

Development and Performance Analysis of Adaptive Tree Whitewashing Equipment Based on Intelligent Control

Xiaoli Han¹ Bingchao Zheng¹ Mingchao Tang²

1. Mengzhou Yellow River Bureau of Jiaozuo Yellow River Bureau, Mengzhou, Henan, 454750, China

2. Mengzhou Yellow River Water Conservancy Project Maintenance Project Management Department of Jiaozuo Yellow River Water Conservancy Project Maintenance Co., Ltd., Mengzhou, Henan, 454750, China

Abstract

Aiming at the problems existing in traditional tree whitewashing operations, such as high labor intensity, low operation efficiency, poor coating uniformity and unstable quality, this study designs and develops a type of tree whitewashing equipment. By integrating an electric mixing system, a multi-directional electric adjustment mechanism and a closed-loop control system, this equipment realizes the mechanization and automation of tree whitewashing operations. The system innovatively constructs a “four-in-one integrated module” of “electric mixing - electric telescoping - electric lifting - electric opening and closing”, which can complete rapid and uniform wrap-around spraying on tree trunks under different site conditions. Verified by practical engineering applications, the uniform and stable whitewashing layer not only improves the aesthetic appearance of trees, but also enhances the trees’ resistance to diseases and pests as well as their cold resistance in winter, indirectly promoting the overall management and maintenance level of landscape greening projects. Generally speaking, this equipment performs prominently in terms of technical feasibility, economic practicality and engineering applicability, and has broad prospects for popularization and application as well as potential for large-scale industrialization.

Keywords

Tree Whitewashing; Mechanical Automation; Electronic Control System; Adjustable Spraying; Encircling Structure; Precise Targeted Spraying

基于智能控制的自适应树木涂白装备研制与性能分析

韩晓丽 郑丙超 汤明超

1. 焦作黄河河务局孟州黄河河务局，中国·河南孟州 454750

2. 焦作黄河水利工程维修养护有限公司孟州河务局黄河水利工程维修养护项目经理部，中国·河南孟州 454750

摘要

针对传统树木涂白作业中存在的劳动强度大、作业效率低、涂层均匀性差及质量不稳定等问题，本研究设计并开发了一种树木涂白装备。该设备通过集成电动拌和系统、多向电动调节机构与闭环控制系统，实现了树木涂白作业的机械化与自动化。该系统创新性构建了“电动拌和-电动伸缩-电动升降-电动张合”四合一集成模块”，可在不同立地条件下完成对树干的快速、均匀包裹式喷涂。经过实际工程应用验证，均匀且稳定的涂白层不仅提升了树木外观的美观度，还增强了树木对病虫害的抵御能力与冬季抗寒性能，间接推动了园林绿化工程整体管护水平的提升。综合来看，该装备在技术可行性、经济实用性与工程适用性方面均表现突出，具备广阔的推广应用前景与规模化产业化潜力。

关键词

树木涂白；机械自动化；电控系统；可调节喷涂；环抱式结构；精准对靶喷涂

1 引言

树木涂白作为林木养护中的一项关键措施，广泛应用于城市绿化、公路林木及生态防护林等领域，其主要功能包括防治病虫害、延缓树木萌芽、防御冬季冻害与夏季日灼。目前，国内树木涂白作业多依赖人工作业，存在涂布效率低、一致性差、劳动强度大和安全隐患较多等问题。尤其在堤防

工程、生态林区等大规模、高密度种植区域，传统人工涂刷方式已难以满足现代化、规模化林木管护的需求。

随着我国林业机械化和智能化水平的不断提升，开发高效、精准、可适应复杂地形的专业化树木涂白设备已成为行业迫切需求。目前，虽已有部分电动喷涂设备投入使用，但仍普遍存在适应性差、操作复杂、喷涂不均匀等问题，无法实现对不同胸径、不同冠层状态树木的精准作业。

