

基于 PLC 和机器视觉的智能涂装检测系统

宋杰¹, 朱建晓², 郑明杰¹, 包建东¹

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏南京 210094;

2. 苏州康尼格电子科技股份有限公司, 江苏常熟 215562)

摘要:针对端子涂层质量检测中人工涂装及目视检查存在的效率低、检测误差大、自动化程度低等问题, 该文设计并实现了一种基于 PLC 与机器视觉的智能涂装检测系统。该系统利用 EtherCAT 协议作为核心数据传输手段, 通过 PLC 集成控制系统、伺服系统及机器视觉模块, 实现端子输送、涂装及检测的全程自动化。其中涂装质量检测模块结合 OpenCV 算法库, 采用 C++ 语言开发。实验结果表明: 该智能涂装控制系统生产工件平均良率为 96.8%, 产能为 1.125 s/pcs, 具有良好的工作性能, 提高了生产效率, 降低了人工干预和涂层缺陷率, 为智能涂装系统的高效稳定运行提供了有力保障, 为端子涂层生产的智能化提供了有效的技术解决方案。

关键词:端子涂层; PLC 控制; EtherCAT 协议; 机器视觉; 质量检测; OpenCV 算法库

中图分类号: TP23

文章编号: 1000-0682(2025)05-0018-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.05.004

An intelligent coating inspection system based on PLC and machine vision

SONG Jie¹, ZHU Jianxiao², ZHENG Mingjie¹, BAO Jiandong¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Jiangsu Nanjing 210094, China;

2. Suzhou Konig Electronic Technology Co., Ltd., Jiangsu Changshu 215562, China)

Abstract: In response to the issues of low efficiency, significant detection errors, and insufficient automation in manual coating and visual inspection for terminal coating quality, this paper designs and implements an intelligent coating inspection system based on PLC and machine vision. The system utilizes EtherCAT protocol as the core data transmission method, integrating PLC control systems, servo systems, and machine vision modules to achieve full automation in terminal conveying, coating, and inspection. The coating quality inspection module is developed using the OpenCV algorithm library and C++ programming language. Experimental results demonstrate that the intelligent coating control system achieves an average production yield of 96.8% and a production capacity of 1.125 seconds per piece (1.125 s/pcs), exhibiting excellent performance. It significantly enhances production efficiency, reduces manual intervention, and lowers coating defect rates, providing robust support for the efficient and stable operation of the smart coating system. This system offers an effective technological solution for the intelligent production of terminal coatings.

Keywords: terminal coating; PLC control; EtherCAT protocol; machine vision; quality inspection; OpenCV algorithm library

收稿日期: 2025-03-25

基金项目: 陕西省省级一流线下课程(陕教[2021]107号)

第一作者: 宋杰(2001—), 女, 汉族, 山东德州, 硕士研究生, 控制工程。研究方向为智能制造。

通信作者: 包建东(1979—), 男, 汉族, 副教授, 主要从事智能仪器, 测试技术, 水下导航、探测、辨识技术的研究。

E-mail: baojd025@163.com

0 引言

端子作为电子制造、汽车工业和精密设备制造中的关键工艺环节, 其质量直接关系到产品的电气性能、长期可靠性和使用寿命^[1]。然而, 在当前的工业生产中, 端子的涂装过程依旧主要依赖人工操作, 这种方式在实际应用中暴露出一系列问题。首

先,人工涂装的主观性较强,操作人员的手法和经验差异会直接影响涂层的均匀性和质量,导致产品一致性难以保证。其次,人工涂装的效率较低,无法满足现代工业对高产能和高标准的需求,尤其在批量生产时,人工涂装往往成为生产效率的瓶颈。此外,由于端子尺寸微小,人工检测往往难以识别细微问题,导致产品质量一致性难以保证。

