

内容简介

本书系统阐述了现代农业机械电子系统的核心理论、关键技术、设计方法与未来发展趋势。随着信息技术与农业生产的深度融合，农业机械正经历着从传统装备到智能化、自动化系统的深刻变革。本书旨在为相关领域的科研人员、工程师及高等院校师生提供一本内容全面、结构清晰、理论与实践紧密结合的专业参考书。

全书共十章，内容层层递进，构成了一个完整的知识体系。第一章作为总览，概述了农业机械电子系统的发展历程、基本组成、应用领域与未来趋势。第二章深入探讨了支撑该领域的理论基础，包括传感器技术、控制理论与信号处理方法。第三、四章是本书的核心，分别从硬件和软件两个维度，详细介绍了微处理器、传感器接口、执行机构等硬件设计要点，以及嵌入式开发环境、实时操作系统和控制算法等软件实现技术。第五章至第八章聚焦于关键应用子系统，深入剖析了导航定位、智能控制、作业质量监测以及通信网络等前沿技术的原理与实现。第九章转向系统工程，讲解了系统集成、测试验证与可靠性优化的完整流程。最后，第十章展望了人工智能、新能源等技术驱动下农业机械电子系统的未来发展蓝图。

本书特色在于理论与实践并重，既构建了坚实的理论框架，又提供了具体的设计思路和工程实践指导。它不仅反映了该领域的最新研究成果，也兼顾了工程应用的实际需求，是推动我国农业机械化、智能化发展的重要学术著作。



PRICE: \$60.00



现代农业机械电子系统：理论与设计
Modern Agricultural Machinery Electronic System: Theory and Design

于兴 著

Modern Agricultural Machinery Electronic System: Theory and Design

现代农业机械电子系统：理论与设计

于兴 著



作者简介



于兴，(1984-01-15)，新疆博湖人，中共党员，农机工程中级，本科，现就职于新疆巴州博湖县查干诺尔乡党建工作办公室，研究方向：农机机械电子专业。2024年12月24日获得中华人民共和国国家版权局计算机软件著作权登记证书（农机作业数字化管理系统）；2024年12月25日获得中华人民共和国国家版权局计算机软件著作权登记证书（农机装备运行状态检测系统），2026年发表两篇论文均获奖。

Modern Agricultural Machinery Electronic System: Theory and Design

现代农业机械电子系统：理论与设计

于兴 著



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

CIP INFORMATION

Title: Modern Agricultural Machinery Electronic System: Theory and Design

题目：现代农业机械电子系统理论与设计

Author: Xing Yu

作者：于兴

ISBN: 979-8-90040-063-1

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

Modern Agricultural Machinery Electronic System: Theory and Design **现代农业机械电子系统：理论与设计**

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

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 16.25

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in March 2026

Printing: First printing in March 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.

前言 PREFACE

农业是国民经济的基础，而农业机械化则是农业现代化的核心标志。当我们站在新一轮科技革命的门槛上，以电子信息技术、人工智能和物联网为代表的先进技术正以前所未有的深度和广度渗透到农业生产的每一个环节，催生了“智慧农业”这一全新业态。在这一宏大背景下，传统的农业机械正在被重新定义，它们不再是孤立的钢铁设备，而是演变为集感知、决策、执行与通信能力于一体的复杂电子系统。这一变革，不仅极大地提升了农业生产效率与质量，更在根本上改变着农业的生产方式与发展模式。

《现代农业机械电子系统：理论与设计》一书，正是在这一时代浪潮中应运而生。我们撰写此书的初衷，是希望系统梳理和构建农业机械电子领域的知识体系，为推动我国农业装备的转型升级贡献一份力量。本书试图回答一系列关键问题：如何将先进的电子技术“植入”传统的农业机械？如何设计出稳定、可靠、智能的控制系统？如何让机器在复杂的田间环境中精准导航、高效作业？这些问题的答案，构成了本书的核心内容。

本书的架构遵循了从理论到实践、从部件到系统、从技术到应用的整体逻辑。我们首先夯实理论基础，让读者掌握传感器、控制论、信号处理等核心工具。随后，我们分别深入硬件与软件设计的“微观世界”，揭示系统构建的技术细节。在此基础上，我们将视野拓展到导航、控制、监测等关键“子系统”，展示这些技术如何协同工作，赋予机器“智慧”。最后，我们回归到工程学的宏观视角，探讨集成、测试与可靠性保障，并展望未来的技术前沿。我们力求使每一章都既有理论深度，又有实践价值，让读者能够知其然，更知其所以然。

我们深知，任何技术的发展都离不开人才的培养。因此，本书特别适合作为高等院校农业工程、自动化、机电一体化等相关专业的研究生或高年级

本科生教材，也可供从事农业装备研发、制造和应用的工程技术人员参考。我们期望，通过本书的引导，能够激发更多青年才俊投身于这一充满机遇与挑战的领域。

在撰写过程中，我们参考了大量国内外最新的文献和研究成果，力求内容的科学性与前沿性。由于农业机械电子技术发展迅速，书中难免存在疏漏与不足之处，恳请广大读者和同行专家不吝赐教，批评指正。我们希望这本书能成为一座桥梁，连接理论研究与工程实践，连接当下发展与未来蓝图，为我国从“农业大国”迈向“农业强国”的伟大征程添砖加瓦。

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

目录 CONTENTS

第一章 现代农业机械电子系统概述	1
第一节 现代农业机械电子系统的发展历程	1
第二节 现代农业机械电子系统的基本组成	7
第三节 现代农业机械电子系统的应用领域	13
第四节 现代农业机械电子系统的发展趋势	20
第二章 农业机械电子系统理论基础	27
第一节 传感器与检测技术基础	27
第二节 控制理论与方法	33
第三节 信号处理与数据分析	40
第三章 农业机械电子系统硬件设计	47
第一节 微处理器与嵌入式系统	47
第二节 传感器选型与接口设计	53
第三节 执行机构与驱动电路	59
第四节 电源管理与电磁兼容设计	64
第四章 农业机械电子系统软件设计	73
第一节 嵌入式软件开发环境	73
第二节 实时操作系统应用	79
第三节 控制算法实现	87
第四节 软件测试与调试技术	93
第五章 农业机械导航与定位系统	101
第一节 卫星导航系统原理	101
第二节 惯性导航技术应用	107

第三节 路径规划与跟踪控制	113
第四节 多传感器融合技术	118
第六章 农业机械智能控制系统	125
第一节 智能控制理论基础	125
第二节 模糊控制与神经网络应用	131
第三节 自适应控制技术	137
第四节 智能决策与优化控制	142
第七章 农业机械作业质量监测系统	149
第一节 作业参数检测技术	149
第二节 图像处理与机器视觉	156
第三节 作业质量评估方法	163
第四节 实时监测与预警系统	168
第八章 农业机械通信与网络技术	175
第一节 现场总线技术应用	175
第二节 无线通信技术	181
第三节 物联网技术在农业机械中的应用	187
第四节 远程监控与数据管理	194
第九章 农业机械电子系统集成与测试	201
第一节 系统集成方法	201
第二节 功能测试与性能评估	206
第三节 可靠性分析与验证	213
第四节 系统优化与改进	219
第十章 农业机械电子系统未来发展	227
第一节 人工智能技术应用前景	227
第二节 新能源与电动化趋势	233
第三节 智能化与自动化发展	239
第四节 标准化与产业化展望	245
参考文献	251

第一章 现代农业机械电子系统概述

本章主要论述现代农业机械电子系统组成、功能和发展脉络，给读者创建一个宏观、清晰的知识体系，使读者更加清楚现代农业机械电子系统在现代农业中的核心地位。本章主要对农业技术演进的过程进行追溯，探究电子信息技术是如何逐步渗透到农业装备中，并最终对农业装备产生革命性的影响的，为后面章节的深入分析打下理论基础。

第一节 现代农业机械电子系统的发展历程

本节从农业机械电子系统由简入繁的发展历程来分析，探究技术革新怎样深刻地改变了农业生产方式。它不单是单纯的技术进步，更是农业生产理念、效率和可持续性不断改进的生动写照。其发展过程可以清晰地分成三个紧密联系又各具特色的阶段，如下表所示。

现代农业机械电子系统发展阶段概览

阶段	核心特征	关键技术代表	主要目标
机械化到自动化 (萌芽期)	电子技术辅助机械功能，初步感知与控制	传感器、电子控制单元、全球定位系统民用化、自动驾驶	提升作业效率，减轻劳动强度，初步实现精准作业
智能化转型 (飞跃期)	数据驱动,自主感知、分析与决策	机器视觉、激光雷达、光谱传感器、高性能车载计算机、ISOBUS	实现精准化、自动化作业，提高资源利用率和产出
网络化时代 (物联网期)	全方位互联互通，数据汇聚与增值	蜂窝网络、M2M 通信、云计算、大数据分析、人工智能算法	农业生产全链条数字化管理，实现远程监控与预测性维护

从上表可知，现代农业机械电子系统的发展是不断演进、不断深化的过程，每个阶段都是在上一阶段的基础上引入新的技术、新的理念，推动农业生产力的飞跃。

一、从机械化到自动化：农业电子技术的萌芽

这一时期属于农业技术变革的序章，电子技术第一次被应用到传统农业机械当中，给其带来了新的活力，拉开了向自动化发展漫长道路的序幕。这意味着农业生产工具不再只依靠单纯的机械力，而逐步有了初步的感知和控制能力，为以后精准化、智能化的作业打下了重要的基础。

（一）早期机械的简单电子控制应用

农业机械电子系统萌芽于上世纪中期，那时电子技术主要用在辅助和优化传统的机械功能上。最初的应用形式比较简单，在拖拉机、联合收割机上安装电子传感器，对发动机转速、水温、油压等重要参数进行监测，通过仪表盘上的指示灯或者蜂鸣器向驾驶员发出警报。简单的监控系统代替了机械式仪表，使信息传递及时、可靠，电子技术开始进入农业机械。

随着集成电路技术越来越成熟，电子控制单元也随之出现并得到发展。播种机上排种监控器采用光电传感器检测每个播种单体的下籽情况，一旦出现堵塞或者漏播，就会立刻发出报警信号，防止大面积缺苗。联合收割机中谷物损失监测器用压电传感器感知清选时抛出的籽粒，辅助驾驶员调节作业参数以减少谷物损失。尽管早期的电子应用功能比较单一，还不能构成复杂的控制网络，但是大大减轻了驾驶员的监控负担，提高了作业质量，增强了设备的可靠性，有力地证明了电子技术在提高农业生产效率方面所具有的巨大潜力，为后来自动化技术的发展打下了坚实的基础。

（二）自动驾驶与变量作业技术的出现

20 世纪末全球定位系统民用化的发展，推动了农业机械电子系统的进步。以全球定位系统为基础的自动驾驶技术随之出现，彻底改变了传统农业机械依靠驾驶员视觉、标记来对行作业的方式。早期的自动驾驶系统多数是光靶或者辅助驾驶形式，用驾驶室內的显示屏和光条指引驾驶员直线行驶，大大减少了行间重叠、漏过。在喷洒、施肥等作业中明显减少了农药、化肥的投入，减轻了驾驶员的劳动强度，在夜间或能见度较低时，优势更加明显。

自动驾驶技术的发展，为变量作业技术的实现打下了空间位置信息的基础。变量作业技术，就是按照农田内各个区域土壤、作物等具体情况，实时调整施肥、播种、喷药等作业量的技术。该项技术的关键之处在于，把事先拟定的处方图输

入到车载控制器当中，控制器凭借全球定位系统给出的精确位置信息，进而精确地控制执行机构。土壤肥力较高的地方少施肥料，贫瘠地带多施肥料。变量作业技术出现以后，农业机械作业由原来的“均匀处理”变为“按需供给”，精准农业理念初步得到落实，农业机械开始真正具备了基于空间信息的决策执行能力。位置感知与作业控制深度结合之后，农业机械自动化过程就站在了新的高度上。

（三）精准农业概念的提出与发展

精准农业概念的正式提出，为农业机械电子系统的发展指明了方向，并且给出了一个完整的理论框架。其倡导用现代信息技术，在适宜的时间、适宜的地点，采取精确的田间管理措施，目的在于使产量最大化、资源利用最优化、农业生态环境保护等多方面目标得以实现。该概念提出之后，把以前分散发展的自动驾驶、变量作业等技术集成在一个大的目标之下，即实现农业生产全过程精细化管理。

精准农业理念提出以后，农业机械电子系统的发展也不再只是单一功能的实现，而是朝着构建一个数据获取、数据分析、决策和执行构成的闭环管理系统方向前进。因此对各种传感器的需求量越来越大，产量传感器、土壤传感器、作物冠层传感器等应运而生，共同构成了田间信息获取的“天罗地网”。车载计算机的处理能力以及软件功能也随之大幅度提高，可以对复杂的处方图数据进行高效的处理，并且可以与各种执行机构进行顺畅的通信。精准农业的概念被广泛传播以后，对农业机械的设计理念产生深远影响，使农机制造企业把信息技术作为核心竞争力来对待，推动了农机向集成化、系统化的方向发展，为以后智能化的转型打下了坚实的理论和实践基础。

二、智能化转型：农业电子系统的飞跃

伴随着信息技术的迅猛发展，农业机械电子系统已经进入以数据驱动、智能决策为特点的新阶段，实现了从自动化到智能化的质的飞跃。这不只是技术上的更新换代，更是农业机械角色定位发生根本性变化，它由原来的被动的作业执行者转变为具有自主感知、分析、决策能力的主动参与者。

（一）传感器技术的普及与信息获取能力的提升

智能化转型核心就是农业机械能对作业环境以及自身状态进行全面、精准的感知，而感知能力的实现离不开传感器技术的飞速发展和广泛应用。新一代传感器技术比早期只能进行简单监控的传感器具有多样化、高精度、集成化等特点，

大大提高了农业机械的信息获取能力。机器视觉系统已经成为了智能化的“眼睛”，它依靠高清摄像头和先进的图像处理算法可以精准地识别出作物、杂草和病虫害，为靶向喷药、机械除草以及果实自动采摘提供重要的决策依据。

传感器技术的进步体现在以下多个维度：

1. 激光雷达、超声波传感器可以准确感知周围障碍物以及作物的三维形态，给农业机械自主导航避障、作物株高、冠层密度等参数的测量提供可靠手段。
2. 多光谱和高光谱传感器出现以后，农业机械可以获取肉眼看不到的作物生理信息。通过对某一波段的光谱反射率进行分析，就可以对作物的营养状况、水分胁迫状况、病害风险作出准确的评价，进而为变量施肥、灌溉提供更为准确的科学依据。
3. 土壤传感器也从离线取样分析变成了在线实时监测。电导率传感器、光学传感器等可以对土壤中有有机质、水分、氮磷钾等主要成分进行实时测量，从而得到超高分辨率的土壤属性图。

这些先进的传感器所采集的大量、多源异构数据一起构成了农业机械对于农田环境的深刻认识，从而使得它不再只是按照预先设定的指令去行动，而是可以依据实时感知到的信息作出动态的调整。信息获取能力质的飞跃，是农业机械由自动化向智能化过渡的前提条件，也给之后复杂的智能控制和决策算法提供了丰富的数据输入。

（二）车载计算机与控制系统的集成化

传感器是智能农业机械的“眼睛”，高性能车载计算机和高集成度控制系统就是其“大脑”和“神经中枢”。微处理器性能指数级增长、成本持续降低，使得功能强大的车载计算机成了现代农业机械的标配。这些计算机不但是强大的数据处理机器，可以对来自全球定位系统、机器视觉、激光雷达等各种传感器的数据流进行实时的融合，而且具有图形化的用户操作界面，使得复杂的操作与设置变得简单直观。

系统集成化，是智能化转型的又一特点。过去农业机械上各个电子控制单元是由不同的供应商提供的，各个系统之间通信协议不同形成信息孤岛。为了克服以上问题，国际上提出了 ISOBUS 标准，定义了一种开放的、标准的串行数据总线，用以实现农业机械与农具之间即插即用式的通信。依靠 ISOBUS 总线，拖拉机上通用终端可以对后面连接的任何兼容农具（如播种机、施肥机等）的操

作界面和参数进行显示和控制，实现了“一台拖拉机、一个显示器、控制所有农具”的理想。高度集成化的架构可以大大降低系统的复杂性以及用户的学习成本，给不同品牌设备之间协同作业创造了有利条件。将动力机械、作业农具和控制软件融合到一个有机的智能作业系统里，把复杂的协同控制和数据管理变成现实，为整机智能化发展打下了良好的硬件和软件平台。

（三）从单机智能到多机协同的演进

单机智能即单个农业机械具有自主导航、智能控制、环境感知的功能，是智能化转型的重要成果。智能联合收割机根据作物的密度、湿度自动调整前进速度、脱粒滚筒转速，从而达到收获效率最高和谷物损失最少的目的。一台智能拖拉机可以牵引农具进行厘米级路径跟踪、自动掉头、按照处方图进行变量作业。大大提高了单台设备的作业效率和质量。

但是现代农业生产常常是多台机械、多环节相互配合的复杂系统工程，单机智能的局限性也就逐渐暴露出来。农业机械电子系统为提高整个作业的效率开始采用多机协同作业。多机协同的主要手段就是利用无线通信技术，在作业现场的多台机械之间建立起实时的数据链路，从而达到信息共享、行为协调的目的。

最典型的应用场景就是联合收割机和运粮车的配合作业。协同系统是多台收割机互相共享自身的位置、粮箱满载等情况的信息。当收割机粮箱即将满载时，系统就会自动调度距离最近、状态空闲的运粮车去卸粮。运粮车可以自动同步收割机行驶速度和路线，实现伴随卸粮。整个过程不需要人工通讯和干预，大大减少了收割机等待卸粮所造成的停机时间，提高了整个收获作业的流畅性、效率。

多机协同技术也可以用于多台播种机或者耕作机械的编队作业，保证机组间间距、作业轨迹准确无误地衔接，防止重播、漏播，最大限度地利用土地、设备资源。从单机智能到多机协同的转变，是农业机械电子系统设计思想从追求个体性能向群体效率转变的标志，也是农业生产组织方式从分散低效向集中高效转变的重要技术保证。

三、网络化时代：农业物联网的兴起

进入网络化时代以后，农业机械不再是孤立的个体，而是深深嵌入到更加广阔的物联网生态系统当中，实现了机器、田地、人三者之间的全方位互联互通。本阶段以无线通信技术、云计算和大数据分析为主要驱动力，把农业机械电子系

统的应用范围,从单纯的田间作业扩展到覆盖农业生产全链条的数字化管理平台。

(一) 无线通信技术在农业机械上的应用

无线通信技术是田间机械同外界沟通的桥梁,也是农业物联网不可缺少的条件。随着蜂窝网络技术的发展,给农业机械提供稳定高速的广域网络连接。在农机上安装通信模块,可以将作业数据(位置、轨迹、作业面积、燃油消耗、传感器读数等)实时上传到云端服务器。云端作业指令、处方图、软件更新等都可以远程下发到车载控制器。双向通信彻底打破了以前依靠 U 盘等物理介质来实现数据交换的局限,实现了对农机作业的实时监控和远程管理。

除了广域网,农机系统里也使用着 Wi-Fi、蓝牙等短距离无线通信技术。驾驶员可以在车外用平板电脑或者智能手机连接农机控制系统,对农具进行诊断和调试。农具上无线传感器可以利用蓝牙将数据传给主控制器,从而减少复杂的物理线束连接。M2M 通信技术是实现机器之间直接对话的技术,多机协同作业就是通过专用无线电链路或者蜂窝网络来实现的。全面使用无线通信技术,使农业机械转变为移动智能节点,从而给大数据融合和智能服务创造了有利的条件。

(二) 农机与农艺数据的云端融合

网络时代最核心的价值就是数据的汇聚和增值。物联网把来自农机自身的作业参数、设备状态等海量数据,和来自卫星遥感影像、无人机监测数据、气象数据、土壤取样分析数据等其它渠道的信息,在云端平台实现了历史性交汇融合。打破各个数据源之间的壁垒,产生很大的协同效应。

云平台用大数据分析、人工智能算法对各种多源异构数据进行深度挖掘。通过对多年的产量图、土壤图、施肥图叠加分析,可以找出影响产量的主要因素,从而制订出更加科学精准的下一季作物生产管理方案。将农机实时作业数据同作物生长模型融合起来,可以准确预估作物的生长阶段和产量,从而给之后的田间管理及收获计划给予有力的决策支撑。通过对大量的农机作业数据进行分析,可以对各种工况下农机的性能、常见的故障进行了解,从而给产品改进和设计优化提供可靠的数据支持。农机与农艺数据在云端的深度融合,使农业生产决策由传统的经验驱动变为数据驱动,农业生产管理的科学化、智能化水平得到新的提高。

(三) 远程监控与诊断服务的实现

利用农业物联网技术可以达到远程监控、诊断的目的,大大提高了农业机械的管理效率以及售后服务水平。农场管理者或者合作社负责人可以利用电脑或者

手机应用程序，随时查看其名下所有农机的位置分布、作业状态、工作进度、燃油余量等信息，真正实现对庞大机队的“运筹帷幄”。当农机出现故障代码的时候，系统会将故障信息以及相关传感器数据一起上传到云端服务中心。

服务中心技术人员可以通过远程登录故障农机的控制系统，查阅详细的诊断信息，做初步的故障分析。现场可以指导驾驶员进行简单的排障操作，也可以远程下发指令解决软件方面的问题。技术人员可以准确获得故障原因和所需备件，大大缩短了维修停机时间。更为前瞻的服务就是预测性维护，即系统对农机运行数据进行不断分析，采用机器学习的方法，找到预示未来故障的异常模式，提前给用户发出预警，推荐做预防性保养。该种主动式服务模式将传统的“坏了再修”变为“预知预修”，最大程度上保障了农机在关键农忙季节的出勤率，为用户创造了巨大的经济效益。

第二节 现代农业机械电子系统的基本组成

一、感知层：农业机械的“五官”

感知层是整个电子系统的基础，主要采集农业机械自身状态、作业环境、作物等信息，为后面决策和控制提供准确的数据。它们是农业机械的眼睛、耳朵和触觉，依靠各种传感器来使它拥有对复杂农田环境全面感知的能力，是实现自动化、智能化的基础。

感知层各类传感器的具体功能和应用场景，详见下表：

感知层核心传感器及其功能表

传感器类型	具体示例	主要功能	应用场景
位置与姿态传感器	全球导航卫星系统	提供农机精准位置信息	自动驾驶、精准播种 / 施肥
	惯性测量单元	测量农机姿态、角速度、加速度	导航辅助、姿态稳定、路径推算
作业参数传感器	流量传感器	实时监测液体 / 颗粒物料流量	变量施药 / 施肥、精确播种
	压力传感器	检测液压系统 / 喷洒系统压力	确保作业动力、优化雾化效果
	温度传感器	监测发动机、液压油、轴承温度	故障预警、延长设备寿命
环境与作物传感器	摄像头	障碍物识别、作物生长监测、病虫害 / 杂草识别	智能导航、变量植保、产量估算
	光谱仪	分析作物叶片反射光，评估长势及养分状况	精准施肥、作物健康诊断

（一）位置与姿态传感器

位置、姿态传感器是实现农业机械导航、路径规划的基础，由全球导航卫星系统接收机和惯性测量单元组成。全球导航卫星系统是靠接收多颗卫星信号，从而在全世界坐标系中准确地得到农机所在的地理位置，精度好坏决定了自动驾驶、精准作业的效果。尤其是用 RTK 技术接收机进行定位，定位精度可达到厘米级，给精确播种、施肥、喷药作业提供可靠保证。

惯性测量单元依靠内部集成的陀螺仪、加速度计来对农机的三轴角速度、加速度做实时测量。经过积分运算后，可以得到农机在短时间内的俯仰、横滚、偏航姿态的变化。卫星信号被遮挡或者不稳定，例如林地边缘或者高大建筑物附近的地方，惯性测量单元可以有效弥补全球导航卫星系统信号暂时失效的情况，使用航位推算技术提供稳定的姿态位置信息，从而保证农机作业轨迹的连续性以及平滑性。两者结合使用，可以大大提高导航系统的鲁棒性、可靠性。

（二）作业参数传感器

作业参数传感器属于农业机械工作状态的检测装置，也是保证作业质量的重要设备。它们像机械的“神经末梢”，对各种重要的运行参数实施监测，把信息反馈给控制系统，从而达成闭环控制以及故障诊断。这对于保证作业过程稳定可

靠十分重要。

在变量施药、施肥作业中，流量传感器起着不可替代的作用。它安装在输送管道中，准确测量液体、颗粒物料瞬时流量。控制器根据上述的反馈数据来调节泵的转速或者阀门开度，达到准确地控制单位面积施用量、防止资源浪费和污染的目的。压力传感器被广泛地用在液压系统、喷洒系统上，用来检测系统压力，保证液压执行机构有足够的动力，或者保证喷头雾化效果最好。

温度传感器主要监测发动机冷却液、液压油、轴承等关键部件的温度，可以有效地防止发动机过热，也可以避免液压系统因为温度过高而导致性能下降。当温度超过预设的安全阈值的时候，系统就会发出警报，甚至自动采取降速或者停机等保护措施，从而有效地延长机械的使用寿命，保证作业的安全。这些参数的共同检测，就形成了农机作业质量与安全的重要保障。

（三）环境与作物传感器

环境、作物传感器给农机赋予直接观察和诊断农田生态的能力，是实现按需投入、精准管理的重要手段。利用光学、声学等方式获取作物生长情况和周边环境信息，给变量作业提供最直接的决策支持。

1. 摄像头属于最直接的视觉传感器，在现代农业中应用较多。可以用来导航时识别障碍物、行对准，也可以用来监测作物生长状况。依靠图像处理以及人工智能算法，系统可以从摄像头所拍摄到的图像当中识别出杂草、病虫害、养分缺乏等状况，进而指引变量喷药或者施肥系统只对有需求的区域实施精准作业。高分辨率摄像头也可以用来估算作物的密度以及产量，给农场的管理工作提供数据支持。

2. 光谱仪就是分析作物叶片反射的各个波段光线，从而得到更深层次的生理信息。近红外光谱可以准确地反映作物叶绿素含量和生长状况，用归一化植被指数等指标来定量评价作物的长势和氮素含量。非接触式的测量方式可以对大面积作物信息进行快速全面的采集，并给精准施肥图谱的创建提供科学依据，属于精准农业养分管理的重要技术之一。

二、控制层：农业机械的“大脑”

控制层是整个电子系统的大脑，它要完成信息处理、决策和指令下达的工作。它接收感知层大量的数据，按照事先设定的控制算法、决策模型进行运算，最后

产生控制指令传给执行层。这一层就像是农业机械的大脑，运算速度、决策智能程度的好坏直接决定了整机作业效率和智能化水平。

（一）微处理器与控制器

微处理器和控制器属于控制层的物理载体，同时也是进行复杂运算和逻辑判断的硬件核心。它们就相当于大脑里的神经中枢，把所有的输入信息加以处理、整合之后，再发出行动指令。

微处理器就是将中央处理器、内存、输入输出接口等主要部件集成在一个芯片上的微型计算机。农业机械电子系统中，功能比较简单的传感器或者执行器节点一般内置微处理器，完成局部的数据采集、初步处理和通信工作。分布式架构能分散主控任务，加速响应速度、增强灵活性。

控制器一般是指车辆领域里更复杂、处理能力更强、接口更多的电子控制单元。农机上的主控制器即整车控制器或者自动驾驶控制器，一般采用高性能的多核处理器，可以同时处理全球导航卫星系统、惯性测量单元、摄像头等各个传感器的数据流。它运行着复杂的操作系统和控制软件，既执行导航、路径规划、变量控制等主要算法，又担负人机交互、数据记录、网络通信等任务，是实现整机智能化协同作业的总指挥。

（二）控制算法与决策软件

控制算法和决策软件是控制层的灵魂，也是实现农业机械智能化的逻辑中枢。它们把农艺知识、操作经验、优化理论固化成计算机程序，指导机械在变化的环境中做出最优的选择。软件先进程度的好坏直接决定了农业机械智能化水平的高低。

控制算法主要是用来完成具体的闭环控制任务。自动驾驶系统中的路径跟踪算法，根据全球导航卫星系统测得的当前位置和目标路径偏差，用比例 - 积分 - 微分控制或者先进的控制理论计算出应该调整的转向角度，从而使农机沿着规划好的轨迹前进。变量施肥系统中的控制算法会根据作物传感器读数、事先设定的施肥处方图，实时计算并调节施肥阀门的开度，达到按需施肥的目的。

决策软件属于更高层次的软件，主要是做全局性的规划和判断。把作物生长模型、土壤数据库、气象数据、实时传感器信息等结合在一起形成智能决策支持系统。一套先进的植保决策软件可以综合考虑作物的病害识别结果、当前的风速风向、田块边界等信息，智能地判断什么时候开始喷洒、避开障碍物和敏感区域、

选择最优的作业路线来提高作业效率和效果，这是实现完全自主作业的关键。

（三）人机交互界面

人机交互界面是操作员和农业机械电子系统沟通的桥梁，用图形化、可视化的形式把复杂的系统状态和作业信息直观地呈现给用户，并给用户提供便捷的操作入口。良好的人机交互界面设计可以明显降低操作难度，提高作业效率和安全系数。

传统的人机交互界面只有指示灯、按钮，现代的农业机械大都用大尺寸的触摸屏。显示屏上可以清楚地显示农机实时位置、行驶轨迹、作业覆盖面积、播种量、施药量等各项作业参数和设备状态报警。地图界面一般是主显示区，除了展示农田边界、导航路线之外还可以叠加显示处方图、实时产量图或者作物长势图等来供决策使用。

用户通过触摸可以设置作业参数，规划或者选择作业路径，开启或者停止自动作业模式，对系统进行诊断与校准。作业开始前，操作员只需要在屏幕上选择要作业的田块和预设的作业任务，系统就会自动加载所有的配置。优秀的交互界面还要有报警提示的功能。当系统检测到故障或者异常的时候，会以声光等形式引起操作员的注意，保证人机作业的安全。

三、执行层：农业机械的“手脚”

执行层属于电子系统最终输出环节，把控制层发出的电信号指令转化为具体的机械动作。它是农业机械的手和脚，直接完成转向、调速、提升、喷洒等物理动作。执行机构响应速度、控制精度、可靠性的好坏直接影响控制策略能否准确、高效地执行。

（一）电液比例阀与伺服电机

电液比例阀、伺服电机都是实现精密控制的重要执行机构，可以将微弱的电信号转换成强大的可调节的机械运动和动力输出。

电液比例阀广泛应用于农业机械液压系统里，对液压油流量、压力、方向等进行调节。比例阀的阀口开度可以和输入的电信号成比例地连续变化，不同于传统的开关式电磁阀。控制器通过调节施加给阀门的电信号强度，就可以准确地控制液压缸伸缩速度或者液压马达转速。电液比例阀可以实现收割机割台升降、播种机开沟器深浅等操作的平稳、准确调节。

伺服电机是一种可以实现角位移或者直线位移精确控制的电动机。一般和驱动器、编码器配合构成闭环控制系统，可以实现对转动角度、转速的极高精度控制。伺服电机在农业机械中经常被用作需要快速准确定位的场合，变量播种系统中排种盘就是通过伺服电机驱动的，自动化采摘机器人中机械臂各个关节也是由伺服电机驱动的。

（二）自动转向与变量执行机构

自动转向和变量执行机构是精准农业里比较典型的两类执行机构，它们分别对农机空间位置和物料投入进行按需精准控制。

1. 自动转向执行机构：按照控制系统发出的转向指令执行，是实现自动驾驶的主体。主流方案有集成在转向柱上的电控方向盘、用液压方式控制前桥转向的电液转向阀组。电控方向盘采用内置电机直接驱动方向盘转动，响应快，安装改造方便。电液转向阀组调节进入转向油缸的液压油来控制车轮角度，可以提供更大的转向力矩，更适合于重型农业机械。

2. 变量执行机构就是根据处方图或者实时传感器数据，动态调节农资施用量的装置。其形式多样，通过直流电机或液压马达改变排肥、排种轴的转速来控制施用量，或者通过控制喷嘴下方的电磁阀、比例阀的开闭频率、时间来实现喷洒量的精确调节。这些执行机构保证农田的每一个角落都能得到最恰当的投入量，是节约成本、保护环境的重要保证。

（三）信息显示与报警装置

信息显示和报警装置属于执行层里达成人机信息交流的输出部分。它们并不直接产生机械动作，但是它们是保证操作员知情权和作业安全的重要环节。用直观易懂的形式把系统内部状态和外界环境信息提供给操作员。

信息显示装置就是驾驶室内各种仪表盘、显示屏。除了前面提到的用于人机交互的触摸屏之外，还有一些专门用来显示发动机转速、水温、油压等重要安全信息的独立仪表。显示设备可以及时反馈数据，使操作人员能够对机械的总体运行情况有全面的了解。一些先进的系统还可以使用平视显示技术，把重要的导航或者作业信息投射到挡风玻璃上，使驾驶员不必低头就能看到，从而大大提高驾驶的安全性。

报警装置在系统检测到故障、危险或者重要状态发生改变的时候，会通过声光等手段向操作员发出警报。传感器检测到籽种箱或者肥料箱即将排空的时候，

系统会发出声音，并在屏幕上显示提示，提醒操作员及时补充；发动机水温过高或者液压系统压力异常的时候，高分贝蜂鸣器和闪烁红色警示灯会强制性地提醒操作员立即采取措施，防止机械损坏或者发生安全事故。该类设备对于保证人机安全、作业顺利进行起着非常重要的作用。

第三节 现代农业机械电子系统的应用领域

伴随着传感器、信息处理、自动控制技术的迅速发展，电子系统已经融入到农业生产各个环节之中。从广大的田野、精密的温室、集约化的养殖场，电子系统依靠高效、精准、智能的优势，正在改变传统农业生产方式，引导农业走向自动化、智慧化。

一、大田作物生产中的应用

大田作物生产是农业的基础，规模化、标准化等特点给电子系统的集成应用提供了一个广阔的舞台。电子系统对农业机械实施智能化改造、对生产过程实行精细化管理，大幅度提高了大田作业效率与质量，缩减了生产成本和资源耗费，是达成精准农业的关键技术支撑。

（一）自动驾驶驾驶系统

自动驾驶驾驶系统是现代大型农机具的“大脑”和“眼睛”，集全球卫星导航、惯性测量、机器视觉、控制系统于一身，赋予拖拉机、播种机、联合收割机等农业机械按预定路线自动行驶的能力。该系统采用高精度差分定位技术，作业路线重复精度能达到厘米级，彻底改变了传统的依靠驾驶员的经验和目视判断的方式，大大减轻了驾驶员的工作负担，使驾驶员能更多的将精力放在对作业机具的监控与调整上。

农场管理者可以事先规划出田块内全部作业路径，即直线、曲线、转弯等各种复杂路线，然后输入车载控制终端。作业时系统自动控制农机的转向、油门和速度，使农机按规划的路径行驶，土地耕整均匀、播种行笔直、收获无遗漏、无重割。准确的路径控制避免了重复作业或漏作业造成的资源浪费、产量损失，也给后面的植保、施肥等田间作业提供了准确的路径基准，实现了耕种管收全流程的路径协同。

自动驾驶的应用大大增加了农机的有效作业时间，不受光线限制，可以实现昼夜连续作业，对抢农时、提高农机利用率有重大意义。大雾、扬尘等能见度低的时候，它比人工驾驶可靠得多。改善行驶路线，削减无效转向和重叠区域，有益于缩减燃油耗费、机械磨损，从而实现经济效益与环境保护的双丰收。

（二）精准播种、施肥与喷药

精准播种、施肥、喷药属于精准农业理念在田间管理环节具体执行的情形，其关键就是依靠电子控制系统来实现作业量的“按需分配”。该系统一般由车载控制器、全球卫星定位接收机、变量控制执行机构、传感器等组成，根据事先绘制的田间信息处方图，在田块不同位置自动调节播种量、施肥量或喷药量。

在精准播种作业中，播种机上安装的电控排种系统可以实时调节排种器的转速或者开度，从而准确控制单位面积的下种量。系统根据土壤肥力、水分含量等数据生成的播种处方图，在肥力高的地块增加播种密度，在贫瘠地块减少播种密度，从而达到群体优势最大化、个体充分发育的目的，最终提高总产量。

变量施肥系统的工作原理同它类似。系统根据土壤养分的空间差异信息来控制施肥机上的执行器，使肥料输出速率随需求而变。在氮素缺乏的地区增加氮肥施用量，在磷、钾充足的地区减少或不施用，做到缺什么补什么，缺多少补多少，大大提高了肥料利用率，减少了由于过量施肥造成的环境污染和成本浪费。对于变量喷药，系统可以利用田间病虫害分布图或者实时传感器（光学传感器识别杂草）来控制喷头的开关和喷量，只对有害生物发生的地方进行精准喷洒，大幅度减少农药使用量，保证农产品的安全和生态环境。

（三）智能收割与产量监测

收割阶段是农业生产最后一个环节，电子系统使它由单纯的收获作业变成集收获、信息采集、分析为一体的智能化过程。智能联合收割机集成了各种传感器和控制单元，在提高收割效率的同时还可以获取作物产量的空间分布情况，为之后的生产管理决策提供依据。

智能收割技术依靠割台上装有的仿形传感器、激光传感器或者超声波传感器，对地面起伏、作物高度、密度进行实时感知，从而自动调节割台高度和收割机行进速度。这就使收割机在复杂地形和不同的作物长势条件下，始终能保持最好的收割状态，从而缩减割茬高度、减少籽粒损失。同时清选系统中的传感器对风机转速、筛片开度进行监测，根据谷物流量、含杂率等信息来自动调节，从而达到

最佳的清选效果，保证入仓谷物的清洁度。

产量监测系统是智能收割机的重要组成部分，一般由谷物质量流量传感器、谷物水分传感器、全球卫星定位接收机等组成。谷物进入粮仓之前要经过质量流量传感器（冲击式或光电式），该传感器可以实时测量单位时间内谷物流通量。水分传感器检测谷物含水量，然后换算成标准含水量下的产量。按照定位系统给出的地理坐标，系统可以实时记录田块内每处产量，作业结束后可以自动生成产量图。

产量地图蕴含着丰富的信息，清楚地表现出了田块内部产量的空间差异性以及形成原因。农场管理者可以利用这些数据来分析不同区域的产量高低同土壤类型、养分状况、灌溉条件等因素之间的关系，为下一季的精准播种、变量施肥等决策提供最直接、最有力的支持，形成一个实践、监测、分析、决策的闭环优化管理体系，不断提高农业生产的科学化水平。

二、设施农业中的应用

设施农业依靠创建可控制的生长环境来达到作物高效、集约化的生产，电子系统则是实现环境可控的神经中枢。电子技术冲破了温室、大棚这些设施的自然条件限制，给作物营造出最合适的生长环境，实现了农作物生产全过程的自动化，促使现代农业朝着精细化、工厂化的方向发展。

（一）温室环境自动控制系统

温室环境自动控制系统属于典型的农业物联网应用，它依靠“感知-分析-决策-执行”的闭环控制过程，对温室内同作物生长密切相关环境因子实施全天候的智能调节。该系统对传统的温室管理方式进行了革命性的改变，把生产者从繁杂、重复的环境调控工作当中解放出来。

系统使用温室中的各种传感器建立立体环境感知网络。传感器就像是作物的感官，可以对周围环境参数进行实时的监测。采集到的数据通过有线或者无线的方式传输到中央控制器或者云平台，控制器内设定的专家系统或者作物生长模型会对预设的目标参数（不同作物、不同生长阶段有不同的最佳环境参数）进行分析、决策，然后向各个执行机构发出指令，进行相应的调节操作。

1. 温度和湿度控制，当温度传感器检测到室内温度过高时，系统会自动开启风机、湿帘或者打开天窗、侧窗进行自然通风降温；当温度过低时，就会自动开启加热设备（电热风机、热水管道）。湿度传感器可以联动喷雾或者除湿设备，

使空气的湿度保持在合适的范围之内。

2. 光、二氧化碳浓度的调节，光照传感器检测光照强度，光照不足时开启补光灯，光照过强时开内遮阳网和外遮阳网。二氧化碳是光合作用的原料，系统利用二氧化碳传感器检测其浓度，当浓度低于设定值时，自动开启二氧化碳发生器或者释放压缩二氧化碳气体进行补充。

3. 通风保温控制，调节通风窗开合程度和开合时间，以达到通风透气、室内温度、湿度适宜的目的。保温幕布或卷帘的开闭由系统根据光照、温度情况自动控制，达到保温或者降温的目的。

（二）水肥一体化智能管理

水肥一体化是将灌溉和施肥同步进行的一种高效农业技术，智能化管理系统给它提供精准运行的保证。该系统以作物需求和土壤环境实时、精确的监测为依据来作出水肥供给决策，实现了水肥的高效利用和按需供给，是节水农业、生态农业发展的重要技术。

智能水肥一体化系统一般由中央控制平台、传感器网络、施肥机、过滤系统、管网系统组成。它的工作流程以前端传感器的信息采集为起点。布置在农田或者基质中，用于实时监测作物根系微环境的土壤水分传感器、土壤温湿度传感器、电导率传感器、pH 传感器等。数据传送到中央控制器，控制器按照事先设定好的灌溉施肥方案，结合气象信息和作物生长模型进行运算，得到当前最合适的灌溉水量和肥料配比。

决策做出之后，中央控制器就给施肥机系统发出指令。施肥机按照指令，用高精度比例泵或者文丘里施肥器，将母液罐内的不同肥料按精确的比例注入主灌溉管道，和灌溉水充分混合。混合后经过滤系统处理过的水肥溶液，通过滴灌管、微喷带等高效节水灌溉设施均匀、缓慢地输送到每株作物的根部，使水和养分能被作物最大程度地吸收利用。整个过程可以完全自动化运行，也可以通过电脑或手机远程进行干预和调整。智能化管理方式节水节肥的效果很明显，还可以避免土壤盐碱化、水体污染，减少人力。

（三）机器人化育苗与采收

劳动力成本不断攀升，农业机器人在设施农业中越来越受到重视，育苗、采收这两个劳动密集型环节更是如此。机器人技术把机器视觉、人工智能、精密机械、自动控制融合在一起，可以代替人完成重复性高、强度大的工作，从而提高

生产效率和作业质量。

育苗工厂的自动化流水线、育苗机器人完成基质装填、播种、催芽、苗期管理大部分工作。嫁接机器人使用高速视觉系统精确定位砧木和接穗的切口位置，用微型机械手完成切割、对位、夹持固定，嫁接速度和成活率都比人工高得多。转运机器人负责把不同的温区穴盘运送到相应的位置，改善育苗的空间布局。这些机器人使用以后，育苗过程实现了工厂化、标准化的流水线作业，育苗周期缩短，种苗质量均一。

果蔬采收属于设施农业里技术难度最高、最难破局的机器人应用场景。采摘机器人一般是由移动平台、多自由度机械臂、末端执行器（手爪）和视觉识别系统组成的。视觉系统用深度学习算法，在复杂的背景里能正确识别出成熟的果实，并判断它的三维空间位置和姿态。控制系统规划出最优抓取路径，驱动机械臂准确移动到目标位置，末端执行器用柔性气囊、仿生手指等牢固抓取果实，不损伤果实，放入收集筐中。尽管目前采摘机器人对于遮挡果实、不同光照条件下果实的识别以及采摘效率等方面还存在一定的问题，但是它的技术正在不断的发展，在草莓、番茄、黄瓜等作物的采摘中已经显示出巨大的应用前景。

三、畜牧与水产养殖中的应用

现代畜牧业、水产养殖正朝规模化、集约化、工厂化方向发展，电子信息技术的深度融合是促使这种转变的主要动力。通过布置各种电子设备，达到对养殖环境进行精确调控、对饲喂实行定量控制、对动物个体行为及健康状况实施智能监测的目的，从而在保障动物福利的同时全面提升养殖效率和质量。

（一）精准饲喂与环境控制

精准饲喂系统以各个动物个体或者群体的营养需求为依据，对饲料进行个性化、自动化的投喂，从而达到饲料转化率最大化、养殖成本最小化的目的。现代化猪场、牛场的每一头动物都有电子耳标或者颈环做其唯一的电子身份标识。当动物进入自动饲喂站时，识别器读取它的身份信息，中央计算机就调取该动物的相关数据（品种、日龄、体重、健康状况、泌乳阶段等），按照预设的营养模型计算出当前需要的饲料种类和数量，然后控制下料器准确投放。既可以满足动物个体化营养需求，也可以对每只动物的食量进行记录，为健康监测、遗传育种提供数据支持。

养殖环境的好坏直接影响着畜禽的生长速度和抗病能力。环境自动控制系统用传感器网络实时检测舍内温度、湿度、氨气浓度、硫化氢浓度、二氧化碳浓度、光照强度等主要参数。当任何一个参数超过设定的舒适范围的时候，系统就会自动开启相应的调节设备，例如启动风机进行通风换气、开启湿帘或者喷雾系统来降低湿度、开启供暖设备来保持温度的稳定。智能化环境调节给畜禽提供稳定的、舒适的、健康的生存环境，大大降低畜禽应激反应以及疾病的发生。

将精准饲喂与环境控制集成在一个管理平台中，养殖者可以对养殖场的实时状况进行远程监控，收到异常报警信息并实施远程控制。数据平台对长期积累下来的采食量、环境参数、生长数据等进行大数据分析，可以促使管理者改进饲料配方、改善饲养管理方式，从而达到提高养殖效益的目的。以数据为依托的精细化管理模式就是智慧畜牧的核心。

（二）畜禽行为监测与健康状况分析

传统畜牧业依靠人工巡查来判断动物的健康状况，这种方法主观性较强，效率低，并且容易错过最佳干预时间。使用电子技术的无损监测系统，能够检测出动物行为、声音、生理状况的变化，可以及早发现动物的疾病，也可以准确地辨别出动物发情等重要的生理现象。

目前应用比较广泛的技术之一是可穿戴传感器的监测。电子脚环、耳标中安装三轴加速度计可以连续记录动物运动数据，以动物活动量、站立时间、行走步数等行为模式变化为依据，判断奶牛是否在发情期或者有无跛行等健康问题。同样，反刍监测传感器可以监测到动物颈部细微的活动，统计其反刍时间，反刍活动减少一般表示动物消化系统出现异常或者总体健康状况变差。

畜禽行为与健康监测技术对比表

监测技术	监测对象 / 指标	应用场景	优点	局限性
可穿戴传感器	运动量、步数、反刍时长	奶牛发情、跛行检测	实时、连续、个体化	成本较高、可能脱落
机器视觉	群体行为、体态、离群	猪只攻击性、病弱识别	非接触、数据量大	易受光照、遮挡影响
红外热成像	体表温度	动物发热个体筛查	快速、无接触、群体适用	仅限于体表温度异常
声音分析	咳嗽、尖叫声	呼吸道疾病、应激监测	早期预警、群体监测	易受环境噪音干扰

由表可知，机器视觉、声音分析技术也有很大的潜力。在养殖场内安装高清摄像头，采用人工智能图像识别算法可以对群体行为进行分析，识别出有攻击行为的个体，或者发现离群、食欲不振等异常行为的病弱猪只。用红外热成像技术可以无接触地测量动物体表温度，快速发现发热个体。声音监测系统通过分析猪的咳嗽声、尖叫声等声音，来判断猪是否有呼吸道疾病或者群体受到应激。将大量的连续客观数据以直观的健康警报和管理建议的形式展示出来，兽医和管理人员可以精准干预，从而把疾病治疗转变为预防。

（三）水产养殖溶氧与投喂监控

溶解氧是水生动物生存、生长过程中最主要的生态因子。智能化溶氧监控系统在养殖水体中安装了在线溶解氧传感器，24 小时不间断对溶氧情况进行监测。当监测到溶氧浓度低于设定的安全值时，控制系统就会自动开启增氧机、曝气泵等进行增氧；当溶氧达到适宜水平时再关闭设备，从而避免无效运转造成的能源浪费。自动化、精准化的溶氧管理完全改变了过去靠经验、定时开启增氧机的粗放式管理方式，大大降低了因缺氧浮头造成的养殖风险，保障了养殖的安全，提高了养殖的密度和效益。

精准投喂又是降低水产养殖成本、减少水体污染的又一重要环节。传统的人工投喂或者简单的定时投喂机，不能根据鱼虾实际摄食情况和水质变化来调整饲料投喂量，常常出现饲料投喂不足或过量。智能投喂监控系统是由水下摄像头、声音传感器（水听器）或者红外感应等设备构成的，可以对水生动物的摄食行为以及活跃度实施实时监测。系统可以分析鱼群的聚集情况和抢食强度，当监测到大量的饲料没有被及时吃掉而沉底的时候，系统会判定动物已经吃饱，从而自动停止或者减少投喂量。系统还可以用水温、溶氧等环境数据来建立摄食模型来预测下一次喂食的时间。利用行为反馈闭环投喂控制，可以精准地给水生动物投喂饲料，既可以满足水生动物的生长需要，又可以最大程度上减少饲料浪费和水体污染。

第四节 现代农业机械电子系统的发展趋势

新一代信息技术、人工智能、生物技术、新材料、新能源技术与现代制造业深度融合，全球农业装备产业正处在前所未有的深刻变革之中。现代农业机械电子系统是这场变革的主要推手，其发展趋势越来越明确，正迅速走向智能化、网联化、绿色化，以期打造起更高效、更精准、更可持续的未来智慧农业生产新模式。

一、智能化与自主化

智能化、自主化是现代农业机械电子系统发展的主要方向，核心就是赋予农业机械类似人的感知、决策和执行能力，把人从繁重、重复的农业劳动中解放出来，大大提高生产效率和作业质量。这一趋势的达成，很大程度上依靠传感器技术、人工智能算法、先进控制理论的融合创新。

（一）从辅助驾驶到无人驾驶

农业机械自主化的过程是从辅助驾驶技术开始的。最早出现的有以光靶系统、基于全球导航卫星系统的自动转向系统等为代表的辅助驾驶技术，大大减轻了驾驶员的操作负担。驾驶员只需在系统辅助下进行监控和少量干预，就能保证机械长时间、高精度地按预定的直线或者曲线路径行驶，避免了由于人工操作疲劳而造成重播、漏播的现象，使作业更加标准化。

目前技术正由辅助驾驶迅速向完全的无人驾驶发展。L3 或者 L4 级别的无人驾驶农机已经从概念走进了田间。这些高度自主化的设备集成了高精度实时动态差分，惯性测量单元，激光雷达，毫米波雷达，多摄像头视觉系统等，形成了很强的环境感知能力。复杂的算法可以支持机器自主路径规划、动态障碍物检测与规避、地头自动转向、异常情况下安全停车。无人驾驶农机在复杂非结构化环境下的可靠性、全天候作业的稳定性、高昂的成本、相关法律法规的完善等还存在一些问题，但是其在提高土地利用率、实现 24 小时不间断作业、节约人力成本等方面所表现出的巨大潜力，已经使其成为全球农机巨头和科技公司争夺的战略高地。

（二）基于机器视觉的自主作业决策

机器视觉技术给智能农机装上了“慧眼”，使智能农机具有了传统传感器所没有的精细感知与自主决策的能力。模仿生物视觉的功能，用摄像头（RGB、多

光谱、高光谱甚至 3D 摄像头) 来采集作业对象和环境图像信息, 经过复杂的图像处理和深度学习算法分析之后, 控制作业部件进行精确操作。这项技术使得农业机械不再只是按事先设定好的指令来工作的工具, 而是可以对环境的变化做出智能反应的作业机器人。

机器视觉的自主作业决策有非常大的应用价值。精准植保环节中, 视觉系统可以区分作物与杂草, 使喷头只对杂草进行靶向喷洒, 大幅减少农药用量、降低生产成本和环境污染。在作物管理中, 通过分析作物叶片的颜色、形态来判断作物的营养状况、水分胁迫程度, 从而为变量施肥、灌溉提供决策依据。采摘机器人的自动采摘依靠的是机器视觉来识别果实的成熟度、大小和空间位置, 再由机械臂无损采摘, 很好地解决了果蔬收获季节劳动力不足的问题。

随着卷积神经网络等深度学习模型的不断成熟, 机器视觉系统对于复杂背景下目标的识别精度和鲁棒性都有所提高。视觉感知与其他传感器数据融合后会获得更加完整、全面的场景认知能力, 使农业机械的自动作业决策更智能可靠、适用于各种不同的农艺和作业环境。

(三) 多机协同的集群作业模式

单个农机的智能化产生出一种新的作业组织形式, 即多机协同的集群作业。该模式借鉴蜂群等生物群体智能的思想, 用先进的通信技术和调度算法组织大量小型化、轻量化智能农机或者农业机器人, 以协同的方式完成大面积的耕种管收等工作。不仅可以实现作业效率的倍增, 而且在灵活性、可扩展性、系统冗余性等各方面也表现出传统大型单机无法比拟的优势。

实现多机协同的关键在于强大的信息交互与协同控制技术。

1. 首先要建立稳定的、低时延的无线自组网, 使农机之间、农机与云平台之间的数据可以实时交换, 共享农机自身的位置、速度、作业状态和感知到的信息。

2. 核心就是协同控制算法, 其中包括任务分配、协同路径规划、冲突消解等模块。控制系统可以是集中式的以主控节点或者云平台为中心的控制系统, 也可以是分布式的, 每台农机按照预先设定的规则以及局部通信做出决策, 具有更好的鲁棒性。

典型的场景就是收获作业时, 多台无人驾驶联合收割机和无人驾驶运粮车一起工作。收割机当粮仓快满时自动向最近的空运粮车发出要求, 运粮车自行规划路线并跟随行驶, 在行进中卸粮。整个过程不需要人工干预, 大大缩短了由于卸

粮造成的停机等待时间，最大限度地提高了收获作业的连续性和效率。由小型的机器人组成的集群进行播种或者除草，能有效降低对土壤的压实。

二、网联化与云化

随着物联网、云计算、大数据技术在农业上的应用，现代农业机械也从原来孤立的“信息孤岛”转变为互相连接的智能终端。网联化、云化促使农机自身实现数字化升级的同时，也将农机作业数据融入到更广大的农业生产管理体系当中，为精准农业、智慧农业打下了坚实的数据基础，提供了强大的计算能力。

（一）农机作业数据的实时云平台分析

现代高端农业机械普遍装备车载智能终端和各种传感器，它们就相当于机器的“黑匣子”，可以对作业时产生的大量数据进行实时采集并上传。这些数据有农机的地理位置、行驶轨迹、速度、油耗、发动机工况、作业时长等基本信息，也有作业部件的状态参数，即播种量、施肥量、喷药量，以及利用专用传感器获得的产量数据、土壤电导率等高价值农艺信息。

当这些数据汇集到农业物联网云平台的时候，其价值就可以被深入挖掘。云平台依靠自身的存储以及计算能力，对于大量的数据展开清洗、处理并实施可视化分析。农民或者农场管理者可以利用电脑或者手机 APP，对农机的位置以及作业进度实施远程实时监控，查看详细的作业报告和统计图表。更重要的是平台把数据和地理信息系统合在一起生成产量分布图、施肥量图、土壤墒情图等各种作业图谱。图谱直观地表现出了农田内部空间的差异性，给后面精准作业的处方图制定提供科学依据，是精准农业闭环管理中重要的一环。

（二）基于大数据的远程预测性维护

传统的农机维护方式是以被动维修、定期保养为主，容易因为突然出现的故障造成作业中断，在农时紧张的季节会造成巨大的经济损失。大数据的远程预测性维护技术（Predictive Maintenance，简称 PdM）正在从根本上改变这一状况。其主要思想就是将被动响应转变为主动预警，即通过对农机运行数据的持续监测，并进行智能分析来预测潜在的故障，在故障发生之前就做好维修的安排。

实现预测性维护的关键就是建立准确的故障预测模型。农机制造商和云平台服务商通过大量同型号设备的运行数据、故障记录进行分析，利用机器学习算法（回归分析、支持向量机、神经网络等）找到与发动机过热、液压系统压力异常、

轴承磨损等特定故障相关的典型数据模式和异常特征。模型部署之后，系统就会一直把每台在线农机的运行数据同健康模型做比较，只要数据出现偏离正常范围并且表现出早期故障的特征，就会触发预警。系统可以把故障类型、可能原因、维修方法自动发给用户和授权的服务商，还可以自动创建维修单、预留所需零件，大大减少非计划停机时间，提高设备的可靠性、出勤率。

（三）农业生产的全流程数字化管理

农机网联化最终目的就是实现农业生产全流程数字化管理。在宏大的愿景里，智能农机是数据采集节点和指令执行终端，但是它们不是孤立存在的，而是无缝嵌入到覆盖全产业链耕、种、管、收、储、运、销的综合数字农业管理平台（Farm Management Information System, FMIS）里。它好比一个数字农场主，把各个渠道的数据流收拢起来。

平台将农机作业的实时数据、田间传感器网络采集的土壤和环境信息、无人机或卫星遥感获取的作物长势影像、气象服务机构提供的天气预报数据、企业资源计划系统的农资采购、库存、人员和财务等数据整合在一起。对多源异构大数据进行融合分析之后，平台可以给农业生产各个环节提供智能决策支持。根据土壤肥力分布和作物长势遥感图生成变量施肥处方图，直接下发给装有变量施肥系统的拖拉机执行。

全流程数字化管理可以达到精准作业的目的，提高资源利用率、生产效率，并且可以建立起从田间到餐桌的完整的追溯体系。每一批次农产品生产环境、农事操作记录、用药施肥情况都被详细地记录下来，形成了唯一的数字身份证。消费者扫描二维码就能知道产品的前世今生，大大提高了农产品的品牌价值和市场竞争力，也给食品安全提供强有力的技术支持。

三、绿色化与电动化

在气候变化、环保法规越来越严格的压力下，农业生产可持续性问题上前所未有地受到重视。现代农业机械电子系统在推动农业机械行业向绿色化、电动化转型中起着举足轻重的作用，它是新能源动力系统的“大脑”，也是实现整机节能降耗、符合环保设计要求的技术基础。

（一）新能源农机动力系统

长期以来，以内燃机为主要动力的传统农机是农业生产中主要的碳排放源之

一。推动农机动力系统电动化、新能源化是实现农业节能减排的必由之路。目前，纯电动拖拉机与混合动力拖拉机是研发和运用最为广泛的两类拖拉机。纯电动农机依靠大容量动力电池作为唯一能源，通过电机直接或者间接驱动行走系统和作业部件，具有零排放、低噪音、低振动、扭矩响应快等特点，适合在温室大棚、畜牧养殖场等对噪音、排放有严格要求的场合使用。混合动力系统把内燃机和电动机的优点结合起来，依靠智能能量管理系统，使内燃机一直工作在高效区间，实现了续航里程和燃油经济性的兼顾，被看作大马力农机电动化转型的重要过渡方案。

除了纯电、混动这两种技术路线之外，氢燃料电池、生物柴油、天然气等清洁能源动力系统也被积极研究。无论是哪种新能源动力，都离不开复杂的电子控制系统，即电池管理系统、电机控制器、整车控制器。这些电子系统实时监测能源状况，精确控制能量走向，对动力系统做热管理、安全保护，是保证新能源农机安全可靠运行的重要部分。

新能源农机动力系统类型与特点

动力系统类型	主要能源	驱动方式	优势	适用场景
纯电动	大容量动力电池	电机直接 / 间接驱动	零排放、低噪音、低振动、扭矩响应快	温室大棚、畜牧养殖场等有严格排放要求的场景
混合动力	内燃机 + 电动机	智能能量管理系统协调	兼顾续航里程和燃油经济性，内燃机工作在高效区间	大马力农机电动化转型过渡方案
氢燃料电池	氢气	电化学反应产生电能驱动电机	零排放、续航里程长、加注速度快	潜在的未来高功率农机动力选择
生物柴油 / 天然气	可再生生物质 / 天然气	传统内燃机改进或专用发动机	相对低碳、降低化石燃料依赖	特定资源丰富地区或环保要求较高区域

从上表可以看出，不同新能源动力系统各具特点，适用于不同的农机应用场景。

（二）节能降耗的智能控制策略

除了动力系统的改变，利用先进的电子控制策略提高已有的动力总成的能量利用率，也是实现节能降耗的又一途径。即使是传统的燃油农机也存在着巨大的电子控制系统节能潜力。发动机与变速箱一体化的智能控制技术，电控无级变

速器的应用可以实时检测负载的变化情况后自动、连续的调节传动比,使发动机一直处于最小燃油消耗转速区间里,从而相比于传统档位变速箱可以节省大量的燃油。

负载敏感液压系统也属于此类型。该系统使用电子控制变量泵,根据作业机械实际工作要求准确地输出液压流量和压力,避免了传统定量泵系统在低负荷时由于溢流而造成的大量能源浪费。电子系统还可以提供经济模式或者自动模式等多种节能工作模式,驾驶员只需按一下按钮,系统就会自动调节油门响应、换挡逻辑等参数,达到最好的燃油经济性。利用自主导航系统所具有的路径规划功能,可以对田间作业路线进行优化,从而缩减无效行驶和地头转弯次数,在作业环节达到节能减耗的目的。

(三) 符合环保要求的电子系统设计

绿色化不仅仅体现在农机使用过程之中,它贯穿于农机电子系统全生命周期的设计之中。未来的农业机械电子系统设计要符合环保要求,从源头上杜绝它给环境带来的潜在影响。这就意味着在产品的设计、制造阶段就要遵守欧盟有害物质限制指令等环保法规,选用无铅焊料、无卤素材料等环保型元器件和原材料,尽量减少或消除电子部件中铅、汞、镉等有害物质的使用。

从设计上来说要提高产品耐用性、可靠性,延长电子系统寿命,减少电子垃圾的产生。推广模块化设计理念也不能忽视。当某一个功能模块出现故障或者需要升级的时候,只需要更换该模块,而不需要更换整个控制单元,这样既可以降低用户的维修成本,又可以最大限度地减少资源浪费。在产品生命周期的末尾还要考虑电子部件的可回收性、可拆解性,选择容易回收、降解的材料,结构设计上便于拆解、分类,提高废旧电子产品资源的回收利用率,最终形成设计、生产、使用、回收的绿色闭环。

第二章 农业机械电子系统理论基础

第一节 传感器与检测技术基础

传感器是现代农业机械电子系统的“感官”，可以感知作物生长环境、农机作业情况、物料特性等各种信息，并把它们转换成可以处理的电信号。对传感器种类、原理、性能指标、选型标定方法等有深刻的认识，是设计高效、精准、智能农业装备的前提，对提高农业生产自动化水平和资源利用率起着至关重要的作用。

一、常用传感器的分类与原理

为了满足农业生产多样化的监测需求，人们开发出了各种各样的传感器。对传感器进行系统分类有利于理解它们的适用场合和内在机理。按照测量物理量、内部工作原理或输出信号形式的不同，传感器可以划分为不同的类型，各种分类方式一起构成了完整的传感器技术知识体系。

（一）按被测物理量分类

现代农业机械的精准作业和智能控制要依靠对各种物理量的准确感知。根据被测物理量不同，传感器种类繁多，对应不同的农业应用场景。位移传感器用来测量农具升降高度、转向机构转动角度或者播种单体仿形深度，保证作业准确执行。常用的位移传感器有测量直线位移的拉线式传感器、测量角度位移的旋转编码器，它们给农机的位置控制提供重要的数据。

速度传感器、加速度传感器也十分关键，一般用来测定农机行驶速度、驱动轮转速或者振动筛工作频率。用霍尔效应传感器或光电编码器来测量车轮转速，可以对播种量、施肥量进行精准控制。加速度传感器一般装在拖拉机或者联合收割机上，用来检测复杂的地形下机器姿态的变化，给自动导航、底盘调平系统提供数据。力、扭矩传感器在农业机械上也是不可缺少的。拖拉机三点悬挂系统上装有力传感器可以测量耕作部件的受力，实现耕深自动调节，传动轴上的扭矩传

感器可测量发动机负荷，给动力输出、燃油经济性提供决策依据。除此之外，还有温度、湿度、流量、压力等各种传感器，它们一起组成了农业机械的感知系统，给农业机械的精细化管理与智能化作业提供全方位的数据来源。

（二）按工作原理分类

传感器按照其将非电量转换为电信号所依据的物理效应，可以分为不同的工作原理类型。此种分类方式可以充分体现传感器自身的工作原理，对于研究传感器本身特性和设计应用电路有重要的指导作用。

1. 电阻式传感器：利用导体或半导体的电阻值随外界物理量（位移、应变、温度等）变化而变化的原理。应变片式传感器是典型的代表，它把机械应变转换成电阻的变化，被广泛地用在力、压力、扭矩的测量上。热敏电阻是利用材料的电阻率随温度变化的特性来感应温度的，被广泛用作发动机水温监测和环境温度控制。

2. 电容式传感器把被测量的变化转换成电容值的变化。其结构一般由两个或两个以上电极组成，被测物理量通过改变电极间的距离、正对面积或介电常数来引起电容的变化。电容式液位计用电容的变化来测量油箱液位；而电容式湿度传感器是利用湿敏材料吸湿后介电常数发生变化，从而检测空气或土壤的湿度。

3. 电感式传感器是根据电磁感应原理，把位移、振动等物理量转换成线圈电感或者互感的变化。常见的有变磁阻式和差动变压器式两种。变磁阻式传感器是利用磁路中气隙的大小来改变磁阻，从而引起电感的变化，一般用于小位移的测量。差动变压器式传感器是利用移动铁芯改变初、次级线圈间的互感来测量位移的，灵敏度高、线性度好。电涡流传感器也是电感式的，利用金属导体在交变磁场中产生涡流的原理来测量位移、振动等，是非接触式的，特别适合高速旋转部件的监测。

（三）数字式与模拟式传感器的区别

根据输出信号的性质，传感器可以分为模拟式传感器和数字式传感器两大类。两者在信号形式、内部结构 and 应用特性上存在着本质的不同，选用哪一类对系统设计简单性、成本、抗干扰能力都会产生影响。

模拟传感器把被测物理量直接转换成连续变化的电压或者电流信号，输出信号的大小与被测物理量的大小成正比。该类传感器结构简单、成本低、响应快，可以连续地对微小的变化进行监测。但是模拟信号在传输过程中容易受到电磁干

扰、线路损耗、温度变化等因素的影响，从而造成信号失真、精度下降。因此，一般需要配合信号调理电路和模数转换器才能被微处理器等数字系统所处理。

数字传感器内部集成了敏感元件、信号放大器、模数转换器甚至微处理器，可以直接输出离散的数字信号（二进制码或者某种通信协议的信号）。这样就使数字传感器具有了更好的抗干扰能力，信号远距离传输不容易失真，从而保证了数据的稳定性和可靠性。其输出信号可以直接和微控制器或者计算机相连接，简化了系统的硬件设计。许多数字传感器具有可编程性和自诊断能力，可以内校准、误差补偿，因而能获得较高的测量精度。虽然数字传感器结构比较复杂，价格高，但是由于其高精度、稳定性好、容易集成等特点，在现代农业机械电子系统中正渐渐成为主流。

二、传感器的主要性能指标

传感器性能指标是衡量传感器品质好坏、适用性的客观标准，也是设计测量系统、评价测量结果准确性的重要依据。这些指标一般被分成静态特性指标和动态特性指标这两类。静态特性表征的是被测量稳定时传感器的输入输出关系，动态特性反映的是传感器对快速变化的被测量做出的响应能力。

传感器主要性能指标概览

分类	指标名称	描述
静态特性	量程	传感器可测量的物理量范围（最大值与最小值之间）
	精度	测量结果与真实值的一致程度，受系统误差和随机误差影响
	分辨率	传感器能检测到的最小变化量
	线性度	实际输入输出曲线偏离理想直线的程度
	重复性	相同条件下多次测量结果的一致性程度
	迟滞	正反行程中，同一输入对应的输出不一致现象
动态特性	灵敏度	输出量变化值与引起该变化的输入量变化值之比
	温漂特性	输入不变时，输出随环境温度变化的漂移现象
	响应时间	传感器输出达到稳定所需的时间
	固有频率	传感器作为振动系统所固有的振动频率

从上表可以看出，传感器的性能指标多维度地反映了其在不同工况下的表现。

（一）量程、精度与分辨率

量程、精度、分辨率是评价传感器性能最基本的、最重要的三个静态指标，

它们共同决定了传感器可以测量的范围、测量结果的准确性以及可以识别的最小变化量，是传感器选型时必须首先考虑的因素。

量程就是传感器可以测量的被测物理量最大、最小值之间的范围。选择量程时必须充分考虑实际工况下最大值和最小值，保证量程包含这些范围，但也不能太大。量程越大，传感器的分辨率和精度就越低，成本也就越高。

精度是传感器测量结果和被测物理量真实值的一致程度，是系统误差和随机误差的综合。精度一般用相对于满量程输出的百分比误差来表示，例如 $\pm 0.5\%$ F.S.。高精度是精密测量和控制的基础，但是过分追求高精度会大大增加成本。因此要根据系统设计的要求来选择精度等级。

分辨率是传感器可以检测到的被测物理量的最小变化量。对于数字传感器来说，它的分辨率一般受到内部模数转换器位数的限制；而对于模拟传感器来说，它受到能响应的最小输入变化的限制。高分辨率是获得高精度的前提，但是高分辨率并不等于高精度。一个传感器能分辨极小的变化（分辨率高）但是所有的读数都会离真实值有偏差（精度低）。

（二）线性度、重复性与迟滞

线性度、重复性、迟滞是用来描述传感器静态特性的三个重要参数，它们分别从不同的角度来表现传感器输出信号的稳定性和可靠性，对于判断测量误差来源和大小有着非常重要的作用。

线性度又称为非线性误差，它表示传感器实际输入输出曲线偏离拟合直线的程度。理想的传感器输出应该与输入成正比，但实际中二者之间或多或少存在非线性。非线性误差一般用最大偏差占满量程输出百分比来表示。线性度好，传感器输出信号处理简单，标定、校准也容易进行。

