

内容简介

《PLC 技术在工业自动化中的先进方法与案例解析》是一部系统阐述可编程逻辑控制器（PLC）前沿技术与实践应用的专业论著。本书立足工业 4.0 时代背景，以智能制造为核心导向，全面覆盖了从 PLC 基础理论到与人工智能融合的完整技术生态，旨在为自动化领域的工程师、研究人员及高校师生提供一套兼具理论深度与工程指导价值的参考手册。

全书共十章，内容结构清晰，逻辑层层递进。第一章作为开篇，系统介绍了 PLC 的基本原理、编程语言、硬件结构及其在工业自动化中的核心作用，为后续学习奠定坚实基础。第二章深入探讨了 PLC 的编程方法，不仅涵盖梯形图、结构化文本等高级编程技巧，还详细讲解了多任务处理、系统调试与优化等实用技术。第三章聚焦于 PLC 的通信与网络集成，系统剖析了现场总线、工业以太网及无线通信等关键技术，并结合案例阐述了系统集成与故障排查方法。

第四章至第八章是本书的核心，重点展示了 PLC 在关键领域的先进应用。第四章以智能制造为背景，解析了 PLC 与机器人协同、物联网数据采集及柔性制造系统的实现方案。第五章专攻运动控制，详细介绍了伺服驱动、多轴同步与轨迹规划等高精度控制技术。第六章则从系统安全角度出发，深入讲解了硬件冗余、安全编程、电磁兼容性等可靠性设计方法。第七章转向过程控制，阐述了 PID 算法优化、复杂回路控制在石油化工等行业的应用。第八章极具前瞻性地探讨了 PLC 与人工智能的融合，介绍了机器学习、智能诊断与预测性维护等前沿课题。

第九章回归工程实践，系统讲解了 PLC 系统的预防性维护策略、故障诊断方法、在线监测工具及备件管理，为保障系统长期稳定运行提供了实用指南。第十章展望未来，探讨了工业 4.0、边缘计算、云平台集成等技术驱动下 PLC 技术的发展趋势与行业前景。

本书特色在于将先进理论与大量案例解析紧密结合，既有对技术原理的深刻剖析，又有对工程实践的精准指导，是推动工业自动化技术与产业升级的重要参考资料。

PLC 技术在工业自动化中的先进方法与案例解析
Advanced Methods and Case Studies of PLC Technology in Industrial Automation

张贵红 著



PRICE: \$60.00



Advanced Methods and Case Studies of PLC Technology in Industrial Automation

PLC技术在工业自动化中的先进方法与案例解析

张贵红 著



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

作者简介



张贵红，女，中共党员，南昌大学共青团学院专职老师，双师型教师。自参加工作以来，一直在电气工程及其自动化专业教学一线工作，教学工作认真负责，具有强烈的事业心和责任感，始终把教书育人、管理育人、服务育人贯穿在工作中，曾获学院“教学创新大赛”一等奖，并多次获得“优秀教师”、“先进个人”、“最美教师”和“优秀共产党员”称号。工作期间，公开发表论文十余篇，一篇核心期刊，主持和参与省级课题八项，其中主持省级教改课题一项，指导学生参加“西门子杯”智能制造挑战赛和各类科技创新比赛，并多次获省级以上奖项。

**Advanced Methods and Case Studies of PLC
Technology in Industrial Automation**

PLC技术在工业自动化中的 先进方法与案例解析

张贵红 著



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

CIP INFORMATION

Title: Advanced Methods and Case Studies of PLC Technology in Industrial Automation

题目：PLC 技术在工业自动化中的先进方法与案例解析

Author: Guihong Zhang

作者：张贵红

ISBN: 979-8-90040-027-3

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**Advanced Methods and Case Studies of PLC Technology in Industrial
Automation**

PLC 技术在工业自动化中的先进方法与案例解析

Address: 100 N Howard St Ste R, Spokane, Wa, 99201. United States

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 16.5

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in December 2025

Printing: First printing in December 2025

**CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL
SCHOLARS**

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher.
Infringement will be prosecuted.

前言

PREFACE

可编程逻辑控制器（PLC）自诞生以来，便以其高可靠性、强大的抗干扰能力和灵活的编程方式，迅速成为现代工业自动化控制系统的核心支柱。从最初替代继电器逻辑控制，到如今在智能制造、过程控制、运动控制等复杂场景中扮演“大脑”角色，PLC 技术本身也经历了一场深刻的革命。随着工业 4.0、物联网、人工智能等新技术的浪潮席卷全球，传统的 PLC 已不再是孤立的控制器，而是演变为连接物理世界与数字世界的智能节点，其技术内涵与应用边界正在被无限拓宽。

在这样一个技术飞速迭代、产业深度变革的时代，如何系统掌握 PLC 的先进技术，如何将其与新兴技术深度融合，如何应对日益复杂的工程挑战，已成为每一位自动化从业者必须面对的课题。市场上虽然不乏 PLC 相关的教材与手册，但多数或侧重于基础入门，或局限于特定品牌产品，鲜有能够全面、系统地阐述 PLC 技术前沿发展，并结合丰富案例进行深度解析的综合性著作。正是基于这样的行业需求与时代背景，我们撰写了《PLC 技术在工业自动化中的先进方法与案例解析》一书。

本书旨在构建一个从理论到实践、从基础到前沿的完整知识体系。我们不仅希望读者能够理解 PLC “是什么”，更希望读者能够掌握 “如何用好” 以及 “未来会如何发展”。为此，本书在内容编排上进行了精心设计：首先，从 PLC 的基础原理与编程方法入手，夯实读者的基本功；接着，深入通信网络、运动控制、过程控制等核心应用领域，剖析关键技术难点；然后，将视野拓展至智能制造、人工智能融合等前沿方向，展现 PLC 技术的无限可能；最后，回归到系统维护、安全设计及未来展望，为读者提供全生命周期的技术视角。

我们特别强调 “案例解析” 的重要性。理论知识的价值最终体现在解决实际问题的能力上。本书在多个章节中穿插了大量源自真实工业场景的案例，分析，涵盖柔性制造、机器人协同、过程优化、智能诊断等多个方面。我们

希望通过这些生动的案例，帮助读者将抽象的理论与具体的工程实践相结合，从而真正提升分析问题和解决问题的能力。

本书的编写汇聚了多位在工业自动化领域深耕多年的专家学者与一线工程师的智慧与经验。我们力求内容准确、技术前沿、案例详实、语言通俗。我们相信，无论您是自动化专业的在校学生、刚刚入行的青年工程师，还是寻求技术突破的资深专家，都能从本书中汲取到有价值的知识。

技术的进步永无止境。我们深知，PLC 技术仍在不断演进，新的应用场景层出不穷。本书所呈现的，只是当前阶段的一个总结与探索。我们衷心希望本书能够成为一座桥梁，连接理论与实践，连接现在与未来，为推动我国工业自动化水平的提升贡献一份绵薄之力。

限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正

—— 作者

第一章 PLC 技术基础与工业自动化概述	1
第一节 PLC 基本原理与硬件结构	1
第二节 PLC 编程语言与开发环境	6
第三节 工业自动化系统组成与发展趋势	12
第四节 可编程逻辑控制器在自动化控制中的核心作用	17
第五节 典型 PLC 产品及其应用领域	22
第二章 PLC 编程方法与高级指令应用	29
第一节 梯形图编程技巧与优化策略	29
第二节 结构化文本与功能块设计	35
第三节 高级指令与数据处理方法	40
第四节 编程规范与调试技巧	45
第五节 多任务与中断处理技术	50
第三章 PLC 通信与网络集成技术	57
第一节 工业通信协议基础	57
第二节 PLC 与现场总线深度融合	62
第三节 以太网及工业以太网应用	68
第四节 无线通信与远程监控	73
第五节 系统集成案例与故障排查	79
第四章 PLC 在智能制造中的应用	85
第一节 智能制造系统架构	85
第二节 PLC 与机器人协同控制	88

第三节 物联网技术与数据采集	93
第四节 柔性制造系统案例解析	97
第五节 智能工厂实施策略	101
第五章 PLC 运动控制与伺服驱动技术	109
第一节 运动控制基础与 PLC 集成	109
第二节 伺服系统参数整定与优化	114
第三节 多轴同步控制技术	118
第四节 运动轨迹规划与误差补偿	123
第五节 典型案例分析与性能评估	128
第六章 PLC 安全与可靠性设计	135
第一节 工业控制系统安全威胁	135
第二节 PLC 硬件冗余与容错设计	138
第三节 安全编程与故障保护机制	142
第四节 电磁兼容性与环境适应性	147
第五节 安全认证与标准合规性	151
第七章 PLC 在过程控制中的高级应用	157
第一节 过程控制系统架构	157
第二节 PID 控制算法与优化	162
第三节 复杂回路与串级控制	167
第四节 实时数据管理与监控	172
第五节 石油化工行业应用	176
第八章 PLC 与人工智能技术融合	183
第一节 人工智能在工业自动化中的角色	183
第二节 机器学习算法与 PLC 集成	189
第三节 智能诊断与预测性维护	194
第四节 自适应控制与优化决策	199

第五节 融合应用与前景展望	203
第九章 PLC 系统维护与故障诊断	209
第一节 预防性维护策略与周期	209
第二节 常见故障类型与诊断方法	212
第三节 在线监测与数据分析工具	217
第四节 备件管理与生命周期评估	221
第五节 典型行业维护案例解析	226
第十章 PLC 技术未来发展与行业展望	231
第一节 工业 4.0 与 PLC 技术演进	231
第二节 边缘计算与云平台集成	235
第三节 标准化与开放性架构	239
第四节 可持续发展与能效优化	243
第五节 全球行业趋势与中国路径	247
参考文献	253

第一章 PLC 技术基础与工业自动化概述

工业自动化正处在从机械代替到智能化、网络化控制的变革之中。可编程逻辑控制器由于具有高可靠性、灵活的编程能力以及强大的环境适应性，已经成为现代工业控制领域里一支中流砥柱的力量。本章主要对这一技术体系的底层逻辑和物理结构进行详细的分析，为后面剖析复杂的自动化系统打下坚实的基础。

第一节 PLC 基本原理与硬件结构

在讨论复杂的控制算法、网络通讯之前，必须对控制器的工作方式及硬件组成有清楚的认识。既牵涉到电子电路的物理实现，也牵涉到计算机科学在工业现场的应用逻辑。本节从信号处理的底层流程开始，一直讲到顶层的模块化硬件搭建，把整个工业大脑的工作方式清楚地表述出来。

一、PLC 核心工作原理

控制器的主要工作原理影响它处理逻辑信号的时序特点和精度。工业控制器与通用计算机的中断驱动方式不一样，它具有独特的循环扫描机制来保证逻辑执行具有确定性、安全性。把握这个机制，就是掌握了系统实时性分析和故障诊断的关键。

（一）循环扫描工作过程详解

可编程逻辑控制器按照严格的时序逻辑工作，其特有的工作方式称为循环扫描工作制。系统一上电后，在系统程序的控制下，不断重复执行一串固定顺序的任务。此过程不是杂乱无章的，而是严格按输入采样、用户程序执行、输出刷新这三个主要阶段的循环往复进行的。处理器在一个扫描周期内会先集中读取外部输入的状态，再在此基础上进行逻辑运算，最后将运算结果集中输出到外部驱动电路。该设计大大减小了程序设计的复杂程度，保证逻辑执行的条理性。

输入采样阶段中控制器用扫描的方式依次读入各个输入端的状态，并将它们

存到内存的输入映像寄存器区。当程序执行阶段开始以后，外部输入信号再怎么变，内存中映像寄存器状态也不会改变。产生这种现象的机制叫“输入信号的锁存效应”，可以滤掉现场的高频抖动干扰，保证同一个运算周期内数据一致。对变化频率大于扫描周期的信号，系统一般需要采用特殊的高速输入模块或者中断功能才能采集得到，否则很容易造成信号丢失。

程序执行阶段就是逻辑处理的主要过程。处理器按照梯形图或者指令表，从上到下、从左到右的顺序逐条扫描用户程序。对于每一条指令，系统从输入映像区以及内部元件存储区读取需要的数据，执行逻辑运算、算术运算或者数据处理。运算的结果会立即刷新到内部元件存储区，即在同一周期内，排在前面的指令运算结果可以直接被排在后面的指令使用。串行执行的特性需要工程师编程时特别注意逻辑的时序依赖关系，防止由于指令顺序不合适造成逻辑竞争或者误动作。

所有用户程序执行结束之后，系统就进入输出刷新阶段。这时处理器将输出映像寄存器中最终状态统一送入输出锁存器，再由驱动电路控制外部执行机构，例如接触器、电磁阀等。该阶段为扫描周期结束，也为下一个扫描周期开始。一个扫描周期的时间是由 CPU 运算的速度、I/O 点数和用户程序的长短决定的。为防止程序死循环造成系统瘫痪，控制器内部一般会设置一个看门狗定时器。如果扫描时间超过设定范围，系统就会响起报警声并停止工作，以保证工业现场的安全。

（二）I/O 映像区与实时响应机制

I/O 映像区就是联系物理世界与软件世界的数字通道，它的出现从根本上解决了高速 CPU 和低速外设速度不匹配的问题。系统内存会开辟出专门的存储空间来映射外部的输入输出状态，从而达到软件和硬件解耦的目的。输入映像区保存上一周期采集的外部开关量或模拟量数据，输出映像区暂存逻辑运算产生的控制指令。这样一种数据缓冲机制，使得 CPU 执行程序时不需要频繁地通过外部总线去获取数据，从而大大提高了程序的执行效率以及系统的稳定性。

1. 映像区使用可以保证程序运行中信号的稳定性。工业环境中信号经常带有大量电学噪声以及瞬态干扰。如果 CPU 直接读取物理端口，那么不稳定的信号就会造成逻辑判断的前后冲突。通过每个周期开始的时候统一采样锁存到映像区，人为制造出一个相对静止的逻辑世界。所有的逻辑运算都采用同一个时间断面上的数据快照作为依据，从而使控制算法的可靠性大大提高。

2. 由于实时响应是依靠扫描周期来实现的，因此有一定的延迟。从输入信号变化到输出端产生反应，在最理想的情况下也需要经过输入采样、程序执行、输出刷新这三个过程。最坏的情况是输入信号在采样结束之后才发生变化，这时系统要到下一个扫描周期才能检测出这个变化，造成最大的两倍扫描周期的响应延迟。大多数热工或者传动控制等场合，几十毫秒的迟延是可以接受的。但是在高速包装或者同步控制的时候，工程师就必须计算滞后对系统精度造成的影响，必要时使用立即 I/O 指令或者中断处理技术来打破扫描周期的限制。

（三）PLC 与继电器控制系统的本质区别

从表面上看，可编程控制器与传统的继电器控制系统都是用来实现电气逻辑控制的，但是它们的实现机理却有着天壤之别。继电器控制系统是硬接线逻辑，其控制功能是通过许多继电器、定时器、接触器等分立元件通过物理导线的连接来实现的。一旦逻辑电路搭建完毕，其功能就固定下来了，要修改控制流程，则必须重新布线，工程量大且极易出错。与之相反，可编程控制器用存储逻辑，其控制功能由存储在内存里的程序来决定。当控制要求改变时，只需用编程软件修改内部程序，不需要改变外部主线路，因此具有很强的灵活性、通用性。

1. 传统系统由于有较多的机械触点，在频繁动作时容易产生电弧磨损、触点粘连或者接触不良等故障，维护工作量大。现代控制器内部采用微电子技术，除输入输出端口外，内部逻辑全部由无触点的半导体电路来实现，没有机械磨损的问题，寿命长。

2. 同时控制器具有完善的自诊断功能，可以对系统进行实时监测，出现故障时给出明确的报警代码，便于排故。由于本质不同，工业控制就由繁重的体力维护向高技术管理转变。

继电器逻辑控制的速度与精度由机械触点的吸合、释放来实现，动作时间在几十毫秒左右，容易出现抖动。可编程控制器是以微处理器高速运算为基础，指令执行时间为微秒或纳秒级，可以完成非常复杂的算术运算、数据处理和 PID 调节，这是传统的继电器系统所不能实现的。不过在一些简单安全互锁回路中，由于继电器硬接线有物理切断的确定性，仍被用作最后的安全屏障，与软件控制配合使用。

二、PLC 硬件系统构成

硬件系统是控制逻辑的物理依托，硬件性能的好坏直接影响到控制系统处理能力及使用范围。典型的工业控制系统由中央处理单元、存储器、输入输出接口、电源、各种外设接口组成。各个模块之间采用背板总线或者通信电缆相连接，形成一个功能强大、便于扩展的工业计算机系统。

（一）CPU 模块的功能与选型要点

中央处理单元模块起到整个系统指挥中心的作用，调度整个系统的软硬件资源。它既要保存用户程序和数据，又要对电源、内部电路的工作状况以及程序的语法是否正确进行检测。CPU 在每个扫描周期里读取输入的状态、执行指令运算、更新输出的状态。高性能 CPU 模块一般会集成多核处理器、大容量高速缓存和专用浮点运算单元，可以很好地应对复杂的运动控制算法或者大范围的过程控制任务。

CPU 选择的时候，工程师得考量很多东西。运算速度为首要指标，用执行 1K 步指令所用时间来表示；高速自动化产线的微秒级指令处理速度是必需的。内存容量决定程序的大小以及可以处理的数据量，系统要处理大量的历史数据记录或者复杂的配方管理时，大容量的数据寄存器就显得非常重要。

另外一个重要的选型依据就是 I/O 点数支持。不同档次的 CPU 模块可以挂载的扩展模块数量以及寻址范围都是有限的。分布范围广、控制点多的系统可以选用支持远程 I/O 扩展的高端 CPU 或者多 CPU 并行处理的架构。这时还要考虑 CPU 集成的通信接口种类，例如是否板载以太网口，是否支持某种现场总线协议等等，这会直接影响到系统集成成本和便捷程度。

（二）数字量 / 模拟量 I/O 模块应用

输入输出模块是控制器同工业现场设备进行信息交流的接口。数字量输入模块主要是接收按钮、行程开关、光电传感器等输出的开关信号。按照电压等级的不同分为直流 24V 输入、交流 110V、220V 输入；根据电路结构又分为源型、漏型输入。正确地选择输入模块的类型，是保证可以准确采集到信号、保证电路电气兼容性的前提。在干扰严重的地方使用带光电隔离的输入模块，可以有效地隔断外部浪涌电流对内部电路的冲击。

采用数字量输出模块控制继电器、指示灯、电磁阀等执行元件。输出形式有

继电器输出、晶体管输出和晶闸管输出。各有利弊，工程师应根据负载性质和控制要求，权衡利弊做出选择，具体可参考下表数字量输出模块特性对比。

常见数字量输出模块特性对比

特性	继电器输出	晶体管输出	晶闸管输出
负载类型	交流 / 直流	直流	交流
带载能力	强	弱	中等
开关频率	低 (Hz 级)	高 (kHz 级)	中 (kHz 级)
使用寿命	有限 (有机械触点磨损)	长久 (无触点)	长久 (无触点)
优点	适用性广，隔离性好	开关速度快，寿命长	适用于交流大功率负载
缺点	动作慢，易磨损，寿命短	仅限直流，过载能力差	仅限交流，易受谐波干扰

从上表可知，继电器输出模块具有带负载能力强、交流直流均可用的优点，但是其动作频率低、寿命短，不适合频繁通断的场合。晶体管输出开关频率高、寿命长，可控制步进电机或进行 PWM 脉宽调制，但是过载能力弱，只能驱动直流负载。晶闸管输出适合交流大功率负载，但是不适用直流负载，易受谐波干扰。

模拟量模块处理的是温度、压力、流量、液位这些连续变化的物理量。模拟量输入模块使用 A/D 转换器把传感器送来的 4-20mA 电流信号或者 0-10V 电压信号转换成数字量供 CPU 处理。转换精度也是衡量其性能好坏的一个指标，常见的有 12 位、14 位或 16 位精度。模拟量输出模块做相反的 D/A 转换，将 CPU 运算结果转换成标准电信号来控制变频器、调节阀等设备。在应用时注意信号线的屏蔽接地、模块的滤波设置，以消除工业现场普遍存在的电磁干扰，保证模拟量数据的准确性。

（三）电源模块与通信接口配置

电源模块是整个控制系统的能量来源，将外部接入的交流电或者直流电转换成系统内部电路所用的直流电压。优秀的电源模块应该有很强的抗干扰能力、过压过流保护以及足够的功率余量。配置系统的时候工程师要算出所有 CPU 模块、I/O 模块、特殊功能模块的功耗之和，再加上 30% 左右的余量，这样就能挑选出合适的额定功率电源模块。如果现场传感器、执行器也是由背板供电的，那么还要考虑它们的负荷，必要时配置独立的电源以防止主机电源过载。

通信接口配置好坏直接影响系统网络化的能力。现代的 PLC 系统不再是孤岛，它要和上位机、触摸屏、变频器、其它 PLC 等进行频繁的数据交换。除

CPU 自带的编程口外，一般还要配装专用的通信模块。串行通信接口由于成本低，布线简单，被广泛用作仪表和变频器之间的连接，多采用 Modbus 协议。工业以太网接口因为带宽高、实时性好、拓扑灵活等特点，渐渐成为智能设备同上层 MES 系统连接的主要方式。在配置时还要考虑通信端口的电气隔离性能，防止地环路干扰造成通讯故障。

第二节 PLC 编程语言与开发环境

工业自动化控制系统刚开始形成的时候，编程语言就成为了人机交互的主要媒介，是控制逻辑与硬件执行之间的桥梁。从早期的继电器逻辑硬接线到现在的高度集成化、智能化的开发环境，可编程逻辑控制器技术的发展在编程方式多样化、开发工具智能化上都有了深刻的体现。本节就 IEC 61131-3 国际标准所规定的编程语言特性展开详细的论述，从工程应用的角度出发，结合主流的开发软件实际操作，就技术细节及实施方案做进一步的分析。

一、五种标准编程语言特点

国际电工委员会制定的 IEC 61131-3 标准对五种主要的 PLC 编程语言进行了定义，其目的是规范各厂商之间代码的兼容性以及逻辑表达方式。尽管各个品牌的 PLC 在具体的指令集上会有一些差别，但是这五种语言包含了从底层的位操作到上层的算法实现的所有内容。根据不同的控制要求选用合适的编程语言，使系统运行速度提高并且维护方便。

（一）梯形图的电气逻辑表达优势

梯形图是可编程逻辑控制器诞生之初就使用的一种编程语言，其设计初衷是使习惯于继电器控制系统、刚起步从事计算机控制工作的工程师顺利进入计算机控制时代。该语言最核心的优点就是直观的图形化表达方式，和传统的电气原理图非常相似。梯形图中左右两条垂直线代表电源母线，中间的逻辑行模拟电流流过触点驱动线圈的过程。这样视觉化的逻辑流向，使故障排查变得非常高效，现场维护人员不需要有深厚的计算机科学背景，只需要有一定的电气知识，就可以通过观察触点的通断来判断逻辑执行的状态。这样的“看得见摸得着”，在现场调试离散制造时有着无法替代的地位。

梯形图在处理布尔逻辑运算方面表现最好，最适用于电机启停控制、电磁阀动作序列、安全互锁逻辑的编程。它用触点的串并联方式表达与、或、非的关系，逻辑结构清楚。复杂的传输带控制急停按钮、光电传感器到位信号、电机热保护触点等各种条件，梯形图中可以用一行图来清楚地表示出来，它们与输出线圈之间有明确的因果关系。当系统发生故障造成设备停机时，工程师利用在线监控功能，可以立刻知道逻辑行中哪一个触点处于断开状态，从而迅速找到故障源，这种诊断速度是纯文本语言所无法实现的。

但梯形图虽然在逻辑控制方面占据着主导地位，但是当涉及到复杂的运算和算法时就会体现出它的不足之处。随着工业现场对数据处理的要求越来越高，虽然现代梯形图中增加了许多功能块指令来完成数学运算、数据传送等操作，但是当需要对大量的数组进行处理、复杂的浮点数计算或者字符串操作时，梯形图的程序结构就会变得非常臃肿，占用大量的屏幕空间并且难以阅读。因此，在现代大型项目中，梯形图一般被用来编写底层的逻辑互锁和 I/O 映射，把复杂的算法封装在其它更合适的语言模块中调用。

（二）结构化文本的复杂算法实现

结构化文本相当于 Pascal、C 语言等高级文本编程语言，打破图形化语言的限制，给工业控制领域赋予数据处理和算法实现的能力。对包含复杂数学模型、多层循环嵌套、数组排序、字符串解析等任务来说，结构化文本的代码密度与执行速度都是十分高的。对习惯用高级语言编程的工程师来说，结构化文本中包含的 IF-THEN-ELSE、CASE、FOR、WHILE 等控制语句，使实现 PID 控制算法优化、运动控制轨迹插补计算、自定义通信协议解析等变得轻而易举。

在很多高精度运动控制场合下，系统需要根据实时编码器反馈来计算目标位置的加减速曲线，这就需要用到高阶多项式运算。如果采用梯形图，则要调用几十个数学运算指令块，连线繁杂，中间变量的管理很不方便。工程师可以直接使用结构化的文本，将数学公式以表达式的形式写入到代码当中，程序简单、紧凑，大大减少了出错的可能性，便于对算法进行修改以及参数的调整。

结构化文本对大数据量的管理有天然的优势。仓储物流或者批次处理系统当中，PLC 常常要保持一个很大的数据库，用以储存物料的属性，位置以及历史追溯的数据。使用指针操作与循环结构结合可以对数组进行快速遍历、查找特定数据或者批量移动、转换数据。这就使 PLC 不再只是进行简单的逻辑控制，而是

可以承担起边缘计算节点的任务，对数据进行初步的清洗和分析。

结构化文本功能强大，但是它的抽象文本形式给现场维护人员提出了更高的要求。缺少图形化的直观呈现，在没有详细注释的情况下，第三方人员很难很快理解复杂的代码逻辑。在线调试时，结构化文本只能显示变量当前的取值，不能像梯形图那样清楚地表现逻辑通断的路径，给现场故障诊断带来一定的困难。因此结构化文本一般应用于开发封装好的功能模块，作为“黑盒”由主程序调用，发挥算法优势的同时也规避了维护的繁琐。

（三）顺序功能图的状态流程控制

顺序功能图是专门用来描述顺序控制系统的图形化编程语言，它把复杂的控制过程分成若干个独立的工步，用转换条件来控制工步之间的转换。该种状态机编程方式非常适合流水线作业、化学反应釜的批次处理、机械手的动作循环等场景。每一个工步对应设备的一种状态，比如注液、加热、搅拌等，转换条件则是定义从一种状态转换到另一种状态的逻辑判断，比如液位到、温度够、时间到等。

顺序功能图使用并行分支和选择分支的结构，可以清楚地表达出系统同时发生的动作或者按照条件执行的不同路径。复杂的自动化装配线上，经常出现多个工位同时工作的情形，顺序功能图的并行分支结构很好地完成多任务的同步控制与协调，保证各个工位进入下一个环节之前已经完成指定动作。处理异常情况或者模式切换的时候，选择分支可以让程序按照传感器信号或者操作人员的指令，跳转到不一样的处理流程当中，比如进入清洗模式或者故障复位模式。

顺序功能图典型应用场景

行业领域	应用示例	描述
汽车制造	焊装、涂装生产线	描述各工位自动化机械手和夹具的协同动作顺序，确保工序精准衔接。
食品饮料	灌装、包装生产线	管理液体灌装、封口、贴标等多个环节的流程，确保批次生产的一致性。
化工制药	反应釜控制、批处理	严格控制物料投加、加热、搅拌、冷却等工艺步骤的顺序和条件。
物流仓储	自动化立体仓库	调度堆垛机、穿梭车、输送带等设备的动作，实现货物的出入库及分拣。
能源电力	发电厂启停机、保护	规范锅炉、汽轮机等大型设备的启动、运行和停机流程，保障安全稳定。

顺序功能图从调试和维护的角度来讲，有很好的可读性。将庞大的系统逻辑分成块状结构，使程序结构层次分明。当系统出现异常或者运行卡顿时，工程师通过查看当前激活的步序和未满足的转换条件，就可以迅速找到出问题的工艺环节。面向流程的诊断方式可以避免在成百上千行的代码里“大海捞针”。现代编程环境对顺序功能图的活动步高亮显示，整个生产过程的进度一目了然，给工艺人员对生产周期进行优化分析提供了很大的便利。

二、主流编程软件实操

伴随着工业 4.0 概念的深入人心，PLC 编程软件已不再只是代码编辑器，而是一个集硬件配置、网络组态、逻辑编程、人机界面设计、驱动调试为一体的综合性自动化工程平台。西门子、罗克韦尔、三菱电机等作为工业自动化领域里的龙头企业，各自所拥有开发环境代表目前业界最高水平以及不同的设计理念。学会用这些软件去操作，这是一条自动化工程师非常重要的核心能力。

（一）西门子 TIA Portal 工程创建与管理

西门子 TIA Portal（全集成自动化门户）是西门子全集成自动化的核心软件平台，完全打破了传统的 PLC 编程软件、人机界面编程软件、驱动装置编程软件各自独立的状态。TIA Portal 创建工程的第一步就是软件使用的统一数据管理架构。工程师可以在设备网络图上用图形化的拖拽方式把 CPU、I/O 模块、伺服驱动器和 HMI 触摸屏加到硬件组态里。直观的配置方式简化了硬件参数设置，更重要的是设备间可以自动建立通信连接、地址映射。在网络视图上把 PLC 和 HMI 的 Profinet 接口连接起来之后，PLC 和 HMI 之间的通信关系就立刻建立起来，不需要再编写复杂的底层通信代码。

TIA Portal 最突出的特点之一就是变量的一致性管理。在项目中定义好的 PLC 变量标签，可以被同一个项目下的 HMI 画面所引用，也可以被驱动器的控制字关联。这种符号化的编程方法，免去了传统开发中因为地址改变而造成的上下位机数据不对应的情况。当工程师修改了 PLC 变量表里某一个 I/O 地址或者数据类型的时候，所有引用该变量的程序块、HMI 画面元素、报警记录都会自动更新，大大降低了工程维护的复杂程度和出错率。

TIA Portal 程序块开发与管理使用强大的库功能。工程师可以将编写好并且经过验证的功能块、数据类型或者整个硬件配置保存到全局库或者项目库中。开

发新项目的时候只需从库中拖动相应的模块进行复用。库文件有版本控制，当库里面的主模板更新时，所有实例化出来的对象都可以通过一键同步更新来进行升级，这对于大型标准化项目的开发以及团队合作打下了良好的基础。

TIA Portal 给出的是在线监视、在线诊断。除了对常规的程序状态进行监视以外，它还带 Trace 特性，可以像使用示波器一样对高速变化的变量进行记录和分析曲线。对于调试运动控制系统 PID 参数、分析偶发逻辑时序故障等来说都十分重要。利用 Web 服务器的功能，工程师不需要安装专门的软件，只需要通过浏览器就可以远程访问 PLC 的诊断缓冲区，查看系统日志和模块状态，真正实现了数字化运维。

（二）罗克韦尔 Studio 5000 程序结构设计

罗克韦尔自动化 Studio 5000 Logix Designer 是 ControlLogix 和 CompactLogix 系列控制器的主要开发环境，其设计思想是标签为主内存管理、任务为主调度。和传统 PLC 用固定的位、字节、字地址（%M0.0，%DB1.DB0）来访问内存不一样，Studio 5000 全部用标签名来访问内存。工程师在设计程序结构时，可以创建具有实际物理意义的标签名，例如 Tank_Level、Motor_Start_Cmd，也可以根据需要定义原子数据类型或者复杂的用户自定义数据类型。抽象化的内存管理方式使程序具有很高的可读性，硬件升级或者内存重新分配的时候，逻辑代码不需要做任何修改。

Studio 5000 程序结构采用任务、程序、例程三层结构，给工程师提供了很大的调度自由度。最上层定义的是代码执行的触发器和优先级，有连续任务、周期性任务、事件任务。一般逻辑控制通常放在连续的任务里循环扫描；而 PID 闭环控制或者运动轨迹计算，则必须放置在具有确定时间间隔的周期性任务中，保证控制算法的积分微分时间准确无误；高速计数器触发、伺服轴位置锁存等应用，事件任务可以以最高优先级立即响应中断请求。

在代码复用上，Studio 5000 提供高级指令。AOI 可以把一段复杂的逻辑封装成自定义指令，在梯形图编辑器中通过输入输出引脚和外部交互，内部逻辑对调用者是不可见的。AOI 不同于常规的子程序调用，它具有独立的本地数据实例，因此同一个 AOI 可以在程序中多次调用而不互相干扰。封装的特点不但可以有效地保护核心的知识产权，还可以使得标准化设备控制逻辑像搭积木一样快速搭建起来，大大缩短大型生产线的开发周期。Studio 5000 强大的在线编辑功能可以

在不停机的情况下修改程序逻辑、增加标签、修改 AOI 定义，对于需要 24 小时不间断生产的流程行业来说十分重要。

（三）三菱 GX Works2 在线调试功能

三菱电机 GX Works2 是最经典的 FX 系列、Q 系列和 L 系列 PLC 的编程软件。虽然新一代 GX Works3 已经出现，但是由于 GX Works2 设备存量、稳定性好，仍然有很多自动化工程师日常工作离不开 GX Works2。该软件在设计的时候就考虑到了日系工程师的操作习惯，有快捷键、界面紧凑等特点。GX Works2 为工程师在线调试时提供许多实用高效的手段，便于快速定位问题。

软元件批量监视是 GX Works2 中用得最多的一种调试工具。工程师可以自定义监视窗口，把分散在程序各处的关键位软元件 (X、Y、M) 和字软元件 (D、W) 集中到一个列表里进行实时观察。与单纯的数值显示不同的是，可以随时切换二进制、十进制、十六进制、浮点数等数据格式，便于对不同类型的数据显示进行分析。调试通信协议时，用十六进制直观查看接收缓冲区的字节流，排查报文错误很方便。

时序图监控功能是 GX Works2 处理逻辑时序问题的利器。此功能相当于一个逻辑分析仪，可以对指定的软元件进行长时间的状态变化记录，并以波形图的形式进行回放。这对捕捉瞬间的干扰信号、分析气缸动作配合的时间差、验证复杂的顺序控制逻辑非常有利。当出现间歇性定位误差的时候，用时序图就能精确测出传感器信号触发之后，电机停止输出之前那一段毫秒级的延时，从而判断是程序扫描周期太长，还是机械惯性引起的故障。

GX Works2 还具备很强的在线修改、强制功能。在监视写入模式下，工程师可以在 PLC 运行的同时直接修改梯形图逻辑，编译完成之后只需要几个扫描周期就可以平滑切换到新的逻辑，不需要停机。单机调试阶段软件支持对 I/O 点进行强制操作，在不切断外部接线的情况下强制锁定输入点的状态或者输出点的动作，传感器损坏的紧急情况下可以临时维持生产。它内置的交叉引用列表、软元件使用列表可以详细地展示每一个地址在程序中读写的地方，从而有效地防止出现双线圈冲突、地址重叠使用等现象，保证程序的健壮性。

第三节 工业自动化系统组成与发展趋势

工业自动化系统作为现代制造业的基石，其内部结构越来越复杂，功能划分也越来越细致，包含从最底层的现场设备到顶层的企业管理等各个方面。深入剖析系统的层次结构，既利于认识各个组成部分之间的逻辑联系及数据流动方向，也是把握技术更新迭代趋势的一种有效方式。随着信息技术与制造技术的融合发展，自动化系统正在经历前所未有的变革，从以前的分层、分层的结构向扁平化、网络化、智能化转变，进而构成一个高效率、高度协同的智能制造生态系统。

一、自动化系统层级结构

经典的工业自动化系统架构大多依照普度参考模型，自下而上地分层构建，每一层完成不同的任务，配有相应的硬件和软件。该金字塔式的结构可以保证控制的实时性和可靠性，也可以给不同厂商设备之间的集成提供一个标准框架，使复杂系统的设计、实施和维护有章可依。

（一）设备层：传感器与执行器的角色

设备层处于自动化架构的最底层，是物理世界与数字世界的纽带，它的主要任务就是感知物理状态并执行控制动作。这一层包含着数量最多的各种传感器、变送器、接触器、阀门、电机驱动器等硬件。传感器属于系统的“感觉器官”，对生产现场的各种物理量，包括温度、压力、流量、位置和成分参数等实施精确检测，把非电量的物理信号转变为控制器可识别的电信号。在现代工业当中，传感器的精度，响应速度以及抗干扰性能的好坏，直接决定了整个工业控制系统的性能上限。同时由于半导体技术的发展，智能传感器也越来越普遍地被采用，智能传感器不仅可以输出原始数据，而且可以进行简单的本地处理、自诊断、参数配置等，从而减轻了上位控制器的负担。

执行器就是系统的手脚，接受控制层发出来的指令，将它转换成机械运动或者物理状态的变化。无论是调节阀开度的精准调节，还是伺服电机的精确定位，又或者是加热元件功率的精确控制，执行器的动作都必须准确可靠，而且要具有高重复性。执行器一般工作在复杂的工业现场，经常要在高温、高压、强腐蚀、强电磁干扰等恶劣的环境下长时间稳定工作，对设备的材质、工艺、防护等级有很高的要求。设备层能否稳定工作是整个自动化大厦的根基，任何一点点故障，

若没有有效的反馈机制将其及时察觉，就有可能在系统内部一层层地扩大，最后引发重大生产事故或者质量问题。

设备层正处在数字化转型的浪潮中。现场总线技术、工业以太网技术的下沉使得越来越多的现场设备具有了通信能力。传统的点对点硬线连接方式正在被数字通信网络所取代，传感器和执行器除了可以传输过程数据以外，还可以传输大量的设备状态数据。这样一种变革给维护人员远程监控现场设备健康状况提供了可能性，使维护工作由被动维修转变为现在所倡导的主动预测性维修，设备的综合效率得到了很大提升。

（二）控制层：PLC 与 DCS 的分工协作

控制层是自动化系统的“大脑”，主要工作是接收设备层的信号，按照预先设定好的逻辑程序或者控制算法进行运算，再将运算的结果输出给执行机构。本层次的主控单元为可编程逻辑控制器和集散控制系统。虽然二者的技术发展存在相互融合的趋势，但是应用领域却有很大差别。PLC 由于具有高速的逻辑处理速度、灵活的模块组合和较强的抗干扰能力，所以它在离散制造中占优势。从汽车组装线到电子产品生产，PLC 用毫秒级的扫描时间协调着成百上千的动作，它可以做复杂的逻辑运算、顺序控制、高速脉冲定位，是实现机器自动化的核心。

DCS 系统主要应用在石油化工、电力、冶金等流程工业中。这类行业的生产过程为连续的物理化学反应，对模拟量调节回路的控制要求很高。DCS 采取分散控制、集中管理的模式，把控制风险分散到各个独立的控制器里，在操作站层面达成信息集中监视。

PLC 与 DCS 的主要特性对比

特性	可编程逻辑控制器	集散控制系统
侧重领域	离散制造、顺序控制、逻辑控制、高速响应	流程工业、连续控制、复杂回路调节、冗余与可靠性
主要功能	逻辑运算、顺序控制、计数、定时、脉冲定位	复杂 PID 控制、多变量解耦、大滞后非线性控制、系统冗余
响应速度	毫秒级，适合实时性要求高的任务	较 PLC 慢，但稳定可靠，适合连续过程
系统架构	通常为单一控制器或少量控制器，模块化扩展	分散控制、集中管理，系统级冗余
编程复杂度	相对简单，易于工程师编程与调试	复杂，需考虑系统稳定性与过程优化
数据处理	原始数据与控制指令	集成高级过程控制算法与数据处理能力

PLC 和 DCS 的主要特性对比见下表, PLC 侧重逻辑速度, DCS 侧重系统可靠性、冗余配置、复杂的 PID 控制算法。其内部预先装有许多成熟的过程控制算法模块, 可以方便地解决多变量解耦、大滞后和非线性控制等问题, 从而保证生产过程平稳运行。

处理器性能飞速提升时, PLC 同 DCS 之间的界限变得越发不清。现代高端 PLC (有时也称为 PAC, 可编程自动化控制器) 具有很强的浮点运算能力以及复杂的回路控制功能, 完全可以完成许多中小型的过程控制任务。反之亦然, DCS 不断加强自身的逻辑控制功能, 而且也开始支持更开放的通信协议。融合趋势使得工程师在选择系统的时候, 不再只是根据硬件分类, 而更多地从系统规模、响应时间要求、维护成本、未来扩展性等各方面综合考虑。大型综合性工厂中会出现 PLC 和 DCS 共存的情况, PLC 对辅助车间的逻辑控制, DCS 对主工艺段的连续控制, 两者之间通过工业网络进行数据交互, 构成全厂控制网络。

(三) 监控层: SCADA 系统的数据可视化

监控层在控制层之上, 用数据采集与监视控制系统来实现生产过程的全方位感知和调度。SCADA 系统是操作人员同底层机器交互的窗口, 它利用工业通信网络从 PLC 或者 DCS 处实时采集数据, 并将数据以图形化的方式清晰地显示在中控室的屏幕上。这一层不是单纯的数据展示, 是人机协同决策的核心。操作员可以随时了解管道内流体的流动情况、罐体内液位的高低、电机工作的好坏、各重要工艺参数的即时数值。直观的可视化呈现方式把复杂的工业过程变得更加透明、可控。

报警管理属于 SCADA 系统的功能之一。生产过程中如果某个参数超出正常范围或者发生设备故障, 系统就会立刻发出声光报警, 在屏幕上显示醒目的提示信息, 还可以通过短信或者邮件把信息发送到相关人员的移动终端上。一个设计得好的报警系统可以对报警信息进行分层、筛选, 避免无效报警造成的“报警洪水”, 使操作员可以将注意力集中到最紧急的事件上。SCADA 系统还有很大的历史数据存储空间, 可以以很高的时间分辨率进行长时间的数据存储。庞大的历史数据既可以为事后追责、责任认定服务, 也可以成为工艺改进、质量分析的重要依据。

由于网络技术的发展, 监控层的边界范围越来越宽。传统的 SCADA 系统一般都是局域网内运行, 而新一代的 Web SCADA 可以让用户通过浏览器从任何地

方安全地访问监控画面。远程监控对于长输管线、风力发电场、城市供水系统等分布式设施来说尤为重要，管理者可以足不出户对整个运行情况进行掌控。同时虚拟现实、增强现实技术也被引入到监控层中，利用三维建模与实时数据映射创建数字孪生体，把监控从二维平面升级为三维立体，给监控带来了

二、工业自动化发展新动向

目前全球工业领域正处于第四次工业革命当中，自动化技术早已不是孤立的控制手段，它正在同人工智能、大数据、云计算等新兴技术发生剧烈的化学反应。这不只是对技术形态的改变，更是对于工业生产组织方式以及价值创造方式的改变。

（一）从自动化到智能化的演进路径

传统自动解决的是确定性、重复性的工作，用事先设定好的逻辑程序来保证生产的统一性。但是遇到多品种、小批量、定制化需求的时候，刚性的自动化产线就有些招架不住。智能化是自动化的高级发展阶段，它给机器赋予了感知、学习和自适应的能力。智能控制系统不再只是机械地执行死板的指令，可以依据环境改变与生产状况起伏自行调节控制策略。像基于模型预测控制的先进算法可以对实时的工艺参数进行优化，从而很好的抵消掉原材料变化的影响，带视觉识别的机器人可以处理各种各样的工件，不需要繁琐的机械定位工装。

机器学习技术在工业上应用的加快，使智能化的发展变快。用大量的历史数据去训练深度学习算法，就能找到人类专家都很难发现的复杂规律。就质量检测而言，智能视觉系统可以对大量图片进行分析，实现比人工更精准、更稳定的瑕疵检测。设备维护时，智能算法凭借振动，温度，电流等大量数据形成设备健康模型，可以提前预知轴承磨损或者电机故障，把维修方式由“故障后维修”改为“预测性维修”。于是工业系统就有了自我感知、自我决策、自我修复的能力，生产系统韧性也得到了极大的提升。

数字孪生技术成为通向智能化的又一条重要途径。通过在虚拟空间中创建和物理实体完全一样的数字模型，用实时数据驱动模型运行，工程师就可以在虚拟世界中做仿真验证、调试和优化。产线设计时利用数字孪生可以模拟物料的流动、机器人运动的轨迹，提前发现设计中存在的缺陷；生产运行时充当虚拟陪练，指导操作员学习应急操作的方法，测试新的控制算法，不影响实际生产。数字孪生

应用冲破了物理世界的地域与时段束缚，给智能制造赋予了低成本、高效率的尝试及革新场所。

（二）工业物联网带来的变革

工业物联网出现以后，工业自动化系统联系手段以及数据架构被完全改变。传统的普度模型里数据是逐级传递的，在相邻层之间流转，路线长、效率低而且容易造成信息孤岛。IIoT 技术使得网络变得扁平化，现场的设备可以直接连入网络，并且可以和边缘计算节点或者云端平台进行通信。万物互联的架构大大释放了数据的价值，底层的数据可以被更多元化的应用使用。一台智能空压机在被本地 PLC 控制的同时，还可以直接把能耗数据传给能源管理系统，把振动数据传给云端的诊断服务公司，从而形成了上下层、多系统之间的协同。

边缘计算属于 IIoT 的关键辅助技术，正在转变控制层的边界。因为云端传输有延迟，带宽有限，所以把所有的数据都上传到云端进行处理是不现实的。边缘计算是一种数据处理和分析的理念，它把数据处理和分析的场所设置在离数据源很近的地方，比如网关、智能仪表、边缘服务器等。这就意味着一些实时性要求高、数据量大的计算任务，例如视频流分析、高频振动监测等，可以在本地边缘端完成，只需要把处理结果或者高价值数据传送到云端。云 - 边 - 端协同架构，在保证控制实时性的基础上也利用了云端无限算力做大数据挖掘。

通信协议标准化为 IIoT 的大规模应用打下了基础。过去工业现场存在各种私有协议，造成设备之间互相连接十分困难。OPC UA 等开放标准协议的推广解决了异构系统之间互操作性的问题。它给不同的 PLC、SCADA 和 MES 系统提供了一个跨平台、安全可靠的通信机制，使不同品牌的系统可以像使用同一种语言一样顺畅地互相交流。MQTT 这种轻量级的发布、订阅式的协议，可以适应网络不稳定的环境中设备之间数据传输的需要，也使得大量的传感器被连接在一起构成一个巨大的传感器网络。

（三）绿色制造与能效管理趋势

在全球碳中和、可持续发展大背景之下，绿色制造不再是工业发展的一项可选项，而是一项必答题。自动化技术对于提高能效、减少排放起着举足轻重的作用。新一代自动化系统核心控制逻辑中已经包含能效管理的思想。通过在设备层面上大量布置智能电表，流量计等能耗感知装置，控制系统可以对各个生产工序的能源消耗实施实时监测。利用能耗数据来准确控制高耗能的风机、水泵和加热

炉等设备。使用变频驱动技术以及智能控制算法，随负载的变化来调节电机的转速，防止大马拉小车带来的能源浪费。

能源管理系统正逐渐和生产控制系统合二为一。传统能源管理一般独立于生产过程，仅仅用作计量统计。目前的趋势是建立能源和生产协同优化的机制。在排产阶段，考虑到峰谷电价的差异，把高耗能的工序排在电价较低的谷时段；在运行阶段，当总能耗接近预警值时，系统会自动对非关键设备降载或者切除，削峰填谷。自动化技术也被广泛应用于余热回收、水资源循环利用等环保设施的控制当中，通过精确的闭环控制提高资源回收率，减少废物排放。

全生命周期碳足迹追踪也是自动化发展的新方向。将碳核算模块集成到 PLC 和 SCADA 系统中后，就可以实时地计算出企业每一条生产线每一个产品的从原材料投入、生产过程、产品下线过程中的碳排放量。这既利于企业符合日趋严格的环保法规与碳税规定，又给工艺改进以削减碳排放赋予了数据支撑。随着绿色自动化技术的发展，经济效益和社会责任不再是矛盾对立的两个方面，而是在技术创新的基础上实现双赢，推动工业文明向生态文明转型。

第四节 可编程逻辑控制器在自动化控制中的核心作用

可编程逻辑控制器就是工业自动化系统的大脑，在现代制造业中起着不可替代的作用。它不只是一个连接感知执行机构和管理决策系统的节点，而且是实现产线智能化转型的重要节点。PLC 对工业现场的设备进行精确控制，是通过对各类传感器信号进行准确的采集、高效的逻辑运算、准确的指令输出来实现的。核心地位来自于控制功能强和明显的应用价值这两方面因素。

一、PLC 的核心控制功能

伴随着微电子技术以及计算机科学的迅速发展，现代 PLC 的功能早已不是早期只能代替继电器做简单的逻辑判断了。如今，它已经发展成集逻辑运算、过程控制、运动规划、数据处理为一体的综合性控制平台。由于具有多种功能的特性，PLC 能够很好地解决复杂的工业问题，是先进的自动化系统的基础。

（一）逻辑顺序控制的基本实现

逻辑顺序控制是 PLC 最基本也是最常用的控制功能之一，它的设计目的就

是为了取代传统的继电器控制电路,利用软件编程来实现对机械设备的启停控制、状态判断以及联锁保护。PLC 在实际运行中是以循环扫描的方式工作的,它先读取现场按钮、限位开关、各种传感器的通断状态,并将这些状态存入到输入映像寄存器中。随后,中央处理器按照事先编写好的用户程序(梯形图或者指令表),一条条地执行逻辑解算。利用布尔代数的逻辑运算可以方便的建立与、或、非等逻辑关系,再配以大量的辅助继电器、定时器、计数器等资源,搭建起复杂的时序控制逻辑。

当程序执行到输出刷新阶段时,PLC 把逻辑运算的结果写入到输出映像寄存器,再通过输出电路驱动继电器、接触器或电磁阀等执行元件,实现电机启动、气缸伸缩、指示灯亮灭等物理控制。相比传统的硬接线逻辑,该种软逻辑控制方式具有很强的灵活性。工艺流程发生变化时,工程师不需要对现场的线路做大量的修改,只需要修改程序代码就可以满足新的生产要求。因此软接线的特性从根本上改变了工业控制的设计方式,使生产线更加灵活地进行配置。

逻辑顺序控制还可以对流水线上各个工序的节拍进行调节。用内部状态机编程模式,把复杂的生产过程拆分成若干个独立步序,各步序间按照一定的转换条件互相连接。该顺序功能图的设计思想一方面简化了程序的编写与调试,另一方面即使发生异常中断,也能使设备迅速回到断点处继续运行,使控制逻辑更加严密,鲁棒性更高。

(二) 过程控制的闭环调节能力

工业生产中除了大量的开关量逻辑外,还有温度、压力、流量、液位等连续变化的模拟量参数,给 PLC 的处理能力提出了更高的要求。现代的 PLC 带有高精度的模拟量输入输出模块,可以将现场传感器采集到的电压、电流信号转化为数字量,通过 PLC 内部的数字滤波算法去除干扰噪声,保证采样数据的真实性、稳定性。PLC 得到实时的过程变量之后,就会利用其内部的 PID 算法模块来根据给定值和实际值的差值快速地算出控制输出。

过程控制的关键是形成闭环反馈调节机制,它依靠对被控对象的实时观测,并做动态调整,可以抵消外界扰动造成的影响,保证工艺参数始终在期望范围之内。

1. 温度控制方面,PLC 用脉宽调制技术或者连续模拟量输出来驱动固态继电器或者调节阀,结合自整定算法自动寻优 PID 参数,可以实现对加热炉或者反应

釜温度的恒定控制，消除超调量，缩短稳定时间。

2. 流体输送系统中，PLC 用变频器来控制泵机转速，按照管网压力反馈信号实现恒压供水或者恒流输送，既符合生产工艺需求，又达到明显的节能效果。

除使用标准 PID 控制外，还可以用模糊控制、神经网络控制等智能算法对于大滞后、非线性、时变的工业对象进行控制。这些算法不需要精确的数学模型，只需要专家的经验或者数据训练的结果来进行决策，大大扩展了过程控制的应用范围。化工、冶金、水处理等行业的复杂配方由 PLC 来实现对反应的控制，保证连续生产过程平稳高效的进行。

（三）运动控制的高精度定位

运动控制是评判自动化系统高端程度的一个标志。现代 PLC 具有高速脉冲输出接口或者专用运动控制总线接口，可以对伺服电机、步进电机进行高性能驱动。在点位控制应用中，PLC 能发出达到数兆赫兹的脉冲信号，准确地控制电机的旋转角度和速度，从而达到毫米级或者微米级的定位精度。配合 S 型曲线或者 T 型曲线的加减速规划，可以有效减小机械设备启停时产生的冲击，提高机械部件的使用寿命，而且能提高运行的平稳性。

对多轴联动比较复杂的机械如数控机床、包装机械、工业机器人等，PLC 具有很强的插补运算能力。它用直线插补、圆弧插补乃至螺旋线插补算法控制各个伺服轴的运动，从而合成出任意复杂的空间轨迹。电子齿轮、电子凸轮功能的加入，打破了传统机械传动链的物理限制，用软件算法模拟出机械齿轮比或者凸轮轮廓，使从动轴对主轴进行高精度的跟随。软凸轮技术消除了机械磨损和间隙误差，又使设备调试变得非常方便，工程师只需要在触摸屏上修改参数曲线就可以改变运动轨迹。

高端制造领域运动控制主要用实时以太网通讯。PLC 用光纤或者双绞线同伺服驱动器做高速同步通讯，通讯周期能低至几百微秒。分布式控制系统大幅削减现场布线的工作量，可以进行位置、速度、扭矩模式之间的转换，也可以实现全闭环控制，在高速动态响应的时候轨迹跟踪也能够保持较高的准确度。PLC 的运动控制功能是半导体封装设备芯片贴装、锂电池生产线极片卷绕高速度、高精度的保证。

二、PLC 系统的价值体现

在工业自动化的宏观架构当中，评判一种控制技术的好坏，不能仅看其功能的繁杂程度，要看它能否给企业带来实际的经济效益和竞争优势。正是因为 PLC 具有提高生产效率、保证系统稳定性、降低全生命周期成本等明显的优势，所以它一直占据着工业控制的主导地位。这种价值不是单个设备性能的提升所能完全体现出来的，而是在全厂运行方式以及获利能力方面有整体的提高。

（一）提升生产效率与产品一致性

自动化生产要达到极致的效率和质量稳定，PLC 就是实现这一目标最有力的武器。与人工控制不能避免的疲劳、情绪、反应速度慢等等不同，PLC 具有毫秒级的扫描时间周期、没有间断性的运行状态，并且其每一次触发动作的时间，持续时间及动作强度都严格地按照事先设置的标准来执行。高频、无差别地重复作业，将生产节拍压缩到了物理极限，单位时间内产量得到了很大的提高。高速包装、电子组装等行业的 PLC 使企业生产能力提高成倍或者几十倍。

产品的一致性评价是现代制造业水平的重要标准，对汽车零部件、医药食品等要求较高的行业来说更是如此。PLC 用精确的传感器反馈、闭环控制算法对生产过程中各种工艺参数进行严格限定。像注塑机的射胶压力、热处理炉的保温曲线之类，在 PLC 严格的掌控之下，保持了很高的统一性，由此剔除了由于人为原因引发的质量分散现象。这就意味着下线的产品在物理特性以及品质标准上都是统一的，废品率以及返工率明显下降。

标准化程序的使用给大规模复制生产线带来了方便。一旦某条生产线的控制程序经试验证明达到最优状态，就能很快移植到其它同类型的生产线，保证不同工厂、不同批次的产品具有相同质量水平。依靠软件复用生产方式一方面可以缩短新产线调试时间，另一方面也使企业可以快速地根据市场对于产品需求的变化，迅速地扩大产能。

（二）增强系统可靠性与安全性

工业现场环境一般都十分恶劣，强电磁干扰、高温高湿、粉尘震动、电压波动等不稳定因素随处可见，普通商用计算机在这样的环境下很难长期稳定工作。PLC 是专门为工业环境设计的工业计算机，其硬件结构是加固的。电源模块具有宽输入电压范围和抗浪涌能力，输入输出端口采用光电隔离技术，将外部电路的

高压冲击、共模干扰隔离，不能进入内部逻辑电路。内部电路板做三防漆涂覆，防止潮湿、腐蚀性气体的侵蚀。由于具有坚固的硬件平台，所以 PLC 系统在恶劣的工作环境里平均无故障时间比其他控制装置要大得多。

在软件方面，PLC 内设看门狗定时器和自诊断功能。程序进入死循环或者硬件发生异常的时候，系统可以立刻检测到并触发复位或者报警，避免设备失控造成更大的损失。对石油化工、轨道交通等高危行业来说，安全完整性等级认证的安全型 PLC 是必须的。该类控制器使用冗余结构，双 CPU 或者三 CPU 同时运算并互相校验，只有当所有的处理器运算结果一致的时候才执行输出。任何一个元件失效，系统都能安全停机或者切换到备用系统，最大限度的保证了人员和设备的安全。

系统可靠性提高的另一个表现就是具有很强的抗干扰软件滤波功能。为了防止现场传感器出现瞬时抖动或者误信号，可以在程序中设置数字滤波时间或者防抖逻辑，从源头上消除虚假信号的干扰。借助软硬件的联合可靠性设计，以 PLC 为平台的自动化系统可以实现全年无休、连续工作，成为现代工厂里最可靠的大脑。

（三）降低运维成本与故障率

虽然引入自动化控制系统会带来一定的硬件和工程费用，但是从整个生命周期来看，可以大大降低企业的总运营费用。传统的继电器控制电路包含很多的机械触点、复杂的接线，一旦发生故障，维修人员必须花很多时间去找出问题。机械触点寿命短、要常常更换。PLC 采用无触点的半导体开关技术，用内部逻辑代替外部接线，控制柜内接线数量减少 80% 以上，大大降低了由于接线松动或者触点氧化而引起的故障率，节省了大量的线缆材料和安装工时。

强大的自诊断、状态监控功能，又是降低运维成本的一个法宝。系统出现异常的时候，PLC 可以借助指示灯、触摸屏或者网络远传等方式精确地上报故障代码以及故障所在的位置。维护人员不用再盲目猜测，只要根据报警信息就可以迅速找到问题所在，无论是传感器损坏、线路中断还是执行器卡死，都一目了然。

PLC 故障诊断与维护效益

特性	传统继电器控制	现代化 PLC 控制	效益提升
故障定位	耗时人工排查	自动报告故障代码和位置	显著缩短诊断时间
维修方式	需专业人员现场维修	远程诊断与程序升级	降低差旅费用，提高效率
部件更换	需拆卸整体电路	模块化热插拔更换	最大限度减少停机时间
维护模式	事后故障修复	预测性维护	降低突发故障风险，节省成本

1. 从上表可以看出，这样一种可视化的故障诊断机制，明显缩短了平均修复时间，避免了设备停机造成的生产损失。

2. 利用远程访问的功能，设备制造商可以对千里之外的设备进行远程诊断、程序升级，减少工程师的出差费用，提供高效的远程运维服务。

模块化硬件设计给维修工作带来了极大的方便。当某个输入输出模块或者通信模块发生故障的时候，维护人员不需要拆卸整机，只需要带电插拔更换故障模块就可以恢复运行，将生产受影响的时间减少到最少。随着预测性维护技术的发展，PLC 对设备的电流、温度、振动数据进行长期记录和趋势分析，在设备彻底损坏之前就发出警报提示更换轴承或者润滑油，从而把事后的维修变成事前的预防，减少突发性故障造成的高昂维修费用和停产风险。

第五节 典型 PLC 产品及其应用领域

可编程逻辑控制器是工业自动化系统的大脑，它的技术形态和市场格局随电子信息技术的发展而不断变化。目前全球品牌竞争越来越多元化，各厂商依靠自身的技术积累和设计理念，在硬件架构、软件生态、通讯协议等各方面存在较大的差异。对典型产品的技术内核进行剖析，考察它适合的行业，对构建高效可靠的、更具前瞻性的自动化控制系统具有决定性指导作用。

一、国际主流 PLC 品牌

历经几十年的市场竞争与整合，已经形成全球工业控制市场以欧洲、北美、东亚为主体的三大技术流派。这些流派中的领军企业不但是目前技术标准的制定者，也在很大程度上控制着未来智能制造的发展方向。了解主流品牌平台的特点和生态逻辑，是做系统选型、架构设计的前提。

（一）西门子 SIMATIC 系列应用概览

西门子是欧洲工业自动化行业的领头羊，其 SIMATIC 系列控制器的世界装机量大、用户多。该产品线包含从微小的逻辑控制到大的过程自动化各种规模的产品，垂直整合度高、横向扩展性好。从硬件上来说，新一代控制器冲破了传统背板总线的带宽限制，采取高速通讯背板，使模块间的数据交流速率得到大幅提升。既提升了逻辑运算的吞吐量，又契合了运动控制、安全集成变得愈发繁杂的趋向。

1. 入门级、中小型系统多数选择紧凑型控制器。其产品一般带有多种通信接口和高速计数功能，可以以较低的价格满足单机设备的自动化要求。一体化设计思想大大削减了布线的工作量，而且支撑模块化拓展，设备制造厂商即便碰到不一样的配置需求，依然可以维持灵活的应对状态。

2. 中高端以及大型复杂的系统，模块化的控制器有很强的扩展性。其强大的处理器不仅可以完成复杂的逻辑运算，还可以在 PLC 内部直接运行复杂的算法模型，而且还具有专门用于浮点数运算、矩阵运算的指令集，使 PLC 内部可以完成复杂的算法运算。利用专属的工业以太网协议，可以对大量的分布式输入输出节点进行精确控制，同步精度可以达到微秒级。

随着博途软件平台的出现，西门子控制器得到了新的发展。该平台把逻辑控制、人机界面设计、驱动调试、安全配置整合在一个开发环境里，第一次做到了数据的一致性。工程师不需要在不同的软件工具之间反复切换，变量定义一旦改变，就会立即反映在所有相关的组件上。全集成自动化思想大大缩短了工程开发周期，也减小了系统的维护难度。SIMATIC 系列由于稳定性好、诊断功能强大，已经成为汽车制造、物流仓储、标准设备制造等行业的事实标准。系统出现故障的时候，控制器可以给机架或者移动终端传送出精确的故障信息，帮助维修人员很快找到故障的位置，降低因机器故障所造成的停工时长。

（二）罗克韦尔 ControlLogix 平台特点

罗克韦尔自动化是北美工业控制技术的佼佼者。ControlLogix 平台的特色就是它的独特集成结构。该平台从一开始就使用标签寻址的方式进行编程，与传统的 PLC 以寄存器地址为编程方式截然不同。这种设计思想上的转变虽然很小，但是对大型系统的开发效率产生了革命性的影响。开发者可给变量起有实际物理意义的名字，而不仅仅是无意义的数字地址。大大提高了程序的可读性与可维护

性，对于多个开发者共同开发的大型工程有着明显的优势。

该平台最大的优势就是多学科控制能力的完美结合。在同一个控制器机架内，可以同时离散逻辑、运动控制、过程控制以及安全控制进行处理，不需要为每一种控制功能分别配置一个硬件处理器。这种结合一方面缩减了硬件的使用数量，另一方面可以快速实现各个控制器之间数据同步以及时间戳对齐。用通用工业协议将所有的设备都放在同一个网络层里，信息流和控制流就能无缝对接。对于想要把制造执行系统同底层控制设备结合起来使用的企业来说，罗克韦尔为他们提供最畅通的数据通道。

重工业领域，采矿，冶金，大型流水线作业等地方，ControlLogix 平台的可靠性高，并且具有热备冗余的特点，所以很受欢迎。它可以实现模块的热插拔以及程序在线修改，而无需停机生产，这对于连续生产中停机成本极高的情况来说是至关重要的。与之相配套的软件环境提倡“互联企业”的概念，内置安全防护和信息服务功能，使得控制器不仅仅是一个执行机构的指挥官，更是工业物联网的智能节点，可以直接将预处理过的生产数据送入到企业的数据库中，为企业的大数据分析和决策支持提供原始材料。

（三）三菱 MELSEC 系列市场定位

三菱电机是亚洲工业自动化技术的佼佼者，MELSEC 系列控制器因为体积小、性价比高、运算速度快，在电子制造、半导体封装、精密机械加工等领域能占据一席之地。日系厂商一直注重细节的雕琢、硬件性能的极限发挥，MELSEC 系列就是这种精神的集中体现。为了满足现代制造业对于节拍速度严格的要求，本系列控制器使用了自主研发的专用芯片，基本逻辑指令的执行时间可以达到纳秒级。

三菱建立起了控制器和伺服驱动器之间的闭环，用专用光纤伺服网络，控制器可以实现几十轴甚至上百轴的高速同步控制，同步偏差很小。因此它能在复杂的机械上做多轴插补、电子凸轮、飞剪控制等。电子行业组装设备高响应速度、高精度相结合，才是保证产品良率、提高生产效率的关键。

智能制造需求升级之后，MELSEC 系列推出了带有数据分析功能的智能平台。新型控制器带有数据库接口，不需要外部网关设备就可以直接同服务器进行通讯，从而简化了现场层和管理层的数据集成架构。为了满足柔性生产的要求，它的编程软件拥有许多功能模块化的功能块以及结构化编程的方式。在成本敏感型市场

中，三菱小型一体机由于功能丰富、价格具有很强的竞争力，成为众多中小设备制造企业所选用的机型，广泛应用于包装机械、纺织机械、食品加工设备等各个领域，市场渗透性强，适应性好。

主流 PLC 品牌的主要特点和适用领域汇总如下表所示。

主流 PLC 品牌对比表

品牌	代表产品系列	核心优势 / 特点
西门子	SIMATIC 系列	高度集成化，垂直整合与横向扩展性强，高速通信背板，强大的诊断功能，全集成自动化
罗克韦尔	ControlLogix 平台	集成架构，基于标签寻址编程，多学科控制融合(逻辑、运动、过程、安全)，高可靠性、热备冗余，互联企业理念
三菱电机	MELSEC 系列	体积小巧，性价比高，纳秒级运算速度，专用芯片，控制器与伺服驱动器完整闭环，光纤伺服网络，数据分析功能，模块化功能块

二、PLC 行业应用匹配

各个行业的生产工艺和管理模式有很大不同,这就使得控制系统的性能指标、功能配置以及环境适应性提出了不同的要求。成功的自动化项目实施，不单依靠先进的硬件产品，更重要的是控制器特性的准确匹配行业的应用需求。高速离散制造、连续流程工业、基础设施、交通运输等领域都有自己独有的控制逻辑和侧重点。

(一) 制造业中的离散控制应用

汽车总装、3C 电子产品生产、机械加工等离散型制造业，生产过程可以看作是由一系列的、不连续的、独立的工序依次连接而成。PLC 的主要工作就是处理高速的数字量信号，对机械手、传送带、气动阀等执行机构进行准确的时序控制。控制系统的扫描周期一般都很短，在毫秒级甚至更短，以保证对高速运动的物体做出及时反应。高速包装生产线上控制器要在很短的时间内完成从传感器信号采集、逻辑判断到剔除机构动作的全过程，任何微小的延迟都会导致次品率急剧上升。

运动控制功能的表现，在很多应用当中都是决定选型的一个重要因素。现代离散制造设备大量采用伺服电机、步进电机实现复杂的轨迹运动。因此所选 PLC 必须具有很强的脉冲输出能力或者高速总线控制能力，才能支持直线插补、圆弧

插补、电子齿轮同步等运动控制指令。系统还要有较快的中断处理速度，在接收到紧急停止信号或者关键位置到达信号的时候，能够立即挂起正在执行的任务，优先处理高优先级事件，保证设备、人员的安全。

柔性制造系统越广泛地被采用，对离散控制的应用来说，PLC 的网络通信能力也被要求越高。生产线各个工位不再是信息孤岛，必须利用工业网络实时的交换物件信息、工艺参数、加工情况等信息。控制器要支持标准化的现场总线协议，以便可以和机器人控制器、视觉检测系统、射频识别设备等进行无缝集成。高度互联互通的特点使得生产线可以按照订单需求随时更改加工工艺，从而达到多品种、小批量生产高效运转的目的。

（二）流程工业中的连续过程控制

与离散制造截然不同，化工、石油天然气、制药、水处理等流程工业生产过程表现为物料连续流动、化学物理性质不断变化。PLC 的主要工作是高速逻辑运算、模拟量信号的精确实数运算和闭环控制。温度、压力、流量、液位等过程变量的稳定性，是评价控制系统好坏的重要标准。因此，用在这一领域的 PLC 需要有很强的浮点数运算能力和丰富的 PID 调节算法库来应对大滞后、非线性、强耦合等复杂过程对象。

1. 高可靠、高冗余，这是流程工业对控制系统的要求。由于生产过程中常伴随着高温高压或者易燃易爆的危险环境，而且生产装置一般要连续运行数月甚至数年，任何非计划停机都会造成巨大的经济损失或者安全事故。因此，所选 PLC 系统一般会配置电源冗余、CPU 冗余以及网络通信冗余，在发生单个组件故障时能够无扰动地切换到备用回路，保证生产正常进行。

2. 配方管理和批次控制功能，也是这类应用的重要部分。制药或者精细化工生产当中，一套装置常常要按照不同的产品配方去制造多种规格的产品。PLC 系统要能储存许多配方数据，按照生产指令自动调节各个控制回路的设定值和工艺参数。

随着数字化转型的不断发展，在流程工业中，PLC 和传统的 DCS 已经相融合。现代高端 PLC 可以处理大量的 I/O 点，而且内部带有复杂的报警管理、历史趋势记录、资产管理等功能。高性能 PLC 由于其结构灵活、成本低的特点，在中型过程控制项目中，逐渐取代了传统的 DCS 系统，成为混合型过程控制的核心。控制工程师不单要具备逻辑编程能力，更应该对化工工艺以及过程控制的基本原

理有深刻的认识，才能设计出安全、高效、可靠的自动化系统。

（三）基础设施领域的楼宇自动化

楼宇自动化包括暖通空调、给排水、照明控制、电梯监控等多个子系统，它的核心目的就是给建筑使用者创造一个舒适、便利的环境，同时达到能源消耗的最小化。楼宇自动化控制对象多、分布广，但是其控制速度要求不如工业生产环境高。该领域所用的 PLC 基本上都有分布式 I/O，并且支持各种异构协议。

在暖通空调系统中，PLC 采集室内外温度、湿度、二氧化碳浓度等参数，用 PID 算法调节风机频率、冷水阀开度、新风量，使室内环境保持恒定。由于建筑体量庞大，传感器和执行器分布在各个楼层、房间内，所以远程 I/O 扩展以及布线灵活的总线技术就显得十分重要。控制器必须能够通过双绞线、光纤和无线网等方式将分散的节点汇集到中心控制中心，达到集中管理，分散控制的目的。

通信协议多样化给楼宇自动化又造成了一大难题。照明系统用 DALI 协议，电能表用 Modbus 协议，冷水机组用 BACnet 协议。所以所选的 PLC 应具有强大的网关功能，能够支持各种通信协议，以破除子系统间存在的信息壁垒，达到数据深度集成的目的。长时间收集建筑能耗数据并加以分析，可以使得智能化的控制策略自动找出能源浪费的地方，进而对设备的运行调度进行改善，例如在夜间低谷电价时段蓄冷，在不同时间段根据人员多少调节照明亮度等，从而大大降低建筑的运营费用。