随着自动化控制技术和机器视觉技术的快速发展,为端子涂层质量检测的智能化升级提供了新的解决思路。近年来,涂装设备的主要研究方向集中在智能化、无损检测及高精度质量控制等方面,致力于提高检测效率、降低人工干预并实现涂层质量的优化。文献[2]自主研发了一款锁相红外热成像设备并进行电力设备防护涂层质量检测。文献[3]提出了一种基于光热辐射热波检测的 RTV 涂层涂覆质量无损检测技术。文献[4]针对基体及涂层厚度对检测结果的影响,使用两种无损检测手段研究各参数对检测结果的影响。文献[5]研发了一种新型的非金属基体表面涂层质量无损检测方法—压力测定计时法。文献[6]基于机器学习和特征提取,设计了一套完善的端子产品缺陷检测装置,实现对接线端子产品缺陷的检测。文献[7]研发出了一款适用于实验室环境的浸涂机,设计紧凑、操作灵活,涂层均匀一致并且成本较低。文献[8]通过分析喷枪运动过程中涂层厚度的分布曲线,提出一种改进的喷涂间距计算方法,以实现涂层的均匀分布。文献[9]设计了一种基于机器视觉的迷彩涂层质量检测系统,用以完成对迷彩涂层表面缺陷检测和迷彩涂层图案一致性检测的任务。文献[10]设计了一种基于机器视觉技术的绝缘子 RTV 涂层质量检测方法。

基于上述背景,该文提出了一种基于 PLC 与机器视觉的智能涂装检测系统。PLC 与伺服系统的结合,能够实现对涂装过程的精确控制,并且机器视觉系统能够通过高分辨率工业相机捕捉端子表面图像,并结合图像处理算法实现高效、精确的缺陷检测。这种智能化检测系统不仅能够适应现代化生产线的高速需求,还为实现涂装过程的全面自动化奠定了技术基础。

1 系统总体设计

1.1 任务分析

涂装系统的任务是对型号为 3 mm 的端子进行底涂。底涂区域如图 1 所示。

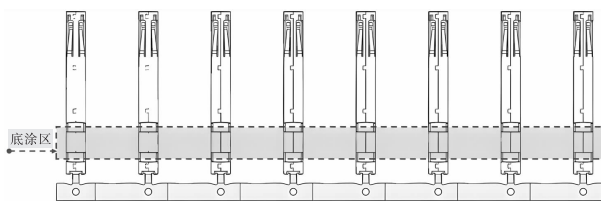


图 1 端子底涂区域示意图

1.2 系统构成

该涂装设备主要由上料转盘机构,端子涂装检测机构,烘干+载具回流机构三个部分组成,设备结构如图 2 所示。设备尺寸为 $LWH = 4000 \text{ mm} \times 2800 \text{ mm} \times 1900 \text{ mm}$,主机架采用方管焊接,确保整体结构的稳固性和耐用性。设备表面经过喷砂处理和防锈涂层处理,以适应工业环境中的高湿度和粉尘条件。设备的设计采用模块化、流水线式的结构,各个功能模块紧密衔接。设备主要功能结构包括:上料转盘结构,裁切工位结构,上/下料模组结构,碳氢/底涂槽结构,等离子清洗结构,CCD 检测结构,烘干线+载具回流线结构。

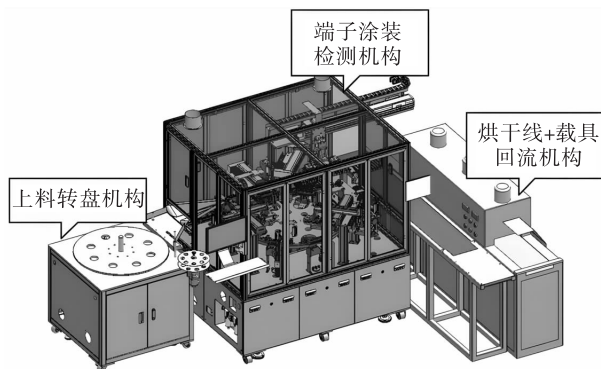


图 2 整机结构示意图

1.3 工作原理

智能涂装系统的工作流程主要分为以下三个步骤:

