

内容简介

《机电一体化系统设计与分析方法》是一部面向新时代先进制造与智能装备发展需求，系统整合机械、电子、控制、信息与人工智能等多学科知识的高水平专业著作。本书以“系统思维”为核心，以“工程实践”为导向，全面阐述了机电一体化系统从概念提出、方案设计、建模仿真到性能评估与优化的完整技术路线，旨在为高校师生、科研人员及工程技术人员提供一套兼具理论深度与应用广度的知识体系。

全书共分十章。第一章系统介绍机电一体化化的基本内涵、发展历程、典型应用及未来趋势，明确其在智能制造体系中的关键地位；第二至第五章分别深入剖析构成机电一体化系统的四大基础模块：精密机械结构、传感与检测技术、驱动与执行机构、嵌入式控制系统，详细讲解各模块的工作原理、选型依据、接口规范及协同设计要点；第六章聚焦系统集成方法论，提出基于功能—结构映射的设计流程，并强调模块化、标准化和可重构性在现代机电产品开发中的重要价值；第七章系统讲解动态建模与仿真分析技术，涵盖牛顿—欧拉法、拉格朗日方程、状态空间模型等建模方法，并结合 MATLAB/—Simulink、ADAMS 等工具进行多域联合仿真演示；第八章专门探讨智能化设计路径，引入机器视觉、边缘计算、自适应控制、数字孪生等前沿技术，展示如何赋予传统机电系统感知、决策与学习能力；第九章通过三个综合性工程案例——高精度数控工作台、协作机器人关节模组、智能仓储搬运 AGV——完整复现从需求分析到样机验证的全过程，强化读者的系统工程能力；第十章则围绕技术经济性、可靠性、可维护性及环境适应性等维度，介绍多准则综合评价方法，如层次分析法（AHP）、模糊综合评价与生命周期成本分析，支撑科学决策。

本书特色鲜明：一是坚持“理论—方法—案例”三位一体，避免空洞说教；二是注重国产化元器件与国内工程标准的融入，增强本土适用性；三是强调跨学科融合与创新思维培养，鼓励读者突破传统设计边界。无论是作为高等院校机械工程、自动化、智能制造工程、机器人工程等专业的核心教材，还是作为企业研发工程师的技术参考书，《机电一体化系统设计与分析方法》都具有重要的学术价值与实践指导意义。



机电一体化系统设计与分析方法
Design and Analysis Methods for Mechatronics Systems

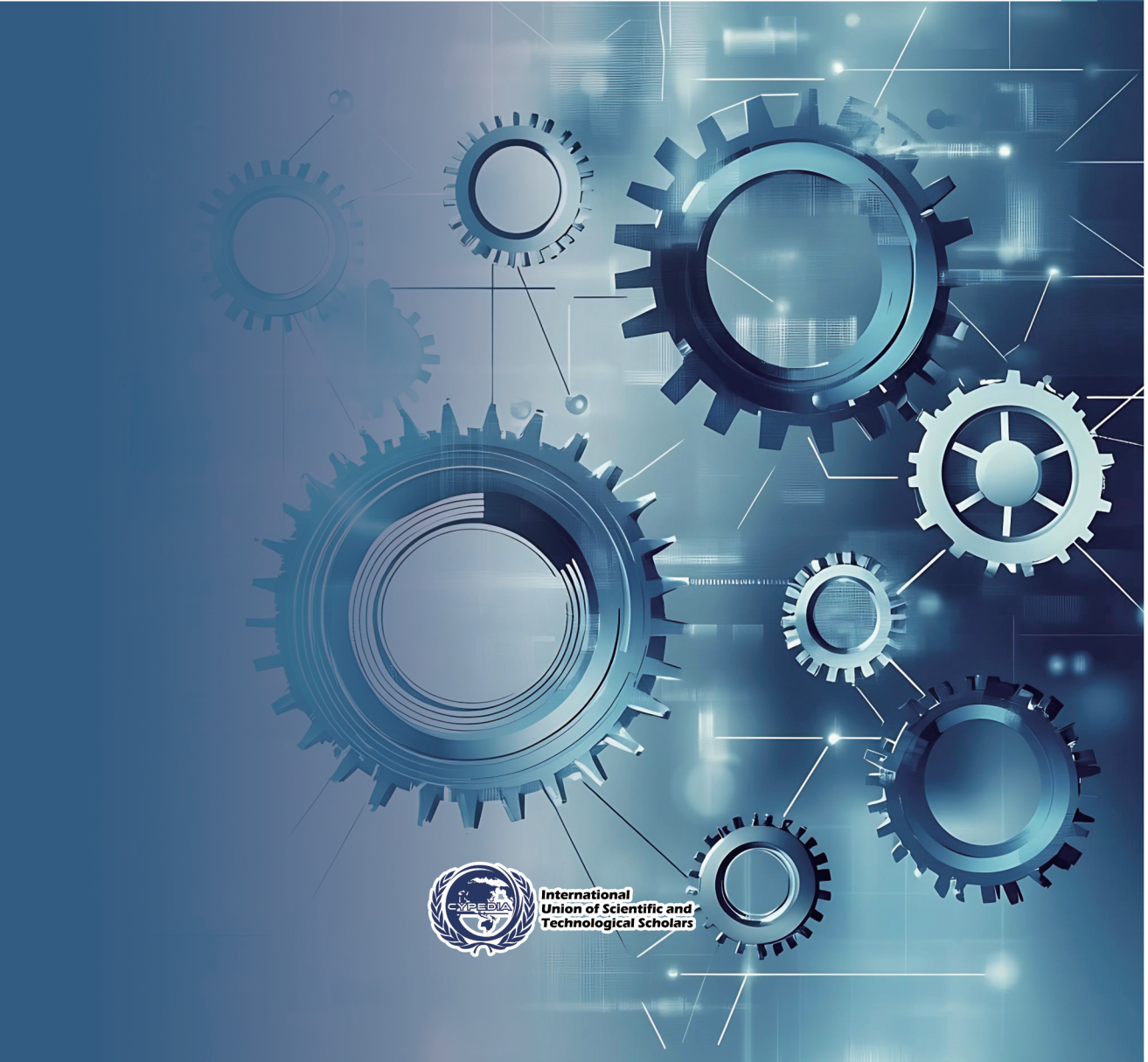
张斌 著



Design and Analysis Methods for Mechatronics Systems

机电一体化系统设计与分析方法

张斌 著



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

作者简介



一、基本情况

张斌，男，中共党员，1975 年 5 月 19 日生，湖南溆浦人。高级技师，正高级讲师，高级考评员，湖南省机械行业技能人才评价专家委员、湖南省省级专业带头人、国家高技能人才培训教师，湖南省优秀班主任、湖南省优秀教师、湖南省农民工就业工作省政府三等功嘉奖、怀化市学科带头人、怀化市首届骨干教师、怀化市首届技能大师、怀化市教学名师工作室首席名师、怀化市教育领域领军人才。

二、突出业绩与表现

参加工作 31 年以来，一直工作在机电专业教学及技能人才培养培训一线，在机电专业技能人才培养和技术传承方面做出了较大贡献，先后培养了近 4000 余名机电专业（中技）毕业生，为企业开展高技能人才培训共培训了 1786 名高级工、技师，69 名高级技师，为 3789 人企业职工开展了技能培训，培养了一批企业技术骨干及市级技术能手。先后主讲了《可编程控制及应用》、《工厂电气技术及应用》、《自动化生产线组装及维护》等多门省市级精品网络课程，主持了湖南省精品专业《工厂电气控制》、湖南省示范性特色专业《机电技术应用》、国家示范校重点专业《机电技术及应用》、湖南省卓越职业院校重点建设专业群《智能制造装备技术及应用》等近十项省级重点专业建设项目，带领专业教学团队先后开发了 1 个省级专业教学标准、1 门国家级优质网络课程、11 门省级精品课程、7 本专业技术培训教材，培养了 2 支省级专业教学团队，1 名省级技术能手、3 名市级优秀教师、3 名国家教师职业能力大赛一等奖教师、2 名省级教师技能竞赛一等奖教师。

Design and Analysis Methods for
Mechatronics Systems

机电一体化系统设计与分析方法

张斌

著



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

CIP INFORMATION

Title: Design and Analysis Methods for Mechatronics Systems

题目：机电一体化系统设计与分析方法

Author: Bin Zhang

作者：张斌

ISBN: 979-8-90040-183-6

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

Design and Analysis Methods for Mechatronics Systems
机电一体化系统设计与分析方法

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: 11.75

Word Counts: 150.000

Edition: First edition in June 2026

Printing: First printing in June 2026

**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.

随着新一轮科技革命与产业变革的深入推进，制造业正加速向数字化、网络化、智能化方向转型升级。在这一历史进程中，机电一体化作为融合机械、电子、控制、信息等多学科知识的交叉性技术体系，已成为现代高端装备研发的核心支撑。无论是工业机器人、数控机床、智能物流系统，还是新能源汽车、航空航天器、医疗设备，其背后无不依赖于高度集成、精密协调、智能响应的机电一体化系统。面对日益复杂的工程需求与快速迭代的技术环境，如何系统掌握机电一体化的设计原理、分析方法与工程实现路径，成为广大工程技术人员与高校学子亟需解决的关键课题。

正是基于这一时代背景与教育使命，我们编写了《机电一体化系统设计与分析方法》一书。本书旨在构建一个逻辑严谨、内容完整、理论与实践深度融合的知识体系，帮助读者不仅“知其然”，更“知其所以然”，从而具备独立分析、综合集成与创新设计的能力。

本书的编排遵循“由点及面、循序渐进”的认知规律。开篇从构成机电一体化系统的四大基础技术模块入手：机械系统提供结构支撑与运动传递，传感检测技术赋予系统“感知”能力，执行驱动技术实现能量转换与动作输出，计算机控制技术则担当“大脑”角色，统筹全局决策。每一模块均结合工程实例，深入剖析其设计要点、性能影响因素及与其他子系统的接口关系。例如，在伺服电机选型时，必须充分考虑机械负载的转动惯量与摩擦特性；在控制系统设计中，需兼顾传感器信号质量与执行器动态响应。这种强调整体关联性的叙述方式，有助于读者摆脱“技术堆砌”的误区，建立起真正的系统工程观。

进入中后段，本书聚焦于系统级设计方法论。我们详细阐述了从用户需求出发，经由功能分解、方案构思、建模仿真到优化验证的完整开发流程，并引入现代设计工具（如 MATLAB/Simulink）进行动态性能预测与参数调优。尤为突出的是，本书专设章节探讨智能化与网络化这一前沿方向。通过引入机器视觉实现高精度识别与定位，利用深度学习处理非线性、强耦合的控制

难题，构建具备自适应与自学习能力的智能体，使机电系统能够应对不确定环境并持续优化性能。这些内容不仅反映技术发展趋势，也为读者打开通往未来智能制造的大门。

在评价与决策环节，本书摒弃单一指标评判，倡导多维度、全生命周期的综合评估。技术经济评价法平衡性能与成本，模糊综合评价法处理主观性指标，层次分析法则为复杂多准则问题提供结构化决策框架。三种方法互为补充，共同支撑科学合理的方案优选。

最后，我们强调学习方法的重要性。机电一体化的学习绝非知识的被动接收，而应是主动建构、跨界融合与创造性实践的过程。因此，书中穿插了大量思考题、设计练习与仿真实验建议，鼓励读者动手验证、反思迭代，并运用创造性思维技巧突破传统设计瓶颈。

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 绪论	1
第一节 机电一体化的基本概念与发展历程	1
第二节 机电一体化系统的组成与关键技术	7
第三节 本书的结构与学习方法	13
第二章 机电一体化系统总体设计	21
第一节 系统设计流程与需求分析	21
第二节 总体方案设计与评价方法	27
第三节 机械本体与执行机构选型设计	34
第三章 传感与检测技术	45
第一节 常用传感器原理与特性	45
第二节 信号调理与数据采集技术	52
第三节 检测系统的精度与可靠性分析	58
第四章 驱动与执行技术	69
第一节 电动机及其控制特性	69
第二节 液压与气动驱动技术	76
第三节 新型驱动技术与执行器	84
第五章 计算机控制与接口技术	93
第一节 微处理器与嵌入式系统基础	93
第二节 控制算法与软件设计	100
第三节 接口技术与通信总线	108
第六章 系统建模与仿真分析	117
第一节 机电系统数学模型建立	117
第二节 控制系统仿真方法与工具	122

第三节 多领域物理系统联合仿真	128
第七章 系统集成与性能测试	135
第一节 硬件集成与电磁兼容设计	135
第二节 软件集成与系统调试	142
第三节 性能测试与评估标准	148
第八章 现代设计方法与案例分析	155
第一节 智能化与网络化设计方法	155
第二节 可靠性设计与优化方法	164
第三节 典型机电一体化系统案例分析	172
参考文献	181

第一章 绪论

机电一体化系统设计与分析方法的研究目的，就是为工程师、研究人员提供一套解决复杂工程问题的系统化的方案。本章从基本概念出发，对机电一体化技术的发展过程、发展脉络进行梳理，为后面深入研究具体的系统设计、分析、集成方法打下坚实的理论基础。

第一节 机电一体化的基本概念与发展历程

机电一体化技术作为现代工程领域的驱动力，对传统制造业的变革是深刻的，它使产品的形态和功能的种类都发生了很大的变化。本节要详细地分析出机电一体化概念、发展过程及工业、消费品中的具体运用情况，从而体现其从简单的组合到高度智能化的发展道路。

一、机电一体化的定义与内涵

机电一体化是高度综合的一门交叉学科，核心就是实现机械系统和电子控制系统有机结合、深度集成。它不只是对传统机械、电气功能进行简单的叠加，更是创造出一种功能更强大、性能更好、智能化程度更高的新型系统。

（一）机械技术与电子技术的融合

机电一体化的根本就是机械技术和电子技术的有机融合。融合不是简单地把两者拼凑在一起，在设计之初就将它们看成一个不可分割的整体。机械本体为电子控制系统提供物理执行平台，是实现运动和功能的骨架；电子技术给机械系统装上了眼睛、大脑，使其具备感知、决策、精确控制的能力。深度融合体现在系统每一个层次，从底层的传感器、执行器到上层的控制单元、软件算法，都紧密配合，以达到整体性能最优化的目的。

传统的机械设备功能单一、灵活性差，性能提高主要依靠材料科学和制造工艺的发展。电子技术特别是微处理器及各种传感器的应用完全改变以往的状况。利用高精度的传感器采集机械系统状态参数（位置、速度、力等），控制器按照

预先设定好的程序或者算法进行高速运算和逻辑判断，然后通过伺服驱动系统控制执行机构动作，从而实现复杂、高精度的动态控制。由此机械产品由刚性变为柔性，满足更多的、更加严格的工作需求，大大拓宽了机械产品的应用领域及附加值。

（二）系统论与信息论的引入

机电一体化系统本质上是一个物质流、能量流、信息流三者相互作用的系统，所以系统论和信息论给其提供了重要的理论指导。系统论是从整体出发，研究系统中各个组成要素之间相互关系及作用机理的理论，追求系统整体功能的最优化。在机电一体化系统设计中不能孤立地看待机械、电子、控制等任何一个部分，而应该把它们放在整个系统框架内进行协同设计和集成，从而达到“整体大于部分之和”的效果。系统化的思维方式贯穿需求分析、方案设计、硬件选择、软件开发、系统调试、优化的全过程，保证各个子系统之间的有效配合、无缝相接，达到综合性能最优的目的。

信息论给机电一体化系统信息的获取、传输、处理、决策提供理论基础。机电一体化系统的核心就是信息的有效利用。传感器从物理世界中获取信息，经过信号调理和转换，送入以计算机或者微控制器为信息处理单元的系统。信息处理单元根据控制算法对海量数据进行实时分析、运算，产生控制指令。包含决策信息的指令经过接口电路、驱动环节，变成执行机构的精确物理动作，从而达到对被控对象的有效控制。整个过程就形成了一个完整的闭环反馈系统。信息处理的速度、精确度和智能化水平影响机电一体化系统性能的好坏。因此信号处理技术、控制算法、数据管理方法在系统设计中起着举足轻重的作用。

（三）多学科交叉的特性

机电一体化技术最突出的特点之一，就是它的明显的多学科交叉性。它不是某项技术的简单扩展，而是机械工程、电子技术、计算机科学、控制理论、传感检测技术、信息技术、材料科学等诸多学科领域互相渗透、互相融合的结果。跨领域的知识整合对于完成机电一体化系统创新设计、功能升级来说是十分重要的。以一个先进的工业机器人系统为例：机械臂结构设计需要精密的机械动力学分析；关节驱动依靠高性能伺服电机、电力电子技术；路径规划、运动控制要用到复杂的控制算法和软件编程；环境感知、自主作业离不开机器视觉、人工智能技术。

多学科交叉的特性给从事机电一体化系统的设计、分析的工程技术人员提出

了更高的要求。除了要具备扎实的专业知识外，还应该具有宽广的技术视野和跨学科的知识整合能力，能理解不同领域的语言与工具。在项目开发中不同的专业人员要相互配合解决设计、集成、测试等复杂问题。也正是由于这些技术的融合与协作才催生了诸多革命性的产品与方案，推动现代工业向着自动化、智能化、网络化方向持续发展。从宏观的智能制造系统到微观的微机电系统，多学科交叉的特点一直就是机电一体化技术创新和发展的重要驱动力。

二、机电一体化技术的发展历程

机电一体化技术的发展不是一朝一夕的事情，是伴随着电子技术、计算机技术的革命性突破，逐步深入发展的过程。其发展大体上可以分为三个互相联系、层层递进的阶段。

（一）萌芽阶段：机械装置的简单电子化

20 世纪 60 年代以前属于机电一体化技术的初期萌芽阶段。虽然当时还没有正式提出机电一体化这个术语，但是将电子技术初步应用于改进机械产品性能的尝试已经出现。这一时期的主要特点就是，在现有的机械装置上加装简单的电子元器件或者继电器控制线路，以代替部分手动操作，实现初级自动化。其融合层次较低，电子部分和机械部分多是分开设计，再简单组合，两者之间的耦合度低，信息交互能力差。

早期的机床用继电器逻辑电路来完成加工过程的顺序控制，取代了繁杂的手动挡位变换和操作。军事领域对机电结合的要求更高，因此产生了火炮伺服跟踪系统，用电子管或者晶体管放大器驱动电机，实现对目标的自动跟踪。尽管这些早期实践的技术比较落后，但是它们开创了机械与电子相结合的先河，证明了利用电子控制提高机械性能的可能性，为以后机电一体化技术的发展积累了宝贵的经验，播下了技术融合的种子。

（二）发展阶段：微机控制技术的应用

20 世纪 70 年代至 80 年代是机电一体化技术迅速发展的时期。这一时期最具代表性的就是微处理器和微型计算机的出现与普及，为机电一体化系统提供强大的“大脑”。机械与电子相结合的技术趋势，在日本工程师于 1971 年提出“Mechatronics”这个词汇时被准确地概括了出来。以微处理器为核心控制器，取代了以前由分立元件或者中小规模集成电路构成的逻辑控制器，使复杂的控制

算法可以采用软件编程的方式实现,大大提高了系统的控制精度、灵活性、可靠性。

这一时期的技术融合由最初的“机”加“电”变为以微机控制为中心的系统集成。数控技术便成了那个时期的代表。将加工指令转化为数字形式,用计算机控制机床的伺服系统,实现了复杂零件的高精度自动化加工。工业机器人在此期间也实现了技术上的成熟,PUMA 系列机器人被制造出来,该机器人采用多 CPU 分级控制,配备专用编程语言和传感器接口,在工厂流水线上可以稳定地完成焊接、搬运、装配等任务。可编程逻辑控制器的出现并得到广泛应用,给工业自动化提供了一种比计算机更加简单易学、更加可靠耐用的控制方案。这些成果给现代机电一体化系统打下了基础,形成了以机械本体、传感器、控制器、执行器为主要结构形式的典型结构模式。

(三) 智能化阶段: 人工智能与网络的渗透

从 20 世纪 90 年代至今,伴随着人工智能、网络通信、传感器技术高速发展,机电一体化进入了以智能化、网络化为主要特征的新时期。本阶段目标不再只是实现自动化,而是使机电一体化系统具有更高的智能水平,可以自动感知环境、学习、推理、决策,并可以进行网络协同工作。人工智能技术渗透进来,机器学习、模糊控制、神经网络等技术使机器人、自动化设备可以完成更加复杂、不确定的任务。

机器视觉、多传感器融合技术的应用,使得机器人具备了看、感觉的能力,可以识别和定位工件,避开障碍物,甚至可以进行精细的装配作业。互联网、物联网等技术的应用使设备不再是一个独立的单体机器,而是一个可以互相连通,并且可以和云端数据进行交互的机器。催生了远程监控、预测性维护、数字孪生、计算机集成制造系统等新的应用模式。此时机电一体化产品的形态也趋向于微型化、模块化、绿色化。微机电系统把机械元件、传感器、执行器和电子电路集成在微米级的芯片上,给医疗、通信等领域带来了深刻的变革。因此智能化、网络化使机电一体化向更高、更自主的方向发展,成为智能制造和工业 4.0 的基础。

三、典型机电一体化产品演变

机电一体化技术的发展最直接的体现就是它孕育出来的各种产品。从工业装备到家用电器,技术融合的发展过程清楚地体现出从自动化到智能化的转变,使生产效率和生活质量得到了极大的提高。

机电一体化技术在典型产品中的演变

产品类型	萌芽 / 早期阶段	发展 / 微机控制阶段	智能化 / 网络渗透阶段
数控机床	纸带控制铣床	计算机数控系统	高速、高精、复合、智能
工业机器人	示教再现型 (Unimate, 1961)	交流伺服、PUMA、SCARA	智能自主、机器视觉、协作机器人
家用电器	机械式洗衣机、电风扇	微处理器控制洗衣机、自动恒温空调	智能冰箱、智能音箱、扫地机器人

从上表中可以看出，不同产品在机电一体化技术的影响下呈现出明显的演变轨迹。

（一）数控机床的发展历程

数控机床被称作工业母机，数控机床的发展史就是机电一体化发展史的缩影。每一个重大的突破都是和电子、计算机技术的革新联系在一起的。

1. 世界上第一台数控机床于 1952 年在美国的麻省理工学院诞生。利用纸带上打孔记录坐标信息来控制铣床的三个坐标轴运动，实现了从手工控制到数字控制的飞跃。这一时期的数控系统主要是由电子管、继电器组成的，体积大、可靠性差，但是开创了数字信息控制机械加工的先河。

2. 随着晶体管及集成电路技术的发展，数控系统体积不断缩小，成本降低，可靠性提高。到了 20 世纪 70 年代，由于微处理器的应用，计算机数控系统开始流行。以计算机为控制中心，用软件来实现控制功能的 CNC 系统，不仅可以进行复杂的插补运算，而且具有刀具补偿、程序编辑、故障诊断等许多功能，大大提高了机床的柔性及自动化程度。

3. 进入 21 世纪以后，数控技术向着高速化、高精度化、复合化、智能化等方向发展。开放式结构的数控系统便于新技术的集成。高速电主轴、直线电机驱动等技术的应用，极大地提高了加工效率以及表面质量。多轴联动技术的成熟，使得复杂的曲面加工成为可能。近些年来，由于人工智能、物联网技术的渗透，新一代智能数控系统开始出现，该类系统通过传感器对加工状态进行感知，从而实现对切削参数的实时优化，达到自主编程、自主加工的目的，利用数字孪生技术在虚拟空间中进行仿真和预测，标志着数控机床正在由自动化设备向智能化的信息物理系统转变。

（二）工业机器人的技术进步

工业机器人技术水平是体现一个国家制造业自动化水平的标志。工业机器人

发展史，也是机电一体化由预定程序控制向智能自主作业深化的过程。1961年，世界上第一台真正意义上的工业机器人“尤尼梅特”在美国通用汽车公司的生产线上投入使用，采用液压驱动，能够按照事先录入的示教点位重复执行抓取、放置压铸件的动作。这就标志着机器人开始代替人类从事危险、繁重、重复性劳动。早期的机器人是示教再现型，没有对外部环境的感知能力，只能在结构化环境中执行预先编写的程序。

20世纪70年代到80年代，由于计算机、传感器技术的发展，机器人进入了快速发展的普及期。交流伺服电机代替了笨重的液压驱动，使机器人的结构更轻、控制更准。计算机控制器的应用使机器人运动轨迹规划和控制算法更加复杂、优化，产生了PUMA、SCARA等经典构型的机器人，被广泛应用于焊接、喷涂、装配等各个领域。第二代“有感觉”的机器人是通过力觉、触觉、视觉等传感器，使机器人可以感知作业环境中微小的变化并做出反应。

90年代以后，机器人技术朝着智能化、网络化方向迅猛发展。具有一定感知、判断、计划能力的第三代智能机器人开始出现并走向应用。集成了机器视觉、人工智能、多传感器信息融合等技术，在非结构化的环境中可以自主识别目标、规划路径、避开障碍，并且可以和人进行更自然的协作。现在的工业机器人不再只是工厂里的自动化工具，而是智能制造系统中的重要节点，利用工业互联网将多台机器人连接起来，实现协同作业和生产流程的动态优化，其技术进步也不断推动着现代工业的变革。

（三）家用电器的智能化升级

家用电器发展过程中机电一体化技术的渗透与升级，也深刻地影响着人们的生活方式，从最初的机械电气化逐渐发展到自动化，最终迈向全面的智能化、网络化，极大地改善了人们的居家生活品质。早期的家用电器如机械式洗衣机、电风扇等，主要是用电机代替人力完成基本的洗涤、送风功能，控制方式简单，一般使用手动开关或定时器，属于机械与电气功能的初步结合。

随着电子技术的发展，自动化控制开始用在家电产品上。以洗衣机为例，微处理器控制使洗衣机可以按照预先设定的程序自动完成进水、洗涤、漂洗、脱水等一系列过程，用户只需要选择不同的洗衣模式即可。空调由原来的手动调节温度发展到现在的可以自动恒温的温控器。本阶段家电产品依靠传感器、简单的电子控制器实现了功能的自动化，提高了使用的便捷性，但是设备之间仍然是孤立

的。近些年，物联网、人工智能和大数据技术的结合，使家用电器进入了全面智能化的阶段。现在的智能家电不是孤立的工具，而是可以互相连接、互相通信的智能终端。智能冰箱可以识别食物种类，提示保存期限，推荐菜谱；智能空调可以学习使用者的使用习惯，自动调节温度和湿度；手机 APP 可以远程控制。扫地机器人用激光雷达、摄像头绘制出室内地图，自主规划清扫路线、避开障碍物。智能家电依靠家庭网络和云平台来连接，既能实现设备间的协同作业，也能给用户提供个性化的、场景化服务，是智能家居生态系统的重要部分。

第二节 机电一体化系统的组成与关键技术

机电一体化系统不是简单的机械和电子部件的叠加，它把各个功能单元用系统化的思维联系起来，一起完成复杂而精确的功能目标。对系统内部的组成要素以及运行的关键技术有深刻的认识，是开展系统设计与分析，促进系统不断向更高智能化、集成化水平迈进的前提。

一、机电一体化系统的基本组成要素

一个功能完备的机电一体化系统一般是由机械本体、动力与驱动、信息处理和控制等主要部分组成。各个部分互相依赖、互相作用，依靠物质、能量、信息的有序流动而成为一个具有一定功能的整体。明确这些基本组成要素的功能定位，可以宏观上认识系统的架构。

（一）机械本体结构的功能

机械本体是机电一体化系统中的骨架和平台，给系统中其他的所有功能组件提供物理支撑和安装基座。其主要功能就是执行具体的机械运动和物理作业，是系统同外界进行物质、能量交换的最终执行者。机械本体的好坏直接决定了系统的刚度、强度、精度保持性以及动态响应能力。优秀的机械本体结构不仅要满足基本承载、运动传递的功能，还要从结构、材料、工艺等各个方面进行优化，来适应系统向高效、轻量化、小型化、高可靠性发展的趋势。

现代机电一体化系统中的机械本体设计不能独立进行，必须同电子、控制等部分协调一致。设计高速、高精度的数控机床时，必须考虑机械结构固有的频率，防止与伺服系统的控制频率产生共振；还要优化运动部件的惯量，减小驱动负载，

提高响应速度。从材料选用方面讲，使用碳纤维复合材料等轻质高强材料可以大大减小系统运动惯性，降低能耗，全面提高整个系统性能。机械本体的功能已经由原来的“执行”转变为和整个系统性能深度绑定、基础支撑与性能保障的角色。

（二）动力与驱动部分的作用

动力与驱动部分是机电一体化系统的“心脏”和“肌肉”，它的重要作用就是根据控制核心发出的指令，给系统提供和转换能量，从而驱动执行机构完成预定的动作。其中动力部分提供的是原始能量，电源、气源或者液压源等；而驱动部分则是将这些能量转化为机械运动的机构。其好坏直接影响系统的响应速度、控制精度、输出力矩、运行效率，是实现用最小的能量输入得到最大、最准确的功能输出的关键。

现代的机电一体化系统对于驱动技术有很高的要求。一方面要保证驱动系统具有高效率、快速动态响应等特性来满足起动、制动、变速等各种动态变化的要求。另一方面，由于电力电子技术和微处理器技术的发展，高性能伺服驱动技术，即交流永磁同步伺服电机、步进电机等，已经得到了广泛的应用。先进的驱动单元配合精密的控制算法，可以实现速度、位置、力矩的闭环控制，精度可以到微米甚至纳米级别。

选择恰当的驱动方式对系统整体性能来说十分重要。电动驱动由于控制灵活、无污染而被广泛应用，液压驱动由于功率密度大、响应快而适合重载、高冲击场合，气动驱动由于成本低、结构简单而适合开关式或逻辑控制的场合。设计时要考虑负载特性、成本、环境适应性、控制要求等各方面因素，选择并优化适合的动力与驱动方案，使系统能量转换效率和动态性能达到最佳。各类驱动方式的特点及适用场合如表所示。

常见驱动方式特性对比表

驱动方式	优点	缺点	典型应用
电动驱动	控制灵活、清洁无污染	功率密度相对较低，易受电磁干扰	机器人、数控机床、家用电器
液压驱动	功率密度大、响应快、力输出稳定	易泄露、维护成本高、系统复杂	工程机械、重型设备、航空航天
气动驱动	成本低、结构简单、工作介质易获取	精度较低、压缩性高、输出力较小	夹持、送料、开关控制

（三）信息处理与控制核心

信息处理和控制核心是机电一体化系统的“大脑”，它接收传感部分传来的信息以及外部的指令，并对这些信息进行处理、运算、判断、决策，最后根据预设的程序和逻辑，向驱动部分发出控制指令，保证整个系统按部就班地进行运行。该核心单元一般由微型计算机、单片机、可编程逻辑控制器、数字信号处理器等硬件和它们上面运行的控制软件组成，是系统实现自动化和智能化的关键所在。

信息处理与控制核心的核心功能就是对系统状态进行全方位的感知，并且能够做出精确的控制。它依靠输入输出接口同传感器、执行器相连接，从而形成一个信息流动的闭环回路。传感器测量得到的物理量经信号调理、模数转换后输入给处理器。控制软件根据控制理论（如 PID 控制、自适应控制、模糊控制等）对反馈信息和设定的目标进行计算，并生成控制信号，经数模转换、功率放大后去驱动执行机构运动。循环往复的过程保证系统可以准确地执行指令，也可以对系统的外部扰动做出快速的补偿。随着技术不断发展，控制核心由原来的简单指令执行者变成了人工智能、专家系统等高级信息处理技术的集成者，使系统具有了自学习、自诊断、自适应的能力，在更高的层次上提高了机电一体化系统的智能化水平和自主性。

二、机电一体化相关关键技术

机电一体化属于典型的交叉学科，其发展要依靠许多相关技术来支撑和推动。这些关键技术就是它成长的养料，给它的集成化、智能化、精密化的进一步发展创造了有利的条件。从微观的元件制造到宏观的系统控制，各种技术的进步一起成为机电一体化技术不断革新的动力源泉。

（一）精密机械制造技术

精密机械制造技术是机电一体化系统实现高精度、高性能的物理基础，给传感器、执行器、机械本体的制造提供工艺保障。机电一体化产品，尤其是高端装备，精度、稳定性、可靠性很大程度上取决于构成其机械零部件的制造精度和质量。此技术并不只是对于传统上的尺寸精度、表面粗糙度进行研究，更是在微观层次上做结构改善及性能提高研究。

由于系统对小型化、轻量化、高动态性能的要求越来越高，精密机械制造技术也在不断发展。精密机械制造技术的重要性主要表现在以下几点上，即

1. 超精密加工、微细加工技术：这是制造传感器敏感元件、微型驱动器、精密导轨、丝杠等核心部件的基础，需要达到亚微米甚至纳米级的加工精度。光刻、刻蚀等半导体工艺被用在微机电系统器件的制造上，金刚石车削、精密磨削等技术用来获得极高精度和质量的表面。这大大提高了机电一体化系统的感知精度以及运动的平稳性。

2. 新材料的应用和成形技术，为了满足轻量化、高刚度、耐磨损、抗疲劳等严格性能要求，精密机械制造越来越多地使用高性能合金、工程陶瓷、复合材料等新型材料。与此相对应的精密铸造、粉末冶金、增材制造等先进成形技术，可以实现复杂内部结构的轻量化构件的制造，从而有效地减小了系统的运动惯量，改善了动态特性。

3. 表面工程技术就是对机械零部件表面进行处理，以降低摩擦、提高耐磨性、抗腐蚀性。通过物理气相沉积、化学气相沉积、激光表面强化等方法，在零件表面形成一层具有特殊功能的薄膜或者改性层，从而大大提高关键运动部件的使用寿命，保证系统长时间工作可靠性和精度的保持。

（二）传感器与检测技术

传感器和检测技术是机电一体化系统的感官，主要作用就是实时、准确地获取系统自身和外部环境的状态信息，把这些信息转化成可以供控制核心处理的电信号。是实现系统闭环控制、状态监测、故障诊断、智能决策的基础。如果把控制核心比作大脑，那么传感器就是系统的“眼睛”和“神经末梢”，它的性能好坏直接关系到系统的感知能力以及控制精度。

传感器在机电一体化系统中起到的作用是多样的。它给精确控制提供反馈信息。位置传感器、速度传感器、力矩传感器等构成了伺服系统的反馈环节，从而可以对运动状态进行精确的调节。在数控机床中，光栅尺或者编码器可以以很高的分辨率来检测工作台位移，从而保证加工精度。

传感器是实现系统智能化、获取信息的基础。利用视觉传感器、声音传感器、温度传感器等多元信息的综合分析，可以使得系统对于工作环境有更加全面的感知，从而做出更加智能的决策。工业机器人可以借助视觉传感器识别、定位工件，并借助力觉传感器感知与工件的接触力，实现柔顺的装配作业。多传感器信息融合技术，是提高系统自主性、适应性的主要方法。

传感器技术对于设备状态监测以及故障预警来说，起着非常重要的作用。在

关键部位装设振动、温度、压力等传感器，可以对设备运行情况进行实时监测，根据分析的数据以及人工智能技术预估易出现故障的部位，进而实施预测性维护，提升设备的安全稳定性，降低由于突然停机而带来的经济损失。随着微电子、新材料技术不断进步，传感器正朝着微型化、智能化、集成化、网络化方向发展，在机电一体化系统中的应用范围也越发广泛，深度也逐渐加深。

（三）计算机控制与接口技术

计算机控制与接口技术是机电一体化系统“大脑”和“四肢”之间信息交换的“神经中枢”，它解决了信息处理核心和传感器、执行器之间信息交换及指令传递的关键问题。这项技术的核心就是依靠计算机强大的运算和逻辑处理能力，对机械系统复杂、高速、精确地进行控制；同时用标准接口技术保证系统各个部分之间能够顺畅通信、高效协同工作。

计算机控制技术的发展，使机电一体化系统可以实现以前无法实现的复杂功能。从最初的单片机、可编程逻辑控制器发展到现在的以工业 PC、嵌入式系统为基础的高性能控制器，计算能力的飞跃为高级控制算法的应用打下了坚实的基础。自适应控制算法可以根据工况的变化自动调整控制参数，以达到最优的控制目的；多轴联动插补算法是多自由度机器人、五轴加工中心实现复杂轨迹运动的重要算法。软件起着非常重要的作用，控制逻辑、运动规划、用户界面等都是由软件来定义的，使机电一体化系统具有很强的灵活性和可扩展性。硬件标准化和软件可编程性一起构成了现代计算机控制的基础。

接口技术属于系统集成的通用语言，它使不同的厂家、不同的协议的硬件和软件可以即插即用、相互配合。接口技术有硬件接口和软件接口之分。硬件接口有输入输出接口、串行通信、并行通信、现场总线、工业以太网等，主要是对信号的电气连接以及数据帧的物理传输。软件接口用驱动程序、通信协议、应用程序编程接口来定义数据交换的格式和规则。设计良好的接口除了要保证数据传输的实时性、可靠性，还要有较好的兼容性、互操作性，这也是模块化设计和构建开放式机电一体化系统的基础。

三、系统集成的概念与意义

系统集成是把各个分离的子系统或者组件按照整体最优的目标，用技术、管理等手段有机地结合起来，构成一个功能协调、性能互补的统一整体。机电一体化

化中系统集成不是简单的物理连接，而是机械、电子、控制、软件等异构技术在功能、性能、信息等各方面深度融合。

（一）硬件系统的协调匹配

硬件系统协调匹配是机电一体化系统集成的物理基础，其主要目的就是保证机械、电子、驱动等各个硬件子系统在性能参数、物理尺寸、工作环境等方面可以无缝对接、协同工作，避免因不匹配而产生的性能瓶颈或者冲突。这就要求系统在设计之初就具有全局观念，把所有的硬件单元作为一个整体来考虑。

协调匹配首先要从性能参数入手。伺服电机的额定转矩和转速要和机械负载惯量、运行速度相匹配；过大则会造成能源浪费、成本增加，过小则不能满足动态性能的要求。传感器的分辨率和响应速度要和控制系统的采样频率、控制精度要求相匹配，否则高精度控制器也发挥不了应有的作用。这种匹配存在于能量流、信息流的每一个环节，电源功率容量、驱动器电流输出能力、数据采集卡采样率等都要进行周密的计算和选择。其次就是物理接口的兼容性问题，机械安装尺寸标准化、电气连接器标准化、信号电平匹配等都会影响系统的装配调试。依靠合适的硬件配合，才能搭建起一个损耗低、效率高、稳定运行的硬件平台，为软件功能的充分发挥和整体性能的优化奠定基础。

（二）软件功能的综合调用

软件是机电一体化系统的灵魂，给硬件赋予智能和柔性的功能。软件功能的综合调用，是指把分散在不同的处理器或者模块中的分散控制算法、数据处理、人机交互、通信管理等软件功能集中部署、调度、协调，组成一个功能完备、逻辑清晰的软件系统架构。它的作用就是利用软件强大的整合能力，把分散的硬件功能集成到一起，形成一个有机的整体来完成复杂的系统任务。

首先要对软件进行模块化、层次化的设计。把系统复杂的功能拆解成独立的软件模块，即运动控制模块、传感器数据处理模块、用户界面模块等等，有利于降低开发的难度，也提高了代码的复用性和可维护性。各个模块之间通过预定义的应用程序编程接口来实现交互，上层的应用软件可以方便地调用下层硬件的驱动功能，而不需要去关注具体的实现细节。软硬件解耦的设计思想，在现代复杂的机电系统中已经成为了很重要的一个设计原则。

软件功能综合调用的另一方面就是实时任务调度与资源管理。机电一体化系统中存在对实时性要求不同的任务，高优先级的伺服控制循环和低优先级的界面

刷新任务。实时操作系统在此起到了重要的作用，按照任务优先级和时间要求合理分配 CPU 时间和其它系统资源来保证关键控制任务的确定性执行，防止由于任务冲突或者延迟导致系统失稳。依靠高效的软件架构和任务调度机制，系统可以自由组合、调用各种功能，及时对内部需求的变化做出反应，具有很强的柔性以及可重构性。

（三）系统整体性能的优化

系统整体性能优化是机电一体化集成的最终目的，即实现“ $1+1>2$ ”的系统效应，也就是集成后的系统整体性能大于各个部分性能之和。该目标存在于设计、制造、运行维护的全过程之中，它不是某个环节的优化改进，而是各方面因素的综合权衡和妥协。

动态性能的提高属于优化的一个重要部分。这就要求机械结构设计、驱动选型、控制算法开发三者之间相互配合。例如可以采用有限元分析对机械臂做轻量化、刚度优化，减小运动惯量，提高固有频率；在此基础上选择与之匹配的高响应伺服系统，再设计先进的前馈控制、振动抑制算法，三者有机结合才能实现机器人高速、高精度运动。单独优化某一环节，往往会受到其它环节的限制，难以达到最好的效果。

能效优化也属于一个重要方向，设计阶段就要从整个系统能量流动和损耗的角度去考虑。使用高效电机、优化传动链、采用变频调速技术、开发能量回收策略（制动能量回收）等措施可以大大降低系统运行能耗。采用智能调度算法，在保证生产节奏的基础上合理安排设备启停、调节工作速度，可以避免空载和峰期用电过高，从而达到系统级节能的目的。最终，系统整体性能优化是多目标、多约束的复杂问题，在精度、速度、成本、能耗、可靠性等各方面找到最优的平衡点，从而达到系统价值最大化的目的。

第三节 本书的结构与学习方法

机电一体化是一门典型的交叉性、综合性的学科，它所涉及的知识面广、深度大，对学习者的要求很高。为了使读者能够理清知识脉络，掌握科学有效的学习方法，本节主要从本书的内容结构、内在逻辑、针对性的学习方法三个方面入手，引导读者循序渐进、理论联系实际地学习机电一体化。

一、本书的内容架构与逻辑

本书的编排按照系统性、渐进性、实践性原则来完成，并尽量表现出机电一体化系统的整体面貌，突出各个部分知识之间的联系，使读者建立起一个条理清楚、层次分明的知识体系。

（一）从基础理论到系统设计的渐进

本书编排的逻辑是从单元到系统、从理论到应用的认知规律。全书知识体系从构成机电一体化系统的基础技术模块入手，这些模块就如建设大厦的基石，给系统集成和设计提供坚实的理论基础。就内容而言，主要是从机械系统、传感检测技术、执行驱动技术、计算机控制技术等主要单元技术入手。这些模块一起构成了机电一体化系统的基础。它们具体的内容与作用见下表。

机电一体化基础技术模块

模块名称	核心内容与作用
机械系统	传动机构设计原理、结构优化、动态特性分析，支撑系统运动与载荷。
传感检测技术	传感器选型、信号采集、信号调理与处理，实现系统感知功能。
执行驱动技术	执行机构原理、电机选型与匹配、驱动控制，实现系统动作。
计算机控制技术	经典 / 现代控制策略、嵌入式系统、可编程逻辑控制器编程，实现系统决策与智能控制。

由以上可知，这些基础技术模块为机电一体化系统搭建打下了基础。在机械系统部分，除了基本传动机构设计原理的介绍，还会对动态特性对整个系统的影响进行详细的分析；控制技术部分则从经典控制理论逐步过渡到现代控制策略，包含嵌入式系统和可编程逻辑控制器的应用，层层递进，目的是使学习者先对各个子系统有深刻的认识。

读者掌握分散的单元知识之后，本书就会把读者带入到系统集成、设计的更高层次。这一阶段的主要任务就是根据不同的功能需求，在已有的技术中进行合理的选择、匹配和集成。书中会详细论述机电一体化系统设计的通用方法以及开发流程，即需求分析、方案论证、系统建模、动态仿真、优化设计等主要部分。这样构造的知识体系，能够让读者看到一个完整的机电一体化系统从概念构思出发，经过理论分析和技术整合，最后成为功能完善的实体的全过程。该架构符合工程设计实际流程，而且可以使学习者平稳地过渡到复杂系统问题分析与解决当中，不至于因为过早面对系统的复杂性而感到困惑或者受挫。我们认为用由点及

面、循序渐进的方式来建构知识，是掌握机电一体化这门复杂的交叉学科最好的方法。

（二）各章节知识点的关联性

机电一体化系统本质上就是机械、电子、控制等领域技术的有机融合，因此本书各章知识点不是孤立存在的，而是相互联系、相互支撑，形成一个紧密耦合的知识网络。深刻认识、理解这种关联性，才是掌握系统设计精髓之所在。

第四章介绍的传感器选型及信号处理技术，在后续的伺服控制章节中会有充分的体现。高精度控制系统的实现，离不开高分辨率、高动态响应的传感器来提供准确的反馈信号，信号调理电路的好坏直接影响控制算法的稳定性、有效性。正如俗语所说：没有准确的感知就没有准确的控制。研究者通过文献综述和问卷调查，对 100 名小学生进行深度访谈，分析他们阅读兴趣、阅读习惯及阅读体验

执行机构章节与机械系统设计章节之间也存在着不可分割的关系。选择伺服电机时必须严格按照机械系统负载特性，即转动惯量、摩擦力矩等参数来进行匹配计算。如果电机选择不当，会使得系统响应迟缓，驱动力矩不足以克服负载阻力；这些都会在系统动态性能分析中得到量化的说明。计算机控制技术是系统的“大脑”，它存在于设计过程的各个环节之中。无论是可编程逻辑控制器的梯形图逻辑，还是单片机的 C 语言程序，它们的编写都是以对被控对象（机械本体）的工艺流程和控制要求有深刻认识为前提的。控制算法设计要考虑机械系统非线性、时滞等特点，接口电路设计要与传感器和执行器的电气特性相匹配。本书在各章节里不断地回顾和引用前后关联的知识点，并设置综合性的思考题和案例，目的是使读者在学习过程中主动地建立知识之间的联系，形成整体性的系统观念，而不仅仅是把技术简单地堆砌起来。

（三）理论与实践案例的结合

为了使抽象的理论知识与鲜活的工程实践相结合，本书在内容编撰上采取的是理论解释、案例剖析、仿真验证、设计练习四位一体的方法。每个核心理论章节之后，都会有一系列精心挑选的真实工程领域典型实践案例。讲解滚珠丝杠和伺服电机匹配设计理论之后，书中会用数控机床进给系统设计为例，从负载计算、电机选型、传动比确定、动态性能校核四个方面来展示理论公式的运用过程。

本书尤其看重案例的深浅和多少。深度就是对案例的技术细节进行详细的分析，不能只停留在功能的描述上，而要从关键参数的计算、控制逻辑的实现、故

障诊断策略等重要环节入手。广度指的是案例类型的多样性，从简单的物料搬运装置到复杂的多轴机器人系统，尽量把不同应用场景下机电一体化技术提供的各种解决方案呈现出来，从而拓宽读者的工程视野。

除静态的文字案例外，本书也重视动态仿真和实践。对一些重要的案例会提供 MATLAB、Simulink 等仿真平台建模的方法和参数设置的指导，鼓励学生自己动手搭建系统模型，做仿真实验来观察不同的参数对于系统性能的影响，从而加深对理论知识的理解。理论指导实践，实践是检验真理的标准。采用理论与实践案例相融合的方式，目的是消除理论学习和工程应用之间的壁垒，培养读者分析解决复杂工程问题的综合能力，为其以后从事机电一体化产品开发设计工作打下坚实的基础。

二、学习机电一体化的方法

要真正掌握机电一体化，不能只靠学习大量的专业知识，还需要形成一套科学高效的学习方法。该方法的关键在于冲破学科的壁垒，培养系统思维，并且要始终坚持理论与实践的统一，最终实现由知识接受者转变为知识创造者。

（一）多学科知识的融会贯通

机电一体化本质就是机械工程、电子工程、计算机科学、控制理论等多学科知识的交叉渗透。所以学习者面对的第一个问题就是怎样有效地将这些知识整合起来。如果仅仅将它作为一个独立的知识模块去学习的话，最终只能形成知识孤岛，不能真正理解机电一体化系统精髓。要实现融会贯通，就必须主动去建立不同学科之间的联系桥梁。在学习机械设计的时候不能仅仅满足于完成结构和运动的功能，而应该主动去思考：需要什么样的传感器来检测运动的状态？需要使用什么样的电机才能满足动态性能要求？控制程序怎样才能实现预期的运动轨迹？

主动开展跨学科思考，就是进行知识融合的起点。学习者绘制出知识图谱或者概念地图，以某一个具体的机电一体化产品（工业机器人）为起点，使用网络结构把机械结构、传感器、控制器、驱动器、算法等知识点关联起来，并标明它们之间相互的关系和制约因素。参加跨学科项目团队也是一种有效的途径。不同专业背景的人为共同目标而努力，观点碰撞、知识互补可以大大提高个人对于其他学科的认识。向电子专业同学请教电路设计，同计算机专业同学讨论算法实现，书本上抽象的关联就变得具体而生动。最终的学习目的就是要打破单一学科的思

维模式，用综合、多维的角度去分析、解决实际问题，从而自然而然地利用各个学科的工具去解决问题。

（二）系统工程思维的培养

系统工程思维是机电一体化学习与实践中的核心能力，它要求把研究对象看成是相互作用、相互依赖的若干部分组成的有机整体，而不是各个部分的简单叠加。培养这样的思维，就是要用全局、整体的眼光来分析和理解问题。学习者要改变以往只注重改进单个零件或者局部电路性能的习惯，更多地考虑各个子系统之间的接口、配合、匹配。要知道，一个机电一体化产品的最终性能不是由最强的部分决定的，而是受限于最弱的部分或者匹配最差的接口。

培养系统思维可以从以下几个方面着手。学会自顶向下分解和自底向上综合。系统设计之初就要确定系统的总体功能目标和性能指标，然后将复杂的系统逐层分解成功能相对独立的子系统，直到最基本的功能单元。单元设计和分析完成后，再把单元集成到系统当中去，进行系统的测试，看系统是否能达到最初设定的要求。权衡与折衷的艺术要领就是懂得怎样去平衡，怎样去取舍。机电一体化系统中各子系统性能要求之间常常会存在矛盾。追求高刚性的机械结构会增加系统的重量和惯性，与控制系统期望的快速响应相矛盾；提高系统精度需要使用昂贵的传感器和驱动器，又与成本控制目标相矛盾。系统工程师的价值就在于能在多种需求矛盾中找到最佳折衷点，做出最优选择。重视系统集成与测试。理论上的完美设计，并不保证实际系统可以稳定地工作。集成过程中不同的模块之间电气兼容性、通信协议一致性、时序协调性等都会暴露出来。解决这些实际的集成问题，可以很好地加深对系统整体性的认识。

（三）理论联系实际实践途径

机电一体化是一门应用性很强的工程学科，它的学习过程绝不能脱离实践。理论知识给我们提供的是分析问题的工具和框架，实践则是加深理解、检验真理、培养工程能力的途径。把课堂上学到的抽象公式、原理转化成看得见摸得着的物理实体，并让它们按照我们所想的方式运动、工作，这样的体验及能力的提高是纯粹理论学习所不能比拟的。理论联系实际的方式多种多样，学习者应该根据自身的实际情况和兴趣积极地探寻。

