

# 工程机械涂装前处理在线检测加药可视化研究

王哲<sup>1</sup>, 余育军<sup>1</sup>, 胡章枝<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 蒋刚<sup>1</sup>, 杨雨霖<sup>2</sup>, 吴锦彪<sup>2</sup>  
(1.中机第一设计研究院有限公司,合肥 230601; 2.帝业化学有限公司,上海 201800)

**摘要:**以国内某工程项目为例,针对工程机械涂装前处理过程中在线自动检测与加药系统的技术现状,系统地研究了一套可视化监控软件平台,实现了对脱脂、硅烷等关键工序中总碱度、游离碱及 pH 等核心参数的实时监测与精准控制。该系统通过集成在线检测设备与涂装线中央控制体系,构建了“检测-决策-执行-反馈”的闭环控制机制,显著提升了药剂管理的自动化与智能化水平。为工程机械涂装前处理过程的精细化管理和智能制造转型升级提供了关键技术支撑。

**关键词:**涂装前处理; 在线检测; 工程机械

**中图分类号:**TQ639 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-9548(2026)01-0009-04

## Research on Automatic Detection Visualization and Dosing of Construction Machinery before Coating Treatment

WANG Zhe<sup>1</sup>, YU Yu-jun<sup>1</sup>, HU Zhang-zhi<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, JIANG Gang<sup>1</sup>, YANG Yu-lin<sup>2</sup>, WU Jin-biao<sup>2</sup>

(1.First Design and Research Institute MI China Co., Ltd., Hefei 230601, China;

2.Empirechem Co., Ltd., Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Taking a domestic engineering project as an example, aiming at the technical status of online automatic detection and dosing system in the pretreatment process of engineering machinery coating, a set of visual monitoring software platform was systematically studied, which realized the real-time monitoring and precise control of core parameters such as total alkalinity, free alkali and pH in key processes such as degreasing and silane. by integrating the online detection equipment and the central control system of the coating line, the system constructs a closed-loop control mechanism of "detection-decision-execution-feedback", which significantly improves the automation and intelligence level of pharmaceutical management. It provides key technical support for the fine management of engineering machinery coating pretreatment process and the transformation and upgrading of intelligent manufacturing.

**Key words:** pretreatment before coating; on-line detection; construction machinery

## 0 引言

根据中研普华产业研究院等权威机构的数据,2024年全球工程机械市场销售额达到1310.1亿美元,并预计在未来几年内保持增长态势。中国作为全球最大的工程机械生产地,占有约46%的市场份额<sup>[1]</sup>,但

涂装环节的自动化水平显著落后于汽车制造业。在涂装化学前处理设备中,仍有较多的工程机械企业采用人工加药模式,导致槽液浓度波动幅度高达±20%,引发涂层附着力不足、防腐性能下降等质量问题<sup>[2]</sup>。究其原因在于工程机械结构件具有高度非标特性——如挖掘机动臂曲面复杂、起重机底盘结构多层叠加等,传统的机械前处理(抛丸/喷砂)难以实现均匀处理,而新兴的化学前处理工艺(磷化/硅烷)虽能提升表面质量,但对药剂浓度敏感性极强。

**收稿日期:**2024-12-05

**作者简介:**王哲(1988—),男,硕士,高级工程师,主要从事工程机械涂装线设备的设计工作。E-mail:wangzhe@cmfi.cn。

在此背景下,国家《“十四五”智能制造发展规划》明确提出推进工程机械等重点领域“工艺数字化再造”。某头部企业质量事故分析表明,因人工加药滞后导致的硅烷膜层不均匀问题占涂装缺陷的63%。本研究通过构建“检测-决策-执行-反馈”闭环系统,突破工程机械多品种小批量生产的管控难题,推动行业向智能化深度转型。

在工程机械涂装工艺中,化学前处理(磷化、硅烷)工艺相较于机械前处理(抛丸、喷砂)工艺,在提高防腐能力、外观装饰等表面质量方面更具优势<sup>[3]</sup>,所以现阶段诸多工程机械企业开始在涂装产线中普及化学前处理工艺,其中又以硅烷工艺居多。目前工程机械涂装线化学前处理工艺中,脱脂与硅烷是最重要的两道工序,其中脱脂的总碱度、游离碱度、磷化(或薄膜)的酸度、pH等,都对化学前处理硅烷成膜起到至关重要的作用<sup>[4]</sup>。伴随着生产线工件的产出,设备中的药剂逐渐消耗,对各个工序的药剂添加就成为影响工件表面质量的关键点之一。