(1)作业时,上料转盘自动送料,自动收集底纸,同时送料及收底纸感应器被触发,裁切工位来料后,裁切计数光电传感器触发实现对裁切工件数量的统计,传感器检测端子到位后压紧机构将端子固定住对来料自动裁切为 8 连串,并切掉多余水口。

(2)上料时,解锁机构把转盘弹性夹紧机构打开,模组把工件放到转盘夹紧机构内,解锁机构缩回,产品夹紧模组回位。到达碳氢清洗工位后,内槽通过伺服控制自动上升到指定位置,到设定时间后下降到外槽内补液,通过液位传感器可实现自动补液和排液。底涂机构与碳氢清洗机构类似。当工件到达等离子清洗工位后,气缸伸出,通过 X 轴移动,

对 8 个工件依次清洗,在 CCD 检测机构中,当工件通过转盘到检测位,依次对产品进行检测。

(3)下料后,在烘干线和载具回流线中,搬运模组先将满载具的产品运送至烤箱的入料口,随后将回

流线上的空载具搬运至产品下料位,用于接收新的产品。满载具通过烤箱进行烘烤后,到达人工下料位,操作人员在此处将产品取出,并将空载具放到回流线以完成循环,涂装设备工作流程图如图 3 所示。

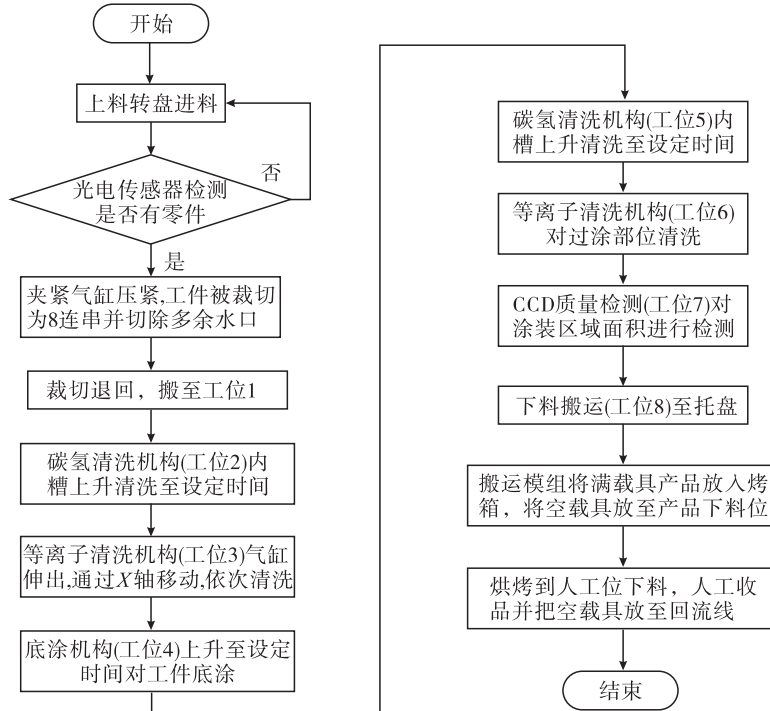


图 3 设备涂装工作流程图

2 控制系统设计

2.1 系统结构设计

该控制系统采用汇川 H5U PLC 作为控制器,通过部署各类传感器,系统精准采集作业中的关键参数,并将数据传输至 PLC 进行处理。PLC 根据预设逻辑和采集数据,驱动相应的外围设备,实现对执行机构的精确控制。同时,PLC 可与人机界面进行通信,接收来自操作人员的监控指令和参数调整命令,从而实现对涂装过程中各部分的集中管理和灵活调控。如图 4 所示为控制系统框架图。