1. 开展个人兴趣项目，从简单的项目开始，是激发学习兴趣、建立自信的一种有效方法。例如，可以试着做自动巡航小车。本项目虽小，但是包含着机电一

体化的基本要素,机械底盘搭建、红外或摄像头传感器的使用、电机驱动电路设计、核心控制算法编写。制作过程中会出现电机转速不匹配、传感器信号受到环境光的干扰、程序逻辑不完善等许多实际问题。独立思考并解决这些问题,就是把理论知识内化为实践能力的过程。

2. 参加机器人大赛、智能车竞赛等科技比赛。该类比赛给学生赋予了高强度、有明确目的的实践舞台。竞赛一般会给出一个复杂的工程任务,要求参赛者在规定的时间内设计并制作出可以完成任务的实体系统。准备阶段要经过方案论证、机械设计、电路焊接、软件编程、系统调试等许多环节,就是项目开发完整的流程。在高压力的竞争环境中,解决问题的效率以及创新能力都会得到极大的锻炼。

3. 去企业实习。深入到企业一线是了解真实的工业需求,接触最新的技术最好的方法。学生在实习岗位上可以参与到实际产品的研发、生产、维护过程之中,学习企业规范化的项目管理方法,认识到成本、可靠性、可维护性 etc 在学校中很少涉及的现实约束条件。和有经验的工程师一起工作,观察他们怎样分析和解决工程难题,可以让你快速成长,缩短从学生到合格工程师的过渡时间。

三、课程学习与工程实践结合

为了把理论知识变成工程能力,本课程设计中特别重视课堂学习同工程实践的深入融合。以课程设计、实验教学、科研项目三种形式来构建起层次分明、互相补充的实践教学体系,将学生置于真实的工程问题情境之中,全方位锻炼学生综合设计、动手操作、创新探索的能力。

(一) 课程设计的选题与实施

课程设计属于理论学习同综合实践之间的桥梁。在教师的指导下,学生以小组或者个人的形式,完成一个机电一体化产品从设计开发到最终实现的全部过程。本环节主要考查学生对全书知识的综合运用能力以及系统设计能力。课程设计课题具有开放性、灵活性,既可以是教材中规定的指定题目,也可以是学生自选的。选题大多来自于工业上的简化应用或者生活中对自动化的需求,目标是完成特定功能并且达到一定的性能水平,比如可以按照物料颜色自动分拣的传送带系统。

课程设计的实施完全按照工程开发的要求来进行。需求分析、方案论证阶段,学生需对任务要求做详细的分析,查阅有关资料,提出两种以上的备选实现方案,从技术可行性、经济性、创新性等角度进行比较,最后选出最佳方案。详细设计

阶段包含机械结构绘制与仿真、传感器和执行器选型计算、控制单元（可编程逻辑控制器或者单片机）选择、电气原理图及接线图设计、控制软件流程图设计。该阶段的学生要经常用本书各章的知识来计算和做决定。虚拟样机或者实体样机的制作和调试。学生需要编写控制程序，将程序下载到控制器上，与硬件平台一起调试。调试过程是问题最多、最能锻炼人的阶段；学生在此过程中会遇到理论设计与物理现实之间的差异，从而学会通过观察、分析、实验的方式来找出并解决问题。整个课程设计以详细的课程设计报告、最终的成果演示为考核标准，对学生在课程设计过程中所表现出来的各种能力进行全方位的评价。

（二）实验教学的技能训练

实验教学对于学生工程技能的培养和科学态度的形成起到重要的作用。它是理论知识的直接验证平台，也是学生熟悉常用仪器设备操作、实验方法的途径。本书配套的实验教学体系经过精心设计，覆盖了机电一体化系统各个核心技术单元，通过由易到难的一系列实验项目来逐步提高学生动手能力和实践技能。实验内容主要是从以下几个方面进行的。

1. 单元技术基础实验：就是对单个技术模块原理的验证以及技能训练。传感器实验要掌握光电传感器、接近传感器、温度传感器的工作原理，亲手搭建检测电路，进行信号采集与调理。步进电机、伺服电机控制实验，目的在于使学生掌握对这些执行器进行开环、闭环控制的编程方法，观察不同的控制策略下动态响应的特点。

2. 控制技术应用实验：主要针对可编程逻辑控制器、单片机这两种主流控制器的编程和运用进行训练。可编程逻辑控制器实验一般从基本逻辑指令开始，再逐步进行交通灯、电机启停等典型工业时序逻辑控制。单片机实验主要是接口电路的设计以及 C 语言编程，如驱动数码管显示、键盘扫描、模数转换器读取模拟信号等。

3. 综合性、设计性实验，在掌握单元技术的基础上，综合性实验要求学生综合运用多个模块完成复杂任务，如搭建可编程逻辑控制器气动机械手控制系统，实现工件抓取搬运。设计性实验给学生留出更大的发挥余地，只规定实验需要达到的功能目标，具体的硬件选型和软件实现路径由学生自己设计，极大地激发了学生的创新思维和自主学习能力。经过这样的分层实验训练，学生一方面可以加深对理论的理解，另一方面也可以获得很多宝贵的实践经验和解决实际问题的初

步经验。

（三）科研项目的参与体验

对于学有余力、对技术研究有爱好的学生来说，参加导师的科研项目，就是培养他们的更高层次创新能力的最好办法。科研项目同课程设计、实验相比，由于所面对的科学前沿和工程难题都是未知的，所以探索性、不确定性是科研项目最明显的特征。参加科研项目，学生可以接触到行业内最新的一些技术动向以及研究手段。

学生在科研团队中一般会从做一些比较具体、辅助性的任务开始，文献资料的调研与整理、某个算法的编程实现与测试、实验数据的采集与分析等。该过程可以使学生很快地掌握相关的学科基本知识以及专业工具。随着项目的推进，导师会一步一步地使学生参加方案的讨论与设计工作，甚至让学生独立完成某一个子系统的研究。学生可以借此学会科学的研究范式、严谨的逻辑思维，以及怎样从纷繁的现象中提炼出关键的科学问题。

参与科研项目的经历对学生的影响是全方位的。它可以明显提高学生专业技术水平和解决复杂问题的能力，也可以培养学生批判性思维、创新意识、团队协作精神。完成一项科研任务后获得的成就感、参加学术会议展示研究成果的经历都会极大提高学生们的自信心。这段宝贵的经验对于将来继续读研究生或者去企业从事研发工作，都会起到重要作用并使自己与众不同。

第二章 机电一体化系统总体设计

机电一体化系统设计是一项复杂的、精细的工程，它把机械、电子、控制、信息技术有机地结合在一起。本章主要是对总体设计阶段的关键部分和方法进行论述，给智能化系统的良好、可靠创建打下良好的理论基础和实践基础。

第一节 系统设计与需求分析

机电一体化系统的生命周期是从需求的准确定义开始的，是遵循一定的设计程序进行的。本节主要研究从市场需求获取到最终形成设计任务书的过程，目的是确定系统开发方向，明确清晰的目标，给后续的设计实现提供根本的遵循。

一、市场需求与设计任务书

设计任务书是市场与工程之间沟通的桥梁，把模糊的市场需求转变成明确的工程设计要求。设计团队在这一过程中要对用户的需要有深入的认识，确定设计的目的，并对项目是否可行、存在哪些风险做全面的分析。

（一）市场调研与用户需求挖掘

市场调研是机电一体化产品成功的基础，核心就是深入认识并准确把握目标用户显性的、隐性的需求。调研工作一般会采用问卷调查、用户访谈、焦点小组讨论等方法，从各个角度获取用户的使用习惯、功能偏好、痛点问题、期望价值等第一手资料。原始数据为后面分析打下了基础，也使团队对用户画像、应用场景有了初步的认识。

收集信息之后，最重要的一步就是进行系统的需要挖掘和分析。设计团队一般用 Kano 模型等工具来对需求进行分类排序，把基本型需求、期望型需求、兴奋型需求区分开。基本型需求是产品必须具备的功能，不能满足的话会使得用户满意度急剧下降；期望型需求和用户满意度成正比，性能越好，满意度越高；兴奋型需求就是超出用户预期的“惊喜”功能，可以极大提高用户的忠诚度。这样

就使得团队清楚地知道哪些是必须要完成的门槛功能，哪些是创造竞争优势的亮点功能。

最终所有的用户需求经过分析、筛选、排序之后就会被整理成文，形成需求规格说明书。该文档真实地记录了用户需求，体现了产品主要功能，是后续所有设计、开发、验证工作的依据，保证项目组对最终目标有统一深刻的认识，防止因目标不明确而造成项目方向偏离和资源浪费。

（二）设计指标的确定与分解

设计指标是把用户需求转化为工程语言的过程，给产品设计、制造、测试、评价提供客观、可度量的标准。指标的确定要兼顾性能、可靠性、成本、可维护性等各方面，以保证最终的产品能够全面满足市场以及用户的各种需求。该过程注重科学性与系统性，质量功能展开是实现这一目的的主要方法。

1. 利用质量功能展开法：QFD 又称为质量屋，是客户需求转化为技术要求的系统化方法。它就是通过建立客户需求和关键技术特性的关联矩阵来确定各个技术指标对于满足用户需求的重要性。设计团队需要量化的确定两者之间关系的强弱（强、中、弱），并结合用户对各项需求的重要性程度打分，从而得出各个技术特性所具有的权重。这就使得设计资源可以准确地投向给用户带来最大价值的技术环节，保证重要的性能得到优先保障。

2. 指标逐层分解：确定了顶层系统技术指标之后，必须把顶层系统技术指标逐层分解到各个子系统、模块、元器件上。无人机系统对长续航的要求，就会被拆解成电池系统能量密度、电机和螺旋桨效率、整体结构轻量化等具体技术指标。分解过程要遵循系统工程的原则，保证下层指标的集合可以完全支持上层指标的实现。每一个层次分解都要做详细的计算论证，并清楚地标明各模块之间接口关系和约束条件，从而形成一个完整协调无矛盾的指标体系树。该体系树给各个设计团队提供清晰的设计输入，也为之后的集成、测试设定了准则。

（三）可行性分析与风险评估

可行性分析是在项目开始之前，对设计方案在技术、经济、操作、法律等各方面现实可能性进行全方位的评价。技术可行性分析就是评价目前技术水平、资源条件、团队能力是否能够达到所设定的设计目标，包括对关键技术成熟度的判断、核心元器件的可获得性、制造工艺复杂程度等。设计时如果需要使用某项前沿但是尚未大规模应用的传感技术，则要考察供应商的稳定性和技术支持能力。

经济可行性分析就是对研发、生产、营销、运维等整个生命周期的成本进行运算，预测市场销售所获得的潜在收益，从而判断项目在财务上是否可行、有利可图。操作可行性指产品未来在实际使用环境里是否方便、安全、容易维护。法律和社会可行性，即该产品是否符合相关的法规标准，不能违反社会的伦理和环保要求。

风险评估与可行性分析是相辅相成的，其目的是对项目全过程的各种不确定因素做系统的识别、分析、应对。这是项主动的、前瞻性的管理事务。失效模式与影响分析是做风险评价的有力工具。FMEA 自下而上地对系统中的每一个零部件、每一个工艺环节可能存在的潜在失效模式进行分析，并评价这些失效模式对上层系统甚至最终用户的影响程度 S 、发生可能性 O 和被发现难度 D 。通过三者的乘积来计算风险优先数，可以得到所有潜在风险的排序，从而让团队可以优先将资源投入到风险最高的项目中。

高风险点被识别出来之后，需要制定相应的风险应对措施，一般有风险规避、风险转移、风险降低和风险接受。

整个可行性分析、风险评估过程是动态的、持续的。设计越来越深入、外部环境发生变化，新的信息和不确定性也随之产生。因此需要定期对分析结果进行复核和更新，保证设计任务书的各项内容始终建立在现实和理性的基础上，为机电一体化系统成功开发提供保障。

二、系统总体设计流程

系统总体设计流程是把抽象的功能转化成具体的蓝图的过程，它给复杂系统有条理的开发赋予了清晰的路线图。该过程具有逻辑性、迭代性，在保证设计方案功能满足的基础上，使结构合理、性能最优。

（一）功能规划的制定步骤

功能规划是系统设计的第一个步骤，它把设计任务书上描述的用户需求转化为系统应该具备的具体功能。此步骤的核心目的在于形成一个完备清晰的系统功能框架，为之后原理设计给出明确的依据。制定功能规划一般是从确定系统总目标开始，即确定系统最核心、最顶层的目标。自动包装设备的总目标就是按指定规格自动完成物料的包装。

在此基础上，采用功能分解的方法，把总功能逐层分解成若干相互联系的子功能。该过程类似于构建功能树，树根为总功能，树枝、树叶为各子功能。自动

包装设备的总功能可以分为物料供给、计量、制袋、填充、封口、切断、成品输出等一级子功能。一级子功能可以再细分成“封口”、“加热”、“加压”、“冷却”。功能分解要遵循分解彻底、覆盖全面、接口清晰的原则，保证所有必要的功能都被包含在内，子功能之间的逻辑关系、信息、能量、物质的流转清晰。采用模块化思想对功能进行划分，有利于后面并行设计和系统集成。

（二）详细设计与验证环节

详细设计阶段就是把已经确定的原理方案转化成具体的、可制造、可执行的工程图纸和技术文档的过程。此环节工作细致严谨，决定最后产品质量的好坏。详细设计包含系统所有部件尺寸公差、材料选用、表面处理工艺、电路原理图、印制电路板布局布线、元器件选型、算法实现、代码编写、模块划分。每个部分的设计都必须严格依照前期分解的各项技术指标和约束条件。

验证环节与详细设计紧密相连，迭代进行，目的就是尽量在投入物理制造之前发现并修正设计中的错误和不足。

1. 仿真分析和虚拟样机，现代机电一体化设计很大程度上依靠计算机辅助工程工具来进行仿真分析。工程师用有限元分析验证结构强度和刚度，用多体动力学仿真分析机构运动特性，用计算流体动力学模拟流场、热场分布。将各个领域不同的模型整合在一起就构成了系统虚拟样机。虚拟样机可以在计算机上模拟系统在真实工况下运行的情况，检验系统动态性能、可靠性、各个子系统之间的耦合效应，早期发现设计缺陷，大大缩短研发周期，降低物理样机试错成本。

2. 物理样机试制与实验：虚拟验证功能很强大，但物理样机的试制和实验还是不能省的。样机制造完成后要进行一系列严格的试验，以检验其各项性能指标是否达到设计要求。功能测试、性能测试、环境适应性测试、可靠性与寿命测试、安规认证等。测试中遇到的问题要反馈给设计端，由设计端进行分析修改，形成设计、验证、修改的闭环，直到产品性能稳定，完全满足设计任务书的要求。

三、设计要求与约束条件分析

在机电一体化系统设计之初，就要对所有设计要求以及边界约束做全面深入的分析。它关系到系统能否最终达到预期的目标，也影响整个开发过程效率、成本，是项目取得成功的保证。

（一）性能指标的具体量化

性能指标的量化就是把抽象的设计目标转变为具体的、可测量的、可验证的工程参数，它是评价设计好坏、指导优化方向的基础。模糊的性能描述，例如高精度或者快速响应，在工程实践中如果没有具体的数值和单位，就无法实现。因此高精度量化出来就是定位精度 $\pm 0.01\text{mm}$ 、重复定位精度 $\pm 0.005\text{mm}$ ；快速响应具体化为系统阶跃响应的上升时间小于 50ms 、超调量不大于 5% 。

量化过程要考虑各方面因素。根据市场需求、竞争分析来确定性能指标在行业内所处的位置，即达到行业平均水平还是领先地位。采用理论计算、仿真分析的方法，在现有的技术、成本条件下对所能达到的性能极限做出初步预测，保证设定的目标具有现实性。还要考虑到各项性能指标之间内在的联系与制约。机器人设计时如果过分追求高速度、高加速度，就会造成系统振动增大、能耗增加、结构刚度要求提高，从而影响定位精度和运行平稳性。

因此，性能指标的量化就是权衡取舍的过程，在满足核心功能需求的基础上，对精度、速度、稳定、能耗、可靠性等各方面进行最佳平衡。这些精确量化的指标将会成为之后设计计算、仿真验证、样机测试以及最终产品验收的主要标准，保证所有的参与者对好与坏有一个统一的评判标准。

（二）工作环境适应性要求

机电一体化系统的工作环境千差万别，洁净的室内和严酷的野外，其性能、寿命都会受到环境的影响。因此，在设计之初就必须对系统所处的工作环境做详尽的分析，并提出相应的适应性设计要求。这些要求保证产品在预定的环境里可靠、稳定、安全地工作。

1. 温度、湿度、振动、冲击、气压、粉尘、盐雾等为物理环境因素。设计时需要确定系统的温度范围（ $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ ），根据温度范围选择宽温级的电子元器件，设计热管理方案（散热风扇、热管、加热片）。在高湿度、高盐雾的环境下要进行三防设计，即防潮、防盐雾、防霉菌，例如对电路板进行涂覆，对结构件进行耐腐蚀表面处理。对于振动和冲击，使用结构优化，加设减振器等手段来避免共振，提高抗冲击的能力。

2. 电磁环境因素：电磁兼容性是机电一体化系统设计的重要要求，分为两个部分：系统自身产生的电磁骚扰不能对周围的设备造成干扰；系统必须具备抵抗外部电磁骚扰的能力。为此在设计时应采取以下措施：对电源滤波，对敏感信号

线和重要电路板进行屏蔽，保证单点接地，优化 PCB 布局减小高频信号环路面积等，从而使整个系统能通过相关的 EMC 测试标准。

典型环境适应性设计策略

环境因素	潜在影响	设计策略举例	常用材料 / 技术
温度	元器件性能下降、寿命缩短	宽温元器件选型、主动 / 被动散热、加热	工业级芯片、热管、相变材料
湿度 / 盐雾	腐蚀、短路、绝缘失效	三防涂覆、密封设计、防腐材料	环氧树脂、硅胶、不锈钢、电镀
振动 / 冲击	结构疲劳、连接松动、功能失效	结构优化、减振器、阻尼材料、加固	橡胶减振垫、弹性连接、高强度合金
粉尘	磨损、散热不良、电路污染	密封箱体、防尘滤网、正压防护	工业级密封件、过滤膜、IP 防护等级
电磁干扰	数据错误、功能异常、系统崩溃	屏蔽、滤波、接地、PCB 布局优化	导电涂层、铁氧体磁环、差分信号

如上表所示，针对不同的环境因素，机电一体化系统需要采取多样化的设计策略以确保其适应性。

（三）成本与周期的经济约束

成本、周期是任何商业化的开发项目都必须遵守的硬性规定，也是决定项目是否具有经济可行性以及市场竞争力的因素。在机电一体化系统设计之初就要对这两个约束做出明确的定义，并贯穿整个设计和开发的全过程进行有效的控制。脱离了成本、周期的设计，再先进也不能被市场接受，或者因为上市过晚而失去商业机会。

目标成本法是以市场为出发点，自上而下进行成本控制的一种方法。它首先用市场调查来确定消费者可以接受的目标价格，然后减去企业期望获得的利润，得出产品应该达到的“目标成本”。此目标成本将会成为设计、制造过程中的“天花板”，所有的技术决策、方案选择都在它的约束之下进行。之后目标成本就会分解到系统各个模块、零部件上，各设计团队要在自己的成本限额内寻找最佳技术实现途径。该方法要求设计人员在项目初期就具备很强的成本意识，用价值工程分析来剔除多余的过度设计，找到功能和成本的最佳平衡点。

全生命周期成本管理把成本的视角从只考虑制造成本扩展到研发、采购、运营、维护、报废处置等产品全生命周期。初始采购成本低的设备，由于能耗高、故障率高、维修备件贵，总拥有成本会比竞争对手高很多。因此，在设计阶段就

应对各种方案的全生命周期成本影响做综合分析。采用质量更高、寿命更长的轴承或者电机,虽然会提高制造成本,但是因为后期维护频率降低、停机损失减少,总体生命周期成本反而更占优势。

开发周期也是决定产品是否成功的一个重要因素。在变化迅速的市场中,最早推出产品的企业一般会获得先机,获得品牌优势。项目管理中的关键路径法和计划评审技术工具被用作项目进度计划的详尽安排之中,用以找出决定整个项目所需时间的活动节点。通过科学安排工作量、协调各任务间的关系、并行作业等方式可以达到缩短开发周期的目的。设计阶段使用模块化、标准化的方式选择成熟的货架产品和技术,可以有效地降低开发风险、加快项目进度,保证产品按时上市。

第二节 总体方案设计与评价方法

机电一体化系统总体方案设计,就是把系统需求和技术实现联系起来的纽带。本阶段任务是在确定设计要求的基础上,经过创造性构思提出多种可行的实现方案,再用科学的评价与决策方法从中选出技术上先进、经济上合理、综合性能最佳的方案,为详细设计打下基础。

一、总体方案的构思方法

总体方案的构思是设计过程中最具创造性的环节,需要设计者冲破思维定势,从多个方面、多层次去寻找实现系统功能的方法。有效的构思方法可以系统地激发创新,拓宽解决问题的思路,从而产生更多的、更好的备选方案,避免由于思维局限而错失最好的设计。

(一) 黑箱法与功能抽象

黑箱法属于功能分析当中一种重要的抽象思维方法。在机电一体化系统设计的初期,可以将整个系统或者子系统当作一个黑箱,忽略其内部复杂的物理结构和实现细节,把注意力集中在系统的输入、输出和两者之间的关系上。输入可以是能量、物料或者信息,输出也如此。设计者从繁杂的技术细节中解脱出来,把精力放在系统“做什么”的主要功能上,而不是“怎样做”。

功能抽象在此基础上更进一步,把黑箱要实现的总功能分解为一系列互相联

系的基本功能单元。每一个功能单元都可以看成一个小的黑箱，有自己的输入和输出。利用功能结构图可以清楚地看出系统内能量流、物料流、信息流的转换过程。自顶向下、分层分解的方式有利于设计者系统地认识、梳理复杂系统的内部逻辑，保证所有的必要功能都被充分考虑在内，为后面找到具体的实现方式提供清晰的功能框架和方向。

（二）形态学矩阵与方案组合

形态学矩阵法又称为茨维基矩阵法，是一种强有力、系统化的产生新方案的方法。它以二维表格的形式，把系统要实现的总功能分解成若干个并行的基本功能或组成部分，把这些基本功能或组成部分作为矩阵的行；对每一项功能，列出所有可能的技术实现原理或者结构形态，把这些技术实现原理或者结构形态作为矩阵的列。于是就形成了包含所有可能解的形态学矩阵。

构建形态学矩阵的关键就是全面、无遗漏地找出系统的重要功能参数，针对每一个参数尽可能多地找到创新的实现途径。这些途径可以来源于现有的技术，也可以是跨领域的知识借鉴，甚至是全新的构想。矩阵建立以后，就可以从每行的元素中选择，设计出矩阵中所有的路径组合，每条有效的路径就代表一个完整的总体方案。

这种方法最大的优点就是具有很强的组合生成能力。一个包含 m 个功能，每个功能平均有 n 种实现方式的系统理论上可以产生 n 的 m 次方个方案。形态学矩阵用图形化的方式把所有可能存在的方案都展现出来，极大地扩展了设计空间，有效地避免了思维定势造成的方案狭窄，从而避免了设计思想被早期限制在少数熟悉的方案上。经过对矩阵中的组合进行筛选和初步评价，就可以得到一批可行且新颖的候选方案。

（三）创造性思维的运用技巧

虽然系统化的办法给方案构思赋予了架构，但是突破性的革新常常产生于非线性的创造性思维里。掌握一些创造性的思维方法，在机电一体化系统设计过程中，可以有效地激发灵感，产生意想不到的解决办法。这些方法并不是凭空产生的，而是根据一定的规律产生的，是智慧的结晶。

在众多技巧中，有几种尤为常用且有效：

1. 头脑风暴法的核心就是提倡思维的自由发散，在不受任何批评和限制的环境下，让团队成员畅所欲言，尽可能多地提出想法。此过程重视延迟评判、重数

量不重质量，依靠相互启发、联想来产生大量的想法，在海量的想法碰撞中激发出有价值的创新火花。

2. 类比法，即从其他领域寻找解决当前问题的启示。可以从生物界中获得仿生学的启示，也可以将航空航天、精密仪器等其他工程领域中已经成熟的原理和结构，经过改造后应用到目前的机电系统中。跨界借鉴就成了技术实现跨越式发展的有效途径。

3. 发明问题解决理论是一套强大的、以大量的专利分析为基础总结出的创新方法体系。通过定义技术矛盾和物理矛盾，用其内部构造的矛盾矩阵、分离原理和四十个发明原理为设计者提供系统解决技术瓶颈的方法，尤其适合处理那些表面上看起来互相排斥的设计矛盾。

二、系统性能评价方法

在方案构思阶段产生出若干备选方案之后，接下来的任务就是对其进行科学、客观的评价。系统性能评价就是建立一个统一的衡量标准，按照预先设定的设计目标和约束条件，对各个方案的优劣进行量化或者定性的比较，其评价结果是后续进行方案决策的直接依据。

（一）技术经济评价法

技术经济评价法是将技术性能指标和经济成本指标结合起来，在产品设计的全过程里应用的一种综合评价方法，其目的就是找到技术先进性和经济合理性之间的最佳平衡点。机电一体化产品作为商品，其市场竞争力不是单纯依靠产品功能和性能的好坏来决定的，更多的是受到产品成本、价格的影响。脱离经济性的技术追求是不能持久的。

从技术上讲，评价指标一般包括系统精度、系统速度、系统效率、系统可靠性、系统稳定性、系统安全性和人机交互友好性等。这些指标体现的是方案实现功能需求的程度，一般可以通过理论计算、仿真分析或者样机试验来获得。每个指标的重要性，即权重，要按照产品所处的应用场景和用户的主要需求来确定。

从经济角度来说，评价的时候要充分考虑到产品全生命周期的成本。研发阶段支出、原材料采购费、生产制造费、装配调试费等属于直接费用的生产制造费用，产品使用过程中产生的运行费、维修费、更换备件费等消耗费以及报废处理费等属于间接费用。对各种方案做详细的成本核算、效益预测，计算投资回报率、

净现值等经济指标来衡量它的市场价值及盈利能力。技术经济评价的最终目的就是以满足技术要求为前提，选择性价比最高的方案。

（二）模糊综合评价法

机电一体化系统的评价过程当中，许多重要的指标不能被准确地量化出来，比如外观的“美观度”、操作的“便捷性”、系统的“智能化水平”等等。这些指标具有很强的主观性以及模糊性。对于这样的问题，传统的定量评价方法无能为力，但是模糊综合评价法可以提供解决途径。该方法利用模糊数学理论把模糊的定性概念进行量化。

模糊综合评价法的步骤清晰、系统。第一步就是建立评价因素集，也就是确定所有的评价指标，包括定量和定性两方面。第二步就是建立评语等级集，即将各个评价的结果划分为优秀、良好、一般、较差等几个等级。第三步就是确定各个评价因素的权重，一般由专家小组根据各因素对系统总体性能的重要性来确定。第四步，也是最核心的一环，就是进行单因素模糊评价。领域专家对每一个备选方案，给每一个评价因素赋值它属于各个评语等级的隶属度，得到一个模糊关系矩阵。经过模糊运算把权重集和模糊关系矩阵融合起来，就能得到一个综合评价向量，这个向量体现出备选方案在总体上属于各个评语等级的程度。通过对向量的分析或者使用最大隶属度原则，就可以对方案的优劣进行排序。

（三）层次分析法

层次分析法是把复杂决策问题分解成不同的层次，再结合定性定量分析的一种系统化的决策方法。它特别适合于多目标、多准则、多方案、结构复杂的问题，可以将人的主观判断用量化的形式来表达和处理，使决策过程更加系统化、逻辑化。机电系统方案评价中，它常被用来确定各个评价指标的权重，或者直接对方案进行排序。

该方法的第一步就是将决策问题结构化，建立递阶层次模型。模型一般由三层组成：顶层是总目标，即选出最好的机电系统方案；中间层是评价准则层，包含评价方案好坏的各种子准则，如性能、成本、可靠性等，准则层还可以进一步细分为次准则；底层是方案层，即所有的待评价的备选方案。

构建层次模型之后，第二步就是利用两两比较的方法，确定同一层次内各个元素相对于上一层某一准则的相对重要程度。专家在确定准则权重时需要回答，相对于总目标，性能和成本哪一个更重要，重要程度是多少？比较时一般用 1 到

9 的标度来构成判断矩阵。

通过对本层次各个元素的极大特征值以及对应的特征向量进行计算，即可得到本层次各个要素的权重顺序。对所有层次重复上述操作之后，再自上而下地进行权重合成，即可得到各个备选方案对于总目标的最终得分，得分最高的方案即为推荐的最优方案。层次分析法还给出了一致性检验的方法，用以检验专家两两比较时是否存在逻辑矛盾，保证评价结果的可靠性。

上述三种评价方法各有侧重，其主要特点、适用场景及优缺点可见下表。

系统性能评价方法对比表

方法名称	适用场景	核心特点	优点	缺点
技术经济评价法	目标明确、指标可量化，追求性价比	结合技术与经济指标，量化成本与收益	综合考量经济性，结果直观	难以处理定性指标，对数据要求高
模糊综合评价法	存在大量模糊、主观的定性指标	运用模糊数学量化定性概念，处理不确定性	能处理模糊信息，评价结果更全面、贴近实际	权重和隶属度确定受主观影响，运算复杂
层次分析法	多目标、多准则、结构复杂的决策问题	结构化问题，两两比较，量化主观判断	逻辑清晰，系统性强，可进行一致性检验	判断矩阵构建主观性强，指标过多时计算量大

三、方案决策与优化

所有的备选方案评价完后，设计小组就进入方案的选择和优化阶段了。本阶段根据评价结果以及其它影响因素作出最终选择，并就选定的方案中的缺陷进行修正和完善，在进入详细设计前达到最优状态。

（一）多目标决策理论

机电一体化系统的设计决策本质上就是典型的多目标决策问题。设计者一般希望系统性能好、成本低、体积小、可靠性高，但这些目标往往是互相冲突的。提高系统精度一般会增加制造成本，减轻设备重量又会降低其刚度和稳定性。多目标决策理论给处理此类问题提供数学框架和工具。

该理论的主要思想并不是去寻找使所有目标同时达到最优的“完美解”，因为这样的解一般不存在。目的是找到一组帕累托最优解（非支配解）。对于非支配解来说，任何一个目标的改善都会导致至少一个其他目标的恶化。这组解共同构成帕累托前沿，也就是当前技术条件下所有的最优权衡方案的集合。设计者可

以将前沿展示给决策者（客户或者管理层），由决策者根据自己的偏好、战略重点从中选择一个最能接受的折中方案。常用的多目标决策方法有加权求和法、约束法、目标规划法等，可以系统地帮助设计者找到帕累托最优解集。

（二）灵敏度分析与权衡

灵敏度分析是方案决策和优化的重要环节，其目的是研究模型或者系统输入参数变化时输出结果受到多大的影响。在机电系统设计过程中，利用灵敏度分析找出影响系统性能最关键的设计变量及外部条件，从而得到更为稳健的设计方案。

进行灵敏度分析具有多重意义：

1. 关键参数的识别：经过分析可以找到对系统最终性能（定位精度、响应时间等）影响最大的设计参数（电机刚度、丝杠导程等）。对于高灵敏度参数，在设计制造时要加以注意，采用更精确的计算模型，严格控制公差。

2. 了解设计权衡：灵敏度分析可以定量地描述出各种性能指标之间互相制约的关系。它能够告诉设计者将某一个结构件的壁厚减薄 1 毫米，系统重量会减轻多少，但是最大应力就会增大多少。量化信息给在冲突目标之间做理性权衡提供可靠的数据支持。

3. 评价方案是否具备良好的鲁棒性，即优秀的方案不应在标称条件下很好，但要能对制造偏差、环境温度变化、负载波动等不确定因素具有很强的抵抗力。灵敏度分析可以用来评价各个方案对于各种干扰的抵抗能力（即鲁棒性），从而选出实际工作中更为稳定的方案。

（三）最终方案确定策略

最终方案的确定是综合性的决策过程，前期评价方法得到的量化分数、设计团队的工程经验、对风险的判断、对未来发展的预见等都会影响最终方案的确定。仅依靠模型和数据做出的决策，会忽略一些不能用数量来衡量的隐性因素。因此，在决策的最后阶段，召开由设计、工艺、制造、市场、采购等多方人员参加的方案评审会就显得尤为重要。

在评审会上对排在前几位的候选方案进行最后审议。讨论的内容要包含技术可行性、制造成本和周期、供应链风险、维护方便性、市场接受度、是否符合公司长期技术发展战略等等。有时候，即使技术上不占优势，但是由于方案成本低或者与公司现有的生产线兼容性好，仍然会因为商业上的优势而被选为最佳。决策过程应该尽可能地透明，所有的关键决策依据以及讨论过程都应该被记录在案。

最终方案一旦被决定下来,就意味着整个团队的资源、努力都将集中到此方案上,决策的成败直接关系到项目的成败。

四、设计文档与规范管理

设计文档是设计过程中智慧的结晶,也是设计成果的集中体现,是生产、装配、调试、维护的重要依据,也是团队之间交流、沟通、知识传递的重要途径,更是质量控制的基础。建立严格的设计文档、规范管理体系,对机电一体化系统项目顺利实施、产品全生命周期管理起到不可替代的作用。

(一) 设计说明书的编写规范

设计说明书是纲领性技术文件,对设计全过程做了全面、系统的阐述。一份好的设计说明书应该逻辑清楚、内容完整、数据准确。其编写必须严格依照规范进行,保证信息传递的准确无误。设计说明书一般包括项目概述和设计任务来源,即对设计背景、设计目的和主要技术指标要求进行说明。

主体内容要详细说明总体方案确定的过程,即对不同的备选方案进行比较,说明最后选择的理由。后续章节主要对各个主要组成部分进行计算设计,机械结构强度刚度校核、关键零部件选型、电机与驱动器匹配计算、传感器选择依据等。控制系统设计也十分重要,需要说明控制系统硬件组成、控制策略、算法流程和软件架构。

说明书还应有系统仿真分析结果、预期性能指标、装配和调试说明、初步成本估算和经济性分析。所有的标准、参考文献、计算机软件都应该被清楚地列出。编写时务必使用规范的工程语言和术语,图文并茂,保证任何具有相关专业背景的工程师都能够准确无误地理解设计意图。

(二) 图纸与技术文件管理

图纸是工程界通用的语言,也是设计与制造的纽带。机电一体化系统所用图纸种类繁多,有总装配图、部件装配图、零件图、电气原理图、接线图、液压和气动系统图等。所有的图纸绘制都必须严格按照国家或者行业颁布的制图标准进行,保证图纸规范、清晰、唯一。图纸上尺寸、公差、形位要求、材料、热处理、表面处理等应该完整、准确地标注出来。

除图纸外的技术文件有外购件清单、标准件清单、工艺规程卡、操作手册、维护手册等。对所有的图纸和技术文件实行系统的管理十分重要。有效的管理体

系应该有统一的文件编码规则，给文件赋予唯一的标识。同时应该创建中心化的电子档案库或者物理档案库，对文件进行分类保存，并建立索引，便于相关人员及时、准确地查阅所需的文件。

文件签审程序为质量把关。一份正式发布的文件要经过设计、校对、审核、批准等一系列的严格审查，最后由有关责任人签字确认。文件的分发、回收要详细记录，防止过时或者错误的图纸流入生产现场，造成不可挽回的损失。现代企业越来越倾向于使用产品数据管理或者产品生命周期管理系统，用电子化的方式对所有的技术文件进行高效、安全、规范化的管理。

（三）版本控制与变更流程

机电一体化系统设计开发过程中变更属于常态，不是例外。随着设计的深入、测试的进行或者客户需求的改变，对已有的设计进行修改是不可避免的。如果没有严格的版本控制和变更流程，设计过程很快就会陷入混乱，造成各个部门使用不同的图纸版本，严重时还会造成制造错误或者项目延误。

版本控制的主要目的就是给文件的每一个正式修改生成一个新的、可以追溯的版本号。图纸、三维模型、控制软件代码等都应该被纳入到版本控制系统中进行管理。这保证设计的每一次变动都有历史记录可以追溯，在出现问题的时候可以迅速回溯到以前的稳定版本。在复杂的协同设计中，版本控制可以很好地管理各个工程师对同一个文件的并发修改，防止工作冲突、数据丢失。

当需要变更设计的时候，必须走一个正式的变更程序。该流程一般从一份工程变更申请开始，申请人在申请中详细说明变更内容、原因、影响。申请之后，就进入到由技术专家和管理者组成的变更控制委员会评审。评审通过之后会签发工程变更指令，正式授权设计修改。变更完成后所有受影响的图纸、文件、物料清单等要更新成新的版本并且及时告知采购、制造、质检、售后服务等部门，保证组织内部信息的统一性。该闭环流程，是保证设计质量，控制项目风险的生命线。

第三节 机械本体与执行机构选型设计

机电一体化系统机械本体是所有功能单元的物理支撑结构，执行机构是实现系统运动功能的重要部分。本节主要对机械本体的设计要求、常用传动机构的选择、导向及支撑部件的选择、执行机构的运动学分析进行详细的分析。目的是为

高精度、高效率、高可靠性的机电一体化系统打下基础。

一、机械本体的设计要求

机械本体是机电一体化系统的基础，设计的好坏直接决定系统整体性能、精度、稳定性。一个优秀的设计要综合考虑刚度、重量、热稳定性、振动噪声等各方面因素，以满足工业应用不断增长的需求，保证系统在复杂工况下可靠工作、长久使用。

（一）高刚度与轻量化设计

高刚度、轻量化成为现代机械本体设计的基本目标，两对矛盾通过结构优化和新材料的应用可以统一。高刚度是机电系统在承载后变形极小，达到高精度定位，运动轨迹精确定位的前提。系统运行过程中切削力、惯性力等载荷都会使结构产生变形，影响最后加工或者操作的精度。为了提高刚度，设计中常采用闭合的箱型或者蜂窝状结构，增大截面惯性矩来抵抗弯曲、扭转变形。利用有限元分析等现代设计手段，可以对结构的受力、变形进行精确的预测，进而有针对性地优化加强筋、支撑梁的位置，使材料用在受力大的地方。

轻量化设计的目标就是在不降低或者提高结构刚度和强度的前提下，最大限度地减轻系统的重量。对于高速运动的机电系统来说，质量越小，惯性力就越小，加减速性能就越高，工作循环时间就越短，驱动功率和能源消耗就越低。轻量化实现途径有结构优化和材料替换。拓扑优化技术根据载荷路径、约束条件等自行得到最佳材料分布方案，去掉多余的材料，得到高效的承重骨架。

材料革新是达到高刚度、轻量化的重要途径。碳纤维复合材料、泡沫铝、高强度铝合金等新型材料由于比刚度、比强度优异，正在逐渐取代传统的钢材、铸铁。碳纤维复合材料在航空航天、高端装备上的应用，大大减轻了结构重量，而且良好的阻尼特性也有利于抑制振动。合理的结构设计同先进材料相结合，可以打破刚度和重量之间传统的限制，达到既坚固又轻盈的设计目的。

（二）结构热变形的抑制

由于电机、主轴、驱动器发热等内部热源，以及外界环境温度变化等外部热源，都会使系统长期工作精度下降。温度的变化会引起材料热胀冷缩，造成零部件几何尺寸、相对位置的改变，进而会表现出定位误差、轨迹偏差。尤其是精密、超精密加工领域，由热变形产生的误差可以比其它所有误差的总和还要大。因此

抑制结构热变形，就成为保证系统精度稳定的关键。

抑制热变形的办法主要是从控源和疏导两个方面入手。控制热源的根本办法就是优化设计来减少系统内部产生的热量。采用高效率的电动机和驱动装置，可以减少能量转换过程中产生的热损耗。主轴等高速运转的部件通过高效的润滑和冷却方式（如油气润滑、喷射冷却）迅速带走摩擦产生的热量。把发热元件和关键精度部件物理隔离开来，或者用隔热材料阻断热量传递的路径，也是控制热源的有效方法。

疏导策略指的是对已经产生的热量、热变形进行管理和补偿的方法。一方面，改善结构的设计，使它不受温度变化的影响。采用热对称结构来抵消各个方向的热变形，使关键点（刀尖点、测量点等）的位置不变。龙门式机床的横梁、立柱采用对称布置，可以减小主轴中心线受温度变化而引起的漂移。选用低热膨胀系数材料，殷钢、陶瓷、花岗岩等，也能从材料本身降低结构对温度变化的反应。

另外还可以使用热补偿技术主动修正热误差。在机床的关键部位上布置温度传感器，对结构各部分的温度场分布进行实时的检测，并且建立热变形和温度变化的数学模型。控制系统根据该模型及实时的温度数据，来估计出当前热误差大小和方向，再发出坐标轴微小反向位移的指令进行补偿，从而达到实时修正热变形对加工精度的影响的目的。以模型为基础的智能热补偿技术，是保证高精度机电系统长时间连续工作时精度稳定的重要保证。

（三）抗振性与减噪措施

振动和噪声是决定机电一体化系统动态性能、工作精度、环境友好性好坏的因素。系统在运行的过程中，由于电机运转、齿轮啮合、切削过程的断续冲击和外界环境的干扰等因素都会引起结构的振动。剧烈振动会降低加工表面质量，加快刀具和零部件的磨损，还会造成系统不稳定。伴随振动产生的噪声会恶化工作环境，给操作者的健康造成危害。因此在设计阶段就要充分考虑抗振、减噪措施。

提升结构的抗振性主要通过以下几种途径实现：

1. 提高结构固有频率。优化设计提高结构的静态刚度、减小运动部件质量，可以使结构固有频率避开外激振频率，不会发生共振。高刚度材料、缩短悬臂梁的长度、使用闭合截面等都是提高刚度的有效方法。

2. 增加系统的阻尼，阻尼就是系统消耗振动能量的能力。在结构连接处（导轨结合面、轴承座等）施加预紧力可以增大摩擦阻尼。采用高阻尼材料（铸铁、

聚合物混凝土等)制造床身等基础件,或者在结构中填充阻尼材料,或者使用主动或被动式动力吸振器,都可以吸收振动能量,迅速衰减振动。

3. 从源头上减小激励力,这是抗振设计的根本。提高运动部件的动平衡精度,减小不平衡惯性力,改进加减速曲线(S型曲线),减小运动启停时的冲击,改进切削工艺参数,防止切削颤振的发生。

降噪措施一般要和减振措施配合使用,因为固体振动是产生机械噪声的主要原因。控制噪声的方法是从声源、传播途径、接收者这三个方面入手。在声源处通过降低振动强度、改善齿轮啮合精度、使用低噪声电机和轴承等方法来减少噪声的产生。从传播途径上看,可采用隔声、吸声这两种方法。用隔声罩把高噪声部件(液压泵站)封闭起来,就可以防止噪声向外辐射。在设备内外表面涂上吸声材料(多孔纤维、泡沫塑料等),把声能转化为热能,减小反射声,降低空间内噪声强度。合理的结构设计,避免出现大的平整表面减小声音辐射面积也是一种有效的降噪方法。

二、常用传动机构的设计与选型

传动机构是机电一体化系统中的连接部件,是动力源和执行部件之间的纽带,起着传递运动和动力的作用。传动机构的好坏直接影响到系统的精度、响应速度以及承载能力。精密齿轮、滚珠丝杠、同步带、和谐波减速器等都是常用的传动元件,根据不同的应用场合做合理的设计、准确的计算。

(一) 精密齿轮传动装置设计

精密齿轮传动因为传动比准确、结构紧凑、承载能力强、效率高等特点,在机电一体化系统中起到不可替代的作用。精密齿轮被广泛地用在机床的分度工作台、机器人关节驱动等各个地方。其设计的主要目的就是保证传动平稳性、高精度和足够的承载能力,有效地控制噪声和振动。设计过程一般是从对工作条件的分析开始的,即输入转速、传递功率、传动比、预期寿命、工作环境等。

齿轮材料的选择以及热处理,对于齿轮的承载能力以及耐磨性来说起着决定性的作用。高负载、高精度应用一般用 20CrMnTi、40Cr 等优质合金钢,经渗碳淬火或者氮化处理,使齿面获得高硬度(58 ~ 62HRC)来抵抗磨损和接触疲劳,同时保持心部良好的韧性来承受冲击载荷。齿轮精度等级的好坏直接影响传动是否平顺、定位是否准确。按照国际标准,齿轮精度分为不同的等级,精密传动一

般用 5、7 级齿轮。高精度等级对齿距偏差、齿形偏差、齿向偏差的控制要求要高得多，需要用高精度的磨齿或者剃齿工艺来实现。

齿轮参数的设计包括模数、齿数、压力角、变位系数的合理选取。模数是决定齿轮尺寸和承载能力的重要参数，要按照弯曲疲劳强度和接触疲劳强度来校核。大压力角（ 25° 以上）可以提高齿根弯曲强度和齿面接触强度，但是对安装中心距的精度要求更高。正变位可防止小齿数齿轮根切，提高齿根强度；负变位可用于凑配中心距。为了获得高平稳性的传动和减小噪声，在设计时应该尽量提高齿轮的重合度，用斜齿轮代替直齿轮。斜齿轮啮合过程是渐入渐出，冲击小，传动平稳，但是会产生轴向力，需要通过轴承结构来平衡。

（二）滚珠丝杠副的选型计算

滚珠丝杠副是将旋转运动转换成直线运动的常用传动部件之一，具有效率高（一般大于 90%）、精度高、摩擦小、寿命长等优点，被广泛地用在数控机床、自动化设备、精密定位平台等各个领域。选型计算过程必须严格，保证系统性能要求得到满足，使所选用的丝杠强度、刚度、稳定性符合要求。

选型计算的第一步就是确定工作参数，即最大轴向载荷、工作行程、最高移动速度、加减速时间、定位精度要求、预期使用寿命。根据以上参数可以大致确定滚珠丝杠的导程、公称直径、精度等级。导程大小由最大移动速度和驱动电机最高转速来决定，大导程适合高速运动，小导程可以得到更大的推力，更高的分辨率。

接下来是重要的性能校核，首先是刚度校核。滚珠丝杠副的轴向刚度对系统定位精度和动态响应产生影响。刚度不够，负载作用下会产生较大的弹性变形。总刚度是丝杠轴、螺母和支撑轴承刚度综合体现出来的。丝杠安装方式（固定 - 自由、固定 - 支撑、双端固定）决定刚度和稳定性，双端固定方式刚度稳定性最好。临界转速校核很重要，丝杠的转速接近固有振动频率时会发生剧烈的弯曲振动，造成运行不稳定甚至损坏。临界转速和丝杠直径、安装方式、支撑间距有关，最高工作转速必须远低于临界转速的 70% 到 80%。

寿命计算也是不可缺少的，滚珠丝杠的寿命一般用额定动载荷表示，即在 100 万转总转数内所能承受的轴向载荷。按照实际工况下的平均转速和平均载荷来计算预期的额定动载荷，然后在产品样本里挑选出其额定动载荷不小于该值的丝杠型号。在选型时还要考虑预紧。适当的预紧可以消除轴向间隙，提高传动刚

度，但是预紧过大，会使摩擦力矩增大、温升增加、寿命缩短。最终的选择要在满足所有性能约束条件的基础上，考虑成本、尺寸、可获得性等因素来做出最优的选择。

常用传动机构对比

特性	精密齿轮传动	滚珠丝杠副	同步带传动	谐波减速器
传动精度	高	高	中	极高
承载能力	高	高	中	高
传动效率	高	极高	高	高
运动形式	旋转→旋转	旋转→直线	旋转→旋转	旋转→旋转
有无间隙	可调，可预紧	可预紧，无间隙	无间隙	微小（角秒级）
噪声	中等	低	低	低
优点	结构紧凑，传动比准	摩擦小，寿命长	结构简单，免维护	体积小，高减速比
缺点	噪声，对安装要求高	不可逆，价格高	伸长变形，易磨损	柔轮易疲劳，价格高
典型应用	机器人关节，机床	数控机床，精密平台	打印机，轻型机械臂	机器人关节，航空

上表列出了常用传动机构的对比，从中可以看出，不同传动机构在性能和应用场景上各有侧重。

（三）同步带与谐波减速器应用

同步带传动、高精度减速器属于机电一体化系统当中解决远距离传动、大减速比、高精度定位等问题的重要方式。它们各有千秋，在不同的场合起着不同的作用。由于同步带结构简单、传动平稳、不需要润滑、噪声小、具有缓冲吸振作用等特点，被广泛地用在对精度要求不高但是需要洁净、安静的场合，如打印机、绘图仪、轻型机械臂的腕部传动等。同步带传动属于啮合传动，依靠带齿和带轮齿的啮合来传递运动，因此可以保证准确的传动比。根据同步带传递的功率、传动轴转速、中心距、工作环境确定带的齿形（梯形齿、圆弧齿）和型号规格。圆弧齿同步带齿形的应力分布更加均匀，可以传递更大的功率，啮合性能好，定位精度高。

谐波减速器具有单级传动比高、回程间隙小（角秒级）、精度高、效率高、体积小、重量轻等优点，因此是高精度机器人关节、航空航天机构、半导体制造设备等领域最常用的选择。谐波减速器由波发生器、柔轮、刚轮这三大部分组成。

它的工作原理是依靠波发生器使薄壁柔轮产生可控制弹性变形，利用柔轮和刚轮齿之间错齿啮合、脱开的方式实现运动传递。由于同时啮合的齿数很多（占总齿数的 30%），载荷被分散，因此承载能力很高，传动精度也很高。谐波减速器选型时主要考虑额定转矩、瞬时最大转矩、传动比、回程间隙、扭转刚度、启动转矩这些参数。扭转刚度对伺服系统的动态响应和稳定性有很重要的作用，较高的扭转刚度可以减小负载改变时减速器的扭转变形，伺服定位更精确。机器人关节等需要高动态性能的地方，在考虑转矩和精度的同时还要校核减速器的允许输入转速和热平衡，保证在高速频繁启停的工作模式下，减速器不会因为过热而失效。

三、导向与支撑部件选择

导向、支撑部件为机械系统提供运动轨迹，是机械运转的轴心。导向、支撑部件的精度、性能好坏直接影响整个系统运动精度及寿命。滚动直线导轨和静压导轨给直线运动提供准确的导向，主轴部件给旋转运动提供可靠的支撑。对于这些部件有充分的认识并且做出正确的选择，是系统设计成功的关键。

（一）滚动直线导轨的特性

滚动直线导轨是标准化的精密运动部件，在现代机电一体化设备上应用最广，是核心的导向元件。它由导轨、滑块、滚动体（滚珠或者滚柱）和循环系统组成，依靠滚动体在导轨和滑块之间做无限循环滚动，实现高精度直线运动。最突出的特性就是摩擦力很小，动静摩擦系数差别不大，所以驱动功率需求小，低速运动时不会出现爬行现象，可以实现微米级甚至更高的精度定位。

滚动直线导轨有较好的承载能力以及刚度。使用哥特式圆弧槽或滚子结构，滚动体与轨道之间形成多点或者线接触，增大接触面积，从而可以承受上下左右四个方向的载荷。给滑块加预紧力可以消除导轨副间隙，提高导轨副的刚性，抵抗切削力等外力，保证加工精度。

