

分类号: S23  
学号: 20232009032

密级: 公开  
单位代码: 10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 果园厩肥精准变量施肥控制系统的设计与试验

学位申请人

陈思睿

指导教师

坎杂教授

戚江涛 高级实验师

申请学位类别

工学硕士

专业名称

农业工程

研究领域

农业机械化工工程

所在学院

机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2026年5月

分类号: S23  
学号: 20232009032

密级: 公开  
单位代码: 10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 果园厩肥精准变量施肥控制系统的设计与试验

学位申请人	陈思睿
指导教师	坎杂教授 戚江涛 高级实验师
申请学位类别	工学硕士
专业名称	农业工程
研究领域	农业机械化工工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子  
2026年5月

**Design and Experimentation of a Precision Variable-Rate Manure  
Application Control System for Orchards**

A Dissertation Submitted to

**Shihezi University**

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

**Master of Engineering**

By

**Chen Si-rui**

**(Agriculture Engineering)**


Dissertation Supervisor: Prof. Kan-Za

May,2026

# 石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

## 学位论文独创性声明


本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名： 


时间： 2026 年 5 月 15 日

## 使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名： 

时间： 2026 年 5 月 15 日

导师签名： 

时间： 2026 年 5 月 15 日

## 摘要

新疆是我国重要的林果产区，林果业已成为区域经济的支柱产业。科学施肥是提升果实品质、维持树体营养和保障果园可持续生产的关键。然而，生产中普遍存在化肥过量、有机肥施用不足、施肥与树体需求不匹配等问题，导致肥料利用率低、土壤退化及环境污染。因此，优化施肥技术、实施精准养分管理对提升新疆林果业可持续发展能力尤为重要。目前常见的厩肥深施机大多自动化程度低、依赖人力操作、劳动强度较大，难以满足果园对精准化施肥的需求。针对上述问题，本研究基于自主研发的自走式果园厩肥深施机平台，围绕新疆果园实际作业需求，开展果树品种与树龄的变量施肥控制及基于优化算法的 PID 精准控制研究，设计了一套果园厩肥精准变量施肥控制系统，以期新疆果园精准施肥装备研发提供理论依据与实践参考。主要研究内容与结论如下：

(1) 基于农机农艺融合原则与物料特性，确定了精准变量施肥控制系统的总体方案。以新疆特色林果核桃与苹果为研究对象，通过实地调研明确了不同树种、树龄条件下的施肥量需求。进一步对羊粪厩肥的关键物理参数进行了测定，得到其密度约为  $1.486 \text{ g/cm}^3$ ，含水率约为 17.99%，并在此基础上构建了基于品种与树龄的变量排肥数学模型。此外，完成了刮板排肥装置与螺旋绞龙装置等核心执行机构的机械设计。结合生产实际与物料特性，最终确立了施肥控制系统的集成架构与控制方案。

(2) 基于 Simscape 和 Simulink 分别构建了变量排肥模型和精准排肥模型，围绕变量施肥控制与 PID 精准施肥控制展开了研究。通过变量排肥模型仿真试验验证了基于果树品种与树龄的变量施肥方案可行性，在六组目标转速下，系统稳态排肥量的仿真值与理论值相对误差均低于  $\pm 5\%$ 。针对液压控制系统的非线性特性导致的排肥精度不足的问题，提出了一种融合模拟退火算法与伊辛耦合受限玻尔兹曼机的混合智能算法 SA-IsingRBM 用于 PID 参数整定，并与粒子群算法、差分进化算法、副本交换算法等算法进行对比。精准排肥模型仿真试验结果表明，SA-IsingRBM 表现最优，其对应的 IAE、ITAE、超调量、调节时间分别为 0.0303、0.506、 $5 \times 10^{-6}$ 、1。