原有的工程机械涂装前处理的管控现状大部分是人工化验、人工加药,具体方法为每天按照间隔2h或4h检测一次,或者早班、晚班各一次,检测完成后手工抄表,以报表的形式做统计,依据实验室中的数据范围,判断是否添加药剂。这种过程是一个黑箱过程,无法判断人工检测的误差、加药量的误差以及造假情况,一旦

出现批量性的事故异常,很难追溯其源头究竟在哪个环节。针对上述问题,各个行业的前处理设备均采用了在线监测、自动加药的整体性系统,在汽车行业已经实现了智能自动化、无人化、品质一致性、可数据化以及有一定的经济性,代替人工做检测以及加药<sup>[5]</sup>。

针对工程机械行业的特点,更好地适应涂装线整体管控和可视化要求,本文通过对国内某工程机械企业前处理在线加药系统进行改进和研究,形成了一款适合工程机械涂装行业的在线加药系统软件。采用1次/(1~2h)的检测频率,能够有效实现自动化,保证品质的一致性。同时数据可以上传至涂装线整体中控系统,以及现有的MES或ERP系统,统计日加药量、每次加药量和检测参数。通过科学的加药计算方式来体现其经济性,保证加药数据维持在稳定的线性范围内,实现精细化和可视化管理。相较于传统加药,预计节省10%~15%的药剂消耗量。

## 1 在线监测加药系统的基本状况

### 1.1 生产工艺以及检测情况

本次研究项目采用常规的脱脂+硅烷工艺,其质量控制核心在于:脱脂工序的总碱度(TA)需维持在35~45 pt,游离碱(FA)需控制在12~18 pt,其直接影响油污去除率。硅烷成膜的pH波动范围需 $\leq \pm 0.3$ ,超出阈值将导致膜层疏松。前处理具体工艺流程及基本情况见表1。

表1 前处理工艺参数及检测项目

工序名称	处理方式	工艺温度/℃	工艺时间/min	检测项目	设备配置
预脱脂	喷淋	40~45	~1.5	游离碱,总碱	在线测定仪
脱脂	喷淋	40~45	~3.0	游离碱,总碱	在线测定仪
水洗	喷淋	常温	~1.0		
纯水洗1	喷淋	20~25	~1.0	电导率	仪表
硅烷	浸洗	20~25	~2.0	pH	在线测定仪
纯水洗2	喷淋	常温	~1.0	电导率	仪表
纯水洗3	喷淋	40~45	~1.0	电导率	仪表
人工吹水	人工	常温	10		

依据上述工艺流程,在线监测加药系统采取了多点检测的方式保证前处理质量,核心检测为脱脂、预脱脂以及硅烷工序。

### 1.2 在线检测加药系统的组成及运行方式

本项目在线检测加药系统针对游离碱、总碱以及电导率采用了不同的检测方法,同时整体系统由取样系统、检测系统、补压系统、数据系统以及中控系统组成。

#### 1.2.1 检测方式

本项目在线检测加药系统采用了两种检测方式。

1)在线滴定光度法:光度分析是一种较为常见、应用广泛的基本分析方法,它是通过测定被测物质在特定波长或一定波长范围内吸收度或发光强度,对该物质进行定性和定量分析的方法。运用博朗(Lambert)-比尔(Beer)定律(通过特征波长(如溴甲酚绿指示剂在620 nm处吸光度)定量分析碱度,检测限达0.1 pt)进

行运算,获取待测液浓度。

2)在线电位滴定 ISE 法:利用电极电位与组分浓度的关系实现定量检测,离子选择电极是一类化学传感器,它的电位对溶液中给定的离子活度的对数呈线性关系;原理:两支电极与待测溶液组成工作电池(原电池),通过测定电动势来获得待测物质的含量。采用离子选择性电极(ISE),建立  $H^+$ 浓度与电位差(mV)的数学模型: $E = E_0 + (RT/F)\ln[H^+]$ ,实现 pH 毫伏级解析。

### 1.2.2 智能取样系统

创新设计三级处理流程:槽液循环——离心泵(流量  $2\text{ m}^3/\text{h}$ )保持槽液流动;过滤消泡—— $20\ \mu\text{m}$  不锈钢滤网+超声波消泡器;定量抽取——蠕动泵精准取液  $10\ \text{mL}$ ,误差  $\leq \pm 0.5\ \text{mL}$ 。