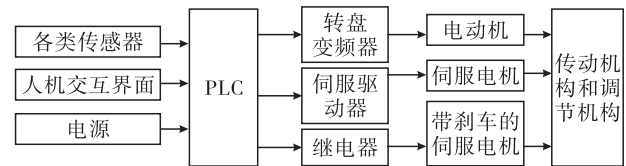


图 4 控制系统框架图

2.2 输入/输出口

输入/输出模块承担着 PLC 控制系统与现场设备之间信号的采集与驱动任务。PLC 控制模块根据预编程的逻辑,分析传感器数据,进行逻辑判断和处理,生成相应的控制指令^[11]。这些指令通过输入/输出模块发送至执行器,调节电机、阀门等设备的运行状态。PLC 主要输入/输出口功能如表 1。

表 1 PLC 主要输入输出端口功能

地址	功能	地址	功能
X31	裁切到位光电	Y10	启动按钮灯
X32/X33	裁切压紧气缸到原位/工作位	Y11	停止按钮灯
X34/X35	裁切切料气缸到原位/工作位	Y15	蜂鸣器
X40/X41	上料搬运上下气缸到原位/工作位	Y21	照明灯
X42/X43	上料搬运夹爪气缸到原位/工作位	Y20	转盘变频器
X50/X51	工位 1 顶升到原位/工作位	Y23	转盘电机刹车
X52/X53	工位 1 夹爪到原位/工作位	Y25	工位 5 碳氢清洗伺服带刹车

续表 1

地址	功能	地址	功能
X54	工位 2 碳氢池液位	Y26	工位 7 底涂伺服带刹车
X60/X61	工位 3 离子左气缸到原位/工作位	Y27	工位 8 碳氢清洗伺服带刹车
X62/X63	工位 3 离子右气缸到原位/工作位	Y30/Y31	工位 3 等离子左启动/右启动
X70/X71	工位 4 底涂池/底涂仓液位	Y32/Y33	工位 6 等离子左启动/右启动
X72/X73	工位 5 碳氢池/碳氢仓液位	Y100	裁切压紧气缸
X74	工位 2 碳氢仓液位	Y101	裁切切料气缸
X100/X101	工位 6 等离子左气缸到原位/工作位	Y104/Y105	工位 1 顶升/夹爪
X102/X103	工位 6 等离子右气缸到原位/工作位	Y120/Y121	工位 8 顶升/夹爪
X110/X111	工位 8 顶升到原位/工作位	Y122	下料搬运上下气缸
X112/X113	工位 8 夹爪到原位/工作位	Y123	下料搬运夹爪气缸

2.3 控制程序设计

在涂装系统设计中,采用汇川 AutoShop 作为开发平台,构建以 PLC 为主体的控制系统。通过梯形图(LAD)编写程序,采用模块化设计思路,主程序根据涂装流程调用相应功能模块,如图 5 所示,各子程序分别承担特定功能,实现高效自动化控制。