重复性就是指在相同的测量条件下，对同一个被测物理量沿同一个方向做多次重复测量时，各次测量结果之间的一致性程度。它反映传感器输出的随机波动情况，是衡量传感器读数分散性的指标。良好的重复性说明传感器受到内部噪声、随机干扰的影响很小，输出稳定可靠。

迟滞是指被测物理量从最小值到最大值（正行程），再从最大值到最小值（反行程）时，同一输入值对应的输出值不同，两条曲线一般不重合。迟滞误差就是该值和满量程输出百分比之差。迟滞现象主要是由于传感器敏感元件材料特性以及内部摩擦等造成的。

（三）灵敏度与温漂特性

灵敏度、温漂特性是衡量传感器好坏的重要指标。灵敏度指的是传感器对微弱信号的敏感程度，温漂特性指的是传感器在不同的温度环境下所表现出来的稳定性。这两大指标同传感器的测量精确度有关，也同它在复杂多变的农业作业环境中能否稳定工作有关。

灵敏度就是传感器输出量的变化量和引起该变化的输入量变化量之比。简单来说，就是传感器对被测物理量变化的敏感程度。灵敏度越高，表示很小的输入变化就能产生较大的输出信号，有利于信号的后续处理和放大。但灵敏度过高容易引起传感器拾取环境噪声信号，从而影响信噪比。因此选择灵敏度时要在信号强度和抗干扰能力之间做出权衡。

温漂特性就是指输入量不变时，传感器输出量随环境温度变化而产生的漂移现象。漂移有零点漂移和灵敏度漂移两种形式。零点漂移指的是在没有输入的情况下，输出值随温度变化；灵敏度漂移指的是灵敏度随温度变化。农业机械作业环境温度变化大，从寒冬到酷暑，温差很大。温漂是传感器误差的主要来源之一，温漂特性不好的传感器在不同季节或者不同时间工作的时候，测量结果会有很大的差别，严重影响系统的精度和稳定性。因此，选择温度补偿性好或者温漂系数小的传感器十分重要。

三、传感器的选型与标定方法

为了使农业机械电子系统能准确、可靠地工作，要根据具体的需要选择合适的传感器，并进行精确的标定。传感器选择决定系统性能上限，标定则保证发挥传感器的性能、数据精度。整个过程包含应用场景分析、标定流程实施、后期数据处理这三个部分。

（一）根据应用场景选择合适的传感器

传感器的选型是综合考虑测量对象、作业环境、性能要求、成本效益等各方面因素的过程，目的是保证所选传感器能够满足现代农业的严格要求。

1. 确定测量对象及性能指标：首先要确定待测的物理量，例如土壤水分、作物冠层温度或者农机具作业深度等。根据精度要求确定传感器的量程、分辨率、精度等主要指标。变量喷药系统对作物氮素含量的感知需要高灵敏度、高分辨率的光谱传感器，水箱液位监测可以使用普通的液位传感器。

2. 对环境适应性进行评价, 农业作业环境较为复杂多变, 灰尘、湿气、振动、腐蚀性化学物质(化肥、农药)等恶劣的环境下都会影响到传感器的工作。因此所选择的传感器要具有良好的环境耐受性。田间土壤传感器应具有 IP67 或者 IP68 等级的防水防尘能力, 外壳材料要能抵御紫外线的老化、化学腐蚀。发动机舱用的传感器要能经受高温、振动。

3. 考虑数据传输、兼容性: 按照系统的布局以及数据处理要求来选择合适的的数据输出和传输方式。大田作业分布范围广, 用低功耗广域网技术的无线传感器可大幅度减少布线成本。在小范围的农机内部或者多节点应用中, 一般采用 CAN 总线或者 RS485 接口。同时选择使用标准通信协议(Modbus、MQTT 等) 的传感器, 保证与不同厂家控制器或者云平台兼容, 便于以后系统扩展。

(二) 传感器静态与动态标定流程

传感器标定是保证传感器测量准确性的过程。无论是在出厂前还是使用一段时间之后, 都需要对传感器的输入 - 输出关系进行标定, 从而确定或者修正它的特性。标定一般有静态标定和动态标定两种。

静态标定是在被测量稳定或者缓慢变化的时候进行的, 其目的是确定传感器的静态特性指标, 比如线性度、灵敏度、迟滞、重复性等。静态标定的基本过程为, 先准备好一套精度比待标定传感器高的标准仪器或设备。在预定的测量范围内, 从零点开始逐渐增大输入量到满量程, 记录每个标定点上标准仪器读数和待标定传感器输出值。达到最大量程之后再逐渐减小输入值到零, 同样记录各点的读数。通常要进行多次来检验其重复性。根据采集到的数据绘制出传感器的静态特性曲线, 并计算出各项性能指标。

动态标定是用来评价传感器对快速变化的输入量的响应能力, 也就是获得它的动态特性。动态标定一般要施加一个已知的阶跃信号、正弦信号或者脉冲信号, 然后记录传感器的输出响应曲线。分析输出曲线的时间常数、响应时间、固有频率、阻尼比等参数来建立传感器动态数学模型。标定加速度计时, 一般用振动台产生标准频率、振幅的正弦振动, 将传感器输出与标准振动比较, 得到不同频率下传感器的灵敏度、相移。动态标定对振动监测、动态负载控制等快速变化的场合的传感器来说尤其重要。

(三) 标定数据的处理与误差补偿

标定完成后的数据必须经过科学的处理和分析, 才能被用来修正测量结果,

提高传感器在实际使用中的精度。数据处理的主要任务就是建立精确的输入输出数学模型，根据该数学模型进行误差补偿。

数据处理的第一步就是对数据进行筛选和平滑。由于测量过程中不可避免地会存在随机误差以及异常值（野值），所以需要采用统计学方法（格拉布斯准则等）来剔除异常数据点。然后可取多次重复测量的数据的均值来减小随机误差的影响。曲线拟合是另一项工作。对标定数据点进行数学拟合，可以得到输入量和输出量之间的函数关系，也就是标定函数。最常用的是最小二乘法，依据数据点的分布情况选择线性拟合、多项式拟合或其他非线性函数拟合，目标是使拟合曲线和所有的数据点总偏差最小。

误差补偿就是用已经建立好的标定函数，对传感器实际测量值进行修正。补偿可以在硬件电路中完成，也可以用软件算法实现。硬件补偿一般采用设计补偿电路来抵消温度漂移，热敏电阻补偿桥路就是其中一种。软件补偿更加灵活强大，把拟合得到的标定函数或查找表编程写入微处理器。微处理器对传感器原始输出值做实时的运算，用先前存储的标定模型进行转化，以求得更接近真实数值的结果。对于非线性误差可以采用多项式补偿；对于温度漂移则可以建立包含温度变量的二维补偿模型，使传感器在不同的温度下都能得到准确的测量值。误差补偿可以提高低成本传感器的性能，达到高精度应用的要求。

第二节 控制理论与方法

控制理论是实现农业机械智能化的关键手段，它给执行机构精确动作赋予了结实的理论根基和设计引导。本节从控制系统的基本组成入手，对经典控制方法、现代控制方法进行详细的分析，并对计算机控制技术进行详细的说明。

一、经典控制理论基础

经典控制理论把传递函数作为主要的研究基础，主要研究单输入单输出系统。它直观简单，在农业机械控制领域得到广泛的应用，是理解更复杂的控制策略不可缺少的基础。

（一）开环控制与闭环控制系统

开环控制系统结构简单、成本低。其控制器输出是事先设定好的，与系统

实际输出状态无关。以简单的定时灌溉系统为例，不管土壤湿度如何，都会在设定的时间内开始和停止。该控制方式的优点是系统稳定，实现简单，缺点也很明显：对外界扰动和系统内部参数变化没有补偿能力，控制精度低，不能满足现代农业对精准作业的严格要求。目前，它多被用在对精度要求不高的农业机械辅助功能上。

闭环控制系统又称为反馈控制系统，通过反馈环节把系统实际输出和期望输出相比较，用二者之差来产生控制作用，从而调整系统输出。这样一种反馈机制可以很好地抑制内外扰动，大幅度提高控制精度以及系统的动态性能。在现代农业机械当中，自动驾驶拖拉机的路径跟踪系统就属于闭环控制的一种典型应用。传感器能检测拖拉机与预定路径间的偏差，控制器根据这些偏差对转向轮角度进行修正，使拖拉机能按照设定的路线行驶。

开环与闭环控制系统特性对比表

特性 / 系统类型	开环控制系统	闭环控制系统
基本结构	简单，无反馈	复杂，含反馈
控制依据	预设输入 / 模型	误差信号（实际输出与期望输出之差）
稳定性	易受扰动影响	通过反馈机制提高稳定性
抗干扰能力	弱	强
控制精度	较低	较高
对系统参数变化敏感性	敏感	较不敏感（有自校正能力）
实现成本	较低	较高
典型应用	定时灌溉、洗衣机定时程序	自动驾驶、温度控制、机器人定位

从上表可以看出开环、闭环的控制选择要视具体需要以及经济性而定。扰动小、精度要求不高的情况，开环控制依然是一种经济实用的方案。但是，高精度、高稳定性的复杂作业任务不能缺少闭环控制。现代农业机械电子系统的发展趋势是越来越多地采用闭环控制，甚至把两者结合起来形成更加复杂的复合控制系统，以达到最好的控制效果，提高农业生产效率和质量。

（二）PID 控制原理与参数整定

PID 控制即比例、积分、微分控制，是经典控制理论中使用最广的一种控制算法。它根据系统误差，综合使用比例、积分、微分三种运算产生控制量，算法简单、鲁棒性好、可靠性高，特别适合于机理复杂、难以建立精确数学模型的受控对象。

比例环节的控制作用与当前误差成正比，一旦误差出现，控制器就会立即产生反应来减小误差，但是会存在稳态误差。积分环节主要是用来消除静态误差的。只要系统存在误差，积分环节就一定会累积控制输出，直到误差为零为止。微分环节能预测误差的变化趋势，在误差变化率出现时就能做出反应，从而加快系统的响应速度，减小超调量，改善动态性能。农业机械中变量施肥控制系统可以采用 PID 算法，根据作物长势传感器反馈的偏差信号，准确调节肥料阀门的开度，从而达到精准施肥的目的。

PID 控制器的参数整定是控制系统设计的重要部分。参数整定的目的就是找到一组最优的控制器参数 (K_p 、 K_i 、 K_d)，使得闭环系统具有快速响应、良好的稳定性、较小的稳态误差等特点。常用的参数整定方法有，

1. 经验试凑法是依靠工程经验的在线整定方法。一般先调节比例环，再逐步加入积分、微分环，根据系统响应曲线反复调节，直到达到满意的效果。该方法虽然简便直观，但是耗时较长，对工程师的经验要求很高。

2. 齐格勒尼科尔斯整定法：该方法给人们提供了一套更为系统的整定规则，通过对系统临界振荡状态或者阶跃响应特性进行分析来确定 PID 参数。相比纯粹的经验法，它更有理论指导性，是工程实践中常用的方法。

PID 控制器的性能很大程度上取决于参数的选择。对于农业机械这样作业环境多变、负载经常变化的系统，一套固定的 PID 参数不能保证一直是最优的。因此参数自整定 PID、模糊 PID 等先进的改进算法随之产生，可以在线调节系统运行状态下的参数来适应外部环境变化，从而进一步提高农业机械的智能化水平。

（三）系统稳定性与性能分析

系统稳定是控制系统正常工作所必须具备的先决条件。不稳定系统输出发散或者产生等幅振荡，不能完成预定的控制任务，甚至会损坏设备。经典控制理论中经常使用劳斯判据、奈奎斯特判据或者根轨迹法来分析系统的稳定性。劳斯判据通过对系统特征方程系数的分析来判断闭环极点是否全部在 S 平面左半平面，从而判定系统是否稳定，它的好处是不用求解特征根。

控制系统性能分析主要是对控制系统的动态性能和稳态性能进行分析。动态性能指标用于表征系统在典型输入信号作用下响应的平稳性、快速性，超调量、上升时间、调节时间等属于这类指标。稳态性能是指系统响应最终达到的稳定状态，稳态误差就是系统稳定后，系统输出期望值与实际值的差值。在农业机械电

液控制系统中，例如收割机割台高度自动控制，既要求响应速度快来适应地面的起伏，又要求超调量小、稳定性好来防止割茬高度出现大的波动。各种性能指标之间常常会相互制约，设计者需要综合权衡之后进行设计。

二、现代控制理论概述

现代控制理论是以状态空间法为基础，能很好地处理多输入多输出系统，并且一般可以得到更好的控制效果。它既考虑系统的输入输出关系，又探究系统内部状态，给复杂农业装备的协同控制提供强有力的工具。

（一）状态空间模型的建立

状态空间模型是现代控制理论的数学基础，用一阶微分方程（或者差分方程）来描述系统的动态行为。方程组由状态方程和输出方程组成。状态变量就是可以完全描述系统动态行为的一组最小变量。状态方程表示状态变量随时间变化的规律，它和系统的输入、当前状态紧密相关。输出方程说明系统输出和状态变量、输入的关系。

状态空间模型同经典控制理论中的传递函数模型相比，有明显的优势。它可以体现系统的输入输出关系，也能表现出系统内部全部状态变量的动态情况，这对于对系统内部状态实施监控，并且进行复杂控制任务的执行来说十分重要。状态空间法可以用来分析线性系统、非线性系统、时变系统、时不变系统以及多输入多输出系统，其适用范围比传递函数模型更广。例如在建立植保无人机飞控系统模型的时候，可以将位置、速度、姿态角、角速度等设为状态变量，用状态空间方程来描述植保无人机复杂的六自由度运动。

建立状态空间模型一般有两种方法。机理建模法就是根据系统的物理定律（牛顿定律、基尔霍夫定律等）推导出系统的动态微分方程，再整理成状态空间表达式。该方法所建立的模型物理意义明确，但对于复杂的农业机械系统来说，做精确的机理分析往往非常困难。另一种方法就是系统辨识法，即给系统施加一定的输入信号，测量出系统的输出响应，然后利用辨识算法从实验数据中估计出模型的参数。当系统机理不明的时候，此法尤其有效。

（二）系统的可控性与可观性

可控性、可观性是现代控制理论中卡尔曼提出的两个主要概念，也是系统分析、综合设计的基础。这两个概念很好地体现了系统内部状态同输入、输出之间

的联系。

系统的可控性指的是，是否可以通过某个控制输入，在有限的时间内把系统的任意初始状态驱动到任意期望的最终状态。一个系统是完全可控的，意味着我们可以用外部的控制输入来完全控制系统的所有内部状态。反之，系统存在不可控的状态，无论怎样设计控制器，都不能影响这些状态的运动轨迹。如果拖拉机自动驾驶系统某一状态（横向侧滑角）被判定为不可控，那么就意味着控制器不能通过操纵方向盘来消除侧滑的影响，这是对系统设计的警告。可控性可以利用构造可控性矩阵并求出它的秩来判断。

系统的可观性是指能否只根据系统的外部输出，就能完全确定系统内部所有初始状态。如果系统是完全可观的，那么就可以在有限的时间内，通过观测系统输出的情况来反推出系统内部的各个状态变量的初始值。这对状态反馈控制来说很重要，因为状态反馈的前提是所有状态变量都已知。当某些状态变量不能直接测量时，就需要设计状态观测器来估计，而系统完全可观是设计有效状态观测器的前提。可观性也可以通过构造可观性矩阵并判断其秩来分析，与可控性类似。

（三）状态反馈与极点配置

状态反馈是现代控制理论中强有力的、基本的控制方式。基本思想就是把系统所有状态变量用一个反馈增益矩阵线性组合起来，再反馈到输入端，就得到了新的控制律。该种控制方式可以直接改变闭环系统的动态特性。当系统完全可控时，就可以用状态反馈任意配置闭环系统的极点。

极点配置属于一种依靠状态反馈的综合设计方法。闭环系统极点位置好坏决定系统动态响应特性的好坏，即稳定性、响应速度、阻尼等。合理配置极点可以使得系统达到预期的性能。将极点放在 S 平面的左侧深处，系统响应速度会变快；对两个共轭复数极点的位置进行适当的调节，可以得到具有合适阻尼比的稳定控制系统。在农业机械行驶过程中的方向控制中，可以利用极点配置来设计状态反馈控制器，使车辆受到侧风等扰动之后，可以快速、平稳地回到预定的路线。

状态反馈控制律的设计过程通常包括：

1. 建立受控对象的状态空间模型。
2. 检验系统的可控性，确保极点配置的可行性。
3. 根据期望的动态性能，确定闭环系统极点的理想位置。
4. 利用阿克曼公式或其他方法，计算所需的状态反馈增益矩阵。

状态反馈实施的前提就是所有的状态变量可以被准确测量。但是由于成本和技术条件的限制，并不是所有的状态变量都可以由传感器直接获得。此时就需要利用状态观测器来估计真实状态值，用估计值代替真实值，从而构成基于观测器的状态反馈控制系统。

三、计算机控制实现方法

将连续控制理论用于由微处理器和传感器组成的数电子系统时，其主要的难题就是怎样搭建理论与实践之间的桥梁。本部分主要研究怎样把连续控制器转换成计算机可以执行的离散算法，以及实现过程中要重点解决的技术问题。

（一）控制系统的离散化

现代农业机械电子系统一般是以计算机或微控制器作为控制核心，数字控制器只能处理离散的数字信号。因此，必须把连续时间的控制器（PID 控制器、状态反馈控制器等）转化为数字控制器可以执行的离散形式，这一过程就叫做控制系统的离散化。离散化本质是用差分方程近似原来的微分方程。

离散化的常用方法有后向差分法、前向差分法和双线性变换法。后向差分法用 k 时刻和 $k-1$ 时刻信号的差值来近似微分，计算简单，能将稳定的连续系统映射为稳定的离散系统。前向差分法与后向差分法类似，但稳定性较差，因此使用较少。双线性变换法又称为梯形法，它是把 S 复平面整个左半部分唯一地映射到 Z 平面的单位圆内部，从而很好地保持原连续系统的稳定性。因此，双线性变换法在设计高性能数字控制器的时候，是使用最频繁的方法之一。

对连续控制对象模型进行离散化同样重要。若已知连续对象的状态空间模型，就可以使用精确离散化的方法（基于状态转移矩阵）得到与之等价的离散状态空间模型。离散模型对于数字控制器的仿真、分析、预测控制等高级算法的设计有重要的作用。

不管采用何种方法，离散化过程都会产生近似误差。采样周期选择的好坏直接决定离散化的效果。采样周期越小，离散模型对连续系统的逼近程度就越高，但是同时也会大大增加计算机的计算负担和对硬件性能的要求。因此，选取合适的采样周期，就是控制性能和实现成本之间的一项重要权衡。

（二）数字 PID 算法的编程实现

数字 PID 算法是计算机控制中应用最广的一种算法。将连续的 PID 公式离

散化以后,就得到计算机程序可以执行的形式。离散化的 PID 算法有位置式 PID 和增量式 PID 两种实现方式。

位置式 PID 算法输出的是控制量的绝对值,直接对应执行机构目标位置(阀门开度、舵机角度)。它直接用 PID 的离散化公式计算得到,包含了过去所有的误差的累积。该算法的缺点是当计算机出现故障的时候,控制执行机构的输出就会突然发生大的变化;同时积分项的累积也会造成积分饱和。

增量式 PID 算法的输出是控制量的增量而不是绝对位置。控制器每次只计算出相对于上一时刻所需要调整的变化量。该算法的优点是误动影响小,手动/自动切换过程平滑无扰动。由于没有累积过去误差的长时间过程,积分饱和问题也得到了一定程度的改善。在农业车辆速度控制等需要平滑控制的场合,增量式 PID 算法更适用。程序实现时一般采用简单循环结构,不断读取传感器数据、计算误差、执行增量式 PID 公式,输出控制增量,形成数字控制闭环。

(三) 采样周期选择与量化误差分析

在数字控制系统中,采样周期的选择非常重要,它决定着系统稳定性以及动态性能的好坏。根据采样定理,采样频率必须大于被控信号中最高频率的两倍,才能不失真的还原出原始信号。工程实践上,为了保证足够的裕度,采样频率一般取闭环系统带宽频率的 5 到 10 倍以上。采样周期过长会造成系统对于信号变化反应迟钝,控制效果变差,甚至会造成系统不稳定。相反,采样周期过短虽然可以提高控制精度,但是会增大处理器的计算负担,并且会放大高频噪声的影响。

量化误差属于数字控制系统固有的另一种误差来源。是指把连续的模拟信号转化成有限个数字信号的时候产生的误差。12 位模数转换器可以把模拟电压分成 4096 个离散值,其最大量化误差就是最低有效位的一半。误差对控制精度会造成干扰,对于依靠视觉导航的行间除草机器人这样的高精度系统,即便是很小的量化误差也会导致执行机构产生不必要的小幅晃动。采用更高位数的模数转换器或者数模转换器可以有效地减小量化误差,但是一般会增加硬件成本。

因此系统设计过程中采样周期的选择和量化误差分析要进行综合权衡。设计者要根据农业机械作业要求、成本预算、所选硬件性能等各方面因素做出合理的判断。有时候还要从算法的角度出发,利用数字滤波器来抑制由于采样和量化产生的噪声,以有限的硬件资源获得最佳的控制效果。

第三节 信号处理与数据分析

现代农业机械电子系统是信息采集、处理、执行的综合体，传感器采集的原始信号和数据给整个系统提供运行的基础。原始信息里常常会有噪声和冗余的成分，必须经过有效的处理和分析，才能从中提取出有用的信息，为之后精准控制、智能决策提供可靠的依据。本节主要对信号处理、数据分析的基本理论及方法进行阐述。

一、信号的基本概念与分类

信号是信息的物理载体，也是物理量变化的函数。农业机械电子系统中信号形式多种多样，有温度、压力、位移、图像等。为了能够正确处理信号，首先要对信号进行科学分类，理解信号的内在属性，这就是选择合适的分析工具的前提。

（一）确定性信号与随机信号

确定性信号是指用明确的数学函数可以任意时刻求出其数值的信号。这类信号的波形和数值可以完全预知，只要产生信号的条件和初始状态确定，其未来的状态就随之确定。农业机械作业时，控制器发出的脉宽调制信号用来控制液压阀的开度，或者预先规划好的作业路径轨迹坐标信号，都属于确定性信号。该类信号的规律性强，分析起来也较为直接。

随机信号瞬时值无法用精确数学表达式来预测，它的变化是不确定的。只能通过其统计性质来描述，即均值、方差、概率密度函数等。农业生产环境中的大部分信号都是随机的。土壤养分传感器在田间移动时测得的数值，由于土壤的空间异质性会产生随机波动，拖拉机行驶在不平地面上产生的底盘振动信号，也是典型的随机信号。对于此类信号的处理要依靠统计信号处理的理论与方法，从中找出有用的信息统计规律。

（二）周期信号与非周期信号

根据信号是否具有重复性，可以分为周期信号和非周期信号。周期信号就是指在固定的时间间隔（周期）内无限重复自身模式的信号。最典型的就是发动机转速传感器输出的脉冲信号，其频率与发动机转速成正比，周期性非常明显。一般用傅里叶级数等手段，把信号分解成一系列不同频率的正弦分量，从而表现出它的频谱结构。非周期信号没有重复性，其波形在时间轴上是单一的。农机具与障碍物单次碰撞所产生出的冲击信号，作物冠层光谱仪扫描一行作物过程中所记

录下来的光谱数据，都属于非周期信号。对于这种信号，需要用傅里叶变换来分析它在整个连续频率域内能量分布的情况。

（三）连续信号与离散信号

按照时间变量的取值特点，信号可以分为连续信号和离散信号。连续信号又叫模拟信号，自变量（一般是指时间）在定义的区间内可以取任意的值，而信号的幅值也是连续的。自然界中大部分物理过程产生的信号都是连续的，土壤温度、空气湿度、拖拉机行驶速度等可以反映物理量连续变化的过程。

但是现代农业机械电子系统的核心是数字计算机或者微控制器，它们不能直接处理连续信号。因此必须经过采样过程把连续信号转变成离散信号。采样就是对连续信号的幅值，在时间轴上以固定的时间间隔（采样周期）进行测量，得到一个时间序列。由此得到的信号只在离散的时间点上定义，即离散信号。

离散信号是数字信号处理的基本。为了保证离散信号可以不失真地表示原始连续信号，采样频率的选择十分重要，必须满足奈奎斯特采样定理，即采样频率至少是原始信号最高频率的两倍。否则就会产生频率混叠，进而导致后续分析和处理的结果出现严重的错误。在农业机械系统当中，从全球定位系统接收机所获取的位置信息，到图像传感器所采集到的像素阵列，本质上都是经过采样与量化之后形成的离散信号，所有的分析与计算都是在离散的数字世界里展开的。

了解上述信号分类对后续信号处理、数据分析十分重要，各类信号的特点及其在农业中的应用见下表。

信号分类对比表

分类维度	信号类型	特点	农业应用示例
可预测性	确定性信号	可用精确数学函数描述，未来状态可预测	农机 PWM 控制信号、预设作业路径
	随机信号	瞬时值不可预测，用统计性质描述	土壤养分波动、拖拉机底盘振动
重复性	周期信号	在固定时间间隔内无限重复自身模式	发动机转速脉冲信号
	非周期信号	不具有重复性，波形呈现一次性特点	农机碰撞冲击、作物光谱扫描
时间变量	连续信号	自变量可取任意值，幅值连续	土壤温度、空气湿度、行驶速度
	离散信号	仅在离散时间点有定义，经过采样和量化	GPS 位置数据、图像像素阵列

二、常用信号处理方法

传感器采集到的原始信号中会夹杂大量的噪声和干扰，如果直接用于控制的话，会造成控制系统不稳定或者决策失误。因此必须用一系列的信号处理方法对其进行净化、变换和解读，才能从数据背后隐藏的真实信息中提炼出来，从而被系统有效地利用。

（一）信号的时域与频域分析

时域分析是信号处理最基础、最直观的分析方法。直接对信号波形在时间轴上进行分析，研究信号幅值随时间变化的规律。时域分析可以得到信号的均值、方差、峰值、均方根等统计量，能直接体现信号的强弱以及波动程度。用液压系统压力信号的时域波形可以判断系统工作是否平稳，用发动机振动信号的均方根值来判断发动机整体的振动烈度。时域分析简单方便，是实时监测和初步诊断常用的方法。

频域分析给信号提供了一个不同的视角。它利用傅里叶变换等数学方法，把信号从时域转换到频域，从而发现信号是由哪些频率成分组成的，各个频率成分的强度是多少。该方法可以发现时域上不容易察觉的周期性特征以及隐藏的规律。例如一台联合收割机脱粒滚筒的振动信号，在时域上看是一段杂乱无章的波形，但是通过频域分析，就可以清楚地看到与滚筒转速相对应的基频以及谐波分量。如果谱图上出现不属于正常工作状态的异常峰值，则表明该设备某一部分出现松动或者磨损状况，对设备故障的早期预警及诊断有着十分重要的意义。时域分析与频域分析二者互相补充，只有结合起来才能更全面地了解信号的内在特性。

（二）数字滤波技术

数字滤波是信号处理的重要步骤，它的主要目的就是消除信号中的噪声，突出有用的信息。在农业机械电子系统中，根据噪声特性及应用要求可以选用不同的滤波算法。

1. 均值滤波属于简单直观的线性滤波方法。其原理就是对信号中某一点周围几个数据点进行算术平均，用平均值作为该点滤波后的输出值。该方法对服从正态分布的随机噪声抑制效果较好，可以平滑信号曲线。缺点是会造成信号中的阶跃或者脉冲等细节特征变得不清晰，所以不适合对信号边缘信息有较高要求的场合。

2. 中值滤波是非线性滤波的一种,用邻域窗口内所有像素的中值代替该像素。中值滤波对于处理脉冲噪声(椒盐噪声,传感器偶尔会出现的奇异突跳值)效果较好。和均值滤波相比,在滤除这种噪声的同时可以较好地保留信号的边缘细节,不会产生明显的模糊效果,所以在农业图像处理中应用较多。

3. 卡尔曼滤波是功能强大的一种最优递归估计算法。它不只是一种滤波器,它也是一种状态观测器。该算法将系统动态模型和带噪声的测量数据结合起来,对系统真实状态做最优估计。它可以处理时变的、非平稳的随机过程,被广泛地运用在导航定位中。在自动驾驶拖拉机中,卡尔曼滤波可以将更新频率低但是精度高的全球定位系统位置数据,与更新频率高但是存在累积误差的惯性测量单元数据融合起来,从而得到一个连续、平滑、高精度的实时位置和姿态估计,为路径跟踪控制提供稳定可靠的输入。

(三) 信号的平滑与特征提取

信号平滑与滤波的目的都是为了减小噪声的影响,但是平滑更注重反映数据的主要变化趋势。常用的平滑方法有移动平均法、指数平滑法等,它们用加权平均的方法来消除短期波动,使信号曲线更加平滑,有利于观察和分析长期趋势。用平滑处理作物生长周期内冠层归一化植被指数的时间序列数据,可以更清晰地反映出作物生长、成熟、衰老的过程。

特征提取属于信号处理中的一个较高层次的任务,它的目的在于从原始、高维的信号数据中提取出可以反映系统状态或者对象属性的关键信息,即所谓的特征,实现数据降维和信息的浓缩。对土壤电阻率的测量信号可以提取均值、方差、梯度等特征来表征土壤质地的均一性;对作物叶片图像,则可以提取颜色、纹理、形状等特征来识别病虫害类型。提取出来的特征量会成为后面模式识别、机器学习模型的输入,直接决定分类、识别或者预测任务最终的效果。高质量的特征提取,可以很好地把信号处理和智能决策联系起来,并且对最终的系统性能有较大的影响。

三、农业数据的特点与分析思路

伴随着物联网、遥感、智能农机技术的发展,现代农业生产过程中会产生大量的、多源的、异构的数据。农业大数据不但是信号处理的对象,而且是具有巨大价值的资源。对它的独特性有深入的理解,形成科学的分析思路,对于智慧农

业的实现有着至关重要的作用。

（一）农业数据的时空特性

农业数据最明显的一个特征就是时空性很强。空间特性指农田环境中的各种要素，比如土壤肥力、水分含量、作物生长状况、病虫害分布等等，在地理空间上都存在着明显的变异性。即使在同一块田地里，不同地方的情况也会千差万别。因此几乎所有的农业数据都必须和地理坐标（经纬度）绑定在一起，形成有空间属性的数据层，即产量图、土壤养分图、处方图等。地理信息系统是空间数据的管理与分析。

时间特性就是农业生产要素随时间而变化的特性。一天光照、温湿度的变化，一季作物发育阶段的变化，跨年度的气候、土壤变化等，时间是农业生产的一个重要维度。因此农业数据分析必须考虑到它的时序依赖性。时空特性是交织在一起的，因此在数据分析时必须把两者结合起来。对连续多年作物产量分布图（空间数据的时间序列）进行分析，可以找到田块中长期稳定存在的高产区、低产区，并探究其背后的原因，从而给长期稳定的分区管理提供依据。

（二）多源数据的融合与关联分析

现代农业决策常常要同时考虑来自各个渠道的信息。数据源有农机自身传感器（作业速度、燃油消耗、产量监测器）、田间传感器网络（土壤温湿度、pH值）、航空航天遥感（卫星和无人机图像）、气象数据服务和人工记录的农事活动信息等。由于数据来源不同、格式各异、时空分辨率不一，就形成了典型的多源异构数据。数据融合技术的主要目的就是分散的数据整合起来，消除数据之间的一致性，实现信息互补，从而获得比任何一个单一数据源都要全面、准确、可靠的信息。

数据融合之后，关联分析就成为挖掘数据潜在价值的主要方式。采用统计学方法、数据挖掘算法可以发现各个数据层之间的相关性。产量数据与土壤速效钾含量图、高程图、历史降雨量等数据进行叠加、关联分析，就可以对产量受哪些因素影响、各因素的影响权重怎样进行量化分析。有利于理清潜在的“因果”链条，解释为什么有些区域产量高，有些区域产量低，把数据转化为知识，给精准施肥、灌溉等管理决策提供深刻的认识。

（三）基于数据挖掘的决策支持

数据挖掘属于农业大数据分析的高级阶段，其主要目的在于从海量数据中自

动发现以前不知道的、有价值的模式和规律，并利用这些规律来创建预测模型，为农业生产提供智能化的决策支持。与传统的统计分析相比，它更多的使用了机器学习、人工智能技术。

其在农业上的应用范围比较广。聚类分析算法可以将土壤特性、产量潜力相似的田块区域自动分成不同的管理区，实行分区精细化管理。分类算法可以利用无人机多光谱图像特征，对田间杂草种类或者作物受胁迫情况自动识别，从而产生出喷洒农药、水肥的处方图。回归模型、时间序列分析等可以使用历史气象数据、土壤状况、作物模型等来预测未来作物的产量或者病虫害的发生风险。经过数据挖掘得出的模型和知识可以被纳入农业决策支持系统当中，给农场管理者提供具体的量化行动建议，也可以直接驱动智能农机执行全自主的精准作业，从而实现农业生产的智能化、高效化。

第三章 农业机械电子系统硬件设计

农业机械电子系统硬件是实现各项功能的基础，硬件设计是否可靠、稳定、经济，直接关系到整个系统的好坏。本章主要对硬件设计的关键部分进行阐述，从处理器的选择、系统级电路的设计、通信接口的实现等几个方面入手，为先进农业装备电控系统的设计提供理论依据和实践指导。

第一节 微处理器与嵌入式系统

微处理器是电子系统的“大脑”，嵌入式系统是以微处理器为核心构建起来的专用计算机系统。从简单的传感器节点到复杂的自动驾驶控制器，嵌入式系统在现代农业机械里起着不可缺少的作用。本节主要对微处理器选型策略、嵌入式最小系统构造方法进行分析，是硬件设计的基础。

一、主流微处理器选型指南

选择微处理器是硬件设计中十分重要的一步，微处理器性能的好坏直接影响到整个系统性能、功耗、成本和开发周期。面对市场上各种处理器型号，设计者需要根据具体的应用需求，综合考虑各项技术指标来做出最佳的选择，使处理器既能满足当前的功能，又能为以后的升级留有余地。

（一）8 位、16 位、32 位 MCU 的特点与选型

根据数据总线宽度微控制器可以分为 8 位、16 位、32 位等等，性能和成本上存在梯度差异，适合于不同的农业应用场景。

8 位 MCU，以 8051 系列或者 AVR 系列为代表，结构简单、成本低、功耗小，适合执行单一固定的控制任务，例如农机上单个传感器信号采集与预处理、简单的开关量控制、小型执行器的驱动。它们所用的开发工具链成熟好用，适合成本敏感型的分布式控制节点。

16 位 MCU：性能和成本之间取得很好的平衡。相比于 8 位 MCU，它有更

好的数据处理能力以及更快的运算速度，可以执行更加复杂的算法，而且外设资源更多，一般集成了多路高精度模数转换器和脉宽调制输出。16 位 MCU 一般用在农业机械的中小型集散控制单元上，比如播种机、施肥机等设备，完成传感器数据处理以及复杂的控制逻辑实现，是实现从简单控制到综合监控过渡的平台。

32 位 MCU：以 ARM Cortex-M 系列为代表的一批 MCU 在农业机械电子系统的设计中占据主导位置。具有很强的运算能力、高代码密度、丰富的片上外设资源，可以很好地运行实时操作系统，完成复杂的浮点运算和控制算法。精准农业应用中的变量施药系统决策控制、农机自动导航和路径规划、多传感器融合的环境感知等都需要 32 位 MCU 的支持。它能够对 GPS、惯性测量单元、视觉传感器等所产生数据进行实时分析，进而达到对农业机械的精准高效控制的目的，提高作业质量和效率。

（二）数字信号处理器与现场可编程门阵列在特定场景的应用

通用微控制器对于一些高强度的计算任务无能为力，这时就需要使用数字信号处理器和现场可编程门阵列这两种专用处理器。

数字信号处理器的核心优势就是哈佛结构和单周期乘法累加指令，都是专门为高速重复性数学运算设计的。农业上可做实时信号分析与处理。以光谱分析技术测定作物氮素含量为例，传感器采集到的光谱数据要经过傅里叶变换、滤波等处理，计算量大的任务可以由数字信号处理器来完成。农机故障诊断时，利用发动机、传动系统等振动信号的频谱，数字信号处理器可以快速找到异常模式，从而达到预测性维护的目的。

现场可编程门阵列提供了一种完全不同的解决办法，它是一种硬件可重构的逻辑器件，内部有数以万计的可编程逻辑单元、存储器和布线资源。开发人员可以用硬件描述语言来自定义内部电路来完成真正的并行运算。因此在高速、大数据量数据流的处理中它具有无与伦比的优势。现场可编程门阵列可以同时处理多路高分辨率视频流，实时完成图像采集、畸变校正、特征提取、目标识别等任务，其并行处理架构的延迟比软件顺序处理小得多。高速精量播种控制中现场可编程门阵列能产生纳秒级的控制信号，保证种子投送的精确时序，传统微控制器无法做到。

（三）处理器的性能评估（主频、功耗、资源）

对处理器性能的评价是多维的，不能只依靠一个指标。一个完整的评估体系

应该从运算速度、能源效率、集成资源等各方面来考虑,保证所选择的芯片能够满足农业机械在特定工况下所要求的苛刻条件。综合评价方法可以避免为了追求高性能而造成成本、功耗失控,也可以避免为了节约成本而牺牲必要的功能。

1. 主频和运算能力,衡量处理器执行指令的速度,但是主频不是唯一的标准。架构效率也很重要,因此用每秒百万条指令或者更常见的 Dhrystone MIPS 来衡量它的整数运算能力。对需要大量浮点运算的应用,比如坐标变换、滤波算法等,则应该关注浮点运算单元的性能。

2. 功耗,农业机械,特别是依靠电瓶供电的移动设备或者田间传感器节点,对功耗非常敏感。处理器功耗评价要关注它在全速运行、待机、休眠等各种工作模式下电流的消耗。有几种低功耗模式、能快速唤醒的处理器,能有效延长设备续航时间、降低对电源系统的要求。

3. 片上资源是评价处理器性价比的指标。包括程序存储器、数据存储器大小、模数转换器、数模转换器、定时器、脉宽调制发生器、通信接口(UART、SPI、I2C、CAN)等各种外设接口的数量和类型。丰富的片上资源可以简化外部电路的设计,减小电路板的面积,降低系统的总成本,提高系统的可靠性。

二、嵌入式最小系统设计

嵌入式最小系统就是保证微处理器正常启动、运行的最基本电路。无论上层的应用多么复杂,都必须有一个稳定的、可靠的最小系统作为基础。基础平台设计质量的好坏直接影响整个电子系统的稳定性和寿命,在振动、尘土、温差巨大的农田环境中,这一点尤其重要。

(一) 电源电路、时钟电路与复位电路

电源、时钟、复位这三部分被称作嵌入式系统的生命线,保证微处理器在正确的时序下、稳定的状态下启动和运行。在农业机械复杂的电磁环境里,这三部分的电路可靠性设计要求很高。

电源电路的作用是将农机电瓶或者外部供应的不稳定电压,转换成处理器及其他芯片所需要的纯净稳定的电压。常用的有线性稳压器和开关稳压器。线性稳压器结构简单、噪声小,适合给敏感的模拟电路供电;开关稳压器转换效率高、发热少,适合给大电流的数字核心供电。设计时必须考虑输入电压范围、负载电流、瞬态响应、过压和过流保护等问题,同时利用滤波电容、磁珠来抑制由发动

机点火、电机启停等引起噪声。

时钟电路给微处理器提供准确稳定的节拍，是所有同步逻辑运算的基础。一般由外部晶体振荡器或者谐振器、内部振荡电路组成。晶体频率精度、温度稳定性都会影响系统的定时（通信波特率）。时钟电路在电路板布线时要靠近处理器引脚，用接地线包围以减少干扰。

复位电路：用来保证处理器在通电或者发生严重错误的时候，能够从某一个确定的初始状态开始执行程序。常用的复位方式有上电复位、手动按键复位和看门狗定时器触发的系统复位。设计良好的复位电路可以防止程序“跑飞”，系统异常时“锁死”，是提高系统在无人干预下长期稳定运行的重要因素。

（二）存储器扩展

当微处理器内部存储器容量不能满足数据存储、程序代码不断增加的要求时，就要利用外部总线来扩展存储器。在现代农业应用中，记录作物生长周期的海量传感器数据、存储高精度作业地块地图、运行功能丰富的图形用户界面，都需要大量的存储容量，所以存储器扩展成了常规的设计。扩展分为两类，随机存取存储器的扩展和闪存的扩展。

随机存取存储器扩展：主要解决程序运行时动态数据存储空间不够的问题，在系统运行实时操作系统或者进行大数据量缓冲的时候。处理图像数据的时候，会用到上百兆字节的随机存取存储器当作帧缓存区。

闪存扩展，存放大容量程序代码、固化数据（字库、图片资源）和需要长期保存的用户数据（作业日志、故障代码）。根据需要可以使用并行接口的闪存（NOR、NAND）来获得高速读写性能，也可以使用串行接口的闪存来节省宝贵的处理器引脚。在设计扩展接口的时候要考虑到信号完整性，合理地安排电路板的走线，保证地址线、数据线、控制线的时序符合存储芯片的要求，避免出现数据读写错误。

（三）调试接口的设计

调试接口为开发工具与目标处理器搭建起桥梁，在嵌入式系统的开发、生产、维修过程中起到举足轻重的作用。它可以在不中断处理器正常运行的情况下访问处理器的内部寄存器、存储器，设置断点，单步执行程序代码，大大提高固件开发和问题排查效率。目前最主流的调试接口标准为 JTAG 和 SWD。

JTAG 是一个功能强大的传统标准，用多根信号线，除了调试之外，还经常

被用来做边界扫描测试,检测芯片引脚焊接质量。

SWD 是 ARM 公司推出的新一代调试接口,与 JTAG 兼容,只需要一根时钟线和一根双向数据线就可以完成调试,减少了处理器引脚资源和电路板布线空间,在引脚资源紧张的紧凑型设计中优势更加明显。

在硬件设计阶段,所选调试接口的引脚要连接到标准接口或者一组测试点上。即使在最终量产的产品中也应保留这些接口,因为这些接口是固件升级、生产测试、售后维修的生命线,能保证技术人员在田间地头快速诊断、解决问题。

三、常用通信接口设计

现代农业机械是由很多电子控制单元组成的分布式网络系统,各个单元之间以及和外部设备的数据交换非常重要。通信接口好坏决定数据传输速度、可靠程度、传输距离,是系统协同工作、信息化的基础。设计时需要考虑通信对象、距离、速率、成本等各方面因素。

(一) 串行通信接口

串行通信因为接线简单、占用引脚少的特点,在农业机械电子系统内部通信中占主导地位,UART、SPI、I2C 是最常用的三种协议。

1. 通用异步收发传输器是一种易于使用、灵活的异步通信接口,只需两根信号线(TX、RX)就能实现全双工通信。没有时钟线,通信双方要事先约定相同的波特率。通用异步收发传输器在农业机械上一般用来连接卫星定位信号的 GPS 模块、4G 或者 LoRa 无线数据传输模块、上位机简单的指令交互和数据上报等标准化外部模块。

2. 串行外设接口是高速、全双工的同步通信总线。它用四根线(主出从入、主入从出、时钟、片选),通过独立的片选信号可以和多个从设备通信。由于使用同步时钟,串行外设接口的通信速率可以达到几十兆赫兹,可以连接大流量数据交换的外设,例如存储作业数据的 SD 卡、液晶屏控制器、高采样率模数转换芯片。

3. 内部集成电路总线,使用 SDA 和 SCL 两条信号线,实现多主多从控制的同步通信总线。总线上的每一个设备都有唯一的地址,主设备通过地址选择通信对象。尽管其速度比串行外设接口慢,但是很少的连线 and 内嵌寻址机制使其适合连接板级各种低速外设。农业电子控制器上大量的环境传感器如温湿度传感器、

气压计、加速度计等，还有配置存储芯片，大都用内部集成电路总线接口与主处理器相连接。

（二）控制器局域网络总线接口

控制器局域网络总线是一种为高噪声环境设计的可靠串行通信协议，已经成为汽车和工业控制领域的标准。在结构复杂、电磁干扰大的农业机械上，控制器局域网络总线因为其容错性好、鲁棒性强而成为各个核心电控单元之间的一条“神经网络”。采用差分信号传输方式，可以有效地消除共模干扰，并且具有完善的错误检测、信令发送、错误判定的功能来保证数据帧的可靠传输。控制器局域网络总线支持多主通信，网络上任一节点都可以在总线空闲时主动向其它所有节点发送信息，通过报文的标识符来决定消息的优先级，优先级高的消息可以获得总线的使用权，保证关键控制指令的实时性。

农业机械领域中控制器局域网络总线的使用已经用 ISO11783 标准进行规范和统一。ISOBUS 协议栈建立在控制器局域网络总线物理层上，给农用拖拉机及挂载机具间定义了一种通用通信语言。利用 ISOBUS，不同品牌拖拉机、播种机、喷药机、收割机可以实现即插即用，使用同一个虚拟终端（显示器）和控制手柄对作业任务进行统一管理以及数据交换。设计控制器局域网络接口时需要一个控制器局域网络控制器（一般集成在 32 位微控制器中）和一个控制器局域网络收发器芯片，后者把逻辑电平转换成总线上的差分电平。电路设计时要注意 120 欧姆的终端匹配电阻在总线的两端，这是保证信号质量、防止反射的重要因素。

常见通信接口对比表

接口类型	主要特点	应用场景
UART	异步、双线、全双工、无时钟	GPS 模块、无线数据模块、上位机通信
SPI	同步、四线、全双工、高速	SD 卡、液晶屏控制器、高精度 ADC
I2C	同步、双线、多主多从、地址寻址	环境传感器、EEPROM、低速外设
CAN	差分信号、容错性强、多主通信	农机 ECU 间通信、ISOBUS
USB	高速、即插即用、供电能力	数据导出、系统诊断、固件升级
以太网	高带宽、网络连接、局域网 / 互联网	视频监控、云端平台对接、农场管理

从上述常见通信接口对比表可以看出，不同的通信接口各有侧重，适用于不同的农业机械应用场景。

（三）通用串行总线与以太网接口

农业信息化、智能化程度越高，对数据传输带宽、网络连接能力的要求就越

高，通用串行总线、以太网接口在农业机械中的作用也越来越大。

通用串行总线接口因为传输速率高、即插即用、供电能力强等特点，在农业机械上主要承担数据导出、系统维护的功能。作业完成后，操作员可以利用通用串行总线接口将控制器内存储的作业地块数据、产量图谱等信息快速拷贝到 U 盘里，以便于以后的数据分析。同时该接口也可以连接个人电脑做系统诊断或者固件升级，比传统的串口更方便高效。

以太网接口给农业机械提供了接入高速局域网甚至互联网的能力，百兆或者千兆的传输速率远大于控制器局域网络总线，非常适合大数据量的传输。大型高端农业装备，联合收割机、青贮饲料机等，会装有多个摄像头来对作业过程以及周边环境进行监控，视频流数据可以通过以太网汇集到中央处理器进行分析，也可以实时上传到云端平台。对固定式或者半固定式的农业设备，例如自动化温室的控制中心、畜牧养殖的饲喂站等，采用以太网搭建稳定可靠的有线网络，可以将各个控制器、传感器连接起来，实现与农场管理信息系统之间的无缝对接以及远程监控。

第二节 传感器选型与接口设计

传感器是现代农业机械电子系统感知的末梢，它把作物、土壤、环境、农机自身状态的参数转变成电信号，给后面控制、决策、信息管理打下基础。本节主要就关键传感器的选型方法、微控制器和接口电路设计进行说明，目的是给农机电子系统可靠、准确的构建提供实践指导，从感知源头保证数据质量。

一、关键传感器选型实践

传感器在现代农业装备智能化进程当中起到决定性的作用，它是系统性能的上限。选择重要的传感器时要从精度、可靠性、成本、严格的农业环境适应性等几方面来考虑。周密的选型决策是整个电子系统设计成功的基础，必须以应用场景的具体需求为依据做详细的分析和评价。

（一）全球导航卫星系统接收机的选型要点

全球导航卫星系统 GNSS 接收机是农业机械精确定位、自动导航的“大脑”。定位精度是选择时首先要考虑的判断指标。播种、移栽等高精度作业对 RTK 定

位精度要求很高，一般要达到厘米级。因此接收机必须具有 RTK 功能，可以接收 L1、L2、L5 等多频段卫星信号来提高解算结果的稳定性、可靠性，有效抵抗多路径效应、电离层延迟等误差。

数据更新率也是重要的一个参数。农业机械在田间作业时速度很快，为了保证导航控制的平滑性、实时性，GNSS 接收机必须有较高的位置、速度信息输出频率。一般 10Hz 更新率是最低要求，高速作业或者需要精细轨迹控制时应选择 20Hz 甚至 50Hz 的接收机。还要考虑接收机的启动时间，冷启动、温启动、热启动时间都会影响设备开机后进入正常作业的等待时间。

接口类型、协议兼容性、功耗、物理尺寸、防护等级等也是选型时不能忽略的因素。常用的接口有 UART 串口、CAN 总线、以太网等，需要和主控制器的硬件相匹配。输出的数据协议（NMEA0183、RTCM 等）也需要得到主控软件的支持。由于农田环境比较复杂，采用有较好的防尘防水能力及宽温工作范围（-10℃ ~ +50℃）的工业级产品来保证系统的长期稳定运行。

（二）姿态传感器选型与评估

姿态传感器一般称为惯性测量单元 IMU，它内部装有陀螺仪、加速度计来测量载体的三轴角速度和加速度，从而算出俯仰、横滚、航向角。IMU 可以弥补 GNSS 信号短暂中断的时候的定位误差，可以提供地形坡度变化的姿态信息。选择的时候，陀螺仪零偏不稳定性为主要参考指标，它直接决定航向角漂移的速度。战术级（ $0.1^{\circ} - 15^{\circ} / \text{h}$ ）的微机电系统 MEMS IMU 比较适合，在 GNSS 信号丢失的时候短时间内可以保持较高的航位推算精度。

评估 IMU 性能时，需关注以下几个方面：

1. 除了零偏不稳定性之外，角度随机游走、加速度计零偏稳定性、比例因子误差、非线性度也要考虑。这些参数一起决定姿态解算的短期精度以及长期稳定性。比例因子误差、非正交性误差，在动态的条件下，是造成误差的主要原因，需要用精确标定来补偿。

2. 数据融合能力：许多现代 IMU 内部集成处理器，可以执行卡尔曼滤波等高级算法，直接融合磁力计数据来获得稳定的航向角或者和 GNSS 数据进行组合导航解算。选择内置成熟融合算法的 IMU 可以大大减少主控制器的开发工作量以及运算量。

3. 环境适应性，振动是农业机械作业的常态，所以 IMU 的抗振动性能十分

重要。选型时要查看其振动和冲击测试标准。温度变化会引起传感器零点、灵敏度的漂移，所以必须选择具有良好温度补偿功能的产品，保证在宽温度范围内性能稳定。

（三）压力、流量等过程传感器的选型

在变量施药、施肥或者精量播种等作业过程中，压力、流量、液位等过程传感器起着监控执行状态、实现闭环控制的作用。该类传感器的选择主要看量程、介质兼容性、响应时间、长期稳定性。变量喷洒系统中压力传感器用来检测管路压力以保证雾化效果，流量计精确测量药液的瞬时施用量。

压力传感器选型时需要确定测量的压力类型（表压、绝压或者差压），量程范围和过载能力。由于农药化肥具有腐蚀性，所以传感器接液部分所用的材质（316L 不锈钢等）要具有良好的耐腐蚀性。常用的流量计有电磁流量计、涡轮流量计等。电磁流量计没有运动部件，可靠性高，适合于导电液体；涡轮流量计成本低，但是要注意运动部件的磨损问题。

液位传感器的选择要视储液箱形状及所需的精度而定。超声波或者雷达液位计是非接触式的测量方法，安装方便，不受液体性质的影响，适用于大型药箱、肥箱。浮球式液位计结构简单，价格便宜，适合于精度要求不高、只做液位报警的场合。所有的过程传感器输出信号类型（4-20mA 电流信号、0-5V 电压信号、CAN 总线信号等）必须和数据采集系统相匹配，并具有相应的工业防护等级，以适应田间粉尘、潮湿、振动等环境。

二、模拟量传感器接口电路设计

模拟量传感器输出的是连续变化的电压或者电流信号，这些信号一般比较微弱，容易受到噪声的干扰。因此必须设计专门的接口电路对它进行放大、滤波和数字化处理，才能被微控制器正确读取。良好的模拟接口电路对保证测量精度起着关键作用，一般包括放大、匹配、滤波和转换等过程。

（一）信号放大与阻抗匹配电路

应变式测力传感器、热电偶等传感器输出信号的幅度只有毫伏或者微伏量级，远远小于模数转换器 ADC 的测量范围。为了充分地利用 ADC 的动态范围并且提高分辨率，需要对信号进行放大。仪表放大器是此类应用的首选，它有高输入阻抗、高共模抑制比、增益可精确调节等特点，可以放大差分信号，抑制传感器

引线上耦合的共模噪声。选择仪表放大器时要考虑它的输入失调电压、失调温漂和噪声等参数，这些都会影响测量的静态精度。

阻抗匹配就是用来使得信号能量可以被有效地传输的一种方法。当传感器的输出阻抗和放大器的输入阻抗不匹配的时候，会导致信号幅度减小，对于输出阻抗高的传感器（压电式传感器）来说更加明显。仪表放大器有较高的输入阻抗，一般为 $G\Omega$ 级，很好地解决了上述问题。对一些射频或者高速脉冲信号，则要设计专用的阻抗匹配网络，如 L 型或 π 型网络，或者在源端串联一个匹配电阻，使信号源输出阻抗与传输线特性阻抗相等，从而消除信号反射。

（二）滤波电路的设计与实现

传感器信号在产生和传输的过程中，不可避免的会混入各种噪声，比如电源工频干扰、高频电磁干扰、机械振动引起的噪声。噪声会对测量精度造成严重影响，因此必须使用滤波电路来抑制噪声。滤波电路可以分为无源滤波、有源滤波两种。无源滤波器由电阻、电容、电感等无源元件组成，结构简单，成本低，一般用作滤除高频噪声或者作为 ADC 前端的抗混叠滤波器。简单的 RC 低通滤波器是抑制高频噪声的方法之一。

有源滤波器含有运算放大器等有源元件，可以实现更复杂、性能更好的滤波功能，并且带负载能力强、输入阻抗高、输出阻抗低。对需要陡峭截止特性的情况可以采用巴特沃斯、切比雪夫等高阶有源滤波器。在农机环境中，低频振动噪声很常见，设计恰当的低通滤波器可以较好地消除这些干扰。有源滤波器与无源滤波器的选取准则，就是对滤波效果、成本和电路的复杂度三者做综合权衡。实际应用中，一般把无源滤波和有源滤波结合起来使用，以获得最佳的抑制噪声的效果。

（三）模数转换电路的接地与布线

模数转换 ADC 是模拟信号与数字信号的桥梁，它的电路设计，特别是接地、布线对转换精度有决定性的影响。包含数字电路和模拟电路的混合信号系统中，当数字电路开关时会产生高频噪声，该高频噪声很容易经由地线耦合到敏感的模拟电路部分，从而污染 ADC 的输入信号。因此，最根本的设计原则就是模拟地和数字地分开。

理想情况下，在印制电路板 PCB 上应该把模拟和数字区域分开。模拟电路和数字电路的走线要严格限制在各自区域内，任何信号线都不能跨越地分割的间隙。模拟地和数字地最终要连接在一起，保证它们有相同的参考电位。单点接地

为推荐的连接方式,即将 ADC 芯片下方的模拟地和数字地用短而宽的连接点或者 0 欧姆电阻、磁珠连接起来。既给数字信号返回电流提供通路,又最小化了数字噪声对模拟地的污染。ADC 电源也需做类似处理,模拟电源、数字电源应该分别从系统电源上得到干净的供电。

三、数字量传感器接口电路设计

数字量传感器直接输出高低电平或者串行数据,与模拟传感器相比,抗干扰能力更强,接口设计也更直接。设计的主要目的就是保证信号完整、可靠,保证微控制器时序正确。开关信号、总线信号、高速脉冲信号采用的接口方式不同。

(一) 开关量输入的消抖与隔离

开关量信号,限位开关、按钮、霍尔接近开关等都是农机电子系统中最常见的输入信号。机械触点闭合或者断开时,由于弹性抖动会产生一串高低电平脉冲,即抖动。如果不处理,微控制器就会误判成多次触发。硬件消抖是一种常用的、可靠的方法,简单的一个 RC 低通滤波器就可以很好地滤除抖动毛刺。RC 电路的时间常数要大于抖动时间(一般为几毫秒),但又不能小于有效的按键间隔,保证响应速度。

在电气环境恶劣的农机上,由于外部开关信号线长,所以容易被耦合到较强的电磁干扰中。为了保护微控制器内部脆弱的电子元件,必须做电气隔离。光电耦合器是开关量输入隔离的理想器件。外部开关信号驱动光耦输入端的发光二极管,输出端光敏三极管与微控制器 IO 口相连接,二者之间只有光信号传递,没有电气连接,有效隔绝共模干扰、地线回路引入的噪声。采用光耦隔离可以方便地实现不同电压域之间电平的转换。

(二) I2C/SPI 总线的上拉与速率配置

I2C、SPI 是数字传感器(IMU、温湿度传感器等)常用的两种串行总线。I2C 总线用时钟 SCL 和数据 SDA 两根线,其标准是开漏输出,因此必须在每条线上加一个上拉电阻到电源。上拉电阻的选取十分重要,它决定总线的上升时间、灌电流能力。电阻值过小会造成总线低电平灌电流过大;电阻值过大,由于总线电容的存在,会使信号上升沿变得缓慢,从而限制通信速率。上拉电阻的阻值要根据总线电压、总线电容、通信速率三者综合来确定。

SPI 总线是高速的全双工同步总线,一般有四根线:时钟 SCK、主入从出

MISO、主出从入 MOSI、片选 SS。它的速率配置是由主设备的时钟频率决定的，最高可达几十兆赫兹。高速 SPI 通信的主要问题是信号完整性。过长的走线或者不恰当的布线会造成信号反射和串扰。为了保证高速通信的可靠性，应该尽量减小 SPI 走线的长度，在靠近驱动源端串联一个 22-33 欧姆的匹配电阻来抑制振铃。SPI 的时钟极性 CPOL、时钟相位 CPHA 要按照从设备的要求设置好，保证数据在时钟的正确边沿被采样。

（三）编码器接口电路的设计

旋转编码器可以测量电机转速、方向盘转角或者关节角度，是闭环控制的重要传感器。增量式正交编码器输出 A、B 两相脉冲信号，根据两相脉冲信号的相位差可以判断旋转方向。为了克服长距离传输、强干扰环境的影响，一般用输出 A+、A-、B+、B- 差分信号的编码器。接收端用差分线接收器芯片（AM26LS32 等），能有效抑制共模噪声，把差分信号转换成控制器可以识别的 TTL/CMOS 单端信号。

为了防止编码器信号线带入噪声干扰主控制系统，可以在接收器前端加装光耦隔离。编码器的信号是高速脉冲，要用高速光耦防止信号失真。对于非差分输出的编码器，传输距离较远时应该使用屏蔽双绞线进行传输，屏蔽层在控制器一端单点接地。编码器供电电源也需要经过滤波，防止电源噪声影响到编码器内部电路正常工作，使输出信号稳定准确。

常见传感器选型考量参数

传感器类型	关键选型参数	农机应用考量
GNSS 接收机	定位精度、数据更新率、启动时间	厘米级精度，10-50Hz 更新率，快速启动，抗多路径、电离层干扰
IMU 姿态传感器	零偏不稳定性、随机游走、比例因子误差、数据融合能力	战术级精度，抗振动，宽温工作，内置卡尔曼滤波
压力传感器	测量类型、量程、介质兼容性、响应时间	耐腐蚀材料，精确量程，快速响应
流量传感器	测量原理、量程、介质兼容性、可靠性	电磁式（导电液体）、涡轮式（成本），耐磨损
液位传感器	测量原理、精度、储液箱形状、非接触性	超声波 / 雷达（大型箱体），浮球（低精度报警）
开关量传感器	机械抖动、抗干扰能力、电气隔离	硬件消抖，光电耦合隔离，应对外部强电磁干扰
编码器	脉冲数、差分输出、抗噪声能力	高速光耦隔离，差分传输，屏蔽接地，电源滤波

从上表中可以看出，不同类型传感器在农机应用中，其关键选型参数和实际考量各有侧重。

第三节 执行机构与驱动电路

一、常见执行机构及其特性

现代农业机械中执行机构种类很多，根据工作原理和应用场合的不同把电能转换成直线运动、旋转运动或者流体压力的变化。充分认识这些执行机构的性能特点，是进行合理选型并改善系统控制策略的前提，对整个作业的精度和效率起着直接而重要的作用。

（一）直流电机与步进电机

直流电机由于具有调速性能好、启动转矩大、控制简单等特点，在农业机械中起着不可替代的作用。无论是播种机排种盘驱动、施肥机搅龙输送，还是温室大棚卷帘机的升降控制，到处都能看到直流电机的身影。它的最大优点就是通过调节输入电压的幅值来方便地改变电机的转速，实现作业速度的连续调节。驱动方式上，有刷直流电机结构简单、成本低，但是存在电刷磨损、维护不便的问题；无刷直流电机则通过电子换向代替了机械电刷，具有寿命长、效率高、噪声低等优点，在对可靠性要求较高的场合，其应用也越来越广泛。

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或者线位移的开环控制元件。每个脉冲信号到来时，电机就转一个固定的角度，这个角度称为步距角。它不需要位置传感器就可以进行精确定位和定量控制。步进电机在农业生产中被广泛地应用到变量施药系统阀门开度调节、精量播种机种子计量装置、农业机器人关节控制等地方。它的优点有位置控制精度高、结构简单、低速时转矩大、运行稳定。但是它的缺点是高速时扭矩会显著下降，存在失步的风险，因此在设计时需要给工作负载留有充足的扭矩裕量。

选择直流电机还是步进电机要根据具体的应用要求来决定。对需要高动态响应和宽范围调速的场合，比如电动运输车辆的驱动，直流电机更合适。对于需要精确定位、定量输送或者按固定节拍运动的场合，比如自动化采摘臂角度控制，步进电机是更好的选择。随着控制技术的发展，带有编码器的闭环步进电机、直

流伺服电机等先进技术使两者之间的界限越来越模糊，给农业机械精准执行提供更多的解决方案。

（二）电磁阀与比例阀

电磁阀、比例阀是液压、气动系统中用来实现流体通断、流量压力控制的重要元件，在农机具的液压升降、喷洒系统控制、气动清选等环节起着重要的作用。电磁阀本质上是一种开关阀门，它的工作原理就是通过电磁线圈通断电来吸引或者释放阀芯，从而迅速改变流体通路，达到介质开启或关闭的目的。因为结构简单、响应迅速、成本低，所以被广泛使用在对流量控制精度要求不高的情况下，例如拖拉机液压悬挂系统的快速提升和下降、喷杆喷雾机分段管路的通断控制等。

比例阀不同于电磁阀的开关特性，它是一种可以连续调节的控制元件。它依靠一个比例电磁铁接收控制器发出的连续变化的电流信号，产生与电流信号成比例的电磁力，从而准确地控制阀芯的位移，实现对流体流量或者压力的连续、按比例调节。比例阀一般都带有压力补偿功能，因此输出流量或者压力不会受负载变化的影响，控制精度远高于普通电磁阀。在精准农业领域，例如变量施肥系统中根据处方图实时调整肥料输出量、电液悬挂系统中根据地势变化平滑调节机具高度等，比例阀的应用就显得非常重要。

（三）液压马达与伺服油缸

在重型农业机械中，液压传动因为功率密度大、传递平稳、容易实现大范围无级调速等特点而占据主导地位。液压马达和伺服油缸是液压系统最终的执行元件，前者提供旋转运动，后者提供直线运动。液压马达把液压能转换成旋转机械能，主要作为需要大扭矩部件的动力源，例如联合收割机的滚筒、大型播种机的风机、自走式植保机械的行走驱动轮等。体积小、输出扭矩大、在恶劣的工况下也能可靠工作。

伺服油缸是在普通液压油缸的基础上加上位移传感器和电液伺服阀（或比例阀），组成的一个高精度闭环位置控制系统。控制器按照目标位置同传感器回馈的实际位置的差别，随时调节伺服阀的开度和方向，准确掌控液压油流入油缸的速度，进而达成活塞杆位移的精确掌控。伺服油缸在农机自动驾驶系统转向控制、大型犁具耕深自动调节、农用机械臂姿态控制等场合有广泛的应用，是实现农业装备高级自动化、智能化的重要执行部件之一。

常见农机执行机构及其特性

执行机构类型	主要应用场景	优势	局限性
直流电机	播种排种、施肥搅龙、温室卷帘	调速性能好、启动转矩大、控制简单	有刷电机需维护、无刷成本相对高
步进电机	变量施药、精量播种、机器人关节	定位精度高、结构简单、低速扭矩大	高速扭矩下降、存在失步风险
电磁阀	液压升降、喷洒通断、气动清选	结构简单、响应快、成本低	无法连续调节、控制精度有限
比例阀	变量施肥、电液悬挂	连续调节、控制精度高、有压力补偿	结构相对复杂、成本较高
液压马达	联合收割机滚筒、大型风机、行走驱动	功率密度大、输出扭矩大、恶劣工况可靠	需要液压系统支持、效率相对较低
伺服油缸	自动驾驶转向、耕深调节、机械臂姿态	高精度闭环控制、响应快	系统复杂、成本高

从上表可见，不同执行机构在驱动方式、控制精度和应用范围上各有侧重。

二、电机驱动电路设计

电机是电能到机械能转换的主要装置，电机性能的好坏很大程度上取决于驱动电路的设计。一个好的驱动电路不仅要给电机提供足够的功率，还要能够精确地控制电机的转速和转向，同时还要具备完善的保护功能，保证电机以及整个电子系统稳定可靠地运行。

（一）H 桥驱动电路原理

H 桥电路是驱动直流电机最经典的电路结构，因为形状像字母 H 而得名。该电路由四个开关元件组成，一般采用晶体管或者场效应管，电机接在电路的“横杠”处。改变这四个开关的通断状态，就可以改变流过电机的电流方向，从而达到控制电机正转、反转、停机、制动等工作的目的。

为了使电机正向转动，导通对角线上的两个开关（比如 Q1 和 Q4），电流就从电源正极经过 Q1、电机、Q4 流回负极。要使电机反向运转，则要关断 Q1 和 Q4，同时导通另外一对对角线上的开关（如 Q2 和 Q3），电流就会反向流过电机。特别要注意的是，不能让同侧桥臂上的两个开关（Q1、Q2）同时导通，否则会造成电源短路，瞬间产生很大的电流，把开关元件烧毁。为了规避这样的风险，在实际的设计中一般会加入逻辑控制电路，保证驱动信号互锁。

（二）电机驱动芯片的应用（L298N 等）

为了简化 H 桥驱动电路的设计，提高其可靠性，半导体厂商开发出了许多集成功率驱动芯片。其中 L298N 是双 H 桥驱动芯片中使用最广、最经典的一种。L298N 芯片内集成了两个完整的 H 桥驱动电路，可分别驱动两个直流电机或一个两相步进电机，它的宽广的工作电压范围和较大的输出电流，可以满足大部分中小型农业机械执行机构的驱动要求。

使用 L298N 可以大大简化硬件电路的设计。设计者只需给芯片提供电机电源和逻辑电源，把微控制器的控制信号接到 L298N 的输入端。一般 H 桥有 IN1、IN2 两个方向控制端以及 ENA 一个使能端。向方向引脚输入不同的高低电平组合可以控制电机的正反转和刹车，向使能引脚输入 PWM 信号可以方便地调节电机的转速。L298N 芯片内部有热保护，更安全。使用该种集成驱动芯片可以减小电路板的面积和元器件的数量，更重要的是提高了整个驱动系统的稳定性和抗干扰能力。

（三）脉宽调制调速与方向控制实现

脉宽调制是电机调速技术中应用较多的一种高效的方法。基本原理是在固定的周期内通过改变高电平脉冲的宽度（即占空比）来调节输出到电机两端的电压平均值，从而控制电机的转速。占空比越大，平均电压越高，电机转速就越大；反之，占空比越小，平均电压就越小，电机转速就越小。该方式相对于线性调压来说，具有功率损耗小、控制精度高等优点，目前是电机控制的主要技术。

在集成有 H 桥的驱动电路中，方向控制和 PWM 调速一般同时进行。微控制器用设置的 H 桥的方向控制引脚（L298N 的 IN1、IN2）来决定电流的方向，从而确定电机的转动方向。随后微控制器用一个专用的脉宽调制输出引脚，给 H 桥的使能端输出一个有特定占空比的脉宽调制信号。虽然脉宽调制信号以很快的频率快速地开关 H 桥导通状态，但电机由于惯性作用，它的转速会平滑响应所施加的平均电压，最终稳定在由脉宽调制占空比所决定的速度上。利用软件编程可以产生任意占空比的脉宽调制波形，从而达到电机无级调速和平稳、宽范围的正反转切换。

三、阀驱动电路设计

液压、气动系统中各类阀门执行器起着举足轻重的作用。其驱动电路性能的

好坏，直接影响到整个流体控制系统响应速度、控制精度和可靠性。不管是简单的开关控制，还是复杂的比例调节，都需要稳定可靠的电路来驱动电磁线圈，并保证功率器件在安全范围内工作。