第二章 PLC 编程方法与高级指令应用

在当今工业自动化控制领域中，PLC 编程质量的好坏，直接关系到系统运行是否稳定，响应是否迅速，后期维护是否方便。随着工业现场对控制精度和逻辑复杂程度的要求越来越高，仅靠基本的逻辑指令已经不能满足要求了。本章主要对 PLC 编程的高级方法进行讨论，重点是梯形图的规范设计以及底层执行效率的优化手段，目的在于使工程师能够设计出高效的、稳定的控制程序，给复杂的自动化任务提供牢固的软件根基。

第一节 梯形图编程技巧与优化策略

梯形图是使用最广泛的 PLC 编程语言，它直观的特性使得电气工程师可以很快上手。但是当处理大规模的复杂逻辑时，如果没有系统的技巧和优化方法，程序的扫描周期过长或者逻辑混乱的问题就会出现。本节从建立编程规范、提高程序执行效率两个方面，对梯形图编程常用技巧与优化方法进行详细的分析，保证控制系统在处理大量数据、进行高速逻辑运算时依然能有出色的性能。

一、梯形图编程规范

规范化的编程是大型自动化项目成功的决定性基石，它关系到的不只是代码是否美观的问题，而是多名程序员一起开发时的效率问题，以及系统投入使用后别人来修缮的难易程度。制定严格的梯形图编程规范，能使程序的逻辑像工业图纸一样清晰易懂，大大降低由于逻辑错误造成设备故障的风险。

（一）清晰的程序结构与注释标准

创建清晰的结构是编写好的 PLC 程序的前提。处理复杂的工业控制逻辑时，一定要抛弃那种把全部逻辑都堆砌在主程序里的“面条式代码”写法。工程师按照工艺流程把程序分成若干个功能独立的模块，比如手动控制、自动运行、报警处理、参数计算等逻辑，分别封装在不同的程序段或者功能块中。模块化结构便

于调试，可以快速找到故障点。在网络段的划分上就要遵守“单一职责原则”，即一个网络段只完成一个核心逻辑或者驱动一个主要动作，不能在一个网络内串并联太多逻辑条件，造成视觉上的拥堵和逻辑理解上的困难。

注释工作在编程中常常被忽略，但是它却是程序可读性的灵魂所在。标准的注释体系应该包含变量注释、网络注释、块注释这三个层次。变量注释要明确写出信号的物理意义和中文名称，不得使用模糊的代号；网络注释要重点说明该段逻辑的控制意图和工艺背景，解释“为什么这样做”而不是仅仅“做了什么”；块注释要概括整个功能块的作用、输入输出接口定义、版本修改记录。尤其是在与安全互锁或者复杂算法有关的部分，详尽的注解为后世的维修人员留下了宝贵的逻辑线索，可以防止由于误解程序目的而造成误操作。多人协作的大型项目中统一的注释风格，命名规则等都是保证代码一致性的刚性需求。

好的程序结构也表现在对数据存储区的安排上。编程之初就要明确划分断电保持区、临时变量区、全局变量区。对于设备运行参数重要的数据，需要存入断电保持寄存器中，同时预留足够的空间来应对以后可能的功能扩展。清晰的内存映射表可以有效防止地址冲突，在使用触摸屏或者上位机通信的时候，规范的地址分配是保证数据正确传输的前提。用严格的结构、注释来创建程序的生命周期，可以很大程度上降低维护成本。

（二）合理使用中间继电器

中间继电器在梯形图编程中起着承上启下的作用，是 PLC 内部的一个虚拟位存储器。尽管不直接驱动外部负载，但是是建立复杂逻辑不可缺少的一环。物理输入输出点的数量一般很少，硬件接线一旦确定就很难改变。利用中间继电器可以建立一个软件缓冲层，在该层上把所有的物理输入点的状态映射到中间继电器上，然后在后续的逻辑运算中使用这些中间继电器。这样做的好处是当现场传感器种类发生变化（比如常开变常闭）或者接线端子损坏需要更换的时候，只需要修改输入映射部分的逻辑，不需要对庞大的核心控制程序进行改动，从而使得系统更具有灵活性、通用性。

顺序控制逻辑设计里，中间继电器是实现步进控制的元件。将工艺流程分解成若干个独立的步骤，用中间继电器代表每一个工步的状态，就可以建立起来清晰的状态机模型。每一个中间继电器的得电，就代表系统进入一个新的运行阶段，同时切断上一个中间继电器，保证动作的顺序性。该设计方法省去了复杂自锁互

锁电路交错的情况,使得逻辑流向一目了然。当设备出现卡顿或者异常停止的时候,只需要监视中间继电器的状态就可以知道设备停在哪个工序上,从而快速找出故障点。

中间继电器也是消除逻辑竞争、信号去抖动的一种有效办法。高速计数或者高频脉冲处理时,直接使用外部输入信号会由于信号波动造成逻辑判断错误。利用中间继电器配合定时器指令,可形成一个软件滤波环节,有效地滤除干扰信号。多路逻辑共同作用于一个目标的时候,可以把各个逻辑的结果汇总到不同的中间继电器上,然后通过这些中间继电器的触点串联或者并联来驱动最终输出,整理出各路逻辑关系,避免条件冲突造成的控制混乱。合理且充分地利用中间继电器,是提高梯形图逻辑层次感和鲁棒性的重要方法。

中间继电器在 PLC 内存中占用的资源很少,读写速度很快,所以常被用作临时标志位,在编写复杂的算法或者数据处理程序时尤其如此。在批量数据比较、传送或者数学运算过程中,可利用中间继电器来记录运算过程中的溢出、错误或者完成情况,为后面程序的执行提供判断依据。在不增加硬件成本的情况下,极大地扩展了 PLC 的逻辑处理能力,梯形图不再只是开关量控制,还可以完成一定的数据运算。

（三）避免复杂双线圈输出的方法

双线圈输出就是在同一个扫描周期中,同一个输出线圈被程序中不同的赋值指令驱动。这是 PLC 编程初学者最容易犯的错误之一,也是造成控制逻辑出现“灵异现象”的主要原因。PLC 的工作方式是输入采样、程序执行、输出刷新。程序执行阶段中 CPU 按照从上到下、从左到右的顺序扫描梯形图。如果在程序的前段对某个线圈进行置位,在后段又因为另一个条件对其进行复位,那么在最终的输出刷新阶段,物理输出点只会执行最后一条指令的状态。这种“后进优先”的机制会导致前面的逻辑判断失去意义,造成设备动作与预期相反,而且这种故障非常隐蔽,很难通过简单的观察发现。

彻底根治双线圈问题最根本的方法就是改变编程思维,坚持一个线圈只在一处输出的原则。对需要在多种条件下才能执行动作的执行机构,应把所有触发条件(自动启动、手动点动、安全联锁等)汇集起来,用触点的串并联逻辑组合,最后由一个输出线圈来驱动。这样的集中式逻辑结构既消除了双线圈冲突的可能,又使控制条件一目了然。当设备无法启动的时候,工程师只需要查看这一行梯形

图中各个触点的状态，就可以迅速找到导致输出被阻止的条件，从而大大简化故障排查的过程。

在某些非常特殊的工艺场景下，如果必须在程序的不同段落控制同一个输出，且不能用简单的触点组合来实现时，可以采用如下几种替代方案来规避双线圈的弊端：

1. 置位、复位指令替代：用置位、复位指令代替一般的线圈输出指令。置位指令一执行到位的状态就锁定为接通，直到复位指令执行才改变。该方式允许程序的不同部分对同一个位进行操作，但必须非常小心地处理置位和复位条件之间的互斥性，避免死锁或者不能复位的情况发生。

2. 中间缓冲位法，在不同的程序段中分别驱动不同的中间继电器（M1、M2、M3）来代表不同的工况下的输出请求。程序将中间继电器的触点并联起来，共同驱动物理输出线圈 Q0.0。既保持了逻辑分散处理简便的优点，又可以满足单个线圈的输出。

二、程序优化实用技巧

随着工业生产节奏的日益加快，PLC 扫描周期成了系统性能的瓶颈，在高速包装线、飞剪控制、运动控制等场合表现得尤为突出。优化程序代码，不是单纯为了减少存储空间，更主要的是缩短扫描时间，提高系统对外部信号的响应速度。精妙的程序优化技术可以最大程度上发挥硬件的潜力，甚至不需要增加 CPU 的规格也能获得更好的控制效果。

（一）简化逻辑电路的几种方法

简化逻辑电路是提高程序执行效率最直接的方法。在梯形图设计过程中，使用布尔代数原理对复杂的触点网络进行化简，可以减少 CPU 在每一个扫描周期内执行的指令条数。把各个并联支路共用的串联触点提取出来，放在并联块的前端，既能减少重复编码的工作量，又能减小指令的堆栈深度。串联电路处理时要遵守“左重右轻”原则，即最不可能接通或最常断开的触点要放在梯形图的最左边。因为 PLC 执行逻辑运算时具有短路运算的特点，当左侧触点断开时，CPU 就不必再对右侧的一系列触点进行判断，从而节省了宝贵的运算时间。

在并联电路设计时，应当采取“上重下轻”的方法，把最容易接通的触点置于并联块的最上面。一旦上面的触点接通，整个并联逻辑块就为真，CPU 就可

以跳过下面其他支路的运算。基于概率的触点排序方法，单个网络节省的时间可以忽略不计，但是在拥有数千个逻辑网络的大型程序中，累积起来的时间效益是相当可观的。对于包含很多复杂互锁条件的逻辑，可以应用德摩根定律把与非逻辑转化为或非逻辑，减少触点的数量，简化梯形图的结构。

进行算术运算或者数据传送的时候，应当尽可能地防止在每一个扫描周期内都无条件地执行。许多模拟量的处理或者参数的计算并不需要每毫秒更新一次。可以利用脉冲指令或者条件判断，只对数据变化或者特定时间间隔到达时才执行复杂的数学运算指令。温度控制系统的 PID 运算周期一般是几百毫秒或者秒级，如果每个扫描周期（通常为几毫秒）都执行 PID 算法，就会造成资源浪费。简化不必要的频繁运算，使 CPU 资源更多地用在实时性要求高的逻辑控制上。

程序结构扁平化也是一种有效的简化途径。嵌套层次过深会加大阅读难度，也会加大堆栈操作的开销。尽量把多层嵌套的逻辑展开成平铺的逻辑结构，或者用中间标志位把复杂的嵌套逻辑分成若干个简单的逻辑段。这样既可以提高执行速度，又可以避免由于堆栈溢出造成 CPU 停机的错误。精简逻辑电路的过程，实际上就是对工艺流程的深刻理解并加以再创造的过程，它需要工程师具有很强的逻辑思维能力。

（二）子程序调用减少扫描周期

子程序调用是解决大规模程序扫描周期过长的良药。许多复杂的控制系统中，并不是所有的程序逻辑都需要在每一个扫描周期内执行。例如，设备处在自动运行模式的时候，与手动调试相关的逻辑代码就是多余的；反之亦然。如果把所有的模式代码都写在主程序里面，依次进行扫描，那么不管当前处于何种状态，CPU 都会去扫描所有的指令，造成极大的算力浪费。将不同的工作模式或者功能模块分别编写成独立的子程序，采用条件调用指令实现“按需执行”。

当主程序检测到系统处在“手动模式”时，只调用手动控制子程序，跳过自动逻辑的扫描；切换到“自动模式”时则相反。该种动态调度方式可以缩短实际扫描周期，使 PLC 更快响应高速传感器的输入信号，提高控制精度。对于一些初始化参数设置、配方数据加载等只需要在开机瞬间执行一次的任务，应将其封装在初始化子程序里，只在第一次扫描周期调用，以后就不占用任何扫描时间。

除了按模式调用之外，还可以用中断子程序来处理实时性要求非常高的任务。普通子程序受主扫描周期的限制，中断子程序由外部事件（输入点信号跳变、

定时中断到达等)触发,可以打断主程序的执行,先处理紧急的逻辑。这就使得 PLC 既可以处理一般逻辑,又可以满足微秒级高速响应的要求。利用高速计数器中断来实时修正位置偏差,可以保证伺服定位控制下高速运动时的定位精度。合理地安排主程序、子程序、常规扫描和中断响应的关系,就是形成高性能 PLC 系统根本的架构能力。

(三) 利用跳转指令提高执行效率

跳转指令(JMP/LBL)可以在程序块内部跳过一段代码,它的功能类似于子程序调用,但是更加精细。梯形图中当跳转条件满足时,CPU 会直接跳转到指定的标号处继续执行,跳过中间所有的程序行。这一特点在选择配方、多工位更换、故障旁路等情况比较明显。假如在一个有十个加工工位的流水线上,用户如果选择屏蔽第 5 个工位,就可以直接使用跳转指令跳过第 5 号工位控制程序的逻辑,避免做很多没有必要的条件判断,也避免被屏蔽的工位发生误动作。

用跳转指令优化程序时要注意输出线圈的状态保持特性。当 PLC 跳过包含线圈输出的程序段的时候,此时此刻上一次的线圈状态将被保留下来,不会因为输入条件的变化而改变。利用这一特性可以实现一些特定“冻结”的功能,但也会造成设备无法停止的严重安全隐患。因此使用跳转指令时,一般要先对被跳过区域内的关键输出进行复位处理,或者保证跳转时这些输出的状态不会对系统安全造成威胁。这是使用跳转指令必须遵守的安全规定。

跳转指令可以用来构造紧凑的循环。虽然 PLC 的扫描机制本身就是个大循环,但是进行数组运算、数据检索、缓冲区移位等操作时,可以在一个扫描周期内使用跳转指令创建局部循环(类似于高级语言中的 FOR 循环),从而大大减少代码量。但必须控制好循环次数,防止循环时间过长,造成看门狗定时器溢出,使 CPU 报错停机。设计出详尽的跳转逻辑,在保证系统稳定性的基础上,把无用扫描所耗费的时间降到最低限度,使得 PLC 系统的响应时间接近硬件的极限值。复杂模拟量 PID 调节算法里,同样可以使用跳转指令以达到算法分时执行的效果,把 10 路 PID 回路平均分配到 10 个扫描周期当中轮询计算,从而抑制 CPU 的瞬时负载,保持系统稳定。

第二节 结构化文本与功能块设计

随着工业自动化控制系统越来越复杂，传统的梯形图编程在处理复杂的计算和逻辑封装时就暴露出它的不足。结构化文本以及功能块的设计已经成为创建现代化、模块化 PLC 程序的重要技术。本章主要研究高级编程语言的特点，研究怎样利用标准化的封装方法来提高代码的复用性、系统稳定性。

一、结构化文本编程

结构化文本是一种高级文本编程语言，其语法结构与 Pascal 或者 C 语言很像，具有很强的数据处理以及算法描述能力，很好地弥补了图形化语言在数学运算和循环控制上的缺陷。本部分主要阐述 ST 语言在工业控制中的应用以及编程规范。

（一）ST 语言语法基础与变量声明

按照 IEC 61131-3 标准，结构化文本语言以严格的语法结构、强类型检查为特点。编程时所有的变量在用之前都要做详细的规划，并加以声明。变量声明一般放在程序头部，用关键字来确定变量的作用域、数据类型和初始值。虽然显式声明会增加编码的工作量，但是它可以防止由于数据类型的不匹配而造成的溢出或者逻辑错误。局部变量只在当前程序组织单元中有效，适合做临时的计算或者中间状态的存储；全局变量在整个控制系统中都有效，用于不同程序段之间的数据交换。ST 语言为布尔型、整型、实数型等基本数据类型提供严格的类型转换函数，防止隐式转换造成的精度损失。

赋值操作符 `:=` 和相等判断操作符 `=` 在语法上是有严格区别的。赋值语句是使用 `:=`，逻辑判断是使用 `=`。这样的设计会大大降低出现逻辑混乱的可能性。分号 `;` 是语句必须有的结束符，可以明确指令执行的范围，编译器才能够正确的解析多行代码。对于数组、结构体这种复杂的类型来说，ST 语言的灵活程度就体现出来了。用户可以自由设置多维数组来适应各种工业现场的批处理数据，几轴伺服位置参数或多个温区的温度采样值即是如此。结构体的使用把不同种类但逻辑相关数据打包到一起，比如将电机的运行状态、故障代码、电流数值等封装到一个结构体变量里，大大提升了数据的可读性及管理效率。

1. 变量命名要采用匈牙利命名法或者驼峰命名法。使用前缀明确变量的类型和变量的作用域（输入变量、输出变量、静态变量等）来提高代码的自解释性。

2. 声明常量时，应该尽可能发挥常量的定义作用，把系统内所有固定的参数（比如圆周率、物理转换系数等）集中起来进行管理，这样有利于以后的维护以及参数的修改。

3. 注释是高质量代码不可缺少的一环。ST 语言支持行注释，块注释（(...)）。程序员应该给重要的逻辑段落加上详细的说明和修改记录，以保证代码的可传承性。

（二）复杂算法（如滤波、计算）的实现

工业现场传感器采集信号时会有各种频率噪声，硬件滤波不能达到高精度控制的需求。此时用 ST 语言编写软件滤波算法就显得特别重要。滑动平均滤波是一种常用的处理方法，建立一个固定长度的数组作为先进先出队列，在每个扫描周期内更新队列数据，然后计算队列内元素的算术平均值作为当前有效的输出。ST 语言的循环语句对于数组遍历以及累加计算来说，有着非常简洁的实现方式。梯形图庞大的网络相比只需要几行 ST 代码就可以实现完整的滤波逻辑，还可以根据需要对采样深度进行改变，这样就可以在响应速度和平滑性之间做出取舍。一阶滞后滤波、中位值滤波等复杂的信号处理算法，用 ST 语言结合浮点数运算可以很方便地实现复杂的数学公式，保证模拟量信号的稳定可靠。

在飞剪控制中的凸轮曲线生成、多轴联动的插补运算、化工过程中的热平衡计算等复杂工艺计算场合，ST 语言的优势是无法取代的。这些算法大多涉及很多三角函数、指数运算以及高次多项式求解。图形化语言对于这样的任务来说，编程过程繁琐且调试困难。工程师用 ST 语言将数学模型转为代码逻辑，并用条件判断语句处理各种边界情况、异常情况。在计算流量累计时可以利用浮点运算精确地处理瞬时流量时间积分，并使用条件语句来停止低流量切除或者仪表故障时累计，从而保证计量数据的真实准确。

对状态机逻辑来说，CASE 语句给出了一种清楚有效的编程手段，特别适合顺序控制或者拥有许多离散状态的设备控制。使用定义好的枚举类型的变量作为状态标志，CASE 语句根据当前的状态值直接跳转到对应的逻辑分支去执行动作，在满足某些转移条件时更新状态变量。这种编程范式把复杂的设备运行流程划分成若干个独立封闭的子状态，这样就大大的降低了程序之间的耦合度。修改某一个阶段的动作只需要修改对应分支的代码，不需要考虑影响其它状态，因此算法鲁棒性、可维护性较好。

（三）ST 与梯形图的混合编程

现代的 PLC 编程软件平台普遍都支持多语言混合编程，其主要目的就是充分发挥梯形图在逻辑联锁可视化上的优势和 ST 语言在数据运算上的长处。实际工程中一般用梯形图作主程序的框架来完成数字量输入输出、安全互锁逻辑、程序流程控制。由于梯形图的触点及线圈连线方式直观，电工维修人员很快就能弄清设备的工作状态以及故障原因。而核心的算法处理、数据解析或者复杂的运动控制指令，都被封装在用 ST 语言编写好的功能块或函数里，然后在梯形图中调用。分层架构既保证开发效率、维护方便，又可以促进各个专业技术人员之间的技术交流。

混合编程具体实现中数据交互、同步是需要注意的地方。梯形图调用 ST 编写的功能块，在扫描周期的某个时刻把输入参数传递给功能块；功能块内部完成逻辑运算后，结果通过输出参数返回给梯形图。为了保证数据的一致性，不能在一个扫描周期内对同一个全局变量执行多次写操作，否则会出现竞态条件。针对需跨语言共享的复杂数据结构，使用全局数据块或者用户自定义数据类型来作为接口载体，保证双方对数据格式定义一致。

利用 ST 语言编写的功能块可以被当作用户自定义指令，在梯形图中可以像标准指令一样多次调用。该种方式极大地简化了梯形图的网络结构，使主程序更清晰整洁。伺服定位控制逻辑比较复杂，有速度规划、位置比较和错误处理等。用梯形图编写时可能要占用几十个网络，但是封装成 ST 功能块后在梯形图中只表现为一个带若干引脚的方框。现场工艺发生变化时，需要修改控制策略时，只需要修改底层 ST 代码。使用该功能块的所有梯形图程序段都自动地获得了新的逻辑，不需要再对每一个梯形图进行修改，这样大大减少了工程变更给设计带来的风险和劳动量。

二、自定义功能块开发

功能块就是面向对象编程思想在工业控制领域的具体体现，也是实现代码模块化、标准化的主要载体。设计完整并且接口良好的自定义功能块，可以将复杂的设备控制逻辑封装成一个封闭的模块，从而大幅提高工程开发的标准化水平和代码复用率。

（一）功能块与函数的区别

PLC 编程中函数和功能块都是代码封装单元，但二者在内存分配以及执行上是不同的。函数是无记忆的程序组织单元。函数内声明的临时变量存放在堆栈区或者临时存储区，函数调用结束并返回主程序后，这些变量所占用的内存空间就会被释放，其中的数据也随之消失。所以函数适合仅由当前输入参数决定输出结果的情况，比如数学运算、逻辑转换、数据校验等。每次函数调用都是一个新的执行过程，不会累积历史状态。

功能块的核心特性就是拥有独立的背景数据区，背景数据区是用来存放功能块内部静态变量、输入输出状态和中间计算结果的存储区域。即使功能块当前调用周期结束，背景数据块中的数据也不会发生变化，直到下次调用时才会被读取或更新。由于该特性，功能块可以保存以前的状态，所以适合处理带有历史信息的控制逻辑，例如定时器、计数器、PID 控制器、各种时序逻辑等。背景数据块的存在把代码逻辑同数据存储紧紧联系起来。一个功能块的代码可以被多次实例化，各个实例都各自独立地拥有数据空间，互相之间互不影响。

函数与功能块主要区别表

特性	函数	功能块
状态保持	不带记忆，不保留历史状态	具有独立背景数据区，可保留历史状态
内存分配	临时变量存储在堆栈区，调用结束即释放	静态变量存储在背景数据区，数据持久化
适用场景	仅根据当前输入确定输出 （数学运算、数据转换）	需要累积状态或历史信息 （定时器、计数器、PID）
实例化	每次调用都是全新执行	可多次实例化，每个实例有独立数据空间
资源占用	内存占用小，调用速度快	占用更多数据存储区
调试便利性	较难直接查看内部临时变量	可通过外部监控背景数据块调试内部变量

从上表可以看出，选择函数还是功能块的关键在于是否要保留状态信息。当逻辑涉及到边沿检测、延时等待、步骤累积时，就必须使用功能块。从资源消耗的角度看，函数不需要永久性数据块，内存占用小，调用速度快，适合高频调用简单的逻辑。功能块实例化过程所消耗的存储器更多，但是它提供了一个较高的层次抽象，也可以使用外部监控背景数据块的方式调试其内部变量。

（二）封装电机控制、PID 控制等标准功能块

电机属于工业现场最基本的执行机构，其控制逻辑的标准化封装对于提高系

统整体质量有着非常重要的意义。完善的电机控制功能块应该有启动、停止、复位等基本输入接口，还有运行反馈、故障报警、模式选择等辅助接口。内部逻辑实现的时候，除了要考虑接触器的吸合、断开之外，还要考虑全面的保护。发出启动指令之后，功能块就要启动内部定时器来监测运行反馈信号。如果在设定的时间内没有得到反馈信号，就判定为启动失败，并置位故障标志，同时强制断开输出，防止设备带病运行。还要考虑就地和远程控制模式切换的逻辑，保证在不同的操作权限下电机动作的安全性以及合规性。

PID 控制功能块开发是过程控制领域的一项重要工作。尽管大多数 PLC 厂商都提供了系统级的 PID 指令，但是在一些特殊的工艺场景下，标准指令并不能满足特定的控制要求，这时就需要开发自定义的 PID 功能块。离散化的 PID 算法需要准确计算误差的比例、积分、微分量。为防止积分饱和造成的系统超调，在功能块内部需要加入抗积分饱和逻辑，即当输出达到限幅值时停止积分项累加，或者根据误差变化趋势自适应调整积分增益。对微分项进行处理时，一般要串联一个低通滤波器，用来抑制高频噪声对控制输出的剧烈干扰，保证执行机构动作平稳。

除了核心的控制算法外，标准的功能块还应该具有完备的报警管理和状态指示的功能。如电机控制功能块中加入运行时间累计逻辑，在运行达到一定周期时发出保养提示，PID 功能块中加入过程变量偏差范围监测逻辑，偏差连续大于一定范围时发出调节失灵报警。附加的功能使功能块不再仅仅作为一个执行单元，而是作为一个智能化的设备管理节点。经过严格测试验证以后把这些标准的功能模块存到企业级的代码库。工程师在新项目中只需要拖拽调用并设置参数，就可以快速搭建出稳定的控制系统，大大缩短了调试时间。

（三）功能块的变量管理与数据持久化

功能块内部变量的合理分类和管理，是保证功能正确、内存使用高效的基本保证。设计功能块接口时要根据内部功能模块的特点来确定输入变量，接收外部控制指令、传感器信号等作为输入；输出变量是驱动执行机构并反馈状态的，双向交互数据则要使用输入输出变量处理。功能块内部使用到的中间变量，必须将静态变量和临时变量区分开来。静态变量存放在背景数据块中，具有掉电保持或者周期保持的特点，可以用来存放状态机当前步序、积分累加值或者历史极值。临时变量使用系统堆栈资源，只在当前扫描周期内有效，适合循环计数器或者中

间计算结果。合理使用临时变量可以有效地减小背景数据块的大小，改善内存布局。

数据持久化是工业控制中不能忽略的环节，特别是对一些关键工艺参数以及设备运行数据来说，PLC 断电重启之后，应当能够保持断电之前的状态。功能块设计时，对于重要的静态变量要进行保持，即把它们放在有电池备份或者非易失性存储器的地方。比如 PID 功能块里面的设定目标值、PID 参数以及手动 / 自动模式状态之类的东西，一般情况下应当采用保持型变量，以防断电重启以后参数归零造成控制失序。对累计产量、设备全生命周期运行时间这些需要长时间保存的数据，也可以在功能块内设计逻辑，定期把数据写入文件寄存器或者上传到服务器中长期保存。

用很多背景数据块使变量管理更灵活。当复杂功能块（轴控制功能块）内部需要调用其他功能块（通用报警处理功能块、延时功能块）时，可以把子功能块的实例声明为父功能块的静态变量，而不是给子功能块分配独立的全局背景数据块。嵌套式变量管理方式使整个复杂的控制逻辑的数据结构呈树状层次，只需要一个父级背景数据块就可以包含所有的子级数据，大大简化了地址映射关系，避免了全局数据块数量过多带来的管理混乱。同时，该结构也方便整个功能模块的移植和导出，保证程序的封装性、独立性。

第三节 高级指令与数据处理方法

在现代工业自动化控制系统中，可编程逻辑控制器不再只是简单的执行一个逻辑控制的设备，它更像是一个承担着核心运算和信息交互的智能节点。掌握高级指令以及高效的数据处理办法，是达成复杂工艺算法、加快系统反应速度、优化存储空间的关键所在。

一、数据处理高级指令

工业现场的数据流转非常频繁，形式也多样，从底层的传感器模拟量采集到上层通信报文解析，都需要强有力的指令集支持。合理使用这些高级指令可以很大程度上简化程序结构，提高代码的可读性以及执行效率。

（一）数据传送、比较与转换指令集

数据传送指令是程序中使用最频繁、最基础的指令，它可以完成单个数据的复制，也可以完成一组数据的传送和交换。处理大量的连续地址数据的时候，块传送指令就显得十分重要，它可以在一个扫描周期内将源存储区一大批数据完整地传送到目的区，在配方参数初始化、状态数据备份等场合无法替代。不同存储区之间相互传递数据可以使用字节交换指令，可以快速改变高低字节的顺序，在处理不同品牌设备通信时字节序的不同问题上非常有效，不用麻烦的位操作。

比较指令是逻辑判断的中心依据，除了常规的数值大小比较之外，浮点数的比较则要更加小心。由于浮点数在计算机内部存储精度的限制，直接进行相等比较往往是不准确或不成立的，因此在工程中一般采用区间比较的方法，即判断两个浮点数的差值绝对值是否小于一个给定的极小阈值，来判断两个浮点数是否在工程意义上相等。这样做可以避免由于计算出现微小误差而造成的逻辑判断出错，从而提高系统的鲁棒性。

数据类型转换一直存在于控制流程当中。模拟量输入模块采集到的是整型数据，为了进行物理量的计算，必须转换成浮点数。在此过程中不仅要考虑数据位宽的变化，即十六位整数扩充为三十二位双整数时还要注意符号位的处理。双整数转为实数时系统自动处理小数点位置，但是将实数反向转换为整数输出给执行机构时，取整方式选择就显得尤为重要。直接截尾取整会造成输出偏差，四舍五入指令可以对控制输出进行更精确的控制，对于调节阀开度或者变频器频率给定等场合，会直接影响到控制精度。

（二）算术运算与逻辑运算指令应用

算术运算指令早就不只是简单的加减乘除，而是被运用到复杂的控制算法中。当对累积量进行计算，比如流量积算、电能计量时，一定要考虑数据溢出的问题。中间运算一般采用大位宽数据类型或者进位处理，将进位存入高位寄存器，保证保存的数据真实反映现场情况。伺服系统的电子齿轮比计算，用浮点数的乘除运算和开方指令计算出目标位置所对应的脉冲数，可以实现微米级的定位控制。

逻辑运算指令对于位级处理以及状态屏蔽有着特别的意义。与运算用来提取字数据中的特定位状态，用设定的掩码做逻辑与运算，可以快速分离出故障报警位或者运行状态位。或运算常用来汇总多条件，把多个报警字合成一个总报警标志。异或运算在检测状态翻转时效果明显，用当前周期的状态和上一周期的状态

进行异或运算，可以瞬间捕捉到任何位的变化，常用来生成边沿脉冲或者简单的加密校验。

1. 在 PID 控制算法的自编程序中，由于需要计算偏差、积分项、微分项，所以算术运算指令被频繁调用。浮点运算精度决定调节过程是否平滑。为了防止积分饱和，一般采用比较指令对积分累计值进行限幅处理，在运算过程中加入死区逻辑，即偏差小于某一数值范围时，不进行积分运算，消除静态误差造成的振荡。

2. 逻辑运算指令在通信数据的校验码计算中也被广泛使用。循环冗余校验算法用循环移位和异或运算相结合的方法，产生具有高检错能力的校验码。采用基于底层逻辑指令实现的方式，编程复杂度高，但是执行效率远高于调用封装好的库函数，适合对扫描周期要求非常高的运动控制总线通信。

（三）表操作指令详解

表操作指令是队列型数据处理最主要的办法，物料追踪、缓冲存储逻辑里都以它为主。队列操作指令有先入先出、后入先出两种，各自的特性和应用场合见下表。

队列操作指令（FIFO 与 LIFO）对比表

特性	FIFO（先入先出）	LIFO（后入先出）
存取顺序	最早进入的数据最先被取出	最后进入的数据最先被取出
数据结构	队列	堆栈
写入操作	在队尾加入新数据	在栈顶加入新数据
读取操作	从队头取出数据	从栈顶取出数据
典型应用	物料追踪、生产排程、缓冲存储	程序中断 / 函数调用、撤销操作、故障代码记录

先入先出的指令不单是数据的简单移位，而且也是建立生产线产品追踪系统的基本。例如当产品到达检测工位时，检测数据就会写入表尾；当产品转到下一个工位的时候，读取指针就从表头取出对应数据，实现数据流与实物流同步。这保证了即便生产线上的在制品很多，系统也能正确地为每一个产品匹配对应的工艺参数和检测结果，不会出现因为数据错位而导致废品被误判成良品的情况。

后入先出指令经常使用于堆栈式操作的场合，比如自动化立体仓库的临时缓存区，程序嵌套调用时保存的现场数据。新的数据压入栈顶的时候，原先的栈顶数据就会逐个往下移动；读取的时候直接弹出栈顶最新的数据即可。对于回溯性任务来说，该种操作模式十分有效，比如记录设备最近几次的故障代码。由于维

修人员往往只关注最近发生的故障，LIFO 表可以很快地给出这样的信息。

在实际编程过程中，表操作指令一般会与指针的动态管理一起出现。系统要保存数据存贮区，而且要及时刷新表的最大长度、当前条目数目以及读写指针所在之处。

为了防止出现表溢出或者空读的错误，在程序当中一定要加上边界检查的逻辑。在执行写入指令之前，需要判断当前的条目数是否已经达到了最大容量；在执行读取指令之前，则需要判断表中是否存在数据。循环队列的实现还要用取模运算使指针自动回卷，从而使有限的存储空间可以应付无限的数据流。这是一种精妙的设计思路，在长时间的历史趋势记录或者连续的事件日志中就显得格外突出。

二、数据块与字符串处理

随着工业 4.0 理念的不断发展，PLC 所要处理的数据类型也越来越复杂，结构化数据和文本信息互相交互的需求也越来越强。高效的进行数据块规划、字符串处理，是实现设备与上位机、数据库、MES 系统之间无缝对接所必需的基础。

（一）数据块的规划与应用

数据块是 PLC 中存放过程数据的地方，数据块规划的好坏直接影响到系统的可维护性和运行速度。大型项目一般根据功能模块把数据块分成全局数据块和背景数据块。全局数据块用来存放全厂通用的工艺参数、设备状态汇总、系统标志位，供各个程序块调用。为了提高访问速度和节约存储空间，对不需要保持的数据不能选择断电保持；而对于产量统计、设备运行时间等重要数据，必须分配给具有掉电保持功能的存储区。

用户自定义数据类型的应用，使数据块的结构化程度大大提高。通过把电机、阀门等典型设备的控制字、状态字、设定值、反馈值封装成结构体，并在数据块里创建该结构体的数组，用面向对象的方式来管理数百台设备的变量就会变得井然有序。编写通用控制功能块的时候，将该结构体当作输入输出接口，就可以达到代码高度复用的效果。

优化数据块的访问方式可以提高读写速度。对那些支持符号寻址的新型控制器而言，启用优化块访问属性的作用就是使系统能对存储空间作自动排列，同时消除变量间存在的空隙，以此来大幅提升存储空间的利用率。然而当与传统的

HMI 或者第三方 SCADA 系统通信时，由于这些系统一般使用的是绝对地址寻址方式，这时需要关闭优化访问功能，并明确给出变量的偏移量，以保证外部设备可以准确读取每一个字节，防止由于地址错位造成的对数据解释的错误。

（二）字符串的拼接、截取与比较

在现代工业现场条码扫描、产品打标、串口通信中字符串处理起着非常重要的作用。字符串拼接一般用来组装指令报文。比如控制喷码机时，PLC 要把产品的批号、生产日期、流水号拼接成一个字符串传送给打印设备。在这个过程之中，要精确地算出每一个子字符串的长度，妥善地处理分隔符，从而保证生成的最终字符串符合通信协议所规定的帧格式要求。

字符串截取一般用来解析外部输入信息。当扫码枪读取一个包含很多信息的二维码字符串时，PLC 要根据事先设定好的规则，从某个指定的位置开始，截取一定长度的字符串，从而得到物料编码、供应商代码等关键信息。不同物料批次条码之间会有细微的差别，所以不能用固定的偏移量来确定截取的位置，而应该通过识别特定的特征来确定截取的位置。

字符串比较指令主要是用来校验、匹配的。在装配线上，系统会将扫码读取到的零部件条码与当前工单设定的条码进行对比，只有完全一致才允许进入下一道工序。由于某些情况字符大小写不一样，所以一般采用指令把字符串转为大写或者小写再行比较，以防错判。大量字符串匹配的时候，为了避免字符串占用过多的扫描周期时间，一般会对目标字符串组创建索引，使用二分查找法等算法来加快检索速度。

（三）配方管理与数据记录实现

配方管理是柔性制造系统的灵魂，可以使一条生产线通过改变参数集生产不同规格的产品。在 PLC 内部进行配方管理一般用多维数组或结构体数组数据块。每组配方对应数组里的一个元素，包括温度，压力，速度，时间等全部工艺参数。采用间接寻址或者索引寄存器，程序根据 HMI 给出的配方号，瞬间将对应数组元素中的数据批量传送到当前工作区的变量中，实现毫秒级的换产响应。

数据记录功能受到 PLC 存储空间小的影响。为了保存较长的历史数据，一般采用循环覆盖的方法。在数据块中划分出环形缓冲区，给每一条数据记时。当缓冲区写满的时候，新数据就会覆盖最早的一条记录。虽然该机制比较简单，但对捕捉故障发生前后的短时高频率数据有非常大的价值。

1. 为了实现长时间的数据保存，现代的 PLC 方案大多使用文件写入的方式，将数据以 CSV 格式直接写入控制器的存储卡中。程序要调用文件系统指令，对文件执行创建，打开，写入，关闭这些操作。

2. 写入时必须设置严格的互锁机制，即在上一条写入指令执行完之前不能发出新的写入请求，否则很容易造成文件损坏或者数据丢失。

3. 为了减少存储卡的读写次数，一般会把一些数据存到内存中，等内存中的数据量达到几千字节的时候，再将这些数据一起写入文件，这样可以有效地延长存储卡的使用寿命。

第四节 编程规范与调试技巧

工业自动化系统全生命周期内，良好的代码编写以及高效的系统调试，不但是项目成功交付的重要保证，也是降低后期维护成本、保证生产连续性的关键因素。由于控制逻辑越来越复杂，传统的经验式编程已经不能满足大型系统的协同开发要求了。严格的程序规范和先进的调试方法，已经成了提高自动化工程质量的必经之路。

一、标准化编程实践

工业控制程序的标准化水平决定系统的可读性、可移植性，也是解决“一人一把号，各吹各的调”工程乱象的根本方法。创建起一个健全的标准化体系，可以有效地降低团队合作过程中的沟通障碍，让各个工程师所编写的程序模块具备相同的逻辑纹理，从而为系统的长久更新与功能扩展打下稳固的结构基础。

（一）制定企业内部的编程规范

企业级编程规范的制定，不能只是简单的代码格式要求，而应该提升到系统架构设计和工程管理的高度。一套完整的规范应该明确规定程序结构的划分原则，强制推行模块化的设计思想，把复杂的工艺流程拆解成独立的功能块或者功能调用。在此体系之下，主程序只应当是逻辑调度的框架，而具体的设备控制、数据处理以及报警逻辑都应当被封装在独立的子程序里。不仅可以提高代码的复用率，也可以在线性代码中快速定位到设备故障所对应的模块，避免无效的搜索。规范中必须对程序块的接口做出明确规定，输入输出引脚要有明确的定义和匹配的类

型，禁止在功能块内部使用全局变量，以保证模块的“黑盒”特性与独立性。

除了结构设计之外，注释规范也是企业标准里不可忽略的部分。代码注释不能只翻译指令功能，更应该体现其背后的工艺意图。规范应该强制要求每个程序段落都有功能标题和详细的逻辑描述，对于复杂的算法或者重要的联锁条件，在代码旁侧注明其具体的工艺需求或者安全考虑。多人合作的大项目里，统一的注释风格能让交接工作变得顺畅，防止因为人员的变动而造成的技术断层。企业应该建立代码审核制度，定期对工程师编写的程序进行审核，保证所有逻辑都在框架内。虽然严格的控制会增加初期的开发时间，但是从长远来看，它可以消除系统隐患，给工厂的稳定运行提供代码层面的保障。

1. 程序架构应该遵守分层设计的原则，把硬件映射层、逻辑控制层、数据处理层分别明确区分开来，不许跨层级直接访问信号，保证底层硬件发生变化时，上层逻辑代码依然稳定。

2. 必须有标准的报警与故障处理程序，所有设备的故障代码使用统一编码规则，程序中应留有标准接口，方便操作人员及时发现现场异常并作出处理。

（二）变量命名规则与符号表管理

变量命名好似程序的一张名片，如果变量名混乱，则阅读起来会非常困难，还会引起严重的逻辑错误。变量命名要符合语义明确、结构一致、类型清晰这三个原则，并在编程中加以运用。推荐使用匈牙利命名法或它的变种，用前缀表示变量的数据类型和物理属性。用特殊的字符组合来区分数字量输入、数字量输出、中间存储位、数据块内静态变量等。这样命名以后，工程师不需要查阅变量表就可以快速知道信号的来源和性质，从而大大提高了逻辑分析的效率。涉及到具体设备的变量应该包含设备位号和功能描述，保证代码中符号和电气原理图、现场设备标签高度一致，达到图、物、码三者对应。

符号表管理是变量命名的延伸，也是具体实现。大型项目中符号表变量数量可达几千至上万个，手工录入容易出错且效率低。高效的管理方法应该用电子表格软件批量编辑、校验，通过宏命令或脚本自动生成符合规范的符号表文件，再导入编程软件。可以保证命名规则的严格执行，在设计变更的时候可以迅速更新大量的变量。符号表中除了变量名、地址之外，“注释”和“属性”字段也要充分使用，记录信号的电气参数、量程范围、接线端子号。当现场信号出现异常的时候，维护人员可以通过监控符号表直接获得所有的硬件信息，不用查阅厚重的

图纸资料，可以大大缩短故障排查的时间。

（三）程序版本控制与备份策略

工业现场程序经常修改、迭代，缺少有效的版本控制很容易造成新旧代码混用、错误逻辑覆盖正确逻辑的严重后果。建立科学的版本控制体系，首先要摒弃用文件名后缀（如“最终版”、“绝对不改版”）来区分版本的方法。应采用软件工程中版本管理的思想，用专业的文件管理系统或者工业专用的版本控制工具，对每一次代码的修改都进行详细的记录。每次提交都需要附带变更日志，清楚地写出修改时间、责任人、修改原因以及所涉及到的具体功能块。该种可追溯性的管理方法，在团队碰到新引入的错误时，可以立即回滚到上一稳定的版本上，将试错成本降到最低。

备份策略是数据安全的最后一道屏障。工业环境中的电磁干扰、硬件老化、人为误操作等都会导致可编程逻辑控制器内程序丢失或者损坏。因此必须建立分层次、多重冗余的备份机制。本地备份，工程师每次离线都会将最新的程序备份到指定目录；异地备份，定期将工程文件上传到企业的私有云或者物理隔离的服务器中。对关键生产线采取自动化备份方式，利用上位机脚本定时对可编程逻辑控制器内部实际运行程序、数据块做快照。备份内容不单要包含程序文件，还要包括硬件组态文件、网络配置文件以及人机界面画面工程。在重大升级或者长时间停机维护前，必须完成全系统完整的镜像备份，定期进行灾难恢复演练来检验备份文件的可用性，保证极端情况下可以迅速恢复控制系统。

二、高效调试与测试方法

调试阶段是检验设计思想、找出潜在问题、把静态代码变成动态控制能力的阶段。随着生产工艺对精度和速度的要求越来越高，传统的通过观察设备动作来调整的方式已经不能满足要求。采用系统化、数字化的调试与测试方法，可以深入到逻辑内部，捕捉到毫秒级的信号变化，在设备投产前消除大部分隐患，保证控制系统在复杂工况下具有鲁棒性、确定性。下表为几种常用的高效调试和测试方式及其特点。

常见调试与测试方法概要

方法名称	主要目的	关键应用场景	安全与效率考量
强制变量	独立测试逻辑	设备未就绪或安全联锁时	严格安全评估，及时复位
监控表	数据流向分析	实时数据观测，PID 调参	关注刷新频率，高精度追踪
断点调试	精确定位逻辑错误	复杂逻辑死锁，算法异常	生产环境慎用，推荐仿真
单步执行	追踪数据变化	数学运算，指针寻址，循环逻辑	生产环境慎用，推荐仿真
仿真测试	预验证系统功能	大规模系统集成前	减少现场风险，缩短调试周期
实际联调	软硬件配合验证	系统投产前的最终检验	循序渐进，详细记录变更

（一）强制变量与监控表的使用

调试初期，现场设备可能还没有完全准备好，或者因为安全联锁的原因不能直接运行，这时强制变量功能就成为工程师手中的利器。使用编程软件提供的强制表，可以暂时摆脱物理接线的限制，人为地将输入信号设置为接通或者断开的状态，从而检验程序内部的逻辑流程是否符合预期。此方法在单机调试阶段效果最好，可以独立对传感器逻辑、报警触发条件、状态机跳转流程进行测试。但是强制功能是一把双刃剑，使用时必须严格按照安全规范。任何输出点或者关键逻辑位强制操作前都必须保证现场无作业人员，对可能造成的机械碰撞、介质泄漏的风险进行评估。规范的操作流程必须要有“强制清单”，记载每次强制操作的对象和时间，在调试结束时逐个核对并取消，严禁将带有强制变量的程序留在正式生产系统中。

监控表就是了解可编程逻辑控制器内部数据流向的窗口。高级监控表使用技巧与简单状态监视不一样，它使工程师能够为某一个功能区建立自定义的观测视图。将有关控制字、状态字、模拟量数值、中间标志位等放在一张表里，便于数据间逻辑关系的对比。调试 PID 回路的时候要观测到设定值、反馈值、输出值、P、I、D 等参数，同时可以观察出实时趋势图中系统响应受到参数变化的影响。对高速变化的信号，如果刷新率不够，普通的监控模式会漏掉重要的跳变。此时需要开启高精度采样追踪或者使用可编程逻辑控制器内部自带的 Trace 功能，扫描周期为单位记录数据波形，捕获偶发的逻辑错误或者电气干扰信号。

（二）断点与单步执行功能

虽然可编程逻辑控制器的循环扫描方式使其调试不同于高级语言，但是现代高端控制器大多已经具备断点调试和单步执行的功能，给解决复杂的逻辑死锁或

者算法错误提供了一种精确的“手术刀”。当程序出现难以理解的逻辑跳转或者计算结果异常的时候,单靠外部观察很难找到问题所在。在关键程序段设置断点,可以使中央处理器在该指令执行的时候暂停扫描,并且当前的输出状态和内存数据不变。在静止时刻,工程师有充足时间检查每一个相关寄存器的数值,检验累加器中中间结果是否正确,找出逻辑偏差发生点。

单步执行功能让工程师可以像慢动作回放一样,一条指令一条指令地执行程序。对复杂的数学运算、指针寻址、循环逻辑来说,它有不可替代的作用。单步执行,可以看到数据指针移动轨迹、数组元素读写过程、条件判断每一个分支的选择过程。这种微观的调试手段可以找出像数组越界、数据类型溢出、浮点数精度丢失这些藏起来的编程错误。断点和单步调试会延长扫描周期或者造成输出保持,在与实际设备相连的带载调试中是十分危险的。所以对于这种深层调试,一般应该在仿真环境或者与机械负载完全脱离的实验室内进行,千万不要在生产线高速运行时随意挂起中央处理器,否则会导致设备失控,引发安全事故。

1. 环境功能可以追踪功能块在各种调用路径下表现出来的具体行为,这对于找到多重背景数据块数据混淆的原因至关重要,保证同一个程序段在不同的设备上运行结果互不影响。

2. 多任务处理或者中断程序调试的时候,要注意断点对系统实时性的影响,必要时可以关闭看门狗定时器,防止调试暂停导致中央处理器超时停机保护。

（三）仿真测试与实际设备联调

仿真测试是把代码编写和现场实践联系起来的桥梁,也是降低现场调试风险最有效的办法。数字孪生仿真环境的创建,正慢慢成为现代工业自动化工程的一种先进趋势。利用高性能仿真软件(PLCSIM Advanced等),工程师可以在电脑上对可编程逻辑控制器的硬件配置、网络拓扑、输入输出响应做完整的仿真。通过编写专门的仿真逻辑或者连接物理建模软件,可以创建虚拟被控对象,模拟气缸伸缩、电机加减速和温度升降的过程。虚拟环境中可以进行所有的逻辑验证,即正常流程测试、异常故障注入测试、极限边界条件测试。大量的逻辑错误、地址冲突、时序配合问题等都可以在此时被发现并修正,从而使得现场调试工作只剩下参数微调和电气接线排查,极大地缩短了昂贵的现场调试周期。

仿真测试通过之后就是实际的设备联调。这是对控制系统、电气系统、机械系统配合程度的最终检测。联调要遵循先手动后自动、先单机后连线、先空载后

带载的循序渐进原则。输入输出检查阶段，一个个对现场传感器的信号反馈和执行机构的动作方向进行核对，保证软硬件映射正确。接着进行单机调试，主要是检验设备基本动作逻辑、安全保护功能是否正常，急停、限位、过载保护需要反复进行物理触发检验。全线联调的重点就是设备间的握手信号以及节拍配合，采用高速数据采集工具对各个工位的时序图进行采集分析，进而优化动作衔接，去除无用的等待时间。联调过程中应该养成良好的记录习惯，对每次参数修改、逻辑改动都应做记录。联调结束之后，就进行彻底的代码清理和最终备份工作，保证交付给用户使用的系统既高效又干净。

第五节 多任务与中断处理技术

随着工业自动化系统的复杂度越来越高，仅仅依靠单一线性扫描的 PLC（可编程逻辑控制器）控制已经不能满足现代控制系统对实时性、并行处理、复杂算法运算等方面的需求。多任务处理、中断技术是为了解决高速运动控制、复杂进程算法、大量数据通信等难题而出现的，共同成为高效、稳定工业控制系统的重要支柱。经过合理的任务优先级安排并加入中断机制之后，工程师就可以冲破扫描周期的束缚，对重要的事情作出毫秒级或者更短时间的反应。

一、多任务程序结构

对先进的 PLC 软件结构设计来说，创建层次清晰，模块明确，结构分明的多任务程序是保证系统逻辑正确、高可维护性的前提。这不仅是对代码进行物理上的分割，它实际上也是对 CPU 计算资源分配策略以及执行时序精确控制的一种体现，其目的就是将复杂的工艺流程分解为若干个可以独立管理的功能单元。

（一）主程序、子程序与中断程序划分

工业控制程序的编写也不再是在一个巨大的主循环里堆砌逻辑指令，而是逐渐向模块化设计的思想靠拢。主程序是系统骨架，主要用来调用各个功能模块、管理全局状态机、处理优先级较低的常规逻辑，比如系统启停控制、模式切换、常规状态显示等。一般按 PLC 设定的扫描周期循环执行，由于其执行速度受程序步数以及指令执行时间所限制，所以适合完成实时性要求较低的常规任务。

子程序设计可以达到代码复用、逻辑封装的目的。它把工艺功能，比如气缸

动作序列、模拟量换算标准块、设备初始化流程等，打包成独立的子程序。主程序根据工艺条件决定是否调用子程序，有条件地调用子程序的方式可以有效地降低 CPU 空闲负荷，也可以优化扫描周期。通过定义局部变量以及输入输出接口，子程序具有了良好的黑盒特性，大大提高了程序的可移植性以及调试效率。

中断程序是程序结构中最优先级的程序，它的主要作用就是打破主程序循环扫描的时序限制。它不参加主循环，而是等待某种条件发生。硬件输入信号跳变、定时器溢出或者通信端口接收到数据的时候，CPU 就会立刻停止正在运行的主程序或者子程序，保存当前的执行环境，然后跳转去执行对应的中断服务程序。中断处理结束以后，CPU 会自动把现场恢复成原来的样子，然后回到原来的断点处，继续执行原来的那个程序。此机制给系统处理突发事件赋予了“特权”，是达成高精度控制的关键。

主程序、子程序与中断程序在功能和实时性上各有侧重，其主要区别可见下表。

程序类型功能对比表

特性 / 程序类型	主程序	子程序	中断程序
主要作用	全局管理、低优先级逻辑	代码复用、功能封装	高优先级、突发事件响应
执行方式	循环扫描执行	被主程序或中断程序调用	由特定事件触发，立即执行
实时性	一般，受扫描周期限制	依赖调用者，较高可控性	极高，打破扫描周期限制
优先级	低	中（相对主程序）	高
应用场景	系统启停、模式切换、常规状态显示	气缸动作、模拟量转换、设备初始化	硬件信号跳变、定时器溢出、通信接收

（二）不同优先级任务的调度机制

现代中大型 PLC 的操作系统内核一般都具有抢占式或者协作式的任务调度功能，开发者可以给不同的程序块设置优先级。资源有限的控制器里，合理安排优先级是防止系统崩溃，保证关键任务完成的生命线。运动控制算法、PID（比例积分微分）闭环运算等对时间抖动十分敏感的任务一般被安排在高优先级队列里，人机界面交互、历史数据记录、报警日志归档等任务则被安排在低优先级队列里。

高优先级任务触发条件一满足，调度器就强制停止低优先级任务的执行。伺

服定位系统的位置环计算任务每 2 毫秒就执行一次。这时如果 CPU 正在处理一个比较耗时的人机界面数据刷新任务，那么调度机制就会立刻中断数据刷新，先完成位置环的计算，然后再利用剩下的时间片去处理一些优先级比较低的事情。抢占式的机制可以保证核心控制逻辑的确定性，有效的避免非关键任务过多占用系统资源造成的控制系统失稳。

在多任务同时执行的情况下，对看门狗定时器的设置就显得尤为重要。高优先级任务的执行时间过长或者触发过于频繁时，会使低优先级的主循环任务长时间得不到执行，造成扫描周期超时报警或者停机。工程师需要对各个任务的最长时间做出准确的估计，根据 CPU 的运算能力来设置任务周期以及看门狗阈值，在系统处于极端负载的时候保证各级任务动态平衡，既要保证关键控制稳定运行，也要保证常规逻辑不被“饿死”。

（三）任务间数据共享与同步问题

数据在多任务并行的环境下容易出现一致性、完整性问题，尤其是多个优先级的任务同时对一个全局变量进行读写的时候，容易出现竞争条件或者数据撕裂。以 32 位浮点数位置数据为例，主程序正在读取，当它读取了高 16 位的时候，正好碰上了一个高优先级的中断程序。中断程序修改了该位置数据的值，中断返回之后，主程序再读取低 16 位。最终，主程序拼出的数据就是原高 16 位+新低 16 位，这就造成了数据错乱，导致设备严重误动作。

为解决此类隐患，可以采取以下策略进行数据同步与保护：

1. 用原子操作指令或者临界区保护。对共享数据读写操作进行临时禁中，防止中间被打断，保证读写操作一次完成。会引起系统中断延迟，但是可以保证数据完整。

2. 使用双缓冲或者握手信号。设置两个数据缓冲区，一个写缓冲区，一个读缓冲区，用标志位来控制缓冲区切换。或者在任务间建立请求-应答的握手逻辑，只有在写任务确认数据有效之后，读任务才去访问，避免读取到处于中间状态的脏数据。

3. 严格区分局部变量和全局变量的作用域。尽量不要使用全局变量，限定数据交互的接口。使用跨任务标志位的置位、复位指令时必须小心，防止出现逻辑死锁或者状态覆盖的情况。

二、中断系统应用

中断系统就是 PLC 同外部物理世界高速交互的神经末梢，它赋予控制器一种超越自身扫描周期限制的感知与执行能力。用恰当的硬件中断、定时中断、通信中断等方式解决常规逻辑无法完成的工作，比如快速信号采集、高精度时序控制、异步数据交互等，也是提高设备性能的一种方式。

（一）硬件中断（如高速计数）的配置

对运动控制、长度计量、转速测量等工业场景来说，外接传感器输出的脉冲频率常常可以达到上千赫兹甚至兆赫兹。普通的数字量输入通道由于受输入滤波时间以及 PLC 扫描周期的限制，无法对如此快速的电平变化作出准确的响应，很容易造成脉冲丢失。采用硬件中断和高速计数器功能相结合的方式，是解决此问题的常规方法。采用专门配置的高速输入端子来跳过常规输入映像区的刷新过程，用硬件电路直接对输入脉冲进行计数，当计数值达到设定的值时，就触发硬件中断。

配置硬件中断的时候除了要考虑计数模式选择（单相、双相正交、CW/CCW）外还要考虑中断发生以后对应的响应逻辑。当飞剪设备编码器的计数值达到设定的长度时，就会产生中断。中断服务程序中必须立刻执行输出指令（一般采用立即输出指令直接对硬件端口进行操作，而不是写入输出映像区）以驱动切刀动作。从信号触发到执行机构动作的时间延迟一般为微秒级，保证了高速送料时的裁剪精度。

在干扰比较大的工业现场，硬件中断的滤波设置就显得特别重要。如果滤波时间设得太短，很容易导致中断误触发、造成设备误动作；如果设得过长就会引起信号延迟、影响控制精度。工程师要依靠示波器去观察现场的信号波形，权衡信号特性同噪声频率，进而挑选出恰当的硬件滤波参数。一些高端 PLC 具有输入信号锁存功能，即检测到信号跳变时，硬件会立即把当前的编码器位置值锁存下来，程序之后再读取，这样可以消除由于程序响应延迟造成的位置误差，特别适合于精密定位场景。

（二）定时中断的精确时间控制

定时中断给主扫描周期之外的高精度时间基准提供了一个独立的方式，是实现精细化过程控制的基础。很多化工、制药、热处理工艺都对温度、压力等模拟

量的变化率有严格要求，不单要精确的采样值，还需要严格的等时采样间隔。定时中断功能可以设置 CPU 每隔一定微秒或者毫秒就执行一次逻辑块，时间精度由晶振保证，误差很小。

1. 用定时中断来进行高频采样后做滤波。单纯依靠硬件滤波，在模拟量输入信号波动大的时候，一般得不到很好的滤波效果。可以在 10 毫秒定时中断内快速读取模拟量数值存入 FIFO 队列，再做滑动平均或中值滤波计算，得到的数据平滑性好，并且可以比主程序较长扫描时间（50 毫秒甚至更长）更快地捕捉到变化趋势。

2. 利用定时中断产生虚拟凸轮或者斜坡函数。在没有专用运动控制模块的情况下，可以用定时中断模拟脉冲输出的方式产生加减速曲线。每个中断周期内根据目标速度、加速度计算出当前周期的脉冲增量或频率，实时修正输出，用低成本的通用控制器实现较为平滑的电机速度控制。

3. 看门狗、安全监视。定时中断也可做主程序是否出现跑飞或陷入死循环的监视器。如果在定时中断的时候发现主循环的心跳标志在规定时间内没有更新，则判断系统出现异常，立即执行安全停机程序，构筑软件第二道安全防线。

（三）通信中断的数据处理

随着工业物联网、分布式控制技术的应用越来越广泛，PLC 要频繁地与变频器、仪表、扫码枪或者上位机交换数据。串行通信（RS485、RS232）或者基于 TCP/IP 的套接字通信通常是异步、耗时的。如果使用轮询的方式，系统在主程序中等待数据接收完成，就会造成系统响应时间的延后，同时增加扫描周期。通信中断机制使得 PLC 发出请求之后可以继续做其他逻辑，只在通信端口接收到数据字符或者数据包时才中断 CPU 进行处理。

自由口通信协议在发生通信中断的时候，处理过程会更加复杂并且重要。由于数据一般是以字符流的形式陆续到达，并且会出现分包、粘包的情况，因此中断服务程序要设计精巧的状态机来解析数据。一般采用接收字符中断和定时器中断相结合的方式：每当接收到一个字节就触发一次中断，把数据存入缓冲区并重新设置帧结束定时器；如果在规定时间内没有新的数据到达，就触发定时中断判断一帧数据是否接收完毕，然后置位标志通知主程序进行报文解析和校验。

对于大数据量以太网通信，中断处理还要考虑到缓冲区溢出和流量控制的问题。网络风暴或者上位机请求较多的时候，通信中断过于频繁会消耗大量的

CPU 资源，严重的时候还会造成控制任务的停止。高级 PLC 的网络接口一般都带有 DMA 功能，数据接收由网络芯片来处理，直接把数据写入指定的内存中，当数据包完全准备好之后才产生一次中断请求给 CPU。工程师在编写通信中断程序的时候应该遵循“快进快出”的原则，只在其中进行数据搬运、标志位置位等简单的操作，将复杂的协议解析、数据解包等耗时的操作交给主程序或者低优先级的任务来完成，从而达到通信吞吐量和实时控制性能的平衡。

第三章 PLC 通信与网络集成技术

伴随着工业物联网以及智能制造的发展，可编程逻辑控制器已经不再只是独立的控制单元，而是网络化控制系统中重要的一个节点。创建一个高效、稳定、有良好扩展性的通信网络，对设备互联及数据交流共享来说十分重要。本章主要研究现代 PLC 系统通信集成技术以及策略。

第一节 工业通信协议基础

底层通信协议运行机理、适应环境是自动化工程师做网络结构设计时需具备的基本素养。本节将从主流协议技术特点出发，结合选型决策模型来分析怎样构建最适合的工业控制网络。

一、主流工业通信协议对比

目前工业自动化领域所用的通信协议繁多，由于发展背景和技术路线的差异使各种通信协议在实时性、开放性以及应用侧重点上存在较大差别。分析主流协议的内部机制，有利于我们在实际工程中做出正确的选择。

主流工业通信协议特性对比表

特性协议	Modbus	PROFINET	EtherCAT	OPC UA
基础类型	串行 / 以太网	工业以太网	工业以太网	跨平台软件架构
实时性	低 (串行), 中	高, 极高	极高 (微秒级)	中 (非确定性)
传输机制	主从请求 - 响应	RT/IRT 分层	“飞速传输”	发布 - 订阅 / 客户端 - 服务器
主要应用	过程控制, 环境监测, 低速设备	工厂自动化, 运动控制, 集成诊断	高精度运动控制, 多轴联动, 机器人	OT/IT 融合, 数据语义化, 工业云
优点	简单, 开放, 成本低, 易于调试	实时性强, 诊断功能强大, 灵活	极致性能, 高效率, 精准同步, 分布式时钟	平台无关, 信息模型丰富, 安全性高
局限性	实时性差, 主从效率瓶颈, 不支持语义	部署相对复杂, 早期对西门子生态依赖	需要专用从站控制器, 主站需性能支持	实时性不及专用现场总线, 资源占用较高

从上表可以得出各种工业通信协议有各自独特的设计理念和侧重点，来满足各种不同的工业场合的需求。下面主要对各个协议的特点以及应用进行详细的分析。

（一）Modbus 协议家族特点与应用场景

Modbus 协议属于工业自动化领域中历史最为悠久、应用最为广泛的標準之一，它的主要优点就是简单、开放。该协议采用主从式架构，用请求 - 响应机制来完成数据交换，数据交换过程逻辑简单、容易调试。从物理层来说，它可以工作在传统的串行链路上，如 RS-232 或者 RS-485，于是产生了 Modbus RTU 和 Modbus ASCII 这两种形式；也可以将它封装到 TCP/IP 协议栈里面，变成 Modbus TCP 版本，从而符合以太网通信的要求。由于具有跨物理层的能力，因此成为了连接异构设备的通用语言，许多工业仪表、变频器、传感器都将它作为标配接口。

虽然 Modbus 在高速运动控制或者大数据量实时传输上有不足，但是其在过程控制以及环境监测中仍然不可替代。由于协议帧结构简单，有效载荷利用率高，在低带宽的环境中也可以保证稳定的通信质量。楼宇自动化系统中，大量温湿度传感器和电能表用 RS-485 总线以菊花链方式连接起来，主控制器用轮询的方式可以高效地采集几百个节点的数据。由于成本低，部署简单，在实时性没有太严苛的要求时，Modbus 仍然是最经济的选择。工程师到现场用串口调试助手可以很快查看到原始十六进制报文，迅速定位通信故障。直观透明的特点是很多复杂的、高级的协议所不能比拟的。

需要指出的是，Modbus TCP 虽然提高了传输速度，但是仍然保持了主从问答的模式，在实时性上也并没有加入确定性的实时调度算法。网络负载大的时候，以太网的 CSMA/CD 会带来不能预测的通信延迟。因此，在系统设计中一般将 Modbus 定位为信息层或低速设备层首选协议，用来做参数配置、状态监测、慢速过程变量采集等工作，而不会放在时间确定性要求很高的核心控制闭环里。

（二）PROFINET 实时通信机制解析

PROFINET 是工业以太网自动化总线标准，设计目的在于解决标准以太网在工业实时控制中的不确定性问题。创造性地将通信分成三层来满足不同的应用要求。非实时数据传输，比如 TCP/IP 配置、诊断信息等，采用标准的以太网通道；实时性要求较高的 I/O 数据，PROFINET RT 则通过以太网帧的优先级标记，跳

过复杂的 TCP/IP 协议栈,直接在链路层进行数据交换,循环周期可以做到数毫秒,基本能够满足大部分工厂自动化生产线的逻辑控制需求。

为了适应更为严格的运动控制要求,在硬件上加上了带时钟同步功能的 PROFINET IRT。用专门的 ASIC 芯片或者 FPGA,网络中所有的交换机和设备节点在时间轴上实现严格的同步,通信周期被分为同步通道和异步通道。在同步时间段内,只有属于 IRT 的运动控制数据帧可以发送,其他的则要等到下一个时间段,彻底消除了由于网络拥塞造成的抖动,实现了微秒级的同步精度。

1. 在典型的汽车制造焊装车间,PROFINET 网络可以连接数百台 PLC、工业机器人、大量的远程 I/O 模块和安全光栅。共享设备的功能,使同一个远程 I/O 模块可以被不同的控制器分时复用,极大提高系统的灵活性。

2. PROFINET 的另一大特色在于其强大的诊断功能和拓扑发现能力。控制器能够自动扫描网络结构,识别线缆断路、端口故障或设备型号不匹配等问题,并直接在工程组态软件中以图形化方式报警,从而大幅降低停机维护时间。

由此形成了全方位的技术架构,PROFINET 已经不单单是通信协议,它已经成为一个涵盖设备层、控制层、管理层纵向集成需求的完整生态系统。西门子体系的自动化项目里,即插即用的便利和深入的诊断能力被充分展现出来。

(三) EtherCAT 同步传输技术优势

EtherCAT 协议由于处理速度快、独特的“飞速传输”方式,使高性能运动控制有了新的标准。与传统以太网协议中每个节点都接收数据包并进行解析、处理、存储后再转发的“存储转发”方式不同的是,EtherCAT 的数据帧像一列高速行驶的列车,在整个网络链路中穿梭。当数据帧经过某个从站节点时,该节点的专用从站控制器会以硬件方式,在数据流传输的瞬间,直接读取属于自己的输出数据,并将输入数据“插入”到帧内预留的位置,整个过程只需要纳秒级的物理延迟,不需要 CPU 软件参与协议栈处理。

该种工作方式带宽利用率非常高。在典型的 EtherCAT 网络中,主站只需要发出一个以太网帧,就可以完成对成百上千个从站所有的 I/O 数据的采集,有效数据率可以达到 90% 以上。这意味着在百兆全双工网络下,系统可以轻易的达到几十微秒以下的通信周期,而且不会因为节点数量的增加而使得循环周期出现很大的延长。为多轴联动、电子凸轮同步、高速实时测量等场景提供很好底层技术支撑。

分布式时钟技术也是 EtherCAT 实现高精度同步的又一利器。借助对数据帧在各个节点之间传输延迟的测量，建立起全网统一的系统时间，可以使得全部伺服驱动器动作误差保持在极其微小的、远小于 1 微秒的范围之内。基于硬件的精确同步不依靠主站 PC 操作系统的时间精度，即使主站因为 Windows 系统抖动而产生延迟，从站仍可以按照本地的分布式时钟来精确触发动作，保证复杂轨迹加工或者高速印刷套色过程中的极致精度。

二、协议选型决策要素

在具体的工程项目中，没有一种协议能够适应所有的场景。因此，在选择通信协议的时候要考虑到技术参数、项目预算、维护成本、未来的发展前景等各方面因素。创建合理的选型决策模型可以保证自动化系统长期稳定。

（一）数据传输速率需求分析

评估数据传输速率需求时不能只看带宽是否最大化，应该对系统吞吐量和响应时间的要求做详细分析。对于运动控制系统，特别是在做多轴插补、电子齿轮同步的时候，通信周期的确定性（抖动）比带宽更重要。如果通信的抖动超出了伺服驱动器控制周期容忍的范围，即使带宽再大，也会造成电机动作不平稳或者加工精度下降。在此种场合下必须使用带有同步机制的实时以太网协议，根据轴数以及控制算法的复杂度来计算出最小的循环周期，保证指令下发的及时性。

相反，过程工业或者 SCADA 监控系统需要汇总成千上万个离散点位和模拟量参数。此时对于单次响应的实时性要求不高，几百毫秒内就可以满足，但是对于总线的数据吞吐能力却提出了考验。在选型时应根据节点数据量来计算网络带宽占用率。一般峰值负载时网络带宽占用不超过 50%，留有突发报警风暴或者诊断数据上传的余量。

非周期性数据的传输也要考虑，比如视觉检测系统传输高分辨率图像时，就会瞬间占用大量的带宽。若该数据流与 I/O 控制数据的传输共用同一个物理链路，则应该分析其 QoS 机制以保证大数据块的传输不会影响到关键的控制指令下发。对极限工况下通信负载做详细的通信流模型仿真，可以有效地避免网络瓶颈的产生。

（二）系统兼容性评估方法

系统兼容性评估的第一步就是查看目前的设备和遗留系统接口。棕地项目中

往往会有很多老旧设备,这些设备一般会使用某种私有协议或者是一代现场总线。此时的选型决策要考虑用网关进行协议转换,还是将所有的通信卡件换成统一型号。过多的协议转换网关会增大单点故障的风险,增大通信延迟,增大数据映射的工作量。因此,在条件允许的情况下,应该选择原生支持或者简单扩展就可以支持目标协议的方案。

1. 跨厂商互操作性属于兼容性评价的又一重要方面。尽管很多协议都宣称自己是开放的,但是实际上各个厂商对于标准的实现程度不同,有的厂商甚至在标准协议的基础上加上了私有数据结构,造成“互联而不互通”的现象。

2. 应当查看一致性测试报告或者要求供应商提供互操作性证明。对关键设备搭建最小系统进行原型测试,是检验兼容性最直接有效的方法。

3. 开发环境的集成度也不能忽视。即使是一样的协议,在不同的 PLC 厂商的组态软件中,配置的难易程度也会大相径庭。好的兼容性不只是硬件连通,软件的 GSD 或者 EDS 文件能轻易识别设备并且自动映射变量地址,这样就大大减少了工程调试的时间。

(三) 成本效益比计算模型

成本效益比不能只看硬件采购成本,应该用全生命周期成本模型来综合衡量。硬件成本包含 PLC 通信模块、交换机、线缆、接头、网关或者中继器。一些高性能的实时以太网协议主站成本低,但是从站设备必须使用专用的 ASIC 芯片,传感器、执行器单价高。而基于标准以太网硬件的协议,虽然对交换机有特殊要求,但是对节点设备的选择却有更多的、更经济的供应源。