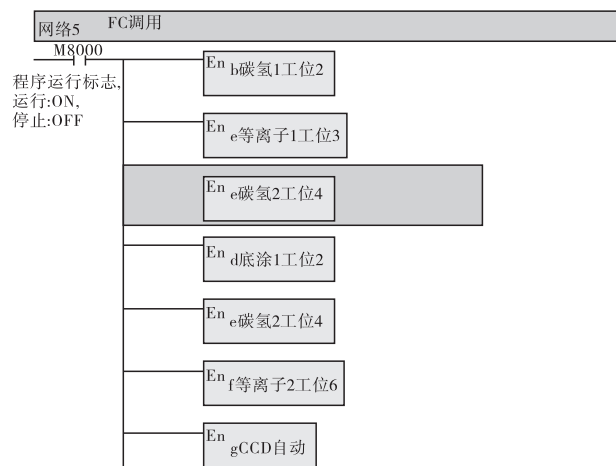


图 5 功能块程序图

2.4 数据传输设计

在底涂机伺服控制系统中,采用 EtherCAT 协议作为核心数据传输手段,选择支持 EtherCAT 协议的 PLC 作为主控单元,并作为 EtherCAT 网络的主站,负责协调网络中的所有从站设备,即伺服驱动器^[12]。PLC 中集成了 EtherCAT 主站功能,通过编程语言对伺服驱动器进行控制,周期性地发送 EtherCAT 帧来驱动伺服驱动器执行动作,包括发送目标位置、速度、加速度等控制参数,同时实时接收和处理伺服电机的实际位置、运行状态和报警信息。通讯拓扑如图 6 所示。

在底涂机控制系统中,PLC 与人机界面(HMI)之间的通讯采用 Modbus 协议,实现了两者之间的高效数据交互。通过 Modbus TCP/IP 方式,PLC 将

设备运行状态、工艺参数和报警信息传输至 HMI, HMI 向 PLC 发送操作指令和参数设置,确保操作人员能够实时监控设备运行并进行远程操控。

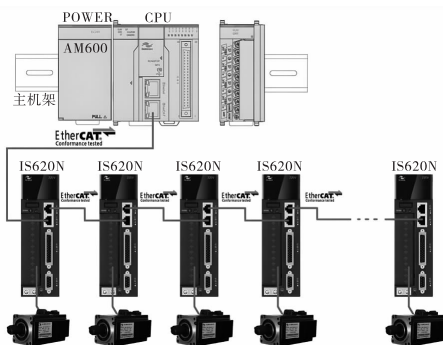
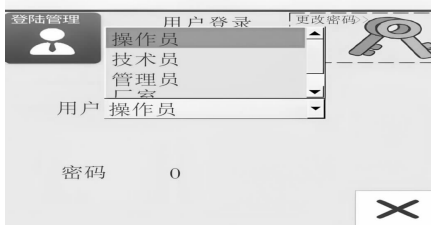


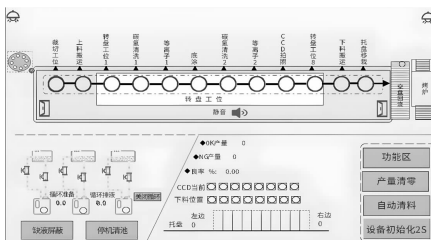
图 6 EtherCAT 通讯拓扑图

2.5 人机界面设计

基于威纶通 MT8106iE 触摸屏和 EasyBuilder Pro 组态软件,系统通过 Modbus TCP/IP 协议与 PLC 通信,实现设备监控、参数设置和自动化控制。触摸屏提供直观界面,支持状态显示、参数调整和故障报警。PLC 负责逻辑控制,结合精确信号处理和智能算法,确保系统高效稳定运行。监控界面如图 7 所示。