由于滚动直线导轨是标准化设计、生产的，因此具有良好的互换性，用户可以根据需要分别购买导轨、滑块，自行装配，精度损失很小。安装、维护都比较简单，大多数导轨系统都装有完善的密封装置来防止灰尘等污染物进入，并通过集成的润滑系统保证长期稳定的运行。选择时要根据负载大小、速度、精度、使用环境来选择合适的导轨尺寸、滚动体（滚珠或滚柱）、精度等级、预紧等级。

（二）静压导轨的应用场景

静压导轨就是利用外部压力源（液压泵）给导轨面之间注入具有一定压力的液体（一般为润滑油），形成一层承载油膜，使运动部件悬浮起来，从而实现几乎无摩擦的直线运动。最大的优点是摩擦系数很低、抗振性好、承载能力大。由于运动件和导件之间没有物理接触，静压导轨没有磨损，可以长期保持很高的几何精度，是超精密加工及重型机床领域最理想的导轨。

静压导轨主要用在对精度要求极高、平稳性要求很高、承载能力很强的地方。超精密车床和磨床中静压导轨可以实现非常平滑的低速进给，没有爬行现象，是实现镜面加工、纳米级表面粗糙度的重要技术之一。其油膜具有良好的阻尼性能，可以吸收和衰减切削过程中或者外部传来的振动，使加工过程的动态稳定性大大提高。

重型、大型机床，大型龙门镗铣床工作台及工件重量可达几十吨到上百吨。静压导轨具有很强的承载能力和良好的负荷均匀性，可以方便地支撑和移动重型部件，驱动力量小。调节不同的油腔压力，还可以补偿负载不均、结构变形造成的误差。但是静压导轨结构较复杂，需要独立的供油系统，对油液的清洁度要求高，成本也较高，所以在普通机床上的应用受到限制。

（三）主轴部件的精度保持性

主轴部件是机床的“心脏”，旋转精度、刚度、热稳定性、可靠性都会影响最终的加工质量。精度保持性即主轴长时间运转、各种工况下保持初始精度的能力，是衡量高性能主轴的重要指标。影响主轴精度保持性的因素很多，涉及设计、制造、装配、使用等各个方面。

主轴结构的刚度是精度保持性的基础，主轴本身的刚度和轴承提供的支撑刚度都属于此。高刚性主轴在承受切削力的时候变形小，能较好地保持刀具或者工件的正确位置。设计上一般通过提高主轴跨距和直径之比、采用高刚度的轴承（角接触球轴承或圆柱滚子轴承）以及进行合理的预紧来达到目的。精确控制预紧力十分重要，它能提高刚度，又能减少过大预紧力对精度和寿命的不利影响。

主轴精度保持性所面对的最大问题就是热稳定性。主轴高速旋转的时候，轴承摩擦、内置电机都会产生大量的热量，造成主轴部件热胀冷缩，使轴向伸长，径向发生偏移，从而影响加工精度。提高热稳定性的措施有使用高效的冷却系统，强制油冷、水冷循环对轴承和电机进行精确的温控；优化结构设计，采用热对称

布局,使热变形方向可以预测并且容易补偿;使用低热膨胀系数的材料制造主轴及相关部件。

主轴的动态性能,即动平衡精度也影响到它的长时间运行稳定性。高速旋转时微小的不平衡量都会产生巨大的离心力,引起振动、加快轴承磨损、降低旋转精度。因此高性能主轴必须做精密动平衡校正。高效密封技术能阻止冷却液以及切削切屑进入轴承内,起到润滑的作用,可以提高主轴精度寿命。只有把设计、制造工艺结合起来,主轴部件才可以在恶劣的加工环境中长时间保持高精度的状态。

四、执行机构的运动学分析

执行机构是完成系统所要求动作的机械部分,一般由连杆、滑块、齿轮等组成。运动学分析是执行机构设计和控制的基础,只研究机构各部分位移、速度、加速度的关系,不考虑引起运动的力,从而保证机构能够实现预期的运动范围、轨迹和速度特性。

(一) 机构自由度的计算

机构自由度是指确定机构各构件相对位置所需要的最小独立变量数,它是评价机构运动可能性的主要指标。正确计算自由度为机构选型、创新打下了基础。平面机构的自由度一般用古兹巴赫-库尔兹巴赫公式来计算: $F = 3 - 2L - H$,其中 F 是自由度, n 是构件总数(包括机架), L 是低副(转动副、移动副等)的个数, H 是高副(点接触、线接触凸轮副、齿轮副等)的个数。

使用该公式时要注意一些特殊情况。复合铰链就是多个构件在一点上用转动副连接起来,应把复合铰链看成是由两构件组成的转动副的组合。局部自由度也称为多余自由度,指机构中某些构件的运动不会影响整个机构的输出运动,在计算机构整体自由度时不作为机构整体自由度考虑。虚约束是指几何上重复的或者没有实际作用的约束,如果在计算中没有剔除它,则会导致计算出的自由度比实际自由度小。辨别并妥善处理这几种特殊的情况,就可以判定机构运动的特性。

(二) 工作空间与轨迹分析

工作空间又叫可达空间,是指执行机构末端(机械手夹持器中心)可以到达的所有点的集合。对工作空间进行分析,是判断一个机构能否完成指定任务的基本条件。工作空间的形状和大小是由机构的构型、各杆件长度和关节运动极限决

定的。工作空间分析的方法有图解法、解析法。图解法直观易懂,适合于简单的机构,在关节变量取极限值时画出末端运动边界来确定工作范围。解析法用机构正运动学方程将关节空间变量映射到笛卡尔空间,用数学表达式描述工作空间边界,解析法精度更高,适合于计算机辅助分析和复杂机构。

轨迹分析是在确定了工作空间之后,研究执行机构末端怎样从一个点运动到另一个点。轨迹规划就是指在笛卡尔空间中规划出一条满足任务要求的路径,即直线、圆弧或者更复杂的曲线。路径点确定后,用机构的逆运动学求解,将末端的笛卡尔坐标转换为各个关节的运动变量(角度或者位移),从而得到驱动各个关节的控制指令。逆运动学求解一般比正运动学更复杂,会存在多解、无解或者奇异解。奇异位形是机构在某些特殊的运动位置上会失去一个或者几个自由度,灵活性变小,逆解变得困难或者无定义。在设计时尽量避免机构运行到奇异点附近。

(三) 速度与加速度特性校核

速度、加速度分析属于运动学分析中的一部分内容,它体现的是机构在运动过程中所表现出的动态特性,同时也是进行动力学分析、电机选型以及控制系统设计的基础。速度分析用以确定执行机构末端以及各个构件上任意点的速度大小、方向,校核其是否符合工作要求,防止速度过大造成剧烈冲击。加速度分析是计算各构件加速度的基础,进而可以求出惯性力。过大的加速度会产生很大的惯性力,给构件的强度、系统刚度、驱动器性能带来严峻的考验,也可能会引起振动和冲击。

分析方法主要有瞬心法、相对运动图解法和解析法。对于复杂的多连杆机构,解析法是使用最广的方法。对机构运动学位置方程进行一次、二次求导,得到速度、加速度的雅可比矩阵关系式。雅可比矩阵建立了关节速度和末端执行器速度之间线性的映射关系,在运动学和动力学分析中起着非常重要的作用。通过雅可比矩阵不仅可以求得速度和加速度,还可以判断机构的奇异位形(此时雅可比矩阵行列式为0或者秩下降)。对速度、加速度进行校核,保证机构在工作轨迹上各关节、末端执行器的速度、加速度都在允许的范围内,是保证机构平稳、可靠运行的必要步骤。

第三章 传感与检测技术

传感器是机电一体化系统的“眼睛”和“耳朵”，它把系统与外界联系起来，是获取信息的主要途径。传感器就像人体的感觉器官一样，可以将各种物理量、化学量或者生物量等被测量，巧妙地转换成系统内部容易处理的电信号。本章主要对传感与检测技术的基础理论以及主要器件进行详细的阐述，为后面复杂的机电一体化系统的设计与分析打下坚实的感知基础。

第一节 常用传感器原理与特性

本节主要对各种传感器的工作原理和特性进行详细的解释，这是正确使用、合理选择以及理解传感器的先决条件，并且对提高系统性能也有影响。本文从传感器共性特征入手，分析传感器静态、动态性能指标，建立误差和精度的概念。接下来还要对机电系统中最重要的几种传感器进行分类，即位移、速度、力等主要参数的检测原理以及典型应用。

一、传感器的基本特性

深入认识传感器的基本特性，是达成精确测量的根基。这些特性一起决定了传感器把物理世界的信息转化为电信号的准确性、可靠性，也直接影响到它是否适合于某个应用场景。本节从静态、动态两方面来分析传感器的性能，研究测量中无法避免的误差问题，从而给传感器的选择以及数据处理提供理论基础。

（一）静态特性指标分析

传感器的静态特性就是当输入信号不变或者变化很慢时，输出与输入之间存在的确定关系。这是衡量传感器性能最基本也最重要的方面。表征静态特性的参数主要是线性度、灵敏度、迟滞、重复性、分辨率和漂移等。

线性度是表征传感器实际输入输出曲线和理想拟合直线之间的偏差，是影响传感器测量精度的主要因素之一。实际应用中绝大多数传感器的特性曲线都不是

一条完美的直线，非线性误差越小，说明在整个测量范围内传感器的输出与输入越接近正比关系，极大地方便了后续信号处理和标定工作。

灵敏度就是传感器输出量增量与引起输出量增量的输入量增量之比，它反映的是传感器对被测参数变化的敏感程度。高灵敏度的传感器对于微小信号的变化会有明显的输出响应，但是并不是越高越好，实际选择时要根据测量范围和噪声情况来考虑。迟滞特性指输入量反向增大或者减小到同一位置时，传感器的输出值不相等。差异一般由传感器内部能量损耗或者材料物理性质不可逆造成的。重复性是衡量在相同的条件下，对于同一输入量进行多次重复测量的时候，输出值的分散程度，它是评定传感器稳定性的重要指标。

（二）动态响应特性分析

传感器的动态特性指的是输入量随着时间迅速变化的时候，输出信号能否准确、迅速地跟随输入信号的变化。与静态特性不同的是，动态分析要考虑时间变量，它决定传感器在高频、瞬态测量场合下所能达到的极限。传感器动态特性一般是用其对于标准输入信号（如阶跃信号、正弦信号等）的响应来描述和分析的。

阶跃信号响应，也就是阶跃响应，可以体现传感器的响应速度、超调量、稳定时间等信息。理想的传感器应该能很快达到稳定状态，没有明显的振荡。

频率响应也是一个非常重要的动态指标，它可以体现传感器对于不同频率的正弦输入信号反应的情况。根据传感器输出信号的幅值和相位随输入信号频率变化的规律，可以确定其工作带宽。工作带宽一般指传感器可以维持灵敏度基本不变的频率范围；超过这个范围，输出信号就会产生明显的衰减和相位滞后，造成测量失真。所以选择用来动态测量的传感器时，必须保证它的频率响应范围能覆盖被测信号的主要频率成分，这是保证动态测量精度的最基本要求。

（三）误差与精度等级概念

任何测量都存在误差，误差是客观存在的。传感器的误差就是它的测量结果和被测物理量的真值之间的差异。误差来源很多，大致可以分为系统误差、随机误差、疏失误差三类。系统误差有规律性，标定不准、环境温度变化、传感器非线性等都会造成系统误差。随机误差是指在相同条件下，对同一量进行多次测量时，结果无规律地随机波动，一般是由内部噪声或者外部电磁干扰等引起的。认识误差来源和性质，才能进行误差补偿和数据处理，进而提高测量系统整体精度。

精度是综合反映传感器测量结果和真值之间差异的指标，把传感器的线性度、

重复性、迟滞、漂移等各种误差都考虑在内。精度等级一般用数字来表示，在一定的条件下传感器的最大引用误差。0.5级传感器指它的最大引用误差不超过满量程的 $\pm 0.5\%$ 。工程应用中选择何种精度等级的传感器要综合考虑测量要求、成本、应用环境等各方面因素，不能一味追求高精度就是最好的选择。

传感器静态特性指标一览表

指标名称	定义及特点
线性度	实际输出曲线与理想直线间的偏离程度，越小越好。
灵敏度	输出量增量与输入量增量之比，衡量对变化的敏感度。
迟滞	输入量同点反向变化时输出值不一致，反映能量损耗。
重复性	多次测量同输入量时输出值的分散程度，衡量稳定性。
分辨率	传感器能检测到的最小输入量变化。
漂移	在恒定输入条件下，输出量随时间缓慢变化。

从传感器静态特性指标一览表中可以得知，各项参数一起组成了传感器性能评价体系，给传感器的选择和使用提供重要的依据。

二、位移与位置传感器

精确检测物体的位置以及行程是完成闭环控制,进行导航和定位的前提条件。位移和位置传感器正是完成这一核心任务的元件，可以将被测对象的线性位移或者角度位置，准确地转换成容易处理的电信号。本部分主要对应用最广的位移、位置传感器的工作机理、性能特点、典型应用领域进行阐述。

(一) 电阻式与电感式传感器

电阻式位移传感器，特别是电位器式传感器是一种结构简单、使用历史长久的测量元件。其工作原理就是利用电阻分压，被测物体的位移带动可动电刷在电阻轨道上滑动，改变输出端的电阻值或者电压值。输出信号和位移量之间存在确定的比例关系，所以它的特点是直观易用。由于电位器式传感器成本低、结构坚固、输出信号大等优点，它在阀门开度控制、操纵杆位置反馈等精度要求不高的一般工业场合得到了广泛的应用。

电感式位移传感器使用电磁感应原理，把被测量的物理量转化为线圈电感量或者互感量的变化。该类传感器可以分为自感式和互感式两种。典型的互感式传感器是线性可变差动变压器，它通过移动铁芯改变初级线圈和两个次级线圈之间

的磁耦合程度，从而产生与位移成线性关系的差分电压输出。自感式传感器包括变气隙式、变面积式、螺管式等，它们都是通过改变磁路的磁阻来引起电感量的变化。

电感式传感器没有物理接触、分辨率高、寿命长，适合于高精度、高可靠性的测量。电涡流式位移传感器属于电感式传感器的一种，其工作原理为利用高频磁场在金属表面上产生涡流来实现非接触测量。它对油污、灰尘等恶劣环境有很强的适应性，被广泛地应用到旋转机械的轴向位移和径向振动监测当中。

（二）光栅与磁栅位移传感器

光栅位移传感器是利用莫尔条纹现象进行高精度位移测量的光学元件。基本结构是一片固定的主光栅和一片随被测物体移动的副光栅。两片光栅以微小夹角重叠，并发生相对移动时，因为光的衍射和干涉效应，会出现明暗相间的莫尔条纹。莫尔条纹移动与光栅相对移动成精确倍数关系，用光电元件检测莫尔条纹移动数量和方向，即可求得位移量。

光栅传感器最大的优点是测量精度和分辨率极高，可以达到微米或者纳米级。其输出为数字脉冲信号，抗干扰能力强，并且可以与计算机系统接口。该传感器在数控机床的精密定位、三坐标测量机、各种精密检测仪器中起着不可替代的作用。磁栅位移传感器的工作原理与光栅类似，只是将光学刻线换成了预先刻在磁性材料上的磁轨，用磁敏读数头（霍尔元件或磁阻元件）来检测磁极的变化。磁栅传感器比光栅传感器耐灰尘、油污、振动等恶劣工业环境，因此在重型机械、木工机械等环境恶劣的地方应用较多。

（三）旋转编码器原理与应用

旋转编码器是测量旋转角度、角速度的精密装置，可以将轴的角位移或者角速度转换成一系列数字脉冲信号。按照工作原理及输出信号的形式不同，旋转编码器可以分为增量式和绝对式两种。

增量式编码器输出的是一系列与转动角度成正比的脉冲序列，通过计数脉冲可以得到转动的角度增量。为了判定旋转方向，一般输出两路相位差 90 度的脉冲信号（A 相、B 相）。增量式编码器结构简单、成本低，适合测量转速、相对角度或者有固定参考点时的定位。

绝对式旋转编码器更为先进，码盘上刻有唯一的二进制或格雷码编码，对应每一个确定的角向位置。因此无论何时通电，编码器都能立即读出当前轴的准确

绝对位置，不需要像增量式编码器那样寻找参考点。因此它在需要高可靠定位、断电后仍要记住位置的场合中有着不可替代的优势，尤其在机器人关节定位、数控转台、天线方位控制等应用中表现突出。绝对式编码器按实现方式可以分为单圈和多圈两种，多圈绝对式编码器除了可以记录一圈内角度之外，还可以通过内部的齿轮计数机构记录旋转的总圈数。

三、速度与加速度传感器

速度和加速度是反映物体运动状态的两个基本的动态量，在运动控制、振动分析、惯性导航等许多方面都起着不可替代的作用。准确测量这两个物理量要使用专门设计的传感器。本部分详细分析了几种主流的速度与加速度传感器的工作原理，探究它们把宏观的运动信息转化为可以分析的电信号的过程。

（一）测速发电机与霍尔传感器

测速发电机是把机械转速直接转换成电压信号的一种电磁式传感器。本质上来说它是一个微型发电机，主要的工作原理就是电磁感应。当测速发电机的转子随被测轴一起转动的时候，其线圈切割磁感线（由永磁体或者励磁绕组产生），从而感应出与转速成正比的输出电压。直流测速发电机输出电压为直流电压，极性直接反映旋转方向；交流测速发电机输出电压是频率和幅值都和转速有关的交流电压。测速发电机具有信号强、线性好、工作可靠等优点，曾被广泛地用在伺服系统、调速系统等速度检测上。

霍尔传感器在速度测量上应用更灵活、更现代化。霍尔效应的原理就是当载流半导体（霍尔元件）处于磁场中时，在电流方向和磁场方向垂直的两个面上会产生一个电势差（霍尔电压）。测量速度的时候，一般把小磁铁固定在旋转物体上，霍尔传感器固定在磁铁运动轨迹附近。磁铁经过传感器的时候，磁场的变化会使霍尔元件输出一个脉冲信号。测量单位时间内产生的脉冲数就可以得到旋转速度。由于霍尔传感器具有非接触、无磨损、响应速度快、环境适应性强等特点，因此它被广泛地应用在汽车轮速检测（防抱死制动系统）、电机换向和转速测量、各种工业计数等领域。

（二）压电式加速度传感器

压电式加速度传感器是振动、冲击测量领域应用最广的一种传感器。它的工作基础是某些晶体材料（石英）的正压电效应，即当受到机械应力的作用时，会

在其表面产生一个和所加力成正比的电荷。传感器内部有一个已知质量的惯性质量固定在压电晶体上。当传感器随被测物体一起加速运动时,根据牛顿第二定律,惯性质量块会产生一个与加速度成正比的惯性力作用在压电晶体上。力使压电晶体产生形变,在表面产生与加速度成正比的电荷信号。

压电式加速度传感器最大的优点就是动态范围大、频率响应范围广、结构牢固耐用、信噪比较高。它们可以测量从微弱振动到剧烈冲击的宽广范围内的加速度,频率可以达到几赫兹到几十千赫兹。由于压电效应是材料自身具有的机理,理论上不需要外部电源就可以工作。但是它产生的电荷信号非常微弱,输出阻抗很高,因此必须使用内置或外置的电荷放大器来调理信号,才能转换成可用的电压信号。其固有限制就是压电传感器不能测量静止的或者零频率的加速度(比如重力加速度),因为它只能对力的变化作出响应。

(三) 多普勒测速原理

多普勒测速原理利用物理学中的多普勒效应来测量物体的速度,是一种非接触式的测速方法,适合于流体速度的测量以及远距离物体运动速度的监测。当波源和接收者之间存在相对运动的时候,接收者观测到的波的频率就会发生变化。激光多普勒测速法,一束激光射向运动的物体或者流体中的微小粒子,这些粒子会把光散射回来。由于粒子的运动,散射光的频率相对于原来的激光频率会有所不同,这个频率差就叫做多普勒频移。多普勒频移大小和粒子沿激光束方向速度分量成正比。利用光学外差法,把散射光的一部分原始参考光进行干涉拍频,就可以准确测出微小的频移,从而反算出被测物体的速度。激光多普勒测速仪具有非接触、高精度、高空间分辨率、快速动态响应等特点,被广泛地应用在航空航天领域的风洞实验、流体力学研究、血液流速测量、工业生产线上对板材、线材等移动产品的速度监控。

四、力与力矩传感器

机器人操作、自动化装配、材料试验、各种称重系统等需要准确感知力、力矩才能达到精确控制、保证安全、评价性能的目的。力与力矩传感器能将被测对象承受的推、拉、压、扭等作用转换成可以量化的电信号。它们是赋予机电系统“触觉”的重要部件,本节主要介绍几种主流的力与力矩传感器的实现原理和应用场景。

（一）电阻应变式称重传感器

电阻应变式称重传感器是力测量装置中最常用的一种，技术成熟、成本低。基本原理就是基于两个物理效应：弹性体的力应变关系、电阻应变片的应变电阻变化效应。传感器由一个特殊的金属弹性体以及贴上面的电阻应变片组成。当外力作用于弹性体的时候，弹性体会产生微小的形变，形变会使应变片被拉伸或者压缩。金属应变片（一般为箔式）的电阻值会因为几何形状（长度、截面积）的变化而发生变化。

为了提高测量灵敏度和精度，同时补偿温度变化造成的影响，一般将多片应变片组成惠斯登电桥电路。当传感器受力时，电桥中对应臂的电阻会出现相反的变化，即两臂受拉伸时电阻变大，另两臂受压缩时电阻变小，从而打破电桥的平衡状态，产生一个与外力成正比的微弱电压输出信号。

该类传感器用弹性体不同形状（S型、梁式、柱式等）分别测量拉力、压力或者剪切力，是电子秤、工业配料系统、材料试验机等设备的核心组件。精度、稳定性很大程度上取决于弹性体材料、热处理工艺、应变片粘贴质量、电路补偿技术。

（二）压电式力传感器

压电式力传感器用压电材料的正压电效应来测量力。当对某些晶体（如石英）或压电陶瓷施加外力时，在其内部会产生极化，在两个相对的表面上产生和外力大小成正比的电荷。该传感器直接把被测力作用在压电元件上，测量产生的电荷量来确定力的大小。压电式力传感器的最大特点就是刚度高、响应快，所以非常适合测量动态力、冲击力、高频振动力。

由于形变很小，对被测系统的影响微乎其微。压电传感器的测量范围非常宽广，同一个传感器既可以测量很小的力，又能承受巨大的冲击力。传感器一般由压电晶片、电极、金属外壳组成，力可以有效地传递。

应用范围较广，可以用来测量内燃机燃烧压力、冲压机冲压力、碰撞试验中的冲击力，也可以用来分析步态等生物力学问题。而压电式力传感器不能用来做静态力的长时间测量。因为产生的电荷由于电路的绝缘电阻不可能无限大而逐渐泄漏，造成输出信号漂移。

（三）腕力传感器与多维测力

机器人在做精密装配、打磨抛光、人机协作等复杂的任务的时候，只依靠感

知单向力是不够的。机器人要能感知到末端执行器（手爪或者工具）在三维空间里所受的全部力和力矩。多维力矩传感器，尤其是安装在机器人手臂与末端执行器之间的腕力传感器，就是为此而设计的。此类传感器可以同时测量 X、Y、Z 三个轴上的线性和绕这三个轴的力矩，从而给出一个六维的力矩向量。

其内部结构一般采用应变原理，用马耳他十字形等弹性体结构，将各个方向的力和力矩分解到不同的应变梁上。在这些应变梁上贴上了多个惠斯通电桥，再用复杂的解耦算法，将各个电桥的输出信号还原成六个独立的力和力矩分量。使用腕力传感器大大提高了机器人智能。它使机器人可以实现柔顺控制，在装配过程中遇到卡阻时，通过力反馈来调节姿态，在打磨任务中，保持恒定的接触力来保证加工质量。腕力传感器对于安全人机交互、遥操作、精细力控操作等起着重要的作用。

第二节 信号调理与数据采集技术

机电一体化系统性能很大程度上取决于感知外界环境、响应外界环境的能力，核心就是信号调理和数据采集技术。传感器所获得的原始信号一般都很弱、带有噪声、形态各异，不能直接被数字控制器使用。本节主要研究怎样用精巧的电路设计和先进的数字化技术，把原始信号转化成处理器可以理解和分析的规范化的、数字化的信息，为系统精确控制、智能决策打下良好的基础。

一、信号调理电路设计

信号调理是把物理世界的传感器与数字处理中心连接起来的一环。它把传感器输出的微弱、不规则、易受干扰的信号，经过放大、滤波、隔离、线性化等一系列处理之后，转换成适合模数转换器采集的标准化电压信号。设计出优良的信号调理电路可以大幅度提高整个测量系统的信噪比、精度和稳定性，是保证机电一体化系统可靠运行的前提。

（一）电桥电路的平衡与调节

电桥电路，尤其是惠斯通电桥，是测量电阻类传感器的基本电路，被广泛地用于应变、压力、温度等各种物理量的测量。电桥是利用桥臂之间电阻的变化来完成测量的。从理论上来说，电桥满足平衡条件的时候，它的输出电压是零。但

是由于传感器初始阻值偏差、温度漂移或者安装应力等因素的影响，电桥一般处于不平衡状态，会产生一个非零的输出，这就是零点偏置。

为了保证测量的准确性，必须对电桥进行平衡和调节。调节方法有粗调和细调。粗调一般采用在桥臂上并联或串联固定电阻的方式，将零点输出调整到较小的范围内。细调时用可变电阻器（电位器）来调节，使输出电压尽可能接近0V。对于动态测量系统，可以在测量开始时采集零点偏置值，在后续测量结果中减去该值来实现零点校正。电桥的平衡状态决定着测量的起始基准，准确的平衡调节是后面信号处理和分析得到高精度结果的前提。

（二）信号放大与隔离技术

传感器输出的信号一般都很微弱，只有毫伏甚至微伏级，而且常常被高共模电压叠加。微弱的信号很容易被后面电路的噪声所掩盖，所以必须对其进行放大。仪表放大器是这类应用的首选，因为仪表放大器具有高输入阻抗、高共模抑制比、低噪声、增益可调等特点，可以准确地提取出微弱的差模信号。只通过改变一个外部电阻就可以方便地调节放大倍数，不会影响电路的对称性及共模抑制性能。

复杂的工业环境当中，系统线路同传感器线路之间会存在电位差。为了保护后面精密的控制单元不受前端高压或者浪涌的冲击，信号隔离就成为不可缺少的环节。信号隔离即切断信号传输路径中的直接电气连接，但是要保证信号信息的无失真传递。常用的隔离方式有光电隔离、变压器隔离。光电隔离是利用光耦合器把电信号变成光信号，经过光学介质传输后再用光敏元件转回电信号，实现输入和输出完全电气隔离。变压器隔离就是利用电磁感应原理，用隔离变压器来传递交流信号。隔离措施可以很好地抑制共模干扰，提高系统的抗干扰能力以及安全性。

（三）滤波器的设计与类型选择

信号采集过程中，噪声无处不在，噪声可以来自于传感器本身、电源波动、电磁感应或者传输线路耦合。噪声会严重影响信号质量，降低测量精度，严重的时候还会导致系统误判。滤波器是抑制噪声、提纯信号的重要部分，它根据频率特性来选择通过某些频率分量的信号，同时衰减或者阻止其它频率分量的信号。

滤波器的类型多种多样，可根据不同标准进行划分。

1. 按照功能不同分为低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器和带阻滤波器。低通滤波器被使用得最广，主要用于去掉信号中所混入的高频噪声。

2. 按照所用的元器件可以分为无源滤波器、有源滤波器。无源滤波器只由电阻、电容、电感等无源元件组成，结构简单、成本低、不需要额外电源，但是带负载能力差、通带增益为负、大电感应场合下体积笨重。有源滤波器是由运放和 RC 网络组成，具有较好的带负载能力，可以对信号进行放大，易于集成，尤其适合于低频信号的处理。

3. 按响应特性分为巴特沃斯滤波器、切比雪夫滤波器、贝塞尔滤波器等。巴特沃斯滤波器通带响应最平坦，没有纹波，但是过渡带宽。切比雪夫滤波器以窄过渡带为代价，换取通带或者阻带内等波纹。贝塞尔滤波器拥有最佳的脉冲响应，可以很好地保持信号波形的完整性，但是过渡带宽较宽。设计时要综合考虑信号特性、系统要求，选择滤波器的类型、阶数、截止频率等参数来达到最好的滤波效果。

二、模拟量与数字量转换

机电一体化系统的核心是微处理器或者计算机，只能处理离散的数字信号。而从传感器和调理电路得到的是连续变化的模拟信号。因此必须通过模数转换，把模拟信号转换成数字世界可以识别和处理的二进制代码。它充当模拟感知和数字智能之间的翻译者，它的好坏直接决定了系统对物理世界感知的准确性和实时性。

（一）模数转换器的原理与指标

模数转换器是把模拟信号转换为数字信号的关键元件，种类繁多，工作原理也不一样，主要有逐次逼近型、积分型、并行比较型、 $\Sigma-\Delta$ 型等。不同类型的转换器各有优缺点，适用于不同的场合，见常见的模数转换器类型对比表。

常见的模数转换器类型对比表

类型	优点	缺点	典型应用
逐次逼近型	速度、功耗、分辨率均衡；结构相对简单	无法同时兼顾极高速度与分辨率	广泛应用于数据采集、工业控制、便携设备
积分型	精度高；抗噪声能力强；线性度好	转换速度慢；不适用于快速变化的信号	仪表测量、高精度慢速采集、称重
并行比较型	转换速度极快；实时性强	功耗高；芯片面积大；分辨率受位数限制；成本高	雷达、高速示波器、视频处理、通信
$\Sigma-\Delta$ 型	高分辨率；高精度；低功耗；数字滤波可抑制噪声	转换速度相对较慢；内部数字滤波器复杂	音频、精密测量、医疗设备、传感器接口

由于逐次逼近型模数转换器在速度、功耗、分辨率之间取得了较好的平衡，所以被广泛应用于实际。它的工作过程像天平称重一样，从最高位开始逐位与输入电压进行比较，经过 N 次（ N 为转换器的位数）比较之后，得到一个与输入模拟电压成正比的 N 位二进制数字量。

评价模数转换器性能的技术指标有分辨率、转换速率。分辨率是指转换器可以区分的最小模拟量变化，一般用二进制位数来表示。12 位转换器可以把满量程电压分成 2 的 12 次方（即 4096）个等级，位数越高，量化越细，测量精度越高。转换速率就是转换器完成一次模拟到数字转换所需要的时间的倒数，一般用 SPS（每秒采样次数）来表示。高速转换器的采样率可以达到 MSPS，也可以达到 GSPS。量化误差、微分非线性、积分非线性等都是评价转换器精度的指标。

（二）采样定理与频率混叠

连续模拟信号转换成离散数字信号时，必须符合采样定理，也叫奈奎斯特采样定理。该定理说明，为了从采样后的数字信号中不失真的复现原始的模拟信号，采样频率 f_s 要大于信号中最高频率分量 $f_{\max}$ 的两倍，即 $f_s > 2f_{\max}$ 。最低采样频率 $2f_{\max}$ 称为奈奎斯特频率。这一定理为整个数字化过程提供理论基础，保证采样过程可以获取信号的全部信息。

如果采样频率不满足采样定理，即 $f_s < 2f_{\max}$ ，就会出现频率混叠或者混叠效应的严重失真。此时，超过奈奎斯特频率 ($f_s/2$) 的信号分量在采样之后会“折叠”到低频区域，表现为虚假的低频信号，和真实低频分量叠加，产生无法区分开来的错误信息。为了防止频率混叠，最好的办法是给信号先加一个低通滤波器，这个低通滤波器叫作抗混叠滤波器。此滤波器的作用就是滤除所有频率成分大于 $f_s/2$ 的信号，保证被采样的信号满足采样定理的要求，从而从根本上防止混叠现象的发生。

（三）数模转换器输出波形重建

数模转换就是将数字控制系统处理过的数字量序列，重新转换成连续的模拟信号，以驱动执行器（电机、阀门等）或者产生某种模拟波形。数模转换器输出并不是一条连续的曲线，而是在每一个采样周期内保持恒定幅值的一系列阶梯状电平。阶梯状波形是由零阶保持器造成的，在每个采样点之间都保持上一个采样点的输出值不变。

阶梯状输出波形含有由于阶跃产生的高频谐波分量，和原始连续模拟信号不

同。为了使输出波形更加平滑,更接近理想的模拟信号,需要在数模转换器输出端加上一个低通滤波器,这个过程叫做波形重建。该低通滤波器又叫平滑滤波器或者重建滤波器,它的作用是滤除阶梯波形中的高频谐波,平滑阶跃边缘,从而得到更接近原始信号的连续波形。重建滤波器截止频率一般设为奈奎斯特频率附近,既能抑制高频成分,又能较好地保留信号的细节。

三、数据采集系统构建

数据采集系统就是将传感器、信号调理、模数转换、计算机硬件软件等有机地结合起来,对一个或多个物理量进行自动采集、处理、存储和显示的集成化系统。创建高效可靠的数据采集系统属于机电一体化系统开发的重要环节。根据应用需求、成本预算、部署环境的不同,数据采集系统有不同的架构。

(一) 基于个人计算机的数据采集卡

以个人计算机为主的数据采集卡是功能强大、使用广泛的采集卡。其核心就是一块插入计算机主板插槽中或者通过外部 USB 接口连接的硬件板卡。数据采集卡一般都包含有多个模拟输入通道、模数转换器、数字输入输出通道、定时计数器等。上位机具有很强的计算能力、丰富的软件资源、良好的人机交互界面,可以方便地使用 LabVIEW、MATLAB 或者 C++ 等高级语言编写控制程序,实现复杂的数据处理、分析、可视化以及存储。由于 USB 数据采集卡具有即插即用、不需要打开机箱、供电方便等特点,在便携式测量、实验室中更受欢迎。适用于开发周期短、数据量大、图形化展示等的架构。

(二) 嵌入式数据采集模块

随着微控制器、片上系统技术的迅速发展,嵌入式数据采集模块由于体积小、功耗低、成本低、可靠性高等优点,在很多机电一体化产品中得到了广泛的应用。一般以高性能微控制器 (ARM Cortex-M 系列) 为核心,在其内部或者外部集成了模数转换器、通信接口 (SPI、I2C、UART) 和存储器。开发者可以在微控制器上编写裸机程序或者运行实时操作系统,从而对数据进行实时采集并做本地处理。嵌入式模块可以被直接装入设备内部,作为一个小型的、独立的智能化部件存在。它脱离个人计算机的束缚,适合于对成本、体积、功耗有严格要求的分布式应用、便携式设备、大规模物联网节点。

（三）分布式采集网络架构

对于大型机电系统或者需要对大面积区域进行监测的应用,例如大型生产线、桥梁健康监测、环境监测网络等,单个采集点已经不能满足要求了,这时就需要建立分布式数据采集网络结构。系统由分散的测控点智能采集节点以及一个或者多个中心服务器组成。每个采集节点本身就是一个小型嵌入式采集系统,对所在区域的数据进行采集并做初步处理。

这些节点用有线(CAN总线、以太网)或者无线(Wi-Fi、ZigBee、LoRa)通信方式互相连接成网,把采集到的数据传送到中心服务器。中心服务器对各个节点的数据进行汇总,做综合分析、长期保存、统一监控。

1. 这种架构具有很强的可扩展性和灵活性,可方便地增加或移除节点。
2. 通过在节点端进行边缘计算,可有效降低网络传输负担和中心服务器的计算压力。
3. 分布式架构提高了系统的容错性,单个节点的故障不会导致整个系统的瘫痪。

四、非线性补偿与标定

理想情况下,我们希望传感器的输出和被测物理量之间有完美的线性关系。但是,在实际生活中很多传感器的传感器元件本身就具有非线性,或者由于制造工艺、工作环境的变化等使整个测量系统的输入输出关系偏离线性。非线性会造成测量误差,因此必须采用补偿和标定的方法来校正,保证测量结果的准确性。

（一）硬件线性化电路

硬件线性化是在计算机技术还没有普及之前的主要补偿方式,它用专门的模拟电路来补偿传感器的非线性。其基本思想就是用具有相反非线性特性的电路来抵消传感器的非线性。可以采用对数放大器和反对数放大器相结合的方式,来校正具有指数或者对数特性的传感器。对于非线性特性也可以设计非线性运算放大器电路,在反馈网络中加入非线性元件(二极管等),构造一个与传感器非线性特性相反的传输函数,使最终输出与被测物理量之间呈线性关系。硬件线性化电路反应迅速,可以实现实时的补偿。它所具有的缺点是电路复杂、调试难度大、补偿精度不高、不具有灵活性。一旦传感器更换或者其特性发生变化,则硬件电路就需要重新设计。

（二）软件查表与插值算法

随着微处理器在测量系统中被广泛使用，由于软件线性化方法精度高、灵活性好、成本低等优点，已经成为主流的方法。查表法是软件补偿的一种简单而有效的方法。该方法先通过实验标定得到一系列的输入物理量和传感器（经过模数转换）输出的数字量，将对应关系存放在内存中形成查找表。实际测量时，把模数转换的结果当作地址或者索引，直接从表中找到线性化后的物理量数值。当测量点不在查找表的采样点上时，为了得到更准确的结果，可以采用插值算法。线性插值最简单，假定两个相邻的表项之间存在线性关系。对非线性较强的传感器可以采用高阶插值算法，二次插值或者三次样条插值，以达到更好的补偿效果。

（三）传感器系统的静态标定方法

静态标定就是确定传感器及其整个测量系统在稳态条件下，输入和输出之间函数关系的过程，是非线性补偿和保证测量精度的基础。标定是得到传感器实际特性曲线，找出传感器的线性度、灵敏度、迟滞、重复性等重要的静态性能指标。标定过程一般用一套高精度的、已知参数的标准设备来提供准确的输入物理量。标定步骤一般为，在传感器的整个测量范围内选取若干个标定点，标定点一般等间隔分布。按照从小到大的顺序，依次给传感器施加标准输入量，记录每个标定点的稳定输出值，得到一个正行程。然后按由大到小的顺序减小输入量，记录反行程的输出值。整理成表格或者画出输入输出曲线，用最小二乘法对数据进行拟合，得到传感器的静态特性方程。该方程或者数据表就是之后进行硬件或者软件线性化补偿的依据。

第三节 检测系统的精度与可靠性分析

机电一体化系统性能的好坏，很大程度上取决于它的检测系统。一个优秀的检测系统，可以准确地获取信息，并且能够在各种复杂的情况下稳定可靠地运行。本节主要从检测系统精度和检测系统可靠性两方面进行详细的分析、提出相应的策略来提高检测系统的精度、可靠性，为高性能机电一体化系统的设计和优化打下坚实的基础。

一、测量误差的基本理论

任何测量过程都会存在误差。对测量误差做系统的理论分析，是评价和提高检测系统精度的基础。深入认识误差的种类、特点以及产生规律，是之后开展误差控制和补偿的基础。本节主要阐述系统误差、随机误差、粗大误差这三种基本误差的理论知识。

（一）系统误差的发现与消除

系统误差又称为规律误差，在相同测量条件下，对同一被测量进行多次重复测量时，误差值的大小和符号不变或者按一定规律变化的误差分量。它有重复性、单向性，多次测量取平均的方法不能消除。因此，识别出系统误差并有效消除它，对于提高测量精度来说是非常重要的。系统误差来源很多，主要可以分为仪器误差、环境误差、方法误差、人员误差这四类。

仪器误差是由于测量仪器本身缺陷或者不按规定使用造成的，例如仪表零点漂移、刻度不准、传感器老化等。环境误差是由于实际测量环境中的温度、湿度、气压、电磁场等和标准条件不一样且发生改变所造成的。方法误差是由测量原理的近似性或者实验方法本身的不完善造成的，例如在电学测量中忽略了电表的内阻影响。人员误差是由于观测者个人的生理特点、不良习惯或者主观偏见所引起的，具有因人而异的特点。

发现系统误差一般要经过详细的分析以及实验验证。一个行之有效的方法就是进行对照试验，即用不同的仪器、测量方法或操作人员对同一个对象进行测量，然后比较结果，找到系统性的差异。消除系统误差的方法有如下几种：

1. 根源消除法，测量前应分析所有的误差源，并采取措施予以消除或者减弱。测量前校准仪器、保证环境条件满足要求、改进测量方法等都属于质量控制的有效措施。

2. 修正补偿法，对于数值固定或者规律已知的系统误差，可以采用引入修正值或者修正曲线的方法进行补偿。对计量器具进行校准得到误差修正表，在后续测量时就可以用它对读数进行校正。

3. 交换测量法改变某些测量条件，使系统误差对结果产生相反的影响，再取两次结果的平均值来抵消误差。使用不等臂天平称量时，将被测物和砝码互换位置各称量一次，取其平均值可以有效消除由于臂长不等而产生的误差。

4. 空白实验法即在不加入被测样品的情况下,按照完全相同的方法和试剂进行一次空白测量。其结果就是试剂杂质等因素引起的系统误差。从样品测量值中减去空白值之后就可以得到准确的结果。

(二) 随机误差的统计规律

随机误差,又叫偶然误差,在相同的测试条件下,多次测量同一物理量时,误差大小和符号以不可预知的方式随机变化的误差。该类误差一般是由很多微小的、难以精确控制的随机因素共同引起的,比如环境的微小波动、仪器内部的噪声、观测者反应的小差异等。单个随机误差的发生没有规律可循,不能预测,但是大量随机误差的总体却遵循一定的统计规律。

随机误差有四个重要的统计特性,一般称为随机误差的四条公理。第一是单峰性,即绝对值小的误差出现的概率大,绝对值大的误差出现的概率小。第二是对称性,绝对值相等的正误差和负误差出现的概率基本相同。第三是有界性,即在有限的测量次数内误差绝对值不会超过一个确定范围。第四个就是抵偿性,也是最重要的一个特性,即随着测量次数的无限增大,随机误差的算术平均值趋于零。

正是因为抵偿性,才可以用多次测量求平均值的方法来减小随机误差对测量结果的影响。理论上,当测量次数趋向无穷大的时候,测量值序列的算术平均值会无限接近被测量的真值(前提是已经排除掉系统误差)。由于无法进行无限次测量,增加平行测定的次数成为提高测量结果可靠性的常用且有效的方法。描述随机误差离散程度的常用指标就是标准差。标准差越小,测量数据就越集中,测量精密度就越高。在大量的重复测量中,随机误差的分布大体上服从正态分布,为误差的分析和处理打下了良好的数学基础。

(三) 粗大误差的剔除准则

粗大误差,也叫疏失误差或者过失误差,在测量结果中明显偏离其它测量值的数据。该类误差产生原因主要是测量人员的疏忽大意、操作失误、读数错误、仪器偶然性故障、外界环境突然剧烈变化等。含有粗大的误差数据,将会严重影响测量结果的准确性,降低测量结果的可信度,因此在数据处理前要对其进行识别与剔除。

判断某数据是否为粗大误差,不能只靠主观感觉随意舍弃,必须按照一定的统计学准则来科学判断。常用的剔除准则一般假定数据符合正态分布。如果某数

据出现的概率很小，在当前测量次数下几乎不可能发生，那么该数据就可以被当作异常值而被排除。

目前应用较广的粗大误差剔除准则有莱特准则、格拉布斯准则和狄克逊准则等。上表给出了不同的粗大误差剔除准则的特点以及适用范围。

粗大误差剔除准则比较表

准则名称	适用样本量	判断依据	特点
莱特准则 (3σ)	较大 ($n > 50$)	测量值与均值之差的绝对值 $> 3\sigma$	简单直观，基于正态分布假设，对大样本有效
格拉布斯准则	广泛适用 (特别是中小样本)	可疑值与样本均值之差与标准差的比值	考虑样本量，适用性更广，对小样本更敏感
狄克逊准则	较小 ($n \leq 10$)	可疑值与相邻值之差与数据极差的比值	专为小样本设计，利用数据内部排序信息

莱特准则：此准则规定，当某次测量的剩余误差（测量值与平均值之差）的绝对值大于 3 倍标准差时，即 $|v_i| > 3\sigma$ ，便可认为该测量值含有粗大误差，应予以剔除。其理论依据是，在正态分布中，数据落在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 区间内的概率高达 99.73%，而落在区间外的概率则极小。该准则简单直观，但通常适用于测量次数较多（如 $n > 50$ ）的情形。

格拉布斯准则：相较于莱特准则，格拉布斯准则对不同的样本量有不同的临界值，因此适用范围更广，在测量次数少时更为敏感有效。

狄克逊准则，小样本（ $n \leq 10$ ）时用极值范围大多少与数据极差（最大数值与最小数值之差）的比值来判断异常数据是否要剔除。

使用准则时每次只检验一个最可疑的数据。剔除一个数据之后，需要重新计算剩下的数据的平均值和标准差，再检验下一个可疑数据，直至所有的数据都符合准则的要求。

二、检测系统的精度分析

检测系统精度是评价系统性能的核心标准，也是衡量其测量结果与被测物理量真值相符合程度的重要指标。对检测系统进行精度分析时，不能只考虑它在静态或者稳态条件下的表现，而应当全面地评价它的动态变化被测量响应能力，并且明确整个闭环控制系统对于精度的具体要求。

（一）静态精度的合成方法

检测系统静态精度指当被测量处于稳定或变化很缓慢的状态下时，系统稳定后其输出量反映输入量的准确程度。完整的检测系统一般是由传感器、信号调理电路、模数转换器等环节串联而成的，每一个环节都不可避免地存在一定的静态误差。因此，系统总体静态精度是由各个组成环节的精度综合决定的，需要用误差合成的方法来评定。

静态误差合成并不是把各个环节的误差简单相加。由于各个环节的误差源一般是相互独立的，误差大小和方向都是随机的，直接相加会高估系统总误差。因此误差合成时一般用概率统计方法，即方和根合成法。假设系统是由 n 个相互独立的环节串联而成，各个环节的极限误差分别为 $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ ，则系统总的合成误差 Δ 一般用下面的公式来计算 $\Delta = \sqrt{(\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2)}$ 。由于多个误差同时达到最大值且方向一致的情况很少发生，因此合成后的总误差一般小于各个环节误差的代数和。

系统设计阶段用误差合成理论进行误差分配。误差分配是误差合成的逆过程，即根据系统总精度要求，把总误差指标合理地分配给各个组成环节。误差分配方案不是唯一的，要考虑技术实现的难易程度、成本、可靠性等各方面因素。一般做法就是对技术成熟、成本低、容易提高精度的参数设定较严格的误差指标，对技术复杂、成本高、实现难度大的参数可以放宽误差要求。合理分配误差，既能保证达到系统总体精度目标，又可以提高设计方案的经济性、可行性。

（二）动态精度特性的评估

在机电一体化系统中位移、速度、压力等很多被测参数都属于时间上快速变化的动态量。此时，静态精度已不能完全体现检测系统性能的好坏，需要对它的动态精度特性做进一步的分析。动态精度就是检测系统对随时间变化的输入量的响应和复现能力，动态误差就是动态精度产生的误差。动态误差主要是由于系统各个环节的惯性、延迟、阻尼等造成的，使得输出信号的幅值、相位等与输入信号存在差异。

评价检测系统的动态特性一般用时域或者频域来进行。时域分析时一般用系统对某种输入信号（阶跃信号、脉冲信号、斜坡信号等）的响应来获取动态性能指标。关键指标有，响应时间，输出达到并稳定在最终值某一允许误差带内需要的时间，超调量，阶跃响应中输出超过最终值的最大百分比，振荡频率，衰减时

间等等。这些指标直接体现出系统响应速度的好坏以及系统稳定性的高低。

在频域里，用系统的频率响应特性来进行评价，主要工具有幅频特性曲线和相频特性曲线。幅频特性指的是系统对于不同频率的正弦输入，稳态响应的幅值和输入幅值的比值，它体现了系统可以不失真地跟踪信号的频率范围，一般用带宽来表示。带宽越大，系统所能响应的信号频率范围就越广，动态性能也越好。相频特性是输出信号相对于输入信号的相位延迟随频率变化的关系，相位延迟会影响控制系统的稳定性。理想的检测系统应该在工作的频率范围内尽可能保持平坦的幅频特性，并且线性相移特性，从而达到对复杂的动态信号最小的失真。

（三）闭环系统对检测精度要求

闭环控制系统中检测环节（一般指传感器及附属电路）属于反馈通道，该环节的精度对于整个系统控制性能有着极其重要的影响。反馈信号是否准确，决定了控制器能否根据系统实际情况做出正确的调节。检测环节的误差会引入到控制回路中，与设定值比较之后影响控制器的输出，进而造成系统输出出现偏差，从而降低整个系统的控制精度。

检测环节的精度要求要同闭环系统的总体精度目标相联系。一般来说，检测精度要远远大于系统控制精度的要求。如果检测环节的误差较大，控制器就会根据不准确的被控量信息做出决策，即使控制器本身设计得再好，也无法达到精确控制的目的。例如温度控制系统的温度传感器测量误差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，那么无论控制算法多么先进，系统的最终控制精度也不可能好于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。一般工程实践中一般要求检测精度比系统总精度高 3 到 10 倍，保证检测误差不是系统总精度的主要限制因素。

检测环节动态特性的影响也会波及闭环系统的稳定性。检测环节的相位滞后会在控制环路中叠加，使系统的相位裕度减小，稳定性降低，严重时会导致系统振荡。响应迟缓的检测环节不能及时反映被控量的变化情况，使得控制器所做出的调节动作总是比被控量的变化慢半拍，对需要快速响应的系统来说是致命的缺点。因此闭环系统设计除了检测环节静态精度要高之外，还要保证动态响应速度足够快，带宽远大于系统闭环带宽，不能成为影响系统稳定性与快速性的限制因素。

三、提高可靠性的技术措施

机电一体化系统的可靠性是指它在规定的时间、规定的条件下完成规定功能的能力。检测系统是系统的“感官”，检测系统的可靠程度直接关系到整个系统安全稳定运行。为了保证系统长期无故障工作，从元器件选择、系统设计到制造的整个过程中，都需要采取相应的技术措施来提高系统的可靠性，涉及了元器件的选择、电路的设计以及系统的整体设计等各个方面。

（一）元器件的筛选与降额使用

构成检测系统的电子元器件是可靠性基础，质量好坏直接关系到系统固有的可靠性。即使同一批次的元器件，性能、寿命也存在差别。因此通过元器件筛选来剔除早期失效、潜在缺陷的产品，就是保证系统可靠性的第一道防线。筛选过程一般包含外观检查、电参数检测、动静态老化试验、环境应力筛选等环节，目的在于模仿设备实际工作时所处的恶劣环境，加快元器件潜在缺陷的显现速度，挑选出性能稳定、质量可靠的元器件。

降额使用是提高元器件可靠性、延长其使用寿命最有效的方法之一。降额，即让元器件在其额定规格以下工作，通过减小元器件承受的电应力（电压、电流、功率）和热应力（环境温度）。可以大大减缓元器件参数退化速度，大幅度降低失效率。25V 电容器用在 15V 电路中，可靠性要远大于用在 20V 电路的情况。降额的程度要根据设备的重要性、成本、体积等各方面来综合衡量。军用标准、行业规范一般会就不同级别的元器件给出推荐的降额系数。设计师要按照这些标准来完成降额设计，在成本与可靠性上找到最佳的平衡方式。