(3) 基于上述研究，完成了果园厩肥精准变量施肥控制系统的软硬件设计与集成。该系统采用上下位机分布式控制架构：上位机以触摸屏作为人机交互界面，下位机以可编程逻辑控制器为核心控制器，通过电液比例溢流阀实现液压伺服控制，并通过驱动液压马达控制刮板排肥装置与螺旋绞龙装置。结合螺旋绞龙转速与排肥量之间的线性模型与 PID 控制器，完成了控制系统的程序设计。系统支持依据不同树种—树龄组合设定目标排肥量，并基于仿真试验整定后得到的 PID 参数实现反馈调节。

(4) 基于所研发的自走式果园厩肥深施机平台，开展了田间性能试验。在新疆叶城县核桃园的实际测试表明：系统空载转速的平均相对误差均低于 5%；系统响应迅速，阶跃响应时间在 3 s 以内；

排肥量变异系数小于 15%，排肥稳定性符合设计要求，且实际排肥量与理论排肥量误差均小于 5%。  
本研究为果园厩肥精准变量施肥控制系统的智能化提升提供了理论依据和实践基础。

**关键词：**果园；厩肥；精准控制系统；优化算法

## Abstract

Xinjiang is an important fruit-producing region in China, and the fruit industry has become a pillar industry of the regional economy. Scientific fertilization is crucial for enhancing fruit quality, maintaining tree nutrition, and ensuring sustainable production in orchards. However, common issues in production such as excessive chemical fertilizer application, insufficient organic fertilizer application, and mismatch between fertilization and tree requirements have led to low fertilizer utilization, soil degradation, and environmental pollution. Therefore, optimizing fertilization techniques and implementing precise nutrient management are crucial for enhancing the sustainable development capacity of Xinjiang's fruit industry. The existing deep application machines for animal manure generally suffer from low fertilization accuracy and excessive reliance on operator experience, making it difficult to meet the orchards' needs for precise and diversified fertilization. Addressing these issues, this study, based on a self-developed self-propelled orchard deep manure application machine platform and centered around the actual operational needs of Xinjiang orchards, conducts research on variable fertilization control for different fruit tree varieties and ages, as well as PID precise control based on optimization algorithms. A precise variable fertilization control system for orchard animal manure is designed, aiming to provide theoretical basis and practical reference for the development of precise fertilization equipment in Xinjiang orchards. The main research contents and conclusions are as follows:

(1) Based on the principle of integration between agricultural machinery and agronomy, as well as material characteristics, the overall scheme of a precision variable rate fertilization control system was determined. Taking Xinjiang's characteristic fruits, walnuts and apples, as the research objects, the fertilization requirements under different tree species and tree age conditions were clarified through field research. Furthermore, key physical parameters of sheep manure were measured, yielding a density of  $1.486 \text{ g/cm}^3$  and a moisture content of approximately 17.99%. Based on this, a mathematical model for variable rate fertilization based on variety and tree age was constructed. In addition, the mechanical design of core actuators such as the scraper fertilization device and the spiral auger device was completed. Combining practical production and material characteristics, the integrated architecture and control scheme of the fertilization control system were ultimately established.

(2) Based on Simscape and Simulink, a variable fertilization model and a precision fertilization model were constructed, respectively, focusing on the research of variable fertilization control and PID precision fertilization control. The feasibility of the variable fertilization scheme based on fruit tree varieties and tree ages was verified through simulation experiments of the variable fertilization model. Under six sets of target rotational speeds, the relative error between the simulated and theoretical values of the system's steady-state fertilization amount was less than  $\pm 5\%$ . To address the issue of insufficient fertilization accuracy caused by the nonlinear characteristics of the hydraulic control system, a hybrid intelligent

algorithm SA-IsingRBM, which combines simulated annealing algorithm and Ising coupled restricted Boltzmann machine, was proposed for PID parameter tuning, and compared with particle swarm optimization algorithm, differential evolution algorithm, copy exchange algorithm, and other algorithms. The simulation results of the precision fertilization model showed that SA-IsingRBM performed optimally, with corresponding IAE, ITAE, overshoot, and adjustment time of 0.0303, 0.506,  $5 \times 10^{-6}$ , and 1, respectively.