(a) 运行界面



(b) 运行界面

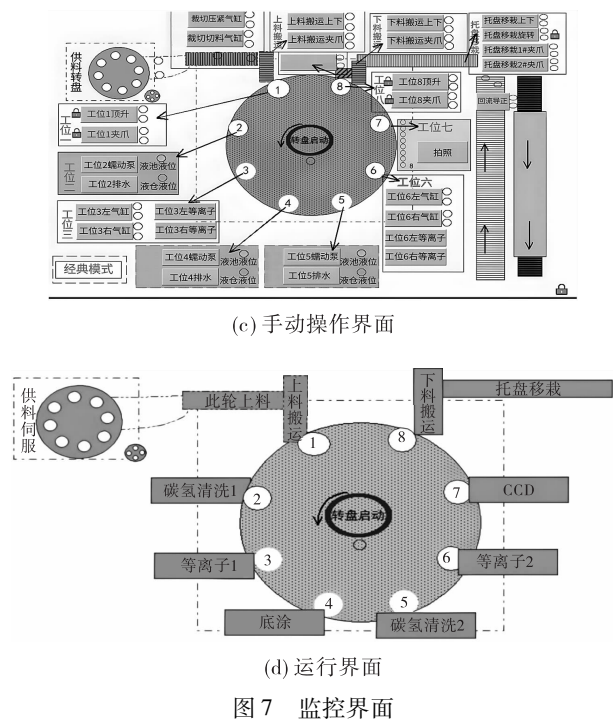


图7 监控界面

3 机器视觉系统设计

3.1 视觉检测方法

智能涂装系统的视觉检测模块由相机、镜头、紫外光源、涂装质量识别软件和显示器组成,该文所述识别软件基于 OpenCV 和 C++ 开发,检测方法采用在底涂液中加入荧光剂使涂覆区域在特定波长光源下显现。相机捕捉荧光反射特征,分析图像提取涂覆面积等关键参数,并与标准值比对。当检测结果偏离标准时,系统发出警示,以确保产品质量一致性和可靠性。

3.2 图像处理过程

为了提高目标区域的分割稳定性,系统首先采用 ROI (Region of Interest, 感兴趣区域) 选择方法,限定图像中需要处理的区域,同时确保颜色提取仅在关键区域内进行。因工件总是在相同位置,在该研究中,采用固定 ROI 方法,即预设一个矩形区域 $ROI = (x, y, w, h)$, 其中 (x, y) 为 ROI 的左上角坐标, w, h 为宽度和高度。

设原始图像为 $I(x, y)$, ROI 选取的子图像可表示为:

$$I_{ROI}(x', y') = I(x + x', y + y'), 0 \leq x' < w, 0 \leq y' < h$$

该子图像 I_{ROI} 作为后续处理的输入。

为了更稳定地分割出目标区域,该系统采用 HSV 颜色空间进行颜色提取。HSV 颜色空间相比

传统的 RGB 颜色空间更适合颜色分割任务。因此,先将输入图像从 RGB 颜色空间转换为 HSV 颜色空间^[13],并对图像进行二值化,生成只包含目标区域的掩码图像,该掩码图像中的白色像素代表符合紫色范围的区域,黑色像素代表其他无关区域。

由于工业涂装环境复杂,涂层检测过程中常受到光照变化、背景杂色、涂层边缘不均匀等因素的影响,导致二值化结果中可能包含一些噪声区域,如孤立的小白色像素点或不连续的边缘^[14]。为了提高检测的鲁棒性和稳定性,引入形态学处理技术,通过开运算去除噪声点,并增强目标区域的连通性。

在完成颜色提取和噪声去除后,将进一步利用轮廓检测方法对涂层区域进行边界分析,在提取出涂层轮廓后,再计算轮廓内的像素点得到整个涂层区域的总像素面积,最终图像处理结果如图 8 所示。