（一）开关型电磁阀的驱动电路

开关型电磁阀的线圈属于感性负载。其驱动电路设计的主要任务就是给线圈提供足够的开关电流，使其可靠工作；同时，在断电瞬间抑制线圈产生的反向感应电动势，保护驱动管。最常用的驱动方式是用一个 N 沟道场效应管或者 NPN 三极管作为低边开关来控制电磁阀线圈的通断。当微控制器的 I/O 口输出高电平信号时，开关管导通，电流流过电磁阀线圈，阀门开启；当 I/O 口输出低电平信号时，开关管截止，线圈失电，阀门在弹簧的作用下复位关闭。

由于电感电流不能突变，在开关管关断的瞬间，线圈会产生一个很高的自感电压，该电压足以击穿开关管。因此，在线圈两端必须反向并联一个续流二极管。当开关管截止的时候，续流二极管给线圈中储存的磁能提供了一个释放回路，把感应电流转化为热量消耗掉，从而将反向电压钳制在一个安全的水平上，有效地保护了驱动器件。选择续流二极管时，要保证反向耐压大于电源电压，并且正向导通电流的能力要能承受线圈的续流电流。

（二）比例阀的电流驱动电路

比例阀控制精度很大程度上取决于电磁铁线圈中电流控制的精度。因此比例阀的驱动电路本质上就是一个电压到电流的转换器，或者一个可编程的恒流源。与单纯的开关型电磁阀不一样的是，比例阀的驱动电路需要根据控制信号（一般为电压信号或者脉宽调制信号）输出成比例、平滑稳定的直流电流。简单的电压驱动方式，由于线圈电阻会随温度变化而波动，所以会导致电流不稳定，从而影响控制精度。

现代比例阀的驱动电路大多是采用闭环电流反馈控制的。电路中一般串联一个低阻值的精密采样电阻，把流过线圈的电流转换成电压信号。该反馈电压和微控制器发出的指令信号进行比较，用由运算放大器构成的 PI 控制器或者专门的比例阀驱动芯片来调节功率输出级的导通程度（一般用 PWM 控制），从而保证实际电流按照指令信号的变化来执行。闭环控制方式可以较好地克服线圈电阻变化、电源电压波动等干扰因素，从而达到对比例阀高精度、高动态响应控制的目的。部分高级驱动方案中还会加上一个高频的“颤振”信号来克服阀芯的静摩擦

力，从而提高阀的控制灵敏度和分辨率。

（三）功率器件的选型与散热

无论是电机驱动还是阀驱动，功率器件（MOSFET、IGBT 等）都是电路中不可缺少的元件。功率器件选用合适，散热设计合理，才是保证系统长时间稳定工作的基础。在选择功率器件的时候，必须考虑多个重要的参数，才能保证功率器件在各种工况下都能安全地工作。

1. 电压裕量：器件的漏源击穿电压 V_{DS} 或者集电极 - 发射极电压 V_{CE} 都必须大于电路中最高工作电压的 50% 到 100%，还要考虑到感性负载产生的电压尖峰。

2. 电流能力：器件的连续漏极电流或集电极电流要大于负载最坏情况下工作电流的最大值。还要考虑脉冲电流的承受能力，因为启动或者堵转的时候会出现瞬态大电流。

3. 导通电阻和饱和压降决定器件的导通损耗，导通电阻（ $R_{DS(on)}$ ）或饱和压降（ $V_{CE(sat)}$ ）越小，器件发热量越少，效率就越高。

4. 开关特性，对于脉宽调制等高频开关，器件的开通时间、关断时间等动态参数都会影响到开关损耗的大小，因此必须根据实际开关频率来选择。

功率器件工作时，会有一部分电能转化为热能，使功率器件自身温度升高。如果热量不能及时散发出来，结温就会大于最大允许值，器件就会损坏。因此必须做严格的散热设计。散热设计的第一步就是求出器件的功率损耗，即导通损耗和开关损耗。根据器件的热阻参数、最大结温、预估的环境温度来计算散热器的热阻。根据计算结果选择合适的散热器，用导热硅脂或导热垫片保证功率器件和散热器接触良好，减小接触热阻。在大功率使用情况下，还可以加装风扇进行强制风冷，从而达到更好的散热效果。

第四节 电源管理与电磁兼容设计

现代农业机械集成了很多精密的电子控制单元、传感器和执行器，这些设备对供电质量以及电磁环境有很高的要求。稳定的、可靠的电源管理系统是整机电子系统正常工作的基本条件，良好的电磁兼容设计是保证复杂作业环境里各个电子模块互不干扰、稳定运行的重要保证。本节主要对农机电子系统的电源管理、电磁兼容性进行详细的研究。

一、农机电源系统特点

农机作业环境恶劣，其电源系统比普通汽车或者工业设备有更多的不确定性和挑战。对车载电源的供电特性有充分的认识，即电压范围、电压波动规律和可能存在的电气危险，这是开展可靠电源管理设计的前提，也是保证电子控制单元稳定运行、延长其使用寿命的基础。

（一）12V/24V 蓄电池供电特性

农业机械的电气系统主要依靠铅酸蓄电池来储存和供电，它的标称电压一般是 12V 或者 24V。轻型农机及附件大多使用 12V 系统，重型、大功率的农业机械装备，如大型拖拉机、联合收割机等大多采用 24V 系统来减少大电流输送时的线路损耗。蓄电池的端电压不是恒定不变的，受充电状态、负载大小、环境温度、电池老化程度等因素影响而变化。

发动机不工作的时候电子系统由蓄电池供电。充满电的 12V 蓄电池静态电压大约在 12.6V 至 12.8V 之间，24V 系统对应的电压大约在 25.2V 至 25.6V 之间。发动机启动时启动机需要很大的电流，蓄电池电压会突然下降，即冷启动现象。低温环境下电压跌落更加严重，12V 系统电压瞬时会降到 6V 以下，24V 系统电压瞬时会降到 12V 以下。在此期间电子控制单元需要能正常工作或者至少可以安全重启，这就对电源模块的宽输入电压范围提出明确要求。

随着蓄电池的使用以及老化，它的内阻逐渐变大，充放电特性也会发生变化。老化或者亏电的电池在负载变化时电压波动更大。环境温度对蓄电池的化学反应活性有很大影响，低温下电池容量、放电能力下降，高温下电池老化加快。因此，农机电子系统的电源设计要充分考虑到蓄电池全生命周期、各种工况下电压变化范围，保证系统在极端电压下仍能可靠工作。

（二）发电机供电的电压波动与干扰

发动机启动后，车载发电机是主要电能来源，在为全车电气设备供电的同时也给蓄电池充电。农机上一般使用交流发电机，交流电经过内部整流桥整流后变成直流电。该过程并不完美，输出的直流电压中仍然会有一定幅值的交流纹波，频率和发电机的转速、磁极对数有关。此种波纹属于车载电子系统要过滤的典型噪声。

发电机为了维持输出电压的稳定，装有电压调节器。电压调节器根据蓄电池电压、电气负载的变化来调节发电机的励磁电流，从而控制输出电压。当负载发

生剧烈变化时，例如大功率液压阀或者照明设备突然开启或者关闭，发电机的调节系统需要一定的时间来做出反应，这就会在电源总线上出现电压的过冲或者下冲。负载突卸属于极端情况。当发电机给蓄电池充电时，如果蓄电池连接线突然断开（由于腐蚀或者振动造成接触不良），那么发电机输出的能量就没有释放的地方了，在电源系统上会产生一个持续几百毫秒的高压脉冲，其峰值电压可以达到 100V 以上。高能量浪涌属于车载电子设备主要的潜在危害。

另外，发动机点火系统、雨刮电机、风扇电机、座椅调节电机、继电器、电磁阀的通断、无线通信设备等都会在电源线、空间中产生宽频谱的电磁干扰。干扰通过传导或者辐射的形式传给电子控制单元的电源输入端，从而对其中的敏感电路造成影响。因此电源设计要处理电压的宽范围波动，并且要有良好的抗干扰能力。

（三）电源反接与浪涌保护

在农业机械的日常维护或者维修过程中，由于操作不当造成蓄电池正负极接反，即电源反接。一旦反接，电子控制单元内部的一些半导体器件，如芯片、电解电容等就会由于反向偏置很快被破坏。为了避免出现这样严重的后果，在电源输入端必须设计可靠的反接保护电路。

电源反接保护的设计方案多种多样，各有其优缺点。

1. 串联二极管保护：在电源输入的正极上串联一个二极管。电源接通时二极管正向导通，反向时二极管不导通断开电路。它的缺点就是存在正向压降（一般为 0.7V 到 1V），造成功率损耗和发热，在大电流下尤其明显。

2. 用 P 沟道的 MOSFET 来作为保护电路的开关元件，可以达到更好的反接保护的效果。正常工作时，MOSFET 的体二极管先导通，然后通过控制电路使栅极接地，MOSFET 完全导通，很低的导通电阻(毫欧级)大大降低了压降和功耗。反接时，栅极和源极都是高电平，MOSFET 保持关断状态，从而保护了后端的电路。

上述两种常见方案的特性对比，可见农机电源反接保护方案对比表。

农机电源反接保护方案对比表

方案	优点	缺点	典型压降	典型功耗	复杂性
串联二极管保护	电路简单，成本低	压降大，功耗高，发热明显	0.7V~1V	较高	低
P 沟道 MOSFET 保护	压降极小，功耗低，效率高	电路稍复杂，成本稍高	毫欧级等效电阻	很低	中

除了反接保护外,浪涌保护也不能忽略,浪涌保护的主要任务就是抑制由于负载突卸、感性负载切换等原因产生的瞬态高压脉冲。常用的浪涌保护器件是瞬态电压抑制器。该器件本质上是一个特殊的齐纳二极管,在正常电压下呈高阻态,超过其击穿电压后,就迅速变成低阻态,把过大的电流泄放到地,从而把电压限制在一个安全水平。在选择瞬态电压抑制器时需要考虑它所具有的钳位电压、峰值脉冲功率、响应时间等重要参数来保证它可以吸收预期的浪涌能量,从而给电路提供良好的保护。

二、电源转换电路设计

农机电子系统中一般会存在一些不同的电压的电路,比如 5V 或者 3.3V 的微控制器供电、12V 的传感器供电、需要特殊电压的模拟电路等等。电源转换电路把不稳定的车载电源转换成各种稳定的、干净的直流电压,是电源管理的关键环节。

(一) 线性稳压器应用及其特点

线性稳压器,尤其是低压差线性稳压器,是结构简单、成本低的一种降压稳压方式。基本原理就是利用工作在线性区的调整管,用负反馈环路动态改变它的等效电阻,从而稳定输出电压。其最大的优点就是输出电压纹波低、噪声小,外围电路简单,不需要电感等磁性元件,适合给对电源质量要求高的模拟电路(传感器信号调理电路、模数转换器参考电压)或者射频电路供电。

线性稳压器的最大缺点就是效率低。效率可以近似为输出电压和输入电压的比值,输入和输出电压差越大,或者负载电流越大,其自身功耗也越大,以热量的形式散发出去。农机环境下的输入电压波动范围很大,在农机这样的输入电压波动大的环境下,线性稳压器的效率问题更加突出。因此线性稳压器一般用于输入输出电压差小、负载电流不大(一般小于 1A)的场合。设计时必须进行热计算,保证其工作结温不超过上限值,必要时加装散热片。选择车规级线性稳压器时还要注意电源抑制比,该参数衡量的是抑制输入端噪声的能力,对提高系统抗干扰性起着重要的作用。

(二) 开关电源设计要点

大电流或者输入输出电压差大的场合必须使用开关电源。开关电源依靠高频开关管、电感、电容三者配合工作,以储能和释放能量的形式来完成电压变换,效

率可达 95% 以上, 大大降低功率损耗和散热压力。常见的非隔离拓扑有降压用的 Buck 电路、升压用的 Boost 电路和可升可降压的 Buck-Boost 电路。

开关电源的设计比较复杂, 涉及到很多重要的环节。核心器件选择即开关控制器集成电路、MOSFET、电感、电容。控制器集成电路决定电源的控制模式(电压模式或者电流模式)、开关频率和保护功能; MOSFET 的选择要考虑到耐压、导通电阻、开关速度; 电感的选择要平衡它的直流电阻、饱和电流、磁芯损耗; 输入输出电容的容量及等效串联电阻影响输入纹波、输出电压的稳定性。

其次印制电路板的布局决定开关电源的好坏和电磁兼容性。高频开关环路(即输入电容、MOSFET、续流二极管或者同步 MOSFET)的面积要尽可能小, 减小寄生电感和高频辐射。功率路径走线要短而粗, 反馈路径要远离噪声源(电感、开关节点等)。良好的接地设计一般采用大面积的接地平面来实现, 它对散热和抑制噪声起着重要的作用。最后反馈补偿网络设计的好坏决定了电源的动态响应速度和稳定性, 必须根据控制环路理论准确地计算并调校, 才能在各种负载下都达到稳定的输出。

(三) 多路电源的隔离与滤波

对于复杂的电子控制单元来说, 为了防止不同的功能模块之间互相影响, 往往需要对电源进行隔离。微控制器、通信接口的数字地与高精度模拟信号采集电路的模拟地分开, 或者将驱动大功率电机的电源与主控制电路的电源分开。电源隔离可以有效地阻断地环路电流, 防止地环路噪声经由共用接地路径传过来。实现电源隔离一般采用隔离型开关电源, 反激式或者正激式变换器, 利用变压器在原边和副边之间传递能量, 实现了电气上的完全隔离。

滤波是抑制电源线传导干扰的又一基本方法。无论是输入端还是输出端, 都需要设计出合适的滤波器来衰减掉一些频率范围内的噪声。输入滤波器(通常是 π 型或者 T 型 LC 滤波器)主要是用来抑制来自车载电源总线的干扰进入控制器, 防止控制器自身的开关噪声传导到电源总线上, 即满足传导发射要求。输出滤波器用来平滑开关电源或者线性稳压器的输出电压, 降低输出纹波和噪声, 给负载提供干净的电源。滤波器设计时需要准确计算电感、电容的数值, 滤波器与电源模块输入输出阻抗不能发生谐振。实际应用时常常把大小不同的电容组合起来使用, 以达到宽频段滤波的目的。

三、电磁兼容性设计基础

电磁兼容性是指设备在电磁环境中能正常工作，并且不会给环境中的任何事物造成不能承受的电磁干扰。农机作业环境电磁背景复杂，自身也集成了很多潜在干扰源，所以电磁兼容性设计是保证现代农业机械可靠性的重要技术。

（一）干扰源与耦合途径分析

进行有效的电磁兼容性设计，首先要找到系统内外的潜在干扰源以及干扰的传播途径。农业机械的主要电磁干扰源有发动机点火系统产生的高压火花放电、各种直流电机换向时产生的电火花、继电器、电磁阀线圈通断时产生的反向电动势、开关电源自身产生的高频开关噪声、GPS、蜂窝网络、Wi-Fi、蓝牙等无线通信模块的射频信号。各种干扰源发出的电磁能量以不同的方式对敏感电路产生干扰。

耦合途径有三种，传导耦合，干扰信号通过共享电源线、地线或者信号线直接从源传到接收器。这是电子系统内部最普遍的一种耦合形式。第二种为辐射耦合，干扰源以电磁波的形式在空间中传播，被接收器的电路环路或者导线（等效于天线）接收。当干扰源到接收器的距离大于波长的 $1/2\pi$ 时，远场辐射就成为主要的耦合方式。

第三种为近场耦合，即干扰源与接收器距离很近时，分为电场耦合和磁场耦合。电场耦合是由于导体之间存在寄生电容，变化的电压通过寄生电容耦合到相邻的导体上。磁场耦合是变化的电流产生变化的磁场，变化的磁场穿过邻近的电路回路，根据法拉第电磁感应定律在回路中感应出干扰电压。认识这些干扰源以及耦合途径，是后面采取屏蔽、接地、滤波等防护措施的理论依据。

（二）屏蔽、接地与滤波三大技术

屏蔽、接地、滤波是解决电磁兼容问题的三类基本技术方法，也是电磁兼容防护体系的基础。

1. 屏蔽就是用导电或导磁材料制成的屏蔽体将电磁场限制在一定空间里，从而阻断或者减弱电磁能量的传播。金属外壳是应用最广的屏蔽体，能很好地反射、吸收电磁波，保证内部电路不受外部辐射的干扰，抑制内部电路的电磁辐射向外传播。低频磁场要用高磁导率材料坡莫合金。屏蔽设计的关键是保证屏蔽体的完整性，任何缝隙、孔洞、电缆进出口都会成为电磁泄漏的薄弱环节，必须用导电

衬垫、截止波导通风口等方法妥善处理。

2. 接地的目的就是给信号和噪声电流提供一个低阻抗的返回路径。良好的接地设计可以稳定电路的参考电位，防止地环路产生。大面积接地平面（地层）在印制电路板设计中是实现低阻抗接地的一种有效方法。根据电路的频率、特性选择接地方式，单点接地适用于低频电路，多点接地适用于高频电路，混合接地介于两者之间。将数字地、模拟地、功率地分开，模数转换器下面连接到一点上，可以有效地避免不同电路之间噪声的互相串扰。

3. 滤波就是利用电感、电容等元件的频率选择性，在电路中加入滤波器，滤除信号线或者电源线上的无用频率成分。在输入输出接口和电源输入端加装电磁干扰滤波器，可以有效抑制传导干扰。在印制电路板上，在每一个集成电路的电源引脚旁边放置一个去耦电容，是高频滤波的一种常用方法，可以给芯片提供瞬时电流，滤除电源总线上高频噪声。

（三）印制电路板布局布线的电磁兼容性规范

印刷电路板是电子系统物理上的载体，印刷电路板的布局布线直接决定着系统电磁兼容性的好坏。不合理的设计会引入大量的寄生参数，形成天然的干扰发射天线、接收天线。因此，在设计之初就严格按照电磁兼容性规范来设计是非常重要的。

首先元器件的布局是基础，应该按照先大后小、先难后易的原则，把相互关联的电路（开关电源功率部分、微处理器核心电路）分成不同的功能区块，并使其尽可能紧凑。模拟信号调理电路应该远离开关电源、继电器等强噪声源。输入输出接口电路应靠近印制电路板边缘的连接器，做好滤波和防护。

多层板的设计以及叠层方式，决定电磁兼容性好坏。四层板及以上层板可以设置电源层、地层来提供完整的低阻抗电流回路，对信号层起到良好的屏蔽作用。经典的四层板叠层是信号层、地层、电源层、信号层，把高速信号层和地平面紧贴在一起，可以有效地控制阻抗，减小环路面积。电源层与地层相邻，形成的平面电容可以给整个板提供良好的高频去耦。

布线层面的关键规则有保持高速信号线、时钟线短而直，给其提供连续的参考地平面，不能跨越分割区走线，否则会形成大的环路，产生强烈的辐射。差分信号线应等长、平行、紧密耦合布线，利用其共模抑制能力。电源走线尽量宽，呈星形或者树形结构，不能形成大的电流环路。地线网络要形成低阻抗的格栅状

或者平面。

最后细节处理也不能忽视，每一个芯片的电源引脚旁边就近放置 $0.1\mu\text{F}$ 或者 $0.01\mu\text{F}$ 的去耦电容；避免走线形成锐角，减少阻抗突变和不连续性；对晶体振荡器等强辐射元件，可在其下面挖地，用接地过孔带包围起来，形成一个局部的屏蔽腔。只有遵守这些规范才能从源头上控制电磁干扰，设计出高可靠的农机电子系统。

第四章 农业机械电子系统软件设计

软件是现代农业机械电子系统的核心,它直接决定一个系统可以完成的功能、性能的好坏、可靠性高低、智能化程度。本章主要对嵌入式软件的设计过程进行详细的阐述,包括开发环境搭建、底层驱动编写、版本控制、软件工程规范等重要部分,为开发出高质量的农机电控系统软件做好铺垫。

第一节 嵌入式软件开发环境

一个高效稳定的嵌入式软件开发环境对项目成功起着决定性作用。它包含代码编写、编译、调试工具,也包含底层驱动的抽象与管理。本章主要讲集成开发环境的选型与配置、硬件抽象层的设计以及版本控制等技术。

一、集成开发环境的选择与配置

集成开发环境把代码编辑器、编译器、调试器等各种工具整合到一个统一的图形用户界面里,极大地提高了开发效率。选择合适的微控制器开发工具集成环境,是控制器开发的第一步,对后续的开发、调试体验起着决定性的作用。

(一) Keil、IAR 等主流 IDE 介绍

Keil MDK 属于基于 ARM Cortex-M 系列微控制器开发的主流 IDE 之一。集成了强大的 μ Vision IDE、ARM C/C++ 编译器和 RTOS 实时操作系统内核,拥有丰富的中间件库。调试功能强大,支持 J-Link、ST-Link 等调试器,可以做硬件在环仿真、性能分析,适合对实时性、可靠性要求高的农机控制系统,比如发动机电控单元、自动驾驶导航控制器等。Keil MDK 界面友好、社区支持广、拥有海量的参考设计及应用笔记,有利于开发者快速上手。

IAR Embedded Workbench 是用在高性能嵌入式开发的工具链。它的语言编译优化能力很强,生成的目标代码体积小、执行效率高,适合用作农机末端节点控制器。IAR 支持的微控制器种类很多,有 8 位、16 位、32 位等各种架构。内

置 C-SPY 调试器功能强大，能对代码覆盖率、功耗进行分析，可以有效地帮助开发者提高系统性能。选择 IAR 就意味着要追求极致的代码质量和执行效率。

实际选择时开发者要从项目需求、目标芯片型号、团队技术栈、预算等各方面综合考虑。如果项目所用的芯片是 STM32 系列的话，一般 Keil MDK 会提供更完善的生态。而对代码密度和运行效率要求高或者需要在多个平台进行开发的程序，则 IAR 更有优势。熟练掌握一款主流 IDE，对于嵌入式系统开发人员来说，是最基本也最重要的一项技能。

主流 IDE 对比

特性	Keil MDK	IAR Embedded Workbench
主要支持 MCU	ARM Cortex-M 系列	广泛（8 位、16 位、32 位）
编译器特点	ARM C/C++ 编译器，集成 RTOS	编译优化强，代码密度小，效率高
调试器支持	J-Link、ST-Link 等，功能强大	C-SPY 调试器，支持代码覆盖率 / 功耗分析
生态与社区	丰富，尤其 STM32 生态完善，资料多	广泛支持多种厂商，注重跨平台移植
典型应用场景	实时性、可靠性高，如发动机电控单元	代码效率高，资源受限的末端节点控制器
优点	易上手，资料多，STM32 支持完善	编译优化强，生成代码质量高，多平台适配
缺点	主要针对 ARM 架构，授权费用相对高	学习曲线稍陡峭，授权费用高昂

由上表可知，Keil MDK 和 IAR Embedded Workbench 各有优缺点，开发者要根据自己的项目要求进行选择。

（二）工程创建、编译与调试流程

选择好 IDE 之后，按照标准的开发流程进行开发工作是保证项目顺利进行的前提。一个完整的开发周期是由创建工程、配置参数、编写代码、编译链接、下载调试等环节组成的。规范化的操作可以有效地避免由于环境配置错误而产生的一系列问题，也可以保证软件版本的一致性以及可追溯性。

具体流程可概括为以下核心阶段：

1. 工程创建，根据目标微控制器型号创建工程，IDE 会自动生成基本的启动代码和工程文件结构。选择正确的芯片型号为所有配置打下基础。
2. 环境配置，设置编译器的优化等级、头文件包含路径、库文件链接路径等。

关键一步就是配置调试器类型，保证硬件连线正确无误，使 IDE 可以识别并且连接到目标设备。

3. 代码编写与编译，在工程中加入源文件和头文件，编写业务逻辑代码。完成之后进行编译操作，编译器将 C/C++ 源代码转化为目标文件，链接器再将所有的目标文件和库文件合并成一个可执行文件。

4. 下载调试，使用调试器将生成的可执行文件下载到目标微控制器的闪存里。然后可以开始调试会话，设置断点、单步执行、查看变量值、观察内存和寄存器状态等，检验代码的功能是否正确，发现并改正代码中存在的错误。

（三）代码编辑技巧与快捷键使用

利用 IDE 的代码编辑器功能来提高软件编写速度和质量，是有效的途径。现代 IDE 一般都带有智能编辑功能，熟练掌握这些功能可以使开发者把更多的精力放在逻辑实现上，而不是繁琐的文本操作。代码自动补全可以依据已输入的字符来智能提示变量名、函数名、关键字等，减少拼写错误，语法高亮用不同的颜色来区分代码元素，使代码更易读。代码折叠功能可以将函数体或者代码块收起，使开发者可以集中注意力在当前的逻辑上，对代码结构有整体的认识。

掌握常用快捷键是衡量开发人员熟练度的重要标准，也是提高“心流”体验的重要途径。不同的 IDE 的快捷键是不同的，但是其基本功能是相同的。全局搜索可以迅速地找到工程中某一个字符串；跳转到定义可以快速找到函数或者变量的声明处；格式化代码可以一键整理代码风格，保证团队编码风格的一致性。投入时间熟悉并形成肌肉记忆，把这些快捷键融入日常开发习惯，带来的效率提升是十分可观的，在处理大型农机控制系统软件项目时，优势更加明显。

二、硬件抽象层与驱动开发

硬件抽象层是上层应用软件和底层硬件之间的桥梁，它的好坏直接决定软件系统是否具有可移植性、可维护性和开发效率。在农业机械这样硬件平台多样化的领域里，构建一个良好的分层驱动架构就显得非常必要了，它可以有效地隔离硬件变化带来的影响。

（一）HAL 的作用与分层思想

硬件抽象层的主要作用就是把应用程序和具体的硬件实现隔离开来。它给上层应用软件提供统一、标准的函数接口，把底层硬件寄存器操作复杂性、差异性

屏蔽起来。当底层硬件平台（比如更换不同的微控制器）发生改变的时候，理论上只需要对 HAL 层内部的实现进行修改和适配，上层的应用代码不需要做任何改动。这样的设计思想使软件具有很强的复用性以及可移植性。

分层思想是实现 HAL 的基础。典型的嵌入式软件架构可以分成几个比较清晰的层次。最底层是微控制器及其外设，上面是驱动层，它直接操作硬件寄存器，对通用输入输出端口、串行异步收发器、模数转换器等具体的外设进行控制。在驱动层之上就是 HAL 层，它对驱动层的函数进行封装，向上提供功能化、标准化的应用程序接口。最上层为应用层，主要实现农业机械的业务逻辑，如数据采集、电机控制等，只调用 HAL 层提供的接口。

现代农业机械复杂电控系统中分层结构的优势非常明显。拖拉机自动作业系统的软件需要在不同的控制器上运行。通过 HAL 层，农具升降、读取 GPS 数据应用逻辑可以不变，只需给不同的控制器提供相应的 HAL 实现即可。不仅可以加快新产品开发速度，也可以降低后期维修和升级的难度，是适应农机产品多样化、定制化需求的有效软件策略。

（二）通用输入输出端口、串行异步收发器、模数转换器等底层驱动编写

通用输入输出端口是最基本、最常用的微控制器外设。其驱动编写主要是配置端口方向（输入或者输出）、设置输出电平（高或者低）、读取输入状态、配置上下拉电阻和中断模式。编写 GPIO 驱动的关键就是将引脚号、端口号等硬件相关的具体信息参数化，用结构体或者宏定义来管理，避免代码中出现“魔术数字”，提高代码的可读性、可维护性。

串行异步收发器是设备间通信的接口，被广泛地用在 GPS 模块、传感器、调试终端等的连接上。UART 驱动的主要功能就是设置波特率、数据位、停止位、校验位，完成数据的发送和接收。发送功能比较简单，只要将数据写入发送数据寄存器即可。接收方式一般为中断接收，在接收到数据时硬件会触发中断信号给处理器，处理器再从中断服务程序读取数据放到内存里。

模数转换器把传感器所得到的模拟信号转变为数字信号，给农机电控系统认识外界环境打下了数据基础。模数转换器驱动程序的编写要设置其工作模式（单次转换、连续转换）、分辨率、采样时间、通道选择。为了提高测量精度，一般要多次采样求平均值，还要考虑参考电压的稳定性。多通道采样时，直接内存访

问模式是比较好的选择,在该模式下,微控制器不需要 CPU 的干预,可以将各个通道的转换结果传送到内存中。

编写底层驱动程序时,一定要仔细阅读目标微控制器的数据手册和参考手册,理解每一个寄存器功能及配置方法。驱动代码要尽量简洁、高效、稳定,并向上层提供清楚的接口函数。良好的驱动是嵌入式系统稳定运行的根本,任何一个小的错误都会导致系统功能异常或者失效。

(三) 驱动的可移植性与模块化设计

驱动程序可移植性,指的是把为某一个硬件平台编写好的驱动代码,用最少的代价迁移到不同的硬件平台上的能力。农业机械控制器硬件更新换代较快,所以具有较强的可移植性设计可以大大降低开发、维护成本。实现可移植性,核心就是把驱动中硬件强相关的部分和硬件无关的逻辑部分分开。一般做法是把硬件相关的宏定义、内联函数集中到一个单独的配置文件里,更换硬件平台时只需要修改这个文件。

模块化设计可以达到可移植性的目的。要求把每一个外设的驱动程序封装成独立的软件模块,在模块内部实现该外设所有的操作代码,对外提供一套清晰的接口函数。光照传感器驱动模块内部包含 I2C 通信和数据解析的逻辑,但是对外只提供一个如 `GetIlluminance` 这样的函数。该种设计可以隐藏实现细节,降低模块之间的耦合度。更换不同型号的传感器时,只需要修改模块内部的实现即可。高内聚低耦合的模块化思想,为建立大型、复杂、易于维护的农机电控软件系统打下了基础。

三、版本控制工具的使用

版本控制管理系统在现代软件开发中是不可缺少的,它对代码每次修改的历史进行记录,并支持多人协作。随着农业机械软件项目的复杂性越来越高,合理地使用版本控制工具来保护代码资产、提高团队协作效率、改善项目管理水平就显得越来越重要。

(一) Git 的基本原理与常用命令

Git 是开源的分布式版本控制系统,与其它集中式版本控制系统相比,其设计思想有明显的不同。Git 的分布式特性就是每个开发者都有一个完整的本地仓库,里面保存着所有的提交历史。开发者可以在本地进行大部分提交、创建分支、

查看历史等操作，不需要实时连接中央服务器，在网络环境不好或者现场调试等情况下极大地提高了工作效率。

Git 用快照而不是差异的方式来记录数据。每次提交，Git 都会对当前所有的文件状态做一个快照，并保存一个指向该快照的索引。为了提高效率，Git 不会将没有改变的文件再次存储，只会保留一个指向之前已存储文件的链接。保证 Git 操作性能和数据完整性的重要机制就是这一点。理解 Git 的三个主要区域，工作区、暂存区、本地仓库，是掌握 Git 的前提。工作区就是实际修改文件的地方，暂存区存放已修改但是还没有提交的文件。

开发者使用频率最高的 Git 命令有 `'git init'` 初始化一个新的仓库，`'git clone'` 克隆一个远程仓库到本地，`'git add'` 把文件修改添加到暂存区，`'git commit'` 把暂存区的内容提交到本地仓库并附带一条描述性信息，`'git push'` 把本地仓库的提交推送到远程服务器，`'git pull'` 从远程服务器拉取最新的代码并合并到本地。会用这些基本的命令，就掌握了版本管理的基础。

（二）GitHub/Gitee 代码托管平台使用

代码托管平台是用 Git 等版本控制系统搭建起来的网络服务，给软件项目提供集中存储、分享、协作的远程中央仓库。GitHub 是全球最大的代码托管平台，有庞大的开源社区和丰富的项目资源。Gitee 是代码托管平台，对国内网络环境做了优化，访问速度更快。对于农业机械行业的商业项目来说，平台一般会提供私有仓库功能来保证代码的安全性。

除了给程序提供基本的代码托管之外，这些平台还有非常多的协作工具。Pull Request 是主要的合作方式，开发人员完成功能开发或者修复缺陷之后在新的分支上创建 Pull Request 请求其他成员去审查代码。审查者可以逐行提出修改意见，在自动化测试通过之后才能合并到主分支中。大大提高了合入主干代码的质量。平台还有问题跟踪功能，可以跟踪项目任务、问题等各个方面，并且有 wiki 功能可以创建和编辑文档。

（三）团队协作开发中的版本管理

多人参与的农业机械软件项目中，版本管理工作流起着至关重要的作用，它可以有效地避免代码冲突，保证版本迭代的稳定性。良好的工作流会为各个分支的用途、生命周期和代码在分支之间流转的规则做出明确的规定。目前业界存在成熟的工作流模型，其中 Git Flow 由于完善的分支管理策略被广泛使用。

Git Flow 模型定义了几个关键分支，并规定了它们的协作方式。一个简化的典型流程如下：

1. 主分支只存放稳定版本，任何时候主分支的代码都可以直接部署到实际的农业机械上。开发者不应该直接在这个分支上进行开发。

2. 开发分支：开发主干分支，包含完成并且测试过的所有功能，为下一个发布的准备状态。所有的新的功能开发都应该从开发分支中产生出新的特性分支。

3. 特性分支是专门用来开发单个新功能的分支。每一个新功能都应该在独立的特性分支上开发，然后合并回开发分支。

4. 发布分支：当开发分支功能已经足够成熟，准备发布新版本的时候，从开发分支创建发布分支。本分支只做缺陷修复、文档完善等发布前的准备工作，不再添加新功能。

5. 热修复分支当已经发布的生产版本出现紧急缺陷的时候，可以从主分支创建热修复分支。修复完成后需要合并到主分支、开发分支上，使修复包含在之后的开发流程里。

第二节 实时操作系统应用

现代农业机械电子系统日趋复杂，控制的精确性以及响应的及时性要求也越来越高。实时操作系统被广泛应用，是提高系统性能和可靠性的主要技术。本节从实时操作系统基础理论、主流产品选择、应用开发方法、资源管理策略四个方面进行论述，目的是给农业机械电子系统研发设计提供理论基础和操作指导。

一、实时操作系统基础

实时操作系统在现代嵌入式系统中起着非常重要的作用，它可以对硬件资源进行精细的管理，给应用软件提供一个稳定的、可预测的运行环境。与通用操作系统不同的是，RTOS 的核心价值就是确定性，即能够在规定的时间内完成指定的任务。农业机械上精准变量施药、自动驾驶等高级功能都要依靠 RTOS 给出的时间保证。

（一）RTOS 与前后台系统的区别

前后台系统又称为超循环系统，是嵌入式开发早期常采用的程序结构。其基

本模型是在主函数里设置一个无限循环，循环体中依次调用不同的函数或者检查各种标志位来执行相应的操作。该结构的优点是简单直观，容易理解、实现，对功能单一、逻辑不复杂的系统来说，是一种低成本方案。一般情况下，硬件中断被用来做前台来执行紧急事件，设置标志，主循环作为后台不断检测这些标志并执行相应的处理过程。

实时操作系统所采用的架构和前面所述的嵌入式系统架构完全不一样。它是一个任务和事件驱动的系统模型，系统的动作主要是由外部事件以及任务优先级共同来决定。RTOS 把复杂任务分成独立的、具有各自的上下文和优先级的各个任务。内核的调度器根据预先设定的调度算法（一般采用基于优先级的抢占式调度）来决定哪个任务可以获得处理器使用权。此机制保证高优先级的紧急任务可以马上得到响应，不会被低优先级的长时间任务所阻塞。

两者本质上的区别就在于任务执行时间是否可预测以及可控制。前后台系统实时响应能力较差，后台循环中任何一个函数的执行时间过长，都会影响到其它所有任务的响应延迟，从而造成系统响应时间的不确定性。RTOS 采用抢占式调度，可以保证关键任务的执行不会因为无故延迟而被耽误，从而提供较高的实时性可预测性。对于需要同时对传感器数据采集、电机控制、通信、用户交互进行处理的现代农业机械控制器来说，RTOS 的并发处理能力以及确定性的响应速度，是前后台系统无法比拟的。

（二）任务、内核、调度器等核心概念

任务是 RTOS 管理的基本单位，任务表示一个独立的、顺序执行的程序流程。农机路径跟踪这一复杂功能可以拆解成 GPS 数据解析、车辆姿态计算、转向控制等任务。每一个任务都有自己的堆栈空间，用来保存该任务运行时上下文的信息，即寄存器的值以及局部变量。任务状态有运行态、就绪态、阻塞态、挂起态等，任务状态会随着程序的运行和外部事件的发生而不断变化。

内核是 RTOS 的核心部分，它给系统提供最基本的系统服务，即任务管理、时间管理、内存管理以及任务间通信。内核保存每一个任务的状态信息，并且按照调度策略来确定任务的执行顺序。内核实现的好坏直接决定着 RTOS 性能和可靠性的。高效内核应该具有代码量少、执行速度快、确定性好等特点。

调度器是内核的重要组成部件，它的任务是确定在所有就绪任务当中，哪一个任务应该得到 CPU 控制权并进入运行状态。调度器用某种调度算法来安排进

程，最常用的调度算法是优先级抢占式调度。在这种方式下，系统会选取就绪队列上优先级最高的一个任务去执行。当高优先级任务变为就绪态的时候（比如被中断服务程序唤醒），调度器会立刻中断正在运行的低优先级任务，保存其上下文，然后切换到高优先级任务去执行，这个过程叫做任务抢占。

（三）硬实时与软实时系统应用场景

根据实时系统对于任务截止时间要求的严格程度，实时系统可以分为硬实时系统和软实时系统。分类对系统设计以及 RTOS 的选择十分重要，因为它直接决定系统失效所造成的影响。

硬实时系统对任务的执行时间有严格的要求，任何一个任务超时都会造成系统性崩溃甚至灾难。该类系统的设计重点在于保证最坏情况下时间的确定性，而不仅仅是平均速度。现代农业机械中发动机闭环控制、车辆制动系统、自动驾驶转向和油门控制等都是硬实时的应用。如果喷药系统不能对位置、速度变化做出及时反应，就会造成农药过量或者遗漏，造成经济损失和环境污染。对于安全关键性的系统，必须使用可以提供确定性保证的硬实时操作系统。

软实时系统也期望任务能尽快完成，但是偶尔错过截止时间不会造成系统崩溃，只会造成服务质量下降或者用户体验下降。这类系统在设计时考虑的是整体性能以及资源利用率，可以容忍一定的延迟和抖动。农业机械上的显示界面、作业数据存储记录、云端服务器通信等都属于软实时应用。数据刷新任务哪怕有零点几秒的延迟，也不会使操作员感到明显的卡顿，更不会影响到田间作业的安全与质量。

在复杂的农业机械电子系统里，硬实时任务与软实时任务常常会同时存在。自动播种机的播种轮转速控制、排种器阀门精确开启等属于硬实时任务，必须准确完成才能保证播种密度和株距；将作业面积、播种数量等信息显示在驾驶室屏幕上则属于软实时任务。RTOS 用优先级管理的方式把 RTOS 当成一个混合系统来保证硬实时任务始终能得到足够的 CPU 资源从而保证系统的安全性、功能性。

二、主流 RTOS 介绍与选型

选择一个合适的实时操作系统对于项目的成功来说是至关重要的。市场上有许多的商业以及开源 RTOS，其在功能、性能、商业模式、生态系统等各方面各有特点。了解主流 RTOS 的特性并掌握科学的选型方法，对开发高效稳定的农业

机械电子系统来说非常重要。本部分主要对几款主流 RTOS 进行介绍，并对其选型的主要依据进行分析。

（一）FreeRTOS、 μ C/OS-II 的特点

FreeRTOS 和 μ C/OS-II 都是应用最广的两款嵌入式实时操作系统内核，以体积小、性能高、可靠性好而闻名，特别适合资源有限的小型微控制器环境，因此被广泛使用于农业机械控制器。

FreeRTOS 是开源的 RTOS，由于其开放的许可协议、精简的内核以及高度的可移植性而被广泛使用。主要特点如下：

1. FreeRTOS 内核非常轻量级和可裁剪，只有少量的几个 C 文件组成。开发者可以按照自己的需要，通过配置文件来打开或者关闭一些功能（协程、软件定时器等），从而达到最大限度地节约 ROM 和 RAM 资源的目的。

2. 灵活的调度策略，支持抢占式调度、协作式调度和时间片调度，可以创建优先级相同的多个任务，这些任务会以时间片轮转的方式共享处理器时间，给任务设计提供很大的灵活性。

3. 丰富的生态系统由于 FreeRTOS 的开源特性以及广泛的使用，它有庞大的用户群体和丰富的第三方组件支持，可以大大加快开发速度。

μ C/OS II 为商业化的 RTOS，有高质量代码、完备文档和良好实时性等。尽管源代码可以查看，但是在商业产品中进行使用一般需要获得许可。主要特点有：

1. 高度确定性与实时性 μ C/OS-II 内核的设计严格遵循确定性原则，所有的系统服务的执行时间都是可预测的，中断关闭时间非常短，因此非常适合对实时性要求很高的硬实时应用。

2. 严格的编码规范和认证，其源代码按照严格的编码规范编写，代码的易读性、易维护性都很高。 μ C/OS-II 已经通过了多项行业安全认证，航空电子领域的认证就是其中之一，说明 μ C/OS-II 是可靠的、安全的，对农业机械中安全控制的部分来说，具有很大的优势。

3. 支持多种处理器架构 μ C/OS-II 具有较好的可移植性，官方提供了针对几十种不同类型的处理器的移植代码，覆盖 8 位到 64 位微控制器和处理器。

主流嵌入式实时操作系统对比

特性	FreeRTOS	μ C/OS-II
许可模式	开源	商业（源码可见，商用需授权）
代码量	小巧精简	较小，高度优化
可裁剪性	高	高
调度方式	抢占式、协作式、时间片	抢占式（最高优先级优先）
实时性	良好，可配置	极高，确定性强
生态系统	庞大社区，丰富组件	完善文档，专业支持
安全性认证	依赖第三方工具	多项行业安全认证
适用场景	成本敏感、快速原型开发	实时性、可靠性、安全性要求高

从主流嵌入式实时操作系统对比表中可以发现，FreeRTOS 由于具有免费、开源、灵活等特点，被许多成本敏感型项目以及快速原型开发所采用。而 μ C/OS-II 由于具有很好的实时确定性、代码质量高、安全认证，因此在对可靠性、安全性要求很高的领域占有重要地位。

（二）RTOS 的性能指标

评价一个 RTOS 的性能，不能只看其功能的数量，更应该关注与实时性紧密相关的性能指标。它们直接反应 RTOS 内核效率和响应性，是选择 RTOS 以及系统优化的重要参考。

任务上下文切换时间可以衡量出 RTOS 性能的好坏。它指的是系统从正在运行的任务切换到另一个就绪任务所耗费的时间。保存当前任务的上下文（CPU 寄存器等）、执行调度算法选择下一个要执行的任务、恢复新任务的上下文。切换时间越短，操作系统本身的开销就越小，留给用户任务有效处理的时间就越多，系统的实时响应能力也就越强。这一段时间主要是由 CPU 架构、时钟频率、内核实现效率一起决定的。

中断延迟时间也是一个重要的参数。它是指从硬件中断信号发生开始，到中断服务程序第一条指令开始执行为止的时间间隔。这段时间由 CPU 硬件响应中断的时间、当前指令执行完毕的时间和 RTOS 为了保护临界区而关闭中断的最长时间组成。硬实时系统当中，保证最坏情况下中断延迟时间在可接受的范围之内，否则就会造成对外部紧急事件的反应失去。

除了上述两个重要的性能指标以外，还有其它几个参数。系统调用的执行时间，即执行一次信号量释放、消息发送等内核服务所需要的时间；内存占用，即

RTOS 内核本身所占的 ROM 以及每个任务控制块、队列、信号量等内核对象所占的 RAM 空间，对资源紧张的控制器的来说尤为重要。利用基准测试工具或者自编测试代码，可以对不同的 RTOS 在目标硬件上的各种性能指标进行量化。

（三）根据项目需求选择合适的 RTOS

选择 RTOS 不能只看哪个产品功能最强、性能最好，而应该是一个综合权衡的过程，要紧密结合具体的项目需求。科学的选型决策至少要考虑以下几方面。

首先就是项目实时性要求，这是 RTOS 选择的第一决定因素。需要确定系统中的任务属于硬实时还是软实时。如果系统包含发动机控制、紧急制动等安全关键功能，那么就必须要使用经过认证的、高确定性的硬实时操作系统。而只需要数据记录、界面显示等软实时任务的应用，就可以采用资源消耗小、更加灵活的 RTOS。

其次就是硬件资源的限制，农业机械所用微控制器的 RAM 和 Flash 容量一般比较小。因此 RTOS 内核本身的大小，创建任务和通信机制所占的内存开销都要考虑。一些轻量级 RTOS 具有很高的可裁剪性，开发者可以去掉不需要的功能模块来适配资源非常有限的硬件平台。

商业因素、生态系统也不能忽略。商业 RTOS 一般会提供专业的技术支持以及完整的文档，但是也会产生授权费用。开源 RTOS 是免费的，它的技术支持主要依靠社区，这就要求开发团队具备较强的自主解决问题的能力。RTOS 的生态系统，即可以使用的驱动程序、中间件（TCP/IP 协议栈、文件系统等）以及开发工具链都会影响到开发效率以及项目周期。选择一个有活跃社区和丰富生态的 RTOS 可以避免重复造轮子，加快产品上市速度。

三、基于 RTOS 的应用开发

从传统的前后台系统开发模式转向 RTOS 开发，不单是学习一些新的 API 函数，更是思维方式的转变。开发者把复杂系统功能拆分成互相配合的任务，利用 RTOS 提供的方法来控制任务的执行、通信和同步。掌握基于 RTOS 的应用开发方法，是构成模块化、可扩展、易维护的农业机械电子系统的基础。

（一）任务的创建、删除与同步

任务是 RTOS 应用的基本单位，任务管理是 RTOS 开发的关键。任务创建为多任务应用的实现打下了基础。RTOS 一般都会有一个创建任务的函数，比如

FreeRTOS 的 `xTaskCreate`。调用该函数时需要为任务指定一个函数指针（即任务的主体代码）、任务名、堆栈大小、传递给任务的参数、任务优先级。堆栈大小的设定很重要，过小容易造成堆栈溢出，使系统崩溃；过大则会浪费宝贵的 RAM 资源。优先级分配直接决定任务调度行为，也是实现系统实时性的重要条件。

任务删除操作虽然很少用到，但是当某个动态应用环境需要关闭某个功能模块的时候，就必须要进行任务删除操作。调用任务删除函数（比如 FreeRTOS 的 `vTaskDelete`）就会把该任务所占的内存空间释放出来，其中包括了任务控制块和堆栈。删除任务的时候一定要保证它已经释放了所申请的资源，例如互斥锁、内存等，否则会造成资源泄漏。

多任务环境下，各个任务间要相互配合才能完成复杂的任务，这就需要任务同步。同步就是控制多个任务在某个时间点上执行的顺序。数据采集任务必须等待数据处理任务处理完上一批数据之后，才能开始采集下一批数据。RTOS 中用到许多种同步工具，二值信号量和事件组最为常见。任务可以通过获取一个信号量来等待某个事件的发生，如果信号量不可用，任务就会进入阻塞状态，让出 CPU；当另一个任务或者中断释放该信号量的时候，等待的任务就会被唤醒，进入就绪状态，从而实现同步。

任务句柄是指创建任务的时候返回的一个唯一的标识符，它对于任务管理起着非常重要的作用。任务句柄可以使得一个任务去操作另一个任务，比如改变任务的优先级、挂起任务的执行、恢复任务的运行或者删除任务。该能力给实现复杂的系统控制逻辑提供了一个强有力的工具，但是使用时也要注意，以免破坏系统的稳定性、可预测性。

（二）信号量、消息队列等通信机制

RTOS 中任务之间的数据交换、事件通知用各种任务间通信机制来完成。不仅可以保证数据传递的线程安全，也可以为任务解耦、系统模块化打下基础。信号量、消息队列是最基本的两种通信方式。

信号量属于轻量级的通信手段，主要用来实现任务之间的同步，以及对资源实施互斥访问。信号量本身不保存数据，只维护一个计数值。

1. 二值信号量它的计数值为 0 和 1，可以看成是一个二进制标志。它适合做任务同步，一个任务等待信号量，另一个任务或者中断事件发生时释放信号量唤醒等待的任务。农业机械中的一个中断服务程序，在接收到完整的 CAN 总线报

文之后，就可以释放一个二值信号量，通知专门的报文解析任务开始工作。

2. 计数信号量的计数值可以大于 1，适合于对多个相同资源进行计数管理或者累计事件发生次数。数据采集任务每次采集一个数据点就释放一次信号量，数据处理任务通过多次获取信号量来批量处理数据。

消息队列比信号量更强大，它可以让一个或者多个任务向一个队列发送数据消息，而另一个或者多个任务则可以从队列中读取消息。消息队列可以异步地完成数据的发送、接收，发送方和接收方不需要同步进行。队列中的消息可以是任意的数据结构，传感器读数、控制指令等。精准农业中 GPS 接收任务可以将解析出的坐标信息通过消息队列发送给路径规划任务；路径规划任务计算出控制参数之后，再通过另一个消息队列发送给车辆控制任务，从而形成清晰、安全的数据流。

（三）中断服务程序的设计要点

RTOS 下中断服务程序的设计要符合一定的规则，才能保证它与操作系统内核的正确交互以及系统的实时性、稳定性。ISR 一般用来处理紧急的硬件事件，是实时响应的起点，但是它的执行环境受到严格的限制。

核心原则就是使 ISR 尽量短小精悍。ISR 执行时会屏蔽一部分或者全部的中断，长时间运行的 ISR 会造成系统中断延迟，降低对其他紧急事件的响应能力。因此 ISR 的职责应该只完成最紧急的操作，也就是清除中断标志和从硬件寄存器读入数据，然后将耗时较长的处理工作通过 RTOS 提供的通信机制（释放一个信号量或者发送一条消息到队列）“延迟”给一个普通任务去完成。中断处理分为上半部和下半部（任务）的方式是 RTOS 编程中最好的做法。

另一个要点是 ISR 不能调用会阻塞的 API 函数。由于 ISR 没有任务上下文，它不能像任务那样被挂起和恢复。如果 ISR 尝试获取不可用的信号量或者向满的队列发送消息并等待，都会导致系统崩溃。因此大多数 RTOS 都提供了一组专门用于 ISR 的 API 函数，FreeRTOS 中一般以 'FromISR' 结尾的函数。特殊的 API 函数不会阻塞，内部处理任务调度的逻辑已经完成，所以可以在中断上下文中使用。设计者必须严格区分并正确使用这两种 API。

第三节 控制算法实现

控制算法是农业机械电子系统的“大脑”，本节要将理论模型转化为嵌入式控制器可以高效执行的代码。对 PID、滤波、路径规划和高级控制算法的编程实现与优化策略做详细的探讨，给读者搭建起一条由理论到实践的桥梁，以解决实际工程应用中遇到的各种核心技术问题。

一、数字 PID 算法的编程实现

PID 控制由于结构简单、鲁棒性好而被广泛使用。数字系统中连续 PID 算法要经过离散化处理。数字 PID 算法的编程实现要考虑具体的实现形式选择、异常处理、参数整定等问题，从而保证控制系统的离散时间域中动态与稳态性能。

（一）位置式与增量式 PID 算法

位置式 PID 算法是根据系统的误差直接计算控制器的绝对输出。离散化公式表明，当前时刻的控制输出就是比例项、积分项、微分项的线性叠加。在编程实现中一般定义一个结构体来保存 PID 的三个主要参数（ K_p 、 K_i 、 K_d ）、目标值、实际值、当前误差、上一次误差、误差的累积和。每次调用函数的时候先求当前误差，然后计算误差累积和，接着求微分项，最后把误差、误差累积和、微分项三者相加得到最终的控制输出量。该算法直观易用，但是积分项会不断累积，造成长时间的误差饱和，影响系统的动态响应。

增量式 PID 算法计算的是控制量的增量而不是绝对值，输出值是当前时刻和上一时刻控制输出的差值。公式推导利用了相邻两次采样时刻误差的关系，没有对过去所有的误差进行累加。在代码实现中只需要保存最近几次的误差值（当前误差、上一次误差、上上次误差），就可以计算出本次控制的增量。该方式的优势是误动作影响小，因为计算的是增量，即使出现一次计算错误，对后续控制的影响也很小。手动 / 自动切换时由于没有积分项的累积效应，可以实现平滑无冲击的切换，对需要人工干预的农业机械操作来说非常重要。因此，在农业机械液压控制、电机调速等场合，增量式 PID 应用更为广泛。

增量式 PID 的实现结构更紧凑，避免了位置式 PID 积分项不断累加而造成浮点数溢出或者精度下降的问题。具体的算法要根据被控对象的特性以及控制要求来确定。对于执行机构本身具有积分效应的系统，如步进电机，使用位置式

PID 更为直接；而对阀门、液压缸等需要控制其变化率的执行器，增量式 PID 具有更好的优势，因为它鲁棒性好、切换平滑，所以在嵌入式控制系统中被广泛采用。

（二）积分饱和与微分冲击的处理

积分饱和问题在位置式 PID 控制器里是常见的。当系统出现较大的且持续的误差的时候，积分项就会不断积累起来，直到控制量达到了执行机构最大的输出能力的极限。这时即使误差反向，累积积分项也要很长时间才能从饱和区退出来，从而造成系统响应迟缓，甚至出现超调和振荡。为了克服这个问题，一般采用积分分离法或者抗饱和的方法。积分分离法就是当误差较大的时候，暂时取消积分的作用，等误差减小到一定的阈值以下的时候再重新加入积分。抗饱和策略则更精细一些，在控制输出到达限幅值时，根据输出的饱和程度来反向修正积分累积项，使它停止增长或者适当减少，从而使控制器更快地脱离饱和状态。

微分冲击一般发生在系统设定值发生阶跃变化的时候。因为微分项的变化率与误差的变化率成正比，设定值的突变会造成误差瞬间产生巨大的跳变，在经过微分环节之后会产生一个很大的瞬时控制脉冲。脉冲会损坏执行机构或者引起系统剧烈的振荡。处理微分冲击的有效方法就是对微分项进行改进。常用的方法是微分先行，即只对测量值进行微分，不把误差（设定值 - 测量值）作为微分对象。这样，当设定值发生变化时，由于测量值的变化是滞后且平滑的，因此微分项就不会发生剧烈的跳变。另一种办法就是在微分项上加上低通滤波器，对误差的变化率做平滑处理，消去高频噪声、突变信号，从而减小微分效应。

（三）PID 参数的在线整定方法

PID 参数整定属于决定控制效果的重要步骤。传统的试凑法效率低，而且很难达到最佳效果。现代农业机械作业负载、土壤环境等工况千变万化，固定不变的 PID 参数很难适应各种复杂情况，因此在线整定方法显得尤为重要。

继电器自整定法是一种简单有效的在线整定方法。其基本原理是用一个继电器环节代替 PID 控制器，在临界状态附近产生等幅振荡。通过测量振荡周期和幅值，可以得到系统临界增益和临界频率，再根据 Ziegler-Nichols 等经典整定规则，自动得到一组比较合适的 PID 参数。不需要精确的数学模型，实现起来简单，在农业机械电控单元中有较高的实用性。编程实现时要设计状态机来控制整定过程，起振、检测稳定振荡、计算参数、恢复 PID 控制等各个阶段都需要状态机来完成。

另一种比较先进的整定方法就是模型参考自适应。该方法假定存在一个理想

参考模型，该参考模型体现的是期望的系统响应特性。控制器根据实际输出和参考模型输出之间的差异，用 MIT 规则或者梯度法等自适应律在线调整 PID 参数，使闭环系统性能不断接近参考模型。此方法能不断优化控制参数，对系统参数变化和外界干扰有很强的适应性。嵌入式实现较为复杂，需要更多的计算资源，但是它在高性能控制要求较高的变量喷药、精准施肥等应用中所带来的性能提升是十分明显的。

二、滤波算法的软件实现

农业机械作业环境是复杂的多变的，传感器信号里包含发动机振动、地面颠簸、电磁干扰等各种噪声。好的滤波算法是保证控制系统稳定性的必要条件，也是提高控制系统精度的保证。本部分主要研究几种常用的滤波算法的软件实现原理以及代码逻辑，它们属于数据预处理的重要步骤。

（一）限幅滤波与中值滤波算法

限幅滤波属于数字滤波中比较简单的一种。根据经验确定一个最大的允许变化量。当本次采样值与上一次有效值的差的绝对值大于该阈值时，就认为本次采样值是异常的、由干扰引起的突变，舍弃本次采样值，取上一次的有效值作为本次的输出。否则就认为本次采样值有效。该算法的优点是实现简单、计算量小，能很好地滤除偶然的、脉冲式的强干扰。但其缺点也很明显，对于变化缓慢的干扰信号或者系统本身状态快速变化时，容易发生误判，造成信号失真或者响应滞后。

中值滤波是非线性滤波，对椒盐噪声、脉冲噪声有很好的滤除作用，同时可以很好地保持信号边缘信息。实现方法就是用 N 个固定的样本窗口（队列）来维护。每当有新的采样数据到达的时候，把新的数据放入窗口中，接着对窗口中的所有数据进行排序，取中间位置的值作为本次滤波的输出。以 5 个窗口为例，输出就是排序后的第三个数据。编程实现时需要一个数据缓冲区来存放窗口数据，然后调用排序算法。为了提高效率，可以使用部分排序算法，也可以在数据更新的时候采用插入排序，而不仅仅是每次都对整个窗口进行完全排序。窗口大小 N 的选择十分关键， N 越大，滤波效果越平滑，但是信号的延迟也越大。

（二）滑动平均滤波与加权滤波

滑动平均滤波属于数字滤波算法中应用较多的一种，它通过在某个窗口内对

连续的多个采样值求平均，从而达到平滑信号、抑制周期性干扰以及随机噪声的目的。它的实现方式和中值滤波相似，也需要一个固定长度为 N 的数据窗口。不同之处在于它把窗口内的所有数据取平均作为输出。为了提高计算效率，嵌入式系统中一般使用递推平均滤波。即维护一个数据求和，每有新的数据加入窗口时，就将和加上新数据，再减去窗口中最老的数据，最后除以 N 得到新的平均值。这样就避免了每次都要对窗口内所有数据求和，大大减少了计算量。

滑动平均滤波本质上是一个低通滤波器，可以很好地消除高频噪声。窗口长度 N 决定了滤波器的截止频率， N 越大，滤波的效果越好，但是信号的实时性也越差，会产生相位滞后。农业机械位置或者姿态测量时选择合适的窗口长度，是噪声抑制和系统响应速度取得平衡的关键。

加权滤波是滑动平均滤波的一种改进。它认为窗口内不同时刻的数据对于当前真实值的贡献度不同，一般距离当前时刻越近的数据，权重越大。加权滑动平均滤波在计算平均值时，给窗口内的每一个数据赋予不同的权重系数，然后对这些加权后的数据求和，再除以权重之和。设置线性权值序列，最近的数据权重最高为 N 次方，其次是 $N-1$ 次方。该方法比简单的算术平均法能更快地响应信号的变化，减小滤波引起的延迟，同时保持较好的平滑效果。权重的选择可以是经验性的，也可以根据信号特性（高斯权重等）来确定。

（三）简单卡尔曼滤波的编程实现

卡尔曼滤波是最优线性估计算法，可以很好地从带有噪声的一系列测量数据中估计出动态系统的状态。在农业机械的导航定位、姿态估计等应用中都有使用。简单的卡尔曼滤波分为两步，即预测和更新。

编程实现一个简单的 1 维卡尔曼滤波器，首先要建立系统的状态空间模型。如果要估计匀速运动物体的位置，那么状态变量就是位置和速度。预测步骤用上时刻的状态估计值和系统模型来预测当前时刻的状态，即预测状态和预测协方差。代码中就是一系列矩阵乘法、加法运算来更新状态向量和它的不确定性（协方差矩阵）。

更新步骤用当前时刻实际测量值修正预测值。计算卡尔曼增益，该增益决定了新测量值要占多大的比重。卡尔曼增益是预测协方差和测量噪声协方差的函数，高增益表示测量值更可信，低增益表示预测值更可信。之后利用卡尔曼增益、测量值和预测值计算出当前时刻最优的状态估计。更新状态估计的协方差，为下一

次迭代做准备。

在嵌入式系统实现卡尔曼滤波的时候，要注意矩阵运算的效率。对低维系统可以直接进行矩阵运算，不需要使用通用矩阵库可能带来的额外开销。滤波器的参数，即过程噪声协方差 Q 、测量噪声协方差 R 的设置，对滤波效果有非常大的影响。 Q 代表系统模型预测的不确定度， R 是传感器测量的不确定度。这两个参数一般要依靠实验数据反复调试、改进，才能达到最佳滤波效果，即跟踪速度和抑制噪声之间取得平衡。

三、路径规划算法的嵌入式实现

路径规划和跟踪属于农业机械自动驾驶的主要技术。在资源受限的嵌入式控制器上高效地运行复杂的路径规划算法，是对算法实时性、稳定性、资源占用等各方面的综合考验。这就要求算法设计在考虑理论最优性的同时，也要考虑到计算的可行性。

（一）直线与曲线跟踪算法

直线路径跟踪是农机自动驾驶最基本、最常见的作业方式。纯追踪算法是几何路径跟踪方法里比较经典的一种，在嵌入式系统上实现起来比较容易。其主要思想就是，在预设路径上向前看一个预瞄距离，找到对应的预瞄点。控制器根据计算得到的转向曲率使车辆沿圆弧路径向预瞄点行驶。关键点有：第一，高效地在路径点序列中找到当前位置到最近预瞄点的过程。根据车辆几何关系（轴距、预瞄距离、航向偏差）可以求出前轮的目标转向角。预瞄距离属于一个重要的可调节参数，它的大小会左右跟踪的平滑度以及反应速度。

对于曲线路径，纯追踪算法也适用，但是曲率变化剧烈的复杂曲线，其性能就会下降。斯坦利算法是另一种优秀的路径跟踪控制器，它同时考虑横向误差和航向误差。该算法的控制律由两部分组成：一部分用来校正车头航向与路径切线方向的偏差，另一部分根据横向误差，用反正切函数直接计算出一个消除横向误差的转角。斯坦利算法在高速行驶时稳定性好，收敛速度快。嵌入式实现时需要精确得到车辆的位置、速度、航向角，同时还需要精确得到目标路径的曲率、切线方向，对传感器精度以及数据同步性有较高的要求。

（二）基于航向的路径跟踪控制

在很多农业作业场合下，精确的航向控制对保证作业质量有着非常重要的作

用，播种、起垄等作业都离不开它。根据航向的路径跟踪控制把问题分成横向位置控制和航向角控制。它一般会采用分层或者级联的控制结构。外环控制器按照车辆当前位置与目标路径的横向误差、航向误差来输出期望的航向角或者航向角速度。内环控制器控制车辆转向机构，使车辆航向角跟随期望航向角。

常用的方法就是用横向误差和航向误差线性组合成期望的偏航角速度。可以设计一个控制器，目标是使 k_1 横向误差 + k_2 航向误差 趋向于 0。该目标偏航角速度被传递到内环 PID 控制器，内环 PID 控制器的输出直接驱动转向电机角度或者液压阀开度。该方法的优点是结构清楚，内外环解耦，便于参数调试。外环参数决定路径跟踪宏观动态性能的好坏，内环参数保证转向执行的快速性、准确性。

该控制策略的嵌入式实现，要求控制器可以很快、周期性地完成内外环的计算。代码中应该把数据采集、状态估计（位置、航向、误差计算）、外环决策和内环执行等模块分开。实时操作系统的使用可以保证各个任务的调度以及实时性，从而保证控制指令的及时下发。

（三）算法的实时性与资源占用优化

在嵌入式控制器上实现路径规划算法，实时性、资源占用这两个问题就是必须要解决的问题。农业机械行驶速度以及作业要求决定了控制算法必须在固定的、毫秒级的时间周期内完成计算，并输出控制指令。

1. 算法层面优化：选择计算复杂度小的算法。相比于复杂的全局动态规划算法，局部路径跟踪算法（纯追踪、斯坦利等）更适合嵌入式环境，因为它主要用几何或者运动学模型。采用分段线性或者简单参数曲线（圆弧、贝塞尔曲线）代替复杂的样条曲线，可以大大减少查找和计算曲率的开销。路径规划可以采用预计算的方式，在上位机或者云端生成详细的作业路径点，车载控制器只负责跟踪任务的执行，从而将复杂的规划计算离线化。

2. 代码实现层面的优化：

在控制循环中尽量避免使用浮点数的除法、三角函数、开方等高开销的运算。可以采用查表法（预先计算三角函数值）、定点化运算、近似公式来代替。小角度时有 $\sin \theta \approx \theta$ ， $\tan \theta \approx \theta$ 。

数据结构优化就是使用高效的数据结构来存储路径点。可以用 KD 树简化思想加速最近邻点的查找，避免每次都要遍历整个路径。

内存管理：实时循环中不要进行内存的动态分配，所有需要的内存应该在初始化时就全部静态分配好，防止出现内存碎片、执行时间不可预知的情况。

编译器优化：打开编译器自带的循环展开、函数内联等优化选项。同时对关键代码段进行仔细分析，必要时使用汇编语言手动优化。

第四节 软件测试与调试技术

软件测试和调试是现代农业机械电子系统稳定可靠运行的根本保证，也是软件开发生命周期中不可缺少的重要环节。本节主要研究代码单元到系统集成的各种测试方法，研究在线调试的核心技术，提出保证软件长期可靠运行的测试策略，给高质量嵌入式软件的开发提供理论指导和实践依据。

一、单元测试与集成测试

单元测试、集成测试对于软件的验证来说，起着承上启下的作用。单元测试只对软件最小可测试单元的正确性进行验证，保证基础组件可靠；集成测试则是把通过单元测试的模块整合起来，检测它们之间接口的兼容性和协同工作能力，层层递进地发现并解决问题，从而有效地降低后期系统集成风险和成本。

（一）单元测试用例的设计方法

单元测试用例设计是保证测试质量、提高测试效率的基础，其目的就是使用最少的用例覆盖更多的逻辑路径以及潜在的缺陷。设计方法主要有黑盒测试和白盒测试两种。黑盒测试只考虑模块的外部特性，不考虑内部实现细节，根据模块的功能规格说明书来设计输入和输出。等价类划分法把无限的输入数据划分成有限的、有代表性的等价类，从中选择少量数据就可以代表整个类别的测试效果。边界值分析法则是在等价类划分的有效补充，它侧重于输入域的边界条件，因为大多数软件错误都是在处理边界情况时发生的。对控制喷洒阀门开度的函数来说，其输入参数是土壤湿度百分比，测试用例要包含正常范围内的值、边界值(0, 100)、边界值附近取值(1, 99)，还要加上无效等价类(-1, 101)。

白盒测试方法深入到代码内部，根据程序的逻辑结构来设计测试用例，目的是保证代码路径被充分验证。常用的白盒测试覆盖标准有语句覆盖、判定覆盖、条件覆盖和路径覆盖。语句覆盖是要求代码中每一个可执行语句至少执行一次的

最低要求。判定覆盖就是程序中的每一个判断语句的真、假两种结果都要被触发一次。复杂的农业作业逻辑，比如根据作物种类、生长阶段、环境温度等条件共同决定灌溉量的控制模块，仅仅满足语句覆盖是远远不够的，必须精心设计用例来保证所有的逻辑分支都被检验，从而有效地发现隐藏在复杂条件判断中的逻辑错误。实践中一般会将黑盒和白盒的方法结合起来，从功能、逻辑两个方面来设计测试用例，从而达到最好的测试效果。

（二）模拟器与仿真器的使用

在现代农业机械电子系统开发中，模拟器和仿真器是进行早期测试、验证的有力工具，可以在没有实际硬件、真实作业环境的情况下，给软件测试提供一个可控、可重复的虚拟平台。模拟器属于纯软件工具，在宿主机上模拟目标微控制器的指令集体系结构以及主要功能。开发者可以将编译好的固件加载到模拟器上运行，观察程序执行的过程、寄存器的状态、内存的变化。模拟器最大的优点就是方便、成本低，可以在硬件未就绪之前就对算法进行验证、逻辑调试，大大缩短了开发周期。可以利用模拟器来对拖拉机的路径规划算法的逻辑正确性进行测试，而不需要真实的车辆。

仿真器比模拟器更进一步，它不仅可以模拟微控制器的指令执行，还可以用软件或者部分硬件模拟目标系统硬件外设的行为，例如 ADC、定时器、CAN 总线控制器等，从而提供比模拟器更高的保真度测试环境。在农业机械领域，硬件在环仿真是一项高级的、十分重要的测试技术。它把真实的控制器硬件接入到可以仿真其它车辆部件（发动机、液压系统、传感器）和外部环境（地形、作物）的仿真平台中。这样控制器软件就仿佛在真正的机器上运行，可以对它进行全方位、接近实际工况的测试。可以用 HIL 平台测试自动驾驶控制器的紧急避障功能，在仿真环境中设置突然出现的虚拟障碍物，检验控制器的响应速度和决策准确性。若在真实的田地里进行此类测试，那么它既风险大、又花费多。使用模拟器与仿真器可以同时进行软件和硬件的开发与测试工作，可以提高研发效率，同时又降低由于物理样机损耗带来的风险。

（三）模块集成时的接口测试

各个软件模块独立通过单元测试之后，集成测试就成为下一个重要的步骤，核心任务就是接口测试。接口测试主要是检验不同模块之间数据交换、功能调用以及协同工作是否正确，目的是找出模块交互过程中出现的各种问题。农业机械

电子系统一般是由导航模块、电控液压模块、传感器数据处理模块和人机交互模块等子系统组成的，各个子系统之间通过 CAN 总线、共享内存或者函数调用等方式进行复杂的交互。