(3) Based on the aforementioned research, the software and hardware design and integration of a precision variable rate fertilization control system for orchard manure were completed. The system adopts a distributed control architecture consisting of an upper computer and a lower computer: the upper computer uses a touch screen as the human-computer interaction interface, while the lower computer uses a programmable logic controller as the core controller. Hydraulic servo control is achieved through an electro-hydraulic proportional relief valve, and the scraper fertilization device and spiral auger device are controlled by driving the hydraulic motor. Combining the linear model between the spiral auger speed and fertilization rate with a PID controller, the control system's program design was completed. The system supports setting target fertilization rates based on different tree species-age combinations, and achieves feedback regulation based on PID parameters obtained after tuning through simulation experiments.

(4) Based on the self-propelled deep application machine platform for orchard manure developed, field performance tests were conducted. Actual testing in the walnut orchard of Yecheng County, Xinjiang, showed that the average relative error of the system's no-load speed was below 5%; the system responded quickly, with a step response time within 3 seconds; the coefficient of variation of the fertilizer discharge was less than 15%, and the stability of fertilizer discharge met the design requirements, with the actual fertilizer discharge error being less than 5% compared to the theoretical fertilizer discharge. This study provides a theoretical basis and practical foundation for the intelligent improvement of the precision variable fertilization control system for orchard manure.

**Key words:** Orchard; Manure; Precision control system; Optimization algorithm

# 目录

摘要.....	I
<b>Abstract</b> .....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 精准变量施肥装置.....	2
1.2.2 变量施肥和精准施肥控制方法.....	4
1.2.3 PID 及其优化算法在精准变量施肥领域应用.....	6
1.3 研究目标与内容.....	8
1.3.1 研究目标.....	8
1.3.2 研究内容.....	8
1.4 研究方法与技术路线.....	9
1.4.1 研究方法.....	9
1.4.2 技术路线.....	10
第 2 章 果园厩肥精准变量施肥控制系统总体方案.....	12
2.1 精准变量施肥控制系统需求分析与设计依据.....	12
2.1.1 基于农艺参数的精准变量施肥需求分析.....	12
2.1.2 精准变量施肥装置关键部件设计.....	13
2.2 精准变量施肥系统装置作业流程与控制架构.....	20
2.3 本章小结.....	21
第 3 章 基于果树品种与树龄的变量施肥控制模块研究.....	22
3.1 变量控制模块设计目标与变量需求分析.....	22
3.2 厩肥物料特性及其对装置设计的影响分析.....	24
3.3 基于品种与树龄的变量控制施肥量关系模型建立.....	24
3.4 变量施肥控制模块物理参数测量试验.....	25
3.5 基于 Simscape 的变量排肥控制仿真试验.....	27
3.5.1 变量排肥模型建立.....	27
3.5.2 变量排肥性能仿真试验设计.....	32
3.5.3 变量排肥性能仿真试验结果与分析.....	32
3.6 本章小结.....	41
第 4 章 基于优化算法的 PID 精准施肥控制模块研究.....	42

4.1 精准控制模块设计目标 .....	42
4.2 基于物理启发式算法与 PID 的精准控制仿真优化研究 .....	42
4.2.1 精准排肥数学模型建立 .....	42
4.2.2 物理启发式优化算法设计 .....	45
4.2.3 PID 参数寻优试验方法与评价指标 .....	53
4.2.4 试验结果与讨论分析 .....	54
4.3 本章小结 .....	57
第 5 章 果园厩肥精准变量施肥控制系统试验 .....	58
5.1 精准变量施肥控制系统软硬件设计 .....	58
5.1.1 精准变量施肥系统硬件选型及外围电路设计 .....	58
5.1.2 精准变量施肥系统程序设计 .....	59
5.1.3 精准变量施肥装置集成 .....	61
5.2 精准变量施肥系统装置田间试验 .....	63
5.2.1 系统测试条件 .....	63
5.2.2 评价指标 .....	63
5.2.3 试验结果分析与讨论 .....	64
5.3 本章小结 .....	68
第 6 章 结论与展望 .....	69
6.1 结论 .....	69
6.2 展望 .....	70
参考文献 .....	71
致谢 .....	77
作者简介 .....	79
导师评阅表 .....	80