基于以上背景，本研究以提升树木涂白作业的机械化、自动化与精准化水平为核心目标，研制了一种树木涂白装备。该设备集机械结构设计、电控系统集成与智能操作为一

【作者简介】韩晓丽（1986-），女，中国河南孟州人，本科，工程师，从事水利工程管理及防洪抗旱研究。

体，具备高度可调节性与环境适应性，旨在为解决当前树木涂白作业中的关键技术瓶颈提供装备支持。

2 文献综述

国内外学者在农林机械自动化领域已开展了诸多研究。张华等（2020）综述了当前林业机械化养护设备的发展现状，指出智能化与多功能集成是未来林业装备的重要发展方向。Yang et al. (2022) 开发了一种基于视觉识别的树木自动保护系统，通过图像处理技术实现对树木位置的识别与定位，但其系统复杂、成本较高，难以在大规模工程中推广。

在涂白设备方面，王鹏等（2021）分析了现有树木涂白技术及其应用现状，指出目前我国涂白作业仍以人工为主，机械化辅助设备普及率较低，亟需开发低成本、高效率的专业化装备。李哲等（2019）设计了一种手持式电动喷涂器，虽减轻了劳动强度，但仍需人工操作，无法实现自动化作业。

综上所述，当前树木涂白设备研究仍处于初步阶段，尚未形成成熟的技术体系与装备系列。本研究基于工程实际需求，设计了一种结构合理、操作简便、适应性强的树木涂白装备，旨在填补该领域的技术空白。

3 设备系统设计与工作原理

3.1 整体结构设计

树木涂白装备主要由四大系统模块组成：限位往复机构、液压滑轨基座、喷涂器总成和自动拌料箱。各模块通过中央电控系统实现协调控制与联动操作。

设备采用模块化设计理念，具备快速安装、折叠收纳和高度集成特点。整体结构依托工程养护车平台，实现了动力与载体的有机结合，显著提高了设备的机动性与场地适应性。

3.2 工作原理

设备启动后，拌料箱内设的电机驱动十字螺旋桨进行涂料混合，并通过高密度滤网（筛孔直径 $\leq 0.1\text{ mm}$ ）实现杂质过滤。喷涂器通过电动推杆控制张合动作，液压滑轨基座带动喷涂器水平移动至树木一侧。随后，往复机构沿树干垂直方向运行，同时电磁阀控制涂料泵完成喷涂作业。整个过程实现了从拌料、定位到喷涂的全流程自动化操作。

3.3 关键部件设计

3.3.1 限位往复机构

采用 CCM 同步带直线模组作为升降装置，配合直流电机与双限位传感器，实现喷涂高度在 30–143 cm 范围内的精确控制。该设计显著降低了设备重量与能耗，提升了运动平稳性与可靠性。

3.3.2 可调节喷涂系统

设计两种口径的环形对开式铜制喷涂器（内径 20 cm / 42 cm），结合电动张合机构，可适应不同胸径的树木。增设手持加长喷枪，应对特殊地形条件下的作业需求。

3.3.3 液压滑轨基座

集成 LX600-140 型电动直流伸缩杆，实现滑轨臂长在

0–120 cm 范围内电动调节，适应不同行距树木的喷涂需求，提高了设备对不同工程环境的适应性。

3.3.4 自动拌料系统

拌料箱采用耐磨尼龙材料制成，内置电动波轮搅拌器与过滤装置，有效防止涂料沉降和堵塞现象，确保涂料混合均匀性和喷涂质量。

4 创新点与技术优势

4.1 技术创新体系

本研究在树木涂白机械装备领域实现了多项重要技术突破，构建了完整的创新技术体系：

4.1.1 基于直线模组的高度自适应控制系统

采用高精度 CCM 同步带直线滑台模组作为垂直升降机构，配合直流伺服电机与光电编码器组成闭环控制系统。系统通过 STM32 系列微控制器实现运动轨迹规划，采用 PID 算法精确控制喷涂高度在 30–143cm 范围内的自适应调节。限位传感器采用双冗余设计，包含霍尔传感器和机械限位开关，确保升降定位精度达到 $\pm 1\text{mm}$ 。该设计解决了传统液压升降系统存在的定位精度低、能耗大、维护困难等问题。