接口测试的第一项内容就是数据传递的检验。即检查接口函数参数的类型、数量、顺序是否正确，传递的数据格式、量程、单位是否符合约定。GPS 模块通过 CAN 总线把位置信息传给路径跟踪模块的时候，接口测试需要检查发送出的这个 CAN 报文的 ID、数据长度和经纬度数据在字节中是否完全按照双方协议规定排列。任何一点偏差都会造成路径跟踪的大错误。其次就是功能调用的协同性测试，需要验证一个模块调用另一个模块功能的时候，被调用模块的响应是否及时、返回的结果是否正确、异常处理是否得当。主控制器要求液压控制模块升起农具时，需要测试液压模块能否在规定时间内完成动作，遇到超载等异常情况时能否返回错误代码。

接口测试还要考虑模块间资源竞争、时序关系。在多任务嵌入式操作系统中，不同的模块会同时去访问同一个全局变量、同一个外设等等。接口测试要创建具体的场景，查看系统并发控制机制（信号量、互斥锁）能否防止数据冲突、死锁。时序问题也不少见，某个模块要依靠另一个模块的初始化完毕，那么在测试的时候就需要看它们的启动顺序和依赖关系是否得到保证。集成测试策略一般采用增量式方法，自顶向下或者自底向上，逐步集成并测试模块，有利于快速定位接口问题，避免大爆炸式集成所带来的调试困境。

二、在线调试技术

在线调试技术是嵌入式软件开发中定位、解决开发中出现问题的主要手段，它可以让开发者对目标硬件上运行起来的程序进行监控和控制。与离线分析不同，在线调试可以发现软硬件交互、实时时序、外部中断等动态环境下才会暴露出来的复杂问题，对保证农业机械电子控制器的功能正确性、性能稳定性起着不可替代的作用。

（一）JTAG/SWD 在线调试原理

JTAG 和 SWD 是目前嵌入式系统中应用最广的两种在线调试、编程接口标准。JTAG（联合测试行动组）最初被用作电路板上芯片连接的测试。采用标准的测试访问端口、边界扫描结构，使外部调试器可以连接到芯片内部逻辑上。调试应

用时，JTAG 接口用 TAP 控制器控制微控制器内核进入调试模式。调试器进入调试模式之后，就可以完全控制 CPU 的运行，可以对内核寄存器、内存、外设进行读写操作，控制程序的执行，即运行、暂停、单步执行等。JTAG 接口一般需要 4 ~ 5 个信号引脚，功能强大但是占用了较多的引脚。

SWD 就是串行线调试，它是 ARM 公司为 Cortex 系列处理器专门设计的调试接口。功能上与 JTAG 兼容，但是使用优化的两线串行协议，大大减少微控制器引脚的使用。这对引脚资源紧张的紧凑型控制器来说就显得尤为重要，因为在现代农业机械中，控制器要连接的传感器和执行器很多，节约引脚资源十分重要。SWD 使用调试端口与 ARM 核的调试逻辑相连接。调试器通过 SWDIO 向调试端口发送命令和数据，调试端口再把这些请求转换为对内核或者系统总线的访问。虽然 SWD 引脚数量少，但是其协议效率很高，在很多情况下数据传输速率甚至比 JTAG 还高。JTAG、SWD 如同窥探芯片内部运行状态的窗口，是实现断点、单步跟踪等高级调试功能的基础硬件。

JTAG 与 SWD 调试接口的详细对比，可见下表：

JTAG 与 SWD 调试接口对比表

特性	JTAG (联合测试行动组)	SWD (串行线调试)
全称	Joint Test Action Group	Serial Wire Debug
主要用途	边界扫描测试，程序调试	ARM Cortex 系列处理器调试
引脚数量	4-5 个 (TCK, TMS, TDI, TDO, TRST 可选)	2 个 (SWDIO, SWCLK)
通信协议	并行 / 串行混合	串行 (双向数据，时钟)
优点	功能强大，可用于边界扫描测试，支持多种芯片架构	引脚少，节省资源；协议效率高，传输速度快；专为 Cortex 设计，兼容性好
缺点	占用引脚多，对资源紧张的系统不友好	主要针对 ARM Cortex 系列，通用性不如 JTAG 广泛
适用场景	复杂 PCB 测试，通用微控制器调试	资源受限的嵌入式系统，Cortex-M 系列微控制器

(二) 断点、单步、变量观察等调试技巧

JTAG、SWD 等硬件接口以及配套调试工具都提供了丰富的调试功能，其中断点、单步执行、变量观察是最常用的也是最基本的调试技术。断点可以让开发者在代码的任何地方设下陷阱。程序执行到此处的时候，CPU 会暂停，把控制权交给调试器。这对定位问题非常有效，可以在怀疑出错的代码行前设断点，程

序暂停时检查系统状态，分析问题发生的上下文环境。硬件断点由微控制器的内部调试逻辑来支持，数量较少，一般只能在程序存储器中设置。软件断点则是通过将断点处原来的指令用一条特殊的“中断”指令来代替实现的，数量没有严格限制，但一般只能在可读写存储器中设置。条件断点是更高一级的技术，它只在满足某个条件时才会使程序在断点处暂停，比如当某变量的值大于某一个阈值的时候。调试循环内或者特定条件下偶发性的错误，使用条件断点比较合适。

单步执行是程序暂停后控制程序逐条或逐行执行的一种调试方法。它分为“单步步过”和“单步入”两种。单步步过在遇到函数调用的时候，会执行整个函数体，然后停留在函数调用的下一行，适合于开发者已经确定被调用函数没有问题，只需要关注当前函数逻辑流程的情况。单步进入则会进入到函数调用内部，从被调用函数的入口处开始单步执行，适合分析子函数内部逻辑。反复调试程序执行路径，可以清楚地看到每一步操作所产生的影响，从而找到逻辑上的偏差。

变量观察属于调试阶段分析问题的主要方式。当程序因为断点或者单步执行而暂停的时候，调试器可以显示当前作用域中所有的局部变量、全局变量和静态变量的值。开发者可以将待调试的变量加入到观察窗口，调试器就可以实时显示这些变量的值。这就使开发者可以直观地看到数据在程序执行过程中是如何被处理、改变的，当发现某个变量的值与预期不符时，就很可能接近了问题的真相。农业机械控制系统的可观察数据除了程序变量之外，还可以是微控制器的特殊功能寄存器，从而可以实时查看定时器、ADC、CAN 控制器等外设的工作状态，这对于调试驱动程序和硬件交互问题来说非常重要。调试喷头流量的 PWM 驱动程序时，可以观察 PWM 定时器的计数值和比较寄存器的值来判断输出波形是否正确。

（三）printf 串口打印调试法

虽然现代调试工具功能很强大，但是在某些情况下经典的 printf 串口打印法仍然是一种简单、有效且不可替代的辅助调试方法。基本原理是在代码的关键处插入打印语句，例如 C 语言中的 printf 函数，将程序运行时的状态信息、变量值或者流程标记通过通用异步收发器发送到上位机。开发者在 PC 上用串口终端软件就可以看到输出信息，从而判断程序运行轨迹及数据的状态。

该方法的优点是无需侵入，JTAG 或者 SWD 设置断点会使 CPU 完全停止运行，对于实时性要求高的系统来说，例如电机控制的闭环算法或者多传感器融合

的时序相关处理，都是致命的。断点的暂停会打乱系统的实时时序，造成被调试的现象消失，还会引起新的问题。`printf` 打印在执行时只占用很短的 CPU 时间，不会对系统时序产生很大的影响，因此特别适合于监控实时控制循环中的变量变化，也可以用来追踪中断服务程序的执行情况。调试植保无人机姿态控制算法时，可以在主控制循环里周期性地打印陀螺仪、加速度计原始读数和 PID 算法输出值，观察这些数据的实时变化曲线，直观判断算法的稳定性和响应特性。

串口打印调试法的另一个优点就是可以记录长时间运行的日志。外场或稳定性测试中调试器不能一直连接。这时可以将重要的系统事件、状态信息持续地经由串口输出，并且保存为日志文件。系统出现偶发性故障或者长时间运行后崩溃的时候，可以从最后阶段的日志信息开始，找到问题发生之前系统的状态，给问题的重现和定位提供重要的线索。农业机械电磁环境、振动条件复杂，JTAG/SWD 连接的可靠性下降，串口通信结构简单，更加稳定。但是 `printf` 调试法也有它的不足之处，它会占用程序存储空间以及 CPU 的运行时间，过多地打印输出可能会影响程序正常执行的速度。

三、软件的可靠性测试

软件可靠性测试是对农业机械电子系统在田间环境下长时间、无故障地稳定运行进行最后的检验，即最后一道防线的检验。它既对软件的基本功能进行验证，又对软件在极限状况、异常干扰、长时间负载等情况下是否健壮、能否恢复进行评估。对现代农业装备来说，可靠性测试是产品质量的基础，因为其功能安全要求越来越高。

（一）边界条件与异常情况测试

边界条件及异常情况测试属于可靠性测试的重要部分，它用极端或者非预期的输入来考察软件的鲁棒性以及容错能力。边界条件测试是检测系统处理能力以及输入范围极限值的测试。在农业机械电子系统中，除了单个参数的边界外，还有多个系统参数组合形成的边界。测试场景要覆盖到以下几个方面：

1. 传感器输入极限，模拟 GPS 信号从很弱到很强大范围连续变化，观察导航系统稳定性以及重捕获能力；输入大于正常范围的温度或者压力传感器信号，检验系统保护逻辑是否正确触发。

2. 系统负载极限，使 CAN 总线的负载接近 100%，检验通信调度模块和数

据处理模块的数据丢失或者延迟是否超限,或者同时启动大量的大功率执行器(液压阀、电机等),检验电源管理模块和任务调度模块极限处理能力。

3. 数据存储极限:向路径记录或者作业日志模块不断写入数据,直到填满存储空间为止,这时测试系统是否能正确处理存储溢出的情况,而不是直接崩溃。

异常情况测试更多模拟的是外部环境干扰和内部组件故障,目的是检验系统的故障检测、隔离和恢复机制。这就要求测试人员要模拟出各种可能出现的故障。在测试自动驾驶拖拉机的时候,人为断开一个轮速传感器的连接,看系统能否迅速检测到这个故障,并安全地切换到降级运行模式或者直接停车报警。还可以模拟电源电压的瞬时跌落或者浪涌,测试系统电源监控和复位电路是否可以保证程序状态不被破坏。对通信系统可以注入错误的 CAN 报文或者干扰通信线路来测试节点的错误处理和总线恢复机制。主动制造正常功能测试中不会出现不良情况,可以充分暴露软件异常处理逻辑上的缺陷,从而提高整个系统在真实复杂的工作环境中生存能力以及安全性。

(二) 长时间运行的稳定性测试

长时间运行的稳定性测试,又叫耐久性测试或者浸泡测试,是检测软件随着时间的积累而慢慢变坏的现象。许多软件缺陷,比如内存泄漏、资源未释放、数值计算精度漂移等,在短时间内做功能测试不容易发现。只有在系统连续运行数小时、数天或者数周以后,这些缺陷才会累积起来,最终造成系统性能下降、行为异常甚至崩溃。对于连续作业几十个小时的联合收割机、植保无人机等农业装备来说,稳定性十分重要。

测试的主要目的就是模拟真实而持续运行的环境,使系统在高负载的情况下连续运行。构建一个自动化测试平台,给被测控制器提供一个不断的模拟传感器输入并监视输出。在此过程中要注意几个重要的指标,内存使用情况可以使用调试工具或者软件内部监控代码来记录。可用内存单调地持续下降,不论速度如何,也强烈表明有内存泄漏。内存耗尽的时候系统就不能给新的任务或者数据分配空间,从而产生不可预知的结果。其次就是系统响应时间,即周期性测量关键任务执行时间或者事件响应延迟。如果响应时间随着运行时间的增加而变大,就说明 CPU 的负载过高,或者任务调度存在问题或者是算法中存在着效率瓶颈。

还要监视文件句柄、通信套接字、任务控制块等其他系统资源。任何只增不减的资源占用量都表示存在泄漏问题。例如一个负责与服务器通信的模块,每

次建立连接后没有正确关闭，最终会耗尽所有的通信句柄，不能建立新的连接。稳定性试验周期要根据产品的实际应用场景来定，一般应该大于单次典型工作时间。测试结束后对收集到的监控数据做详细分析，找出并解决资源泄漏或者性能衰退问题，这是保证农业机械软件产品质量可靠、坚如磐石的必要步骤。

（三）代码覆盖率与静态代码分析

代码覆盖率以及静态代码分析，在编码阶段和单元测试阶段都是用来提高软件内在质量、可靠性的白盒测试技术。通过对源代码的深入分析，在程序运行之前发现潜在的缺陷以及不规范的地方，从源头上减少错误的产生。代码覆盖率是测试完整性的一个度量标准，它描述的是被测试用例执行过的源代码占总代码量的百分比。使用专业的覆盖率分析工具，可以在执行完一套测试用例之后，得到详细的覆盖率报告，清楚地显示没有被测试到的代码行、分支或者逻辑路径。

一般用语句覆盖率、分支覆盖率、条件覆盖率来度量代码的覆盖情况。语句覆盖率保证可执行代码的每一行都被执行一次。分支覆盖率要求所有 if, else, switch, case 等控制结构的每一个分支都要被测试到。它比语句覆盖率更严格，可以发现测试逻辑分支中没有被测试的错误。对农业机械中复杂的判断逻辑来说，例如根据各种传感器数据来判断是否紧急制动，保证所有逻辑分支都被覆盖是至关重要的。高代码覆盖率并不能保证软件没有错误，但极低的覆盖率却明确说明测试不充分，遗漏的代码区域就会成为滋生潜在缺陷的温床。因此，设置最低的覆盖率目标并努力实现它，是提高测试质量的有效方法。

静态代码分析就是使用专门的分析工具，对程序的源代码进行语法、结构、数据流等各方面的自动检查，找出不符合编码规范、存在逻辑错误或者可能引起运行时问题的代码片段。这些工具内置了很多规则库，可以检测出空指针解引用、数组越界、变量未初始化、资源泄漏、死代码等常见的错误。静态分析工具可以用来实现 MISRA C 编码标准，对安全关键领域的嵌入式系统，特别是指农业机械控制软件来说。该标准的主要目的就是限制 C 语言中容易产生歧义、错误的功能，提高代码的安全性、可靠性。持续集成流程里整合静态代码分析工具，可以对每次代码提交做自动扫描，在发现问题时立即告警给开发者，可以实现缺陷的即时发现和及时修复，大幅度降低了后期调试的成本，成为了保证软件质量的有效防线。

第五章 农业机械导航与定位系统

第一节 卫星导航系统原理

卫星导航系统通过向地面用户发送高精度的时、位信号，达到对目标的精确定位、测速、授时的目的。它是现代农业机械自动化导航的基础，可以引导农机在田间做厘米级精度的耕作、播种、施药、收获等作业，大大提高了生产效率和资源利用率。掌握其基本工作原理，是设计农机导航系统，也是使用农机导航系统时必须首先考虑的问题。

一、全球导航卫星系统概述

全球导航卫星系统，简称 GNSS，是指全部在轨运行的卫星导航系统的总称。它是一个庞大的空基无线电导航定位系统，可以给地球表面及近地空间的任何用户提供全天候的三维坐标、速度、时间信息。GNSS 技术的发展给现代农业的精准化管理提供了强有力的技术支撑，也是实现农田信息快速获取和农机自主导航的关键所在。

（一）GPS、GLONASS、北斗、Galileo 系统简介

目前世界上有四个独立的全球导航卫星系统，它们一起组成了 GNSS 的核心。分别是美国的全球定位系统、俄罗斯的格洛纳斯系统、中国的北斗卫星导航系统、欧盟的伽利略系统。每个系统都由空间星座、地面监控、用户设备三部分组成，各自通过卫星网络提供全球或者区域性的服务。

主流全球导航卫星系统概览

系统名称	国家 / 组织	卫星数量	主要特点	覆盖范围
GPS	美国	31 颗（典型）	最早投入使用，应用最广，技术成熟	全球
GLONASS	俄罗斯	24 颗（典型）	卫星分布在高纬度地区定位性能较好	全球
北斗卫星导航系统	中国	30 颗（典型）	混合星座，除定位外有短报文通信等特色服务	全球（亚太地区性能优异）
Galileo	欧盟	24 颗（典型）	首个完全民用，高精度设计，信号质量稳定	全球

GPS 是最早投入使用的全球卫星导航系统，美国国防部从 20 世纪 70 年代开始研制，技术成熟，应用最广。其空间星座是由分布在 6 个轨道平面上的约 31 颗工作卫星组成的，保证全球范围内的信号覆盖。GLONASS 是由俄罗斯创建的全球导航系统，其卫星分布于高纬度地区，在高纬度地区定位性能较好，由分布在三个轨道面上的 24 颗卫星组成。

中国的北斗卫星导航系统是独立自主建设运行的全球系统，采用地球静止轨道、倾斜地球同步轨道和中圆地球轨道卫星组成混合星座，除全球定位导航授时外，还具有短报文通信等特色服务，在亚太地区性能表现优秀。Galileo 系统是由欧盟主导建设的，是世界上第一个完全民用型的卫星导航系统，其目的就是提供独立于其它系统的精确定位服务，标准定位精度较高、信号质量稳定。现代农机导航设备大多采用多模接收机，可以同时接收上面所列的各个系统的信号数据，从而大大提高定位的可靠性与精度。

（二）卫星定位的基本原理

GNSS 定位的基本数学模型就是空间距离的后方交会原理。简单来说，只要能够测量出用户接收机到三颗以上已知位置卫星的距离，用户的准确位置就可以确定。在三维空间中，以每颗卫星的位置为球心，用测出的距离为半径，可以得到一个球面。从理论上讲，三个球面相交的地方只有两个点。其中一点一般位于外太空或者地球内部，用常识或结合地球椭球模型可以排除，从而唯一确定接收机在地球上的位置。这就是所谓三球交会定位原理。

但是实际的定位过程要复杂得多。核心就是精确测量“距离”，距离是通过测量卫星信号从发射到被接收所经历的传播时间，再乘以光速得到的。但是接收机内部的时钟是普通的石英钟，精度比卫星上携带的高精度原子钟差得多，两

者之间存在一个未知的钟差。该钟差会使所有的距离测量值都带有相同的系统偏差，称测得的距离为伪距。为了求出接收机的三维坐标（X、Y、Z）和接收机钟差 Δt 这 4 个未知数，按照方程求解原理，需要同时观测到至少 4 颗卫星，建立 4 个伪距观测方程联立求解。因此在实际的 GNSS 定位中，一般称为四星定位。

（三）GNSS 信号的组成与结构

GNSS 卫星发射的无线电信号非常微弱，但经过精心设计后可以实现远距离传播并且能够被有效接收处理。卫星信号是由载波、伪随机码、导航电文三部分组成的。这三者利用调制技术结合在一起，就形成了最终发射的信号。

1. 载波：载波就是用来传递信息的正弦高频波。导航卫星一般用 L 波段发射信号，GPS 系统的 L1 频率为 1575.42MHz。高频载波可以穿透地球电离层，实现远距离传播。通过测量载波信号的相位变化，可以获得更高的定位精度，即载波相位测量技术。

2. 伪随机码：伪随机码是一种具有类似随机噪声特征的二进制编码序列，但它实际上是可以预先生成、复制的。每颗卫星都有一个唯一的伪随机码，接收机通过相关运算将本地产生的相同伪随机码与接收信号比较，两者完全对齐时会出现一个尖锐的相关峰值。该特性具有以下两个作用：第一，可以准确测量信号的传播时间，进而求出伪距；第二，可以区分出不同卫星发出的信号，实现了码分多址通信。

3. 导航电文属于导航电文，是卫星运行的重要信息的低速率数据流。主要内容有卫星的精确轨道位置（星历）、卫星健康状态、卫星钟校正参数、所有卫星的概略轨道信息（历书）和电离层延迟修正参数等。接收机只有能正确解调导航电文，才能得出卫星发出信号时所在的准确的空间坐标，这是定位求解的前提。

二、GNSS 接收机的工作原理

GNSS 接收机属于用户端的关键设备，它的主要工作就是接收卫星播发的微弱信号，经过一系列复杂处理之后，最终得到用户准确的位置、速度和时间。对于应用在农业机械上的接收机来说，除了定位功能之外，还需要有高精度、高可靠性和高更新率等特点来满足农机自动驾驶和精准作业的需求。

（一）接收机的构成与工作流程

GNSS 接收机从硬件上来说，是由天线单元和主机单元两大部分组成的。天

线单元接收卫星电磁波信号并把它转变成微弱的电信号。为了能够接收到各个方向的卫星信号，同时有效地抑制地面反射信号的干扰，农用高精度天线一般采用扼流圈结构或者多点馈源技术。主机单元是接收机的主体，内部有射频前端、数字信号处理器、微处理器等。

接收机的工作流程可以概括为以下几个步骤：

1. 信号接收与放大，天线接收到微弱的 L 波段卫星信号之后，先经由低噪声放大器放大，从而提升信噪比。

2. 下变频和数字化：放大后的射频信号经过混频器和本机振荡器产生的信号混频，得到中频信号。中频信号经模数转换器进行采样和量化，变成数字信号，为后续处理做准备。

3. 信号处理：接收机工作最核心的过程，在这个阶段数字信号处理器完成信号的捕获和跟踪。

4. 定位解算和输出：微处理器用跟踪环路输出的伪距、载波相位、多普勒频移等观测值结合解调出的导航电文计算出位置、速度、时间等信息。定位结果用标准数据接口（NMEA0183 格式）传送到农机控制系统。

（二）捕获、跟踪与定位解算过程

信号捕获就是接收机开机后，在大量的数字信号中寻找并识别出有效的卫星信号。由于接收机在启动时不能确定哪些卫星可见，也不能知道信号的多普勒频移和伪随机码相位，因此需要在二维（频率和码相位）搜索空间中进行搜索。当本地产生的伪随机码和接收信号的码相位对齐，并且频率差在一定范围内的时候，相关运算的输出能量就会大大提高，说明成功捕获到了一颗卫星。

成功捕获后接收机就进入了跟踪阶段。跟踪环路一般由延迟锁定环、锁相环或者频率锁定环组成，实现精确、持续的锁定信号。延迟锁定环利用即时、超前和滞后三路相关器输出的比较来微调本地伪随机码的相位，使其与接收信号的码相位对齐，从而实现对伪距的准确测量。锁相环或者频率锁定环用来跟踪信号的载波频率和相位，消除多普勒频移的影响，为解调导航电文提供同步的载波信号。

当跟踪的卫星数目大于等于四颗时，接收机就进入定位解算。处理器从各个跟踪通道取得伪距观测值，并从导航电文中取得卫星的星历数据及时钟校正参数。用这些信息可以建立一组以接收机三维坐标、接收机钟差为未知数的非线性方程组。用线性化（泰勒级数展开）和迭代最小二乘法等数学方法求解该方程组，

就可以得到接收机的精确位置坐标。解算出的位置信息会不断地更新，更新频率（1Hz、10Hz 或者更高）由接收机的处理能力以及应用要求决定。

（三）冷启动、温启动与热启动

按照接收机在启动时所拥有的历史信息多少，可以将 GNSS 接收机的启动方式分为冷启动、温启动和热启动。这三种模式的主要区别就是首次定位时间的长短，直接影响到农机开始作业前的准备工作。

冷启动指的是接收机没有有效的初始信息的情况下开机。一般在第一次使用，或者电池耗尽造成存储器信息丢失的时候才会出现，或者是设备移动的距离超过了 1000 公里。接收机需要重新搜索整个天空的卫星，下载全部的星历和历书数据，耗时最长可达几十秒到几分钟。

温启动是指接收机有部分有效初始信息，即历书、近似时间和位置信息，但星历数据已经失效或者不完整。关机数小时后再次开机，此时卫星的概略位置可以由历书来预测，但是精确的星历必须重新下载。因为不需要做全天空搜索，并且历书数据仍然有效，温启动的定位时间处于冷启动和热启动之间。

热启动是指接收机已经获得了全部有效的初始信息，即精确的星历、历书、时间、位置。这种情况一般发生在接收机开机时间很短（小于 2 小时）、位置没有发生大幅度变化的时候。这时接收机可以利用之前存储的有效星历快速地锁定卫星、计算出位置，耗时最短，一般只要几秒钟。对农业机械频繁启停来说，快速热启动能力十分重要。

三、GNSS 定位误差分析

虽然 GNSS 系统的设计非常精细，但是在实际定位的过程中，从信号发射到最终位置解算的整个过程中都会遇到各种误差源。这些误差累积起来最后造成定位结果和真实位置存在偏差。对误差的来源、误差的性质和误差的影响进行深入的认识，是开展误差削减工作、实现高精度定位（如 RTK、PPP 技术）的前提，对于精准农业的应用来说更是如此。

（一）卫星时钟、轨道误差

卫星时钟误差、轨道误差属于 GNSS 空间段中出现的两种主要的误差源。卫星上带有的原子钟非常精确，但是它和标准的 GNSS 系统时间之间仍然会存在微小的偏差和漂移，这种差别叫做卫星钟差。即使时钟误差只有纳秒级别，乘以光

速之后也会造成几十厘米的测距误差。地面监控站不断监测并预测卫星钟差，向用户广播校正参数，但是预报模型总会有残余误差。

轨道误差也叫星历误差，导航电文里播发的卫星位置和卫星实际空间位置之间的偏差。卫星轨道受地球非球形引力、日月引力、太阳光压等多种复杂的摄动力影响，地面站虽然建立了复杂的力学模型来预测轨道，但是由于模型不完善和计算滞后，预报星历不可避免地会出现误差。单点定位的星历误差会造成数米的定位误差。利用国际 GNSS 服务机构给出的精确星历可以大大减小该项误差。

（二）电离层、对流层延迟误差

卫星信号从太空传到地面时，必须穿过地球大气层，主要是电离层和对流层。两种介质都会使信号的传播速度发生变化、路径发生改变，从而产生延迟误差。

电离层延迟是 GNSS 定位中最大的一个误差源。电离层位于距地面 50 公里到 1000 公里的大气层中，含有太阳辐射产生的自由电子和离子。GNSS 信号穿过电离层时，传播路径会发生弯曲，传播速度变大（相位超前、群延迟），强度和信号频率平方成反比。太阳活动、昼夜变化、地理位置等都会使它剧烈变化。单频接收机可用导航电文中播发的电离层模型（Klobuchar 模型）做部分修正。对于双频或多频接收机，用不同频率的观测值相组合的方法，可以大幅度消除电离层延迟的影响，这是实现高精度定位的重要技术之一。

对流层离地面较近，高度约为几十公里，它的状态受温度、气压、水汽等气象因素的影响。对流层不会产生色散效应，即不同频率的信号延迟是相同的，所以不能像电离层误差那样用多频组合消除。对流层延迟一般分为干分量延迟和湿分量延迟。干分量占总延迟的大部分（约 90%），变化比较平稳，可以利用标准数学模型（Saastamoinen 模型等）结合地面气压数据进行比较精确的改正。湿分量数值小，但是时空变化剧烈，难以准确预测，所以成为高精度定位中主要的残余误差项。

（三）多路径效应与接收机噪声

多路径效应、接收机噪声属于接收端环境或者设备本身产生的误差。多路径效应是指卫星信号除了直接到达接收机天线（直射波）以外，还会经过周围的地物（比如建筑物、树木、水面等）的反射或者散射之后才到达天线（反射波）。反射信号与直射信号在天线处叠加，会造成测量的伪距、载波相位出现畸变，进而产生误差。多路径误差与反射面的材质、几何关系以及天线的性能有关，属于

难以精确建模和消除的误差。拖拉机驾驶室、周围树木、建筑物都会造成农业环境下的多路径效应。采用扼流圈天线、改善测站环境、改进接收机内部信号处理算法（窄相关技术）等方法可以有效地抑制多路径效应。

接收机噪声就是指接收机内部电子元件产生的随机热噪声。噪声会叠加到信号处理的各个环节中，对伪距和载波相位测量结果的精度造成影响。接收机噪声属于高频随机误差，大小和接收机硬件质量、天线增益、信号强度（载噪比）等有关。高质量的接收机的噪声水平较低。单次测量的噪声一般不能预测，但是由于其随机性，可以采用多次测量的平滑滤波或者求平均的方法，减小噪声对最终定位结果的影响。

第二节 惯性导航技术应用

一、惯性测量单元基础

惯性测量单元是惯性导航系统的主要传感器，把加速度计和陀螺仪巧妙地集成在一起，可以实时地感知载体的线运动和角运动。IMU 性能的好坏直接影响整个导航系统的精度和可靠性，是了解惯性导航技术不可缺少的基础。

（一）加速度计与陀螺仪的测量原理

加速度计的工作原理是牛顿第二定律。其内部一般有一个微小的质量块，当传感器随农业机械加速运动时，该质量块由于惯性会产生一个和加速度方向相反的位移。测量该位移量，就可以间接求出加速度的大小。常见的实现方式有电容式、压阻式和压电式。其中电容式加速度计因为高灵敏度、低功耗的优点，利用测量检测质量块与固定电极间电容变化来判定位移，被广泛应用。加速度计测量的非引力加速度称为比力，在静止状态下，它会测出重力加速度在各个轴上的分量。

陀螺仪又叫角速率传感器，测量原理主要是角动量守恒定律或者科里奥利效应。传统的机械陀螺仪用高速旋转的转子来抵抗方向的改变，从而保持轴线的稳定。现代农业机械中普遍使用的微机电系统 MEMS 陀螺仪，主要利用科里奥利效应。其内部设有一个不断振动的微型结构，当整个传感器旋转时，该振动结构就会受到一个垂直于振动方向和旋转轴线的科里奥利力，从而产生一个微小的位移。检测出该位移，量化之后，就可以计算出载体绕相应轴旋转的角速度。

三轴加速度计、三轴陀螺仪一般都正交安装在同一个芯片上，共同组成一个六自由度的惯性测量单元。加速度计测量的是载体坐标系下的比力矢量，陀螺仪测量的是载体坐标系相对于惯性空间的角速度矢量。这两组原始测量数据是进行姿态、速度、位置解算的基础，测量的准确性和稳定性对整个导航系统性能起着决定性的作用。

（二）IMU 的坐标系与姿态表示

为准确地刻画出农业机械在空间中运动的情况，首先要确定出一个清晰的坐标系。惯性导航中使用的坐标系有载体坐标系和导航坐标系。载体坐标系固定在农业机械上，一般定义为右前上或者前右下方向。导航坐标系属于地理参考坐标系的一种，常见的是东北天或北东地坐标系，它的原点通常设于载体的附近，用来表示载体的地理位置和姿态。惯性导航的主要任务就是确定载体坐标系与导航坐标系之间方向关系，即载体的姿态。

姿态是描述刚体绕质心转动的物理量，有不同的数学表达方式，每种方法都有各自的优缺点。农业机械导航中所用姿态表示法如下：

1. 欧拉角是最直观的姿态表示方式，它把复杂的空间旋转分解成俯仰角、滚转角、航向角这三个轴上的连续转动。该表示方法符合人的直观认知，有利于姿态的显示和控制。但是它的一个主要缺点就是存在万向节死锁问题，在俯仰角接近 90 度的时候会丢失一个自由度，不能正确表示姿态，所以在全姿态解算时需要小心使用。

2. 姿态矩阵：又叫方向余弦矩阵，是表示从载体坐标系到导航坐标系旋转变换的 3×3 正交矩阵。它没有奇异性问题，但是要使用九个参数来表示三个自由度的旋转，有数据冗余，计算中还要不断地做正交化处理来防止误差累积。

3. 四元数是复数的一种拓展形式，它有一个实部，三个虚部。它用四个参数来描述姿态，有效地解决了欧拉角的万向节死锁问题，计算量比姿态矩阵小，数值稳定性更好。因此，在现代惯性导航算法中，四元数被用来做姿态的更新以及计算。

（三）MEMS-IMU 的特点与误差

微机电系统的惯性测量单元由于具有特殊的优势，在现代农业机械上得到了广泛的应用。最明显的特点是体积小、重量轻、功耗低、成本低，可以集成到各种规模的农业设备上，无论是大型拖拉机还是小型植保无人机，都可以轻松携带。同时 MEMS 器件使用半导体制造工艺，具有较好的抗冲击、抗振动性能，可以

很好地适应农田作业环境的颠簸、振动，具有很强的环境适应性。

尽管 MEMS-IMU 有诸多优点，但是其固有的误差也限制了它的性能。误差分为确定性误差和随机性误差。确定性误差是有规律的误差，理论上可以通过标定、补偿来消除或者减弱。主要包括：包括：

零偏：指传感器在零输入时仍存在的非零输出。

标度因子误差：传感器输出与输入之间比例关系的偏差。

轴安装误差：三个传感轴之间并非严格正交，或与载体坐标系不完全重合所引入的误差。

随机性误差是传感器输出信号中出现的噪声，它随时间随机变化，不能用精确的数学模型来描述，是造成惯性导航系统长期漂移的主要原因。主要的随机误差项有：

角度（速度）随机游走：传感器输出中的高频白噪声，积分后会导致姿态和速度误差随时间发散。

零偏不稳定性：零偏值随时间缓慢变化的低频噪声，对导航精度的长期影响更为显著。

以下列出了 MEMS-IMU 常见误差类型：

MEMS-IMU 常见误差类型表

误差类型	定义	影响	补偿方法
确定性误差	具有稳定规律，可建模	可预测，长期积累	标定、建模与实时补偿
零偏	零输入时的非零输出	导致姿态、速度漂移	多位置法、静置采集
标度因子误差	输出与输入比例偏差	影响测量值的准确性	多位置法、线性拟合
轴安装误差	传感轴不正交或未对齐	引入测量串扰	复杂标定、修正矩阵
随机性误差	随时间随机变化，不可建模	不可预测，长期发散	卡尔曼滤波、数据融合
角度随机游走	高频白噪声	姿态、速度误差发散	滤波处理
零偏不稳定性	零偏值缓慢变化	显著影响长期精度	滤波处理
量化噪声	数字转换引入的误差	影响测量分辨率	提高 ADC 分辨率

认识并有效处理这些误差，是设计高精度惯性导航系统的先决条件。

二、惯性导航系统原理

惯性导航系统依据牛顿力学定律，用 IMU 所测的角速度、加速度信息来实

时积分推算载体的位置、速度、姿态。这是一个完全自主的导航过程，不需要依靠外部信息源，具有独特的应用价值。

（一）惯性导航的基本解算过程

惯性导航的基本解算过程就是循环迭代的积分运算。系统需要一个准确的初始状态，即初始位置（经纬高）、初始速度、初始姿态等，这个过程就叫做初始对准。对准完成之后导航解算循环就启动了。导航计算机在一个计算周期里，从陀螺仪得到角速度增量，从加速度计得到比力增量。

解算顺序一般是：姿态、速度、位置。根据上一时刻的姿态以及当前的角速度信息来计算出当前时刻的姿态。然后，利用更新后的姿态信息，把加速度计在载体坐标系下测量到的比力信息转换到导航坐标系下。导航坐标系中，系统会去除重力加速度和地球自转产生的有害加速度的影响，得到载体在导航坐标系下的真实线性加速度。对线性加速度做一次积分，加上上一时刻的速度，就得到当前时刻的速度。将当前速度再积分，加上上一次位置，就可以得到当前位置。该过程以高频次（一般大于 100Hz）反复进行的方式来达到对农业机械运动状态的连续跟踪。

（二）姿态矩阵的更新计算

姿态更新属于惯性导航解算的关键部分，它的好坏直接影响速度和位置的计算。姿态矩阵更新实际上就是求解姿态微分方程。姿态矩阵 C 的变化率同当前的姿态矩阵、载体相对导航坐标系的角速度矢量有关。可以用矩阵微分方程来描述，姿态矩阵的时间导数等于姿态矩阵和角速度矢量的反对称矩阵的乘积。

在数字计算机中，微分方程要借助离散化的方法来求解。经典的方法是利用陀螺仪在短时间内测量的角增量，构造一个等效旋转矢量，然后根据该矢量计算出该时间步内姿态的变化矩阵。用上一时刻的姿态矩阵左乘姿态变化矩阵，就可以得到当前时刻的姿态矩阵。为了避免由于舍入误差等原因造成姿态矩阵失去正交性，还要定时对姿态矩阵进行正交化处理。四元数更新法计算速度更快，稳定性更好。将陀螺仪测得的角速度转换为四元数微分方程形式，再做数值积分，也可以实现姿态的更新，同时可以保持单位范数，避免了正交化带来的复杂性。

（三）纯惯性导航的误差累积问题

纯惯性导航系统虽然有完全自主的优点，但是它的致命缺点就是导航误差会随着时间迅速累积。问题产生的根本原因就是积分运算对误差的放大作用。IMU

测量本身就存在着各种确定性误差、随机性误差，在积分过程中不断累积放大，使导航结果逐渐偏离真实值，产生发散现象。

误差累积的具体表现形式有很多。陀螺仪零偏误差会造成计算出的姿态缓慢漂移。错误的姿态会把重力加速度错误地分解到水平方向上，产生虚假的水平加速度。虚假的加速度经过一次积分就会产生速度误差，再经过二次积分就会产生位置误差。因此微小的常值陀螺仪零偏最终会导致位置误差随时间呈三次方增长。加速度计的零偏误差经过两次积分之后，也会使位置误差随时间呈平方增长。由于误差具有快速发散的特点，任何纯惯性导航系统，尤其是使用低成本 MEMS-IMU 的系统，都不能长时间独立进行精确定位。

农业机械实际应用时，意味着如果只依靠惯性导航，拖拉机作业几分钟后定位偏差就会达到数米甚至数十米，完全不能满足精准农业对路径跟踪精度的要求。因此，在实际系统中，惯性导航很少单独使用，而是作为核心部件，和全球导航卫星系统 GNSS 等外部传感器配合，用数据融合算法（卡尔曼滤波等）实时校正惯性导航的累积误差，达到优势互补的效果，得到连续、稳定、高精度的导航结果。

三、IMU 的标定与补偿

为了最大限度地发挥 IMU 的作用，减小固有误差对导航精度的影响，在系统投入使用前必须对 IMU 进行标定和补偿。标定就是识别出 IMU 的确定性误差参数；补偿就是导航解算时使用这些参数对原始测量数据进行实时修正。

（一）加速度计与陀螺仪的零偏标定

零偏又叫偏置，是 IMU 最主要的确定性误差源之一。加速度计的零偏指没有外力作用（只有重力）时，该轴上理论输出应为零的读数。陀螺仪零偏是指陀螺仪静止时输出角速度不为零的那部分。零偏存在会使得导航解算中一直有误差输入，造成速度、位置快速漂移。

零偏标定方法比较直接。陀螺仪最简单的标定方法是在 IMU 上电预热稳定之后，将陀螺仪固定在绝对静止的状态下，采集一段时间（例如数分钟）的输出数据。由于真实的角速度为零，这段时间的数据平均值就可以认为是陀螺仪的零偏。加速度计一般用多位置法，常用的方法是六面法，即将 IMU 的三个轴分别朝上、朝下放置。每一个静止位置，加速度计输出理论上应该为 $\pm 1g$ 在各个轴上的投影。测量六个位置的输出可以得到一组超定方程，进而可以解算出各轴的

零偏和标度因子。将标定出的零偏值从每次传感器原始读数中减去，即可完成零偏的校正。

（二）安装误差的标定与补偿

安装误差分为两类：第一类是传感器自身三轴之间的非正交误差；第二类是 IMU 作为一个整体安装在农业机械上时，IMU 坐标系与机械载体坐标系之间对准误差。非正交误差是指加速度计或陀螺仪的三个敏感轴不是严格互相垂直的，一个方向的运动在另外两个轴上产生串扰输出。安装对准误差造成导航系统算出的姿态与机械实际姿态有固定的偏差。

这两种误差一般通过复杂的校准过程一起求得。标定过程一般需要高精度转台，把 IMU 准确地旋转到空间中不同的姿态，然后记录 IMU 的输出并与转台给出的真实姿态或者角速率进行比较。利用最小二乘法等优化算法，可以得到一个修正矩阵，这个修正矩阵可以同时校正零偏、标度因子、非正交误差。对于安装对准误差，可以在机械上进行直线行驶、转弯等特定的机动动作，利用 GNSS 等外部参考信息来辨识出 IMU 坐标系和载体坐标系之间的转换关系。在补偿时用标定出的修正矩阵修正 IMU 原始测量数据，即可得到更加准确的运动信息。

（三）温度漂移的补偿方法

MEMS 传感器的性能受温度的影响很大，温度的变化会导致零偏、标度因子等重要参数出现较大的漂移，这也是 IMU 在实际农田作业环境中长期稳定性的主要影响因素。农业机械工作环境的温度变化范围很大，从清晨到午后温差可达几十摄氏度，如此大的变化会使 IMU 误差模型参数发生变化，如果不加以补偿，导航精度将会严重下降。

温度漂移补偿一般是假定传感器误差与温度之间存在一定的可重复性。补偿的第一步就是温度标定。IMU 被放入温控箱中，按照事先设定好的程序，在其工作温度范围内做多次升温、降温循环。在此过程中记录 IMU 内部温度传感器读数和各轴输出数据。通过对大量数据进行分析，可以建立误差参数（主要是零偏和标度因子）随温度变化的数学模型。

该模型可以是简单的多项式函数，也可以是复杂的查找表或者神经网络模型。模型建立之后，就可以在实际工作中进行实时补偿。导航系统在工作时会不断检测 IMU 内部的温度，根据当前温度值，用已建立好的温度模型计算出对应的误差修正量。然后利用 IMU 原始数据中扣除这个动态计算得到的误差，从而有效

抑制温度变化造成的漂移。该方法可以较好地改善 IMU 在全温域工作时的精度和稳定性，是保证农业机械在各种环境条件下进行高精度导航的重要技术环节。

第三节 路径规划与跟踪控制

本节主要阐述农业机械自动化导航系统中两种核心技术，即路径规划和跟踪控制。路径规划给机械提供最佳的田间作业路线，跟踪控制保证机械能够精确地按照这条路线行驶。两者互相配合，是开展精准高效农业生产不可缺少的重要环节。

一、农业机械的作业路径规划

路径规划是自动导航系统的第一项任务，在满足一定的农艺要求的基础上，生成一条能使农业机械以最高效、最经济的方式完成作业任务的行驶轨迹。规划的好坏直接关系到作业效率、资源消耗和最终的作业质量。

（一）路径规划的基本要求

农业机械路径规划的主要目的就是实现作业区域的完全覆盖，不漏不重。这一目标用两个重要的指标来衡量，即覆盖率、重叠率。覆盖率就是作业机具实际处理面积占总待作业面积的百分比，理想状态下应该为 100%。任何漏耕、漏播、漏喷的区域都会直接造成作物减产或者病虫害滋生，属于严重的不可忽视的问题。因此规划算法必须保证路径可以覆盖地块的全部区域。

重叠率就是指机具重复作业面积占总作业面积的比例。过高的重叠率会造成种子、化肥、农药等生产资料的浪费，增加生产成本，对作物生长造成不利影响，重复施肥会造成“烧苗”。但是过低的重叠率会形成缝隙，造成覆盖率不够。为了保证无缝连接，一般设置一个小到可以接受的理论重叠值来弥补定位误差、车辆侧滑等造成的不准确。优秀的路径规划算法，在保证百分之百的覆盖率的同时，可以将重叠率降到最低限度，从而达到资源利用最大化的目的。

（二）常见路径规划模式

根据农田的形状、规模、各种农艺要求，自动导航系统一般会给出不同的路径规划方式。这些模式给操作员提供了灵活的选择，希望得到最好的作业效果。以下为一些常见的模式，其特点在下表中体现出来。

常见路径规划模式对比表

规划模式	适用场景	主要特点	优点	缺点
AB 直线模式	形状规整的矩形地块	平行直线路径，A、B 点定义	结构简单，计算量小，大田作业首选	不适用于不规则地块，边角处理复杂
圆形路径模式	中心支轴式灌溉系统的圆形或扇形地块	以灌溉系统支点为圆心，同心圆或螺旋线作业	契合地块边界，土地利用率高，减少边角地处理	仅适用于特定圆形地块，规划局限性大
自定义路径模式	梯田、沿等高线种植的山地、不规则形状地块	用户手动绘制或导入基准曲线，生成等距偏移曲线	灵活性高，适应复杂地形，提高土地利用率	路径计算复杂，对用户经验和系统处理能力要求高

最常用、最基本的模式就是 AB 直线模式。操作员只需在田块的一端设 A 点，在另一端设 B 点，系统就会自动生成覆盖整个田块的一组平行直线路径。该模式结构简单，计算量小，适用于形状规整的矩形地块，是播种、收割等大田作业的首选。

圆形路径模式适合于中心支轴式喷灌系统下的圆形或者扇形地块。农业机械以灌溉系统的支点为圆心，做同心圆或者螺旋线的作业。该模式可以很好地适应地块边界，最大程度地利用土地，避免了在圆形地块中用直线路径造成的大量边角地带复杂处理。自定义路径模式具有最大的灵活性，用户可以根据田块不规则边界手动绘制或者导入一条基准曲线，系统以此为基础生成一组等距的偏移曲线作为作业路径。该模式可以很好地适应梯田、沿等高线种植的山地或者不规则形状的田块。虽然路径计算更加复杂，但是它对于提高复杂地形的作业效率、土地利用有着不可替代的作用，可以采用螺旋形、往复形等各种方式适应不同的工作情形。

（三）地头转向路径的优化

地头转向是完成一行作业之后，机械转向到下一行作业路径上的必要过程。此过程不产生直接经济效益，属于非作业时间，所以优化地头转向路径对提高整体作业效率十分重要。好的转向策略可以大大缩短转向时间、节约燃油消耗、减少对地头土壤的压实。不恰当的转向路径不但浪费油料，而且由于转向半径小或者转向动作复杂，会加重机械的磨损。

地头转向有弓形转弯、灯泡形转弯、T 形转弯等几种方式。弓形转弯轨迹平滑，适合较宽的地头区域，可以实现较快的转向速度，但是占用地头空间大。灯

泡形转弯更为紧凑，用类似灯泡形状的环路来换行，适用于地头空间小的情况，但路径复杂，对控制精度要求高。系统在路径规划时要考虑到地块的宽度、机具的宽度、最小转弯半径、车辆运动学特性等诸多因素。其目的就是获得最短、最平滑、耗时最少的转向轨迹。利用先进的算法，例如杜宾斯曲线或者里德 - 希普曲线路径生成算法，可以求出在满足车辆运动学约束下最优的转向路径，从而将非作业时间压缩到最低，最大化有效作业时间占比。

二、纯跟踪模型控制算法

纯跟踪模型属于一种经典的、被普遍采用的路径跟踪控制手段。它用几何原理来模拟人驾驶员的视觉行为，从而得到使车辆沿着目标路线平稳行驶所需要的转向角。由于其原理直观、计算简单、鲁棒性好，所以该算法受到欢迎。

（一）纯跟踪模型的几何原理

纯跟踪模型的控制思想来自一个简单的几何关系。该模型把农业机械简化为后轮驱动的自行车模型，主要任务是找到一个预瞄点。预瞄点就是期望路径上距离车辆后轴中心固定距离（前视距离）的点。控制器的任务便是计算出能够驱动车辆后轴沿着一个圆弧精确到达该预瞄点的转向角。

控制算法在预定路径上找到距离当前车辆后轴中心一定距离的前视点。然后在车辆坐标系下建立一个虚拟圆弧，圆弧起点为车辆后轴中心，终点为预瞄点。纯跟踪算法的几何原理就是：车辆沿这个圆弧走，就会自然地朝向目标路径，最后会收敛到目标路径。该圆弧的曲率 κ 可以用简单的几何公式计算出来，即 $\kappa = 2x/Ld^2$ ，其中 x 是预瞄点在车辆横向坐标轴上的距离， Ld 是前视距离。在阿克曼转向几何关系中，前轮期望转向角 δ 、曲率 κ 、车轴距 L 三者之间存在直接关系，即 $\delta = \arctan(\kappa L)$ 。控制器会周期性地做这样的计算，不断更新转向指令，从而使机械实时跟踪路径。

（二）前视距离的选择与影响

纯跟踪模型中前视距离属于一个非常重要的控制参数，其选取的好坏会直接影响到路径跟踪的效果以及稳定性。前视距离确定要综合考虑控制策略的平滑性、响应性，根据作业速度、道路曲率、期望控制精度等因素来慎重选取。

前视距离越小，控制器就越注重车辆附近路径点，车辆对路径局部变化的反应就更快，跟踪精度就越高，在进入弯道时，能更快地切入。但是缺点是控制系

统过于灵敏，转向动作频繁且剧烈，容易产生振荡，高速行驶时甚至会造成系统不稳定，乘坐体验也会变差。

相反，较大的前视距离就表示控制器注意的更远路径点，车辆行驶轨迹更加平顺、稳定，转向动作也更柔和。在直线行驶或者大曲率半径的弯道上，该设置效果较好，可以抑制由于传感器噪声或者路面不平所造成的干扰。但是代价就是跟踪精度会降低，曲率变化剧烈的弯道处车体会出现明显的切角行为，跟踪误差也随之增大。所以前视距离并不是固定不变的，它一般会随着车速变化而变化。低速时采用小的前视距离保证精度，高速时采用大的前视距离保证稳定性。

（三）算法在直线与曲线跟踪中的表现

纯跟踪算法在不同的路径类型下有不同的特点。直线路径跟踪任务上该算法效果最好。车辆稳定在直线上，横向偏差接近于零的时候，预瞄点就会一直处在车辆前进方向的正前方，计算出来的转向角也接近于零。当侧风或者坡度等外部扰动使车辆偏离直线时，预瞄点就会偏离车辆中心线，算法会立刻算出一个修正转向角，使车辆平稳地回到直线上。由于其内在的几何收敛性，该算法可以抑制超调，实现稳定的直线跟踪。

纯跟踪算法在曲线路径跟踪上也能很好地工作，但是它的性能会受到曲线曲率和前视距离设置的影响。曲率变化比较平缓的曲线，通过合理的设置前视距离，算法就可以生成平滑的转向指令，使车辆顺利地经过弯道。但是该算法存在一个固有的缺点，由于预瞄点的存在，车辆总是倾向于走捷径或者切角，在曲线段上产生一个稳态的横向跟踪误差。稳态误差的大小同前视距离和曲率半径成正比。急弯或者复杂的曲线路段，若要高精度跟随的话，纯跟踪模型的这种特点就会成为性能瓶颈。为了提高曲线上跟踪效果，研究者提出了自适应前视距离调节方法或者把 PID 算法与纯跟踪算法结合在一起来解决剧烈曲率变化下存在的缺点。

三、基于航向偏差的 PID 控制

PID（比例 - 积分 - 微分）控制是工业控制领域中应用最广、使用最经典的反馈控制算法。在农业机械自动导航系统中，以横向偏差、航向偏差为控制量的 PID 控制器被广泛地用在转向控制上，是实现高精度路径跟踪的另一种主流技术。

（一）横向偏差与航向偏差的计算

实现 PID 路径跟踪控制，首先要准确地得到车辆当前状态和期望路径之间的

差值。其中两个最重要的偏差量就是横向偏差和航向偏差。横向偏差 (Cross-Track Error, 简称 XTE) 是车辆某一基准点 (一般为后轴中心) 到其期望轨迹的最近距离。它表示车辆偏离预定路径的程度, 也是控制器要消除的主要误差。一般用高精度全球导航卫星系统定位数据, 通过几何运算得到车辆当前位置到路径上最近点的距离。

航向偏差就是车辆当前行驶方向 (航向角) 与该点切线方向 (期望航向角) 的夹角。它体现的是车辆行驶姿态的偏移情况。即使横向偏差为零, 由于航向偏离的原因也会造成车辆偏离道路, 所以也需要加以控制。加入了航向偏差后, 控制器就有了前瞻性, 在车辆姿态改变之前就可以提前对它作出调整, 使横向偏差快速、稳定地减小, 抑制超调和振荡。这两个偏差量一般是由导航系统状态估计模块 (GNSS+IMU 的卡尔曼滤波器) 实时计算出来的, 并且会提供给 PID 控制器。

(二) PID 控制器在转向控制中的应用

PID 控制器用线性组合横向偏差、航向偏差的比例、积分、微分项来产生最终作用于车辆转向机构的控制指令。三部分各管一个方面的工作, 使车辆能快、准、稳地按路线行驶。比例环节是控制器的核心, 它根据当前的偏差大小 (一般用横向偏差和航向偏差的加权和来表示) 来产生一个与它成正比的控制作用。比例系数越大, 控制作用越强, 系统响应越快, 但是过大容易引起系统振荡甚至失稳。

积分环节的作用是消除系统的稳态误差。农业机械作业时, 持续的侧向坡度、不均匀的土壤阻力或者车辆自身的不对称都会造成即使在比例控制下, 车辆也会有微小但持续的横向偏差。积分环节会累积随着时间变化而变化的误差, 产生出一直存在的控制量来抵消恒定干扰的影响, 最终使汽车准确定位在所给的路径上。

微分环节起预测、阻尼的作用。它按照偏差变化率来产生控制作用。当偏差迅速增大时, 微分环节会产生很大的抑制作用, 防止偏差过大; 当偏差趋于稳定时, 微分环节的作用就变小。给系统增加了阻尼, 可以有效抑制比例环节所造成的振荡, 使控制过程更加平缓 and 迅速地收敛。

(三) 控制参数的整定与优化

PID 控制器性能好坏在很大程度上取决于比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d 的整定。参数整定是十分复杂且重要的工作, 其目的是找到一组最佳的参数组合, 使控制系统在各种工况下都能实现快速响应、小超调、高稳定性的控制效果。不合适的参数会造成系统反应迟缓、持续振荡或者不稳定。

1. 试凑法是依靠经验的在线调试方法。一般先让 K_i 、 K_d 都设为 0，再从小到大逐步增大 K_p ，直到系统出现小幅振荡为止。在此基础上逐渐增大 K_i 以消除稳态误差，适当加入 K_d 抑制振荡，改善动态性能。该过程要反复试验，调试人员的经验要求较高，但是直观有效，是现场应用中使用最广泛的方法。

2. 齐格勒 - 尼科尔斯整定法是比较前两种方法更系统化的一种工程整定方法，它提供了一套经验公式来根据系统临界状态（即系统开始等幅振荡时的增益和周期）来确定初始的 PID 参数。虽然它们不一定是最后的最佳解，但是它们给后续微调提供了很好的起点，大大缩短了调试时间。

3. 智能优化算法伴随着计算技术的发展，遗传算法、粒子群优化等现代智能优化算法也被用来对 PID 参数进行自动整定。通过建立控制系统性能评价函数（响应时间、超调量、误差积分等指标），可以在仿真环境中自动寻找出最优的 PID 参数组合来达到控制器性能最优的目的。

第四节 多传感器融合技术

在现代精准农业的复杂作业环境里，单个导航传感器不能达到定位、定姿信息连续性、可靠性要求。为了克服 GNSS 信号容易被遮挡、INS 存在长期误差积累等缺点，多传感器融合技术应运而生。它利用专门的信息融合算法，将各个传感器的优势互相弥补，从而产生比任何一个单一数据来源都更精确、可靠、稳健得多的导航解，给农业机械的自动化、智能化提供核心技术支撑。

一、GNSS/INS 松组合与紧组合

GNSS 和 INS 组合是目前应用最广泛的导航方式，它的核心思想就是用 GNSS 提供的高精度、无长期漂移的绝对位置信息，实时校正 INS 因为积分运算而产生的累积误差。根据信息融合的深浅程度可以分为松组合和紧组合。

（一）松组合：位置速度融合

松组合是在导航结果层面做数据融合的一种方法。GNSS 接收机和惯性测量单元在这种模式下为两个独立的模块。GNSS 接收机独立完成卫星信号的捕获、跟踪、解算，输出农业机械的位置、速度信息。同时 INS 系统对陀螺仪、加速度计的数据进行积分，独立计算载体的姿态、速度、位置。

这两种独立的导航结果最后被送入中央组合导航滤波器，其中最常用的为卡尔曼滤波器。滤波器把 GNSS 给出的位置、速度当作观测值，用来估计并修正 INS 推算出的导航参数里的误差，也就是位置误差、速度误差、姿态误差以及 IMU 传感器的各项误差（零偏、比例因子误差）。此种架构的优处在于结构简单、技术成熟、实现容易，GNSS 接收机与 INS 模块可以看成是“黑盒子”来使用，不需要获取到它们内部原始的数据。

（二）紧组合：伪距伪距率融合

紧组合是在原始观测数据层面上，对数据进行融合的一种更高层次的方法。组合导航系统架构中，不再使用 GNSS 接收机解算出的最终位置和速度的结果，而是用其更原始的测量数据，即伪距与伪距率（或者叫多普勒频移）。这些原始的观测值同 INS 推算出的位置、速度信息一起，被送入一个统一的卡尔曼滤波器。

滤波器根据 INS 推算出的载体位置、速度来预测每颗可见卫星的理论伪距、伪距率。将预测值和 GNSS 接收机实际测量的伪距、伪距率进行比较，得到的差值作为观测值来更新滤波器，从而估计并校正 INS 误差、GNSS 接收机钟差等参数。从而使 INS 和 GNSS 的数据处理过程紧密地联系在一起。

紧组合架构比较复杂，因为需要得到 GNSS 的原始观测量。深度融合的方式，使得系统即使在 GNSS 可见卫星数量不足以独立完成定位解算（一般需要 4 颗卫星以上）的情况下，只要有一颗卫星的信号，就能利用其伪距信息对 INS 进行有效的校正，从而大大提高了系统的可用性以及在恶劣信号环境下导航性能。

（三）两种组合方式的优缺点比较

松组合和紧组合各具不同的系统设计特点和性能表现，选用哪一种要视具体应用要求、预算以及开发难度而定。GNSS/INS 组合方式的对比如表所示

GNSS/INS 组合方式对比表

特征	松组合	紧组合
融合深度	导航结果层面融合（位置、速度）	原始观测量层面融合（伪距、伪距率）
GNSS 需求	至少 4 颗可见卫星提供定位解	1-3 颗可见卫星即可提供约束
系统鲁棒性	GNSS 信号中断后性能迅速下降	GNSS 信号中断或部分遮挡下表现较好
实现复杂度	较低（GNSS 为黑盒子）	较高（需处理 GNSS 原始数据，滤波器维度高）
计算负荷	较低	较高
适用场景	良好 GNSS 环境，快速开发	恶劣 GNSS 环境，高可用性需求

1. 松组合

它的优点是结构简单、模块化程度高，实现比较容易。由于 GNSS 接收机作为“黑盒子”运行，所以开发人员不需要了解 GNSS 接收机复杂的信号处理和计算算法就能将它集成到系统中。它的优势主要是快速开发和系统集成。但是它的缺点也很明显，主要是对 GNSS 信号的依赖性很强。当可见卫星数量少于 4 颗时，GNSS 接收机不能输出有效的定位和速度解，这时组合滤波器就失去了来自 GNSS 的观测信息，无法对 INS 的误差进行校正，导致整个组合导航系统精度迅速下降到纯惯性导航水平，误差随之快速累积。

2. 紧组合

其主要优点就是鲁棒性好、可用性高。由于可以直接使用伪距等原始观测量，即使只有 1 到 3 颗可用卫星，系统也可以利用观测方程对 INS 的误差漂移进行有效的约束。因此，在卫星信号被遮挡的环境（田边的树林、高大建筑物旁）下，紧组合系统比松组合表现更好。但是其系统结构比较复杂，需要处理 GNSS 原始数据，对开发者的技术要求也更高。计算量较大，因为状态向量、量测向量的维度一般较高。

二、卡尔曼滤波在融合中的应用

卡尔曼滤波是实现 GNSS 和 INS 数据融合的主要算法，它是一种高效的递归估计算法，能够处理带噪声的测量数据来估计出动态系统的最佳状态。现代农业机械导航系统正是利用不断“预测”、更新这一特点，将 INS 短时精度高、GNSS 长期稳定性好的优点结合起来。

（一）卡尔曼滤波的基本思想

卡尔曼滤波的基本思想就是建立一个关于系统状态的数学模型，然后利用该模型预测系统下一时刻的状态。当得到新的测量值后，它就会用测量值与预测值之间的差值对预测进行修正，从而得到更加接近真实值的最优估计。此过程分为两大部分，即预测和更新。

预测阶段用上一时刻最优状态估计值和系统动态模型，预测当前时刻的状态。这一步可以看作是利用 INS 的高频输出进行航迹推算的过程，也可以看作是预测误差的累积过程。更新阶段用 GNSS 给出的高精度测量值（位置、速度或者伪距）来修正预测阶段得到的状态估计。卡尔曼增益属于更新步骤中的一项重要概念，

它体现出系统对于新测量值的信任程度。当测量噪声小、测量值可靠时，卡尔曼增益大，估计结果就靠近测量值；当测量噪声大、测量值不可靠时，卡尔曼增益小，估计结果就靠近预测值。卡尔曼滤波用这样的方式，将两种传感器的信息进行了智能的加权融合。

该滤波算法之所以高效，是因为它具有递归性：只需要保存上一时刻的状态估计和误差协方差，不需要保存所有的历史数据，因此非常适合在嵌入式系统上进行实时运算。其最优性是建立在线性系统和高斯噪声的基础上的。GNSS/INS 融合等非线性系统一般会使用它的变体，即扩展卡尔曼滤波或者无迹卡尔曼滤波。

（二）GNSS/INS 融合的状态方程建立

在卡尔曼滤波框架中，首先要建立描述系统行为的数学模型，也就是状态方程和观测方程。GNSS/INS 组合导航一般不会直接估计载体的位置、速度和姿态等量，而是估计 INS 计算误差的状态，这就是误差状态卡尔曼滤波。此种方法的优势在于误差状态量的动态变化一般呈线性或者弱非线性，更符合滤波器所做的假设。

状态向量就是滤波器所要估计的内部系统参数集。典型的 GNSS/INS 松组合误差状态向量一般有姿态误差 3 个、速度误差 3 个、位置误差 3 个、陀螺仪零偏误差 3 个、加速度计零偏误差 3 个，一共构成了 15 维的状态向量。高精度的应用中还可以加入陀螺仪和加速度计的比例因子误差等，使状态向量的维数更高。状态方程用来描述误差状态随时间的变化，它根据惯性导航的误差传播微分方程建立，并离散化成滤波器可以使用形式。

观测方程就是状态向量和实际观测量之间的关系。在松组合中，观测量是 INS 计算的位置、速度和 GNSS 测量得到的位置、速度之差。观测方程把差值和状态向量中的位置误差、速度误差联系起来。在紧组合中，观测量是 INS 预测的伪距、伪距率和 GNSS 测量的伪距、伪距率之差，观测方程把差值和状态向量中的位置误差、速度误差、接收机钟差等联系起来，模型也更复杂。

（三）滤波器的初始化与参数设置

卡尔曼滤波器的好坏在很大程度上取决于初始化和参数的设定。不合适的设置会使得滤波的结果发散或者精度下降。主要的初始化参数有初始状态向量、初始状态向量的协方差矩阵 P 、过程噪声协方差矩阵 Q 、测量噪声协方差矩阵 R 。

初始状态向量一般设为零，因为系统刚开始运行的时候假定没有初始误差。

初始误差协方差矩阵 P 就是初始状态估计的不确定度。当初始对准精度较高时，可以设置较小的 P 值，当初始状态不确定性较大时，可以设置较大的 P 值，使滤波器在初期更多地依靠测量值进行快速收敛。

过程噪声协方差矩阵 Q 、测量噪声协方差矩阵 R 的合理设置，是整个滤波设计的关键和难点。 Q 矩阵用来表征状态方程模型自身的不确定性，主要反映 IMU 传感器随机噪声的特征。 Q 值越大，对 INS 推算出来的预测模型的信任程度越低，滤波器就会给 GNSS 观测值赋予更大的权重。 R 矩阵表示的是测量值的不确定度，也就是 GNSS 测量噪声的大小。 R 值越大，说明 GNSS 测量结果越不可靠（多路径效应严重或者卫星数量较少时），滤波器就会减少对 GNSS 观测的依赖，更多地相信 INS 的推算。 Q 、 R 矩阵的设置一般要经过传感器性能标定和大量实验数据的调试、优化才能得到最好的滤波效果。

三、融合系统的性能评估

对现代农业机械的多传感器融合系统进行性能评价，是保证其达到精准作业要求的重要环节。评价时不能只看最终的定位精度，还要从系统在各种复杂环境下的可用性、连续性、可靠性、实时性等方面来考虑，从而全面衡量系统对农业生产价值。

（一）定位精度与可用性提升

融合系统的第一项性能指标就是定位精度的提高。GNSS 单独定位时，卫星钟差、星历误差、电离层和对流层延迟、多路径效应等都会对它的精度产生影响，从而导致输出结果出现跳跃和噪声。INS 精度高、稳定性好，但是误差会迅速累积。GNSS/INS 融合系统通过卡尔曼滤波，利用 GNSS 长期稳定性对 INS 累积误差进行校正，同时用 INS 高频、平滑输出滤除 GNSS 的短期噪声，最后得到的导航解算结果比任何单一系统都要平滑、准确。

可用性也得到了很大的提高。可用性是指在一定时间内，导航系统能够提供满足规定精度要求的导航服务的能力。农田环境变化大，建筑和树木等都会影响 GNSS 信号。当单个 GNSS 系统可见卫星数目小于它最小工作所需数量的时候，定位服务就会停止。融合系统由于 INS 的存在，即使 GNSS 信号暂时中断，系统也可以依靠 INS 进行航迹推算，保持导航信息的连续输出，大大扩展了农业机械从事高精度作业的范围和时间，从而提高了整体作业的可用性。

将融合系统的结果与高精度基准系统(RTK 或者 PPK 后处理结果)进行对比,可以获得融合系统的定位精度,常用的评价指标有均方根误差、圆形误差概率等。从实验数据可以看出,在信号部分遮挡的情况下,紧组合结构的精度优势更加明显,水平误差比松组合低 20% 以上。

(二) GNSS 信号丢失时的持续导航能力

在精准农业的实际应用环境中,农业机械在田块边缘树荫下、靠近农舍或谷仓作业时很容易就会遇到 GNSS 信号完全丢失的情况。此时,融合系统依靠惯性导航进行自推算的能力,是保证作业连续性的关键所在。这也是评价融合系统鲁棒性的重要测试项目。

当 GNSS 信号完全断开之后,卡尔曼滤波器的更新步骤就会停止,系统就转入纯惯性导航解算模式。此时由于失去了外部精确校正信息,IMU 的各种误差(尤其是零偏)会使得推算出的位置、姿态误差随着时间不断累积。位置误差增长速度一般和时间的二次方或者三次方成正比。评估该能力就是测量 GNSS 中断之后一段时间内系统定位误差增长速度和漂移量。

当机械穿越隧道、林地或者建筑物遮挡区域的时候,在没有信号的情况下记录下轨迹漂移的情况。漂移大小可以反映出所使用的 IMU 的性能水平,也可以反映滤波器对于传感器误差参数(特别是零偏)估计的精度。性能良好的融合系统即使使用消费级的 IMU,在几十秒的信号中断时间里,也能把位置漂移控制在可接受的范围之内(亚米级到米级),从而保证播种、施肥等作业的行距精度不会受到太大影响。

(三) 融合系统的实时性评估

实时性是评价导航系统能否适应农业机械动态控制的标准。它主要是测量系统完成一次完整的预测和滤波更新运算需要的时间。高速作业的农业机械如高速插秧机、喷药机等,如果导航系统输出延迟大,就会造成控制指令滞后,使作业轨迹跟踪不准确。

融合系统计算负担主要是由于卡尔曼滤波算法的执行,即矩阵乘法和求逆运算。其计算复杂度和状态向量维数、观测量个数有关。紧组合由于状态向量维度更高、观测方程更复杂,所以计算量一般大于松组合。一个 15 维状态的松组合系统计算量比一个包含 20 多个状态、包含多颗卫星原始观测量的紧组合系统要小得多。

实时性评价一般在嵌入式硬件平台上，用测量导航解算更新频率和单次解算时间的方式进行。INS 原始数据更新率可达到 100Hz 以上，要求组合导航算法在 10 毫秒内完成一次运算，否则会丢失数据，不能给出实时的导航输出。在最坏情况下（所有可见卫星数据都参与更新），系统计算时间是否还在可接受范围内需要验证。计算延迟大，可以优化算法、简化模型或者提高处理器的运算能力。

第六章 农业机械智能控制系统

第一节 智能控制理论基础

本节的主要目的就是给读者搭建起一个稳固的智能控制理论框架。从剖析传统控制方法固有的缺点开始，逐步引出智能控制的概念、特点以及智能控制在处理复杂非线性系统方面独有的优势。接下来，本文将对模糊逻辑控制、神经网络控制、专家系统等主流的智能控制技术的基本原理和特点进行介绍，为后面章节中智能控制系统的设计与应用打下理论基础。

一、从传统控制到智能控制

控制理论的发展史，实际上就是机器自主性、适应性不断提高的过程。从最初的开环控制，经过经典反馈控制、基于现代控制理论更加精密系统的发展历程，每一次的革新都会大大突破机器能力的边界。但是面对日益复杂的农业生产环境以及多变的作业对象，传统的控制理论已经不能满足需要。智能控制出现以后，控制科学才开始借鉴人的思维、学习方式，开创了一种全新的发展范式。

（一）传统控制（如PID）的局限性

传统的控制理论以PID控制器为代表，过去几十年里，在工业自动化与农业机械化的发展中起到了举足轻重的作用。该方法结构简单、容易实现，对确定的、线性的、变化缓慢的系统有较好的控制效果。PID控制是用比例、积分、微分三个环节的线性组合来产生控制信号，目的是快速响应偏差、消除稳态误差、预测偏差变化趋势，从而有效地调节系统。