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

我国是全球林果产业的核心国家之一，种植规模与产量长期位居世界前列。据统计，2025年全国果园面积约1.95亿亩，产量约3.2亿吨，均居世界首位<sup>[1]</sup>。新疆依托亚欧大陆腹地的区位优势 and 独特的光热水土资源，已成为全国林果产业的核心产区。2024年，新疆林果种植面积约2100万亩，产量1300万—1400万吨，形成了以环塔里木盆地为核心的“一区三带”产业格局<sup>[2]</sup>。其中红枣、葡萄、香梨的规模与产量全国第一，核桃产量居全国第二，进一步巩固了“瓜果之乡”的地位<sup>[3]</sup>。特色林果业已成为乡村振兴和农民增收的重要支柱。

科学施肥是果园土壤管理的核心措施，对提升果品质量和维护生态平衡具有关键作用<sup>[4]</sup>。研究表明，有机肥可通过提高土壤有机质、改善团聚体结构和激活微生物活性来促进果园生态循环<sup>[5]</sup>。政策层面，我国已构建相应体系：《农业部关于打好农业面源污染防治攻坚战的实施意见》（农科教发〔2015〕1号）提出，到2025年化肥利用率提高到43%以上，畜禽粪污综合利用率达90%<sup>[6]</sup>；《“十四五”全国农业绿色发展规划》（农规发〔2021〕8号）则实施“绿肥还田倍增计划”，推动南方果园绿肥面积年增5%，北方果园秸秆生物反应堆技术覆盖率达60%以上<sup>[7]</sup>。

研究显示，果树采后至落叶前（一般为9~10月）是树体营养积累的关键期，此时基肥应占全年施肥量的60%~70%，其中有机肥占比宜在70%以上<sup>[8]</sup>。通过该时期的科学施肥管理，可有效促进果树根系对养分的吸收转化，提升树体贮藏营养水平，进而提升花芽分化质量，降低病虫害发生率，最终实现果实产量提升及品质改善。

然而，新疆林果产业在经历快速规模扩张的同时，其整体生产质量与可持续发展面临显著挑战。优质集约化栽培、机械化生产、水肥精准化管理及标准化生产等方面的技术储备，滞后于产业规模增长<sup>[9]</sup>。具体而言，当前施肥管理严重依赖农民的粗放式操作，而非基于科学依据<sup>[10]</sup>。这种非标准化施肥行为不仅造成单产水平受限，更引发土壤板结、盐渍化等次生生态问题<sup>[11]</sup>。此外，如图1-1所示，随着矮砧密植栽培技术在新疆的加速普及，株行距普遍缩窄至1.5~2.0米×3.5~4.0米，显著提升了单位面积种植密度，传统施肥机械已难以适应作业要求<sup>[12]</sup>。为此，亟须研制智能精准施肥机械装备，通过精准作业，改善施肥质量，实现果园生产向环境友好型现代化模式的转型。



图 1-1 新疆果园密植种植现状

Fig.1-1 Current status of high-density orchard planting in Xinjiang

针对上述问题,本研究以新疆果园矮砧密植模式的农艺需求为导向,以实现厩肥精准变量施用为目标,从机电系统协同控制角度,设计并开发一套面向新疆果园的厩肥精准变量施肥控制系统。系统设计基于仿真验证结果,并结合关键机械结构,集成果园厩肥精准变量施肥控制系统。该研究为开发适应不同树种、树龄果园的变量施肥装备提供了方法支撑与技术参考。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 精准变量施肥装置