（二）电磁兼容与抗干扰设计

机电一体化系统的工作环境一般会存在复杂的电磁干扰，电机启停、变频器运行、无线通信信号等都会产生电磁骚扰。检测系统所处理的信号一般为微弱的模拟信号，极易受到干扰，造成测量失真或者系统误判。电磁兼容设计的目的就是保证设备在复杂的电磁环境中正常工作，不给环境中其他的设备造成过量的电磁干扰。

提高系统的抗干扰能力主要可以从抑制干扰源、切断传播途径、提高敏感电路的抗扰度三个方面入手。

1. 对系统内部干扰源，例如开关电源、继电器等，可通过增加滤波器或者缓

冲电路的方式来有效抑制产生的噪声。

2. 切断传播途径干扰的传播途径有传导和辐射两种。对传导干扰，可以用滤波器抑制电源线、信号线上的干扰。辐射干扰最有效的办法就是屏蔽。通过金属外壳将敏感电路或者干扰源包裹起来，并保证屏蔽层良好接地，可以有效地阻止电磁波的传播。合理的布线和接地设计也非常重要，将模拟地与数字地分开，采用地线网格或者接地平面等都可以减小地线阻抗、环路面积从而降低噪声耦合。

3. 提高敏感电路的抗干扰能力，在电路设计上可以采用差分信号传输方式，用它优异的共模抑制性能来抵抗干扰。使用光电耦合器隔离敏感信号，可以切断电学联系，有效地阻断地环路干扰。从软件角度使用数字滤波算法，也可以达到消除采集信号中噪声的效果。

（三）冗余设计与故障容错

尽管可以采取各种方法来提高系统的可靠性，但是仍然不能完全避免故障的发生。冗余设计以及故障容错技术的目的在于，当系统中某一部分出现故障的时候，系统仍然可以继续执行全部或者部分功能，而不是立刻崩溃。冗余，即系统正常运行需要的资源之外多出一部分作为备用或者替代。

冗余技术有硬件冗余、软件冗余、信息冗余等。硬件冗余是最常见的一种类型，就是用多个相同的硬件单元来实现相同功能。用双传感器或者三传感器测量同一重要参数，通过表决机制（三取二）来判定并去除故障传感器的输出，从而保证测量结果正确无误。在重要的系统中常采用双机热备份或者多机集群的方式，主系统出现故障时，备用系统可以立即无缝接管工作。

软件冗余，即在软件上增加模块、逻辑来实现故障检测、诊断、恢复。可以设置看门狗定时器来监视微处理器的运行情况，当程序跑飞的时候，看门狗会强制系统复位，使系统恢复正常。检查点技术、恢复块技术等都是常用的软件容错手段，它们会周期性的保存系统状态，以便在发生故障之后把系统恢复到最近的一个正确的状态点上。信息冗余是通过在数据中增加校验位（奇偶校验、CRC 校验等）来实现的，可以检测甚至纠正数据传输或者存储过程中出现的错误。综合使用以上冗余、容错技术后，可构建一个鲁棒性极强的检测系统，即使部分硬件出现故障或软件出错，也能保证系统的稳定可靠运行。

四、智能传感器技术

伴随着微电子技术、计算机技术和人工智能的迅猛发展，传统传感器的网络化、智能化趋势越来越明显。智能传感器由传感元件、信号处理单元、微处理器、通信接口等组成，除了能完成信号检测之外，还具有自诊断、自校准、数据处理、网络通信等功能，使检测系统性能和自动化程度得到很大的提高。

（一）传感器自诊断与自校准

传统检测系统使用中会因为传感器老化、环境改变等原因出现漂移情况，必须定时做人工校准保养工作，但是大型分布式系统难以实现。智能传感器内含微处理器及相应的算法，可以实现一定程度的自我管理。自诊断功能可以使得传感器对自身供电电压、内部温度、电路连通性等重要参数进行连续检测。一旦出现异常，传感器就会立刻将故障信息传送给控制系统，并且在某些情况下还会自动转入到安全备用状态中，从而大大提高了系统的可维护性以及安全性。

自校准功能属于智能传感器的另一项主要技术。智能传感器使用内置的参考源或者特定的算法模型，在线补偿测量误差（零点漂移、灵敏度变化等）。有些智能压力传感器内部就带温度传感器，依靠自身的温度测量结果，利用事先储存的温度误差修正模型，自动纠正温度变化对压力测量值造成的影响。自校准能力消除了人工校正的必要，使传感器在全寿命周期和工作环境变化时，仍然可以保持较高的测量精度，对要求长期稳定运行的精密测量和控制场合来说尤为重要。

（二）数据融合与信息处理

在复杂的机电一体化系统里，一般会用到多种类型的传感器来感知环境及系统状况，从而得到更加全面、可靠的资讯。单个传感器获得的信息很少，并且带有不确定性和误差。数据融合技术就是综合分析处理来自各种传感器的数据，得到比单个传感器提供的信息更准确、完整、可靠的结果或者决策。

数据融合可以分为多层次，数据层融合就是直接将多传感器采集到的原始数据相加，从而降低随机噪声，提高信噪比。特征层融合就是从各个传感器的原始数据中提取关键特征，然后将这些特征进行融合。决策层融合就是各个传感器先做出局部判断，再用融合算法对各个局部判断进行综合，得到全局决策。融合算法有加权平均法、卡尔曼滤波法、贝叶斯估计法、神经网络法等。多传感器融合技术可以提高测量精度和可靠性，增大系统感知范围，提高对复杂环境的认知能

力，而且可以容忍单个传感器的故障。

（三）网络化智能传感器接口

为了满足分布式测量及控制系统的需要，智能传感器必须要有方便的网络通信能力。网络化可以方便地将大量的传感器互联成网，从而实现数据共享、远程访问。早期传感器大多采用点对点的模拟信号（4 ~ 20mA 电流环）或者简单的数字接口，接线复杂，扩展性差。网络化的智能传感器使用的是标准数字总线接口，一根总线就可以连接很多个传感器，大大简化了系统的布线结构。

为了使传感器实现网络化、互操作性，业界已经制定了很多标准接口协议。IEEE 1451 标准族给出了一种通用的网络化智能传感器模型，将传感器的物理部分（传感器、信号调理、模数转换等）和网络部分分开，任何符合此标准的传感器都可以方便地接入任何符合此标准的网络。该标准还定义了传感器电子数据表，它是传感器内部存储器里的一种结构化的、标准化的数据，包含了传感器的型号、序列号、校准数据、单位等全部信息。当这些传感器接入网络之后，上位机就可以自动读取传感器电子数据表，实现即插即用，从而大大简化了系统配置、维护工作。现场总线（CAN、Profibus）和工业以太网（EtherNet/IP、Profinet）已经给传感器提供成熟的网络解决方案。

第四章 驱动与执行技术

驱动与执行技术属于机电一体化系统的一部分，它是把控制系统传给指令信号转换成机械动作的关键部分，是实现系统功能、达到性能要求的重要环节。本章主要对各种电动机及控制特性进行系统介绍，从步进电机、特种电机等不同的驱动方案都会被涉及，为读者构建起完整的机电系统动力学基础。

第一节 电动机及其控制特性

电动机作为能量转换装置，在机电系统中起肌肉的作用，它的好坏直接决定系统的动态响应、精度、稳定性。本节将对步进电机、直流伺服电机、交流伺服电机等不同种类的电机的原理、控制方式和特点做详细的阐述，为各种系统的选型、使用提供依据。

一、步进电机及其驱动

步进电机是将电脉冲信号转换成角位移或者线位移的开环控制元件。在非超载的情况下，电机的转速和停止位置只与脉冲信号的频率、数量有关，因此被广泛地应用到各种需要精确定位的场合。它以固定的角度一步一步地运行，结构简单，控制方便。

（一）步进电机的工作原理

步进电机是用电磁学原理把电能转换成可控的机械能。其基本结构为定子和转子，定子上装有绕组（相），转子根据类型不同可以是永磁体或软磁材料。控制器给定子绕组通入一定的顺序的电流，从而产生一个步进式的旋转磁场。磁场会对转子产生吸引或者排斥力的作用，使转子随着磁场转动一定的角度，即一个步距。

通过依次改变通电相，转子就可以连续地、一步一步地转动。两相步进电机中，如果其中一相绕组电流方向改变，则电机将沿一个方向转动一个步距角（如1.8

度)，如果另一相电流方向改变，则会向相反方向转动。由于每一个脉冲信号对应一个精确的步距角位移，所以可以通过控制脉冲的数量来精确控制电机的总转动角度，通过控制脉冲的频率来控制电机的转速，实现了数字信号对角位移的开环控制。

步进电机的运行方式有多种，常见的有单相励磁、双相励磁和单双相混合励磁（也称八拍运行）。不同的励磁方式会使得电机的输出转矩、运行的平稳性不同。双相励磁时所有线圈都通电，一般能获得最大转矩；单双相混合励磁可以获得更小的步距角、提高分辨率，但是控制比较复杂。由于步进电机具有脉冲控制的特点，在打印机、绘图仪、数控机床等设备上得到了广泛的应用。

（二）步距角与矩频特性

步距角属于步进电机最重要的参数之一，它指步进电机每接收一个控制脉冲时转子转动的角度。角度的大小是由电机内部结构决定的，主要是由定子相数和转子齿数决定的。两相步进电机固有步距角为 1.8 度，即转动一圈需要 200 个脉冲。选择合适的步距角对满足系统定位精度来说非常重要。

矩频特性就是转矩频率特性，它是反映步进电机动态性能的重要曲线。即在不同脉冲频率下，电机可以输出的最大转矩。一般步进电机输出的转矩随着脉冲频率的增加而减小。这是因为随着频率的增加，绕组中电流建立的时间变短，反电动势增大，平均电流减小，输出转矩也随之减小。当频率低到一定程度时，电机就会进入低频振荡区，产生噪音和振动；当频率过高超过某个数值时，电机的转矩就不能克服负载和自身的惯性，造成失步。因此在选择和使用时，必须保证电机在工作频率范围内输出的转矩始终大于负载转矩，并留有足够余量。

（三）细分驱动技术实现

细分驱动技术是提高步进电机综合性能的一种控制方式，不改变电机本身结构，由驱动器精确控制各个绕组电流实现。本质就是电子阻尼技术，主要目的是减小或者消除步进电机低频振荡，提高步进电机分辨率和运行平稳性。这项技术最早是在 20 世纪 70 年代中期提出的，之后得到了广泛的应用和发展。

细分的基本原理就是，在步进电机的一个步距角内，不采用传统的方法使电流瞬间从零变到额定值，而是阶梯式地改变两相绕组的电流，使得合成磁场矢量在一个步距角内平滑地移动若干个微小位置。因此电机原本的一大步就变成了许多小步。细分功能的实现完全依靠驱动器准确控制电机相电流来实现，和电机本

身没有关系。常见的细分驱动电路有斩波式和脉宽调制式两种。

实现细分驱动通常遵循以下步骤：

1. 细分系数确定：根据系统平稳性、分辨率要求设置细分倍数，比如 8 细分、16 细分等。

2. 生成电流矢量表，根据细分系数、电机相数，预先计算出在一个电周期内，每一个微步所对应的各相电流的理想值（一般呈正弦、余弦关系）。数据一般是存放在驱动器的存储器里。

3. 精确电流控制：驱动器接收到外部脉冲信号之后，并不是直接使电机转动一个固定步距，而是根据电流矢量表，利用脉宽调制等技术精确地控制功率管的导通时间，调节输出到电机各个相绕组的电流值，使它达到该微步的目标值。

4. 持续微步进运动，随着外部脉冲的不断输入，驱动器输出不同的相电流，使定子合成磁场矢量以更小的角度步进，带动转子做平滑的微步进运动。

不仅可以提高步进电机定位精度和运转平稳性，还能有效抑制电机低速运行时产生的共振现象，某些情况下还可以提高电机输出转矩。

二、直流伺服电机及控制

直流伺服电机因为控制性能好，所以在机电一体化系统中应用较广，快速响应、精确定速场合使用更多。可以将直流电能转变成机械能，并用反馈控制回路精确控制转速、位置，反应速度快、调速范围大、控制精度高。

（一）直流伺服电机调速原理

直流伺服电机调速原理主要是根据它的电磁转矩、感应电动势的数学模型。电机的转速是由电枢电压、励磁磁通、负载转矩共同决定的。实际应用中主要是通过调节电枢电压来实现调速，因为该方法线性好、响应快。简单地讲，当励磁磁通保持不变的时候，电机的稳态转速大致同电枢电压成正比。因此，改变电机电枢两端所加的平均电压，就可以方便地控制电机的转速。

除了改变电枢电压，还可以通过改变励磁电流来调节磁通强度，从而达到调速的目的，这种方法称为弱磁调速，一般用于电机额定转速以上的调速区。现代直流伺服控制系统中，最常用的是采用电力电子器件构成的斩波器或者脉宽调制控制器，可以将恒定的直流电源电压转换成幅值可调的等效直流电压，供给电机电枢，实现宽范围的平滑调速。

（二）脉宽调制控制

脉宽调制，简称 PWM，是现代直流伺服电机控制中使用最广泛的一种技术。其主要思想就是改变脉冲宽度来得到所需的电压波形和幅值。对于直流电机调速，脉宽调制技术用高频开关（MOSFET 或 IGBT）以极快的速度通断，将直流电源电压斩波成一连串的方波脉冲加到电机电枢上。

电机所受的电压为脉冲式，由于电枢绕组具有电感效应和机械惯性，电枢电流、转速不会发生剧烈变化，而是响应于脉冲电压的平均值。平均电压值是由脉宽调制波的占空比决定的。占空比指的是在一个开关周期内，高电平时间（开关闭合时间）所占的比例。调节占空比可以线性地改变加在电机上的平均电压，进而精确地控制电机的转速。

脉宽调制控制有非常突出的优点。采用开关工作方式，功率器件损耗小，因此效率高。由于开关频率远大于电机系统机械响应的频率，所以控制响应很快。数字电路或者微处理器可以方便地产生和调节脉宽调制信号，容易实现数字化、智能化的控制。除了可以调速之外，利用 H 桥电路还可以实现电机正反转的控制。

（三）闭环调速系统设计

为了实现直流伺服电机转速的高精度、高稳定性控制，一般要建立闭环调速系统。与开环控制不同的是，闭环系统中加入了负反馈，能实时检测电机实际转速，并与期望转速比较，根据误差调节，很好地克服了负载扰动和系统参数变化的影响。闭环调速系统一般由控制器、功率放大器、直流电机、速度传感器（测速发电机或编码器）等组成。

在许多高性能的应用中，会用转速、电流双闭环控制。该系统结构为外环速度环，内环为电流环。速度环控制转速，速度环调节器的输出作为电流环的给定值；电流环快速控制电枢电流，从而间接控制电机的转矩。串级结构明显的好处是电流环的响应速度远远快于速度环，可以实现对指令的快速跟踪，实现转矩的快速控制，提高系统的动态响应能力，电流环还可以限制启动或者堵转时的冲击电流，保护电机以及功率器件。

双闭环系统的设计一般先内环后外环。首先设计电流环，使电流环带宽足够大、稳态误差足够小，可以近似为快速响应的电流跟随环节。在此基础上设计速度环，把带有电流内环的电机对象当作一阶惯性环节进行校正，用设计速度调节器（一般采用比例积分调节器）来满足系统对动态响应时间、超调量、稳态误差

等性能指标的要求。

三、交流伺服电机及控制

随着电力电子技术、微处理器技术、控制理论的发展，交流伺服电机由于结构简单、工作可靠、维护方便、功率密度高等优点，在高性能机电一体化系统中逐渐取代了直流伺服电机。尤其是永磁同步电机，已经成为目前伺服应用的主流。

（一）永磁同步电机原理

永磁同步电机是一种把电能转变为机械能的同步电机，其特点是转子采用永磁体来励磁，而不是传统的励磁绕组。定子结构与普通交流异步电机相似，一般都有三相分布绕组。定子三相绕组通入频率、幅值、相位对称的交流电时，在电机内部的气隙中就会产生一个匀速旋转的圆形磁场。

转子上的永磁体一般采用钕铁硼等稀土永磁材料来产生恒定磁场。在旋转磁场的作用下，转子永磁体受到电磁力的拖动，就像被旋转磁场拉着的小磁针一样，会随着定子旋转磁场以完全相同的速度同步旋转，这就是“同步”名称的由来。转子转速只和电源频率有关，和负载无关，非失步范围内转速非常准确。

永磁同步电机由于采用永磁体代替电励磁，省去了励磁绕组、集电环、电刷等结构，使得电机结构更简单紧凑、可靠性更高，消除了励磁损耗，因此具有效率高、功率因数高、体积小、重量轻等优点。正因为其优良的性能，它被广泛用作现代高性能伺服驱动的首选电机。

（二）矢量控制与直接转矩控制

为了使交流伺服电机具有和直流电机相媲美的优越动态控制性能，就必须解决交流伺服电机的励磁和转矩之间的耦合问题。矢量控制和直接转矩控制就是为此而发展起来的两种主要控制策略。

矢量控制又称磁场定向控制，它的基本思想是用坐标变换，把定子电流矢量分解成励磁分量、转矩分量两个互相垂直的直流分量，从而模拟直流电机的控制方式，实现对磁链、转矩的独立解耦控制。控制系统通过检测或估算转子磁链位置，建立一个与转子磁链同步旋转的坐标系（ $d-q$ 坐标系），在 $d-q$ 坐标系中，励磁分量电流只产生磁场，转矩分量电流只产生转矩，二者互不影响。因此可以像控制直流电机一样，用转矩电流分量来实现高性能的动态响应。

直接转矩控制是在矢量控制之后发展起来的又一种高性能交流调速技术。它

不需要复杂的坐标变换和电流环的解耦控制，而是在定子静止坐标系下，通过计算和控制电机的定子磁链和电磁转矩来实现的。直接转矩控制系统使用一个滞环比较器把估算出的磁链、转矩和给定值相比较，根据比较的结果直接查询优化过的开关表，选择最合适的电压矢量来驱动逆变器，把磁链、转矩的误差控制在预设的滞环内。直接转矩控制结构更简单，省去了旋转坐标变换和脉宽调制脉冲生成环节，因此转矩响应速度很快，但是转矩和磁链脉动较大。

（三）伺服驱动器的参数整定

伺服驱动器是控制伺服电机的重要部分，内部有复杂的控制算法和功率电路。为了使伺服系统与具体的机械负载相匹配，达到最佳性能，需要对驱动器内部的一系列控制参数进行合理的设置，这个过程称为参数整定或者增益调整。参数整定的目的就是使电机能快速、准确、平稳地响应上位控制器的指令，发挥出机械系统性能。

伺服驱动器中最重要的一般是内部控制环路的参数，即位置环、速度环和电流环的比例积分微分调节器参数。主要参数见下表

伺服驱动器主要参数及其作用

参数类别	具体参数	作用描述	调定影响
速度环	比例增益 K_p	决定系统刚性和指令响应速度	K_p 越大响应越快，过高易振荡
	积分时间 T_i	消除稳态误差	T_i 越小消除误差越快，过小易超调振荡
位置环	比例增益	决定位置控制的跟随性能	增益越高误差越小，过大易引起振动和过冲
系统匹配	惯量比	驱动器根据此参数调节算法以适应负载	需正确设置，部分驱动器有自动辨识功能
滤波器	陷波 / 低通滤波器	抑制机械共振、高频噪声	合理设置中心频率、带宽以兼顾平稳与响应

参数整定是理论与实践相结合的过程，一般从速度环开始，在产生振荡之前尽量提高增益以获得更高的系统刚度，再整定位置环，最后通过滤波器改善振动抑制。

四、特种电机应用

在一些特殊的机电一体化应用场合，传统的旋转电机因为结构、原理上的限

制,不能满足高精度直线运动、微型化、高转矩密度、无磁场环境等要求。因此,一系列具有特殊结构和工作原理的电机被研制出来,给系统设计提供了一种新的解决途径。

（一）直线电机直接驱动

直线电机是直接把电能转化为直线运动机械能的驱动装置,它没有中间传动机构,例如丝杠、齿轮或皮带。其工作原理就是把一台旋转电机沿径向切开并展开。结构上分为初级和次级,初级是带有三相绕组的线圈组件,次级是排列有永磁体的磁轨。当给线圈绕组通入交流电时,会产生一个行波磁场,行波磁场和永磁体磁场相互作用,产生沿直线方向的驱动力。

直接驱动是直线电机最大的优势。由于省去了所有的机械传动环节,从根本上消除了传动链带来的反向间隙、弹性变形、摩擦、磨损等问题,使系统具有很高的定位精度、重复定位精度、极快的动态响应。直线电机速度、加速度比传统的丝杠传动系统高很多。

直线电机主要用在速度、精度、动态性能有严格要求的地方。在半导体制造设备、高精度数控机床、激光切割设备、高速物料搬运系统等地方,直线电机直接驱动平台可以实现微米级甚至纳米级的定位精度,加工效率非常高。磁悬浮列车就是直线电机技术最著名的宏观应用。

（二）超声波电机原理

超声波电机与传统的电磁原理完全不同,是新型的电机。它不需要磁场和线圈,而是利用压电材料逆压电效应产生驱动力。其主要组成部分就是由压电陶瓷和弹性体组成的定子(振动体)和定子紧密接触的转子(移动体)。

工作原理:当定子上的压电陶瓷受到一个高频(超声波频段,大于20kHz)的交变电压时,压电陶瓷会产生同频率的伸缩振动。微小的振动经过定子弹性体特有的结构设计(弯曲振动模态)放大和转换之后,定子表面上的质点就产生椭圆形的运动轨迹。椭圆运动切向分量通过定子、转子间的摩擦力使转子产生宏观旋转或者直线运动。

超声波电机有以下优点,低速时可以输出大转矩,结构简单紧凑、重量轻,断电时有自锁功能,不需要另外的制动器,响应速度快,启动、停止都非常迅速,运行非常安静,不受磁场干扰,本身也不产生电磁干扰。由于上述特点,它在精密仪器、相机镜头自动对焦系统、医疗设备、航空航天等无磁、无声、精准定位

有严格要求的场合中具有不可替代的优势。

（三）盘式电机与空心杯电机

盘式电机、空心杯电机为满足某种特殊需要而专门设计的直流电机。通过改变电机磁路和电枢结构，使它们具有与传统直流电机不同的优良特性。

盘式电机又称为扁平电机或轴向磁场电机，最明显的特点就是电枢和磁钢沿轴向排列，形成一个扁平的盘状结构。电枢一般采用印制电路板工艺或者无铁芯绕组制作，呈薄盘状，定子磁钢沿轴向分布在电枢两侧，形成轴向气隙磁场。由于这种结构使电机轴向尺寸小，所以适合空间小的场合安装。由于转子（电枢盘）的转动惯量很小，盘式电机具有很好的动态响应和加减速性能。

空心杯电机没有铁芯。转子（电枢）是用铜线自行支撑绕制而成空心杯形的绕组，内部没有传统硅钢片铁芯。杯状绕组在永磁体和软磁导磁体之间转动。由于去除了铁芯，消除了由于铁芯产生的磁滞损耗和涡流损耗，所以电机效率很高。更重要的是，没有铁芯，转子的转动惯量变小，齿槽效应消失，空心杯电机具有极低的启动电压、极快的响应速度、非常平稳的低速运行性能、线性度很好的控制特性。由于它的诸多优点，被广泛应用于对电机重量、体积、响应速度有严格要求的医疗器械、机器人、精密仪器仪表、航空模型等领域。

第二节 液压与气动驱动技术

液压、气动驱动技术属于机电一体化系统当中动力传递以及控制的关键部分。本节主要是对液压、气动系统基本组成、设计方法以及仿真技术等做简单的阐述，给复杂的机电系统提供理论基础和工程实践的指导。流体动力技术应用范围很广，重型工程机械、精密制造装备等处处都有它的身影。

一、液压动力元件与执行元件

液压动力元件把机械能转变成液压能，执行元件把液压能转变成机械能。充分认识液压泵、液压缸、液压马达的工作特性及选型方法，是创建高效、可靠液压系统的根基。这些元件的性能好坏直接影响整个液压系统的功率、响应速度、工作寿命。

（一）液压泵的工作特性

液压泵是液压系统动力源，其主要功能就是把原动机（如电动机）的机械能转换成液体的压力能。液压泵种类繁多，按结构可以分为齿轮泵、叶片泵和柱塞泵。它们各自的特点和适用场合不一样，主要特性对比如下表所示。

常见液压泵特性对比表

泵类型	结构复杂度	成本	压力承受能力	容积效率	流量特性	噪声特性
齿轮泵	简单	低	低	较低	脉动	一般
叶片泵	中等	中等	中等	中等	均匀	较小
柱塞泵	复杂	高	高	高	脉动	一般

从表中可以看出，齿轮泵由于结构简单、成本低而被广泛使用，但是效率和压力承受能力较低；叶片泵由于流量均匀、噪声小等特点，在对平稳性要求高的场合下表现较好；柱塞泵虽然结构复杂、成本高，但是可以承受极高压力、容积效率高，适用于大功率、高压力的工况。不同的液压泵选择需要根据实际需要进行权衡考虑。液压泵的工作特性一般用流量 - 压力特性曲线、功率 - 压力特性曲线和效率 - 压力特性曲线来表示。流量特性就是泵输出流量随工作压力变化而变化的规律。理论上定量泵的输出流量是恒定的，不随压力变化。但因为内部泄漏，在压力增大的情况下，输出流量会略有下降。泄漏程度是评价泵性能的重要指标，一般用容积效率来表示。

功率和效率特性可以体现泵能量转换的效率。液压泵的输入功率有一部分被用来输出液压功率，其余部分因为机械摩擦和容积损失而消耗掉。总效率就是容积效率和机械效率的乘积，反映泵能量转换的完善程度。液压泵在实际工作时并不总是能获得最高的效率，一般存在一个最佳效率区。因此选择液压泵，确定液压泵的工作点时应该尽量使液压泵工作在其高效区上运行，从而达到节能、降低系统发热的目的。

（二）液压缸与液压马达选型

液压执行元件把液压能转换成直线或者旋转运动的机械能，主要有液压缸和液压马达。合理选型是保证执行机构符合工作要求、完成系统功能目标的必要条件，需从负载特性、运动要求、工作环境等几个方面来考虑。

液压缸与液压马达的选型过程通常遵循以下步骤：

1. 工况需求分析，首先确定执行元件所承受的最大负载（力或者力矩）、运

动速度（直线速度或者转速）、行程或者转角范围、运动循环中速度和负载的变化规律。

2. 根据负载大小和系统设定工作压力初步确定液压参数，即初步估算液压缸的有效作用面积或者液压马达的排量。液压缸的推力是工作压力和活塞有效面积的乘积，液压马达的输出扭矩约为工作压差、排量、机械效率的乘积。

3. 型号选择，根据计算参数并考虑一定的安全裕度，查阅产品样本选择合适的标准型号。对于液压缸还需要确定它的结构形式（活塞式、柱塞式）、安装方式（法兰式、耳环式）和杆径，校核最大载荷时的压杆稳定性。对于液压马达，要考察它的最低稳定转速、额定转速和最高转速，保证工作范围满足系统要求。

4. 性能校核：在初步选型之后，必须对液压缸或液压马达的启动压力、效率、最大工作速度等各项性能进行校核，以保证它可以平稳、可靠地完成工作循环。特别是对精确定位的系统来说，执行元件的低速稳定性及动态响应特性就显得格外重要。

（三）电液伺服阀原理

电液伺服阀是实现高精度液压控制的重要元件，它是电液转换器，可以把微小的电信号准确地转换成大功率的液压流量和压力。该阀门被广泛地用在航空航天、机器人、精密机床等对动态响应和控制精度要求很高的地方。

典型的两级电液伺服阀一般由永磁力矩马达、喷嘴挡板式前置级、滑阀式功率级组成。力矩马达为电气机械转换器，接受伺服放大器的控制电流。当电流通过线圈的时候，在线圈与永磁体产生的磁场相互作用下，衔铁会产生一个偏转力矩，从而带动与它相连的挡板产生微小的偏转。

前置级一般用双喷嘴挡板。挡板处在两个相对的液压油喷嘴中间。挡板被衔铁偏转时，靠近一侧喷嘴的节流作用增大，背压升高；远离另一侧喷嘴的背压降低。这样滑阀两端就有了压差。

这个压力差作用在功率级滑阀的两个端面上，使滑阀移动。滑阀的位移可以打开或者关闭相应的油口，从而控制流向液压执行元件（液压缸等）的流量大小和方向。滑阀的位移通过反馈杆反馈给力矩马达，形成力或者位置的闭环，使滑阀位移与输入电流信号成正比。依靠这种巧妙的机液电耦合设计，电液伺服阀实现了液压动力的高速、高精度控制。

二、液压控制系统的设计

液压控制系统的设计直接关系到整个机电系统性能的好坏。一个优秀的液压系统设计要达到功能要求的同时还要考虑经济性、可靠性、节能性。本节主要对液压回路的设计原则、比例控制技术、节能技术进行研究,为现代化高性能液压系统的建立提供指导。

(一) 液压回路的设计原则

液压回路就是将若干个液压元件用管路连接起来而组成的一个组合,完成某种控制功能。设计液压回路时要遵循一些基本原则,保证系统安全、稳定、高效地工作。首先就是功能性,设计的回路要能完成预期的动作,具备压力保护、过载保护、互锁等安全措施,防止误操作和意外事故的发生。

其次就是可靠性与经济性原则,应该选用标准化、质量可靠、容易组装、管路简单、密封严密的液压元件。在保证性能满足要求的前提下,尽量使系统总成本最低,即元件采购、安装调试、后期运行维护等成本。采用集成块或者叠加阀技术,可以使得系统结构更加紧凑,减少外部管路,降低成本,提高可靠性。

效率和维护性原则也绝不能忽视。设计时要充分考虑系统能量损耗,通过合理的元件选型、回路形式设计来减小溢流损失、节流损失。系统布局要便于检查、维护和更换元件,在关键部位设置测压点,有利于故障诊断。油箱的设计也要便于散热、清洗。回路图形符号要清晰、规范,符合国家或者国际标准,便于制造、调试、技术交流。

(二) 电液比例阀控制系统

电液比例控制技术属于开关控制和高精度伺服控制的中间方式。它用电液比例阀做控制元件,根据输入的模拟电信号按比例控制液压系统的压力、流量或者方向。相比价格昂贵、对油液清洁度要求高的电液伺服阀来说,比例阀具有成本低、抗污染能力强、可靠性高等优点,在工业自动化领域得到了广泛的使用。

典型的电液比例控制系统由控制器、比例放大器、电液比例阀、执行元件组成。控制器(PLC或者专用运动控制器)根据指令信号和传感器反馈(在闭环系统中)产生控制电压或者控制电流信号。比例放大器对信号进行功率放大,加入颤振信号以克服阀芯的静摩擦,最后驱动比例阀上的比例电磁铁。比例电磁铁产生的电磁力与输入电流成正比,该力使阀芯移动从而改变阀口的开度,达到调节

流量或者压力的目的。电液比例阀既可以用于开环控制系统，实现远程调速或者调压；也可以和位移、压力、力传感器配合构成闭环控制系统，实现位置、速度或力的高精度控制。

（三）液压系统的能耗控制

随着对能源效率、环保的要求越来越高，液压系统的能耗控制也成了系统设计中的一项重要内容。传统的液压系统，尤其是采用定量泵和节流调速的系统，存在大量的能量损失，主要是溢流损失和节流损失。这些损失最终会以热量的形式表现出来，既浪费能源，又会造成油温过高，影响系统的稳定性。

为了降低能耗，可以采用多种先进的控制策略和技术。

1. 采用高效动力源：负载敏感系统就是其中一种高效节能回路。它用负载敏感阀检测执行元件的工作压力，然后把该压力反馈给变量泵的压力补偿器，使泵的输出压力始终比负载压力高一个固定的压差值。系统按照实际需要来调节压力，大幅度减少溢流损失、节流损失。

2. 采用变频调速技术，利用变频器控制驱动液压泵的异步电动机转速，根据系统在不同工作阶段对流量的需求来调节泵的输出流量。系统处于待机或者低速工况时，降低电机转速，泵的输出流量和功率都会随之降低，节能效果明显。该技术最适合于负载变化较大的工作循环设备，即注塑机。

3. 能量回收与再利用：电梯、起重机等有势能负载或者惯性负载的系统中，执行元件在制动或者下降时会释放能量。此时可以利用液压蓄能器回收这部分能量。制动过程中产生的高压油储存在蓄能器里，系统需要时再释放，实现能量的循环利用，提高系统总效率。

三、气压传动及其控制

气压传动由于结构简单、成本低、无污染等特点，在自动化领域得到了广泛的应用。它以压缩空气为工作介质，轻载、高速的自动化产线、物料搬运、装配等场合有独特的优势。本部分主要对气源处理装置、典型的气动执行元件和控制元件、气动伺服控制技术进行系统的介绍。

（一）气源处理与气动三联件

空压机输出的压缩空气里一般都混有水分、油污、尘埃等杂质，并且压力不稳定。如果直接用于气动元件，就会对它造成腐蚀、磨损、堵塞等损害，严重

影响系统的可靠性以及寿命。因此压缩空气的净化和压力调节是气动系统正常工作的前提，一般由气源处理装置来完成，其中最典型的气源处理装置就是气动三联件。

气动三联件通常由空气过滤器、减压阀和油雾器三部分组成，其各自功能详见下表。

气动三联件各部件功能表

部件	主要功能
空气过滤器	去除压缩空气中的固态颗粒及液态水滴
减压阀	调节并稳定气源压力至系统所需工作压力
油雾器	向气流中喷射油雾，润滑气动元件内部机构

空气过滤器内部设有滤芯、旋风分离装置等，以完成净化工作。减压阀用于将储气罐中不稳定的气源压力调节至系统所需的工作压力并保持稳定，从而避免气源压力波动对执行元件输出力或速度造成影响。油雾器喷出的微小油液随着气流到达各个阀门、气缸内部，对这些零件的内部机构起到润滑的作用，从而减少磨损。由于现代气动元件一般已经实现了自润滑，所以油雾器可以不用，这时过滤器和减压阀就组成了气动二联件。

（二）气动执行元件与控制阀

气动执行元件是把压缩空气的压力能转换成机械能的装置，用以驱动机构完成各种动作。最常见的气动执行元件是气缸，它依靠活塞的移动实现直线往复运动。根据气缸的结构和工作方式可以分为单作用气缸和双作用气缸。单作用气缸只在一个方向上受气压驱动，返回时靠弹簧力或外部负载；双作用气缸在两个方向上均受气压驱动，输出推力大。还有无杆气缸、摆动气缸、气动马达等，分别实现长行程直线运动、摆动运动和连续旋转运动。

气动控制阀控制气流压力、流量、方向来控制执行元件的动作。方向控制阀是气动回路的心脏，它依靠改变阀芯位置来改变气路通道。规格一般用通路数、位置数来表示，二位五通阀、二位三通阀等。根据控制方式不同，可以分为电磁阀、气控阀和手阀。

流量控制阀又称为节流阀，通过改变阀口通流截面积来调节通过阀门的气体流量，从而控制气缸的运动速度。压力控制阀是用来调节、限制系统压力的元件，溢流阀是安全保护元件，减压阀是局部回路压力稳定的元件。这些控制阀和执行

元件组合在一起，就形成了各种不同的气动控制系统。

（三）气动位置伺服系统

虽然气压传动有诸多优点，但是实现高精度的位置伺服控制一直是一个技术难题。主要是由于空气高可压缩性造成气动系统刚度小、阻尼小，在外力干扰下容易产生位置偏差和振荡。同时气缸活塞与缸筒之间存在的非线性摩擦力，尤其是静摩擦和动摩擦的差别，也给精确定位造成了困难。

典型的气动位置伺服系统一般由高性能的气动比例阀或伺服阀、低摩擦气缸、高分辨率位置传感器（光栅尺、磁致伸缩位移传感器）和先进的控制器组成。控制器是整个系统的中枢，它接受目标位置指令以及传感器反馈回来的实际位置信息，经过某种控制算法计算出控制信号，最后输出给气动伺服阀。因为空气的可压缩性、非线性摩擦等特性，单纯使用 PID 控制达不到理想的效果，需要用到更加复杂的控制方式，例如基于模型的反馈控制、自适应控制、滑模变结构控制、前馈控制等来弥补摩擦力、负载变化的影响。依靠先进的控制算法、强大的硬件性能，气动位置伺服系统可以在各种场合实现快速、平稳、准确的定位。

四、流体动力系统的仿真

随着计算机技术的发展，仿真已经成为流体动力学系统设计和分析不可缺少的方法。利用建立的数学模型进行计算机仿真，可以在设计之初就预测出系统的动态性能，发现潜在的问题，对参数进行优化，缩短研发周期，降低开发成本，提高系统性能。

（一）液压系统动态特性仿真

液压系统动态特性仿真，就是用计算机模拟系统受到动态输入或者扰动时，系统内部的压力、流量、温度、执行器运动状态随时间变化的过程。对分析系统稳定性、响应速度、压力冲击等性能指标有重大意义。仿真的第一步就是对系统中的各个元件建立数学模型。液压泵的流量用理论流量减去内外泄漏量来表示；液压阀的流量一般用节流孔口公式来表示；液压缸的运动遵循牛顿第二定律，其加速度由作用在活塞上的液压力、负载力和摩擦力共同决定。

代数方程、微分方程所组成的模型可以体现元件内部的物理过程。将系统中所有的元件模型按照液压原理图连接起来，就形成了整个系统的仿真模型。现代的专业液压仿真软件 AMESim、MATLAB/Simulink 等，都有十分丰富的标准元

件模型库，可以采用图形化的方式构建自己的系统模型。

利用仿真可以很方便的观察到物理样机上不容易测量到的内部变量，例如换向时的瞬时压力尖峰、系统在不同的负载下的频率响应特性等。通过仿真分析可以在产品制造前评价改进设计方案，比如改变节流口尺寸来减小冲击，调节控制器参数提高系统的稳定性等等，大大地提高了设计的效率和质量。

（二）气动系统管路建模

气动系统动态仿真中，建立各元件之间的气体管路模型是十分重要的一个环节，也是十分复杂的。气体具有可压缩性且粘度小，在管路中的流动特性比液压油复杂得多，特别是在长管路或者快速响应系统中，压力波的传播和反射作用更加不可忽视。管路模型的准确性会直接影响整个气动系统仿真的可信度。

针对不同的应用需求和精度要求，气分管路的建模方法主要分为两类：

1. 集总参数模型，即把管路简化为一个或几个恒定容积的腔室，忽略压力、温度在管路内部空间上的分布，认为管路各处的状态参数是均匀的。它主要考虑气体的可压缩性，也就是容积效应和流动时的阻力效应。集总参数模型简单、计算量小，适用于管路短、系统动态响应慢的情况。

2. 分布参数模型，当管路较长或者系统中阀门开关速度很快的时候，气体在管路中产生的波动效应就会变得很明显。这时需要用分布参数模型，即用一组偏微分方程来描述管路内气体流动，即一维非定常可压缩流体动力学方程，它考虑了质量、动量、能量随时间、空间的变化。该模型可以准确模拟压力波的传播、反射、叠加现象，但是模型复杂，计算量大。传输线法是求解这类模型的高效数值方法。

（三）联合仿真与参数优化

现代机电一体化系统一般是由机械、电子、液压、气动等各个物理领域相互耦合而构成的复杂系统。联合仿真技术属于研究多领域耦合系统动态特性的有效手段。它可以连接各个专业领域中最好的仿真软件（ADAMS 做多体动力学仿真、MATLAB/Simulink 做控制系统仿真、AMESim 做流体动力系统仿真），在仿真过程中实时交换数据，共同完成整个系统的模拟。既可以发挥各个软件在各自领域内的优势，又能正确反映各个子系统之间动态的交互影响。

进一步可以将仿真模型和优化算法结合起来，达到对系统设计参数的自动优化。基本思想就是把系统性能指标定义为优化目标（最小化响应时间、最低能耗

等），确定设计变量（阀口尺寸、弹簧刚度、控制器增益等），用优化算法（遗传算法、粒子群算法、序列二次规划等）在一系列约束条件下，自动调整设计变量的取值，反复调用仿真模型进行性能评价，最后算法会搜索到一组能使系统性能达到最优的设计参数组合。仿真和优化相结合的自动化设计方法，可以使工程师从繁重的手动调参工作中解脱出来，去探索更广阔的设计空间，找到传统方法难以发现的创新设计方案。

第三节 新型驱动技术与执行器

随着机电一体化系统的发展，向高精度、微型化、智能化方向发展，传统的电机、液压、气压驱动方式已经不能满足尖端应用领域的要求。因此，基于智能材料的新型驱动技术就产生了。依靠其特有的物理效应、优良的性能、高度集成的潜力，给现代执行器的设计与实现开辟了新的途径，是推动精密工程、微机电系统发展的重要力量之一。

各类新型驱动技术的关键特性，见下表：

新型驱动技术特性对比表

特性维度	压电陶瓷驱动	磁致伸缩驱动	形状记忆合金驱动	静电微驱动
驱动原理	逆压电效应（电场致伸缩）	磁致伸缩效应（磁场致伸缩）	固态相变（热弹性马氏体相变）	静电力（电场吸引 / 排斥）
典型应变	~0.1-0.15%	~0.15-0.2%	~5-8%	极小（微米级位移）
驱动力	大（数万牛顿，高刚度）	巨大（比压电大，高能量密度）	适中（高功率重量比）	小（微牛顿到毫牛顿）
响应速度	微秒 - 毫秒	毫秒 - 千赫兹	秒 - 分钟（受冷却限制）	微秒 - 纳秒
主要优点	高分辨率、快速、大驱动力	大行程、大推力、可靠性高	结构简单、仿生、高功率重量比	功耗低、结构简单、易集成
主要挑战	迟滞、蠕变、行程小	迟滞、非线性、成本	响应慢（冷却）、循环寿命	输出力小、行程有限、表面效应
典型应用	纳米定位、AFM、精密光学	超精密加工、主动减振、阀门	柔性机器人、医疗器械、航空	MEMS 开关、微镜、微泵

一、压电陶瓷驱动技术

压电陶瓷是一种可以实现电能和机械能相互转换的功能性陶瓷材料。由于压

电陶瓷具有快速响应、高分辨率的特点，因此在微位移驱动方面起着举足轻重的作用。根据压电效应而开发的驱动器可以达到纳米级的定位精度，是超精密加工、扫描探针显微镜、光学仪器等重要应用领域中的关键执行元件，其发展水平直接影响到前沿科技的发展。

（一）逆压电效应与驱动原理

压电陶瓷的驱动机制是由逆压电效应产生的。当对压电材料施加外部电场时，材料由于电场的作用会产生机械形变；当电场消失之后，形变也随之恢复。实质上就是电能直接转化为机械能的过程。从微观机理上来说，压电陶瓷内部有许多自发极化的电畴。未经极化处理的电畴取向是无序的，宏观上不具有压电性。在强直流电场作用下极化处理之后，各个电畴都会沿电场方向重新排列。此后，当施加与极化方向相同的驱动电场时，晶胞内的正负电荷中心就会进一步分离，电偶极矩增大，宏观上表现为材料沿电场方向伸长。反之，若加上反向电场，材料就会收缩。

压电陶瓷驱动器就是利用其和电场强度几乎成正比的变化，来达到精准的位移输出。典型的压电驱动器是由多层压电陶瓷薄片并联堆叠而成，一般称为叠堆式压电促动器。该结构可以有效地降低驱动电压，把每一层微小位移加起来，在较低的驱动电压下获得大的宏观行程。对驱动器两端的电压信号进行精确控制，就能精确控制驱动器的位移输出，理论上位移分辨率可以达到亚纳米级别，为纳米尺度的操作和定位打下了核心技术基础。

（二）压电陶瓷驱动器的特性

相较于传统驱动方式，压电陶瓷驱动器拥有诸多优越性能，但同时也存在一些固有的非线性挑战。

1. 高分辨率、快速响应：压电陶瓷位移由晶格形变引起，运动过程中没有摩擦，没有间隙，理论上可以无限分辨率。它的实际分辨率受限于驱动电源的噪声水平和传感器的测量精度，但是很容易达到纳米甚至亚纳米级的超精密定位。它的驱动直接来自于电场效应，响应速度很快，一般为微秒级甚至毫秒级，可以满足高动态响应的要求。

2. 大驱动力和高刚度：虽然压电陶瓷输出位移一般只有其本身长度的 0.1% 左右，但是它产生的驱动力很大。增大驱动器截面积可以得到数万牛顿的输出力，足以驱动重型负载。另外，压电陶瓷材料本身刚度很大，在承受负载时形变小、

系统固有频率高，具有良好的动态性能。

3. 迟滞与蠕变，压电陶瓷驱动器最明显的非线性问题是迟滞和蠕变。迟滞现象指的是，当驱动电压相同的时候，升压与降压时所造成的位移是不一样的，由此产生一个典型的“迟滞回线”，其最大差值可达总行程的 15% 左右。蠕变就是在恒定电压下，位移并不是立刻稳定下来的，而是随着时间的推移慢慢漂移。这些非线性特性会对开环控制下定位精度产生很大影响。为了克服上述问题，一般采用闭环控制方法，即用高精度位移传感器实时测量输出位移，将测量的位移与期望值比较，通过反馈控制器实时调节驱动电压，从而有效地消除迟滞和蠕变造成的误差，实现高精度的线性定位。

（三）纳米定位驱动应用

由于压电陶瓷驱动技术具有高精度、快速响应、大驱动力等特点，在需要纳米级精密运动控制的各个领域都得到了广泛的应用。压电纳米定位台在半导体技术中被用在光刻机工件台定位、晶圆检测及缺陷审查系统等环节，从而使得集成电路制造精度很高。

在原子力显微镜、扫描隧道显微镜等扫描探针显微学中，压电陶瓷驱动器是实现探针在样品表面做高精度三维扫描的重要部件。控制驱动器在 X、Y、Z 三个方向上做微小移动，就可以得到样品表面形貌的原子级分辨率图像。在光学和光通信领域，压电驱动器被用作精密光路对准、光纤拉伸和耦合、激光腔调谐以及自适应光学系统中变形镜的波前校正等，通过快速改变反射镜面型来补偿大气湍流或者光学系统的像差，从而提高成像质量。压电驱动器在生物医学工程中也被用在细胞显微操作、基因测序设备的微流控驱动、超精密手术器械等。精密加工时，快速刀具伺服系统用压电驱动器对刀具位置进行实时微调，加工非球面等复杂光学元件或者补偿机床误差。

二、磁致伸缩驱动技术

磁致伸缩驱动技术是利用具有特殊磁性的材料，在磁场的作用下发生形变的物理现象发展起来的一种新型驱动方式。特别是超磁致伸缩材料的出现，应变能力远超传统材料，能量密度也高得多，给大行程、大推力的精密执行器设计提供新的可能，在重载、高冲击等恶劣环境下具有独特优势。

（一）超磁致伸缩材料特性

超磁致伸缩材料也称为巨磁致伸缩材料，在外加磁场的作用下会产生很大的应变。其中最具代表性的就是铽镝铁合金，在室温以及较低磁场下可以产生高达1500到2000 ppm的磁致伸缩应变，比传统的压电陶瓷应变量要高出几倍，是镍基磁致伸缩材料的几十倍。巨大的应变是磁畴在磁场的作用下转动、畴壁移动所造成的，从而使材料宏观尺寸发生明显的改变。

超磁致伸缩材料除了大应变以外，还具有其它很多优良性能。能量密度高，能有效地把电磁能转变成机械能，产生巨大的输出力，输出应力远大于压电陶瓷。响应快，材料变形是磁场直接引起的结果，响应频率可达千赫兹。其驱动电压低、驱动阻抗小，适合大功率驱动。与压电材料相比，它有更好的韧性、抗拉伸性以及更高的可靠性。因此超磁致伸缩材料成为大功率、大行程、高精度驱动器和换能器的理想材料，尤其适合大负载、精密位移控制的应用场合。

（二）磁致伸缩微位移执行器

磁致伸缩微位移执行器就是利用超磁致伸缩材料的磁致伸缩效应，把电磁能转化为直线或旋转运动的装置。其主要部件是一根超磁致伸缩棒，一般是镧镝铁合金制成。执行器的基本结构是由缠绕在超磁致伸缩棒外部的驱动线圈、产生偏置磁场的永磁体或偏置线圈、传导磁路的轭铁、输出位移的推杆和预紧机构组成。预紧装置所加的预压力可以改善材料工作状态、提高其输出性能。

工作原理是，当驱动线圈中通入控制电流的时候，就会产生一个轴向的驱动磁场。磁场和偏置磁场叠加在一起，对超磁致伸缩棒起作用。超磁致伸缩棒在合成磁场的作用下，内部磁畴取向改变，材料发生伸长或者缩短，通过推杆把位移和力准确地输出。输出位移大小和驱动电流有关，精确控制电流可以实现微米级甚至纳米级的位移控制。为了消除材料本身的磁滞、非线性，提高定位精度，高性能磁致伸缩执行器一般都带有位移传感器和闭环控制。根据实时的位移信息来调节驱动电流，就可以实现高精度动态、静态定位。

（三）精密致动应用案例

超磁致伸缩致动器由于具有大输出力、大位移、快速响应的特点，在很多高技术领域中已经成功地得到了应用。超精密加工中使用金刚石车床的微进给系统，用纳米级的刀具位置补偿来完成光学元件的超精密镜面加工。在主动振动控制系统中，磁致伸缩作动器作为作动元件，能对传感器检测到的振动信号作出迅

速的反作用力和位移,从而抵消或者抑制机械结构、精密平台和大型建筑物的有害振动。

流体控制上,以磁致伸缩材料为基材的高速开关阀门响应时间小于 1ms,被用在内燃机燃料精确喷射系统中。通过精确控制喷油时机和喷油量,使燃料燃烧效率提高、污染物排放减少。磁致伸缩作动器也被应用在直升机的旋翼后缘襟翼上,能主动改变翼型,从而抑制桨叶振动并降低噪音。除此之外,在微型机器人、精密定位平台等领域,采用磁致伸缩材料设计的“尺蠖式”或者“蠕动式”微型马达,可以完成大行程的精密步进运动,为微纳操作提供一种新的途径。从上面的应用实例中可以得出,磁致伸缩驱动技术在大负载精密驱动方面有着非常广阔的前景。

三、形状记忆合金驱动

形状记忆合金是一种特殊的智能材料,它接受一定的热刺激后就会恢复到在低温下所“记忆”的原始形状。由于固态相变引起的形状记忆效应,使它既具有传感功能又具有驱动功能,为结构简单、运动仿生、轻量化柔性驱动器的开发提供了新的思路,在机器人、医疗器械、航空航天等领域具有广阔的应用前景。