施工成本也占据很大比例。布线是否方便直接关系到人工成本、工期。菊花链拓扑协议可以大幅减少线缆使用量以及布线工作量。以太网供电技术可以进一步简化现场配线。调试和编程的时间成本是隐性的大头,选用有良好诊断功能、丰富的功能块库的成熟协议可以快速找到问题、节省数天到数周的现场调试时间。

维护成本主要在系统长期使用中表现出来。抗干扰能力差的协议容易造成设备频繁停机、排查,造成生产损失。备件的可获取性、通用性也会影响协议的选择,使用市场上主流的、占有率高的协议,设备损坏时更容易、更便宜地找到替代品。只有在对上述所有的指标都完成量化之后,再结合系统的预期使用寿命来制作详细的投资回报率分析表,才能找到性能和成本的最佳匹配。

第二节 PLC 与现场总线深度融合

在现代工业自动化体系当中，可编程逻辑控制器同现场总线的深度整合，成为了达成分布式控制的决定性一步。该种集成方式彻底改变了以往点对点接线的麻烦，大大降低了布线成本和维护难度，也给底层设备数据实时采集、故障诊断、各层次间信息高效交换提供坚实的物理通道和协议基础。

一、典型现场总线系统架构

在众多的工业应用场景当中，现场总线架构是否合适是搭建高效控制系统的要素之一。不同的总线协议在物理层特性、数据链路层控制以及上层功能定义上存在着较大的差别。工程师要综合考虑实时性需求、传输距离、电磁兼容性等各方面因素，选择合适的总线协议，做好总线架构的设计。

（一）Profibus-DP 主从通信模式

Profibus-DP 是高速数据传输协议中的佼佼者，在制造业自动化系统中使用较多。主要结构是对 RS-485 物理层进行优化改进而形成的。协议采用主从通信模式工作，网络中一般有两种主站：一种是执行控制逻辑的主站，另一种是单循环交换控制的主站。实际运行时，主站之间通过令牌传递的方式获得总线的控制权，保证多主站系统逻辑上有序；主站和从站之间采用轮询的方式进行数据交换。该种混合介质访问控制方式既能保证固定的循环周期，又可以满足突发性的诊断数据传输。

为了使 Profibus-DP 的数据链路层有秒级的通信响应速度，就去掉多余的校验部分，用严格的报文格式和时序保证高可靠性。配置阶段中工程师要按照设备描述文件，把从站参数准确映射到主站的硬件组态里。输入输出字节长度定义错误，都会造成总线初始化失败。对于含有智能从站的复杂网络来说，系统还须要支持非循环的数据通讯，在此基础之上，可以在不打乱过程控制的情形之下，随时更改参数并详尽地获取各个设备的状态信息。因此，该总线在驱动器控制、远程接口扩展等方面有很好的应用，即使在工业现场电磁环境恶劣的情况下，依靠屏蔽双绞线和正确的接地方式，也能保持较低的误码率。

虽然工业物联网的发展使得工业以太网逐渐代替了传统的 DP 网络，但是由于存量市场和独有的应用场景，使得 DP 网络所特有的时序特征并不能被完全替

代。为了提高系统的可用性，常常采用冗余的配置方案，如线缆冗余、主站冗余等。这就要求控制器在单一总线链路发生故障的时候，可以平滑地切换到备用链路，并且严格控制切换期间数据丢失量，使它保持在允许的安全范围内。

（二）DeviceNet 设备层网络设计

DeviceNet 网络采用控制器局域网技术构建，是为底层设备互联设计的。其最显著的物理特点就是用一根带有两个双绞线的专用电缆同时传输 24V 直流电源和通信信号。极大地简化了传感器、光电开关等低功耗设备安装过程，不需要给每一个末端节点单独布线。在网络结构上，它打破了传统意义上的严格主从关系，提出生产者和消费者模型，即网络中任意节点在一定的触发条件下可以主动发送数据；其他相关的节点可以根据自身的需求选择接收或者忽略。该种机制大大提高了带宽利用率，对大量的离散量输入输出而言，能很好地减小总线负载，缩短系统响应时间。

1. 物理拓扑结构上，DeviceNet 使用干线加支线的方式，但是支线长度受到严格的限制。过长的支线会引起信号反射、阻抗不匹配造成通信不稳。工程中一般采用粗缆做干线，减少电压降，保证远端设备供电质量，细缆连接现场设备，便于在狭小的空间内进行布线。

2. 为了保证网络供电的稳定，电源模块的接线位置要准确计算，一般设置在网络负载中心，实现两侧压降平衡。当网络规模大、设备耗电量高时，单个电源很难保证末端电压达到规定的要求。此时应该使用辅助电源或者分段供电的方法，在不同的网段上注入能量，并且要严格隔离各个电源回路，防止出现环流。

该总线在配置时使用开放的设备供应商协会标准，不同的厂家设备只要通过一致性测试就可以在同一个网络中互连互通。扫描器配置要设置波特率，还要对每个节点的输入输出长度、轮询频率和故障响应行为作出具体的规定。对关键任务节点，系统支持变化状态触发模式，即只当数据发生实质性改变的时候才占用总线发送报文。比起传统的周期性轮询，这样极大地节约了网络资源，使得低波特率下也能实现实时控制。

（三）CANopen 总线配置要点

CANopen 是一种基于 CAN 物理层的高层协议，被广泛地应用在运动控制、工程机械等领域。最主要的应用就是对象字典的标准化定义。对象字典是设备与网络交互的唯一接口，包含了通信参数、应用数据和设备状态等所有的信息，用

索引、子索引寻址。网络配置时要先确定网络管理的主站，一般由可编程逻辑控制器来担任，主站负责监控所有从站的生命周期，即初始化、预操作、操作、停止状态的切换。心跳报文或者节点守护机制，可以对各个节点的在线情况进行实时监控，如果某个重要节点在规定的时间内没有向主机发送心跳信号，主机就会启动安全停机程序。

过程数据对象传输实时性要求高的控制指令和状态反馈信息，传输形式灵活，可以同步传送也可以异步传送。多轴同步控制中，同步对象报文是全网络的时间基准，各个伺服驱动器根据这个时间基准，在相同的微秒级时间上采到位置信息或者执行动作指令，从而保证机械系统运动的协调性。服务数据对象用来实现非实时参数访问，比如系统启动的时候下发发电机参数或者运行过程中读取故障代码。这样即使数据量较大的参数传输也不会影响到关键控制数据的实时性。

对总线仲裁机制加以理解，对于改善 CANopen 网络性能来说十分关键。CAN 总线用标识符的数值大小来决定总线访问优先级，数值越小优先级越高。在配置阶段，工程师应按照设备的重要性给节点 ID 分配合适的优先级，一般把运动控制器的过程数据对象优先级设置得高一些，而普通输入输出模块或人机界面的通信优先级设置得低一些。网络负载过高时，低优先级报文就会存在发送延迟的风险。因此，在系统设计时就要留有足够的带宽裕量，对某些高频发送设备的数据流进行抑制，防止造成总线拥堵。

（四）FF 现场仪表集成方案

基金会现场总线是过程自动化领域全数字化的发展方向，它不单单是一种通信协议，更是一种将控制功能下放到仪表端的分布式控制思想。H1 网段属于低速层，主要联系现场变送器，执行机构以及传感器。其物理层符合标准，具有本质安全防爆特性，可以直接在危险区域通过总线给仪表供电。集成方案最大的优势就是使用功能块，标准的控制算法，比如比例 - 积分 - 微分调节、算术运算等等都被集成到仪表里面，由调度器来调用，控制回路可以直接在现场仪表之间形成闭环，不需要上传到中央控制器进行处理，因此控制回路的响应速度和可靠性大大提高。

集成 FF 总线的时候，链路活动调度器的设置很关键。调度器是总线上的交通指挥官，周期性数据获得确定的时间片进行处理，非周期性数据（报警、趋势上传等）获得预留的时间段。冗余设计一般把主控系统的接口卡作为主调度器，

具备相应能力的现场仪表作备用调度器。主控链路断开时，现场仪表可自动取得总线调度权，保证底层控制回路正常工作。FF 总线具有容错性，因此被炼油、化工等连续生产行业所青睐。

工程实施时要注意网段的设计。每一个 H1 网段所连接的设备数量受到地址空间的限制，也受到总线供电电流和信号衰减的影响。工程师要算出全部仪表的静态电流与启动电流之和，保证不大于电源调节器的输出能力，还要算出最远端仪表的端电压，保证不低于最低工作要求。FF 总线的终端匹配器不能少，网段的两端都要装，用来消除信号反射。缺少或者位置不对都会造成通信波形畸变，从而引发频繁重传乃至通信断开。

常见现场总线协议特征对比表

特征类别	Profibus-DP	DeviceNet	CANopen	基金会现场总线
物理层	RS-485	CAN	CAN	IEC 61158-2
通信模式	主从	生产者 / 消费者	主从 / 多主	功能块调度
供电方式	外部电源	总线供电	外部电源	总线供电 (本质安全)
典型应用	制造业自动化、高速 IO	离散制造、设备层互联	运动控制、工程机械	过程控制、本质安全
数据传输	快速循环 IO	事件触发 / 轮询	过程数据对象	功能块通信、周期性
实时性	毫秒级	较好 (事件触发)	高 (同步帧)	确定性 (LAS 调度)
布线特点	屏蔽双绞线、线性	干线 + 支线、专用电缆	屏蔽双绞线	本质安全防爆电缆
主要优势	高速、稳定、广泛应用	简化布线、高效利用带宽	灵活、标准化对象字典	分布式控制、本质安全

从上表可知不同的现场总线协议在物理层、通讯方式、供电方式、典型应用等各方面存在不同的优势与特点。

二、总线网络实施要点

理论架构的完善不等于工程落地成功。现场总线系统稳定运行更多的时候取决于物理层实现细节的质量。从布线拓扑的严格规定到电气特性细致匹配，任何一个环节的疏忽都会成为系统以后偶发故障的隐患。因此必须严格依照一套工程实施规范。

(一) 拓扑结构规划原则

工业现场总线实施时，拓扑结构选择的好坏会直接影响信号完整性以及系统

抗干扰能力。理论上有些总线可以采用星型或者树型结构，在高速通信场合，线性(手拉手)拓扑仍然是最好的选择。线性结构可以最大程度地保证阻抗的连续性，减小信号在分支点处的反射波，保证波形清晰。当必须使用 T 型接头或者分支电缆的时候，必须严格控制分支长度。高速的 Profibus 或者 CAN 网络分支长度一般限制在很短的范围内，甚至建议完全避免分支，直接将线缆引入设备接线端子。

1. 从布线路径的规划开始就要考虑电磁兼容性。通信线缆应与动力电缆分槽敷设，并保持一定平行间距，一般大于 20cm。若无法避免交叉，必须呈 90 度垂直跨越，用几何正交性来抵消互感耦合产生的干扰。金属线槽的连续接地可以起到屏蔽高频干扰的作用，线槽之间用编织铜带做跨接，保证整个线槽的低阻抗等电位连接。

2. 对于移动设备或者旋转平台，普通的屏蔽双绞线不能承受反复弯曲的应力，必须采用专用的拖链电缆或机器人电缆，在布线时也要留有应力释放环。光纤由于具有对电磁干扰免疫的特性，常被用作车间之间或者电柜之间的长距离传输介质。光电转换中继器把电气网段隔离开，一方面可以延长传输距离，另一方面可以切断地电位差所造成的环路电流。

对于多网段的大系统来说，合理的分段可以将故障域进行隔离。利用中继器或者网桥把总线分成几个独立的物理段，可以改善信号波形，并且能保证某段出现短路或者断路故障时不会影响到整个网络。规划时要尽量把物理位置相邻或者功能相关的设备放在同一个网段中，减少跨网段的数据流量，预留物理接口和地址空间为以后的设备增加做准备。

(二) 终端电阻配置技巧

终端电阻在场总线网络中是吸收信号反射能量的部件，它的配置是否合理直接影响到通信是否成功。高频信号到达电缆末端时，如果遇到特性阻抗匹配的负载，能量就会沿着原路返回到发射端，而如果遇到的是不匹配的负载，则能量将沿原路反射回来，和入射波叠加形成驻波，造成信号电平畸变和误判。因此，在总线的物理链路两端最远的两个点上要接入终端电阻。RS485 总线一般需要接入 120 欧姆的电阻，在 Profibus 系统中，终端电路更加复杂，包含上拉、下拉电阻来保证总线空闲时为高电位、低电位，防止噪声导致接收器触发。

实际调试时常见的错误就是少接或者多接终端电阻。遗漏会造成波形出现震荡，通信时断时续，多接会使得总线等效阻抗大幅降低，驱动器电流超载，信号

幅度衰减到阈值以下。许多现代总线连接器内部装有可拨动的终端电阻开关,该设计给使用者带来便利的同时,也存在一定的风险,即维修人员可能会无意中改变开关的位置。因此,在工程验收时,应使用万用表测量断电状态下 A、B 两端的电阻值,或者使用专业的手持式分析仪检测有源状态下总线的阻抗,保证总线阻抗在规定范围内。

使用有源终端电阻是提高网络稳定性的进阶方法。传统的无源终端电阻需要末端设备提供电源来维持偏置电压,当末端设备断电时,终端电阻的偏置电压也随之消失,会造成整个网段不稳定。使用独立的有源终端模块,可以保证总线的物理终端特性不随末端设备状态变化而改变。末端设备的插拔、断电检修在柔性制造系统中比较频繁,这一点尤其重要,能有效防止因为单点维修造成整个网络瘫痪的风险。

(三) 地址分配策略

设备地址是可编程逻辑控制器对总线节点进行识别、管理时的逻辑地址。合理的设备地址分配策略可以简化编程,提高维护性。传统硬件寻址模式下,工程师要手动拨动设备上的 DIP 开关或者转动编码盘来设置地址,容易造成人为错误,引起地址冲突。为了避免出现这种情况,应该建立详细的地址映射表,按照物理位置的顺序或者功能模块分组的原则进行分配。1 到 10 号地址留给主站和人机界面设备,11 到 50 号地址给数字量输入输出模块,51 号以后的地址给变频器和伺服驱动器。分段管理方式使得地址本身就包含了设备类型的信息。

随着总线技术的发展,软件自动分配地址或者根据序列号的寻址方式也被采用。在一些高级协议里,控制器按照设备接入端口的拓扑顺序给逻辑地址分配,更换故障设备的时候很方便,维护人员不需要考虑新设备的地址设置,物理连接之后就可以。实施该方案时,要保证拓扑结构的物理一致性,任何线缆连接顺序的改变都会导致逻辑地址错位,因此必须配合严格的线缆标识和文档管理。

跨网段地址透明性是处理多层网络结构时不能忽略的因素。网关集成异构网络时一般要涉及到地址转换以及协议转换。策略上应该使映射逻辑简单明了,尽量避免使用复杂的动态映射给调试带来麻烦。对重要的过程控制设备采用固定的静态地址,对不常用诊断工具以及临时接入的设备采用动态地址预留。必须在总线配置软件中打开地址冲突检测功能,保证系统上电初始化瞬间就可以立即捕获到所有的重复 ID,防止由于错误的地址而造成执行机构的误动作。

（四）网络负载优化方法

网络负载率是体现总线好坏的重要指标。过重的负载既会加大数据传输的时延，又会使系统抵御突然出现的数据暴风雨的能力下降。优化网络负载首先要合理设置扫描周期或者请求包间隔。并不是所有的设备都需要毫秒级的更新频率，温度、液位等变化缓慢的过程量可以将更新周期设为几百毫秒甚至秒级；而运动控制的位置反馈则要配置最短的更新周期。对不同的设备采取不同的等级设置，可以很大程度上削减非关键数据所占的总线带宽。

1. 数据长度不能太短，精简也是必须的。组态时要仔细选择传输数据对象，只把控制逻辑需要的状态字、控制字映射到过程映像区，去掉无用的调试信息或者冗余参数。对 CANopen 这样的基于对象的协议来说，可以利用传输类型参数，把一些状态数据设置为只有在数值发生变化时才发送，而不是定时发送。该种事件触发的机制可以明显提高总线有效信息传输的效率。

2. 在多主站或者高流量网络中，用总线分析工具对流量进行监控是必不可少的。分析报文时间分布可以找到数据拥堵的时间。周期性拥堵可以通过调整主站轮询起始相位偏移，使各个设备通信时间错开在时间轴上来达到削峰填谷的目的。

物理分段也是降低负载的一种方法。当单网段的设备过多，使得通信周期无法达到要求时，就要坚决将网络划分成多个独立的子网。通过增加通信处理卡或者利用网关隔离的方式，把局部的高速数据流在子网内部消化掉，只将必要的交互数据上传到上层网络。这种“分而治之”的办法虽会使硬件成本有所上升，但是可以大大提高系统的实时性与稳定性，对于大型自动化流水线的实施而言，这是保证生产节拍所必需采取的措施。

第三节 以太网及工业以太网应用

伴随着工业 4.0、智能制造战略的不断发展，传统的现场总线技术正在向以太网技术发展。工业以太网在保留标准以太网高带宽、通用性等优点的基础上，对工业现场恶劣环境和实时性要求进行了改进。本节主要研究标准以太网向工业以太网技术的发展过程，对目前主流的实时以太网技术方案和时间敏感网络的时间敏感网络进行分析，并结合 5G 融合趋势，从理论、网络部署等方面为工程技术人员提供指导。

一、工业以太网技术演进

工业通信技术的革新不是一步到位的，在半导体技术、网络协议以及控制需求不断发展的进程中逐步完成的。从开始满足办公自动化通信需求，到现在承载着毫秒级的运动控制指令，工业以太网发展成了一套完整的体系，完成了信息层与设备层的对接。

（一）标准以太网与工业以太网差异

标准以太网最初设计的目的是给办公自动化环境服务，它的主要机制是载波监听多路访问 / 冲突检测（CSMA/CD），因此网络传输具有不确定性。数据流量大的时候数据包发生碰撞造成不可预测的回退重传，造成不可控的延迟。抖动对实时性要求很高的工业控制系统来说是致命的，因为 PLC 必须保证指令在规定的时间内准确地到达执行机构。运动控制轴的同步指令出现毫秒级的偏差，就会造成机械臂轨迹偏离或者发生碰撞事故。工业以太网是标准以太网的数据链路层、应用层的改进，采用时间分片、令牌分配、专用硬件处理等方法，彻底消除了传输的随机性，保证数据传输有确定性、实时性。

物理层硬件差异大，商用以太网设备大多采用塑料外壳，在震动环境下容易松动，抗电磁干扰能力差。工业以太网交换机，接口模块使用金属外壳防护等级一般为 IP67 或以上宽温、抗振、抗干扰。接口处用 M12 航空插头代替易损的 RJ45 接口，保证油污、粉尘等恶劣的工厂环境下连接的可靠性。工业设备一般都具有双路冗余直流电源输入和掉电报警功能，商用设备一般只具有单路交流供电。

就网络拓扑结构来说，标准以太网大多采用星型拓扑，依靠核心交换机来实现数据转发。工业现场为节省布线成本，适应流水线布局，线型、环型拓扑较多。工业以太网协议对底层驱动进行了专门的优化，使设备具有双端口直连的功能，可以实现“手拉手”式的设备串联。同时它支持环网冗余协议，在通信链路断开时可以毫秒级完成自愈来保证生产的连续性。

（二）实时以太网解决方案对比

目前市场上的主流实时以太网协议种类繁多，各自侧重不同的实时性实现路径，共同构建了百花齐放的工业通信生态。下表为主流实时以太网解决方案的特点和差异。

主流实时以太网解决方案对比

特性 / 协议	PROFINET	EtherCAT	EtherNet/IP
核心特点	基于西门子体系 RT: 软件栈优化, 绕过 TCP/IP IRT: 专用 ASIC 芯片, 等时同步	“飞越”传输技术, 数据帧“穿透式”处理 极大带宽利用率 从站硬件读写	遵循 CIP 通用工业协议 强调与标准以太网硬件兼容性 基于 UDP/IP 协议栈 CIP Sync/Motion 扩展
实时性能	RT: 适用于一般 IO 控制 微秒级抖动控制, 高动态伺服	刷新周期可低至几十微秒 卓越的速度和同步性能	极限刷新速度略逊于 EtherCAT 满足大多数实时性要求
网络兼容性	与西门子生态紧密结合 RT 可用于标准以太网 IRT 需专用交换机 /ASIC	主从结构, 需专用控制器或接口	开放性高, 支持标准交换机组网 便于与企业信息网络融合
典型应用	流程自动化、离散制造 一般 IO 控制、高动态伺服驱动	高精度运动控制、机器人 快速 I/O、模块化设备	过程控制、离散制造 跨厂商设备集成

PROFINET 技术基于西门子的自动化系统, 分成 RT 和 IRT 这两种通信级别。RT 通信通过优化的软件协议栈绕过 TCP/IP 层直接在以太网层传输数据, 适用一般的 IO 控制; IRT 通过专用 ASIC 芯片实现等时同步, 它在交换机内部预留高优先级的带宽通道, 将网络划分为同步时钟域, 可以做到微秒级的抖动控制, 广泛用于高动态伺服驱动系统。

以太 CAT 以优越的处理能力而著名, 它用飞越传输技术打破传统接收、处理、传输的工作模式。主站发送的数据帧经过每一个从站时, 从站控制器直接在硬件层面上读取对应的数据并写入反馈, 数据帧不需要在每一个节点停留处理。飞越机制极大提高了带宽利用率, 单个以太网帧可以携带成百上千个 IO 点的数据, 刷新周期可以达到几十微秒。

EtherNet/IP 遵照 CIP 通用工业协议, 突出同标准以太网硬件的兼容性。它使用 UDP/IP 协议栈, 并且通过 CIP Sync 和 CIP Motion 扩展来完成时间同步以及运动控制。虽然极限刷新速度比 EtherCAT 稍差一些, 但是开放性好, 支持标准交换机组网, 容易和企业信息网络融合, 在过程控制和离散制造中拥有大量的用户。

(三) TSN 时间敏感网络应用

时间敏感网络是下一代工业通信的统一标准。它是由 IEEE 802.1 工作组制定的以太网架构上的确定性数据传输服务的一系列标准。TSN 的核心价值就是打

破了不同的工业以太网协议之间的壁垒，在 OSI 第二层提供通用的实时机制，使不同的厂商设备可以在同一个物理网络上共存并且互不影响。这对构建扁平化、融合化的工业互联网架构来说，具有革命性的意义。

TSN 用流量调度机制来解决带宽争用问题。IEEE 802.1Qbv 标准定义了时间感知整形器，把交换机出口队列分成不同的优先级时隙。在重要的控制数据传输窗口期阻断视频监控、文件传输等非实时数据，保证控制数据的正常传输。这就像在繁忙的公路上设置潮汐车道，在特定时间段内只供特种车辆使用，把非关键流量完全排除在控制周期之外。

帧抢占同样是 TSN 的又一明显优点。在传统的以太网中，当一个长数据帧正在被传输时，高优先级的紧急帧必须等到这个长数据帧传输完毕之后才能进行传输。IEEE 802.1Qbu 和 802.3br 标准可以使得交换机在传输长帧的时候把正在传输的长帧切分，优先发送紧急控制帧；当紧急控制帧发送完毕后再继续传输剩余部分。接收端会自动把它们重新拼起来。因此高优先级的数据可以很快地处理完毕，提高了网络应对突发情况的速度。

时间同步是 TSN 运行的基础，IEEE 802.1AS 标准是在 IEEE 1588 协议的基础上发展起来的，可以为整个网络设备提供高精度的时间同步服务。在 TSN 网络当中所有的交换机、终端使用同一个全局的时间标准，其同步精度可以达到纳秒级。从而使工厂内分布在不同地方的机械手、传送带、传感器，像训练有素的乐队一样一起工作，给复杂的协同制造提供坚实的保障。

二、网络部署实践指南

网络规划和布线，是 PLC 系统正常工作的保证。一个好的工业网络除了要满足现在的通信需求外，还必须具有良好的扩展性、安全性以及抗灾能力。工程实施阶段的重点有交换机选型、VLAN 逻辑划分以及冗余机制设置。

（一）交换机选型参数

工业交换机的选型应该根据具体的应用环境来决定，而不能只看端口数量和价格。背板带宽和包转发率是交换机性能的主要度量。在 PLC 控制网络中，虽然单次传输的数据包小，但是发送频率高，广播、多播报文量大。如果背板带宽不够，在高负载的时候会产生丢包现象，从而造成 PLC 通信故障。因此应该使用线速转发的交换机，保证所有端口在满负荷双向传输的时候都没有阻塞。

管理功能是傻瓜式交换机和智能工业交换机最明显的一点区别。对于中大型的 PLC 系统必须使用网管型交换机。该类交换机支持 SNMP 协议，可以被 PLC 或者上位机实时监控端口状态、流量负载和链路质量。端口镜像的功能对于故障排查十分重要，技术人员通过镜像端口来获取数据包，之后利用 Wireshark 这样的工具对通信协议进行解析，就可以很快找出通信故障所在的原因。

环境适应性参数也不能忽视，在电柜内部，电磁环境十分复杂，变频器、伺服驱动器高频开关产生的电磁干扰十分强烈。工业交换机必须通过 EMC 测试，并且要有较高的浪涌、静电抗性。工作温度范围一般要达到 -40°C 至 85°C ，普遍采取了无风扇散热的方法避免因风扇故障而造成设备过热停机。对于安装在防爆区域的设备还要看其防爆认证等级。

（二）VLAN 划分策略

随着工业现场设备数量的增加，将所有的设备放在同一个广播域里是非常危险的。一旦出现广播风暴，PLC 的 CPU 资源就会被瞬间消耗掉，造成控制逻辑卡顿甚至停机。虚拟局域网技术从逻辑上把物理网段划分成了几个互相隔开的广播域，能够隔离不相关的流量，在保障安全的同时又可以提高网络效率。

实际部署时一般按照功能区或者设备种类来划分 VLAN。可以对所有实时控制流（PLC、IO、驱动器）归为同一个 VLAN，将人机交互数据（HMI、SCADA）划入另一个 VLAN，将视频监控数据划分到第三个 VLAN 中。对于需要跨 VLAN 通信的业务，例如 SCADA 系统采集 PLC 的数据就需要三层交换机或者工业防火墙进行路由转发。这样即使视频网络出现拥塞或者遭到攻击，也不会影响到底层的生产控制网络。

端口优先级设置要和 VLAN 策略结合。可采用 IEEE 802.1p 标准，对各个 VLAN 流量打标签。把控制数据所用的 VLAN 优先级设为最高，当交换机出口队列拥塞时可以保证控制数据优先转发。这对于混合传输视频流和控制流的综合网络来说尤其重要，可以有效地防止大数据量的非关键业务“淹没”小数据量的关键控制指令。

（三）网络冗余设计

工业生产对连续性的要求很高，一条链路发生故障就会导致整条生产线的停产，造成巨大的经济损失。物理冗余是最基本的保证。布线时要考虑走线路径的异构性，不能让主备光纤同时穿过一个容易受到物理破坏的管道或者桥架。

环网冗余协议是工业以太网中应用最广、效果最好的一种可靠性方法。传统的 RSTP 生成树协议虽然通用，但是它的收敛时间一般要达到秒级以上，不能满足运动控制的严格要求。工业领域普遍使用 MRP 介质冗余协议或者各个厂商私有的极速环网技术（HiPER-Ring、Turbo Ring 等）。协议在环网里挑选出一个主控节点来担负链路状态的监视任务，只要发现断链状况，就能在 20 毫秒以内把数据路径切换过来。此时 PLC 只能检测到一次丢包，不会出现停机故障。

核电、冶金、高精尖半导体生产等重任务场合，毫秒级切换时间还显得不够。并行冗余协议 PRP、高可用性无缝冗余 HSR 给出的是零丢包的终极办法。PRP 机制中源节点把数据帧复制成两个一样的副本，然后通过局域网 LAN A 和局域网 LAN B 分别发送出去。接收节点会优先接收第一个到达的帧，并丢弃后面的副本。即便出现一个网络故障，数据的传输也并不会断连，可以顺利实现无缝切换。虽然会增加硬件成本和布线的复杂度，但是为了保证核心资产的安全运行，这是必须的投资。

第四节 无线通信与远程监控

伴随着工业 4.0 理念深入人心，传统的现场总线、工业以太网已经不能满足越来越灵活的柔性制造需求。无线通信技术由于具有部署方便、移动性高、维护成本低等优点，正逐渐成为 PLC 控制系统的不可缺少的一部分。它冲破了物理空间的枷锁，让工程师不必受地域的限制，对生产现场进行即时的诊断与操控，工业自动化由此迈出了从封闭走向开放的一大步。

一、无线技术应用场景

由于工业现场环境复杂，电磁干扰严重，金属遮挡物多，单一的通信协议不能满足各种不同的应用要求。工程师一般依照数据吞吐量，传输距离，功耗这些具体需求，去挑选并且把不同的无线技术组合起来。从高速率的局域网覆盖到低功耗的广域网采集，无线技术的选择直接影响控制系统的稳定性、实时性，合理地规划频谱资源、设计网络拓扑是实现工业互联互通的前提。下表给出了工业常采用的无线通信技术及特性。

工业无线通信技术特性对比表

技术名称	典型范围	数据速率	功耗水平	网络拓扑	关键应用场景
Wi-Fi 6	数十米至数百米（室内）	数百 Mbps 至 Gbps	高	星型	高速数据回传、机器视觉、AR/VR、移动机器人通信
LoRa	数公里至数十公里	0.3-27 kbps	极低	星型	广域监测、资产追踪、低频次数据采集、恶劣环境连接
蓝牙 Mesh	数米至数十米（跳传可延展）	数十 kbps 至数百 kbps	低	网状	工业照明、环境感知、资产追踪、设备互联
NB-IoT	数公里至数十公里（广域）	数十 kbps 至百余 kbps	极低	蜂窝	远程抄表、设备状态监控、资产追踪、深度覆盖区域数据采集

（一）Wi-Fi 6 在工厂环境部署

Wi-Fi 6 技术最大的优势是引入了正交频分多址技术，从根本上改变了工业环境下无线网络的竞争机制。在以前的标准中，多台自动导引车或移动机器人同时试图和 PLC 通信的时候，由于信道冲突会带来不可预测的延时，这对实时控制来说是致命的。新一代技术使路由器能够把频谱资源分成更小的资源单元，在同一时间向多个终端设备发送数据，大大减少网络延迟和抖动，保证控制指令的确定性到达。考虑到工厂内部大量的金属货架以及大型设备造成的多径效应，信号衰减一直就是无线部署的难题，Wi-Fi 6 采用波束成形技术智能感知接收设备的位置，把信号能量集中对准目标，改善了信号的穿透力和覆盖范围。

对于工厂内部设备密集接入的情形，基本服务集着色机制起到了重要的作用。给不同的相邻网络的数据包加上不同的颜色标识，终端设备就能忽略来自不属于同一个网络的信号干扰。对于几百个 PLC 和传感器分布在同一工厂区域的场景来说，该特性就显得尤为重要。它允许通过增加接入点来增加总的带宽，同时有效地避免了由于同频干扰而造成的网络性能下降或者崩溃。为了提高可靠性，工业级 AP 一般采用双 5G 频段冗余的方式，当某个频段被突然强干扰的时候，系统可以在毫秒内切换到备用频段，保证生产数据零丢包。

目标唤醒时间功能为电池供电的工业传感器提供了革命性的能耗管理方案，对电池供电的工业传感器来说意义重大。PLC 主控系统可以与终端设备约定一个唤醒时间。在非通信时期间，设备会转入到深度休眠状态中去，这样就大大地增

长了 AGV 小车或者无线传感器的电池寿命，可以增长数倍。网络规划的时候，工程师要借助专门的现场勘测工具来画出信号热图，然后经由改变发射功率以及天线角度的方式来消除信号盲区。对于任何移动路径来说，PLC 同服务器之间的链路品质都要处在高调制编码策略区间，如此便可以达成千兆级别的无线吞吐速率，以此来迎合机器视觉检测等那些需要大量数据及时返回的状况。

（二）LoRa 远距离传输方案

LoRa 技术采用线性调频扩频调制原理，用很低的功耗实现数公里的通信距离，很适合厂区范围大或者分散型设施的监测场景。对于分布在数平方公里范围内的水处理厂或者油气管道阀室，铺设光纤的成本很高、维护麻烦，而 LoRa 网络提供了一种更加经济可行的解决方案。LoRa 独有的扩频技术使它具有非常高的接收灵敏度，在信号强度低于噪声基底的时候，接收端仍然可以依靠先进的解调算法正确地恢复数据。即便是在地下管廊、厚重的混凝土墙阻隔这样恶劣的环境下，LoRa 依然能够稳定的连接，保证偏远节点 PLC 的数据上传通道。

建立基于 LoRa 的工业私有网络时，一般会选取星型拓扑结构。所有终端节点和网关直接通信，不需要经过多跳路由，避免了多跳路由带来的各种复杂问题及延迟累加的现象。由于 LoRa 工作在未授权频段上，所以信道资源较少，协议一般会采用轮询和事件触发相结合的方式。以 PLC 为主站，只在需要获取状态时才进行查询；或者终端发现异常数据时主动上报。可有效地降低数据产生的冲突几率，节省了空中时间。对重要的控制指令，应用层会增加确认重传，虽然这样会损失一些带宽，但可以保证指令一定送达。

1. 自适应数据速率是提高 LoRa 网络性能的主要方法。网关会按照终端信号质量的变化，自调扩频因子、发射功率。当 PLC 设备距离网关较近的时候，系统就会自动降低扩频因子来提高数据传输速率并缩短空中占用时间；反之，对于处在边缘地带的设备，系统就会提升扩频因子，以牺牲速度为代价来换取更远的传输距离以及更强的抗干扰能力。

2. 为了避免同频干扰，先进的 LoRa 网关一般会用多通道同时监听来解调具有不同的扩频因子的多种信号。由于正交性，不同速率的终端可以同时在一个信道里工作，不会相互干扰，极大提高了单网关接入的能力，一个网关可以接入数千个低频次上报的传感器节点。

（三）蓝牙 Mesh 设备互联

蓝牙 Mesh 网络摒弃了传统主从连接模式，而采用多对多泛洪式通信机制，使得网络中的每一个节点都可以充当中继器转发数据。工业照明控制和环境感知系统中的去中心化结构有很强的鲁棒性。就算某个关键路径上的 PLC 节点由于故障而停止工作，数据包也可以通过绕行的方式找到其他的路径到达目的地，从而提高了网络的韧性。在大规模的传感器网络中，工程师不需要给每一个设备单独配置路由表，设备上电之后就可以通过自动配置协议加入到网络中，大大缩短了调试时间。

该技术功耗很低，使用的是低功耗蓝牙底层协议，大部分终端节点可以以微安级电流进行待机。附着在周转箱上的 Mesh 标签可以实时和沿途的锚点进行通信，把位置信息和状态数据传送到中央 PLC。因为数据包在网络中是以受控泛洪的方式传播的，所以每个数据包都有生存时间和序列号。节点对于重复出现的数据包会采取丢弃措施并且限制转发次数，在这样既保障了消息送达率又保持了网络负载健康的状态下完成任务。

安全性是蓝牙 Mesh 被使用到工业上必须要满足的基本条件。采用分层加密体系，把网络层安全和应用层安全严格区分开。即便攻击者获取了网络密钥，也解析不出应用层具体的控制指令，只能起到数据中继的作用。设备配置阶段使用非对称加密算法完成入网认证，可以防止恶意设备伪造接入。在 PLC 集成方案中一般都会设置一个蓝牙网关作为边缘计算节点。网关将 Mesh 网络的状态数据汇聚，并转换成 Modbus 或者 Profinet 等工业协议供 PLC 读取和逻辑判断使用，从而实现了轻量级无线传感网络和重型工业控制系统的无缝融合。

二、远程监控系统构建

远程监控系统属于物理工厂与数字管理层之间的一座桥。除了要实时显示 PLC 内部寄存器状态之外，在保证网络安全的基础上还要对指令进行下发、程序进行远程更新。建立这一体系就要冲破操作技术和信息技术的界限，把网络隧道，数据编码，移动开发等技术融合起来，创建起一个既安全又封闭，又可以互相连接的数字化生态闭环。

（一）VPN 安全隧道建立

在公共互联网上创建虚拟专用网络，是保证 PLC 远程通信安全最普遍、最

有效的方法。工业现场一般处在防火墙的保护之下，如果把 PLC 的 IP 地址暴露在公共网络中，将会产生巨大的安全隐患。于是工程师使用 VPN 技术在远程客户端与工厂网关之间构建出一个加密隧道。这条隧道依靠封装技术，把工业协议的数据包用标准的互联网协议包裹起来进行传输。即使外界嗅探者截获数据流，看到的是经过 AES-256 高强度加密后的乱码，不能解析出真实的控制指令或者生产配方，从而有效地保护了核心商业机密。

隧道建立时需要进行严格的身份认证和密钥协商。目前主流 VPN 协议为 OpenVPN, IPSec 两种，它们都可以用数字证书来实现双向认证。每台接入的远程电脑、现场网关都有一个由企业 CA 中心签发的唯一的数字证书。只有证书合法并且没有被吊销的设备才可以建立安全的 VPN 连接。为了解决工业现场大多没有公网 IP 的问题，一般采用云端中转服务器或者内网穿透的方式。现场网关会主动向云端服务器发起连接请求并保持长连接的心跳。远程工程师访问的时候，数据会经由云端服务器进行路由转发，再经过多层的 NAT 网关之后，形成端到端的逻辑链路。

网络管理员为了防御由远程接入引起的横向攻击风险，就会创建严格的安全访问控制策略。即使是对 VPN 接入的合法用户也只能访问指定的 PLC IP 和端口，不能访问办公网以及与工作无关的其他设备。高级工业 VPN 路由器有 DPI 即深度包检测功能，可以识别 Modbus 或者 S7 通信协议中的具体指令，只允许读操作，拦截未二次授权的写操作或者停机指令。在便利性和安全性之间找到了一个极好的平衡点，从而使得高效的远程调试和故障诊断成为可能。

1. 二层隧道和三层隧道的选择很重要。对于需要扫描网络设备或者使用广播协议的场景，工程师配置桥接模式的二层隧道，使远程电脑像直接接入工厂交换机一样，可以直接被编程软件搜索到。

2. 如果只需要点到点的数据采集，可以使用路由模式的三层隧道，避免不必要的广播风暴浪费有限的公网带宽。

3. 断线重连机制需要在网关处用硬编码的方式实现。工业现场网络经常会有波动，所以 VPN 客户端需要具备指数退避算法，当连接中断之后可以自动尝试重新建立连接，并且会保存详细的连接日志供以后审计之用，从而保证无人值守环境中连接的高可用性。

4. 为了使系统更加安全，在上述基础上大多数系统都加入了多因素认证。工

工程师拨入 VPN 的时候,除了输入密码、加载证书之外,还要输入手机动态令牌,完全消除了因为账号泄露所引发的入侵风险。

（二）数据压缩传输技术

带宽在远程监控当中常常是稀缺且昂贵的资源,特别是当 PLC 数据经由 4G/5G 计费网络传输的时候,未压缩的原始数据流会造成昂贵的资费以及传输阻塞。因此高效的数据压缩传输技术就成了系统设计中的关键环节。由于 MQTT 协议头部开销小,所以被大量使用。相比 HTTP 协议庞大繁杂的报文头来说, MQTT 的二进制头部最小只有 2 字节,当发送一个简单的开关量状态时,有效载荷所占的比例就会大幅度提高,从而大大提高了网络的使用率。

死区传输算法属于应用层常见的数据压缩方法。PLC 或者边缘网关会不断扫描采集点的数据变化。只有当模拟量数值变化的幅度大于死区阈值(比如 0.5%),才会进行数据上报。对于长时间内不变的温度、压力等参数只需要发送心跳包来维持在线状态即可,不需要重复发送无意义的数值。该种改变传输机制可使数据流量缩减至 80% 以下,从而减小云端数据库的存储压力,还能把有限的算力用于处理真正发生波动和异常的情况。

除传输策略优化外,载荷自身的编码压缩不能不予以重视。对于含有大量字符串或者数组等复杂数据结构的数据,在网关处会使用 GZIP、ProtoBuf 等算法进行序列化压缩。ProtoBuf 用事先规定好的 Schema 文件,把冗长的 JSON 键值对映射成紧凑的二进制流,体积可以压缩到文本格式的十分之一。工程师可以在 PLC 端写算法,把多个布尔变量位打包成一个字或把浮点数转化成定点整数来传输,在源头上减小数据量。精细化的数据治理可以在弱网环境下保证远程监控画面的流畅刷新,历史趋势图的加载也可以满足用户对于流畅体验的需求。

（三）移动端监控 APP 开发

移动端 APP 给管理者带来了可以随时随地掌控生产现场的能力。但是移动设备本身资源有限,怎样在这样的设备上高效渲染工业数据并保证交互的实时性,是移动应用开发中的一大难题。跨平台开发框架,Flutter 或者 React Native,被广泛使用。可以让一套代码在 iOS 系统以及 Android 系统上都可以运行,保证用户界面的一致性。APP 底层用的通信协议为 WebSocket。PLC 的状态一旦发生变化,服务器就会自动把消息推送至 APP,而不是像以往那样采用轮询拉取的方式。这就保证了报警信息可以做到毫秒级的送达,让运维人员能够及时对设备故障做

出应对。

用户界面设计要依照工业人机工程学的原则，把复杂的 PLC 寄存器状态转换成直观的仪表盘、趋势图以及状态指示灯。为处理大量的历史数据，APP 中集成了高性能图表库，支持手势缩放、时间轴拖动等交互，可以动态加载云端存储的百万级数据点而不会出现卡顿。从数据交互逻辑来看，APP 一般使用乐观 UI 更新模式：用户按了按钮之后界面立即响应，后台异步发指令；如果指令执行失败则回滚状态并提示错误。这样的设计大大改善了操作的流畅性以及用户的体验。

移动端的安全性更显得十分敏感。APP 要集成 OAuth2.0 等现代认证标准，不能把用户凭证明文存储在本地。对于需要开启设备、调整参数的危险操作，APP 强制要求二次生物识别认证（指纹或者面部 ID 认证），同时会记录操作时的 GPS 坐标数据，来保证操作合法可查。APP 还要有离线缓存功能，用户在信号盲区的时候可以先保存巡检记录，等信号恢复之后再把记录上传。移动端 APP 在深度绑定到 PLC 系统之后，已经不只是一个简单的信息展示终端，而成了工业现场不可或缺的智能协同工具，实现了从“人找信息”到“信息找人”的重大转变。

第五节 系统集成案例与故障排查

伴随着工业物联网技术迅速发展，可编程逻辑控制器已经不再孤立地作为控制单元存在，而是成为了复杂自动化系统中的一个重要节点。系统集成能力的好坏直接影响生产线的效率和灵活性，故障排查的准确度又影响企业的连续生产能力。本章使用不同行业例子来分析集成的策略，探究深层次故障诊断的原理，给工程技术人员提供全方位的从设计到维护的参考。

一、典型行业应用案例

现代工业现场由于不同行业的工艺特性不同，其控制系统的集成方式也不同。通过汽车、食品、制药、能源等行业典型案例分析可知，PLC 技术怎样同行业特有的需求融合起来，创建起高效、稳定并且具备数据交互能力的自动化网络架构。

工业自动化集成案例总览

行业领域	核心集成挑战	主要解决方案	关键技术 / 关注点
汽车制造	海量数据实时交换与功能安全信号的可靠性	工业以太网环形冗余网络，模块化程序设计	毫秒级数据交换，制造执行系统深度交互，柔性化生产，虚拟局域网
食品加工	多设备协同，卫生标准及生产追溯，恶劣环境适应性	工业现场总线，电子凸轮算法，高防护等级设备与布线，数据采集与上传	高速联动控制，防护等级，恒温除湿，数据追溯
制药行业	数据完整性与不可篡改，冗余性，环境监控集成	高端控制器（带权限管理、审计追踪），双机热备 PLC，本地缓存与断点续传，模拟量输入模块	符合法规要求，生产过程可追溯，数据不丢失，污染风险最小化
智慧能源	设备数量众多，通信协议多样，分布地点分散，能源优化	智能网关协议转换，能源数据挖掘与调度，群控算法，实时监测	异构协议统一，削峰填谷，按需供能，能效分析

从上表可知，各行业在 PLC 系统集成时，由于各自生产特点以及法规要求的差别，因而表现出不同的挑战和解决办法。

（一）汽车生产线网络集成

汽车制造行业是离散自动化发展最先进、最成熟的领域之一，在焊装车间、总装车间对于 PLC 系统集成度有很高的要求。大型车企的焊装生产线一般用主 PLC 控制器来统管全局，挂接几百个远程分布式 I/O 模块和机器人控制柜。核心问题就是怎样保证海量数据在毫秒级的时间内完成实时交换，同时保证功能安全信号绝对可靠。设计人员一般用工业以太网构成环型冗余网络，把焊接机器人、输送带、安全防护光栅都集成在一个通信网络上。控制器除了运行常规逻辑程序之外，还要与制造执行系统存在深入的互动，把车型识别码，焊点质量信息以及设备工作状况上传到系统中去，从而实现真正的柔性生产。

为了减少车型增加所造成的控制逻辑复杂化，控制程序一般采用模块化的标准。每个工位都是一个独立的对象，有自己独立的控制状态机和接口定义。当新车型到来的时候，工程师只需在上位机调用对应的新车型配方参数，PLC 就会自动调整夹具的动作序列和机器人焊接的路径，不需要对底层程序做大规模的修改。高度集成的模式大大缩短了新车上市的准备时间，但是也给网络带宽提出了严峻的挑战。为防止数据拥塞，在网络规划时需要准确计算出交换机的背板带宽，利用虚拟局域网技术把实时控制数据和非实时的诊断数据逻辑上分开，保证核心控

制指令高优先级的传输。

（二）食品加工设备联网方案

食品加工行业对卫生标准和生产追溯要求十分严格，这也就直接影响了 PLC 系统硬件以及网络的选择。在一条高速灌装生产线上，集成方案面对的主要是多台独立设备协同工作。理瓶机、洗瓶机、灌装机、旋盖机、贴标机大多由不同的机械厂生产，每台机器上都有自己的 PLC 控制器。为了实现整线联动控制的目的，系统集成商需要创建共同的数据采集与指令分发平台。平台采用工业现场总线把各个单机串联起来，对整条线的运行速度进行实时监控，使用电子凸轮算法动态改变各段输送带的频率，保证瓶体以高速度流动时不会被挤压、不会倾斜。

1. 食品车间经常要用高压水冲洗和化学消毒，所以现场集成的分布式 I/O 模块和线缆连接器的防护等级要非常高。布线工艺要使用不锈钢线槽、防水接头，防止液体进入造成短路或者信号腐蚀。并需配备恒温除湿装置控制柜内部温度，防止因为温差过大而出现冷凝水现象，从而影响精密电子元器件的工作稳定，在潮湿环境里持续运行。

2. 为了满足食品安全追溯需要，PLC 系统对每一个生产批次的杀菌温度、灌装体积、封口扭矩等重要的数据都会记录下来。数据实时上传至上面的数据库，与产品唯一标识码关联。市场一旦出现产品质量问题，企业可以立即反查该批次产品生产时所用全部设备参数，找到问题根源。集成方案可以提高生产效率，也可以给企业品牌信誉的建立一道数字化防火墙。

（三）制药厂数据采集系统

制药行业自动化系统集成必须符合相关的法律法规要求，数据的完整性、不可篡改性等也是它的考察指标。在生物制药的发酵车间中，PLC 系统主要是对发酵罐的温度、pH 值、溶氧量、搅拌速度等重要工艺参数进行控制。与一般的工业控制系统不同，这里的控制系统不仅要执行动作，还要做电子记录员。集成方案一般会采用带有用户权限管理、审计追踪功能的高端控制器，对于工艺参数任何一次修改都会被系统自动记录下来，包括操作人员 ID、修改时间、修改前后的数值、修改原因等，从而保证生产过程的完全透明可追溯。

数据采集系统架构设计时还要考虑到冗余性，防止单点故障造成重要数据的丢失。一般采用双机热备的 PLC 结构，即主控制器和备用控制器同时工作，当主控制器出现故障时，备用控制器可以无扰动地代替主控制器完成控制和数据记

录任务。同时，下位机 PLC 会本地缓存一段时间的数据，通信中断时数据存放在本地，通信恢复后自动断点续传。消除了数据传输过程中的所有盲区，保证批记录文件完整性，通过了监管机构的现场审核。

除此之外，制药厂的系统集成还要牵涉到复杂的环境监控子系统。PLC 要通过模拟量输入模块采集洁净区的压差、温湿度、尘埃粒子计数。这些环境数据同生产工艺数据，在时间轴上是一一对应的。当环境参数在某一时段超标的时候，系统就把在这个时间段生产出来的药品标记为待检品，并且联动门禁系统和空调机组进行紧急调节。跨系统深度整合，把环境控制和生产质量紧紧地捆绑在一起，把药品污染风险降到最低，这就是精细化管理所能达到的极致。

二、常见故障诊断流程

高度集成的自动化系统中，故障常常有隐蔽性高、相关性大的特点。一个简单的停机现象背后，会包含通信干扰、程序逻辑冲突、硬件性能瓶颈等各种各样的因素。建立科学系统的故障诊断流程，对迅速修复生产、减少故障停机造成的损失都起着非常重要的作用。

（一）通信中断排查步骤

通信故障是工业自动化现场发生的频率较高的故障，也是最难处理的故障。当 PLC 与远程模块或者上位机连接突然断开的时候，维护人员不应该随便更换硬件，而应该按照从物理层到逻辑层的顺序进行排查。物理层检查是最基本，观察交换机或者模块端口的指示灯是否亮起来来判断链路是否连通。工业现场震动大，容易造成接插件松动，线缆内部断芯等现象。尤其对于屏蔽双绞线要注意屏蔽层在端子处接地是否牢固。接地不良的时候，变频器等大功率设备产生的高频电磁干扰很容易耦合到通信线缆上，造成信号信噪比下降，进而导致间歇性的通信中断。

物理链路正常之后，才对链路层以及网络层进行排查。IP 地址冲突是造成通信瘫痪的人为因素之一，在设备扩容或备件更换的时候，如果新设备被设置成了和现有设备相同的 IP 地址，网络风暴就会瞬间造成局部网络的瘫痪。此时，用网络扫描工具对网段内所有在线设备的 MAC 地址进行扫描，可以找到冲突节点。另外还要检测控制器的通信负载率，如果 PLC 在一个扫描周期内处理大量的外部连接请求，就会因资源耗尽而主动关闭一些连接，造成假死。调整通信超

时或者限制连接数目的方式可以解决这种软性故障。

排除了以上因素后还要考虑网络拓扑结构的变化。环网架构下，如果环网管理交换机的配置出现错误，数据就会在环内不断循环，造成广播风暴。此时就可以观察交换机端口的数据流量指示灯是否异常的快闪，或者用抓包软件抓取网络中是否存在大量的广播帧来进行判断。确认后立即断开环路的一段，将网络改为链状以利临时抢修，之后再查交换机的生成树协议或环网协议配置。

（二）数据丢包处理方法

数据丢失不一定会造成通信完全断开，但是会严重影响控制系统的实时性、稳定性，造成动作迟滞、触摸屏数据刷新缓慢、伺服电机运行抖动。处理数据丢包问题第一件事就是对现在的网络带宽利用率进行评估。随着千兆网络的普及，带宽不足的情况已经很少发生，但在汇聚层交换机处，高清视频监控数据和工业控制数据共用一条通道时，突发的数据流量依然会占用控制数据的传输空间。此时对服务质量策略进行配置，将控制协议数据包的优先级设置为最高，是解决拥塞的好方法。

交换机端口配置也会产生丢包。例如，PLC 网口工作在全双工模式下，交换机端口强制为半双工模式，双工模式不同会导致大量冲突帧、碎片帧，丢包严重。查看交换机管理页面，保证端口协商状态一致十分重要。线缆质量不好或者布线距离过长都会造成信号衰减，使数据包在传输过程中发生畸变，接收端校验失败后就将其丢弃。用专业的线缆测试仪对链路的近端串扰、衰减比等指标进行测试，可以很快找出不合格的物理链路。

另一个容易被忽略的因素就是 PLC 本身的循环扫描时间。当控制器的 CPU 负荷较大，扫描周期变长，不能及时从以太网缓冲区读取数据的时候，缓冲区就会溢出，新来的数据包会被丢弃。这种情况大多出现在程序中有死循环、复杂的数学运算或者大量数据块移动指令的时候。通过在线检测 PLC 的扫描周期和中断堆栈，优化程序算法，将非关键任务分散到多个周期执行，从而达到减小 CPU 负担的目的，从根本上解决由于处理能力不足导致的数据丢失问题。

（三）协议兼容性问题解决

随着工业 4.0 的发展，多品牌设备互相连接的越来越多，于是就出现了协议兼容性的问题。最常见的问题之一就是字节序不同。西门子等欧系 PLC 使用的是大端模式，高位字节存储在低地址；三菱等日系或者部分美系设备采用小端模

式。采用通用协议进行数据交换时，如果不对字节交换进行处理，那么接收到的浮点数或者双字整数就会变成毫无意义的乱码。解决这个问题的办法是在网关的配置或者 PLC 的程序里加入高低字节互换的逻辑，从而保证数据解析规则一致。

1. 地址映射偏差也属于比较常见的兼容性问题。不同的 PLC 品牌对于 Modbus 地址起始值的分配不一样，有的品牌用 0 作为起始值，有的品牌用 1 (40001 代表物理地址 0)。这样就造成了读出来的数据错位，严重的时候会误操作寄存器。调试人员要阅读双方的通信手册，经由读取某些固定数值 (版本号或者测试值) 来判定地址偏移量，从而保证映射关系准确。

2. 功能码支持的程度不一样也会导致通信失败。虽然标准协议规定了一些功能码，但是有些从站设备只支持其中的部分功能码。有的仪表只能一次读取一个寄存器，需要分次读取各个参数。当主站 PLC 发出批量读取指令的时候，从站会给出异常响应或者不予理睬。解决以上问题，就要改变主站对数据的轮询方式，把长报文分成若干条短报文，以满足从站设备的要求。

在网络环境较为复杂的异构网络里，有些厂商为了保证自己生态圈的安全，在标准协议的基础上又加入了自己特有的握手字段或者校验算法。直接对接时经常会遇到连接已经建立，但是不能交换数据的情况。此时需要使用带有脚本编程功能的智能网关或者工业边缘计算节点。在网关上编写专门的解析脚本，剥离私有协议头，提取有效载荷后再封装成标准格式，就能搭建出不同品牌设备间的翻译官，彻底打破协议壁垒。

第四章 PLC 在智能制造中的应用

在工业 4.0 的潮流推动下，传统自动化技术正在经历一场深刻的、由表及里、由浅入深的智能革命。可编程逻辑控制器早已不是工业控制领域中简单的逻辑开关了，在智能制造的生态系统中，它是不可缺少的关键节点。本章主要探究 PLC 在全新制造范式下应用的深度和广度，分析它怎样支撑起从底层感知到顶层决策的宏大架构。

第一节 智能制造系统架构

智能制造并不是简单地将各种技术进行累加，它是一个具有诸多维度、层次，又比较复杂的工程。了解该系统的结构，对于认识 PLC 在新的时代所承担的任务来说十分重要。该结构一般分为四个相互联系十分紧密的层次，每一层次完成不同的功能任务，共同构成一个强大的生产系统，即高效、灵活并能自行调节。

一、智能制造的层级模型

该模型里信息流、物质流高度融合。底层物理设备到上层云端服务的数据就像血液一样，在各个器官之间流动，支撑着整个制造系统生命活动的进行。这四个层次逐层上升，却又各自独立，合起来便构成了智能工厂的架子。

智能制造层级模型概述

层级名称	核心功能	典型技术 / 设备	PLC 角色
设备智能化：感知与执行层	数据采集与物理动作执行	传感器、伺服电机、工业机器人	数据采集、初级控制
车间智能化：控制与优化层	生产过程实时控制与局部优化	工业以太网、运动控制器、机器视觉	实时控制、协同调度、边缘计算
工厂智能化：管理与决策层	全厂资源管理与运营决策	MES、ERP、数字孪生、数据分析平台	向上提供数据、向下执行指令
协同智能化：供应链与服务层	跨企业协同与全生命周期服务	工业互联网平台、云服务、大数据	作为数据源、执行远程指令

由上表可见，智能制造的层级模型清晰地展示了各层的功能分工与协作。

（一）设备智能化：感知与执行层

设备层是智能制造的物理基础，也是数据产生的源头。它给传统机械设备加上了感知、通信的能力，整合了伺服电机、驱动器等执行机构和高精度传感器网络。智能终端可以对温度、压力、振动等物理量进行即时采集，然后转化为数字信号。

此时设备就不再是孤立的铁块，而是带有自我描述能力的智能实体。通过使用 IO-Link 等底层通信协议，传感器可以传输过程数据，也可以把设备的状态、序列号、诊断信息上传。比如智能气缸会检测自己的动作次数以及响应时间，在故障出现之前就会向系统发出警报。这样一层智能化使得整个生产变得透明起来，每一步动作、每一次转换都能被追踪到，为上层的分析提供了大量的原始数据。

（二）车间智能化：控制与优化层

车间层起到承上启下的作用，主要是对生产过程的实时控制和局部优化。这一层利用工业以太网把各个孤立的智能设备互联互通，实现了机器之间直接对话。生产线不再像过去那样固定地做流水线作业，而是能按实时订单、设备状况来动态调整的柔性系统。

在此层级中，控制系统需要处理复杂的调度逻辑与协同作业任务：

1. 根据各个工作站的实际负载情况来调节输送速度以及加工参数，消除瓶颈工序，保证生产线整体达到最高生产效率。
2. 实现产品质量的在线闭环控制。利用机器视觉和在线检测设备对加工质量及时反馈，系统可以毫秒级地自动纠正，保证产品质量的均匀性。

车间智能化的核心就是自适应能力。当某个工位出现异常的时候，系统就可以迅速地对控制逻辑进行重新组织，把工件分流到备用工位上，最大限度地减少由于停机而造成的损失。这种韧性控制模式是智能制造应对多品种、小批量定制化生产的利器。

（三）工厂智能化：管理与决策层

工厂层负责全厂资源的管理，并对全厂运作做出决策。这里是各个车间、仓储物流和能源系统产生数据的地方，通过制造执行系统和企业资源计划系统深度融合，达到生产现场和企业管理无缝对接的目的。

数据在这个层次上体现出它的商业价值。管理者不用再依靠滞后的纸质报表，可以凭借数字孪生界面随时掌握全厂运行情况。系统根据历史数据、即时的反馈

来对排产计划做滚动优化，准确地算出物资的需求数量、细致的控制能源的消耗量。跨车间的协同成了常态，注塑车间的生产进度直接影响着组装车间的物料拉动，同时指导 AGV 物流小车的配送路线。利用全局视角进行优化打破了传统制造业各自为政的信息孤岛，大大提高工厂的运营效率以及资产利用率。

二、PLC 在架构中的定位

庞大的智能制造体系中，PLC 所承担的功能从根本上发生变化。它不再仅仅是梯形图逻辑的执行者，而是成为物理世界与数字世界的枢纽，集控制、计算、通信功能于一身的枢纽。

（一）作为边缘计算节点的 PLC

由于计算能力呈指数增长，现代 PLC 已经可以处理复杂的算法，成为工业现场理想的边缘计算节点。传统的方法是将大量的原始数据传送到云端来处理，造成了带宽资源的浪费和不能忽略的延迟。现在 PLC 可以在数据源头处进行处理分析。

这就表示 PLC 可以开展繁杂的数学模型以及人工智能推理算法。在数控加工中，PLC 内部集成的振动分析算法能对高频采样数据进行实时处理，在毫秒级的时间内判断出刀具磨损情况，直接调节进给速度，不需要上位机指令。数据不过夜、决策在现场的模式极大地提高了系统的响应速度和安全性。同时 PLC 对原始数据进行清洗、聚合、特征提取，只把有价值的信息上传到云端，有效地减小了网络负载以及云端的存储成本。它是执行者也是现场的思考者。

（二）连接物理世界与数字世界的桥梁

PLC 的独特硬件结构最适合把物理信号转变成数字信息。一方面，它有丰富的坚固 IO 接口，可以直接承受工业现场的电磁干扰，可靠地采集电压、电流、脉冲等物理信号；另一方面，它内部装有先进的网络通信栈，可以和 IT 系统自由交流。

在智能制造架构当中，PLC 起着翻译官的作用。它把底层传感器的信号转换成标准化的数据对象，用 OPC UA 等互操作协议，把语义化数据以标准化的形式提供给上层系统。IT 工程师不需要掌握复杂的电气原理，只需要访问 PLC 暴露出的数据标签就可以得到设备的工作状态。信息技术和运营技术的融合，打破了长期以来把自动化和信息化割裂为两部分的壁垒，从而使得数字孪生系统得以创

建。物理实体的每一个动作，都会在虚拟空间中即时地反映出来，而虚拟空间的优化指令，也能准确无误地转化为物理动作。

（三）实时数据采集与预处理中心

在数据当家的制造模式中，数据的质量决定着智能的程度。PLC 是距离生产过程最近的控制器，天生就具有获取高保真数据的优势。它的扫描周期是以毫秒或微秒为单位循环运行，可以捕捉到瞬间的工艺变化，上层 SCADA 系统是无法做到的。

作为预处理中心，PLC 承担着数据标准化的重任：

1. 时序同步、打标。PLC 利用高精度的时钟协议给每一个采集到的数据点加上准确的时间戳，从而保证了各个设备之间的数据时序对应，为之后因果分析提供可靠的时空准则。
2. 使用内部的滤波算法去除信号中的杂波、噪声、伪影等干扰，剔除无效数据，保证上传数据的纯净。
3. 过程统计与特征提取。PLC 能随时算出平均数、极值、标准差这些统计量，把连续的模拟量变成断续的特征值，给上层大数据分析供应有结构的输入。

第二节 PLC 与机器人协同控制

现代智能制造体系中，可编程逻辑控制器和工业机器人相互配合一起构成自动化生产线。两者的深度整合，就是生产系统柔性、效率、稳定性得到保证的关键。

一、协同控制模式

构建一个高效的自动化系统，核心就是按照工艺需求、硬件条件来选择合适的控制架构。这不但会直接影响系统初期开发成本的高低，更重要的是会决定后期维护是否方便和功能扩展的可能性。

协同控制模式对比表

控制模式	核心特点	数据交换能力	适用场景	优缺点总结
PLC 作为主控制器	PLC 主导运动规划与逻辑控制，集成度高	高（内部处理）	并联 / 直角坐标机器人，高同步要求	简化拓扑，降低成本，高集成度；对 PLC 性能要求高
PLC 与机器人控制器分工协作	PLC 全局调度，机器人专职运动解算	中（宏观指令，状态反馈）	大多数工业现场，追求鲁棒性与并行开发	充分发挥各自优势，系统鲁棒性强，开发周期短
通过 I/O 信号简单握手	硬接线数字信号，简单可靠	低（开关量）	基础自动化单元，数据量小，实时可靠性高	实现简单，可靠性高，排故容易；受物理点数限制，无法传复杂数据
基于工业总线的深度数据交互	高速总线协议，实时数据交换	高（宽带，实时过程数据）	智能制造，数据透明化，柔性化作业，预维护	数据传输丰富，支持预测性维护，系统数字化水平高；协议配置复杂

各控制模式的详细特点，可见上方的协同控制模式对比表。下面将对这些模式进行具体阐述。

（一）PLC 作为机器人主控制器

由于计算能力的迅速提升，高端可编程逻辑控制器已经可以完成复杂的运动算法。在这种模式下，PLC 不再只是逻辑控制器，它直接来做机器人运动规划。控制器内部含有运动学功能块，可以直接进行机器人各个关节轴的插补运算和位置控制。工程师不再需要在机器人专用示教器与 PLC 编程软件之间来回切换，所有逻辑序列和运动轨迹的代码都可以在一个编程环境中完成编写。集中式控制架构简化了系统拓扑，缩短了控制器间通讯延迟，逻辑判断和机械臂动作可以实现微秒级同步。

对于并联机器人或者简单的直角坐标机械手，此种控制方式较为普遍。由于去掉了专用的机器人控制器硬件，使得系统的整体硬件成本大大降低。在软件上，统一的变量数据结构，使变量的管理直观方便，故障的排除也更加集中。当系统停机时，维护人员只要查看 PLC 状态记录就可以找到故障所在，而不用去熟悉不同品牌的机器人控制器专用诊断技术。即便在较为复杂的六轴关节机器人应用当中，一些先进的自动化厂商也会给出基于标准 PLC 平台的通用机器人接口，让通用工业控制器可以直接驱动伺服驱动器，进而达成对机械臂末端的精准控制。

虽然此模式对于 PLC 处理能力的要求很高，但是它所带来的系统集成优势是不言而喻的。它冲破了传统自动化里“逻辑”和“运动”那道物理壁垒，给高

度动态化的生产工艺供应了根基。尤其在多机器人及周边设备需要高度同步的时候，采用一台主控制器控制所有轴的运动方式，可以有效地避免由于通信抖动造成的相位偏差，保证最终加工质量的一致性。

（二）PLC 与机器人控制器分工协作

工业现场最常见的是 PLC 做全局逻辑调度，机器人控制器做自身的运动轨迹解算。PLC 是产线启停、安全互锁、物料追踪、上位机通信的“大脑”，机器人控制器为小脑和肢体，执行具体的动作指令，例如直线插补、圆弧插补、奇异点规避等复杂的运动学计算由它完成。两者各有长处，可以充分利用各硬件的特点：PLC 强项为大范围的布尔逻辑、离散事件处理，机器人控制器多轴联动、动力学控制的专长更是别无二致。

分布式控制策略可以明显提高系统的鲁棒性。即使 PLC 出现逻辑故障而停止工作，机器人控制器也会利用自身安全机制使机械臂处于可控状态，从而防止发生碰撞、坠落等事故。程序开发阶段自动化工程师与机器人工程师共同协作，自动化工程师主要负责产线工艺流程以及外围设备的控制，机器人工程师主要负责机械臂动作节拍和轨迹平滑。双方只需要事先约定好交互信号的接口定义，就可以独立调试，在联调阶段完成信号对接。并行开发方式可以大大减少大型项目的交付时间。

运行中 PLC 只是给机器人发宏观指令代码，比如“去抓位置 A”或者“执行焊接程序 1”。机器人控制器接到指令之后，就会自行规划各个关节的速度和加速度，在动作结束之后还会反馈执行的结果。松耦合的协作方式降低了通信带宽压力，大量的密集运动控制数据不需要在控制器之间实时传输，只需要交换状态字、命令字等关键信息。对于生产线升级改造来说，这种模式非常灵活，更换不同品牌的机器人，只需要在 PLC 端更改接口映射，不需要重新编写整个产线的逻辑程序。

（三）通过 I/O 信号进行简单握手

在很多基础的自动化应用单元里，PLC 同机器人之间所发生的信息交流，并不需要借助特别繁杂的协议来协助，仅仅依靠通过硬接线方式彼此相连的数字量输入输出信号，就足以应对。虽然方式比较原始，但是由于可靠性高、操作简单，至今仍然在工业现场占有一席之地。从物理连接上讲，PLC 的输出端直接和机器人的输入端子相接，相反亦然，依靠电平高低的变化来传递控制意图。

1. 信号定义标准化, 是进行 I/O 握手的前提。一般都会定义一组请求信号, 比如“允许进入”、“执行任务”等, 以及一组状态信号, 比如“任务完成”、“原点到位”、“故障报警”。为了区分不同的动作模式, 还会采用组合位的方法, 即用几个 I/O 点的二进制组合来代表不同的程序号。用 3 个输入点就可以表示出 8 种不同的动作程序, 可以满足大多数简单的上下料或搬运的需要。

2. 电气隔离以及抗干扰设计对于 I/O 通讯来讲是十分关键的。由于工业现场的电磁环境比较复杂, PLC 和机器人一般采用不同的电源供电, 容易产生地电位差。因此接线时一般采用继电器隔离或者光耦隔离模块, 保证信号传输的纯净以及设备的安全。严谨的时序逻辑设计也不能少, 例如发出开始信号之后, PLC 必须等机器人回传运行中信号才能撤销开始命令。闭环握手逻辑可以防止由于信号瞬间抖动而引起的误动作。

虽然硬接线 I/O 受物理点数的限制, 不能传输具体的坐标数值或者复杂的字符串信息, 但是在对数据交互量要求不高、需要实时响应、绝对可靠的场合, 例如急停回路、安全门互锁功能等, 它仍然是不可缺少的。一对一的连接方式非常直观, 对于电气维修人员来说, 用万用表就可以很快找到信号的通断之处, 故障排查的技术难度很小。

二、典型应用场景实现

理论的架构最终要落实到具体的生产场景中去。各个工艺环节中 PLC 与机器人相互配合的方式不尽相同, 但是它们一起推动了生产效率和产品质量的提高。

(一) 数控机床与机器人上下料

机器人代替人工完成数控机床的上下料工作, 在机加工车间已经成为标配。虽然看上去很简单, 但里面却存在着严密的逻辑关系以及时间上的配合。PLC 是整个自动化单元的指挥官, 随时监控机床的状态以及机器人的位置。当机床完成切削循环后, 就会通过 M 代码给 PLC 发送加工完成信号, 同时, 机床主轴停止旋转并定向, 安全门打开。PLC 在确认接收到门已开和主轴静止这两个安全信号后, 才会给机器人发送进入许可。

机器人收到指令以后, 将毛坯件带往机床内完成工作。为了保证万无一失, 机器人一般都配备有两个工位手爪, 先抓取加工好的成品, 确认抓牢之后再向 PLC 发送信号, PLC 控制机床卡盘松开。待成品移出干涉区之后, 机器人快速转

动手爪，把毛坯件装入卡盘。此时机器人给 PLC 发送“装载到位”信号，PLC 就驱动液压系统夹紧工件。这一系列动作必须衔接得紧密无缝，卡盘的夹紧状态信号必须反馈给机器人，机器人确认后才会松开手爪并退回安全区域。

只有机器人完全离开机床内部并发出“安全区域”信号时，PLC 才会控制机床安全门关闭，开始下一轮加工程序。与此同时机器人将取出的成品放到检测台或者料框里。在循环中异常处理是很重要的。机器人在机床内部出现报警停机的时候，PLC 就必须马上切断机床的动作许可，避免机床误动作撞击机械臂。反之，如果机床卡盘损坏不能夹紧，PLC 就会通知机器人停止放料并报警。通过这样一种深度逻辑的交织就达到了无人化车间的高效和安全。

（二）焊接机器人与工装夹具联动

焊接工艺对时序控制要求很严。这时 PLC 主要控制复杂的工装夹具、变位机和焊接机器人之间准确的节奏配合。操作人员把工件安放到位之后按一下启动按钮，PLC 就依照事先设定好的顺序来驱动气缸或者液压缸，把工件紧紧地压在定位面上。每一个夹紧气缸到位信号都必须经过 PLC 的校验，保证工件姿态完全符合焊接要求，防止装夹不到位造成焊接偏差或者废品。