4.1.2 多自由度空间定位系统

创新性地采用 LX600-140 型电动直流伸缩杆与精密直线导轨的组合设计，构建了具有 120cm 行程的横向调节系统。系统通过 CAN 总线通信协议实现多轴协同控制，采用绝对值编码器实时反馈位置信息，确保喷涂机构能够在复杂地形条件下实现精准定位。该系统的重复定位精度达到 $\pm 0.5\text{mm}$ ，可适应不同行距树木的作业需求。

4.1.3 自适应环抱式喷涂机构

研发了双规格环形对开式铜制喷雾器（Φ200mm / Φ420mm），采用 316 不锈钢材质制造，具有优异的耐腐蚀性能。喷涂器采用蜗轮蜗杆传动机构，通过步进电机驱动实现 0–180° 开合角度精确控制。系统配备压力传感器和流量计，实时监测喷涂参数，确保不同胸径树木（20–42cm）都能获得均匀的涂层覆盖。特殊设计的 V 型密封结构有效防止涂料泄漏，密封寿命可达 10 万次以上。

4.1.4 智能拌料与过滤系统

创新设计卧式搅拌容器，采用耐磨尼龙复合材料制造，配备 304 不锈钢制作的十字螺旋搅拌器。系统采用变频控制技术，可根据涂料粘度自动调节搅拌速度（0–200rpm 无级调速）。过滤系统采用三级过滤设计：初级过滤网（目数 20 目）、中级精密过滤器（精度 100μm）和末级高压过滤器（精度 50μm）。同时配备超声波液位传感器和密度计，实时监测涂料状态，确保混合均匀度达到 95% 以上。

4.2 技术性能优势

与传统涂白设备相比，本设备展现出显著的技术优势：

4.2.1 作业效率显著提升

采用高速同步控制算法，实现单株作业时间 3 秒的突

破性性能。经实地测试，连续作业 8 小时可完成 9600 株树木的涂白工作，作业效率达到人工涂白的 20 倍。设备支持无人值守连续作业模式，通过预设程序可自动完成整片林区的涂白任务。

4.2.2 资源利用率大幅提高

创新性的循环喷涂系统使涂料利用率提升至 92% 以上，较传统设备提高 30 个百分点。智能流量控制系统可根据树木胸径自动调节喷涂量，避免涂料浪费。经测算，每万株树木涂白可节约涂料成本约 1500 元。

4.2.3 操作便捷性与适应性

采用人性化按钮设计，操作人员经过 2 小时培训即可独立操作。创新的模块化设计使设备能够适应各种复杂地形，最大爬坡角度达到 15°，可在 -10°C 至 45°C 环境温度下正常工作。

4.2.4 可靠性及维护成本

关键部件采用航空级材料制造，平均无故障时间（MTBF）达到 2000 小时。模块化设计使维护时间减少 60%，日常维护仅需每周检查一次，年维护成本不足设备价值的 2%。

4.2.5 环境适应性及安全性

设备防护等级达到 IP54 标准，可在小雨天气正常作业。电气系统采用双重绝缘设计，配备漏电保护装置，确保操作安全。低噪声设计使工作噪声低于 65dB，远低于国家环保标准要求。

本研究通过以上技术创新，成功开发出具有完全自主知识产权的树木涂白装备，填补了国内在该领域的技术空白，为林业机械化发展提供了重要的装备支撑。

5 应用效果与分析

自 2021 年 4 月起，该装备先后在孟州、博爱、温县等河务局工程中开展应用试验。应用结果表明：

5.1 作业效率提升

使用该设备后，树木涂白作业效率显著提高。传统人工涂刷方式每人每天可完成 200-300 株树木的涂白作业，而使用该设备后，每天可完成 800-1000 株，作业效率提高 3 倍以上。