(一) 形状记忆效应机理

形状记忆合金的独到之处就是它可以发生可逆的热弹性马氏体相变。高温下形状记忆合金是处于高对称性的奥氏体相。冷却到马氏体相变开始温度以下时,奥氏体相就会转变为低对称性的马氏体相。马氏体相是由取向不同但是晶体学等效的孪晶组成的,宏观上不出现形状变化。这时如果给处于马氏体状态的合金施加外力,其内部相对“软”的孪晶界就会移动,不同取向的马氏体变体之间就会发生重排,形成单一取向的去孪晶马氏体,产生较大的宏观塑性形变。

当卸除外力后,形变就会被保留下来。此时合金加热到奥氏体相变开始温度以上时,马氏体相逆相变,重新转变为结构最稳定且唯一的奥氏体母相。由于奥氏体晶体结构具有唯一性,该相变过程会使得材料恢复到奥氏体状态时的原始形状,从而彻底消除之前低温下产生的塑性形变。这个过程就叫做单程形状记忆效应。利用该效应,经过加热、冷却循环可以使形状记忆合金元件(丝、弹簧或者薄片)产生收缩、回复的驱动动作。

（二）形状记忆合金驱动器的设计

形状记忆合金驱动器设计的关键是，怎样充分利用材料在相变过程中形状回复的能力来输出机械功。设计时一般包括驱动元件的构造、激励方法、冷却系统、偏置恢复力等要素。常见的驱动元件形态有形状记忆合金丝、弹簧、薄膜。形状记忆合金丝通过轴向收缩直接产生拉力，结构简单；弹簧形式可以在较小的驱动器尺寸下获得较大的位移输出。激励方式主要是电加热法，利用形状记忆合金自身较大的电阻率，直接通入电流产生焦耳热使其温度升高并发生相变，该方法控制方便、响应快。

由于大多数形状记忆合金只具有单程记忆效应，即只能在外力作用下被动恢复形状，不能自动回到变形状态，所以在驱动器设计中必须包含偏置机构。偏置机构的作用就是在形状记忆合金冷却之后提供回复力，使其回到低温下被拉伸的状态，为下一次驱动循环做好准备。偏置力可以由机械弹簧、重力或者以拮抗方式工作的形状记忆合金丝来提供。另外冷却速度决定形状记忆合金驱动器的工作频率。自然对流冷却方式最简单，但是响应速度最慢；提高响应速度的方法有风冷、水冷，或者通过改进结构设计（细丝、薄膜等）来增大散热表面积。

（三）机器人柔性驱动应用

形状记忆合金由于具有高功率重量比、无噪音、结构简单、能模拟生物肌肉收缩等特点，因此是开发柔性、仿生机器人理想的驱动源。仿生机器人方面将形状记忆合金丝或者弹簧当作“人工肌肉”，用电刺激使其收缩来模仿肌肉的伸展动作，使机器人的关节运动或者身体变形。已经成功研制出仿尺蠖爬行机器人、仿鱼游动机器人、仿鸟翼扑动飞行器等多种仿生机器人。机器人结构轻便、运动平稳、噪音小，可以适应复杂、非结构化的环境。

形状记忆合金被用在医疗康复领域设计轻量化柔性外骨骼、康复手套等。这些设备用形状记忆合金驱动器代替笨重的电机，可以给患者提供轻柔、自然的辅助运动，辅助患者做关节康复训练。由于其生物相容性，在微创手术器械上也表现出很大的应用潜力，可转向导管、内窥镜等，利用导管壁内形状记忆合金丝的特异性驱动，可以准确控制导管尖端的弯曲方向，在复杂的体内环境中进行灵活导航。充分发挥了形状记忆合金驱动器的柔韧性、轻便性、仿生性。

四、静电与微执行器

静电驱动是微机电系统中应用最广、最成熟的一种微驱动技术。它依靠电场产生的静电力来推动微米级的机械结构运动，具有结构简单、功耗小、响应快、容易与集成电路工艺兼容等优点。从微观角度来说，静电力比重力、惯性力等体积力要大得多，因此成为推动微小元件的手段。

（一）静电梳状驱动原理

静电梳状驱动器是经典的大面积位移静电驱动器。主要由两套互相交叉但并不接触的梳齿电极阵列构成，一套是固定梳，固定在衬底上面；另一套是活动梳，和可移动机械结构（如悬臂梁或者弹簧支撑的质量块）相连。固定梳和活动梳在电气上是绝缘的。

其驱动原理如下：

1. 当固定梳和活动梳之间施加电压时，由于电势差，两组梳齿侧壁之间就会产生强电场，产生静电吸引力。吸引力使活动梳向固定梳方向移动，增大梳齿之间的重叠面积，增大整个系统电容量。

2. 驱动力的大小和驱动电压的平方成正比，也和电容随位移的变化率成正比。在理想平行板模型下，只要梳齿的重叠长度在一定的范围内变化，那么驱动力的大小就会基本不变，不会随位移的变化而变化，从而可以获得较大的线性驱动。

3. 活动梳位移的大小由静电力和支撑结构的机械恢复力（弹簧力）平衡决定。改变驱动电压可以精确控制静电力的强度，从而控制活动梳的最终平衡位置，得到连续可调的位移输出。

（二）MEMS 微执行器制造

MEMS 微执行器的制造离不开半导体集成电路的微细加工技术，主要分为表面微加工和体硅微加工两大类工艺。这些工艺可以批量制造出带有复杂三维微结构和可运动的微型器件。

表面微加工技术是在衬底表面利用薄膜沉积、光刻、刻蚀等工序，逐层叠加来形成微结构。其关键在于牺牲层技术，工艺流程一般是先在衬底上沉积并图形化一层牺牲层材料（二氧化硅），然后再在牺牲层上沉积结构层材料（多晶硅）。用特定的化学腐蚀液将牺牲层完全溶解去除，使原来支撑在牺牲层上的结构层被释放出来，形成可以自由运动的悬臂梁、薄膜或梳齿等结构。该工艺与标

准 CMOS 工艺相容性好，利于机电集成。

体硅微加工是直接对硅衬底进行三维雕刻，形成微结构。它主要使用各向异性湿法腐蚀或者深度反应离子刻蚀技术。各向异性腐蚀是利用腐蚀液对硅的不同晶向有差异的腐蚀速率，从而形成 V 型槽、金字塔坑等结构。深度反应离子刻蚀，特别是博世工艺，通过刻蚀和钝化循环交替进行，可以在硅片上刻出深宽比极高、侧壁几乎垂直的深槽或者柱体，是制造高深宽比梳状驱动器和惯性传感器等复杂微结构的重要技术。

（三）微机电系统的驱动挑战

虽然静电驱动在微机电系统中被广泛应用，但是随着微机电系统向着更高的性能、更多的功能、更复杂的环境发展，微驱动技术还存在很多问题。静电驱动的输出力小，不适用于驱动大负载或者克服大粘滞力的场合。特别是在接触式应用或者液体环境中，静电驱动力很难有效驱动微结构。

其次就是驱动行程和驱动电压之间的矛盾。平行板式静电驱动器可以产生较大的力，但是稳定工作行程非常短，很容易出现吸合现象。而梳状驱动器的行程虽大，但输出力密度低。在高驱动电压下，还会出现电击穿的问题。第三，表面效应（粘附、摩擦、磨损等）成了微执行器长时间可靠工作时的主要问题。当微结构表面发生接触的时候，范德华力、静电力、毛细力等表面力会使微结构表面产生永久性粘连失效。微执行器、微传感器、控制电路的高密度三维集成，高温、高压、强腐蚀等恶劣环境下微驱动技术都是目前的研究方向。

第五章 计算机控制与接口技术

计算机控制技术是机电一体化系统的核心，给机械系统赋予了智能和灵魂。本章主要对微处理器、嵌入式系统的基本知识、硬件架构设计、人机交互界面技术、实时操作系统等内容进行阐述，目的是为机电一体化控制系统高效、可靠运行提供理论和实践上的指导。

第一节 微处理器与嵌入式系统基础

微处理器是嵌入式系统的“大脑”，负责数据处理和指令控制，微处理器性能的好坏直接决定了整个系统能力的上限。充分认识各类微处理器的选用依据、嵌入式系统软硬件组成、实时操作系统原理，是进行机电一体化系统开发的前提。

一、常用控制微处理器选型

在机电一体化系统设计之初，选择一颗合适的微处理器就显得十分重要，它对系统成本、功耗、性能、开发周期都会产生深远的影响。开发者要按照项目的具体需求，审慎地权衡单片机、数字信号处理器、高性能 ARM 处理器三者之间的利弊。常用控制微处理器选型对比见下表：

常用控制微处理器选型对比表

类型	核心特点	优势	典型应用
单片机	高度集成 CPU、存储、I/O	成本低、功耗低、高可靠性	家电、简单工业控制、物联网节点
数字信号处理器	专门的硬件乘法器和累加器	高速信号处理、实时运算	通信基站、音频处理、电机控制
ARM 处理器（高端）	高性能、低功耗、可扩展	复杂操作系统支持、丰富生态	智能手机、工业机器人、车载娱乐

（一）单片机特点与应用

单片机也叫做微控制器，它把中央处理器、存储器（RAM 和 ROM）、各种输入输出端口、中断系统、定时器等集成在一个硅片上。该种高度集成的结构使

它具有体积小、功耗低、可靠性高、性价比好等优点。单片机把主要的功能部件集成到一块芯片上，减少了芯片之间的外部连接，增强了系统的抗干扰能力，很适合用在电磁环境比较复杂的工业现场。

单片机最突出的优点就是控制能力强，应用方便。工程师可以利用软件编程的方式灵活地设计它的功能，从而完成各种不同的控制任务。应用范围非常广，几乎覆盖所有的自动化控制场合。工业自动化领域里它被用作可编程逻辑控制器、机器人运动控制、生产线过程监控。单片机在汽车电子上被用作发动机控制、车身稳定系统和车载娱乐系统。智能洗衣机的水量控制、空调的温度控制等家电产品也离不开单片机。消费电子、医疗设备、智能仪表等领域中单片机起着举足轻重的作用。

（二）数字信号处理器优势

数字信号处理器是一种专门用来高速、实时地处理数字信号的微处理器。相比于通用微处理器而言，它的最大优势就是具有独特的硬件结构，而这种结构能够大大提高数字信号处理算法的执行速度。数字信号处理器一般采用哈佛结构，有独立的程序总线 and 数据总线，可以同时取指令和取数据。它有专门的硬件乘法器、累加器，使单个时钟周期就可以完成乘加运算，这对于滤波、变换等计算密集型任务来说十分重要。

结构上具备优势的数字信号处理器，在需要大量的数学运算时表现优异。主要用在通信、音频视频处理、自动控制、仪器仪表等各个方面。现代通信系统中的 5G 基站、光纤通信设备等，数字信号处理器用来完成信号的调制解调、编码解码、复杂的信道均衡算法等任务，保证数据传输的有效可靠。在音频处理领域，主动降噪耳机、高保真音响系统、语音识别设备都是利用它强大的计算能力来实现实时滤波、回声消除和特征提取。数字信号处理器在电机控制、机器人等领域，可以快速完成复杂的控制算法，对电机的转矩、速度、位置进行精确控制。

数字信号处理器有很强的实时处理能力，运算速度也非常快，尤其在处理连续的数据流时，它的优势更加明显。在 CT 机等医疗成像设备中，它被用来做高速的图像数据重建，在工业振动分析中，利用快速傅里叶变换分析设备的故障特征。随着技术的发展，数字信号处理器的外设接口越来越多，支持的算法越来越复杂，应用领域也越来越广，因此它成了机电一体化系统中处理复杂信号的重要器件。

（三）ARM 处理器与嵌入式 Linux

ARM 处理器由于有低功耗、高性能和可扩展性好的特点，所以在嵌入式领域具有绝对优势。ARM 公司本身并不生产芯片，它采用知识产权授权的形式，使合作伙伴可以按照不同的应用场景对 ARM 的芯片进行定制化的设计。ARM 处理器系列种类繁多，低功耗物联网节点有 Cortex-M 系列，实时控制有 Cortex-R 系列，支持复杂操作系统的有 Cortex-A 系列，给机电一体化系统设计提供了多样化的选择。

强大的 ARM 处理器和开源、稳定且功能完备的 Linux 系统相结合，就形成了嵌入式 Linux 系统，被广泛地应用在高端机电一体化设备中。嵌入式 Linux 系统给复杂的开发工作打下了坚实的基础。

1. 功能强，网络性好。Linux 内核具有成熟的内存管理、多进程多线程机制、完备的文件系统、强大的网络协议栈，可以很容易地实现复杂的多网络通信、数据存储、多任务并发。这对于需要远程监控、数据交互、复杂逻辑控制的机电一体化系统来说是十分重要的。

2. 丰富的软件生态系统和可移植性。由于开源社区的庞大，开发人员可以从大量的应用软件、驱动程序、开发工具中获益，从而大大加快了开发速度。由于 Linux 有很好的移植性，基于 Linux 开发的应用软件在不同的 ARM 硬件平台上很容易迁移，可以有效地保护开发投资。

3. 由于资源有限，对网络进行了深度剪枝。按照嵌入式设备的资源约束，对 Linux 内核做深度裁剪，去除掉一些无关的组件和服务来减小系统体积、降低功耗、加快系统启动速度，以适应具体的硬件环境和应用需求。该种组合特别适合工业机器人、高端医疗设备、智能网联汽车等需要图形界面、高级算法处理、复杂网络功能的现代机电一体化系统。

二、嵌入式系统硬件架构

嵌入式系统硬件架构是整个系统物理上的基础，它的好坏直接影响系统能否正常工作。完整的硬件系统是以微处理器为核心，加上最小系统电路、存储系统、人机交互接口等模块，共同构成一个具有某种功能的控制单元。

（一）最小系统电路设计

嵌入式系统最小系统，即保证微处理器能够正常启动和运行的最基本电路集

合。它为所有的复杂嵌入式硬件打下了基础。一般最小系统由电源电路、时钟电路、复位电路三部分组成。这三部分互相配合，给微处理器正常工作提供基本保证。

电源电路是系统的“心脏”，把外部输入的电源（电池或者适配器）转换成系统各个部分所需要的稳定电压。设计时根据微处理器及外设对电压、电流、纹波的要求选择合适的稳压芯片，即线性稳压器或者开关式稳压器，配合滤波电容，给芯片提供纯净可靠的电源。时钟电路就像系统的节拍器，给微处理器提供同步工作的时钟信号，频率、稳定性都会影响处理器指令执行速度和系统的时序精度。一般利用外部的晶体振荡器和芯片内部振荡电路相结合，来产生高精度的时钟信号。复位电路的作用是在系统上电或者运行异常的时候，把微处理器以及其他外设初始化到预设的起始状态，保证程序可以从一个确定的点开始执行。

（二）存储器扩展与管理

在机电一体化系统内微处理器集成的存储器容量一般比较小，不能满足复杂的应用程序或者大量的数据存储要求，所以必须对外部存储器进行扩展。存储器分为两种类型，即随机存取存储器 RAM 和只读存储器 ROM。RAM 是程序运行时存放变量、数据的临时存储单元，掉电后 RAM 中的内容就会丢失；ROM 用来永久保存程序代码、常量数据和配置文件，掉电后 ROM 中的内容不会改变。

设计存储器扩展电路时，设计者要按照系统需求来挑选恰当的存储芯片，并且还要规划出相应的接口电路。动态随机存取存储器因为具有高密度、高速度的特点，常被用作运行操作系统或者处理大量数据系统的主内存。程序和数据的存储目前最常用的方式就是闪存。闪存分成了多种类型，读写特性、成本不同。NOR Flash 支持代码的片上执行，读速度快，适合存储启动代码和小型应用程序；NAND Flash 容量大、成本低，写速度快，更适合做大容量数据存储介质，但是需要复杂的控制器和坏块管理机制。

存储管理属于保证数据可靠性和系统性能的重要部分。它不只是硬件层面地址总线、数据总线、控制总线的正确连接，更是软件层面有效管理策略的体现。对 NAND Flash 而言，需要设计坏块管理算法来跳过物理损坏的存储单元，并用磨损均衡算法延长闪存的使用寿命。带有内存管理单元的处理器上可以采用地址映射、分页的方式来实现虚拟内存的管理，从而使系统能够运行比物理内存容量更大的程序，给多任务环境提供内存的保护，有效防止进程之间的相互干扰。

三、人机交互界面设计

人机交互界面是机电一体化系统同用户进行信息交流的窗口，一个直观友好的界面可以极大地提高系统的可用性以及用户体验。从简单的按键、数码管显示到复杂的图形触摸界面，硬件接口技术和上层软件开发这两方面都有涉及。

（一）键盘与显示接口

键盘、显示器属于机电一体化系统最基本的人机交互设备。键盘属于输入设备，用户使用键盘输入指令或数据；显示器为输出设备，将系统的状态和信息反馈给用户。接口电路设计质量的好坏影响信息交互的可靠性与效率。键盘接口的设计分为独立式按键、矩阵式键盘两种。独立式按键每个按键占用一个微处理器的输入输出引脚，电路简单、编程直接，但是占用引脚资源较多。当按键数量较多时，一般采用矩阵式键盘方案，利用行扫描和列检测的方式，用较少的引脚实现大量的按键识别，达到节约硬件资源的目的。

显示接口的设计会根据显示器件的种类而异。段式液晶或者数码管等简单的显示设备，一般用静态显示或者动态扫描的方式进行驱动。静态显示驱动简单，但是占用引脚多；动态扫描利用人眼的视觉暂留效应，分时轮流点亮各个显示单元，可大大减少引脚占用。点阵式液晶显示器无论是字符型还是图形型，一般都带有专门的驱动控制器。微处理器通过并行口或者串口，按照一定的时序和指令集向控制器发送命令和数据，就可以实现复杂的文字、图形显示。在设计接口的时候要考虑到电平匹配、驱动能力以及时序要求，保证数据正确无误地传输和显示。

（二）触摸屏组态软件

随着技术的发展，触摸屏因为直观、便捷的操作方式在工业控制以及高端机电产品中得到广泛的应用。与传统按键、显示器结合的方式相比，触摸屏把输入、输出功能合二为一，大大简化了设备面板的设计。触摸屏组态软件的出现，又将人机界面开发效率提高到了一个新的高度。组态软件属于通用的图形化开发工具，使开发者在不需要或者只需要少量编写代码的情况下，用拖拽和配置的方式创建出专业的用户交互界面。

使用组态软件开发时，工程师可以在电脑上事先设置各种界面元素，按钮、指示灯、数值输入框、趋势图、报警列表等，并对这些元素的外观、位置、关联

设备变量等进行设置。开发完成之后就可以将组态工程下载到触摸屏硬件上运行。开发模式的主要优势就是把界面设计和底层控制逻辑有效地分离。界面开发者不需要考虑微处理器具体的编程细节,控制程序的开发者也不需要分心于图形绘制。两者依靠事先确定好的通信协议、变量地址表来完成数据交换,从而达成并行开发的目的,大大缩减了项目周期,同时降低了开发人员的技能要求。

(三) 图形用户界面开发

高度定制化、交互逻辑复杂的机电一体化系统,不能完全用组态软件来满足。这时直接在嵌入式系统上开发图形用户界面就成为必然的选择。嵌入式图形用户界面开发是在资源有限的硬件平台上,利用编程的方式实现图形绘制、窗口管理、控件交互等功能,核心就是选择合适的嵌入式图形库。

市面上有多种成熟的嵌入式图形库可供选择,它们在功能、资源占用和授权方式上各有侧重。

1. 轻量级开源库, LVGL, 是一个面向资源受限的微控制器的免费开源图形库。LVGL 有丰富的控件(按钮、图表、滑块等)和精美的视觉效果(动画、抗锯齿等),内存占用很少,可以在低成本的单片机上流畅运行,适合于物联网设备和智能穿戴产品。

2. 高性能商业库, 以 emWin 为代表, 是由 SEGGER 公司开发的商业图形库, 具有高性能、高稳定性和专业的技术支持。emWin 针对各种处理器架构做了深入的优化, 可以实现流畅的动画效果, 并提供窗口管理器、字体转换工具等一系列完整的配套工具, 被广泛地用在医疗设备、工业控制面板等图形性能和可靠性要求较高的场合。

进行嵌入式图形用户界面开发的时候, 需要开发者将所选图形库移植到目标硬件平台, 写驱动程序和底层显示、触摸控制器对接。接着调用图形库的 API 函数来创建和管理界面元素, 编写事件处理逻辑来响应用户触摸、按键等操作, 最终得到一个功能完整、交互流畅的定制化的用户界面。

四、实时操作系统基础

复杂的机电一体化系统常常要同时处理多任务, 并且对响应时间有严格的要求。实时操作系统就是为此而设计的。它是一个多任务系统, 保证任务在规定时间内得到响应的软件平台, 是建立可靠高效的嵌入式系统的重要支撑。

（一）任务调度与抢占机制

实时操作系统的核心就是任务调度器，它的最基本的任务就是决定 CPU 在任何时刻应该执行哪一个任务。调度器用某种调度算法来管理所有的就绪任务，并且负责 CPU 资源的分配。实时系统中用得最多，最重要的调度算法就是基于任务优先级的抢占式调度。系统中每一个任务都有一个唯一的优先级。调度器在做调度决策的时候，会遍历所有的就绪任务，然后从中挑选优先级最高的任务来执行。

抢占机制是保证系统实时性的一种方法。当一个低优先级的任务正在运行的时候，如果一个高优先级的任务由于外部中断、定时器超时等原因被唤醒并进入就绪状态，抢占式调度器就会立即中断当前正在运行的低优先级任务，保存它的运行上下文，然后把 CPU 的使用权交给这个高优先级的任务。只有高优先级任务全部完成或者进入阻塞状态之后，被中断的低优先级任务才能重新获得 CPU 来继续运行。该机制保证重要的紧急任务得到最及时的处理，满足系统对响应时间提出的严格要求，是硬实时系统设计的基础。

（二）进程间通信与同步

在实时操作系统所支持的多任务运行环境之下，尽管各个任务在逻辑上是相互独立的，但是它们在实际运用过程中又常常需要彼此之间相互配合，共同完成一项繁杂的系统任务。这就产生出了任务之间通信、同步的问题。实时操作系统已经提供了一套成熟的机制，可以安全、高效地解决这些问题，有效地防止了全局变量造成的竞争、不一致的风险。

消息队列是任务之间进行数据交换的主要方式。它是一种先进先出的数据结构，一个任务可以将消息（可以是一个简单的数据或者复杂结构体）发送到队列尾部，而另一个任务可以从队列头部取出消息。异步通信方式可以很好地解耦任务之间的依赖关系。信号量属于一种更为轻量级的通信及同步手段，常常被用作控制对共享资源的访问，或者实现任务之间的同步。二值信号量可以看作一种锁，用以保护打印机、通信端口等临界资源，保证同一时刻只有一个任务可以访问这些资源。计数信号量被用来管理缓冲池里可用缓冲区的数量等资源。

多任务等待一个或者多个事件发生时，用事件标志组比较方便。任务可以等待一个或者多个事件标志位的某种组合（“与”或“或”），其它任务或者中断服务程序可以在事件发生的时候设置相应的标志位。内核提供的通信和同步机制

都是原子性的，并且具有阻塞等待的能力，即当任务试图获取一个还没有被占用的资源时，它会被操作系统自动挂起，直到资源可用时才会被唤醒，从而大大提高了 CPU 的利用率。

（三）嵌入式软件架构设计

为了管理日益复杂的机电一体化系统软件，提高代码的可维护性、可移植性和可复用性，分层化软件架构设计就显得十分重要。典型的嵌入式软件架构一般把整个系统垂直划分为几个层次，每一个层次只和相邻的层次通过预先定义好的接口进行交互，达到高内聚、低耦合的目的。

常见的嵌入式软件分层架构包括硬件抽象层、驱动层、中间件层和应用层。

1. 硬件抽象层是最底层，直接和微处理器的寄存器以及片上外设进行交互。它把具体的硬件操作封装成统一的函数接口，向上层隐藏硬件实现的细节。例如芯片制造商所提供给我们标准外设库，就属于这一层。

2. 驱动层处于硬件抽象层之上，它来驱动外部设备，比如传感器，存储芯片，显示屏等等。它整合了电路板上具体的连接信息，给上层提供面向具体功能单元的操作接口，即读取温度、点亮 LED 等功能。

3. 中间件层给上层应用软件提供通用的软件服务组件，如实时操作系统内核、文件系统、网络协议栈、图形库等。这些组件一般可以跨项目复用，给应用层提供更高级的功能。

4. 应用层：软件架构最上面的一层，主要实现系统的业务逻辑。它利用下层提供的接口来组织、协调各个功能模块，以满足最终的用户需求。

分层设计可以使得不同的层次的开发能够同时进行，当底层硬件平台发生改变的时候，只需要改动硬件抽象层以及驱动层，而上层业务逻辑代码不需要修改，从而大大提高了软件的可适应性及其生命周期。

第二节 控制算法与软件设计

机电一体化系统最核心的优势就在于它出色的精确控制能力，而这种精确控制能力是由精密的控制算法和严谨的软件设计来保证的。本节主要研究机电系统中从经典控制理论到现代控制策略的具体应用，对配套控制软件的设计思想和技术要点进行详细的分析，最后给出应对复杂运动需求的特殊算法。本课题的主要

目的就是为高性能、高可靠性机电系统提供一套完整的理论指导和实践方案。

一、经典控制算法实现

经典控制理论由于结构简单、容易实现和调试，在机电一体化系统的设计中仍然占有很重要的地位。这些算法为控制系统打下了基础，也给解决大量的工程实际问题提供了一种行之有效的方法。对经典控制算法的数字化实现有深刻的理解并且能熟练地掌握，是设计出更复杂的控制系统的前提。

（一）数字 PID 控制器设计

数字 PID 控制器是机电一体化系统里使用最广泛的反馈控制器。其设计的关键在于将连续时间域的 PID 控制规律，用离散化的方法，转换成可以在数字计算机上执行的算法。常用的离散化方法有向后差分、双线性变换等，可以将微分方程转换成差分方程。因此数字 PID 算法主要发展出两种形式，位置式 PID 和增量式 PID。

位置式 PID 的输出就是执行机构所要求的目标位置，其计算结果是所有过去误差的总和。该算法的优点就是原理简单，容易理解。但是缺点是计算过程中存在历史误差的累积，每次输出都和过去所有状态有关，计算量较大，容易因为长时间的误差累积造成积分饱和。当执行机构达到极限位置之后，积分项仍然会继续增加，误差反向之后，系统要很长时间才能从饱和区退出，从而影响动态响应。控制器程序或者硬件出现故障，可能会造成输出大幅度变化的控制量，对执行机构造成冲击。

增量式 PID 算法的输出是控制量的增量或者变化量。计算只和最近的几个误差采样值有关，没有对历史误差做累加，因此计算量小，不容易产生严重的积分饱和问题。当计算机出现故障时，由于输出的是增量而不是绝对值，对执行机构的影响较小，系统的安全性较高。增量式 PID 的实现逻辑在 C 语言等编程语言中更为简单，只需要记录最近几次的误差值就可以进行迭代计算，因此被广泛应用于需要频繁调节的电机速度控制、位置控制等场合。

（二）PID 参数自整定方法

PID 控制器性能的好坏很大程度上取决于它的三个参数（ K_p 、 K_i 、 K_d ）的整定效果。传统的手工整定方式耗时耗力，很大程度上依靠经验。为了提高效率、控制效果，PID 参数自整定技术应运而生。常用的自整定方法有基于模型的分析

法和基于过程响应的实验法,其中齐格勒-尼科尔斯法和继电自整定法是工程上应用最广的两种实验方法。

齐格勒-尼科尔斯法,又称临界比例度法,其操作步骤清晰明确:

1. 关闭控制器的积分和微分作用,使其工作在纯比例模式下。
2. 逐渐增大比例增益 K_p ,从比较小的数值开始,直到系统对阶跃输入的响应出现等幅振荡为止。这时的比例增益称为临界增益 K_u ,振荡周期称为临界周期 T_u 。
3. 根据获得的 K_u 、 T_u ,用齐格勒-尼科尔斯给出的经验公式来计算 PID 控制器的初始参数。

此法简便易行,可作为参数整定的一个较好的起始点,但其整定结果往往具有较大的超调量和振荡,在此基础上一般需要人工进行微调。

继电自整定法是一种更加自动化的整定方法。基本思想是在系统中加入一个继电环节,在设定的值附近人为地使系统产生极限环振荡。通过测量稳定振荡的幅值和周期就可以分析出被控对象的动态特性,即临界增益和临界周期。得到这些关键参数之后,同样可以利用齐格勒-尼科尔斯或者其它经验公式来计算出 PID 参数。继电自整定过程自动化程度高,所需的先验知识少,实现简单,许多商用调节器和 PLC 都集成了该功能,极大地简化了现场调试工作。

(三) 超前-滞后校正算法

当 PID 控制不能满足系统动态性能(快速性、超调量)和稳态性能(稳态误差)的要求时,可以加入一些更灵活的校正环节,其中超前-滞后校正就是常用的频率域校正方法。超前校正给系统提供正相角裕度,主要用来改善系统的动态性能,提高响应速度,减小超调;滞后校正可以在不改变截止频率的前提下提高系统低频段的增益,主要用于改善系统的稳态性能,减小稳态误差。

把这两种校正思想结合起来就形成了超前滞后校正。数字系统中实现时,首先要根据期望的相角裕度、增益裕度、稳态误差系数等性能指标来设计连续域的校正环节传递函数。然后用双线性变换等离散化方法,把传递函数转换成数字控制器的差分方程形式。该差分方程表明,现在的控制输出是由现在的误差输入和过去控制输出共同决定的。

从程序实现的角度来讲,该算法的结构和二阶数字滤波器相似。每一个采样周期内控制器读取误差信号,用差分方程算出当次的控制量输出。超前滞后校正

的设计过程比 PID 更系统化, 可以针对系统的频率特性进行有目的的整形, 从而得到更好的性能指标。在伺服系统、机器人关节控制等对动态响应和稳态精度有严格要求的地方, 它具有很好的性能。

二、现代控制策略应用

由于机电一体化系统的复杂性以及性能要求不断提高, 仅仅依靠经典控制理论已经不能满足要求了。现代控制策略是以状态空间模型为基础的, 可以很好地处理多输入多输出、非线性、时变系统, 为提高控制性能开辟了一条新途径, 在航空航天、机器人、精密制造等领域得到了广泛的应用。

(一) 状态空间法与极点配置

状态空间法为现代控制理论打下了基础。用一阶微分方程或者差分方程来表示系统内部状态的状态方程、输出方程, 可以完整的体现系统所有的动态性质, 而不仅仅是输入输出之间的关系。对线性定常系统来说, 可以建立其状态空间模型来分析它的能控性、能观性。如果系统是完全能控的, 则可以通过状态反馈任意配置闭环系统的极点。

极点配置属于一种强有力的控制器设计方法。闭环系统极点的位置决定系统的动态性能即系统的稳定性、响应速度、阻尼。通过设计状态反馈矩阵 K , 使闭环系统特征方程 (即 $\det(sI - (A - BK)) = 0$) 的根处于期望的复平面上, 从而达到对系统动态性能精确控制的目的。将极点配置到虚轴左侧更远的地方可以加快系统的响应速度; 调节极点对的阻尼比可以控制系统的超调量。

并不是所有的状态变量都可以直接测量。这时就需要设计状态观测器 (例如龙伯格观测器) 来估计那些不能直接测量的状态。观测器本身也是一个动态系统, 用系统的输入、输出信息来重建系统内部的状态。将状态反馈和状态观测器结合起来, 就得到了基于观测器的状态反馈控制器。这就极大地扩大了极点配置技术在实际系统中的应用范围。

(二) 模型参考自适应控制

模型参考自适应控制是一种有效的自适应控制方法, 特别适合于参数未知或者随时间变化的系统。核心思想就是设定一个理想的动态性能参考模型, 再设计一个自适应律在线调整控制器的参数, 使被控对象的输出跟踪参考模型的输出。整个系统一般由参考模型、可调控制器、自适应调节机构三部分组成。

MRAC 的工作原理就是将受控对象的输出与参考模型的输出进行比较,从而得到跟踪误差。自适应调节机构根据误差,按照预先设定的自适应规律(MIT 规则或者基于李雅普诺夫稳定性理论推导的规律)实时调节反馈控制器和前馈控制器的参数。调整的目标就是使跟踪误差趋向于零,从而使受控对象的行为接近理想的参考模型。由于李雅普诺夫方法可以严格保证闭环系统的全局稳定性,因此得到更广泛的应用。

机电一体化系统,如高速精密定位平台或者飞行器姿态控制系统,在负载变化、环境温度改变或者部件老化的时候,动态模型会随之发生改变。采用 MRAC 之后,系统就可以自动补偿这些不确定性,使系统接近理想的动态响应,具有很强的鲁棒性以及环境适应性。虽然其理论及实现比固定参数控制器要复杂得多,但是由于它具有的优良性能,所以它成为对付复杂、不确定环境的有效手段。

(三) 模糊控制算法实现

模糊控制就是用模糊集理论、模糊语言变量、模糊逻辑推理来实现的智能控制方法。它尤其擅长处理不能建立精确数学模型的复杂或者非线性系统。模糊控制的关键就是把人类专家的控制经验、知识转化为计算机可以处理的模糊规则,从而模拟人的决策过程。典型的模糊控制器由模糊化、知识库(包括规则库和数据库)、模糊推理机和解模糊四大部分组成。

1. 模糊化,即把传感器精确、清晰的输入量(误差 e 、误差变化率 ec)转变为模糊的语言变量。85 度的温度可以被转换成“温度高”这样一个模糊的概念,同时给它赋予一个隶属度值,即这个值在“高”这个模糊集合中的程度。

2. 模糊推理是模糊控制的主要部分。它用 IF-THEN 形式的模糊规则进行逻辑推理。规则保存在规则库中,比如:当误差大于零而且误差变化率等于零时控制量取负大。推理机按照输入变量的隶属度激活相应的规则,从而得出模糊输出。

3. 解模糊,模糊推理的结果是模糊量,必须将它转化为精确、清晰的数值才能驱动执行器。常用的解模糊方法有最大隶属度法、重心法、加权平均法等。重心法因为输出平滑被广泛应用。

模糊控制器的设计不需要被控对象的精确数学模型,有很好的鲁棒性,而且容易实现。在很多机电系统中,它常常和 PID 控制结合在一起,形成模糊 PID 控制器。即利用模糊控制器根据系统的实时状态(e 和 ec)在线调整 PID 的三个参数,使 PID 控制的精确性与模糊控制的灵活性、智能性有机地结合在一起。

三、控制软件程序设计

控制软件是机电一体化系统的大脑，完成控制算法的执行、传感器信息的处理和执行器的驱动。优秀的软件设计不能只保证控制算法的正确实现，还要从实时性、可靠性、可维护性三个方面来考虑。良好的程序架构是这一切的前提，它决定系统整体性能的好坏以及将来扩展的可能性。

（四）模块化程序设计思想

模块化程序设计是现代软件工程中的一个基本思想，它的基本原则就是把一个复杂的程序划分成几个功能独立、接口清晰的小模块。在机电一体化控制软件设计时，必须坚持模块化思想，即高内聚、低耦合的设计原则，模块内部功能高度相关（高内聚），模块之间依赖关系尽可能弱（低耦合）。

按照模块化的思想，整个控制软件系统可以被划分为驱动层、服务层、应用层等。驱动层模块直接和硬件进行交互，传感器数据读取、电机驱动器通信等属于驱动层模块，服务层提供通用功能，PID 运算、运动规划、通信协议栈等属于服务层模块，应用层调用下层服务，执行具体的工艺逻辑。每一个模块都有自己的职责，有良好的接口函数。这样的划分使代码结构更加清晰，便于理解，有利于分工协作开发。当某一个硬件或者算法需要更换的时候，只需要对相应的模块进行修改或者替换，不会对整个系统造成大的影响，从而大大提高了软件的可维护性和可复用性。

（二）中断服务程序编写

中断在嵌入式系统中起到处理并发事件的作用，可以响应突发的状况。机电控制系统的常用中断有定时器溢出（保证控制周期固定）、传感器信号采集、通信数据接收等异步事件。编写高效可靠的中断服务程序对于保证系统实时性来说十分重要。中断服务程序要尽可能短小精悍。

中断服务程序设计需要注意的是，中断处理程序应该尽快完成主要工作，不能执行耗时的复杂数学运算、浮点数运算、循环等待、像 `printf` 这样的“重型”输入输出操作。因为在中断处理过程中系统正常的任务调度一般会被暂停，所以中断处理时间过长就会严重影响系统的实时性。理想的做法是在中断服务程序中只完成最重要的工作，即读取数据、设置标志位或者发送信号量，然后把复杂的数据处理任务交给优先级较低的常规任务去完成。中断服务程序不能有返回值和

入口参数，要小心处理共享资源，防止产生数据竞争或死锁。

中断的响应过程就是指从产生中断信号开始到 CPU 开始执行中断服务程序第一条指令的时间，称为中断延迟。这段时间是硬件延时和软件延时（如保护现场、查询中断源）之和。硬实时系统中，必须对最坏情况下中断延迟做出准确的评估，保证系统在规定时间内对所有的外部事件做出反应。中断嵌套、优先级管理属于复杂系统当中必须要精心设计的部分，用以保证高优先级的紧急事件可以及时被处理。

（三）控制周期与实时性保障

实时性是评价机电控制系统性能好坏的重要指标，即系统能在规定的时间内完成所规定的功能，对外部事件作出反应的能力。控制周期就是决定控制系统实时性和控制性能的关键参数，是控制算法的执行频率。选择控制周期的时候，需要考虑控制效果和计算负担。

按照香农采样定理，采样频率应该不小于被控信号最高频率的两倍。但是为了获得更好的控制性能以及足够的相位裕度，控制频率一般会达到系统闭环带宽的 5 到 10 倍甚至更高。过长的控制周期会使系统对扰动的反应变慢，控制精度下降，严重时还会使系统出现不稳定的情况。相反，过短的控制周期虽然可以提高响应速度，但是会大大增加处理器的计算负担，如果算法在一个周期内不能完成，则会破坏系统的实时性。

保障实时性的方法很多，可以使用实时操作系统，它具有基于优先级的抢占式任务调度、精确的时钟管理、高效的内部分组通信机制（信号量、消息队列），可以保证高优先级的控制任务优先执行。任务的划分和优先级的分配也十分重要，硬实时任务（伺服控制）要被赋予最高优先级。第三，实时任务中不要使用非确定性操作，即动态内存分配或者没有超时限制的等待。利用硬件协处理器和高性能处理器，减少执行时间，也是从硬件上保证系统实时性的重要方法。

四、复杂运动控制算法

对多轴联动的机器人、数控机床等高端机电装备而言，单轴精确控制是远远不够的。为了得到平滑的高速、高精度的复合运动，就需要用复杂的运动控制算法来规划、协调多条运动轴的轨迹。这些算法是实现复杂加工路径、精密操作的基础，也是决定装备性能好坏的核心因素。

（一）插补算法原理与实现

插补属于运动控制的一项关键技术，它实质上是对已知轨迹轮廓的起点和终点之间，数据点进行密化的过程，即求出一系列中间点的坐标，从而使工具或执行器按预定的路径运动。插补算法在每个控制周期内，按照指令脉冲分别驱动各个坐标轴电机微小移动一步，合成出所要求的轨迹。常用的插补算法有直线插补、圆弧插补。

1. 直线插补：是插补中最基础的一种，使刀具或末端执行器在两个坐标点之间沿直线运动。实现方法有逐点比较法、数字积分法等。逐点比较法在每个插补周期内比较当前位置和理想直线的偏差，从而决定下一步往哪个坐标轴方向移动一步。该算法简单，不需要乘法运算，适合在低成本微控制器中实现。

2. 圆弧插补：用来产生圆弧路径。其算法比直线插补复杂，也可以用逐点比较法或者数字积分法实现。每个步进周期要判断当前点在圆弧轮廓里面还是外面，从而决定下一步的方向，使实际轨迹尽可能接近理想圆弧。计算时要考虑到象限判断、顺逆时针方向等。

直线插补、圆弧插补本质上都是一个迭代计算的过程。在每个控制周期中，插补器计算出各个轴要移动的位移增量，并将这个增量发送给伺服驱动系统。插补运算的精度、速度影响最终的加工精度、效率。现代运动控制器一般还会含有螺旋线插补、抛物线插补等高级插补功能，用来满足不同的运动需要。

（二）S 曲线速度规划

对于需要高速启停、频繁变速的运动控制应用来说，简单的梯形加减速（即加速度为常数）会在加速度变化的瞬间产生理论上无限大的加加速度，从而造成机械系统出现冲击和振动，这会影响定位精度和设备寿命。为了达到更平滑的运动效果，S 曲线速度规划被广泛使用。S 曲线因速度曲线形状像字母 S 而得名，它的特点是加速度连续变化，使得加加速度有界。

S 曲线速度规划把加减速过程分成许多段。完整的七段式 S 曲线速度规划一般由加加速、匀加速、减加速、匀速、加减速、匀减速、减减速这七个阶段组成。在加速阶段加速度由 0 开始线性增大到最大值；匀加速阶段加速度恒定；减加速阶段加速度由最大值线性减小到 0，速度达到最大。减速过程与上面加速的过程相反。用控制加速度来进行 S 曲线规划，可以明显减小运动过程中的冲击和振动，实现柔性启停，适合于精密定位、液体搬运、晶圆传送等需要平稳性的场合。

实现 S 曲线规划算法就是根据给定的起始速度、目标速度、最大速度、最大加速度、最大加加速度等约束条件，求出各个运动阶段的时间和位移。该算法比梯形加减速复杂些，因为需要处理不同的速度曲线类型（如没有匀速段的情况）。每一个控制周期里，控制器根据当前运动阶段、规划方程算出瞬时速度、瞬时加速度、瞬时位置指令，再传给伺服系统。

（三）多轴协同运动控制

多轴协同运动控制是实现复杂空间轨迹和姿态控制的关键技术，各个伺服轴在时间、空间上要同步协调，形成整体动作。这对工业机器人、五轴联动数控机床、并联机构等设备来说是不可缺少的。主要的挑战就是怎样精确地规划、控制各个轴的耦合运动，使末端执行器严格按照期望的空间轨迹、速度进行运动。

实现多轴协同控制，首先要用运动学正逆解在关节空间和笛卡尔空间之间进行坐标变换。运动控制器接受笛卡尔空间轨迹指令（空间直线或者圆弧），然后通过运动学逆解得到每一个关节（即每一个伺服轴）需要到达的角度或者位置。之后利用插补算法为每一个关节规划出随时间变化的运动曲线，并保证所有轴在同一时间到达各自的目标点，这就是时间同步。

更高级的协同控制技术有电子凸轮、电子齿轮等，给同步提供了更灵活的方法。电子凸轮可以使得从动轴的运动轨迹完全跟随一个主导轴（无论是虚拟的还是实际的）的位置，并且两者的运动关系可以是任意复杂的函数关系。电子齿轮是用来实现两个或者多个轴之间精确的同步转速比的装置。它们被广泛应用在连续生产的印刷、包装、纺织各个工序里，用以代替传统的机械凸轮、齿轮传动链，达到更好的灵活性、精度和生产效率。整个协同控制系统依靠高速、确定性的实时通信总线（EtherCAT、POWERLINK）来保证各轴之间达到纳秒级同步精度。

第三节 接口技术与通信总线

机电一体化系统要想稳定高效地协同运转，就必须要有准确的信号采集、可靠的指令执行以及各个单元之间的良好的通信。接口技术和通信总线是控制器、传感器、执行器之间的重要桥梁，接口技术、通信总线设计的好坏直接影响到整个系统性能。本节将对数字量接口、串行总线、工业现场总线、无线通信等核心技术进行详细的阐述，给现代机电系统提供理论及实践上的指导。

一、数字量输入输出接口

在机电一体化系统中，控制器和外部设备最基本的交互方式就是数字信号的输入输出。为了保证信号在复杂的电磁环境中可靠地传输，并且能够驱动各种负载，必须设计专门的接口电路。不但是信号的电气隔离，而且是控制不同功率等级执行元件的关键环节，是保证系统稳定可靠运行的第一道防线。

（一）光电隔离技术

光电隔离技术利用光作为媒介传输电信号，从而达到输入输出两端电气上完全隔离的目的。其主要器件是光电耦合器，它把发光元件（一般是发光二极管）和光敏元件（如光敏三极管）装在同一个管壳里。当输入端有电信号时，发光二极管发光，光敏三极管接收到光信号后导通，把信号从输入端传到输出端。由于信息传递依靠的是光而不是电的直接连接，输入和输出电路之间没有电气通路，因此能有效隔断地线回路噪声、高频干扰、高压冲击，防止外部强电干扰，保护核心控制电路。

光电隔离技术被广泛地用在机电系统设计的开关量输入输出通道、数据通信接口以及电源电路里。可编程逻辑控制器的数字量输入模块中，现场按钮、限位开关等设备的信号一般会先经过光耦隔离再送入内部处理器，即使现场信号线路上出现高压或者浪涌，也不会对中央处理器造成损害。输出模块驱动接触器、电磁阀等感性负载的时候也会用光耦隔离信号，防止由于负载切换而产生反向电动势对控制系统造成冲击。

选择和使用光电隔离技术时要考虑一些重要的参数。隔离电压指器件能承受的最大输入输出端电压差，必须大于系统里可能产生的最大的共模电压。其次就是电流传输比，即输出电流和输入电流之比，它影响光耦的驱动能力以及信号传输效率。响应速度也是重要指标，高速开关的应用要选用开关时间短的光耦，防止信号延迟或者失真。选择合适的光电隔离器件可以大大提高机电系统抗干扰、稳定的能力。

（二）继电器驱动电路

继电器属于经典的机电式开关元件，经常被用作控制大功率负载的开关，如电机、加热器、大功率电磁阀等。工作原理就是利用小电流产生磁场，使衔铁动作来控制触点的开闭，进而达到主电路通断的控制。由于控制器（单片机或者可

编程逻辑控制器)的 I/O 端口输出电流能力一般只有几毫安到几十毫安,不能直接驱动继电器线圈,所以必须设计专门的继电器驱动电路。

驱动电路的主要作用就是给继电器线圈提供足够的电流,保证继电器线圈可靠吸合。常用的驱动元件有 NPN 型三极管或 N 沟道场效应管。以三极管驱动为例,控制器的输出信号连接到三极管的基极,继电器线圈作为三极管的集电极负载。当控制器输出高电平时,三极管饱和导通,为继电器线圈提供足够大的电流通路,使继电器吸合;当控制器输出低电平时,三极管截止,线圈失电,触点复位。为了保护三极管,一般在继电器线圈两端反向并联一个续流二极管,用来吸收线圈断电时产生的自感电动势,防止其击穿三极管。

(三) 固态继电器应用

固态继电器是由全固态电子元件构成的无触点开关器件。利用半导体器件(晶闸管、功率场效应管等)的开关特性来代替传统电磁继电器中机械触点的作用,实现电路的通断控制,达到无火花、无噪声、无磨损的目的。固态继电器内部一般由输入电路、光电隔离和输出开关电路三部分组成,用微小的输入控制信号就可以控制大功率负载的通断。

固态继电器比传统的电磁继电器具有更好的特性。开关速度很快,响应时间可以达微秒级,适合高频通断控制场合。由于没有机械部件,使用寿命长、可靠性高、工作时无噪声、对周围电路的电磁干扰小。固态继电器的输入电路一般与 TTL、CMOS 等逻辑电平兼容,可以直接由微处理器或者可编程逻辑控制器的 I/O 端口驱动,大大简化了接口设计。因此固态继电器被广泛地用在温控系统、电机控制、灯光调节、数控机床等各个领域。

固态继电器实际使用时要顾及散热状况。由于半导体器件在导通的时候会存在一定的通态压降,从而产生热量,所以大电流应用必须配用合适的散热器来保证它的稳定工作。交流型固态继电器又分为过零触发型和随机触发型两种。过零触发型的只有在交流电压接近于零点的时候才导通,这样就可以最大程度减少电网的干扰和射频干扰,适合阻性负载的通断控制。随机触发型在得到控制信号之后马上导通,适合对相位有严格要求的感性或容性负载,比如调光、调速等。

二、常用串行通信总线

由于机电一体化系统越来越复杂,单个控制器已经不能满足要求了,分布式

控制开始流行。串行通信总线可以使控制器、智能传感器、驱动器等许多设备用少量的电缆就能实现数据交换，大大简化了系统的布线工作，提高了信息交互的效率和灵活性。掌握常用的串行总线技术是建设现代分布式机电控制系统的基础。

（一）RS-232/485 通信标准

RS-232、RS-485 是应用较多的串行通信物理层标准，规定了信号的电气特性，没有规定通信协议。这两种标准在机电系统设备之间进行通信，尤其是在和计算机、人机界面等设备相连的时候起着重要的作用。

RS232 标准最初是为数据终端设备和数据通信设备之间的通信设计的，采用全双工通信方式，一般使用三根线（发送 TXD、接收 RXD、地 GND）就可行。其信号电平为负逻辑，逻辑 1 为 $-5V \sim -15V$ ，逻辑 0 为 $+5V \sim +15V$ 。由于电压摆幅大、抗干扰性能差、通信距离短，一般不大于 15 米。虽然有上述缺点，但是 RS-232 由于接口简单、硬件实现成本低，在短距离、点对点的应用中仍然被广泛使用。

RS-485 标准是为了克服 RS-232 的缺点而制定的，采用差分信号传输。它用双绞线 A 和 B 上电压差值来表示数据，逻辑 1 电压差为 2V 到 6V，逻辑 0 电压差为 -2V 到 -6V。差分方式具有很强的共模干扰抑制能力，RS485 通信距离可达 1200 米，传输速率最高可达 10Mbps。RS485 是多节点通信总线，一根总线上最多可以接 32 个设备（用中继器时可以连接更多），一般用半双工方式，收发共用一根信号线。

RS-232 与 RS-485 通信标准对比表

特性	RS-232	RS-485
通信方式	点对点全双工通信	多点半双工通信
传输距离	最长约 15 米	最长可达 1200 米
抗干扰能力	较弱	强（差分信号）
连接设备数	2 个	最多 32 个（可扩展）

从上表可知，RS485 的传输距离、抗干扰性、组网性比 RS232 要好，因此在工业现场得到了更广泛的应用。

（二）CAN 总线与应用层协议

控制器局域网络总线属于一种功能强大的串行通信协议，最初被用在汽车电子系统中，之后才被广泛地应用到工业自动化、医疗设备、航空航天等各个领域。

CAN 总线因为具有高可靠、强抗电磁干扰、实时性好等特点而著称。它只规定了物理层和数据链路层，所以在实际使用中，一般需要一个更高级的应用层协议来规范数据的解释和交互方式，CANopen 是应用最广泛的。

CAN 总线使用差分信号传输，具有很强的抗噪声能力。它的主要特点之一就是采用消息式通信和非破坏性的位仲裁。网络上的每个节点可以主动发送信息，信息帧里用 ID 来表示消息的优先级。当多个节点同时发送数据的时候，ID 值小（优先级高）的节点就会获得总线使用权并继续发送，其他节点则自动转入接收状态，这样可以保证高优先级的消息实时传输，不会因为总线冲突而瘫痪。