1. 工装夹紧无误之后，PLC 向机器人发送开始焊接的指令以及本次任务要执行的焊接程序号。机器人收到指令后移动到起弧点，焊机引弧。焊接的时候，PLC 不是闲着的，它一直看周边的安全光幕以及排烟除尘设备。当有人闯入光幕范围内的时候，PLC 会利用硬接线安全回路直接切断机器人的动力电源，强制停止焊接。

2. 复杂的立体焊缝一般要采用变位机和机器人配合来完成。此时变位机一般作为机器人的外轴，由机器人控制器直接驱动；或者由 PLC 控制变位机转到指定角度后发出到位信号给机器人。如果前者是真正意义上的联动焊接，后者就是分度焊接。在多层多道焊工艺中，PLC 根据焊道累计热量来控制层间冷却时间或者驱动清枪站进行焊枪清剪，保证每次起弧的质量。

3. 机器人回到原点，发出结束信号。PLC 接收到信号之后，按照相反的顺序松开夹具，利用顶升机构将工件顶起，提示人工或者搬运机器人取件。PLC 在此时也会实时采集焊机的电流电压数据，一旦发现参数超出工艺窗口，马上就会将该工件标为不良品，在下道工序中实行自动分流。

（三）AGV 小车的路径规划与调度

智能物流环节中自动导引车的正常运转，也需要 PLC 搭建起来的基础控制

系统来支撑。尽管现代 AGV 一般自带导航算法以及调度服务器，但是从物理环境交互的角度来说，PLC 依然起着不可忽视的作用。当 AGV 需要经过自动门或者乘坐货梯时，它会通过无线网络向 PLC 发出请求。PLC 根据当前区域安全状况以及电梯楼层来控制门机的开闭，在设备到位之后，向 AGV 反馈可以通行的信号。其中包含不同的通信协议转换以及实时逻辑判断。

更深层次的协同就是交通管制以及死锁解除。在没有复杂的上位调度系统、中小型的应用中，PLC 可以直接完成交通管制的任务。在重要的路口装射频识别读取器或者光电传感器，PLC 就可以知道 AGV 所在的位置。当多台 AGV 在同一个路口汇入时，PLC 根据到达顺序或者任务优先级来控制信号灯。对于低优先级的车辆，则给它一个停止指令并让它在路口外面等待，这样可以防止交通拥堵以及发生碰撞。

产线对接过程中 AGV 同生产线辊道之间的接触要精准。AGV 停靠在接驳台旁边时，会通过光通讯或者无线局域网与控制接驳台的 PLC 进行“握手”。PLC 会根据产线辊道上的空位和 AGV 上是否有货物（或者相反）来决定是否启动辊道电机。双方设备在传输的过程中会不断地发出电机运转、货物过半、传输完毕等微小的信号。如果出现传送超时或者传感器没有检测到货物移动，PLC 就会立刻停止工作并发出警报。这种依靠 PLC 实现的分布式的控制逻辑，克服了顶层调度系统实时性差、不能直接与现场设备打交道的缺点，保证了物流系统的“最后一米”畅通无阻。

第三节 物联网技术与数据采集

伴随着工业 4.0 的深入发展，传统的单点可编程逻辑控制器系统正在发生深刻的变化，单一的逻辑控制中心已经成为工业物联网中不可缺少的重要边缘节点。在这个转型期，怎样高效、准确地采集底层设备数据，又怎样安全、稳定地将这些数据上传到上层管理系统或者云端平台，成了达成智能制造的前提。本节将讨论基于控制器的现代数据采集技术，以及利用物联网协议把数据上传到云端并且实现远程应用的过程，从而体现出自动化技术和信息化技术高度融合的特点。

一、工业物联网数据采集

在工业物联网系统建立之初，数据采集一直处在架构的最下层，它是物理世界通向数字世界的关键通道。本环节不仅要处理高速实时控制信号，而且要解决不同品牌、不同年代设备之间的互联互通问题。使用现代化的控制系统以及通信协议，企业便可以打破信息孤岛，创建起全面互联的工业数据基础。

（一）通过可编程逻辑控制器直接连接传感器进行数据采集

工业现场的可编程逻辑控制器作为控制中心，自然而然可以与各种传感器进行数据交换，这是数据采集最直接也是最基本的手段。现代 PLC 一般都具有丰富、高速的输入输出接口和高精度的模拟量处理模块，可以对现场的温度、压力、流量、位移等各方面的物理量进行实时采集。工程师根据传感器信号类型，开关量状态跳变、4-20mA 电流、0-10V 电压模拟信号，或热电阻、热电偶微弱电平变化等来选择相应的扩展功能模块进行硬件组态。PLC 内部的中央处理单元会循环扫描，把物理端口的电信号转变为内部寄存器能够读取的数字量，之后经过预设的滤波算法和工程量标定逻辑，最后得到具备实际物理意义的监测值。

这种直连采集方式的实时性最好，可靠性也最高。因为信号传输路径最短、无需任何第三方协议转换设备，最大程度地减少了通信延迟和数据丢失的风险。对于控制周期要求较高的高速运动控制场合，或者精密的过程控制环节，采用 PLC 本体或者其扩展模块进行数据采集是无法替代的。随着技术的发展，新一代的 PLC 具有 IO-Link 主站功能，可以对智能传感器深入读取参数配置、诊断信息、过程数据，让底层感知设备更透明。

1. 硬件层面抗干扰设计是保证采集精度的前提，布线时应将强电和弱电线槽分开敷设，模拟量信号线缆必须屏蔽且接地良好，避免现场变频器等大功率设备产生的高频噪声干扰采样数据，从而造成控制逻辑误判或者数据记录错误。

2. 软件数据预处理也不可少，在控制程序中添加滑动平均滤波、中值滤波或一阶滞后滤波算法可以有效消除由于环境震动、电磁干扰等引起的瞬间尖峰，保证上位机接收的数据能正确反映设备的实际运行情况。

（二）通过工业网关集成非标准设备数据

工业现场经常会有许多非标准或者老旧的设备，这些设备可能会使用封闭的专有协议，也有可能只有串口通信的能力，不能直接接入现在的以太网架构。面

对万国牌设备并存的复杂情况,采用工业智能网关是一种有效的方式来实现统一的数据采集。智能网关作为协议转换器,向下兼容 Modbus RTU、Profibus-DP、CC-Link 等各型串口协议,向上统一转换为 Modbus TCP、EtherNet/IP 等标准以太网协议,或者封装成物联网协议供上层应用使用。

在实施时,工程师要对网关做细致的设置,创建底层设备寄存器地址同网关内部标签变量的对应联系。这不仅仅是数值的简单移动,还包含有数据格式间的转换,比如大端模式的浮点数转成小端模式,或者将分散的位状态打包成整型数据来提高传输效率等等。智能网关一般具备一定的边缘计算能力,能在采集高频数据时对它进行清洗、聚合和阈值判断,只把有价值的变化数据或者报警信息上传到上层服务器,有效地减轻了网络带宽的压力以及上层服务器的存储负担。

(三) OPC UA 在数据采集中的统一作用

为了解决工业通信协议碎片化所引发的互操作性问题,OPC 统一架构应运而生,渐渐成为工业 4.0 时代通信的“通用语言”。与传统的基于 Windows 操作系统 COM/DCOM 技术不同的是,OPC UA 是跨平台、面向服务的,可以将 OPC UA 直接嵌入到嵌入式控制器、智能传感器、Linux 网关等设备中。它不单传送数值,而是把数据和它的上下文语义一起打包传输,使接收端不仅知道数值,还知道它的单位、量程、描述性文本以及相关联的设备结构。

实际数据采集系统中,支持 OPC UA 的控制器作为服务器,把内部变量组织成树形的节点空间,对外提供标准的读写接口以及订阅服务。上位机软件、SCADA 系统或者 MES 系统作为客户端,不需要为每一种硬件编写专门的驱动程序,只需要通过统一的 TCP 端口建立安全连接,就可以浏览访问所有授权的数据节点。OPC UA 具有很强的安全机制,能使用 X.509 数字证书认证、消息签名、加密传输等方式来提高安全性,由于工业网络安全环境越来越严峻,因此这些措施就显得尤为重要,保证了采集到的关键生产数据在传输时不会被偷听或者篡改。

OPC UA 核心优势一览表

特性	描述
跨平台性	摆脱了对特定操作系统的依赖,可在多种硬件和软件环境中运行。
面向服务	提供统一的接口,方便不同应用间的数据交互和服务调用。
信息模型	不仅传输数据值,还包含数据语义、单位、上下文等信息,提升数据可理解性。
安全机制	内置数字证书、消息签名、加密传输等,保障数据传输的机密性和完整性。
互操作性	统一了通信协议,解决了工业现场设备间的互联互通难题。

如上表所示，OPC UA 以其独特的优势，在工业数据采集领域发挥着举足轻重的作用。

二、数据上云与远程应用

现场设备数据采集并数字化以后，下一步就是怎样突破地理障碍，把数据送达企业自己的私有云或者公有云平台，以便能开展更高层次的大数据分析以及远程运维服务。打破传统工厂内网的界限，用互联网技术建立即时可靠的云边协同通道，促使企业从制造向智造进行根本性的转变。

（一）MQTT 协议实现轻量级数据传输

工业现场经常会遇到带宽小且网络环境不稳定等情况，传统的 HTTP 协议由于头部信息多、请求 - 响应模式的原因不能满足大量设备同时在线的要求。消息队列遥测传输协议由于发布 / 订阅模式非常轻量，因此成为了工业设备上云的首选。控制器或者网关作为客户端，把采集到的数据封装成特定主题的消息发布到云端代理服务器上；任何对数据感兴趣的应用程序只需要订阅相应的主题就可以接收更新，实现设备端和应用端的完全解耦。

MQTT 协议设计的精妙之处在于对网络资源的极致节约，最小的包头只有两个字节，非常适合通过 4G/5G 蜂窝网络或者卫星链路传输高频遥测数据。它给出三种服务质量保证机制，QoS 0（至多一次），QoS 1（至少一次），QoS 2（只一次）。工业应用中，对一般的温湿度监测一般采用 QoS 0，以节省流量；对重要的产量计数或者报警停机信号等必须采用 QoS 2 级，这样才能保证数据在网络波动较大时不会丢失，不会重复。遗嘱消息，云端可以立刻知道现场设备非正常掉线，及时派发运维工单，系统的可观测性得到很大提升。

（二）数据本地缓存与断点续传机制

工业网络环境比较复杂，连接不稳定属于常态，有线宽带临时中断、无线信号盲区遮挡等都会造成数据传输链路故障。为保证数据的完整性、连续性，现代控制器以及智能网关大多都使用了本地缓存、断点续传的方式。当设备检测到与云平台连接断开时，会将正在采集的实时数据，加上准确的时间戳，一起存入到本地的非易失性存储器（SD 卡或者 Flash 芯片）当中，形成一个先进先出的数据队列。

时钟同步、队列控制就是这个机制的中心。设备端需要借助 NTP 与云端时

钟保持高度一致,这样才能保证离线期间所记录的数据,在下次恢复上传的时候,可以被正确地插入到历史数据库的时间轴当中,而不是被错误地标记为上传时刻的数据。网络重新连通之后,设备不会立刻停止实时上传,而是会开启一个并行的补传过程,按照时间顺序把本地缓存的历史数据一批批推送到云端。为了避免突然出现的大流量补传造成网络拥塞,算法一般会对补传的带宽占用率进行限制,以达到平滑数据追溯的目的。这一点对制药、食品等需要严格追溯、有合规审计要求行业十分重要。

(三) 云平台数据存储与可视化

海量工业数据汇聚到云端之后,怎样高效地存储并挖掘出它的价值,便成了系统设计的重点。传统的通用关系型数据库很难满足每秒几万点的高频写入,因此专门设计用来存储带有时间戳的数据的时序数据库已经成为了工业云平台的标配。时序数据库使用面向时间序列的压缩算法以及存储结构,可以达到非常高的数据吞吐写入速度,而且可以对大量的历史数据进行毫秒级的快速查询和聚合分析。这为保存长达数年、数千个变量参与的全厂历史记录提供了一个经济而有效的解决办法。

基于云端的数据可视化不再只是简单的组态图这样的传统形式,而向着商业智能、数字孪生方向前进。利用 Web 技术建立的动态仪表盘,管理者可在任何地方,用浏览器或者移动设备实时查看工厂综合设备效率、能耗趋势、产能报表。更进一步,采用三维建模技术,将采集到的实时驱动数据映射到虚拟产线 3D 模型上,实现数字世界和物理世界的同步监控。可视化程度和范围并存的特点,使企业高层可以从宏观数据趋势中发现生产瓶颈,辅助战略决策,也使一线工程师可以逐层下钻到微观数据,对设备运行的细节进行分析。

第四节 柔性制造系统案例解析

在现代工业自动化的大潮中,柔性制造系统是生产方式从刚性化向智能适应性发展的最高标准。它依靠高度集成的控制逻辑和硬件结构来满足多品种、小批量的生产。本章主要对在复杂工业现场环境下,采用先进的控制器逻辑以及系统架构,构建出具有强大适应性的生产环境,对其中主要的组成、逻辑控制器的数据交互以及执行环节的具体应用进行详细的分析。

一、柔性制造的核心要素

要创建真正意义上的柔性生产环境，绝不是简单地堆砌机器人或者引进高端设备，而是在底层逻辑以及物理布局上做全方位的系统化设计。这就要求生产系统在硬件方面能够具有物理形态的灵活性，而在信息流和控制流方面要能表现出较强的可塑性，从而摆脱传统上专机专用的生产方式所限制，达到制造资源的动态配置以及最优利用的效果。

（一）可重构的生产线布局

物理层面上的可重构性为柔性制造打下基础。生产现场的设备布局必须能根据工艺路径的变化快速做出调整，不需要对土建设施进行大规模的改造，也不需要重新布线。在先进的案例实践中一般都采用标准化的功能单元岛的形式。每个加工岛都装有独立的电气接口、气路接口，并且通过工业现场总线的高级拓扑结构同主控系统相连。当需要改变生产工艺的时候，物理位置的变动不会影响到逻辑控制的连续性，因为控制器内部集成了拓扑自动识别技术，可以实时扫描总线上挂载的各个节点，自动分配网络地址、建立通信握手。

在这样的布局模式之下，传统的刚性传送带被自动导引运输车或者智能立库穿梭车所取代，形成了一个离散的物流网络。每一个工位不再是固定不变的一个节点，而可以随意接入或者拆解的模块化黑盒。现场总线网络一般采用环形冗余的方式去适应这种布局，在移动现场设备的时候，如果某一段线路断开，数据仍然可以通过另一条路径进行传输，不会造成生产数据的丢失。另外设备供电使用的是快速插拔的航空接头和非接触式供电技术，极大缩短了物理连接的时间。

（二）模块化的控制程序设计

由于物理布局具有很高的灵活性，控制软件也必须具有同样高的弹性。因此，控制程序的设计已经从传统的线性编程转变为面向对象的模块化编程。在实际工程案例中，程序员不再给某个具体的电机或者气缸编写线性逻辑，而是把设备抽象成功能块。每个功能块中包含了该类设备所有的控制逻辑、报警处理、状态机流转和数据交互接口，对外只保留了标准的输入输出引脚。无论是皮带输送机还是旋转工作台，在主程序看来都是遵循同样的标准接口的对象，控制指令的下发和状态反馈的读取也都使用同样的协议。

1. 标准接口定义：新设备接入非常简单。新的加工单元接入系统时，主控程

序只需要调用相应的功能块实例，映射出对应的硬件地址，就可以实现逻辑层面上的上线，不需要修改核心调度算法。

2. 代码复用与稳定，这样的设计使代码的复用率和稳定性的提高是显而易见的。经过验证的功能模块可以被不同的项目重复使用，减少了因重复编程造成的逻辑漏洞，也便于以后的维护和升级。技术人员只管单个模块的内部逻辑，不用理会复杂系统间的耦合。

（三）快速换产与工装调整技术

实现多品种共线生产最大的瓶颈一般是机械工装的切换速度。先进的柔性系统依靠的是机电一体化的深度融合。控制系统里面存有大量的工装参数模型。生产指令发生变化的时候，控制器立刻取出对应的伺服驱动参数集，改变伺服电机转矩限制、位置增益和电子凸轮曲线，从而调整执行机构的动作特性。不更换机械凸轮、连杆的情况下就可以满足不同尺寸规格产品加工的需求。对需要更换的物理夹具，使用零点快换技术，配合射频识别技术：夹具装到位以后，读写头自动检测并读取夹具上的电子标签，确认型号无误后，气动锁紧机构就自动工作。

更复杂的数控加工中心在快速换产时还要进行刀具寿命管理、刀具补偿参数动态加载等。控制器会记录下每把刀具的切削时间、切削力等数据，在换产间隙自动和新产品工艺要求进行对比。当刀库中现有的刀具已经不能满足新产品精度或者寿命余额不足时，系统就会自动触发刀具预调仪进行补刀或者提示人工换刀。同时采用视觉系统对工件坐标系进行在线测量和校正，控制器可以自动计算由于工装更换引起的微小位置偏差，在加工代码执行时动态叠加坐标偏置，保证首件产品合格，完全消除了传统试切所占用的调试时间。

二、PLC 在 FMS 中的关键作用

庞大的复杂的柔性制造系统中，可编程逻辑控制器就起到了中枢神经系统的作用。它不仅要进行毫秒级的逻辑运算、运动控制，还要起到下层设备与上层管理系统之间数据桥梁的作用。通过高吞吐量的背板总线以及强大的运算核心，控制器可以把分散的传感器信号转换成有价值的生产信息，然后按事先预设好的复杂策略来驱动执行机构完成高精度的物理动作。

PLC 在 FMS 中的核心功能

功能模块	主要作用	关键技术或特点
产品识别与工艺调用	识别产品，匹配并加载相应工艺参数	条码 / 芯片数据读取、数据库搜索、指针寻址、间接寻址、参数校验
设备状态实时监控	持续监测设备健康状况，预防故障	模拟量 / 数字量采集、环形缓冲区、数学运算库、中断服务程序、快照上传
生产节拍与路径动态调整	实时调节生产速度和物料路径，应对异常	缓冲区传感器状态读取、降速 / 停料指令、故障节点屏蔽、最优路径计算

从上表可以看出 PLC 在柔性制造系统里起着非常重要的作用，它使整个生产过程实现智能化、高效化、稳定化。

（一）产品身份识别与工艺调用

混流生产模式下，同一条输送线上会排布着完全不同的产品，因此控制器需要具备很强的身份识别和配方管理能力。当产品到达加工工位时，前端传感器读到的条码或者芯片数据会被传送到控制器寄存器中。控制器内部运行的是搜索算法，会从庞大的数据库或者数据块中快速查找标识码所对应的产品型号，从而得到该型号所需的工艺配方。配方数据包含非常详细的加工参数，压装压力、拧紧扭矩、加热温度曲线、保压时间等。

为了处理大量的配方数据，现代控制器一般用指针寻址、间接寻址等高级编程方法。程序不再使用硬编码的固定参数值，而是使用结构体数组的方式来存储成百上千种产品的工艺参数。确定好产品 ID 以后，程序会计算出该 ID 在数组中对应的索引偏移量，然后使用指针将该位置处数据批量拷贝到工作区中的临时变量。该过程一般在几个扫描周期内完成，使设备动作的衔接平滑。控制器还具有配方数据校验功能，在将参数下达到驱动器或者执行器之前，会进行极值判断以及逻辑合理性校验，防止因为配方设置错误而造成设备损坏或者产品浪费。

（二）生产设备状态实时监控

要保证柔性系统正常工作，就必须对设备的健康情况做到不间断的监视。控制器通过高速采集各种传感器的模拟量、数字量信号来创建设备的数字化体征档案。电流互感器反馈的主轴负载电流、振动传感器采集的轴承频谱信号、温度传感器采集的电机绕组温度等数据，被控制器实时采集并存入环形缓冲区。利用控制器内嵌的数学运算库可以实时计算出设备综合效率指标，也可以对关键参数进行趋势分析。

当监测数据超过安全阈值或者计算出的变化率出现异常时，控制器内部的中断服务程序就会被立即触发。这不仅仅是简单的停机报警，它里面包含了很多复杂的保护逻辑。当伺服电机负载增大时，控制器立即减小进给速度或者执行回退运动，保护昂贵的机械部件和工件。当出现故障时，所有的状态数据（输入输出映像区的快照、重要的变量值等）都会被冻存下来，然后上传到监控系统当中，给后面的故障诊断提供充足的数据支撑。利用预防性维护的方法，把事后维修转变成视情维护，大幅度地减少非计划停机时间。

（三）动态调整生产节拍与路径

适应性是柔性制造的灵魂，适应性在实际操作层面就是控制器对生产节奏、物流通道等进行的实时调控。传统的刚性生产线工位节拍是固定的，但是柔性系统中不同的产品加工时间是不一样的，所以控制器要不断改变各个工位的负荷。通过实时读取各个缓冲区传感器的状态来得到上下游工位是否拥堵、空闲的信息。当下游工位物料堆积时，控制器给当前工位的上料机构发出降速指令，或者暂时停止上料，使设备进入低功耗待机状态，达到节能和流线平滑的目的。

控制器有很强的逻辑判断能力。当某条分支路线上的关键设备出现故障代码的时候，控制器内部路由表会屏蔽掉该节点，根据当前物流拓扑结构计算出最优的迂回路径。它会指挥分流道岔动作，把后面的物料引到并行的备用线体上。在毫秒级的时间内完成调整，控制器可以按物料当下的 S 点和速度来实时改变减速曲线以及停止点，使物料从一处路径转移到另一处时不会造成物理碰撞或者丢失位置。这样高智能化的动态调度，可以保证生产系统在受到内部扰动时仍然能高效稳定的产出。

第五节 智能工厂实施策略

当今工业自动化领域当中，可编程逻辑控制器既是执行逻辑指令的关键部件，又是形成智能工厂神经系统节点的重要组成部分。随着工业 4.0 的流行，PLC 也从之前的设备控制变成了数据聚合 + 边缘计算。智能工厂不是一下子建成的，它是依靠先进的 PLC 技术，分两步实现生产制造的数字化转型。

一、智能工厂建设路径

智能工厂的创建是逐步展开并且繁杂的工程，企业必须先确定自身所处的发展阶段和战略目的。因为 PLC 技术不断进步，制造企业创建起稳定的底层控制网络以后，就可以慢慢加入数据分析和智能决策模块。这条路径大体上按照物理设备互联、信息数据深度挖掘、生产全流程协同配合的逻辑向前推进。

（一）从单机自动化到产线自动化

传统制造业当中，PLC 主要是对单个设备实施逻辑控制，从而形成一个个独立的自动化孤岛。物料流转依靠人工搬运或者简单的机械传送，设备之间没有信息交流，生产节拍不能协调，整体效率常常被瓶颈工序所限制。随着现场总线技术以及工业以太网的普及，把分散的单机设备集成起来，并通过网络互联形成自动化产线，已经成为必然的趋势。此时 PLC 的功能已经不再仅仅是控制单台电机或者气缸的运动，而是需要通过工业网络协议与其它 PLC、人机界面、驱动器进行实时通讯。完成主从站的配置之后，中央 PLC 就可以对整个生产线的运作情况进行统筹管理，使得上游和下游的设备相互协调、相互配合。

生产线自动化要使得 PLC 程序具有更高的结构化、模块化的特征。工程师要设计复杂的握手信号，保证各个工序之间正确传递物料。在一条由加工、装配、检测、包装组成的自动化生产线上，各个工位的 PLC 要实时传递工件的位置和加工状态。当某一个工位发生故障报警时，上游设备应该立即停止进料，下游设备在完成当前工件后进入待机状态，防止物料堆积或者空转造成浪费。水平集成利用网络通信技术克服了物理空间障碍，把分散的生产设备连为一个有机的整体，从而大大提高生产线连续性和稳定性。

1. 建立统一的工业网络架构是实现产线自动化的前提，采用 PROFINET 或者 EtherNet/IP 等高速工业以太网通讯协议，将车间内所有的 PLC 控制器都置于同一个网段中，保证控制指令和状态数据的毫秒级传输，消除信息传递的延迟和丢包现象。

2. 用分布式 I/O 控制模式把控制系统扩展到生产线各处，用远程 I/O 模块在附近采集传感器信号并驱动执行器，极大地简化了现场布线、降低成本、增强抗干扰性、便于维护。

3. 制订统一的设备接口功能块，对所有的生产系统、不同种类的机器设备进

行通用的数据交换模式和控制逻辑规定,使新型的设备在接入产线时即刻可以投入使用,降低系统的集成的难度,提高整个生产线的灵活性及可扩展能力。

过程中的安全控制整合也一样。传统的硬接线安全回路慢慢被基于总线的安全 PLC 系统所取代。使用安全协议在线路上传输标准数据和安全数据,在同一线路上完成急停、光幕等安全信号的逻辑编程和分区控制。既简化了硬件接线,又在产线触发局部安全机制的时候保证其他区域正常运行,最大限度地减少非计划停机时间,为从单机作业向连续流生产跨越提供可靠的技术保障。

（二）从数据采集到数据分析

当产线完成自动化互联之后,PLC 就变成了海量工业数据的一个重要产生地。单纯的数据采集和存储已经不能满足智能制造的要求,数据真正价值在于从沉睡的数据中挖掘出指导生产的智慧。过去 PLC 只管“设备是否运行”,现在更多地关心“设备运行得怎样”。这样的转变就要求 PLC 要有更好的数据处理能力,甚至要做边缘计算,把原始的 I/O 信号转换成有意义的 KPI。

现代高级 PLC 已经具备了大量数据统计分析的功能。在控制程序里插入算法模块可以实现设备综合效率的实时计算,同时也可以统计各个工位循环时间、故障率以及停机原因等相关数据。预处理过的数据已经不再是冰冷的二进制代码,而是生产健康状况的晴雨表。通过对伺服电机电流、转矩数据进行连续监测与趋势分析,PLC 可以发现刀具磨损、机械传动部件松动等早期征兆,在设备彻底损坏之前发出预测性维护报警,将以往的被动维修转变为现在主动预防。

数据分析的深浅在质量控制这一环中就表现了出来。传统质量检验多是在事后的剔除,用 PLC 进行实时数据分析可以实现过程中的质量控制。PLC 对压力、温度、位移等关键工艺参数进行高速采集,并与事先设定的标准曲线实时比较,来对生产过程的质量作出即时判断。一旦参数超出公差带,系统就会立即对工艺参数进行自动补偿,或者直接标记次品分流。毫秒级的反馈回路是云端分析所不能及的,充分体现了 PLC 作为边缘计算节点的优势,使数据价值在产生源头的瞬间就被释放出来。

（三）从局部优化到全局优化

智能工厂的最终目的就是实现整个价值链的全局优化,所以 PLC 不能只控制自己的设备,还需要深入企业运营管理体系中。从局部优化到全局优化的跨越,其实质就是操作技术和信息技术的深度融合。PLC 通过 OPC UA、MQTT 等

物联网协议，在这个阶段就打破了 PLC 控制层和信息管理层之间的壁垒，可与 MES、ERP 等上层管理系统实现双向的数据交换，成为物理世界与数字世界之间的桥梁。

全局优化就是实现生产资源动态配置、有效利用。当 ERP 系统发出生产订单以后，信息流就自动穿过车间底层的 PLC。控制系统会依照当前的设备状况，物料库存，能源消耗等情形，对生产任务实施智能调度。电力负荷高峰期，PLC 根据全局能源管理策略，自动对高耗能设备的工作模式进行调整，也可以将非紧急任务推迟执行，以降低总的能耗成本。这样的依赖全厂数据来做决策的机制，就避免了局部为了追求高产出而造成下游堵塞或者能源浪费的次优解，从而实现了全厂范围内的效率最大化。

数字双胞胎技术的应用使得全局优化成为可能。通过建立和物理产线一一对应的虚拟模型，可以在虚拟环境中对 PLC 控制逻辑进行预验证和迭代优化。实际生产过程中，物理 PLC 采集的实时数据不断传送给数字双胞胎，使得虚拟工厂可以同步运行。管理者通过比对虚拟和现实运行的不同，可以快速找出系统的瓶颈，在虚拟空间中试验各种改进方案，确定可行之后才能下发给物理 PLC。通过闭环优化过程，使工厂在多品种、小批量定制生产问题上获得很好的改进效果，从单个设备的效率提高过渡到整个制造生态系统的协同发展，实现质的飞跃。

二、实施过程中的挑战与对策

企业在智能工厂的创建过程中会碰到技术架构老化、数据标准不统一、组织文化冲突等许多障碍。PLC 系统是物理世界与数字世界的纽带，PLC 系统升级改造的过程也充满了不确定性。正视这些挑战，提出切实可行的技术、管理对策，是保证智能工厂战略从理想变为现实的重要保证，需要工程技术人员、管理人员共同努力，用创新的方法解决问题。

（一）新旧设备兼容性问题

在大多数制造企业当中，智能工厂的创建不是从零开始，而是大多是在已有基础上进行改造。车间里有各种不同年代、不同品牌、不同控制原理的设备混杂在一起。老旧的 PLC 系统只支持某一种串行通讯协议，甚至没有外部通讯接口，而新引进的设备大多数使用以太网等现代通讯标准。新旧设备并存，造成语言不通问题严重，给建立统一的互连网络造成巨大的技术鸿沟。直接淘汰旧设备成本

高昂，还会造成生产长时间停产，企业不能承受这样的损失。

解决的办法就是使用工业物联网网关和协议转换技术。不同的协议有着不同的特性以及应用场合，如下表所示：

常见工业通信协议特性表

协议类型	典型协议	主要特点	典型应用场景
传统现场总线	Modbus RTU	主从式通信，报文结构简单，可靠性高，但传输速率较低。	单机设备控制，旧设备互联，简单数据采集。
	Profibus-DP	主从式通信，具备较高确定性，传输速度较快，但兼容性较封闭。	中高速自动化产线，复杂过程控制系统。
工业以太网	PROFINET	高实时性，支持高速数据传输，开放性强，与 IT 网络兼容。	高性能自动化、运动控制、高带宽数据传输。
	EtherNet/IP	兼容 IT 以太网标准，实时性高，广泛应用于北美市场。	产线自动化，IT/OT 深度融合，灵活的设备集成。
物联网协议	OPC UA	统一信息模型，跨平台，内建安全机制，支持复杂数据结构。	工业数据标准化、IT/OT 融合、云边协同、设备互操作。
	MQTT	轻量级，基于发布 / 订阅模式，低带宽消耗，适用于不稳定网络。	远程设备监控、广域网通信、边缘计算数据上报。

对于有通讯接口但协议封闭的老旧型号 PLC，可以增设智能网关，将 Modbus RTU、Profibus-DP 等传统的现场总线协议实时转换成 OPC UA 或者 MQTT 等标准物联网协议，把老旧设备包装成具备现代通讯能力的智能节点。没有通信能力的哑设备，则可采用外挂传感器的方式实现数字化。在不改变原有电气回路的情况下，在设备上直接加装开口式电流互感器、振动传感器、光电开关等，采集设备的运行状态信号，再将采集到的信号接入新增的远程 I/O 模块或者边缘计算网关。该种非侵入式改造方案既不破坏原有设备的使用价值，又能使设备联网的风险降到最低，从而实现设备数据的有效采集，保证新旧系统在智能工厂结构体系中可以和谐共存。

（二）多源数据融合与标准化

因为 PLC 所连接的设备越来越多，所以数据的量级和维度也在迅速增大。各个传感器传来的温度、压力、振动数据，各个控制器传来的状态字、报警码，共同组成了复杂的多源异构数据环境。核心问题是没有统一的语义标准。同样的温度参数，在 A 设备的 PLC 里是以浮点数的形式存储在寄存器中，单位是摄氏度；在 B 设备的 PLC 中则是整型数据，代表电压模拟量。直接将原始数据上传给上

层系统，这些数据对 IT 系统毫无意义，只能成为垃圾进垃圾出，数据分析变成无用功，严重影响数据价值的挖掘。

核心就是创建统一的信息模型和数据标准化规则。在 PLC 层级，应当推广使用 PackML 等行业标准状态机模型，对设备运行模式、状态进行规范，从而在逻辑层面达到设备行为一致性的目的。在数据传输方面，OPC UA 的信息建模功能就显得格外重要。

1. 创建统一命名空间，制定全厂范围内的标签命名规范，确定每一个数据点的层级结构以及业务含义，保证数据产生之初就带有身份证和说明书。

2. 在边缘侧部署数据清洗与标准化服务，采用边缘计算网关或者高性能 PLC 对采集到的异构数据进行格式转换、单位统一、时间戳对齐，去除无效噪点，将非结构化数据转换为标准的 JSON 或者 XML 格式。

3. 创建元数据管理平台，集中维护 PLC 和现场设备的数据字典并实施版本控制，使上层的数据应用可以随着底层设备程序的变动而同步更新解析规则，从而保证数据链路的完整性以及准确性。

这样就可以抹平数据孤岛间的语义差异，实现 OT 数据和 IT 系统无缝对接，为以后大数据分析、人工智能的应用打下坚实统一的数据基础。

（三）IT 与 OT 团队的协作

智能工厂的建设不但是技术的革新，而且是组织文化的一种重塑。长期以来 OT 团队和 IT 团队两方面各自的工作目标、技术技能、思维方式等存在较大的不同。OT 团队主要任务就是保证生产的连续性与稳定性，把停机当成最大的事故，对系统变更持非常谨慎的态度，习惯使用梯形图等确定性编程语言；IT 团队则更注重数据的保密性和系统迭代的速度，习惯于敏捷开发、频繁的补丁更新，用高级语言处理抽象数据。当 PLC 系统接入企业网络并且频繁地进行数据交换的时候，这两个团队之间的鸿沟，就会变成互相推卸、指责的行为。例如 IT 部门强制推行的网络安全政策会中断 PLC 实时通讯，而 OT 部门固守旧系统就会使 IT 数据采集无从下手。

打破僵局要建立跨领域协作机制以及融合型人才培养体系。企业成立以 IT 人员和 OT 人员组成的数字化转型项目组，确定共同的绩效指标，融合各自的视角。从技术角度来讲，OT 工程师渐渐学会网络架构、数据库的一些基本常识、Python 这类脚本语言；IT 工程师要深入到车间里去，认识 PLC 的扫描周期、实

时性需求、工业现场的安全规定。

这就产生了一种新的工业 DevOps 工作方式。IT 人员可以采用虚拟化技术以及容器化的应用程序，在不会对 PLC 的实时控制内核造成影响的情况下，在 PLC 的开放式操作系统分区内安装数据采集与分析软件。还要创建统一的安全防御体系，既符合 IT 部门的安全合规要求，又满足 OT 系统可用性特点。使用工业防火墙对 PLC 进行深度包检测，而不是简单的端口封锁。依靠工具、流程彼此融合，把 IT 的先进技术同 OT 的稳定特性融合起来，消除团队之间的信任鸿沟，携手推动生成智能工厂高效完成。

第五章 PLC 运动控制与伺服驱动技术

本章会详细探究可编程逻辑控制器在工业运动控制方面的应用，以及伺服驱动同 PLC 的融合之法。本文从底层硬件架构和上层控制算法的交互出发，试图找到实现高精度、高动态响应自动化系统的方法。

第一节 运动控制基础与 PLC 集成

运动控制是工业自动化系统的重要子系统，它的本质就是把逻辑指令转换成精确的位移、速度或者力的输出。PLC 是控制系统的大脑，不仅要进行复杂的逻辑运算还要和下位机建立高效的信息传输通道，使指令可以正确及时地被执行。

一、运动控制系统组成

典型的工业运动控制系统一般由指令产生装置、功率放大器、机电转换部分和机械传动机构组成。四个部分互相配合，形成了从信息流到能量流，最后变为机械流的闭环。闭环中任何一个环节的性能好坏都会直接决定最终控制效果。

（一）控制器、驱动器、电机、执行机构

控制器是整个运动控制系统的信息处理中心，一般使用 PLC 或者专用运动控制器。PLC 在现代自动化系统中运行内部运动控制算法，按照工艺要求制定出目标轨迹，再将目标轨迹转化为具体的控制信号。信号可以是高频脉冲、模拟电压或者以总线为载体的数字指令。控制器运算能力决定了系统响应速度及多轴协调控制的复杂度。高端的 PLC 甚至具有可以处理纳秒级任务周期的运动控制核心，被广泛应用于半导体生产、高速包装等对实时性要求很高的场合。

驱动器是连接控制器和电机的功率接口，起到信号放大的作用。接受 PLC 微弱控制信号，经过内部逆变电路转换为主电源电压、频率可调的强电输出，进而驱动电机运转。现代伺服驱动器内部装有独立的数字信号处理器，具有电流环、速度环、位置环的三环控制功能，可以独立完成一些底层控制任务，比如电流矢

量控制、振动抑制等，从而减轻上位 PLC 的计算负担。驱动器的好坏直接影响电机转矩的平稳和动态跟随的准确。

电机是把电能转化为机械能的核心部件，根据不同的应用场景选择不同类型的电机。在精密定位场合下，永磁同步伺服电机由于具有高功率密度、高响应性等特点被广泛使用；而成本敏感或者开环控制的场合下，步进电机更常见。直线电机属于直接驱动技术，它消除了中间传动环节，从而可以得到更高的加速度和精度。执行机构是指电机轴之后的机械传动部分，滚珠丝杠、同步带、齿轮齿条、导轨滑块等都属于执行机构。机械系统的刚性、摩擦系数、背隙误差等都会影响控制精度，优秀的控制算法一般需要优良的机械设计配合才能发挥最大的效用。

（二）位置、速度、转矩三种控制模式

位置控制模式是工业自动化中应用最广泛的控制形式，它的控制目的就是使执行机构准确到达指定物理坐标。PLC 发出目标位置给驱动器，驱动器将反馈信号和目标值比较，然后控制电机产生相应的电流，直到达到目标点为止。点对点定位、直线插补、圆弧插补、电子凸轮同步等复杂的运动轨迹都是用位置控制模式。该模式对系统稳态精度和动态跟踪误差有很高的要求，多用于数控机床、机械手装配、自动仓储系统。

速度控制模式只要求电机转速恒定或者按一定的曲线变化，不关心具体的停止位置。输送带、搅拌机、风机水泵、纺织机械主轴驱动等，速度模式占主导地位。PLC 通过模拟量或者总线通信给出目标转速，驱动器内部的速度环抵抗负载扰动使转速保持稳定。转矩输出会随负载的变化而调整，使角速度保持在预设的某个值上。高精度速度控制对保证连续生产过程中材料张力的稳定、工艺的一致性十分重要。

转矩控制模式与前面两种模式有着本质的区别，它的控制目标是电机输出的电磁转矩，速度和位置随着外部负载的变化而变化。此种模式一般用在需要精确力控制的场合，比如薄膜收卷、线缆押出、注塑机锁模机构等。收卷时，随着卷径增大，为保证材料张力不变，电机输出的转矩要动态调节。负载突然消失时，在转矩模式下电机有“飞车”的风险，因此一般要设置速度限位保护。这三种模式不是相互独立的，现代伺服系统可以使用 PLC 指令，在不停机的情况下实现实时无干扰切换。

（三）闭环控制与反馈元件

闭环控制是实现高精度运动控制的基础，闭环控制就是加入了反馈环节，把系统的实际输出量实时反馈到输入端，再和期望值进行比较。运动控制系统的运动反馈一般由电机轴端或者负载端的编码器来实现。编码器是一种精密测量元件，可以将机械角位移或者直线位移转换成电信号，给人们提供位置、速度甚至加速度的准确信息。

1. 增量式编码器用 A、B、Z 三相脉冲信号来表征位移的变化。它的优点是结构简单、成本低、传输距离远。因为其输出的是相对位置变化，系统断电之后会丢失当前坐标，上电后需要做回原点操作来建立参考坐标系。这就对一些不能随意移动的机械结构形成了限制。

2. 绝对值编码器给每一个机械位置赋予一个独一无二的编码。无论是断电还是通电，只要读取编码器数值就可以知道当前精确位置，不需要回原点。可以提高设备的启动效率和安全系数。按照量程不同又分为单圈绝对值、多圈绝对值。

3. 全闭环控制架构就是在半闭环（只反馈电机位置）的基础上，在最终执行机构（工作台）上装上光栅尺或者磁栅尺作为第二反馈源。该方式可以消除丝杠热变形、齿轮间隙、传动链弹性变形所带来的误差，可以达到微米级甚至是纳米级的定位精度。但是对控制算法的稳定性提出了很高的要求，容易引起系统振荡。

反馈信号质量的好坏直接决定了整个控制系统的性能上限。在高干扰的工业环境中，编码器信号传输一般采用差分驱动的方式来抑制共模干扰。PLC 以及驱动器必须具有高速计数或者专用编码器接口，才能解析高频反馈信号，保证控制回路的更新速度符合动态响应的要求。

二、PLC 运动控制实现方式

随着微电子技术、通信技术的发展，PLC 实现运动控制的方式也从简单的脉冲控制发展为复杂的总线网络控制。不同实现方式具有不同的成本结构、接线复杂度以及控制性能，工程师根据项目的规模以及精度要求做出相应的选择。

下表对常见的 PLC 运动控制实现方式进行了对比：

PLC 运动控制实现方式对比表

特性维度	集成高速脉冲输出控制	专用运动控制模块	基于总线（如 EtherCAT）控制
控制原理	PLC CPU 生成脉冲序列	模块内部运动芯片处理	实时工业以太网通信
硬件成本	低（利用 PLC 自带端口）	中（需额外购买模块）	高（伺服、控制器成本较高）
布线复杂度	高（轴数越多越复杂）	中（仍需独立信号线）	低（一根网线串联）
控制性能	简单定位，速度受限，开环	高速高精，多轴插补，闭环	极高，纳秒级同步，全闭环
抗干扰能力	较差（易受电磁干扰）	较好（差分驱动接口）	优秀（数字通信，检错机制）
应用场景	简单点位、精度要求不高设备（包装机、送料机）	复杂轨迹、高精定位设备（数控机床、焊接机器人）	高端精密制造、多轴同步（半导体、高速包装）
编程难度	相对直观（初学者友好）	较高（需掌握模块指令）	较高（需掌握总线协议和功能块）

（一）集成高速脉冲输出控制步进 / 伺服

使用 PLC 自身具有的晶体管输出点发出高速脉冲，是中小规模自动化设备中最常见的控制方式，也称为脉冲加方向控制。PLC 高速脉冲输出口根据设定的频率和数量来输出脉冲串，其中频率决定电机的转速，脉冲数量决定走动距离，另外还有一个普通输出点用来控制旋转方向。

此法最突出的优点就是成本低。大多数紧凑型 PLC 自带 2-4 路最高频率达到 100kHz 甚至 200kHz 的脉冲输出，可以使用便宜的定位模块控制多轴步进或伺服电机。对于包装机、送料机等点位不多、精度要求不高的设备，这是一种非常有性价比的方案。因为信号直接由 CPU 来处理，指令响应速度较快，编程逻辑直观，利于初学者学习。

脉冲控制也有着很明显的物理限制。脉冲频率上限影响电机高速、高精运行。尤其是当使用高分辨率编码器的时候，为了达到高转速往往需要很高的脉冲频率，这就超出了常规 PLC 硬件的极限。信号传输容易受电磁干扰的影响，造成丢步或者多步。其本质是开环发送，即 PLC 只是发送脉冲，一般不实时读取伺服反馈。一旦机械发生卡死，PLC 就很难及时发现并修正，因此需要配合外部传感器做原点回归和限位保护。接线工作量随轴数的增加而急剧增加，每增加一个轴就要增加独立的脉冲线、方向线、IO 信号线，使电气柜的复杂程度和故障排查难度增大。

（二）使用专用运动控制模块

当控制任务的复杂程度或者控制轴的数量超过 PLC CPU 本身的处理能力时，一般使用专用的定位模块或者运动控制模块。这些模块与 PLC 主 CPU 是独立的，内部装有专用的运动控制芯片，通过背板总线同主 CPU 通信。主 CPU 只需要发出“移动到位置 X”的高级指令，具体的脉冲产生、加减速曲线计算、原点回归逻辑等全部由模块来处理。

专用模块有很强的插补运算能力。它们不仅可以完成单轴的高速定位，还可以轻松实现多轴之间的直线插补、圆弧插补甚至是螺旋线插补，这对于数控机床、涂胶机、焊接机器人等需要复杂轨迹控制的设备来说非常关键。部分高端模块还带有凸轮曲线，可以代替机械凸轮，实现多轴之间的非线性同步，使机械设计更加柔性。

专用模块的使用大大提高了系统可靠、抗干扰。模块一般都带有差分驱动接口，可以远距离传输高频信号，抗噪能力强。模块高速输入接口多，可以和原点开关、限位开关、伺服驱动器反馈信号直接连接，实现微秒级的硬件中断响应，保证在极限情况下能快速停机保护。虽然成本比脉冲输出方式高一些，但是它所带来的性能的飞跃以及开发效率的提高，对于复杂的项目来说，是不可替代的。

（三）通过总线（如 EtherCAT）控制伺服

高端运动控制的实现方式发生了质的飞跃，以工业以太网为载体，基于实时现场总线技术，EtherCAT、PROFINET IRT、MECHATROLINK III 等技术支持高端运动控制。PLC 通过一根网线把所有的伺服驱动器串联或者星型连接起来，数字通信完全替代了传统的脉冲、模拟量接线方式。

总线控制最大的优点就是数据吞吐量大，时钟同步精度高。EtherCAT 的分布式时钟可以使得网络内所有的伺服轴同步误差小于 1 微秒。PLC 可以以很短的通信周期（250us 或者 500us），对几十个伺服轴同时发出位置、速度或者转矩的指令，并实时获取电机的实际位置、电流、故障代码等全部的状态信息。闭环信息透明度是全闭环的，而脉冲控制做不到这一点，因此复杂的力位混合控制、龙门同步控制、防碰撞检测都可以实现。

接线十分简单是总线方案的又一大特点。不管系统有多少个轴，控制器侧只需一个网口，伺服之间通过网线级联，大大降低布线成本和安装时间，消除因接线松动或信号衰减而造成的故障隐患。参数设置更方便，PLC 可以直接读写伺

服驱动器内部参数，不用逐台调节驱动器面板，利于配方更换和批量维修。尽管 PLC 的算力要求高，但是随着控制器性能的提高，总线控制也逐渐成为了中高端自动化设备的标准配置。

第二节 伺服系统参数整定与优化

伺服系统在现代工业自动化控制当中占有举足轻重的地位，它是控制算法与物理执行机构之间的纽带。伺服系统性能的好坏直接决定了机械设备运动的准确与快慢。电气工程师若对伺服驱动器内部控制逻辑有深刻的理解，并且充分掌握伺服驱动器参数整定的基本法则，就可以使设备由“能动”变为“精动”。本节会详细剖析伺服系统三环控制结构，探究参数调节的内在机理，而且联系工程实践中经常出现的问题，给出具体可行的系统性能改善办法。

一、伺服参数基本概念

伺服驱动器之所以能实现高精度运动控制，就是由于它内部复杂的闭环控制算法。掌握参数所代表的物理意义以及各参数之间的相互影响机理，才能做好整定工作。本文从控制回路结构入手，对各个重要的参数进行定义，分析各个参数对于系统行为的影响，以使技术人员建立起系统参数调试的认知体系。

（一）位置环、速度环、转矩环的作用

伺服系统控制架构多采用串级控制，转矩环、速度环、位置环层层嵌套，这样的结构使系统具有很高的稳定性以及控制精度。最内层的转矩环用来调节电机输出转矩，响应速度最快，采样频率也最高。该环节检测电机绕组电流并和给定电流指令比较，再由电流调节器迅速调节输出电压，使电机输出期望的电磁转矩。由于转矩与电流成正比，转矩环的性能决定电机的加速能力以及力矩输出的平稳性，是伺服系统动态响应的基础。转矩环一般由驱动器厂家出厂时根据电机特性预先设定好，用户很少会去调整。而在高动态负载场合，理解它本质上是一个电流环，有利于分析过载、发热问题。

中间层是速度环，它的核心任务就是消除负载扰动，使电机按给定的速度指令平稳运转。速度环接受位置环输出的速度指令，采集电机编码器反馈信号得到实际转速，两者之差经过速度调节器运算后，产生转矩指令给内环。速度环带宽

的好坏直接决定系统抗干扰能力；当负载发生变化时，稳健的速度环可以迅速改变输出转矩来抑制速度波动。对于大部分的数控机床以及自动化生产线来说，速度环的刚度决定着加工表面是否光滑、运行是否顺畅。如果速度环响应有迟滞，电机在加减速的时候就会出现拖尾或者超调的现象，使运动轨迹偏离预定路线。

最外层为实现精确定位而设的位置环。位置环接收来自上位可编程控制器的脉冲指令或者总线位置命令，将其与编码器反馈的实际位置进行比较，得到位置偏差。偏差经过位置调节器处理后，就会输出一个速度指令给速度环。位置环的主要作用是保证系统在静态的时候没有误差，在动态的时候能准确跟随指令轨迹。位置环增益越大，系统跟随误差越小，定位速度越快。但是位置环增益过高，需要内环有很好的性能支撑，速度环响应跟不上，盲目提高位置环增益，会导致系统产生振荡。因此这三个闭环环节环环相扣，外环的调节必须建立在内环稳定的基础上，调整顺序一般由内而外。

（二）增益、积分时间、微分时间理解

伺服参数整定时，比例增益、积分时间和微分时间是经典控制算法的三个重要部分。比例增益决定控制作用的强弱，积分时间决定控制效果的准确性，微分时间决定控制目标预先估计的能力。比例增益可以形象地看作系统的弹簧刚度。系统受到外部干扰或者产生偏差的时候，比例增益决定回复力的大小。增益值越大，系统对偏差的反应越灵敏，抵抗干扰的能力就越强，就像一个硬弹簧一样，受压之后能迅速回弹。在速度环中提高比例增益可以明显加快系统响应速度，减小速度波动；位置环中高增益即跟踪误差小。物理系统总会存在惯性和延迟，如果刚度过大，系统很容易出现超调，甚至在目标位置附近产生高频振荡，造成电机发出刺耳的噪声。

积分时间常数用来消除系统的稳态误差，积分时间常数就是对过去偏差的积分。在纯比例控制中，偏差减小到一定程度时，输出的校正力不能克服摩擦力或重力，就会产生静差。加上积分作用以后，只要存在偏差，输出就会随着时间的推移而不断增加，直到偏差消失为止。积分时间越短，则积分的作用越大，消除静差的速度也就越快。此特点对垂直升降轴或者存在较大恒定阻力矩的负载来说尤其明显。但是积分作用过强会导致相位滞后，使系统稳定性下降，容易出现低频晃动或者定位时不断调整。因此，积分时间的设置要做到消除静差和维持稳定两者之间的平衡，在系统不出现振荡的情况下尽量减小积分时间。

微分时间常数反映的实际上是控制系统对将来趋势的估计。微分项对偏差变化率十分敏感,偏差刚开始增大时,微分作用就会提前产生反向的抑制力,就像给系统加了一个阻尼器。合适的微分作用可以抑制超调,缩短调节时间,提高系统的动态稳定性。负载惯量大或者要求快速启停时,此方法效果最好。但是微分对于高频噪声非常敏感,微分时间过大,会使得编码器信号中微小的噪声被放大,造成电流剧烈波动,使电机发热、振动。微分参数起到辅助作用,和比例、积分参数配合使用来对系统进行微调从而得到最好的瞬态响应。

(三) 自动整定与手动整定方法

伺服驱动技术不断发展,自动整定功能也成为了现代伺服系统标配,大大降低了调试的门槛。自动整定有离线自动整定和在线实时整定两种方式。在离线整定过程中,驱动器控制电机做小幅度的往复运动,通过测量电流和加速度的关系来估算负载转动惯量比,根据预设的刚性等级计算出对应的位置环、速度环增益以及滤波器参数。此办法适合于负载特性比较稳定的情况,使用方便。在线实时整定更先进,驱动器在设备运行过程中不断检测负载变化,实时调节控制参数。它可以很好地适应加工过程中工件重量变化、机械臂姿态变化所引起的惯量剧变,但是需要小心地设定调整范围,以免外界突发的干扰造成参数误修正。

虽然有自动整定功能,但面对复杂的机械共振、极端的惯量比或者特殊工艺要求的时候,手动整定仍然是一项非常重要的技能。手动整定一般按照先内后外、先平稳后激进的原则。

1. 调试人员先将位置环增益设为较小值,只对速度环进行调节。逐渐增大速度环比例增益,直到电机发出轻微的啸叫或者振动,再回调到稳定状态的百分之八十左右。

2. 增加速度环的积分作用,即减小积分时间常数,以提高低频刚度,并观察稳态误差是否消除。

3. 在速度环稳定后,逐步提高位置环增益,以减小跟随误差,提升定位精度。

4. 调试过程中依靠示波器或者驱动器监控软件观察阶跃响应曲线,根据超调量和调节时间仔细调节前馈增益和滤波器参数,直到系统性能最好为止。

二、系统性能优化实践

掌握了基本参数的整定方法后,工程师面对工业现场千变万化的应用场景时

一般会继续发掘系统潜力。对定位不准、运行抖动、响应慢等实际问题进行细化调整,使系统达到最大优化,这才是体现自动化技术价值的地方。

(一) 提高定位精度的调整技巧

精密组装、微米级定位精度是各个领域如半导体封装、数控加工的基本要求。如果要提高定位的精度,那么首先要消除机械传动链的反向间隙。现代伺服驱动器和控制器大都具备间隙补偿功能,但是参数调节的前提是精确测量。工程师用千分表或者激光干涉仪测量各个轴的反向间隙值,将准确值输入到补偿参数中。这只是静态补偿,在动态过程中还需要使用全闭环控制技术,即在负载端安装一个光栅尺作为第二位置反馈,直接检测最终执行机构的位置,把机械传动所造成的弹性变形和热误差都包含在控制闭环里,从根本上消除传动误差。

除了硬件方面的优化,参数方面仔细的调节对提高精度同样不能小视。提高位置环增益是减小稳态误差的直接方法,但必须与前馈控制配合使用。位置前馈增益可以让系统在指令改变的时候做出预判性的控制量,大大减小动态跟踪误差,使实际轨迹更接近指令轨迹。调节前馈增益时一般设置在 50% 到 100% 之间,过大的前馈会造成加减速段过冲。为了进一步消除停止时微小抖动引起的定位误差,可以使用伺服的定位完成窗口参数,配合积分钳位功能,使电机在很小的误差带内完全锁死,不受外力影响产生微米级的漂移。

(二) 减少振动与过冲的参数设置

机械共振是伺服系统调试中最难处理的,电机发出刺耳的啸叫声或者设备不停的颤动。这一般是由于伺服增益过高激发了机械结构的固有频率造成的。解决这个问题最好的办法就是使用陷波滤波器。利用驱动器自带的频率分析工具准确找到共振频率点,设置陷波滤波器的中心频率和带宽,专门对该频率进行衰减。这样既可以抑制振动,又可以保持其他频段的高增益,不会因为消振而降低系统响应速度。对低频机械振动,可以用振动抑制滤波器抑制,调节阻尼系数平滑末端负载的抖动。

过冲现象一般发生在高速定位结束的时候,即负载越过目标位置后又回拉。这不仅会增加整定时间,还会造成碰撞事故。抑制过冲的关键就是平衡速度环和位置环的响应。如果位置环增益大于速度环增益,很容易产生超调。此时应该适当减小位置环增益,或者在速度环中加入微分作用,利用微分作用的阻尼特性提前减速。用 S 型加减速曲线代替梯形曲线也是从指令源头减少过冲的有效办法。

S 型曲线在启动、停止时的加速度变化是连续平滑的，没有加速度突变带来的冲击，使系统可以柔和地趋近目标位置，大大降低超调量。

（三）响应速度与稳定性的平衡

在工业自动化方面，响应速度和稳定性常常存在着矛盾。追求极致的生产节拍，伺服系统必须具有极短的整定时间和极快的跟踪速度，这就需要极高的环路增益；而高增益又将系统推到临界稳定边缘，稍有不慎就会发生失稳振荡。找到二者的最佳平衡点，就是参数优化的艺术所在。一般需要控制系统的带宽，带宽越大系统对于快变指令的复现能力就越强，但高频噪声抑制能力就越差。工程师应根据机械结构的刚性来确定合理的带宽目标，对直连丝杠这类刚性较好的结构，可以追求较高的带宽；而皮带轮、长悬臂等柔性结构则要牺牲部分带宽来保证系统的稳定性。

为了保证系统稳定性能的同时，又尽可能的提高响应速度，现代伺服驱动系统一般用模型追踪控制和二自由度控制算法。这些算法可以把指令响应特性与抗扰动特性解耦，使工程师可以分别独立调节。可以将指令响应设置得很快以满足快节奏的要求，抗扰动特性设置得较软，避免系统对机械间隙、摩擦过于敏感。合理使用转矩前馈功能，可以不提高反馈增益来提高响应速度。通过计算加减速时所需的惯性力矩，并直接叠加到转矩指令上，使电机“未动先知”，大幅度减小加减速过程中出现的滞后，得到既快又稳的控制效果。

第三节 多轴同步控制技术

在现代工业自动化领域，随着生产设备向高速化、高精度化的方向不断发展，单一的运动控制已经不能满足日益复杂的工艺需求，多轴同步控制技术应运而生，并已经成为评价控制系统性能的重要指标。利用高性能现场总线 and 高速运算处理器等，使物理连接、逻辑算法等各方面全面革新，使各个执行机构的时间、空间上达到高度协调。

一、同步控制功能

同步控制功能是完成复杂运动轨迹的基础，又是提高设备加工质量、生产效率的关键。利用电子齿轮、电子凸轮、高精度相位控制算法使控制器可以组合成

有机的多个独立伺服轴。

（一）电子齿轮与电子凸轮应用

电子齿轮的功能从根本上彻底改变了传统的机械传动链的设计思路，依靠控制器内部的算法精确地设定出主轴和从轴之间的比例关系。工程师在实际操作中不需要更换机械齿轮和皮带轮，只需要在控制程序中更改分子和分母的参数比值，就可以实现任意传动比的设置。该种软连接方式，可以消除由于机械间隙而产生的传动误差，并可以大大减少机械结构的磨损以及维护成本。对高分辨率编码器反馈，采用浮点数运算或者长整型数据结构来设置电子齿轮比，可以保证长距离运行时位置指令的累积误差控制在微米级。这对定长切割、印刷套色等连续加工来说，有着决定性的作用。

电子凸轮属于对传统机械凸轮机构的一种数字重构，轴从轴上按照预先设置好的函数曲线，根据主轴位置变化实现非线性运动。创建电子凸轮表的时候，常常要用到三次样条插值或者五次多项式拟合算法，这样就能保证所生成的运动曲线在位移、速度、加速度甚至加加速度方面都保持连续平滑，防止机构运行时出现柔性冲击。

1. 部分复杂的包装机械设备可以使用电子凸轮曲线，根据产品规格实时切换工艺，实现飞剪或者旋切动作的无停车调整。

2. 通过设置凸轮的关键点以及从轴的缩放比例，能适应不同的尺寸产品加工要求，而这种灵活性是传统的刚性机械凸轮所无法达到的。

3. 控制器工作时会实时计算出主轴相位所对应的从轴位置指令，然后通过高速总线同时发送给驱动器，使机械动作和电气控制紧密融合。

（二）主从跟随与相位同步

主从跟随模式是多轴同步控制中最基础的架构之一，主要思想就是确定一个参考源作为主轴，其他的轴都跟随着它运动。参考源可以是实际的物理编码器反馈值，也可以是控制器内部产生的虚拟指令流。在印刷机或纺织机械的张力控制环节中，从轴除了要跟随主轴速度外，在位置上也要与主轴严格对应。为此，控制器内部的运动控制中心会以微秒级的频率来刷新主从轴位置数据，使用二阶或者三阶滤波算法平滑主轴信号的噪声，保证从轴接收到的指令平稳、准确。

相位同步是在主从跟随的基础上增加了相位偏移的控制。在生产中常会遇到需要调整两个旋转轴之间相对角度的情况，例如多色印刷机套印时，各色组滚筒

必须严格保持相位对齐，否则就无法保证图案的清晰。用相位同步指令来修正从轴的角度误差而不改变从轴基准速度。此种调整大都依照高速色标传感器获取的位置偏差信号来实施。控制器里面的锁相环算法按照偏差的大小、方向来算出最合适的相位补偿曲线，随即执行纠偏动作，产品质量就会保持一致。

（三）同步误差的补偿方法

理想情况下，多轴系统是完美的同步。但是机械间隙、负载波动、皮带弹性形变、总线通讯微小抖动等都会造成同步误差。为了消除这些非线性因素的影响，建立鲁棒的误差补偿机制就显得十分必要。

同步误差常见补偿方法表

序号	补偿方法	主要机制 / 特点	适用场景
1	交叉耦合控制	考虑轴间位置差，联动调整各轴输出	负载波动、动态不平衡
2	前馈控制	基于模型预估动态分量，减轻反馈负担	高动态响应、系统惯量变化
3	重复控制 / 迭代学习	依据前期周期误差，自行调节控制输出	周期性干扰、轨迹追随
4	反向间隙补偿	换向瞬间叠加补偿脉冲，抵消间隙误差	机械传动链反向间隙

常见的同步误差补偿方式如同步误差常见补偿方法表所示，各有各的特点以及适用范围。其中一种常用的控制策略就是交叉耦合控制，在单轴跟踪误差的基础上还要考虑各个轴之间位置差值，将其加入到控制回路中。当某一轴因为负载突变产生滞后时，控制器不但会增加该轴的输出力矩来校正，还会适当减少其它相关轴的速度来保持整体的同步。

除了轴间耦合的调整之外，以模型为基础的前馈控制也属于一种有效的动态误差补偿方法。对机械系统进行动力学建模后，控制器能预测出在某加速度或者加加速度下，系统所需要的转矩和速度分量，然后将这些分量作为前馈信号叠加到控制输出上。这样做大大减轻了反馈回路的负担，伺服系统的响应速度不再受位置环带宽的限制。当周期性干扰出现的时候，重复控制算法或者迭代学习控制算法会根据以前周期的误差数据，自己调节当前的控制输出。运行周期增多，同步误差就会具有收敛性，从而得到高精度追随轨迹。机械传动链的反向间隙，控制器用换向瞬间叠加补偿脉冲的方法，抵消齿轮啮合间隙引起的定位偏差，保证

往复运动时的定位精度。

二、多轴系统调试

多轴系统调试比单轴系统复杂得多，是控制算法的严峻考验，也是对机械特性、电气响应的综合衡量。调试过程高效化主要是依靠合理的程序结构、严格的测试程序来实现系统在各种工况下都能够正常运转的目标。

（一）虚轴与实轴的编程技巧

多轴同步系统的编程中，用虚轴的概念实现复杂逻辑的解耦，是一种重要的方法。虚轴不是真正与电机相连的物理轴，而是在控制器内存中建立的一个逻辑对象，它具有完整运动状态机、位置计数器、速度规划器。编程时，通常把虚轴当作整个系统的指挥官或者主基准，所有的实轴（即与物理电机相连的轴）都作为从轴和虚轴建立电子齿轮或电子凸轮的关系。该结构最大的优点是虚轴的运动轨迹完全由数学计算决定，与机械负载、摩擦、振动等无关，所以运动十分平滑准确。

当实轴跟随虚轴运动的时候，即使某一时轴因为机械故障出现波动，也不会反过来影响作为参照的虚轴，从而有效地避免误差在轴间级联放大。调试时工程师可以在不通电驱动电机的情况下，观察虚轴和实轴的指令曲线是否正确，从而验证逻辑，使调试过程更安全。对于需要频繁启停或者变速的工艺段，工程师可以编写专门的功能块来控制虚轴的状态，实轴只负责底层的伺服环路响应。通过把工艺逻辑（虚轴控制）和执行逻辑（实轴映射）分开，程序的可读性、可维护性得到了质的提升，也方便以后功能的扩展和移植。

（二）同步启动与停止的平滑处理

多轴系统在启动、停止瞬间动态表现的好坏，直接影响机械结构寿命及最终产品加工质量。多个大惯量负载轴高速同步时突然急停，会产生巨大的惯性力，使机械部件断裂，产品表面产生划痕。因此同步启停的平滑处理就成为调试工作的重中之重。在软件算法上，使用 S 型速度曲线或者正弦加加速度曲线代替传统的梯形波，限制加加速度（即加速度的变化率），使电机输出的扭矩变化更平缓，从而有效抑制机械系统残留的振动。

涉及到主从同步的场景，一般采用“动态啮合”。即主轴先加速到稳定运行状态，从轴在达到预设切入条件后，通过电子凸轮的飞剪曲线或者离合器的作用，

在速度和相位完全匹配时切入同步状态,从而有效避免了直接硬连接造成的冲击。

对于停止过程,特别是紧急停止工况,控制器需要执行协同停机逻辑。

1. 检测到急停信号之后,系统不会立刻关闭所有的轴,而是保持各个轴的同步关系,以系统最大的减速度一同减速到零。

2. 同步制动模式在停机的时候,可以保证各轴之间相对位置关系不变,防止由于各个轴的惯量不同造成减速距离不一致而发生机械碰撞。

3. 高精度设备中也会积极使用驱动器直流母线共享,即把制动轴产生的再生能量合理分配给其它需要维持力矩的轴,以达到优化利用能量、辅助平滑停机的效果。

(三) 轴间干涉的软件限位

多关节机器人、龙门结构或多工位协作设备中,各轴运动空间存在重叠的情况比较常见,稍不注意就容易发生严重的机械碰撞。传统的硬限位开关只能实现行程末端保护,不能彻底解决复杂空间内干涉的问题,因此基于软件算法的动态干涉检测与限位就显得非常有必要。该技术需要控制器实时创建运动部件的几何模型,按照当前的指令向前预估几个周期后位置的情况。龙门双驱结构中,两个平行轴要严格同步。软件限位对各轴的绝对位置进行监测,然后求出两个轴间的偏差值(偏斜误差)。偏斜量大于安全值时,控制器立刻发出报警,停止高速运动,防止龙门架扭转造成永久变形。多自由度机械手防干涉算法会划定一些禁入区域或者安全包裹体。当机械臂末端或者肘部靠近这些地方时,控制算法就会按照实际情况来改变路径或者减慢速度,严重的时候还会强制停止。

软件防护机制是动态生效的,可以依据设备当前模具尺寸或者工件种类自动调节限位范围,比固定机械限位要灵活得多。在编程实现上,一般用区域互锁逻辑,即当 A 轴处在某个区域时, B 轴的一些动作就会被软件锁定;或者利用笛卡尔空间坐标变换实时检测各关键节点的欧几里得距离,保证所有的运动部件都在安全距离以外,从而从逻辑上建立起一道坚不可摧的安全屏障。

第四节 运动轨迹规划与误差补偿

PLC 技术在现在工业自动化控制系统中已经不单是简单的逻辑顺序控制，发展到运动控制领域。由于制造工艺对加工速度、精度的要求越来越高，伺服驱动器内部的算法已经不能满足复杂工况的需求，基于 PLC 的高级运动轨迹规划、多维误差补偿等技术成了提高设备性能的关键因素。本节主要研究 PLC 实现复杂运动轨迹时的核心算法逻辑，用数学模型优化机械运动的平稳性，阐述物理环境影响下，利用软件算法对机械系统固有的几何误差、热变形进行动态修正的方法，最终达到对工业装备的微米级精确控制。

一、轨迹规划算法

轨迹规划是运动控制系统的大脑，轨迹规划决定着执行机构从起点移动到终点的方式。轨迹规划关系路径几何正确性、机械运行速度、加速度、冲击度。PLC 依靠内部的高速运算单元，实时解算运动方程，将理论路径离散化为伺服系统可以执行的脉冲序列或者位置指令。高效的轨迹规划算法可以有效的抑制机床的振动，缩短加工时间，是实现高速高精加工的前提。

（一）直线插补与圆弧插补原理

直线插补是运动控制中最低级别、最常用的一种路径生成方式，它的核心任务就是根据起点、终点来求出一系列中间点，使这些点尽可能接近理论上的直线。PLC 的运算逻辑中一般采用数字积分法或者逐点比较法。控制器按照设定的进给速度，把各个轴的位移分量，在每一个插补周期内进行分解。多轴联动系统中直线插补各轴同时开始运动，按比例同步到达终点，即各轴速度在任何时刻都必须保证合成速度投影到坐标轴上一致。当系统的分辨率很高时，离散化的阶梯状逼近无限接近于光滑的直线，加工出来的轮廓平直度就会更高。

圆弧插补需要做更复杂的三角函数运算或者差分方程求解。PLC 根据编程指令中圆心坐标、半径、起点、终点等计算出下一时刻 X 轴、Y 轴的进给量。算法在处理圆弧运动时，要一直观察当前的误差值，如果当前点偏离理论圆弧轨迹的误差超过预设的阈值，系统就通过改变进给脉冲的分配来纠正偏差。该过程需要 PLC 有很高的浮点运算能力，才能保证高速切削时圆弧的圆度和切向速度的稳定。特别是经过象限点的时候，插补算法要应对反向间隙和摩擦力突变带来的

非线性影响，保证圆弧过渡平滑无痕。

现代的 PLC 系统中插补算法已经不局限于平面几何了，螺旋线插补、空间样条插补正在逐步得到应用。螺旋线插补是将平面圆弧运动与垂直于该平面的直线运动合成，它被广泛地应用于螺纹铣削、油孔加工。此时 PLC 除了平面内轨迹精度保证外，还要对第三轴线性位移进行同步控制，会大大提高控制器多轴协同控制的要求。底层算法一般采用预处理的办法，预先计算出各个关键节点的坐标数据，并将这些数据存入缓冲区中，从而减轻实时运算的负担，保证插补输出的连续及时。

（二）S 型曲线与 T 型曲线速度规划

速度规划主要解决执行机构启停、变速过程中平稳性的问题。T 型曲线又叫梯形速度曲线，是最早、最简单的一种规划方式。其加速度恒定，速度波形为等腰梯形。计算简单，占用控制器资源少，适合于振动要求不高的场合。在 T 型曲线控制下，电机启动瞬间就具有最大加速度，并立即加速到目标速度，然后匀速运行，最后以最大减速度减速停止。但是由于加速度在启停瞬间存在突变，阶跃变化会产生无限大的加加速度，使机械系统承受较大的刚性冲击，容易引起设备抖动，从而限制了运行速度的上限。

S 型曲线速度规划采用加加速度控制消除加速度瞬间突变。S 型曲线中加速度变化是平滑渐进的，一般采用七段式或者五段式规划，使速度曲线呈平滑的 S 形。S 型曲线和 T 型曲线特性不同，具体如下表所示。

速度规划曲线特性对比表

特性	T 型曲线 (梯形)	S 型曲线 (平滑 S 形)
加速度变化	瞬间突变 (恒定)	渐变，无突变
加加速度	无限大 (启停时)	受控，平滑变化
运动平稳性	较差，易产生冲击和振动	极佳，运动柔和，无冲击
算法复杂度	低	高
控制器资源	占用少	占用多
应用场景	振动要求不高，成本敏感	高速高精加工，寿命要求高的精密设备
机械磨损	较大	较小
定位精度	相对较低	较高