取样系统包括循环静置和过滤消泡。待检测时实时循环,并通过前置的过滤器过滤槽液。由于本项目部分槽体较大,取样系统会一直保持循环,等到需要检测时抽取  $10\ \text{mL}$  的槽液,来确保检测的实时性。由于工程机械生产节拍较慢,取样时间设定为  $1\ \text{次}/\text{h}$ 。本系统的取样系统可以根据实际生产情况手动调节取样频率,在生产满产情况下可以实时保持  $1\ \text{次}/\text{h}$  的取样频率,在产量降低时可以适时降低检测频率,最低检测频率设定为  $1\ \text{次}/2\ \text{h}$ 。

### 1.2.3 机器视觉检测系统

滴定终点判定:高清 CMOS 相机(500 万像素)拍摄显色反应。

图像处理算法:HSV 色彩空间转换→饱和度阈值分割→比色卡匹配。

检测系统根据光谱法和电位滴定法分析的结果,通过蠕动泵管完全模拟化学实验室人工滴定。滴定后通过拍照进行比对,利用照片信息和系统中的信息进行详细比较,由本系统判断是否需要加药。如需要加药,则启动加药泵对槽液进行加药,补充槽液药剂,使槽液药剂浓度达到要求。上传至系统以及检测的误差确保在  $\pm 3\%$ ,保证系统的精确性。

### 1.2.4 补加系统

补加系统依据系统软件计算得到的数据自动进行药剂添加,加药补压通过计量泵实现,不同的药剂采用不同的计量泵,见表 2。

表 2 补加系统信息

药剂类型	计量泵精度	加药逻辑
脱脂剂	齿轮泵 $\pm 1\%$	PID 闭环控制
硅烷 A/B 剂	蠕动泵 $\pm 2\%$	比例同步注入

### 1.2.5 数据及中控系统

通过收集、传输、分析所有数据以及参数,并根据设定自动调整化学品参数。

## 2 在线监测加药系统可视化软件

本项目根据上述在线检测加药系统开发了可视化软件,对加药系统的各个操作进行了优化。

### 2.1 操作主界面

操作主界面包括游离碱总碱分析仪的工作状态以及硅烷 pH 分析仪的工作状态(见图 1),显示预脱脂游离碱、预脱脂总碱、脱脂游离碱、脱脂总碱、纯水洗 1 电导率、硅烷 pH、纯水洗 2 电导率、纯水洗 3 电导率的实时测量值。界面下方为用户界面按钮,对应的界面根据选择的按钮自行切换,通过点击下面的按钮,系统自动切换不同的界面。操作主界面实时映射全产线状态,8 参数同屏监控:预脱脂 FA/TA、主脱脂 FA/TA、纯水电导率  $\times 3$ 、硅烷 pH。设备状态双色指示:绿色(运行中)、红色(故障/待机)。

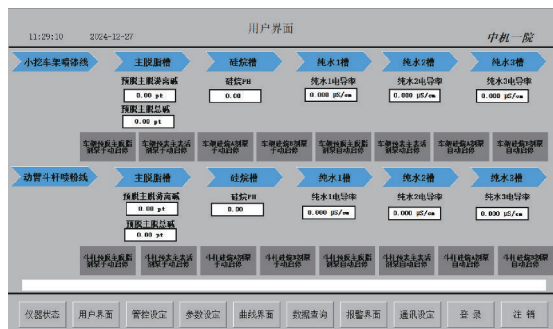


图 1 操作主界面

### 2.2 管控设定

管控设定界面包含了主脱脂游离碱、硅烷 pH 两个重要药剂质量参数在当前系统中的设置情况,包含管控报警上限、管控上限、管控设定点、管控下限、管控报警下限。如图 2 中显示的是系统当前正在运行的设定参数,其参数的含义如下:管控报警上限——药剂浓度超过设定值,系统报警药剂浓度超高;管控上限——药剂浓度超过设定值,系统停止添加对应药剂;管控设定点——药剂浓度设定的理想值,仪器管控以设定值为目标;管控下限——药剂浓度低于设定值,系统开始添加对应药剂;管控报警下限——药剂浓度低于设定值,系统报警药剂浓度超低。