CANopen 协议是在 CAN 总线之上定义的协议，给工业自动化设备提供了一个标准化的通信框架。CANopen 的核心就是对象字典，它是一个标准化的数据结构，存在于每一个 CANopen 设备里，用来描述该设备所有的参数和功能。网络中的其他设备可以利用服务数据对象访问并配置某个节点的对象字典，从而达到参数设置、诊断等点对点通信的目的。对实时性要求高的数据交换，比如传感器数据、控制指令等，则使用过程数据对象来传输。PDO 的传输效率非常高，它把数据直接映射到 CAN 报文的数据场中，省去了协议开销，可以实现周期性、事件触发或者同步的数据广播。网络管理报文可以被主站用来控制整个网络中所有从站的起动、停止以及复位等。

（三）USB 与以太网接口

通用串行总线、以太网是来源于计算机领域的两种主流通信接口，由于其高速度、高可靠性和标准化等特点，在现代机电一体化系统中所起的作用越来越大。极大地简化了系统同上位机、人机界面、其它网络设备之间的连接。

通用串行总线接口由于具有即插即用、支持热插拔、可以给设备供电等优点，被广泛地用作连接计算机和外围设备。常用来作为数据采集卡、运动控制器、智能相机等设备和上位机之间的接口，进行高速的数据传输和设备的配置。以通用串行总线为基础的数据采集系统，可以方便地从传感器获取高速信号，在个人计算机端进行实时分析和显示。通用串行总线也被用来做设备固件更新和参数调试接口，给设备维护带来了很大的方便。

以太网，特别是工业以太网，把标准以太网技术应用到严苛的工业环境中，采用坚固的连接器和更强的抗电磁干扰设计、确定性的通信协议，满足工业自动化对实时性、可靠性的要求。标准的 TCP/IP 协议栈使得机电系统可以无缝地接

入到企业信息网中来,从而把生产数据和管理信息系统融合在一起,为数字化工厂、工业物联网的创建打下基础。通过以太网可以实现设备远程监控、生产指令下达、远程诊断、远程维护。以太网相比于传统的现场总线,具有带宽大、支持视频监控、大数据量传输等复杂应用的优点,为实现更智能、更互联的机电一体化系统打下了良好的网络基础。

三、工业现场总线技术

工业现场总线是生产现场使用的,实现测量控制设备间串行、数字、多点通信的数据总线。它代替了传统的很多点对点的模拟信号线,全部采用数字化通信方式,简化了布线、降低了成本、提高了系统的诊断能力、增强系统的灵活性,是构建分布式控制系统的基础。不同的现场总线有其各自的特点,适合于不同的场合使用。

(一) Profibus 总线概述

Profibus 是由德国的多家公司、研究机构共同提出的一个现场总线标准,是目前世界上应用最广泛的开放型现场总线之一。Profibus 家族有 3 个兼容部分,分别为 Profibus-DP、Profibus-PA 和 Profibus-FMS,其中 Profibus-DP 应用最广。它提供了一种高速、经济的连接方式,把分散的 I/O 模块、驱动器、阀门等外围设备同中央控制器(可编程逻辑控制器或者个人计算机)连接起来。

Profibus-DP 是专门为工厂自动化高速数据交换而设计的,主要目的就是取代传统的并行信号传输(24V 信号或者 4-20mA 模拟信号)。它使用 RS485 物理传输方式,传输速率可以选 9.6kbps 到 12Mbps,一条总线段最多可以连接 32 个站点,用中继器可以扩展到 126 个站点。Profibus-DP 采用主从通信方式,主站周期性地向从站发送数据,保证了通信的确定性和实时性。除周期性的 I/O 数据交换以外,它还有非周期性的参数设置、诊断、报警等功能,提高系统的可维护性。

Profibus-PA 面向过程自动化,如化工、石化等行业。根据 IEC61158-2 物理层标准,可以在总线上给现场设备(变送器、执行机构)提供本质安全供电,适合于有爆炸危险的环境。Profibus-FMS 是一个通用的、支持多主通信的协议,主要应用于车间级设备之间的通信,但是目前已经被工业以太网取代,很少使用。

(二) Modbus 通信协议

Modbus 协议是在 1979 年为可编程逻辑控制器通信而设计的串行通信协议,

现在已经成为工业领域的通用标准。它的特点就是协议开放、免版权、容易理解、易于实现。Modbus 协议定义了控制器怎样请求并访问其它设备的数据，怎样响应这些请求，它不涉及物理层，可以运行在 RS-232、RS-485 等不同的电气接口上，也可以封装在 TCP/IP 数据包里通过以太网传输。

Modbus 通信采用主从模式，网络中只存在一个主设备，其余设备均为从设备。主设备发出通信请求，从设备作出回应，从设备之间不能直接通信。该模型可以保证通信的顺序性，可以防止总线冲突。每个从设备都有唯一的地址，地址范围从 1 到 247，主设备用地址指定要与之通信的从设备。

Modbus 协议有三种主要的形式，Modbus RTU、Modbus ASCII 和 Modbus TCP。Modbus RTU 和 ASCII 都用在串行链路上。RTU 模式使用紧凑的二进制格式来表达数据，传输效率高，在工业应用中是使用最广泛的模式。ASCII 模式是把每一个字节的数据转换成两个 ASCII 字符来传输，读性好但效率低。Modbus TCP 用于以太网网络，将标准的 Modbus 数据帧嵌入到 TCP/IP 报文中，用以太网的高速和广泛覆盖性实现 Modbus 协议在现代网络环境中的应用，支持跨网段甚至跨互联网的设备通信。

（三）EtherCAT 实时以太网

EtherCAT 是工业自动化领域的一种高性能高实时性的以太网技术，被用在运动控制、机器人、高端制造等领域。EtherCAT 把以太网的带宽优势同现场总线的简洁性结合起来，从而得到微秒级的通信周期以及纳秒级的同步精度。

EtherCAT 的工作原理独特，采用的是飞速处理数据的方式。主站发出的以太网帧要经过整个网络中所有的从站。每一个从站会在数据帧经过时迅速从中提取出自己所需的数据，同时将自己的数据插入到帧中，整个过程只产生纳秒级的硬件延时。数据帧到达最后一个从站之后，会马上折返传回主站。因此总线利用率很高，一个以太网帧就可以完成与所有从站的数据交换，从而实现极短的循环时间。

EtherCAT 的另一个技术就是分布式时钟。通过该机制可以保证网络中各个节点本地时钟可以精确到亚微秒级。高精度同步对多轴联动、协同运动等要求非常严格的应用来说十分重要，它使所有的驱动器、I/O 设备能够在完全相同的时间点执行动作或者采集数据。EtherCAT 支持线性、树形、星形等各种物理拓扑结构，不需要交换机或者集线器，并且支持热插拔，给系统构建和维护带来了极大的方便。

四、无线通信与物联网接口

伴随着工业 4.0、工业物联网的发展,无线通信技术在机电一体化系统中应用也越来越广。无线技术摆脱了线缆的束缚,给设备布置带来了很大的灵活性,特别适合移动设备、旋转部件、布线困难的地方。将无线通信以及物联网接口嵌入到机电系统当中,就可以达成远程监控、预测性维护以及数据驱动型智能化决策。

(一) 蓝牙与 Wi-Fi 模块应用

蓝牙、Wi-Fi 属于两种成熟的、被广泛采用的短距离无线通信技术,由于其成本低廉的模块以及广泛的终端支持,被广泛地应用到机电产品的辅助功能以及人机交互当中。

蓝牙技术属于低功耗无线通信技术,可以实现设备之间短距离的数据交换。在机电一体化系统中,蓝牙模块常常被集成到设备里来代替传统的串口调试线缆。工程师可以利用笔记本电脑或者手机上的应用程序,采用无线方式对参数进行设置、状态进行监控、故障进行诊断等,大大提高了现场调试维护的便利性。蓝牙可以连接无线手持操作单元、遥控器等,从而对设备进行灵活的控制。低功耗蓝牙技术出现以后,它也被用于电池供电的微型传感器节点,实现了长时间的数据采集。

Wi-Fi 技术具有带宽大、覆盖范围广的特点,最大的优点就是可以方便地将设备接入已有的局域网,并且可以连接到互联网。在机电系统中加入 Wi-Fi 模块之后,设备就成为网络节点,通过 TCP/IP 协议进行通信。因此操作人员可以在工厂内任意地点,通过无线网络对设备的运行情况实施监控,也可以通过互联网进行远程访问。对于数据量大的应用,例如工业相机图像传输、设备运行日志上传等,Wi-Fi 的高速率特点就显得特别重要。

(二) ZigBee 无线传感网络

ZigBee 是以 IEEE 802.15.4 标准为基础的低功耗、低速率、低成本短距离无线通信技术。它的设计目的在于满足工业控制、楼宇自动化、智能家居、传感器网络等低数据量、低功耗、高节点密度的应用需求。ZigBee 协议栈简单,功耗极低,节点在休眠模式下只消耗微安级电流,使用电池供电可以工作数月甚至数年。

ZigBee 最显著的特点就是具有很强的自组网、自愈能力。ZigBee 网络支持

星形、树形、网状三种拓扑结构。网状网络中除了有协调器和终端设备，还有路由器节点。数据通过多跳路由在节点间传递，当某条路径中断时，网络会自动寻找新的路径建立连接，从而保证通信的可靠性和鲁棒性。ZigBee 网络节点数理论上可达 65000 个以上，在大范围内可以部署大量的传感器。

ZigBee 适合于机电一体化应用中无线传感器网络的构建，可以对大型设备或者生产线上的温度、振动、压力等状态参数进行监测。传感器节点采集的数据经 ZigBee 网络汇集到协调器上，再经由协调器将数据传送到主控制系统进行处理。它可以克服传统传感器信号线必须一条条地铺设这一缺点，能够降低系统的敷设和维修费用，特别适合于对已有设备实现自动化。

（三）工业物联网数据传输

工业物联网的关键就是把大量的设备、传感器、系统连接起来，利用云计算和大数据分析发现数据中的价值，优化生产流程，实现预测性维护，创造新的商业价值。在此过程中，高效、可靠、轻量化的数据传输协议就显得十分重要。传统的工业协议往往过于复杂或者不适应广域网、不稳定网络环境下的使用，于是产生了 MQTT、CoAP 等专门为物联网设计的协议。

MQTT 是一种采用发布订阅模式的轻量级的消息协议。它是工作于 TCP/IP 之上的一种技术，其设计原则是尽可能地减小的网络带宽的占用和设备资源的消耗。MQTT 模型中设备（发布者）将数据发布到一个主题上，对它感兴趣的客户端（订阅者）会从消息代理那里收到数据。发布者和订阅者之间没有直接关系，解除设备和应用之间的依赖，扩展性好。MQTT 提供 QoS 等级，可以根据不同的应用需求保证消息可靠传递，非常适合在低带宽、高延迟或者不稳定网络环境下做远程数据采集以及下发指令。

CoAP 协议是专门为资源受限的设备设计的，是一种轻量级的协议。它使用 UDP，比 TCP 开销小得多，适合于功耗低、计算能力差的设备。CoAP 采用和 HTTP 一样的请求 - 响应方式，支持 GET、POST 等方法，可以和 Web 服务集成。物联网协议可以保障现场数据的安全与高效传递到云端，使机电系统发生由自动化向智能化的改变。

第六章 系统建模与仿真分析

系统建模和仿真分析是机电一体化系统设计的重要环节，用数学的方法描述系统各个部分物理行为及相互关系，用计算机仿真技术预测和分析系统的动态特性。本章主要对机电系统数学模型建立的方法以及仿真分析技术进行论述，目的是给系统的设计、性能的改善和控制策略的制定提供理论依据和有效的工具。

第一节 机电系统数学模型建立

建立正确的数学模型，是认识、分析、控制机电系统的前提。数学模型把复杂的物理系统简化成一系列数学表达式，这些表达式可以定量地描述系统内部变量之间的动态关系，也可以对外部输入做出反应。本节分别对机械、电路、机电耦合系统建模的方法进行研究。

一、机械系统数学模型

机械系统是机电一体化的执行基础，机械系统的动态特性直接决定了整个系统的性能好坏。建立机械系统准确的数学模型，其目的在于分析机械系统在外力或者运动激励下所引起的动态响应，这对后续控制器设计和系统性能评价有重要的意义。

（一）牛顿力学建模方法

牛顿力学建模方法是最基本的、最直观的刚体运动建模方法。它根据牛顿第二定律，即物体的加速度与作用在它上面的合外力成正比，而与它的质量成反比。复杂的机械系统一般分解成一系列相互连接的刚体，对每一个刚体单独做受力分析，用牛顿-欧拉方程描述其平动和转动。平动方程是质心在外力作用下做线性运动的方程，欧拉方程是刚体绕质心转动的动态方程，将外力矩、角速度、角加速度、惯性张量联系在一起。

该方法的关键是正确的受力分析，需要考虑驱动力、重力、摩擦力、弹簧力、

连杆间相互作用力等所有的内力和外力。将各个部件隔离,画出受力图,就可以看到所有的作用力和力矩。根据系统的几何约束关系来建立各个刚体运动坐标之间的联系,最后得到描述整个系统动力学行为的微分方程组。物理意义明确,刚体少时建模直观,但是系统自由度增加,需要处理的约束力、方程数量迅速增多,分析、求解变得复杂。

(二) 拉格朗日方程应用

拉格朗日方程是分析力学中分析系统的有力工具,它用能量法给系统化建模提供了一种重要的方法。与牛顿力学不同的是,拉格朗日方法并不直接处理系统内部的约束力,而是用广义坐标来表示系统的位形,大大简化了建模的过程。广义坐标就是系统位置所必需的最少数目的独立变量,其数目为系统的自由度。这种方法的关键是建立系统的拉格朗日量 L ,它是系统总动能 T 和总势能 V 之差,即 $L = T - V$ 。

系统的动能是广义坐标和广义速度的函数,势能一般只与广义坐标有关。确定了拉格朗日量之后,就可以把拉格朗日量代入拉格朗日方程,通过求解一组二阶常微分方程来得到系统的动力学方程。每一个广义坐标都对应一个拉格朗日方程,该方程描述的是能量转换和守恒怎样决定系统的运动轨迹。

拉格朗日法的优点是普适性强、效率高,适合于复杂的约束的多自由度系统。它把矢量力学问题转化成标量能量的分析,省去复杂的受力和约束力求解。缺点就是推导过程中会用到偏微分运算,比较繁琐,不像牛顿法那样直接地体现各个力对系统运动的影响。

(三) 机械传动链等效模型

机电系统中的机械传动链,即齿轮系、皮带轮、丝杠等,是用来传递、变换运动和动力的。为了简化分析,一般将复杂的传动部件等效成一个集中式的数学模型。等效的目的就是把传动链上所有的运动部件的惯量、刚度、阻尼折算到同一个参考轴上(一般为电机输出轴或者最终负载轴),得到一个简化的单自由度或者少数自由度的动力学模型。

1. 等效转动惯量就是把传动链上的所有旋转、移动部件的惯量都折算到参考轴上。对于一个传动比为 i 的减速器,其后级负载的转动惯量 J_L 折算到电机轴上等效转动惯量为 J_L/i^2 。直线运动部件用传动变换关系(丝杠导程)把质量 m 折算成等效转动惯量。把所有部件的等效转动惯量相加,就得到系统的总等效转

动惯量 J_{eq} 。

2. 等效刚度和阻尼，传动链中轴、联轴器、齿轮等存在弹性变形，可以等效为扭转弹簧，等效刚度 K_{eq} 决定系统的振动特性。各个部件的摩擦以及能量耗散可以等效成阻尼器，阻尼器的等效阻尼 B_{eq} 会影响系统的振荡衰减速度。把它们折算到参考轴上，就得到包含等效质量、等效弹簧和等效阻尼的振动系统模型，可以用来分析系统共振频率和动态响应精度。

机械传动链等效参数表

等效参数	描述	影响的系统特性	示例 (折算到电机轴)
等效转动惯量	将传动链所有运动部件的惯量折算到参考轴	响应速度、系统惯性、加减速能力	$J_{eq} = J_{motor} + J_{load}/i^2$
等效刚度	传动链部件 (轴、联轴器等) 的弹性变形	振动频率、动态精度、共振特性	串并联弹簧模型
等效阻尼	各部件间的摩擦及能量耗散	振荡衰减速度、系统稳定性	基于摩擦系数和阻尼系数的折算

机械传动链中的等效转动惯量、等效刚度、等效阻尼等主要参数以及它们对系统性能的影响见上表。采用等效的方法，复杂的齿轮、轴传动系统可以简化成二阶或者更高阶的微分方程，清楚地反映出电机驱动力矩、负载力矩和系统运动的动态关系。对于伺服系统的控制器设计和性能分析来说十分重要，可以用来衡量系统响应速度、稳定性。

二、电路系统动态模型

电路系统是机电一体化系统的“大脑”和“神经”，主要完成电能的转换、信号的处理以及控制指令的发出。建立电路系统的动态模型，对电源特性、驱动器性能、信号处理的准确性都有着非常重大的意义。这些模型一般是一组用电压、电流随时间变化的微分方程来描述的。

(一) 电路基本定律应用

电路动态模型的基础是电路的基本定律，主要是基尔霍夫定律和元件的伏安关系。基尔霍夫电流定律说，在任何时候通过任一节点的电流代数和总是为零，这是电荷守恒的结果。基尔霍夫电压定律说，在电路的任意一个闭合回路中，所有元件两端的电压之和的代数和为零，即能量守恒。

建模过程首先要找到电路中的所有独立节点和回路。用 KCL 列出节点电流

方程,用 KVL 列出回路电压方程。电阻、电感、电容三种基本的储能和耗能元件的动态行为,就是用伏安关系来描述的,即电阻的电压和电流成正比,电感两端电压和电流变化率成正比,电容两端电压和电荷的积分(即电流时间积分)成正比。将元件方程代入 KCL、KVL 方程组中,就可以得到一组描述电路动态行为的微分方程。对于复杂的线性电路,可以用拉普拉斯变换把时域的微分方程变成频域的代数方程,使求解变得简单。

(二) 电机动态方程推导

电机是实现电能和机械能相互转换的关键部件,对电机动态模型进行分析,也是分析整个机电系统性能的基础。不同的电机,例如直流电机、交流异步电机、永磁同步电机等等,其数学模型大相径庭,但是一般都包含电气部分和机械部分。

以他励直流电机为例,动力学方程组主要是两部分。第一组为电枢回路电压平衡方程,遵照 KVL,描述电枢电压、电枢电阻上的压降、电枢电感的自感电动势、反电动势之间的关系。反电动势是电机机械运动对电气系统反馈的作用,反电动势的大小与电机转速、磁通量成正比。第二组为机械运动的转矩平衡方程,用牛顿第二定律来表示电机产生的电磁转矩、负载转矩、转动惯量、角加速度之间的关系。电磁转矩是电机产生机械运动的根本,和电流、磁通都成正比。

对于交流电机来说,异步电机或者永磁同步电机其模型比直流电机要复杂得多,因为它的内部磁场是旋转的,三相绕组之间存在电磁耦合。一般采用坐标变换的方法,把定子三相静止坐标系下的变量转换到同步旋转的 $d-q$ 坐标系下。在 dq 坐标系下交流变量转换成直流分量,把复杂的交流电机模型简化成类似直流电机模型,便于分析控制。

(三) 功率电子器件模型

功率电子器件,即二极管、晶闸管、MOSFET、IGBT 等,是组成电机驱动器、逆变器、开关电源的重要部件。这些器件工作在开关状态,有很强的非线性。根据分析精度的要求不同可以分为不同的层次。

最简单的模型是理想开关模型,即器件导通时压降为 0,关断时漏电流为 0,并且开关动作是瞬时的。该模型适合做系统级的宏观性能分析,即效率估算、稳态工作点计算。

为了更加准确的进行分析开关过程中损耗和动态响应,就需要用到更复杂的模型。IGBT 可以等效为一个被 MOSFET 控制的 PNP 晶体管,该等效模型可以

反映出 IGBT 的电压控制特性以及双极性器件的导通压降优势。还可以用寄生电容和电感来模拟器件开关的瞬态过程，比如开通延迟、关断拖尾电流等等。详细的模型对于分析电磁干扰、改善驱动电路、评价开关损耗等都是很重要的。精度要求高的仿真可以用半导体物理的器件模型，但是计算量大，不适合系统级仿真。

三、机电系统耦合模型

机电一体化系统本质就是机械子系统和电子子系统深度融合、动态交互。因此建立一个能反映耦合关系的系统模型就显得十分重要。耦合模型可以反映出各个子系统本身的动态性，也可以作为系统之间能量、信息交流的桥梁。

（一）电动机 – 负载耦合模型

电动机与负载耦合是机电系统里能量耦合的主要部分。耦合模型要将电机的电气动态方程和负载的机械动态方程结合起来。电机电磁转矩是驱动机械负载运动的原因，而负载的运动又以反电动势的形式影响电枢电流，形成闭环的相互作用。

建立耦合模型时，首先要将电机模型和机械负载模型结合起来。负载的转动惯量、摩擦力矩、工作负载力矩一般都反映在电机的机械运动方程里。在直流电机驱动的传动系统中，总的转动惯量是电机转子惯量、折算到电机轴上的所有传动部件、负载惯量之和。完整的耦合模型就是一组含有电气变量和机械变量的微分方程组。该模型说明了系统机电时间常数、机械时间常数是如何一起决定系统整体动态响应的。耦合模型在负载突然增大的时候，可以预测出电机转速下降、电流增大，最终恢复到新的稳定状态的全过程。

（二）传感器 – 信号传输模型

传感器是机电系统接收外界信息的窗口，信号传输通道就是信息流动的神经网络。传感器本身是一个动态系统，它的输出不能瞬间、完全地反映被测。因此需要建立传感器的动态模型来准确描述它的测量延迟、响应速度和带宽限制。一般地，一阶或者二阶滞后环节可以用来近似描述大多数传感器的动态特性。温度传感器的响应可以采用一阶惯性环节来建模，时间常数就是传感器达到被测温度的 63.2% 所需要的时间。

信号从传感器传到控制器的时候，也会存在延迟和失真。传输延迟可以用纯滞后环节来表示。信号调理电路例如滤波器、放大器本身也有自己的传递函数，

会对信号的幅值、相位造成改变。低通滤波器用来消除高频噪声，会引入相位滞后，从而影响控制系统的稳定性。把传感器模型、传输延迟模型、信号调理电路模型串联起来，就得到完整的传感器 - 信号传输模型。该模型对系统测量精度、噪声抑制能力、闭环控制稳定性有重大的意义。

（三）系统整体传递函数推导

对于线性定常的机电系统来说，传递函数是用来描述系统的输入输出关系最常用的方法。零初始条件下，它是系统输出量的拉普拉斯变换和输入量拉普拉斯变换之比。推导系统整体传递函数的过程就是将前面建立的各子系统的微分方程用拉普拉斯变换在复数域中进行代数运算，消去中间变量，最后得到期望输出和输入之间的关系。

一般用系统框图来完成。将每一个子系统的传递函数用方框表示出来，按照信号流向将各个方框连接起来，得到整个系统的结构图。框图有前向通路、反馈回路、信号加减运算组成。采用框图化简法，即串联、并联、反馈回路等效规则，将复杂的系统框图逐级简化，最后得到表示系统总传递函数的单一方框。对于更复杂的系统，可以利用梅森增益公式，直接从信号流图中求出总传递函数。得到的整体传递函数，其极点、零点位置决定系统的稳定性、响应速度、超调量等各项动态性能指标，是进行控制器设计、系统性能分析的数学基础。

第二节 控制系统仿真方法与工具

由于机电一体化系统结构复杂，因此必须使用有效的设计分析手段。控制系统仿真是理论与实践的桥梁，它让工程师可以在虚拟环境里对系统动态特性做测试和验证，这样就可以缩减开发时延，削减开支，改良系统品质。本节主要研究 MATLAB/Simulink 仿真方法和工具。

一、MATLAB/Simulink 基础

MATLAB/Simulink 是业界标准的仿真平台，给机电一体化系统建模、仿真提供图形化的环境。掌握基本操作是设计复杂系统的基础，主要是模块库的熟悉、模型结构的建立、自动化仿真流程的设计。

(一) Simulink 模块库介绍

Simulink 强大的功能来自于丰富的模块库，模块库是构成仿真模型的基本单元。常用模块库存放的是最常用的模块，便于使用者调用。信号源库中提供各种激励信号，如阶跃信号、正弦波、斜坡信号等，外部输入或者干扰都是由这些激励信号产生的。接收器库用来显示和记录仿真数据，其中示波器模块是系统动态响应观察的最直观的工具，可以将仿真过程中信号的变化以图形的方式实时地显示出来。

在建立系统数学模型的时候，连续模块库和离散模块库起着重要的作用。连续模块库有积分器、微分器、传递函数、状态空间等模块，用以描述连续时间系统的动态方程。对于带有数字控制器的机电系统来说，离散模块库中必不可少的有离散积分器、单位延迟、零阶保持器等模块。数学运算库包含加减乘除、增益、三角函数等各种数学计算的功能，用以实现控制算法中复杂的数学运算以及坐标变换。

逻辑与位运算库、查表库、信号路由库等各有不同的用途。多路复用器、多路分解器在多维信号处理中起到了重要的作用，完成着信号合成的功能和信号分离的工作。掌握各个模块的功能及用法是建立准确仿真模型的前提。Simulink 常用模块库及功能见下表。

Simulink 常用模块库及其功能

模块库名称	主要功能	典型模块示例
常用模块库	汇集最常使用的基本模块	常量、增益、求和
信号源库	提供各种激励信号和输入	阶跃、正弦波、斜坡
接收器库	显示和记录仿真数据	示波器、To Workspace
连续模块库	描述连续时间系统动态	积分器、传递函数、状态空间
离散模块库	描述离散时间系统动态	离散积分器、单位延迟、零阶保持器
数学运算库	提供各种数学计算功能	加减乘除、三角函数、增益
信号路由库	处理多维信号的合并与分离	多路复用器、多路分解器

(二) 子系统封装技术

随着仿真模型越来越复杂，模型图也会变得庞大而杂乱，不易于阅读和维护。子系统技术就是将一组相关的模块打包成一个有独立功能的单元，使模型结构更清晰、更容易理解。子系统像编程中的函数调用一样，把复杂的内部逻辑隐藏起来，只暴露必要的输入输出端口。模块化既可以简化顶层模型，也可以方便团队

协作，不同的成员可以分别对子系统进行设计、调试。

为了使子系统更加容易使用、可以重复使用，Simulink 提供了封装的功能。子系统封装可以创建出定制化的对话框界面，用户不需要深入到子系统内部就可以方便地设置关键参数。封装编辑器有参数添加、初始化命令、说明文档编写、图标绘制等全部功能。例如创建一个电机模型子系统封装，把电机电阻、电感、转动惯量等物理参数暴露在对话框里，用户只需要填写这些参数就可以配置模型，将一个通用子系统转化为可以灵活配置的模块，大大提高了模型的复用性以及工程实用性。

（三）脚本文件与模型交互

虽然 Simulink 有直观的图形化界面，但是在进行复杂的仿真任务的时候使用 MATLAB 脚本文件可以达到更高的自动化和灵活性。脚本文件可以用来仿真启动前对模型进行系统的配置。模型所需要的控制器增益、物理常数、初始条件等所有参数可以集中在一个脚本文件中定义。运行此脚本后，这些参数就被加载到 MATLAB 的工作空间中，当 Simulink 模型执行仿真时，会自动从 MATLAB 的工作空间中读取参数，从而达到参数与模型结构分离的目的，便于参数的集中管理和批量修改。

脚本文件是控制仿真流程和执行批量仿真的主要方式。MATLAB 中提供 sim 命令，可以使用代码的方式开始、暂停、停止 Simulink 模型的仿真。使用 sim 命令可以编写循环结构，对一个或者多个参数进行取值的改变并自动执行多次仿真。此方法在参数优化、系统灵敏度分析、蒙特卡洛仿真中非常有效，可以省去大量重复的人工操作，大大提高设计、分析效率。

仿真结束之后，大量的仿真数据要经过有效的后处理和分析。脚本文件在此处又发挥出强大的作用。Simulink 仿真结果可以直接输出到 MATLAB 工作区。脚本可以对数据做复杂的数学运算、性能指标计算和数据可视化等。可以自动绘制出系统响应曲线，并计算超调量、调节时间等性能指标，也可以用傅里叶变换来分析数据频谱特性。这种模型和脚本的无缝交互，就形成了一条从参数设置、自动仿真、结果分析的工作流程。

二、控制系统时域仿真

时域仿真最直观的分析控制系统动态特性的方法，通过观察系统在某个输入

信号下的输出响应来评价系统的稳定性、快速性、准确性。它可以直观地展示出系统随时间而变化的动态行为，是控制器设计、参数整定的基础。

（一）阶跃响应分析

阶跃响应属于控制系统时域分析的基础性、重要部分，它表现了系统在遭受一个从零突然变为常数的阶跃输入信号之后，输出量随时间变化的全过程。在 Simulink 中进行阶跃响应分析一般比较简单，只需要在模型的输入端接入一个阶跃信号模块，将系统输出连接到示波器模块即可。运行仿真后，示波器上显示的曲线就是系统的阶跃响应曲线，完整地表现出系统动态过程及最终稳态情况，是评价系统性能的重要依据。

分析阶跃响应曲线主要是得到一系列的动态性能指标，这些指标一起用来度量系统响应的品质。关于这些指标的具体定义，在阶跃响应动态性能指标表里给出。

阶跃响应动态性能指标表

指标	定义	衡量 / 反映
上升时间	系统响应从终值的 10% 上升到 90% 所需的时间	系统的响应速度
峰值时间	响应第一次达到其最大峰值点所需的时间	系统的首次响应速度
超调量	响应的最大峰值与稳态值之间的百分比差	系统的相对稳定性及振荡程度
调节时间	响应进入并保持在稳态值某一允许误差带（通常为 2% 或 5%）所需的最短时间	系统的响应速度和稳定性

（二）稳定性判断与根轨迹

控制系统能否正常运转，首先要看系统是否具有稳定性。一个不稳定的系统在受到扰动之后，输出会发散或者产生等幅振荡，不能恢复平衡状态，这是实际工程中绝对不允许的。在时域分析中，稳定性的最直接表现就是，对任意有界的输入，系统的输出也必须是有界的。系统稳定条件是其闭环传递函数所有的极点都在复平面左半平面内。存在极点位于虚轴上时，系统为临界稳定状态；有任一个极点位于右半平面时，系统为不稳定。

根轨迹法是用来研究当系统中某一个参数（一般指的是开环增益 K ）由 0 到无穷大变化时，闭环系统极点变化轨迹的直观图解分析工具。绘制根轨迹图，可以清楚地看出增益变化时闭环极点在复平面上移动的轨迹。根轨迹和虚轴的交点表示系统处于临界稳定状态时增益值和振荡频率，根轨迹如果穿过右半平面，那

么系统就有可能存在不稳定增益范围。

MATLAB 中可以使用 `rlocus` 函数方便地绘制出系统的根轨迹图。通过根轨迹图的形状、起始点、终点信息的分析,对渐近线、与虚轴交点情况的分析,就可以判断系统在不同的增益条件下是否稳定,根据需要选择闭环极点,使闭环增益满足期望的动态性能。根轨迹法把参数变化同系统稳定性以及动态性能联系起来,给控制器的设计与整定赋予了深刻的认识。

(三) 稳态误差与动态性能

稳态误差是用来衡量控制系统控制精度的指标,它是在系统达到稳态时期望输出和实际输出的差值。稳态误差的大小与系统结构类型(开环传递函数中积分环节的个数)、输入信号形式(阶跃、斜坡、抛物线信号)和系统开环增益有关。单位反馈系统用终值定理可以求出稳态误差。用 Simulink 仿真时将输入信号与输出信号相减,在仿真时间足够长之后观察其稳定值就可以直观地得到系统稳态误差,从而验证理论计算的正确性。

动态性能和稳态误差一般存在着相互制约的关系,在二者之间如何进行权衡,是控制器设计中永远的课题。一般为了减小稳态误差,需要增大系统的开环增益。从根轨迹图中可以看出,增大的增益会使闭环极点右移,从而使系统阻尼比变小、超调量增大、动态过程振荡加剧,甚至造成系统不稳定。反之,如果过分追求好的动态性能(小的超调量),就会牺牲增益,从而导致稳态误差增大,控制精度降低。因此,在机电系统设计过程中要根据应用场合对快速性、平稳性、精度等各方面不同的要求,用仿真分析反复调试控制器参数,找到动态性能和稳态精度之间最佳的平衡点。

三、控制系统频域仿真

频域分析法是控制系统理论的又一支柱,它通过研究系统对各种频率正弦输入信号的响应特性来分析系统性能。可以直观地反映出系统带宽、相对稳定性和抗噪声能力,给复杂系统的分析和校正提供新的角度。

(一) 波特图绘制与分析

波特图是表示系统频率响应最常用的图形工具,波特图一般由对数幅频特性曲线和对数相频特性曲线两部分组成。对数幅频特性图的横坐标是频率,纵坐标是幅值(单位为分贝);对数相频特性图的横坐标也是频率,纵坐标是相位(单

位为度)。该种表示方法的优点是,可以将很宽的频率范围在一个图上直观地表示出来,乘除运算转换成加减运算,便于分析和手工绘制。

MATLAB 可以直接使用 `bode` 函数绘制波特图,而不需要定义传递函数模型。通过对波特图的分析可以得到系统的性能信息。幅频特性曲线低频段幅值反映系统的稳态性能,低频幅值越大,说明开环增益越大,稳态误差越小。曲线形状,尤其是它的转折频率,可以体现系统时间常数的分布。相频特性曲线是输出信号相对于输入信号相位延迟随频率变化的曲线。

波特图对于系统校正的设计来说,尤其重要。根据原始系统波特图就可以判断出系统需要做怎样的性能改进,比如提高低频增益可以减小稳态误差,提高穿越频率可以加快系统的响应速度。在此基础上选择合适的校正环节(超前、滞后或者超前滞后校正),并分析校正环节对原系统波特图的影响。用波特图的图形叠加法可以直观设计出满足期望稳定裕度的校正网络,从而改善系统的性能。

(二) 奈奎斯特稳定性判据

奈奎斯特稳定性判据是判断闭环系统稳定性的最基本、最严格的方法。用开环频率响应的极坐标图即奈奎斯特图,根据复变函数中的幅角原理来判断闭环系统特征根在右半平面的个数。与根轨迹法不同,奈奎斯特判据直接利用系统的开环频率特性数据来判断闭环稳定性,对于无法得到精确传递函数,但是可以通过实验测量频率响应的场合特别有用。

奈奎斯特判据的核心思想可概括如下:

1. 绘制开环传递函数的奈奎斯特曲线,即当频率从负无穷到正无穷变化时,开环频率响应在复平面上的轨迹。
2. 确定开环传递函数在复平面右半部分的极点数 P 。
3. 观测奈奎斯特曲线顺时针绕过临界点 $(-1, 0j)$ 的净圈数 N 。如果曲线从 $(-1, j0)$ 点左侧穿过,就计为正半圈;从右侧穿过,就计为负半圈。
4. 闭环系统右半平面极点个数 Z 由公式 $Z=P+N$ 得出。闭环系统稳定的充分必要条件是 $Z=0$,即奈奎斯特曲线顺时针包围 $(-1, j0)$ 点圈数必须等于开环传递函数在右半平面的极点数 P 。开环稳定($P=0$)的闭环稳定条件简化为奈奎斯特曲线不包围 $(-1, j0)$ 点。

(三) 系统裕度计算

稳定性只是合格控制系统的一项基本要求,在实际工程中,更关心的是系统

距离不稳定状态的远近，也就是系统的相对稳定裕度。系统裕度一般分为幅值裕度和相位裕度，二者一起反映系统的相对稳定性。裕度在波特图或者奈奎斯特图上可以直观地计算和表示出来。一个好的系统应该有足够大的稳定裕度，可以承受由于模型的不确定性以及外部参数的摄动所造成的影响。

相位裕度就是当系统开环幅频特性为 0 分贝（幅值为 1）时，对应的相频特性与 -180 度线之间的相位差。该频率就叫增益穿越频率。相位裕度就是系统不失稳时可以容许的额外相位滞后量。一般相位裕度的范围是 30° 到 60° 。幅值裕度指的是当系统开环相频特性为 -180 度的时候，其对应的幅频特性倒数的值，在波特图上表现为 0 分贝线和该频率点幅值之间的距离。它表示系统在失稳之前可以增大的开环增益倍数。充足的幅值裕度和相位裕度，可以使系统具有较好的鲁棒性和动态性能，可以抑制振荡。

第三节 多领域物理系统联合仿真

由于机电一体化系统越来越复杂、集成度越来越高，传统的单领域分析方法已经不能满足对系统整体性能评价的需求了。多领域物理系统联合仿真技术随之产生，它把各个领域的模型融合在一起来完成对系统动态行为的全方位、精准的模拟，成为现代机电产品研发的关键环节。

一、多学科仿真技术概论

多学科仿真就是在一个统一的仿真环境中，对涉及机械、电子、液压、控制、热等多方面的复杂系统进行耦合建模和分析。它要冲破学科壁垒，表现不同子系统彼此影响的规律，进而于设计之初就找出并处理可能的耦合问题。

（一）基于接口的联合仿真

基于接口的联合仿真属于比较成熟、应用广泛的多学科仿真方法。该方法的核心思想就是用各个领域内最专业的软件，对各自对应的子系统进行建模，然后通过标准或者定制的软件接口，将它们连接起来，实现仿真过程中数据的交换和协同工作。机械系统模型在多体动力学软件中建立，控制系统模型在控制仿真软件中建立，两者在每一个仿真步长或者特定时间点，通过接口交换位移、速度、力、控制信号等重要数据。

该方法可以充分发挥各个专业软件的强大功能，又可以保持各个领域模型的深度和精度。它给不同的开发团队并行工作提供方便，各个团队可以专注于自己领域里的建模和调试。联合仿真成功的要素是接口稳定以及数据交换同步。主从式仿真模式是由一个主仿真软件控制整个仿真过程及时间步进，在并行式仿真中各个仿真软件可以单独进行计算，由协调器来同步数据从而提高仿真的效率。

（二）基于模型的协同仿真

基于模型的协同仿真是一种更加灵活、标准化的联合仿真方式，典型的代表就是功能模型接口标准。不同于依靠特定软件之间的接口来完成联合仿真，本方法的关键之处在于把不同的软件生成的子系统模型，导出为一种称为功能模型单元的标准化格式。功能模型单元是带有模型方程和求解器的黑盒或者白盒文件，它统一了模型描述、变量接口、调用规范。

因此，任何支持功能模型接口标准的仿真平台都可以导入并集成不同工具生成的功能模型单元模型，从而得到完整的系统级仿真模型。即插即用的特点大大提高了模型的可移植性、可重用性、互操作性，很好地解决了异构仿真工具之间的集成难题。它降低了对特定软件接口的依赖，企业对仿真工具的选择有更大的自主权，在供应链中的各个合作伙伴之间也可以进行模型交换和集成，真正实现了协同设计、协同仿真。

该方法推广之后，仿真工作流程就可以被标准化。开发人员可以把精力集中到模型本身开发上，而不用花过多时间做接口开发和数据格式转换。从系统集成的角度来讲，它提供了一种组织、管理复杂系统模型的系统化手段，使从部件级到系统级多层次仿真验证更高效、可靠，加快了从概念设计到详细设计的迭代速度。

（三）统一建模语言

统一建模语言为多领域物理系统集成建模提供了一条新的思路，其目的就是在同一个建模环境里，用统一、非因果的描述方法建立跨学科系统模型。不同于联合仿真的用子模型拼接的方式，本方法实现了从根本上模型的一体化。

在这种范式之下，最具代表性的语言就是 Modelica。它是一种面向对象的、基于方程的物理建模语言，可以描述机械、电气、热、流体和控制等各个领域动态行为。其主要特点有，

1. 非因果性建模，用户只需要按照物理定律，用方程的形式来描述组件的行

为，不需要事先指定信号的输入输出方向，模型编译器可以自动把方程转换成可以执行的仿真代码。因此模型的建立更直观，也更易于重复使用。

2. 面向对象的组件化建模，系统是由一个个可以复用的组件模型通过连接器连接起来的。连接器确定的是组件之间物理交互的方式，也就是力、流等能量信息传递的途径，从而让复杂的系统的搭建过程像搭积木一样直观高效。

除了模型库建模语言外，系统建模语言给机电一体化系统的早期需求分析、功能分配、架构设计提供了一个图形化的统一描述框架。SysML 主要面向系统工程流程，可以对系统结构、行为、需求、参数约束等从更高层次上进行描述，并且可以与 Modelica 等详细的物理模型建立起联系，保证从系统设计到物理仿真的连贯性、一致性。

多领域联合仿真方法对比表

特点 / 方法	基于接口的联合仿真	基于模型的协同仿真	统一建模语言 (Modelica/SysML)
核心理念	软件间数据交换	标准化模型单元交换	统一建模环境，非因果描述
实现方式	专用接口 / 定制连接	导出 / 导入功能模型单元文件	方程描述，组件化，连接器
软件依赖	强依赖特定专业软件	降低对特定软件依赖	独立于特定仿真工具
模型集成	外部拼接，数据同步	中间格式，即插即用	内在统一，一体化建模
主要优势	充分发挥专业软件优势，模型深度精度高，并行开发	提高模型互操作性 / 重用性，流程标准化，降低集成成本	模型直观，易于复用，一体化，物理真实性高，跨学科
主要挑战	接口稳定性与数据同步复杂，耦合问题难早期发现	初始导出功能模型单元的复杂度，对功能模型接口标准支持度	学习曲线较陡，现有专业模型迁移成本
典型应用	传统机电系统联合仿真	供应链伙伴间模型交换，系统集成	复杂物理系统建模，早期概念设计，基于模型的开发

多领域联合仿真方法对比可见上表，不同的方法各有侧重，适用于不同的应用场景和开发需求。

二、机械 – 控制联合仿真

机电一体化系统的核心就是机械本体与控制系统深度耦合、动态交互，因此

机械-控制联合仿真技术是该领域应用最广泛、最基础的仿真技术之一。它可以模拟控制算法对机械系统动态行为的影响,也可以模拟机械系统状态对控制器反馈的作用,是提高系统性能、验证控制策略的必要手段。

(一) ADAMS 与 Simulink 联合

ADAMS 和 Simulink 联合仿真是机械控制领域最经典、最强大的组合。ADAMS 是一款功能强大的多体动力学仿真软件,可以对复杂的机械系统运动学和动力学行为做准确的模拟。Simulink 是 MATLAB 环境下的图形化仿真软件,在控制系统设计、信号处理、算法开发等各个方面都有无可比拟的优势。

两者联合仿真一般用 ADAMS/Controls 插件来完成。其工作原理为:用 ADAMS 建立机械系统三维动力学模型,定义几何、质量、约束、接触等物理属性;在 Simulink 中搭建控制系统逻辑框图,设计控制算法。仿真开始以后,ADAMS 把机械系统的状态变量(关键部件的位置、姿态、速度等)当作输出,实时传递给 Simulink 中的控制器。控制器根据反馈信号和设定的控制目标计算出所需的驱动力或力矩,再将驱动力或力矩作为输入返回给 ADAMS,施加到相应的驱动关节上,形成闭环仿真回路。

联合仿真使工程师可以在虚拟环境中对机械结构的动态响应、控制系统调节性能做全方位的观察和分析。机器人仿真时可以研究不同的 PID 参数对末端执行器轨迹跟踪精度的影响,车辆动力学分析时可以检验 ABS 控制器在不同路面条件下制动的效果。大大提高设计的可靠性,缩短了开发周期。

(二) 刚柔耦合系统仿真

传统的刚体动力学仿真把所有的构件都看成理想的刚体,运动过程中不会发生变形。但对于高速、轻质、大尺寸的现代机械系统,例如大型航天器展开机构、高精度机床、长臂架起重机等,构件的弹性变形及其引起的振动效应是不能忽略的,它们会对系统的定位精度、稳定性、动态性能产生显著的影响。因此刚柔耦合系统仿真技术被提出,用来解决上述问题。

刚柔耦合仿真是在多体动力学模型中,对一个或者几个重要的构件进行柔性描述。一般要进行柔性构件的模态分析或者子结构分析,用有限元分析软件得到描述弹性变形的模态信息。之后把模态信息导入到多体动力学软件中,建立柔性体模型。该柔性体模型包含构件的刚体运动信息,也用模态坐标描述其弹性变形。从而使得在系统级的动力学仿真时,能很好地考虑构件的柔性效应,并通过刚体

运动和弹性振动耦合计算,更准确地预测系统动态特性。

(三) 虚拟样机技术应用

虚拟样机技术是多学科仿真技术发展的综合与升华,它用计算机辅助设计、计算机辅助工程、虚拟现实等技术,在计算机中构建出一个和物理样机功能、行为完全一致的数字化模型。对机电一体化系统来说,虚拟样机不仅仅是一个精确的几何形状,更主要的是它把机械、控制、电气、液压等各个领域的行为模型都包含在其中,是可运行、可测试、可交互的“数字孪生体”的早期形态。

机械控制联合仿真、刚柔耦合仿真,是创建功能性虚拟样机的两个主要支撑技术。用这些技术可以模拟机电产品在真实工况下动态工作的情况,人机交互的过程以及可能出现的问题。开发人员无需生产实体零件,就可以在新设计数控机床的高速切削工况下测试加工精度、振动稳定性;可以模拟飞行器各种飞行姿态下控制舵面响应特性;还可以进行设备操作的虚拟训练。

虚拟样机技术在产品设计之初就开始起作用。在概念设计阶段用来验证设计方案的可行性,在详细设计阶段用来优化性能和参数,测试阶段可以模拟极限工况、故障场景,做可靠性、安全性的评估,从而代替部分昂贵、耗时的物理样机试验。大大降低了研发成本,缩短了产品上市时间,极大地提高了设计质量和创新能力。

三、机电液联合仿真

工程机械、航空航天、重型装备等领域因为液压传动与控制系统的功率密度大、响应速度快、承载力强等特点而得到广泛应用。机电液一体化系统把机械、电子控制和液压技术有机地结合在一起,其系统行为表现出较强的非线性、瞬态耦合特性。因此,开展机电液联合仿真对于认识和改善这类复杂系统十分重要。

(一) 液压与控制系统仿真

液压及控制系统仿真重点是液压元件动态特性描述准确,研究液压元件与控制算法的交互。液压系统由泵、阀、油缸或马达、油箱、管路等组成,内部流体流动时存在压力、流量的动态变化,伴随有压力损失、泄漏、油液压缩性、温度变化等复杂的物理现象。这些因素一起决定了液压执行机构的响应速度、输出力、平稳性。

仿真建模时要建立能够反映这些特性数学模型。伺服阀的动态响应一般用高

阶传递函数或者流量、压力、位移的非线性映射来表示；液压缸的运动取决于两腔流量差与负载的变化；管路中压力动态特性要考虑流体波动方程。控制系统根据外部指令和传感器反馈来产生控制信号，驱动比例阀或者伺服阀的阀芯运动，从而调节进入执行机构的流量和压力。联合仿真可以较好的反映出液压系统非线性、时滞特性对控制回路稳定性和动态品质的影响，有利于设计人员合理选择元件参数、改进控制策略，有效地抑制压力冲击和振动。

（二）AMESim 与 MATLAB 交互

机电液联合仿真方面，AMESim 和 MATLAB/Simulink 相结合的方案又成为了一种有效的、流行的方案。AMESim 是目前市场上最先进的、功能完备的一维多领域系统仿真软件，具有丰富的、经过验证的物理元件库，在液压、气动、热流体、机械等各个方面都有很好的表现。用户可以利用图形化的方式快速创建出物理系统模型。

AMESim 与 MATLAB 的交互主要通过两种方式实现：

1. 协同仿真接口，类似 ADAMS 和 Simulink 的联合，AMESim 可以和 Simulink 建立协同仿真连接。一般把对动态响应要求高、非线性强的液压或机械物理系统模型放到 AMESim 中，而把复杂的控制算法、信号处理以及系统级管理逻辑放到 Simulink 中。两者在仿真过程中互相交换数据，发挥各自的优势。

2. 模型导入导出：AMESim 可以将已经建好的物理系统模型编译成 S 函数模块或者功能模型单元，然后导入到 Simulink 中。于是整个机电液系统模型就可以在 Simulink 单一平台上进行仿真分析，有利于控制器的设计、代码生成以及与其它 Simulink 模型的集成。

该交互方式使工程师可以把 AMESim 精细的物理建模能力同 MATLAB 强大的数值计算、数据分析、控制设计工具箱结合起来。例如利用 MATLAB 优化工具箱对 AMESim 模型中的液压系统关键参数进行自动寻优，或者使用 MATLAB 频率分析工具评估机电液系统闭环稳定性。这就大大地拓宽了分析手段的广度和深度。

（三）复杂管路系统仿真

大型液压系统各个元件之间由管路网络连接，而管路网络本身就是一个复杂的动态子系统，管路网络本身的特性对整个系统的性能产生重要的影响。当管路较长、流速变化大、需要快速响应的时候，必须对管路系统做精确的仿真分析。

传统的集总参数模型把管路简化为简单的容性或阻性环节，没有考虑压力波在管路中的传播过程，不能准确预测水锤、压力振荡、信号延迟等现象。

复杂管路系统精确仿真一般用一维波动方程的分布式参数模型。该方法把管路离散成很多小单元，在每个单元上求解描述流体动量和连续性的偏微分方程组。特征线法是求解该类问题的经典而有效的方法。该法可以正确模拟压力波在管路中传播、反射、叠加的过程，可以准确地模拟阀门突然关闭、泵突然启动时的压力峰值，给管路强度设计、压力冲击抑制器的配置提供可靠的依据。

现代系统仿真软件自带管路模型，可以方便的考虑流体粘性、摩擦损失、管壁弹性、油液含气量等实际因素对动态特性的影响。对包含复杂管路网络的机电液系统做联合仿真，就可以对各个工况下系统的动态响应质量做全方位的评价，找出潜在的振动噪声源，保证整个系统稳定、安全、高效地运转。对飞机液压系统、大型船舶压载水系统、工程机械液压动力系统等的设计有极其重要的意义。

第七章 系统集成与性能测试

机电一体化系统集成测试，即保证机电一体化系统达到设计所要求的功能、性能、可靠性等各项指标。本章主要对硬件集成、电磁兼容设计、软件集成、系统性能测试与评价、故障诊断与维护等各方面理论及方法进行阐述，给机电一体化系统提供全方位、高效的技术支持。

第一节 硬件集成与电磁兼容设计

硬件集成和电磁兼容设计在机电一体化系统开发过程中属于重要环节，其好坏直接影响系统各个物理部分能否协同运行，也关系着系统处在复杂电磁环境之下时能否保持稳定可靠。本节对硬件的结构布局、安装工艺做了详细的分析，并且重点研究电磁干扰的机理和相应的兼容性设计对策。

一、机械结构与电气安装

机械结构与电气安装为实现机电一体化系统功能打下了基础。设计是否合理，会直接影响到整个系统性能的好坏、稳定与否以及可维护性。好的结构与安装方案在满足功能要求的同时还要考虑散热、减振、电磁兼容等各方面的因素，为系统长期稳定运行打下良好的基础。