自 20 世纪 70 年代起,随着精准农业理念的推进,国外逐步形成了以精准变量施肥技术为核心的智能化施肥装备体系,其在基础理论与集成系统研发方面取得重要突破。精准变量施肥装置作为精准农业技术实施的关键载体,能够实现肥料按需精准投放,显著提升肥料利用率。以法国库恩集团推出的 ProTwin 8150 型侧式抛撒机为例<sup>[13]</sup>,如图 1-2 所示,该装置集成 GPS 与 GIS 技术,可自动生成施肥处方图,通过 EMC 控制系统实时调节撒肥盘开度与转速,实现高精度的变量施肥作业,尤其适用于蓝莓等小浆果类果园的高效精准施肥场景。除了法国库恩集团之外,还有美国凯斯 (Case) 公司推出的 Flexicoil 系列精准变量施肥播种机,支持同时调控三种类型肥料配比,具备多物料协同变量施肥能力;德国阿玛松 (Amazone) 的 ZA-M/ZA-B 系列变量撒肥机配备 ISOBUS 终端与液压驱动系统,可依据作物长势动态计算最佳施肥量<sup>[14]</sup>。这些装备共同体现了精准变量施肥装置向智能化、多功能化及高精度化的发展趋势。

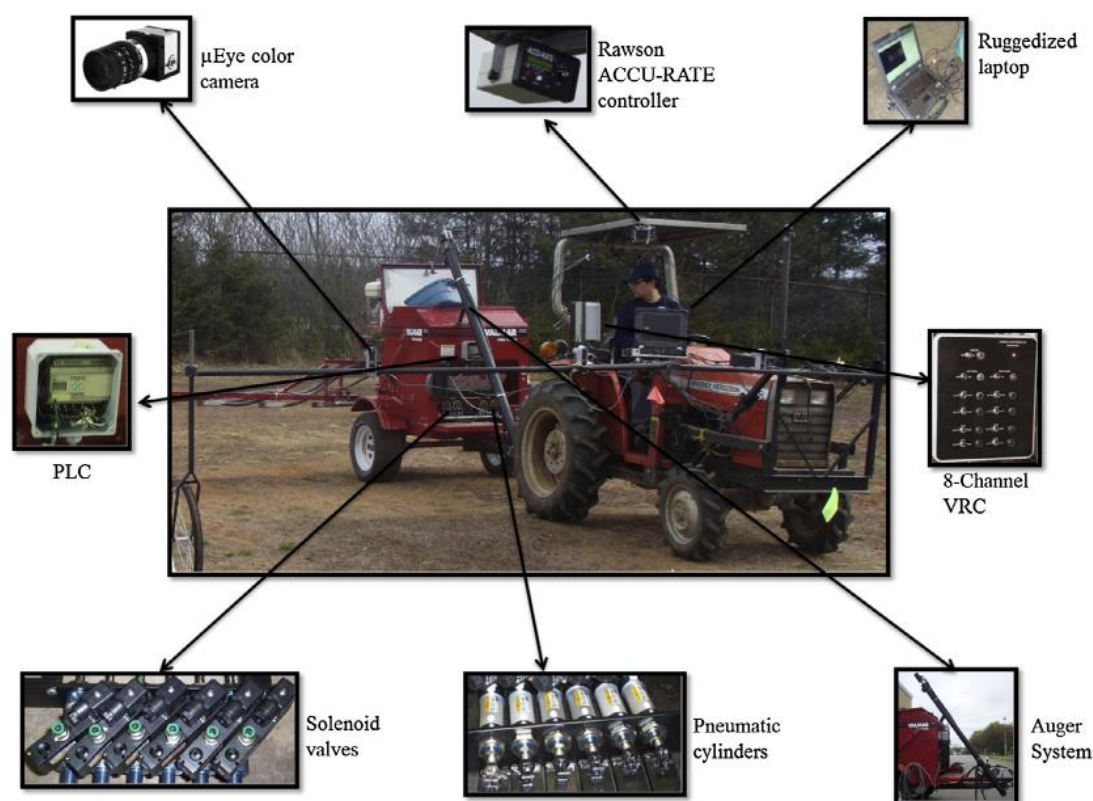
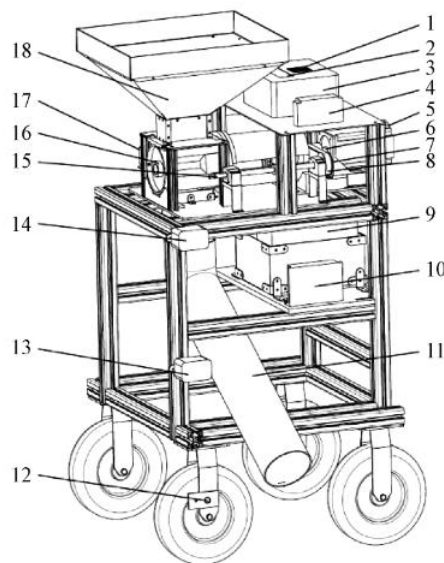