从上表可以看出：

1. 启动时加速度从零开始按线性或者正弦规律逐渐增大到最大加速度，从而

有效消除启动瞬间的刚性冲击。

2. 减速时加速度平滑地回到零，能够很好地抑制残留振动，使定位更准、更柔和。

S 型曲线规划明显提高了运动的平稳性，延长了机械部件的使用寿命，但是它的算法复杂程度远远大于 T 型曲线。PLC 在一个运算周期内要计算位置、速度，还要实时更新加速度、加加速度的值。这就要求编程人员在配置运动参数时要考虑到电机的转矩特性、负载的惯量比、机械结构的刚性等，合理设置加加速度的极限值。不合理的参数设置会造成系统响应迟滞或者跟踪误差增大。高端包装机械、半导体封装设备中 S 型曲线已经成为标配，即使在高加速度的情况下也能保证设备运行轨迹丝般顺滑，大大提高生产效率和产品良率。

（三）连续轨迹的平滑过渡

实际工业加工中的运动轨迹一般由许多段直线和圆弧组成。如果在轨迹交接处减速到零后再开始下一段，加工效率会很低，而且频繁启停会使电机发热加剧、机械磨损加重。连续轨迹平滑过渡技术，也叫拐角控制或者混合路径控制，正是为此而生的。当 PLC 预读到两段相邻轨迹夹角时，算法就判断是否可以在不停车的情况下，用一段过渡曲线把两条轨迹连接起来。过渡一般采用相切或者曲率连续的方式，使得刀具或者执行末端可以以较高的合成速度平稳的通过拐角。

平滑过渡的关键是精准把控精度。PLC 可以给用户设定最大允许误差或者拐角半径参数。允许误差内控制算法对尖锐棱角做倒圆处理。对小线段密集连接而成的复杂曲面加工，如模具制造，PLC 就启动微小线段处理功能，将成百上千条微小直线拟合成光滑的样条曲线，例如复杂的非均匀有理 B 样条曲线。这样拟合不但消除了节点处的速度波动，而且保证了切削进给率恒定，使工件表面光洁度大大提高。

不同的过渡方式适合不同的加工环境。几何锐角切割工艺中必须使用准确停止模式，涂胶、焊接工艺中为了保证胶条、焊缝的均匀性，必须使用连续路径模式，此时 PLC 会动态调节各轴速度，保证合成线速度恒定，即使在拐角处轨迹也会产生轻微的内缩。更高级的平滑算法会用到前馈控制，提前预测拐角处的动力学变化，预先施加反向力矩去抵消离心力带来的路径偏差，在高速过弯时也可以保持轨迹的高保真度。

（四）前瞻功能的作用

高速加工最大的矛盾就是，进给速度极高，而机械系统加减速能力是有限的。如果 PLC 只考虑当前的运动指令，当突然出现急转弯或者终点的时候，物理系统往往来不及减速，就会产生过冲。前瞻功能就是为了解决控制系统滞后性而产生的重要技术。它采用 PLC 内存中的缓冲区，预先把当前程序段之后的几十甚至几千个程序段的数据读入。算法对未来的几何路径进行深入的分析之后，就可以提前对路径曲率的变化、拐角的大小以及微小线段的分布情况有所感知。

基于对未来路径的预判，前瞻算法会反向推算当前时刻所允许的最大速度：

1. 当系统检测到前方存在尖锐拐角的时候，会在很多个程序段之前就开始缓慢减速，以保证到达拐角顶点时的速度处于安全范围之内。
2. 当连续路径较为平坦时，系统则会计算出最优的加速曲线，尽快提升至目标速度。

打破了传统的控制方式中“一步一步走，一步一步看”的限制，将时间轴上的动态规划运用到空间轨迹控制上。

前瞻功能的好坏由 PLC 的运算性能和缓冲区大小共同决定。处理复杂的三维曲面精加工时，大量的 G 代码数据流要由 PLC 有很强的数据吞吐能力才行。先进的前瞻算法除了考虑几何约束之外，还会把机床的动力学模型，即各轴最高转速、最大扭矩、最大允许加加速度等物理限制考虑在内。采用此种全局速度规划方式，设备可以处于物理极限边缘的安全运行状态，既不会因为加速度太大导致伺服报警或者损坏机械，又可以充分发挥设备的最大加工能力，从而达到效率与安全的完美统一。

二、精度补偿技术

工业现场的物理环境和理想的数学模型之间必然存在差别，机械制造公差、磨损、受力变形、热胀冷缩等都会造成误差。PLC 作为控制中心，除了要发出准确的指令外，还要有很强的误差修正能力。精度补偿技术依靠软件算法抵消已知的物理误差，是一种低成本、高回报的提升设备最终加工精度的方法，可以使得普通精度的机械结构达到精密级设备的性能指标。

（一）机械背隙的软件补偿

机械背隙又叫反向间隙，在齿轮传动、丝杠螺母副、减速机等结构中普遍存

在。当电机从正转变为反转的时候，由于机械咬合面之间存在着微小的空隙，即使电机轴已经转动了一部分角度，但在间隙完全消除之前，负载端也不会产生实际的位移。造成加工轮廓在换向处产生凸台或凹陷，严重影响圆形或者圆弧轨迹的真圆度。PLC 用背隙补偿来纠正这个物理毛病。系统调试阶段，工程师对各个轴的静态背隙值进行测量后，存入 PLC 的系统参数中。

在运动程序指令轴发生转向的时候，PLC 会在反向运动开始的一瞬间加上一个数值和背隙值相等的补偿脉冲。该过程一般以极高的速度瞬间完成，目的是在负载开始有效移动之前迅速“吃掉”间隙。对于动态性能要求较高的系统，静态补偿已经不能满足高速冲击下产生的弹性变形，因此现代 PLC 大多采用动态背隙补偿。根据当前负载力矩、运动速度实时调节补偿量，适应不同工况下间隙的变化。对于机械磨损越来越大的情况，设备仍然能保持较好的定位精度，使机械部件的保养间隔大大延长。

（二）丝杠螺距误差补偿

滚珠丝杠是直线运动的关键传动件，但是由于制造工艺的限制，其导程不可能绝对均匀一致。长距离丝杠一般都会存在累积误差，指令移动 1000 毫米实际只移动了 999.8 毫米或者 1000.2 毫米。这种和位置有关的几何误差可以用螺距误差补偿的方法来校正。PLC 内部专门留出一块存储区存放螺距误差补偿表。该表是用高精度的测量仪器测量出来的，把轴的行程分成若干个补偿区间（比如每 10 毫米一个点），测量每个参考点的位置偏差值。

PLC 在系统运行时会获取编码器当前位置信息，之后再行误差补偿表插值计算。如果当前位置处于两个参考点之间，那么算法就会采用线性拟合的方式来确定此时应该施加的修正量。修正量实时加到位置控制环上，伺服电机就会微量多转或少转一下，从而抵消丝杠的物理误差。

1. 在全闭环系统中，光栅尺可以直接反馈负载的位置，半闭环系统提升精度的唯一有效办法就是螺距补偿。

2. 双向螺距补偿技术更加先进，它为正向运动和反向运动分别建立误差表，消除了由于螺距误差和方向性所造成的位移偏差问题，在整个行程中得到高精度定位。

（三）温度漂移补偿方法

热变形是精密加工的隐性杀手，随着设备使用时间的增加，电机线圈发热、

轴承摩擦生热、环境温度的变化都会引起机床床身、立柱、丝杠的热膨胀。金属材料受热膨胀、冷却收缩，会引起坐标系原点发生移动，造成刀具中心点偏离理论位置，误差缓慢变化，很难靠一次标定来完全消除。PLC 的热补偿一般是在机床的关键部位（主轴箱、丝杠螺母座、床身底座）装上温度传感器来实现的。传感器实时测量温度，并将测得的温度传送给 PLC 的模拟量输入模块。

按照热力学模型，PLC 内部运行着热误差补偿算法。该算法根据事先建立的温度位移模型（一般用多元线性回归方程或者神经网络模型）实时计算出各轴热伸长量。当检测到丝杠温度上升 5 摄氏度时，算法会立刻用钢材的热膨胀系数、丝杠有效长度算出需要补偿的微米数，然后迅速调整坐标系零点偏置。高级的热补偿系统不但会考虑到瞬时温度，而且还会考虑到温度的变化率以及历史的热累积效应，以补偿热惯性造成的滞后。在高精度坐标磨床或者五轴加工中心，实时热漂移补偿技术是长时间连续加工一致性的保障，可以保证从早上冷机启动到下午热机状态，加工出的零件尺寸都非常一致。

第五节 典型案例分析与性能评估

工业自动化控制系统的价值体现在具体的应用中，理论设计的好坏只有通过具体的行业应用实例才能加以检验和改进。在复杂的工业现场，可编程逻辑控制器不只是完成一些基本的逻辑运算，也开始进入到了高端的运动控制和过程控制中。本节对数控机床、激光切割机这两类对控制性能要求非常高的典型场景进行分析，提出先进控制策略，建立系统性能评价体系，用时域和频域两种方式量化分析控制系统的精度、响应速度、稳定性，为高端装备的控制系统设计提供实证依据和优化方向。

一、行业应用案例

数控机床、激光切割机等是代表运动控制技术最高端的设备，它对于控制器运算速度、总线通讯速度、多轴协同算法等都有很高的要求。这两类设备的控制系统设计底层是电机驱动，上层是轨迹规划和动力学补偿，是对 PLC 技术高端应用性能边界最好的试金石。

（一）数控机床的多轴联动控制

数控机床，特别是五轴联动加工中心，代表了工业母机制造技术的最高水平，它的关键难点在于怎样利用 PLC 系统来实现复杂空间曲面的高精度插补和刀具中心点控制。传统的数控系统大多使用封闭的专用控制器，但随着高性能工业 PC 和软 PLC 的不断发展，基于通用硬件平台的开放式数控系统越来越普遍。在这种架构下，PLC 既要完成辅助功能的逻辑运算，又要做运动学的正逆解实时精确的计算。五轴联动加工时，三个平动轴和两个旋转轴必须具有很高的时间、空间同步性，任何一个轴的微小滞后都会造成加工表面过切或者欠切。先进的控制方案一般会在 PLC 内部建立高阶样条插补算法，三次或者五次 B 样条曲线等来平滑小段线形成的刀具路径，防止由于加速度突变所引起的机械振动。

除了轨迹平滑之外，五轴联动还要考虑刀具中心点控制。刀具姿态改变时，由于旋转轴运动而引起刀尖产生非线性位移偏差，控制系统需要用毫秒级的插补周期来实时计算出这个偏差并补偿，保证刀尖一直贴在工件表面预定轨迹上。基于 PLC 的方案一般是通过模型控制，即建立机床刚体运动学模型，从各轴的光栅尺获取反馈位置信息，输入刀具长度和半径，修正伺服轴的位置指令。由于有大量的矩阵运算和浮点数运算，对 PLC 的浮点运算能力要求非常高。为了保证控制回路的实时性，一般使用多核并行处理方式，把运动控制任务分配到不同的核心上并行执行，同时使用等时同步模式的总线技术，使得所有伺服驱动器在同一个微秒时刻进行采样和指令执行，从而彻底消除由于通信抖动所造成的同步误差。

切削时切削力的波动会造成进给轴的扰动，进而引发动态误差。为了提高加工精度，在以 PLC 为基础的控制系统中一般采用负载观测器与前馈控制相结合的方法。建立伺服电机力矩模型，使得控制器可以根据电流指令来估计出负载转矩的扰动分量，并且在电流环直接进行前馈补偿，从而抵消掉切削力对位置环精度的影响。大型龙门机床双边驱动不同步时，控制程序中就集成了交叉耦合控制算法，对两轴的位置偏差进行实时检测，当偏差大于设定的阈值时，就通过叠加补偿命令来调节两轴的速度，保证龙门架高速运动时的几何精度。深度算法融合很好地体现了现代 PLC 技术在复杂的运动控制中所具有的很好的适应性。

（二）激光切割机的轨迹控制

激光切割机属于金属加工行业中的关键装备，其控制核心的难点主要存在两

方面,一个是高速运动过程中轨迹精度的保持,另一个是激光能量与运动速度的精准对应。激光切割过程的特点是高加速度、频繁加减速,对于控制系统的动态响应能力提出了很高的要求。切割复杂轮廓的时候,切割头要在很短的时间内完成拐角处的减速、转向和再加速。控制算法处理不当,很容易在拐角处出现过烧现象,也会因为轨迹超调造成轮廓变形。因此基于 PLC 的激光切割控制系统大多采用速度前瞻算法。此算法可以在实际运动之前就先扫描缓冲区内多条加工指令,然后对于路径的几何曲率特征进行详细分析。

针对不同的路径特征,控制系统会采取差异化的处理策略,主要体现在以下两个方面:

1. 对于连续的小线段或者圆弧路径,系统会根据自身的计算结果,计算出最大允许的合成速度,把向心加速度控制在机械结构所能承受的最大范围之内,防止因为离心力过大而引起横梁产生抖动。控制器根据当前的合成速度,对激光发生器的功率信号进行精确的调制,一般采用脉宽调制技术调节其占空比,使单位长度上激光能量密度保持不变,从而保证切缝宽度的一致性以及切割断面的平整度。

2. 遇到直角或者锐角拐角的时候,系统就会强制减速,有的时候还会在拐角处短暂停留,直到把布料彻底切透才前进。为了提高加工效率,先进的控制方案中常常采用“蛙跳”功能。这样,切割头从一轮廓到另一轮廓空行程过程中,用 Z 轴、XY 轴三轴联动形成抛物线运动轨迹,替代传统矩形避让动作,大大缩短了空行程时间。

除平面轨迹控制之外,Z 轴高度跟随控制对于激光切割质量也十分重要。板材表面存在不平整或者受热变形的现象,切割头要实时调节自身高度,使焦点位置不变。PLC 系统利用电容式传感器得到模拟量信号,从而形成一个高响应的 PID 闭环调节系统。由于切割时容易产生等离子体干扰,传感器信号中常常含有高频噪声,因此控制程序中必须采用数字滤波算法,如卡尔曼滤波、移动平均滤波等,才能得到真实的高度信息。该高度跟随控制回路一般独立于主运动插补循环,以较高的采样频率工作,保证 Z 轴可以灵敏地跟随板材表面的细微凸起,防止喷嘴碰到板材,也防止因焦距偏移造成切割中断。

二、系统性能评估指标

在复杂控制算法设计与实现完成后，就必须建立一个科学、严谨的量化评价体系，来全方位地检验系统实际运行情况。该体系已不再是依靠主观运行来判断了，而是利用精密的测量仪器、先进的数学分析工具从时域上的稳态与瞬态、频域上带宽和抗干扰能力等多方面对整个 PLC 控制系统进行全方位的评价和分级。

系统性能评估指标概览表

指标名称	核心衡量内容	关键考量点 / 测量方法
定位精度与重复定位精度	执行机构到达目标位置的准确性与一致性	ISO 230-2 标准，激光干涉仪测量，残余误差分布
稳态时间与超调量	系统响应速度与稳定性，无振荡或最小振荡达到目标值的时间和幅度	阶跃响应曲线，S 型 / 正弦加速度曲线，PID 参数整定
同步精度与轨迹精度	多轴协同运动时各轴的时间、位置匹配程度；实际路径与理论路径的吻合度	主从轴实时差值，总线时钟同步；球杆仪 / 双向激光干涉仪测量圆轨迹
系统带宽与响应频率	系统追踪快速指令和抑制高频扰动的能力	伯德图，频率扫描法，相位裕度、增益裕度

下表概括了主要的系统性能评估指标及其特点，这些指标共同构成了对控制系统性能的全面评价体系。

（一）定位精度与重复定位精度

定位精度是控制系统把执行机构准确移动到指令目标位置的能力，是评价工业自动化设备，尤其是精密加工设备最基本、最核心的指标。实际测试时一般采用双频激光干涉仪作为基准测量仪器，测量分辨率可以达到纳米级。按照 ISO 230-2 等国际标准进行测试，控制系统驱动工作台在全行程范围内，以随机或者规定间隔多次往返定位。PLC 系统发出的脉冲指令位置和干涉仪测得的物理位置之差，就是定位误差。它不是一个数值，是系统误差和随机误差的叠加。系统误差主要是由于滚珠丝杠的螺距累积误差、导轨几何直线度误差、热膨胀引起的尺寸漂移等；而随机误差主要是由于机械传动间隙、摩擦力不稳定、伺服系统电磁噪声等因素造成。

为了对控制系统性能做出正确的评价，必须引进统计学的方法。重复定位精

度指的是系统在相同的条件下，多次趋近同一个目标位置时，其位置重现性或者一致性的好坏，一般用误差分布标准差的倍数来衡量。高精度的 PLC 控制系统，单次精确到位是不够的，它必须在长时间运行以及不同负载的情况下，依然能够保持高重复性。先进的 PLC 系统内部就有一个螺距误差补偿表和反向间隙补偿。控制器在生成运动指令时会自动加上事先测得的误差数据。评估时需要重点看补偿算法生效之后，残余误差分布的情况。如果残余误差有明显的周期性或者趋势性，就说明补偿模型与实际的机械特性之间存在差异，或者系统中存在没有被完全考虑到的热变形因素；如果残余误差呈正态分布且标准差很小，那就说明控制系统的伺服环路稳定性好、抗干扰能力强。

（二）稳态时间与超调量

稳态时间、超调量属于反映控制系统瞬态响应特性的参数，也是决定设备生产节拍、加工质量的因素。稳态时间又叫整定时间，指的是系统从接收到阶跃指令开始，到实际输出量进入目标值允许误差范围内并稳定下来所经历的时间。高速贴片机、半导体固晶机等执行机构要求在很短的时间内完成点到点的移动，并且要快速稳定，振荡过多会增加等待时间，从而降低总的产出效率。PLC 控制程序里的轨迹规划算法对稳态时间有着决定性的影响，采用 S 型速度曲线或者正弦加速度曲线，可以防止由于加速度突然变化而产生的机械共振，并且能够缩减残留振动消失的时间。

超调量指控制系统达到给定值以后，输出峰值超出目标值的百分比。伺服控制中，超调过大不仅会造成机械撞击，还会造成加工件过切报废。超调量一般是由系统比例增益设置过高或者积分作用过强所引起的，从而造成系统阻尼不足。阶跃响应曲线一般用示波器记录 PID 参数整定后的系统位置环和速度环的阶跃响应曲线。理想的控制性能是在保证快速上升时间的前提下，使超调量最小化，甚至实现无超调。这就需要用到微分先行、积分分离或者抗积分饱和等高级的控制策略。根据不同的负载惯量下得到的响应曲线，可以对自适应控制算法的有效性进行分析，即系统在负载发生变化时，能否自动调节控制参数，使系统的动态性能保持一致。

（三）同步精度与轨迹精度

多轴协同工作的场合，单轴定位精度已经不能全面衡量整个系统性能的好坏，同步精度和轨迹精度则成了更加重要的评价维度。同步精度主要是指各个轴在运

动过程中时间、位置的匹配程度，在龙门双驱结构或者电子凸轮的应用中尤为明显。如果主从轴有微小的同步误差，就会使机械结构产生扭曲，产生内应力，严重时会造成电机过载报警，机械结构也会因此受到损坏。在对同步精度进行评定的时候，通常需要实时观测主从轴编码器的反馈值的差值，并对其在匀速段、加减速段和换向瞬间的起伏状况进行分析。好的 PLC 控制程序用总线时钟同步技术使多轴同步抖动控制在微秒内，达到对物理位置严格对准的目的。

轨迹精度就是指实际加工的轨迹与理论编程轨迹的吻合程度，在曲线切割、涂胶、焊接等工艺中十分重要。传统的测量手段很难反映高速运动下轨迹的动态误差，目前常用的球杆仪或者双向激光干涉仪来测量圆轨迹。通过机床执行标准圆运动可以得到实际半径变化的数据，从而生成极坐标误差图。可以清楚的看出伺服系统的跟随误差、象限突跳误差、各轴增益不等伺服系统等。比如圆轨迹是椭圆的，就说明 X 轴和 Y 轴的伺服环路增益不一样；过象限有尖峰突起，也许是反向间隙补偿或者摩擦力补偿参数不对。基于 PLC 的交叉耦合控制器能有效消除轮廓误差，所以评价指标应该主要看使用该算法之后，在复杂的曲率路径上最大轮廓误差以及速度变化敏感度。

第六章 PLC 安全与可靠性设计

现代工业自动化领域当中，PLC 作为重要的控制单元，它的安全可靠程度关乎整个生产体系能否正常运转。工业 4.0 和物联网技术深度融合之后，封闭的工业网络逐渐走向开放，给数据互通带来便利的同时也使得控制系统安全风险环境越加复杂。因此，建立高可靠、高安全的 PLC 系统已经成为目前自动化工程设计中不能逾越的一环。

第一节 工业控制系统安全威胁

工业控制系统正面临前所未有的严峻挑战。所承受的威胁不只是物理环境的自然损耗造成的，更多时候来自于网络空间的恶意渗透以及逻辑层面的攻击。探究这些威胁产生的原因和演变规律，对构筑全方位防护体系、保证关键基础设施的正常运行起着决定性的作用。

一、常见安全风险来源

工业环境下安全风险的来源是多样的，既有外部的黑客组织进行的有目的的攻击，也有内部管理上存在的漏洞。识别风险源头是实行有效防护措施的前提。

（一）网络攻击与恶意软件入侵

工业网络同企业管理网络相接，以前那种物理隔离的状态被打破，对通用信息技术系统实施的攻击手段，就渗入到了工业控制层。攻击者用精心构造的恶意软件，利用控制网络和边界之间存在的漏洞，进入控制网络。这些恶意代码一般都很隐蔽且具有针对性，它们会隐藏在操作员工作站或者服务器当中，长久地搜集网络拓扑结构，通信协议的细节之类的信息，等到合适的时刻，对 PLC 执行指令篡改或者发起拒绝服务攻击。近些年来，勒索软件在工业领域愈发猖獗，它们会加密重要的 HMI 数据或者历史数据库，造成生产线瘫痪，迫使企业支付巨额赎金。

对于 PLC 本身的恶意代码来说,危害性要大得多。攻击者一般利用底层通信协议没有加密和没有认证的漏洞来进行攻击。由于许多传统工业协议在设计之初就考虑了通信效率和实时性,默认网络环境是可信的,因此攻击者一旦进入内网,就可以伪造控制指令。可以向 PLC 发送非法的停机指令,也可以修改重要的寄存器值造成逻辑判断错误。更高一级的攻击甚至可以修改 PLC 的固件,使控制器脱离工程师的控制,成为攻击者手中的傀儡。该类深层入侵不能通过普通的重启或者重置清除。

(二) 未经授权的访问与操作

许多工业现场访问控制策略存在严重漏洞,给未经授权访问留下了可乘之机。物理上不严密的访问控制也是常见的现象,控制柜不上锁、机房出入无管理,任何接触过 PLC 硬件接口的人都可以通过编程口上传恶意程序或者随意改变运行方式。很多 PLC 设备使用以太网接口与交换机相连,网络端口没有做 MAC 地址绑定或者 802.1x 认证,外来设备接入网络就可以对控制器进行扫描和访问。

1. 远程维护通道被滥用也成了主要风险点。设备供应商或者系统集成商为了方便以后的维护,会在系统里预留出远程访问通道,比如,虚拟专用网络、桌面共享软件等。如果没有严格的认证和审计机制,那么一旦凭证泄露,攻击者就可以长驱直入,取得与现场工程师相同的最高权限。

2. 弱口令、默认密码的广泛存在加大了该风险。大量现场设备在投入使用之后依旧沿用出厂时的默认用户名与密码,或者采用容易被猜到的简单组合。攻击者使用自动化扫描工具,可以在很短的时间里找出并突破防护力弱的点,进而干扰生产流程。

(三) 工程软件与固件漏洞

工业控制系统的核心不仅仅表现在硬件上,运行于硬件之上的固件以及用于组态开发的工程软件也同样十分重要。软件组件不是绝对安全的,也会存在代码错误或者逻辑漏洞。工程软件是工程师与 PLC 之间的桥梁,工程软件存在缓冲区溢出或者权限提升漏洞的时候,攻击者就可以构造特殊的工程文件诱导工程师打开,在工程师站上执行恶意代码,进而感染所有和该工程师站相连的 PLC。

固件漏洞给工业环境造成很大麻烦。与 IT 系统频繁打补丁更新不一样,工业现场对连续运行有极高的要求。停机更新固件造成的产量损失巨大,重新验证过程也十分复杂。因此很多 PLC 设备的固件一直运行着带有已知高危漏洞的旧

版本。供应链攻击也成为了新的攻击向量，如果设备厂商的开发环境被污染，那么出厂的固件中就可能带有后门。源头污染使最终用户无能为力，整个控制系统从一开始便处在裸奔状态。

二、安全事件后果分析

工业控制系统遭到破坏时，所造成的损失一般要比一般的计算机信息系统遭到破坏要严重得多。数据的完整性得不到保障，更不用说物理世界中实体的安全、经济利益和社会稳定了。企业对于可能产生的后果有着充分的认识，可以从战略高度上重视 PLC 系统安全防护的建设。

（一）生产中断与经济损失

工业生产线讲究高效、连续，任何非计划的停机都会造成直接的经济损失。PLC 系统遭到拒绝服务攻击或者逻辑被修改造成停机的时候，生产流程就会被打断。对于离散制造业而言，就是产量直接减少、订单交付延期；对于化工、冶金、制药等流程工业而言，生产过程一旦中断，就会立即导致管内物料凝固、反应釜内原料报废，重启生产线需要花费时间清理和预热，而且还会造成巨大的能源浪费和原材料浪费。

恢复生产所付出的间接成本也不能忽略。企业采取安全团队来进行取证分析、系统清理、数据恢复，一般需要几天到几周的时间。供应链上下游的协同也会受到影响，上游原材料堆积、下游客户因为缺货而索赔，连锁反应使经济损失规模进一步扩大。如果攻击的目标是电力、水务等关键基础设施，那么造成的社会经济损失就无法估量，甚至会导致某个地区商业活动的停止。

（二）设备损坏与安全事故

工业控制系统是数字世界和物理世界的桥梁，网络攻击在工业领域有明显的物理破坏性。攻击者修改 PLC 里面的控制逻辑，使得执行器在不安全的情况下工作，造成超出设计工况。离心机超速旋转造成转子炸裂，加热炉温度失控造成炉体烧穿，控制机械臂无视安全光栅信号进行违规动作等。这些行为不再只是修改数据，而是真的对实物加以毁坏。

更为严重的是物理破坏很容易造成严重的安全事故，危及现场人员生命安全。石油化工行业里，控制阀门被恶意关闭或者开启，就会引发压力容器超压，进而发生剧烈爆炸或者有毒气体泄漏，造成群死群伤的惨剧。电力行业中的发电机非

同步并网可能会造成巨大的电流冲击，从而毁坏价值连城的主变压器，严重的时候甚至会引发火灾。一旦此类安全事故发生，就会造成企业巨额赔偿、法律惩罚和监管机构停业整顿的处罚，其影响绝非技术层面的。

（三）核心工艺数据泄露

现代制造业当中，PLC 内部存储的不只是控制逻辑，有时候还是企业核心工艺参数与配方数据。这是企业在多年研发中积累下来的成果，也是企业市场竞争优势的重要财富。竞争对手或者商业间谍会通过网络入侵的方式获取 PLC 的数据块内容，解析出关键的温度曲线、配料比例或者运动控制算法。

一旦核心知识产权被泄露，竞争对手就可以以很低的成本复制同样的质量产品，甚至可以制定有针对性的竞争策略，从而使受害企业市场份额迅速减少。攻击关键基础设施的人也可能获取管道拓扑图、设备配置信息等机密数据，为发起更大规模、更有破坏性的攻击铺平道路。数据泄露比生产中断更隐蔽，企业常常在不知不觉中，一直在一种“透明”的状态下，直到失去市场竞争力才意识到问题。

第二节 PLC 硬件冗余与容错设计

工业自动化领域对系统可靠性、连续性有较高的要求，这是评判控制系统好坏的标准。为了应对工业现场环境日趋复杂、生产工艺愈发苛刻的形势，单靠一个硬件设备很难达到很高的安全、稳定程度。采用硬件冗余结构和深入的容错设计，可以大大减少由于单个设备故障造成的设备停机，当某个设备发生故障时，仍然能保持原来的控制逻辑。本节将就全链路冗余的实现方式和容错控制逻辑进行详细的分析。

一、硬件冗余架构

创建高可靠的自动化系统，从物理上讲硬件冗余是不能忽略的基础。在系统的关键节点处设置备用设备并建立高效的通信和仲裁机制，在主设备出现故障的时候，备用设备能马上接手控制权从而保证系统不间断地运行。该类架构设计包含控制核心、电源供应、通信线路、现场接口等各个方面。

（一）CPU 冗余

中央处理器就是可编程逻辑控制器的“大脑”，它的运行状态直接决定着整

个控制系统运行的好坏。按照备用处理器同主处理器同步的严密程度及切换速度，冗余设计一般分成热备、温备和冷备这三种形式。

热备模式是目前高端工业领域应用最广、技术难度最高的方案，主从控制器同时通电，执行相同的用户程序。二者之间用高速光纤同步链路做数据交换和状态核对，每个扫描周期就做一次。一旦主控制器发生故障，备用控制器就能在毫秒级甚至更短的微秒级时间里无缝接替控制权，输出状态不变，现场执行机构根本不知道有没有故障，真正实现了过程控制的零中断。

温备模式的同步机制较简单。在此架构下，备用控制器同样处于通电状态，但是它不会在每一个扫描周期内与主控制器同步所有的数据，而是在定时的心跳检测或者特定的数据检查点进行状态更新。主机出问题的时候，系统切换要花时间去加载最新的过程数据并开启接管程序。该模式适用于对切换时间要求不十分严格，但需要自动恢复的连续生产过程，如部分水处理、物流输送等，其成本远低于热备系统。

冷备是最基本的一种冗余形式。备用控制器一般已经安装于控制柜中并预先烧录好程序，但平时处于断电或者待机状态，不参与即时的控制逻辑运算。当主控制器出现故障的时候，人工操作或者低速自动逻辑上电启动备用设备。由于存在较长的启动及初始化过程，且无法保留故障发生前一瞬间的中间变量数据，冷备适合于对实时性要求不高的、可以接受短时间停机的辅助系统，是经济高效的灾备方案。

不同 CPU 冗余模式的对比详见下表：

CPU 冗余模式对比表

冗余模式	同步程度	切换时间	成本	适用场景	数据保留
热备	高度同步（每扫描周期）	毫秒级 / 微秒级	高	高端工业，零中断	完全保留
温备	定时心跳 / 检查点同步	较长（需加载数据）	中	切换时间要求不严苛的连续生产	部分保留
冷备	无同步	较长（启动初始化）	低	实时性要求不高，辅助系统	不保留中间变量

（二）电源冗余与双路供电

电源系统稳定工作是保证所有的电子设备正常工作的前提。电网波动、线路老化或者模块本身故障都会使控制系统断电，从而造成生产事故。因此，采用冗

余电源模块并配合双路供电方案，成为工业控制系统中的标准和必须的配置。双路供电一般指从市电电网接入两路独立的电源输入，其中一路来自市电电网，另一路来自不间断电源系统或者备用发电机组，这两路电源分别接入控制柜里的不同的电源模块。

1. 模块层次冗余电源一般采用均流或者主备方式。均流模式下两个电源模块一起承担系统负载，其中一个电源模块出现故障时，另一个电源模块能立刻承担全部负载电流，保证背板总线电压不下降。不但提高了可靠性，而且减小了单个模块的发热量，延长了器件的寿命。

2. 为了进一步提高容错性，先进的电源冗余设计会在电路中串联二极管或者使用电子开关来隔离，防止某个电源模块内部短路而造成系统总线电压被拉低。系统通过状态触点实时检测电源模块的健康状况，如果发现输入欠压、输出过流、模块过热等故障，就立即给中央处理器发送报警信号，由上位机提示操作员进行在线更换，整个过程不需要停机。

（三）网络冗余

通信网络是否畅通，就如同人体神经系统的传导是否顺畅。单一的通信线路很容易因为电磁干扰、物理损坏、交换机故障等因素造成中断。所以，形成自愈性强的冗余网络结构对保证数据的完整传输十分关键。

目前主流的工业以太网冗余方案大都是用环形网络拓扑结构。控制器、远程站和人机界面用交换机组成一个闭环。正常通信时，网络协议会逻辑上断开环路中的一段链路来避免广播风暴，环路中的任意一处物理线缆断开或者节点失效时，协议管理器会在毫秒级的时间内检测到断链，并且迅速闭合之前被逻辑阻断的链路，使数据流向反转，从而恢复网络通信。介质冗余协议以及高可用性无缝冗余协议属于实现该功能的主要代表。

对通信可靠性要求最高的时候，双网冗余架构就更加可靠。系统使用两套完整的物理网络，形成两个独立又互相不影响的通信平面，由独立的网卡、线缆、交换机构成。控制器发送数据时，会同时给两个网络发数据包，接收端根据先到先得或者完整性校验原则选择有效数据。该种冗余协议硬件成本较高，但可以有效地抵抗多点故障，即使其中一个网络全部失效，另一个网络也可以保证系统的全部功能正常运行，常常被应用在核电站、地铁等重要基础设施当中。

二、容错设计策略

硬件堆叠构成的是系统可靠的躯体，而智能容错设计策略就是给系统注入灵魂的重要因素。容错设计不能只是对故障的被动处理，还要主动发现潜在风险，在系统级协调下屏蔽错误的指令、保证控制指令平稳过渡。要求工程师在程序开发阶段就考虑到各种边界条件、异常状况，建立起一套严密的防御系统。

（一）关键信号的双路采集

化工、冶金行业的连续生产中温度、压力、流量等关键工艺参数的准确性同产品质量、生产安全相关。单一传感器存在损坏的风险，还会因为漂移、干扰造成数据失真。因此对于核心测点要采用双路或者三路信号采集的容错设计。即在同一个监测点上设置 2 个或 3 个独立的变送器，其信号分别接到不同的输入通道上。

软件层的处理逻辑就是这一策略的精髓。双路采集时，系统一般使用高选、低选或者平均值算法。锅炉液位保护中，为了防止假水位造成干烧，可以采用“低选”逻辑，即两个信号中任何一个显示低液位就触发联锁；冷却水流量检测时，为了避免误停机，采用“二选一”逻辑，需要两个信号都确认流量低才触发动作。

如果采用更为严谨的三路采集（2oo3 架构），系统就会使用表决机制。三路信号两两比对，剔除偏差大的异常值，取剩下两条接近的值的平均值作为最终运算的过程变量。中间值表决逻辑可以大大提高系统抗干扰能力，可以避免单个传感器出现故障或者瞬时干扰所引起的误跳车事故。

（二）故障检测与自动切换逻辑

容错系统是否能发挥有效的功能，取决于它能否及时准确地发现故障。如果系统不能检测出主设备的异常或者正常工作时出现误判，那么冗余设计就会变成负担。因此建立多层次、多维度的故障诊断模型就显得非常重要。不单指硬件指示灯报警，还包括通信协议校验位、模拟量信号超量程检测、程序循环周期超时看门狗监控等。

逻辑设计上自动切换程序的优先级、确定性不能有一点点差错。系统要形成清楚的“健康值”打分体系，把 CPU 负载、存储器情况、I/O 通信误码率这些因素算进眼里。当主系统健康值小于预设阈值或者关键模块发出异常信号的时候，切换逻辑就会立刻触发。

1. 切换逻辑应包含防抖动设计，以避免因网络瞬时抖动导致主备系统频繁互切，造成控制震荡。

2. 切换过程必须遵守先通后断或者极速通断的原则，保证控制指令流的连续性。系统要存下详细的故障快照，包含切换时所有的寄存器状况，故障代码以及时间戳，这样后续的事故追查和根本原因分析才能有据可循。

（三）冗余系统的同步机制

无缝容错的首要条件就是主备系统数据的高度同步。同步机制设计的好坏，决定着备用系统接管时能否正确地再现主系统的控制状态。这不是简单地复制程序，而是过程映像区、中间变量、定时器 / 计数器当前值以及 PID 控制回路积分项的实时镜像。

同步有事件驱动同步和周期性同步两种。周期同步的时候，主控制器会在每个扫描周期的某个时间段（通常是程序执行完毕、输出刷新前）把发生变化的数据块打包，然后经由光纤链路传送给备用控制器。备用控制器接收到之后更新自身的内存区，使两者的下一个周期的起始位置相同。此方式实时性高，但是占用系统带宽较多。

事件驱动同步主要是对非周期性数据进行处理，配方参数修改、报警确认操作等。只有当这些特定事件发生时才会传送数据。在实际使用时，通常会把两种方式结合在一起使用，在高速链路上做过程映像区的周期性即时复制，在缓冲区中处理大量的非实时数据，从而达到同步速度和系统资源消耗之间的平衡。对于 PID 控制来说，关键是同步积分累积量，防止切换后由于积分初值不同造成输出剧烈波动。

第三节 安全编程与故障保护机制

工业自动化系统并不只是追求生产效率的提高，而主要的价值就是建立一个稳定、安全、容错能力强的控制环境。安全编程、故障保护是保证人员安全，防止设备损坏，减少意外停机时间的必要技术。本节主要研究在 PLC 系统设计中，怎样从软件逻辑结构以及硬件配合的角度来构造严密的安全防护体系。

一、安全编程原则

编写高可靠性的工业控制程序，必须遵循一系列严格的规范，其目的就是消除逻辑漏洞，保证系统即使在受到非预期输入或者误操作的时候也能保持可控。好的控制代码应该有防御性思维，即预设故障随时可能发生，在逻辑中提前嵌入应对措施。

（一）程序启动前的条件检查

控制系统在设备正式开始自动运行循环前，要对所有的物理状态以及逻辑标志位做全面的检查确认。这不是简单的读取传感器信号通断，而是要建立严密的逻辑门槛，保证气压、液压、温度、初始位置等所有的先决条件都在绝对安全范围内。任何一个指标超出允许值，程序就必须强制禁止自动模式的使用，在操作界面上明确指示出未就绪的具体项目，避免设备带病工作。

此类检查应该存在于设备每一个循环周期开始时，而不能只存在于设备上电初始化的时候。对机械手臂移动、高压通电、化学反应加注等危险动作，启动条件的设计必须要有冗余。以检测气缸是否回位为例，只依靠单一的磁性开关信号是不准确的，因为开关容易松动或者损坏。工程师需要把上一步动作完成的标志位、时间窗口逻辑、反向位置传感器状态综合起来形成启动许可信号。只有物理信号和逻辑状态高度一致，互斥条件完全解除的时候，才能发出启动指令。从源头上防止由于传感器误报、机械卡滞等原因造成不必要的动作，打造安全的第一道屏障。

（二）关键动作的互锁逻辑设计

互锁逻辑是工业控制程序中最基本也是最重要的安全屏障，它的主要目的就是防止物理上或者逻辑上互相矛盾的动作同时发生。在编写有电机正反转、气缸伸缩、多轴协同运动的程序时，在执行输出动作前，应该串联对方动作的常闭触点或者使用反逻辑状态进行互锁。这不仅要在控制器内部的梯形图或者功能块上严格实现，对于大功率负载来说，还需要在电气柜接线的时候利用接触器的辅助触点来实施硬线互锁，从而形成软件与硬件的双重保护，有效防止由于编程错误或触点粘连造成的短路事故。

除了直接的动作用互锁之外，流程上先后顺序的互锁也十分重要。注塑机合模动作完成、高压锁模建立之前不能进行射胶动作；物料输送带未达到额定转速

之前, 给料装置不能开启。按照工艺流程的互锁设计, 需要工程师对被控对象的物理特性有深刻的认识。设计时必须使用严格排他性的逻辑, 保证一个动作运行过程中, 对它产生干扰或者造成危险的其他动作输出都被强制封锁。对带有惯性负载的设备, 互锁逻辑还要加入延时功能, 使前一个动作完全停止释放能量之后, 反向动作才能被激活, 从而避免机械冲击造成设备损坏。

(三) 异常状态的复位与确认流程

工业现场不可避免会出现报警和故障停机, 如何从异常状态安全地恢复到正常运行状态, 考验着程序的健壮性。简单的故障信号消除不能直接触发设备自动重启, 必须要有有人工确认机制。只有操作人员按压专用复位按钮, 系统重新完成全自检扫描之后, 才能把控制权交给自动运行逻辑。二次确认机制可以有效地避免维修人员还没有离开危险区域的时候, 设备突然启动的情况发生。

复位过程本身也应当是按步骤来进行的, 而不是瞬间完成的状态改变。对于复杂的自动化生产线, 盲目进行全局复位, 会造成悬空的工件掉落或者气缸急速复位发生撞击。理想的复位流程应该具备智能判断的功能, 根据设备当前所在的位置, 依次驱动各个执行机构按照一定的安全顺序完成归位。当设备处于非常危险的中间状态时, 程序应该强制性地切换到手动模式, 由专业人员缓慢地进行操作并确认无误之后, 再执行逻辑复位, 禁止因为自动化逻辑的机械执行而造成二次事故。

(四) 编写可预测、可测试的代码

代码可预测性, 即对于任意的输入组合, 控制器的输出都是唯一且确定的, 不会出现由于竞争冒险或者死循环导致的随机输出。编写复杂的顺序控制程序时尽量不要用难以追踪的指针间接寻址、嵌套深度的条件跳转指令, 虽然可以省一些代码量但是会增加逻辑的复杂性、不确定性, 后期的维修很困难。工程师要养成结构化编程思维, 把繁杂的工艺流程划分成若干个独立且状态分明的功能块, 保证每一个功能块的输入输出关系清楚明白, 让逻辑流向像电路图一样直观可见。

为了保证程序在各种极端情况下表现和预期一样, 程序应该有良好的可测试性。即在逻辑设计阶段就要预留模拟调试接口或者仿真模式。不需要实际驱动负载的情况下, 通过强制设定内部变量来检查逻辑通路是否正确, 具体的设定原则如下表所示。

可预测与可测试代码设计原则

特性	描述	目的
独立的仿真数据块	创建专门的数据块模拟传感器输入和执行器反馈，支持脱离硬件进行逻辑验证，覆盖所有故障分支。	提高测试效率，降低硬件依赖，全面验证系统鲁棒性。
专门的测试模式分支	设计特定模式，允许低速或分步运行关键算法，观察中间变量变化过程。	发现瞬时逻辑错误，深入理解程序行为，简化调试。
报警逻辑参数化	将报警逻辑和安全限制值设计为可配置参数。	验证边界条件触发的准确性，确保系统在临界状态下可靠运行。

将报警逻辑、安全限制值等设置为参数化配置，可以在测试阶段方便地检验边界条件触发是否正确，从而保证系统处于临界状态时也可以正常工作。

二、故障保护机制实现

软件逻辑严密性的范围只能解决可控范围内的问题。当控制器硬件发生故障、电源出现异常或者与外部的通信被中断的时候，系统就必须拥有一个脱离常规逻辑的硬性保护措施，使得设备最终会向安全的状态发展，从而避免失控造成灾难。

（一）看门狗定时器应用

看门狗定时器是控制器自身运行情况的最末一道防线。在工业控制器操作系统层面，看门狗对用户程序的扫描周期进行监视。当程序进入死循环，算法运算超时或者硬件故障造成程序指针异常，使得扫描周期超过预设的极限时间，看门狗就会介入。此种介入会立刻终止用户程序，强行把全部输出通道转为安全状态，点亮故障灯，从而阻止控制器发出错误的控制信号造成失控。

在应用层编程中，也可以使用看门狗原理来监视外部设备或者通信从站的健康状况。以与上位机或者远程输入输出模块通信为例，可以设置一个随时间不断跳变的心跳信号。主控制器设有一个定时器，在规定的时间内没有检测到心跳信号的翻转，就认为通信链路中断或者对方设备已经停止工作。此时应该立即触发通信故障处理流程，停止与之有关的自动化流程，并且将引导执行机构停留在安全位置或者退回安全位置，而不是一味地等待通信恢复，以免产生控制偏差。

（二）故障时的安全输出状态

当控制器检测到严重的内部错误，比如存储器校验失败、背板总线错误、电源模块电压跌落等的时候，会马上挂起所有的用户任务，并将输出映像表切换到

预设的故障安全模式。在大部分工业应用场景下，输出点全部断开（即输出为 0）一般被当作安全状态，即电机不转动、电磁阀断电。这就要求在系统设计之初，就要根据气路、液压回路的特点来选择单电控电磁阀常态位。控制垂直升降的气缸失电状态应为“锁止”或者“保持”而不是“释放”，防止重物坠落。

有些特殊的工艺，简单的全断电并不一定安全。如冷却水循环系统中控制器故障使循环泵停止运转，就可能引起高温反应釜爆炸。对此种情形必须选用具有故障状态配置功能的输出模块。此模块可让工程师为每个通道设置不同的故障行为，可以保持上一次的状态或者输出替代值，具体配置示例如下表所示。

故障输出配置示例

故障场景	控制对象	故障安全行为	目的
过热风险	加热器控制回路	强制关闭输出	防止超温，避免火灾或设备损坏
压力异常	散热 / 压力释放阀门	强制开启状态	及时释放系统能量，防止爆炸或损坏
工件夹持	物料夹持装置	保持上一次状态	防止工件滑落，避免人员伤害或二次事故
运动停止	电机、气缸等执行器	输出全部断开(零)	立即停止运动，确保设备安全停机

如上表所示，加热控制回路故障时必须强行断开输出；重要的散热或者压力释放用阀门在故障时需设为强制开启，使系统的能量得以释放；对物料夹持装置一般保持原来的状态，以免工件滑落造成人员受伤。

（三）重要数据的掉电保持

工业现场电源环境复杂多变，意外的瞬间断电或者电压波动时有发生。为了保证生产数据不丢失，使得设备在来电之后可以从断点处继续生产，合理分配掉电保持存储区是十分重要的。过程变量，当前的计数值、累计流量、配方参数、设备当前位置坐标等，必须保存在由电池后备或者非易失性存储器支持的地址范围内。工程师写程序的时候，要搞清楚哪些数据是临时的，哪些数据是永久的，把它们映射到对应的保存型寄存器里，保证数据断电之后还能保存数年。

仅靠硬件的保持功能有时是不可靠的，因为当电压跌落时，控制器可能会写入错误的数据。因此对关键的数据处理要进行数据校验。系统上电初始化扫描周期中，程序首先要读取保持寄存器中的标志位和校验码，对数据的完整性、合理性进行检验。当系统发现数据异常或者超出逻辑范围的时候，就应当自动启用事先设定好的默认安全参数，然后告知操作员去检查，而不是随便使用那些可能已

经损坏的历史数据。上电后一般要对运动控制的位置数据执行强制回原点操作，以消除断电期间由于机械惯性滑动造成的坐标误差。

第四节 电磁兼容性与环境适应性

工业自动化系统在实际安装与长期工作的时候，作为核心的控制模块的编程逻辑控制器，其稳定程度直接由现场复杂的电磁环境以及严酷的物理条件所制约。建立一个高可靠性自动化系统，不能只依靠好的控制算法，还要注意硬件抵抗电磁干扰的能力，以及承受恶劣工作环境的能力。本节将就如何提高系统的电磁兼容性、环境适应性给出相应的具体方法、有效的策略。

一、电磁兼容性设计

电磁兼容性设计就是指控制系统在所期望的电磁环境里能正常工作，同时不对其中的其它设备造成由于电磁辐射而无法容忍的干扰。在工业现场为了达到这个目的，需要从抑制干扰源、切断耦合路径、防护敏感设备这三个方面进行规划并实施，构建起一道立体的电磁防护体系。具体的干扰类型以及防护手段，如下表所示：

常见电磁干扰与防护策略表

干扰类型 / 脆弱点	常见干扰源	典型防护策略	备注
传导干扰	变频器、整流设备、电源线	电源滤波器、信号隔离器、合理接地	沿导线传播，通过电源线或信号线
辐射干扰	高频焊机、电机火花、空间电磁波	屏蔽电缆、机柜屏蔽、法拉第笼	空间传播，通过空气或介质
敏感设备易损性	模拟量模块、高速计数器、通信接口	信号隔离、差分传输、滤波、三防处理	自身易受噪声影响而误动作
接地系统缺陷	接地环路、地电位不均	单点 / 多点接地、独立地线、等电位连接	消除地环流，建立统一参考电位
线缆间耦合	平行敷设、线缆交叉、未经屏蔽	分类敷设、物理间距、90度交叉、屏蔽电缆	减少串扰、电容 / 电感耦合

（一）干扰源与敏感设备的识别

工业现场的电磁环境很复杂，要对可能的干扰源有正确的识别，才能做电磁兼容设计。变频器、伺服驱动器、大功率整流设备和高频电焊机等都是强干扰源，

工作时会通过传导或者辐射的方式向外发射高次谐波和高频噪声。强电磁波很容易通过电源线或者空间耦合进入控制系统。同时，控制系统内部的模拟量输入模块、高速计数模块、弱信号通讯接口等都是很容易被损坏的敏感设备。一旦敏感元件所受到的噪声信号超过允许值的时候，轻则造成数据采集出现异常跳变，重则可能会使控制器产生误动作，甚至造成硬件损坏。

项目规划时，技术人员要到现场对电磁环境做细致勘测，画出干扰源分布图。对既有系统进行改造时，要利用频谱分析仪等专业设备去捕捉瞬态干扰信号的特性，探究它的频率分布以及能量强度。区分内部干扰和外部干扰也是必要的，柜内布线不合理造成的串扰常常比外部电网波动更难找到。对于识别出的强干扰源，应在源头上抑制，比如在变频器输出端加装电抗器，大功率开关器件上加装吸收电路等，从源头上降低噪声的发射水平，从而减轻后续防护环节的压力。

（二）合理接地与屏蔽措施

接地系统作为工业自动化系统的电位基准，也是抑制电磁干扰最根本、最有效的方法。合理设计的接地系统给高频噪声提供低阻抗泄放通道，保证各设备之间等电位连接。实际工程中必须将信号地、电源地、机壳安全地严格区分。信号地是弱电系统的参考电位，对噪声很敏感，一般采用独立的接地干线，最后接到专用仪表接地网，严禁与大功率设备动力地混用，防止地电位反击。

针对不同频率的干扰，接地策略需灵活调整：

1. 低频干扰主要由接地环路电流引起，此时应采用单点接地，切断地环路，避免工频电流在信号线屏蔽层上感应出电压；高频干扰占主导地位时，由于集肤效应和引线电感的影响，多点接地往往更有效，利用最短路径将高频噪声泄放到底板。

2. 屏蔽电缆接地处理同样不能忽略，直接影响屏蔽效果。对模拟信号一般采用一端接地，避免两端地电位不相等而产生电流；高频通讯电缆可采用电容耦合进行多点高频接地。

电缆的屏蔽层处理也不能马虎，屏蔽层的连续性是屏蔽层发挥作用的前提，任何断点或者使用“猪尾巴”式接地引线，都会使屏蔽层在高频下失效。连接器屏蔽端接处应该采用 360 度全方位接触夹紧，使屏蔽层与机柜金属壁面形成完整的法拉第笼效应。机柜本身的门板、侧板之间也要用导电编织带跨接，使整个柜体成为等电位体，阻隔外部空间电磁波的入侵。

（三）信号线缆的敷设与分类

信号线缆犹如控制系统的神经网络，敷设方式决定噪声耦合的多少。从物理空间上合理地隔离、分类，是成本最低、效果最好的抗干扰方法。根据电压等级及频率特性，线缆要分为不同的类型：高压动力电缆属于强干扰类，24 伏直流电源线和数字量 I/O 线属于一般类，模拟量信号线和通讯总线属于敏感类。

桥架设计及现场施工时，不同种类的线缆应分槽敷设，严禁在同一个槽内混杂敷设。若空间受限必须平行敷设，强弱电缆间应不小于 300mm 的物理间距，并且加装接地金属隔板进行隔离。强电与弱电线缆若必须交叉，只能用 90 度垂直交叉，90 度时两者之间的互感系数最小，电磁感应耦合程度也最小。

布线工艺还应该符合紧凑原则，双绞线的绞合密度要一致，以抵消共模干扰。长距离传输模拟量信号时，应使用带独立屏蔽层的双绞屏蔽电缆。控制柜内部线缆布线不要形成环路，多余的线缆长度不应盘绕成圈，以防形成空心线圈接收磁场干扰，应呈 S 形折叠或者酌情剪短重新接驳。

二、恶劣环境应对方案

工业生产现场常常会遭遇严峻的物理环境考验，高温，高湿，粉尘，腐蚀性气体，强烈的机械振动，这些都是控制器的“天敌”。遇到这般恶劣的工况，就得从硬件选型、防护处理、结构设计这些方面出发，找出对应的解决办法，从而保证系统能在极端条件下稳定工作。

（一）宽温型 PLC 的选择与应用

标准工业控制器的正常工作温度范围为 $0^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ ，但是在钢铁冶炼、沙漠油田、极地考察站等特殊环境下，温度会超出这个范围。高温时电子元器件漏电流变大，电解电容寿命急剧缩短，半导体器件特性漂移，很容易造成控制器死机或者逻辑运算错误；低温时液晶显示屏可能无法正常显示，部分电容失效，热胀冷缩造成电路板焊点开裂。

此类特殊应用场合下，只有宽温型控制器才符合要求。此类设备从一开始就采用耐高温、耐低温的工业级或者军工级元器件，并且经过严格的环境应力筛选试验。宽温型控制器的电路设计中充分考虑到温度补偿，使在 -40°C 到 $+75^{\circ}\text{C}$ 的宽温度范围内，时钟精度、模拟量转换特性、运算速度等都不变。在极寒地区启动设备的时候，还要和加热模块配合使用，防止冷启动瞬间的大电流冲击损坏精

密器件。

（二）防潮、防尘、防腐蚀处理

在高湿食品加工厂或者昼夜温差大易产生凝露的户外机柜中，水分会电路表面形成导电水膜，导致短路或者电化学腐蚀。化工、造纸等行业空气中漂浮的硫化氢、氯气等腐蚀性气体，很快会对铜箔线路、元器件引脚产生腐蚀作用，造成断路故障。导电粉尘的堆积也会导致绝缘性能下降，从而引发飞弧。

为防止上述威胁，需要对电路板实施三防涂层处理。聚氨酯、丙烯酸或者有机硅等材质的三防漆均匀涂覆在 PCB 板和元器件的表面上，形成一层密实的保护膜，把湿气、尘埃、腐蚀性气体隔绝在外。

1. 涂覆工艺中必须避开连接器、插座、散热片等关键部位，保证电气连接可靠、散热通道畅通，涂层厚度要均匀一致，不能产生气泡。

2. 接插件、端子排应选用镀金加厚触点，涂抹导电防腐油脂。机柜的整体结构需要达到高的防护等级，进出线口必须采用防水接头密封，必要时设置正压通风系统，引入经过过滤的洁净空气，使柜内气压稍大于柜外。

（三）抗振动与抗冲击设计

冲压机床、纺织机械或者移动工程车辆控制器，长时间处在机械振动的环境下，而且有可能突然遭受剧烈的冲击。机械应力会使固定螺丝松动、接插件接触不良，还会引起共振而使电路板上的元器件掉落。抗振动设计根本就是提高系统的刚性和阻尼特性，避免结构共振频率落入环境振动频率范围内。

安装控制器的时候要用弹簧垫圈类紧固件，螺纹处涂螺纹紧固胶，防止振动导致松动。对板卡式的控制器，应加装压条或固定架子来限制 PCB 板的形变幅度。线缆连接是抗振的薄弱点，在连接器后面一段距离处应将线缆牢固地捆扎固定，以消除线缆自身重量对接口所引起的悬臂梁效应。应选用带锁扣或螺纹锁紧式接头，保证在剧烈颠簸时接头也不得松动。对振动较大的环境，可以在控制柜和安装基座之间加装橡胶减震器或钢丝绳减震器，可以有效地从物理传递路径上衰减振动能量。

第五节 安全认证与标准合规性

工业自动化系统正在向着高集成化、网络化方向发展,可编程逻辑控制器的安全性已经不仅仅是一个技术问题,它已经成为保证生产连续性、人员安全、环境合规性的一个重要因素。建立健全安全认证体系,按照标准合规性实施路径严格执行,是现代工业控制系统设计和运维的根基,既是法律职责所系,也是企业持续发展内在需求。

一、工业安全标准体系

完善的工业安全标准体系的建立,是保证自动化控制系统在它整个生命周期内保持高可靠、低风险水平的理论基础和行为准则。体系是由通用基础标准到行业特殊标准多层次构成,可以给复杂的工业场景提供统一的安全量化指标和有效的验证方法。

(一) 功能安全标准

国际电工委员会所发布的 IEC 61508 标准,作为功能安全领域的母标准被广为认可,对电气、电子以及可编程电子安全相关系统的设计给予了一整套通用的标准。该标准用全生命周期的概念,把安全管理贯穿于从概念设计、风险分析、详细工程到最终报废的全过程。从底层逻辑上讲,它不再只是依靠设备本身所具有的固有可靠性,而更加重视利用系统化的故障避免手段和故障控制技术,把剩余的风险降到可以接受的程度。对于控制器制造商而言,遵循该标准就意味着必须在硬件结构上达到高诊断覆盖率,在软件编程时用防御性编程、形式化验证等手段来应对随机硬件故障和系统性故障两种情形。

IEC 61508 在过程工业中的具体应用就是 IEC 61511,它更关注终端用户工程实践。本标准对化工、石油天然气、制药等行业连续生产过程安全仪表系统工程实施的具体规范做了规定。它把传感器、逻辑控制器、执行器等作为一个整体回路的性能作出规定,在实际工业现场中,根据工艺流程的危险性来确定安全功能,并验证在真实工况下这些功能的响应能力。

从执行上来说,两套标准是互相补充的。IEC 61508 主要对设备的研发制造过程做出规定,保证出厂的设备具备基本的安全基因;IEC 61511 则指导系统集成商和最终用户怎样把标准化的安全产品正确地组合、配置并集成到具体的工艺

装置中。从源头生产制造到最终使用，这条标准链可以有效地避免由于标准不一而造成的安全盲点，为高韧性工业控制网络建设提供法理基础和技术规范。

（二）安全完整性等级评估

安全完整性等级是把抽象的风险分析同具体的硬件选择紧密联系起来的量化指标。分 1 级至 4 级，SIL 等级越高，容许故障就越少，对安全功能可靠性的要求就越高。工程师根据保护层分析法或者风险图法，结合工艺过程潜在危害严重程度、人员暴露频率、规避危害可能性，科学计算出各个安全仪表功能的最低等级。

1. 评估工作以对需时失效概率或者每小时失效率做精确计算来展开。低要求操作模式主要考虑系统空闲时的可用性；高要求或者连续运行模式下需要考虑系统的动态响应故障率。这个过程要调用很多元器件失效率数据库，还要按照具体的系统结构（单通道、双通道或者三通道冗余）来综合建模。

2. 评估同样重视系统性失效的控制。这要求在系统设计阶段严格执行质量管理体系，以排除人为失误、软件缺陷及规范表述的含糊之处。即使硬件指标达到的系统，如果软件开发过程中缺乏必要的审核和验证，其安全完整性也无法达到预期效果，“木桶效应”在评估中被高度重视。

（三）安全纯正认证

取得权威第三方机构的认证是工业控制器进入高端市场的通行证，以德国 TÜV 莱茵、TÜV 南德等机构的认证最受行业认可。这并不仅仅是型式检验，而是一套针对产品各个方面的严格检查。认证机构会到底层代码、芯片架构、开发团队管理流程等地方去，查看是否存在可能造成危险失效的设计缺陷。以微处理器设计审查为例子，认证机构会对设计进行考察，有没有双核锁步技术、有没有能阻止由单粒子翻转造成的错误、内存纠错码是否有效等。

认证时会做非常严厉的故障注入测试。测试人员人为地在系统各个节点插入短路、断路、数据漂移、逻辑死锁等故障模式，来考察系统能否在规定的故障响应时间内正确识别故障，并执行安全动作（如安全转矩关断、紧急停机）。只有系统安全失效分数与诊断覆盖率同时满足标准阈值，所有软件模块完成静态分析和动态覆盖率测试之后，才会得到相应的认证证书。

用户选择了认证产品之后，就会把一部分复杂的安全验证责任转嫁给供应商和认证机构，从而大大降低了系统集成的合规风险。认证证书一般会附带安全手

册，对设备使用、安装和维护都有具体的规定，这些资料是现场安全运维的法定依据。

（四）行业特定安全规范

由于各个工业领域的物理属性以及工作环境的不同，所以存在着多种垂直行业的安全规范。ISO13849 标准在机械制造领域中处于主导地位，该标准提出了性能等级的概念，把机械防护装置（光幕、安全门锁等）和逻辑控制单元联系起来，重点放在简单确定性逻辑和机电融合系统可靠性上。该标准使用更直观的类别架构（Category B1、Category B2、Category B3、Category B4）来描述系统结构，便于机械工程师进行安全回路设计。

轨道交通行业按照 EN 5012x 系列标准，对控制器的环境适应性有很高的要求。除了要满足功能安全的要求以外，在剧烈的振动、冲击、强电磁干扰的环境下还需要保证很高的可用性。因此应用于该领域的安全控制器一般都会采用特殊的加固设计，常采用三取二或者二乘二取二的冗余结构来保证高速运行时的安全。

燃烧控制系统领域燃烧器管理系统标准对于逻辑时序有严格的要求。点火前吹扫时间、点火尝试次数、火焰检测响应速度都有严格限制，任何一个逻辑上的延时或者误判都会导致炉膛爆炸等严重后果。这些行业的特殊规范可以看作是通用功能安全标准的细化与扩展，把抽象的安全原则转化为具体的工艺参数限制，使控制技术与行业工艺有效结合。

见下表，我们可以更直观地理解不同行业标准关注的侧重点及主要应用领域。

行业特定安全规范要点对比表

标准名称	所属行业	主要侧重点	典型应用
ISO13849	机械制造	性能等级、机电融合可靠性、类别架构	机械防护装置、机器人安全控制
EN 5012x 系列	轨道交通	环境适应性、高可用性、加固与冗余设计	列车控制系统、信号系统
燃烧器管理系统标准	燃烧控制系统	严格逻辑时序、快速响应、故障防护	工业锅炉、燃烧炉控制

从上表可知，虽然这些行业标准都是按照功能安全的基本原则来制定的，但是由于各个行业特点不同，因此对某些方面提出了更加具体、更加严格的要求，以满足本行业领域内安全保护的特殊需求。

二、合规性实施路径

把安全标准转化为实际的工程能力，是一项复杂的系统工程，需要建立从需求端到运维端的闭环管理流程。合规性实施路径不是简单的技术叠加，而是一种严谨的工程方法论，要求项目团队在每一个节点上都保持高度的严谨性和可追溯性，从而保证最终交付的安全系统可以经受住时间的考验，经受住事故的考验。

（一）安全需求分析与规格定义

实施合规性第一件事就是对受控对象展开细致的危险及可操作性分析。这时就由多学科团队一起工作，找出工艺流程上所有可能出现的偏差，再对这些偏差可能造成的后果作出评价。根据风险矩阵可以筛选出需要用自动化手段控制的高危场景，从而确定安全仪表功能。

每一个安全仪表功能都要转化为具体的、详尽的安全需求规格书。此文件应该清楚明白地写明系统输入信号、逻辑处理规则以及输出动作。当反应釜温度超过临界值的时候，系统除了切断加热源之外，还应该具体给出切断时间、备用冷却阀的开启顺序、报警信号的传输线路。规格定义阶段还要明确系统独立性的要求，即安全控制系统在物理上或逻辑上要常规过程控制系统隔离，以防止常规控制层的故障影响到安全保护层。

需求分析中，共因失效的识别就显得非常关键。如果主系统与备用系统使用同一路电源或者同一条电缆桥架，则一处外部破坏就会导致所有的保护功能同时失效。因此，规格书必须对供电、通信、物理安装等各方面进行多样性要求并采取隔离措施，从源头上消除系统性弱点，为后期的架构设计提供刚性约束。

（二）安全系统的设计与验证

设计阶段是把抽象的规格书转变为具体的软硬件实现的创造性过程。在硬件架构的设计当中一般会用冗余的配置来保证系统安全完整、高可靠性的特点。工程师应根据安全完整性等级的要求来选择合适的表决逻辑结构。对级应用一般采用 1oo2D(带诊断的二取一)或者 2oo3(三取二)，可以在一个模块发生故障的时候做出安全的动作，并且可以避免因为误动作带来的不必要的停车，从而在安全性与经济性之间找到一个平衡点。

软件设计则需遵循模块化与结构化的原则。

1. 应避免使用复杂的指针运算与动态内存分配，转而采用经过验证的功能

块库。

2. 逻辑代码的编写应严格对应因果图，确保每一条逻辑分支都有明确的触发条件与复位机制。

3. 在代码完成后，必须进行离线仿真与在线测试。

4. 利用数字孪生技术创建虚拟的被控对象，可以不对现场设备造成影响，对极端工况下逻辑的响应做全覆盖测试。

验证是设计过程严格的把关。验证工作应该由设计团队以外的人员来完成，即代码走查、硬件集成测试、整机联调。验证记录中应该详细的记录每一个测试用例的输入，期望的结果，实际结果。发现偏差之后就要启动变更管理程序，分析修改代码可能会给其它功能模块带来的影响，防止出现新的回归错误。

（三）安全生命周期的管理

安全系统的交付并不表示合规工作就完成了，安全周期的管理才刚刚开始，进入运行维护的阶段。随着设备老化，工艺改变，系统实际的安全性会随着时间慢慢降低。因此必须建立严格的定期检验测试制度。此种证明测试不同于日常巡检，需在停机状态下对安全回路做全行程动作测试，可以暴露出一些在正常工作状态下不容易发现的隐蔽故障，例如阀门卡涩、传感器零点漂移等。

运维阶段的核心问题就是变更管理。工业现场由于工艺优化或者产能扩充而改变控制逻辑的情况经常出现。如果没有有效的控制，任意改变参数很容易破坏已经存在的安全性。合规的变更流程规定，在做任何改动之前都要重新评估风险，保证变更不会使系统的安全完整性等级变低。修改过的系统必须进行全范围回归测试，并由授权人签字确认之后才能重新投入使用。

退役环节的管理也不能忽视，当安全系统达到设计寿命或者工艺装置报废的时候，需要制定详细的拆除方案，保证拆除过程中不误触发周围关联设备，同时也要对残留的危险能量进行有效释放。全生命周期的管理观念强调时间上的连续性，保证安全系统在任何时候都处在有效的控制之下。

第七章 PLC 在过程控制中的高级应用

随着工业自动化的不断发展，PLC 已不再是简单的逻辑开关量控制，已经深深地嵌入到复杂的流程控制当中。在石油化工、制药、冶金、电力等产业中，依靠先进的算法和强大的硬件，PLC 除了执行简单的回路调节之外，还可以承担许多复杂而连续的生产过程管理任务。本章会深入分析 PLC 在该领域高级应用策略，研究 PLC 如何应对过程控制中的特殊问题来建立一个高效稳定的控制系统。

第一节 过程控制系统架构

建立一个良好的过程控制系统，首先要知道其基本架构和设计理念。与离散制造的断续性相对应，过程控制所关注的是物料或能量在流动过程中状态的连续变化，这就对控制系统提出了适应连续生产特点的结构要求。本节从过程控制固有的特点入手，对从现场设备到上层优化的多级架构进行了详细的论述，并对现代 PLC 在这样的复杂系统中所起到的核心作用做了分析。

一、过程控制特点

过程控制对象的物理特性使得其控制策略更加复杂，过程控制对象的特性往往是动态的、非线性的、变量间高度耦合的。对这些特点有充分的认识，才是进行系统选型、架构设计、算法开发的先决条件。只有掌握了被控对象的本质，才能用 PLC 技术对工艺指标进行精确的控制。

（一）连续性与稳定性要求高

化工、炼油或者发电等流程工业的生产过程一旦开始，一般需要连续运转数月甚至数年。任何非计划性的停机都会造成巨大的经济损失，甚至造成设备损坏或者安全事故。从原料输入到化学反应再到产品输出，整个过程不间断地连续运行，这就要求 PLC 控制系统必须有很强的连续运行能力。系统不仅要长时间的无故障工作，即使有些部件发生故障，也可以依靠冗余保证控制权的顺利交接，

保证生产过程不受影响。

过程变量稳定是产品质量一致、生产效率高的保证。与离散制造只关心是否到位或者不到位不同，过程控制要求温度、压力、液位、流量等参数必须被严格控制在工艺设定的值附近。任何大幅波动都会造成产品降级或者产生废品。PLC 在执行这些任务时，需要做高频率的采样和运算，用 PID 等闭环控制算法，实时抑制原料组分变化、环境温度波动、公用工程压力改变等各种外部干扰，使因干扰而导致的被控量偏差控制在很小的允许范围内。

为了达到如此严格的连续稳定性能，现代高端 PLC 一般都采用电源、CPU、通讯总线三者冗余的结构。在软件方面，控制程序有很强的抗干扰能力以及容错性。即使传感器信号瞬时消失或者执行机构动作缓慢，也可以依靠预设的故障安全逻辑来保持系统的稳定，从而防止局部故障发展成全厂性的生产瘫痪。

（二）多变量耦合与非线性特征

过程控制对象很少是孤立的单输入单输出系统，更多是变量之间相互影响、相互制约的强耦合系统。在典型的化学反应釜中，为了保持反应速率，需要提高反应温度，一般采用加热夹套的方式；加热过程中会引起釜内压力升高，影响物料粘度和副产物生成率。只调节温度阀门的话，必然会引起压力、液位的波动。这种牵一发而动全身的强耦合效应，使得传统的单回路控制方法常常无计可施，系统很容易产生振荡甚至发散。

非线性特性也是过程控制所遇到的另一个难题。很多物理化学过程的增益不能用简单的线性方程来表示，数值会随着工作点的变化而剧烈变化。控制阀的流量特性一般为非线性，在小开度时流量变化敏感，大开度时趋于饱和；pH 值中和滴定过程中，在等当点附近表现出非常高的非线性增益，少量酸碱的加入就会引起 pH 值的急剧变化。非线性因素使得控制器在某一工作点上整定好的参数，一旦工况发生偏移，就会完全失效，造成控制品质严重下降。

对以上所提到的这些复杂特性，PLC 系统采用了很多高级的控制方法。工程师们一般会采用解耦控制算法，将多变量系统变为单变量系统；或者使用多变量模型预测控制方法进行统一操纵变量的控制。对于非线性问题，现代 PLC 可以采用自适应控制、增益调度等技术，根据当前的工况参数自动调节 PID 参数；也可以把复杂的非线性曲线划分成若干个线性区段进行控制，以保证在整个工作范围内控制效果的一致性。