（一）控制柜布局与布线工艺

控制柜是机电一体化系统的大脑和神经中枢，控制柜内部元器件的布置以及布线工艺对系统的稳定运行十分重要。科学合理的布置可以提高系统的美观性以及维护的便利性，同时也可以防止电气干扰和散热问题的发生，是保证系统可靠性的第一道防线。在布局设计时应该按照功能分区的原则来执行。一般会将变频器、伺服驱动器、大功率电源等发热量大的元器件放在控制柜上部通风良好的地方，便于热量散发。强电单元和弱电单元要明确分开。可编程逻辑控制器、通信模块等弱电控制元件要与接触器、继电器等强电执行元件分开布置，减小强电回

路对弱电信号的电磁干扰。元器件之间应留有一定空间,既利于散热又利于以后接线、调试、维护。

布线工艺属于控制柜集成过程中又一重要的技术。所有线缆走向都应横平竖直、层次分明,不能随意交叉缠绕。使用线槽或者导轨来布线已经成为现代电气装配的通用做法。线槽不仅可以对线束起到规范的作用,还可在物理上把强电和弱电分隔开来。布线时信号线要远离高压线、动力线;若无法避免平行走线,则应保证足够的间距或者使用金属隔板进行隔离。导线连接要牢固可靠,一个接线端子上一般只接一根导线,用合适的冷压端头压接,以最小化接触电阻,保证连接的长期稳定可靠。导线两端必须标明线号,且线号读取方向应一致,可大大提高安装、调试、故障排除的效率。

良好的接地是控制柜安全和抗干扰性能的根本保证。控制柜内应设专门的接地母排,所有需接地的设备外壳、屏蔽层、金属支架等均应通过最短的路径与接地母排相连接。保护接地线应采用黄绿双色线,线径要足够大,以保证漏电时有可靠的泄放通路。信号线屏蔽层一般采用单端接地,避免形成地环路引入干扰;接地点应选择 in 信号接收端或者干扰较小的一端。经过精心规划布局和严格布线工艺的施行,能明显提高机电一体化系统整体性能与可靠度。

(二) 元器件散热设计

在机电一体化系统中,大量的电子元器件,例如处理器、功率晶体管、电源模块、驱动器等在工作的时候会发出大量的热。如果这些热量不能及时有效地散发出去,就会对元器件的性能造成影响,缩短其使用寿命,甚至造成系统故障。因此科学的散热设计对于系统长期稳定的运行来说是非常重要的。发热量大的元器件应优先放在空气流通过路径的上游或者通风口附近,使冷空气可以先对元器件进行冷却。温度敏感的元器件(如电解电容)不能和发热量大的元器件摆放在一起。

散热方式主要有自然冷却、强制风冷和液体冷却。功率小的系统,通过改善元器件的布局,采用热传导、对流、辐射等方式可以实现自然冷却。这就要求机箱或者控制柜必须有足够的通风孔,保证内外空气的自由对流。对于功率较大、发热集中的系统必须采用强制风冷。这一般会牵涉到散热风扇和散热器的配合。散热器增大表面积以加强热交换,材质多为铝或铜,鳍片形状、尺寸都会影响散热效果。风扇选择要根据系统总热功耗、内部风阻来计算所需风量、风压,保证产生足够的气流带走热量。设计风道时要尽量使气流路径短而平滑,不能出现涡

流、死角，保证冷空气均匀地流过所有的发热元件。

（三）减振与隔离安装技术

机电一体化系统中普遍存在各种振动源，电机、风扇、泵等旋转或者往复运动的部件。振动会带来噪声，对工作环境造成影响。更为严重的是，当振动传递到精密传感器、控制器印制电路板这些敏感元件上的时候，就会造成测量信号失准，焊点疲劳断裂，连接器松动等等，从而严重影响系统的精度和可靠性。因此采取有效的减振与隔振安装技术就显得尤为重要。

减振设计的第一环就是尽可能降低振动源本身的震动。动平衡校正减小电机转子不平衡量，选择低振动设计的风扇、泵。当振动源不能完全消除时，就必须用隔离技术来切断振动源的传播途径。最常用的方法是在振动源或被保护的敏感部件的安装基座之间加装减振器。减振器种类繁多，有橡胶减振垫、金属弹簧减振器、空气弹簧等。橡胶减振器因为成本低、阻尼效果好而被广泛使用，主要用来隔离中高频振动。金属弹簧减振器对低频振动的隔离效果更好。选择减振器时需要考虑振动频率、设备重量、所需隔振率等各方面因素。对连接振动设备与固定机架的管道、线缆，采用柔性连接，即波纹管、软管、柔性电缆等，防止刚性路径传振，取得更好的振动隔离效果。

二、电磁干扰分析

随着电子技术的发展，机电一体化系统内部元器件密度、工作频率越来越高，系统所处的电磁环境也越来越复杂。电磁干扰已经成为影响系统稳定可靠性的主要因素。分析干扰源特性，认识干扰耦合途径和表现形式，是做好电磁兼容设计的前提。

（一）干扰源与耦合路径

产生电磁干扰需要满足三个要素：干扰源、耦合途径和敏感设备。干扰源指的是产生电磁能量的设备或者自然现象。机电一体化系统内部干扰源主要有：开关电源工作时产生的高频开关噪声；电机（特别是直流有刷电机、变频调速电机）换向时产生的电火花和电流突变；继电器、接触器等机械开关通断瞬间产生的电弧；微处理器、晶振等数字电路产生的高频时钟信号及其谐波。这些干扰源的共同特点就是电压或者电流变化率很大，即 du/dt 或者 di/dt 的数值很大，这也是产生电磁辐射的根本原因。

耦合路径就是干扰能量从干扰源传到敏感设备的方式。它分两类：传导耦合和辐射耦合。传导耦合是干扰信号通过共享的导线、电源线、地线或者电路板上公共阻抗来传播的。大功率电机启动时在电源线上产生的电压跌落，会通过电源线影响到同一个供电网络下的微控制器，造成其复位或者工作异常。

辐射耦合就是指干扰能量以电磁波的形式在空间中传播，被敏感设备的电路或者线缆接收。天线效应是辐射耦合的重要因素，所有的导线或者 PCB 的走线都可能作为电磁波的发射天线或者接收天线。变频器输出电缆会产生很强的电磁场辐射，如果附近的传感器信号线没有做好屏蔽，就可能会产生干扰电压，从而影响测量精度。还有依靠空间电场或者磁场相互作用的容性耦合和感性耦合，它们是近场耦合的主要形式。电磁干扰的各种耦合路径及特点如下表所示。

电磁干扰耦合路径分类表

耦合路径	传播方式	主要特点
传导耦合	通过导电介质（导线、电源线、地线）	干扰信号直接沿物理通路传播，常见于低频。
辐射耦合	通过电磁波在空间传播	干扰以电磁场形式传播，无需物理连接，常见于高频。
容性耦合（近场）	通过电场相互作用	干扰源与敏感设备间存在电容。
感性耦合（近场）	通过磁场相互作用	干扰源与敏感设备间存在互感。

透彻理解这些干扰源的特性以及各种耦合途径，是后续采取有针对性抑制措施的前提。

（二）传导干扰与辐射干扰

传导干扰和辐射干扰属于电磁干扰的两种基本形式，两者体现了干扰能量传播方式的不同。准确辨别两种干扰的机理，对诊断电磁兼容问题并采取有效抑制措施来说十分重要。传导干扰用电源线、信号线、接地线、各类互联电缆等导体来传递。干扰源产生的噪声电流或者电压通过这些导体路径直接流入敏感设备，从而影响到它的正常工作。传导干扰一般只在频率范围较窄（几十 kHz ~ 几十 MHz）的时候比较明显。按照干扰电流在导线对上流动的方式，传导干扰又可以分为共模干扰和差模干扰。差模干扰电流在信号线及其回流线上大小相等、方向相反；共模干扰电流在信号线、回流线上同向流动，以大地或设备机壳作为公共回流路径。

辐射干扰是以电磁波的形式在空间中传播，不需要电气连接。当导体中流过

高频电流或者存在快速变化的电压时,就会向周围空间辐射电磁场,产生辐射干扰。任何电路、电缆或者金属结构都可以充当天线,发射或接收电磁能量。辐射干扰的频率范围很广,一般在几十兆赫兹到千兆赫兹以上。根据场源与接收点之间的距离,辐射场又分为近场、远场。在近场区电场和磁场分量相对独立,在远场区二者互相垂直,形成平面电磁波。辐射干扰问题一般通过屏蔽、接地、改进布局布线等方法来解决。

(三) 静电放电防护

静电放电是一种常见的自然现象,即两个不同电位的物体接触或者靠得很近的时候,发生的快速电荷转移。对于高度集成的现代电子元器件,尤其是使用CMOS工艺的芯片来说,静电放电是非常危险的。人体、设备、空气流动都会产生几千伏的静电电压,静电电压所造成的瞬间放电电流和电磁场,很容易击穿半导体器件内部脆弱的栅氧化层,或者烧毁金属连线,造成永久性损坏。能量较弱的静电放电不会立即造成硬件损坏,但是会降低器件性能或者产生“隐性损伤”,使它在以后的工作中更容易失效。

静电防护属于一项系统工程,牵涉到机电一体化产品从设计、生产、运输、安装直至维护的全部过程。从设计角度看,防护的基本思想就是“堵”和“疏”。堵即用结构设计阻止静电直接接触核心电路,使用绝缘材料外壳或者改善外壳缝隙结构,增大放电路径的爬电距离。疏就是为可能侵入的静电提供低阻抗泄放通道,把静电导入大地,从而防止冲击敏感电路。一般会在输入/输出接口、按键等容易被人手接触的部位安装静电防护器件。

常用的静电防护器件有瞬态电压抑制二极管、压敏电阻、气体放电管、聚合物静电抑制器等。瞬态电压抑制二极管由于有快速的响应时间(皮秒级)和精确的钳位电压等特点,经常被用作高速数据接口的保护元件。在印制电路板设计时,这些保护器件要靠近接口连接器放置,并使它的接地路径尽可能短、宽,减小寄生电感,以获得最好的防护效果。

在生产及维护过程中要严格按照防静电规程操作。工作人员要戴防静电腕带,工作台要铺设防静电垫,所有的设备和人员都要良好接地。储存、运输敏感元器件时必须使用防静电袋或者防静电箱。经过以上综合性的保护措施之后,静电放电对于机电一体化系统所带来的危害将会被减小到最小,从而极大程度上提高产品的可靠性和耐久性。

三、电磁兼容设计措施

电磁兼容设计，即保证机电一体化系统在一定的电磁环境里能够正常工作，且不给环境中其它设备带来不能接受的电磁干扰。这就需要在系统设计之初，就综合使用各种技术手段，从根本上解决电磁干扰问题。有效的电磁兼容设计不是出现问题后再去补救，而是在设计阶段就主动预防。

（一）接地技术的应用

接地是电磁兼容设计中最为基本、最为关键的技术之一，其主要目的就是给信号提供稳定的零电位参考，给噪声电流提供低阻抗的泄放通道。不合理的接地设计不但不能抑制干扰，反而会引入共地阻抗耦合或者地环路等问题，从而加重电磁兼容状况。接地种类很多，主要有工作接地、保护接地和屏蔽接地。工作接地是电路运行的基准电位；保护接地是为了防止设备外壳带电而采取的措施，保障人身安全；屏蔽接地则是使屏蔽体能够有效终结电场线或者为感应电流提供回路。

机电一体化系统中既有模拟电路又有数字电路，它们的接地方式是不同的。数字电路信号边沿陡峭，高频分量丰富，地电流会在地线上产生较大的电压噪声。如果模拟电路和数字电路共用接地线，噪声就会耦合到模拟信号上，影响模拟电路的精度。因此普遍采用的原则是模拟地和数字地分开，即在印制电路板上分别布设模拟地和数字地的地线网络。

接地方式主要有单点接地、多点接地和混合接地。单点接地即所有地线汇集到一个物理点上，适用于低频电路（一般小于 1MHz），可以避免地环路问题。多点接地即设备或系统各部分就近接地，适用于高频电路（一般高于 10MHz）。高频时地线寄生电感不能忽略，长地线阻抗大，多点接地可获得最短接地路径，减小地线阻抗。混合接地是单点接地和多点接地的结合，低频段采用单点接地，高频段通过旁路电容或电感实现多点接地，是更加灵活高效的接地方式。

（二）屏蔽技术与滤波器

屏蔽技术和滤波器都是抑制电磁干扰的主要方式，但二者的作用机理不同，前者针对的是辐射耦合路径，后者针对的是传导耦合路径。屏蔽技术的基本原理就是用导电或导磁材料制成屏蔽体，把电磁场限制在一定范围之内，从而阻断其

传播。滤波器是一种频率选择性电路，它让有用信号的频率通过，同时抑制或者阻挡无用的干扰频率。

电磁屏蔽可以分为电场屏蔽、磁场屏蔽和电磁场屏蔽。电场屏蔽使用高电导率材料（铜、铝等）制成封闭的金属外壳，并保证良好的接地。外界电场在屏蔽体表面产生感应电荷，屏蔽体内部会产生一个和外界电场方向相反的电场，两者叠加使屏蔽体内部场强为零或者大大减弱。磁场屏蔽比较复杂，低频磁场可以利用高磁导率材料（坡莫合金）作为磁力线的低磁阻通路来旁路磁场，高频磁场则利用良导体在高频磁场作用下产生的涡流来抵消原磁场。机箱、屏蔽罩、屏蔽电缆属于屏蔽技术最常用的应用形式。屏蔽设计的核心就是保证屏蔽体的完整性，任何孔洞或者缝隙都会成为电磁波泄漏的窗口。

滤波器在电磁兼容设计里担当着“看门人”的角色，它的主要功能就是抑制传导干扰，传导干扰是指沿电源线、信号线传播的干扰。电源线滤波器是最常用的一种，一般装在设备电源入口处，既可以阻止外部电网噪声进入设备，又可以防止设备内部产生的噪声污染电网。滤波器是由电感、电容、电阻等元件组成的电路，具有低通、高通或者带通等特性。共模干扰和差模干扰需要采用不同的滤波电路结构，一般用 X 电容滤除差模干扰，用 Y 电容和共模电感滤除共模干扰。在选用及使用滤波器时，必须考虑它的额定电压、额定电流、插入损耗、源负载阻抗匹配等因素，才能发挥最佳的滤波作用。

（三）印制电路板抗干扰设计

印制电路板是机电一体化系统中电子元器件的载体和电路连接的枢纽，其设计的好坏直接影响到系统的电磁兼容性。优秀的印制电路板设计能在事前从根本上抑制干扰的产生和耦合，也是一种最经济的抗干扰措施。印制电路板抗干扰设计属于综合性工程，包含元器件布局、布线规则、层叠结构、接地处理等各方面。

元器件的合理摆放为抗干扰的设计打下基础。基本原则是按照不同的种类和速度把电路划分成模拟电路区、数字电路区、功率电路区、接口电路区等物理上相互隔离的区域，以防止相互干扰。高速元器件（晶振、处理器）应尽量靠近接口连接器，缩短高频信号路径，减小辐射。电源入口处的滤波电路和接口处的防护电路应紧挨着对应的连接器。

布线规则对于控制串扰、辐射有很重要的作用。高速信号线尽量短直，不能出现直角或者锐角走线，采用 45 度角或者圆弧过渡方式，可以减少高频反射和

辐射。时钟线、总线等关键信号线要远离输入输出线，尽量布设在内层，并用上下地平面做屏蔽。差分信号线应该等长、平行且紧密耦合，以便充分利用它的共模抑制能力。电源线宽度要根据承载电流大小来确定，尽量增大电源线和地线的宽度，减小阻抗、降低压降和噪声耦合。

层叠结构和接地处理属于印制电路板设计的主要部分。对于高速或者复杂的系统，使用多层板是必要的。典型的四层板叠层结构为信号层、地平面、电源平面、信号层。完整的地平面和电源平面可以给电流提供低阻抗的回流路径，大大减小回路面积，有效地抑制差模辐射。电源平面和地平面耦合形成的平板电容，可以给高频电流提供良好的去耦作用。每一个集成电路的电源端要放上 $0.01\ \mu\text{F}$ 至 $0.1\ \mu\text{F}$ 去耦电容来滤除电源噪声，给它提供干净的局部电源。电容的引线要尽量短，以减小寄生电感的影响。经过这样细致的设计，印制电路板以及整个系统抗干扰能力都会得到很大的提高。

第二节 软件集成与系统调试

机电一体化系统复杂性不单是由于硬件结构多样性造成的，更是由于软件系统之间深度耦合、紧密配合所导致的。软件集成和系统调试是把设计和实现联系起来的桥梁，保证各个软件模块协调工作，使整个系统在真实环境里高效稳定的运行。该过程不但是技术验证，也是性能优化的开始。

一、软件模块集成策略

在机电一体化系统开发过程中，软件模块集成就是将独立开发的软件单元组合成一个协同工作的整体。成功的集成方案可以缩短开发周期，在早期就发现接口和逻辑层面的深层次问题，保证最终系统稳定可靠，也是项目顺利交付的重要保证。

（一）增量式集成方法

增量式集成在现代软件工程中被广泛使用，有效地避免了大爆炸式集成所导致的巨大风险以及调试难题。此方法把系统功能逐步实现，每次只把少量新模块加入已经测试过的系统核心里。渐进的方式使每次集成的变量变化很小，出现问题时，错误定位的范围也被限定在最新集成的模块及其接口上，大大简化了调试

过程，提高了开发效率。

按照集成顺序的不同，增量式集成又可以分为自底向上、自顶向下、混合式三种具体的实现方式。这三种方式的特点如表所示。

增量式集成方法对比表

集成方式	描述	优点
自底向上	从最底层驱动程序和基础功能模块开始，逐层向上构建应用。	能尽早发现底层硬件接口及基础服务的稳定性问题。
自顶向下	从顶层用户界面和主控制逻辑着手，底层功能由桩函数代替。	用户可尽早看到系统的整体框架及交互逻辑。
混合式	结合前两者优点，从中间层向两端同时集成，或灵活选择起点。	兼顾底层稳定性与上层可见性，集成过程灵活高效。

不论采用什么方式，增量式集成的核心思想都是小步快跑、持续验证，即通过频繁、小规模集成和测试循环来逐步构造功能完整、性能可靠的机电一体化软件系统。

（二）驱动程序与中间件调试

驱动程序和中间件是上层应用软件和底层硬件之间的“神经中枢”，它们的好坏直接影响到整个机电一体化系统的性能基础。驱动程序调试难度大，它直接与硬件寄存器、中断、时序打交道，任何微小的错误都会造成系统崩溃或者行为异常。调试底层代码时一般要用到硬件调试工具，不能影响系统的实时运行。观察、修改内存、寄存器的状态可以验证中断服务程序响应是否及时、准确，也可以验证数据在硬件和内存之间传输的正确性。

中间件是提供标准化服务接口的软件层，调试的重点是验证接口是否正确、不同模块之间能否正常通信。尤其对实时操作系统来说，必须严格的对各个任务之间的同步、互斥机制进行测试，比如信号量、互斥锁等等，防止出现资源竞争、死锁等情况的发生。同时还要做消息队列、共享内存等通信机制吞吐量、延迟的压力测试，保证系统在高负载下可以正常通信。调试时产生的日志记录是找到问题根本原因的有效途径，它可以记录程序运行过程中重要的路径以及数据流动的全部过程，进而帮助我们找到问题所在。

（三）应用程序联调

应用程序联调属于软件集成阶段的收尾工作，其主要目的就是保证所有的上层应用模块可以协同工作，共同完成最终的用户需求以及系统功能。调试重点已

经从单个模块的内部逻辑转向模块之间接口匹配、数据流转、业务逻辑完整性验证。典型的程序一般是由人机交互界面、运动控制模块、数据采集与分析模块、状态监测报警模块等几个独立模块组成的。联调的主要任务就是检验各个模块之间的接口调用是否符合事先定义，参数传递是否正确，返回数据是否在预期范围内。

数据流的正确性是联调的又一主要关注点。在典型的机电一体化系统里，传感器数据通过驱动程序、中间件传到应用程序处理并作出决策，而控制指令又反向传到执行器。联调要对整个闭环路径进行完整的追踪，保证数据在各个环节都没有丢失、篡改或者错误解读。需要验证传感器采集到的原始数据经过标定、滤波之后，是否能够真实的反映物理世界的情况；运动控制模块发出的轨迹规划指令能否被底层正确执行，产生预期的运动效果。

为了检验系统稳定性以及鲁棒性，在联调时还要模拟出各种正常和异常的工作情况。模拟用户操作序列来检测系统的实时响应能力，采用故障信号注入方式测试系统在遇到高负荷情况时能否正常容错、报警。设计系统级集成测试用例，对所有的核心功能和关键路径进行测试，可以系统地发现单元测试阶段无法发现的一些深层次问题，最后交付一个功能正确、性能稳定、可靠协同的整体系统。

二、系统在线调试技术

软件模块初步集成之后，就要将其部署到目标硬件上进行在线调试。在线调试技术是在系统实际运行状态中，实时观察系统内部状态、分析行为的一种方法，是发现和解决软硬件交互问题的关键手段。这些技术给研究系统动态行为提供强有力的支撑，是保证机电一体化系统性能和可靠性的最后一道防线。

（一）JTAG 与在线仿真

JTAG 是国际上通用的一种测试协议，主要用于芯片内部的测试及系统内编程。在机电一体化系统调试过程中，JTAG 已经成了不可缺少的底层调试工具。调试器通过连接处理器的 JTAG 接口，可以控制 CPU 的执行过程，访问系统内存及所有的寄存器，并且不会影响系统的正常工作。硬件启动问题、底层驱动开发、复杂实时系统调试这三个方面都有很强的控制和观察能力。

使用 JTAG 进行在线仿真调试，开发者可以实现以下关键操作：

1. 可以在代码任意位置设置断点，单步执行。程序运行到断点时 CPU 就会

停止执行，开发者这时就可以查看变量值、寄存器状态、调用堆栈来分析程序在此刻的行为。单步执行可以逐行跟踪代码逻辑，观察状态的微小变化，对寻找复杂的逻辑错误很有帮助。

2. 在线仿真器在设置观察点之后，可以对内存地址或者变量的变化进行实时观测，不需要中断整个系统就可以得到数据。这对调试电机控制中 PID 调节等时间敏感型算法来说，可以最大程度地减小调试行为对系统实时性能的影响。

3. JTAG 接口也是向微控制器内部闪存或 RAM 烧录固件的常用通道。调试工具链通常集成了编程功能，使得代码修改、编译、下载、调试的循环过程变得异常高效。

（二）逻辑分析仪的使用

逻辑分析仪可以同时观测几十甚至上百个信号通道，是调试复杂数字系统、通信总线的好帮手。与示波器主要分析的是信号的模拟特性，即电压波形、噪声等不同，逻辑分析仪更多是去捕获、分析多个数字信号在时间上逻辑状态以及彼此间的时序关系。因此对于并行总线、SPI、I2C 等高速串行协议的分析，以及 FPGA 逻辑设计验证来说，逻辑分析仪的作用就显得特别重要。

使用逻辑分析仪的第一步就是正确连接探头，将探头接入要观察的信号线，并设置合适的阈值电压来区分逻辑高低电平。关键是设置触发条件，简单的可以设置为某个信号的上升沿或者下降沿，高级的可以设置成复杂的逻辑组合，例如当地址总线出现特定值且读写信号为低电平时才开始捕获数据。从而可以精准地从海量的数据流中找到所需要的瞬间，大幅度地提高了调试效率。

捕获到的数据会以时序图的形式在逻辑分析仪软件里显示出来，开发者可以看到各个信号线上的电平变化和它们之间时间的关系。利用缩放、测量光标等工具可以测量出脉冲宽度、信号建立时间、保持时间等关键的时序参数，然后与芯片手册上所要求的时序参数进行比较。现代逻辑分析仪一般都会内置协议分析功能，可以自动把捕获到的 SPI、I2C、CAN 等总线信号解码成可读的数据字节，从而使得协议层面的错误一目了然，从而快速找到通信故障的根源。

（三）串口调试助手应用

串口通信由于实现简单、可靠性高，被广泛地用在机电一体化系统中模块之间的通信、人机交互以及调试信息输出上。串口调试助手是 PC 端的软件工具，可以将嵌入式设备通过串口发送的数据显示在计算机上，也可以向设备发送自定义

义指令。

系统调试的时候,串口调试助手最直接的用途就是用作非侵入式的打印工具。开发者可以在嵌入式程序的关键位置,用串口输出变量值、程序执行情况或者错误信息。PC 端调试助手收到这些信息之后,可以以文本或者十六进制的形式显示出来,使开发者随时掌握系统内部的运行情况,对系统原有的逻辑和时序影响很小。

串口调试助手可以用来验证通信协议,也可以做人机交互的测试。开发者可以手动或者自动地向目标设备发送格式化的指令帧,观察设备的响应是否符合协议的规定,以此来检验设备命令解析和执行的功能。发送启动电机指令之后,观察电机是否按照预期转动,通过串口接收设备返回的状态信息。交互式测试法,在系统初步联调和功能验证阶段中效果很好,大大简化了测试流程。

三、常见故障诊断与排除

机电一体化系统故障诊断是一项综合性很强的工作,要求工程师具备机械、电子、软件等各方面的知识。故障可以是因为物理部件的磨损,也可以隐藏在数万行代码的复杂逻辑当中。科学的诊断流程以及排查方法,对于恢复系统功能来说十分重要。

(一) 硬件故障排查流程

硬件故障属于机电一体化系统当中最直接,最常见的一种故障。排查硬件问题应该按照由表及里、由简到繁的系统化程序进行。先看电源线是否接好,指示灯是否正常,有无明显的物理损坏,有无异常气味和声音。很多时候问题只是一个松动的接头或者烧毁的保险丝。

之后用万用表检测各个电源轨电压是否符合标称值要求,用示波器观察有无过大纹波或噪声。不稳定供电属于引起系统行为异常的常见原因。确认供电正常之后,才可以进行信号链路的排查。用示波器或者逻辑分析仪,从信号源开始逐级检查信号波形是否正常、时序是否满足要求。如晶振是否起振,复位信号是否正常,总线信号有无振铃或者串扰。

怀疑某个元器件出现故障时,最直接有效的方法就是替换法。用一个经过检验合格的备件,替换有疑点的部件,观察故障是否消失。本方法特别适合于模块化的系统,可以很快地找到故障所在。对于复杂的电路板级故障,就要借助理理

图做元件级诊断,即检查电阻、电容、二极管等元器件的参数是否正常。按照此步骤可以大大提高硬件故障定位的效率。

(二) 软件逻辑错误定位

软件逻辑错误比硬件故障更加隐蔽,它不会产生烟雾、异响等明显的故障现象,但是它会造成系统功能异常、性能下降甚至整个系统的瘫痪。定位该类错误要依靠严密的逻辑推理以及有效的调试工具。

1. 代码审查、静态分析,在深入调试之前对代码进行审查,是初步查找问题的一种方法。分析出故障代码,在代码中查看是否有明显的逻辑漏洞、边界处理不当、变量未初始化或者指针被误用等问题。利用静态分析工具可以对代码库进行扫描,找出编码缺陷、接口使用不一致、违反编码规范等问题,在程序运行之前就消除一批潜在的错误。

2. 动态调试与日志分析,当静态分析不能发现问题时,就进入动态调试阶段。使用 JTAG 或者在线仿真器设置断点,在程序执行到可疑代码段的时候暂停,然后单步执行,查看变量的值以及执行路径是否符合预期。对那些不容易复现的、与时间有关的复杂错误来说,详细的日志记录就显得尤为重要。在代码重要的节点上添加日志输出,记录程序运行时的状态、数据、决策流,故障发生之后,通过分析日志文件就可以找到问题的根源。

3. 分治法和假设验证,对于复杂的软件系统可以使用分治策略将问题分解。通过注释掉部分功能模块或者用简化的桩函数替换它们,看故障是否仍然存在,从而逐步缩小问题范围。其核心就是提出假设,用实验来验证或者推翻这个假设。如果怀疑某个算法模块造成数据异常,可以将该模块暂时替换成直接返回固定正确值的函数,如果系统恢复正常,就说明问题出在该算法模块内部。

(三) 通信故障的分析与修复

通信是机电一体化系统各个子系统之间的联系纽带,通信故障会导致系统功能解体,产生严重后果。通信故障分析一般按照 OSI 七层模型的思路,从物理层开始,逐层向上查找。物理层常见的问题有,线缆连接不良,断路,短路,接插件氧化,终端匹配电阻错误。这些问题可以利用万用表做通断测试,也可以用示波器观察信号波形是否出现明显的失真、衰减或者反射来诊断。

数据链路层主要问题有数据的成帧、检查、同步等。使用逻辑分析仪或者专用协议分析仪,可以获得总线上的原始数据流。检查帧的起始位、停止位是否正

确，地址信息是否匹配，CRC 或者校验和计算是否无误。频繁出现的错误帧一般都表明总线上存在严重的干扰，或者某个节点的发送器有故障。根据错误类型可以更准确的找出故障。

最高层应用层的故障是由通信协议本身的内容所引起的。即使底层数据传输完全正确，如果发送方和接收方对数据的解析方式不一样，也会造成通信失败。此类问题需要对照协议文档仔细核对收发双方指令格式、数据类型、字节序、命令与应答的逻辑流程是否完全一致。利用串口助手等工具进行一方收发测试，可以检验应用层协议的实现是否正确。

第三节 性能测试与评估标准

对机电一体化系统进行全方位、准确的性能检测与评价，是检验设计目的是否实现、保证系统质量与可靠性的过程。不但直接影响系统能否达到预期的功能需求，还会对系统的市场竞争力以及全生命周期的价值造成长远的影响。

一、系统精度测试方法

精度是衡量一个机电一体化系统性能好坏的重要指标，它集中体现了机械结构、驱动单元、传感技术、控制算法等各个方面的设计和制造水平。准确的测试方法给系统量化评价、提高系统精度提供可靠的依据。

（一）几何精度检测

几何精度是系统的基本静态特性，主要用来评价系统在无运动或者低速运动状态下，各个组成部件的形状、尺寸、相对位置、方向的准确性。几何精度检测一般要等到系统组装完毕后才进行，是动态性能测试不可缺少的先决条件。检测的内容主要是构成系统运动基准的导轨直线度、工作台面平面度、各运动轴之间的垂直度或平行度等。这些参数决定着系统在工作空间内定位和轨迹精度的好坏。

检测需要高精度的测量仪器，激光干涉仪、准直仪、精密水平仪、标准方尺等。检测过程必须严格按照国际标准 ISO230 系列或者国家标准 GB/T17421 系列的规定进行，这些标准对各项几何误差的定义、检测工具、环境条件以及数据处理方法都有详细的规定。检测某轴的直线度时，一般把反射镜固定在运动部件上，沿该轴的全行程移动，用激光干涉仪记录垂直于运动方向的位移偏差，以评定直

线度误差。

全面的几何精度检测可以发现制造公差、装配应力、部件变形等造成的原始误差。静态误差属于系统误差的主要来源之一，如果不加以控制和补偿的话，它们在动态运行过程中会被放大，对整个系统性能造成极大的影响。因此高标准的几何精度检测与调整，是保证机电一体化系统达到高精度性能的第一步，也是进行误差补偿、提高系统稳定性的依据。

（二）位置精度与重复性测试

位置精度、重复性是评价机电一体化系统尤其是数控机床、工业机器人等装备的重要性能指标。位置精度也称为绝对定位精度，是用来衡量运动部件实际到达的位置和指令目标位置之间差值的指标。重复性，即重复定位精度，是指系统在相同的条件下重复定位到同一个目标点的时候，实际位置的离散程度。它可以用来衡量系统的稳定性以及一致性。一般情况下系统的重复性比绝对定位精度要好。

测试过程一般使用激光干涉仪、球杆仪或者高精度光栅尺等设备，在恒定的环境温度下进行，避免热漂移。控制系统在某个轴上进行各个目标点的单向或者双向往复运动。激光干涉仪等测量设备记录下每次定位时实际位置与指令位置的偏差。根据采集到的大量数据，按照 ISO 或者国家标准（对于工业机器人可以参照 GB/T 12642 标准）中规定的方法，统计分析得到定位精度、重复定位精度、反向误差（或背隙）等一系列重要的指标。测试结果可以对系统的定位能力进行量化，也可以暴露传动系统间隙、摩擦非线性、伺服控制不稳定等潜在的问题。

（三）动态轨迹精度测量

动态轨迹精度测量就是评价系统在执行连续的运动轨迹（例如直线、圆弧、复杂的曲线）的时候，实际的运动轨迹和指令运动轨迹的符合度。动态轨迹精度与静态位置精度不一样，它把伺服驱动系统动态响应特性、多轴插补算法协调性、机械结构振动、运动过程中各种扰动因素综合考虑。它也是评价系统在高速、高加速度下加工或者作业质量的重要指标。

测量动态轨迹精度的方法主要有球杆仪测试、激光追踪仪测量。球杆仪可以测量精密伸缩杆两端球头中心运动过程中的微小距离变化，从而可以快速诊断出伺服失配、垂直度误差、反向间隙、径向跳动等误差源。它适合于圆形轨迹的检测，根据测量得到的极坐标偏差图可以直观地看出某个形态的误差曲线，从而迅

速找到问题所在。对更大范围或者更复杂的三维轨迹测量一般采用激光追踪仪系统。激光追踪仪可以实时跟踪运动部件上的靶标，并可以用较高的精度、采样率记录运动部件在空间中三维坐标的变化情况，因此可以很精确地复现运动轨迹。

对测量数据进行分析可以得到动态轨迹精度评价的重要参数。这些参数给优化控制算法、调节伺服参数、改善机械结构提供重要的实验依据，是提高系统轮廓加工精度、高速作业性能的重要途径。评估中所关注的核心指标有以下几项

1. 最大轨迹偏差：在整个运动过程中，实际轨迹偏离指令轨迹的最大法向距离。
2. 轨迹轮廓误差：综合评价实际轨迹形状与指令形状的相似度。
3. 过冲和拐角误差：在轨迹方向急剧变化处（如尖角），由加减速及系统惯性导致的轨迹偏移。

动态轨迹精度的提高，是机械设计、驱动技术以及控制策略三者共同配合所组成的一个综合性系统工程。精确的测量与分析是协同优化的基础，能帮助设计者认识系统的运行机制并采取措施来加以改进，最终达到提高速度及精度的目的以适应工业对精度要求的严格提升。

二、系统动态性能测试

动态性能表示的是机电一体化系统对于指令的快速响应、稳定跟踪能力，直接影响着系统的生产效率以及加工质量。经过一系列的动态测试，可以对系统的控制回路以及机械特性进行全方位的评价，并加以改善。

（一）阶跃响应测试

阶跃响应测试属于机电一体化系统动态特性评价中的一种基本手段。给系统输入阶跃信号（即瞬间把输出由零值变成常数值），用输出（位置、速度等）变化的情况来判定系统的动态特性。阶跃响应曲线能直接反映系统的稳定性、响应速度、阻尼等性能，也是调试伺服控制系统非常有效的手段。

分析阶跃响应曲线时主要考虑以下性能指标，上升时间是输出从阶跃响应终值的 10% 上升到 90% 所需要的时间，它体现的是系统的响应速度。超调量就是响应峰值比最终稳态值大多少的百分比，超调量过大说明系统阻尼不够，容易产生振荡甚至造成系统不稳定。调节时间，又称稳定时间，是指输出进入并保持在终值某一允许误差带（一般为 $\pm 2\%$ 或 $\pm 5\%$ ）内所用的最短时间，是反映系统

快速性和稳定性的综合指标。通过对这些指标进行测量、分析可以得到系统的阻尼比、自然频率等内在参数，给优化控制器增益、改善系统动态性能提供直接的依据。

（二）频率响应测试

频率响应测试主要是对系统在不同频率的正弦输入信号下，系统对于这些信号的响应特性进行分析，从而判断系统在频域内动态性能的好坏。该方法对于了解系统的带宽、稳定性裕度、抗干扰能力等都有极其重要的作用。测试时给系统输入一系列频率从低到高连续变化的正弦信号，测量输出信号的幅值和相位相对于输入信号的变化情况。

将不同频率下的幅值比（增益）和相位差画成曲线，就得到系统的波特图。波特图为频率响应分析的主要工具。由幅频特性曲线可知系统可以跟踪的信号频率范围，这就是系统的带宽。带宽越宽，系统响应速度就越快，能处理的频率变化率就越高。相频特性曲线可以反映出输出信号比输入信号滞后的程度。

通过波特图可以得出两个主要的稳定性指标：增益裕度和相位裕度。增益裕度是相位滞后达到 180 度时，系统增益距离临界不稳定点的裕量；相位裕度是增益为 0dB 时，相位滞后距离 180 度的裕量。两个裕度值越大，系统就越稳定，对外部扰动和参数变化的鲁棒性也越好。频率响应测试给控制系统设计者提供系统化的角度，使设计者能设计、调试反馈控制器，保证系统在满足快速性的同时拥有足够的稳定储备。

（三）加减速性能测试

加减速性能测试是对机电一体化系统速度快速变化过程中，动态特性以及精度保持情况的一种检验。该项测试对于需要频繁启停、快速定位或者执行高速轮廓运动的拾放机器人、高速加工中心等应用场合有非常重要的意义，它直接影响工作效率和运动平稳性。测试的主要目的就是检验系统是否可以按照给定的最大加速度、减速度平稳准确地完成速度的平滑过渡，不产生过大的冲击、振动或者运动误差。

系统按照预设的加减速曲线（S 形或者线性），由静止加速到给定速度或者从高速减速到停止状态。使用激光干涉仪或者高精度的编码器等传感器，实时检测系统在加减速过程中的位置或者速度跟踪误差。通过数据的分析可以得出伺服驱动器的扭矩输出能力、机械传动链的刚性以及控制算法对于惯量变化的适应情

况。良好的加减速性能即在速度变化区间内跟踪误差小、振动抑制效果好、速度转换点处平滑无冲击，有利于延长机械部件寿命、保证最终加工或作业质量。

三、可靠性与寿命测试

可靠性与寿命测试就是对机电一体化系统在规定的条件下、规定的时间段内保持其功能能力的一种评价。该类试验模拟实际或者严苛的工作环境，目的是预测系统长期稳定性和潜在的故障模式，是保证产品质量、降低全生命周期成本的重要环节。机电一体化系统可靠性与寿命测试的方法有各种，每一种方法都有其不同的目标和侧重点，具体情况见表。

常见可靠性与寿命测试方法概览表

测试类型	主要目的	关注指标 / 原理	应用场景 / 价值
平均无故障时间	评估可修复系统长期可靠性	两次故障间平均工作时间	预测寿命、维护计划、备件需求
环境应力筛选	剔除早期潜在缺陷	通过高于正常应力加速缺陷暴露	提高产品出厂可靠性，降低早期失效率
老化测试	模拟产品寿命退化	在加速应力下观察性能退化	预测有效寿命、确认耐久性
极限测试	发现设计操作与破坏极限	逐步施加应力，主动寻找薄弱环节	提高产品稳健性，指导设计改进

（一）平均无故障时间

平均无故障时间属于衡量可修复性机电一体化系统可靠性的主要参数。它是产品两次相邻故障之间正常工作的时间长度，一般用小时表示。MTBF 值越大，系统可靠性就越高，发生故障的可能性就越小。该指标可以给用户评价系统长期运行的稳定性，制定维护计划，预估备件需求提供重要的统计依据。

MTBF 的计算要依靠长时间的运行数据以及故障统计。基本计算公式就是总运行时间除以总故障次数。假设 100 台设备连续工作 1000 小时，发生 5 次故障，则总运行时间为 $100 \times 1000 = 100000$ 小时，MTBF 为 $100000 / 5 = 20000$ 小时。MTBF 是一个统计平均值，它表示的是大量同类产品的故障率的倒数，不能说明单台设备可以无故障地运行多久。

在产品的设计阶段，可以采用可靠性预计的方法，对系统中各个元器件的失效率进行分析，从而估计出整个系统的 MTBF。而在生产、使用阶段，现场收集的

数据所得到的 MTBF 值更能反映产品实际使用中可靠性的水平，可以为后面产品的改进设计提供依据。

（二）环境应力筛选试验

环境应力筛选试验是在产品出厂前，给产品施加高于正常工作应力的环境及电应力，在较短的时间内暴露并剔除产品元器件、材料、制造工艺等各方面的潜在缺陷（即早期故障）的一种工艺方法。其目的不是破坏产品，而是在可控的应力范围内加快缺陷的暴露，把在使用初期就可能出现的故障提前在工厂内部解决，从而提高交付产品的可靠性。

常用的环境应力筛选应力组合主要是快速温度循环和宽频随机振动。温度循环可以激发由于材料热膨胀系数不同、虚焊、连接不良等原因引起的缺陷。随机振动可以发现结构连接不牢、零部件松动、电路板裂纹等机械结构上的缺陷。应力种类、强度、作用时间、循环次数等参数要按照产品特性、技术要求、成本效益精心设计、裁剪，一般参照 GJB1032A 等标准。

环境应力筛选试验的核心思想是“筛选”而不是“测试”，它并不是为了评定产品的性能指标而存在的，而是作为一道生产质量控制的工序。在不同的层次上（板级、单元级、整机级）做环境应力筛选，可以以较低的成本定位并修复故障。成功的环境应力筛选可以明显降低产品早期的失效率，使产品交付时就进入到故障率很低的偶然故障期，从而大大提高用户的满意度和企业的信誉度。

环境应力筛选根据目的及所处阶段不同，可以分为多种。常规筛选是最常用的方法之一，主要用来剔除早期故障，但是不建立可靠性指标的定量关系。定量筛选要同筛选效果、成本、可靠性目标形成定量联系。高加速应力筛选是在高加速寿命试验确定产品操作极限、破坏极限之后，用远大于常规筛选的应力水平进行快速筛选的过程，效率非常高。选择和使用这些方法，就体现出现代可靠性工程由被动处理故障转向主动预防、提高产品稳健性的根本转变。

（三）老化测试与极限测试

老化测试、极限测试，都是用来评定及改进产品长时间的可靠性和稳定性。它们在严苛的条件下研究产品的极限性能以及存在的缺陷。

老化测试，尤其是加速老化测试，主要是模拟产品在使用过程中性能退化或者失效的过程，在较短的时间内完成。在高温、高湿、满负荷运转等加速应力下进行产品老化试验，可以加速材料的老化，元器件参数的漂移等各种物理化学的

变化，从而预测产品在正常的工作状态下产品的寿命以及性能稳定性。极限测试中高加速极限试验属于比较激进的一种测试方式。其目的不是模拟寿命，而是通过逐步增加应力（温度、振动、电压等），主动发现产品的操作极限和破坏极限，可以快速找到产品设计、制造上最薄弱的环节。

1. 老化测试结果可以用来检验产品耐久性是否符合设计要求，也可以给保修期限、维护周期的确定提供数据支持。

2. 极限测试发现的设计裕度不足，给工程师指明了改进的方向。经过迭代设计之后，产品对于未预料到的应力能够承受的更多。

第八章 现代设计方法与案例分析

信息技术、人工智能、网络通信技术迅猛发展之时，机电一体化系统的设计理念及方法也正在发生着深刻的变革。现代设计已经不再只是传统机械、电子、控制理论的简单叠加，而更加注重多学科技术的深度融合、系统智能化水平、网络化协同能力、全生命周期可持续性，目的是创建更高效、更智能、更绿色的机电一体化系统。

第一节 智能化与网络化设计方法

智能化、网络化已经成为现代机电一体化系统设计的主要驱动力，二者一起为新一代的制造技术以及产品的创新打下了基础。利用先进的各种人工智能、物联网、大数据等技术，系统不但可以实现自动化操作，而且具有感知、学习、决策、协同的能力，使机电产品由原来的“有用”型产品转变为现在的“好用”型、“智用”型产品，从而改变制造业的发展格局。

一、机电系统智能化设计

机电系统智能化设计就是把先进的传感技术、智能算法和控制理论融合起来，使系统具有自主感知、决策、执行的能力。它既是自动化程度的提高，又是系统本质上的进化，使系统可以适应复杂多变的工作环境，实现性能优化，并且具备一定的自我诊断和修复能力，这是提高机电产品核心竞争力的重要手段。

（一）机器视觉引入与集成

机器视觉属于实现机电系统智能化的重要技术之一，它使设备拥有比人眼更好的感知和判断能力。采用高分辨率相机、图像采集卡、图像处理软件系统进行机器视觉，可以准确地对工作对象、环境进行识别、定位、测量和缺陷检测。机电一体化系统里，机器视觉的应用不是简单的叠加，而是一项复杂的系统工程，它要求光学系统、电子成像器件、机械执行机构、控制系统紧密配合，保证视觉

信息及时、准确地传送到控制核心。

其集成效果决定系统智能化程度的好坏。机器视觉系统控制机械臂在生产线上做精准的抓取、放置，定位精度和响应速度都会对生产效率造成影响。在质量检测阶段，高速线阵相机加上定制光源可以对产品表面的微小瑕疵进行拍照，然后利用图像分析算法对瑕疵进行分类并剔除。集成应用之后，人工重复劳动被替代了，检测的精度和一致性提高了很多，产品质量稳定性也得到了保证。因此机器视觉的引入和集成设计要考虑具体的场合、检测精度、处理速度、控制系统配合等各方面因素，是实现生产过程智能化的重要手段。

（二）深度学习在控制中的应用

深度学习技术依靠很强的非线性映射、特征提取能力，给解决传统控制方法难以应对的复杂机电系统问题打开了新的途径。它不同于依靠精确数学模型的传统控制理论，可以对大量的运行数据进行自主学习，得到系统动态特性以及内在规律，进而建立高精度的预测与控制模型，特别适合于模型未知、强非线性、多变量耦合的复杂系统。深度学习在机电系统控制上的应用，由理论变成了实际。

其应用主要体现在以下几方面，系统辨识与建模方面，可以采用循环神经网络或者长短期记忆网络等结构，从传感器采集的时间序列数据中学习系统动态特性，创建数据驱动的系统模型，为之后控制器的设计打下基础。智能决策和控制策略的产生有巨大的潜力，主要是深度强化学习。它把深度学习的感知能力和强化学习的决策机制结合起来，让智能体（控制器）同环境（受控对象）经由不断的交互与试错，学会并得到最佳的控制策略，从而达成机器人自主导航、生产过程参数动态调整等繁杂的任务。

深度学习也被用来做机电系统的故障诊断以及预测性维护。对设备运行时产生的振动、温度、声学等信号进行深度特征提取，用卷积神经网络等模型识别设备早期故障的征兆、预测可能的失效模式，将传统的定期维护变成基于状态的预测性维护，提高了设备的可靠性、利用率，降低了维护成本。深度学习正在成为提高机电系统控制智能化水平的重要技术。

（三）自适应与自学习系统

自适应、自学习系统是机电系统智能化的主要体现，在运行过程中，能够对系统内参数变化或外界环境干扰进行自动调整，使控制器参数或结构一直处在最

佳或者接近最佳状态，从而保持最优或者准最优的性能指标。因此机电系统不再受固定的工作条件限制，提高了系统的鲁棒性以及环境适应性，是实现高级智能化的重要环节。

自适应控制系统的核心就是它的在线参数估计或者性能评价机制，它可以根据系统的输入输出数据实时调节控制器的参数。模型参考自适应系统，就是将实际系统的输出与理想参考模型的输出进行比较，通过调整参数来使系统的输出逐步接近参考模型。该方法在航空航天、过程控制等地方都有应用，可以解决飞行器质量变化或者化工反应过程中参数漂移的问题。

自学习系统则可以进一步，不仅能够调节参数，还能依靠与环境的交互来积累经验，改进自身的控制策略或者知识库，体现出类似人类的学习行为。强化学习是实现自学习控制的一种典型方法。系统通过试错来探索不同的行为会带来什么样的奖励或者惩罚，并据此来更新决策逻辑，最终学会在某种环境里怎样才能最大化长期累积奖励的行为策略。自学习系统可以让机器人自行掌握抓取各种形状物体的能力，也可以使机器人在未知的地形中规划出路径。因此在机器学习的过程中，电机控制系统就可以从经验中获取知识，进而不断进化以适应新的任务和挑战，表现出更高的自主性、智能程度。

二、网络化制造技术

网络化制造技术就是利用信息通信技术，把地理上分散的制造资源、设备、人员、信息系统连接起来，形成一个协同工作、资源共享的制造网络。它打破了传统制造模式里时间、空间的束缚，实现了设计、生产、经营、服务等各个环节的敏捷响应、高效协作，是制造业向服务化、全球化、智能化方向发展的技术支撑。

（一）工业互联网架构

工业互联网是实现网络化制造的基础设施，它用泛在的网络形式来构建一个全产业链、全价值链的网络，把机器、物料、人员、数据、信息系统有机地结合在一起。一般智能制造的结构分为三个层次，各层各自承担自己份内的事情。工业互联网架构的功能、关键技术和价值见以下表格。

工业互联网架构主要层次概览

层次	核心功能	关键技术 / 组件
边缘层	设备连接与数据采集，边缘计算	传感器、执行器、工业总线、5G、TSN、嵌入式系统
平台层	数据汇聚、存储、分析、应用开发与管理	大数据引擎、AI 算法库、数字孪生建模、云计算基础设施
应用层	面向特定工业场景的软件服务	生产监控、设备健康管理、能源优化、供应链协同、远程运维

1. 边缘层是工业互联网架构的基础，主要是对物理世界中的各种工业设备进行连接。边缘层通过集成传感器、执行器、嵌入式系统、各种工业总线、无线通信技术（5G、TSN）等，可以采集生产现场大量的异构实时数据，即设备状态、工艺参数、环境信息等。边缘计算可以部分地把数据处理、决策处理放置在数据源旁边，减小网络延迟，减少云端的运算量，保证控制的及时性。

2. 平台层：平台层相当于工业互联网的大脑，在云计算基础设施之上建立起来，给上层应用提供可扩展的开发和运行环境。这一层把边缘层传来的大量数据收集起来，有很强的数据存储、管理与分析能力。依靠大数据处理引擎、人工智能算法库、数字孪生建模工具等主要部分，平台层可以对工业数据进行深度挖掘和分析，可以完成复杂的建模仿真、优化、故障预估、决策支持，是工业智能应用创新的主要载体。

3. 应用层是面向最终用户的应用层，给不同的工业场景提供各种软件服务。平台层所提供的能力可以迅速创建并部署各种工业应用，生产过程监控、设备健康管理、能源优化、供应链协同、远程运维服务等均可以在该层创建和部署。这些应用是以软件即服务的形式提供给用户使用的，用户根据自身需要选择性的订阅使用，极大地降低了企业应用先进技术的成本，也提高了制造业的数字化转型速度以及商业模式创新。

（二）远程监控与维护技术

远程监控与维护技术属于网络化制造的重要部分，它依靠物联网、云计算、通信技术，使技术人员可以冲破地理束缚，对散布在世界各地的设备实施实时状态监测、故障诊断并给予维护指导。这项技术改变的是传统的售后服务方式，由原来的被动现场响应转变为主动的、以数据为依据的预测性服务，给设备制造商以及用户带来了极大的价值。在设备上安装各种传感器，采集设备运行时的振动、

