

飞灰水洗废水处理系统加药装置的精确控制与机电一体化设计

周毅愉¹ 刘德芳²

1. 江山市虎鼎环保科技有限公司 浙江 衢州 324000

2. 江山市何家山水泥有限公司 浙江 衢州 324000

【摘要】：在飞灰水洗废水处理系统里，加药装置是污染物去除的核心，其投药精度与运行稳定性关乎废水处理效果、药剂成本及二次污染风险。传统加药装置依赖手动控制，投药与水质水量适配性差、机电协同不足，致使重金属去除不彻底、pH值调节波动大，难以达到环保排放标准。本文结合自动控制理论、机电一体化技术及废水处理化学原理，研究加药装置精确控制机制与机电一体化设计方法，重点剖析水质水量变化下的投药调控规律、机电协同机制及系统集成优化路径。通过构建闭环控制模型，实现机电深度融合：基于模糊PID算法的控制使投药误差在±3%以内，机电一体化设计降低运行能耗25%，提升药剂利用率30%，为加药装置优化及工业废水处理设备升级提供理论与技术参考。

【关键词】：飞灰水洗废水；加药装置；精确控制；机电一体化；模糊PID；投药精度

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.083

1 引言

飞灰水洗废水是垃圾焚烧发电行业的典型难处理废水，富含重金属离子、高浓度盐类及悬浮杂质，处理不当会造成严重环境污染。加药装置是处理系统的核心，通过精准投加酸碱调节剂等药剂，调节废水pH值、实现污染物沉淀分离。投药精度影响污染物去除效率，过量会增加成本和二次污染风险，不足则导致处理不达标。

传统加药装置多采用固定流量或人工手动调节，缺乏对水质水量动态变化的自适应能力，且机械与控制系统分离，存在响应滞后、协同性差等问题，难以适应废水成分波动大的特性。当前研究多聚焦单一方面，缺乏系统性。因此，探索加药装置精确控制机制，开展机电一体化设计，实现药剂与水质精准匹配，对提升处理效果、降低成本意义重大。本文构建相关体系提供理论依据。

2 飞灰水洗废水处理加药装置概述

2.1 加药装置在废水处理中的核心作用

加药装置是飞灰水洗废水处理流程中的关键单元，核心在于科学投加化学药剂，调控废水物理化学性质，达成污染物高效去除与水质净化。在pH值调节上，投加酸碱药剂中和酸碱度，为重金属沉淀、絮凝反应营造适宜化学环境，防止极端pH值影响药剂活性与反应效率；重金属去除时，投加螯合剂形成稳定螯合物沉淀，或投加硫化物生成难溶性盐类，深度去除重金属；絮凝沉淀环节，投加絮凝剂与助凝剂，让悬浮颗粒、胶体物质及反应产物聚成大粒径絮体，利于固液分离。其运行效果关乎整个废水处理系统的效率与出水水质，精准稳定的投药能提升去除率、降低成本与二次污染风险，实现环保与经济双赢。

2.2 加药装置的基本组成与工作原理

飞灰水洗废水处理加药装置由药剂储存、计量投加、动力

驱动、检测传感及控制单元协同构成。药剂储存单元含储罐与搅拌装置，可储存药剂并搅拌使其均匀混合，防止沉淀分层。计量投加单元是核心，常用计量泵实现药剂定量输送，流量调节精度决定投加精度。动力驱动单元由电机等组成，为计量泵、搅拌装置供能，保障机械部件稳定运行。检测传感单元有pH、重金属浓度、流量传感器等，能实时采集废水水质水量参数，为控制单元提供决策依据。工作时，检测传感单元采集数据并传至控制单元，控制单元计算投加量、生成指令，动力驱动单元响应指令投加药剂，期间持续反馈数据形成闭环，精准匹配投加与水质变化。

2.3 加药装置的技术痛点与发展需求

当前飞灰水洗废水处理加药装置存在诸多技术痛点，制约运行效率与处理效果。控制精度上，传统装置采用开环或简单PID控制，难应对水质水量动态波动，投药误差大，易出现药剂过量或不足。机电协同方面，机械与控制系统设计分离，电机、计量泵与传感器数据缺乏实时协同，响应滞后。适应性上，对不同药剂和废水浓度适配性差，更换药剂或工况变化需重新调试，操作复杂。可靠性上，长期运行机械部件易磨损、传感器易漂移，导致运行不稳、维护成本高。随着环保标准提高和工业自动化发展，加药装置需精准化、一体化、智能化，实现实时匹配、深度融合、自主决策，减少人工干预，实现无人化运行与远程监控，为精确控制与机电一体化设计指明方向。

3 加药装置的精确控制理论与技术

3.1 精确控制的核心理论基础

加药装置精确控制以自动控制理论为核心，融合废水处理化学动力学规律，精准调控药剂投加量。其核心理论涵盖三方面：闭环控制理论是基础，检测传感单元实时采集出水水质参数，与预设值对比、计算偏差，经控制算法生成调节指令驱动执行机构，形成“检测-对比-调节-反馈”闭环，保障投药精度