### 2.3 参数设定

参数设定界面包含主脱脂剂泵、活剂泵、硅烷 A 剂泵、硅烷 B 剂泵等重要药剂添加泵的当前系统设置,包含流量、每 L 影响率、积分增重、积分时间、增量加药时间、定时加药量、定时间隔加药、手动加药量、定时功

能、仪器联动等正在起作用的参数情况,见图3。



图2 管控设定界面

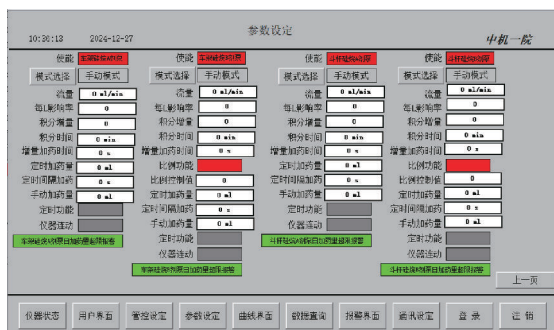


图3 参数设定界面

### 2.4 报警界面

报警界面包含了整套设备的实时报警以及历史报警情况,并且可以对发生的报警进行报警复位,进行报警声音消鸣功能。

当有故障报警时,报警系统会发出故障信息,报警灯红灯闪烁,同时故障信息所对应的相关设备的相关功能(自动、手动、定时)全部停止,不能启用。报警采用三级报警机制,实现故障精准定位。初级报警:浓度超限→声光报警(蜂鸣器+LED);中级处置:日加药量超阈值→自动锁定加药权限;高级防护:设备故障→联锁停机(如泵空转代码 E03)。

#### 2.4.1 测量值超上限/下限报警

当在线滴定分析仪测量值高于管控报警上限或低于管控报警下限时,会触发中控系统报警系统发出故障信息,报警灯红灯亮并持续发出蜂鸣声。

此种报警的故障处理方法:首先关闭蜂鸣声,此时检查判断在线滴定分析仪测量值是否有误,管控报警上限/下限设置是否合理,是否需要手动加药。

#### 2.4.2 日最大加药量超限报警

当一天的加药量(手动、自动、定时三者加药量之和)超过设定的最大加药量时,会触发中控系统报警系统发出故障信息,报警灯红灯亮并持续发出蜂鸣声。

此种报警的故障处理方法:首先点击消鸣,时间过当天 24:00 之后,需点击故障复位,红灯灭,故障信息

消除。将由于故障导致的相关设备的自动或手动启停功能开启即可。

### 2.5 数据记录及使用效果

在线检测系统各项实时数据会显示记录在线滴定分析仪测量历史数据,以及每次加药量历史数据、每日加药量历史数据等。各个测量数据,不仅可导入 U 盘,亦可以将数据上传至涂装中控系统,并通过中控显示,见图4。

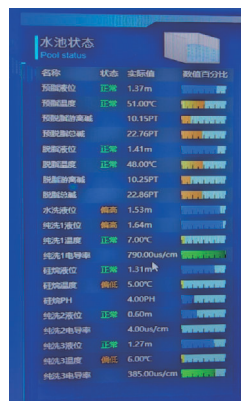


图4 加药系统数据显示

该项目在线检测加药系统既可以实现数据的曲线显示,亦可以通过涂装线中控系统与 MES/MOM 系统互通,通过 MES/MOM 系统的指导,对不同产品、不同工件进行实时数据调整。

### 3 应用效果与经济性分析

本项目使用上述前处理在线检测加药可视化系统,获得了良好的应用效果,具体情况如下。

#### 3.1 管理能效升级

通过本系统的应用,该项目在前处理加药环节获得了良好的管理能效提升,实现自动化以及可视化后,避免了人工操作带来的不确定性,具体表现为以下方面:数据追溯——自动生成电子台账(原始记录保存≥5年);远程运维——故障响应时间从4h缩短至30min;系统扩展——通过 OPC UA 协议对接 MES,实现配方自动调用。

#### 3.2 经济效益测算

某型号挖掘机年产量1.2万台,采用本系统的成本对比见表3,可节约61万元/a,投资回收期<14个月。

表3 成本对比

项目	传统模式	本系统	年节省
药剂消耗/万元	188	159	29
人工成本/万元	24(2人)	0	24
危废处理/万元	36	28	8

(下转第 25 页)