虽然PID控制应用广泛，但是它固有的缺陷在现代农业复杂场景中越来越明显。PID控制器对被控对象的精确数学模型有很强的依赖性。但是农业机械作业对象，比如土壤、作物、地形等，具有明显的非线性、时变性、不确定性，因此建立精确的数学模型是十分困难的，甚至不可能。当作业环境或工况发生较大变化的时候，一套固定的PID参数很难同时满足快速性和稳定性的要求，系统动态

品质对参数的改变很敏感，常常需要频繁的重新整定。PID 用误差消除误差的机制本身就存在着矛盾。目标值的阶跃变化和系统输出的惯性之间存在不匹配，直接用二者偏差来控制容易造成初始控制量过大，从而引起超调、振荡。积分环节能够有效地抑制常值扰动，但是它对无扰动时会降低系统的响应速度，并且对时变扰动的抑制能力不够。由于传统控制器的局限性，不能很好地解决农业领域中普遍存在的多变量、强耦合、非线性等问题，促使控制理论向更智能的方向发展。

（二）智能控制的定义与特点

智能控制是自动控制和人工智能技术相结合的产物，它模仿人类智能的某些方面，即学习、推理、适应、组织等，在没有精确的数学模型的情况下，对复杂的、不确定的系统进行有效的控制。传统控制方法重视的是被控对象，智能控制则更重视控制器本身，核心就是知识获取、表示、存储、推理机制的设计。其最终目的就是使控制系统在熟悉或者不熟悉的环境中，通过人机交互或者全自主的方式完成复杂的拟人化任务。

智能控制相较于传统控制，展现出一系列鲜明的特点，使其能够胜任复杂系统的控制任务：

1. 自适应性、鲁棒性：智能控制系统有很强的自适应性和鲁棒性，能自动适应被控对象、环境条件、运行状态的变化，不需要精确的数学模型。因此对于非线性、时变、滞后等复杂不确定性对象来说，其适应性和鲁棒性都很高。

2. 学习与组织能力：智能控制系统的理想能力之一就是学习与组织能力，即它可以识别、记忆环境信息，并利用积累的经验不断优化自身的性能。该类系统一般采用分层递阶的组织结构，可以处理海量的信息和存储的知识，也可以进行有效的推理决策。

3. 知识与模型的融合，智能控制系统把专家经验的知识同模型精确控制结合起来，用符号、语言、图像等各种方式来处理信息，从而实现从宏观决策到微观执行全过程的控制。混合控制方式体现出了“智能递增、精度递减”的组织原理，即上层做战略规划，下层做精细操作。

4. 容错性、自修复能力，由于其知识分布表达和并行处理的特点，智能控制系统在部分组件失效的时候仍然可以保持一定的功能，具有较好的容错性，在一定程度上具备自修复能力。

（三）智能控制的主要分支

智能控制是一个很大的领域，经过几十年的发展，形成了模糊控制、神经网络控制、专家系统这三个主要的研究方向。它们分别从不同的角度去模仿人的智能，给解决复杂的控制问题提供了一种特别的工具。

模糊控制就是利用模糊集合理论、模糊语言变量、模糊逻辑推理来进行控制的方法。核心思想就是把人的操作经验、直觉、知识概括成一系列的“如果…那么…”语言控制规则，并用模糊逻辑来处理那些不精确、模糊的信息。模糊控制不需要建立被控对象的精确数学模型，特别适合于那些不能用解析方法建立数学模型的复杂非线性系统。设计过程大体上可以分为输入量模糊化、按照模糊规则库进行推理和输出量解模糊化三个步骤，本质上是一种非线性控制。

神经网络控制是用人工神经网络作为控制器或者系统模型的一种方法。人工神经网络模仿人脑神经元连接的方式，用大量的简单的处理单元（神经元）并行地处理信息，具有很强的自学习、自适应、容错性以及非线性映射的能力。可以直接从输入输出数据中学习系统动态特性，不需要事先了解系统的精确模型，在系统辨识、动态建模和非线性控制方面表现突出。循环神经网络被广泛地用于识别系统动态特性。可以将神经网络同传统的 PID 控制器及其他智能算法相融合形成更加智能的混合控制系统。

专家系统：专家系统是一种以知识为基础的计算机程序系统，它把某一领域专家的知识 and 经验封装起来，利用推理机制来解决该领域的高水平问题。专家控制属于智能控制的一种方式，其工作方式就是对系统状态进行监测，利用知识库中的规则进行分析、判断，进而选择最佳的控制策略。侧重于对知识的表达、存储、推理过程，适合做高层决策、故障诊断、复杂任务的规划等工作。把专家系统与模糊逻辑相结合可以克服模糊控制器的结构简单、规则单一等不足，使得控制系统更加智能化。

二、智能控制系统的基本结构

智能控制系统作为一个复杂的集成系统，设计目标就是模仿人脑专家解决问题的思维方式。不管它具体使用了什么样的智能技术，其基本结构一般都包含三个核心模块，即信息获取与处理模块、知识库与推理机模块、控制决策与执行模块。这三个模块相配合就形成了感知、决策、执行的闭环。

（一）信息获取与处理模块

信息获取与处理模块是智能控制系统的“感官”、初级神经系统，它从外部环境、被控对象内部取得数据，把原始数据变成系统能理解的信息。在农业机械中，该模块的重要性不言而喻。它用全球定位系统接收机、机器视觉摄像头、激光雷达、土壤温湿度传感器、作物冠层传感器等各类传感器，实时采集农机位置、姿态、速度、作业环境（地形地貌、障碍物）、作物长势（植被指数、病虫害情况）和农机自身工作状态（发动机转速、液压系统压力）等大量的原始数据。

获取原始数据之后，该模块还要进行一系列复杂的处理，包括数据清洗来滤除噪声和异常值；数据融合来整合不同传感器异构信息，从而得到对环境和对象全面、一致的描述；特征提取，从海量数据中挑选出对控制决策最有价值的关键特征。多光谱图像处理可以得到归一化植被指数来衡量作物的生长状况。经过处理的结构化信息将会成为后面决策的依据，被传送到知识库和推理机模块。因此此模块的好坏直接影响到整个智能控制系统认识世界的能力。

（二）知识库与推理机

知识库和推理机是智能控制系统中起关键作用的组成部件，它们一起组成系统的大脑和思维核心。知识库保存专业知识，推理机依据输入信息做逻辑推理，最后得出决策。这两部分紧密联系在一起，就是系统“智能”的集中体现。

知识库就是存放某一领域专业知识的数据库，这些知识可以来自于人类专家、历史数据或者理论模型。农业机械智能控制系统的知识库包含作物生长模型、病虫害识别图谱、土壤养分数据库、农艺操作规程、农机故障模式、诊断规则等内容。知识的表示形式多种多样，可以是“如果-那么”形式的产生式规则（模糊规则、专家规则），也可以是数学公式、逻辑表达式或者神经网络的权重参数。全面的、精确的知识库为智能系统高质量的决策打下基础。

推理机模仿人类的思维过程，是逻辑处理器。根据信息获取模块传来的实时状态信息调用知识库中的相关知识，利用预设的推理策略（正向推理、反向推理、模糊推理等）进行推理分析、匹配判断、决策。传感器发现作物叶片出现某种斑点后，推理机就能从知识库中找到相应的图谱来判定出是哪一种病害、病害的严重程度，并据此给出防治方案。推理机是“感知”与“决策”之间的桥梁，推理机的好坏直接影响到整个系统的反应速度以及决策水平。

（三）控制决策与执行模块

控制决策与执行模块是智能控制系统的神经末梢和效应器官，它的任务就是将推理机得出的抽象决策转化为具体的物理动作，驱动执行机构对被控对象进行精确的操作。本模块是控制指令的最终执行者，保证智能决策可以有效地实施。

控制决策部分收到推理机发出的宏观指令后，就会把它们转化为一系列可以执行的控制信号。当推理机做出 A 区施肥的决策后，控制决策模块根据处方图和农机当前位置，实时计算出该点施肥量，并产生相应的控制电压或者控制电流信号。该过程一般会用到底层的控制算法，如 PID 控制或者改进的形式，保证控制过程的平稳性、精确性。

执行模块由液压阀、电机、舵机、喷头等各种执行器组成。这些执行器根据控制决策模块的信号，直接对农业机械各个部件进行控制。变量施肥系统中执行器根据控制信号调节施肥阀门的开度，变量喷药系统用 PWM 技术控制喷头喷射频率和占空比来精确控制药液施用量。整个模块就形成了一条完整的执行链路，把智能系统做出的决策意图转化成对物理世界实际的干预。

三、智能控制在农业机械中的应用场景

由于智能控制技术的应用，农业机械的能力边界被无限拓宽，并且适应生产环境复杂多变的程度也越来越高，实现了前所未有的精准高效、自主。耕整地、播种、田间管理、收获等现代农业生产各个环节，都已经渐渐地开始渗透智能控制技术。本文主要论述几个智能控制技术给现代农业设备带来的实际应用场景。

（一）变量施肥与喷药的智能决策

精准农业的核心理念之一就是要在合适的时间、合适的地点使用合适的投入品，变量施肥、喷药就是这一理念的集中体现。传统的“一刀切”施肥施药方式容易造成有的区域投入不够影响产量，有的区域投入过多造成资源浪费并污染环境。智能控制系统可以对农田内部的空间差别作出准确的感知、做出智能的决定，从而实现化肥农药的精准使用。该过程首先要依靠信息获取模块。利用带有多光谱或者高光谱传感器的无人机或者卫星获取遥感影像，并与田间传感器实时监测的土壤养分、水分等数据、GPS 记录的地理位置信息相结合，系统可以生成一张详细的“农田处方图”。

处方图为智能决策打下基础，知识库里保存有作物生长模型、施肥专家系统

等，推理机依据处方图中各个管理单元的作物长势、土壤情况来做出推理判断。对于长势较弱的区域，推理机就会增加氮肥的施用量；检测到病虫害的区域，就会进行喷药处理。控制决策与执行模块就着手开展工作。装载在拖拉机或自走式植保机上的智能控制系统，依靠 GPS 实时位置的提供，可以在处方图中准确定位，并且从推理机中得到当前位置精确的施用量。

农业机械智能控制应用概览表

应用场景	主要智能技术	核心功能	典型执行机构
变量施肥 / 喷药	模糊控制、专家系统	精准投入品管理	电控阀门、调速电机
作业环境自适应	神经网络、强化学习	自动避障、地形跟随	发动机、变速箱、悬挂
故障诊断	专家系统、神经网络	预测性维护、故障定位	警报系统、通信模块

控制系统把决策量转换成对变量施肥机或者变量喷药机上执行机构（调速电机、电控阀门等）的控制信号，实现施肥量或喷药量的实时、动态调节。闭环控制系统依靠对田块内差异有深入了解，作出并执行高分化智能化决策，从而保证作物产量的同时，最大限度地提高肥农药利用率、降低生产成本、减少环境风险。这既是一种技术上的更新，又是农业生产方式由传统走向可持续的一种转变，上表中不同智能技术在农业机械中起着核心作用。

（二）作业环境的自适应控制

农业机械的作业环境十分复杂多变，作业环境有起伏不平的地形、变化的土壤质地、作物行间随机出现的障碍物、多变的气候条件。传统机械面对以上变化，往往要操作人员频繁的进行手动调节，这样不仅劳动强度大，而且不能保证作业质量。智能控制系统给农业机械带来了很强的环境自适应能力，它具有了像经验丰富的驾驶员一样自主应对各种复杂环境的能力。

当拖拉机耕作或者联合收割机作业的时候，智能控制系统可以依靠激光雷达、毫米波雷达、机器视觉等传感器对前方地形的起伏、沟坎、障碍物等实行实时的感知。地形发生改变的时候，推理机就会依照事先设定好的知识规则（上坡时加大发动机输出扭矩，下坡时适度制动）或者依靠自学习得到的模型做出调整决定。该决策会立即传送到执行模块，由执行模块调节发动机油门、变速箱档位或者底盘悬挂高度来保证机车平稳行驶和作业深度的统一。行间除草作业时，利用深度学习的视觉系统可以识别出作物行和杂草，从而可以自动调节除草刀具运动路径，在高效除草的同时也不会对作物造成伤害。自适应控制能力大大提高作业质量、

效率，减少对操作人员技能的依赖，提高作业安全性。

（三）复杂工况下的故障诊断

农业机械结构复杂，工作强度大，在恶劣的田间环境里工作时发生故障的可能性较大。传统的方法依靠的是操作人员或售后服务人员的经验来进行故障诊断，效率低、容易出现误判，造成设备损坏。智能故障诊断系统用上了专家系统、神经网络等智能技术来分析判断设备健康状态，从而达到早预警、快定位、智能决策支持的效果。

1. 实时监测与数据采集，在发动机、变速箱、液压系统等关键部位布置振动、温度、压力、油液等各种传感器，对机械运行状态数据进行实时不间断的采集。海量连续的数据积累，就成为故障诊断的基础。

2. 智能推理和诊断决策：采集到的数据进入系统的大脑，即专家系统或者神经网络推理机。专家系统里储存大量的故障诊断规则，例如：发动机振动频率异常，排气温度过高，说明是喷油嘴堵塞。神经网络模型利用历史故障数据进行学习，可以自动建立故障征兆与故障根本原因之间非线性映射的关系。当实时监测数据出现异常的时候，推理机能立刻对规则进行匹配或者激活模型，从而判断出可能是哪种故障，发生于何处，严重到何种程度，甚至能预知故障的未来走向。

该系统除了可以及时向操作人员发出报警外，还可以在显示界面上给出详细的故障信息和维修建议，并且可以通过物联网远程传输诊断结果到服务中心，使维修人员提前准备备件、合理安排行程，从而大大缩短停机时间。智能故障诊断的应用使农业机械的维护方式由原来的被动的“事后维修”转变为现在的主动的“预测性维护”，有效地保证了农业生产连续、可靠。

第二节 模糊控制与神经网络应用

现代农业对于精准化、智能化作业的需求越来越大，传统的控制理论已经不能很好地应对现代农业复杂、非线性、时变的生产环境。模糊控制、神经网络属于智能控制的重要分支，由于其具有的强大的非线性处理能力以及自学习能力，给解决农业机械电子系统中的复杂控制问题提供了一种新的思路，也提供了一种有效的技术手段。

一、模糊控制的基本原理

模糊控制就是用模糊集合理论、模糊语言变量、模糊逻辑推理的一种智能控制方法。它可以处理不能建立精确数学模型的事物，模仿人类在控制过程中积累的经验和思维方式，对复杂的系统进行有效的控制。在拖拉机耕深控制、联合收割机割台高度调节等农业机械的应用场合里，模糊控制有非常广阔的应用前景。

（一）模糊集合、隶属度函数

经典集合论中，元素与集合的关系是明确的，非此即彼。但是现实生活中的许多概念是模糊的，例如“拖拉机速度快”、“土壤湿度高”等。为了用数学语言来描述这些模糊的概念，模糊集合理论应运而生。模糊集合的成员以一定的程度存在于某个集合里，隶属度用来刻画一个元素的隶属度。一个元素对于某个模糊集合的隶属度是一个介于 0 到 1 之间的数值，0 表示完全不属于，1 表示完全属于，介于 0 和 1 之间的数表示不同程度的隶属关系。为量化模糊信息打下了基础。

隶属函数是用数学方式描述隶属度的一种方法，在变量取值范围论域里把每一个元素映射到 0 到 1 的区间上。隶属函数的形式多种多样，选择不同，模糊控制器的性能也不同。常用的隶属函数有三角形函数、梯形函数、高斯函数、S 型函数等等。以拖拉机速度的模糊集合为例，将速度论域划分成低、中、高这三个模糊子集，对每个子集设置三角形或者梯形的隶属函数，就准确地刻画了任意速度值有多大的程度属于低速或者中速。隶属函数一般根据专家的经验或者大量的数据统计分析来确定，隶属函数的形状及参数的合理性直接关系到整个模糊系统性能的好坏。

（二）模糊推理与模糊规则

模糊推理是模糊控制的核心，它模拟的是人类用模糊概念来推导决策的过程。基础规则属于模糊规则，用 IF - THEN 的形式表达输入和输出之间的因果关系。每一条模糊规则都是由前提（IF 部分）和结论（THEN 部分）组成的，前提表示系统当前的状态，结论表示应该采取的控制动作。温室灌溉控制中的一条模糊规则可以是土壤湿度为“干”、温度为“高”时阀门开度为“大”。这里的“干”、“高”、“大”都是用隶属函数定义的模糊语言变量。

模糊推理过程大体上可以分为如下几个步骤，对精确的输入量（传感器测得的土壤湿度值）进行模糊化处理，用隶属函数确定该输入对各个模糊子集的隶属

度。然后根据模糊规则前提部分和相应的模糊算子（MIN 或者 AND）计算每条规则的触发强度。根据触发强度修正规则的结论部分，得出每一条规则对应的模糊输出。系统把所有规则所得到的模糊输出集汇集在一起，得到一个总的模糊输出集，该汇总结果包含所有的规则控制建议，可以作为最终判断的依据。

（三）解模糊化方法

模糊推理的结果是模糊集合，不能直接用作控制信号施加在执行机构（如电机、液压阀）上。解模糊化又称为清晰化，就是把聚合后的模糊输出集合转化为一个精确的数值的过程。这是模糊控制作用于实际物理世界的最后一步，其方法的选择对控制的平稳性、精确度有较大的影响。

目前，存在多种解模糊化方法，每种方法都有其特点和适用场景，如表所示。

解模糊化方法对比表

方法名称	主要特点	优点	缺点
重心法	计算聚合后模糊输出隶属函数曲线与横轴所围图形的几何重心坐标。	考虑所有被激活规则的输出贡献，最终输出平滑稳定，应用最广泛。	计算相对复杂。
最大隶属度法	选取隶属度最大点的横坐标作为输出，若有多个点则取平均值。	计算简单、直观。	容易丢失输出模糊集合的部分信息，可能导致控制输出跳变。
面积平分法	计算一条将聚合输出模糊集合面积平分为两半的垂直线，取其横坐标作为最终输出。	兼顾输出分布的整体形状，性能介于重心法和最大隶属度法之间。	计算复杂度适中。

从解模糊化方法对比表可以看出，重心法使用最多，性能一般最好。计算聚合后的模糊输出隶属函数曲线以及横轴围成的几何重心坐标，用横坐标作为最后的结果。重心法会综合所有被激活的规则输出，保证最后的输出比较平滑稳定。

最大隶属度法就是选择隶属度最大的点的横坐标作为输出，当存在多个点的隶属度为最大值时，一般取这些点的平均值。该方法计算简单，但是容易丢失输出模糊集合的部分信息，造成控制输出出现跳变。

面积平分法是计算一条把聚合输出模糊集合面积平分为两半的垂直线，该垂直线的横坐标即为最终输出。面积平分法也考虑了输出分布的整体形状，性能介于重心法和最大隶属度法之间。选择什么样的解模糊化方法要综合考虑计算复杂度和控制性能的要求。

二、模糊控制器的设计

设计性能良好的模糊控制器，不仅要對模糊理论有深刻的认识，还要考虑到被控对象本身的特性以及专家的经验。在现代农业装备当中，模糊控制器设计的好坏直接影响农机作业质量、效率以及智能化程度。整个设计过程一般要经过一定的步骤，反复调试才能得到最好的性能。

（一）确定输入输出变量与模糊化

设计模糊控制器首先要确定系统的输入和输出变量。输入变量一般是指能够反映系统状态的重要参数，耕深误差（设定值与实际值之差）、误差变化率等都是输入变量。输出变量就是控制器发出的控制指令，比如液压阀的调节信号。选择的变量要能够真实的反映系统的动态特性以及控制目标。变量确定之后，就需要给每个变量确定论域，也就是该变量取值的范围。

随后进行模糊化处理，即给每一个输入、输出变量定义一系列模糊子集（语言变量），并求出隶属函数。耕深误差有负大、负中、零、正中、正大等模糊子集。隶属函数的形状（三角形、梯形）和覆盖范围要经过周密的设计，使论域被适当覆盖的同时，相邻的模糊子集之间还要有合理的重叠，使控制过程平滑过渡。本环节是把精确世界与模糊世界联系起来的桥梁，它的设计好坏直接影响后面规则的建立和最终的控制效果。

（二）建立模糊控制规则表

模糊控制规则就是模糊控制器的大脑，它体现的是专家的控制策略和经验知识。规则一般用 IF A 是 NB，B 是 PS，则 C 是 PM 的形式，把输入变量的模糊状态映射到输出变量的模糊状态。设计者要根据对被控过程的认识，有条理地建立完整的模糊控制规则库。一般都整理成二维或多维的表格，即模糊控制规则表，便于查阅和实现。

规则表创建的过程就是知识工程的过程。双输入单输出控制器中规则表一般用第一个输入变量的模糊子集作行，用第二个输入变量的模糊子集作列，每个单元格对应一个输出变量的模糊子集。耕深控制时，耕深误差为正大（耕得浅），耕深误差变化率为零（深度在浅处稳定不变）时，规则应该给出负大的控制输出，即大幅降低农具的高度。规则制定要具备完备性，即覆盖所有的输入状态组合；同时还要保证规则间的协调性，避免出现互相矛盾的控制指令。规则质量的好坏

直接影响到控制器的智能水平和性能。

（三）模糊控制器的仿真与调试

理论设计完成后必须通过仿真和调试来检验并改进模糊控制器的性能。仿真是在计算机上建立被控对象和模糊控制器的数学模型，在一定的工况下模拟控制系统动态响应过程。仿真可以方便地检验控制器的各项性能指标，即稳定性、响应速度、稳态误差等。通过阶跃信号或斜坡信号作为输入，观察系统输出曲线是否达到设计要求。

如果仿真性能不好，就需要对控制器进行调试。调试就是对各个环节进行调整，即修改隶属函数的形状和位置，调整论域的量化因子和比例因子，或者增删、修改模糊控制规则。当系统响应超调大时，应该加强负反馈作用强的规则；当系统响应迟缓时，应增大输出的控制力度。反复迭代、不断优化，直到控制器性能达到要求为止。经过充分仿真验证、调试之后才能固化到硬件上，进行现场测试和实际应用。

三、神经网络在控制中的应用

神经网络是人脑神经结构和功能的模仿，它有强大的自学习、自适应、并行处理和非线性映射的能力。因此它在解决传统方法难以解决的复杂控制问题，特别是当系统模型未知或者高度非线性时，有独特的优势。神经网络在现代农业中被用来做作物产量预测、病虫害识别、农机路径跟踪、作业过程智能控制等。

（一）神经网络的基本模型（BP、RBF）

在众多神经网络模型当中，BP（反向传播）神经网络和RBF（径向基函数）神经网络是控制领域应用最广的两种模型。BP神经网络为多层的网络，主要使用反向传播法来改变网络的权重值，从而使得网络的输出值与期望值之间的误差减小。BP网络具有很强的非线性映射能力，可以任意精度地逼近任意连续函数，因此被广泛地用来建立非线性系统模型和控制器。但是BP网络也有收敛速度慢、容易陷入局部极小值等缺点。

RBF神经网络是三层前馈网络，结构比较简单。它主要的特征就是隐藏层的神经元激活函数使用的是径向基函数。径向基函数对输入信号具有局部响应性，即只有当输入信号在径向基函数的中心附近的一定范围内时，该神经元才会产生较大的输出。因此RBF网络具有最佳逼近性能和全局最优性，可以有效地

解决 BP 网络中局部极小值的问题。RBF 网络的学习速度一般比 BP 网络快得多，适合于实时性要求高的控制系统。两者的主要区别是 BP 网络是全局逼近网络，RBF 网络是局部逼近网络，在具体的应用中应根据问题的特性以及性能要求来选择。

（二）神经网络系统辨识

系统辨识是控制器设计的基础，它的任务是给被控对象建立一个能准确反映其动态行为的数学模型。现代农业机械是复杂的非线性系统，建立精确的解析模型很难。神经网络给数据驱动建模提供了一种强有力的手段。神经网络系统辨识利用神经网络的非线性逼近能力，用系统输入输出的数据来建立系统动态模型。

神经网络系统辨识需要采集大量的系统输入输出数据对，数据要能充分反映系统在不同工作状态下动态特性。然后选择合适的神经网络结构（BP 或 RBF 网络），用系统的历史输入和输出作为网络的输入，以系统当前的输出作为网络的期望输出进行训练。训练的目的就是对网络参数（权重、阈值）进行调整，使得网络输出和实际系统输出的误差最小。训练完毕后就得到了被控对象的非线性动态模型。该模型可以用来预测系统未来的行为，也可以作为设计模型的参考控制器或者预测控制器的基础。神经网络辨识不需要了解系统的内部机理，对于非线性、不确定性的系统有更好的适应性，比传统的辨识方法要好。

（三）神经网络控制器设计

神经网络由于具有很强的学习和逼近能力，可以设计出监督控制、直接逆控制、模型参考自适应控制等多种类型的控制器来实现复杂系统的智能控制。监督控制是最直接的方法，它通过学习一个专家控制器（经验丰富的操作手或者已经存在的 PID 控制器）的控制行为，使神经网络模仿和复制它的控制策略。

直接逆控制也是一种常用的方法。基本思想就是，如果被控对象的动态模型已知或可以借助系统辨识获得，那么就可以建立一个神经网络来学习它的逆动态。控制过程中将期望的系统输出作为逆模型网络的输入，其输出就是实现期望输出所需要的控制信号。该方法结构简单，但是前提是被控对象的逆模型必须存在且稳定。

模型参考自适应控制比前面两种方法更加复杂并且鲁棒。该系统有参考模型、神经网络控制器、自适应学习机构三个部分组成。给出的参考模型是期望的系统闭环性能。神经网络控制器直接对被控对象进行控制。自适应学习机构按照被控

对象实际输出和参考模型输出之间的偏差,在线调整神经网络控制器的权值,使被控对象的动态行为同参考模型的行为一致。该控制器在农业机械所处复杂多变的作业环境中,可以在线适应系统参数变化以及外部干扰,具有很强的鲁棒性、适应性。

第三节 自适应控制技术

现代农业机械作业环境复杂多变,土壤比阻、作物密度、地面坡度等因素随时都在变化,造成系统负载和动态特性具有很强的不确定性、时变性。自适应控制技术可以在线辨识系统特性变化,并自动调节控制器参数或者结构,使控制系统在环境或者自身参数变化时仍能保持最优或者次优的性能。这必定会成为实现农业装备智能化、精准化的重要技术。

一、自适应控制的基本概念

自适应控制不是单一的控制方法,而是一系列在不确定、时变的系统里改变自身行为的控制策略的总称。它的基本思想就是“边学习边控制”,即不断地进行在线辨识和决策,使控制器能够自动适应被控对象动态特性变化,从而保证系统始终具有良好的性能。

(一) 自适应控制的定义与分类

自适应控制就是指能够自动调节自身参数,以适应受控对象和扰动特性变化的控制系统。它利用一个带有辨识和决策功能的反馈回路,不断对系统的性能进行监视。根据系统实际性能和期望性能之间的差异,按照二者之间的偏差来调节控制器的参数或者结构,从而适应系统内部参数或者外部环境的随机变化。与采用固定参数保证系统在一定参数范围内稳定鲁棒的控制方法不同,自适应控制是通过逐步逼近系统特性来不断提高控制精度和性能。

自适应控制系统一般由三部分组成:可调参数控制器、性能评价反馈回路以及根据评价结果改变控制器参数的自适应律。根据它的调整方式,自适应控制分为两大类。一类是直接自适应控制,它是根据系统输出与参考模型输出的误差直接调节控制器参数。另一类是间接自适应控制,它在线辨识被控对象的模型参数后,再用最新的参数估计值更新控制器参数,也称为自校正控制。

不同自适应控制技术的特点和适用场景，可见自适应控制技术对比表。

自适应控制技术对比表

控制方法	类型	核心原理	关键组成	适用场景
模型参考自适应控制	直接自适应	使被控对象输出跟踪参考模型输出，保持动态响应一致性	参考模型、可调控制器、自适应律	动态特性要求高、不确定性强的系统，需严格稳定保证
自校正控制	间接自适应	在线辨识对象参数，并根据最新参数设计 / 调整控制器	参数估计、控制器设计、反馈控制	模型未知或时变的复杂工业过程，需持续优化控制策略
参数自整定 PID 控制	间接自适应（基于辨识 / 模糊逻辑）	在线自动调节 PID 参数以适应对象变化，优化控制效果	辨识模块 / 模糊推理、参数整定、PID 控制器	传统 PID 难以满足、非线性、时变且有延迟的系统

（二）模型参考自适应控制

模型参考自适应控制是一种典型的直接自适应控制方法，它包括参考模型、可调控制器和自适应律三个部分。核心思想就是设立一个期望动态特性的参考模型，再用自适应律在线调整控制器的参数，使受控对象的输出可以实时跟踪参考模型的输出。因此不论被控对象参数怎样变化，或受外部干扰，闭环系统的动态特性都会趋近于参考模型的特性。

MRAS 系统中的参考模型定义了控制系统应该具有的理想响应，比如期望的上升时间、超调量、阻尼比等。控制器一般包含可以调节的前馈增益和反馈增益。自适应律是设计的核心，它根据被控对象实际输出和参考模型期望输出之间的误差，用李雅普诺夫稳定性理论或者 MIT 规则等方法来调节控制器参数。调整过程一直进行到误差收敛到零或者一个小范围内，使整个系统具有和参考模型一致的优良动态性能。

（三）自校正控制

自校正控制属于间接自适应控制，基本原理就是系统辨识和控制器设计相结合。该方法的基本思想是“先辨识，后控制”，即用在线参数估计器（递归最小二乘法等）实时估计被控对象的模型参数，然后把估计出的参数当作对象的真实参数，在线设计并更新控制器参数，从而达到期望的控制目标。整个过程就构成一个闭环的自适应调节回路。

自校正控制系统由三部分组成，即参数估计、控制器设计以及反馈控制。参数估计环节用系统输入输出数据实时更新模型参数的估计值。控制器设计阶段，

用最新的参数估计值,按照某种设计准则(最小方差控制、极点配置等)计算或更新控制器参数。最后更新的控制器作用于被控对象。由于参数估计和控制器设计是周期性地在在线进行的,该系统可以很好地克服由于负载变化、环境干扰等因素引起的模型参数漂移,特别适合于模型未知或者时变的复杂工业过程。

二、模型参考自适应控制的深入探讨

模型参考自适应控制由于结构简单、设计思想直观,在现代农业机械动态控制中得到了广泛的使用。经过精心设计的参考模型和自适应律,即使在遇到各种不确定因素的情况下,MRAS 依然可以达到期望的动态响应效果,这对提高农业机械作业质量与效率有着十分重要的意义。

(一) 参考模型的设计

参考模型是 MRAS 系统性能的基准,它的输出就是控制系统希望跟踪的理想动态响应。参考模型设计质量的好坏直接影响整个自适应闭环系统最终的性能指标,包括响应速度、稳定性、超调量等。因此参考模型应该是一个稳定、性能良好的线性时不变系统。设计时一般要根据实际工程需要来确定传递函数或者状态空间表达式。

阶次的选择尤为重要。为了简化自适应律的设计和分析,一般假定参考模型的阶次与被控对象的阶次相同或者相近。模型参数的设定要根据希望达到的动态效果来确定。对二阶系统来说,调节其自然频率和阻尼比就能准确地得到系统的上升时间、峰值时间和超调量。

农业机械控制中参考模型要体现理想作业状态。以拖拉机导航控制为例,参考模型可以设为平滑转向反应、快速路径跟随的理想车辆模型。在选择模型时要权衡理想性能和实际可行性,过于理想的模型会造成控制器参数的大幅波动或者系统的不稳定。

(二) 自适应律的设计

自适应律是 MRAS 的核心,它说明了怎样根据系统误差来调节控制器的参数。自适应律设计的主要目的就是保证整个闭环系统稳定,保证被控对象输出最终收敛到参考模型的输出。目前主流的设计方法主要有两种,一类是传统的设计方法,另一类是现代的设计方法。

1. 基于李雅普诺夫稳定性理论的方法:这是保证系统全局稳定性的最常用、

最可靠的方法。设计过程中先构造误差信号和参数估计误差的李雅普诺夫函数，该函数必须是正定的。然后对它进行求导，选择合适的参数更新法则（即自适应律），使导数为负定或半负定矩阵。根据李雅普诺夫第二法，系统在全局上是渐近稳定的，即跟踪误差最终会收敛到零。

2. 基于 MIT 规则的方法是梯度下降法的一种早期应用，它的基本思想是定义一个误差代价函数，用梯度法调节控制器参数，使代价函数沿减小的方向变化。直观易行，但是在参数调整速度远小于系统响应速度时可以保证局部稳定，不能保证闭环系统全局稳定。

现代农机中，由于严格稳定性的证明，以李雅普诺夫理论为基础的方法更受青睐。可以保证即使参数发生变化很大，系统也不会失控，从而给复杂的农业作业环境提供可靠的安全保障。

（三）在农机变载荷控制中的应用

农业机械在田间作业的时候，载荷是不断变化的。联合收割机收割不同密度作物时脱粒滚筒负载剧烈变化；播种机在不同的土壤质地中作业时开沟器阻力也会不断改变。这样就会造成发动机转速、行驶速度等重要参数发生波动，从而影响作业质量与效率。模型参考自适应控制对于变载荷问题有较好的适应性。

以饲料收割机的发动机过载控制为例，当收割机喂入量突然增加的时候，发动机会出现转速降低、过载的风险。这时可以使用 MRAS 来控制。首先建立理想发动机转速的参考模型，该模型描述的是负载变化期间期望得到的平稳转速响应。控制系统会不断地对发动机实际转速进行监测，并将它同参考模型的输出进行比较。偏差出现的时候自适应律会立刻调整控制策略，例如调节液压泵排量来减小收获机行驶速度，降低喂入量，使发动机负载减少，转速回到理想状态。过程自动完成，不会使发动机因超载而熄火，并能使收割机一直处在最佳效率下工作，大大提高作业效率和适应不同田间的作业条件的能力。

三、参数自整定 PID 控制

PID 控制器因为结构简单、鲁棒性强、容易实现而在工业控制上得到了广泛的应用。但是现代农业机械作业对象千差万别，环境复杂多变，传统的固定参数 PID 控制器很难取得最佳的控制效果。参数自整定的 PID 控制技术，能在线自动调整 PID 控制器参数，使其适应对象特性的变化，大大提高了控制系统的性能。

（一）基于对象特性辨识的参数整定

基于对象特性辨识的参数自整定方法属于经典 PID 自适应控制策略。基本思想就是在线辨识被控对象的数学模型，然后根据辨识得到的模型参数，用某种经典的 PID 参数整定规则（如 Ziegler-Nichols 方法）来计算并更新 PID 参数。该方法一般由在线辨识模块和参数整定模块两大部分构成，两者配合工作来实现 PID 参数的自动调节。

在线辨识一般用继电反馈法或者最小二乘法。继电反馈法是在系统中加一个继电器，使系统产生极限环振荡，通过测量振荡幅值和周期，快速获得对象的临界增益、临界周期，根据整定规则计算出 PID 参数。不需要精确的数学模型，实现简单，在许多工业仪表中得到了广泛的应用。另一种方法是利用最小二乘法等辨识算法，根据系统输入输出数据拟合出一个动态模型（如一阶加纯滞后模型），然后根据该模型来整定参数。该方法对于特性比较明显的被控对象效果最好。

（二）基于模糊逻辑的参数自整定

基于模糊逻辑的参数自整定 PID 控制，是把模糊控制理论和传统 PID 控制结合起来的一种智能控制方法。它模仿人类专家的经验知识进行在线调节，用模糊规则来调整 PID 控制器的 K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数。该方法不需要建立被控对象的精确数学模型，对非线性、时变、存在时滞的复杂系统有很强的适应性。

典型的模糊自整定 PID 控制器一般用系统误差和误差变化率作为输入。控制器内部主要是由模糊化、模糊推理和解模糊这三部分组成。把输入量 E 、 EC 通过隶属度函数转化为模糊量；然后，用一系列的模糊规则（例如，如果 E 为正大、 EC 为负小，则 K_p 增大）进行推理，得到模糊的 PID 参数调整量；最后解模糊（也称清晰化）得到准确的数值，用于更新 PID 控制器的参数。

当系统误差较大时，模糊逻辑会增大比例增益 K_p 来加快响应速度，减小积分作用以防止超调；当系统趋于稳定、误差较小时，则适当增大积分增益 K_i 来消除稳态误差，根据误差的变化率调整微分增益 K_d 来抑制振荡。智能调节的方法使系统在不同工况下都能有较好的动态、静态性能。

（三）在变量喷洒控制中的应用实例

变量喷洒是精准农业的一项重要技术，根据作物需要、病虫害状况或者土壤养分状况来精准施用农药或液肥，提高利用率，减少环境污染。当植保无人机执行变量喷洒任务时，其飞行速度受到风速、地形等影响而不断变化，如果喷洒流

量保持不变，那么单位面积上的施药量就会不均。采用参数自整定 PID 控制，可以较好地解决上述问题。

控制系统的目的就是使实际喷洒流量跟随飞行速度算出的目标流量。系统利用流量传感器测量出流量，并与设定值进行比较，得到误差和误差变化率。一个模糊自整定 PID 控制器根据 E、EC 实时调节控制 PWM 信号占空比所对应的 PID 参数。当无人机加速的时候，目标流量变大，模糊控制器就会很快增加 PID 参数，从而使喷头流量迅速跟上目标值；当无人机减速或者悬停时，又能平稳的减小流量，防止超调与振荡。研究表明，模糊自整定 PID 变量喷洒系统比传统 PID 控制，响应更快、稳态误差小，喷洒更均匀、精准，系统参数变化或者受到外部扰动时鲁棒性更好。

第四节 智能决策与优化控制

伴随着现代信息技术同农业生产深度融合，农业机械智能化程度也达到了新的高度。智能决策与优化控制已经成了评价现代农业机械先进性的标准。本节主要对智能决策支持系统、先进优化算法在农业装备控制中的应用进行系统的研究，以为现代农业机械电子系统的设计开发提供理论基础和技术途径。

一、农业专家系统基础

农业专家系统属于人工智能在农业方面的重要应用，它模仿农业专家的思维过程，依靠其知识和经验，解决农业生产中的复杂问题，给农业机械智能化作业提供决策支持。掌握它的基本组成和工作原理是开发高级农业决策功能的前提。

（一）专家系统的结构与组成

农业专家系统是模拟人类专家决策能力的智能计算机程序系统，它的设计目的在于解决某一领域内的复杂问题。典型的专家系统一般是由知识库、推理机、综合数据库、知识获取模块和人机交互界面等组成。知识库是专家系统的基础，专门用来存储领域专家所拥有的知识、经验、规则，一般以“如果……那么……”的形式存在。

综合数据库起着动态数据中心的作用，保存问题初始信息、中间推理结果、最终结论。推理机是专家系统的大脑，它按照一定的推理策略，在知识库中寻找

和当前数据库事实相匹配的规则。利用这些规则推导出新的事实或者结论，从而使问题得到解决。知识获取模块主要是帮助知识工程师把领域专家的知识结构化、条理化整理好，导入到知识库中。人机交互界面是用户和系统之间沟通的桥梁，它一方面可以方便用户输入问题、数据，另一方面可以使用户了解系统给出的分析结果、最终决策。各组成部分之间互相配合，使得专家系统能像真正的专家一样去思考并做出决定。

(二) 知识获取与知识表示方法

知识获取是建立专家系统的重要环节，它的目的就是从事领域专家、专业文献、历史数据等各方面提取、总结、结构化相关知识。这一过程的质量好坏直接影响专家系统性能的好坏。知识获取途径包含直接访谈领域专家、观察专家解决问题的过程、分析典型案例、使用机器学习算法从海量农业数据里自动发现规律和模式等等。

获取到的知识必须用适当的方法表示，才能被计算机理解与处理。目前农业专家系统中常用的知识表示方法及其特点如下表所示：

常见知识表示方法及其特点表

方法名称	主要特点	适用场景 / 示例
产生式规则	“IF-THEN”形式，直观模块化，易于理解与修改	病虫害诊断、农作物施肥建议
框架表示法	结构化对象表示，包含槽（属性）	农作物信息（品种、生育期）、农机设备参数
语义网络	有向图表示，节点为概念，弧为关系，清晰展现实体间复杂联系	农业知识图谱构建、实体关系推理
多模态知识表示	融合文本、图像、声音等多种知识源，构建全面的知识图谱	作物病虫害图像识别与文字描述结合

如上表所示，产生式规则是知识表示中最常用的一种，它把知识表示成一系列的 IF-THEN 形式的规则。一条病虫害诊断规则可以写成：作物叶片出现黄色斑点并且湿度大于 80% 时，可能会感染霜霉病。该算法直观，模块化，容易理解、修改。框架表示法就是用一个个的框架作为知识组织的数据结构。每个框架表示一个对象或者概念，并且包含若干槽 (slot)，槽是对象的一种属性。水稻框架可以包含品种、生育期、适宜温度等槽，适合于表示结构化的对象信息。语义网络用节点和带标签的弧构成的有向图来表示知识。节点是对象、概念或者事件，弧

就是它们之间的关系。该方法可以清楚地表现出实体之间复杂的联系，有利于关联推理。技术发展使得知识来源已经不再只是文字，也包括图片、声音等很多种形式。多模态知识表示是把作物图像特征同文字描述融合起来，从而创建起一个完备的农业知识图谱。

（三）推理机的推理机制

推理机是专家系统的执行机构，根据知识库中的知识以及用户给出的信息，按照一定的逻辑规则进行推理，模拟专家的思维过程，得出结论。推理机的主要功能是控制、协调整个推理过程，它用一系列的算法来解释并应用知识库中的规则。推理过程一般从用户输入的事实开始，在知识库中找到可以被这些事实激活的规则。规则执行会生成新的事实，不断循环，直到没有新规则可以被触发或者找到问题的最终答案为止。

推理机的推理方式大体上可以分为正向链推理、反向链推理两种基本形式。正向链推理是一种数据驱动的推理方式，它从已知的初始事实出发，不断使用规则，推导出新的事实，直到最终目标被证明或者不能推导出新的结论为止。此种方式适合于需要对已有的数据进行预测或者监控的应用场景。反向链推理是以目标为导向的推理方法，它从预设的假设或者目标开始，反向寻找能支持假设或者目标的规则和事实。若某个规则的结论部分和目标相符，则该规则的前提部分就会成为新的子目标，推理过程会不断进行，直到所有的子目标都被已知事实所满足为止。该机制适合诊断或者规划，找到某种病害的根本原因。

二、基于规则的决策系统

基于规则的决策系统属于专家系统中最常见的一种实现形式，它把产生式规则当作知识表示与决策逻辑的主要载体。在现代农业机械的电子系统当中，此系统把繁杂的农艺知识转变为计算机能够执行的指令，从而对耕、种、管、收等各个部分做出智能的决定。

（一）决策规则的建立与表达

决策规则的确定，就是要把领域专家的经验、科学知识转换成机器可以执行的逻辑信息。一般要知识工程师和农业专家合作来完成。规则的来源有多种，可以是公开的农业技术手册、科研论文、专家实践经验、对历史数据的统计分析等。制定规则时要准确找出影响决策的关键条件以及相应的操作或者结论。变量施肥

决策的条件包括土壤氮含量、作物生育阶段、叶片颜色等,结论就是具体的施肥量。

规则表达要清晰无歧义且计算机能够处理。一条规则一般用数据对象来表示,由条件集和结论集组成。条件可以是简单的逻辑判断,也可以是调用传感器数据或者数学模型的复杂表达式。规则表达不能只考虑逻辑上的完备性,还要考虑其可维护性。当新的知识产生或者环境变化的时候,系统应该能方便的添加、删除或者修改规则。一个设计良好的规则库应该保持模块化,即每条规则只处理一个相对独立的知识点,便于管理、扩展。

（二）冲突消解与规则匹配

在基于规则的决策系统运行时,当有多个规则条件同时满足的时候,就会产生冲突。这时系统必须使用某种策略来决定执行哪一条规则,此过程称为冲突消解。冲突消解是保证推理过程井然有序、高效运行的关键机制,缺少该机制的话,系统就容易陷入混乱甚至死循环。

常用的冲突消除方法就是根据规则的特异性来选择,即条件越具体、越特殊的规则优先级就越高。另一种方法就是根据知识库中事先设定的优先级或者权重来执行。还可以使用新近度原则,即先执行与最近产生数据或者事实有关的规则,因为这类规则更能反映当前问题的最新状态。农业决策也使用上下文限制的方法,即只在某一种作业模式或者环境里启用一组规则来避免冲突。

规则匹配是推理机执行循环的基础步骤,它把综合数据库中的当前事实同知识库中所有规则的条件部分做比较,从而找出可以被激活的所有规则,形成一个叫做冲突集的集合。此过程要高效匹配算法的支持,在知识库规模很大的时候尤其明显。匹配算法的效率好坏直接影响专家系统的响应速度。因此系统设计时一般会对规则库做优化索引来加快匹配速度,使农业机械可以及时对田间状态的变化做出反应。

（三）在病虫害防治决策中的应用

基于规则的决策系统在农业病虫害智能防治方面有巨大的应用前景。借助整合了昆虫学、植物病理学专家的诊断知识所设计的规则,该系统可以辅助农业生产者,也可以集成到自动化植保机械里,从而实现病虫害的快速诊断和精准防治。这类系统常与田间传感器网络、图像识别技术、气象信息系统等相融合来获取做决策所需要的实时数据。

水稻病害诊断决策系统知识库中存在如下规则,如果水稻叶片出现纺锤形病

斑，中心灰白色、边缘褐色，田间湿度连续三天大于 90%，则该水稻极有可能感染稻瘟病，建议立即喷洒三环唑类药剂。当系统利用图像传感器获取叶片病斑特征，结合湿度传感器数据之后，推理机匹配到此规则就会向用户发出预警和防治建议。系统可以将害虫生命周期模型与气象数据结合起来，从而预测害虫种群爆发的风险，进而提前做好防治工作。该种智能决策方法可以明显提高病虫害防治的准确性、及时性，有利于减少农药的使用量，降低生产成本和环境污染，是实现精准植保的核心技术之一。

三、优化算法在控制中的应用

现代农业机械在复杂的作业环境下怎样实现作业效率、能源消耗、作业质量等目标之间的平衡，是典型的多目标优化问题。智能优化算法，遗传算法、粒子群算法等，模仿自然界进化或者群体行为，给解决非线性、高维复杂的优化问题提供了一种强有力的手段，尤其在作业路径规划、控制参数整定等地方有广泛的应用。

（一）遗传算法基本原理

遗传算法是模拟生物界自然选择和遗传的全局优化搜索算法。把问题的潜在解当作种群中的个体，用解的参数来进行染色体编码。算法从随机生成的初始种群开始，经过迭代演化，每一代执行选择、交叉、变异这三个基本操作。

选择操作体现的是适者生存的原则。系统按照预设的适应度函数来评判各个个体的好坏程度，适应度越高，被选中遗传到下一代的概率就越大。适应度函数和所解决的问题的优化目标直接相关，在路径规划问题中，路径总长度的倒数可以作为一个简单的适应度函数。

交叉操作模拟生物繁殖时基因重组的过程。选取个体随机配对，用一定概率交换染色体部分，产生新的后代个体。这样父代的优良基因就可以组合、继承，是遗传算法产生新优解的主要途径。变异操作是以很小的概率随机改变染色体上某个基因的值，模拟生物遗传中基因突变的现象。变异操作给种群引入新的遗传信息，增加种群的多样性，有效地防止算法过早地收敛到局部最优解。依靠这三个要素共同作用，种群经过多代演化之后，最后可以得到一个包含问题最优解或者近似最优解的个体。

（二）粒子群算法基本原理

粒子群算法是受鸟群觅食行为启发的群体智能优化算法。该算法把搜索空间中的每一个潜在解看作是一个没有质量、没有体积的“粒子”，所有的粒子共同组成一个种群（也叫群体）。粒子在多维搜索空间里飞行，随着群体内最好的个体不断变化而改变飞行方向与速度。

算法每进行一次迭代就对每一个粒子进行速度、位置的更新。速度的更新主要受粒子当前的速度、粒子迄今为止找到的最优位置（个体经验）和群体迄今为止找到的最优位置（群体经验）这3个因素的影响。粒子根据这三方面的信息计算出新的速度矢量，并用新的速度矢量来更新粒子的位置。因此每个粒子都有自我总结和向群体最优者学习的能力。

由于粒子群使用简单的共享信息、协同搜索的策略，在解空间中表现出的演化过程是无序搜索到有序收敛的过程，最后集中到最优解附近。粒子群算法因为没有复杂的交叉、变异操作，原理简单、参数少、容易实现且收敛速度快，所以被广泛地应用到各种工程优化问题中。

（三）在作业路径优化中的应用

在广阔的农田里，农业机械作业路径的好坏会直接决定作业效率、能耗以及重叠漏作面积。作业路径优化就是找到一条可以覆盖全部作业区域，又能满足总路程最短、转弯次数最少、能耗最低等一个或者多个目标的最优路线。这是一个复杂的组合优化问题，尤其是面对不规则田块和障碍物的时候，传统的求解方法很难找到最优解，但是遗传算法和粒子群算法可以很好地解决此类问题。

在使用遗传算法或者粒子群算法进行路径优化时，首先要做的是对问题进行编码。可以将田块划分成一系列子区域或者离散路径点，用遗传算法的染色体编码；也可以将粒子群算法中粒子的位置向量作为染色体。接着要定义适应度函数，该函数一般包括路径总长度、转弯角度、转弯次数、重叠作业面积等几个方面来评价一条路径的好坏。算法不断地产生新的路径方案，经过评价后得到性能最好的作业路径。利用遗传算法的全局搜索能力和粒子群算法的快速局部收敛特性，可以设计出混合优化策略，先用遗传算法快速找到一个比较好的路径框架，再用粒子群算法对这个框架进行细致的调整，最后得到更好的作业路径。

第七章 农业机械作业质量监测系统

现代农业对精细化、标准化的要求越来越强烈，这促使农业机械电子系统迅速发展。作业质量监测系统作为重要的一环，依靠实时采集和处理各类关键参数来达到精准农业、提高资源利用率、保证生产效益的目的，是评价农机智能化水平的重要标准。

第一节 作业参数检测技术

作业参数是评价农机作业质量好坏的标准。对这些参数实施实时、精确的检测，乃是达成农机作业智能化控制及决策的基础。本节将会详细解释播种、施肥喷药、收获这些农业生产中的重要作业参数检测技术、传感器原理和它们在电子系统里的集成应用。

一、播种作业参数检测

播种质量直接影响作物出苗的均匀性以及最终产量。因此对播种的关键参数进行有效的监测，能大大提高播种作业的可靠性和精确性。实时获取株距、播深、漏播、重播等信息，对于优化播种过程，保证作物健康生长起着不可替代的作用。

（一）株距与播深检测方法

株距检测是测量播种行中相邻两颗种子实际距离的过程，它的好坏直接影响到作物的合理群体结构以及个体发育的空间。目前主要使用光电传感器和超声波传感器。光电检测法在排种管道上安装对射式或反射式红外传感器，当种子下落经过感应区域时，会短暂遮挡或者反射光路，产生一个脉冲信号。控制器根据相邻两个脉冲信号之间的时间差，再乘以播种机前进速度，就可以得到实际株距。该方法响应快、成本低，但是多尘环境下传感器表面容易受到污染，从而影响检测精度。超声波检测法是向下发射声波，通过种子或者种沟回波信号的特征来判断种子的位置，但是设备成本高、信号处理也较复杂。

播种深度的均匀性对于种子在适宜的土壤层里良好发芽是至关重要的。播深检测一般用间接测量法，即测量播种单体上与深度有关的部件相对位移来实现。常用的有角位移传感器和线性位移传感器。角位移传感器一般安装在播种单体限深轮摆臂与机架的连接处，测量限深轮随地形起伏产生的摆动角度，结合已知机械结构参数，可以解算出开沟器相对于地表的深度。线性位移传感器直接测量限深轮调节机构或者仿形机构的伸缩量，然后换算出播深。两种方法在作业前都要做精确标定，建立位移传感器输出值与实际播深的函数关系，保证测量结果准确可靠。

为了提高检测系统的综合性能和可靠性，多传感器信息融合成了发展的趋势。将株距检测同高精度全球导航卫星系统获取的位置信息结合起来，既可以评价单一行内播种的均匀度，又可以生成带有地理坐标的播种质量分布图，给田间管理提供空间化的决策依据。同时利用机器学习算法对传感器信号进行深度分析，可以有效滤除振动、粉尘等环境因素的干扰，从而大幅度提高株距、播深检测的精度和稳定性，给高质量精量播种作业提供有力的保证。

（二）漏播、重播监测传感器

漏播、重播监测是保证播种均匀性的重要步骤，核心就是精准辨识种子落下的顺序。实现该功能的传感器种类繁多，主要根据光学、声学、微波等原理设计，安装在排种管的重要部位，实时采集种子流动信息。各类传感器的特点和适用场景如下表所示。

漏播、重播监测传感器对比表

传感器类型	工作原理	主要优点	典型缺点
光电式	种子遮挡或反射红外光	结构简单、成本低、响应快	易受粉尘污染、可能误判
压电式	种子撞击产生形变及电压	对粉尘不敏感、耐用性好	信号微弱、需精密电路、易受振动干扰
电容式	种子改变电场介电常数	非接触、无磨损、检测透明 / 同色种子	灵敏度高、对含水率敏感、需温湿补偿

各种传感器都需要对农田作业环境的复杂性做出相应的改进。光电传感器可以通过引入脉冲调制光技术、增加气吹除尘装置或者开发出更加先进的自诊断算法等方式，有效地提高抗干扰能力，解决由于粉尘污染所引起的问题。压电传感器还要配合精巧的信号放大、滤波电路才能有效地去除机械振动带来的噪声干扰，

正确地检测出种子撞击所产生的微弱信号。电容式传感器具有非接触、无磨损的优点,但是由于它对种子含水率的变化很敏感,在系统设计中必须考虑温度、湿度的补偿,以保证测量结果的稳定和准确。综合应用不同的原理传感器或者对单类型传感器进行技术升级、环境适应性改造等是提高漏播、重播检测的精确度和可靠性的重要手段。

(三) 播种机转速与开沟状态监测

播种机转速检测主要是排种器驱动轴,这是保证排种量稳定的重要参数。实时监测排种轴转速,保证排种轴转速与播种机前进速度一致,才能达到设定的株距。常用的转速传感器有霍尔效应传感器和光电编码器。霍尔传感器在旋转轴上装设小磁钢,用霍尔元件检测磁场变化产生脉冲信号来计算转速,结构坚固、耐久性好,能很好地适应农田恶劣环境。光电编码器在轴端装设码盘,利用光束通断产生高精度脉冲信号,可以给出非常准确的转速和角位置信息,但是对振动、粉尘比较敏感,需要良好的封装保护。

开沟状态的检测对保证种子顺利进入种沟、处于合适的位置十分重要。开沟器在作业中由于泥土粘湿、秸秆缠绕等原因造成堵塞,不能开出合格种沟,造成架桥或浅播,严重影响播种质量。开沟状况监测技术可以分为直接监测、间接监测。间接方法是通过监测播种单体受力或者姿态的变化来推断的,例如在开沟器悬挂部分安装压力传感器,当堵塞发生时,前进阻力突然增大,压力传感器的读数也随之出现异常。

另一种间接方法是将角度传感器安装在仿形机构上,堵塞时单体会被动抬起,角度会非正常变化。直接监测法更直观,它采用机器视觉技术,在播种机后方装设摄像头,实时拍摄开沟后的种沟图像,用图像处理算法分析种沟深度、宽度、连续性,判断是否堵塞或者塌方。

将转速监测同开沟状态监测联系起来,就构成了播种过程的监控闭环。当系统检测到开沟器堵塞的时候,不但会发出警报,还会联动控制系统,暂时停止该排种子的排播,以防止种子浪费。同时结合转速数据和全球导航卫星系统测得的前进速度,可以实行变量播种控制,按照处方图精准调节排种速率,实现不同地块的差异化管理,充分发挥土地的潜力。

二、施肥与喷药作业参数检测

施肥、喷药属于田间管理的一部分，作业质量好坏直接影响到作物生长、病虫害防治效果以及农业生态环境。精准检测、控制施肥量、喷洒压力、流量、喷杆姿态等重要参数，是实现精准变量施药、减少农业资源浪费和环境污染的前提。

（一）肥料流量与施用量检测

肥料流量的实时检测是变量施肥技术的基础，目的是使肥料的施用量与预设处方图或者作物需求相匹配。固体颗粒肥料流量检测方法主要有体积法、质量法。体积法通过测量单位时间内排出的肥料体积来推算流量，可以在排肥口下方安装光电传感器阵列，用肥料流对光线的遮挡程度来估算体积流量。另一种体积法就是检测排肥轮的转速，已知单转排肥量，结合转速就可算出理论流量。此方法简单易行，但是肥料物理性质（粒径、密度、流动性）的变化会降低标定的精度。

质量流量检测可以实现更高的精度。常用的科里奥利质量流量计精度很高，但是由于成本高、结构复杂，在常规农机上应用较少。更实用的方法是称重法，在肥箱底部安装称重传感器，实时监测肥箱内肥料总质量变化速率，从而得到瞬时施用流量。此法可以直接测量质量，不受肥料物理性质变化的影响，精度高。以冲击原理为基础的流量传感器也被使用，测量肥料颗粒从一定高度落下撞击测量板所造成的冲击力大小，换算成质量流量。液体肥料可以直接使用高精度的电磁流量计或涡轮流量计来测量。

（二）喷雾压力与流量检测

喷雾压力直接影响到雾滴的大小、喷射扇形角、农药覆盖效果、漂移风险。压力过低会使雾滴过大、分布不均；压力过高又容易造成细小雾滴的产生，容易蒸发、飘散，造成农药浪费和环境污染。因此对喷雾管路中的压力进行稳定控制十分重要。压力检测一般安装在喷雾泵出口或者喷杆总管路上。常用的压阻式压力传感器、陶瓷电容式压力传感器可以把液体压力转换成标准电压或电流信号，反馈给控制器。控制器根据实际压力和设定压力的差值，采用 PID 等控制算法来调节泵转速或者旁通阀开度，实现压力的闭环控制，保证即使在流量变化的时候也能保持稳定的喷雾压力。

喷雾流量的测定可以用来精确地计量出单位面积上所用的农药量。流量传感器（涡轮流量计、电磁流量计）和压力传感器一起安装在主供液管路中。涡轮流

量计内部叶轮随液体流动而转动，转速和流量成正比，检测转速即可得到流量。电磁流量计是根据法拉第电磁感应定律工作的，可以测量导电液体，无运动部件，可靠性高。用实时流量数据可以准确地计算出已经喷洒的总量和剩余药量。将流量、压力和用全球导航卫星系统测量出来的速度、作业幅宽结合在一起，系统可以实现喷洒量的自动控制，保证每块农田获得正确的剂量，避免过量或者不足。

先进的喷雾系统还会对每一个喷嘴的工作状况进行检测。在每个喷嘴上装设小型流量或者压力传感器，可以实现单喷嘴的故障诊断和变量控制。机器视觉技术也被用来评定喷雾效果，根据雾锥形态、雾滴分布情况来间接判断压力、流量是否达到最佳。各种技术的综合使用大大提高了喷药作业的准确性和智能化程度。

（三）喷杆高度与姿态监测

大型喷杆喷雾机作业时，喷杆与作物冠层或者地面之间要保持一定的稳定距离，才能保证药液均匀覆盖作物并且不发生漂移。喷杆过高容易产生雾滴飘移现象；喷杆过低会碰到作物或者地面造成机械损伤和喷洒不均匀。因此喷杆高度、角度监测以及自动调平系统就成为了解决这类问题的关键技术。

1. 高度检测传感器中应用最广泛的是超声波传感器。它们一般成对或多个安装在喷杆的两端和中间。传感器周期性地向下发射超声波脉冲，根据声波从发射到接收返回信号的时间差来测量出传感器到下面目标（作物冠层或地面）的距离。超声波传感器响应速度很快，成本低，不会受到光线和粉尘的干扰。激光雷达、红外测距传感器也已经投入使用，精度更高、抗干扰能力更强，在作物行间存在空隙或者冠层不平整的时候，可以更准确地识别出作物顶部轮廓。

2. 姿态监测传感器使喷杆保持平行于地面的平衡，所以要检测它的倾斜姿态。一般由安装在喷杆或者车身上的惯性测量单元来完成。惯性测量单元内装有陀螺仪和加速度计两个测量单元。陀螺仪可以分别测出喷杆的横滚角、俯仰角；加速度计可以感知重力方向、运动时产生的加速度。把这两种传感器的信号进行融合，就可以得到喷杆相对于水平面的实时姿态。

控制系统把高度、姿态信息综合起来，就可以对喷杆进行控制。当系统检测到喷杆一侧过低的时候，会驱动该侧的液压或者气动执行机构独立提升喷杆，直到其回到设定的高度和水平状态为止。在坡地或者不平整的地块上作业时，姿态传感器的数据就显得特别重要，它可以帮系统分辨出由于地形倾斜造成的正常高度变化，以及由于车身颠簸引起的非正常姿态变化，从而做出正确的调节动作，

保证整个喷杆在行进过程中始终与作业目标面保持动态的平行和稳定。

三、收获作业参数检测

收获是农业生产的最后一道工序，作业质量直接影响一年来辛勤劳动的最终成果。对收获时的重要参数进行实时监测，不但可以减少粮食损耗、提高作业效率，还可以为后面的仓储、加工提供数据支持，是实现收获过程精细化管理、智能化的基础。

（一）割台高度与前进速度检测

割台高度调节的好坏直接影响联合收割机减损增效的程度。留茬过高容易造成穗头损失；留茬过低会使得割台吸入过多的杂草、泥土，增大清选负荷，甚至损坏刀片。割台高度检测一般用多种传感器配合使用的方式。仿形接触式传感器，例如滑靴或者挠性探杆，直接与地面接触，随地形起伏带动电位计或者角度传感器，反馈割台相对于地面的物理高度。非接触式传感器使用超声波或者激光雷达安装在割台上方，测量到地面的距离来获取实时地形信息。综合两种信息并结合车身倾角传感器的数据，可以消除车身姿态变化对高度检测的影响，使割台能够仿形地面，保持稳定的留茬高度。

收割机前进速度属于决定其作业效率和作业质量的综合参数。速度过快会造成喂入量过大，使脱粒滚筒堵塞、清选损失和夹带损失增大；速度过慢会降低作业效率。前进速度检测有两大技术，一是采用车轮转速传感器，在驱动轮或者从动轮上安装霍尔传感器或光电编码器，测量车轮转速，然后乘以车轮周长得到速度。该方法简单可靠，但是车轮打滑时会产生较大误差。二是采用全球导航卫星系统接收机，根据连续的定位信息直接得到收割机在大地坐标系中的移动速度。全球导航卫星系统测速精度高，不受车轮打滑的影响，已经成为现代联合收割机速度检测的标准配置。

割台高度和前进速度信息的联动控制是收割机智能化水平提高的表现。系统用割台喂入量传感器测量作物密度，用损失传感器测量谷物损失率，调节前进速度，在保证低损失率的同时提高作业效率。割台高度传感器检测前方有沟壑、田埂的时候系统会自动减速并提升割台，实现智能避障，从而提高作业自动化程度与安全性。

（二）谷物损失率与含水率检测

谷物损失是反映联合收割机作业水平好坏的指标，主要出现在割台、脱粒、清选等环节。对损失率进行在线实时监测，可以使驾驶员及时调整作业参数，从而把损失控制在最低限度。谷物损失监测系统一般用装在清选筛尾部、排草口下方的冲击式传感器来构成。这些传感器是由一块装有压电晶体或者麦克风的灵敏冲击板组成。当谷物颗粒撞上冲击板的时候，就会产生可以识别的电信号。根据单位时间内冲击信号的次数和强度，再结合收割机的作业幅宽和前进速度，可以得到单位面积的谷物损失量，以柱状图或者报警灯的形式显示给驾驶员。

谷物含水率是决定收获时机的关键因素之一，也是指导后续干燥、储存工作的数据。传统的含水率检测需要人工取样和离线测量，效率低，且代表性差。在线含水率检测技术可以在收割过程中进行连续测量，目前应用较多的方法有电容法和近红外光谱法。电容式传感器一般安装在粮仓入口或者内部循环通道，通过测量流经传感器电极板之间谷物的介电常数来推算含水率。由于介电常数随含水率的变化而变化，所以该方法需要对不同的谷物、温度进行补偿和标定。近红外光谱分析技术就是向谷物流发射特定波长的近红外光，检测其反射或者透射光谱，根据水分子对特定波段光谱的吸收特性来计算含水率。此方法的精度高，但是设备成本相对较高。

将收割机的中央控制系统集成损失率、含水率数据之后，可以实现更高级别的智能决策。驾驶员可以依据实时显示的损耗率数据，调节滚筒转速、风机开度、筛片角度等参数来找到最优的作业方案。同时结合全球导航卫星系统定位信息，可以生成带地理坐标的谷物含水率分布图和损失率分布图，为精准农业数据库提供重要的数据，也可以为以后差异化干燥、分区储存、分析田间成熟度差异等提供科学依据。

（三）作业幅宽与面积监测

作业幅宽、面积的准确测量，是进行作业成本核算、补贴发放、评价作业效率的基础。作业幅宽指收割机单次行程有效收割的宽度，大型收割机驾驶员很难始终保持满幅作业，容易出现重复收割或者漏割的情况。

作业幅宽的检测，一种方法就是采用机器视觉的方法，在收割机上安装广角摄像头，利用图像处理技术确定已收割区与未收割区的分界线，从而实时计算出当前的有效作业幅宽。另一种方法是用配备高精度 RTK 差分定位的收割机来记

录每次作业轨迹线，计算相邻两次作业轨迹之间的长度来得到实际作业幅宽，同时也可以准确地找到重复收割、漏割的地方。

作业面积一般用作业幅宽和行进距离相加得到。没有高精度定位的时候，传统的面积测量方法就是用轮速传感器测量行进距离，再乘以设定的额定幅宽。此法虽然简单，但会忽略车轮打滑、非满幅作业等造成的误差。现代农业机械多使用全球导航卫星系统对作业面积进行测量。系统会自动保存作业开始和结束时的轨迹点，用算法绘制出作业地块边界，即时计算出覆盖面积。精度高，可达 97% 以上，可在显示终端上直观地展示作业轨迹图及进度，有效避免重复作业，特别适合于夜间或者能见度不好的条件下使用。系统可以自动扣除地头转弯和未作业区的面积，使最后的统计结果更准确可靠。

第二节 图像处理与机器视觉

机器视觉技术给现代农业智能装备装上了“眼睛”，深刻地改变了传统的农业生产模式。它综合了光学、电子学、计算机科学等各个学科的知识，模仿生物视觉机制，实现对农业生产环境中作物、土壤、杂草等对象的快速识别和分析，给精准作业和自动化控制提供重要的技术支撑。本节主要对机器视觉系统组成、核心图像预处理技术以及在现代农业中的典型应用进行阐述。

一、机器视觉系统组成

机器视觉系统是用机械装置模拟人眼的功能，核心是用固态图像传感器来代替视网膜，用计算机硬件和软件系统来模拟大脑，从而达到对外部世界的感知、处理和决策。一个功能完整的机器视觉系统一般由工业相机、光学镜头、光源、图像采集单元、视觉处理单元和执行机构等组成，各部分互相配合，完成从图像获取到分析决策的全过程。

（一）工业相机与镜头选型

工业相机作为机器视觉系统中的主要成像元件，就如同人眼一样把经过镜头汇聚的光学信号转换成电信号。工业相机不是普通的相机，它是为了在恶劣的工业、户外环境下长期稳定工作而设计的，具有高帧率、高分辨率、高稳定性、抗干扰能力强的特点。按照其内部传感器结构，工业相机可以分为面阵相机和线阵

相机。面阵相机可以直接获取二维图像信息，使用很广；线阵相机通过逐行扫描来形成完整的图像，适合于高速运动物体高精度的检测。农业应用中相机的选择要考虑检测对象、作业速度、精度要求、成本预算等各方面因素。静态果蔬品质分级用成本低的 CMOS 面阵相机，而高速运动谷物筛选要用高帧率的 CCD 线阵相机。

镜头是相机的“眼睛”，把光线汇聚起来，在传感器上形成清晰的图像。镜头的选择影响成像质量，包括分辨率、视场范围和图像畸变等主要参数。选择时要考虑焦距、光圈、景深、工作距离等。焦距决定视场角的大小，即相机观测范围的大小；光圈调节进光量、影响图像的亮度、影响景深，景深就是指焦点前后能清晰成像的距离范围。农业环境里目标距离、光照条件千差万别，所以选择合适的景深、适应各种光照条件的镜头十分重要。整株作物的表型分析用广角镜头覆盖较大的视野；识别病虫害细节时用长焦或微距镜头得到较大的放大倍数。

相机和镜头的选择是权衡的结果，需要根据具体的农业应用场景来选择。对于大面积监控的农田，使用高分辨率相机配合广角镜头可以减少相机的布置数量。为了得到准确的作物尺寸，应该使用低畸变的远心镜头来减小测量误差。传感器尺寸、分辨率、相机接口类型（USB、GigE、Camera Link 等）也要加以考虑，保证整个视觉系统兼容并且数据传输效率高。

（二）光源的选择与布置

光源在机器视觉系统中起着非常重要的作用，它不仅是一个简单的照明，而且对图像质量、算法复杂度有着重要的影响。设计良好的照明系统可以突出被测物体的特征，抑制背景和噪声的干扰，得到对比度高、信息丰富的图像。若选择光源不合适的话，会造成局部过曝或者过暗，产生不需要的阴影或者反光，影响之后图像处理的准确性以及稳定性。因此光源的选择与布置是视觉系统设计时首先要考虑的问题。