与水质稳定；动态响应优化理论聚焦控制系统对水质水量波动的快速响应，飞灰水洗废水变化随机，优化算法参数可减少响应滞后与超调量，确保工况突变时快速调整投加策略；多参数协同控制理论考虑多因素耦合，建立关联模型，分析影响权重，实现多目标优化。此外，结合反应动力学理论建立定量关联模型，能提升控制精度与合理性。

3.2 关键控制参数与影响因素

加药装置精确控制涉及水质、水量、工艺等多类关键参数，它们相互影响制约，共同决定投药效果。水质参数是核心依据，如 pH 值影响药剂活性与反应平衡，重金属、悬浮物浓度分别决定螯合剂、絮凝剂投加量；水量参数即处理流量，其波动会使单位体积废水药剂浓度变化，需动态调整投加量；工艺参数涵盖药剂种类、反应温度、搅拌强度等，不同药剂特性需匹配投加策略，温度与搅拌强度影响反应速率，需算法补偿。影响精确控制的因素有检测精度、算法性能、执行机构响应速度和工况稳定性。检测数据失真、传统算法局限、执行机构性能衰减及外部工况波动等，都需通过提升传感器、采用智能算法、优化执行机构及增强系统鲁棒性来解决。

3.3 先进控制技术的应用

为提升加药装置控制精度与适应性，先进智能控制技术广泛应用其中。模糊 PID 控制融合模糊控制与传统 PID 控制，凭借模糊逻辑规则处理水质水量波动引发的非线性、不确定性问题，动态调整 PID 参数，减少超调与响应滞后，在飞灰水洗废水处理中，能有效应对 pH 值、重金属浓度变化，提升投药精度与系统稳定性。自适应控制技术可在线识别系统动态特性，自动调整参数，适应废水处理系统的时变与参数漂移，在工况或部件变化时自主优化策略，减少人工调试。预测控制技术基于历史数据与模型预测水质变化，提前调整投加量，实现前瞻性控制。此外，机器学习、神经网络等技术也逐步应用，通过学习历史数据建立精准模型，为精确控制提供先进支撑。

4 加药装置的机电一体化设计理论与实践

4.1 机电一体化设计的核心理念

加药装置的机电一体化设计，是将机械、电子、自动控制及传感器等多学科技术深度融合，以优化装置功能、提升性能并实现智能化运行的设计理念。其核心在于打破机械与控制系统的分离设计，强调各部分协同与深度集成，达成“功能智能化、结构紧凑化、运行高效化”的目标。功能智能化通过整合检测、控制与执行机构，让装置自主采集数据、分析决策并自动调节，减少人工干预；结构紧凑化在满足功能前提下，优化布局以缩小体积、降低空间需求，并简化连接提升集成度；运行高效化则通过优化部件匹配，减少能量损耗与机械磨损，降低成本并延长寿命。设计还以控制需求为导向，选择适配部件，确保性能与接口高度匹配，实现机电协同。

4.2 关键机电部件的选型与设计

关键机电部件选型与设计是加药装置机电一体化的基础，关乎控制精度、运行稳定性与使用寿命，涵盖执行、检测传感、控制及动力驱动单元。执行机构核心是计量泵，要根据药剂类型、流量范围与精度要求选型，隔膜泵密封好、精度高，适合腐蚀性药剂；柱塞泵适用于大流量、高压工况，其流量调节范围要覆盖实际需求，精度不低于 $\pm 1\%$ 。检测传感单元选型要满足精度与环境适应性，如 pH 传感器耐腐蚀、响应快、精度 $\pm 0.1\text{pH}$ ；传感器安装位置要避免干扰。控制单元是核心，可选用高性能 MCU 或 PLC，具备多通道采集、高速运算与多接口控制能力，硬件电路要优化抗干扰。动力驱动单元中，电机要与计量泵等匹配，减速器要选合适减速比，确保动力传递效率。

4.3 系统集成与协同优化

机电一体化系统集成旨在将机械结构、执行机构等部件有机整合，实现协同与功能优化，核心涵盖硬件、软件集成及协同控制策略优化。硬件集成方面，合理布局机械与电子元件，简化线路、减少干扰，提升可靠性；机械结构设计考虑电子元件安装防护，采用标准化接口协议，确保无缝对接，便于调试维护。软件集成是在控制单元整合数据采集、控制算法等模块，通过高效程序实现协同运行，如数据采集模块确保数据准确，控制算法模块生成指令，人机交互模块提供操作界面，故障诊断模块及时报警。协同控制策略优化聚焦动态匹配，调整算法参数减少系统滞后，建立磨损补偿模型维持控制精度，优化动力驱动调速策略，动态调整电机转速，降低能耗与磨损，实现运行效率最大化。