（三）大惯性与纯滞后问题

大惯性属于过程控制中常见的物理现象，大惯性主要体现为被控对象对于控制作用的响应较慢。大型加热炉的升温过程、巨大的储罐液位变化、长输送管道物料传输等都存在明显的容量滞后。PLC 发出控制指令（如开蒸汽阀），被控变量（温度）需要较长时间才能有明显变化。能量或者物料的存储效应会造成系统响应迟钝，如果控制器参数调整不当，就很容易产生超调，造成系统反复振荡，不能稳定在设定值上。

纯滞后是一种更为复杂的延迟现象，一般是由物料输送时间或者分析仪表的检测周期引起的。物料在传输时，从加料点到下游检测点有一个固定的时间差。在这段时间里，不管控制器怎么调节，检测值都不会有任何改变。纯滞后造成控制作用不能及时反映到反馈信号上，闭环控制也就没有了即时纠偏的能力。当最终的反馈信号到达时，之前已经发生的控制作用会过量，从而造成系统严重失稳，在皮带称重配料、长管道温度控制等场合中特别明显。

为了克服大惯性与纯滞后带来的控制难题，PLC 内部集成了多种补偿算法：

1. 史密斯预测控制算法被广泛地用于纯滞后较大的情况，它利用对象的数学模型来预估控制作用对将来的影响，提前加入反馈环路，抵消滞后时间造成的相位滞后，从而大大加快系统的响应速度，提高稳定性。

2. 前馈控制策略也是解决此类问题的有效方法，检测主要扰动变量（进料流量、进料温度等），PLC 在扰动对被控变量产生影响之前就发出补偿指令，抵消扰动的影响，将事后调节变为事前预防，大大减小系统的动态偏差。

二、典型过程控制架构

一个完善的工业过程控制系统一般都采用分层递阶的结构形式，从最底层的物理设备到最上层的管理决策，各个层次之间各司其职、密切配合。一方面，可以保证数据畅通流通，另一方面，又实现控制功能的分散和集中。现代 PLC 具有很强的通讯能力和运算能力，它处在整个架构的最内层，是联系现场物理世界和上层数字世界的枢纽。

（一）DCS 与 PLC 在过程控制中的分工

历史上集散控制系统和可编程逻辑控制器各自有不同的应用范围。集散控制系统起源于仪表控制技术，对模拟量、回路调节和复杂工艺流程的监控比较擅长，

天生就具有全局数据库和统一组态环境，因此更适合于大型连续生产装置的集中管理。可编程逻辑控制器起源于继电器逻辑的替代，具有高速逻辑运算、顺序控制、离散量处理的能力，由于具有灵活、快速、成本低等特点，被广泛应用于单体设备或者辅助工段的控制。

由于微电子技术、软件技术的发展，两者界限越来越模糊，出现相互融合的趋势。现代高端 PLC 的处理能力有了很大的提高，可以轻松运行复杂的 PID 算法、浮点运算以及用高级语言编写的控制模型。模拟量处理的精度和通道密度也达到了或超过了集散控制系统。在很多中小型过程控制项目和大型项目的辅助车间（水处理、物料输送）上，由于 PLC 具有开放性好、性价比高、维护方便等特点，它逐渐代替了部分传统的集散控制系统，成为主要的控制平台。

典型的混合架构中两者会根据各自的优势分工合作。集散控制系统一般作为工厂的中心主控系统，负责对整个工厂的主工艺流程、复杂回路进行调节，并对全厂的数据进行集成和监视，保证核心反应过程的稳定。可编程逻辑控制器作为子系统，对压缩机组、包装线、离心机等高速运转的设备或者公用工程设施的逻辑控制、顺序控制。可编程逻辑控制器采用工业以太网或者现场总线，把重要的运行数据和状态上传给集散控制系统，听从它的协调指令，从而达成全厂管控一体化。

可见在现代工业生产中，集散控制系统和可编程逻辑控制器的角色分工与融合趋势，同 DCS 和 PLC 在过程控制中的分工对比表中所示：

DCS 与 PLC 在过程控制中的分工对比表

特性	DCS（集散控制系统）	PLC（可编程逻辑控制器）
起源 / 擅长	仪表控制技术，模拟量、回路调节、复杂工艺流程监控	继电器逻辑替代，高速逻辑运算、顺序控制、离散量处理
优势	全局数据库、统一组态、大型连续生产集中管理	灵活、快速、成本低、开放性好、性价比高、维护方便
典型应用	大型连续生产装置、核心主工艺流程、复杂回路调节	单体设备、辅助工段（水处理、物料输送）、高速运转设备
当前趋势	处理能力提升，界限模糊，与 PLC 融合	处理能力大幅提升，模拟量精度、通道密度追平甚至超越 DCS

（二）现场仪表与执行机构层

该层级处于控制系统最底层，是感受外界环境、执行控制指令的“眼睛”和

“手脚”。它包含了各种传感器、变送器、检测仪表,以及调节阀、变频器、泵、电机等执行设备。传感器把温度、压力、流量、液位、成分等物理化学量转变成电信号,执行机构依照控制系统的指令去改变流体的流速、能量输入或者设备的运行状况。PLC 利用 I/O 模块同这一层进行交互。

数字化技术在现场端得到了广泛的推广和应用,传统的 4~20mA 模拟信号正被智能数字信号补充或者取代。现代智能仪表除了可以传输过程变量值之外,还可以利用 HART、IO-Link 或者现场总线协议,传输设备的健康状态、诊断信息以及配置参数。智能调节阀可向 PLC 提供阀门定位器实际开度、气源压力、摩擦力趋势,便于 PLC 判断阀门有无卡涩或磨损。

PLC 在分层架构中既是信号采集与输出的执行者,又日益成为设备管理的主体。高速现场总线可对变频器的电流、转矩、故障代码进行实时采集,从而实现电机的精确控制和保护。一些先进的设计中 PLC 还可以利用通信协议直接对现场仪表的量程、报警值进行远程修改,从而对最底层的设备进行远程维护与动态设置,使系统更加灵活,便于维护。

(三) 过程控制站与监控层

过程控制站是 PLC 系统的核心计算单元,执行所有的逻辑运算、回路调节、顺序控制程序。PLC CPU 在该层级以高速背板总线为周期扫描输入状态,调用用户编写的控制程序进行解算,并刷新输出映像区。就过程控制而言,控制站的循环周期一般设置在几十毫秒到几百毫秒,以适应热工参数变化对响应速度的要求。过程控制站要处理复杂的工艺算法,一般会装有较大的内存和强劲的浮点运算处理器,支持功能块图,结构化文本这些符合 IEC 61131-3 标准的高级编程语言。

监控层即 SCADA 系统,是操作人员和控制系统之间的“人机界面”。它通过工业网络与下位 PLC 过程控制站通信,把现场实时数据变成图形化的流程图、趋势曲线和数字仪表,显示在中央控制室的大屏幕或者操作员工作站上。监控层除了提供可视化的操作界面,使操作员可以远程启停设备、调节设定值、切换控制模式之外,还具有数据记录和报警管理等十分重要的功能

1. 报警管理系统对 PLC 上传的异常信号进行分类、分级、去重,防止无效报警淹没操作员,保证重要故障可以及时发现、处理。

2. 历史数据库主要是对大量的工艺数据进行压缩存储,为之后的工艺分析、质量追溯、事故反演等提供详细的数据。

第二节 PID 控制算法与优化

虽然现代工业自动化系统不断涌现出各种高级控制策略,但是 PID 控制由于结构简单、鲁棒性好、物理意义明确等特点,在过程控制领域依然占据着不可替代的地位。可编程逻辑控制器是工业现场的大脑,它对 PID 算法的实现方式以及优化手段直接影响到生产过程是否稳定、产品质量是否优良。对 PID 在 PLC 环境下的运行机制进行深入研究,分析各种控制结构的差别和特点,掌握相应的参数整定方法,这是每一个自动化工程师从逻辑控制到过程控制的必经之路。

一、PID 控制原理剖析

要把 PID 算法成功地移植到 PLC 系统中去使用,仅仅明白它的数学表达式是不够的,还要理解各个环节在离散时间域中的具体行为特征。从模拟时代连续运算,到数字时代的离散迭代, PID 的核心思想一直都是根据过去的累计误差、现在的误差、误差变化趋势动态调整。但是在 PLC 实际实施过程中,运算周期确定性和数值计算精度都会对控制品质产生重大的影响。

(一) 比例、积分、微分作用

比例控制是整个闭环控制系统的基础,它主要对现在的偏差信号做出立即的反应。当系统检测到设定值和反馈值之间存在偏差的时候,比例项会立即输出一个和该差值成正比的信号,使被控制变量向目标点靠拢。比例增益的大小直接影响控制作用的强弱,比例增益越大,控制作用越强,系统的响应速度越快,上升时间越短,但是过大的比例作用会使系统过于敏感,容易产生高频振荡,甚至造成系统失稳。单纯的比例控制对具有自平衡能力的被控对象来说,不能完全消除稳态误差,因为当误差趋于零时,控制输出也随之减小,不能维持目标状态,这种固有的剩余偏差称为静差。

积分环节的引入,很好地解决了比例控制所存在的静差问题。积分作用是误差累积的过程,只要偏差存在就会不断地进行累加运算,使控制输出发生变化,直到偏差消失为止。该“记忆效应”使得控制器具有消除稳态误差的能力,使被控量最终能准确地稳定到给定值上。积分作用的加入虽然提高了系统的稳态精度,但是也带来了相位滞后,系统中增加了一个惯性环节。积分作用过强时,系统响应过程中会有超调量,调节时间变长,表现为被控量在设定值上下大幅度波动,

不能很快收敛。

微分环节有预测性，利用误差信号的变化率来预测系统未来的走向。当偏差刚刚出现并且有扩大趋势的时候，微分项就会提前加上一个反向的修正信号，这就好比给系统加了一个“阻尼力”，这样就抑制了偏差的继续增大。超前调节的特性可以明显改善系统动态性能，减小超调量，缩短调节时间。但是微分作用对噪声很敏感，工业现场的传感器信号中经常含有高频干扰，如果微分增益设置不当，微分项就会把微小的噪声放大，导致控制输出大幅波动，不但不能改善控制效果，反而会加大执行机构的机械磨损。微分环节在实际应用中会和输入滤波算法配合使用，在微分的动态增益与噪声风险之间找到平衡。

（二）PID 控制器的几种结构形式

PLC 指令集中，PID 算法不是只有一种结构，在不同的场合下，其形态也不一样。其中比较典型的就位置式 PID 和增量式 PID。位置式 PID 算法属于全量计算，每次运算的结果都是执行机构实际的开度或位置。这种结构很直观，容易理解，可以清楚地反映出目前的控制情况。但是，由于其积分项累计的是从系统开始运行至今所有的误差，一旦计算机发生故障或停机，再次启动时，由于积分项的累计值过大，会导致输出突然大幅度变化，从而引发生产事故。

而增量式 PID 算法在 PLC 中的应用更广，主要应用于步进电机、电动调节阀等带有保持功能的执行机构上。增量式算法只计算本控制周期与上一控制周期的输出变化量，PLC 只需要输出一个增量信号。它不需要累积历史误差，因此没有积分项溢出；控制切换或者系统故障时，执行机构仍能保持当前位置，安全性也得到提高。由于只和最近几次的采样值有关，增量式算法受误动作的影响小，通过逻辑判断限制增量的大小，更容易实现手动 / 自动的无扰切换。位置式和增量式 PID 详细的对比如下表所示。

PID 结构类型对比表

特性	位置式 PID	增量式 PID
计算输出	控制量的绝对值（全量）	控制量的变化量（增量）
积分累积	累积所有历史误差	只涉及当前及前一周期误差
故障影响	易因积分饱和导致输出剧变	执行机构保持原位，安全性高
手动 / 自动切换	切换复杂，易产生冲击	可实现无扰动切换，更平滑
应用场景	适用于模拟量输出等无自锁执行机构	适用于步进电机、电动调节阀等有保持功能的执行机构

从算法的内部连接方式来看，还存在理想标准型与串联型之分：

1. 理想标准型结构中，比例、积分、微分三项独立运算互不影响，最后把三者结果线性叠加。该结构使得参数调试较为直观，调整某一个参数时，不会影响到其它两项的动态增益，适合大多数通用控制场合。

2. 串联型结构是把比例增益作为公用系数加到积分、微分项上，或者将 PD 环节和 PI 环节串联。一些老式的气动控制器或者某些 PLC 功能块采用的就是这样的结构。特点就是参数之间存在耦合效应，调整比例增益的时候也会改变积分和微分的有效作用强度，调试较为复杂，但在大滞后对象的控制中表现出更好的抗干扰性。

（三）采样周期对控制效果的影响

PLC 执行 PID 运算时采样周期的选择，就是在控制理论和硬件性能之间进行权衡的问题。从香农采样定理来看，采样频率要大于被控信号最高频率成分的 2 倍，但闭环控制中为了得到较好的相位裕度和动态响应，采样频率通常会设置得高一些。采样周期不单是时间参数，它还是决定离散控制系统逼近连续模拟系统程度的关键因素。

采样周期如果设置得过大，控制器就不能及时对被控变量的快速变化做出反应，控制作用就会产生滞后。滞后期间偏差早已大量积累，控制器反应过来时，必须输出一个很大的修正量，造成系统超调或者持续振荡。对于流量、压力等变化较快的物理量来说，过大的采样周期是造成控制品质变坏的主要原因之一。过长的采样间隔会造成微分项计算粗糙，不能很好地反映误差变化的趋势，导致预测控制的效果大打折扣。

反之，如果一味地追求很短的采样周期，虽然从理论上讲更接近于连续控制，但是会给 PLC 的 CPU 造成巨大的运算压力。过高的采样频率造成单位时间内 PID 指令执行的次数骤然增多，占用的扫描时间也变得很长，这会挤压其他逻辑控制任务的执行时间，严重时还会引发数值计算的错误。在极短的时间间隔内，被控变量的变化量很小，甚至小于 A/D 转换模块的分辨率，此时微分项计算出的结果主要反映量化噪声，造成控制输出出现高频抖动。温度等大惯性系统，过快采样是不必要的，因为被控对象本身的热惯性就滤掉了高频变化，此时应选择与对象时间常数相适应的采样周期，一般取对象时间常数的十分之一到五分之一。

二、PID 参数整定技巧

参数整定是 PID 控制技术应用的必要过程，是联系理论模型和现场工况的一座桥梁。虽然现代 PLC 提供了很多自整定工具，但是由于工业现场环境千差万别，最终达到最好效果还是需要人工来完成整定。掌握科学的整定步骤与方法，才能在面对非线性、时变负载的时候，迅速找到系统的稳定平衡点。

（一）经验试凑法步骤

经验试凑法是现场工程师用得最多的整定方法，它依靠的是对控制理论的深刻理解以及对具体工艺流程的熟悉程度。在试凑之前首先要保证系统处于闭环状态，执行机构正常工作，并将 PID 参数设成安全值，通常的做法就是先将积分时间、微分时间关闭，只留适当的比例增益。

整定第一步是调节比例参数 P。逐步增大比例增益，然后人为施加一个阶跃干扰（即改变给定值），仔细观察被控变量的响应曲线。目的是使系统产生 4:1 左右的衰减振荡，即第二个波峰的高度约为第一个波峰的四分之一。这时系统会有比较快的响应速度以及较好的稳定性。当系统反应迟钝的时候要增大增益；出现等幅振荡或者发散振荡的时候应立刻减小增益。虽然这时系统可能还有静差，但系统的基本动态特性已经确定了。

比例参数基本确定之后，再慢慢加入积分作用。积分时间的设置应由大到小来试，积分时间越短，积分作用越强。随着积分作用的加入，系统静差会慢慢消失，但是超调量会增大，振荡频率会降低。调节积分参数的时候，要找出消除静差与保持稳定的最佳结合点，一般要适当降低之前选定的比例增益，来抵消积分带来的相位滞后。继续观察过渡过程，直到系统可以平稳无差地跟随设定值为止。

最后根据需要加入微分作用。温度、液位属于大滞后、大惯性系统，微分项对动态性能的改善效果十分明显。使微分时间由小逐渐增大，观察它对超调量的抑制作用。过强的微分作用会造成控制阀频繁动作甚至发生振荡，因此应该小心调节。在整个试凑过程中必须按照先 P 后 I 再 D 的原则，随时注意执行机构动作的快慢，防止参数过大造成设备损坏。每一次参数调整之后，都应给系统留出足够的稳定时间，防止频繁改变参数造成观察结果失真。

（二）临界比例度法应用

临界比例度法，又称 Ziegler-Nichols 闭环整定法，是用系统临界振荡状态来

确定 PID 参数的经典方法。不需要被控对象的精确数学模型，只需要通过实验得到系统的临界特性。实施本方法之前，被控量必须在一个一定的范围内可以产生等幅振荡，否则有安全隐患。

操作时先将控制器的积分作用与微分作用切除，只保留比例作用。把比例增益设置成一个小数值，然后慢慢增大，每次增大后给系统加一个小小的干扰，看被控量变化的轨迹。直到系统出现等幅振荡，即振荡幅度既不增大也不减小为止，这时的比例增益就是临界增益 K_u ，振荡的周期称为临界周期 T_u 。记录这两个参数，后面计算要用到。得到 K_u 、 T_u 之后，可以参照 Ziegler-Nichols 临界比例度法参数整定表来确定 PID 参数。

Ziegler-Nichols 临界比例度法参数整定表

控制类型	比例增益	积分时间	微分时间
P 控制	0.5 K_u	-	-
PI 控制	0.45 K_u	0.83 T_u	-
PID 控制	0.6 K_u	0.5 T_u	0.125 T_u

如上表所示，这套参数一般可以实现较快的响应速度，但是过于激进，在一些要求平稳的场合中会出现超调量较大的情况。工程师在使用时应以基准为参考，根据工艺的具体要求适当减小比例增益或者增大积分时间来微调，从而达到更好的控制效果。

（三）衰减曲线法操作

考虑到系统进入持续等幅振荡是临界比例度法所必需的，而这种持续的等幅振荡在许多化工、电力生产过程中是极为危险甚至不允许的，因此衰减曲线法应运而生。该方法并不追求系统达到临界不稳定状态，而寻找的是次优的衰减振荡状态，因此更安全。

纯比例控制下，逐步增大比例增益，用设定值扰动下的过渡过程曲线来观察，找到 4:1 或者 10:1 衰减比时的比例增益和振荡周期。4:1 衰减是指相邻两个同相的波峰的振幅比为 4:1，在工业控制上认为是比较理想的一种过渡过程形态。观察到这样的波形时，记下此时的比例度 δs 以及两个波峰之间的时间间隔当作周期参数。

利用 4:1 衰减状态下得到的参数，用经验公式进行计算。采用 PI 控制时比例度一般取 δs 的 1.2 倍，积分时间取 0.5 倍振荡周期。PID 控制的比例度设为

δs 的 0.8 倍, 积分时间取 0.3 倍的振荡周期, 微分时间取 0.1 倍的振荡周期。由于该方法是在系统稳定的条件下进行的, 因此它对生产过程的干扰较小。衰减曲线法的难点是正确找到 4:1 的衰减率, 实际工业信号中常常有噪声, 波峰的读数会有些误差。因此有经验的工程师一般会使用趋势图记录工具对波形进行捕捉分析, 从而提高参数整定的准确性。

第三节 复杂回路与串级控制

在现代工业自动化领域, 随着生产工艺对控制精度和稳定性的要求越来越高, 简单的单回路反馈控制已经不能满足大滞后、大惯性、多干扰的复杂控制对象的需求。此时需要使用更高级的控制策略, 串级控制、前馈控制、比值控制等, 并充分利用可编程逻辑控制器强大的运算能力, 从而大幅度提高系统动态性能、抗干扰能力, 保证生产过程的安全、高效。

一、串级控制系统

串级控制是工业过程控制中用得最多的复杂控制方法之一。通过把两个调节器串联使用来形成一种独特的双闭环结构, 目的在于克服控制对象的容量滞后问题, 从而提高系统的控制质量。该系统特别适合于干扰大、频率高、主要作用于副回路的情况, 被称为解决大惯性对象控制难题的利器。

(一) 串级控制的结构与优势

串级控制系统的结构核心是两个相互套用的闭合回路, 即在原来的一个主控制回路中再套入一个副控制回路。这个结构有两个控制器, 一个叫做主控制器, 另一个叫做副控制器。与单回路不同的是, 主控制器的输出不是直接驱动执行机构, 而是给副控制器提供设定值。真正驱动执行机构, 改变操纵变量的是副控制器的输出。从信号流动的角度来说, 主变量反馈给主控制器并与工艺设定值进行比较; 副变量反馈给副控制器并与主控制器的输出信号进行比较。由此形成“回路套回路”的层级结构, 使系统具有了双重监管, 可以对过程的每一个阶段进行精细的管理。

该种控制策略最大的优点就是具有极强的抗干扰性。由于副回路的存在, 副回路范围内发生的任何扰动, 在影响到主被控变量之前, 就会被副控制器迅速感

知并及时调节消除。相当于是给干扰源和主变量之间装起了一道防火墙,使得干扰对主控制指标影响大大减弱。副回路加入后,可以改变广义控制对象的特性,一般可以减小广义对象的时间常数,提高系统的响应速度。对于非线性问题比较严重的系统,副回路甚至可以起到一定的线性化作用,使得整个系统在各种工况下都能保持近似的控制性能。

在实际的编程控制器程序中,串级控制一般用两个独立的运算块级联来实现。主运算块计算出来的控制量数值传递到副运算块的设定值输入端口。实现了数字化的方式避免了传统模拟仪表接线的麻烦,回路组态、修改、参数监控更加灵活方便。工程师可以用编程软件方便地观察主、副回路的偏差情况,可以按照实际的工艺要求设置两个回路的运算周期。一般来说,副回路的运算周期要比主回路小,这样才能使副回路及时反应。

(二) 主、副回路的选择原则

构造一个高效的串级控制系统,关键就在于合适的选择主变量和副变量。这一步直接关系到控制方案是否可以成功。主变量选择较直观,一般是生产工艺过程中起决定性作用、必须严格控制的质量指标或参数。主回路的设计目的是使主变量无静差地跟踪设定值。但是副变量的选择更加复杂,更具技巧性。副变量应该是一个对干扰反应灵敏,能迅速响应操纵变量变化的中间参数。设计时要遵循“包含主要干扰”的原则,即尽可能把系统中变化剧烈、幅值大的主要干扰包含在副回路中,利用副回路的快速调节作用将其克服。

确定副回路的覆盖范围时要考虑控制通道的“深浅”。如果副回路包含的化工设备或管道过短,响应速度虽然很快,但能克服的干扰就小;反之,如果副回路包围的过程过长,包含的滞后太多,则会降低副回路的响应频率,减弱其快速校正的作用。一般副对象的时间常数比主对象要小得多,二者之比为三到十倍最为合适,可以较好地避免主、副回路发生共振,保证系统稳定。

副变量和操纵变量之间要存在明显的、强烈的因果关系。物理上,操纵变量一变,副变量就应该立刻变化。以炉膛温度为主变量时,一般选择燃料流量或者炉膛压力作为副变量,因为阀门开度变化会引起流量或者压力的瞬间变化。快速的反应能力是副回路发挥作用的先决条件。为了保证快速性,副控制器一般采用纯比例或者比例积分控制;为保证无静差,主控制器一般都采用比例积分微分控制算法。

（三）串级 PID 的投运与整定步骤

串级控制系统投运及参数整定比单回路系统要复杂，必须按一定顺序进行，否则会引起系统振荡甚至发散。这就成了一个控制器对另一个控制器进行调试的过程，也就是内外环控制，要遵循“先副后主”的原则。工程师在编程控制器调试界面进行操作的时候一定要小心谨慎。

1. 系统投运前的准备与方向确认

系统投入运行前，现场仪表和执行机构要工作正常。调试的第一步就是将主控制器和副控制器都打到手动。操作人员利用人机界面手动调节副控制器输出，检查执行机构（调节阀等）动作是否达到要求。之后确定副变量（流量）和主变量（温度）的响应方向，再确定两个控制器的正反作用方向。这是非常关键的一环，调节的方向如果错了，就会出现正反馈，最后失控。

2. 副回路参数整定

参数整定的核心就是先副后主。保持主控制器处于手动模式，将副控制器切换成自动模式。这时系统相当于一个副变量为被控对象的单回路系统。可以采用单回路整定方法（临界比例度法、衰减曲线法）对副控制器参数进行整定。由于副回路的主要任务是快速抑制干扰，而不是无静差，所以副回路一般采用较强的比例作用和较弱的积分作用，甚至采用纯比例控制，以使副回路具有快速的跟随性和抗扰性。

3. 主回路参数整定

当副回路参数确定、稳定运行之后，再将主控制器切换到自动模式。这时整个串级系统就进入了闭环工作状态。由于副回路已经校正了部分非线性效应以及干扰，主对象的特性也会随之改变。主控制器参数整定一般要加入积分和微分作用，使主变量回归设定值，同时具有较好的动态性能。在整定主回路时，如果系统出现振荡，首先要确定系统振荡是主回路还是副回路引起的，然后再进行相应的调整。

4. 系统整体联调与优化

最后进行系统的整体联调和优化。可以加入阶跃干扰或者模拟负荷的变化，看主变量的过渡曲线。根据曲线实际形状调整主、副控制器参数。为了得到更好的整体效果，有时必须牺牲一些副回路的稳定性（允许有小波动），从而保证主回路的平稳。在编程控制器中，主副回路无扰切换逻辑也要特别注意检查，在手

动、自动以及单回路、串级模式切换的时候，输出值不能发生突变，从而保证工艺流程的稳定性。

二、其他复杂控制回路

除了串级控制外，在工艺机理特殊或者对安全性要求极高的地方，还出现了许多复杂的控制回路。这些回路不再只是简单的反馈偏差的调节，而且加上了开环补偿、逻辑判断、多变量协调等一系列的机制。利用编程控制器强大的逻辑判断功能和数学运算模块，很容易实现上述复杂的控制策略，解决传统仪表无法完成的控制问题。

（一）前馈控制的基本思想

前馈控制与传统的反馈控制有着本质的不同，它是一种以扰动补偿为原理的开环控制方法。它的基本思想是：扰动作用于被控对象并使被控变量发生变化之前，先测量出扰动的量值，利用对象和扰动通道的数学模型算出所需的补偿量，提前控制执行机构进行调节。这种“未雨绸缪”的控制方法，从理论上讲是可以把干扰完全补偿掉的，使被控量不受干扰。

单纯的前馈控制在实际运用中存在一定的局限性，它高度依赖精确的数学模型，不能消除由于模型误差和不可测干扰所造成的偏差。因此，工业应用中几乎都采用前馈控制和反馈控制结合的方式，即前馈 - 反馈复合控制。复合结构中前馈部分主要用来克服可测干扰，承担主要的调节任务，起粗调作用，反馈部分主要用来消除残余偏差及其他不可测干扰的影响，起精调作用。

前馈控制一般通过数学公式或者查表模块来实现。控制器从干扰源的模拟量信号（进料流量、环境温度等）中读取数据，经增益、动态补偿算法（超前滞后环节）处理之后，再加上反馈控制器的输出上。在锅炉汽包水位控制中，一般用蒸汽流量作前馈信号。当用户突然增大用汽量的时候，反馈系统还没有感觉到水位开始下降，前馈系统已经根据蒸汽流量增量立即打开给水阀，很好地克服了虚假水位现象，从而改善了系统的动态稳定性。

（二）比值控制的应用场景

比值控制是两个或多个变量之间要保持一定比例关系，在燃烧控制、配料混合等领域应用广泛。最常用的是单闭环比值控制与双闭环比值控制。燃烧是热量传递、物质传输、化学反应相互耦合的过程。工程实践当中，对燃烧过程的认识

和控制能力是进行高效、清洁能源生产的根基。燃烧控制的一个重要方面就是燃料与空气的比例，即空燃比，对于保证燃料充分燃烧、减少污染物排放非常重要。燃料流量一般被看作不可控的主流量，空气流量作为从动流量。

在单闭环结构里，控制器检测燃料流量，再把检测到的燃料流量乘以设定的比值系数，形成空气流量控制器的给定值。燃料流量一有波动，空气流量就会随之改变，以保证空燃比恒定。在编程控制器中实现该逻辑非常简单，只需要调用乘法指令就可以完成设定值的联动计算。如果工艺要求同时控制两种物料的总量，则需要采用双闭环比值控制，即引入一个主控制器，调节两个流量回路的设定值，以达到既保持比例又控制总量的目的。

除了简单的流量比例外，比值控制也被用在化学反应中化学计量比的控制上。在酸碱中和反应中，酸液和碱液的流量要严格按照化学方程式中的摩尔比来控制。由于反应的非线性以及 pH 值对数特性，简单的流量比不够准确。此时一般会配合使用 pH 分析仪，采用变比值控制策略。编程控制器按照 pH 值反馈偏差去动态调整流量比值系数，这种自适应比值控制可以应对原料浓度的变动，保证最后产品 pH 值一直达标。

（三）均匀控制与分程控制

均匀控制与分程控制虽然目的不同，但是都是采用常规控制算法的变种来满足特殊的工艺要求。均匀控制主要用在前后工序的缓冲罐液位和流量控制上。主要矛盾为：一方面不能让液位波动太大（避免溢出或者抽空），另一方面也不能使流出流量变化过大（以免冲击下游工序）。这就需要控制器参数设置得非常柔和，一般采用宽比例度、长积分时间的方式进行整定。在编程控制器中，有时会采用特殊的非线性算法来实现均匀控制，即液位处于中间区域时控制作用很小，主要用于稳定流量；当液位接近上下限时，控制增益迅速增大，优先保护液位。

分程控制就是控制器发出一个信号去控制两个或两个以上执行机构，每个执行机构在控制器输出信号的某个范围内动作。典型的例子就是反应釜的温度控制系统，需要同时控制加热和冷却。当控制器输出为 0% 到 50% 时，冷却水阀由全开变为全关；当控制器输出为 50% 到 100% 时，蒸汽阀由全关变为全开。这样一套控制系统就可以覆盖很宽的操作范围。

分程控制的关键是阀门定位器的调节或者编程控制器内部的输出映射。在数字系统中，工程师更倾向于在程序里将比例积分微分控制器的 0 到 100% 输出信

号用比较指令和线性变换指令映射到两个模拟量输出通道上。比如 PID 输出是 40% 的时候，程序算出冷却阀的开度，强行把加热阀关上。该软件分程的精度高，不存在机械分程所具有的死区问题。必须强调的是，在两个阀门动作交接处（50% 左右），一定要留出一小块死区或者重叠区，防止两个阀门来回开关或者同时打开，造成能源浪费。

第四节 实时数据管理与监控

一、过程数据采集与处理

现场传感器采集的原始信号一般会受到各种噪声的干扰，而且物理量纲与控制器内部数据格式存在差异。因此，在核心控制算法执行之前，一定要进行预处理。这个过程直接影响后面控制指令是否准确、系统是否稳定，它是自动化程序设计中最基本的步骤，包含从信号清理到物理量重构的全部过程。

（一）模拟量信号的滤波与标定

工业现场电磁环境非常复杂，变频器、伺服驱动器、大功率接触器动作时都会在模拟量信号传输线上感应出高频噪声，使得控制器采集到的数值大幅跳动。为了消除这些干扰，在软件上必须要用到数字滤波算法。常用的滑动平均滤波是建立一个先进先出的数据队列，对队列中多个采样值求平均值，削顶突发的尖峰干扰；温度信号变化缓慢时，一般用一阶滞后滤波法，调节滤波系数使信号稳定且响应速度合适。在一些高精度的应用场合下还要采用中位值滤波法，即去掉采样周期内出现的最大值和最小值，以反映真实的物理信号变化过程，保证控制系统不会因为瞬时干扰而产生误动作。

噪声剔除是数据处理的第一项核心工作，而把采集到的数字量编码转换成具有实际工程意义的物理量，也是另一项核心工作。模拟量输入模块把电流或电压信号转成数字码，数字码本身没有直观可读性。标定程序按照传感器量程范围，采用线性变换公式将整数码转换成温度、压力、液位等工程单位数值。但是由于传感器本身的非线性或者安装位置造成的系统误差，单纯的线性变换精度不够。工程师一般会用多段线性插值或者最小二乘法去拟合数据，从而得到更加精确的校正模型。传感器老化造成零点漂移的时候，程序还要有自动归零或者手动偏置

修正的功能，让操作人员在人机交互界面设置修正参数，及时补偿信号偏差，保证监控数据和现场实际工况保持高度一致。

（二）流量、温度、压力的补偿计算

在流体过程控制中气体、蒸汽体积流量受温度、压力的影响很大，直接读取的流量计数值不能真实反映质量流动的情况。根据理想气体状态方程和流体力学相关原理可知，工况条件下介质密度会随压力增大而增大，随温度增大而减小。如果不做动态补偿，在高温高压或者工况变化剧烈的情况下，计量误差会大于百分之十，这对于能源计量和配比控制来说是不可接受的。因此控制器内部必须建立包含温度、压力变量的补偿算法模型，实时采集流体的当前温度、压力数据，计算出实时密度系数，将工况体积流量修正为标准状况下的体积流量或者质量流量。

根据不同的介质特性和计量标准，补偿计算的策略多种多样。实际操作中，一般遵循如下逻辑：

1. 过热蒸汽计量由于蒸汽密度和温度、压力的关系呈非线性，一般不用复杂的偏微分方程。预先用多维数组或查表指令将蒸汽密度表存储在控制器的存储区中。程序根据实时采集到的温度、压力值用双线性插值法获得准确的密度，再和差压信号开方后的流速相乘。

2. 可压缩性气体计量，按国家或行业有关标准、规范公式。程序需要加上一个压缩因子来作为修正项，而压缩因子本身又是压力和温度的函数。控制器调用高精度数学运算库，在每个毫秒的扫描期内可以对复杂的浮点数幂指进行运算，实现贸易结算级的计量。

（三）累积量与瞬时值的统计

累积量的计算在工业生产中涉及到原料消耗统计、产量核算、能效分析等各个方面，其实质就是对瞬时流量在时间上的积分。由于可编程逻辑控制器是循环扫描工作方式，积分运算实际上被离散化成了黎曼和的形式。为提高累积精度，程序不能认为扫描周期是恒定的，因为通信中断、中断程序的执行都会造成扫描周期产生微秒级的抖动。先进的处理方法采用系统高精度时钟指令，得到上次扫描结束到本次扫描开始的时间差，将时间差换算成秒或分钟，再与当前的瞬时流量值相乘，得到扫描周期内微小的增量值。

长时间累积就会出现数据溢出、精度丢失等问题。常用的 32 位浮点数在数

值很大的时候，其分辨率会急剧下降，出现“大数吃小数”的现象，即当累积总量很大而当前瞬时增量很小时，浮点数加法可能无法正确更新数值。为解决这个问题，一般采用 64 位双精度浮点数存储或者建立级联累积算法：设定一个较小的中间变量存储周期内的小增量，当中间变量达到一定的阈值时，一次性累加大数变量中，再清空中间变量。这种分层累积策略很好地避开了计算机浮点运算的精度问题，保证了长时间运行的统计准确性。

生产管理经常需要按班次、按日、按月对数据进行切片统计。程序内部需要设置专门的时间触发逻辑，使用控制器的实时时钟功能，在每天的零点或者交接班的时候触发数据转存操作。系统把现在的累计总值存入历史寄存器，算出当天的净增量，把日增量存入月度数据块。需要严密的逻辑互锁来防止数据搬运瞬间产生新的累积动作，造成数据不一致。系统设置环形数据缓存区，存近三十天或者十二个月的统计数据，上位机通讯出错也不影响下位机数据完整，支持追溯。

二、人机界面设计

人机界面是操作人员感知生产过程、下达控制指令的唯一窗口，人机界面的好坏直接关系到生产效率和安全性。一个好的人机界面不仅要好看，还要信息展示有逻辑、操作流程规范，让人能轻易地注意到异常信息并做出正确的反应。

（一）流程图动态显示

流程图是人机界面的主要视图，它用图形符号模拟现场工艺管道及设备的连接情况，给静态的图像赋予生命。动态显示技术关键是把图形对象属性同控制器变量标签建立实时绑定。管道内流体流动效果并不是简单的动画循环，而是受到泵的运行状态反馈和阀门开位信号控制：只有当泵处于工作状态并且出口阀门打开时，管道颜色才会从灰色变成蓝色并叠加流动光条动画，直观地告诉操作员介质正在输送中。这样逻辑关联的动态效果，可以使操作员立即核对控制逻辑的执行情况，防止由于误判设备状态而发生事故。

为了提高视觉识别效率，现代界面设计不再采用过去那种高饱和度、五彩缤纷的混乱风格，而用上以灰色调为主的暗舱设计理念。正常运行时背景和设备都是低对比度的灰或冷色，只有设备出现故障、参数超限或者处于非自动状态时才采用高亮度的红、黄、橙来警告。而“异常带动显示”的办法就是利用人眼对色彩变化的敏感性，使操作员的注意力始终集中于待处理的问题上。对电机、风机

等旋转设备来说，矢量图形技术可以模拟出平滑的转动动画，转速快慢可以直接与变频器频率反馈值一一对应。

（二）关键参数的实时监控面板

在复杂的工业系统中，如果将数百上千个参数全部展开显示，会造成信息超载。因此建立分层次的关键参数监控面板就显得十分必要。主监控画面一般只保留最重要的关键绩效指标和安全参数，反应釜温度、总管压力等，并使用仪表盘、棒图、数字读数相结合的组合控件形式。仪表盘背景刻度线上会动态标出正常工作区、预警区、危险区，指针位置清楚地显示出当前数值在量程中所处的相对位置，使操作员无需查看具体的数字就能判断出系统状态的好坏。

针对不同工艺段的特性，监控面板的布局策略各有侧重：

- 1. 温控系统，面板上嵌入一个微型实时趋势图，显示上一小时温度变化曲线。这就让操作员知道温度是上升、下降还是稳定，可以预估控制效果，避免超调。
- 2. 复杂设备：对于多参数耦合的复杂设备，如离心式压缩机，监控面板可以采用雷达图或者多轴坐标系，把振动、轴温、位移等参数综合在一个几何图形里。所有参数正常时图形为规则形状，一旦参数出现异常，图形轮廓就会发生畸变。该种模式识别的方法大大提高了故障诊断的直观性。

人机界面常见显示策略与应用场景

显示策略	关键特性	优点	适用场景
暗舱设计	低对比度背景，异常高亮	减少视觉疲劳，快速识别异常	长期监控，高可靠性要求
动态流程图	图形实时绑定控制变量	直观反映工艺状态和逻辑执行	过程型生产，复杂工艺流程
仪表盘 / 棒图	模拟量程，指示当前位置	快速判断参数状态，无需精确读数	关键参数，运行状态判断
实时趋势图	显示历史变化曲线	预判变化趋势，评估控制效果	具有时间滞后特性的参数，如温度
雷达图 / 多轴图	综合显示多参数	直观识别多参数耦合异常	复杂设备(如大型机组)，故障诊断

从上表可以看出，不同的人机界面显示策略各具特点，旨在优化操作员的认知体验和决策效率。

（三）报警记录与操作日志

报警系统是保障工业生产安全的最后一道防线，设计的核心就是准确、可管

理。控制器内报警逻辑不只是简单的阈值比较，它还有滞后回差以及延时滤波。当参数在阈值附近小动的时候，回差设置能阻止报警信号一明一灭地闪动，不让操作人员产生“狼来了”的心理疲惫。报警等级分为紧急、重要、一般和提示四级，各级别发出的报警信号以及确认方式也不同。紧急报警一般要操作员二次确认，强制跳转到故障画面，确保险情及时处理。报警记录除了有触发时间和恢复时间之外，还会有一些报警发生时的参数快照记录，可以为后面故障的复盘工作提供一定的数据支持。

操作日志是生产管理的“黑匣子”，记录所有的人为干预操作。对于制药或者食品加工这些合规性要求比较高的行业来说，操作日志系统必须要达到相关法规对于数据完整性所提出的要求。每一个参数修改、模式转换或者设备启动停用都会被系统自动记录，并且记录操作人登录账号、时间、操作之前后数值。记录保存在不能被篡改的加密数据库里，并可以按时间段、操作员或者事件类型进行查询。完善的日志系统有利于追溯生产事故责任，从分析操作员的操作习惯出发来改进控制逻辑与作业流程，进而提高系统运行水平。

第五节 石油化工行业应用

石油化工行业是现代工业的基石，其生产过程具有高温、高压、易燃、易爆和工艺流程连续性强的特点，因此对自动化控制系统的可靠性、稳定性、安全性有极高的要求。随着工业化与信息化的逐步深入，可编程逻辑控制器 PLC 在石化行业的应用也从简单的开关控制向复杂过程控制、复杂的算法实现甚至全厂的安全联锁保护等发展，它已经成为保证装置长时间连续稳定运行的技术支撑。

一、典型化工单元控制

化工生产过程是由许多基本单元操作组成的，每一个单元的控制效果都直接关系到最终产品的质量、收率。现代控制方案依靠高性能处理器强大的运算能力，把先进的控制策略深深地植入到底层控制器中，从而对精馏、反应、公用工程、储运等重要环节进行精确的控制，彻底改变了以前依靠人工经验操作的模式。

（一）精馏塔的控制方案

精馏塔是石油化工分离过程中最重要的设备，其控制目标一般是保证塔顶或

者塔底产品的纯度，同时考虑能耗最小。由于精馏过程本身存在大滞后、强耦合、非线性等特性，传统的单回路反馈控制很难达到高纯度分离的目的。控制器通过模拟量输入模块采集塔顶温度、塔釜温度、进料流量、回流流量、塔内压力等参数，经滤波处理后参加运算。进料组分波动属于主要的干扰源，一般采取前馈控制的方式，依据进料流量波动提前调整蒸汽量或者回流量，力求在干扰影响产品质量之前就将其消除。

为克服温度控制的大滞后，一般采用串级控制方案。一般以灵敏板温度作为被控变量，回流量或再沸器蒸汽流量作为副被控变量，构成温度 - 流量串级控制回路。主控制器（温度控制器）的输出作为副控制器（流量控制器）的给定值，副回路可以迅速消除阀门非线性和管道压力波动所引起的干扰，使系统具有快速响应和很好的抗干扰能力。多组分分离或者高纯度要求的精馏塔中，还会加入解耦控制算法，消除塔顶和塔釜控制回路之间的相互影响，保证调整塔顶产品质量的时候，不会引起塔釜工况的剧烈波动。

在大型乙烯裂解或者芳烃分离装置上，基于模型的先进控制技术已经在控制器层面上得到广泛的应用。系统用控制器内置的精馏塔动态数学模型，可以预估未来一段时间内过程变量的轨迹，用滚动优化的方法来得到最佳的控制动作序列。该种方式能保证产品质量的同时，最大限度的减小回流比和加热蒸汽的消耗，达到最大的经济效益。技术人员在实际操作中需要对控制器做复杂的参数辨识和整定，才能使模型和实际对象高度吻合。

（二）反应釜的温度与压力控制

化学反应过程，尤其是聚合反应、加氢反应等，往往伴随着剧烈的热效应，温度控制的好坏直接影响反应转化率及催化剂的活性寿命，甚至关系到装置的安全。反应釜温度控制对象具有时变性大、传热系数随反应进程而变、放热速率非线性增加等特点。间歇式反应釜的控制逻辑，必须按照工艺配方来进行升温、恒温、降温等各个阶段的控制。升温阶段控制器全开加热阀，缩短辅助时间；接近设定值时自动切换到 PID 调节模式，防止超调；恒温反应阶段利用分程控制技术，一个控制器输出协调加热阀和冷却阀动作；50% ~ 100% 控制加热蒸汽，0% ~ 50% 控制冷却水，在分界点设置死区，防止冷热介质频繁切换浪费能源。

对连续流动搅拌釜反应器来说，压力控制也十分重要。釜内压力的波动会使得反应体系气液平衡发生改变，进而影响反应速率。控制系统一般用调节气相排

放阀或进料阀来保持压力稳定。高压加氢等危险工艺的控制逻辑里要设置完善的超限报警和联锁机制。一旦温度或者压力超过了高高限的设定值，程序就会立即执行紧急冷却水注入或阻聚剂加入的逻辑，并且同时关闭进料和加热源，有效地防止由于飞温现象造成的反应失控。

1. 自适应模糊 PID 控制策略的应用，由于反应过程中的热特性是不确定的，所以在控制器中采用了模糊推理。它会按照实时的温度误差以及温度变化率去自动调节比例、积分、微分参数。当误差较大的时候，增大比例系数加快响应；误差趋近于零的时候，增大积分作用消除静差。智能算法使反应釜在任何反应阶段、任何负荷下都具有很好的控温精度，不会出现温度剧烈波动的现象。

2. 夹套与内盘管的协调控制：大型反应釜一般都会装有夹套和内盘管换热系统。控制逻辑要按所要求的换热量大小，合理地分配两种换热介质的流量。当反应初期放热量较少时，只使用夹套冷却；当反应进入剧烈期后放热量突然增大时，系统会立即打开内盘管冷却回路，利用双管散热通道快速移除反应热，从而保证系统始终处于受控状态。

（三）锅炉燃烧系统的优化控制

工业锅炉为石化装置提供动力蒸汽和工艺热源，燃烧系统控制品质的好坏直接决定了能源利用效率以及排放指标。燃烧控制的主要任务就是维持蒸汽压力的稳定，保证燃料充分燃烧。为了达到上述目的，控制系统一般会使用“双交叉限幅”的方式对燃料量和空气量的比值进行调节。该策略的核心逻辑是：增加负荷的时候先增大空气量再增大燃料量；减少负荷的时候先减小燃料量再减小空气量。经过这么严密的逻辑闭锁，不管处于何种工况，炉膛内始终处于富氧状态，不会出现因缺氧燃烧导致的冒黑烟、炉膛熄火爆炸等现象。

汽包水位控制是锅炉系统中比较难控制的一个环节，主要原因是存在假水位现象。当蒸汽负荷突然增大时，汽包压力降低，汽水混合物体积增大，水位在短时间内出现虚假上升。如果此时控制器判断失误而减少给水，就会发生干锅事故。因此控制器采用三冲量控制，即汽包水位、蒸汽流量、给水流量三个信号。蒸汽流量作为前馈信号可以及时反映负荷的变化，给水流量作为副回路的反馈信号可以迅速消除给水管道的压力的波动。三个因素结合起来就可以使控制系统能够准确识别出虚假的水位，进而使全工况下达到液位的稳定调节。

为了满足环保排放标准越来越高的要求，燃烧优化控制中又加入了烟气含氧

量校正回路。氧化锆分析仪对烟道废气中氧含量进行实时监测，把信号传到控制器。控制器按照负荷曲线算出最合适的空燃比，掺混氧含量偏差做小修正。当氧含量高的时候，可以减少送风量，从而减小排烟热损失；当氧含量低的时候，应当增大送风量，以减小未完全燃烧损失。锅炉的热效率得到提升并削减了氮氧化物、一氧化碳的排放浓度，这在很大程度上符合绿色化工的生产指标。

二、安全仪表系统 SIS 应用

由于石油化工装置大型化、工艺复杂化程度越来越高，单靠基本过程控制系统已经不能满足对极端风险的防护需要。安全仪表系统是装置安全运行的最后一道防线，它在常规控制系统之外单独运行，专门用于当工艺参数越限或者设备故障等危险工况出现时，自动执行事先设定的安全功能，把生产装置引入安全状态。高可靠，高可用，故障安全，为石油化学工业生产提供基础保障。

（一）SIS 与基本过程控制 BPCS 的关系

在工业自动化架构设计时必须遵守“独立性原则”，即把安全仪表系统 SIS 和基本过程控制 BPCS 在物理上以及逻辑上完全区分开来。BPCS 主要是对连续生产过程进行调节，追求控制的平稳与经济，处于动态调节过程之中；SIS 主要是对潜在的危险状态进行监测，必要时采取断然措施；它大部分时间处于静态监测状态，一旦动作，就必须具有绝对的快速性与可靠性。如果两者共用传感器、逻辑运算器或者执行机构，当公共部分发生故障的时候，会使得控制和保护功能同时失效，造成不可估量的严重后果。

虽然两者在硬件上必须是分开的，但是它们在信息层面上却是互相交换的。现代控制架构利用专用的安全通讯网关或者硬接线的方式，将 SIS 系统状态信息、报警数据以及诊断结果在 BPCS 的操作员站上进行映射。使操作人员能在一个人机界面上监视全厂的安全状态，不用频繁切换系统。但是数据交换是单向或者受限的，不允许 BPCS 向 SIS 写入任何会危及安全逻辑的指令。即便是在不得不修改参数的情况下，也要经过物理钥匙开关、特权密码以及工程师站专用软件的多次确认，以保证安全边界不能被打破。

从失效模式的角度看，BPCS 能够容忍一定程度的故障，一般采用故障保持或者故障报警的方式；而 SIS 系统的设计核心是故障安全，即当系统自身出现 CPU、模块、电源等部件故障，或者现场回路发生断线、短路等情况时，系统必

须自动输出导向安全侧的信号（一般是去激磁、关阀、停机等）。本质安全的设计思想渗透到硬件的选择和软件编程的每一个细节里，保证在最坏的情况下，装置仍然可以被置于安全可控的状态。

（二）紧急停车系统 ESD 的 PLC 实现

紧急停车系统 ESD 是安全仪表系统中的重要组成部分，专门用来处理反应失控、压缩机喘振、超压泄漏等重大工艺风险。ESD 系统中心控制器一般都采用多重冗余容错结构。如常用的方式有多种冗余投票表决方式，1oo2（一取二），2oo3（二取三）等。各类投票架构的详细对比如下表所示。

安全仪表系统常用投票架构对比表

架构	描述	安全性 (拒动风险)	可用性 (误停风险)	典型 SIL 等级
1oo1	单通道系统	低	中	SIL 0 / 1 (非安全)
1oo2	一取二（任一通道报警即动作）	低（易误停）	高	SIL 1 / 2
2oo2	二取二（两通道同时报警才动作）	高（不易误停）	低	SIL 2
2oo3	二取三（任意两通道报警即动作）	高	高	SIL 3

2003 架构系统中设三个独立的工作模块、三模块同时执行相同逻辑程序、采集信号的三个独立通道。只有在两个或以上处理器的运算结果都满足停车要求时，输出模块才会执行停车操作。该结构不但能避免单元件故障所造成的误停车（提高系统可用性），而且也能防止单元件故障所造成的拒动作（提高系统安全性）。

ESD 逻辑编程时用的功能块和常规 PLC 完全不同，采用的是标准化的功能块。这些功能块经过国际安全认证机构的严格测试，内部的算法不能被用户修改，只能做参数设置。逻辑设计主要是通过因果矩阵图来确定每一个触发条件也就是“因”所对应的执行动作也就是“果”。当裂解炉出口温度过高（因）的时候，逻辑上就会触发切断燃料气阀、打开放空阀、停止引风机等一系列动作（果）。程序中还必须有事顺序记录功能，可以以毫秒级分辨率记录事故发生前后所有的信号变化，给事故调查和原因分析提供无可辩驳的数据支持。

现场仪表和执行机构的回路诊断在 ESD 系统中是不能缺少的一个环节。智能输入输出模块带有一路在线检测的故障，能随时检测回路出现的断线、短路、接地等各种故障。对重要的切断阀，可以进行在线的部分行程试验。在不影响流体正常输送的前提下，让阀门小幅度地动一下（10%），来检验阀门是否卡死、

执行机构是否灵敏。如果测试失败，系统就会立刻发出维护报警，提示人员及时检修，避免“沉睡故障”积少成多，在真正紧急的时候保证安全阀能够万无一失地关闭。

1. 当任意一个通道发生故障时，系统可以降级为 1oo2 或者 2oo2 的方式运行，保证生产连续进行，这样既可以保证硬件故障时连续生产的可靠性，也可以保持相应的安全完整性等级。相比于单一的 1oo2 结构，这样可以有效地减少由于仪表误信号造成的非计划停机次数，从而大幅度提高工厂的经济效益。

2. 1oo2D 架构特点：带诊断功能的一取二架构，用内部完善的自诊断电路来检测通道故障并自动将其旁路，使系统切换到单通道工作模式。该结构在成本和可靠性间取得较好的平衡，一般用在 SIL2 或者部分 SIL3 安全回路里。

（三）火气系统 F&G 的联动逻辑

火气系统 F&G 是全厂安全监控网络，布置在装置区、罐区、控制室等处，随时掌握可燃气体泄漏、有毒气体扩散和初期火灾情况。ESD 系统主要针对的是工艺参数越限保护，而 F&G 系统主要针对的是环境灾害的监测和减灾。其核心逻辑控制器要处理来自火焰探测器、感烟探测器、感温探测器以及各种气体探头的开关量或者模拟量信号。由于火灾、气体泄漏有空间分布特性，F&G 系统的逻辑判断大多采用区域投票的方式，即同一区域内两个或者两个以上的探测器同时报警才会触发联动，从而最大程度上减少误报。

火气系统确认险情后就会立即执行复杂的联动控制逻辑。气体泄漏时，系统会自动启动排风扇进行强制通风以降低泄漏气体的浓度，关闭相关非防爆电气设备电源；对于火灾确认，系统将根据火灾位置自动打开对应雨淋阀组、泡沫发生器或惰性气体灭火系统，并联动消防泵起动，保证灭火介质连续供应。声光报警系统还会控制现场的警铃、闪灯，通过广播系统疏散人员。这些都是快速动作，稍有迟疑就会引起灾难蔓延。

F&G 系统的联动逻辑要和暖通空调 HVAC 系统相集成。当系统发现有毒气体泄漏的时候，必须立刻关闭控制室、机柜间等人员集中的地方新风入口，防止有毒气体侵入，保障操作人员和精密电子设备的安全。跨系统联动要求 F&G 控制器有强大的通讯能力以及灵活的逻辑扩展性，可以采用硬接线或者安全总线协议同全厂其它辅助系统无缝对接，构建起一张立体化的安全防护网。

第八章 PLC 与人工智能技术融合

随着工业 4.0 的概念逐渐深入人们的心里，传统的自动化技术也迎来了前所未有的变革。其中最明显的改变就是人工智能技术深入其中。可编程逻辑控制器，工业控制的“大脑”，正由原来刚性执行逻辑控制的装置，向着能感知、分析、判断的智能终端发展。本章将会详细探究 PLC 同人工智能技术融合的理论基础、应用场合以及所遇到的难题，还要展望两者相结合会怎样刷新工业生产未来的景象。

第一节 人工智能在工业自动化中的角色

人工智能技术在工业自动化领域出现以后，标志着制造业正处在由原来的“机器换人”向“认知智能”的转变过程中。人工智能不再只是独立于控制系统之外的旁观者，它逐渐渗透到底层控制逻辑中，成为提高生产效率、保证产品质量的重要因素。对人工智能在自动化系统中承担的具体角色有充分认识之后，我们就能够寻找到技术融合的切入点，从而创造出更高效、更灵活、更有韧性的智能制造体系。

一、AI 技术赋能方向

人工智能技术对工业自动化的赋能是全方位的、深层次的，它不仅改变了数据的处理方式，也改变了控制系统响应的方式。利用机器学习、深度学习、强化学习等新算法，传统的 PLC 控制系统冲破了原来的逻辑束缚，在应付复杂性、不确定性、非线性问题的时候体现出非凡的能力。赋能贯穿在感知、决策等所有的环节中。

（一）从“自动化”到“智能化”的跃迁

传统工业自动化是以自动化为核心，即机器严格按照预先设定好的规则和逻辑，准确、重复地完成某项任务。它在标准化、大批量生产中表现出色，但本质

上是确定性的机械执行。当生产环境发生微小的改变或者出现编程逻辑不能覆盖的异常的时候,传统的系统就会出现停止或者出错的情况。人工智能技术的注入,才使得系统可以实现从“自动化”到“智能化”的质的飞跃。智能化即系统不再是简单的照着指令办事,而是具有一定的认识能力,可以理解环境的变化并作出相应的调整。

PLC 控制系统智能化之后,就如同有了眼睛和大脑。集成计算机视觉以后,控制器对产品的外观瑕疵、位置移动乃至材料改变的情况,不再只是通过光电传感器的通断信号来判断。更深层次的智能化就是系统具有了预测能力,经过历史数据的训练,可以预知可能发生的故障或者生产瓶颈,在问题发生之前进行干预。从被动响应到主动预测,就是智能化最明显的一个表现。它使生产线具有了类似生物神经系统调节机能,可以按照实时反馈来调节自身的运行状态,实现真正的柔性制造。

这一个跃迁的过程不是一蹴而就的,而是算力下沉,算法优化的一个过程。从最初的依靠规则的专家系统到现在的数据驱动的深度学习神经网络,工业智能化的内涵越来越丰富。未来的 PLC 将不再仅仅是逻辑控制器,而是成为边缘智能计算节点,成为工业互联网的神经末梢,把物理世界实时数据转化为数字世界智能决策,实现物理空间和数字空间的融合和共同进化。

(二) AI 解决传统控制难以处理的问题

传统的 PID 控制理论对于线性、时不变的系统控制效果非常好,但是对于非线性严重、耦合强、大滞后的时间工业过程就无能为力了。以复杂的化工反应过程为例,温度、压力、流量等变量之间存在着复杂的相互影响,而且反应过程还受到催化剂活性、原料纯度等难以量化的因素的干扰,传统的数学建模变得非常困难。人工智能技术,尤其是神经网络、模糊控制,给解决这些“黑箱”、“灰箱”问题提供了新的思路。通过对大量的历史运行数据进行学习,可以得到非常复杂的非线性关系,从而可以精准控制复杂的过程。

视觉检测同样也是离散制造业里传统控制方法所不能解决的问题。传统的机器视觉要依靠人工设计的特征提取算法,在检测形态各异、背景复杂的缺陷时,很容易出现误报的情况。深度学习技术的使用从根本上改变了上面提到的情况。卷积神经网络可以自己从大量的样本里得到很多层抽象特征,对于一些细小的划痕、不规则的裂纹、复杂纹理下异物等人工智能的精度都会超过人的专家。PLC

同人工智能视觉系统无缝对接之后，可以实现对检测结果的实时剔除次品或者调整加工参数等操作，这是传统的逻辑编程所不能完成的。

声音与振动分析也成为人工智能发挥大本领的领域。经验丰富的资深技师可以通过听声音来判断设备是否有异常，但是这种经验不能用传统的算法来固定。使用人工智能对声纹进行识别，或者对振动频谱进行分析，就可以把那些不能被量化表达出来的知识转变成可以量化的数字模型。系统可以从电机微小的振动变化来判断轴承的早期磨损，也可以从切削声来判断刀具的磨损情况。这些依靠非结构化数据展开的分析处理，正是一大人工智能技术同传统逻辑控制的不同之处，也是补全了传统自动化在感知以及复杂决策上留下的空白之处。

（三）增强系统的自适应与自学习能力

工业现场环境是不断变化的，机械部件的磨损、原材料批号的变动、环境湿度的改变等都会对生产过程造成影响。传统的 PLC 程序一旦烧录，其参数、逻辑都是固定的，无法改变，只能依靠人工修改，效率低、完全依靠工程师的经验。加入人工智能技术后，控制系统就具有了很强的自适应、自学习能力，在运行过程中能不断地进化，自动适应新的工况。

1. 参数自整定与动态优化

深度强化学习算法使得控制器在与环境进行交互的时候，可以经过试错的学习来获取最优策略。伺服控制系统依靠 AI 算法可以即时响应负载惯量的变化，自动调节 PID 参数，从而达到抑制振动、提高响应的目的。自整定过程不需要人工参与，系统就像一个经验丰富的操作工，在设备运行过程中不断摸索出最佳的控制“手感”，始终工作在最优工作点上。

2. 工况漂移的自动补偿

随着时光的流逝，机械间隙、摩擦系数这些物理特性就有可能漂移。采用基于人工智能的补偿算法，对细微的变化进行快速检测，把补偿量直接加在控制指令上。精密数控加工时热变形会带来精度降低。人工智能模型可以学习温度场与热变形之间的对应关系，利用实时的温度数据不断修正刀架的运动轨迹，即使机器长时间连续运转，也能保持在微米级的误差范围之内，从而大大提高机器的稳定性以及可靠性。

3. 新任务的快速泛化

生产线处于柔性制造环境之中，经常要更换产品型号。传统的机器人示教编

程费时费力，但是具备自学习能力的 AI 机器人可以依靠模仿学习或者迁移学习，快速学会新产品抓取、装配的技能。只需要少量示范或者辅助引导，系统就可以把已有的技能迁移到新的任务中，大大缩短了换产调试的时间。由编程到学习的转变，使自动化系统的灵活性被完全释放出来。

二、AI 与 PLC 结合的挑战

尽管 AI 与 PLC 深度融合有着令人激动的前景，但是实际推进时两者间存在很多技术上的差异以及工程难题。PLC 来源于运行技术极端稳定、逻辑确定性的要求，AI 则是由于算力的发展和概率统计分析需求的增加而产生的。要把这两种基因不同的技术融合得天衣无缝，就要冲破计算架构、实时性保证、数据质量以及复合型人才储备这些难关。主要的挑战与融合的难点如下表所示：

挑战与融合难点概述表

主要挑战	PLC 固有特点	AI 技术需求
计算能力限制	逻辑运算、顺序控制、算力存储资源有限	大量矩阵 / 卷积 / 浮点运算、模型复杂庞大
实时性与确定性	毫秒 / 微秒级固定扫描周期、结果确定性	推理时间不确定、结果具概率性预测特点
数据质量与标注	原始数据多噪声 / 错误、异构性强、格式多样	大量高质量 / 平衡数据集、专业领域知识标注
人才复合性	熟练梯形图、电气 / 机械原理（OT 领域）	精通 Python、神经网络、数据调优（IT 领域）

接下来，我们将详细探讨这些挑战。

（一）PLC 的计算能力限制

传统的 PLC 硬件结构设计主要用来做逻辑运算和顺序控制，它的 CPU 一般采用微控制器或者 ASIC 芯片。该种结构在处理位操作、定时器、计数器以及简单的算术运算时速度非常快，适合周期性扫描工作模式。但是人工智能算法尤其是深度神经网络，会用到大量的矩阵乘法、卷积运算、浮点数运算，对计算资源需求呈爆炸性增长。普通 PLC 的算力、存储空间对于庞大的 AI 模型来说，无异于杯水车薪。

为了使人工智能算法在工业现场得以运行，目前一般需要外接高性能的边缘计算设备（工控机或者专用 AI 模块），利用以太网或者现场总线与 PLC 通信。

分离式架构虽然可以解决算力问题，但是也会造成通信延迟、系统复杂度增加、可靠性降低的风险。数据在 PLC 和 AI 单元之间来往传递，会占用大量带宽，很容易引发通信抖动，进而使控制不同步。虽然一些高端的 PLC 厂商尝试在控制器里面集成 AI 加速芯片，但是这样会极大的增加硬件的成本，而且目前的集成度也还不能支持大量的复杂模型进行运行。在有限的功耗以及体积的情况下，怎样给 PLC 赋予足够的并行计算能力，这是硬件层面上亟待解决的难题。

另一种办法就是模型轻量化部署，以此来克服算力不够的难题。将云端训练好的大模型进行剪枝、量化、蒸馏，使得模型在精度损失可控的前提下，将模型体积压缩到可以嵌入 PLC 或者智能模块中运行的程度，是目前的研究热点。但是需要很高的算法优化能力，并且针对不同的 PLC 硬件品牌还需要相应的模型转换工具才能实现，因此在一定程度上影响了 AI 算法在工业现场的通用性、可移植性。

（二）实时性与确定性要求

工业控制系统的重点是实时性、确定性。对高速运转的包装机或者精密的运动控制系统来说，PLC 必须在毫秒甚至微秒级的固定扫描周期内完成所有的逻辑运算，并且输出指令。任何一个超过周期的延迟都会导致设备停机、产品报废或者安全事故。但是人工智能算法的推理时间是不确定的。数据输入量、模型复杂度、处理器当前负载情况都会引起 AI 推理时间的波动。概率性的时间延迟同 PLC 严格的要求有很大区别。

人工智能介入闭环控制的时候，这种状况就特别明显。当人工智能模型推理时间偶有大于 PLC 控制周期的时候，PLC 会怎么选择？等待 AI 的结果还是用上一期的旧数据或者是切换到传统的控制逻辑呢？这就需要非常细致周密的系统设计以保证系统的稳定。为了保证系统的稳定性，不得不设计一套复杂的同步机制，或者将 AI 的应用限制在非实时或者准实时的监测、优化层次，而不敢轻易地将其应用到核心的运动控制环当中。

另外，人工智能模型本身具有黑盒性质并且有一定的错误率。深度学习模型的输出属于概率性质的预测，不是绝对意义上的逻辑判断。即使有 99.9% 的准确率，背后那 0.1% 的不确定性也会造成严重后果。工业安全不能接受这样的不确定性。如果 AI 视觉系统把安全光栅里的物体错判了，就会造成机械臂误伤操作人员。因此，怎样建立人工智能算法的安全验证机制，保证当 AI 失效或者误判

的时候,系统仍然能够回到安全的状态,这是融合过程中必须解决的可靠性问题。

(三) 数据质量与标注成本

人工智能算法的效果好坏在很大程度上取决于训练数据的质量和数量,这就是所谓的数据驱动。但是工业现场的数据环境比实验室要复杂得多,恶劣得多。PLC 采集到的数据一般会带有电磁干扰、噪声、传感器漂移等各种问题。未经清洗的原始数据里可能含有无效信息甚至是错误信息,若直接将此种数据用来训练模型的话,就一定会造成严重的偏差。所谓垃圾进,垃圾出,在工业 AI 中体现得最为充分。

1. 样本不平衡难题

工业生产中设备大部分时间处于正常工作状态,故障数据很少。对做故障诊断或者预测性维护的人工智能模型而言,这就成了一个巨大的难题。我们有海量的健康数据,但是患病的样本却很少。因为数据极度不平衡,所以训练出的模型一般都会倾向于认为设备正常,对真实故障视而不见。为了解决上述问题,一般采用数据增强、GAN 合成虚拟故障数据或者小样本学习的方法,但是无疑增大了算法开发的难度和成本。

2. 标注成本高昂

不同于互联网领域中图像分类识别猫和狗,工业数据的标注需要深厚的专业知识。一张 x 光探伤图片上一个很小的裂纹,或者一段振动波形中一个异常的频段,一般只有多年工作经验的老工程师才能识别标注。这就表示数据标注既费时又很昂贵。企业很难调动重要的专家去做枯燥的数据标注工作。缺少高质量的标注数据,人工智能模型就如无源之水,无法达到工业级应用所要求的精度。

3. 数据孤岛与标准缺失

很多工厂中不同的品牌 PLC、传感器、上位机用的协议不一样,数据格式也大相径庭。把各种异构数据汇聚并进行标准化,这是一道非常浩大的工程。数据孤岛造成 AI 无法得到全局视角下的信息,从而不能发挥自身的优化作用。缺少统一的工业数据元数据标准,造成跨设备、跨产线模型迁移十分困难,每次部署都需要做大量的数据适配工作。

第二节 机器学习算法与 PLC 集成

随着工业 4.0 观念加深,传统控制技术与现代数据科学相互融合,是自动化发展的一种必然趋势。可编程逻辑控制器不再是一个孤立的执行确定性逻辑的单元,经过集成先进的机器学习算法之后,它开始向具有自适应能力、可以进行预测性维护的智能终端转变,给制造业的柔性化生产提供强大的技术支持。

一、边缘侧机器学习

工业现场,实时性就是控制系统的生命线。把机器学习能力下放到边缘侧,就可以很好地解决数据传输延迟和带宽瓶颈的问题。边缘侧机器学习让 PLC 或者紧耦合的边缘设备可以像本地智能一样即时处理数据并做出决定。系统能够在毫秒级的时间范围内,在生产的过程中出现异常的时候做出反应,从而保证生产的连续性。在保证生产正常进行的同时,可以大大提高数据的安全性、隐私性。

(一) 轻量化机器学习模型部署

在资源有限的工业控制环境里,直接运行一个庞大的深度神经网络是不现实的,所以轻量化的模型的创建与部署就显得尤为重要。工程师一般将高性能计算机上训练出来的复杂的模型进行剪枝、量化、压缩,极大地减小了模型的参数量以及运算复杂度,从而使得模型可以部署在 PLC 有限的存储空间和运算能力上。轻量化后的模型一般会转换成结构化的文本语言或者 C 代码,然后封装成功能模块,嵌入到 PLC 用户程序中。

嵌入式部署需要控制器处理器具有浮点运算单元或者数学协处理器,保证矩阵运算以及激活函数的执行效率不会影响主控循环扫描周期。在实际中要准确计算出模型推理运算所消耗的 CPU 时间片,用任务调度策略将其分配到低优先级的后台任务中去,或者用时间切片方法把一次推理拆分为若干个扫描周期来依次执行,防止算法执行超时造成的看门狗复位以及控制任务频率波动。

为满足一些实时性的要求,也发展了硬件加速方案。部分高端 PLC 就有了专门设计来支持神经网络的单元或者是 FPGA 模块,可以实现大数据并行计算。这样就能够在资源有限,运算能力较差的嵌入式设备上实现支持向量机、随机森林等传统机器学习算法甚至简化版的卷积神经网络的运行。从而使得设备拥有了毫秒级的识别复杂信号模式的能力,完全打破了传统 PLC 只能做简单的布尔逻

辑和线性运算的局限。

（二）利用 PLC 进行简单的数据分类

使用 PLC 自身的算力完成基本的数据分类，是边缘智能最直接的体现，不需要额外的计算设备，分类算法直接嵌入到控制逻辑中。生产线传感器采集到的模拟信号一般都会混有噪声和干扰，传统的阈值判断法很难对非线性数据做出准确的判断。而用统计学的原理去分类的话，更能显示出数据真实的属性。在 PLC 内部，可以使用 K-Means 聚类或者简单的决策树算法逻辑，对产品或者过程状态进行实时归类。

1. 数据采集与预处理是分类的先决条件。PLC 用高速模拟量输入模块采集压力、温度、振动等物理量，采用滑动平均滤波或中值滤波算法去除高频噪声，把原始数据归一化成统一量纲，得到待分类的特征向量。

2. 特征提取完成后，PLC 内运行的分类算法就介入。对于计算资源比较少的控制器，一般采用事先计算好的决策树路径，通过一系列嵌套的比较指令快速判断数据属于哪一类；对于性能比较强的控制器，可以执行基于欧氏距离计算的最近邻分类算法，将实时的数据点与事先设置好的各个类别中心点进行比较。

3. 分类结果直接对应到 PLC 的输出映像区，然后驱动不同的执行机构工作。在分拣系统中，控制器根据分类结果控制气动推杆把不同规格的产品推到不同的料道；在设备运行状态分类结果的基础上，发出不同等级的报警信号，从而形成数据感知到物理执行的闭环控制。