在农业应用中，作业环境多为室外或者温室大棚，自然光变化剧烈，光照强度、颜色、方向时刻都在变化，容易在作物表面产生高光或者阴影，给图像采集带来很大的困难。为了消除自然光的不确定，必须使用主动光源系统。目前发光二极管 LED 光源由于具有寿命长、响应快、亮度稳定可控、颜色丰富等优点，已经成为机器视觉领域的主要光源。根据不同的检测任务可以选择不同形状、不同照射方式的光源，即环形光源、条形光源、同轴光源、背光源等。

常见机器视觉光源及其应用

光源类型	典型特征	主要应用场景	优势
环形光源	四周均匀发光，无阴影	检测物体表面特征，如叶片病斑	均匀照明，适合突出纹理
条形光源	灵活组合，可调整角度	突出物体三维轮廓，如作物行边缘检测	灵活度高，可创建阴影突出特征
同轴光源	消除表面反光，光线与相机同轴	检测光滑物体表面瑕疵，如水果划痕	适用于高反光表面，避免眩光
背光源	从物体后方照射，形成轮廓	物体尺寸测量、形状识别、透明内部缺陷检测	高对比度轮廓，尺寸测量精度高

从上表可知，光源的布置方式也会对成像效果造成很大的影响。常用的布置方式有明场照明和暗场照明。明场照明就是直接照射到物体表面的光线，相机接收到的是物体的反射光，能清楚地表现出物体表面的纹理和细节。暗场照明即光线以小角度掠射物体表面，相机只接收物体的散射光，不接收镜面反射光，可以很好地突出物体表面的凹凸、划痕、边缘等信息。农业实践中一般会采用多种光源和布置方式来试验，找到能最大程度体现目标特征、最小化环境干扰的最优照明方案。

（三）图像采集卡与视觉处理单元

图像采集卡是工业相机与视觉处理单元之间的桥梁，主要作用就是把相机输出的原始图像数据高速、稳定地传送到计算机内存中。它把图像信号转成数字信号（模拟相机），整理数据格式，和计算机总线通信。采集卡性能的好坏直接影响系统支持的相机数量、数据传输速率、实时性。在多相机同步采集或者相机帧率很高的时候，高性能图像采集卡对于保证不丢帧、数据完整非常重要。

图像采集卡一般以板卡的形式插在计算机主板的 PCI 或者 PCIe 插槽上。它把相机通过 Camera Link、CoaXPress 等接口传输的高速串行数据转化成计算机可以处理的并行数据。现代数字相机，特别是使用 GigE（千兆以太网）或 USB 接口的相机，图像数据可以直接通过网络接口或者 USB 接口传送到计算机，此时就可以不使用专门的图像采集卡，从而简化系统结构。选择什么样的方案要根据系统对带宽、传输距离、触发精度和成本等各方面要求来定。

视觉处理单元是机器视觉系统的“大脑”，对采集到的图像进行各种复杂的算法运算，从中提取出需要的信息并做出相应的决定。该单元可以采用不同的硬件平台来实现

1. 个人计算机或工业计算机：这是最常用的处理平台，有强大的计算能力、丰富的软件生态和高度的灵活性。开发者可以在 PC 上使用 OpenCV、Halcon 等比较成熟、稳定的技术来进行快速算法开发和验证。工业计算机在稳定性以及环境适应性上做了增强，更适合于在农业机械等移动设备上面部署。

2. 嵌入式系统，对于成本、功耗、体积有严格要求的手持式检测设备或者小型农业机器人，一般采用嵌入式视觉系统。该类系统主要以数字信号处理器、现场可编程门阵列或者带有专用视觉处理单元的系统级芯片为主。DSP 适合进行重复的数学运算；FPGA 用硬件编程实现算法并行处理，可以达到极高的处理速度和实时性，适合用作前端图像预处理任务的平台。

3. 专用视觉控制器：即集图像采集、处理、输入输出控制功能于一身的专用设备。它把复杂的硬件以及底层软件封装起来，给用户简化提供简化的开发环境，用户只需要关注视觉算法的逻辑实现，大大降低了系统集成的难度和开发周期。

二、图像预处理技术

机器视觉系统得到的原始图像由于光照不均、噪声干扰、目标和背景对比度低等原因不能直接用来做特征提取和分析。图像预处理就是利用一系列算法对原始图像进行加工，去除无用的信息，恢复有用信息，增强感兴趣的特征，从而改善图像质量，为后续的分割、识别等高级处理任务打好基础。

（一）图像灰度化与二值化

农业图像处理过程中颜色信息很丰富，但并不总是必需的，甚至在光照改变等情况下还会成为干扰。图像灰度化就是把包含红、绿、蓝三通道的彩色图像转成只含亮度信息的灰度图像。这样可以大大减少数据量，把三维图像降到一维，也加快了后面的处理速度。常用的灰度化方法有最大值法、平均值法、加权平均值法。加权平均值法最常用，给不同颜色的敏感程度用不同的权重来加权求和，得到更符合人眼视觉感知的灰度图像。

图像二值化是灰度化处理的进一步发展。它设置一个阈值，将灰度图像中所有的像素的灰度值和该阈值进行比较，最后得到只有黑白两种颜色的二值图像。其目的就是最大限度地目标和背景分开。阈值选择的好坏直接影响分割效果。最简单的全局阈值法用一个固定的阈值处理整幅图像，但是在目标和背景灰度分布相差很大、光照均匀的情况下才有效。在复杂的农业环境中一般采用自适应阈

值算法大津法。OTSU 算法根据图像的灰度直方图自动求出最佳的分割阈值，使得类间方差最大，鲁棒性较好。

（二）图像滤波与边缘检测

农业图像在采集过程中，不可避免地会受到传感器自身产生的椒盐噪声或者高斯噪声的污染。图像滤波的主要目的就是尽量保持图像的细节，特别是边缘信息，抑制或者去除噪声。常见的滤波算法有线性滤波和非线性滤波两种。均值滤波、高斯滤波属于线性滤波中的一种平滑滤波器，利用像素邻域的加权平均更新中心像素值，可以有效抑制高斯噪声，但是会使图像边缘变模糊。

非线性滤波中，中值滤波是去除噪声效果最好的一种，对椒盐噪声（即图像中出现的黑白噪点）的去除效果最好。其原理是用像素邻域内所有像素值的中位数来代替中心像素值，在去除噪声的同时又能较好地保持图像边缘细节，所以在农业图像处理中应用较多。双边滤波属于一种比较先进的滤波方法，它既考虑到像素值的相似性又考虑到空间距离，能够较好地去噪，并且最大程度地保留边缘信息，从而达到保边去噪的目的。

边缘是图像中像素灰度值突然变化的地方，一般对应物体的轮廓。边缘检测为图像分割、目标识别、三维重建等工作打下了基础。经典的边缘检测算子有 Sobel、Prewitt、Laplacian 等，它们都是通过对图像的一阶或二阶导数进行计算来找到灰度变化点的。Sobel 算子考虑了邻域像素的影响，具有平滑噪声的作用，但是定位精度一般。Laplacian 算子是二阶微分算子，对噪声很敏感，但是能很好地突出细节。Canny 算子在实际使用中被认为是一种性能较好的边缘检测算法。其多阶段处理流程如下：用高斯滤波对图像平滑抑制噪声；计算梯度幅值和梯度方向；在梯度幅值上使用非极大值抑制法来细化边缘；用双阈值法和滞后链接来确定并连接边缘。在这种情况下噪声抑制和边缘定位精度效果好。

（三）图像形态学处理

图像形态学处理是基于几何形状的图像分析理论和方法的，它以集合论为依据，用各种形状的结构元素在图像上移动、匹配、运算，达到改变图像几何结构、提取形状特征的目的。经过二值化或者边缘检测之后，图像中常常会存在断裂的线条、孤立的噪点、微小的孔洞等，形态学处理是解决这些问题的有效方法。基本运算有腐蚀、膨胀两种。

腐蚀运算就是用结构元素把目标的边界擦掉，使得目标区域的尺寸缩小。主

要作用就是去除小于结构元素的噪声点，分离粘连在一起的不同的物体，细化目标的边界。对于图像中小的毛刺、孤立的噪点等，用腐蚀运算能很好地去掉。

膨胀操作与腐蚀操作相反，会增大目标区域的尺寸。它的主要功能就是填补目标内部的孔洞，把断开的线条或者区域连接起来，使目标的轮廓更加平滑完整。在作物行识别过程中，若提取出的作物行线条存在断点，可用膨胀运算将断点连起来，获得连续的导航线。

在腐蚀、膨胀这两种基本运算的基础上，衍生出了两种重要的复合运算，即开运算和闭运算。开运算是先腐蚀后膨胀的过程，能够平滑物体轮廓、断开狭窄的连接、消除细小突起，其结果是去掉小目标对象，而原有目标大小和形状基本不变。闭运算就是先膨胀后腐蚀，可以填补目标内的小孔洞、连接相邻物体、弥合轮廓断裂处，其效果是填充小的空洞而不改变原始目标的总体大小。灵活地使用这些形态学操作，可以大大提高图像分割结果的质量，给后续的精准分析提供高质量的二值图像。

三、机器视觉在农业中的应用

随着算法越来越成熟，硬件设备的价格也越来越低，机器视觉技术以前所未有的深度和广度渗透到农业领域。机器视觉给农业的自动化和智能化赋予了强有力的技术感知能力，大幅度提高了农业生产效率、资源利用率以及农产品品质，有力地推进了精准农业和智慧农业的发展。

（一）作物行识别与导航线提取

现代农业机械在大田种植中，农业机械的自动化导航是进行精准作业的前提。基于机器视觉的导航技术，通过对农田图像进行分析，实时识别作物行或者田垄走向，提取供机器跟踪行驶的导航基准线，属于一种成本低、自主性较强的相对定位方法。关键之处在于怎样从复杂的田间背景中快速、准确地提取作物行信息。

实现过程大体上可以分为如下几个步骤，在农机前方安装相机获取前方道路图像。因为作物（尤其在苗期）一般呈绿色，可以利用颜色特征做初步的分割。采用超绿特征等方法来增强图像中绿色植物和土壤背景的对比度，再结合大津法等自适应阈值法进行二值化处理，就可以得到只包含作物区域的二值图像。接着利用形态学滤波等方法去除非草的噪声。核心步骤就是用霍夫变换或者最小二乘法来检测、拟合这些离散的作物点，得到直线或者曲线。霍夫变换非常适合用来

检测图像中的直线特征，在参数空间进行投票，可以从杂乱的特征点中找到作物行的位置和方向。

根据拟合出的左右两条或多条作物行线算出中心线，此中心线可作为农业机械的导航基准线。控制系统根据农机当前位置和导航基准线的偏差，实时调节转向机构来达到精确的循行作业。该技术已经被应用在播种、中耕、植保、收获等许多农事活动中，作业精度明显提高，重复作业、漏作业现象大大减少，对作物造成伤害的可能性也大大降低。

（二）杂草识别与精准喷药

化学除草是保证作物产量的重要措施，但是传统的普喷方式会造成大量农药浪费，既增加生产成本，又对土壤、环境造成严重影响。基于机器视觉的精准喷药技术可以对杂草进行定向攻击，即只在识别出的杂草处喷洒农药，使农药用量降低到原来的十分之一以下，是实现绿色可持续农业的重要技术。

该技术的关键就是区分作物和杂草。早年的研究用作物和杂草在形状、纹理、颜色等宏观特征上的差别来识别。玉米等单子叶作物与大部分阔叶杂草的叶片形态有明显差别，可以用圆形度、分形维数等形状特征来区分。但是当作物处于苗期或者杂草形态与作物相似的时候，识别准确率就会降低。

近几年来，由于深度学习技术的不断发展，以卷积神经网络为基础的识别方法已经成为主流。研究人员用大量的带标注的作物和杂草图像训练深度学习模型，使模型自己学会、提取人眼看不见的深层次、微小的特征。相比传统的办法来说，采用深度学习的方法，比如 YOLO、Faster R-CNN 等目标检测网络，对复杂背景、光照变化、部分遮挡等都有更好的识别精度以及鲁棒性。系统识别出杂草的位置和范围之后，视觉处理单元就会立即向控制系统发出指令，使对应位置的喷头进行瞬时、定量的喷洒作业，从而达到对农药使用的极致精准控制。

（三）果实成熟度检测与产量预估

正确判断果实成熟度对于确定最佳采收期、保证果品质量、实现分等级采摘起着非常重要的作用。人工判断带有较强的主观性，效率低，容易造成果实损伤。机器视觉技术可以对果实的成熟度进行非破坏性的、快速的、定量的分析。评价的主要依据就是果实成熟时发生的外部特征变化，即颜色、大小和形状。

颜色是判断成熟度最直接的指标。对果实图像进行 RGB、HSV、Lab 等颜色空间的特征值分析，得到颜色与成熟度的关系。柑橘成熟时表皮颜色由绿变黄或

变橙，用色相分量分析图像可以有效划分其成熟阶段。有研究还将纹理、光谱等信息引入进来，从而改善检测精度。基于深度学习的图像分类网络 ResNet 也被用来做成熟度检测，端到端学习可以融合颜色、形状、纹理等各方面信息，对复杂场景下果实的成熟度进行准确分类。

产量预估属于果园精细化管理的内容之一，准确的产量信息可以指导施肥、灌溉等措施的制定，也可以给储存、运输、销售等环节提供依据。基于机器视觉的产量预测技术就是根据视野内果实的数量来实现的。它的主要问题是自然光照不均，枝叶遮盖，果实叠压等现象比较严重。现代的解决方案一般采用 YOLOv5 这样的目标检测算法，可以定位并框选出所有的可见果实。对单棵果树或者样区进行多角度、多位置的图像采集，可以得到更加全面的果实数量信息。结合用果实检测算法得到的果子大小信息、用样本来建立果子数量、尺寸与实际产量之间的回归模型，最后可以对整棵树乃至整个果园的产量做出预测。

第三节 作业质量评估方法

现代农业机械电子系统的重要目标之一就是实现精准高效的田间作业。为了保证系统达到预期的性能，给农艺决策提供可靠的依据，建立科学、准确的作业质量评价方法十分重要。本节主要研究怎样利用先进的电子技术，对重要的作业环节质量进行量化评价。

一、基于传感器的直接评估

农机具上安装的各类传感器可以直接、实时测量与田间环境发生物理交互的关键作业参数。此方法所取得的数据具有高精度、强实时性，为闭环控制和即时调整打下了基础，也是实现过程化质量监控最直接的方式。

（一）作业深度与均匀性评估

作业深度，尤其是耕整地和播种作业的深度是决定种子萌发、根系生长、作物生长一致性的关键因素。评价作业深度以及作业在田块内的均匀性，是评价作业质量的第一步。机具上装设超声波、激光位移或者角度传感器，可对机具对地高度或者重要部件的姿态进行连续监测。给播种机安装超声波传感器，按照传感器和沟底或者地面的距离、结合机具的几何参数实时计算出实际的播种深度。

传感器采集的数据流加上高精度的定位信息（一般用 GNSS 提供）就可以获得地理配准的作业深度图。此图可以直观的展示田块各个位置深度变化的规律，农场管理者或农机手根据该图可以判断深度控制系统的效果，也可以发现由于土壤质地、地面起伏或者机械故障等造成的深度超差的地方。通过对深度数据进行统计分析可以得到平均作业深度、深度标准差、深度合格率等量化指标，从而对深度均匀性做出准确评估。

根据评价结果可以对农机电控系统进行优化。系统根据实时的深度反馈来自动调节液压系统或者电动推杆，抵消地表起伏的影响，形成闭环深度自适应控制系统。通过数据评价来不断改进，使农机具能更好的适应复杂多变的田间环境，使每一粒种子都种在适宜的深度里，为作物高产稳产打下坚实的基础。

（二）施肥量与喷药量准确性评估

精准施肥施药属于变量作业的主要应用领域，即把物料施加到正确的位置，使用正确的剂量，以提高利用率，减少环境污染。因此施肥量、喷药量准确性评价非常重要，它影响变量作业处方图的执行效果。依靠安装在流量通道或者物料箱上的各种传感器，就构成了用量监控系统的基础。

评估与监控的具体技术手段多样。其概览如下表所示：

施肥 / 喷药量评估技术一览

材料类型	核心技术 / 传感器	评估功能简述
液体肥 / 农药	电磁 / 涡轮流量计	实时测量体积，比对目标率，计算误差与累积差异
固体颗粒肥	称重传感器	监测肥箱重量减速，推算施肥量，结合 GNSS 判定准确性
变量喷药	流量计与压力传感器	检测压力，确保稳定，保障喷洒量及雾滴准确性

上表是各种物料的评估方法。液体物料用流量计实时监测并计算误差，固体颗粒物用称重传感器推算施肥量，变量喷药系统除了流量计之外，还会用压力传感器保证喷洒量的准确和稳定。

（三）作业覆盖率与重叠率评估

作业覆盖率、重叠（或者漏行）率都是反映农机作业效率和资源利用水平的指标。理想作业状态就是完全覆盖目标区域，没有重叠，也没有遗漏。这两个参数的准确获取依靠全球导航卫星系统给出的高精度位置信息。农机上 GNSS 接收器以 1 ~ 10Hz 的频率记录下机具或者作业部件的准确地理坐标。

连续的轨迹点组成机具实际作业路径。通过将路径点与机具的有效作业幅宽相结合,电控系统或者后台软件可以实时或者事后生成已作业区域图。该图清楚地标明了已覆盖的区域。利用算法分析此图,可以方便地求出总作业面积、有效作业面积、漏播、漏喷区域面积。重叠区域根据作业轨迹覆盖某地理位置两次或者多次来确定。用重叠面积占总作业面积的比例,来获得重叠率。不仅可以给驾驶员提供路线规划导航,还可以使农场管理者定量地对作业效率进行评价,了解油料、种子、化肥等物资的浪费情况。

二、基于机器视觉的评估

机器视觉技术模拟人眼的功能,用非接触、信息量大的方式来对农业作业质量进行评价。可以提取出图像中作物、土壤、杂草的形态、空间分布和光谱特征,从而对一些传感器不能直接测量的作业效果给出更加直观、全面的评价。

(一) 出苗率与株距均匀性评估

播种质量的最终体现就是作物出苗情况,直接影响到作物群体的形成和最终产量。出苗率、株距均匀性是播种作业效果评价的两个主要指标。传统的田间抽样调查费时费力并且代表性差,而机器视觉评价法可以对大面积进行快速、客观的评价。利用无人机或者地面机器人搭载的高分辨率相机,可以获得播种后一段时间内的田地高清照片。

取得影像之后,关键一步就是利用图像处理、模式识别算法来对影像进行分析。利用色彩、纹理、形状特征把绿色幼苗从复杂的土壤背景中分割出来,一般采用色彩空间变换(RGB转HSV)和阈值分割的方法。系统在成功识别出所有的幼苗之后,可以对视野内的所有幼苗进行计数。用单位面积的幼苗数量和该面积的理论播种量进行对比,就得到田块的出苗率。

在株距均匀性评价上,当所有幼苗中心点坐标在图像中确定之后,算法就可以沿着作物行方向计算相邻两株幼苗间的距离,即株距。对大量的株距数据进行统计分析,可以得到平均株距、株距标准差、变异系数等统计量,这些参数可以定量地描述出株距的一致性。系统可以识别空穴(漏播)、双株或多株共存(重播)等情形,并给出发生率。根据视觉精细化评价可以改善播种机性能,调节播种参数。

（二）杂草清除率评估

杂草是制约作物产量和品质的重要生物胁迫因素之一，因此除草作业效果评价就显得尤为重要。机器视觉给杂草清除率的定量评估提供了一种方法。该方法核心就是用算法来区分作物和杂草，再分别统计数量或者覆盖面积。一般需要取得除草作业前、作业后两个时间点的田地影像。

图像处理阶段的关键问题是怎样准确识别杂草。早期研究主要依靠颜色、形状等特征来区分双子叶杂草和单子叶禾本科作物，双子叶杂草叶片和单子叶禾本科作物明显不同。随着深度学习的发展，卷积神经网络被用来做作物和杂草分类。用大量带有标签的图片来训练模型，可以在复杂的背景中识别出各种杂草，精度非常高。在得到作业前后杂草密度（株/平方米）或杂草覆盖度（杂草像素面积占总面积的比例）后，用公式（作业前杂草量 - 作业后杂草量）/ 作业前杂草量 $\times 100\%$ ，得出杂草清除率。

（三）作物表型参数评估

作物表型参数是反映作物生长状况、健康状态的外部形态、生理特征，直接体现前期耕地、播种、施肥、灌溉等各项田间作业综合效果。使用机器视觉技术对作物的表型参数进行无损、高通量监测，已经成为对整个农田管理质量做深入评价的重要手段。

最常用的表型参数之一就是植被指数，其中以归一化植被指数应用最广。搭载多光谱或者高光谱相机的无人机采集作物冠层近红外、红光波段反射率数据，计算出每个像素的归一化植被指数值，得到其分布图。该值与作物的叶绿素含量、叶面积指数、生物量等有很强的相关性，可以很好地反映作物的生长状况和健康程度。田块内归一化植被指数值的空间变异性是由施肥不均、灌溉不当、病虫害等造成的。

机器视觉除了可以获取作物的光谱信息之外，还可以获取其结构参数。采用双目立体视觉、结构光或者激光雷达技术，可以对作物做精确的三维点云模型重建。可以从点云模型中得到株高、茎粗、冠层覆盖度、冠层体积、叶倾角等重要的表型参数。对一定时期内连续观测的株高增长速率进行分析，可以评价水肥管理措施是否有效。

丰富的表型参数给作业质量的深层次评价创造了条件。将播种时株距均匀性评价结果同后期作物冠层覆盖度均匀性联系起来，就可以验证均匀播种对形成整

齐作物群体的影响。同样，将变量施肥处方图的执行情况与相应的归一化植被指数图谱进行对比，就能直接评判变量施肥决策的合理性以及执行效果。

三、基于多源数据融合的评估

单一来源数据只能反映作业质量的某一个方面，不能形成全方位、立体化的评价。整合各种传感器、平台、多维数据，可以弥补单一数据源的不足，从更深层次上认识作业参数、田间环境、作物生长之间的内在联系，从而构建更加准确、智能的评价体系。

将机载传感器获取的过程参数与机器视觉获取的结果参数融合起来，可以加深对评估的深度。传感器数据是作业过程的“因”，图像数据是作业效果的“果”，两者结合可以形成因果关系链，使评价更有洞察力。播种机上的深度传感器记录下每一个播种点的准确深度，无人机在出苗后得到的图像显示出每一个位置的出苗情况。将地理位置上的两种数据进行配准、融合，就可以得到播种深度和出苗率之间的定量关系。

经此种融合分析后可知，当播种深度小于某个值的时候，由于土壤缺水，出苗率会下降；如果播种深度过大，则出苗时间会延长，出苗活力也会降低。根据融合数据的分析结果，不仅可以评价某个作业的质量，也可以给作业参数的优化提供直接的科学依据。同样地，把施肥时流量传感器记录下来的实时施肥率数据，同后期无人机多光谱影像生成的作物长势图（归一化植被指数图）融合起来，以此来检验变量施肥处方图的实际效果，给下一季的施肥决策提供迭代优化的方向。

（二）作业参数与作物长势数据关联分析

现代农机电控系统利用 CAN 总线网络记录下大量的作业过程参数，行驶速度、发动机负荷、机具功耗、播种频率、施肥率、喷药压力等都被包含在内。这些数据细致地画出了作业的每一个环节。同时利用卫星遥感、无人机遥感或者田间物联网传感器，可以持续获取反映作物生长过程的长势数据，叶面积指数、叶绿素含量、含水量等。这两种跨越时空、跨越平台的信息之间的联系分析，这是完成精准农业闭环的重要一步。

关联分析的目的就是找到作业参数对作物长势影响的模式和规律。一般需要使用地理信息系统平台，把所有的数据统一到同一个地理坐标系下。之后可以采用空间统计分析的方法，比如地理加权回归来研究作业参数和作物长势的空间异

质性关系。经过分析发现，在土壤有机质含量较低的地区，施氮量较高对提高作物后期归一化植被指数有明显的积极作用；而在有机质含量较高的地区，效果不明显。

深度关联分析突破了合格或者不合格的传统质量评判范围，给出了诊断性视角。农场管理者可以清楚地知道不同的管理措施在田块各个部分的表现，从而把精准作业上升到精准决策的层面。根据以上分析结果可以不断对农艺处方模型进行完善，使变量作业更加科学高效，真正实现因地制宜的管理。

（三）建立综合作业质量评价模型

在完成各项作业质量指标评价、多源数据融合、关联分析之后，最终目的就是建立可量化的整体作业质量评价模型。可以将分散、零散的评价指标汇总成一个或者少数几个综合评分或者指数，给农场管理者提供简单明了的辅助决策工具。模型的建立过程就是对农业生产过程深刻理解与认识的过程。

模型建立一般会用到多准则决策分析方法，例如层次分析法或者模糊综合评价法。首先要确定评价目标，将影响作业质量的各种因素构建成层次结构，顶层是总作业质量，下分播种质量、施肥质量、植保质量等，每个分项再细分成具体的指标（播种深度均匀性、出苗率、施肥准确性等）。根据专家打分或者历史数据来确定各个指标在各个层次的权重，体现各个因素对最终作物产量和效益的影响。将各项评估的归一化得分乘以相应的权重并求和，就得到最终的综合作业质量分数。该模型使得横向比较不同的地块、作业队伍或者品牌机具的作业情况成为可能，进而为农机管理以及采购提供科学的依据。

第四节 实时监测与预警系统

现代农业机械电子系统智能化发展，使对作业过程进行精细化管理并具有主动维护功能的需求被提出。实时监测与预警系统是其中的重要一环，把信息感知、数据处理、智能决策融合在一起，从而实现对农机状态、作业品质的透明化监督，保证农业生产高效、精准、安全。

一、监测系统硬件架构

监测系统的硬件就是数据感知、处理、传输、交互的物理基础。设计的主要

目的就是使设备在田间复杂多变的作业环境中可以稳定、可靠、高效地完成信息采集和初步处理工作，为人机交互和远程通信提供坚实的硬件基础。一个稳定的硬件架构是系统各项功能得以实现的基础。

（一）车载终端

车载终端是整个监测系统的中心，它把各种传感器的数据加以整合，实施初步的运算，给予本地化的、人机交互的界面。该终端一般采用嵌入式系统设计，核心就是高性能、低功耗的微处理器单元来满足多任务并行处理的需求。为了应对农业作业环境中的振动、粉尘、温湿度剧烈变化等挑战，车载终端在结构设计上必须达到工业级甚至军用级的防护标准，一般采用无风扇散热、全密封外壳、宽温工作范围元器件。数据采集接口属于其关键部分，除了标准的串口、接口之外，控制器局域网总线接口已经成为现代农机电子系统标准配置。通过该接口，终端可以快速地获取到发动机转速、扭矩、水温、油压、自动驾驶系统、机具控制单元等各个电子控制单元的状态信息。

车载终端还装有一高精度的全球导航卫星系统接收模块，可以实时获取农机的位置、速度、航向信息，给作业轨迹记录、面积测量提供数据支持。数据存储单元一般使用大容量固态硬盘或者闪存芯片，保证海量作业数据可靠存储、快速读写。显示单元一般使用高亮度、宽视角的工业触摸屏，即使在户外强光下也能清楚地显示作业参数、导航地图、报警信息等，并支持触摸操作系统的各种功能。

（二）无线通信模块

无线通信模块是车载终端与远程监控中心之间传递信息的重要设备，它要将现场采集的作业数据、设备状态、预警信息实时上传到云端服务器，还要接收云端服务器下发的远程指令以及配置更新。选择通信模块时要兼顾数据传输速率，网络覆盖范围，功耗以及运营成本这些方面。目前农业物联网应用中存在多种通信技术，各自应用场景不同，具体无线通信技术概览如图 1 所示。

无线通信技术概览

特性 / 技术	优势	典型应用场景	适用数据量	功耗	网络覆盖
通用分组无线服务技术	覆盖广、技术成熟、成本低	基础远程监控、低频数据传输	小	中	广
4G 长期演进技术	速度快、覆盖广、延迟较低	高清数据传输、远程诊断、实时监控	中等	中	广
第五代移动通信技术	超高带宽、极低延迟、海量连接	远程遥控、高清视频回传、农机协同	大	高	逐步扩展
窄带物联网	超低功耗、深层覆盖、连接数大	偏远地区传感器数据采集（如土壤墒情）	小	极低	深
长距离无线电技术	远距离传输、低功耗、免授权频段	农场内局部环境监测、设备定位	小	极低	局部广域

从上表可知，通用分组无线服务技术、4G 长期演进技术依靠广泛的网络覆盖和比较稳定成熟的技术，目前仍然占据了农机远程监控的大部分地区，可以满足常规作业数据以及低频报警信息的传输需求。

随着 5G 技术逐渐普及，它具有的高带宽、低时延、海量连接等特点给农业机械的智能化升级开辟了一条新的道路。5G 技术可以实现高清视频的实时回传，使远程专家像亲临现场一样对故障进行诊断或者作业指导，也可以为农机之间的协同作业、远程遥控驾驶提供必要的技术支持。而在一些网络覆盖较差的或者功耗要求很高的特殊场合，如偏远地区土壤墒情监测节点，低功耗广域网技术，如窄带物联网或者长距离无线电技术，就表现出了它的独特优势，可以实现极低功耗的长距离、小数据包的可靠传输。通信模块本身要集成立体完整的通信协议栈来完成网络连接、数据打包、重传、心跳保持等工作，保证数据链路的可靠性。

（三）声光报警模块设计

声光报警模块是预警系统中直接、最直观的执行单元，它的主要功能就是当系统检测到作业参数异常或者设备出现故障时，通过声音和灯光信号向现场操作人员发出明确的警示，引起他们的注意并促使他们采取相应的措施。模块设计要保证农机驾驶环境中，也就是嘈杂、高亮的环境里信号的识别度。声音报警部分一般使用高分贝蜂鸣器或者压电式扬声器，发出的声音频率应经过特殊设计，可以穿透发动机等设备产生的背景噪声。为了区分不同类型的报警，报警声音可以设置不同的模式，短促的“滴滴”声表示一般性提示，连续急促的蜂鸣表示紧急故障。

灯光报警部分一般用高亮度发光二极管阵列或者警示灯。颜色区分是设计时考虑的主要因素：绿色常亮表示系统工作正常；黄色闪烁表示参数偏离正常范围报警；红色急闪表示严重故障或者危险状态需要立即停车检查。声光报警模块是由主控制器用专门的驱动电路控制，驱动电路要给报警器件提供足够的电流，并具备一定的保护功能，防止短路等故障损坏主控制器。整个系统中声光报警逻辑的响应是最高优先级的，任何时候都必须立即触发，给人员和设备的安全提供最后一道防线。

二、监测系统软件设计

监测系统软件是整个系统的核心，把硬件采集到的原始数据转化为有用信息，并以用户友好的方式呈现给用户。不仅要实现数据处理、存储等功能的稳定可靠，而且要用智能算法实时评价、分析作业过程，再用好的界面来提高系统的可用性、用户体验。

（一）数据采集与存储程序

数据采集与存储程序是软件系统底层的基础，其设计目的就是保证数据的完整性、实时性、准确性。该程序一般采用多线程或者事件驱动式的结构，并行处理不同的数据源信息流。主控制程序会启动一个专门的数据采集线程，该线程按设定频率轮询各个传感器接口，或者以中断方式被动接收数据。对于控制器局域网总线上的数据，程序会按照事先设置好的数据库文件来解析报文，从中提取出发动机转速、车速、水温等具体的物理量。采集的所有数据都会加上准确的时间戳和地理坐标信息，形成一条完整的时空数据记录。

由于数据丢失、通信中断等现象的存在，数据存储策略就显得非常重要了。程序把采集的数据存到内存中的环形缓冲区里作为高速缓存来使用。独立的存储线程会定时把缓冲区中的数据批量写入非易失性存储介质（闪存）里。异步写入方式可以大大减小对主程序流程的影响，从而保证数据采集的实时性。存储的文件格式一般是采用二进制格式或者轻量级数据库格式，可以提高空间利用率、读写效率。程序还要设置数据完整性校验机制（循环冗余校验码），断点续传逻辑，保证设备意外断电重启之后，可以从前次的断点继续进行数据记录和上传，最大程度上保证历史数据的完整性。

（二）作业质量实时评估算法

作业质量实时评估算法是监测系统的核心智能所在，它把孤立的作业参数转化为对作业效果的综合、定量评价，为操作手改进作业方式、管理者做决策提供科学依据。该算法属于一个多输入、多输出的复杂模型，它把来自全球导航卫星系统、姿态传感器、深度传感器、机具状态传感器等多源信息融合起来，对作业过程展开动态分析。评价一般会从以下几个方面展开：

1. 作业轨迹和覆盖率分析：算法处理连续的全球导航卫星系统定位点，实时生成农机具作业轨迹图。将轨迹宽度与设定的作业幅宽比较，可以得到重播率、漏播率。算法会在人机界面上用不同的颜色高亮显示重播、漏播区域，给操作手提供直观的调整依据。

2. 关键作业参数达标率评价，根据不同的作业类型，算法会监控相应的参数。播种过程中算法对播种深度、株距、行距的一致性进行实时检测并与预定目标值做比较后得出合格率。深松作业时主要看耕深是否稳定在设定的目标深度范围内。

3. 作业效率和稳定性分析，算法还会对作业过程中速度、发动机负荷率等参数做统计分析。用平均作业速度、速度波动方差、非作业时间所占比例等指标来评价操作的平稳性以及作业效率。

评价结果会实时在车载终端上显示出来，也会被结构化地记录下来，从而生成详细的作业质量报告。通过对历史数据进行纵向分析，可以发现某块土地作业的难点、某位操作手的驾驶习惯等，为之后农艺改进和人员培训提供数据支撑。

（三）人机界面设计

人机界面是系统同用户之间沟通的桥梁，它的好坏直接影响到系统的实用性和用户的接受程度。优秀的农机监测系统人机界面设计应该遵循清晰直观、操作方便、信息主次分明的设计原则，还要考虑到农机操作手在强光、颠簸、高强度作业环境下使用的特点。界面整体布局一般为主状态显示区、作业地图监控区、参数设置区、报警信息区。主状态显示区采用大字体、图形化的仪表盘形式来显示车速、发动机转速、水温、油量等最基本的车辆状态信息，使操作手一目了然。

作业地图监控区占屏幕大部分，实时显示农机当前位置、作业轨迹、已作业区域、前面提到的重播、漏播区域。地图具有缩放和平移功能，可以方便操作手查看作业的全局和局部细节。参数设置界面采用层次化的菜单结构，把复杂的参数按功能分门别类，使用大尺寸的虚拟按钮和滑块，方便用户在颠簸环境下进行

触摸操作。报警信息区一般设在屏幕的顶部或底部，出现预警信息时会以醒目的颜色、图标弹出，并提供查看详情、消音的快捷操作。整个界面的视觉风格以高对比度的色彩方案为主，去掉多余的装饰元素，保证信息的可读性。

三、预警机制设计

预警机制是现代农业机械电子系统从被动监测到主动防御的重要一步，依靠事先设定好的规则和智能算法，提前对可能存在的风险、故障发出告警，避免作业质量下降、设备损坏、安全事故的发生，是人、机、作业安全的重要保障。

（一）作业参数异常阈值设定

作业参数异常阈值的确定，对于预警机制的有效性来说是非常重要的。科学合理的阈值可以保证预警系统不会因为过分敏感而造成误报频发，也不会因为过于迟钝而造成预警失时。阈值的设定方法主要有静态阈值、动态阈值和复合阈值这三种。静态阈值是按照农业机械的设计规范、农艺要求标准或者长期经验总结，对关键参数设置一个固定的、不随工况变化的上下限。例如可以给发动机水温设置一个绝对最高安全温度，超过此值就触发高级别报警。该方法简单直观，适用于有明显的安全边界的参数。

动态阈值更加智能化，可以依据不同的作业环境、作物种类或者农机自身运行情况来自动调节。播种深度的合格范围会因为土壤的质地、含水量的不同而改变，系统根据集成后的土壤传感器数据来自动调整深度报警阈值。更高层次的动态阈值设定方法用到的是机器学习算法，对大量的历史作业数据进行分析之后，模型就能学会在不同的工况下正常参数波动的范围，从而产生更为精确且个性化的预警标准。实际使用时一般采用复合阈值策略，即把静态的绝对安全阈值和动态的相对工况阈值结合起来，建立多层次、多维度的预警判断体系，大大提高了预警的准确性、可靠性。

（二）故障诊断与报警逻辑

故障诊断和报警逻辑属于预警机制的重要决策部分，它在发现参数出现异常之后，经过一系列推理和判断，找出故障的真正原因，进而触发相应的报警。传统的诊断逻辑大多依靠规则的专家系统，即领域专家事先编写出大量的“如果-那么”规则。若发动机水温一直大于阈值 A，冷却风扇转速小于阈值 B，则判断为冷却风扇故障。该方法对常见且因果关系清晰的故障有较好的诊断效果，但是

知识库的维护成本高，很难覆盖所有未知故障模式。

随着人工智能的发展，以数据驱动为特点的故障诊断模型也成了新的研究热点。用支持向量机、神经网络或深度学习等算法训练大量的传感器数据，就可以使模型学会各种故障模式下的数据特征。通过分析发动机振动信号频谱、排气温度、燃油消耗率等各方面的数据，卷积神经网络模型就可以对喷油嘴堵塞、轴承磨损等早期故障征兆做出预测。报警逻辑设计也应该具有层次性。系统判断到故障之后会根据故障的严重程度来确定报警级别。轻微偏离仅有界面提示，中等故障会发出声光报警，危害设备安全或者造成重大损失的紧急故障，除了最高等级的声光报警之外，还会联动车辆控制系统实施限制发动机功率或者紧急制动等保护措施。

（三）预警信息的远程推送

预警信息的远程推送功能把车载终端的本地报警能力延伸到了云端、远方的管理人员那里，实现了农机群的集中、实时、主动管理。当车载预警系统发出警报时，车载终端就会把一条结构化的预警信息打包，然后通过无线通信模块传送到后台的云服务平台。除了故障代码、报警级别以外，这条信息里还有机器报警时所在位置、运行速度、发动机转速、传感器读数、操作员信息等现场快照数据。带有上下文的预警数据给远程故障诊断和决策支持带来了很大的便利。

云服务平台收到预警信息之后，会立即将预警信息存入数据库，然后执行事先设定的推送流程。按照预警的级别以及类型，平台会借助不同的途径把信息传递给相应的责任人。最常用的方式就是通过手机短信或者移动应用推送通知，把简短的报警摘要直接发送给车队管理员或者维修工程师，使他们可以第一时间知道异常情况。对于需要详细分析的复杂故障，平台会通过电子邮件给用户发一个包含所有数据报告的链接，或者在车队管理网页端界面上产生醒目的报警工单。利用远程推送技术可以实现对千里之外的农机进行“遥感”和“听诊”，在农机设备出现故障之前就安排预防性维护，大大提高农机设备的管理效率和出勤率。

第八章 农业机械通信与网络技术

随着电子技术、自动化控制技术的不断发展，现代农业机械也发展成为集成了许多电子控制单元的复杂系统。为了实现各个单元间高速可靠的互联协作，需要使用先进车辆网络技术。本章将对应用于农业机械的各种通信与网络技术做详细的研究，为智能化的农机电控系统提供坚实的理论基础和实践指导。

第一节 现场总线技术应用

现场总线技术是一种数字式、串行、多点通信网络，很好地解决了传统控制系统中大量的线束带来的复杂性和可靠性问题。在众多的现场总线中，CAN 总线由于其良好的性能被广泛应用于农业机械上，已经成为农机内部通信和控制的主要技术。

一、CAN 总线基础

CAN 总线是一种功能很强、应用范围很广的串行通信协议。它最初是专为汽车行业设计的，现在已经被用到各种工业控制系统和自动化领域。了解农机网络系统物理层的基本特性、通信原理及实现技术是开发可靠农机网络系统、进行系统集成和故障诊断的前提和必要的知识储备。

（一）CAN 总线的基本特点

CAN 就是控制器局域网络，是一种支持分布式实时控制的串行通信协议。其主要特点就是高可靠性和很好的错误检测能力。CAN 总线用差分信号来传送信息，抗电磁干扰能力很强，在农业机械等电磁环境差的地方应用较多。任何节点都可以在需要的时候主动向网络发送信息，多主控结构使系统更加灵活、快速。

CAN 总线采用的是非破坏性仲裁方式。如果多个节点同时发送报文，那么优先级较高的报文就会先被传输，可以防止总线冲突和数据丢失，保证重要的控制指令能够及时地被发送出去。报文标识符优先级排序机制，可以使得系统的设

计者根据任务的紧急程度自由地给报文分配优先级，发动机控制或者制动系统的报文优先级一般会被设为最高。

CAN 总线具有很强的错误处理能力。每一个 CAN 控制器都具有复杂的错误检测、错误判定、错误帧发送功能。节点可以自动检测总线错误，主动隔离严重故障节点，防止故障节点影响整个网络的正常通信。高度的容错性使即使农机控制系统某一部分节点或者线路出现问题，系统也能正常工作，满足农业生产对设备高可靠性要求。

（二）CAN 协议的帧结构与仲裁机制

CAN 协议中定义了各种不同的帧，主要是数据帧和远程帧。数据帧是节点向总线广播数据的基本单位，数据帧是由标识符、控制字段、数据字段、CRC 校验字段等组成。标识符不但可以唯一地确定报文的身份，还可以决定报文在总线仲裁中的优先级。数据字段长度最大为 8 个字节，存入实际的控制指令或者传感器数据。远程帧与请求、数据帧使用相同的标识符，它的结构和数据帧类似，没有数据部分。协议中还定义了错误帧和过载帧，错误帧用来通知总线上所有节点发生错误，过载帧在节点忙的时候起到延迟的作用。

CAN 总线具有仲裁机制，采用位仲裁技术保证通信无损高效。当多个节点同时发送报文的时候，就会逐位比较总线上信号的电平。按照 CAN 协议的规定，显性电平（逻辑 0）会覆盖隐性电平（逻辑 1）。发送节点在发送每一位隐性电平的时候，都会同时监听总线实际的电平。若节点发送的是隐性位，而侦听到显性位，则表示有优先级比它高的节点（其标识符中对应位为 0）在发送数据。此时该节点马上停止发送，进入接收状态，保证了高优先级报文不会被延时或者阻断。整个仲裁过程在报文标识符传输阶段就完成了，几乎不占用实际的数据传输时间。

（三）CAN 总线收发器与接口电路

CAN 总线系统在物理层上需要通过 CAN 收发器来连接 CAN 控制器和物理总线。CAN 收发器是把逻辑电平转换成差分信号电平的重要器件。它把 CAN 控制器发出单端的 TX 信号（逻辑电平）转换成总线上的差分信号（CAN_H、CAN_L），再把总线上的差分信号转换回单端的 RX 信号（逻辑电平）送至 CAN 控制器。差分传输方式是实现 CAN 总线长距离、高可靠通信的物理基础。

TJA1050、MCP2551 等典型 CAN 收发器内部集成了驱动器和接收器，有驱动器过热保护、限流、总线引脚瞬态保护等功能，使节点更加稳健。高速 CAN

应用中收发器可以达到 1Mbps 的通信速率，可以满足大部分农机控制系统对于实时性的要求。

完整的 CAN 接口电路一般由微控制器、独立的 CAN 控制器或者微控制器内部集成的 CAN 控制器、CAN 收发器和保护电路组成。微控制器用来处理上层应用逻辑，把待发送数据通过 SPI 或者并行接口传给 CAN 控制器。CAN 控制器完成 CAN 协议所有的功能，即报文打包、发送、接收、滤波、错误处理等。

为了防止静电放电、浪涌等电气瞬变对收发器、总线造成影响，接口电路中一般会加入保护元件。在 CAN_H 和 CAN_L 线与地之间并联瞬态电压抑制二极管，在过压时可以将能量泄放到地。在收发器的 CAN 引脚和总线之间串联共模扼流圈，可以滤除共模干扰，提高通信质量。在田间复杂的电气环境中，这些都是保证农机正常工作的保护。

二、CAN 总线在农机上的应用

CAN 总线技术可以大幅度简化农业机械整机布线，提高系统可扩展性、可维护性。建立标准化的通信网络，可以实现不同厂家控制器和作业机具的即插即用互操作性，为精准农业和智能化作业打下了良好的网络基础。

（一）农机整机 CAN 网络拓扑

农业机械的 CAN 网络拓扑结构就是指整机所有的电子控制单元通过 CAN 总线相互连接的物理布局形式。选择合适的网络拓扑对保证通信可靠性、降低布线成本、便于维护有重要的意义。现代农业装备常见的拓扑结构有：

1. 线性总线拓扑是 CAN 网络最基本、最经典的拓扑。所有的电子控制单元都直接挂在一条主干总线上。该结构优点是布线简单，电缆短。主干总线的两端都要接上 120 欧姆的终端电阻来消除反射。该结构被广泛地用在拖拉机、联合收割机等大型农机的主干网络上。

2. 星型拓扑是用一个中央节点（集线器或者网关）来连接所有的电子控制单元。某一分支节点出现故障时，不会影响其它分支之间的通信，结构方便故障诊断和隔离。在一些复杂的农机系统中，会采用星型或者混合型拓扑来连接不同的功能区域控制器，例如将驾驶室內的显示器、操作手柄等连接到一个中央控制器上。

3. 混合型拓扑，在大型或者功能复杂的农业机械上，一般采用线性总线和星

型拓扑相结合的混合模式。一条高速主干总线贯穿整台机器，将发动机、变速箱、底盘等重要的动力和传动系统控制器连接起来；通过网关将驾驶室控制单元、作业机具控制单元等子网络接入主干，形成一个结构清晰、层次分明的整机网络。

农机整机 CAN 网络拓扑结构特点及应用场景可参考下表：

CAN 网络拓扑结构比较表

拓扑类型	特点	优点	缺点	应用场景
线性总线	所有 ECU 直接连接至一条主干线，两端需终端电阻	布线简单，成本较低	单点故障易影响全网，诊断较复杂	拖拉机、联合收割机主干网络
星型拓扑	通过中央节点（集线器 / 网关）连接各 ECU	故障隔离性好，便于诊断	中央节点故障影响大，布线可能较长	复杂农机系统，功能区域控制器互联
混合型拓扑	线性总线与星型拓扑结合	兼顾可靠性、灵活性与可扩展性	设计与实现相对复杂	大型或功能复杂的农业机械整机网络

拓扑结构的选择要考虑农业机械具体结构、电子控制单元数量和分布、成本和可靠性要求。对电子控制单元分布较广的联合收割机来说，分段式线性总线或者混合拓扑更为常见，既可以保证通信的稳定性，又可以保证布线的灵活性。

（二）标准 CAN 与 J1939 协议

在农业机械的 CAN 总线使用中要区分物理层和数据链路层的 CAN 协议（如 CAN2.0B 规范）和应用层的高层协议。CAN2.0B 标准定义了报文的帧格式、仲裁机制、错误处理等底层细节，但是没有规定报文标识符的具体含义，也没有说明如何发送超过 8 字节的长数据。为了解决不同厂家设备之间互操作性的问题，国际汽车工程师学会制定了 J1939 协议，该协议已经成为非道路车辆（农业机械）领域通信的行业标准。

J1939 是建立在 CAN 总线上的高层协议族，在 CAN2.0B 扩展帧（29 位标识符）的基础上做了详细的规范。J1939 把 29 位的标识符分成优先级、参数组编号、源地址等部分，使每一个报文的用途和来源都很清楚。PGN 定义了有特定意义的信号，比如发动机转速、水温、轮速等等。每一个信号都称为可疑参数编号。统一的 PGN、SPN 标准可以实现各个厂家的发动机、拖拉机显示器之间的相互操作。

J1939 协议除了定义周期性广播数据外，还有请求 / 响应通信机制、多包数

据传输协议（用来传输超过 8 字节的故障诊断信息或者软件程序），网络管理功能（包括地址分配和节点状态监视）。农业机械领域的 ISOBUS 标准是在 J1939 基础上发展起来的，专门定义了拖拉机与农具之间的通信接口，可以实现不同品牌的拖拉机、农具的即插即用，对精准农业技术的发展起了很大的推动作用。因此，设计现代农机 CAN 网络时遵循 J1939 或者 ISOBUS 标准是保证系统兼容性、可扩展性的关键。

（三）基于 CAN 的分布式控制

随着 CAN 总线的出现，农机电控系统架构也由原来的集中式向分布式转变。传统集中式控制中，中央处理器要处理所有的传感器数据并控制所有的执行器，造成中央处理器负担过重、系统布线复杂、牵一发而动全身，系统可靠性和可维护性差。

基于 CAN 总线的分布式控制系统把控制任务分配给各个独立的电子控制单元。每一个电子控制单元控制一个功能子系统，即发动机管理单元、变速箱控制单元、液压悬挂控制单元、作业机具控制单元等。这些电子控制单元用一条共享的 CAN 总线组成网络。每一个电子控制单元都是一个智能节点，有独立的数据采集、处理、控制能力。各个子系统通过 CAN 总线将自身的状态信息（发动机转速、车速、液压压力等）广播到网络中其他节点上。同时从总线上接受其它节点发过来的指令或者数据，从而实现协同工作。在联合收割机自动割台高度控制系统的中，控制器根据底盘电子控制单元传来的车速信息和割台高度传感器信息，动态调节液压阀，而这些信息的交换就是通过 CAN 总线来完成的。该种分布式架构不仅可以大大减少线束的数量，降低成本，更重要的是提高了系统模块化程度。任何一个子系统的开发、测试、升级或者替换都可以独立完成，互不影响。系统整体可靠性由于功能分解而提高，单个节点故障一般不会导致整个系统瘫痪。

三、CAN 总线系统设计与调试

稳定可靠的 CAN 总线系统不能单靠前期的设计，后期的调试也不能省略。从通信矩阵规划、物理层参数确定，到用专业工具做网络测试和分析，每一个环节都直接影响农机电控系统整体性能的好坏和最终产品质量。

（一）节点地址分配与通信矩阵设计

遵循 J1939 等高层协议的 CAN 网络中，每个电子控制单元节点都必须具有

一个唯一的源地址来标识自身。J1939 协议定义了地址分配机制，静态地址分配、动态地址协商。系统设计阶段要给每一个电子控制单元指定一个首选地址，明确其是否支持动态地址协商功能，防止网络中出现地址冲突。

通信矩阵是 CAN 总线系统设计过程中不可缺少的文档，从设计开始到系统测试、调试、后期维护都离不开它。它一般以表格的形式来表现，对网络中所有的报文的通信关系及其属性进行了详细的定义。对于每一个 CAN 报文（一般通过它的标识符或者 PGN 来唯一标识），通信矩阵都会列出该报文的发送节点、接收节点、发送周期（对于周期性报文）或者触发事件（对于事件触发报文）。

矩阵里会定义报文的优先级，这直接影响着它在总线仲裁中表现出来，关键控制报文要赋予它高优先级。通信矩阵要对每个报文的数据场进行逐字节或者逐位定义，确定每个信号在数据场中的起始位、长度、分辨率、偏移量和物理含义。

设计出清晰、准确的通信矩阵，可以给各个开发团队之间良好的合作提供强有力的保证。软件工程师根据矩阵编写节点收发程序，测试工程师根据矩阵编写测试用例，来检验节点的行为是否符合设计规范。在系统集成或者后期维护阶段，通信矩阵是查找并快速解决通信问题的重要参考材料。

（二）总线终端电阻配置

CAN 总线物理层设计的好坏，终端电阻的配置好坏直接影响信号质量以及通信可靠性。CAN 总线使用差分信号传输，总线电缆本身就是一条传输线。高速变化的信号到达传输线末端时，如果因为阻抗不匹配引起反射，反射信号和原信号叠加后就会造成波形严重失真，进而产生通信错误。

为了消除信号的反射，在总线的两个物理端口上都必须接上终端电阻。按照 CAN 标准规定，特性阻抗为 120 欧姆的双绞线电缆要接上 120 欧姆的终端电阻。两个并联的终端电阻使得总线的直流等效电阻为 60 欧姆，正好满足 CAN 收发器正常工作的负载条件。缺少终端电阻会造成严重的信号振铃，过多或者错误的终端电阻会造成信号衰减过大，从而影响通信。因此，在设计农机整车网络时，必须确定总线主干的物理走线，识别出总线物理端点的两个电子控制单元，并在其内部或者外部连接器上设置 120 欧姆的终端电阻。对于既可以作为总线末端又可以作为总线中间节点电子控制单元（拖拉机连接农具的接口），可以设计可跳线选择的终端电阻来提高应用的灵活性。

（三）CANoe 等总线测试工具的使用

专业的总线测试与分析工具在 CAN 网络的开发、集成、测试和故障诊断整个生命周期中起着举足轻重的作用。德国 Vector 公司 CANoe 是目前使用最广的 CAN（也支持 LIN、FlexRay 等）总线开发与测试软件之一，可以完成网络设计到系统级测试的所有工作。

使用 CANoe 开发人员可以实时观察总线上所有的报文活动。软件界面以 Trace 窗口、图形窗口等多种方式把报文 ID、数据内容、发送周期、总线负载率等信息直观地呈现出来，使工程师可以很快地掌握网络目前的状态。CANoe 还有强大的模拟仿真功能。工程师可以通过配置数据库文件来进行仿真，该文件是通信矩阵的电子版，包含所有的报文和信号定义。根据 DBC 文件，CANoe 能够模拟网络中的一个或者多个电子控制单元向总线发送预设的报文，来测试其它真实节点的响应是否正确，在电子控制单元样机尚未完成的时候特别有用。

CANoe 的分析功能对于系统调试、故障排查起着非常重要的作用。可以记录并回放总线数据，可以再现和分析偶发性问题。用 CAPL 语言来写复杂的智能自动测试程序，例如模拟传感器故障、发送诊断服务请求、检测节点响应时间等等。除此之外还有 CANalyzer、PCAN-View、ZLG 的 CANTest 等工具也具有相似的功能，它们共同构成了保证农机 CAN 网络稳定可靠的保障体系。

第二节 无线通信技术

无线通信技术给现代农业装备赋予信息感知、数据交换、智能控制的支撑作用。它冲破了传统有线连接在复杂多变的农业作业环境里形成的束缚，创建起田间传感器、作业机械、远程云平台组成的立体化信息网络，给精准农业、智慧农业的实现提供重要的技术手段。

一、短距离无线通信技术

短距离无线通信技术主要是用来实现农业机械自身、机具与主机、特定作业区域内设备之间的连接。它的特点就是通信范围小，但功耗低、成本低，可以满足局部网络数据交换的需求。

（一）蓝牙技术特点与应用

蓝牙属于短距离无线通信技术标准，具有低功耗、低成本、便于组网等特点，在农业机械电子系统中应用较多。低功耗蓝牙技术出现以后，纽扣电池供电的微型传感器可以连续工作数月甚至数年，大大方便了农业设备上部署。蓝牙技术能够实现点对点网络、星状网络拓扑，可以很快地建立设备之间临时的连接关系，保证数据的安全传输。核心优势就是普及率高，几乎所有智能终端都带有蓝牙功能，给开发以手机或者平板电脑为交互终端的人机交互应用提供了便利。

现代农业装备中蓝牙技术的应用场景很多。播种机上的种子传感器会利用蓝牙无线技术将漏播、堵塞等情况的报警信息实时传送到拖拉机驾驶室监控终端上，不需要繁重的布线工程。农机维修人员用带有蓝牙的诊断工具无线连接到车辆的电子控制单元上读取故障码、获取车辆的各种实时数据流，可以提高农机的维修便捷性和效率。小型智能农具、手持的农业检测设备一般会通过蓝牙同用户的智能手机相连接，并通过专有的应用程序来记录数据、控制设备以及分析信息。

（二）Wi-Fi 技术特点与应用

Wi-Fi 即无线保真技术，是基于 IEEE 802.11 系列标准的，目前应用最广的高速无线局域网技术。相对于蓝牙来说，Wi-Fi 最大的特点就是更高的数据传输速率、更大的覆盖范围。用无线接入点搭建农场办公区、机库和部分作业区的无线网络。随着技术标准的发展，Wi-Fi 的传输速率已经从最初的几十兆比特每秒发展到现在的千兆比特每秒，完全能够满足大容量数据传输的要求。

农业机械领域由于 Wi-Fi 具有高速率的特点，所以被当作大数据传输任务的首选。大型联合收割机作业后产生的高精度产量图数据带有地理位置信息，设备回到场院之后可以通过 Wi-Fi 网络快速同步到农场服务器上，便于后续的数据分析和决策。在进行农机固件升级或者软件更新的时候，Wi-Fi 比蜂窝网络更经济、速度更快。安装在大马力农机具上的高清摄像头可以通过 Wi-Fi 将实时视频流传输到驾驶室的显示屏上，给驾驶员提供无死角的作业观察视野，保证作业质量与安全。

Wi-Fi 技术的主要缺点就是功耗高，不能长期依靠电池供电的独立传感器节点使用。其网络覆盖一般需要事先部署基础设施，远离建筑物的广阔田间地块实现全面覆盖存在一定的成本和技术难题。因此，Wi-Fi 更多地被用作场内高速数据交换的“信息坞”，而不是广域田间传感的组网技术。

（三）ZigBee 技术特点与应用

ZigBee 是以 IEEE 802.15.4 为标准的低功耗、低速、短距离无线通信技术。它的最大特点就是支持大规模自组织、自修复网状网络拓扑。网络中每一个节点既可以作为数据源，也可以作为路由器，为其它节点转发数据，大大地扩大了网络的覆盖范围以及鲁棒性。单个节点的通信距离虽然很小，但是经过多跳中继之后，数据可以传输很远的距离。

因为 ZigBee 具有上述优点，所以它适合创建农田环境监测和设备控制网络。在大面积农田上布置 ZigBee 无线传感器节点，监测土壤温湿度、酸碱度、养分含量等主要参数，达到精准农业的目的。

1. 各传感器节点将采集到的数据逐级传递，最终汇聚到网关节点。

2. 网关再通过 GPRS 或者 4G 等远程通信方式将数据上传到云平台，从而实现大田环境精细化监测。

温室大棚等设施农业场景中 ZigBee 网络也起着不可替代的作用，可以连接各种环境传感器，也可以连接风机、卷帘、滴灌阀门等执行器，构成一个完整的无线传感与控制网络，对温室环境进行自动化、智能化的调节，从而改善作物的生长条件。

二、远距离无线通信技术

当农业机械作业范围超出田间地块，需要和数公里外的农场管理中心或者云端服务器进行信息交互的时候，远距离无线通信技术就成为不可缺少的桥梁。该类技术使农机设备可以实现远程在线，可以对农机设备进行远程监控、调度、数据管理。

（一）GPRS/4G/5G 蜂窝网络技术

蜂窝网络依靠遍布各地的基站设施，给移动设备提供广域无线连接。从 2G 的 GPRS（通用分组无线服务技术）、3G 的 4G（长期演进技术）到现在 5G，数据传输速度、网络容量、延迟性能都得到了飞速的发展。GPRS 主要提供低速率、非实时的数据传输，4G 技术由于带宽高、延迟小，目前已经成为农机远程信息处理的主流。

4G 网络把车辆的位置、行车轨迹、发动机状况、燃油耗费、作业量等大量数据即时发送到云端管理系统当中。农场管理者可以远程监控设备状况，进行作

业调度，达到精细化管理的目的。同时，农机也可以从云端获得作业处方图，执行变量施肥、变量喷药等精准作业。5G 技术出现以后，智慧农业就有新的设想。超高可靠、低延迟通信特性对于农机自动驾驶和远程控制来说是必不可少的，可以实现指令瞬时下达并执行。海量机器类通信可以支持在一个区域里接入 4G 网络数量多几个数量级的物联网设备，为万物互联的智慧农场打下了基础。

蜂窝网络的覆盖面广，技术已经很成熟，网络非常稳定。它的主要限制有偏远农业地区存在信号盲区、会产生数据流量费。

（二）LoRa 低功耗广域网技术

LoRa 是物联网用的低功耗广域网通信技术。它最突出的特点就是实现了数公里级别的远距离通信，并且功耗极低，使得终端节点的电池寿命可以长达数年。LoRa 为了保证通信距离和能耗，而牺牲了数据传输速率，所以适合于数据量小、发送频率低的物联网应用场景。一般在 ISM 频段工作，组网成本低。

农业上 LoRa 技术很好地适应了广域、低频、小数据量的监测需求。在大面积牧场内给每头牛套上带有 LoRa 项圈来跟踪其位置与活动，达到智能放牧的目的。在广大的农田里部署的土壤墒情监测站、对远程灌溉渠道的水位进行监测的传感器，都可以使用 LoRa 技术把数据定时传送到几百米乃至数公里远的农场网关上。与蜂窝网络相比，LoRa 在没有蜂窝信号覆盖的地区具有独特的优势，农场可以自建网关，搭建起自己的物联网，有效地解决了偏远地区农业生产信息孤岛的问题。

（三）卫星通信技术应用

地面通信网络（蜂窝网络或者自建的 LoRa 网络）无法覆盖的极端偏远地区，就只能依靠卫星通信来保障农业机械的“永不掉线”了。卫星通信依靠地面终端同轨道卫星展开信号的接收和发送，从而达成全球或者区域范围内的无间断覆盖。传统的地球同步轨道卫星通信技术已经很成熟，但是存在延迟大、终端功耗高、费用昂贵等问题。近几年来，以星链为代表的低地球轨道卫星星座网络迅速发展，大大缩短了通信时延、提高了数据传输速率，给农业应用增添了新的可能。

卫星通信在农业机械上的应用主要有两个方面。一是作为数据回传的备用通道，在农机作业到蜂窝网络盲区的时候，车载终端可以利用卫星链路把重要的报警信息、位置以及核心作业数据发送到管理中心，保证设备监控的连续性。二是获得了高精度的定位所需要的差分校正信号。许多 GNSS 的增强服务，例如

SBAS 或者 PPP 服务等，都是通过卫星向农机发送校正数据来实现厘米级定位精度的，这也是实现自动导航和精准作业的前提。

三、无线通信模块选型与使用

在农业机械电子系统中加入无线通信功能，主要任务就是正确选择和使用无线通信模块。这是一项要考虑需求、环境因素、软硬件集成复杂度等各方面因素的系统工程。

无线通信技术参数对比表

特性 / 技术	蓝牙	Wi-Fi	ZigBee	4G/5G 蜂窝网络	LoRa	卫星通信
通信距离	短	中	短 - 中 (10- 数 km, 多跳)	长 (数 km- 数十 km)	长 (数 km- 数十 km)	全球覆盖
传输速率	低	高	低	高	极低	中 - 高
功耗	极低	高	极低	中 - 高	极低	高
组网能力	点对点 / 星形	AP 局域网	网状网络	基站广域网	星形 / 网状 (私有)	星形
主要应用场景	近距离数据交换 / 控制 / 诊断	场内高速数据传输 / 视频	环境监测 / 智能控制 / 多跳传感	广域远程监控 / 管理 / 自动驾驶	广域低功耗传感 / 追踪	极端偏远地区通信 / 高精度定位
成本	低	中	低	高 (流量费)	低	高 (设备 / 服务)

从上表可以看出，通信距离、传输速率、设备功耗这三个无线通信技术的固有指标之间存在着互相制约的“不可能三角”关系。一般情况下，为了获得更远的通信距离和更高的传输速率，就必须要加大发射功率，因此而增大功耗。反之，为了达到极低的功耗，就必须牺牲通信距离或者速率。所以，在为某一个农业应用场景选择通信模块的时候，首先要确定主要需求，在此基础上进行权衡。

选择过程要以具体的应用为导向。对于车辆直接供电的驾驶辅助摄像头视频传输系统来说，高数据速率是首要目标，功耗是次要考虑的因素，Wi-Fi 模块为最佳选择。对需要电池长期供电的田间土壤传感器来说，数据量小、上报频率低，此时低功耗、长距离通信是主要要求，LoRa 模块就成为首选。农具和拖拉机之间低数据量的交互使用低功耗蓝牙，在功耗、成本、实现复杂度三个方面取得较好的平衡。

另外，农业作业环境对于无线信号的传播有很大影响。作物生长、地形起伏、大型金属机身都会造成信号衰减、多径效应，实际通信距离远小于模块标称的理想值。选型过程中应留有较大的链路预算，选择穿透性好、抗干扰能力强、易于实现的技术方案，通过现场试验来考察在实际情况中其通信的可靠性。

（二）模块接口与 AT 指令集

就硬件来说，无线通信模块需要通过特定的物理接口连接到主控制器上。最常用、通用的是通用异步收发器，只用简单的串行数据线 (TX、RX) 就能实现主控和模块之间的通信。对数据速率要求高的模块，如一些高速的 Wi-Fi 模块，会用 SPI 或者 SDIO 接口。模块上一般带有电源、接地、复位、状态指示或者模式切换的通用输入输出引脚，设计时需要按照模块数据手册正确连接。

从软件角度来说，为了简化开发，大部分无线通信模块都支持 AT 指令集进行控制。AT 指令是以文本形式操作无线通信模块的命令接口，开发者不需要掌握复杂的通信协议栈知识，只需要向模块发送预先定义好的字符命令就可以实现对模块的配置、设置等功能。

1. 基础配置包括 AT+BAUD 设置串口波特率，AT+CWMODE 设置 Wi-Fi 模块工作模式（客户端、接入点或者并存）。

2. 网络管理：对于蜂窝模块可以使用 AT+CSQ 来查询信号质量，使用 AT+COPS 来搜索并注册网络。

3. 数据通信，用特定的指令建立 TCP 或者 UDP 连接，进入数据透传模式或者直接发送、接收数据。掌握 AT 指令集对于实现无线通信功能的嵌入式开发来说是十分重要的。

（三）天线选型与匹配设计

天线是无线通信系统不可缺少的无源元件，它的好坏直接决定着信号的收发质量，是影响通信距离和稳定性的一环。一个设计良好的射频前端电路，如果与之匹配的天线不合适，那么整个系统的性能就会大打折扣。天线的作用是将模块输出的高频电流高效地转换成空间中的电磁波辐射出去，或将空间中的电磁波高效地捕获并转换成高频电流送入射频接收端。

选择天线时要考虑频率、增益、方向图、极化、尺寸、机械强度等各方面因素。农业机械上一般使用全向天线，安装在外部，保证在不同的朝向上都能稳定地发送和接收信号。对于内嵌在控制盒内的模块，可以使用 PCB 天线或者陶瓷

贴片天线，但是其性能容易受到周围元器件和外壳材料的影响，需要精心布置。使用增益较高的定向天线，在固定点通信时可以提高某一个方向的信号强度，从而实现远距离稳定的通信。

阻抗匹配在天线的设计、使用中是不可缺少的。为了达到最大功率传输的目的，天线输入阻抗要和无线模块射频输出端口的阻抗（一般为 50 欧姆）相匹配。任何失配都会产生反射，造成功率损失，缩短通信距离。PCB 设计中连接模块和天线座的微带线要严格控制阻抗。在最后调试时，一般用矢量网络分析仪等专业仪器测量天线端口电压驻波比，通过由电感、电容组成的匹配网络进行精细调节，使天线工作在最佳状态，从而充分发挥无线模块的性能。

第三节 物联网技术在农业机械中的应用

物联网技术同现代农业机械深度融合之后，农机由自动化发展成为智能化、网络化的设备。通过将传感器、无线通信、大数据分析等前沿技术集成到农机装备里，一个包括云、管、边、端的全方位技术体系就产生了。这是以前无法想象的技术支撑，以前所不能实现的精确作业、高效管理、智能决策。

一、农业物联网体系架构

农业物联网体系架构是实现农机智能化、网联化的基础框架，它把数据从田间地头产生到最终呈现给用户，指导生产的全过程描绘出来。该架构一般被划分为感知层、网络层、平台层、应用层，各个层次之间互相联系、互相配合，共同组成了农机物联网完整的生命周期。

（一）感知层、网络层、平台层、应用层

感知层属于农业物联网的基础，同时也是物理世界同数字信息相互作用的开端。农机应用中，感知层是由分布于农机本身或者作业环境中的众多的设备组成，例如：获取农机位置信息的 GNSS 接收器、监测发动机转速、油耗等状态参数的 CAN 总线接口、用于感知作业质量的摄像头、测量土壤温湿度、作物长势的各类传感器。这些设备就是农机的感官，把位置、速度、工况、环境参数等物理世界的真实状态转变成可以处理的数据信号。

网络层是感知层与平台层之间数据传输的通道，主要承担着将大量、异构

的感知数据稳定、可靠、高效地传输到云端或者边缘计算节点的任务。由于农业生产环境广阔，网络覆盖不全，所以农机物联网网络层一般会采用多种通信技术相结合的方式。农机内部传感器之间在田间近距离范围内采用 CAN 总线或者 ZigBee 技术来通信；农机与远程平台之间的数据传输主要依靠 4G/5G 蜂窝网络、窄带物联网或者卫星通信等广域网技术来完成，保证即使在偏远地区也能将数据传送到远程平台。

平台层是整个架构的“大脑”，对网络层传来的海量数据进行汇聚、存储、处理、分析。本层一般基于云计算基础设施来创建，包括数据接入模块、数据库、大数据处理引擎、算法模型库。平台层除了要处理实时数据流实现远程监控之外，还要对历史数据进行深度挖掘和分析，用机器学习算法对农机作业效率进行评价、设备故障进行预测，并优化作业路径。它是底层硬件和上层应用的连接点，把原始数据转化成有价值的洞察和知识。

应用层是农业物联网价值的最终体现，直接面对终端用户，提供各种服务。通过电脑网页端或者手机 App 等用户界面查看农机实时位置、作业状态、历史轨迹和统计报表等信息。应用层包含农机调度、作业任务管理、故障报警、维修保养提示、农田信息管理等模块，目的在于提高农机手、合作社管理者或者政府监管部门的管理效率，优化资源配置，辅助科学决策。