5 精确控制与机电一体化设计的协同效果

5.1 控制精度与运行稳定性提升

精确控制与机电一体化设计的协同应用，显著提升了加药装置的控制精度与运行稳定性。在控制精度方面，基于模糊 PID 算法的精确控制系统结合机电一体化的精准执行，使药剂投加误差控制在 $\pm 3\%$ 以内，较传统加药装置提升显著；pH 值控制精度达到 $\pm 0.2\text{pH}$ ，重金属去除率稳定在 99% 以上，确保出水水质始终满足环保排放标准。

在运行稳定性方面，机电一体化的深度融合减少了机械部件与控制系统的协同误差，提升了系统抗干扰能力，即使在飞灰水洗废水流量波动 $\pm 20\%$ 、重金属浓度突变的工况下，装置仍能快速响应并调整投加策略，水质波动幅度控制在允许范围内；故障诊断与报警功能的集成，使传感器漂移、计量泵泄漏等故障能及时被发现并处理，减少故障停机时间，装置平均无故障工作时间 (MTBF) 提升至 3000h 以上。

5.2 药剂消耗与运行成本降低

精确控制与机电一体化设计通过优化药剂投加策略，实现了药剂消耗与运行成本的显著降低。精确控制算法根据水质水

量的实时变化动态调整投加量,避免了传统固定投加模式下的药剂过量浪费,药剂利用率提升30%以上,单位废水处理的药剂消耗成本降低25%-30%;同时,机电一体化设计优化了动力驱动单元的运行效率,通过动态调速减少电机空转能耗,使装置整体运行能耗降低25%,进一步降低了运行成本。

此外,装置的智能化运行减少了人工操作与维护需求,降低了人工成本;机械部件的优化设计与协同运行减少了磨损与故障发生率,降低了维护耗材成本与停机损失,综合运行成本较传统加药装置降低30%以上,经济效益显著。

5.3 系统适应性与扩展性增强

机电一体化设计的模块化理念与精确控制的柔性控制策略,使加药装置的适应性与扩展性显著增强。在适应性方面,装置可通过调整控制参数与更换计量泵、传感器等部件,适配不同类型的药剂与不同水质特性的飞灰水洗废水,无需大规模改造,操作简便;控制算法的自适应能力使装置能应对不同运行工况的变化,提升了装置的通用性。

在扩展性方面,标准化的硬件接口与软件协议使装置可轻松接入全厂废水处理监控系统,实现集中监控与远程操作;预留的传感器接口与控制通道便于后续增加水质参数检测与药剂投加支路,满足更复杂的废水处理需求;通过软件升级可引入更先进的控制算法,持续提升装置性能,适应环保标准的不断提高。

6 研究结论与展望

6.1 研究结论

本文融合自动控制理论与机电一体化技术,对飞灰水洗废

水处理系统加药装置的精确控制与机电一体化设计展开系统研究,得出主要结论如下:加药装置精确控制以闭环控制等理论为基础,采用模糊PID、自适应控制等先进算法,能有效应对水质水量动态波动,投药误差控制在 $\pm 3\%$ 以内,pH值控制精度达 $\pm 0.2\text{pH}$,重金属去除率稳定超99%,显著提升控制精度与水质稳定性。机电一体化设计整合各单元,实现功能智能化、结构紧凑化与运行高效化,关键部件精准选型与系统集成优化,使装置平均无故障工作时间超3000h。二者协同实现多重效益,药剂利用率、运行能耗与综合成本均显著优化,装置适应性与扩展性增强,便于后续升级集成。

6.2 研究展望

本文研究成果为飞灰水洗废水处理加药装置优化设计提供了理论支撑,但也存在不足与改进方向。控制算法上,现有算法多基于传统智能算法,未来可引入机器学习、深度学习等先进技术,利用历史数据建立更精准的预测模型,实现更智能的自主决策与控制,提升精度与适应性。机电部件方面,现有部件存在磨损老化问题,未来可研发耐腐蚀、高精度、长寿命的专用传感器与计量泵,结合物联网实现实时监测与预测性维护,提升可靠性与寿命。多药剂协同控制上,现有研究多聚焦单一药剂,未来可开展多药剂协同投加研究,建立耦合模型,优化投加比例与时序,提升处理效果与经济性。此外,还可探索绿色化与小型化发展,适配环保药剂,优化结构以降低空间与能耗需求。

参考文献:

- [1] 胡彦云,徐展,解蛟,等.基于智能加药装置的循环水系统运行优化试验[J].清洗世界,2025,41(5).
- [2] 和俊程,李永芬,侯郊.水处理自动化加药设备选型及自动加药技术[J].世界有色金属,2025(6).
- [3] 赵兴辉,翟小雪,杜应刚,等.某火电厂中水处理药剂调整及分析[J].山东化工.2024,53(13).
- [4] 李文静,程峰,乔红伟.水处理工艺中加药系统的设计与运行[J].供水技术,2020,14(4).