温度、压力、电流等重要参数，然后通过网络实时上传到云端监控平台。

在监控中心，数据分析软件对大量的数据进行处理，并以可视化的形式呈现出来，技术专家就可以清楚地看到每台设备的健康状况。当检测到数据异常或者偏离正常工作区间的时候，系统就会发出警报，促使维护小组提前介入，防止小故障发展成重大事故。结合机器学习、人工智能算法对历史和实时数据进行分析，能发现故障的潜在规律，达到预测性维护的目的。即系统可以预知设备部件的失效时间，在最佳的更换或维修的时间窗口内进行备件的更换或者维修，从而最大程度地减少非计划停机时间，提高设备综合效率。

设备出现故障的时候，远程维护技术就会起到关键的作用。利用 AR 眼镜等智能终端远程专家可以第一人称的方式查看现场情况，把维修手册、电路图、操作指令等信息叠加到现场技术人员的视线里，实现手把手式远程指导。该方法有效地解决了现场技术人员缺乏经验的问题，大幅度缩短了故障排除时间，降低了差旅费用。远程监控和维护技术可以提高服务效率和服务质量，也可以产生新的商业模式，即“设备即服务”，从而成为提高企业核心竞争力的重要途径。

（三）云制造与大数据分析

云制造是以服务为中心、网络化的智能化制造新模式，它把云计算的思想应用到制造业。在这种模式下所有的制造资源与能力，比如设计软件、加工设备、生产线、专家知识等都会被虚拟化并且封装成云服务，然后通过云制造平台进行统一的管理调度。企业或者个人用户可以像使用水电一样，通过网络按需获取和使用服务，从而达到制造资源社会化共享、高效利用的目的。云制造冲破了传统企业组织边界，可以迅速创建起动态的、跨企业的虚拟生产链，来应对个性化、小批量、快速变化的市场需求。

大数据分析对云制造来说非常重要。云制造平台把设计、生产、供应链、销售、运维等全生命周期内所有异构数据汇集在一起，这些数据就是宝贵的“数字石油”。大数据分析技术对这些数据进行深度挖掘和智能分析之后，可以发现数据背后隐藏的规律、关联以及趋势，从而给制造全过程的优化决策赋予科学的依据。根据历史订单、市场趋势数据等可以预测未来产品需求，进而指导企业生产计划、库存管理。

生产过程中，通过对设备传感器数据的实时分析，可以达到对工艺参数动态优化的目的，进而提高产品质量和生产效率。整合供应链各个环节的数据，可以

达成物料需求精准预测和物流路径的优化,从而缩减供应链成本。大数据分析可以促进产品创新,对用户使用数据、反馈信息加以分析,企业就可以更深层次地认识用户需求,对产品实施改进完善,并寻找到新的市场机会。云制造同大数据分析融合起来,正在促使制造业由原来的要素驱动模式,向数据驱动的智能化模式发生深刻转变。

三、数字孪生技术

数字孪生技术是物理世界与数字世界深度融合的重要使能技术,它创建物理实体的高保真虚拟模型,依靠实时数据实现虚实双向映射和交互。它不但是简单的物理对象的3D可视化,而且是一个集多学科、多物理量为一体的动态仿真系统,可以模拟、预测、诊断、优化物理实体全生命周期的内在和外在状态。

(一) 物理实体与虚拟模型映射

数字孪生的基础就是创建物理实体和虚拟模型之间准确的、动态的映射。它不单是传统三维建模的一种形式,它不但是一个几何形状、尺寸、拓扑关系和实体高度一致的实体,而且更重要的是它承载着物理属性、行为规则、性能参数。这就意味着模型要融合材料力学、热力学、流体动力学、电磁学等多学科的知识,才能正确地描述物理对象在真实环境中内在机理和响应规律。发动机数字孪生模型要包含所有零部件的精确几何模型,还要包含各个部件的材料属性、装配关系,还要嵌入燃烧、传热、润滑等复杂的物理方程。

由实到虚的映射,物联网传感器实时采集物理实体的运行状态(温度、压力、振动、转速等)数据,并且使虚拟模型的状态同物理实体一致。所以虚拟模型不再只是静态的数字档案,而是动态鲜活的“数字克隆体”。由虚到实的映射就是用虚拟世界中仿真、分析、优化的结果来指导和控制物理实体。

(二) 实时数据交互与预测

实时数据交互是数字孪生的生命线,把物理世界与虚拟世界连接起来。数字孪生依靠部署在物理实体上各种传感器以及全流程物联网系统,不断获取对象自身状态数据和外部环境变化数据。高速低延迟的数据流被实时传送到虚拟模型当中,保证虚拟世界同现实世界精准同步的镜像。实时双向数据流动,使得物理世界里任何细微的变化都可以立即在虚拟模型上反映出来,为深层次的分析 and 决策打下了基础。

数字孪生依靠实时数据有很强的预测能力。它不但是历史数据的记录，当前状态的反映，而且是未来的“预言家”。将实时数据注入内嵌有机理模型和数据驱动模型（机器学习算法）的虚拟环境，在数字孪生环境下可以实现高保真动态仿真，对物理实体未来一段时间的行为和性能发展情况进行预测。可以模拟出各种情况下设备工作的状况，预测重要零件剩余寿命；也能模拟整条生产线改变工艺参数后产出量的变化，来判断改进措施的可行性。

预测能力把传统的“事后分析”、被动响应转变为“事前预测”、主动干预。数字孪生预测到潜在故障风险或者性能下降趋势的时候，系统就会发出预警并提出预防性维护的建议，从而避免由于非计划停机造成的巨大损失。生产运营中通过各种生产计划的虚拟推演、结果预测，从中选出最优方案进行实施，达到资源最优配置、生产效率最大化的目的。把实时数据交互同预测能力融合起来，数字孪生就由原先的单纯监控系统，转变为智能决策、前瞻性管理的主要方式。

（三）全生命周期管理应用

数字孪生技术最值钱的应用之一就是它贯穿于产品设计、制造、运维、报废回收的全过程。它通过建立一条不断演变、不断完善、动态的数字主线，把以前被割裂开的环节连接起来，使数据在全生命周期里可以自由流动、可以追溯、可以增值，给各个阶段决策的优化提供前所未有的支持。

设计研发阶段工程师可以采用数字孪生的虚拟样机多种方案的仿真，在虚拟环境下模拟产品极端状况下的性能，在物理样机制作之前发现并修正设计缺陷，可以大幅度地缩短研发周期、降低创新成本。车间数字孪生体可以进行实时监测，也可以进行仿真优化。把实际的生产数据同虚拟模型融合起来，就能达成生产计划动态调度、工艺参数自动调节并实现质量问题实时追溯分析的目的，从而保证生产过程高效稳定。

产品的运行、维护阶段数字孪生的价值才真正体现出来。产品运行状态数据实时上传到其数字孪生体上，由企业为客户提供的远程健康检测、故障预测与诊断以及性能优化等一系列增值服务。数字孪生找到故障点以后，可以用增强现实给维修提供指导来提高维修效率。当产品生命周期结束的时候，数字孪生体已经记录下了产品从设计、制造、材料使用、使用历史的所有数据，为产品的回收、再制造、材料循环利用提供准确的依据，有力地支撑了循环经济、绿色制造。

四、绿色设计方法

绿色设计又叫生态设计,是把环保、资源利用的思想贯穿于机电一体化系统全生命周期的一种设计方法。其主要目的就是满足产品功能、性能、成本等要求的基础上,尽可能地减少产品从设计、制造、使用到报废处理全过程给环境带来的负面影响,实现经济效益和环境效益的统一。

(一) 轻量化设计技术

轻量化设计属于绿色设计方法的重要组成部分,它的主要目的就是,在保证甚至提高机电产品性能和安全性的基础上,尽可能减轻产品自重。交通工具、机器人、各种移动设备,轻量化直接决定能源消耗的高低以及运行效率的好坏。汽车重量每减轻 10%,燃油消耗就会减少 6% 到 8%,工业机器人臂膀越轻,加减速性能越好,工作节拍越快,对驱动电机功率的需求就越小。

轻量化设计有三种途径。结构优化设计是用拓扑优化、形貌优化等先进的计算机辅助工程分析技术来进行零部件结构创新设计。此方法在满足承载和刚度要求的同时,去掉多余材料,找到最优的材料分布方案,设计出仿生、高效的承力结构,如中空结构、点阵结构。使得材料的使用效率最高,用最少的材料来达到所需的功能。

采用轻质高强新材料,用铝合金、镁合金、钛合金、高强度钢、碳纤维复合材料等先进材料代替传统普通钢材,是实现轻量化的一种直接有效的方法。这些材料的比强度、比刚度更高,在减轻重量的同时还能保证或者超过原有的机械性能。设计时要充分考虑新材料加工工艺性、连接技术、成本等因素,做出综合性的选材和设计决定。先进制造工艺的应用也给轻量化提供了一种可能,例如使用 3D 打印(增材制造)技术制造出传统工艺无法实现的复杂优化结构,实现结构与功能的集成,达到减重的目的。

(二) 节能控制策略

机电一体化系统全生命周期内使用阶段的能源消耗一般占据绝大部分,在设计阶段就植入高效的节能控制策略,对实现绿色设计目标十分重要。节能控制策略就是通过对系统的运行方式和能量转换过程的改善,使系统完成所要求的工作,并把能量消耗降到最低。

1. 能量优化和再生利用。很多机电系统在工作的时候伴随着能量的转化与浪

费, 频繁的启停、加减速的情况之下更为明显。节能控制策略就是改善能量流动的途径。对电机驱动的系统来说, 优化运动曲线规划, 减少不必要的加减速过程, 可以减小峰值功率, 降低总能耗。对带有制动过程的系统, 例如电梯、电动汽车、起重设备等, 可以采用能量再生技术。制动或者减速时, 将系统巨大的动能或者势能通过电机转换成电能, 并回收电网或者储能装置(电池、超级电容等)中, 供系统再次加速时使用, 大大提高了系统的整体能量效率。

2. 待机耗电控制、智能启停。许多设备在非工作状态时所消耗的待机功耗, 也不能忽略。先进的节能控制策略带有精细化的电源管理功能。系统根据设备当前的负载情况和任务需求, 在设备空闲或者负载低的时候自动切换到低功耗的休眠或者待机模式, 关闭不需要的小系统或者外设。新的任务指令到达的时候, 系统可以很快被唤醒, 进入全速工作状态。根据按需供能的原则, 可以有效地减少能源在无效等待时间里的浪费, 积少成多, 节能效果明显。

(三) 材料回收与环保设计

材料回收、环保设计是绿色设计理念在产品生命周期末期的体现, 即要求设计师在产品开发之初就要对产品的拆卸、回收、再利用以及最终处理问题做出系统考虑。其目的在于最小化废物的环境污染, 提高资源循环利用效率, 形成物质闭环的流动系统。设计目标就是提高产品的可回收率, 优先选用单一的、可回收的或者可生物降解的环保材料, 不用含铅、汞、镉等有毒有害物质的材料, 对所用材料进行明确标识, 便于后续分类回收。

在结构设计方面, 应该按照易于拆卸的原则来设计。采用模块化设计, 简化产品结构, 减少零部件种类和数量, 用标准化、易拆卸的紧固件代替永久性连接(焊接、胶合)。产品报废之后可以快速低成本地将不同的材料分离出来, 有价值的零部件可以修复后作为备件再利用, 材料可以高效地进入各自的回收渠道。设计时还要考虑不可避免产生的危险废物, 例如废电池、含油部件等, 为它设计专门的收集处理方案。将环保理念融入设计的每一个细节, 可以从源头上减少以后的环境治理压力。

第二节 可靠性设计与优化方法

机电一体化系统越来越复杂，它的可靠性、稳健性、安全性已经成为决定系统成败的关键。本节主要研究从设计之初就保证系统长久稳定运行的方法，可靠性工程基础理论、系统级优化设计方法、提高环境适应性的稳健性设计、保证人员和设备安全的原则等。我们的目的就是创建起一套完整的、系统的可靠性与安全性设计理论体系。

一、可靠性工程基础

可靠性工程是研究怎样保证产品在规定的时间内、规定的条件下完成预定功能的一门学科。在机电一体化系统设计的初期就开展可靠性分析，可以系统地发现设计中存在的隐患，预测并防止故障发生，从而有效地提高系统全生命周期的效益和市场竞争力。本文主要研究可靠性工程核心分析工具和理论。

（一）可靠性指标体系

可靠性指标体系是用数学的方法定量描述、评价机电一体化系统可靠性水平的工具，给设计决策和改进提供科学依据。它不是单一数值，而是由许多互相联系参数组成的一个系统，可以全面地反映产品从投入使用到最后失效的整个生命周期的行为。由此建立的指标，使得系统可靠性度量、预计、分配、验证等都成为可能，有效地把可靠性理论与工程实践联系起来。

机电一体化系统一般用的可靠性指标有可靠度、平均无故障工作时间和可用度。可靠性就是指系统在规定的时间内、规定的条件下，能够无故障地完成它所具有的功能的概率。平均无故障工作时间属于评判可修复系统可靠性的指标之一，其指代系统连续两次出现故障期间保持正常运行的时延，数值越大说明系统保持稳定运行的时长越长。不可修复的产品一般用平均寿命来表示期望工作时间。

可用度又叫使用度或有效度，是可靠性和维修性综合影响的表现，是反映系统在需要的时候能够正常工作的能力的综合指标。它是指系统在任意时刻处于可以工作的概率，它直接影响系统任务成功完成的概率以及系统运行的效率。除了上面的基本指标之外，失效率、维修度、平均修复时间等也属于完整的指标体系的重要组成。建立科学合理的评价指标体系，把其贯穿到设计、制造、测试、使用全过程之中，工程师就能在可靠性优化方面得到明确的指导，进而达到机电一

体化系统预期的可靠性目标。

常见可靠性指标与描述

指标名称	简称	描述	应用场景
可靠度	$R(t)$	系统在规定时间内无故障工作的概率	不可修复系统、任务成功率
平均无故障工作时间	MTBF	两次故障间的平均工作时间	可修复系统，如服务器、工业设备
平均寿命	MTTF	系统发生首次故障前的平均工作时间	不可修复产品，如一次性器件
可用度	A	系统在任意时刻处于可工作状态的概率	持续运行系统，如通信网络
失效率	λ	单位时间内发生故障的概率	零部件、系统生命周期分析
平均修复时间	MTTR	修复故障所需的平均时间	可修复系统，评估维修效率

从可靠性指标可见上表，它们帮助我们全面评估系统健康状况。

（二）失效模式与影响分析

失效模式与影响分析属于一种系统化、前瞻性的工程分析手段，它在设计阶段就对系统、子系统、部件以及元器件可能会出现失效模式加以识别并加以评价，进而剖析这些失效模式可能导致的后果。经过结构化分析的过程，设计人员可以预知并理解产品可能出现的各种故障情况，按照严重程度、发生概率、可探测性对风险进行排序，在产品研制之初就及时开展预防或者修正工作。

失效模式和影响分析的实施过程是有步骤的。一般由系统功能的细化开始，确定各个部分的功能以及相互关系。分析团队会系统地对每一部分提出所有的失效模式，即它们可以以什么样的方式发生故障。对每一个失效模式都要对其对上级系统、整个产品最终功能的潜在影响进行详细的分析，影响可以是性能的下降，也可以是完全功能的丧失，甚至会引发严重的安全问题。

失效模式与影响分析提出了风险优先数的概念，用它来量化各种失效模式的风险。RPN 是将失效的严重度、发生频度和被检测出的难度三个因素相乘而得到的。严重度评估失效后果的严重性；发生频度预测失效模式出现的可能性；探测度评价现有控制手段在失效发生前或者发生后发现它的能力。计算出来的 RPN 值越大，表示该失效模式的危险度就越高，应该优先被改善。因此，失效模式与影响分析可以把有限的改进资源用在最需要的地方，使设计优化更加有效。

（三）故障树分析

故障树分析是自上而下、演绎式的可靠性、安全性分析方法，用逻辑图的形式一层层地分析导致系统顶层不希望事件（系统失效）发生的原因，这些原因可以是硬件故障、软件错误、人为失误等。图形化的逻辑关系模型直观清晰，可以使得工程师对造成系统故障的各种事件组合有一个系统的认识，并且可以对顶事件发生的概率进行定量的分析。

故障树的构建过程为逻辑推理。分析从确定顶事件开始，即最不希望发生的系统级故障。然后通过逻辑门（与门、或门等）将顶事件与它的直接原因事件连接起来，再逐级向下分解，直到所有的事件都被分解成不能再拆分的基本事件为止。基本事件一般指元器件故障、环境影响、操作失误等，发生的概率或者失误率可以用统计数据或工程经验获得。完整的故障树清楚地显示了从基本事件到顶事件的所有逻辑路径。

故障树构建完成后，即可进行定性和定量分析。

1. 定性分析的主要目的就是找出所有能导致顶事件发生的基本事件组合，这些组合称为割集。最小割集就是能够引起顶事件发生的最简单的基本事件组合，去掉任何一个基本事件后，顶事件就不一定发生。找出所有的最小割集，就相当于找到了系统所有的固有弱点。

2. 定量分析：得到各个基本事件发生的概率之后，按照故障树的逻辑结构来求出顶事件发生的概率。通过最小割集对顶事件发生概率的影响程度分析，可以找到影响系统可靠性的主要途径和主要部件，给补救措施的采取、改进设计提供量化的依据。

二、系统优化设计方法

机电一体化系统设计的本质就是多目标决策过程，在相互冲突的目标之间寻找最佳平衡。系统优化设计方法依靠数学规划、计算智能和仿真技术，从系统的性能、成本、可靠性等各个方面来寻找最优的设计方案，是使产品从“可用”向“好用”、“高效”转变的关键技术手段。

（一）多目标优化算法

机电一体化系统设计时经常要考虑许多互相制约甚至矛盾的性能指标，例如追求高精度会增大成本，提高响应速度又会增大能耗。多目标优化算法就是为解

决此类问题而设计的一套数学工具，其目的在于找出一组称为帕累托最优解的解决方案集合，而不是找到一个最优解。这些解的共同之处在于，不能在不降低任何一个目标性能的前提下，使其他任何一个目标性能得到提升。

帕累托最优前沿给决策者提供了一种包含许多折中方案的选择范围，决策者可以依据具体的应用场景和个人偏好，从中挑选出最合适的方案。在众多的多目标优化算法中，以遗传算法为基础的非支配排序遗传算法 II 由于应用广泛、效果较好而被广泛使用。NSGA-II 用快速非支配排序、拥挤距离计算、精英策略等机制，很好地解决了传统多目标遗传算法计算复杂度高、容易陷入局部最优等问题。

算法先对种群做快速非支配排序，把种群分为不同的非支配前沿。位于第一层的最优解就是当前种群中最好的解。算法在选择下一代种群的时候，会选择非支配等级高的个体。同等级的个体用拥挤距离计算来保证解的多样性，防止解集过于集中。拥挤距离表示的是某个解周围邻近解的密度，距离越大，说明该解所在区域越稀疏，被选择的概率就越大。依靠该种精英保留和多样性保持机制，NSGA-II 可以比较快地收敛到一个分布广泛、距离真实帕累托前沿比较近的解集。

（二）基于仿真的优化设计

基于仿真的优化设计，是把计算机仿真技术同优化算法融合起来的现代设计手段，它使得工程师可以在虚拟环境里，对复杂的机电一体化系统展开全面的性能评判，从而找到最佳参数。可以大大缩短研发周期，降低物理样机试错的成本，可以在设计初期就发现并解决潜在的问题，从而大大提高最终产品的性能和可靠性。

该方法的基本思想就是用高保真的系统仿真模型代替昂贵的物理试验。需要建立可以准确描述系统动态行为的多领域物理模型，这些模型可以包括机械、电子、液压、控制等各个学科领域。然后定义需要优化的设计参数（结构尺寸、电机参数、控制器增益等）为优化变量，将系统的重要性能指标（响应时间、能耗、振动等）定义为优化目标函数。

之后优化算法（遗传算法、粒子群算法等）就对整个优化过程进行驱动。优化器产生一组设计参数组合，然后把这组参数输入仿真模型中做动力学仿真。仿真结束之后，系统会依照事先设定好的性能指标，算出对应的目标函数值，再把计算得出的结果告知优化器。优化器根据反馈结果，用内部的寻优机制（选择、

交叉、变异等)产生新一代更好的参数组合,然后重复上面的仿真评估过程。迭代循环会一直进行下去,直到找到满足设计要求的最优解或者达到设定的迭代次数为止。这样工程师可以在巨大的设计空间里,通过闭环自动化的流程,快速找到全局最优或者近似最优的设计方案。

(三) 结构拓扑优化应用

结构拓扑优化属于一种先进的概念设计手段,它能在给定的设计空间范围内,依照所受载荷,约束条件以及性能目标,自动找出最佳的材料分布形式,进而得到既轻量化又高性能的创新结构构型。这项技术摒弃了传统设计中依靠经验、借鉴已有形状的做法,从最本质的力学原理出发,被认为是可以将材料用到最需要的地方的智能设计工具。

机电一体化系统设计当中,结构拓扑优化的作用愈发明显,尤其对于重量、刚度以及动态特性有较高要求的航空航天设备、精密机器人、高速执行机构等来说,这一作用更为突出。通过拓扑优化,在保证结构强度、刚度的同时尽量去除多余材料,实现结构轻量化,从而达到降低能耗、提高系统动态响应性能的目的。

结构拓扑优化的应用过程通常包括以下几个步骤:

1. 问题定义,首先要确定设计的初始空间、边界条件(固定约束)、载荷工况和优化目标。优化目标一般要使得结构的刚度最大,也就是柔度最小,并且还要加上体积或者质量的限制。

2. 优化求解,采用有限元分析软件自带的拓扑优化算法(均匀化法、变密度法等)进行迭代计算。每次迭代时,根据单元的应力或者应变水平来改变单元的材料密度,密度低的区域材料被去除,密度高的区域材料被保留。

3. 结果后处理即优化完成后得到的拓扑结构的密度云图,一般为概念性的、不光滑的几何形状。设计人员要解读结果,结合制造工艺可行性重构一个光滑的、可制造的 CAD 模型。该步骤对于把优化结果转化为现实的产品是十分关键的。

三、稳健性设计

稳健性设计又叫鲁棒设计,它的主要目的就是使产品或者系统在受到各种内部、外部干扰因素(即噪声)波动的影响时,仍然能够保持性能稳定,不偏离设计目标。它所关注的不是消除噪声源,而是通过优化设计参数来降低系统对噪声的敏感度,用较低的成本获得更好的质量稳定性。

（一）田口方法简介

田口方法是由日本质量专家田口玄一先生提出的一套完整的工程体系，其中最重要的一部分就是稳健性参数设计。基本思想是产品的质量是在设计阶段就已确定，而不是在生产检验阶段。因此，应当通过改善产品或过程的设计参数，使其对制造过程中各种波动以及使用环境中不确定性因素（统称为噪声）不敏感，从而以低成本、高效率地实现高质量。

与传统的质量控制方法相比，田口方法最明显的特点就是对质量的定义和关注点不同。传统方法把质量定义为符合规格界限，即产品特性在公差范围内就为合格。而田口方法认为，任何偏离设计目标值的波动都会给社会造成损失，而这种损失又与偏离值的平方成正比。因此，优良的质量不单是符合规格，更是尽可能地接近目标值，减少波动。

为了达到这个目的，田口方法用正交试验设计、信噪比、质量损失函数等方法。正交试验设计可以利用最少的试验次数，获得有关设计参数对产品性能影响的大量信息。信噪比属于一种综合性的评价指标，它表现的是系统输出的稳定性以及对于噪声的抵抗程度。通过对不同参数水平下的信噪比进行分析，找到使系统性能最稳定的参数组合。该方法论的革命性就在于，把质量控制的重点从下游的生产检测前移到上游的设计开发阶段，从源头上保证产品的稳健性。

（二）信噪比与参数设计

信噪比在田口法中是用来衡量系统稳健性的主要统计量。它不是通信领域里信号功率和噪声功率的比值，而是期望输出（信号）和不期望波动（噪声）的函数。根本目的就是找到一组设计参数的水平组合，使信噪比最大，即系统功能输出受各种噪声因素干扰最小，稳定性最好。

田口方法根据质量特性的不同需求，将信噪比分为三种主要类型，以适应不同的优化目标：

1. 望小特性：适合于期望值越小越好的质量指标，例如磨损量、污染物排放、定位误差等。优化目标是使输出结果最小。
2. 望大特性：适合于期望值越大越好的质量指标，如产品强度、使用寿命、系统效率等。优化目标就是使输出结果最大化。
3. 望目特性，固定值质量指标，零件尺寸、输出电压、弹簧刚度等。优化目标就是使输出结果尽可能接近目标值，同时波动最小。

参数设计的实施分为两步，用正交试验和信噪比分析，确定能最大化提高信噪比的控制因子和最佳水平组合。本步骤的主要目的就是减小输出的波动，使系统性能更加稳定。在保证稳健性的同时，对信噪比影响小但是对均值影响大的调整因子进行调整，将系统输出的平均值精确地调整到目标值。经两步分离优化的田口方法可以很好地完成减小波动、拟合目标这两个任务，从而找到一个既准确又稳定的最优设计参数。

（三）质量损失函数

质量损失函数是田口质量工程理论的重要基础之一，它从经济学的角度对产品质量做了全新的解释。传统的观念认为只要产品的特性在规格范围之内，就认为是合格品，在质量上没有差别。田口玄一博士对此表示质疑，他认为任何偏离设计目标值的波动，在任何场合下都会给社会生产者和消费者造成损失。损失可以由性能不好、可靠性降低、需要额外维修、产品过早报废等原因引起。

质量损失函数把抽象的损失用数值的形式量化出来。当质量特性 y 取得目标值 T 的时候，产生的损失 $L(y)$ 与它偏离目标值的平方成正比，可以用公式 $L(y)=k^2$ 表示。其中 k 为质量成本系数，把质量特性偏差的量纲转化为货币量纲。二次函数曲线顶点在目标值 T 处，开口向上，为抛物线。这说明当产品的特性值等于目标值的时候，其质量损失为零；偏离目标值越远，其质量损失会以平方的形式急剧上升。

二次损失函数的概念有重大的工程意义。它突出持续改善、追求零偏差，因为规格限内的产品只要有波动就会造成质量损失。它给设计和制造过程中所做的决策提供了经济上的依据，例如设置公差、选择元器件等级或者改进工艺的时候，可以通过对比不同的方案所带来的质量损失总量的差别来决定取舍。最小化产品全生命周期的质量损失总和，满足顾客要求的同时，实现企业和社会效益的最大化，就是田口方法追求的最终目标。

四、安全性设计原则

安全性是机电一体化系统设计中不能跨越的红线。它要求系统在正常运行、可预见的误操作或故障情况下都不能给人员、设备、环境带来危害。安全性设计不是事后补救的措施，而是要从设计之初就系统地融入到产品结构中，从源头上防止事故的发生。

（一）故障安全设计

故障安全设计，也就是失效安全的原则，是保证机电一体化系统安全性的重要基础。其根本目的就是保证系统中的任何一个关键部件出现故障的时候，系统可以自动进入一个事先设定好的、不会造成危险的安全状态。该设计理念认为故障是不可避免的，所以把设计的重点放在控制故障的后果上，防止单一故障演变为灾难性事故。

故障安全设计一般有几种不同的模式。失效静止模式：当系统发生故障时，系统会停止所有运动并停留在当前位置或者转换到无能量的静止位置，电磁制动器断电后自动抱闸就属于此类。另一种是失效运行模式，适用于不能轻易中断运行的系统，飞行控制系统。该模式下系统通过冗余配置或者备用通道，在某个部件失效之后仍然可以完成基本的功能，但是性能会有所下降。

最常见的是失效安全模式，即当系统出现故障的时候会自动转换到一个事先设定的安全状态。信号系统信号灯故障应显示红色，交通道闸断电时应自动升起疏导交通。为了保证故障安全，在设计的时候一般会使用冗余技术、异构设计以及定时自诊断。增加备用组件，当主组件失效的时候，备用组件可以无缝接管。同时用监控回路对重要的信号、设备做不间断检测，一旦发现异常信号或者设备故障，系统就会自动转入预设的安全模式，有效地防止风险的发生。

（二）安全联锁装置

安全联锁装置属于机电一体化系统当中保证操作人员安全、防止设备在危险情况下运转的关键保护装置。它用机械、电气或其他方式建立起一种强制性的逻辑约束，只有当所有的安全条件都得到满足的时候，机器的危险部分才会启动或者运行。一旦安全条件被破坏，比如防护门被打开，联锁装置就会发出信号，使系统停止。

安全联锁装置的形式很多，可以适应不同的场合和危险等级。机械联锁是最直接的一种形式，利用杠杆、凸轮、销钉等机械部件的物理干涉来强制实现不同操作之间的先后顺序，结构简单可靠。电气联锁更为常见，它用开关、继电器、安全可编程逻辑控制器等电气元件来监测安全门、防护罩等的位置状态。安全门上装有带强制断开功能的位置开关，只有门完全关闭时触点才会闭合，使主控制回路得电工作。

现代机电系统越来越多地采用带防护锁定的电磁安全门锁。该装置不仅可以

检测到门的位置，还可以在机器危险运动还没有完全停止的时候用电磁力把防护门锁定，防止操作人员为了尽快进入而受到伤害。这些联锁装置通常需要与安全继电器或安全可编程逻辑控制器一起组成完整的安全回路。这样设计的目的在于提高安全完整性等级，采用双通道监控、交叉检查等冗余设计，保证即使联锁装置本身或者其线路发生单个故障，系统仍然可以执行安全的停机功能，从而给操作人员提供可靠的保护。

（三）人机工程安全考量

人机工程安全是机电一体化系统设计中，研究人、机器、环境三者之间相互关系，以达到高效、舒适、无害作业目标的综合性学科。其主张以使用者生理和心理特点为基础来设计，从改善人机交互界面、操作空间、作业流程入手，从根本上减少由于人的失误、疲劳或误解所造成的事故。

从设计的角度来说，符合人机工程安全原则的系统，其控制装置（按钮、开关、触摸屏等）的布置要直观、逻辑性强，重要的、紧急的操作按钮要放在最容易触及的地方，用颜色、形状或者尺寸加以区分，以防混淆和误操作。显示界面应该给出清楚、准确、无歧义的信息，防止信息过载，用声光报警等方式及时向操作者传递系统的重要状态和潜在的危險。用颜色来区别不同的状态，红色为危险、停止，绿色为安全、开始，用标准的图形符号减少操作者的认知负荷和反应时间。

物理工作环境设计也不能忽视。必须保证操作员有足够的空间，以免紧急情况下因为空间狭小不能迅速撤离。设备的可触及的表面不能有尖锐的边角和高温区。同时对需要人工干预的维护、检修等环节也要保证相关部件的可达性、可操作性，减少因姿势不便于、用力困难而产生的安全风险。将人机工程学的安全因素融入设计全过程，可以大大提高系统的安全性，真正实现以人为本的设计理念。

第三节 典型机电一体化系统案例分析

机电一体化系统是机械、电子、控制、计算机技术有机结合的产物，使功能得以集成，性能得以优化。本节将分别从数控加工中心、工业机器人、自动导引车以及智能家居等几个典型机电一体化系统入手，对其设计思想、关键技术及实现方法展开详细的分析，从而给复杂机电一体化系统的设计与分析提供具体的参考。

一、数控加工中心设计分析

数控加工中心是现代制造业的主导设备，是机械、电气、液压、气动、计算机控制和测量技术高度融合的产物。其设计和分析涉及宏观总体布局和微观伺服控制等各个方面，主要目的就是实现高精度、高效率的自动化加工。机床性能的好坏，直接决定复杂零件的制造质量和生产效率。

（一）系统需求与总体布局

数控加工中心设计开始于对加工需求的准确分析。包括对被加工材料的物理性质、零件几何形状的复杂程度、精度等级、表面粗糙度、生产节拍等各方面的综合考虑。航空航天领域铝合金结构件加工要求高速、高精、高稳定性，模具钢加工要求大切削力下机床的刚性、低速大扭矩输出能力。具体的需要直接决定机床总体布局的选型。

立式加工中心结构紧凑，占地面积小，工件装夹方便，适合中小型零件的加工。立柱、主轴箱等关键部件的排列方式，对整机的刚度和动态特性起着非常大的作用。龙门式加工中心由于具有较大的加工空间、良好的结构刚性，所以被广泛地用于大型、重型工件的加工。横梁、双立柱对称布置可抑制切削时产生的振动变形，保证大型零件的加工精度。

机床的布局设计还要考虑热稳定性和人机工程学。采用有限元分析的方法，对床身、立柱等主要结构件进行拓扑优化，设计出合理的筋板结构，在保证高刚性的前提下达到轻量化的目的，并优化其热变形特性。合理的操作面板布置、方便的排屑系统、良好的加工区域可视性，都是提高设备使用效率和安全性的设计环节。

（二）主轴与进给驱动系统

主轴系统是数控加工中心的核心执行机构，它的好坏直接影响加工中心的切削能力及最终加工精度。主轴的设计要在转速、扭矩、刚性、精度、温升等互相制约的指标间取得最佳的平衡。目前常用主轴有皮带式主轴、直联式主轴、电主轴。皮带式主轴结构简单、成本低，低速时能输出大扭矩，适合重切削。直联式主轴是通过联轴器把电机和主轴直接连接起来，传动链较短，动态响应和稳定性比皮带式好，可以达到更高的转速。

电主轴将电机直接装在主轴单元内部，实现零传动，结构紧凑、动态响应快、

转速高、振动小，适合于高速加工中心。为有效抑制高速旋转产生的热量，电主轴要配备冷却系统，一般采用油气润滑、循环水冷或油冷的方式来保证主轴的回转精度和使用寿命。主轴的动态平衡精度十分重要，不平衡产生的离心力会造成剧烈的振动，对加工表面质量产生严重影响。

进给驱动系统是实现各坐标轴精确移动的装置，主要是由伺服电机和传动机构组成的。滚珠丝杠副是应用最广的传动元件，经过预紧处理后可以消除轴向间隙，从而得到较高的传动刚度和定位精度。直线电机驱动在追求高动态响应的场合下，具有零传动、高加速度的特点，因此具有明显的优势。伺服电机作为驱动源，根据数控系统的指令以及高分辨率编码器的位置反馈做闭环位置控制，使刀具沿设定的轨迹运动。

（三）数控系统与调试

数控系统是加工中心的“大脑”，它由硬件和软件组成，可以完成加工程序解析、刀具运动轨迹规划、伺服驱动控制、人机交互管理等所有功能。现代数控系统一般采用模块化、开放式结构，由中央处理单元、存储器、输入输出接口、伺服控制模块等硬件组成，并运行着系统软件、插补算法、补偿算法、用户界面程序。开放式系统给用户提供了二次开发的便利，可以集成专用功能或者定制化算法，从而提高系统的灵活性以及适应性。

数控系统的调试是系统工程，目的是使机床各项性能指标达到设计要求。从最基本的电气连接和参数设定入手，保证所有的传感器、执行器和控制器能正常工作。接着对伺服参数进行优化，通过改变增益、积分时间等参数，使进给轴在保证响应速度的同时具有较好的稳定性，使跟踪误差最小。

几何精度补偿在调试过程中是不能缺少的。工程师用激光干涉仪、球杆仪等精密测量仪器，可以测出机床各个运动轴的定位误差、反向间隙、垂直度误差、俯仰、偏摆等几何误差。数控系统根据这些测量数据建立误差补偿模型，在运动控制中实时修正，从而大大提高机床的综合加工精度。最后的功能测试一般用试切削标准件来完成，这是对整个调试工作最终的检验。根据加工件的尺寸精度、表面质量分析，可以对机床的静态、动态性能做全面的评价。

二、工业机器人系统设计

工业机器人是指专门为工业领域设计、具有多关节或自由度的机器装置，可

以依靠自身动力和控制能力自主完成各种任务,实现各种复杂的功能。其设计把机械结构、驱动技术、传感技术、智能控制算法有机地结合起来,目的是代替人类完成重复性的、高强度的或危险环境下的工作。

(一) 机器人本体结构设计

机器人本体是机器人各项功能的物理载体,在满足工作空间、负载能力、运动精度条件的基础上尽量实现轻量化、高刚度、高动态性能。机器人本体结构分为串联式和并联式两种。串联机器人,即常见的六轴关节型机器人,其关节是串行连接的,工作空间大、灵活性高,应用最广。并联机器人是通过多个运动链并联连接动平台和定平台,刚度大、承载能力强、动态响应快,一般用在高速拾放等对速度和精度要求较高的场合。

结构设计时自由度的选择非常重要,它决定机器人运动灵活性以及可达到的工作区域。一般情况下,六个自由度就可以使机器人末端执行器到达工作空间内的任意位置,并且可以保持任意姿态。材料的选择对机器人的自重、刚度有较大的影响,高强度铝合金、碳纤维复合材料等轻质高强材料的使用,可以有效地减小运动部件的惯量,提高机器人的加速度和运行速度。

关节设计是本体结构设计的核心。关节要承受并传递复杂载荷,还要完成精确的转动或者移动。设计时需要考虑关节的承载能力、回转精度、间隙、密封防尘等各方面问题。采用有限元分析对机器人大臂、小臂等关键部件做静力学和动力学分析,可以改善各构件的结构形式、尺寸,防止运动时产生共振,保证机器人运动时的稳定性、精度。

(二) 关节驱动与控制系统

关节驱动系统是工业机器人的动力源,给机器人运动提供所需要的扭矩和速度。该系统一般是由高性能伺服电机、精密减速器、传动机构组成的高精度伺服控制单元。

1. 伺服电机是主流的驱动部件,其中交流伺服电机应用最广。交流伺服电机由于具有响应快、控制精度高、过载能力强、免维护等特点而得到广泛的应用。电机利用编码器把转子的位置、速度信息实时反馈给控制器,形成闭环控制,保证关节能准确执行运动指令。

2. 精密减速器在驱动系统中起着重要的作用,它可以降低电机的转速,增大输出扭矩,提高传动刚性。谐波减速器体积小、重量轻、传动比大、回程间隙小,

所以常用于机器人手腕等小负载、高精度关节。RV 减速器以高刚度、强抗冲击著称，一般用在机器人的腰部、大臂等承受大负载的关节上。

3. 机器人控制系统的结构一般为分层式。底层是关节伺服控制器，对单个关节做精确的运动控制，执行 PID、前馈补偿等控制算法。中间层是运动控制器，根据上层规划的轨迹做运动学、动力学逆解计算，得到各个关节期望的运动角度、速度、加速度，再传给伺服控制器。顶层是中央控制器，它负责人机交互、任务调度、路径规划、和外部设备（视觉系统、PLC 等）通讯。

（三）路径规划与作业编程

路径规划是决定机器人怎样从起点运动到终点的重要技术，它的目的就是根据一定的约束条件（如避开障碍物、保持一定的姿态等）来生成一条最优或者次优的运动轨迹。路径规划分成了全局路径规划和局部路径规划。全局规划就是在已知环境地图的情况下，离线地计算出一条完整的路径。局部规划使用传感器实时获得的环境信息，在线地动态调整来避开没有预料到的障碍物。

作业编程是指示教机器人完成某项任务的过程，分为示教在线编程和离线编程两种。示教在线编程是最传统、最直观的示教方式，操作者手持示教器手动控制机器人完成任务轨迹上各个关键点的位置、姿态的记录。该种方式简单易学，但是会占用生产时间，对于复杂轨迹的精确示教存在局限性。

离线编程是在专门的计算机软件中进行的。工程师将机器人的三维模型以及工作单元的布局导入到虚拟环境中，在电脑上直接对路径进行规划，姿态进行设置，逻辑进行编程。软件可以自动生成机器人程序代码，做运动仿真，检测出可能发生的碰撞。离线编程不影响实际生产，在复杂轨迹规划、多机器人协同作业等场合使用较多，可以大大减少项目调试周期，提高编程效率和质量。

三、自动导引车设计

AGV 作为现代物流自动化和柔性生产线不可缺少的一种设备。它是一种按照规定的导引路线行驶、具有安全保护和各种移载功能的运输车辆。其设计集环境感知、运动控制、能源管理、系统调度于一身，核心目的就是实现物料的高效、精确和无人搬运。

（一）行走机构与导航方式

行走机构是 AGV 移动的基础，设计好坏直接影响到 AGV 的机动性、载重

能力及场地适应性。差速驱动是最常用的行走机构，通过控制左右两个驱动轮不同的转速来实现直行、转弯、原地旋转等运动，结构简单、控制技术成熟。对于狭小空间内需要全向移动的场合，一般采用麦克纳姆轮或者全向轮，使 AGV 在不改变自身朝向的情况下可以实现横向、斜向等任意方向上的平移。

导航方式属于 AGV 设计的关键部分，导航方式的灵活程度以及成本高低同 AGV 的设计存在关联。传统的电磁导航、磁条导航技术已经比较成熟稳定，依靠地面铺设导线或者磁条来引导 AGV 行驶，但路径固定不能轻易更改。二维码导航依靠摄像头读取地面二维码来定位，用惯性导航单元做姿态修正，部署方便，定位精度高，在电商仓储中应用广泛。

以激光雷达为基础的同步定位与建图导航属于目前最先进的技术之一。AGV 上的激光雷达扫描周围环境，实时创建环境地图，在此基础上确定自身的当前位置，不需要任何物理标识，实现了真正的柔性导航。该方式环境适应性好，路径可以随时通过软件修改，但是算法复杂，对计算能力要求高。视觉导航是另外一个前沿方向，它用摄像头来获取环境图像特征来定位，有巨大的潜力。

常见 AGV 导航方式对比

导航方式	部署难度	路径柔性	成本	定位精度	适应环境
电磁 / 磁条导航	中	低	低	高	简单固定
二维码导航	低	中	中	高	室内平坦
激光 SLAM 导航	低	高	高	高	复杂动态
视觉导航	中	高	中	中	复杂动态

从上表可知，不同的 AGV 导航方式在部署难易程度、路径柔性、成本、定位精度、适应环境等各方面都有所不同。电磁 / 磁条导航成本低、定位精度高，但是路径固定，不能适应需要改变路线的场景；而激光 SLAM 导航虽然成本高、算法复杂，但是其路径灵活、环境适应性好，在复杂动态环境中表现优秀。

（二）动力电池与管理系统

动力电池是 AGV 的能量来源，性能的好坏直接影响到 AGV 的续航能力、运行效率以及运营成本。锂离子电池，尤其是磷酸铁锂电池，由于具有高能量密度、长循环寿命、高安全性、快速充电等特点，已经成为 AGV 动力电池的主要选择。选择电池要按照 AGV 的负载、运行速度、工作班次和充电策略，对需要的电池容量、放电倍率进行准确计算，保证整个工作时间段内能量的供给。

电池管理系统是保证动力电池安全可靠运行的重要组成。它是一个电子控制系统，主要功能就是对电池组中每一个单体电池的电压、电流、温度进行实时监测，准确地估计出电池的荷电状态和健康状态，并进行电池均衡管理，防止由于单体电池不一致而造成的寿命衰减。BMS 在发生过充、过放、过温、短路等异常情况的时候，会立即切断回路并发出报警，从而保证电池组以及整车的安全。高级 BMS 带有通信功能，可以将电池状态信息上传给车辆调度系统，为智能充电管理提供决策依据。

（三）避障与调度系统

避障系统给 AGV 的安全运行提供最基本的保障。现代 AGV 一般用多传感器融合的方式来实现可靠的障碍物检测。激光雷达是主要的避障传感器，能提供 360 度的距离信息，可以检测到行人和各种障碍物。3D 视觉相机可以获取障碍物的立体轮廓，弥补了激光雷达对低矮或者悬空障碍物检测的不足。AGV 车体四周还会装设超声波传感器和红外传感器，形成近距离的补充，进而构建起从远到近、从高到低的多层次、立体化的安全防护区域。

当传感器检测到障碍物的时候，AGV 的控制系统就会按照预设策略做出避障动作，也就是减速、停止或者在允许的路径上绕行。复杂的动态环境下，避障不应该只限于单个 AGV 的行为，而应该有系统级的协同。

调度系统是 AGV 集群高效作业的指挥中心，也叫车队管理系统。上层系统（WMS、MES 等）将搬运任务发给 AGV 分配器，由 AGV 分配器智能地分派给合适的 AGV 执行。调度系统实时对所有的 AGV 的位置、状态、电量进行检测，做全局路径规划以及交通管制来避免车辆发生冲突或者堵塞。当 AGV 电量低于预设阈值时，调度系统会自动给它分配充电任务，并且会安排其它车辆代替它完成任务，从而保证整个 AGV 系统能够连续、高效、有条不紊地运行。

四、智能家居控制系统设计

智能家居系统使用先进的计算机技术、网络通信技术和自动控制技术，把与家居生活有关的设备有机地联系起来，综合管理，使家居生活更加舒适、安全、便捷。它的设计核心就是创建稳定可靠的传感器网络、制定智能控制策略和提供友好的操作界面。

（一）传感器网络布置

传感器是智能家居系统的感觉器官，可以获取环境状态以及用户行为信息。合理布置传感器网络为智能化打下了基础。常用的传感器有室内温湿度传感器、人体移动感应的红外移动传感器、门窗开合状态的门磁传感器、检测光照强度的照度传感器等。

大部分传感器都是低功耗的，并且使用无线方式组网，从而避免了复杂的布线工程。目前主流的无线通信技术有 Zigbee、Z-Wave、蓝牙、Wi-Fi。Zigbee、Z-Wave 技术低功耗、自组网、高节点容量，适合创建全屋传感器网络。Wi-Fi 因为带宽大，所以更适合和摄像头、智能音箱等需要高速数据传输速率的设备相连。

布置传感器网络的时候需要考虑到信号的覆盖范围，穿透墙体的能力以及不同协议之间的干扰。一般情况下，一个或者多个智能网关充当网络协调器，连接并管理各种协议的设备，把采集到的数据上传到云端或者本地服务器上，从而实现设备的互联互通。网络的拓扑结构设计（星型、树型或者网状）对网络的稳定性、可靠性起着非常重要的作用。

（二）环境控制策略

环境控制策略是智能家居系统的“大脑”，它根据传感器网络所收集到的数据，按照事先设定好的逻辑规则或者学习用户的行为习惯，自动控制家中的各种设备。这些方法都希望创造出舒适的、节能的、人性化的居住环境。

最基础的方法就是规则控制的场景联动。用户可以自行定义多种场景模式，回家模式即当门锁被打开的时候系统会立即完成开启客厅灯、调节空调温度至适宜值、拉起窗帘等一系列操作。睡眠模式就是用一键操作关闭所有指定的灯光、拉上窗帘并开启安防布防。时间策略是比较常用的方法，早晨定时地拉开卧室窗帘使用自然光照明来唤醒用户。

更高级的控制策略就用到人工智能和机器学习算法。系统可以利用用户日常行为来预测用户的需求。系统分析用户晚上七点看电视的习惯后，就提前调节客厅的灯光氛围。系统根据室内外温湿度、当天天气预报等各方面数据进行分析，更智能地控制空调、新风、地暖系统，既保证舒适度，又最大限度地节约能源。自适应、自学习的控制策略，使智能家居由原来的自动化控制变成真正的智能服务。

（三）移动终端 APP 开发

移动终端应用程序是用户与智能家居系统交互的主要窗口，它的好坏直接影响用户的总体体验。一个好的智能家居 APP 应该包含设备管理、场景控制、状态查看、远程操作等基本功能。用户可以利用 APP 添加、删除、配置家中的智能设备，清楚地查看每一个设备（灯光、空调、摄像头）的工作状态，随时随地通过互联网远程控制。

用户界面及用户体验设计对 APP 的开发起着非常重要的作用。界面设计要简洁直观，用清晰的图标、合理的布局，使用户能快速找到自己需要的功能。按照房间或者空间来分设备，是一种符合用户心智模型的有效组织方式。场景控制按钮要设置在首页等容易触及的地方，达到一键启动的效果。交互设计应该追求流畅自然，调节灯光亮度的滑块、设定空调温度的转盘等都应当给予实时的视觉反馈，让操作结果马上可见。

APP 还应该有权限管理功能，即家庭主用户可以给其它家庭成员（老人、孩子等）设置不同的设备控制权限，使用方便又安全。消息推送功能也不可缺少，安防系统报警、检测到漏水或者有访客按门铃的时候，系统应该立即向用户手机发送通知。经过精心设计的 APP 可以将复杂的、庞大的智能家居系统简化为用户可以轻松掌握的、一目了然的系统。

参考文献

- [1] 田永利,邹慧君,郭为忠,等.机电一体化系统建模技术与仿真软件的研究与分析[J].机械设计与研究, 2003, 19(4):4.
- [2] 李瑞琴,邹慧君.机电一体化系统方案评价方法的研究[J].机械设计与研究, 2004, 20(3):4.
- [3] 李青文.机电一体化系统方案创新设计理论与方法的研究[J].中国电子商情:科技创新, 2014.
- [4] 谢 帅.机电一体化系统设计与优化方法研究[J].Mechanical & Electronic Control Engineering, 2024, 6(24).
- [5] 李震.任务驱动教学法在机电一体化系统设计教学中的运用分析[J].当代教育实践与教学研究(电子刊), 2015.
- [6] 连香姣.”机电一体化系统设计与综合实验”的改革与实践[J].机电工程技术, 2006, 35(9):97-99.
- [7] 朱发智.机电控制系统自动控制技术与一体化设计分析[J].科技创新与应用, 2016.
- [8] 李树涛.机电一体化系统设计的目标和方法探析[J].科技促进发展:应用版, 2011.
- [9] 李卫强.机电一体化系统设计概述[J].黑龙江科技信息, 2012(18):1.
- [10] 李瑞琴,张启升,薄瑞峰,等.机电一体化系统方案评价方法研究进展[J]. 2014.
- [11] 潘大雷,顾申杰,郭广跃,等.机电一体化系统设计方法论的发展与分析[J].机电信息, 2016(18):2.
- [12] 张建民,王宪丰,唐水源,等.机器人机电一体化设计方法与应用研究——运动学及力学分析[J].北京理工大学学报, 1993, 13(1):7.
- [13] 翟成亮.机电一体化系统的设计分析[J].中国科技期刊数据库 工业C, 2018(5):00261-00261.
- [14] 韩敏敏.机电一体化系统设计方法论的发展与分析[J].中文科技期刊数据库

- (全文版)工程技术:00288-00288[2025-12-29].
- [15] 谢 帅.机电一体化系统设计与优化方法研究[J].机械与电子控制工程, 2024, 6(24):151-153.
- [16] 温暖.机电控制系统自动控制技术与一体化设计分析[J].工程技术(全文版): 00232-00232[2025-12-29].
- [17] 李红波.浅谈机电一体化系统设计的目标和方法[J].职业, 2010, 000(020):121-121.
- [18] 孔龙.机电一体化系统的设计与优化研究[J].数码设计(电子版), 2024(4):0784-0786.
- [19] 弓长长.机电控制系统自动控制技术与一体化设计分析[J].科教导刊: 电子版, 2018(7):1.
- [20] 王永强.滚珠丝杠进给系统自适应建模理论与方法研究[D].山东大学,2013.