（二）农机物联网的特点与挑战

农机物联网属于物联网技术在特定领域内的应用，它既符合物联网技术的一般范式，又因为农业生产特有的属性而表现出明显的特征，并且伴随着诸多严峻的挑战。这些特点与难题互相交错，一起决定着农机物联网技术方案设计与实施的方式。

农机物联网系统最突出的特点之一就是工作环境恶劣和复杂。农业机械长期在田间地头作业，要经受高温、高湿、粉尘、振动、化学品腐蚀等恶劣环境考验，所以感知层设备耐用性、稳定性要求很高。农机作业范围广，地理位置分散，经常处于网络信号不稳定甚至无信号的区域，给网络层的数据传输带来很大的困难。农机种类繁多、功能各异，造成数据类型、协议标准多种多样，给数据集成、管理带来复杂性。

面对这些特点，农机物联网的发展面临着多重挑战，具体可见下表：

农机物联网面临的主要挑战

挑战类型	具体描述	影响
成本投入	高性能、高可靠性的传感器、智能终端、网络服务等费用较高。	对于利润空间有限的普通农户和小型合作社，成本是主要制约因素，投资回报周期长，导致技术普及速度慢。
技术集成与标准化	不同厂商、不同型号农机及搭载传感器的整合存在复杂的协议兼容问题。	行业内缺乏统一数据标准，造成“数据孤岛”，影响信息互联互通和价值挖掘。
数据安全与隐私	农机作业数据涉及农户隐私、粮食生产信息，易受窃取、篡改、滥用。	可能造成巨大的经济损失和安全风险，保护用户隐私和商业秘密亟待解决。
运维服务	农机物联网系统需要长期的持续运维服务，而非“一劳永逸”。	广大农村地区缺乏专业技术人员进行及时故障排查与维护，影响系统长期稳定运行和用户体验。

从表中可以看出，农机物联网的普及和发展并非坦途，需要多方协作共同攻克这些难题。

（三）云平台与边缘计算

农机物联网体系结构当中，云平台 and 边缘计算不是互相替代的关系，而是互相配合、互相补充的关系，共同组成强大的、灵活的计算与数据处理体系。二者相结合，较好地解决了农机作业中实时响应和海量数据分析的双重问题，是推进智慧农业发展的一种重要计算模式。

云平台是农机物联网的中心枢纽，全局的数据存放在云平台里，云平台进行复杂的运算以及深层次的分析。它汇集了所有的农机历史作业数据、设备状态数据、相关农业环境数据，形成庞大的数据库。平台利用云计算强大的计算力来做复杂的机器学习、人工智能算法等，挖掘大数据。通过对长期作业数据进行分析，可以评价不同品牌、型号农机的作业效率、燃油经济性，给设备采购提供决策依据；还可以建立预测性维护模型，在农机关键部件出现故障之前发出预警，减少非计划停机时间，降低维修成本。

边缘计算就是将农机数据的计算放在农机数据源头附近，从而弥补纯云端计算在实时性方面的不足。尤其在农机自动驾驶、精准喷药等对决策实时性要求很高的情况下，如果数据要传送到云端然后再返回指令，产生的延迟会造成作业偏差甚至安全事故。边缘计算节点（安装在农机上的智能网关或者嵌入式控制器）可以直接对传感器采集到的数据进行本地处理，快速做出反应。视觉传感器得到杂草的图像之后，边缘节点可以立刻完成识别工作，不需要通过云端。该模式大

大减少了对网络带宽的依赖，在网络连接中断的时候也能独立完成智能作业，保证农机作业的连续可靠。云边协同架构下，云端做非实时的、长周期的大数据分析、模型训练，边缘端做云端下发的模型、指令的实时执行、短周期业务处理、决策，实现了计算资源的最优分配。

二、农机数据采集与传输

农机数据采集与传输，是把物理世界中的农机装备与数字世界管理平台联系起来的纽带。其效率、质量、安全性能的好坏直接关系到整个物联网系统运行的效果。它包括从多种传感器获得数据、选用合适的通信协议封装数据、使用相应的策略保证数据传输的安全、高效、低功耗。

（一）传感器数据采集协议

选择一个轻量、高效、可靠的农机物联网数据传输通信协议，对农机物联网数据传输来说是十分重要的一环。消息队列遥测传输协议由于其特有的设计思想以及良好的性能，在该领域里得到了广泛的应用。MQTT 是一种基于发布 / 订阅模式的消息协议，专门针对低带宽、高延迟或者不稳定网络环境而设计的，与农机作业环境特点不谋而合。

MQTT 协议最核心的优势就是轻量化、高效。协议头很小，最小的控制报文只有 2 字节，大大减少了网络开销，在带宽有限的蜂窝网络中尤其重要。与基于请求 / 响应模式的 HTTP 协议不同，MQTT 使用的是发布 / 订阅模式以及长连接方式，因此可以减少由于频繁建立和断开连接而产生的资源浪费，从而大大降低设备的功耗以及数据传输费用。在此模式下，农机上的传感器或者智能终端作为发布者，把采集到的数据（位置、速度、油耗）发布到某个主题上；远程监控平台作为订阅者，只需要订阅对应的主题就可以接收数据，从而实现了发布者和订阅者之间的解耦，提高了系统的灵活性和可扩展性。

（二）数据安全与加密传输

随着农机物联网的应用越来越广泛，数据安全问题也越来越突出。农机作业数据不但是农户生产隐私的载体，还会涉及区域性的粮食生产信息，一旦被窃取或者篡改，将会造成巨大的经济损失和安全风险。因此数据采集、传输、存储、应用全生命周期中建立完善的安全保障体系就显得尤为重要。

保证数据在传输过程中不被泄露、不被篡改的手段就是加密传输技术。目前

广泛采用的方案是利用 MQTT 等上层应用协议,在传输层安全协议的基础上对数据进行加密。TLS 协议在握手阶段就会创建起客户端(农机终端)和服务器(云平台)之间安全加密通道,在数据传输时使用加密技术对所有的数据进行保护,能够有效地防范中间人攻击、窃听等风险。除了传输层加密,对重要的数据进行应用层加密也是一种增强安全性的方法,即用 AES 等算法对敏感数据包再进行一层加密处理,即使传输通道被攻破,攻击者也很难轻易得到数据的明文信息。

身份认证属于数据安全的又一道重要防线。系统要保证接入平台的只能是合法设备,而访问数据的只限于授权用户。一般的做法就是给每台农机设备颁发唯一的数字证书或者密钥,设备和平台之间进行双向认证,验证双方的身份。同时平台层要建立基于角色的访问控制机制,给农机手、管理员、维修人员等不同的用户分配不同的数据访问和操作权限,从而最大程度上降低由于内部管理不善造成的数据泄露风险。

(三) 数据压缩与低功耗传输策略

在广阔的田野里,很多农机物联网终端都是使用电池供电,蜂窝网络流量也会产生持续的成本。因此,在保证数据有效性的前提下,减少数据传输量、降低设备功耗就成为农机物联网系统设计必须要解决的关键问题。数据压缩与低功耗传输相结合,是实现这一目的的主要方式。

数据压缩技术就是利用某种算法使原始数据变小,从而减轻网络传输负担,节约成本。对农机采集的数值型数据流采用差分编码等方式,只传输数据与前一个值的变化量,而不是完整的数值。对于图像或者视频等非结构化数据,可以使用已有的压缩标准(JPEG、H.264)。在边缘计算节点上对原始数据进行预处理和聚合,将一分钟内多次采集的传感器读数计算出平均值、最大值、最小值之后再打包上传,既可以压缩数据,又可以提取出具有代表性的特征信息。

低功耗传输策略就是从改善设备的通信行为来延长电池的续航。有效的办法就是采用事件驱动的非周期性报告方式,而不是固定的报告时间间隔。设备大部分时间处于低功耗休眠状态,只有农机启动或停止、作业参数超过预设阈值、进入或者离开某个电子围栏区域等事件发生时,才会被唤醒并上报数据。对周期性上报的“心跳”数据要按照农机实际作业的情况来确定上报频率,在高速作业时增大上报频率,在空闲或者停机时降低上报频率。利用窄带物联网等低功耗广域网技术,利用支持省电模式和非连续接收等方式,在没有数据传输的时候使设备

进入深度休眠，从而达到最大节能的效果。

三、农机远程监控与管理平台

农机远程监控与管理平台是农机物联网系统的大脑和指挥中心，它把前端采集的数据转换成可视化的信息和可执行的指令，是实现农机信息化、智能化管理的重要载体。一个功能齐全的平台可以大大提高农机作业效率，降低管理成本，辅助科学决策。

（一）平台功能模块设计

一个全面高效农机远程监控及管理平台，其功能设计要根据用户需求来确定，一般用模块化的方法来构建。平台核心功能模块一般由以下几部分组成：

1. 设备与资产管理模块，主要对所有的农机终端以及农机资产信息进行管理。包含农机终端注册、激活、在线状态监控、远程配置等各项功能，对农机品牌型号、购买时间、保养记录等静态信息进行记录，从而形成农机电子档案。

2. 实时监控和调度模块，用地理信息系统地图来显示全部的农业机械的实时位置、行驶路线、速度、工作状态等各方面的信息。管理人员据此进行作业调度，给农机手下达作业任务、优化路线，实现农机资源的动态最优分配。

3. 数据分析和报表模块：表现了平台强大的数据处理能力。对大量历史数据进行统计分析，生成单台农机作业里程、作业面积、工作小时、油耗等报表，同时也可以产生整个机队的利用率、效率评估等报表，给管理者提供量化决策的依据。

4. 告警及事件管理，用户可以设置各种告警规则，超速告警、进入或者离开禁区告警、长时间怠速告警、设备离线告警、传感器数据异常工况告警（发动机水温过高）。当触发规则的时候，系统就会通过短信、App 推送等方式通知相关人员。

5. 用户和权限管理：为保证系统的安全，本模块负责对不同的用户账号进行管理，给不同的用户赋予不同的操作权限，使不同的岗位人员只能访问并操作其职责范围内信息及功能。

（二）农机位置与状态实时监控

对农机进行位置和状态的实时监测，是平台最核心、最基本的功能，也是农机调度、作业监管、安全保障所必需的最直接的数据来源。该功能的实现需要农

机终端集成高精度定位模块，并能和农机自身的电控系统进行数据交互。

农机位置信息主要是由 GNSS 模块（兼容 GPS、北斗等）来获取。终端设备内部 GNSS 接收机持续接收卫星信号，解算出农机经纬度、海拔、速度、航向等信息，然后按一定频率上传到平台。平台收到这些坐标点之后在 GIS 地图上实时标绘出来，再将它们连接成线，就形成了农机的行驶轨迹。轨迹回放功能可以再现农机以往的行驶轨迹和作业区域，给作业面积核算、作业质量抽查等提供依据。

农机状态信息主要由农机自身的 CAN 总线提供。现代农机一般采用 CAN 总线技术来连接发动机、变速箱、液压系统等各个控制器单元。车载智能终端通过和 CAN 总线相连可以获取发动机转速、水温、机油压力、瞬时油耗、行驶里程、PTO 转速等诸多车辆信息。解析之后的数据与位置信息一起打包上传，使管理人员在远程就可以对农机的健康状况和作业工况了如指掌。当平台检测到发动机故障码或者参数异常的时候，可以及时发出警告，给预防性维护工作留出充足的时间。

（三）历史数据分析与报表生成

如果说实时监控解决了“现在在哪、在做什么”的问题，那么历史数据分析与报表生成就是回答“过去做得怎么样、未来怎样改进”的问题，是实现数据驱动决策的重要环节。平台长期积累的农机作业数据经过多层次、多维度的分析之后，就把原始数据转化成了具有商业价值的洞察。

平台可以产生各种各样的统计报表，有效地减轻了管理人员手工统计的工作负担。常见的报表有单台农机或者整个机队的日、周、月作业报表，内容包含作业时长、怠速时长、行驶里程、作业亩次等；油耗分析报表，记录加油量，利用 CAN 总线的油耗数据计算出百公里油耗或者每亩地油耗，用于成本核算和异常油耗筛查；作业效率报表，结合作业亩数和作业时长，评价不同驾驶员、不同型号农机的作业效率，作为绩效考核和设备选型的依据。

利用历史数据分析可以支持更高级的应用。通过农机在不同地块、不同作业深浅模式下的油耗、效率数据进行对比分析，找到最佳的作业参数组合。通过发动机、液压泵等部件的历史运行数据来建立模型进行分析，可以预测剩余寿命或者潜在的故障风险，从而实现从被动维修到预测性维护的转变。依靠数据所获得的信息最终会帮助农业经营者降低生产成本，提高生产效率，达到精细化经营的目的。

第四节 远程监控与数据管理

随着信息技术和现代农业的融合，农机电子系统也从以前的孤立作业单元，逐渐向网络化、智能化阶段发展。远程监控与数据管理属于智慧农业的重要部分，依靠物联网、大数据这些前沿技术，可以对农机作业过程展开实时感知，用数据来推动精准决策，并给予智能化的运维支撑。这就给农业生产效率的提高、资源调配的优化、设备可靠性的保证带来了前所未有的技术支持。

一、远程监控系统设计

远程监控系统是田间农机与云端管理平台之间的纽带，设计的好坏直接影响着整个农机智能化管理体系的效率和可靠性。一个好的远程监控系统需要考虑到硬件架构的稳定性、数据传输的实时性、可靠性、用户交互的便捷性，从而形成起一个高效、稳定、易用的云、管、端一体化监控体系。

（一）车载终端与服务器架构

现代农机远程监控系统核心就是建立稳定的车载终端和服务器架构。车载终端，一般称为 T-Box，是安装在农机上的黑匣子。它不是简单的定位设备，而是一个带有传感器接口、数据采集模块、无线通信模块和微处理单元的智能网关。该终端可以对农机在作业过程中产生的各种状态信息进行采集，通过 CAN 总线（控制器局域网）获得发动机转速、水温、油耗、作业部件状态、故障代码等车辆底层数据，并配合北斗、GPS 等全球卫星导航系统得到高精度的位置信息、速度和行驶轨迹信息。

服务器端一般采用分层分布式架构，可以满足大量的设备同时接入以及大量的数据处理。一般可以分为设备接入层、数据处理层、应用服务层等。设备接入层依靠高性能网关，同成千上万的 T-Box 形成安全稳定的长连接，并对终端上报的数据流做初步的解析。数据处理层使用消息队列实现削峰填谷，把原始数据清洗、转换、初步分析后，存入不同类型的数据库中。应用服务层通过一系列应用程序接口为上层应用提供数据查询、设备控制、告警推送等服务，支持网页端和移动端各项功能的实现。端云协同架构设计出保证田间到云端数据流转的基础，给精准管理和智能决策奠定基础。

（二）数据传输协议设计

农机远程监控系统当中，数据传输协议的选择以及设计，对于数据上报的实时性、可靠性还有系统功耗等方面都会产生较大的影响。考虑到农业作业环境复杂多变、网络信号不稳定、车载终端资源有限等原因，选择轻量级、低开销并且可以保证可靠传输的协议就显得十分重要。目前 MQTT 协议已经成为农业物联网领域里使用最多的协议之一。MQTT 采用发布 / 订阅的方式，相比传统的 HTTP 轮询方式可以大大节省网络带宽和终端电能。其代理架构使得设备与服务器之间可以解耦，一个发布者可以向多个订阅者发送消息，很适合农机状态广播、指令下发等场景。

协议设计要兼顾数据传输的可靠性以及效率。根据数据的重要程度选择不同的服务质量（Quality of Service, QoS）等级。对农机位置、核心工况等重要数据可采用 QoS 1（至少一次）或 QoS 2（仅一次）等级，以保证消息可以被正确地接收；对于一些非重要的日志信息则可以采用 QoS 0（最多一次）等级，在牺牲一定的可靠性的前提下换取更高的传输效率。数据包格式要精心设计，一般用 JSON 或者二进制格式对数据进行封装，二进制格式比 JSON 有更高的压缩率和更快的解析速度，可以节约带宽资源。协议中还要包含心跳机制来维持连接，检测终端是否在线，支持断线重连、离线消息缓存功能。网络发生短暂中断之后重新连接的时候，终端会把之前缓存的历史数据发送给服务器，从而保证整个数据流程的连续性。

（三）Web 端与移动端监控界面

Web 端、移动端的监控界面是农机远程管理系统同用户交流的窗口，直观性、易用性、功能完整性都会对用户的使用体验和管理效率产生影响。无论是面向合作社管理者的大屏 Web 系统，还是面向机手或者农场主的移动 App，核心目标都是用清晰、友好的方式呈现复杂的数据，给用户提供的便捷的操作方式。一个好的监控界面一般具有以下基本功能：

1. 实时状态监控，把所有的农机实时位置、工作轨迹、作业状态（作业中、空闲、行驶中）等重要信息集中到地图上。用户可以快速找到任何一台农机并查看其详细信息。

2. 历史数据查询与回放，可以回放农机的行驶路线和作业过程，用户可以选取某个时间段，在地图上再现农机作业的全过程，方便核算作业面积，分析作业

效率。同时还可以对历史数据进行油耗、里程、作业时长等统计查询。

3. 作业管理及统计分析，系统可以对每次作业地块、作业面积、作业时间等进行自动或者手动的记录，可以生成单机效率分析、车队作业量对比、油耗成本分析等多种维度的统计报表，给管理者提供决策依据。

4. 智能告警与维护提醒，农机出现故障代码、进入或离开电子围栏、发生异常震动的时候，系统就会用 Web 界面弹窗、App 推送、短信等多种方式，立刻通知相关人员。系统会根据累计工作时间或者行驶里程来提醒用户定期做保养，从而降低设备故障率。

界面设计要符合视觉传达设计的原则，用合理的布局、清晰的图标、舒适的色彩搭配，把重要的信息放在显眼的位置。移动端触控操作要简单易用，在田间地头也能方便使用。因此，用户不必到现场就可以对千里之外的农机群了如指掌，从而达到远程调度和管理的目的。

二、农机数据管理

农机作业时产生的数据量大，包括农机自身状态数据、作业质量数据、农田环境数据等，是一座待开采的“金矿”。高效的农机数据管理是开展远程监控的前提，也是进行大数据分析、优化农艺方案、实现精准农业、预测性维护的基础。因此建立科学的数据管理体系就显得十分必要。

（一）农机作业数据库设计

农机作业数据库是整个数据管理系统的核心，设计好坏直接决定着数据存储的效率、查询速度、扩展能力。由于农机数据具有多源异构的特点，数据库设计一般采用混合模式，即结合关系型数据库和非关系型数据库的优点。关系型数据库（MySQL、PostgreSQL 等）由于具有很强的事务一致性以及成熟的生态系统，适合存储结构化的基础信息，即农机档案（型号、出厂日期、所属合作社等）、用户信息、合作社信息、地块信息、作业计划等。此类数据的更新频率较低，但是对数据的一致性要求较高。

农机上报的实时状态数据，例如 GPS 轨迹点、传感器读数、CAN 总线数据等，具有典型的时序数据特征，即数据量大、产生频率高、写多读少。对这类数据使用专门的时序数据库 InfluxDB、TimescaleDB 等更有效率。时序数据库对数据写入、压缩存储、按时间范围聚合查询做了大量的优化，可以高效地存取海量的时序数

据。在数据库表结构设计上,应把农机唯一标识(车架号)设为主键,把时间戳设为排序键。数据模型中要包含位置信息(经纬度、海拔、速度)、工况信息(发动机转速、负荷率、油耗率)、作业参数(作业部件状态、作业深度/高度等)等关键字段,给后续的数据分析、可视化提供规整、统一的数据源。

采用该种混合数据库结构,既可以有效地把静态的实体关系数据和动态的海量时序数据分开,又可以保证核心业务数据的完整性、一致性,并且可以满足物联网数据高并发写入和高效查询分析的要求。给上层应用快速开发和大数据分析功能的拓展打下了坚实的数据基础,是建立可扩展、高性能农机数据管理平台的重要一步。

(二) 数据的存储、查询与备份

农机产生的海量数据洪流,必须要有完整的数据存储、查询、备份策略来保证数据的长期可用性、安全性、可追溯性。数据存储的方式要考虑数据生命周期的管理。一般用分级存储方法来区分热、温、冷数据。实时写入且查询频率高的热数据(过去一周的轨迹、工况数据)保存在高性能固态硬盘或者内存数据库中,可以达到快速查询的目的。随着时间的推移,查询频率降低,数据可以迁移到机械硬盘里,成为温数据。对于超过一年甚至更长的时间段的历史归档数据,即所谓的“冷”数据,可以压缩之后存入成本较低的对象存储服务或者离线磁带库中。

高效的数据查询是发挥数据价值的一个环节。除了依靠时序数据库自身的查询优化外,还需要建立合理的索引机制。在地理空间数据上建立R树或者GeoHash索引,可以大大加快地理位置范围查询的速度,比如查询某地块内所有的历史作业轨迹。对复杂的分析查询可以利用大数据处理引擎,依靠其分布式计算能力对大量的数据进行批处理或者流式处理,进而深入挖掘出农机作业效率、燃油消耗模型、区域作业热力图等复杂的指标。数据备份与恢复属于数据安全的最后一道防线。必须制定严格的备份计划,即每日增量备份、每周全量备份。备份数据要异地存放,避免数据中心因自然灾害等原因造成单点故障。定期开展恢复演练,保证备份数据的可用性以及恢复流程的有效性,在系统出现数据丢失或者损坏的情况下,可以迅速将系统恢复到正常状态,最大程度地减少损失。

(三) 数据可视化技术(图表、地图)

数据可视化就是将抽象的农机数据用图形、图像的形式表现出来,是人和数据之间交流的重要桥梁。在现代农业管理中,使用丰富的可视化技术,管理者可

以很快地发现数据背后隐藏的规律和问题，从而做出更加科学的决策。地理信息系统对于农机数据的可视化来说是必不可少的。在电子地图上叠加农机实时位置、历史轨迹、作业区域热力图等信息，管理者就能对整个车队的位置、动态一目了然。用不同的颜色的图标表示不同作业状态的农机，可以清楚地看到设备利用率。利用 GIS 的空间分析能力，可以将土地分块图、土壤肥力图、作物生长情况遥感图等农田信息图层叠加到农机作业数据上，对作业效果进行评价和分析，最终实现“一张图纸式”的精准管理。

除了地图可视化，各种统计图表也是分析数据的重要方法，参见下表。

常见农机数据可视化图表及其应用

图表类型	适用场景	展现能力
折线图	农机油耗、温度等参数随时间变化	趋势分析、异常波动发现
柱状图	不同农机、机手、作业季的效率对比	绩效评估、资源优化
饼图	作业类型、油耗构成等比例分布	结构分析、占比洞察
仪表盘	实时速度、转速、负荷率等主要指标	实时监控、状态概览
热力图	作业区域分布、高负荷区域识别	空间分析、模式发现

从上表可以看出折线图能较好地表现农机油耗、发动机温度等参数随时间变化的趋势，容易找出异常波动。柱状图、饼图常被用来对比不同农机、不同机手、不同作业季的效率、里程、工作时长，从而对绩效进行评价以及对资源进行优化。仪表盘式组件可以实时显示农机当前速度、转速等主要指标，带来很强的监控感。

这些图表、地图大多使用 ECharts、Mapbox 等前端可视化库在 Web 或者移动端实现，可以提供丰富的图表类型以及强大的交互功能。用户用缩放、平移、点选、筛选等方式可以从不同的角度、粒度去探索数据。最后，一个好的可视化系统可以把大量的、枯燥的数据变成生动的、容易理解的信息图，管理者因此可以运筹帷幄，真正地把数据用来创造价值。

三、远程故障诊断与维护

随着农机电子化程度越来越高，复杂性越来越大，传统的故障排除方式已经不能满足高效、低成本运维的要求。通过利用物联网和大数据分析等技术进行远程故障诊断、远程维护，由原来的“被动维修”变成了现在的“主动预测、快速应对”。通过远程读取、分析故障信息，预测潜在问题，远程软件更新，大大提

高农机的可靠性、出勤率，大大减少维修成本、停机损失。

（一）故障码的远程读取与分析

远程故障码读取分析属于快速反应，精准修理的第一步。现代农机电控单元按照 SAE J1939 等标准的 CAN 总线协议工作，当系统出现异常时，就会产生一个标准的故障诊断码。车载 T-Box 监听 CAN 总线来获取实时的故障码和故障发生瞬间的车辆状态参数，也就是冻结帧数据。捕获到故障码之后，T-Box 就会立即把故障码上传到云端服务器。

云端平台收到故障码后，就会马上进行解析和处理。平台内置的故障码知识库可以将类似“SPN 110, FMI3”这样的代码转换成易于理解的故障描述，比如发动机冷却液温度传感器电压偏高。系统会根据事先设定的规则对故障进行分级。对于严重影响到安全或者可能造成设备损坏的紧急故障，系统会采用 App 推送、短信、电话等多种方式第一时间通知机手和管理人员。一般性的故障会在维保工单系统中自动创建记录。

系统可以集成专家系统或者知识图谱。当出现一个故障码的时候，系统除了给出故障描述外，还会给出故障可能的原因、排查步骤以及维修建议。给一线维修人员提供强有力的技术支持，经验不足的技术员在指导下也可以很快找到问题。服务中心专家不需要到现场也能在后台看到车辆的历史故障信息，可以在远程会诊的时候指导现场工作人员完成修理工作，大大缩短了诊断时间，提高了首次修复率。

（二）基于数据的预测性维护

以数据为依据的预测性维护，是农机运维由事后补救到事前防范的革命。它并不是在等故障发生后再去检测，而是在农机运行的时候对数据进行连续监测，用机器学习、大数据分析等方法预测未来将要出现哪些故障，然后按需做修理工作，从而最大程度减少非计划停机时间、降低维修成本。

1. 关键部件健康状况评价，根据发动机、液压系统、变速箱等主要部件的传感器数据（温度、压力、振动、转速）建立部件健康状况模型。当某个参数的长期趋势偏离正常的基线，或者出现异常的波动模式的时候，算法就会发现潜在的衰退信号，并对部件的健康状态进行打分。

2. 故障预测和剩余寿命估算：用历史故障数据和运行数据来训练机器学习模型（支持向量机、随机森林或长短期记忆网络 LSTM 等），使它学会正常状态到

故障状态的演变模式。该模型可以对新数据进行实时运行，当发现与已知故障模式相似的早期特征时，就可以预测出某种故障发生的概率，也可以估计出关键部件剩余使用寿命。

3. 智能维保决策支持系统预测某个部件故障风险较高的时候，就会产生一份维保建议，提前告知管理人员。维保建议会给出要更换的备件，还会按照农机作业计划、备件库存情况给出最佳维修时间窗口的建议。主动式维护策略可以防止农忙期间由于设备突然停机造成的巨大损失，也可以使运维资源得到最好的利用。

实行预测性维护以后，农机管理就由被动的“救火队”转变为积极主动的“保健医生”，从而大大提高设备的综合效率和机队整体可靠性。

第九章 农业机械电子系统集成与测试

现代农业机械电子系统是传感器技术、控制技术、通信技术和信息处理技术相结合的综合体。本章主要对本章需要使用的电路进行整合，设计一个集成系统，并进行系统测试以保证系统正常工作，满足本章的系统性能需求，为精准农业、智慧农业做好硬件技术支撑。

第一节 系统集成方法

系统集成就是将各个独立子系统或者模块，用标准接口和统一架构把它们巧妙地组合成协同工作的整体。农业机械领域的电子模块，就是导航、控制、传感、执行等电子模块的有机融合，实现复杂自动化作业功能。其要义是保证各个部分之间信息畅通无阻、控制准确。

一、系统集成的层次与流程

系统集成并不是简单的把各个部件堆叠在一起，而是具有层次化、结构化的从硬件到软件、单个模块到整个系统的严谨的流程和规范。有效的集成是实现系统功能、保证系统稳定可靠的基础，也是决定农业机械整机智能化程度和作业效率的重要因素。

（一）硬件集成：模块化设计与接口连接

农业机械电子系统的硬件集成，从本质上来说，就是将各种功能的电子控制单元、传感器、执行器、人机交互设备等物理实体，用总线和连接器巧妙地组合成一个有机的整体。模块化设计是硬件集成的主要思想，把复杂的系统拆解成功能独立的标准模块。导航系统、电液控制系统、作物监测系统等可以分别设计成独立的模块。该种设计方法可以简化系统设计的过程，也可以大大增加系统灵活性、可维护性。当某项功能需要升级或者更换的时候，只需要更换相应的模块，而不需要对整个系统重新设计，这对于快速响应市场需求和技术迭代来说十分

重要。

硬件集成的关键就是接口的连接。各个模块间的连接都要按照电气标准和机械标准来实现，保证信号传递的可靠性和物理上的牢固。使用标准化的接口可以使不同的供应商提供的模块即插即用，从而大大简化装配和维修工作。硬件集成时要充分考虑电磁兼容性，采用合理的布线、屏蔽、接地方式来防止各个电子模块之间互相干扰，在拖拉机、收割机等强振动、多尘、高湿的田间恶劣环境下，保证整个电子系统稳定可靠地工作。

硬件集成一般是从系统总体方案设计开始，确定各个硬件模块的功能和性能指标。接下来进行模块选型或者设计，按照模块间通信需求和物理布局来设计线束、连接方案。通过样机装配、测试来验证硬件集成是否正确可靠。在整个过程中文档化管理十分重要，对每个模块的规格、接口定义、连接方式等都要详细记录，为以后的软件设计、系统调试和维护提供清楚的依据。

（二）软件集成：模块化编程与接口调用

软件集成就是把分散的、独立的软件模块组合成统一、协同工作的应用系统的过程。现代农业机械中软件起着决定性的作用，它决定设备的功能逻辑和智能行为，软件集成质量的好坏直接影响整机作业精度和自动化程度。模块化编程是软件集成的基础，把复杂的软件系统按照功能划分成高内聚、低耦合的模块，例如数据采集模块、决策控制模块、通信管理模块、用户界面模块等。每个模块都完成一定的工作，通过定义好的应用程序编程接口与其它模块进行交互，大大提高了代码的可读性、可重用性、可维护性。

软件集成的核心就是接口调用。接口是模块之间数据交换的格式、通信协议和调用规则的明确定义。设计良好的接口应该具有稳定性、易于理解的特点，它可以隐藏模块内部实现的复杂性，只暴露出必要的功能。采用标准化接口调用，不同团队、不同公司开发的软件模块可以顺利地集成在一起，对构建开放的农业机械生态系统有着重要的意义。按照 ISOBUS 标准的拖拉机软件系统可以实现各个厂家农具控制软件的无缝集成，达到拖拉机和农具之间数据共享、协同控制的目的。

（三）软硬件联调与系统联调

软硬件联调就是软件装载到目标硬件平台上，检验软件和硬件能否协同工作的重要环节。本阶段的主要目的就是保证底层驱动程序可以正确地控制硬件，传

传感器数据可以被软件准确地读取,控制指令可以精准地驱动执行器动作。调试时一般会使用在线仿真器、逻辑分析仪、示波器等专业的设备,并同步观测硬件信号和软件执行情况来找出软硬件交互引起的问题。在调试自动驾驶系统的时候,要检验导航控制器发出的转向指令能否经由 CAN 总线正确地传递给转向执行机构,进而带动车轮转动到设定的角度。需要软硬件工程师之间紧密合作、共同完成。

系统联调属于更高层次的集成测试,它把所有的子系统连接起来,形成一个完整的农业机械电子系统,在模拟或者真实的作业环境下进行全方位的测试。系统联调的重点是检验各个子系统能否协同工作,整个系统能否作为一个整体完成预期的功能和性能指标。在联合收割机联调的时候,要检测谷物损失监测系统、割台高度控制、发动机负载管理等系统是否可以协同工作,在保证收割质量的基础上,达到最高的作业效率和最低的燃油消耗。

系统联调一般分为实验室环境下半物理仿真测试和真实的田间试验。半物理仿真测试就是利用计算机模拟真实的工作环境和传感器信号,可以安全、高效地对控制系统在各种极端工况下做出的反应进行测试,大大缩短开发周期。最后进行的田间试验,是对整个系统在真实使用环境中的最终验证,经过长时间、多工况的运行,发现系统存在的潜在设计缺陷和可靠性问题,保证产品交付用户后能够稳定可靠地工作。

二、系统接口标准化

接口标准化是达到现代农业机械电子系统模块化、开放性、互操作性的基础。它用统一的技术规范对硬件的物理连接、电气特性、软件通信协议和数据格式作出规定,使不同厂家、不同功能的电子模块可以很容易地集成在一起并协同工作。这大大推动了技术创新以及产业生态的发展。

(一) 硬件接口的电气与机械标准

硬件接口的标准化,即保证各个电子模块之间可以可靠地进行物理连接和信号传输。它大体分为电气标准和机械标准两个部分。

1. 电气标准对接口的信号类型(模拟信号、数字信号、电源)、电压水平、电流承载能力、阻抗匹配、信号时序要求等作出规定。按照统一电气标准,可以有效防止由于电平不同而导致的信号失真或者元件损坏,保证数据传输的完整性。车载网络中广泛使用 CAN 总线,它对差分信号的电压范围有严格规定,可以提

高抗干扰能力。

2. 机械标准对连接器的物理尺寸、引脚布置、防护等级、锁定方式、耐振动和耐冲击性能等都作了规定。标准化的连接器可以使得不同供应商的设备即插即用，大大简化了安装、维修的工作。对于农业机械这样高振动、多尘、潮湿的恶劣工作环境来说，坚固可靠的机械连接和高防护等级对保证系统长期稳定运行十分重要。符合一定标准的防水防尘连接器可以防止水分、灰尘进入，从而避免电路短路或者接触不良。

（二）软件接口的通信协议与数据格式

软件接口标准化主要是通信协议、数据格式的统一。在复杂的农业机械电子系统中，几十个甚至上百个控制器、传感器、执行器要实时交换信息，如果没有统一的“语言”，系统就不能协同工作。通信协议对数据传输的规则做了规定，即数据的寻址方式、传输速率、错误检测方法、网络管理等。目前，农业机械领域最常用的两种 CAN 总线通信协议标准是 SAE J1939 和 ISO 11783。ISOBUS 不但是拖拉机和农具之间通信的标准，而且实现了虚拟终端的功能，使操作手可以在一个显示器上对所有的连接设备进行监控和控制，大大简化了驾驶室的布局和操作。

数据格式标准化即确定交换信息的内容以及结构。ISOBUS 标准对拖拉机速度、发动机转速、GPS 位置、农具工作状态等数百种参数的编码方式、单位、分辨率都做了详细的规定。统一的数据字典可以保证不同的厂商设备可以正确地解析、使用网络上其它设备的信息。支持 ISOBUS 的播种机可以从拖拉机的 GPS 接收机获得准确的位置信息，根据事先设定的处方图来自动调节播种量，实现精准农业作业。统一的通信协议以及数据格式对设备互操作性、数据共享、协同工作起到决定性的作用，是智慧农业发展所依靠的重要技术。

（三）模块化、插件式集成思想

模块化、插件式集成思想是系统设计理念上的一次飞跃，把复杂的系统看作一个可以扩展的平台，不同的功能通过标准化的接口作为模块接入系统。这种思想的本质就是关注点分离，也就是把系统的基础平台和具体的功能应用解耦，从而达到高度的灵活性和可重用性。在这种结构下，农业机械的电子系统就相当于一块带有标准接口的“主板”，导航、变量施药、产量监测等高级功能就相当于可以即插即用的“板卡”。

这种集成思想有诸多益处。可以大幅度提升新功能开发、部署的速度,由于开发者只需要考虑自己的功能模块设计,而不需要去考虑底层系统复杂的集成问题。它给用户赋予了很高的定制化水平,农场主可依照自身的作业需求,像搭积木一样挑选搭配不同的功能模块,创建出最契合自己的智能农机系统。开放平台也吸引了大量第三方开发者加入进来,形成一个有活力、能持续发展的创新生态,不断催生新的应用与服务,推动整个农业技术装备行业的进步。模块化、插件式集成有利于降低系统全生命周期总费用,即开发集成前和维护升级的总费用。

三、集成中的常见问题与对策

系统集成过程不是一帆风顺的,把来自不同的供应商、采用不同的技术、硬件和软件模块整合成一个稳定可靠的系统的过程中会遇到各种问题。这些问题大体上集中在接口兼容性、资源竞争、时序配合等方面,需要系统工程师凭借丰富的经验以及行之有效的解决办法去一一解决。

(一) 接口不匹配与信号干扰问题

接口不匹配属于系统集成时常常出现的问题之一,它会表现出物理连接器不匹配,电气电平不匹配,或者通信协议不匹配。物理接口不匹配一般用转接器或者重新设计线束来解决,但是电气和协议层面的不匹配就更复杂了。以控制器需要接收 5V TTL 电平信号为例,如果将输出 12V CMOS 电平的传感器接在控制器的输入端口上,就会造成控制器输入端口永久损坏。根本的解决办法就是设计阶段严格按照统一接口标准。无法避免使用异构接口的模块时,必须设计专门接口转换电路或者软件网关进行电平转换或者协议翻译。

信号干扰会严重影响系统稳定性,农业机械这样电磁环境复杂的应用场景中更加明显。发动机点火系统、大功率电机以及无线通信设备等都会产生电磁噪声,这些噪声会以传导或者辐射的方式耦合到敏感的信号线缆上,造成数据传输错误或者控制器死机。对抗信号干扰的方法主要有遵循电磁兼容设计原则,即对电源线、信号线进行滤波处理来抑制传导干扰;合理布置线束,高频数字信号线和模拟信号线分开布设以避免交叉耦合;对关键模块和线缆采用金属外壳或者编织网屏蔽来阻挡外部辐射干扰;设计良好的接地系统,为干扰电流提供低阻抗的泄放路径。

信号完整性分析也很重要,高速信号传输中布线不恰当会使信号发生反射、串扰和衰减影响通信质量。利用仿真工具对信号传输路径进行分析与优化,可以

保证信号到达接收端时波形依然清楚。CAN 总线设计时，在总线两端要加 120 欧姆的终端电阻，消除信号反射，保证通信的可靠性。

（二）软件冲突与资源竞争问题

复杂的嵌入式系统当中当多个软件模块或者任务同时在运行的时候，就会产生软件冲突和资源竞争问题。软件冲突一般是指由于命名空间污染、库版本不兼容或者全局变量滥用所造成的程序运行异常。例如两个不同的软件模块定义了同名的全局函数，链接时就会发生冲突，其中一个不能正常工作。采用模块化编程思想对内部实现进行封装，严格地定义命名规范和接口，可以有效地避免冲突。

资源竞争现象在任何系统中都是存在的，在 RTOS 环境下更是如此。多个任务可以访问同一个共享资源，共享资源可以是共享内存区、串口这样输入输出设备，也可以是数据结构。没有有效的并发控制机制，就会导致数据损坏或者系统死锁。比如一个任务正在更新包含多个字节的配置参数，这时被另一个高优先级的任务打断，这个高优先级的任务又去读或者修改这个参数，那么它就可能读到不完整或者不一致的数据。

解决资源竞争的主要方法是采用同步机制，即互斥锁、信号量或者临界区。当一个任务要访问共享资源的时候，它首先要获得该资源的锁。如果锁被其他的任务持有，该任务就会进入等待状态，直到锁被释放为止。这就保证了在任何时候只有一个任务可以访问共享资源，从而保证数据的一致性。合理使用这些同步工具可以编写出健壮的多任务程序。但是过度使用锁会降低程序性能或者引发优先级反转等现象，所以必须仔细设计，只在需要的时候才保护最小化代码段。

第二节 功能测试与性能评估

对现代农业机械电子系统开展功能测试及性能评定，是保证其在繁杂的田间环境里稳定、可靠、高效运作的重要环节。本节主要从测试用例设计、核心性能指标评价、多层次测试环境搭建三个方面，对系统开发和验证的全过程进行阐述，目的是给系统开发和验证提供理论指导和实践依据。

一、功能测试用例设计

功能测试是判定电子系统是否达到预期要求的根本手段。完备规范的测试用

例是功能测试成功的前提，也是决定产品质量好坏的关键。设计过程要严格使用逻辑思维，并且对农业应用场景有深刻的认识，保证所有的功能路径都被覆盖。

（一）基于需求的功能点分解

需求驱动的功能点分解是测试用例设计的开端，它的任务就是把复杂的、宏观的用户需求和系统规格说明逐层拆解成清楚、独立、可测试的功能点。这个过程要求测试工程师不但是文档的解释者，更是农业作业逻辑的领悟者。拿自动导航系统来说，它的顶层需求“实现高精度自主路径跟踪”可以拆解成路径规划、控制器初始化、传感器数据接收、执行器指令发送、状态监控、异常报警等具体模块。

每一个功能模块都需要继续细化。以路径规划为例可以再细分为直线路径生成、曲线路径生成、地头转弯路径自动生成、障碍物避障路径重新规划等子功能点。精细化的分解方法就像一棵功能树，根部是宏观需求，树叶是最基本的可测试单元。它可以保证测试的全面性，有效地防止了因为需求理解偏差造成功能缺失的情况。

完成功能点分解之后，就要对每个功能点的输入条件、处理逻辑以及预期输出进行确定。输入条件可以是操作指令、传感器信号、系统参数设置等；处理逻辑为功能点内部运算、决策的过程；预期输出就是系统执行功能后状态变化、界面显示或者对执行器发出的控制指令。用这种方式把抽象的需求转化成一系列具体的“如果输入 A，那么系统应该执行 B 并输出 C”的明确描述，为之后具体测试用例的编写打下了坚实的基础。

（二）正常、异常、边界用例设计

在功能点分解的基础上，测试用例的设计要覆盖所有的可能工作场景，一般通过设计正常、异常、边界这三种用例来完成。它们共同构成了一个完整的测试集，用以检验系统在预期内外的各种情况下所表现出的行为，从而尽可能地发现潜在的软件缺陷。

正常用例又称为正向用例，主要用来检测系统在理想或者常规情况下核心功能是否按照预期进行。该用例模拟的是用户最常用的操作流程和典型的工作环境。测试自动喷洒系统时，可以设计一个用例，在设定的标准速度、喷幅下，系统根据处方图正确打开或者关闭对应的喷头。正常用例的通过可以证明产品功能已经实现。异常用例，又叫反向用例，主要用来模拟各种非预期的错误操作或者环境

条件，从而检验系统的容错性以及鲁棒性。设计异常用例要具备一定的破坏性思维，具体包括：

1. 输入非法数据，如向控制器发送格式错误或超出范围的指令。
2. 模拟硬件故障，比如在导航过程中突然断开全球导航卫星系统的信号，看系统能否安全停车并发出警报。
3. 模拟外部环境干扰，如在视觉识别系统中引入强光或阴影，测试算法的适应性。

边界用例属于一种特殊的、高效的测试手段，主要对输入值的边界或者数据范围的临界点进行测试。大量实践证明程序错误最容易出现在这些边界处。对于控制施肥量的功能来说，它的有效输入范围为每公顷 50 公斤到 500 公斤。边界用例应该包含 49.50.0、50.1、499.500.0、500.1 等值，检验系统对有效范围的判断是否正确，处理逻辑是否正确。经过精心设计这三种用例之后，就可以构建起一个逻辑严密、覆盖面广的测试体系，从而有效地提高缺陷发现的效率，全面地改善产品的质量。

（三）测试用例的管理与执行

测试用例的管理与执行，是把测试设计转化为实际的测试活动的环节，是对测试用例进行组织、评审、执行、跟踪和维护的过程。有效的管理可以保证测试过程的规范性、可重复性、可追溯性，是实现高效测试的组织保证。一般情况下测试用例会集中到测试管理工具里，给每一个用例赋予唯一的标识符，详细记录它的前置条件、执行步骤、预期结果、测试数据、重要程度和所属功能模块。

执行测试前一般会召开用例评审会，邀请开发工程师、产品经理、资深测试工程师参加，对用例的正确性、合理性、覆盖度进行审查，以便在测试执行之前发现设计上的不足，避免无效的测试投入。测试执行阶段，测试工程师根据用例步骤进行操作并详细记录实际结果。当实际结果与预期结果不一致时，说明发现了缺陷。此时需要详细记录复现步骤、记录日志文件、截图或者视频等资料，并提交到缺陷管理系统中，以便开发人员找到并修复问题。缺陷修复之后需要对相关测试用例做回归测试，保证问题被解决并且没有引入新的缺陷。测试用例本身也需要不断地维护，当产品需求发生变化或者功能被更新的时候，需要对相关的用例进行更新、补充或者废弃，使测试用例集和产品功能保持同步更新。

二、系统性能评估指标

性能评估是对农业机械电子系统在动态工作条件下表现好坏的评判，关注的不是功能有无，而是功能实现的效果。对系统的各项性能指标进行量化分析可以对系统的工作效率、精度、可靠性做出客观的评价，给系统的优化、选型提供依据。系统主要性能指标如下表所示。

农业机械电子系统关键性能指标表

指标类别	具体指标	衡量标准 / 定义	典型影响因素	评估方法
实时性	响应时间	系统从接收输入到产生输出的全部时间延迟	传感器延迟、数据传输延迟、控制器计算延迟、执行器响应延迟	埋点记录关键节点时间戳，统计最大、最小、平均响应时间
	任务执行周期	周期性任务的执行频率及其抖动情况	控制算法复杂度、处理器负载、中断管理	统计分析周期稳定性及抖动范围
精度	定位精度	系统获取自身或目标位置信息的准确程度	GNSS 信号质量、差分校正、传感器噪声、环境遮挡	采用更高级别差分 GNSS 基站或全站仪作真值参考，统计均方根误差、圆概率误差等
	控制精度	系统输出量与期望设定值的吻合程度	传感器测量误差、控制算法优劣、执行器响应特性、外界环境干扰	使用流量计、编码器、测速仪等专用传感器测量实际输出，并与设定值进行比较分析
稳定性	平衡保持能力	系统受到内外扰动时，维持或快速恢复平衡工作状态的能力	控制系统设计、软件鲁棒性、硬件抗干扰能力、电源波动	长时间疲劳试验，观察控制输出振荡、发散及软件死机、重启、内存泄漏等现象
可靠性	平均无故障时间	产品在规定条件下和时间内完成预定功能的平均间隔	元器件质量、电路设计、散热、环境适应性	疲劳试验、加速老化试验，统计故障间隔时间
	平均修复时间	产品发生故障后，平均修复所需的全部时间	模块化设计、诊断能力、维修便利性、备件供应	记录维修时长，统计平均修复时间

(一) 实时性

实时性是评价农业机械电子控制系统动态性能好坏的主要标准，影响着作业的及时性和有效性。它主要是用响应时间和任务执行周期来衡量的。响应时间即系统从接收到输入信号或者事件触发开始，到作出相应处理并产生输出为止的全

部时间延迟。农业机械中用到的传感器感知延迟、数据传输延迟、控制器决策计算延迟、执行器响应延迟都属于此类。对一套变量喷药系统来说，响应时间就是摄像头识别杂草到相应的喷头开始喷洒的时间间隔。时间必须足够短，才能保证机具前进过程中准确地命中目标。

任务执行周期就是系统中周期性任务的执行频率。许多控制任务，比如电机转速调节、液压阀门位置闭环控制等，都需要按照一定的频率不断刷新。周期的稳定性，尤其是抖动大小，也是衡量实时性的一个因素。稳定的、高频次的控制周期可以保证控制过程的平稳、精确。评价实时性时，要在系统中布置埋点，用高精度时钟来记录各个关键节点的时刻戳并统计分析得到最大、最小、平均响应时间和周期抖动范围，以保证可以满足各种农业作业场景对快速响应的严格要求。

（二）精度

精度是衡量现代农业机械电子系统作业质量好坏的标准，它直接影响精准农业理念能否成功实现。精度指标分为定位精度和控制精度两种，二者互相配合，共同保证作业的准确性。定位精度是指系统获取自身或者目标位置信息的准确性，是实现自动导航、路径跟踪、地理信息系统应用等的基础。一般用统计误差来表示，即均方根误差、圆概率误差等。厘米级的定位精度对于播种作业来说，是保证作物行距均匀、充分利用土地的前提。

控制精度即系统输出量（拖拉机转向角、播种机下种速率、喷洒系统流量等）和期望设定值的符合程度。它反映的是整个控制回路，即传感器、控制器算法、执行器三者综合的性能。控制精度会受到传感器测量误差、控制算法的好坏、执行器响应特性的好坏、外界环境干扰等多种因素的影响。施肥作业的精度就是实际施肥量和处方图上目标施肥量之间的差值。为了提高控制精度，需要从算法方面引入 PID 控制、模糊控制或模型预测控制等先进的控制理论，在硬件上选择高精度的传感器和响应速度很快的执行机构。

评价精度要依靠高精度的测量仪器。评价定位精度时，一般采用更高一级的差分全球定位系统基站或者全站仪作为真值参考；评价控制精度时，则需要用流量计、编码器、测速仪等专用传感器测量实际输出，再与设定值进行比较分析。对各种工况下大量重复试验结果进行统计分析，得到误差分布情况，从而对系统精度进行评价。

（三）稳定性与可靠性指标

稳定性、可靠性是衡量农业机械电子系统长时间、复杂、恶劣的田间环境下保持功能、性能的重要能力，是产品能否成功商业化、赢得用户信赖的根本。稳定性指的是系统受到内外扰动的时候，能否保持或者迅速恢复到平衡的工作状态。稳定性要求控制系统输出没有持续的振荡或者发散，可以平稳跟踪给定值。电子系统整体稳定性的另一表现就是软件运行是否稳定，即是否会发生死机、重启、内存泄漏等现象。

可靠性是一个更广泛的概念，用概率来衡量产品在规定的条件下和时间里完成预定功能的能力。评价可靠性指标有两个，MTBF、MTTR 各为一个。平均无故障时间越长，系统越可靠，发生故障的次数就越少。平均修复时间越短，则系统发生故障后越容易被修复，可用性也就越高。

对系统稳定性、可靠性进行评价并加以改进，需要做一系列的严格测试。长时间疲劳试验，模拟典型工况下连续运行几百到几千个小时来发现偶然性、损耗性的故障。环境适应性测试也不能忽视，因为农业机械工作环境一般比较恶劣，会受到剧烈的振动、冲击、极端的高低温变化、潮湿、粉尘、电磁干扰等影响。因此必须在专门的环境实验室内对电子系统进行振动试验、高低温循环试验、盐雾试验、电磁兼容性试验来检验硬件设计的鲁棒性。采用综合性的测试手段，可以发现设计中存在的薄弱环节，从而对设计进行有针对性的改进，开发出真正能经受田间严酷考验、稳定可靠的电子系统产品。

三、测试环境搭建

为了对农业机械电子系统进行全方位、高效的功能检验和性能评价，就必须创建起多层次、虚实结合的测试环境。完善的测试体系一般由实验室半实物仿真测试、真实的田间试验、配套的测试仪器与设备三部分组成，三者一起形成了从开发调试到最终验证的完整闭环。

（一）实验室半实物仿真测试平台

实验室半实物仿真测试平台，又叫硬件在环仿真平台，是现代复杂电子系统开发与测试过程中不可缺少的高效工具。它把真实的硬件控制器和虚拟的计算机模型融合起来，形成一个既可以体现真实物理特性，又具有很强的可控性和可重复性的测试环境。该平台中真实的电子控制器（自动驾驶控制器、作业机具控制

器)为被测对象,而其外部环境即农业机械的动力学模型、传感器信号、执行器特性、整个作业场景(地形、作物分布)等,则由高性能的实时仿真计算机用数学模型来模拟。

其最大优势就是安全、高效并且支持早期干预。在开发初期,甚至样机还没有制作出来的时候,就可以对控制器的硬件、软件进行全方位的功能、性能测试。测试人员可以在实验室中模拟高速行驶时突然刹车、传感器突然失效、执行器卡顿等极限工况和危险情况,既不会损坏昂贵的物理样机,也不会发生安全事故。仿真环境可以准确地再现,出现问题之后,可以迅速再现故障场景,极大地方便了问题的定位和调试。半实物仿真平台可以自动执行大量的测试用例,完成回归测试、耐久性测试等,有效地缩短开发周期,降低测试成本。

(二) 田间试验环境与条件

虽然实验室仿真测试功能很强,但是它不能代替真实的田间试验。田间试验是检验农业机械电子系统在最终实际应用环境中综合表现的不可或缺的环节,是产品定型和走向市场的“最终大考”。真实的田地环境具有复杂性、不确定性、多变性等特点,数学模型不能完全精确地模拟出来。土壤质地变化对于耕作部件阻力的影响、作物形态多样性给视觉识别算法带来的挑战、泥泞湿滑地面上车辆的动态响应、多变的无线信道给通信系统带来的干扰等,这些都是仿真难以完全覆盖的。

为了保证田间试验的科学性和有效性,必须对试验环境和条件做出周密的计划与选择。应根据测试目的选择具有代表性的试验场地,测试播种机时可以选取沙土、黏土等不同类型、经过免耕、旋耕等不同前期处理的田块。试验期间还要记录关键的环境参数即天气状况(温湿度、光照强度),土壤参数(含水率、紧实度)、作物信息(品种、生长时期)等,给试验结果分析提供依据。

试验组织要标准化,制定详细的试验方案、确定测试流程、设置作业参数、规定数据采集要求和评价标准。测试自动驾驶系统时需要事先用高精度设备标定基准路径,试验后用实际行驶轨迹与基准路径的偏差来评价精度。只有经过真实多样田间环境的充分且规范的试验,才能暴露系统与真实物理世界交互时可能出现的问题,从而保证系统在交付用户之前已经具有足够成熟可靠的性能。

(三) 测试仪器与设备选型

无论是实验室仿真测试,还是田间试验都需要很多专业测试仪器、设备。正

确选择并使用这些工具,是得到准确、可靠的测试数据的前提。仪器设备种类繁多,按用途分。

1. 数据采集和记录设备,这是测试系统最基本的组成。它一般由多通道数据采集卡、分析控制器内部总线(CAN总线)报文的分析仪、存储和同步各种数据的工业计算机或数据记录仪等组成。这些设备必须有高的采样率、高的精度以及在恶劣的环境下稳定的特性。

2. 信号模拟与发生设备:在半实物仿真平台中要使用专门的设备来模拟各种传感器信号。全球导航卫星系统模拟器可以产生动态的卫星信号,用来测试接收机的定位性能;任意波形发生器可以模拟各种复杂的电信号,用来测试控制器的输入端口。

3. 性能测量和分析工具,用来对系统重要的性能指标进行定量的评价。例如用高精度差分全球定位系统或者激光跟踪仪测量车辆的实际位置、姿态等,作为导航精度评估的真值参考;用功率分析仪测量系统的能耗;用示波器、逻辑分析仪观测和分析电子信号的波形、时序关系。

4. 环境模拟设备:环境适应性测试时需要用到环境试验箱(高低温、湿热)、振动台(模拟振动、冲击)、电波暗室(做电磁兼容性测试用)等大型专用设备。

选择仪器设备时需要从精度、量程、带宽、可靠性、与被测系统接口相适配等几个方面来全面衡量它的性能。一套配置合理、性能优良的测试装备体系,是保证研发质量、加快产品成熟进程的重要投资。

第三节 可靠性分析与验证

现代农业机械电子系统可靠性是其功能有效实现、安全稳定运行的基础,也是决定农业生产效率、运营成本的重要因素。本章以可靠性基本概念开始,在产品全生命周期的各个环节展开论述,给出了设计方法以及验证手段,可以为农机电子系统研发高可靠性的理论基础及实践参考提供依据。

一、可靠性基本概念

理解可靠性基本概念及评价指标是进行可靠性设计、分析的前提,为定量评价产品在规定时间、规定条件下完成规定功能的能力提供科学的数学语言和工程

依据。他们是可靠性工程学理论的根基。

农机电子系统在评价其可靠性的时候，一般会用到平均无故障工作时长、平均首次故障时间和失效率等量化指标，这些指标的定义及特点如表所示。

主要可靠性指标对比表

指标名称	定义	适用对象	特点
平均无故障工作时长	两次相邻故障之间产品正常工作的平均时间	可修复产品（如农机控制器）	值越高，可靠性越高；反映平均无故障运行时间
平均首次故障时间	产品从投入使用到首次发生故障的平均时间	不可修复产品（如一次性传感器、熔断器）	反映产品群体的平均寿命；等同于 MTBF 对于可修复产品而言的首次故障时间
失效率 (λ)	产品单位时间内发生故障的概率	所有产品	随时间变化呈浴盆曲线，偶然失效期接近常数，且与 MTBF 互为倒数

平均无故障工作时长就是两次相邻故障之间产品可以正常工作的平均时间。该值越大，产品可靠性就越高，故障间隔周期就越长。例如农机控制器平均无故障工作时长是 2000 小时，就表示该农机控制器平均运行 2000 小时就会出现一次故障。

对不能修理的部件，如一次性传感器、熔断器等一般用平均首次故障时间来度量它的可靠性。平均首次故障时间就是产品从开始使用时算起，到首次发生故障为止所经历的时间。它体现的是产品群体寿命的平均数。这两个指标虽然都是表示平均时间的，但是适用的对象却大相径庭。

失效率就是产品单位时间内发生故障的概率，表示的是产品在一个时刻上瞬时的失效概率。失效率不是固定不变的数值，它随时间的变化一般用浴盆曲线来表示。浴盆曲线分为早期失效期、偶然失效期、耗损失效期三个阶段。在偶然失效阶段，失效率接近于一个常量，这时失效率和平均无故障工作时长互为倒数，一般用作工程计算。

（二）串联、并联系统可靠性模型

任何复杂的电子系统都可以被分解成由基本元器件构成的串联、并联或者混联结构。串联系统可靠性模型是最简单也是最常见的模型。它的特点就是系统中任何一个单元出现故障都会造成整个系统失效。假定系统是由 n 个独立单元串联而成，每个单元的可靠度分别为 R_1 、 R_2 、……、 R_n ，那么整个系统的可靠度 R_s

为所有单元可靠度的乘积, 即 $R_s = R_1 \times R_2 \times \cdots \times R_n$ 。由公式可知, 串联系统的可靠度低于组成它的各个单元中最低的可靠度, 系统单元数越多, 整体可靠度反而越低。

而并联系统模型体现的是冗余的思想。纯并联系统中所有单元一起工作, 只有当所有的单元都出现故障时系统才会失效。假设系统由 n 个功能相同且相互独立的单元并联组成, 那么系统的可靠度为 $R_s = 1 - \times \times \cdots \times$ 。并联系统的可靠度远远大于任何一个单元的可靠度, 增加并联单元的数量可以显著提高系统的整体可靠性, 冗余设计提高系统可靠性的核心理论依据就是如此。

(三) 农机工作环境特点与可靠性要求

农业机械工作环境十分恶劣、复杂, 对电子系统的可靠性要求远远高于一般的工业或者消费类电子产品。农田作业环境温度范围很大, 在冬季的严寒和夏季的酷暑之间, 电子系统一般要在 -40°C 到 85°C 或者更宽的温度范围内正常工作。同时空气湿度大、早晚温差大容易产生冷凝水, 化肥、农药等化学物质飘散后, 对电子元器件、电路板有很强的腐蚀性。

机械应力给农机电子系统带来的又一严峻考验。拖拉机、收割机等大型机械工作时, 其强大的柴油发动机本身就是巨大的振动源。再加上田地、田间地面的道路和路面崎岖不平, 机械在行驶、作业过程中, 要不断受到变化随机性很大且强度很高的震动冲击。这样的力学环境很容易造成元器件引脚疲劳断裂、焊点开裂、接插件接触不良或者结构件损坏, 是电子系统故障产生的主要原因之一。

严苛的工作环境特点使得农机电子系统必须有很高的可靠性。产品设计上要求有良好的密封性, 一般要求达到 IP67 防护等级、宽温工作能力、强振动和冲击抗力、耐化学腐蚀。电子系统从硬件选型、电路设计、结构布局、工艺制造等各个环节都必须把抵抗这些环境挑战作为核心设计约束, 从而保证设备长期、高强度地在田间作业中稳定可靠地运行, 不会出现因为电控系统故障而耽误农时、造成经济损失的情况。

二、可靠性设计方法

可靠性不是通过试验检验出来的, 而是在设计阶段就赋予产品的内在属性。科学的可靠性设计方法是提高农机电子系统稳定性的主要途径, 它把可靠性工程的思想贯穿于产品的整个开发过程。

（一）降额设计与冗余设计

降额设计是提高电子元器件和系统可靠性的最基本、最有效的方法之一。其主要思想就是让元器件工作在低于额定规格的条件下，留有足够大的安全裕度。减小元器件所承受的电应力（电压、电流、功率）和热应力（工作温度），可以大大减缓元器件老化的速度，降低元器件的失效率，从而延长产品的使用寿命。

在农机电子系统设计当中经常用到降额设计。电容器的实际工作电压一般只利用其额定耐压值的 50% 到 60%；而功率器件的实际功耗应远小于它的最大额定功耗，并配有良好的散热装置，使结温远低于允许的最大结温。合理的降额标准要充分考虑到元器件种类、应用环境、可靠性目标，是一种控制成本、实现可靠性目标的有效手段。

冗余设计，顾名思义，就是增加冗余资源来容忍系统部分单元的故障，保证系统功能正常。这是创建高可用性系统的重要技术。冗余设计可以有不同的形式。硬件冗余就是用多套相同或功能相近的元件来完成同样的工作，例如双路电源供电、两个微控制器以热备份方式组成一个控制单元来提高可靠性。

农机自动驾驶或者精准作业等重要系统中，冗余设计就显得十分重要。姿态测量单元会整合两套或三套独立的惯性测量单元，利用算法融合、表决多组数据，在某个惯性测量单元的数据出现异常的时候，系统能够将它排除出去，依然可以保证导航定位的精度和稳定性，防止因为单点故障带来的系统风险。虽然该设计会增加成本和复杂性，但对保证安全和实现核心功能来说却是不可缺少的。

（二）环境应力筛选

环境应力筛选就是产品出厂之前，给它加环境应力，剔除早期潜在缺陷的一种工艺保证过程。环境应力筛选的目的不是模拟产品的实际使用环境，而是在受控条件下，施加比预定工作极限高、但不超过设计破坏极限的应力（温度循环、随机振动），使产品内部元器件、制造工艺、装配过程中存在的潜在缺陷暴露出来。

这些潜在的缺陷，例如虚焊、元器件内部开裂、接触不良等，在正常的检测条件下很难被发现，但在环境应力筛选的过程中，很快就会演变成明显的故障。在生产阶段就将潜在缺陷的产品筛选出来并加以修复，可以有效地净化出厂产品批次质量，显著降低产品早期失效率，提高交付给用户产品的现场可靠性。大批量生产的农机控制器、显示器等电子产品采用环境应力筛选，是保证其长期可靠工作的重要质量控制方法。

（三）故障模式影响分析

故障模式影响分析属于一种系统性、前瞻性的工程分析手段。核心在于设计阶段识别产品或者过程潜在的故障模式及其带来的影响，根据这些分析结果来确定并且采取必要的预防措施，以期望消除或者大幅降低故障发生的可能性。它以预防为主，是重要的定性可靠性分析手段。故障模式影响分析实施过程大体分为：

1. 对系统各个部分进行全面的故障模式识别，即列出系统各个部分可能出现的所有故障形式。压力传感器的故障模式有信号输出开路、短路、信号漂移或者无响应。

2. 分析故障影响，即分析各种故障模式对本级、上一级系统乃至整个系统以及最终用户造成的影响。压力传感器信号漂移会造成液压系统压力控制不准，从而影响到作业质量。

3. 对每种故障模式从严重度、发生率和可探测度三个方面进行打分，得到风险。严重度用来衡量故障后果的严重程度，发生率用来衡量故障出现的可能性，可探测度用来衡量故障发生后是否能够被检测出来。三个数相乘得到风险顺序数。

用风险顺序数可以对所有的潜在故障模式进行排序。风险顺序数最高的那一个故障模式，是系统最薄弱的环节，应该首先投入资源加以改善。团队可以有针对性地采取设计改进、增加诊断功能、优化制造工艺等措施，从而降低某种故障模式的严重程度或者发生频率，也可以提高其可探测性。借助这样的一个不断改进的过程，故障模式影响分析可以系统地提升设计的鲁棒性以及可靠性。

三、可靠性验证试验

可靠性验证就是通过一系列标准化的试验，检验产品是否满足预定可靠性要求的过程，它是设计目标和实际产品性能之间的桥梁，也是产品定型和量产前不可缺少的一个环节。

（一）环境适应性试验（高低温、振动）

环境适应性试验属于可靠性验证的重要部分，主要目的是考察农机电子系统在模拟的极端气候和力学环境下，功能表现和结构完整性情况。此类试验一般都在专业环境试验箱或者振动试验台上进行，按照国家或者行业的标准设置试验条件和评价标准。

高低温试验分为高温工作、低温工作、高温存储、低温存储、温度循环试验。

高温试验可以暴露出元器件参数的漂移、材料软化、散热不足等问题；低温试验来检验产品在低温下是否具有较好的启动性能、材料脆化、显示器件的性能表现等。温度循环试验是对产品的焊点、封装等部位在最高和最低工作温度之间做快速的交变，在交变热应力的作用下考察产品焊接工艺及结构设计的可靠性。

振动试验模拟的是农机在田间行驶和作业时所受到的机械振动环境。试验一般采用随机振动的方式，因为随机振动更接近实际生活中振动的复杂性。按照规定的振动频谱和加速度均方根值，对产品做长时间的振动考核，检验产品结构强度、连接器接触可靠性、元器件抗振能力。试验之后要进行产品的全面功能检验、外观检验，保证无功能失效、结构损坏等现象。

（二）寿命试验与加速寿命试验

寿命试验就是检验产品按规定条件所具有的寿命及可靠性指标。传统的寿命试验就是将一批样品置于正常工作条件下长期运行，直到出现故障或者达到规定的时间，然后统计分析故障数据。此方法的优点是结果直观、可信度高，但高可靠性产品平均无故障工作时长为数千甚至数万小时，试验周期很长，不能满足现代产品快速迭代的开发要求。

为克服传统寿命试验周期过长的不足，加速寿命试验应运而生。其基本原理就是施加比正常使用应力水平高的环境应力（温度、电压、振动强度等），加快产品失效的速度，在较短的时间内得到产品的寿命信息。利用失效物理模型（阿伦尼斯模型描述温度与寿命的关系）或者统计模型，可以将加速应力下的试验数据外推，预测产品正常工作应力下产品的寿命和可靠性水平。加速寿命试验大大缩短了验证周期，给产品设计改进和可靠性评定提供快速有效的反馈依据。

（三）现场统计与数据分析

尽管实验室的验证试验十分重要，但是检验产品可靠性的试金石还是田间的实际应用。现场统计与数据分析就是通过收集、分析用户实际使用产品时产生的故障数据，来评价产品的真实可靠性，并找出产品设计和制造中存在的问题的过程。这是可靠性工程闭环管理中不可缺少的一环。

为了有效地分析数据，首先要建立完善的现场故障信息采集系统。当设备发生故障的时候，售后服务人员应该对故障发生的时间、地点、环境、运行总时长、故障现象、损坏零部件、初步判断的故障原因等做出详细的记录。原始数据是之后分析的基础。

收集到足够的故障数据之后，就可以用专业的统计分析方法（威布尔分布分析）来对数据进行处理。利用威布尔分析可以判断产品处在浴盆曲线的哪个阶段，找到主要的故障模式，准确地算出产品的平均无故障工作时间等可靠性参数。

分析结果成了产品不断改进最直接的依据。从数据中发现某种连接器故障率高，研发团队就应该重新选择该种连接器或者改变其固定方式。分析出早期故障率偏高，就说明生产过程中环境应力筛选强度不够或者存在工艺漏洞。依靠现场数据闭环反馈来提高产品的可靠性，这也是制造高品质农机电子产品的必由之路。

第四节 系统优化与改进

现代农业机械电子系统的设计不是一次性完成、固定不变的静态过程，而是动态发展、不断完善的一个循环过程。系统初步设计、测试之后，真正的考验才刚刚开始。本节主要研究系统优化改进的重要环节，从内部技术驱动的精细化调整、外部用户需求驱动的产品迭代、商业化过程中无法避免的成本和性能平衡策略三个方面入手，为打造具有技术先进性、用户友好性、市场竞争力的现代农机电子系统提供理论指导和实践路径。

一、基于测试结果的系统优化

系统测试不但是检验功能完整性的方法，也是发现潜在问题、指明优化方向的诊断书。通过对测试过程中出现的性能瓶颈、功能缺陷、可靠性问题进行分析，可以促使系统从算法、软件、硬件等各个方面进行全面的改进。本阶段优化工作有很强的针对性，工程实践意义重大，是提高系统品质、提升核心竞争力的重要步骤。

（一）控制算法参数优化

控制算法是农业机械电子系统的“大脑”，控制算法参数的设定影响系统的动态响应速度、稳定性、控制精度。参数优化是一个系统工程，目的是在一定的工况下找到最优参数组合来获得最好的控制效果。比例积分微分控制器参数整定是其中的关键步骤。初始参数一般用经验或者理论模型来确定，但是复杂的田间条件下这些参数并不一定是最佳的。通过现场测试记录系统阶跃响应或者特定扰动下动态曲线，可以为参数调节提供依据。

参数优化的过程一般都会是不断地逼近、不断完善的过程。可以采用试凑法，根据比例、积分、微分各自的作用特点来调节。增大比例增益可以加快响应速度，但是会增大超调量、产生振荡；积分项可以消除稳态误差，但是过大的积分作用会使调节时间变长；微分项可以预测偏差变化趋势，改善动态性能，但是也会放大高频噪声。PID 控制器各个参数对系统性能的影响如表所示。