5.2 涂白质量改善

设备采用机械喷涂方式，涂料分布均匀，涂层厚度一致，避免了人工涂刷常见的漏涂、厚度不均等问题。经检测，涂白层的厚度偏差控制在 ±0.2 mm 以内，远优于人工涂刷的 ±0.5 mm。

5.3 经济效益显著

以 1000 米堤顶树木涂白为例，传统人工方式需 1 工日（费用约 100 元），而该设备仅耗电 9 度（费用约 5.04 元），成本仅为人工方式的 1/20。同时，涂料利用率提高 30%，进一步降低了物料成本。

5.4 社会效益突出

该设备的推广使用，显著降低了工人的劳动强度，改善了作业环境，提高了作业安全性。同时，提升了林木养护的机械化水平，为推进林业现代化建设提供了装备支持。

6 讨论与展望

6.1 技术讨论

本研究开发的树木涂白装备在多个方面实现了技术突破，但在实际应用过程中也发现了一些值得改进的问题。例如，在极端地形条件下设备的稳定性有待进一步提高；当前设备对树木形状的适应性还有提升空间。这些问题为后续研究指明了方向。

6.2 发展展望

未来研究可基于现有成果从以下几个方向深入开展，以进一步提升设备的智能化水平与工程适用性：

6.2.1 智能感知与自主决策技术融合

引入多模态传感器与机器视觉技术，通过深度学习算法实现树木胸径、树皮纹理及空间位置的自动识别与定位。可研究基于 RGB-D 相机的视觉伺服控制系统，结合点云数据处理技术，实现喷涂轨迹的实时规划与动态避障，最终建立无人化自主作业系统。

6.2.2 自适应喷涂与协同控制策略

开发具备在线监测与反馈调节能力的智能控制系统。通过高精度流量与压力传感器实时获取涂料状态数据，结合树木胸径、表面粗糙度等特征参数，利用模糊 PID 控制算法实现喷涂参数的自主优化与调节，显著提升不同树种及生长状态下的涂白质量一致性。

6.2.3 轻量化与地形自适应结构创新

针对丘陵、堤岸等复杂地形，需开展轻量化与模块化结构设计。研究基于碳纤维复合材料的关键部件制造工艺，并引入铰接式底盘与主动悬架系统，提高设备在崎岖地形中的通过性与稳定性。同时，可探索双臂协同或无人机 - 地面设备协同作业新模式。

6.2.4 多功能模块化与能源系统优化

开发快速换接装置与多功能末端执行器，拓展设备在树木病虫害防治、营养液喷涂及数据采集等方面的应用。研究基于新能源的混合动力系统，结合光伏充电与智能能量管理策略，实现长时间野外作业的能源自给，进一步提升设备的环保性与经济性。

7 结语

本研究成功研制了一款新型树木涂白装备，通过集成机械结构设计、电控系统与智能操作等多项先进技术，显著提升了树木涂白作业的效率和整体质量，实现了高效、均匀与低成本的林木养护操作。该设备具有结构合理、适应性强、操作便捷等优点，可广泛应用于各类林木养护场景。

综上所述，本研究开发的树木涂白装备在提升作业质

量、降低劳动强度与综合成本方面表现突出，为现代林业管理的智能化与机械化发展提供了切实可行的技术支撑。

参考文献

- [1] 张华, 李哲. 林业机械化养护设备研究进展[J]. 林业工程学报, 2020, 5(3): 45-50.
- [2] 王鹏, 刘洋. 树木涂白技术及应用现状分析[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(2): 62-65.
- [3] 陈建国, 王志刚. 农林机械自动化技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 1-15.
- [4] 李明, 张涛. 电动喷雾设备在林业养护中的应用研究[J]. 林业科技开发, 2020, 34(4): 112-116.
- [5] Smith J, et al. Advances in Agricultural Automation: A Review[J]. Journal of Field Robotics, 2021, 38(3): 456-478.