图 1-2 ProTwin 8150 型侧式抛撒机

Fig.1-2 ProTwin 8150 Side Spreader

我国施肥机械研究在精准变量施肥装置领域虽起步较晚，但通过高等院校与科研机构的持续攻关，已形成具有本土适应性的精准变量施肥装备体系，部分机型已实现规模化生产<sup>[15]</sup>。例如，白秋薇等<sup>[16]</sup>研发的设施果园自动对靶精准变量施肥装置，如图 1-3 所示，采用激光雷达探测果树冠层，通过 STM32 单片机控制排肥轮转速与槽口开度，实现了对尿素、复合肥等颗粒肥料的按需精准投送，单棵果树施肥量相对误差最大仅为 5.17%。何义川等<sup>[17]</sup>基于点定位技术设计了变量施肥控制装置，并通过 EDEM 离散元分析与田间试验对比，指出肥料填入槽轮的速率是影响施肥准确性的关键，通过修正电机转速可有效提升精度。刘方平等<sup>[18]</sup>研发的自动开沟施肥机采用双绞龙强制排肥技术，可用于多形态肥料（化肥、有机肥、复合肥）精准下肥。郑钧耀等<sup>[19]</sup>针对螺旋施肥装置的排肥脉动问题，设计了一种两级螺旋施肥装置，通过优化排肥口开口角度与上下螺杆转速比，使排肥均匀性变异系数降至 7.35%，对靶误差小于 0.17 米。段洁利等<sup>[20]</sup>根据蕉园实际沟施过程和农艺要求，设计了一种香蕉假茎自动对靶精准施肥装置，并以施肥量变异系数、施肥长度变异系数和假茎中心偏移距离为评价指标，进行最优参数组合下的田间试验，进一步验证精准施肥装置的工作性能。



1.4×4 矩阵键盘 2.显示屏 3.控制箱 4.驱动器 5.86 式步进电机 6.联轴器 7.同步带  
 8.同步带 9.蓄电池 10.驱动器 11.排肥管 12.霍尔传感器 13.激光对靶传感器 1  
 14.激光对靶传感器 2 15.丝杆滑轨 16.排肥轮 17.4.2 式步进电机 18.肥料箱

图 1-3 自动对靶精准变量施肥装置结构示意图

Fig.1-3 Structure diagram of auto-targeting precision variable-rate fertilization device