PLC 内部数据分类流程示意图

环节	描述	实现方式举例	目的
数据采集	PLC 通过模拟量输入模块，实时获取压力、温度、振动等生产数据。	高速模拟量输入模块	获取原始生产状态数据
数据预处理	对原始数据进行滤波（去除噪声）、归一化（统一量纲），生成特征向量。	滑动平均滤波、中值滤波、Min-Max 归一化	提升数据质量，便于后续算法处理
特征提取	从预处理后的数据中识别和提取对分类有意义的特征。	基于阈值、统计量（均值、方差）或简单组合计算	简化数据表示，突出关键信息
分类算法执行	PLC 内部执行预设的分类逻辑，判定当前数据所属类别。	决策树逻辑（通过比较指令）、最近邻算法（通过欧氏距离计算）	实时识别产品 / 过程状态
结果输出与执行	分类结果映射到 PLC 输出，驱动执行机构进行相应操作，或发出警报。	控制气动推杆分拣、发出报警信号、调整生产参数	实现物理动作，完成智能控制闭环

从上表可以看出, PLC 内部数据分类是数据采集、预处理、特征提取、分类算法执行、结果输出、执行的全过程。

（三）基于规则的专家系统实现

专家系统属于人工智能的一个重要分支, 在 PLC 方面已有早期的研究成果, 并且取得了较好的效果。它把人类专家的经验转化成一系列逻辑规则, 使控制器可以处理模糊、不确定的问题。工业现场的很多复杂故障诊断、工艺调整都需要资深工程师的经验。虽然这些经验不能用精确的数学模型来表示, 但是可以用“如果 - 那么”形式的规则集来表示。把这些规则编入 PLC 程序就形成了实时专家系统, 可以无人干预地分析设备状态并给出操作建议。

基于 PLC 专家系统的核心就是建立知识库、设计推理机。知识库中存有大量生产规则和故障模式, 一般存放在 PLC 的大容量数据块或掉电保持寄存器里。推理机是梯形图或结构化文本编写的逻辑程序, 会周期性扫描输入信号, 并在知识库中进行模式匹配。当系统的运行状态符合某条或者多条规则的前提条件时, 推理机就会产生相应的结论或者动作。该机制对于复杂的机电系统故障检测特别有用。大型自动化生产线当中出现停机故障的时候, 专家系统凭借多传感器信号以及执行器回馈等信息, 可以迅速找到液压系统压力不够, 电气回路接触不良或者机械结构被卡住之类的具体问题, 进而直接在人机交互界面上给予维修指引。

相对于黑盒化的神经网络模型, 基于规则的专家系统具有很强的可解释性。现场维护人员可以清楚地知道 PLC 做每一个决策的逻辑依据, 这对于以安全为第一要务的工业控制系统来说非常重要。随着生产工艺的改变, 工程师可以随时把新的规则加到 PLC 的知识库里面, 让系统拥有不断进步的能力。在某些流程工业中, 专家系统被用来改善配方控制, 根据原材料性质的变化自动调节反应温度和搅拌速度, 从而保证产品质量的稳定。这种调节方式很大程度上取代了人工的巡检和手工的操作。

二、云端训练与边缘推理

伴随着工业物联网技术不断成熟, 现场数据汇聚到云端进行挖掘, 成为提高制造智能水平的重要手段。云端具有无限的计算能力和存储能力, 可以承载边缘侧不能完成的规模较大的模型训练任务。训练好的智能模型返回给边缘执行, 形成了一个从数据到模型再到执行的闭环, 从而改变了工业控制系统迭代进化的

方式。

（一）PLC 数据上传至云平台

实现云边协同的第一步就是打通 PLC 和云平台之间的数据通道，需要控制系统有强大的网络通信能力和协议转换功能。现代 PLC 一般都带有内置的以太网接口，能直接接入工厂信息化网络。为了适应云平台的数据接口标准，PLC 要把内部寄存器中布尔量、整数、浮点数等原始数据包装成 JSON 或者 XML 等通用格式的数据包。在传输协议的选择上，由于轻量级 MQTT 协议带宽开销低、可靠性高，所以经常使用。PLC 作为客户端连接到云端的 MQTT 代理服务器，按照设定好的主题结构，定时将设备状态、生产计数、工艺参数发布到服务器上。

数据上传的时候，一定要重视网络安全以及数据完整的问题。生产数据在开放网络中传输存在着被窃听、被篡改的隐患，所以 PLC 同云端形成联系的时候，常常采用 TLS/SSL 加密通道，并且凭借数字证书来彼此认证。针对工业现场网络的不稳定性，PLC 内部应该具有断网续传功能，并且本地应该开辟环形缓冲区。网络断开时，数据会存进缓冲区保存起来，在网络恢复之后，后台程序会自动按时间戳对积压的数据进行排序，然后批量上传到云端数据库之中。因此能够保证云端数据库历史数据的时间连贯性与连续性，为之后的大数据分析奠定准确的基础。

（二）在云端进行模型训练与优化

云平台汇聚起来自全国、各种设备产生的海量历史数据，给训练高精度深度学习模型给予了肥沃的土壤。云端数据科学家利用大数据分析工具对上传的原始数据进行清洗、去重、补全，剔除掉由于传感器故障或者传输错误所造成的异常值，得到高质量的训练数据集。依靠云计算集群强大的并行计算能力，可以快速执行复杂的神经网络算法，比如 LSTM 或者 CNN，挖掘出数据背后隐藏的时空联系和物理规律，这是单个 PLC 或者边缘设备无法实现的。

1. 模型训练是不断优化的过程。云端系统会根据目标函数（最小预测误差或者最大分类准确率）对神经网络的权重、偏置参数做连续调整。

2. 训练时系统会采用交叉验证、正则化等方法来防止模型过拟合，保证模型对没见过的工况也能有较好的泛化能力。

3. 用数字孪生技术对云端设备进行虚拟映射，在虚拟世界模拟各种极端工况以及故障情形，产生大量的合成数据。这些数据被用来辅助训练，很好地解决了

实际生产过程中不良样本稀少的问题。

经过反复训练和验证，云端最后会得到性能最好的机器学习模型。该模型可以精确地预测出设备的剩余使用寿命，也可以根据当前原材料的属性以及环境参数给出最佳的工艺配方。云端训练可以不断给模型提供新的知识，现场数据不断积累的同时，模型也定时进行重训练，把最新的生产案例、故障模式等加入到模型中。因此模型的智能水平随着时间不断提高，持续进化的特性就是工业人工智能发展的关键。

（三）将训练好的模型下发至 PLC 或边缘设备

云端训练完成的模型，只有下沉到生产一线才能产生实际的价值，这就是模型的部署与下发。由于云端模型的规模大、格式多种多样，在发布之前需完成格式转换、编译适配等工作，得到可以用于特定品牌的 PLC 或者边缘网关的可直接执行的文件或者配置文件。模型下发的过程类似于手机系统的在线更新。云平台借助远程管理通道给目的设备发出更新指令，PLC 接收到指令以后就进入更新模式，把最新的模型文件下载下来，然后对文件的完整性和签名执行校验，保证文件没有被恶意改动。

为了保证生产过程的连续性，模型下发技术要支持无缝切换或者热更新功能。因此在更新模型的时候，PLC 的基本控制逻辑不能断开，设备仍然可以运行。常用的做法就是预留两个模型运行区，即“当前区”和“备用区”。新的模型下载到备用区，完成初始化验证后，立刻把控制指针指向备用区，旧模型就退出了。对于不能实现热更新的老旧型号设备，可以在生产间隙或者计划停机时进行更新。

模型下发不只是文件传输，它还带有版本管理以及灰度发布策略。在向全部设备更换新模型之前，一般会先用一小批先导设备进行试运行，仔细观察新模型的工作情况。系统发现异常的时候可以马上回滚到上一次稳定的版本，避免出现大范围的生产事故。如此细密的管理过程，使工业控制策略的智能化改造既安全又可靠，工厂可以像管理软件一样来管理工业控制策略。

第三节 智能诊断与预测性维护

工业物联网技术迅猛发展，可编程逻辑控制器不但是逻辑运算的控制核心，也是连接物理世界和数字世界的节点。PLC 系统由于具有集成的先进数据采集功能以及边缘计算算法，正在逐步具备较强的自我感知和分析能力。本节主要研究基于 PLC 平台的设备智能故障诊断与预测性维护技术，利用多角度的信号分析和模型建立来提高生产的可靠性、智能化程度，为工业自动化持续发展打下良好的基础。

一、智能故障诊断

传统的故障诊断大多依靠事后报警或者简单的阈值判断，已经不能适应复杂的、变化的工业现场。现代智能故障诊断体系依靠高频数据采集和深度算法分析，希望从大量数据中找出隐藏的故障特征，从而达到对设备状态实施实时监控并作出准确判定的目的。

（一）基于振动、电流、温度的异常检测

工业现场里，机械设备的运转参数发生改变，直接体现出设备的状态。用高精度模拟量输入模块进行实时采样，可以实现电机、齿轮箱等关键部件振动频率、定子电流和表面温度毫秒级的数据采集。PLC 内部的快速傅里叶变换算法可以将时域信号转变为频域信号，从而得到某些频率分量，以此来判定是否出现轴承磨损，转子不平衡等状况。

电流信号的监测也十分重要，电机负载的细微变化一般都会在电流波形上有所反映。系统可以实时分析三相电流不平衡度、谐波畸变率、有效值等参数，很快就能发现绕组短路、断条、机械卡阻等早期故障的迹象。温度检测反应的是设备的热稳定度。PLC 用热电偶或者热电阻模块采集多点温度数据，构建设备的热分布模型，当温升速率异常或者局部过热时，就会立即启动预警系统。

融合处理多种信息来源可以明显提高检测的准确性。单个传感器的数据容易受到环境噪声的干扰而造成误报，但是振动、电流、温度数据之间相互关联的时候，虚警率就会大幅度下降。当振动幅值变大、电流出现异常波动、温度上升的时候，系统可以很准确地判断出设备的严重故障隐患，从而指导维修人员有目的的检查。利用多物理量融合来发现异常的方法，构成了智能诊断系统第一道防线。

就像表中基于物理参数的异常检测方法所表明的那样，采用多方面的数据相互印证之后，故障被发现的准确率和可靠程度得到了改善。

基于物理参数的异常检测方法表

物理参数	检测对象 / 故障迹象	PLC 关键技术 / 算法
振动	轴承磨损、转子不平衡、松动等	FFT 分析、频率分量识别
电流	绕组短路、断条、机械卡阻、过载	三相不平衡度、谐波畸变率、有效值实时分析
温度	局部过热、温升速率异常、绝缘老化	热分布模型、多点温度采集、温升趋势监测

（二）利用机器学习识别故障模式

传统的逻辑判断法很难处理非线性、强耦合的复杂故障模式，但是机器学习技术的引入使 PLC 系统具有了很强的模式识别能力。当前的高级 PLC 控制器大都能够支持高级语言的编程或者是内置有 AI 加速模块，使边缘侧轻量化机器学习模型的运行成为可能。通过采集设备在正常运转、轻微故障和严重故障等不同工作情况下所产生的大量数据，来创建包含许多特征的训练集。

支持向量机、随机森林、神经网络等算法已被广泛应用于故障模式的分类和识别。算法可以自动从大量的数据中选出能够区分各种故障的特征，如振动信号的峭度、偏度以及电流信号的频谱能量分布等等。训练好的模型可以封装成功能块下载到 PLC 中，对现场采集的数据进行推理运算。现场数据一进入模型，系统就能马上给出当前设备的运行状态概率分布，比如设备处于正常、磨损、松动等状态。

无监督学习算法对于探索未知故障有独特之处。由于工业现场故障样本很难获取，聚类算法可以依据数据分布情况，自动把偏离正常簇的异常点识别出来。该方法不需要事先标记故障样本，可以发现以前没有出现过的新故障模式。系统运行时间越长，经过不断的在线学习、模型迭代，识别准确率就会不断提高，最后达到对复杂的故障模式进行智能识别、判断的目的。

（三）故障根因分析与定位

判断故障模式只是诊断的第一步，找出故障的根本原因并且准确定位故障点才是解决问题的关键。PLC 系统经由时序数据以及逻辑状态的记载，可形成一条完整的事件追溯链。用序列事件记录功能来记录每一个传感器状态的变化、控制

指令的发出以及执行机构动作等全过程，可以获得详实的数据，为之后因果分析提供依据。

1. 逻辑关联分析法属于根因定位的常用方法之一。通过控制逻辑的反向推导可以找到引起故障的触发条件。如当某个执行机构动作超时或者不到位的时候，程序就会自动回到这个动作之前的条件，去查看液压站的压力、限位开关的状态、中间继电器的信号等等，从而来判断故障是由于机械部分卡阻，还是电气线路断路，或者是传感器出问题。

2. 基于因果图的分析模型更加关注系统各部分间互相影响的关系。利用构建设备之间拓扑关系及信号流向图的方式呈现故障传播的途径。在复杂的流水线系统中，下游设备停机一般是由上游供料不足或者中游传输堵塞造成的。利用拓扑分析可以迅速排除次生报警，找到导致连锁反应的源头节点。

间歇性故障诊断的关键就是分析环境因素和工况参数的相关性。一些电气故障只有在一定的电压波动或者环境温度下才会出现。PLC 系统会不断记录电网品质、环境温湿度以及设备负载率等参数，并用统计分析的方法来找出故障发生时的共同特点，找到隐藏在偶然现象之下本质。这样的深度根因分析能力，大大缩减了排故所用的时间，明显改善了维修的效率。

（四）诊断结果的可视化展示

智能诊断最终的目的就是为决策者提供支持，直观清晰的可视化界面就是机器智能和人类智慧之间的桥梁。通过工业人机界面或者 SCADA 系统，PLC 可以把底层的数据以及分析结果转化为易于理解的图形化信息。诊断结果可视化方式一览表，用不同的可视化技术把机器智能和人的智慧紧密联系起来。

诊断结果可视化方式一览表

可视化方式	核心功能 / 特点	优势
设备状态总览大屏	颜色编码实时显示设备健康状况，概览全厂设备运行状态	直观快速掌握宏观状态，便于管理层决策
详细诊断报告页面	展示实时振动波形、温度趋势、参数雷达图等详细数据	深入了解具体故障详情，辅助专业人员分析
三维数字孪生	与 PLC 实时数据联动，同步复现实体设备动作与故障点	直观定位故障部件，提供型号、安装位置等辅助信息
增强现实	叠加故障代码、内部结构、动态拆卸动画于实物设备	降低维修技术门槛，提升现场操作效率与准确性

设备状态总览大屏属于可视化展示的核心部分，用颜色编码的方法对全厂设备的健康状况进行实时呈现。其中绿色表示正常、黄色表示预警、红色表示故障，维修人员可以立刻知道设备的状况。点击具体的设备图标就可以弹出详细诊断报告页面，显示实时振动波形、温度趋势曲线和重要参数雷达图。

三维数字孪生技术的应用使得可视化的水平上升到了一个新的高度。通过和 PLC 的数据联动，屏幕上的三维模型可以和实体设备的动作姿态同步。一旦检测出某个轴承出现故障，模型中对应的轴承部件就会高亮闪烁，同时弹出该部件的型号、安装位置以及推荐维修工具列表。增强了现实 AR，可视化到现场，维修人员戴上 AR 眼镜对准设备扫描，眼前就会浮现故障代码、内部结构剖视图、动态拆卸动画等。大大降低了维修作业的技术门槛。

二、预测性维护策略

预测性维护是工业维护理念的一次革命，它不再像过去那样等到设备坏了才去修理，而是通过科学的预测手段，在故障发生之前就主动出击、提前干预。依靠 PLC 系统准确的数据和强大的计算能力，可以充分发挥设备的效能，把非计划停机的风险降到最低。

（一）设备健康状态的评估模型

建立科学的设备健康状态评价模型是做预测性维护的前提和核心。该模型用量化指标来反映设备当前的性能水平和劣化程度。PLC 系统运行的时候会实时计算并更新设备的健康指数。健康指数一般用 0 到 100 分来表示，其中 100 分代表设备为全新或者最佳状态，0 分代表设备已经失效。

健康指数的计算就是多维参数加权融合。它把实时的振动、温度、电流等物理量同设备的累计运行时间、启停次数、负载率历史分布等工况数据融合起来。算法按照各个参数对设备寿命影响的权重，使用加权平均或者模糊逻辑推理的方式得出综合评分。拿一台伺服压机来说，它的健康模型就会特别关注压力曲线的重复性精度，保压时液压油温升速率，伺服电机的转矩输出稳定性这些方面。

动态基线的建立，决定着模型准确性的好坏。设备处于磨合期、稳定期、损耗期时的性能表现不同，使用统一阈值标准对设备实行全生命周期评价是不切实际的。智能评估模型可以依照设备过去的运行数据来完成自我学习，修正基准值，这样就能消除环境温度的波动，原材料批次的不同这些外部因素对评价结果产生

的干扰。当实时计算出的健康指数出现下降趋势时，即使没有达到传统报警值，系统也会判定为亚健康状态并向管理人员发出预警。

（二）关键部件的剩余寿命预测

剩余寿命预测是预测性维护中最难也最值得的部分。其目的就是回答设备还能正常工作多久的问题，给备件采购和维护排程提供准确的时间窗口。基于物理失效机理的模型以及基于数据驱动的模型，成为剩余寿命预测的两种主要方式。PLC 应用中数据驱动法由于通用性而被广泛使用。

时间序列预测算法在剩余寿命的预测上起着非常重要的作用。PLC 系统用循环缓冲区存历史的关键部件性能指标变化曲线，然后用 ARIMA 模型或者 LSTM 网络来外推未来退化趋势。滚珠丝杠系统会主要追踪定位误差的发展趋势和摩擦力矩变化的过程，根据当前的磨损率来预测各项指标达到失效临界点还需剩余的时间。

预测结果一般以概率区间的形式给出，而不是某个时间点的结果。主要考虑到未来工况的不确定性。系统根据乐观、中性、悲观三种情况下的未来生产计划和负荷给出相应的预期剩余寿命。如果将来生产任务繁重、负载率高，那么预测出的剩余寿命就会自动变低。这种动态调整机制保证了预测结果同实际生产场景高度契合，使维护人员可以对关键部件的更换时间做出最合理的预估。

（三）基于预测结果制定维护计划

准确的预测只有转化为具体的维护计划，才能产生经济效益。PLC 系统同制造执行系统或者企业资源计划系统实现深度融合之后，就形成了从状态预估到维护安排的自动化闭环。当底层 PLC 计算出某台重要电机剩余寿命小于 500 小时的时候，该信息就会立即上传到 MES 系统。

智能调度算法会按照生产订单优先级、设备当前的健康状态、备件库存状况来寻找适合的维护时间窗口。系统一般安排在生产空闲时间、设备更换调整之后或者休息节假日等非生产时间段进行维修维护，防止影响正常的生产。如果预测结果表明设备存在很高的即时失效风险，系统就会启动紧急预案，把紧急订单转给其他正常的设备去生产，并立刻生成最高优先级的维修工单。

备件管理水平的提高，在制定维修计划时也要考虑进去。按照剩余寿命预测结果进行备件的准时采购。无需事先准备大量的昂贵关键件来应付突发情况，只需要按预测的时间提前向供应商发出采购请求，保证维修前一天备件准时到达。

既保证维修工作的正常开展，又大大缩减了企业库存资金占用。

第四节 自适应控制与优化决策

随着工业现场复杂度指数级增长，传统固定逻辑控制已经不能应对非线性、时变性以及强耦合的被控对象了。可编程逻辑控制器在工业自动化系统中扮演着重要角色，正将高级算法以及数据决策能力融合在一起，不再只是简单的执行机构，而是具备自适应能力并且能够作出优化决策的智能终端。本节将对最新的 PLC 在自适应控制策略以及生产全过程的优化方面做详细的论述。

一、自适应 PID 控制

在现代工业控制中，虽然常规的 PID 控制算法被广泛应用，但是当出现参数摄动或者环境剧烈变化的时候，其控制效果并不理想。用自适应理论来改进 PLC 控制回路，使它可以感知到对象特性变化后自动调节控制律，从而提高控制品质。不单需要 PLC 具有很强的运算能力，而且还要有先进的算法封装技术作为支撑。

（一）模型参考自适应系统

模型参考自适应系统是解决复杂工业过程控制难题的途径。其主要思想是同时设置一个理想的动态特性参考模型和一个被控对象。PLC 在运行的时候实时采集被控对象的输入输出数据，并且将它和参考模型的输出进行比较。参考模型表示系统所期望达到的最好性能指标，比如某个超调量、调节时间、稳态误差等。实际输出和模型输出之间出现的偏差，就成为自适应机构调整控制律的动力。

自适应机构的设计通常基于李雅普诺夫稳定性理论或波波夫超稳定性理论，以确保闭环系统的全局稳定性。在 PLC 内部实现时，就是大量的矩阵运算和浮点数运算。高性能 PLC 用特定的功能块将这些复杂的数学推导过程封装起来，控制工程师不需要深入了解底层数学公式，只需要配置参考模型的参数就可以达到控制目的。自适应律按照广义误差和它的变化率，随时算出控制器增益系数，并且修正，这个过程在 PLC 扫描周期不断重复。

在这种机制下，被控对象的物理参数（例如由于磨损而导致的摩擦系数变化、由于原料改变引起的热容变化等）即使发生较大漂移，PLC 也可以不断地修正参数，使实际系统的输出轨迹一直贴近参考模型的输出轨迹。模型参考自适应系统

有很强的随动性，在冶金轧机、造纸张力控制等对动态性能要求很高的场合中，起着不可替代的作用。这时控制系统不再只是静态的参数集合，而是一个具备动态学习、自我修正功能的有机整体。

（二）自整定 PID 的智能化升级

早期的 PID 自整定技术大多采用继电器反馈法或者简单的阶跃响应测试。这些方法简单易行，但是通常需要将系统置于临界振荡状态，容易对机械设备造成物理冲击，而且整定结果往往比较保守，很难在快速性、稳定性之间找到平衡点。新一代智能化自整定技术完全抛弃了破坏性测试的方法，转而采用基于频域辨识或者模式识别的非参数化方法。闭环运行时，PLC 可以对背景噪声的各种统计特性进行分析，也可以在设定值发生微小改变的时候，捕捉到系统的动态响应特性。

1. 频域分析法。利用小波变换或者快速傅里叶变换算法，PLC 可以在频域中准确地获取被控对象的幅频和相频特性，从而得到更加精确的受控对象数学模型。辨识过程一般以后台低优先级任务的形式进行，不会影响到主控制逻辑的实时性。

2. 智能寻优：根据辨识出的模型，智能算法会智能地求出最优的比例、积分、微分系数。该计算过程已经不单用齐格勒尼科尔斯公式来计算，而是考虑了鲁棒性指标和时域性能指标的加权函数。

智能化升级主要是表现在智能地判定整定触发时机的方面。传统的自整定程序需要人工来启动，而升级之后的系统可以实时对控制回路的性能指标进行监测。当发现控制品质下降（振荡加剧或响应变慢），在排除外部干扰因素之后，系统会提示操作员或者在得到授权之后自动启动微扰动辨识过程。全生命周期的参数管理机制，大大减少了运维人员依靠经验来操作的情况，使控制回路一直工作在最佳区间。

（三）基于 AI 的 PID 参数在线优化

将人工智能算法嵌入到 PLC 的控制回路中属于自动化技术发展的主要方向之一。传统的查表法或者增益调度法虽然在一定程度上可以解决非线性问题，但是面对高维度的工况变化时仍然无能为力。利用神经网络或者模糊逻辑的 AI-PID 控制器，用非线性映射网络来体现 PID 参数和系统状态之间复杂的内在关系。PLC 在这里既是控制运算单元，又是推理引擎，它根据当前误差、误差变化率以及外部环境传感器数据，实时推出此时最合适的 PID 参数组合。

在线优化一般用“离线训练，在线推理”的方式进行。利用历史生产的数据，

在云端或者边缘计算服务器上对深度神经网络模型进行训练，让模型学会各种工况的参数调节规律。训练好的模型经轻量化处理以后下发到 PLC 运行环境中。在一个控制周期内神经网络前向运算根据实时采集的状态量产生比例、积分和微分的修正值。这种调节方式泛化能力较强，可以平滑过渡各个操作点，很好地消除了传统多套参数切换时的扰动。

对计算资源较少的中型 PLC 来说，模糊控制规则表成了代替神经网络的轻量化 AI 方案。工程师依据专家经验来制订一系列模糊规则，比如“当误差很大并且误差变化率为正的时候，大幅度增加比例增益，取消积分作用”。PLC 内部模糊推理机把精确的数值量模糊化，匹配规则库，经过去模糊化处理得出确定的 PID 参数。这种方法大大提高了系统抵抗不确定性干扰的能力，控制过程既有像人一样的灵活，又有像人一样的适应性。

二、生产过程优化

生产过程的优化已经不再局限于单个设备的控制精度，而是从整个生产线甚至车间这样宏观的系统角度来考虑。PLC 是底层数据的汇聚点和执行终端，由于它和上层系统交互的深度，已经成为实现能效最优、质量最佳、成本最低等多维优化的中心。

生产过程常见优化目标与策略表

优化目标	优化策略	涉及技术	PLC 角色
能耗优化	实时能耗模型建立、峰谷电价调度、设备组合优化	数据分析、能耗建模、预测算法	数据采集、模型运行、策略执行
工艺参数寻优	强化学习、数字孪生预训练、在线微调	强化学习算法（DDPG、PPO）、数字孪生	环境交互、参数调节、策略学习
多目标协同	帕累托最优解探索、动态权重调整	遗传算法、粒子群算法、OEE/KPI 计算	数据整合、优化算法运行、约束管理
生产调度	实时工况感知、动态重组、物料准时配送	图神经网络、强化学习、预测分析	状态上传、指令接收、柔性执行

从上表中可以看出，PLC 在生产过程的优化中扮演着多重关键角色。

（一）能耗优化模型的建立

工业生产能耗管理由粗放统计转向细密控制，形成高精确度的能耗改良模型成为这种改变的基础。由于 PLC 系统有较高的采样频率，可以对重要的耗能设

备的电压、电流、功率因数和有关的工艺参数（流量、压力、温度、转速）进行全天候记录。大量的数据形成能耗建模的样本库。经过清洗并关联数据之后，就可以得到设备运行效率同工艺负载之间的数学映射关系，也就是能耗特性曲线。

能耗模型不只有功率和负载之间静态的关系，还要把能量损耗的过程的机理加进去。注塑机上可以量化解锁模、注射、保压、冷却等各个阶段的能量消耗以及这些能量消耗和射胶速度、保压压力等工艺参数间的关系。在压缩空气系统中，模型就会考虑多台空压机组运行的情况，在不同的总用气量需求下，研究变频与工频设备最佳的启停组合。这些模型一般以多项式拟合或者支持向量回归的形式存储在 PLC 或者边缘网关里。

根据能耗模型可以实时计算出当前的能效指标（单位产品能耗），并预测未来能耗走向。当实际耗能与最优模型曲线不一致的时候，系统可以分析是由于设备老化造成的能耗降低，还是由于工艺参数配置不当造成能耗增加。依靠模型的实时监测，给后面优化控制提供准确的量化依据，使节能不再是事后的弥补，而是生产过程中的实时约束条件。

在此基础上 PLC 还可以加入峰谷电价策略模型。系统依据电网的实时电价时间段，根据生产计划留有的缓冲余量来自我安排高能耗设备的工作时段。将冷冻水的制备、原料的研磨等可以中断、可以缓存的工序，智能调度到电价较低的时段进行。这种优化不需要人工干预，全部由 PLC 根据事先设定好的成本函数和能耗模型自动决策，从而实现产量不变的情况下，大幅降低经营成本的目的。

（二）基于强化学习的工艺参数寻优

传统的工艺参数设定大多依靠资深工程师的经验试错，效率低，不能挖掘出设备的极限潜能。以强化学习为工具的工艺参数寻优技术，把 PLC 控制下的生产过程看成是与智能体交互的“环境”。PLC 或者边缘计算节点充当智能体，不断尝试微调工艺参数（动作），依据生产结果（状态）得到奖励或者惩罚（回报），进而自主学习出最佳的控制策略。

1. 状态空间是温度、压力、原料属性等实时数据；动作空间是 PLC 可以调节的各种设定值；奖励函数是产品质量检测数据、生产节拍、能耗数据等指标的加权。

2. 智能体使用 DDPG 或者 PPO 等先进算法，在虚拟的数字孪生环境中进行预训练，获得足够的探索经验之后，再迁移到真实的生产线上，在安全边界内进

行在线微调。

该方法的革命性在于它的不断进化的功能。生产过程中不断产生新的样本数据被强化学习模型保存下来，可以发现设备老化细微的变化、原料批次的波动等对工艺的影响，然后自动调节参数来消除这些影响。举个例子，在半导体晶圆刻蚀工艺里，强化学习算法依照刻蚀速率的实时监测数据，动态调整气体流量和射频功率，从而保证刻蚀深度有着非常高的统一性，这种精确度是人工调参无法达到的。

（三）多目标优化（质量、效率、成本）

工业生产一般会遇到质量、效率、成本这三个相互矛盾的目标。追求极致的质量会减慢生产速度，提高废品率，造成隐性成本上升；追求最高产量会缩短设备寿命，增大能耗。PLC 在这个层次上的优化任务就是寻找帕累托最优解集，即在不降低任何一个指标的前提下，使综合效益达到最大。这就需要建立包含多约束条件的多目标优化函数。

PLC 根据实时采集的生产数据，采用事先确定好的权重因子，计算出当前的设备综合效率或者关键绩效指标。遗传算法或者粒子群算法等优化算法在 PLC 或者上位机中运行，在满足设备安全约束以及工艺硬约束（温度上限，最大压力）的解空间内进行全局搜索。在热处理炉控制中，算法在保证工件金相组织合格（质量约束）的情况下，寻找使升温保温曲线最短、燃气消耗量最小（成本目标）的最优解。

系统可以根据市场策略由管理者来调节权重。当订单紧急的时候，PLC 自动切换到效率优先模式，放宽能耗要求，全速驱动生产线；淡季备货时，切换到成本优先模式，用最经济的参数运行。这样一种灵活的策略切换方式，就实现了底层控制系统同企业顶层经营战略的无缝对接。此时 PLC 不再只是一个执行指令的机器，而是可以理解商业意图的智能执行官。

第五节 融合应用与前景展望

伴随着工业互联网技术的迅猛发展以及计算能力的显著提高，可编程逻辑控制器作为工业自动化的“大脑”正在经历前所未有的技术变革。传统控制理论中依靠确定性逻辑的执行方式，正在被融入用数据驱动的人工智能算法之中。跨界

融合不只是信息技术同运营技术之间的壁垒被打破，而且给制造业带来了生产效率以及灵活性的飞跃。

一、前沿应用案例

智能制造已经由概念验证阶段进入到规模化应用阶段，很多行业的龙头企业也开始在实际的生产过程中尝试使用带有 AI 算法的先进 PLC 系统。有力的证明了在复杂的非结构化环境以及高精度的质量控制的情况下，新型控制架构可以怎样解决传统自动化方案难以解决的问题。

（一）AI 视觉引导的机器人抓取

传统自动化生产线上机器人抓取作业依靠工件精确定位、夹具固定来完成。但是面对散乱堆放或者形状不规则的物品的時候，传统的机器视觉就显得无能为力了。AI 视觉引导系统加入以后，PLC 同高端的视觉控制器就形成了新的配合方式。系统使用机械臂末端或者上方的 3D 相机采集点云数据，并用深度强化学习算法对散乱工件做实例分割和位姿估计。这个过程不再需要人工去设计特征提取算子，让神经网络自己去学习物体最好的抓取点以及接近向量。光照剧烈变化或者物体相互遮挡时，系统也能有很高的识别鲁棒性。

PLC 起中枢协调和实时运动控制的作用。当视觉系统进行图像推理得到抓取坐标后，数据就通过千兆工业以太网或者现场总线实时传递给 PLC。PLC 不仅要解析带有位置、姿态信息的报文，还要根据机器人当前的运动学状态做路径规划的第二次校验。为了防止机械臂在抓取过程中碰到料箱，在 PLC 上运行的避障算法会根据视觉反馈出的环境模型来动态规划避障路径，以毫秒级的周期向机器人伺服驱动器发出位置指令。

智能抓取方案已经被广泛地应用在汽车零部件分拣、物流拆码垛、3C 电子组装等场合。AI 模型在做抓取动作的时候不仅能辨认出物件，也可以根据表面质感和纹理推断出物件的物理特性，进而调整末端执行器所用的抓取力量大小，防止损坏易碎物品。系统具有自我学习的功能，在运行数据不断积累的过程中，抓取成功率和节拍时间会不断的改善，真正的实现了从“自动化”到“智能化”的飞跃。

（二）基于深度学习的产品质量检测

产品质量检测对制造业来说十分重要，传统的人工目检效率低、标准不统一，

而依靠传统算法的 AOI 设备对复杂表面缺陷的检出率一般都不高。基于深度学习的检测系统把卷积神经网络与工业现场融合起来,使用 PLC 和边缘计算单元来实现对小缺陷的正确判定和分类。在高速生产线上,产品以每秒数米的速度通过检测工位,PLC 用高速编码器实时跟踪产品的位置,在产品到达相机视场中心的瞬间发出图像采集信号。

得到的高分辨率图像直接传送到边缘侧的 AI 推理服务器,用已经训练好的深度神经网络模型进行像素级分析。系统可以对划痕、凹坑、异色、脏污等各种缺陷做出区分,并给出缺陷的置信度评分。为了保证生产节拍不受影响,整个推理过程必须在几十毫秒内完成。如果产品判定为不合格,AI 系统就会发出 NG 信号以及具体的缺陷代码给 PLC。PLC 收到信号之后,依靠自身强大的逻辑运算能力,根据编码器数值精确计算出该废品到达剔除机构的时间点,控制气缸或者分流阀在最佳时刻动作,将不良品准确分离。

该应用模式的优势在于其强大的泛化能力与闭环控制机制:

1. 样本库的更新迭代,刚开始系统检测的时候会存在误判的情况,但是将之前误判的图像再次进行训练模型的检测算法,在以后的使用中检测算法的准确率随着使用时间的增加而提高。PLC 可以远程接收更新过的模型参数并马上投入使用,不需要停机升级。

2. 多维数据融合 PLC 收到视觉判断结果的同时,也收到了生产过程中温度、压力、扭矩等工艺参数。把图像数据与过程数据关联起来分析,系统可以追溯出缺陷产生的原因,反过来调节前端工艺设备的参数,形成质量管理的闭环优化。

3. 柔性换产、多品种小批量生产传统视觉方案难以应对,但是基于深度学习的方案只需要调用对应模型文件即可。PLC 依靠配方管理功能,一键切换检测标准和剔除逻辑,大大缩短了换产调试时间。

二、未来发展前景

由于底层芯片技术的发展、软件架构的重新组织,PLC 正向开放、智能、互联的方向发展。未来的工业控制器,不单单是逻辑运算的执行者,而将会成为一个集计算、通信、控制为一体的工业智能边缘节点,彻底改变人机协作、生产组织方式。

（一）PLC 自身的 AI 化趋势

传统的 PLC 架构采用专用嵌入式处理器或者微控制器，主要对布尔运算和顺序控制进行了优化，不能承担复杂的矩阵运算。未来 PLC 硬件架构将会发生根本性的改变，异构计算将成为主流。新一代高端 PLC 将 CPU、GPU 以及专用的神经处理单元集成在同一个 SoC 芯片上，使控制器既能保持微秒级实时控制周期，又具有本地执行轻量级 AI 推理的能力。这种“端侧智能”消除了将数据传送到云端或上层服务器所造成的延迟和安全问题，从而让针对实时性要求很高的预测性维护和自适应控制变得可行。传统 PLC 和 AI 融合 PLC 的主要差别如下表所示。

传统 PLC 与 AI 融合 PLC 对比表

特征	传统 PLC	AI 融合 PLC
核心处理器	专用嵌入式处理器 / 微控制器	CPU、GPU、NPU 异构集成于 SoC 芯片
计算能力	优化布尔运算与顺序控制，难承载复杂矩阵运算	在微秒级实时控制基础上，具备轻量级 AI 推理能力
智能部署	不支持或仅有限支持	本地化“端侧智能”，低延迟，高安全性
软件架构	通常为紧耦合	模块化、容器化，AI 服务容器与控制逻辑交互
应用场景	确定性逻辑控制	预测性维护、自适应控制、智能协同
编程模式	梯形图、结构化文本	可直接调用封装好的 AI 功能块

软件上 PLC 操作系统会越来越模块化、容器化。在实时操作系统上运行容器引擎，在 PLC 上建立独立的 AI 服务容器，采用共享内存或者虚拟网络和实时的控制逻辑核心进行高速数据交互。以伺服电机控制回路为例，嵌入到 PLC 中的 AI 模型可对电流以及振动的频谱特性实施实时监测，从而提前察觉轴承磨损或者皮带松动的早期信号，进而自动调节参数以补偿机械间隙，直到由于物理限制而不能继续补偿时才发出维护报警。内嵌式的智能化大大降低了系统集成的复杂度，也给设备赋予了自我感知、自我优化的生命力。

在此趋势之下，PLC 的编程模式也会发生改变。工程师在编写梯形图或者结构化文本时可以直接使用封装好的 AI 功能块。这些功能块内部存在着复杂的神经网络算法，但对外只提供简单的输入输出接口，例如，输入振动信号数组，输出健康状态百分比。封装把底层算法的复杂性隐藏起来，使缺少算法基础、不具备自动控制经验的工程师也能轻易地搭建智能控制系统。

（二）低代码 / 无代码 AI 开发平台

人工智能技术在工业领域落地的最大障碍之一，就是由于数据科学家不懂工业工艺、自动化工程师不懂算法模型而造成的技能鸿沟。为了弥补断层，面向工业现场的低代码甚至无代码的 AI 开发平台将会迎来爆发式的增长。这类平台一般都带有图形化的交互界面，将复杂的 AI 开发流程，也就是数据采集、数据清洗、特征工程、模型训练、验证、部署等等，抽象成可视化的操作向导。用户不需要写一行代码就可以直接通过拖拽组件，配置参数来搭建模型。

对于 PLC 工程师来说，就意味着他们可以根据工艺的深刻理解直接参与到智能系统开发中去。平台可以自动对接 PLC 历史数据库，方便工程师选择正负样本数据。平台在模型训练时，用技术对网络结构、超参数等进行搜索，得到适合目标硬件的轻量模型。模型部署阶段可以用一键编译的方式将训练好的模型转化为 PLC 能直接运行的二进制代码或符合标准的库文件，然后直接下载到控制器上运行。

这样一种开发模式大大降低了工业 AI 的试错成本以及开发周期。企业不需要再组成大小算法团队了，一线工艺专家就可以借助平台对新的控制策略做快速的验证。工程师可以利用无代码平台基于历史数据训练出温度预测模型，然后将此模型放到 PLC 之中做为前馈控制部分来解决因大滞后引起超调的问题。工具的普及，会让一线工程师的创造性思维被充分激发出来，工业智能应用也会出现碎片化落地的现象。

（三）AI 模型的标准化与可移植性

目前工业人工智能领域存在严重的碎片化现象。不同品牌的 PLC 硬件、不同的深度学习框架和不同的边缘计算平台之间没有统一的交互标准，所以模型很难在不同的设备之间实现迁移和部署。随着开放自动化技术发展，AI 模型的标准化、可移植性成行业新焦点。通用模型交换格式在工业控制领域里将会得到更广泛的支持，使得在一个框架中训练出的模型可以转换成中间表示，在任何支持该标准的 PLC 运行时环境中高效地执行。

标准化不只是模型格式的标准化，更应该是模型与控制逻辑的接口标准化。有关的国际标准组织正在探索把 AI 推理引擎加入到现有的工业控制标准的扩展范围内。这就意味着未来的 PLC 程序将会有标准化的 AI 调用指令，底层硬件用 X86 或者 ARM 架构、模型来自哪个平台训练、模型是用什么语言编写的都不重要，

只要遵守统一的接口标准，就可以像调用定时器或计数器一样方便地调用 AI 的能力。很好地保护了用户的软件资产，不会被某一个硬件厂商锁定。

标准化之后，工业 AI 应用商店就能够在实际的应用中出现。算法提供商可以开发出通用的、针对某个具体应用场景的预训练模型，之后以组件的形式进行发布。终端用户购买之后可以将模型导入到自己的 PLC 系统中，在少量迁移学习或者参数微调之后就可以很快获得智能控制能力。会促成一种生态系统，使得好的算法被快速复用、传播，从而带动整个制造业水平的提升。

第九章 PLC 系统维护与故障诊断

工业自动化系统全生命周期的管理中，系统长期稳定、可靠，不仅仅依靠最初的设计、调试来实现，后期系统维护是否及时、有效，是否有科学合理的故障诊断体系，同样起着非常重要的作用。随着控制规模的增大和逻辑复杂度的提高，维护工作也从以前的“事后维修”转变为现在的以状态监测、数据采集分析为主的“全过程管理”，力求通过系统化的方式将风险消灭在萌芽状态。

第一节 预防性维护策略与周期

预防性维护的核心思想就是依靠事先的计划和标准化的作业流程，主动干预设备运行状况，从而最大程度地降低突发性停机风险，延长控制系统使用寿命。建立合理的维护策略要依照设备所处的工作环境，负荷强度以及其重要程度，把依靠时间的周期性检查同依靠设备状态的灵活维护融合起来。

一、预防性维护体系

建立完善的预防性维护体系是保证 PLC 系统高效运行的基础，要从资产管理、计划制定、物资保障、人员能力四个方面入手进行深入构建，形成闭环管理机制，使每一次维护作业都有章可循、可追溯。

（一）建建设备台账与维护档案

建立详细的设备台账是实行精细化管理的基石。工程技术人员在实际操作过程中，需要对工厂内所有的 PLC 控制器、PLC 扩展模块、PLC 通信接口卡、外围设备进行一一编码，并将编码信息录入数字化管理系统。台账内容不应当只有型号、序列号，还应该包含固件版本、硬件版本、安装日期和供应商信息。随着工业 4.0 的推进，静态台账已经不能满足要求，动态的维护档案就显得特别重要。维护档案应该详细记录设备每次巡检结果、已发生的故障现象、备件更换记录、每次程序修改版本说明。

采用统计学方法分析历史维修数据，管理人员就能发现故障频繁发生的位置和系统中薄弱的地方。如某一型号的模拟量输入模块在高温环境里频繁失效，维护档案就能给以后设备选型改良、环境控制提供有力的数据支持。档案管理的完善之处在于，能让技术经验得到良好的延续，不至于出现核心维护人员一走，系统维护工作就出现断层的情况。每一次变更都必须要有操作人、操作时间、变更原因、变更前后代码快照，严格的版本控制是追溯生产事故根源、保证控制逻辑完整性的有效手段。

（二）制定分级维护计划

维护计划的制定要按照分级管理的原则，按检查内容的详略以及它对生产影响的程度把维护任务分成日检、周检、月检和年检四个等级。

PLC 系统分级维护计划概要

维护级别	执行人员	主要检查内容	目的
日检	操作员 / 巡检工	控制器指示灯、供电电压、异响异味	快速发现明显故障征兆
周检	维护技术员	散热风扇、空气滤网、机柜温湿度	预防性检查，发现潜在问题
月检	维护技术员	系统运行日志、故障缓冲区、传感器读数对比	深度分析，排查偶发性问题
年检	专业维护团队	供电系统绝缘 / 接地、电气连接紧固、控制逻辑功能测试	全面检修，确保系统可靠性

上表显示日检一般由当班操作员或巡检工来完成，用目视检查的方式检查控制器面板指示灯状态、供电电压稳定性、现场有无异响、异味等，以迅速发现明显的故障征兆。周检会增多一些细致的检查项目，查看散热风扇转动时声音是否正常、空气过滤网有没有积尘、机柜内温湿度指标是不是处于标准范围之内等等。月检要对系统运行日志展开深入分析，技术员需调取 PLC 故障缓冲区数据，找出偶尔出现的通信丢包或者 I/O 模块报错状况，还要对照主要传感器的读数。年检属于最高等级的维修活动，一般同工厂年度大修结合起来。此时应断开电源，对供电系统绝缘电阻、接地电阻做全面检测，并紧固所有电气接线点，对控制系统进行全覆盖功能测试。分层次、分阶段的计划体系可以保证资源的合理利用，

防止因为过度维护造成设备停机浪费，也可以避免因为维护不足导致设备积累潜在故障。

（三）关键备件的库存管理

1. 备件库存策略的好坏直接关系到故障修复的平均时间。工业现场的关键备件不应该只用价格来衡量，更应该考虑其在系统中的不可替代性以及采购货期。对 CPU 模块、电源模块、主干网络通信卡等主要元件实行最小安全库存制度，在硬件损坏时可以立即从仓库调取备件进行替换，把停产损失降到最低。库存管理还要重视电子元器件的存储环境，避免高湿、静电或者腐蚀性气体引起早期失效。

2. 备件的生命周期管理也不能忽略，带有电解电容的电源模块以及 PLC 系统后备电池都会随着时间推移而性能逐渐下降。库存管理系统应该有有效期自检功能，长时间存放的备件要定期上电检测或者检验其性能状态，防止备件在货架上失效。当组件停产或者升级换代比较频繁的时候，库存管理还要和供应商保持紧密联系，及时掌握产品生命周期变化的情况，对即将退市的产品，提前制定好储备计划或者升级替代方案，保证系统备件供应不中断。

二、具体维护内容

预防性维护措施的落实，就在于对每一个物理设备的细心维护和精确检验。控制系统物理状态关乎逻辑程序执行速度，任何细微的硬件隐患，一旦遇到特定工况就可能会被放大成系统性故障，所以具体维护内容的执行要严格。

（一）控制柜的清洁与散热检查

工业现场工作环境一般会存在粉尘、油雾、纤维絮状物等污染物，这些污染物都是 PLC 系统的隐形杀手。控制柜的清洁不是为了好看，是为了防止导电粉尘堆积在电路板上造成短路，或者堆积在元器件上形成隔热层导致热量积聚。维护人员要定期使用工业吸尘器和防静电软毛刷，清除机柜底部积尘及模块表面的附着物。对装有风扇滤网的机柜要定时清洗或更换滤棉保证冷空气流通。

散热检查的重点就是找出热热点并评价通风的效果。PLC 的 CPU 模块以及电源模块工作的时候会释放热量，如果机柜内部的温度长时间超过 55 摄氏度，电子元件老化速度就会呈指数级增长。维护时用红外热成像仪对柜内设备进行扫描，主要注意大功率模块、接线端子排和变压器是否有异常温升。查看机柜风扇

转速是否正常、风道是否被新加的线缆或者设备挡住。对于处在高温车间里的控制柜，应该考虑是否要加装工业空调或者热交换器，保证 PLC 一直工作在适宜的散热环境里，保证运算逻辑的稳定性。

（二）接线端子的紧固与状态检查

接线端子状态决定信号传得对不对，电供得是否可靠。在交变电流的热效应和机械振动的作用下，原来牢固的螺丝端子随着时间的推移会产生微小的松动，称为冷流或者蠕变。松动的接触点会造成接触电阻增大，使局部发热、信号电压降增大，严重时还会引起电弧烧蚀。定期维护时，技术人员必须用经过校验的力矩螺丝刀，根据设备制造商规定的扭矩标准，对所有的 I/O 端子、电源端子、通信接口进行逐一紧固。

除机械固定外还要检查端子的氧化腐蚀情况。在化工或者潮湿的环境下，铜质端子很容易表面氧化发黑，造成信号阻抗不稳定。在该类环境中，可选用喷涂三防漆或者使用专用防护油。还要检查线缆的绝缘层有无老化、破损或被柜门挤压的情况，屏蔽电缆注意屏蔽层的接地情况，防止电磁干扰信号进入控制回路。规范的端子维护可以消除许多时有时无、很难复现的电气连接故障。

第二节 常见故障类型与诊断方法

故障诊断、维修对保证生产连续性，设备安全是重要的一环，对工业自动化控制系统全生命周期而言占有极其重要的地位。在复杂的多变的工业现场环境当中，迅速识别出故障类型，并且采取正确的应对措施，这就是每一个自动化工程师所必须要具备的技能。本节对硬件和软件两方面常见的故障进行详细的分析，系统的梳理诊断流程和排查技巧，以期用科学的方法论来指导实际的工程应用，最大限度的减少系统的停机时间，提高系统的整体运行效率。

下表列出了工业自动化控制系统中常见的故障类型及其初步诊断方法，供工程师快速定位问题。

常见故障类型与初步诊断表

故障类型	典型现象	初步诊断方法
硬件故障		
电源故障	指示灯不亮 / 闪烁，系统不稳定 / 重启	检查指示灯，测量电压，运用分段隔离法
CPU 模块故障	指示灯报警，系统停机 / 无响应	检查指示灯状态，检查存储卡，使用编程软件诊断
I/O 模块故障 (输入)	传感器动作但系统无信号反馈	比对现场信号与映像寄存器，检查接线 / 供电
I/O 模块故障 (输出)	模块指示灯亮但执行机构无动作	测量输出电压，检查外部线路 / 执行机构
传感器故障	信号输出异常 (高 / 低电平, 漂移)	人工触发，万用表测量信号 / 回路电流
执行器故障	有指令但无动作，或动作异常	检查线圈磁力 / 电压，观察反馈误差
软件故障		
程序逻辑错误	系统动作与预期不符，间歇性故障	时序图对比，在线监控变量，交叉引用分析
通信故障	通信中断，数据传输异常 / 无数据	检查物理连接，核对协议参数，借助网络抓包
参数设置错误	设备运行不正常，性能下降	核对组态与实物，检查量程 / 滤波 / 看门狗 /PID 参数
诊断缓冲区故障	系统停机，红灯亮起，不明原因	在线连接 CPU，查看诊断缓冲区事件记录

接下来，我们将对这些故障类型进行更深入的探讨。

一、硬件故障诊断

硬件系统是自动化控制的基础物理平台，它的稳定与否直接关系到控制功能是否能够正常工作。硬件故障诊断要按照由外向内、由电源到信号的逻辑顺序，用物理现象和测量数据作出判断，在复杂的电气连接中找到故障点。

（一）电源故障的快速判断

电源模块是控制系统的大脑，它的运行情况直接影响整个系统是否能够正常工作。任何电压的波动或者停电都会使系统陷入混乱，甚至造成硬件的损坏。判断电源故障最直接的方法就是观察电源模块面板上标有 PWR 或者 DC24V 字样的绿色指示灯是否发光。如果不亮或者闪烁，则说明供电端有问题。此时技术人

员应马上用高精度万用表的直流电压档，直接在端子排上测量输入和输出电压，查看是否处在额定值允许的偏差范围之内，一般波动幅度要控制在标称值的 5% 到 10% 之内。如果输入电压正常但是指示灯不亮，基本上可以判断是电源模块内部的电路，比如保险丝或者整流桥损坏了，这时就需要更换模块；如果输入电压本身就是零或者很低，那就需要从上一级的断路器、隔离变压器或者供电电缆去找原因，看看有没有跳闸、断线或者接触不良这些物理连接方面的问题。

在排除了外部供电的问题之后，接下来就要考虑负载侧是否出现了短路或者过载的情况，这也是导致电源模块自我保护性关断的另一个常见原因。当外部传感器、执行器、中间继电器线圈发生短路时，瞬间的大电流会导致输出电压下降，使电源模块进入“打嗝”状态或者直接保护停机。此时采用分段隔离法是最有效的诊断方法，即把电源输出端的负载连线一一断开，每断开一路就重新上电观察电源的状态。如果其中一条负荷电路断电，当电源恢复正常输出的时候，则该回路存在短路故障。供电容量不足也是老旧系统改造中常常被忽略的问题，随着外围设备数量的增多，总功率超过了电源模块的额定功率就会造成电压在负载启动时跌落，使得系统频繁重启。该类隐性故障要通过计算总功耗和电源额定参数来确认。

（二）CPU 模块故障现象与排查

中央处理单元相当于系统的控制中心，一旦出现故障，系统就有可能彻底瘫痪，也有可能逻辑执行完全停止，面板上的指示灯会显示某种报警状态。CPU 模块上正常工作时的运行状态指示灯应该常亮绿色；如果出现黄色或者 SF/DIAG 灯为红色则表示有故障。如果所有的指示灯都熄灭，且已经确定背板总线供电没有问题，则很可能是 CPU 模块内部电源转换电路损坏或者主板烧毁，只有更换硬件才会有用。如果红灯闪烁而不能用复位来清除的话，则内部存储器出现校验错误或者底层固件出现不可逆的逻辑冲突，在强电磁干扰的环境下偶尔会遇到，这时应该尝试重新刷写固件或者格式化存储卡来恢复出厂设置。

存储卡故障也是造成 CPU 不能正常启动的另一大原因，尤其经常断电、带电插拔的时候。当 CPU 通电后一直停止并且报错的时候，技术人员应该检查存储卡是否松动、触点是否氧化、卡内文件系统是否损坏。对于依靠电池供电来维持数据的老式控制器来说，电池电压低报警绝不是可以忽略的信号，因为在此刻断电，RAM 中的用户程序和断电保持数据将全部丢失，CPU 就会变成空白状态，

无法运行。因此定期测量电池电压，在系统通电的情况下更换电池是必要的维护步骤。带有自诊断功能的现代高端控制器，使用编程软件在线连接读取 CPU 的硬件状态信息，可以获取内部总线错误、看门狗超时或者运算单元异常的详细代码，从而判断是由于外部干扰造成的软性死机，还是芯片层面的物理损坏。

二、软件故障诊断

软件故障比硬件故障更隐蔽、更复杂，它会表现为系统逻辑运行不符合预期、通信中断或者数据异常，但是硬件本身并没有损坏。诊断软件故障需要清晰的逻辑思维，用编程工具提供的在线调试功能深入程序内部的数据流、控制流，逐步定位逻辑漏洞或者配置错误。

（一）程序逻辑错误的排查思路

程序逻辑错误一般不是指语法错误，因为语法问题在编译时就能被发现。真正的逻辑错误是指程序没有按照工艺要求正确地执行控制意图，这类问题一般在某些工况或者复杂时序下才会出现。排查此类问题首先要画出一个清晰的时序图，将期望的动作流程和实际看到的现象进行对比。在线监控就是逻辑错误的显微镜，技术人员要进入程序块里，观察变量的状态变化。发现某个输出未能按预期置位的时候，用交叉引用工具反向追踪变量的所有驱动条件，逐一核对常开常闭触点的通断情况，尤其是要注意那些多次赋值的双线圈现象，初学者常犯的错误，会导致输出结果取决于最后一次扫描时状态，从而产生不可预知的动作。

产生竞争冒险，时序配合失误造成的间歇性逻辑故障的根本原因。高速生产线上，如果传感器的信号持续时间小于 PLC 的一个扫描周期，那么这个信号就会被漏读，从而造成后面逻辑无法触发。对这样问题应该使用脉冲捕捉或者中断指令来处理瞬态信号。另一方面，当复杂的连锁逻辑里，置位指令与复位指令在同一个扫描周期内同时满足条件的时候，由于程序中指令的排列顺序不同，它们的执行结果会出现竞争，进而引发设备动作的抖动或者状态卡死。在程序中设置断点或者开启变量强制功能，模拟出某种特定条件下的逻辑流向，以此来验证逻辑设计是否周密，找出由于扫描机制特性所引发的逻辑漏洞。

（二）通信故障的诊断流程

随着工业互联网和分布式控制的发展，通信故障已经成了影响系统稳定性的主要因素之一，在诊断过程中必须按照物理层、协议层逐层进行。物理连接的好

坏是通信稳定性的前提。通信中断的时候，首先要检查电缆屏蔽层是否接地，终端电阻是否正确，接头是否拧紧。在 RS485 等现场总线网络中，缺少终端电阻或者阻抗不匹配都会造成信号反射，造成严重的数据丢失。用示波器看通信总线上的波形是否正常，如果波形出现严重的畸变并且带有大量的毛刺干扰的话，就说明物理层遭受了强电磁的干扰或者是线路阻抗出现异常现象，那么此时应该对布线加以调整或者添加中继设备。

物理链路无误之后，重点就转移到协议配置和参数对应上来。主从站地址冲突是人为失误造成通信瘫痪的主要原因，必须保证网络上每个节点的地址是唯一的，并且与组态配置严格一致。波特率、数据位、校验位等通信参数中任何一个不匹配，都会导致数据包不能正确解析，表现为通信指示灯闪烁但没有数据交换。以太网通讯中 IP 地址冲突、子网掩码设置错误、交换机端口 VLAN 划分错误等都会造成连接超时。使用网络抓包工具对数据报文的底层结构进行分析，就可以找出有无 CRC 校验错误、帧格式错误或者请求超时等错误，进而判断出来是发送端的数据封装问题、接收端的解析超时问题还是网络负载过重引起的数据拥堵。

（三）参数设置错误的检查方法

参数设置错误属于典型的软故障，系统硬件正常，程序逻辑无误，但是设备不能正常工作或者性能大幅下降，此类问题隐藏在复杂的硬件组态和模块配置界面里。

1. 硬件组态和实际物理架构不一致为第一项检查项目。当 CPU 报告模块缺少或者参数配置错误的时候，需要仔细核对组态软件中模块订货号、固件版本与机架上实际安装的实物是否完全一致。即使同样型号的模块，如果固件版本不同，也会造成部分功能不能启用或者初始化失败。

2. 模拟量模块量程卡的跳线设置必须与软件组态中信号类型（电压、电流、热电阻）完全一致。如果软件设置为 4-20mA 输入，硬件跳线停在电压档，会造成采集数值溢出或者极度不准确。滤波时间要根据现场干扰情况来定，太短会造成数值波动很大，太长会造成控制滞后。

3. 看门狗时间与循环中断周期的设置都会影响到系统的稳定性。如果用户程序太长，使得扫描周期超过看门狗最大值，CPU 就会无条件进入停止模式。查看 CPU 属性中的扫描周期统计数据，合理增大看门狗阈值或者优化程序结构，这是解决这种停机问题的途径。

4.PID 控制参数的整定错误是造成过程控制不稳的主要原因。当发现温度或压力控制出现大幅振荡或无法收敛时,不应盲目怀疑硬件,而应检查比例增益、积分时间与微分时间这三个核心参数。参数设置过激会导致系统超调震荡,参数过缓则导致调节响应迟钝。利用自整定功能或经验试凑法修正参数,是恢复系统控制性能的必由之路。

第三节 在线监测与数据分析工具

随着工业自动化水平不断提高,可编程逻辑控制器的稳定运行就成了保证整条生产线上效率和安全的重要因素。在线监测以及数据分析工具是保证系统健康运转的重要手段,它的功能由最初的简单状态查看发展成集故障诊断、性能优化、预测性维护为一体的综合技术体系。本节将会以控制器的自身功能及第三方的专业工具为主,对系统做进一步的分析,为工程技术人员提供底层硬件到顶层数据分析的全方面技术参考。

一、PLC 内置诊断功能

现代工业控制器不仅是逻辑运算的中心,也是具备强大力量的智能终端。控制器内部含有一大批诊断资源,可以对控制器的自身硬件工作状态、程序的执行情况、外设通信状态做实时检测。充分挖掘并利用好这些内置功能,有利于快速找到故障并进行系统维护,从而大大减少停机时间,提高维护效率。

(一) 利用 LED 指示灯初步判断

控制器机架上装有发光二极管指示灯,给现场的维护人员提供了认识系统状态最直接的途径。这些指示灯用不同的颜色、亮灭以及闪烁快慢,对外部发出处理器当前的工作模式及可能存在的故障信息。绿色灯正常,黄色灯非致命或强制,红灯故障或者严重逻辑矛盾。通过观察面板上的系统故障灯、总线故障灯、运行停止状态灯,技术人员无需连接编程终端就可以对故障范围做出初步判断,从而决定是检查外部接线还是深入分析内部程序。

指示灯的闪烁频率也含有很多的信息。品牌控制器运行灯以一定的频率闪烁,一般说明系统正在启动或者正在对固件进行升级;总线故障灯快速闪烁,则可能是网络中存在从站丢失或者通信干扰。经验丰富的工程师可以综合观察电源灯、

电池灯、输入输出模块通道状态灯等来快速判断出故障是由电源模块不稳定、后备电池电量耗尽、现场传感器线路断路或短路引起的。虽然基于物理层面的直观诊断精度不高，但是它在工业现场争分夺秒的紧急情况下却是启动应急预案的第一步。

对于分布式输入输出站来说，接口模块上的指示灯也十分重要。主站和从站之间如果出现通信链路故障，那么接口模块的总线故障灯就会马上亮起来，同时对应的机架故障灯也会发出报警信号。由此产生的层级化的指示灯创建出一张可视的硬件健康图，使维修人员不用打开控制柜门就可以做巡检。对于偶发的故障，一些高端控制器可以编程逻辑控制指示灯的状态变化，把某个工艺报警投射到控制面板上，使得硬件指示灯的功能得到了进一步的拓展。

（二）通过编程软件读取诊断信息

硬件指示灯提示系统异常的时候，使用专门的编程软件与控制器联机，读取内部的诊断缓冲区，这是得到正确故障信息的关键一步。诊断缓冲区采用的是先进先出的环形存储方式，可以对控制器运行过程中所有的重大事件进行如实的记录，包含模式切换、硬件插拔、通信中断、程序出错、用户自定义报警等等。每一条记录都带有时间戳、事件 ID 和详细的参数，就像黑匣子录像一般不能被抹除，它就是故障发生的复盘的重要线索。

对诊断缓冲区里的十六进制错误代码进行分析，工程师就可以精确地把故障指向某个模块，或者指到某一段程序上。比如访问地址出错的时候，缓冲区除了报出错类型之外，还会告诉使用者出错的那条指令处在哪一个程序块号的哪一个网络段。对于复杂的间歇性故障，诊断缓冲区的时间标签功能就显得非常关键，技术人员可以利用它将故障发生时间同现场工艺动作的时序进行比对，进而有效地排除由于电磁干扰或者机械动作不同步所引起的系统异常。

1. 硬件中断记录属于诊断信息的重要部分。当模拟量模块发现断线、超限或者电源故障的时候，就会向中央处理器发出中断请求，在缓冲区留下具体的硬件故障信息。有利于区分现场仪表是物理损坏还是信号线路接触不良。

2. 软件逻辑错误记录主要是对程序运行时出现的异常情况做记录，例如除数为零、数组下标越界、定时器溢出等等。这就会造成控制器停止工作。程序员通过读取具体的错误堆栈信息，可以很快找出代码中逻辑的缺陷并加以改正。

3. 通信连接状态工业以太网、现场总线等各种网络的建立 / 断开。对庞大的

分布控制系统来说,这些记录可以用来分析网络抖动、丢包率、从站设备在线率等,给改善网络架构赋予了重要根据。

（三）I/O 状态与变量强制监控

调试和维护阶段中,对输入输出信号的状态以及内部变量的数值进行实时监控,是检验控制逻辑是否正确的主要方法。编程软件提供的变量监控表功能可以自定义需要观察的信号列表,并且以位、字节、整数或者浮点数的形式实时更新数据。可视化数据流不仅可以显示当前的逻辑状态,还可以通过设置触发条件来获取变量的快照,进而分析高速变化的工艺过程是否存在逻辑死区或者竞态条件。

变量强制功能是强有力的干预手段,一般只在非常特殊的情况下才用得到。当现场传感器损坏或者机械机构还未安装到位,但是此时需要对后续的控制逻辑进行检测时,工程师可以通过软件来强制改变输入映像区或者输出映像区的状态,以此来模拟出现场信号的通断。虽然该操作可以隔离外部硬件故障对程序调试的影响,但是也伴随着很大的安全风险。因此使用强制功能时必须严格依照操作规程进行,保证设备和人员处于安全区域内,测试结束后及时释放所有的强制变量,防止虚假信号引起设备误动作。

除了基本的开关量强制之外,模拟量数值的监视和修改对过程控制系统而言也十分重要。实时改变 PID 控制器的设定值、比例系数或者积分时间,工程师就可以在线调节系统动态响应特性。同实时趋势曲线功能配合使用,观察被控变量对于参数调整的响应过程,这是控制回路整定的常规方法。复杂的运动控制情况下还可以使用高精度的跟踪功能,对位置、速度、扭矩曲线进行毫秒级的采样,然后分析机械传动系统间隙、摩擦、惯性的特性。

二、第三方监测工具

虽然控制器本身就带有强大的诊断功能,但在面对跨平台、跨协议以及存在物理层干扰等复杂的系统问题时,就需要用到第三方专业监测工具。它们可以克服单一控制器的局限性,从网络通信、物理环境、数据流向等各方面来全方位诊断、细致分析。

（一）网络流量与协议分析工具

随着工业以太网技术得到广泛推广,网络通信的稳定性已经成了系统可靠运行的生命线。专业的网络流量分析工具,例如基于镜像端口的数据包捕获软件,

可以对数据链路层数据报文进行捕获，能获取到经过交换机的全部数据报文。经过报文解码、协议分析之后，工程师就可以观察到网络中广播风暴、多播流量比、数据包重传率以及微秒级的传输延迟。

不仅可以识别通用的 TCP/IP 协议，还可以解析 Profinet、EtherNet/IP、Modbus TCP 等工业专用协议的报文格式。当系统出现偶发性通信中断的时候，经过长时间的流量抓包和过滤分析，一般可以发现 ARP 攻击、IP 地址冲突、畸形数据包恶意注入等异常行为，异常行为常常隐藏在正常的数据流当中，不易发现。对于实时性要求很高的等时同步网络来说，专业的分析仪可以准确地测量报文的抖动偏差，保证网络传输的确定性符合运动控制的要求。

网络拓扑发现工具属于第三方监测体系的组成成分。可以对网络内所有的节点进行扫描，画出一张实时的物理连接拓扑图，其中每一条链路的带宽使用率和连接质量都会被显示出来。当某条网线由于老化造成信号衰减，或者某个交换机端口出现 CRC 校验错误的时候，拓扑图上就会立即用醒目的颜色进行警示。这样全局的网络监视，就使得维护人员从被动应付故障变为自觉进行网络健康管理。

（二）振动与温度在线监测系统

工业现场的电机、泵、风机、减速机等机械设备运行状况的好坏直接影响到自动化生产线的连续性。独立的振动、温度在线监测系统，通过在关键部位装设加速度传感器、热电偶等设备，把物理参数转变成数字信号，再传送给上位机或者直接反馈给 PLC。与控制器主要对电气信号进行监控不同的是，它们主要对机械磨损、润滑不良、动不平衡、轴对中偏差等物理故障的征兆进行监测。

振动分析属于预测性维护的重要技术。用快速傅里叶变换把采集到的时域振动波形转成频域图谱。分析人员根据各个频率分量的幅值变化来判断故障类型：工频及其倍数分量增大，多为转子不平衡、不对中；高频段能量集中，多为滚动轴承早期剥落或者齿轮啮合出现问题。依靠频谱特性实施的诊断手段，在设备完全毁坏之前可以提前数周或数月发出警报，给备件采购和维修计划的安排留出时间。

1. 温度检测主要是对电气接点、摩擦件进行过热保护。采用红外热成像传感器或分布式光纤测温系统，可以得到设备表面温度场分布图。可有效防止大功率变频器柜、伺服电机长时间高温工作时，由于散热风扇失效或者积尘造成元器件热击穿。

2. 使监测系统更加紧凑高效的是智能传感器。支持相关协议的智能振动温度复合传感器可以输出原始的测量值,同时在传感器内部做边缘计算,直接输出均方根速度值、峰值因子等统计量,从而降低控制器的运算负担,达到状态监测与过程控制完美融合的目的。

(三) 基于云平台的远程监控平台

工业物联网技术飞速发展,出现了依靠云架构的远程监控平台。在生产现场布设工业网关,用轻量级的通信协议把分散的 PLC 的数据加密传输到云端服务器。平台冲破了地理空间的束缚,设备制造商与终端用户经由网页浏览器或者移动应用,可以随时察看设备的运行画面,产量数据以及报警信息。

云平台最大的优势就是大数据的汇聚和协同。它可以同时连接成百上千台设备,把大量的异构数据进行统一标准化的存储。利用云端强大的计算能力,可以对数据进行深度的挖掘和关联分析。对比不同地区同型号设备的运行参数可以找到环境温度、湿度对设备性能的影响规律;分析设备报警的共同点可以指导产品设计迭代优化。跨国企业依靠云平台实现了全球工厂管理 KPI 看板的统一,使生产过程更加透明,管理趋于扁平化。

安全是远程监控不能碰的红线。成熟的云平台方案一般会使用端到端加密的传输通道,双向认证和详细的权限控制方法。工程师可以利用建立好的虚拟专用网络隧道,安全的穿越企业的防火墙,对远端的 PLC 进行程序下载、固件升级、在线调试,就像在现场一样。远程运维模式大大降低了差旅成本,缩短了故障响应时间,已经成了高端装备服务的标准配置。

第四节 备件管理与生命周期评估

工业自动化系统长时间稳定运行及维护过程中,PLC 备件管理以及全生命周期评价,是保证生产连续性的两大支柱,也是减少总拥有成本的两大根基。一套行之有效的备件策略,可以把设备的平均修复时间缩减到最低限度;准确的生命周期分析,能够给系统的升级改造赋予可靠的数据支撑和决策依据,在技术更新与资产保值之间找到最佳契合点。

一、备件管理策略

有效的备件管理，远不只是在故障发生时现场物理储备的问题，它也是工业现场风险控制的重要部分，其关键之处在于找到库存成本和潜在停机风险之间的最佳平衡。

（一）关键备件清单（ABC 分类法）

采用 ABC 分类法对 PLC 系统零部件进行分级管理，是提高库存效率的有效方法。根据备件的重要程度、备件的采购难易程度、备件单价、备件故障对生产的影响程度，可以将所有的备件划分成三个层次。

PLC 备件 ABC 分类表

分类	备件类型示例	关键性 / 影响	管理策略
A 类	CPU、电源模块、核心通讯模块	极高，故障致全厂停产	设安全库存，现场常备，不依赖紧急供货
B 类	I/O 模块、模拟量模块、功能扩展卡	中等，故障影响局部工段	动态库存管理，基于历史数据季度调整
C 类	端子台、继电器、线缆接头	低，通用性强，低值易耗	集中采购，批量管理，定期盘点

A 类备件指的是中央处理器，电源模块，核心通信模块这些主要部件。虽然这类备件的更换频率不高，但是一旦出现故障，就会造成整条生产线乃至全厂停产，间接损失无法估量。因此 A 类备件不论价格高低，都必须设置最低安全库存，并保证随时可以取用，不能过度依赖供应商的紧急发货，因为物流配送的几个小时，都会造成巨大的产值损失。

B 类备件主要是各种输入输出模块、模拟量模块以及功能扩展卡。这类备件的故障一般只影响到某个工段或者某种功能，市场上常常存在替代品或者通用性较强的型号。对于这类备件来说，管理的重点就是根据历史故障率数据来动态地调整库存水平，既不能造成资金的浪费，也不能使备件的更换不能在合理的期限内完成。管理者应该对近三年的消耗记录进行深入的分析，同时还要考虑设备运行环境恶劣程度来调整 B 类备件的储备量，按季度进行调整。

C 类备件是端子台、继电器、线缆接头等低值易耗品或者非关键辅助部件。该类备件单价低、通用性强、采购渠道多，一般不用严格的个别库存跟踪。企业多用集中采购、批量管理的方式，只需要设置简单的再订货点。尽管 C 类备件