PID 控制器参数对系统性能的影响表

参数项	响应速度	超调量	稳态误差	稳定性
比例增益	增大	增大	减小	降低
积分时间	减小	增大	消除	降低
微分时间	增大	减小	无影响	提高

实践中一般采用先比例、后积分、再微分的方法进行整定，观察系统响应曲线，看系统的超调量、调节时间、振幅衰减比等主要指标是否合适，反复调整直到得到满意的动态性能。

除传统工程整定方法外，现代控制理论还给参数优化提供更为先进的手段。基于模糊逻辑或者神经网络的智能 PID 控制器，可以根据系统运行情况的变化，自适应地调节参数，从而达到更好的动态性能和鲁棒性。可以创建出模糊规则库，把有经验的操作员的调整策略转化为控制规则，使系统在不同的负载和工况下进行自动寻优。用数据为基础的优化方法，从测试过程中采集到的大量运行数据进行分析学习，可以发现更深层次的控制规律，从而使得系统优化冲破传统方法的束缚。

（二）软件流程与代码优化

软件是系统功能的实现载体，流程的合理性以及代码执行效率都会对系统的性能，特别是实时性、可靠性造成决定性的影响。由于嵌入式系统处理器资源少、内存空间小，所以软件优化就显得十分重要。优化工作主要从提高运行速度、减小代码量这两个角度入手，即用尽可能少的资源达到更快的响应。

从流程上要对任务调度、中断处理、数据流转等主要部分进行审视。不合理的软件流程会造成任务响应延迟、数据处理瓶颈，严重的时候还会造成系统死锁。通过对软件时序图进行分析，对关键任务执行时间进行跟踪可以找到流程中的瓶颈。把耗时的计算任务分成若干个子任务，分时处理，防止高优先级的任务长时间等待。优化中断服务程序，尽量使其短小精悍，只做紧急处理和状态标记，把

复杂的数据处理移到主循环中，是保证系统实时性的常用方法。

代码层面的优化则更为微观和具体，涉及算法实现、数据结构选择、编译器选项等多个方面。

1. 选择高效算法为优化打下了基础。处理大量数据的时候使用哈希表或者二叉树进行查找，效率远远高于顺序遍历。选择合适的数据结构可以大幅度提高处理效率，对于频繁插入和删除的场景可以选择链表。对于复杂的数学运算，可以采用查表法代替实时计算，用空间换取时间，这是资源受限的嵌入式系统中行之有效的策略。

2. 代码编写技巧在编写代码的时候要注重细节，养成良好的编程习惯。减少循环体内的函数调用、复杂的判断；经常使用但是不变的计算结果可以存放在临时变量里，避免重复计算；合理使用内联函数可以减少函数调用的开销。深入了解编译器的特性，利用它提供的 O2 或者 O3 等优化选项，可以在不改变源代码的情况下提高程序的运行速度。

（三）硬件电路与结构优化

硬件是电子系统物理的基础，设计的好坏直接决定系统的可靠性和抗干扰能力以及长期稳定性。尤其在农业机械这样振动、粉尘、湿气、电磁环境复杂的场合下，硬件优化设计显得十分重要。既包含电路原理上的改进，也包含元器件布线规划、电路板布局、结构加固保护等工作。

电路方面最明显的就是电磁兼容性设计。农机上的大功率电机、电磁阀等都是强烈的电磁干扰源，必须在电路设计时就考虑进去。关键措施有为微控制器等核心芯片提供稳定、干净的电源，加装滤波电容、磁珠等元件以滤除电源噪声；对高速信号线进行阻抗匹配、端接处理，减小信号反射、振铃；合理规划地线布局，采用星型接地或大面积接地平面，减小地线环路阻抗，降低公共阻抗耦合。对模拟信号通路进行屏蔽保护，用光电耦合器或者隔离变压器对 I/O 端口进行电气隔离都是提高系统抗干扰能力的有效方法。

电路板的布局布线好坏直接决定着电路性能的好坏。优化布局布线时应遵循高频与低频分离、数字与模拟分离、功率与信号分离的原则。把强辐射源时钟电路、高速逻辑电路等和敏感的模拟电路、I/O 接口等隔离开。元器件的布局要尽量紧凑，缩短信号传输路径，减小引线电感。电源线、地线应尽可能宽，形成低阻抗回路。关键信号线要远离噪声源，用地线做屏蔽包扎。合理的电路板布局可以有效地减

小电磁干扰的产生和传播。

结构优化主要是提高系统对于物理环境的适应性。即选择合适的封装形式来提高芯片的防潮、防尘、散热能力。安装在振动剧烈的地方的控制单元需要设置专用减振支架，对电路板上大尺寸、重质量的元器件进行加固。改善外壳结构，达到 IP67 及以上防护等级，防尘防水，内部组件空间合理设计有利于通风散热。结构层面的改善措施，就是电子系统在恶劣农田环境下长期可靠运转的物理屏障。

二、用户反馈与持续改进

任何一项成功的农机产品都必须得到用户的检验与认可。把用户的意见反馈到产品开发的全过程里，形成起收集反馈、分析问题、迭代升级的闭环，这就是现代产品开发的主要理念。以用户为中心，不断改善、更新，既可以解决目前的问题，又可以发现未来的需求，使产品不断地进化，保持产品的市场生命力。

（一）收集用户使用意见与建议

全面真实的获得用户的反馈是进行持续改进的先决且最关键的一步。有效的反馈收集机制应该具有多渠道、低门槛的特性，给用户便捷的意见表达途径。传统的售后服务热线、经销商走访、用户座谈会等反馈渠道仍然是现在获取深层次信息的主要方式。直接同用户交流，能对用户的使用场景、操作习惯、产品具体感受有更深入的认识。

随着信息技术的发展，线上反馈渠道的作用也越来越明显，给大规模收集信息提供了便利。企业可以在官方网站或者移动应用上设置专门的用户反馈入口，用户可以提交文字、图片、视频等各种不同的建议与问题。建立用户社群、论坛或者利用社交媒体平台来促进用户之间的交流使用心得，从中可以发现许多有价值的“集体智慧”。另外定期进行线上问卷调查，对某个功能或者整体体验进行满意度评价，可以定量地了解用户的评价。

为了鼓励用户积极反馈，可以设置一定的奖励，积分、礼品或者服务优惠券。将反馈渠道同车载智能终端融合起来，用户在田间地头就可以一键上报故障或者建议，能够大大提升反馈的即时性以及场景相关性。整合线上和线下、主动与被动的各种渠道，创建起一个立体的用户反馈网络，才能使产品团队听到最广泛、最真实的用户声音。

（二）分析常见故障与用户痛点

大量的反馈信息就如同未经加工的“矿石”，只有经过系统的分析和提炼之后，才能成为指导产品改进的“黄金”。核心任务就是找到共性问题，找到共性问题背后的根本原因，发现用户虽然没有明说但是深受其害的痛点。

分析工作可以从故障统计开始，对售后维修记录、在线反馈数据进行分类、频率统计，很快就可以找到高发故障类型。例如传感器经常出错、执行器动作不正常、系统在某种环境里经常死机等。对高频故障要组织技术团队进行根因分析，分析是硬件缺陷、软件漏洞、设计不合理还是用户误操作引起的。利用失效模式和影响分析等质量管理工具，可以对各种可能的失效模式进行系统的严重性、发生率、可探测性分析，从而确定解决问题的优先顺序。

用户痛点分析主要是从体验的角度来展开的。痛点常常隐藏在用户的抱怨、吐槽、操作习惯里。用户对某项功能设置过程繁琐的抱怨，可以反映出人机交互界面设计上的缺陷；用户对设备在某些地形下作业效果不好抱怨，可以反映出控制算法对复杂工况适应性的不足。分析用户痛点要具备同理心，从用户的角度去看待产品。采用用户访谈法、现场观察法、可用性测试法等可以由用户角度直接体验使用过程中遇到的困惑、不便、挫败等，从而找到产品体验优化的方向。

（三）产品迭代与版本升级

在充分认识产品存在的故障和痛点之后，产品迭代、版本更新就成了改进的落脚点。这是一个循环往复的螺旋式上升过程，依靠不断的版本更新来解决存在的问题、改善体验、增加价值。迭代可以是小步快跑的微小改进，也可以是阶段性的重大升级，关键就是快速响应市场、用户需求变化。

产品迭代计划要按照问题的优先级、技术实现难易程度、投入资源和预期效益来制定。一般情况下，对系统稳定性、安全性造成严重危害的故障要立即组织力量进行修复，通过紧急补丁或者软件更新推送给用户。对于体验类优化及新增功能，可以按照常规的迭代周期进行规划、设计、开发、测试。清晰地定义版本管理策略十分重要，每个版本都应有明确的更新日志来告诉用户本版本修复了哪些问题、带来了哪些新的变化。

软件迭代升级在现代农机电子系统中起着越来越大的作用。空中下载技术使制造商可以远程向已经售出的设备推送软件更新，能及时修复漏洞、优化算法参数、增加新功能，大大提高服务效率，降低维护成本。硬件迭代周期更长、成本

更高，一般和产品更新换代同步。新一代产品设计时，将前期经验教训融入到设计中，对硬件平台进行重新设计或者局部改良，更换性能更好的处理器、选择更可靠的传感器、优化电路板布局等。软硬件同步发展使得农业机械电子系统朝着更加智能化、高效化、可靠化的方向发展。

三、成本与性能的平衡

现代农业机械电子系统商业化过程中，成本与性能一直存在着矛盾。过分追求极致性能会导致成本失控，产品的市场竞争力被削弱，过度压缩成本会使得产品缺少必要性能、可靠度不够而影响信誉与品牌。保证核心功能和可靠性的同时怎样才能达到最佳的性价比，就是检验设计团队智慧和经验的试金石。

（一）元器件选型中的成本考量

元器件是电子系统最基本的组成单元，元器件成本占系统总成本的比重大。因此元器件选型就是成本控制的源头。选型工作需要从性能、质量、供货周期、价格等各方面做复杂的权衡。

在满足设计要求的前提下，不能出现过度设计。选择处理器时要衡量系统所需的运算能力和接口资源，选取“刚好够用”的型号，不能一味追求高主频、多内核的旗舰芯片。传感器的精度、量程、响应时间等参数要和实际需要相适应。在很多场合下，工业级元器件已经能够满足要求，并不是所有场合都需要高昂的车规级或军工级器件。

其次就是建立多元化的供应商体系，这是控制成本、保证供应链安全的策略。对于同一个元器件应至少有两个或三个合格的供应商进行比价和备份，防止由于单一供应商涨价或者断供而陷入被动。近年来由于国内半导体产业的发展，我国许多国产元器件在性能、可靠性方面已经达到了国际先进水平，并且具有价格优势和更短的供货周期。在选型的时候积极引进经过验证的国产替代方案，是降低采购成本的一种有效方法。

最后还要考虑元器件的生命周期以及可采购性。不宜选择即将停产或者市场货源短缺的“冷门”器件，以免后续大批量生产或者维修时出现供应困难。使用市场上普遍使用的明星元器件，一方面可以降低采购成本、价格透明，另一方面可以降低研发风险，使用已有的成熟应用方案。

（二）在满足性能要求下降低成本

降低成本是产品设计、生产、制造全过程的系统工程，要在保证核心性能、产品质量不妥协的基础上，依靠精益化的设计、管理来实现。这就需要工程师在重视技术实现的同时还要有强烈的成本意识，将成本控制的思想渗透到每一个设计决策当中。

设计阶段是成本控制的最佳时期。方案优化可以从根本上降低成本。利用软件算法来弥补硬件精度不足，用低价的传感器配合复杂的滤波和校准算法，可以得到与高价传感器相近的性能。功能集成也是一种有效的方法，采用集成度更高的系统级芯片，把多个外围芯片的功能集成到一块芯片里，可以降低物料清单成本，减小电路板面积，简化生产过程。在不降低核心功能的前提下，对一些非必要的锦上添花型功能做适当的裁剪，也是控制成本的一种直接方式。

生产制造环节也存在着很大的降低成本空间。通过改进电路板的布局来提高板材的利用率，从而降低制板成本。改善生产工艺，提高自动化程度，可以降低人工成本，也可以减少生产过程中不良品率。按照精益生产的原则，减少生产线上的浪费，改善库存管理，实行准时制供应，可以有效地降低仓储及资金占用成本。另外，模块化设计思想的运用，使不同的产品可以共享一部分标准模块，依靠规模效应摊平单个模块的研发、生产成本，从而可以灵活组合出不同价位的各种产品来满足不同的市场需求。

（三）系统方案的性价比评估

性价比是衡量一个产品市场竞争力的综合指标，科学、客观地评价性价比，是产品决策和市场定位的重要依据。性价比不能只用价格来比较，应该把产品的全生命周期成本和它所提供的价值结合起来考虑。

首先要建立一个包含许多要素的价值模型。该模型应该包含产品功能性能、可靠性、耐久性、用户体验、品牌价值、售后服务等各方面。功能性能是最基本的价值，主要是考察系统能否满足用户最基本的工作需求，作业效率、精度是否达到行业领先水平。可靠性和耐久性会直接影响到用户长期使用的成本，故障率低、寿命长的产品，即使最初的购买成本比较高，其总拥有成本一般也会比较低。良好的用户体验、方便的操作、智能化的功能都是产品价值的组成部分。

在价值评估的基础上，用产品全生命周期成本进行综合分析。全生命周期成本不仅仅只是制造费用、销售价格，它也包含用户在使用过程中因为维护、维修、

耗材更换、故障停机而产生的各种机会成本。专业的性价比分析还会加入投资回报率分析，即评价用户购买设备之后，依靠提升效率、节约人工、减少损耗等途径，多长时间能够回收投资并开始盈利。

将各个方案的价值得分与全生命周期成本进行对比，就可以得到各个方案的性价比排序。可以建立一个性价比评价矩阵，用性能 / 价值作纵轴，用成本 / 价格作横轴，把不同的竞品或者设计方案放在矩阵中，直观地表现出其市场定位。系统化的评价方法可以让决策者摆脱只看价格的局限，从战略的高度做出更加明智的决策，从而保证最后推向市场的产品能够在激烈的竞争中脱颖而出。

第十章 农业机械电子系统未来发展

由于信息技术、人工智能和机器人技术发展迅速，现代农业正处在深刻变化之中。农业机械电子系统成了这次变革的主要推动力，未来农业机械电子系统的发展趋势必然是智能化、自主化、网络化，以此达到更高效、更精准、更可持续的农业生产。

第一节 人工智能技术应用前景

人工智能技术正在全方位的改变着农业生产各个环节，从播种、管理、收获等各个方面都显示出巨大的应用前景。不仅能大大减轻人力劳动，更能依靠数据驱动的智能决策，大幅度提高农业生产效率和资源利用率，是未来智慧农业发展的主要推动力量。

一、深度学习在农业中的应用

深度学习属于人工智能的一个子领域，具备极强的特征学习及模式识别能力，面对各种复杂农业数据的处理具有明显的优势。它可以对大量的图像、传感器数据做深入分析，发现人眼不容易察觉到的潜在规律，给精准农业管理提供前所未有的技术支持。

（一）基于深度学习的图像识别（杂草、病害）

深度学习图像识别技术是农田精准管理的基础。其核心就是用卷积神经网络等模型，对大量的带有标记的农作物、杂草、病虫害图像数据进行训练，使模型可以自主地学习并提取出用于分类、识别的视觉特征。装有高清摄像头的无人机或地面机器人可以实时采集农田的图像，系统在后端或者边缘端使用训练好的模型来进行快速的分析。系统对于杂草可以做出区分，并将它们与作物幼苗区分开来，使得变量喷药或者物理清除设备可以实现点对点的精确操作，从而将除草剂的使用量控制在最低水平，降低环境污染，减少生产成本。

深度学习模型可以找到作物叶片、果实上因病害、虫害而产生的微小斑点、颜色变化或者形态异常。该项技术可以对病虫害进行早期诊断，病虫害大面积蔓延之前发出预警。相比于传统的人工巡查，该种自动化监测方式效率更高、覆盖面更广，而且可以避免由于主观经验不同而造成的误判。结合不同的生育期作物图像数据，模型可以不断优化，提高识别的准确性与鲁棒性，给农民科学制定防治策略提供可靠的数据支撑。这项技术的推广使用将会使农业植保工作由被动应对转变为主动预防，从而保证作物的正常生长。

（二）基于深度学习的产量预测

准确的作物产量预测对农业生产计划、粮食市场调控、国家粮食安全都具有举足轻重的战略意义。基于深度学习的产量预测模型，把多种不同的数据融合起来，可以对产量做出准确的预测。数据有高分辨率遥感影像、无人机航拍图像、气象数据、土壤理化性质、作物品种信息、历史产量数据等。深度学习模型，特别是把卷积神经网络和循环神经网络结合起来的混合模型，对于这样的复杂时空数据来说特别擅长。

模型通过对作物各个生育期冠层光谱特征、植被指数图像信息的分析，对作物长势及健康状况进行评价。同时模型把空间信息同气象变化趋势、土壤水分和养分动态等时间序列数据结合起来，进而找出决定产量的主要因素以及各种复杂的作用关系。模型可以学习并且量化出在关键灌水期适度的雨量、光照对最终产量的积极影响。挖掘历史数据，模型可以发现生长过程到产量之间复杂的非线性映射关系，精度比传统统计模型或者基于作物生长模型的模拟方法要高很多。强大的预测能力给农业生产者提供田间管理优化建议，给供应链企业安排仓储物流提供重要依据，给政府制定农业政策提供科学支撑。

（三）深度强化学习在自主决策中的应用

深度强化学习把深度学习的感知能力同强化学习的决策能力融合起来，给农业机械的自主作业赋予了强有力的理论架构。它使智能体（自主拖拉机、智能灌溉系统等）在与复杂的、多变的农业环境进行互动的时候，通过“试错”的方式找到最优的行为策略，目的是获得长期累积的收益，比如最大化作物产量、最小化资源消耗或者缩短作业时间。

在农业机械的路径规划、自主导航中，深度强化学习可以让农机在没有事先设定的高精度地图的情况下，自行学习在田间怎样高效、安全地行驶。农机用摄

像头、激光雷达等传感器对环境进行感知，可以学习躲避障碍物、适应不同的地形，优化作业路径，从而达到节约燃油、减少土壤压实的目的。在精准灌溉和施肥决策中，强化学习智能体可以依据实时的土壤湿度、作物长势、天气预报来给每一个地块制定最优的灌溉量、施肥量决策。决策的过程不再使用固定的阈值或者静态的模型，而是依靠同环境的不断互动来学习，从而获得适应动态变化的智能控制策略，最后实现水肥资源的最优化分配，促进农业生产向着更高的智能化、自适应方向发展。

二、农业知识图谱构建

信息爆炸时代农业领域形成了大量的结构化与非结构化知识，但是这些宝贵的知识却散落在各种文献、数据库以及专家的经验之中。农业知识图谱就是将分散的农业知识联系起来，融合成一个系统化的、网络化的农业知识库，给智能农业应用提供强大的语义支持。

（一）农业知识图谱的概念与意义

农业知识图谱本质上就是大规模的语义网络，它用图来组织和表达农业领域的知识。图中的节点代表各种农业实体，比如作物品种、病虫害、农药、肥料、农机具、气象灾害等；边表示这些实体之间存在的一些语义关系，例如水稻容易患稻瘟病、联合收割机适用于小麦收割、氮肥促进叶片生长等等。从而使分散的知识点组成相互联系的知识网络。

构建农业知识图谱的意义，就是给机器理解农业知识提供一个形式化的表达方式。传统数据库只能实现关键词匹配，而知识图谱可以做到更深层次的语义检索和推理。这就意味着计算机不仅可以存储知识，还可以在一定程度上理解、运用知识。打破了各种数据来源之间的障碍，把孤立的知识分散开来形成一个统一的知识体系。这对实现智能化的农业决策支持、精准化的农技服务推广、标准化的农业生产管理有着极其重要的意义，也是农业人工智能从感知智能迈向认知智能的重要基础设施。

（二）多源异构农业数据的融合与构建

建立一个全面准确的农业知识图谱，最根本的问题就是怎样把来自各个渠道、结构不一的数据有效地融合起来。一般会牵涉到一系列复杂的技术环节，是项系统性的知识工程。

1. 数据采集与预处理：首先要从多元数据源获取信息，数据源包括农业科研论文、技术专著、政府发布的农业标准、农技推广网站、气象数据库、土壤普查数据和物联网传感器实时采集的数据等。数据形式多种多样，既可以是文本、表格等结构化或者半结构化的数据，也可以是图像、视频等非结构化的数据。在分析之前必须要对数据进行清洗、去重、格式转换等预处理。

2. 知识抽取，对不同类型的数据要采用相应的知识抽取技术。对文本数据而言，可以采用自然语言处理技术中命名实体识别的方式找到作物、病害、农药等实体，再借助关系抽取技术挖掘这些实体之间的联系。结构化数据可以利用预定义的映射规则，直接转换成图谱所要求的主谓宾三元组。

3. 知识融合，由于数据来源多样，很容易出现实体指代不清（玉米和苞米）、属性信息不一致（不同文献对于某病害潜伏期的描述不一样）等问题。知识融合的目标就是消除冲突、冗余，利用实体对齐、属性值融合等方法把不同的来源的同一个实体信息融合在一起，得到统一、一致的知识表示。

4. 知识存储与更新，即把抽取、融合后的知识用三元组的形式存入图数据库中，得到农业知识图谱。知识图谱不是一成不变的，必须建立起动态更新机制来不断吸收新的数据源中产生的新知识，从而保证它的时效性以及准确性。

（三）基于知识图谱的智能问答与决策

根据农业知识图谱创建出的智能问答系统，可以更自然、更准确地回答用户对于农业信息的需求。当用户用自然语言提问小麦抽穗期应该注意防范哪些病害的时候。系统在接收到问题的时候，首先要对问题进行语义理解，从中找出问题的主要实体（小麦、抽穗期）和用户意图（查询病害）。系统会把问题转换成知识图谱上的查询操作，从小麦节点出发，沿着生育期关系找到抽穗期节点，再查询与抽穗期相关的病害实体，最后把查询结果（赤霉病、白粉病等）用清晰的语言组织后返回给用户。

智能问答系统比普通的简单关键词搜索又迈进了一步，它可以理解问题背后复杂的逻辑关系和联系，从而能给出更准确、更直接的答案。农业决策支持中所用的知识图谱技术更加深入。它能很好地利用实时监测数据进行推理分析。比如系统判断地块土壤氮素含量低，天气预报显示未来几天会下雨，知识图谱就会推理出此时是追施氮肥的最佳时机，根据作物品种、生育阶段等因素给出合适的肥料种类和用量建议。这种把背景知识同实时数据融合起来的智能决策能力，会大

大提高农业生产管理的科学化、智能化水平，把专家级的知识普惠给每一位农业生产者。

三、AI 驱动的自主作业机器人

人工智能同机器人技术深度融合之后，便产生了新一代的农业自主作业机器人。这些机器人可以不用人工干预就完成复杂的农田作业任务，是实现“无人农场”愿景的关键执行单元，也是农业机械电子系统发展的前沿方向。

（一）全自主除草机器人

全自主除草机器人属于人工智能技术应用到精准农业的典型范例。该类机器人装载有先进的导航系统、机器视觉和智能决策算法，可以自主行驶在田间，实时、准确地除草。典型的工作流程为，采用高精度的全球导航卫星系统和惯性测量单元相结合的导航技术，机器人按照事先设定或者自行规划的路径在作物行间移动。机器人底部会不断对作物和杂草进行拍摄。

机载嵌入式 AI 处理器用轻量化深度学习模型对采集到的图像进行分析，核心任务就是对像素级别区分作物和杂草。当机器人控制系统检测到杂草的时候，就会立刻使执行机构开始工作。常见的执行机构形式及特点见下表自主除草机器人执行机构对比表。

自主除草机器人执行机构对比表

执行机构类型	原理	优点	缺点	适用场景
微型喷头	定向喷射微量除草剂	精准高效，减少药剂用量	仍涉及化学药剂，需精确识别	化学除草剂敏感作物区域
机械臂	物理切割或拔除杂草	无化学残留，环保	速度相对较慢，可能损伤作物	幼苗期杂草，作物行间作业
高功率激光	瞬间烧毁杂草生长点	环保无残留，效果即时	能源消耗，成本较高	点状杂草，特定作物保护

点对点清除方式可将除草剂用量降到最低，保护土壤、生态环境，对发展有机农业有革命性意义。

（二）智能采摘机器人

果蔬采摘工作一直都是农业生产中劳动强度最大、季节性最强、对人工依赖最重的环节。智能采摘机器人出现以后，为解决这个问题找到了一条重要途径。技术难题主要表现在环境感知、决策规划、操作执行这三个方面。环境感知方面

机器人要使用彩色相机、深度相机、多光谱相机等众多传感器来对复杂不均匀的自然环境进行感知，从而准确地定位出待采果实。仅仅识别果实是不够的，还要判断果实的成熟度，准确地测量果实的空间三维位置和姿态，还要面对光照变化、枝叶遮挡等各种复杂的干扰。

决策规划上，确定好目标果实之后，机器人的大脑就要立即规划出一条最佳的运动轨迹，使它在枝叶繁茂的环境中移动时，既可以快速到达目标点，又不会碰到植株、藤蔓和其它果实。机械臂末端执行器的设计对于操作执行来说十分重要。需要模仿人的灵巧、柔性，根据果实的硬度（草莓软、苹果硬）采取不同的抓取方式（气动吸附、柔性包裹、剪切等），以保证采摘成功率为前提，尽量减少对果实的机械损伤。目前智能采摘机器人采摘效率、成本比熟练工人低，但是随着人工智能算法的不断优化、硬件成本的持续降低，商业化应用前景越来越广阔。

（三）农田巡检机器人

农田巡检机器人就是田间的“智能侦察兵”。它们一般是小型化的、轻量化的地面或者空中平台（无人车、无人机），装有各种先进的传感器，可以对农田进行全天候、高通量的自主巡检和数据采集。机器人可以根据事先设定好的路线，也可以根据作物生长情况来动态规划巡检路径，从而对整个农场进行全面的覆盖，并且对农作物进行精细化的表型数据采集。

它的传感器阵列功能多样、强大。各种传感器及其主要功能和应用场景如表5-2所示。

农田巡检机器人传感器功能表

传感器类型	主要功能	应用场景
可见光相机	观测作物形态、颜色变化	作物长势评估，病虫害初步识别
多光谱 / 高光谱相机	分析作物生理状态（叶绿素、氮素水平）	营养诊断、病害胁迫早期检测
红外热像仪	监测作物冠层温度	水分胁迫诊断，病害发热点识别
激光雷达	构建农田和作物三维点云模型	作物高度、密度测量，农田地形测绘

机器采集到的大量数据经由无线网络传送到云端，人工智能模型对数据加以深入分析之后，可以产出作物长势分布图，病虫害预警图，土壤墒情图等可视化报告。可视化报告给农场主带来了前所未有的洞察力，可以及时发现问题，采取

精准的管理措施，从而实现农田的按需精细化管理，是构建处方农业和智慧农业闭环控制系统不可缺的一环。

第二节 新能源与电动化趋势

全球能源结构转型和环保要求促使各行各业发生改变，农业也不例外。新能源技术、电动化浪潮正在对现代农业机械的设计理念和方向产生深刻的影响，给现代农业机械注入了绿色、智能、高效的强劲动力。

一、农机电动化动力系统

农机电动化是实现农业碳减排的重要手段，主要建立高效可靠的动力系统。这不但是能源形式的转变，而且对整机的系统集成、能量管理、动态响应提出了新的技术要求。

（一）纯电动与混合动力系统架构

纯电动农机动力系统完全依靠电池来提供能量，通过电机直接或者经过传动系统来驱动作业部件以及行走系统。该架构的优势是零排放、结构简单、噪音低、维护成本低。其系统一般由动力电池包、电池管理系统、电机和电机控制器、车载充电系统等主要部件组成。纯电动架构适合于作业负载稳定、工作时间短的中小型农机，即植保无人机、小型拖拉机、果园管理机等。电动农机在这些场景下可以充分发挥环保、低运行成本的优势，续航里程一般能满足作业需求，不构成主要限制。

混合动力系统把内燃机和电驱动这两种动力源结合在一起，目的是达到续航和燃油经济性两者兼顾的效果。按照内燃机和电机的耦合方式不同，可以分为串联式、并联式和混联式三种基本形式。串联式混合动力系统中，内燃机只做发电机为电池充电或者直接供电给电机，不直接参与驱动，车辆完全由电机驱动，驾驶体验接近纯电动。并联式系统中内燃机和电机可以单独或者共同驱动车轮，系统结构紧凑，动力强。混联式结合了前两种的特点，控制策略较复杂，但是可以达到最佳的能量管理。

大型、重载、长时间连续作业的农业机械，如大型拖拉机、联合收割机等，混合动力系统适用性更好。高负荷工况下依靠内燃机提供稳定强大的动力输出；

低负荷或者怠速工况下切换为纯电模式或者电机辅助驱动，大幅度降低燃油消耗和污染物排放。灵活的能量分配模式，使混合动力农机成为目前阶段实现大型农机节能减排的现实选择，也是迈向全面电动化的一个重要过渡阶段。

（二）电池管理系统技术

电池管理系统是电动农机动力系统的“大脑”，它的性能好坏直接影响到动力电池的安全性、耐用性和可靠性。电池管理系统主要是对电池组实施实时监控、管理、保护，使电池组在各种复杂的工况下一直保持在最佳的工作状态。具有数据采集、状态估计、均衡控制和热管理等功能。数据采集模块主要对电池单体的电压、电流、温度等关键参数进行实时检测，给后续分析控制提供准确的数据基础。

在此基础上，状态估计就是电池管理系统技术的核心和难点。要用复杂的算法模型准确估算电池荷电状态和健康状态。荷电状态的准确估计直接影响续航里程预测的准确性，也能避免电池过充或者过放造成的损坏。健康状态的评价可以给电池老化程度、性能衰减状况提供依据，为电池的维护、更换提供科学指导。同时电池均衡功能也不可忽视，采用主动或者被动均衡的方式，解决由于单体电池不一致性所造成的容量衰减问题，最大程度上提高整个电池包的有效容量和循环寿命。热管理功能就是对冷却或者加热系统进行控制，使电池温度保持在最佳的工作范围内，防止由于过热或者过冷造成安全风险以及性能下降。

（三）电机驱动与能量回收技术

电机驱动系统为电动农机的执行机构，把电能高效地转换成机械能。农机用驱动电机要具有高扭矩密度、高效率、宽调速范围、高可靠性。由于永磁同步电机具有功率密度大、效率高、转矩脉动小等特点，所以成为电动农机驱动系统的主流。电机控制器通过精准控制电机电压、频率、电流来达到对农机行驶速度、作业部件转速的精确调节，这是传统液压系统所不能达到的优势。

能量回收技术也就是再生制动技术，是提高电动农机能源利用率的重要途径。农机减速、下坡或者作业部件惯性转动时，驱动电机可以切换为发电机模式，把车辆的动能或者部件的惯性能量转化为电能，回收动力电池中。变废为宝的过程，大大延长了农机的续航里程。农业生产中拖拉机频繁启停、联合收割机在田间掉头等场景都有利于能量的回收。设计出高效能量回收控制策略时需要考虑车辆状态、电池状态和驾驶员意图，在保证制动安全性、稳定性的基础上尽可能提高能量回收效率，对降低农机整体能耗有重大意义。

二、新能源在农机中的应用

除了利用电网充电实现电动化之外，还有很多新能源形式在农业机械领域也显示出独特的应用前景。各种技术相互融合，给未来农业能源体系实现离网、低碳甚至零碳运行提供广阔的探索空间和可能性。

下表概述了这些新能源在农机中的应用特点和挑战：

新能源在农机中的应用特点对比表

新能源类型	供能方式 / 特点	优势	局限性 / 挑战	适用场景
太阳能辅助供电	光伏电池板持续发电，补充辅助负载，涓流充电	绿色环保，减少主能源消耗，提高独立作业能力	无法单独驱动大型农机高强度作业，受天气影响	车载电子设备、空调、照明，电动农机涓流充电，偏远农场
氢燃料电池	氢气与氧气电化学反应发电，唯一的副产物是水	零排放，能量密度高，加注速度快（分钟级）	成本高（催化剂），储运技术不完善，加氢基础设施缺乏	大型、重载、长续航农机（如深耕、联合收割）
生物能源	生物质转化燃料（生物柴油、乙醇、沼气）驱动内燃机	就地取材，减少化石燃料依赖，促进农业废弃物资源化	生物质收集处理成本，部分生物燃料对发动机有要求	生物柴油用于柴油机，生物乙醇用于小型汽油机，生物质气用于固定式或混合动力发电

（一）太阳能辅助供电系统

太阳能技术用于农业机械，给人们提供了一个绿色能源的解决方案。在农机驾驶室顶部、发动机罩等大而平整的表面上铺设光伏电池板，可以构成太阳能辅助供电系统。该系统在日光照射下不断地产生电能，给车载电子设备、空调系统、照明系统等辅助负载供电，从而减小发动机或者主电池的能量消耗。电动农机上可以利用太阳能系统给动力电池进行涓流充电，在车辆停放或者低功耗运行时补充电能，一定程度上缓解续航焦虑。

太阳能不能单独驱动大型农机做高强度的工作，但是作为辅助能源的作用却不可小视。长时间的田间作业中，辅助系统所消耗的能量在总能耗中所占的比例相当大。使用太阳能来满足这部分需求，可以直接提高整机燃油经济性或者电能效率。偏远地区或者电力基础设施不完善的农场中，带有太阳能充电功能的农机具有更好的独立作业能力。由于光伏电池的转换效率不断提高，成本不断降低，

太阳能在农机能源体系中所占比例会越来越大，在小型化、智能化农业装备上发挥的作用也越来越大。

（二）氢燃料电池在大型农机上的前景

大型农业机械对长续航、大功率、快速能量补充提出了很高的要求，氢燃料电池技术为它提供了一条非常有希望的技术途径。氢燃料电池利用氢气和氧气进行电化学反应直接发电，唯一的副产物是水，实现了真正的零排放。氢燃料电池农机比纯电动农机能量密度大、加注速度快。储氢罐几分钟就能完成加注，基本和传统燃油车加油时间相当，大大提高了大型农机在繁忙农季的出勤率和作业效率。

氢燃料电池系统由燃料电池电堆、储氢系统、空气供给系统、热管理系统等组成。其工作原理是把高压的氢气和空气分别送入电堆，产生电能驱动电机；多余的电能可以储存在小容量的功率型电池里，用来应对负载的迅速变化或者回收制动能量。燃料电池与电池的电混合动力构型，将燃料电池长续航的特点和锂电池快速功率响应的特点结合起来，非常适合于功率需求变化剧烈的大型农机作业工况，例如深耕、联合收割等。

虽然氢燃料电池在农机领域有广阔的应用前景，但是它仍然存在一些问题。高昂的成本，尤其是电堆中催化剂的成本，成为制约其商业化的主要因素。氢气的制备、储存、运输技术还没有完全成熟，相关基础设施的建设也比较慢。特别是在广大农村地区，建设安全、方便的加氢网络还存在着很大困难。随着可再生能源制氢技术的发展和储氢材料技术的突破，氢燃料电池的成本会大幅度下降，在重型、大型农机上的应用潜力将会完全发挥出来。

（三）生物能源应用

生物能源来自于农业自身的循环系统，用其应用到农业机械当中，与农业可持续发展的内在逻辑相吻合。农机领域生物能源的应用主要是利用生物质转化成的燃料，给内燃机或者发电机提供动力，减少对化石燃料的依赖。该应用模式可以就地取材，减少燃料运输成本，又可以促进农业废弃物的资源化利用，形成农场到燃料、燃料到农机的闭环生态系统。

当前，生物能源在农机中的应用主要通过以下几种途径实现：

1. 生物柴油是由油菜籽、大豆等油料作物或者废弃食用油加工而成，可以按一定比例与普通柴油混合，甚至可以在部分改装后的柴油发动机上直接使用。它

有良好的润滑性、低硫含量，能减少颗粒物、硫氧化物的排放。

2. 生物乙醇是以甘蔗、玉米等含糖或含淀粉的作物为原料发酵而成，可作为汽油的替代品或者添加剂。虽然在农机柴油机上应用较少，但是在一些小型汽油动力农机具上具有应用前景。

3. 生物质气，即农作物秸秆、禽畜粪便等农业废弃物经过厌氧发酵产生的沼气，或者通过气化技术产生的合成气，都可以驱动燃气内燃机。该方式特别适合于固定式农业机械或者混合动力系统发电单元的燃料，从而实现农业废弃物的能源化利用。

三、电动农机的智能控制

电动化给农业机械带来了前所未有的控制精度和响应速度，当它和智能化技术相结合的时候，就会产生更加高效、精准的作业模式。智能控制是发挥电动农机全部潜能的重要因素。

（一）电动化的精准能量管理

电动农机能量管理系统的主要目的就是，在保证作业要求的基础上，使整机能耗最小化，从而延长续航里程。电动农机能量流动比传统燃油农机复杂，包含电池、电机、各种辅助负载、能量回收等很多部分，既为精准管理提供可能，也带来新的挑战。智能化能量管理策略它不只是简单的功率分配，而是一种全局优化的、对未来工况进行预测的策略。

该系统用全球定位系统、惯性导航、机器视觉等多种传感器对农机当前的位置、姿态、速度、前方地形地貌、作物状况进行实时感知。利用事先设定好的作业路径和任务信息，控制系统就能预知未来一段时间内负载需求的变化。系统会在上坡路段即将到来之前就调整电机输出扭矩和电池放电，使爬坡时的动力效率最大化；当预测到前方是较长的平直路段时，就会切换到经济性更高的巡航模式。以预测为驱动的全局能量优化算法，可以有效地避免由于负载突增造成的能源浪费，使每一分电能都发挥出最大的价值，比传统的被动式管理策略节能效果更好。

（二）电动执行机构的快速响应控制

农业机械电动化最革命性的优势就是执行机构的电气化。传统的农机具，如播种机、施肥机、喷药机等，其主要作业部件大多是由液压系统或者机械传动系统来驱动的。这些系统普遍存在着响应慢、控制精度低、能量损失大、容易漏油

污染环境等固有的缺陷。而使用电机直接驱动的电动执行机构，则完全改变了这种状况。电机响应时间短于毫秒，远低于液压系统，电机的转速、扭矩、位置都可以用电磁信号来完成精密的闭环控制。

快速响应、高精度控制能力，给精准农业作业赋予了优良的硬件根基。以电驱动的变量施肥机为例，控制器根据处方图或者传感器实时获得的土壤养分信息，瞬时调节施肥电机的转速，实现不同地块施肥量的像素级精准控制，大大减少肥料浪费和环境污染。电控喷头能够根据病虫害识别结果，以毫秒级实现开启或者关闭，从而达到精准点杀的效果，与传统广角喷洒模式完全不同。

电动执行机构大大简化了机械结构，也大大降低了维护的复杂程度。去掉了复杂的液压管路和阀组，使农机具的设计更加灵活紧凑。采用标准的电气接口以及通信总线，电动执行机构可以很容易地与农机主控制器进行数据交换，实现即插即用，为农机具的模块化、标准化、智能化升级打下了良好的基础。不但提高了作业质量、效率，而且使农机装备向着智能化、环保化方向全面的发展。

（三）电动化与智能化的协同发展

电动化、智能化是现代农业机械发展的两大主要动力，两者不是孤立发展的，而是互相促进、深度融合的共生体。电动化给智能化提供了一个理想的载体平台，智能化又最大限度地发挥了电动化的技术优势。这样的协同发展正在深刻地改变着无人农场的未来图景。一方面电动农机精准控制是实现自主作业的前提。无论是路径跟踪、自动驾驶或是作业具的精细化操作，都需要快速、精确响应控制指令的平台。电动底盘、电动执行机构正好满足了这些需求，使复杂的智能算法能够精准落地，把决策高效地转化为实际行动。

另一方面智能化技术给电动农机性能提高、应用拓展提供强大的支持。根据人工智能的能量管理策略可以很好地提高电动农机的续航能力。智能系统依靠机器视觉、多传感器融合等技术手段来感知作业环境，优化作业路线，调节操作参数从而达到节电的目的。智能化和电动化结合产生新的农机产品形态和作业模式。多台小型、轻量化电动智能农机集群可以一起完成大面积田间作业。既可有效降低土壤压实，又具有较高的灵活性及鲁棒性，是未来农业生产的主要发展方向。电动化与智能化相结合，会使得农业机械不再只是单纯的动力工具，而是能感知、做决策、完成动作的智能移动机器人。

第三节 智能化与自动化发展

新一代信息技术同农业机械电子系统深度融合以后，现代农业机械电子系统正处在由单点智能向系统智能、局部自动化向全流程无人化的大变革当中。它不但是技术的迭代升级，更是对传统农业模式的颠覆性变革，目的是创建更加高效、精准、绿色、可持续的农业新范式。本节主要对智能化、自动化的发展状况进行详细论述，并对未来的农业大致面貌进行描绘。

一、从单机智能到多机协同

单台农机已经不能满足大规模、高效率现代农业生产的需要，农机集群协同作业已经成为必然。依靠信息互联和智能调度，使多台农机能够臂使指一般统一行动，将农业生产力提升到新的高度，这是从“个体”智能走向“群体”智能的重要一步。

（一）农机集群作业的通信与协同

农机集群协同作业的核心就是建设稳定、高效、低延迟的通信网络。该网络除了要承载各个农机自身状态数据（即位置、速度、姿态、作业参数等），还要实时传输协同指令、环境感知信息、任务调度数据。目前 5G、北斗卫星通信、Wi-Fi 6 等无线通信技术已经成为了这个网络体系的支撑。特别是 5G 技术，大带宽、低时延的特点给海量数据（高清视频、雷达点云）的实时交互提供可能，使机群高速行进中可以立即作出协同反应。

协同机制的建立也不仅仅是信息的传递，它还是一个复杂的语言和规则体系。使用标准化的通信协议，不同的农机之间可以互相通信，解决了长久以来存在的数据孤岛问题。在此基础上，主从控制、分布式控制等不同的协同模式也相继出现。主从模式下，主控农机做决策并发出指令，其它从属农机精准跟随执行，适合于结构化程度较高的作业场景。而分布式控制更灵活，机群中的每台农机都有一定的自主决策能力，互相协商达成一致，共同完成复杂的任务，鲁棒性更强，适应性更好。由中央集权向民主协商的转变，就是农机集群智能水平跃升的表现。

（二）任务分配与路径协同规划

高效的农机集群作业效率的“大脑”就是任务分配和路径规划。面对广阔的农田、繁重的作业任务，怎样把任务分解成子任务并分配给每一台农机，为它规

划出无冲突、最优的作业路径，这就是组合优化问题。现代算法为此提供了一种强有力的手段，即改进的合同网算法、动态遗传算法可以在云端平台上根据田块边界、障碍物信息和农机性能参数快速生成全局最优的任务分配方案。分配时要考虑到单机作业效率，还要把整个集群总作业时间最短、能耗最低、重复作业面积最小作为综合目标。

路径协同规划是在任务分配之后精细化执行的方案，分两个层次：地块内部全覆盖路径规划和地块之间转移路径规划。地块内部算法要给每台农机生成最优的弓字形、环形或者往复式作业路径，保证无遗漏、无重叠地覆盖所有区域。在地块之间要规划出最短、最安全的转移路线。多机协同作业时路径规划是动态的、协作的。系统需要可以实时预测各个农机的位置以及运行轨迹，从而防止路径交叉或者互相干扰。主从跟随模式下，从机的路径规划要根据主机的距离、相对位置关系来动态生成，并且设置好协同转弯策略，在地头转弯等复杂区域不能发生碰撞。依靠全局信息和实时交互来实现集群的协同规划，是实现集群高效、安全作业的重要保证。

（三）协同避障与安全控制

安全是农机自动化，尤其是集群作业中不能忽视的底线。协同避障、安全控制系统是保证农机、人员、环境安全的“守护神”。集群协同避障和单机避障的不同之处在于，集群协同避障要应对田间的静态障碍物（电线杆、树木）、动态障碍物（突然闯入的人、动物），还要处理集群内成员间的相互避让，复杂度呈指数级增长。这就需要系统有全局态势感知能力，把激光雷达、毫米波雷达、深度摄像头等传感器的数据融合起来，创建起动态共享的环境模型。

探测到碰撞风险的时候，安全控制系统就会立即介入。内部成员的回避，系统按照事先设定好的优先级以及避让规则，采用改变速度、航向或者停车等方式化解冲突。以方向包围盒算法、分离轴定理为原理，建立的安全状态检测模型，能够准确地判断出农机的相对位置，在农机发生潜在碰撞之前会发出警告并触发现象躲避动作。系统在遇到外部突发障碍的时候，除了执行紧急制动之外，还会通过集群通信网络向所有的成员发出预警信息，使其他农机提前做出调整，防止出现连锁反应。远程安全监控与接管功能也是不可或缺的，在机器不能自主处理的情况下，通过监控中心人员远程干预，实现远程驾驶，保证农机安全，给农机协同提供一道安全屏障。

二、全流程无人化农场

全流程无人化农场是现代农业机械电子技术的集大成者，它把智能化、自动化渗透到农业生产各个环节中，形成一个高度协同、自我优化的生产系统。这绝不是简单的“机器换人”升级，而是一场农业生产的系统性革命，预示着一个耕种管收皆无人、丰产增效尽在云的新时代的来临。

（一）耕、种、管、收全流程无人化作业

全流程无人化作业是无人农场最直观的体现，是农业生产由依靠人力、经验到依靠数据、算法转变的标志。它包含土地整备、播种、收获、储存全部过程。

1. 耕整地环节：用的是北斗高精度导航系统的无人驾驶拖拉机，可以完成土地深耕、旋耕、激光平地等作业，精度在厘米级。系统按照事先设计好的路线自动驾驶，24小时不间断作业，提高工作效率，保证土地平整度的一致性，为后面播种创造有利条件。

2. 播种环节：无人播种机根据土壤墒情、肥力分布图自动调节播种深度、株距，实现精量播种。无人插秧机在水稻种植中能够均匀高效地完成插秧的工作，使秧苗分布合理。

3. 田间管理阶段在无人化作业当中，技术含量最高。植保无人机或者地面无人车按照作物长势遥感监测图、病虫害预警信息，自动规划航线或者地面路线，进行变量喷药和施肥，实现“哪里需要打哪里、需要多少打多少”。智能灌溉系统根据土壤湿度传感器、气象数据来控制阀门，以达到精准灌溉的目的。

4. 收获环节：用人工智能算法规划无人联合收割机收获路线，按作物密度、成熟度调节收割速度和滚筒转速。当粮仓快要装满的时候，系统会自动召唤无人运粮车来配合作业，从而实现收割、卸粮无缝对接，最大限度地缩短停机等待时间。从收割到粮食转运的整个过程都可以无人干预自动完成。

（二）无人农场信息物理系统

无人化作业装备是无人农场的“四肢”，信息物理系统则是无人农场的“大脑”和“神经中枢”。它把计算、通信、控制技术融合在一起，把物理世界中的农场和数字世界中的虚拟农场紧密联系起来，从而对农业生产全过程进行精准映射、智能分析、优化控制。无人农场的CPS由感知层、网络层、认知层、控制层组成，主要层级及功能如下表所示。

无人农场信息物理系统核心层级及功能

层级	主要功能与组件
感知层	采集土壤、气象、作物长势、病虫害等数据；利用卫星遥感、无人机、物联网传感器等设备
网络层	实时、可靠地将海量数据传输到云端；主要通过 5G、Wi-Fi 6、北斗卫星通信等技术
认知层	构建农场数字孪生模型，模拟推演农艺措施对作物生长的影响；融合作物生长、水肥运移、病虫害等机理模型，进行智能决策
控制层	将智能决策指令下达给田间的无人农机、智能灌溉设备等物理实体，精准执行作业任务

感知层就像农场的神经末梢一样分布到各个地方，使用卫星遥感、无人机、物联网传感器等设备全天候、多维度地采集土壤、气象、作物长势、病虫害等海量数据。网络层要将这些数据可靠、及时地送往云端。认知层创建农场数字孪生模型的重要。该模型不但是农场物理实体的三维可视化复制，而且结合了作物生长模型、水肥运移模型、病虫害发生模型等机理模型，在虚拟空间里模拟和推演不同的农艺措施（施肥量、灌溉策略）对作物生长的影响。以数字孪生为基础，人工智能决策系统对大量的数据进行分析，得到最优的耕、种、管、收作业方案，即智能决策。

控制层把决策指令下达到田间的无人农机、智能灌溉设备等物理实体上，精确地执行作业任务。执行结果又被感知层捕获，反馈给系统，形成了一个感知、认知、控制、执行的闭环，使整个无人农场系统具有了自我学习、自我优化、自我适应的能力，进而不断提高生产效率和资源利用率。

（三）无人农场的运营与管理模式

无人农场出现以后催生了新的商业模式和运营管理模式。传统的以家庭为单位、依靠个人经验进行生产的模式，已经被以数据驱动、专业化服务为主导的平台化经营方式所取代。典型的模式就是技术加服务的轻资产运营。农业科技公司不再只销售昂贵的智能农机，而会给出一个完整的无人农场解决方案，也就是设备租赁、作业外包、数据分析、农艺指导等。农场主可以像网约车一样根据需要租用农机服务，大大降低了进入门槛和初期投资。

订单农业和数据服务相结合是一种新的模式。农业企业同农场主签订产销合同，依靠无人农场管理平台对农场主实施标准化、精准化的生产引导，从而保证农产品的质量与产量。农场主由此得到稳定的销售渠道以及较高的收购价格。由

此产生的大量生产数据本身就是一种非常有价值的资产。平台运营方对这些数据进行脱敏和分析之后，可以开发出针对某一地区、某一作物的种植模型、产量预测、灾害预警等数据产品，为保险、期货、供应链金融等行业提供服务，从而创造出新的利润增长点。智慧农业云平台成为运营管理的主要工具，集成了农机调度、农事管理、生产过程追溯、财务核算等各个功能，使农场管理者可以远程、可视化的精细化经营。

三、人机共融的混合智能

农业生产的复杂性、不确定性决定了在未来可以预见的时期里，完全的无人化并不是唯一的追求。人机共融的混合智能模式把人的经验和直觉和机器的准确、高效结合起来，形成优势互补的强大生产力，是农业智能化发展的更加成熟、务实的发展道路。这是强调在关键环节里保留人的监督、决策和创造性的这种人机结合智能。

（一）远程遥控与虚拟现实操作

远程遥控与虚拟现实技术打破了传统农机驾驶必须身临其境的局限，把操作者从颠簸、嘈杂、尘土飞扬、农药味浓的驾驶室里解放出来，转移到一个舒适、安全的远程控制中心。在农机上安装高清摄像头、麦克风等传感器，利用 5G 等低延迟通信技术，操作员可以实时获得农机周围全景视频和声音，获得身临其境的驾驶体验。沉浸式远程驾驶体验适合于自动驾驶系统不能应对的复杂地形、突发状况，操作员随时可以无缝接管作业，保证作业的连续性、安全性。

虚拟现实技术的加入使远程操作体验又有了新的层次。操作员佩戴 VR 头盔，可以得到完全沉浸式的第一人称视角，用双手或者数据手套来更直观、自然地控制农机。不仅可以降低操作难度，减少培训时间，还能叠加虚拟信息（规划路径、作业边界、作物信息等）辅助操作者进行更精准的判断。陡峭山坡作业或者果实采摘等高风险或者精细化作业场景中，VR 操作有独特的优势，操作者可以安全、精准地控制机器。

（二）增强现实辅助维修与培训

增强现实技术给农机维修和操作培训带来了很大的变化。当农机在田间出现故障的时候，维修人员不必带沉重的纸质手册了。只需要佩戴 AR 眼镜，对准设备上的标志，眼前就会立刻出现该设备的三维数字模型。AR 系统可以叠加虚拟

拆卸动画于实际设备之上，突出要检查的部件、标注工具型号及扭矩值，用第一人称视角让后方专家直接语音指导、进行虚拟标注。可视化指导大大降低了维修难度，减少了对个人经验的依赖，有利于快速找到问题并修复机器，保证农忙时节机器出勤率。

培训上 AR 也起着非常重要的作用。新手农机手可以佩戴 AR 眼镜做模拟农机作业。系统会在驾驶室内将虚拟的仪表盘读数、操作提示和安全警告投射出来，使学员对各项功能有了解。和纯虚拟的 VR 培训相比，AR 培训使学员在真实环境中与真实设备进行互动，从而获得更好的学习效果，培训到上岗之间的过渡也更加平缓。虚实结合的培训方式提高了培训效率、保证了培训安全，也给农业新技能人才的快速培养提供了一条有效的途径。

（三）人机协作的作业模式

人机协作是混合智能最高级的表现形式，人和机器在作业中不再是主仆关系或者监控与被监控的关系，而是动态的、平等的伙伴关系。人和机器按自身优势进行动态分工、合作。机器进行的是重复性、标准化、耕作、播种等工作，人则做具有创造性、决策性的工作。

果园的管理由一名农艺师带领，加上小型采摘机器人、运输机器人组成一个小组进行作业。农艺师根据果实的成熟度来决定是否可以采摘，然后向机器人发送采摘指令，机器人再执行精准的采摘、移动动作。在此模式中人的角色由体力劳动者转变成管理者、决策者、质量控制者。植保作业时，人负责驾驶无人机做宏观巡查，发现异常区域后，再指挥地面机器人进入该区域做高精度的抵近侦察和点对点施药。“人巡 + 机动”的方式是效率与精度的最好结合。未来人机协同会更加注重交互的自然性、任务的自适应分配，系统会根据任务难易程度、作业环境、人的状态等来提出或者调整人机分工建议，进而实现整体作业效能的最大化。

第四节 标准化与产业化展望

随着信息技术同农业生产不断深入融合，现代农业机械电子系统变得越发复杂。为了保证不同厂家的设备之间可以互联互通、数据可以充分利用、系统安全可靠，建立一个统一、完备的标准体系是行业发展必不可少的条件，也是基础。

一、农业电子系统标准化

标准化是农业机械电子系统实现规模化发展，以及高效协同作业的前提。制定并执行统一的技术标准，可以降低研发、制造成本，打破市场壁垒，促进产业链各个环节健康有序发展，为智慧农业的大规模普及奠定良好的科技基础。

为实现上述目标，农业电子系统的标准化工作主要围绕以下几个核心领域展开，具体可见下表。

农业电子系统标准化核心领域

标准化领域	关键目标与作用
接口标准	确保不同设备即插即用、无缝对接，提高作业灵活性与经济性。
数据格式与通信协议	统一数据定义、传输规则，实现数据互联互通，支撑数据价值化和智能决策。
安全与可靠性	建立功能安全、信息安全及环境适应性规范，保障人身财产安全、数据安全和系统稳定运行。

（一）接口标准的统一与推广

现代农业机械及其控制系统之间存在不兼容的情况，造成不同的智能农机设备之间不能协同作业，严重制约了智能农机装备的协同作业效能和潜力。实现接口标准的统一，即在物理连接器、电气特性、上层软件协议等各方面建立一套开放共享的规范。广泛应用的拖拉机与农具通用总线技术，可以实现不同厂家生产的拖拉机、播种机、施肥机、后端管理软件等设备即插即用无缝对接。用户可以按自己的需要自由组合设备，大大提高作业的灵活性、经济性。

国内推行接口标准要依靠政府、行业协会、科研院所、企业等各方共同完成。一方面依靠政策引导和项目扶持，促使国内企业主动参与到国际标准的制定和修订当中，提高我国在标准领域的话语权。另一方面要加快相关国家标准、行业标准的落地实施，用组织互操作性测试、建立认证体系等方式，促使市场从封闭的私有协议转向开放、统一的标准化解决方案，构建起开放、兼容、协同的农业装

备技术生态系统，为用户创造实实在在的价值。

（二）数据格式与通信协议标准化

农业机械电子系统作业时会形成许多多源异构的数据，地理位置数据、耕深数据、播种量数据、作物长势数据、病虫害状况数据、设备工况数据等。数据格式没有统一标准，对数据的存储、交换、分析、应用都会造成很大的困难。因此，对田间作业数据、传感器数据、控制指令数据等做标准化的定义，让数据可以在一台设备、多台设备以及设备与云平台之间正确理解、调用，是实现数据价值化的首要前提。

通信协议的标准化也十分重要，它是数据传输的“语言”和“规则”。它包括设备内部控制器局域网之间的通信，也包括设备与设备之间、设备与云端平台之间远程无线通信。按照农业场景中远距离、低功耗、高可靠性通信要求，选择并规定适合的无线通信技术，统一数据交换协议栈，才能保证农田信息流的高效、稳定传输。

数据格式、通信协议的统一将会完全打通智慧农业信息链路。使不同设备的数据汇聚到统一的农业物联网平台或者大数据中心，为深层次的分析挖掘打下坚实的基础。根据标准化的数据，开发者可以开发出第三方应用，农场管理者可以更方便地对各种设备进行统筹调度和集中控制，农业科学家可以利用更多的数据研究作物模型并做出精准决策，从而产生更多的智慧农业应用场景。

（三）安全与可靠性标准制定

随着农业机械电子系统功能越来越复杂，自动驾驶、无人驾驶等技术的应用，系统安全性和可靠性问题越来越突出。农业作业环境恶劣，粉尘、湿气、振动、温差等都会给电子元器件带来严峻的考验。系统智能化、网联化给数据泄露、恶意入侵等带来了新的风险。因此建立一个包含功能安全、信息安全、环境可靠性标准体系，是保证人身、财产、数据安全，保证农业生产稳定持续的根本保障。

为应对这些挑战，安全与可靠性标准的制定应重点关注以下几个方面：

1. 功能安全标准可以借鉴汽车、工业控制等成熟领域，根据农业机械的应用场合，从设计、开发、验证全生命周期来确定安全要求。在自动驾驶、无人集群作业等高风险的功能上应该建立一套危险评价模型、故障诊断体系、失效安全策略，在可预见的故障发生之前，切换到安全状态，避免造成人员伤亡或者财产损失。

2. 信息安全标准应对农业机械电子系统数据加密、通信安全、固件更新、身

份认证、访问控制等各方面提出具体的技术要求。使用防火墙、入侵检测系统等手段,防止未经授权的访问、控制、数据窃取,保证农场生产数据、用户个人隐私不被侵犯,筑牢国家粮食安全的信息屏障。

3. 对电子系统及其零部件的防护等级、耐振、耐高低温、抗盐雾腐蚀等环境适应性要求及测试方法做详细的规定。同时还要制定严格的电磁兼容标准,保证系统本身不产生过多电磁干扰,能够抵御外部电磁环境的干扰,在复杂的田间电磁环境下稳定可靠地工作。

二、核心元器件与软件的产业化

标准化体系的建立为产业的发展铺平了道路,但是真正的产业竞争力来自于核心技术的自主可控。推动关键硬件元器件、核心软件实现国产化、产业化,是我国摆脱对国外的依赖,提升农业装备核心竞争力,保障国家粮食安全的战略选择。

(一) 国产高精度传感器与芯片的突破

传感器和芯片是农业机械电子系统的“五官”和“大脑”,性能的好坏直接决定了整机的智能化程度。不论是用于精确定位的卫星导航接收机、感知姿态的惯性测量单元、识别作物和杂草的机器视觉传感器、分析土壤成分的光谱传感器,目前高端市场仍然被国外厂商所垄断。一方面造成我国农机装备的制造成本上升,另一方面也给我国农机装备供应链的安全埋下了隐患。

所以国产传感器和芯片实现高精度、高可靠性和低成本的突破已经迫在眉睫,成为了我国农业机械装备升级的当务之急。这就需要国家层面加大在相关领域科研投入和政策扶持力度,推进产学研用深度融合,集聚各方面力量攻克核心算法、关键材料、先进工艺等技术难题。通过设立重大科技专项、建立产业创新联盟等方式,引导资金和人才进入战略领域,培育出一批有核心竞争力的本土企业。

国产高精度传感器、芯片大规模供应会产生重大影响。它不但可以大大降低高端智能农机的生产成本,加快精准农业技术普及到普通农户的速度,自主可控的中心部件会激发农机制造厂商的创新活力,开发出更多符合中国农业实际需求的特色产品,更重要的是,它从根本上保障我国农业科技产业链的安全和完整,为我国由农机大国向农机强国的转变提供强大的技术支持。

（二）嵌入式操作系统与控制软件的产业化

芯片是“大脑”，嵌入式操作系统和上层控制软件就是它的思考与决策的“灵魂”。它们是硬件资源的管理者，是实时处理传感器信息的中心，也是完成路径规划、自动作业、变量控制等繁杂工作的执行者。目前我国大多数农机电子系统使用的是通用开源操作系统，或者直接采用国外成熟的商业软件方案，没有针对农业场景深度优化且自主可控的底层软件平台。

推进专用的国产农业嵌入式操作系统和核心控制软件的产业化，是提高我国农机智能化核心竞争力的又一重要环节。这样的操作系统应该具有高实时性、高可靠性、模块化设计和加强的信息安全特性，可以灵活地适应各种农机和作业任务。在此基础上大力发展自主的控制软件产业，把先进的导航算法、路径规划算法、机器视觉识别算法、多机协同调度算法等转化为具有竞争力的软件产品。不仅可以防止核心技术被控制，还可以用软件定义硬件的方式快速迭代产品的功能，及时响应市场的变化，形成差异化竞争优势。

（三）产业链协同与集群发展

核心元器件和软件的产业化不是某一个企业、某一个环节的孤军奋战，而是整个产业链上下游企业共同参与、共同推进的一项系统工程。它包括基础材料、半导体制造、精密仪器、软件工程、整机集成等诸多领域，需要建立研发、生产、测试、应用等各个环节完整的生态体系。任何一个环节出现缺陷或者薄弱环节，都会成为制约产业发展的瓶颈。因此必须加强产业链各主体之间的战略协同，促使整机企业向上游传递需求、带动零部件企业的发展，支持核心元器件企业向下游提供解决方案、赋能整机产品创新。

在此过程中推动有区域特色、专业优势的产业集群形成，是加快产业化进程的有效途径。在有条件的地方建设农业智能装备产业园或者创新基地，可以集聚资本、技术、人才等重要的资源，促进企业、高校、科研机构之间知识溢出和技术扩散。集群内的企业可以共享供应链资源、测试设备、市场渠道，降低运营成本，也可以通过竞争合作关系来激发创新动力。集群化的产业发展模式有利于形成规模效应、品牌效应，从整体上提高我国农业机械电子系统产业链的韧性以及全球竞争力。

三、商业模式与服务创新

技术、产品突破之后，最终还是要依靠创新的商业模式来体现其市场价值，并更好地服务于农业生产。随着农业机械电子化、智能化的发展，行业正在由原来的设备销售向多元化、服务化的商业生态转变，给产业链各个环节的增长创造了新的空间。

（一）从卖产品到卖服务

传统的农机商业模式是以一次性的产品销售为主，农户或者农业合作社要承担高昂的设备购置成本以及后续的维护风险。对许多技术先进、价格昂贵的智能农机来说，该模式使中小规模种植户望而却步，也造成设备在非农忙季节的闲置浪费。商业模式创新就是要打破这样的局面，促使行业由单一的设备制造商向综合性农业服务提供商转变。

在这种新的模式下，企业提供的不再是拖拉机、收割机，而是一亩地的耕作服务、一吨作物的收割服务。农户根据自己的需要，按需订购作业服务，按作业量或者作业时间付费。对于农机设备制造商、经销商或者专业的农机服务公司来说，利用物联网平台对农机设备实行统一的智能化调度与管理，可最大限度地提高农机设备的利用率，实现跨区作业的规模化、标准化，在降低农民生产成本的同时，也可以给农机服务公司带来稳定的收入。

由卖铁牛到卖服务的转变，实质上就是企业同用户之间关系的改变。它把一次性买卖关系转变为长期合作伙伴关系，企业可以从服务过程中获取设备在真实场景中运行的数据、用户的反馈信息，给产品迭代改进提供第一手资料。既提高了用户的粘性，又使企业更加重视服务质量和农业生产最终效果，形成良性发展闭环。

（二）数据驱动的增值服务

现代农业机械除了完成耕、种、管、收等物理作业之外，它所搭载的各种传感器还使它成为一个移动的农田信息采集终端。作业过程中产生的土壤墒情、养分分布、作物长势、病虫害状况、产量变化等各方面数据，无疑是一座待开发的金矿。经过有效的收集、处理和分析这些数据，就可以产生出一系列高附加值的增值服务，这也是智能农机商业模式创新的又一条途径。

最基本的增值服务就是为用户提供作业报告、地块档案、历史数据查询等，

使用户更好地认识自己的农田和生产活动。更高层次的服务就是对大数据进行深度分析，做出智能决策。融合多源数据，用人工智能和农业模型进行分析，可以给农户提供精准的变量施肥施药处方图、最优的播种密度建议、作物生长状态的实时监测与预警、精确到地块的产量预测等。数据驱动的决策支持服务可以直接帮助农户实现减本增效、降低污染，进而达到可持续精细化管理的目的，产生的价值甚至大于设备本身。

（三）融资租赁等新型商业模式

高昂的购置成本是制约先进农业机械特别是大型、高端、智能化设备广泛应用的主要因素之一。传统的银行信贷模式门槛高、手续繁琐，不能满足广大农户和新型农业经营主体的融资需求。融资租赁作为一项新的金融工具，在这种情况下有较大的应用前景。它用“融物”而不是“融资”的方式，使农户不需要一次性投入大量资金，分期支付租金就可以获得先进设备的使用权，期满后可以选择购买、续租或者退还设备，大大降低了技术应用门槛。

现代信息技术被应用到融资租赁模式当中之后，使其更加灵活、智能。在农机上装上物联网终端，就可以准确地记录下设备的作业时间、作业里程或者作业亩数，从而实现按使用付费的弹性租赁方式。设备的位置、健康状况可以被实时监测，从而有效地降低租赁公司资产管理风险。融资租赁、设备保险、维修保养、技术培训等打包在一起为用户提供一站式综合服务方案，可以消除用户顾虑。金融服务同产业应用深度融合，既给农机制造企业开辟了新的销售渠道，又给我国农业装备的更新换代、结构升级注入了强大的金融动力。

参考文献

- [1] 王艳丽,党国刚.现代设施农业移动智慧实时监控分析[J].机械与电子, 2020, 38(8):4.
- [2] 沈露萍.基于电子技术的智能农业机械控制系统设计[J].南方农机, 2024, 55(22):59-61.
- [3] 王婷.精密电子控制技术在现代农业机械中的集成与应用分析[J].中国农机装备, 2025(6).
- [4] 梁筑.电子信息技术在农业机械中的应用探析[J].科学与信息化, 2020(8): 140-140.
- [5] 姚莉莉,王爱琴.农业机械电子信息技术应用分析[J].河南科技, 2014(001):000.
- [6] 宋岩岩.电子信息技术在农业机械中的应用[J].建筑工程技术与设计, 2016, 000(014):1928.
- [7] 李季.电子信息技术在农业机械中的应用[J].吉林农业, 2018(7):1.
- [8] 莫锦攀.电力系统配电网技术在农机自动化控制中的应用[J].电子乐园, 2021(4):0180-0180.
- [9] 汪博.基于机器视觉的农业导航系统[D].浙江理工大学,2016.
- [10] 梁筑.电子信息技术在农业机械中的应用探析[J].农民致富之友,2020(8): 140-140.
- [11] 李胜.电子信息技术在农业机械中的应用[J].农技服务, 2016(17):1.
- [12] 张亚南,赵宇飞,李娜.电子信息技术在农业机械中的应用[J].农民致富之友, 2015(16):2.
- [13] 孙庆振.电子信息技术在农业机械中的应用[J].南方农机, 2017, 48(2):1.
- [14] 薛成文.电子信息技术在农业机械中的应用[J].农民致富之友, 2014(20):1.
- [15] 邓卫斌.电子信息技术在农业机械中的应用[J].现代农业科技, 2017(4):1.
- [16] 陈泽宇.探析电子信息技术在农业机械中的应用[J].电脑迷, 2017(2):1.
- [17] 姚刚,孙庆宏,郎曼廷.机电一体化系统在农业机械工程中的应用[J].南方农机,

- 2024,55(16):92-94.
- [18] 赵宝.新时期电子信息技术在农业机械中应用研究[J].河北农机, 2023(3):10-12.
- [19] 秦鑫.农业机械自动化在现代农业中的应用与发展趋势[J].电子乐园, 2019(27):1.
- [20] 郭羿江.电子信息工程在农业机械自动控制系统中的应用研究[J].南方农机, 2025(8).
- [21] 陈超.机械类农业机械智能控制系统设计与优化[J].河北农机, 2024(23):34-36.
- [22] 马巨龙.农业机械智能控制系统的设计与优化[J].南方农机,2024,55(21): 186-188.
- [23] 秦诗凡,兰雯竣,常梦鸽.基于物联网的农业机械智能控制系统设计[J].中国农机装备, 2025(6).
- [24] 冯先臻.农业机械作业状况通用监测平台[D].吉林大学[2025-12-19].
- [25] 陈满,倪有亮,金诚谦,等.基于机器视觉的大豆机械化收获质量在线监测方法[J].农业机械学报, 2021.
- [26] 冀呈昕.农业机械智能化控制系统的设计与实现[J].农业机械, 2025(3):101-103.
- [27] 文士达.农业机械自动化远程监控系统的实现与优化[J].中国农机装备, 2024(12):20-22.
- [28] 王丽巍.智能化农业机械系统设计与优化[J].农机使用与维修, 2024(11):38-41.
- [29] 杨思琦.基于网络通信技术的智能农业机械系统建模与优化研究[J].中国农机装备, 2025(6):65-68.
- [30] 曹月真,薛鹤娟.农业机械与电子信息技术结合应用——评《农业机械信息化与智能化技术》[J].中国农业气象,2021.