在精准变量施肥装置的结构优化与功能完善层面，后续研究者开展了深化改进。施印炎团队<sup>[21]</sup>围绕稻麦精准变量施肥机的排肥稳定性问题，对外槽轮式排肥器进行了系统研究。该团队基于离散元方法构建仿真模型，对排肥过程开展数值模拟，探讨了不同排肥器结构参数与施肥控制策略对排肥稳定性的影响机制。中国农业大学谭好超团队<sup>[22]</sup>针对林果园有机肥的物理特性，研制了一种链式精准变量开沟施肥机，采用刮板式排肥机构实现肥料自底部向排肥口的稳定输送，并通过排肥口高度与排肥转速的双参数联动控制，提升施肥精度。马旭等<sup>[23]</sup>面向水稻插秧同步施肥的作业需求，开发了一种基于 STM32 单片机的固体颗粒肥料精准变量施肥装置。该装置集成了肥料流量在线检测系统，建立了三种主要固体颗粒肥料的检测流量与压电片输出电压的关系模型、实际排肥流量与排肥轴转速的对应模型，以及排肥轴转速与电动推杆工作长度、插秧机前进速度之间的联动模型。

综上所述，国内外学者在精准变量施肥装置方面的持续探索，在机构设计、检测方法、智能控制与集成应用等层面取得了重要进展，为本研究提供了相应的理论依据与技术支撑。基于此，本研究拟进一步探索适用于新疆果园厩肥的精准变量施肥控制系统。

### 1.2.2 变量施肥和精准施肥控制方法

随着农业现代化进程的不断推进，变量施肥与精准施肥控制方法已成为提升肥料利

用效率、保障粮食安全及推动农业可持续发展的重要技术路径。近年来，国内外学者围绕该类技术开展了广泛研究，重点聚焦于机电一体化系统集成与作业可靠性提升等关键方向，推动了施肥作业向高精度、智能化方向发展。在国外，Raja 等<sup>[24]</sup>开发了基于可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）的多参数协同调控系统，通过集成实时监测与闭环反馈机制，构建了涵盖墒情分析、营养守恒求解与执行器调控的全流程控制架构，为变量施肥提供了可行的工程化解决方案。Snahill Agrawal 等<sup>[25]</sup>开发的智能滴灌系统则通过 PLC 集成技术，建立了灌溉周期与施肥浓度的控制模型，该系统的模块化程序设计不仅支持作物生长阶段适配的养分供给策略，还通过人机协同机制实现了远程监控与动态参数优化，精确地调整滴灌系统中的肥料释放量，以满足不同作物的需求，实现了对变量施肥和精准施肥的控制。Ahmed A. Alameen<sup>[26]</sup>等研制了一种用于颗粒肥料的变量施肥速率控制系统（VRA），通过引入微处理器、气动缸和旋转轴编码器，将传统手动机械施肥装置升级为实时自动控制系统，实现了对颗粒肥料施放的变量调控与精准管理。P.P Pawase 等<sup>[27]</sup>开发了一套基于微控制器的可变速率施肥系统，系统通过氮传感器实时检测养分需求，利用比例电磁阀调节肥料流量，实现了根据推荐剂量精准调控营养素施用的功能，并在玉米田间试验中验证了其有效性。

在国内相关研究领域，刘明达等<sup>[28]</sup>开发了基于 PLC 的精准施肥系统，如图 1-4 所示，整合人机交互界面（Human Machine Interface, HMI）、工业通信与模糊控制策略，实现了水肥参数的实时精准调控。夏晓谦等<sup>[29]</sup>设计了以 PLC 为核心的恒湿干燥排肥系统，通过螺旋排肥器与湿度传感器构成闭环精准排肥调控体系，实现了物料输送、环境监测与执行机构的一体化控制。刘文亮等<sup>[30]</sup>在马铃薯水肥一体化系统中引入 PLC 与 PID 动态补偿算法，依托传感器网络与恒压变频装置，实现了施肥流量的精确稳定输出。