关注度不高，但是也不能忽视由于个别特殊规格连接件的丢失而造成维修工作出现“缺一颗螺丝钉就停一台机器”的情况，所以定期的盘点检查仍然不可缺少。

（二）备件的采购渠道与质量把控

为保证备件来源可靠，防止由于贪图便宜而使用劣质元件，埋下控制柜里的“定时炸弹”，正规采购途径应选择原厂授权分销商或经过严格认证的系统集成商。原厂渠道可以提供最新的硬件版本、固件支持，还可以追溯产品生产批次，在发生批量性质量缺陷召回时更显得十分重要。对于已经停产的旧型号备件，企业有时候只能从二手市场或者第三方翻新机构处购买，这时渠道的甄别难度会大大提升，必须建立起严格的供应商准入审核机制，主要看其测试能力和以往的交付信誉。

入库前的质量把控环节，必须执行严格的标准化流程，不能仅仅停留在外观检查层面。

1. 外观包装检查为第一步，主要查看防静电包装有无破损，标签序列号是否清晰，实物与标识是否一致，金手指触点有无氧化，插拔磨损等，可以剔除大部分翻新件或残次品。

2. 功能性测试属于质量控制的主要部分。对于重要的 CPU 或者智能模块，有条件的企业应该在备用的测试平台上进行上电运行测试，查看通讯端口、指示灯状态、基本逻辑功能是否正常，避免出现到手即坏的情况。

3. 对于长期库存的备件，采购部要同技术部配合，注意其生产日期，特别是带有电解电容的电源模块。库存时间过长的，在使用前必须预充电，激活电容，防止直接上电造成爆裂。

（三）备件的存储与保养要求

工业级电子元器件对于存储环境有非常严格的要求，不合适的存储方法会使得备件在使用之前就已经出现性能下降的情况。建立恒温恒湿的专用备件库房是基本条件，温度要控制在合适的范围内，相对湿度也要严格控制，过高的湿度会造成电路板上的金属部件生锈或者发霉，过低的湿度容易产生静电。所有的 PLC 模块必须存放在防静电屏蔽袋里，放在接地良好的防静电架上。对于沿海或者化工区域的企业，库房要装有空气净化系统，把空气中的盐雾，硫化物等腐蚀性气体过滤掉，不让它们进入模块里面，腐蚀精密的电子线路。

除环境控制之外，对长时间放置的电子备件做定期通电保养也十分重要。

PLC 内部的电解电容等元件虽然具有自愈特性，但是长期不通电会导致电解液干涸或者介质膜退化。建议制定详细的库存备件轮保计划，每一到两年将长期不用的 CPU、电源、功能模块等取出来，在测试台上通电运行几小时。不仅可以激活元器件的物理活性，还可以顺便检测备件的功能是否完好。在通电保养时，还可以检查备件的固件版本，必要时将其更新为和现场运行设备一样的版本，使紧急更换时可以“即插即用”，缩短现场调试时间。

二、PLC 生命周期评估

全生命周期评估，就是通过对 PLC 系统从投入运行、达到最佳状态、逐渐老化直到最终报废的全过程进行分析，确定出合适的运维策略及更新路径，从而达到最大化地提升自动化资产价值的目的。

（一）设备老化与性能衰减评估

任何电子设备都有自己的物理老化规律，PLC 系统也一样。对老化程度、性能衰减进行准确的评价，是开展预防性维护的前提。系统运行到中后期，物理层面上的老化主要是电源模块电压纹波增大、继电器触点接触电阻增大、接插件氧化松动等。技术人员应定期用示波器、红外热成像仪等专业仪器检测背板总线信号质量和模块工作温度。CPU 负载率在程序不变的条件下突然上升，或通讯误码率趋于上升，就说明硬件性能开始下降，系统进入故障高发期。

环境应力对于 PLC 寿命的影响不可小视，评估时必须考虑设备工作历史中的工况。长期处在高温、高湿、强振动或者高粉尘这样的恶劣环境当中，PLC 的老化速度就会远远超过标准实验室环境下所预料的寿命。对系统的日志数据进行深入分析，研究偶发性故障出现的频率，查看有无无故停机、I/O 点突然跳断等现象。这些非致命的、频繁出现的异常，是电子元器件接近寿命终点的信号。借助设备健康度评分模型，把物理检测数据同运行日志数据融合起来，就可以对系统老化程度实施量化评判，进而决定是继续维修使用，还是由于可靠性太低而选择整体更换。

（二）技术淘汰与备件停产风险

工业自动化领域技术更新速度比设备物理寿命要快得多，技术淘汰的风险已经成为生命周期评估时必须重视的外部因素。由于芯片制造工艺进步以及通讯协议的发展，PLC 厂商一般会在产品生命周期内发布该产品的生命周期状态，正

常销售、限制销售直至停产服务。设备一停产，原厂备件就很难买到，价格由于稀缺而翻了倍，官方的技术支持和固件更新服务也停止了。这就意味着系统一旦出现问题就无法解决。

企业要和主要 PLC 供应商联系，了解其产品路线图和停产通知。风险评估不能只盯着主机，还要看看周边的扩展模块、特殊功能卡和配套的编程软件。有时候硬件还可以运行，但是陈旧的编程软件不能在新系统上安装，从而造成维护工作无法开展，这也属于一种隐性的技术淘汰。已经列入淘汰清单的系统，要提前做最后一次采购或者寻找经过认证的替代品。风险评估报告里要注明这个系统不可持续，给管理层的改造决定发出预警。

（三）系统升级与改造的时机选择

选择恰当的系统升级与改造时机，是一项需要综合考量生产计划、技术紧迫性与资金预算的复杂决策。

1. 利用生产线计划性大修的窗口进行升级是最稳妥的办法。此时机械设备的停机维护已经包含在计划之中，更换 PLC 系统也能防止因设备停止运转而产生更多的损失。以年度检修或者淡季停产为契机，进行控制系统迁移，可以有充足的时间拆除旧设备、安装新柜、联合调试，从而降低工期紧张造成接线错误或者逻辑漏洞的风险。

2. 当现有系统备件获取成本已经大于新系统投资的一定比例，或者故障频发造成的生产损失已经接近改造费用的时候，就是被动但是必须进行改造的时机。此时旧系统的边际效用已经为负，立即启动改造虽然会有短期的阵痛，但从长远看是最优的止损方式。

3. 配合工艺改良或者产能扩充而进行的升级也属于常见的一种情况。新的生产工艺需要更复杂的运动控制算法、更快的总线通讯速度或者更强数据采集能力时，旧的 PLC 已经无法满足要求，这时升级改造就成为工艺革新的必要前提。以需求为导向的升级更容易获得企业资金的支持，因为它直接关系到生产力的提高。

第五节 典型行业维护案例解析

工业自动化系统在全生命周期里，维修工作占据着非常重要的位置。面对复杂多变、瞬息万变的工业现场环境，保证生产连续性、安全性的前提下，必须依据不同的行业工艺特点、设备结构制定出精确有效 PLS 故障诊断和处理办法。本节主要对制造业、过程工业典型维护案例进行分析，目的是找出其故障机理并提出解决办法。

典型行业 PLC 维护案例汇总

行业	案例名称	主要问题表现	根本原因	关键解决方案
制造业	汽车生产线 PLC 故障快速抢修	安全光栅误报，生产线停机	屏蔽双绞线机械磨损，与动力线高频耦合；常规万用表无法捕捉瞬时干扰	更换高柔性屏蔽电缆，物理隔离布线；PLC 软件滤波（10ms 延时）
制造业	注塑机液压系统与 PLC 联动故障	产品飞边、尺寸超差；压力剧烈振荡	电子尺信号线绝缘老化，受加热圈干扰；PID 算法因错误反馈而误判	更换双层屏蔽信号线，避开热源；加装 RC 滤波器，优化 PID 参数
过程工业	化工厂 PLC 控制系统接地故障排查	模拟量数据瞬间归零 / 跳变	双端接地错误，地环流干扰；地网电位不平衡	严格执行一点接地原则；切断现场屏蔽层接地；控制接地电阻
过程工业	污水处理仪表与 PLC 通信中断处理	在线仪表频繁通信中断，影响风机调节	RS485 总线手拉手拓扑无终端电阻；接线端子氧化腐蚀	总线末端加装终端电阻；接线盒除锈涂胶；适当降低波特率
过程工业	热电厂 DCS 与 PLC 接口故障分析	DCS 无法发送指令，反馈状态严重滞后	OPC 客户端扫描周期短，数据点多导致瓶颈；心跳信号超时	数据点按重要性分类扫描周期；优化心跳检测逻辑（容错计数器）

从上表可知不同的工业场景中 PLC 故障不同，解决方法也不同。接下来就是对上述案例进行具体的剖析。

一、制造业维护案例

制造业自动化生产线有动作节拍快、逻辑关系错综复杂、伺服定位精度要求高等特点。PLC 在这里一般起到运动控制以及逻辑顺序控制的作用。PLC 一旦出现故障，很容易造成整条生产线的停机，造成巨大的产能损失。本文主要从汽

车制造、精密注塑两个具体的场景来分析 PLC 系统在制造业中的维护策略。

（一）汽车生产线 PLC 故障快速抢修

汽车总装车间或者焊装车间一般都会配置高水平的柔性生产线，在其中大量使用机器人、输送带、夹具等各种执行机构。在某大型车企的侧围焊接工位上，由于突发性停机造成整个焊装线停机。故障表现为 PLC 控制柜内 CPU 模块运行指示灯亮，但是外部 HMI 界面却显示安全光栅触发报警，复位无效。维护人员介入后立即查询 PLC 内部输入映像寄存器的状态，发现对应的安全光栅输入位一直处于断开状态，而现场并没有人员或者物体遮挡光幕。由于该生产线处在强电磁环境中，焊接机器人工作时产生的大电流很容易对低压控制信号产生干扰。

技术人员用示波器捕捉该输入通道的信号波形，发现电弧焊启动时，信号线上出现了非常高的尖峰电压脉冲，强烈地表明现场信号电缆屏蔽层失效或者接地不良。经过排查发现，连接安全光栅和 PLC 输入模块的屏蔽双绞线在穿拖链的时候，因为长时间机械磨损造成屏蔽层破损，与动力电缆产生高频耦合。由于常规万用表只能测量稳态电压，不能捕捉瞬间的干扰脉冲，所以在初期排查中很容易被忽略。针对该故障，维护人员决定用高柔性、耐折弯的屏蔽电缆更换原来的电缆，做好物理隔离和分槽布线工作。同时，在 PLC 程序输入逻辑里添加了软件滤波环节，设置了十毫秒的信号确认延时来剔除纳秒级的电磁干扰脉冲，从而解决了误报警的问题，保证生产线正常运转。

（二）注塑机液压系统与 PLC 联动故障

注塑成型工艺对压力、流量的控制精度要求很高，一般采用 PLC 加比例阀的闭环控制方式对液压系统进行控制。精密电子零件的射出成型过程中经常会发现射出机跑边、尺寸偏差等各类质量问题。操作员反馈设备在合模、射胶时抖动明显，压力也跟着波动。初步检查发现，液压站油压表读数显示高压锁模阶段的系统压力不能达到设定的值，在一定的范围内剧烈震荡。PLC 的模拟量输出模块给比例放大板发出 0 到 10V 的电压信号，用以控制比例溢流阀的开口度。技术人员在线监视 PID 运算模块的输出值会不规则的跳变，使得比例阀芯来回动作，造成油压不稳定。

由于机电液耦合故障复杂且相互影响，所以维护团队用分段隔离的方法来进行检查。断开 PLC 与比例放大板的连接，用高精度信号发生器直接给放大板输入恒定电压信号，发现液压系统压力立即稳定下来，排除了液压执行机构、放大

板的硬件故障可能性。接着就把排查的重点转向了 PLC 模拟量输出通道以及反馈回路。结果发现安装于注塑机动模板上的电子尺信号线有绝缘老化的现象,而该线路又恰好经过加热圈供电的区域。加热圈频繁的通断,在传感器线路中就会产生杂波干扰,造成 PLC 所采集到的位置反馈数值跳变。由于 PID 算法利用位置和压力反馈偏差来调整,错误的会使 PID 算法发出不断的修正指令,造成系统出现振荡。

为了彻底消除这个故障,维护人员重新敷设了带双层屏蔽的传感器信号线,并保证电缆线路避开高温加热区和大电流动力区。在 PLC 模拟量输入通道上加装了硬件 RC 低通滤波器,在软件上优化了 PID 参数,适当增大了积分时间常数,使系统对高频噪声不敏感。经过上述一系列的改进之后,注塑机的压力控制曲线又变得平滑起来,产品合格率也恢复到了标准水平。

二、过程工业维护案例

过程工业,如化工、电力、水处理等,生产过程连续,工艺变量间联系密切,安全可靠要求高。在此类系统当中,PLC 的维护并不仅仅是逻辑控制本身的维护,还要兼顾仪表通信,系统接口以及本质安全等诸多方面。

(一) 化工厂 PLC 控制系统接地故障排查

大型石油化工企业聚合反应装置控制系统大多采用冗余结构的高端 PLC。雷雨天过后,中控室操作站的温度、压力等模拟量数据时常出现瞬间归零或者满量程跳变的异常现象,对反应釜的正常运转造成严重威胁。仪表维护人员到现场对变送器进行校验,没有发现单体故障。测量 PLC 控制柜内 24V 直流电源时,发现负极对地的电压中存在不稳定的交流分量,最大可达几十伏。这就清楚地表明系统存在严重的接地故障或者电位差干扰。化工生产现场一般分布范围广,仪表电缆要长距离传输。如果现场仪表外壳接地和控制室 PLC 机柜接地之间有电位差,就会在信号回路中形成地环路电流。

进一步分析可知,现场部分仪表屏蔽层在接线箱处接地,在控制室一端又接到机柜汇流排,造成双端接地的错误接线。当雷雨天气造成大地电位波动,或者附近大功率电机启动引起地网电位不平衡的时候,强大的地环流就会通过屏蔽层耦合到信号芯线上,严重干扰正常的 4-20 毫安模拟量信号。更严重的是会造成 PLC 模拟量模块输入通道隔离层被击穿。维护人员马上制订修正方案,依照一点

接地准则开展。具体的措施有：断开现场仪表屏蔽层的现场接地，只保留控制室一侧的接地；将控制系统逻辑地、屏蔽地、安全保护地在总接地排上进行等电位连接，并将接地电阻控制在欧姆级以下。经过这次的整改，系统的抗干扰性有了很大的提高，数据采集也变回了正常状态。

（二）污水处理仪表与 PLC 通信中断处理

现代污水处理厂大都使用分布式控制结构，大量的水质分析仪表（溶氧仪、污泥浓度计等）采用现场总线与主 PLC 进行数据交换。在某污水处理厂二期工程中，曝气池区域多台在线仪表经常出现和 PLC 通讯中断的情况，造成曝气风机不能根据实时溶氧量自动调节风量，影响出水水质。该系统用 RS485 物理层上面的 Modbus RTU 协议进行通信。表现为通信链路时断时续，有时还要重启仪表电源才能恢复。技术人员使用串口调试助手检测总线数据时发现数据帧里 CRC 错误以及帧结构异常的数量很多。

对物理链路进行排查后发现，RS485 总线使用了手拉手的拓扑结构，在总线末端没有接入终端电阻。当通信波特率高、传输距离远的时候，信号在电缆末端就会产生反射波，反射波与入射波叠加会造成信号波形失真，产生误码。由于污水处理场地的环境湿度较大，部分室外接线盒的接线端子发生氧化腐蚀，造成接触电阻增大，信号衰减严重。维护人员立即在总线最远端的仪表处并联上了 120 欧姆的终端匹配电阻，以消除信号反射。之后对所有的室外接线盒进行除锈处理，涂刷导电膏和防水胶，保证连接的可靠性。为了提高系统的稳定性，把 PLC 的通信端口的波特率由原来的 9600bps 改为 4800bps。虽然牺牲了一定的数据刷新速度，但是极大地提高了系统在恶劣环境下抗干扰能力以及通信成功率。

（三）热电厂 DCS 与 PLC 系统接口故障分析

热电厂辅助车间的输煤、化水、除灰等子系统一般使用独立的 PLC 进行控制，全厂协调控制由 DCS 完成。两者之间的通信接口就成为故障高发区。某电厂输煤程控系统的 PLC 与主厂房 DCS 之间，采用硬接线和软通信相结合的方式。当机组满负荷运行时，DCS 操作员不能给输煤 PLC 发送上煤指令，同时 DCS 画面上输煤设备的反馈状态也严重滞后。硬接线信号负责关键跳闸连锁，经过检查确认工作正常，因此问题出在负责大量数据监视和非关键控制的以太网通信链路上。

经过对通信协议以及网络架构的分析得知，PLC 与 DCS 之间主要依靠 OPC 服务器来进行数据交换。因为 DCS 侧 OPC 客户端扫描周期过短（设为 500 毫秒），

而输煤 PLC 侧的数据标签点数达到数千个，造成网络带宽和服务器处理能力出现瓶颈，数据包拥塞、丢包。双方的握手信号也有问题，原来设计的心跳信号在通信负载过重时会出现翻转超时，进而导致 DCS 侧通信故障报警逻辑被触发，最终闭锁控制指令的下发。

技术人员接着对数据点按重要性进行分类管理。对电流、温度等变化缓慢的模拟量，将扫描周期设置为 2 秒；对开关量状态等需要较高刷新频率的数据，仍按原来的速度。并且对心跳检测逻辑进行了优化，加入了一个容错计数器机制，只有连续几次检测不到心跳跳变的时候才判断为通信中断，这样有效避免由于网络瞬时抖动而造成的误报。通过软硬件相结合的一整套改善手段成功地打通了信息孤岛，保障了全厂管控一体化的畅通无阻。这也给我们敲了个警钟，在解决异构系统互联故障的时候，光看物理连通性是不够的，还得把数据交互机制、流量负载这些特性算进考虑的范围里。

第十章 PLC 技术未来发展与行业展望

伴随着第四次工业革命浪潮一波接一波地席卷全球制造业，作为工业自动化“大脑”的可编程逻辑控制器正处在技术变革的十字路口。本章会分析传统控制技术怎样冲破原有的束缚，依靠新兴信息技术来重新塑造自己的形态和功能，并对未来行业走向作出预测。

第一节 工业 4.0 与 PLC 技术演进

工业 4.0 不只是一个制造的概念，它更是一种变革，是制造方式、业务流程和价值链条的变革。在这个过程中，传统自动化层级的界限渐渐消退，现场控制层的关键设备得在实时性，开放性以及智能化之间寻找到新的契合之处，才能符合愈加繁杂的生产需求。

一、工业 4.0 的核心诉求

新一代工业革命提出了很高的要求，要求制造系统具有很高的灵活性、资源利用率、市场快速反应能力。宏观目标落实到具体的实施层面，就变成底层控制系统的三个主要要求，促使控制技术由简单的逻辑执行转变为数据驱动的综合管理。

（一）信息物理系统的构建

高效 CPS(信息物理系统)是智能制造的前提，它把计算、通信、控制技术融合在一起，达到物理空间和数字空间实时映射及交互。传统的控制设备只执行单一的逻辑指令，在 CPS 架构中，控制单元还要起到数字孪生底层数据源的作用。这就表示控制器要对现场传感器数据执行高频采集，在本地创建物理对象的数字化模型，随时展现设备的运行情况，能耗水平以及健康状态。

物理实体和虚拟模型之间就形成一个双向闭环。控制器将实时的物理数据传到虚拟空间，进行仿真分析得到优化决策后返回到控制器再精准调节物理实体。

这就要求底层硬件有着非常大的数据吞吐能力和边缘计算能力，要在毫秒的时间尺度内完成感知、分析、决策、执行这样一个闭环。如复杂数控加工中心中系统要根据振动数据实时调整切削参数，就是逻辑控制和物理模型的实时运算。

数据创建的时候，准确性与同步性都是非常关键的。为了保证数字孪生体可以真实的反映物理实体的状态，控制系统要解决多源异构数据的时钟同步问题。不同的传感器、驱动器以及视觉系统运行在不同的时间基准上，控制器作为时间主站要给采集到的数据加上准确的时间戳。只有依靠精准的时间、空间基准，上层应用才能对生产过程有更深刻的洞察和优化。

（二）横向与纵向集成

工业 4.0 所要追求的全方位集成，就是要消除传统工业体系中存在信息孤岛现象，达到数据能够无障碍、无缝隙地相互链接。纵向集成指的就是企业内部各层级之间的打通，即从最底层的现场层、控制层开始向上延伸到制造执行层乃至企业资源计划层。控制设备不再成为封闭的、看不见的数据节点。生产订单可以直接下达给产线控制器，而产线的实时产量和质量数据也可以实时上传到管理系统，从而消除了中间环节的人工统计和传递延时，使管理层可以对实时生产情况做出及时的调度决定。

横向集成就是价值链上各企业之间、各生产环节之间的深度整合。这就需要生产设备具有更高的互操作性，能够直接与上游的物料供应系统、下游的包装物流系统进行数据交换。

1. 在这样的集成模式之下，控制器必须要支持某种标准的通信协议，才能够使得不同厂商生产的设备彼此之间可以相互连接。当上游工序出现延误的时候，信息会自动传递给下游单元，使得下游单元自动进入待机节能模式，从而优化整条产线的能效和生产节拍。

2. 跨企业横向整合实现了大规模定制。消费者的个性化需求数据可以直接送达工厂的控制系统，从而驱动生产线自动地切换配方、模具、加工工艺。动态生产模式要求控制器有很高的柔性，可以对外部输入参数进行瞬间重构控制逻辑，不需要停机重新编程。

（三）产品全生命周期管理

产品全生命周期管理要求把数据的价值延续到产品的设计、生产、使用、维护乃至回收的每个环节。在这个理念之下，控制系统产生的数据既可以为当前

生产服务，也能做产品改进的依据。生产过程中控制器记录的每一个工艺参数，比如温度曲线、压力峰值、扭矩历史等，共同组成了每件产品的电子病历。产品投入市场之后，将生产数据同售后反馈的质量数据加以关联分析，有益于研发人员追查质量问题的来源，不论是设计缺陷还是工艺偏差，均能指导下一代产品的改善。

就生产设备自身全生命周期的管理来说，智能化的控制单元起着决定性的作用。经过长时间观测关键部件的运行情况，比如电机电流有细微变化，气缸动作时间慢慢变长等等，就能形成起设备健康衰退模型。基于数据的预测性维护取代了传统的预防性维护，使得工厂只在必要的时候更换部件，大大降低了备件库存成本，也避免了因意外停机造成的损失。

数据流闭环形成后，设计制造就从原来的割裂状态转变为协同的状态。研发部门用控制系统返回的实际运作数据去修正设计模型，制造部门按照设计变更迅速改动控制参数。这样一种设计和制造相互配合、不断更新的模式，大大缩短了新产品上市的时间，极大地提高了企业面对变化的市场时的竞争力。

二、PLC 技术的演进方向

为了满足工业 4.0 所提出的要求，可编程逻辑控制器技术正在发生五十年来最剧烈的变化。它正在摆脱单一逻辑控制器的限制，向着综合自动化平台，集计算、通信、控制于一身发展。PLC 技术在工业 4.0 背景下的发展走向见下表所示。

PLC 技术演进方向概览表

方向	核心转变 / 特征	主要影响 / 优势
从“控制器”到“智能边缘节点”	具备数据处理、边缘计算及 AI 推理能力	提升响应速度、可靠性，实现复杂自适应控制
IT 功能与 OT 功能的深度融合	操作系统混合化，通信接口多样化，内置安全机制	丰富应用生态，简化互联，增强系统安全性
软件定义的自动化硬件	逻辑与硬件解耦，虚拟控制器，功能应用化	提高系统可移植性、复用性，降低维护成本，灵活定制
开放生态与标准化接口	OPC UA、时间敏感网络等标准应用，PLCopen 标准功能块，开源协同	消除信息孤岛，降低集成成本，加速创新，提升知识资产传承

（一）从“控制器”到“智能边缘节点”

传统的控制装置主要是对输入输出信号做布尔逻辑运算，核心任务就是保证

动作的准确性、时序的严谨性。伴随着工业物联网的兴起，大量的现场数据被产生出来。如果把所有的原始数据直接传到云端进行处理，会占用大量的网络带宽，也会产生不能忽视的传输延迟以及数据安全隐患。因此，控制装置正向智能边缘节点转变，有很强的数据处理能力。它既要实现控制逻辑，又要对数据做源头清洗、过滤、聚合、特征提取，只把有用的信息传给上层系统。

新一代控制器内嵌有机器学习的推理引擎，因此它就是真正意义上的智能边缘节点。这就意味着人工智能算法不再只是存在于云端服务器之中，而可以直接部署到距离设备最近的控制单元当中。高速视觉检测场景下，控制器可以直接运行深度学习模型进行缺陷识别，可以在几毫秒内将不合格产品剔除出去，无需等待云端算力判定之后再行动作。加快了系统的响应速度、提高了系统可靠性，从而可以使得复杂自适应控制策略可以在现场被实现。

硬件架构升级给这一角色的转变打下了物质基础。多核处理器使控制任务与计算任务可以在不同的核心上并行进行，互不影响。一个核心做高实时运动控制，另一个核心执行复杂的分析算法或者数据库服务。异构计算架构保证在加入智能化功能的情况下，不会破坏工业控制所必须的确定性、稳定性，实现了信息技术和运营技术的硬件融合。

（二）IT 功能与 OT 功能的深度融合

信息技术同运营技术的融合不再只是停留在概念上，而是已经渗透到控制器的操作系统以及软件架构当中。传统的专用实时操作系统正慢慢变成能兼容通用操作系统的混合类型。现代控制器一般会保留一个硬实时内核，并且上面运行 Linux 这样的通用操作系统环境。开发者可以在控制器上运行 Python 脚本、Docker 容器、各种开源数据库，工业控制的应用生态变得非常丰富。工程师可以利用高级语言编写数据分析程序，并与 IEC 61131-3 标准控制的逻辑很好地融合在一起。

网络通信技术融合程度越来越高。以太网已经渗入到现场层，新一代控制器甚至把 Web 服务器、MQTT 客户端、RESTful API 等典型的 IT 通信接口集成到了控制器里面。

1. 这样控制器就可以直接和云平台、移动终端、企业数据库进行通信，而不用经过复杂的中间网关。维修人员可以使用平板电脑直接访问控制器内置网页进行诊断，管理人员可以直接从企业资源计划系统读取控制器的生产数据。

2. 安全性成了融合过程中主要的考虑因素。引入 IT 功能的同时也会有网络攻击的风险,现代控制器中会内置防火墙、VPN 服务以及基于证书的身份认证机制。深度包检测技术嵌入到通信栈里面去阻止恶意指令篡改控制逻辑。这些内生的安全机制看护着工业生产的核心资产,保证它们即便身处开放互联的环境里也能受到严密的守护。

第二节 边缘计算与云平台集成

工业自动化技术日新月异,仅依靠传统的逻辑控制已经不能满足智能制造深层次的要求。边缘计算和云平台的深度融合,正成为推动可编程逻辑控制器技术跃升的主要力量。集成的模式不仅重新构造了数据流动的结构,也根本性的改变了工业现场控制逻辑以及决策的方法,把单一控制转换为了全方位智能感知。

一、边缘计算的价值

边缘计算依靠在靠近数据源头的设备端实时处理,很好地解决了云计算模式下出现的延迟和带宽瓶颈问题,给工业现场赋予了低延迟、高可靠的算力支撑。因此,经过这样的架构革新之后,可编程逻辑控制器就不再只是执行指令的控制中心,而是一个有智能分析能力的边缘节点。

(一) 数据本地处理的实时性优势

工业生产环境对时间敏感性有很高的要求,很多重要的控制任务要在毫秒或者微秒以内完成闭环。传统的云计算架构需要将现场数据传送到远端服务器进行处理,然后再把指令传回,不可避免地会受到网络延迟、抖动、路由跳数等因素的影响,不能满足高速运动控制或者精密加工等场景对实时性的要求。将计算能力下放到边缘侧,就是将可编程逻辑控制器或者边缘控制器直接连接到传感器上,对传感器采集到的数据进行采集、过滤、分析、决策等一系列操作,数据在物理传输的过程中被尽可能的缩短,从而保证了控制回路的确定性。本功能对于保证生产线的同步性、精确性、安全性有着非常重要的作用,消除了远程通信带来的不确定因素,使设备能在极短的时间内做出反应,从而保证生产连续、稳定的运行。

在复杂的自动化产线当中,像视觉检测、力觉反馈、高速伺服同步这样的应用会生成大量的数据,并且对处理的速度有着非常高的要求。依靠边缘计算,高

频、高吞吐量的数据不需要离开生产单元就可以被快速处理。智能可编程逻辑控制器内部集成的边缘计算模块,可以在几个扫描周期内完成比较复杂的算法运算,比如实时调节比例 - 积分 - 微分参数或者做轨迹规划,不需要等云端的指令。这创建了一个不受外部网络环境干扰的高速本地控制网络,即使网络出现波动,也能保证生产环节的高效率和高精度,为构建高响应速度的智能工厂打下了基础。

(二) 降低网络带宽与云平台压力

伴随着工业物联网设备爆发式的增长,工厂里安装的传感器数量呈指数级增加,产生的数据量也随之增大。如果不加筛选地将所有的原始数据上传到云端,一方面会造成大量的网络带宽资源浪费,引发网络拥塞,另一方面也会给云平台造成巨大的存储、计算压力,大大增加企业的运营成本。边缘计算作为前处理方式,可以对海量原始数据进行预处理。在可编程逻辑控制器或者边缘网关端部署数据清洗,聚合以及特征提取算法,系统只需要将清洗过后剔除噪声的数据,以及提取出的状态参数,报警信息或者统计数据上传到云端即可。

边缘计算对数据传输的优化方式

优化方式	描述	效果
数据降维	在边缘侧执行傅里叶变换或小波分析等算法,将高频振动波形转化为特征值。	数据传输量可减少数个数量级,节约带宽成本。
智能过滤	边缘节点根据预设阈值或逻辑规则过滤周期性数据。	仅在检测到异常波动或状态改变时触发上报,避免无效数据传输。
数据压缩	利用边缘侧的压缩算法打包历史数据,在保证可追溯性的同时提高传输速度。	使有限的网络资源能用于更关键的业务交互。

根据上表可知,这样分层处理的架构使数据流更加细密,云平台不会被大量的底层原始数据所拖累。相反地,它可以让人把注意力集中到宏观的数据存储和挖掘上。边缘侧做了一部分初步的计算工作,使整个工业互联网系统负载更均衡。企业在面对峰值数据流量的时候,并不需要投入巨额资金去建设昂贵的基础设施,云端计算资源也可以更好的分配给需要高性能计算的任务(比如模型训练,全局优化等等),这样既提高了数字化转型的经济性和可持续性,又降低了系统的运行成本。

二、可编程逻辑控制器与云平台协同

可编程逻辑控制器与云平台的协同工作不是简单的连接,而是在物理层到信

息层上垂直融合起来的体系。高效的数据交互和功能互补一起组成工业互联网的主干骨架，也实现了操作技术与信息技术的深度融合发展。

（一）数据上云与远程监控

现代工业结构当中，可编程逻辑控制器不再是一个孤立的信息孤岛，而是一座座通往云端的数据桥梁。可编程逻辑控制器采用 OPC UA、MQTT 等工业通信协议集成到一个开放的工业通讯统一架构中，现场设备状态数据，工艺参数，产量统计等信息经过数据包打包后实时传送到云平台。这消除了传统的监控与数据采集系统存在的地域性局限，使工厂的运转情况能被世界各地的管理人员通过网络或移动终端掌握。数据上云不仅仅只是数值的传输，它还给数据的语义做了统一的定义，使异构设备之间的数据可以被云平台所识别解析，为全厂信息的透明化打下了基础。

远程监控系统可以利用云端汇聚的数据，创建出与物理工厂完全对应的数字孪生体。管理人员可以借助三维可视化界面，对生产线的运作状况实施全面的实时监管，无论是宏观的产能报表还是微观的阀门开合情况，皆能一览无遗。跨越空间维度的监控能力，大大地提高了管理效率，能快速应对市场的变化，及时对生产计划进行灵活调整。当设备发出故障预警的时候，云平台立刻把消息送给有关的维修人员，技术专家不需要跑到现场去，只要通过远程访问可编程逻辑控制器的诊断缓冲区和在线程序，就能对故障进行定位并调整参数。远程运维模式大大降低差旅费、停机时间，设备全生命周期管理更高效、更智能。

（二）云端大数据分析与模型训练

云平台拥有接近无限的存储空间以及强大的并行计算能力，它成了工业大数据价值的炼金场。可编程逻辑控制器把历史数据上传到云端，形成了一个巨大的数据湖，里面藏有设备运行的内在规律和工艺改进的方法。云端通过使用机器学习、深度学习算法对大量的时序数据进行挖掘，找到一些只有通过人工才能发现的关联特征。分析长期振动频率、电流变化同产品质量之间那些潜在联系，云平台可以培养出比较精确的预测性维护模型，进而比较准确地预知关键部件的大致寿命。这就把原先“出了问题再修”的模式，变成了“根据状况来修”。

云端训练出来的智能模型并不只是存储在云端上，还可以通过云边协同的方式下发到边缘侧的 PLC 或者智能网关。云端用海量的历史数据做高算力的模型训练和迭代，不断改进算法的准确性；边缘侧可编程逻辑控制器用训练好的轻量

化模型做实时的推理和执行。云端训练边缘推理的闭环模式，完美地把云端计算的深度和边缘推理的速度结合起来。

当生产工艺发生变化或者外部环境发生改变的时候，云端可以对模型进行定期的再训练、更新，并且通过空中下载的方式，把最新的模型版本推送到全球各地的工厂设备上。持续进化着的智能系统使工业自动化系统具有了自我学习、自我优化的功能，随着时间推移，生产效率和良品率越来越高。在大数据深度赋能的情况下，可编程逻辑控制器系统也不再只是单一的逻辑执行器了，它变成了一位智慧的工艺专家，把制造业引向更高层的智能化。

（三）云原生应用与微服务架构

随着工业 4.0 不断深入，软件定义自动化程度越来越高，云原生技术开始渗透到工业控制层，给可编程逻辑控制器软件架构带来革命性的变化。传统的可编程逻辑控制器程序一般是单体式的、紧密耦合的，改变任何一个功能模块都会牵一发而动全身，软件部署和更新高度依赖特定的硬件环境。微服务架构的引入使庞大的控制程序被分解成多个独立部署、松耦合的小服务，运动控制服务、逻辑处理服务和通信服务等。微服务可以独立进行开发、测试、升级，大大提高了软件的灵活性和可维护性。

云原生技术加入以后，工业应用就有了容器化部署的能力。使用 Docker 等容器技术可以编程逻辑控制器控制软件打包成标准镜像，在不同硬件平台之间实现了“一次编译，到处运行”，从而打破硬件供应商锁定。

云原生在工业自动化中的优势

优势类型	详细描述
敏捷开发部署	开发者可在云端利用 DevOps 工具链进行代码编写、仿真和自动化测试，测试无误后可一键部署到边缘侧的可编程逻辑控制器容器中，缩短新功能上线时间，快速满足个性化定制生产需求。
资源高效管理	利用 Kubernetes 等容器编排工具，可对分布在车间各角落的可编程逻辑控制器计算资源实行集中管理、调度、负载均衡和故障自愈。
系统高可用性	当某个控制节点出现故障时，系统会自动将相应的微服务迁移到其他健康节点上运行，从而保证业务的高可用性。

云原生和微服务的结合，使工业控制系统具备了互联网软件的弹性以及迭代速度，为创建开放、灵活、可扩展的未来工业自动化平台赋予了一种新的技术途径，促使工业自动化软件工程方法发生根本性的改变。

第三节 标准化与开放性架构

工业自动化正在发生深刻的变化，由原来的封闭的专用系统向开放的互联架构转变，转变的主要动力是为了生产更灵活、效率更高。智能制造战略持续推进，传统的 PLC 封闭性越来越成为数据交流、业务合作的障碍。以统一标准为基础的开放架构不仅可以消除设备间的通信壁垒，而且给工业物联网、边缘计算、人工智能等先进技术的广泛使用打下基础，重新定义了自动控制系统的价值链。

一、技术标准的重要性

技术标准是工业自动化系统实现互操作性的基础，也是把物理世界和数字世界联系起来的通用语言。对于高度异构化的工业现场来说，缺少统一标准会造成各个自动化“孤岛”不能有效协同，严重阻碍生产数据的采集、分析和优化。通过采用被广泛接受的技术规范，行业可以创建起一个可以预知、可扩展并且具有高兼容性的生态系统，从而给企业的数字化转型创建起稳固的信任根基与技术架构。

（一）降低系统集成成本与复杂性

传统的工业自动化项目系统集成所占的预算比例非常高，并且花费的时间也非常长。其根本原因就是各个品牌、各个型号的控制器的存在严重的协议壁垒。工程师要花费大量的时间去编写专用驱动程序，做繁琐的地址映射，调试复杂的通信接口。采用统一的技术标准以后，设备之间就按照统一的接口标准以及数据模型进行连接，从而可以实现即插即用。标准化的连接方式很大程度上简化了底层硬件组网，定制化的代码编写也大大减少，项目交付时间大幅缩减。

标准化带来的一个明显好处就是降低系统维护、升级的复杂性。非标准化系统中任意一个组件的更换都会引起一系列的连锁反应，甚至造成整个控制网络瘫痪，使企业付出高昂的维修成本。而按照标准架构设计的系统，模块间耦合度低，故障排查和修复工作会更直观、高效。企业不需要再依靠特定集成商的独家知识来诊断和解决问题，内部的技术团队可以依靠标准化的文档，很快地找到问题所在。从长远看，低复杂度系统架构可以有效地降低企业全生命周期的运营成本，提高资产回报率。

（二）避免供应商锁定风险

工业自动化长久以来一直存在严重的供应商锁定状况，这是阻碍制造企业灵

活发展的一大要因。一旦企业选择了某个主流自动化厂商的硬件平台，那么它的软件升级、备件采购以及系统扩展就不得不服从该厂商的技术体系。封闭的生态系统使企业失去议价能力，不能按照自身需要选择市场上的最优、最有创新性的第三方解决方案。专有协议、私有算法像无形围墙把用户困在特定技术路径里，加大了技术迭代的沉没成本。

推行开放的技术标准才是打破僵局的唯一办法。当控制逻辑、通信协议以及数据格式都使用行业通用标准的时候，硬件设备就回归到它作为执行者的本质，不再是控制系统里的独裁者。制造企业可以依据性能、价格、服务等诸多要素，自由地从各个供应商那里采购产品，也可以随时更换，不会担心底层系统不兼容所引发的麻烦。这种自主可控的态势，会使供应商由卖硬件变成卖服务、卖更具竞争力的整体方案，从根子上改善市场竞争环境，最大程度地保护最终用户利益。

（三）促进技术创新与生态繁荣

封闭的系统架构从客观上造成了技术难以快速更新、跨行业融合也受到限制。在专有系统中，创新的门槛高，第三方开发者不能接入核心控制层，造成工业应用开发跟不上信息技术的发展速度。标准的、开放架构的出现终于结束了这种局面。依靠公开的统一应用程序接口和数据模型，自动化系统给更多的开发者敞开了大门。初创科技公司、科研机构和传统的 IT 服务提供商都可以利用标准接口开发出面向某种工业场景的算法、分析软件或者可视化软件，工业的应用数量与类型都得到了极大的丰富。

以下列举了开放架构对技术创新与生态繁荣的促进作用：

开放架构对技术创新与生态繁荣的促进作用统计表

跨领域协同创新成为常态	计算机视觉、机器学习等先进技术，无需修改底层控制器程序即可整合进控制过程，极大推动了先进技术在制造业的普及。
知识与经验的复用	工程师可以将成熟的控制策略作为标准功能模块，在不同项目和平台间灵活复用，避免重复开发，提高行业工程效率。
良性生态竞争机制的产生	在开放架构下，硬件制造商、软件开发公司及系统集成商各司其职，共同推动整个产业链价值提升，形成繁荣的应用生态。
人才培养与流动加速	通用技术标准的出现，降低了自动化工程师的学习曲线，无需学习各种专有技术，使人力资源配置更加合理。

二、开放自动化实践

开放自动化的理想，正在被一系列具体的工程实践转化为现实的生产力。通

信协议成了软件工程范式,应用部署方式也发生了变化,工业现场正在开展全方位的数字化转型。不仅可以解决长期以来困扰行业的互联互通难题,还可以给建设敏捷、智能、弹性的未来工厂提供行之有效的方法和工具,使自动化系统具备像 IT 系统一样快速迭代、持续进化的本事。

（一）OPC UA 作为统一通信架构

开放平台通信统一架构早已超出通信协议范畴,在工业自动化领域已经成为了通用的一种互操作性标准。与传统的现场总线不同,OPC UA 不仅定义了数据怎样传输,更重要的是定义了数据的含义以及上下文。OPC UA 内部的信息模型可以使得机器间不但可以交换二进制数据,也可以互相理解数据的含义以及结构。温度传感器传输的不再只是简单的数值,而是一个包含了单位、量程、报警限值、设备状态等信息的一个对象。语义互操作性完全打破了异构系统之间数据孤岛的现象,上层 IT 系统可以不用特定的驱动程序直接读取、解析下层 OT 设备的数据。

安全性也是 OPC UA 架构的又一主要优点。随着工业网络安全威胁越发严峻,OPC UA 把企业级安全特性例如基于证书的身份认证、消息加密、消息完整性签名等集成到了协议层。这就意味着数据离开设备之后就处于严密的保护之中,直到到达最终的接收端。OPC UA 依靠自身的内生安全特性,可以穿越防火墙做到工厂与工厂之间、地区与地区的远程监控以及云端的连接,给工业物联网的构建赋予了可信的通信根基。

随着时间敏感网络技术的加入,OPC UA 正朝控制器之间的实时通信方向发展。OPC UA over TSN 出现以后,克服了传统以太网在确定性、实时性方面的缺陷,使得标准以太网可以承担起运动控制等高实时性的任务。这说明以后工厂网络将不再需要各种专有实时总线的存在,单一融合开放的网络架构会覆盖传感器到云端的所有链路通信需求。极大地简化了网络布线、维护,消除了数据纵向贯通、横向协同的障碍,在开放自动化实践里确立了核心枢纽的地位。

（二）硬件无关的软件工程

实现硬件无关性是开放自动化追求的又一终极目标,控制软件的生命周期不再被某一个特定的硬件载体所限制。在传统模式下,PLC 程序的编写与某一厂商的指令集和地址空间紧密相关,一旦硬件停产或者更换品牌,之前编写的成熟控制代码就会变成废弃资产,必须重新开始编写。现代的开放自动化实践借助硬件抽象层以及运行时环境,把控制逻辑同硬件平台分离。工程师可以使用符合 IEC

61131-3 或者 IEC 61499 标准的通用编程环境来进行开发，生成的代码可以在任何安装了兼容运行时的工业 PC、嵌入式控制器或者树莓派上运行。

这种工程范式转换产生了很大的经济效益和灵活性。企业可以将核心工艺算法打包成标准化的软件组件，这些组件就是企业的核心知识产权，可以在不同的生产线、不同的工厂、不同的硬件平台上任意复用。硬件采购的选择权归用户所有，用户可以按照自己的项目预算和需求自由的购买需要的计算硬件，不需要考虑软件兼容性的问题。这也利于引入现代软件工程的最好方法，例如版本控制、单元测试和自动化部署，从而使得工业控制软件的开发质量和效率发生质的飞跃。

（三）基于容器技术的应用部署

容器技术给 IT 领域带来了巨大的成功，现在正在快速地渗透到工业自动化领域中来，彻底改变了工业应用部署和运维的方式。容器把应用程序以及所有的依赖库、配置文件打包成一个轻量级、可移植的镜像，从而保证应用在任何环境下都能够得到同样的运行效果。在工业现场上就是控制逻辑、人机界面、数据采集网关、高级分析算法等都可以被封装为独立容器，并行运行在通用边缘计算节点上。容器启动比传统的虚拟机快得多，资源占用也少很多，适合于资源有限的工业现场设备。

以下是基于容器技术的应用部署带来的主要优势：

基于容器技术的应用部署优势统计表

系统更新与维护简化	传统方式下，更新控制系统固件或应用软件往往需要停机并进行复杂的刷写操作，风险较高。通过容器编排技术（如 Kubernetes 的轻量化版本），可以实现应用的灰度发布和无缝滚动更新。新版本出现问题时，系统可瞬间回滚至上一稳定版本，最大程度保障生产连续性。
支持微服务化应用架构	复杂的单体控制程序可被拆分成多个松耦合的微服务容器，例如一个容器管理运动控制，一个管理视觉检测，一个负责向云端发送数据。这种分解使得系统各模块可以独立开发、独立升级，大大提高了系统的可维护性和可扩展性。
打破 IT 与 OT 部署壁垒	IT 开发人员熟悉的 DevOps 工具链可以应用于工业现场，实现从代码提交、自动测试到现场部署的全过程自动化。这不仅加快了软件迭代速度，也推动了 IT 技术向 OT 侧的快速转移和落地。
实现控制与计算完美融合	利用容器隔离的特性，可以在同一个硬件控制器上安全地运行实时性要求不同、安全等级不同的应用。关键任务控制逻辑运行在实时操作系统中的容器里，而数据分析与可视化应用则在普通的 Linux 环境容器里运行，两者互不干扰，大幅降低了硬件采购成本。

第四节 可持续发展与能效优化

全球工业碳排放限制越发严格，再加上能源成本一直上涨，自动化系统不再只顾着提高生产效率和质量，而是把可持续发展、节能减排这些理念放到非常重要的位置上。可编程逻辑控制器是工业现场的“决策大脑”，它的功能也从简单的逻辑执行者变成了能源管理的枢纽。由于 PLC 具有先进的控制策略和强大的数据交互能力，所以可以深入挖掘生产过程中潜在的节能空间，实现对单个设备甚至是整个生产线的能源精细化管理，进而促使制造业朝着更加绿色、低碳的方向发展。

一、绿色制造对 PLC 的要求

在绿色制造的背景之下，工业控制系统的设计思想发生了根本性的改变。控制器除了要有强大的运算能力之外，自身的能效表现、数据采集深度、逻辑优化策略、新能源兼容性等各方面都要符合严格的规范。这些要求就构成了新一代控制器技术发展的主要方向。

（一）PLC 自身的低功耗设计

工业现场常常有成千上万个控制节点，如果控制器本身的能耗不能得到有效控制，那么累积产生的碳排放量就无法忽视。新一代控制器的硬件架构越来越向超低功耗方向发展，芯片的选择越来越偏向于高能效比的处理器，在保证运算速度的前提下，大大降低热功耗。硬件工程师们还给电路加入了一种动态电源管理技术，可以依照负载的变动来智能调节工作电压和频率，控制器在空载或者轻载的时候就会自行削减用电量以达成节电效果。

对于输入输出（I/O）模块的能耗情况也应该考虑进去。传统的 I/O 模块常年处在待命状态，静态电流一直被消耗着。新的设计理念则要求模块具有独立的休眠功能，在总线扫描周期内没有数据交换或者外部信号触发的时候，模块的部分电路就会通过逻辑切断供电，只留下极低功耗的唤醒侦测电路。对于汽车制造、物流分拣等有大量离散控制点的行业，可以大大减少控制柜的散热需求，从而降低机柜空调或者风扇的配置，形成节能循环。

从物理结构上来说，无风扇散热成了绿色控制器的标配。通过改善内部 PCB 布局及导热材料，采用自然对流散热方式，取代容易损坏的能量散热风扇这个机

械部件，从而达到延长设备在恶劣环境下使用寿命的目的。设备的长寿命本身就是对可持续发展的一大贡献，因为设备的长寿命可以大大减少由于设备过早报废造成的电子垃圾，完全符合全生命周期的绿色制造理念。

（二）对生产过程能耗的精确计量

实现节能减排的前提是拥有全面准确的能耗数据，这就要求控制器具有直接或者间接的能源计量能力。传统的能耗统计大多依靠独立的电表系统，数据和生产逻辑是分开的，不能准确分析各个工序的能耗水平。现在的控制系统要求在 I/O 层就集成电量测量功能，采用专门的能源测量模块，使得控制器可以像读取温度、压力信号一样，随时获取各个支路的电压、电流、功率因数、谐波畸变率等电气参数。

嵌入式计量方式最大的优点就是它具有很高的时间同步性。控制器能把能耗数据同生产节拍准确对应起来，可以记录每一个动作、每一个工件加工时瞬时功率变化的数据。系统可以根据工序或者单件产品生成能耗身份证，便于管理者找到生产过程中的能源刺客。例如一条自动化冲压线，在成型瞬间的峰值功率上对比不同批次原材料，就可以分析出材料硬度波动对设备能耗的影响，给工艺改进提供无可辩驳的数据支撑。

（三）基于能耗数据的优化控制

获得数据的最终目的是为了优化控制。控制器要具有处理大量能源数据的能力，把能源数据转变成实时的控制策略。不再是简单的阈值判断了，而是变成了一个复杂的算法模型和多变量耦合控制的过程。控制器里面运行的逻辑程序加入了能源管理算法，可以按照实时电价、电网负荷和设备工况来改变生产速度。

1. 峰值负荷管理策略

电力需求侧管理对于工业生产来说十分重要。控制器实时检测全厂或者某个区域的功率，一旦预测到功率即将超过设定的需量阈值，就会立即介入。它不会简单粗暴地拉断电源，而是根据事先设定好的优先级表，对大型加热炉、冷冻水泵这些高惯性设备实施短时的功率限制或者暂停。因为该类设备热惯性或者机械惯性较大，短时间内功率降低不会影响最终产品质量，但是可以有效削减尖峰负荷，帮助企业规避高昂的需量电费。

2. 动态工序调度与参数自适应

控制器可以按照能耗反馈来调节工艺参数。在注塑或者压铸行业当中，如果

系统发现当前模具温度保持所需要的加热功率出现异常升高情况，控制器会根据环境温度数据决定是否调节冷却水流量，或者优化加热周期的占空比。控制器依据各个工位能耗效率比开展分析，将生产任务优先安排给能效比更好的设备单元，对于非瓶颈工序，在自动减少设备运行速度的同时，保证完成既定产量，以最省能耗的方式进行“按能效生产”，而不仅仅是为了“按时生产”。

二、能效优化解决方案

把理论上的绿色要求转化为工程实践的价值，需要具体的方案来承载。在工业自动化实践当中，控制器同驱动技术以及传感技术相互融合，从而产生出许多成熟的能效优化模式。这些模式既可以节约成本又可以提升系统的智能水平。

以下能效优化模式的特点和优势总结如下：

能效优化模式对比表

模式	核心技术	优化目标	典型场景	预期节能量
变频器与 PLC 协同	变频调速、现场总线	负载适配、运行效率	流体输送、多电机传动	10%-30%
智能休眠与唤醒	全线感知、实时调度	消除空载损耗	离散制造、装配线	显著消除待机能耗
能量回馈系统	共直流母线、有源前端、超级电容	回收再生能量、电网缓冲	起重机械、高频启停设备	单机可达 40% 以上

从上表可以看出，不同的能效优化模式各有侧重，共同构成了现代工业节能体系的重要组成部分。

（一）变频器与 PLC 的协同节能控制

变频技术是工业节能的基础，而控制器和变频器的紧密配合又把这种节能效果推向了新的高度。传统的控制方式中控制器一般是用模拟量信号给定频率，变频器被动接受，二者之间没有深入的信息交流。先进的能效解决方案用高性能现场总线把所有设备联起来，控制器就能随时得到电机的转矩电流、输出功率、负载率这些重要参数。

流体输送系统里，协同效应更加显著。以中央空调系统的循环泵控制为例，采用传统的恒压供水方式会造成极大的能源浪费。引入协同控制之后，控制器除了监测管网压力之外，还会依据末端空调机组实际开启的数量以及热负荷的需求，经由繁杂的 PID 算法运算得出系统最理想的流量点。控制器发给变频器的指令不

再只是简单地改变频率，还会实时调整变频器的加减速时间、转矩提升曲线甚至载波频率，使电机一直运行在最高效的区间。

多电机传送带系统采用协同控制可以实现自动平衡负荷。控制器检测主从电机的实时力矩，发现某台电机负载过轻造成效率下降的时候，就会改变整个驱动组的速比分配，或者在低速运行阶段令部分驱动器进入休眠状态，只用少量的电机来维持运转，避免出现大马拉小车的低效情况。根据负载的感知调节可以发掘出传统开环控制所不能达到的节能区域，一般可以带来 10% 到 30% 的额外能效改善。

（二）待机设备智能休眠与唤醒

工业产线并不是一直都在满负荷运转，物料不足、上游工序出现故障或者下游堵塞都会造成局部设备出现等待的情况。以往的做法是使设备空转或者“热待机”，造成大量的无效能源浪费。智能休眠和唤醒方案依靠控制器对全线的感知能力，建立起类似计算机操作系统一样的电源管理系统，根据生产节拍预估，实现设备的自动启停。

本方案的关键就是对唤醒时间的准确控制。控制器依靠工业网络实时追踪工件所在位置及流向，当检测到上游工件距离当前工位还有一段距离的时候，就会预估设备预热或者启动所要花费的时间。当预计的等待时间远远大于设备重启的时间时，控制器就果断地切断伺服驱动器、加热器、传送带电机、人机界面等设备的电源，使设备处于深度休眠状态。

工件接近或者上游故障排除信号发出之后，控制器就会提前发出唤醒指令。这不叫通电，按照设定好的时序逻辑，逐级打开各个子系统，防止瞬间产生大电流冲击电网。当机器人处在等待焊接指令的空闲时间段内时，控制模块会向机器人伺服系统发送关闭励磁的指令，仅保留编码器的电源；当传送链发出信号之后，机器人能在毫秒级的时间里重新激活励磁，进入工作状态。在不影响生产节奏的前提下，智能休眠模式可以消除大部分空载损耗，达到人走灯灭、料断机停的节能效果。

（三）能量回馈系统的控制

起重机械、离心机、高频次启停的伺服系统、下行皮带运输机等设备在制动或重物下降时会产生大量的再生能量。传统的办法是把这部分电能转换成热能消耗掉，既浪费能源，又加重了控制柜的散热负担。基于控制器能量回馈系统控

制方案，目的就是将这部分再生电能回收利用，变成可以供其他设备使用的清洁电源。

1. 共直流母线技术的逻辑调度

在多轴运动控制系统当中，控制器对各个轴的运动时序进行调配，使得发电状态的电机与电动状态的电机分时错峰或者同步运转。利用共用的直流母线，制动力直接供给需要加速的轴，在系统内完成能量自平衡。控制器算法的作用是防止母线电压过高而触发保护，并且可以优化各个轴的动作配合，比如安排升降机下降的时候，平移机构正好处于加速阶段，从而使内部能量循环利用率最大。

2. 有源前端的并网控制

对单机功率较大或多轴同时制动产生的多余能量，控制器通过控制有源前端整流单元，将直流电逆变为与电网同频同相的交流电，回馈到厂内电网。控制器在这里起到的作用就是严格的监管，它可以实时监控电网电压波动和谐波含量，保证回馈电能的质量符合标准。电网发生故障或者电压突然下降的时候，控制器就得在微秒级的时间内把回馈通道切断，避免产生“孤岛效应”。港口起重机应用案例当中，由于回馈控制的存在，单台设备综合节电率能达到 40% 以上，控制器回馈电量的数据记录也是企业申请碳排放配额的凭证。

3. 超级电容储能缓冲控制

对于短时间高频率的能量冲击，可以在控制器里加入超级电容器作为缓冲介质。设备制动瞬间，控制器指令双向 DC/DC 变换器快速给电容充电；加速瞬间，再把电容里的能量释放出来帮忙驱动。该方案避免了回馈电网所造成的冲击，控制器用复杂算法维持电容器电压的动态平衡，既能保护电池寿命又能使能量高效利用，适合于作秒级的往复动作设备。

第五节 全球行业趋势与中国路径

伴随着工业互联网以及智能制造的持续深入发展，可编程逻辑控制器作为工业自动化的“大脑”正在发生技术架构的重塑和功能范围的拓展。在全球范围内，IT 技术与 OT 技术深度融合正在逐步打破传统的自动化封闭系统，催生出新的控制形态和服务模式。与此同时，中国制造业经历了长期引进、消化、吸收的过程之后，开始走出一条有中国特色的自主创新之路，在产业链重塑的大变局中争取

主动权。

一、全球技术发展趋势

目前，全球工业自动化技术发展大体上呈现数字化、网络化、智能化的发展趋势。传统的金字塔结构正在由扁平化、服务化的发展方向转变。新一代通信和虚拟化技术的加入，使控制器不再仅仅是执行逻辑运算的硬件黑箱，而是变成一个具备边缘计算能力、可以同大数据进行实时交互的智能节点。这就完全改变了底层控制系统的工作原理。

PLC 在技术趋势下的演进特点，可见下方的 PLC 演进趋势对比表。

PLC 演进趋势对比表

特征	传统 PLC	新一代 PLC
控制架构	金字塔形，封闭，独立	扁平化，服务化，互联
通信方式	碎片化总线协议，有线	5G/TSN，标准以太网，无线 / 有线融合
功能定位	纯逻辑运算，执行器	边缘计算，智能节点，数据引擎
开发调试	依赖物理设备，周期长	虚实联动，虚拟调试，仿真
安全策略	物理隔离，隐身式	内置安全机制，主动防御
应用场景	确定性控制，固定生产线	柔性制造，跨设备协同，预测维护
数据处理	有限，本地存储	大数据交互，云边协同，实时映射
智能水平	预设逻辑，无学习能力	AI 融合，自适应，自学习，自优化

（一）5G、TSN 等网络技术的应用

第五代移动通信技术和时间敏感网络融合以后，从根子上攻克了工业现场长久以来通信协议零散、无线联系不稳定等障碍。过去工业现场各种总线协议之间壁垒森严，造成设备互联互通的成本很高。TSN 技术在标准以太网帧里加入时间同步和流量调度机制，保证重要的控制数据在网络拥塞的时候也能有确定性的传输，进而达到控制网络和信息网络深度集成的目的。这就意味着未来的工厂不需要为控制数据单独铺设封闭的总线网络，所有的视频流、数据流、控制流都可在一根网线上和谐共存，大大简化了网络结构并且降低了布线成本。

5G 技术的出现给柔性制造提供了无限的可能。依靠超高可靠低时延的通信特性，PLC 和现场设备之间的物理连接限制被完全解除。无线 PLC 控制被移动机器人、自动导引车和需要经常改变生产线的柔性制造单元所采用。和以往工业环境中 Wi-Fi 的不稳定不同，5G 专网可以实现毫秒级的空口时延和高达 99.999%

以上的传输可靠度,使云化 PLC、集中式控制成为可能。控制算法可以往上移到边缘服务器,现场只剩下输入输出模块,这样极大地提高了算力资源的利用率,并且为跨设备的协同控制提供了良好的网络环境。

目前全球主要自动化厂商已经推出符合 TSN 标准的控制器产品,正在积极展开 5G 工业模组集成测试。新的现场级和云端级的协同控制模式正在形成,对 PLC 本地的逻辑处理能力、网络吞吐量、时间同步精度要求更高,以满足未来各种设备协同工作时这几个方面的严格要求。

(二) 数字孪生与 PLC 的虚实联动

数字孪生技术将 PLC 的应用领域从物理世界扩大到虚拟空间中,使控制系统开发、调试、运维的方式彻底转变了。传统工程中 PLC 程序的验证一般在物理设备就位之后进行,造成项目周期长、试错成本高。而现在工程师可以利用高保真的虚拟生产线,在设备实际制造之前就可在虚拟环境中编写并调试 PLC 代码。虚拟调试技术可以检验逻辑是否正确,同时也可以模拟系统在极端工况下的反应,从而在设计阶段就消除潜在的风险。

1. 全生命周期的虚实映射

PLC 正逐渐从独立的控制器角色,转变为数字孪生体里的核心数据引擎。运行阶段时物理 PLC 把传感器数据、状态参数、执行结果实时传送到虚拟模型,使得数字孪生体可以同步运行。这种实时映射的功能,让管理人员可以通过三维可视化的界面直观的观察到的生产的情况,并且可以追溯以往的故障场景,使得监控更加立体、深入。

2. 基于仿真的预测性维护

借助虚拟环境对复杂的物理模型开展仿真,并将 PLC 上传的数据加以预推,就可以对关键零部件的剩余寿命或者潜在的故障隐患做出准确的预估。数字孪生系统对于电机电流、振动数据等细微变化都能够分析出来,可以比物理传感器更早的发现机械磨损的迹象,从而告诉 PLC 调整运行参数,以此来延长设备的使用寿命,从原来的故障维修变成预测性维护。

虚实联动的趋势对 PLC 提出了更高的要求,需要它有更强的数据处理能力以及标准化的数据接口。未来的控制器会拥有更多的建模仿真软件对接协议,甚至本身就包含了轻量级的仿真引擎,可以在边缘侧对模型进行实时的对比与优化,这也是工业软件和硬件的又一次典型的融合。

（三）网络安全成为标配功能

随着 PLC 接入工业以太网甚至是互联网，它的安全威胁呈指数级增长。过去依靠物理隔离的隐身式安全策略，在万物互联的时代已经不再适用了。在全球范围内的工业控制系统勒索病毒攻击与恶意入侵事件中，PLC 是网络战的目标。因此将网络安全防御机制内嵌到控制器里，已经成为全球技术发展的必然趋势。

新一代的 PLC 在硬件设计的时候就考虑到了纵深防御的思想。芯片级的加密启动可以保证固件的完整，防止恶意代码从底层渗透进去。TLS/SSL 加密协议已经逐渐取代传统的明文传输工业协议，从而保证控制指令以及采集的数据在传输过程中具备机密性、完整性。同时实行基于角色的访问控制来避免非授权者修改重要的参数，并且还采用详细的操作日志审计功能以便追踪到任何不正常的行为。

除了被动防御之外，主动安全监测功能也渐渐被加入到 PLC 系统当中。部分高端控制器具有流量异常检测功能，可以识别出不符合工业协议标准的畸形报文和异常流量洪峰，并自动报警或者转入安全保护模式。安全功能的标配化，使安全性在 PLC 评价标准中上升到和可靠性、实时性同等重要的地位，IEC 62443 等国际安全标准的认证也成了产品进入高端市场的必要准入证。

二、中国制造业的发展路径

中国是全世界最大的制造业基地，PLC 的应用场景最丰富，市场的需求量也最大。中国本土自动化产业在长时间的“市场换技术”“跟风模仿”之后，正在走到规模扩张与质量效益转换的关口。在复杂的国际地缘政治环境以及供应链安全的挑战之下，创建自主可控、具有核心竞争力的工业控制技术体系，已经成为中国制造业发展的必然之路。

（一）国产 PLC 品牌的崛起与挑战

近些年来，中国的 PLC 品牌在小型 PLC 市场上有着明显的优势，由于其具备高性价比，灵活定制以及快速满足中国客户需求等特性，在小型 PLC 市场中占有较大的份额。在包装、纺织、电子制造这些离散制造行业，国产控制器已经可以和国际二线品牌掰手腕，甚至取代一线品牌。经过不断的研究，国内企业已经掌握了梯形图编译、运动控制算法等关键技术，产品稳定性及易用性也得到了市场的认可。

尽管中低端市场已趋于成熟，但是高端大型 PLC 在石油化工、电力、冶金等流程工业中对系统的可靠性有着很高的要求，国产产品的市场占有率仍然很低。这既是由技术累积造成的差别，又和使用者习气以及行业信赖壁垒有关。大型项目控制系统一般会有成千上万个 I/O 点，需要系统连续多年无故障运行，并且要有很强的冗余备份能力以及复杂的生态兼容性。国产厂商在这些领域的应用案例很少，缺少大规模长周期运行的数据背书，这是国产厂商实现向上突破的主要障碍。

核心元器件的供应链安全，也成了国产 PLC 面临的严峻问题。整机设计和软件算法大体实现了国产化，但是高端 MCU、FPGA、高精度模数转换芯片还依赖进口。在全球半导体供应链波动加剧的情况下，如何实现底层芯片的国产化替代，保证性能和稳定性的不降级，已经成了中国工业自动化企业必须解决的战略难题。因此上下游产业链必须联合攻关，实现芯片设计、制造封装、系统应用等各个环节的全面自主可控。

（二）从“应用”到“创新”的转变

过去几十年中国工程师更擅长于应用层面，即使用国外的 PLC 产品，用优秀的控制程序实现复杂的工艺控制。但是，随着制造业的转型和升级，单靠应用层面的优化已经不能满足智能制造的要求了。中国的制造业角色正由过去的使用者转为创新者，并努力定义出新的控制架构和算法模式。

这种创新表现在对某一行业进行深度定制，也体现在把几种算法有机融合起来。与国外的巨头提供的通用型控制器不一样的是，中国的厂商更喜欢研发专用控制器或行业工艺包。以光伏切片机、锂电池卷绕机等中国优势产业为例，国内厂商把复杂的工艺算法打包集成到 PLC 固件或者功能块中，大大降低了设备开发商的编程工作，并且有效提高了机器的运行速度。贴身服务的新的经营模式，使国产 PLC 在某些细分领域形成了独特的竞争优势。

边缘智能同人工智能的融合，同样是具有中国特色的发展道路的一大特色。依靠中国在人工智能领域的应用优势，一些创新企业正尝试将轻量级的人工智能推理模型嵌入到 PLC 中，使 PLC 具有视觉识别、自适应参数整定等智能化的功能。这已经不是简单的模仿了，而是一种主动寻找下一代工业控制新范式的行为。通过控制和计算的深度融合，给 PLC 赋予自我学习、自我优化的能力，这就是中国制造业在工业自动化领域实现“换道超车”的关键机会。

参考文献

- [1] 李树彬.浅谈PLC控制技术在工业自动化中的应用[J].机电信息, 2011(30):2. DOI:CNKI:SUN:JDXX.0.2011-30-080.
- [2] 张育.基于PLC控制技术在工业自动化中的应用研究[J].科技与企业, 2016(8):2. DOI:10.3969/j.issn.1004-9207.2016.08.094.
- [3] 刘娟.试论PLC技术在工业自动化中的应用[J].化工管理, 2014(32):2.DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2014.32.105.
- [4] 李秋菊.浅谈PLC控制技术在工业自动化中的应用[J].工业B, 2015(32):182-182.
- [5] 王丽娟.浅谈PLC技术在工业自动化中的应用[J].商, 2012(15):1.DOI: CNKI:SUN:SHNG.0.2012-15-189.
- [6] None.PLC控制技术在工业自动化中的应用分析[J].小学语文教学, 2019(1): 72-73.
- [7] 熊旻燕.PLC控制技术在工业自动化中的应用分析[J].湖南农机, 2018.DOI: 10.3969/j.issn.1007-8320.2018.01.054.
- [8] 鹿新,郑承凯.基于PLC控制技术在工业自动化中的应用研究[J]. 2018.
- [9] 王利军,白春玲,张武虎.关于PLC在工业自动化控制领域中的应用分析[J].工业 C, 2015(51):104-104.
- [10] 高亮,张文树.PLC在工业自动化控制领域中的应用及发展[J].价值工程, 2014, 33(22):2.DOI:10.3969/j.issn.1006-4311.2014.22.034.
- [11] 顾红卫.PLC技术在电气自动化中的应用[J].市场周刊·理论版, 2020(32):0212-0212.
- [12] 魏震,贾青.PLC中PID模块指令的应用[J].化工自动化及仪表, 2001, 28(3):4. DOI:10.3969/j.issn.1000-3932.2001.03.003.
- [13] 梁伟华.浅谈PLC基本指令教学[J].职业, 2012(5):2.DOI:10.3969/j.issn. 1009-9573.2012.05.023.
- [14] 高军.浅谈某机械的多种PLC编程方法[J].大科技: 科技天地, 2011(14):1.

- [15] 林洪君,张韶华.PLC功能指令的应用[J].设备管理与维修, 2007(3):2.
DOI:10.3969/j.issn.1001-0599.2007.03.020.
- [16] 詹文彬.PLC功能指令在编程中的灵活应用[J].机电信息, 2012(12):2.
DOI:CNKI:SUN:JDXX.0.2012-12-038.
- [17] 范玉刚.探索PLC控制技术的特点及发展[J].科学技术创新, 2017(5):15-15.
- [18] 王福义.自动化电气控制中PLC的应用与技术分析[J].新潮电子, 2023(10):31-33.
- [19] 张盼盼,孙路路.PLC技术在智能制造中的应用[J].造纸装备及材料, 2021(3):106-108.
- [20] 王瑶.PLC技术在电气工程及其自动化控制中的应用分析[J].新潮电子, 2024(11):115-117.
- [21] 刘媛媛,张如萍,张正和,等.基于伺服电机和PLC的工作台运动控制[J].机械工程与自动化, 2012(4):3.DOI:10.3969/j.issn.1672-6413.2012.04.053.
- [22] 侯甫坤.PLC在运动控制中的应用[J].工程与试验, 2015(A03):4.DOI:10.3969/j.issn.1674-3407.2015.z1.015.
- [23] 曾湘,段文杰.试析PLC控制系统的可靠性设计问题[J].企业技术开发, 2011.
DOI:CNKI:SUN:QYJK.0.2011-22-068.
- [24] 和德明.PLC控制系统可靠性设计[J].微计算机信息, 2016, 000(006):144,146.
- [25] 陈焕明,江淑园.PLC在等离子喷焊过程控制中的应用[J].自动化技术与应用, 2002(1):3.DOI:10.3969/j.issn.1003-7241.2002.01.018.
- [26] 赵鑫.PLC技术在电气工程及其自动化控制中的应用分析[J].精品, 2020, 000(023):P.199-199.
- [27] 杨正.浅析PLC电气系统中的故障原因与维护处理技术[J].信息系统工程, 2015(11):1.DOI:CNKI:SUN:XXXT.0.2015-11-077.
- [28] 马力.关于PLC控制系统维护及故障诊断的探讨[J].河南科技, 2013(5):1.
DOI:10.3969/j.issn.1003-5168.2013.09.060.
- [29] 李明建.PLC电气系统中的故障原因与维护处理技术分析[J].无线互联科技, 2017(13):2.DOI:10.3969/j.issn.1672-6944.2017.13.056.
- [30] 王富亮.PLC电气系统中的故障原因与维护处理技术分析[J].电子世界, 2018(6):2.DOI:CNKI:SUN:ELEW.0.2018-06-091.

- [31] 黄学先.PLC未来发展趋势浅析[J].消费电子, 2013(12):2.DOI:10.3969/j.issn.1674-7712.2013.12.003.
- [32] 叶璞.浅谈PLC的现状与未来发展[J].山海经: 教育前沿, 2021(9):0055-0055.
- [33] 张永丰.浅析PLC技术的发展现状及应用前景[J].网友世界, 2014(18):1.
- [34] 肖 锋.电气自动化中 PLC 的应用及发展前景[J].建筑工程技术与设计, 2017, 000(011):1241-1241.