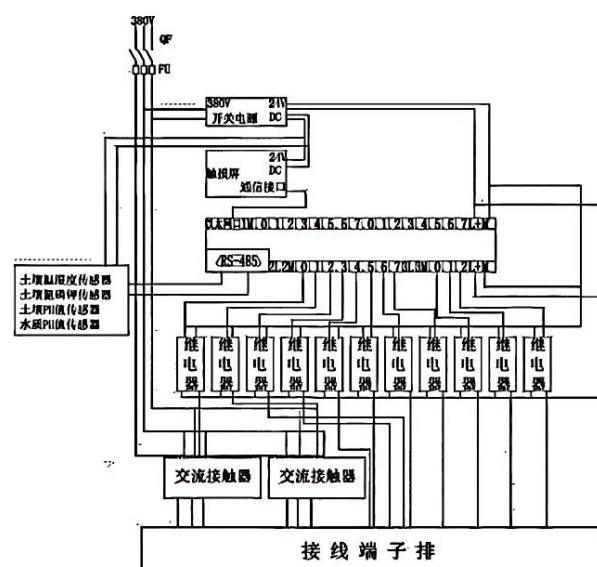


图 1-4 控制系统接线图

Fig1-4. Control system wiring diagram

综上所述, 现有研究为变量施肥与精准施肥控制方法的建立提供了重要的理论支撑与技术路径。然而, 由于有机肥在物理特性方面具有显著复杂性, 其流动性与抛撒形态易受湿度、纤维含量等多种因素影响, 表现出较强的不确定性。目前该领域的研究多基于无机肥的物料特性展开, 致使针对有机肥的精准控制研究存在明显不足, 亟待开展相关系统研究与技术攻关。

### 1.2.3 PID 及其优化算法在精准变量施肥领域应用

在精准变量施肥领域, PID 控制及其优化算法的应用是实现施肥量高精度控制的核心途径之一。当前研究重点集中于如何通过智能优化算法、自整定策略或自适应 PID 控制模式, 有效提升系统在复杂工况下的控制品质与稳定性, 这已成为农业自动化装备智能化发展中的一个重要研究方向。

在国外相关研究中, Song 等<sup>[31]</sup>将传统 PID 控制与模糊逻辑及遗传算法相结合, 构建了变速率施肥控制系统, 依托处方图配置设备速度与条幅宽度, 实现了颗粒肥料施用的精准调控。Sun-Wook 等<sup>[32]</sup>开发了基于图像的施用量检测系统 (IBARMS), 并对比分析了开环控制与 PID 控制策略的性能, 结果表明 PID 控制器在多种转速下均具有更高的控制精度。Liu 等<sup>[33]</sup>设计了基于 PID 算法的闭环施肥控制系统, 依托 LabVIEW 平台与流量传感器构建反馈机制, 试验结果显示该系统在响应速度与控制准确性方面显著优于传统定速系统。Wang 等<sup>[34]</sup>提出一种变论域模糊 PID 控制器, 用于三通道灌溉施肥机的水肥比例调控, 试验表明该策略可显著缩短系统稳定时间, 并将误差控制在 5% 以内。Abdul Azis 等<sup>[35]</sup>研制了基于 PID 控制的螺旋式变速排肥装置, 如图 1-5 所示, 通过阶梯响应与阶跃响应测试验证了该系统能够准确跟踪设定指令, 展现出良好的动态性能与控制潜力, 为精准施肥装备的开发提供了重要参考。Uri Arta Ramadhani 等<sup>[36]</sup>开发了一套基于 PID 控制的水肥混合控制系统。试验结果显示, 在设定点为 540 ppm 时, 系统控制效果稳定且精度较高; 当设定点提升至 1100 ppm 时, 实际测得的溶解颗粒肥料浓度为 1116 ppm, 平均误差率仅为 4.22%, 表明该系统具有良好的控制性能。Emmanuel Abiodun Abioye 等<sup>[37]</sup>则设计了一种结合卡尔曼滤波器的 PID 控制器 (Kalman Filter-PID, KF-PID), 应用于地下纤维毛细管水肥混合灌溉系统。该控制器旨在精确调控纤维毛细管界面与水面之间的供水深度, 从而保障水分经由毛细管作用高效输送至植物根区。借助 KF-PID 算法, 系统可实时调整供水参数, 动态维持根区水分平衡, 进而提升水肥利用效率并优化作物生长环境。