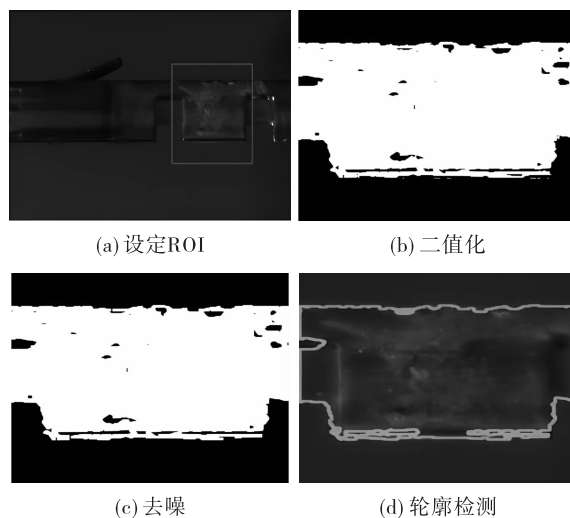


图8 图像处理结果

4 系统测试

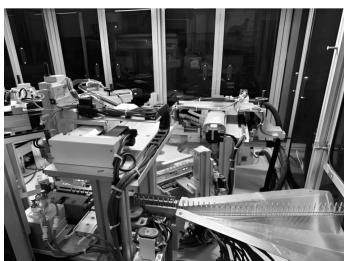
为了验证系统的可行性,对系统经过调试后进行测试,实物图和涂装场景图如图 9 所示,测试结果如表 2,平均良率为 96.8%,产能 $CT = 1.125$ s/pcs 实现了对端子涂层质量的高效、精准检测。系统在连续运行过程中表现出良好的稳定性和可靠性,有效减少了人工干预,显著提高了生产效率。

表2 实验结果

实验编号	样本数量 / 件	OK 数量 / 件	良率	所用时间 / 秒
1	200	192	96%	225
2	180	175	97.2%	202
3	150	146	97.3%	168



(a) 实物图



(b) 涂装场景图

图 9 涂装工作图

5 结论

该研究设计并实现了一种基于 PLC 与机器视觉的智能涂装检测系统,提升了端子涂层检测的自动化水平。实验结果表明,该系统平均良率达 96.8%,产能达 1.125 s/件,有效提高了生产效率并降低了缺陷率。相比传统方法,该系统利用 EtherCAT 通信和 OpenCV 算法,提高了控制精度和稳定性。然而,涂层检测仍受荧光剂特性和环境光影响,且复杂形状端子的识别仍需优化。未来可结合深度学习进一步提升检测智能化水平,并优化控制策略以适应更广泛的应用场景。

参考文献:

- [1] 王延涛. 简述汽车连接器接线端子和多芯线束连接界[J]. 汽车电器,2023(12):41-43.
- [2] 李波,陈俊卫,刘卓毅,等. 基于锁相红外热成像技术的电力设备防护涂层质量检测[J]. 无损检测,2023,45(08):73-78.

- [3] 郭晨璠,刘立帅,涂彦昕,等. 绝缘子室温硫化硅橡胶涂层热波模型及其涂覆质量无损检测方法[J]. 电工技术学报,2022,37(11):2753-2760.
- [4] 段涵屹,王邦凯,尹松松,等. 涂层粘接质量红外热成像检测研究[J]. 工业计量,2021,31(05):28-30+42.
- [5] 马岩,陈建平,梁湘鹏,等. 基于施压过程计时的非金属基体涂层质量无损检测[J]. 天津科技大学学报,2021,36(02):36-39+50.
- [6] 陈晨. 基于机器学习和特征提取的端子缺陷检测[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2020.
- [7] Christy Dunlap, Skylar Featherstone, Matthew Smith, et al. Design and fabrication of a low-cost and programmable dip coating machine[J]. HardwareX,2022,12(01).
- [8] L. Zhang, G. Zhang. Optimization of Spraying Distance and Coating Thickness of Spraying Robot[J]. International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS),2021:413-417.
- [9] 赵辉. 基于机器视觉的迷彩涂层质量检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
- [10] 申振腾,陈建平,杜厚栋,等. 基于机器视觉的绝缘子 RTV 涂层质量检测方法研究及应用[J]. 电瓷避雷器,2018(05):233-240.
- [11] 吴丽斌. 基于 PLC 可编程控制器的电气设备自动化控制系统研究[J]. 全面腐蚀控制,2024,38(12):166-169.
- [12] 许志明. 基于小型 PLC 的 EtherCAT 主站系统设计与实现[J]. 工业控制计算机,2023,36(5):36-38.
- [13] 何丽阳. PLC 技术原理及其在电气设备自动化控制中的实践[J]. 自动化应用,2023,64(21):43-46.
- [14] 孙杰,祁新杰,陈棘. 基于 OpenCV 的喷嘴喷雾锥角自动计算方法[J]. 机电设备,2025,42(1):76-79.
- [15] 李欣,齐家敏,程昊,等. 基于机器视觉和 PLC 的谷糙分级控制系统设计[J]. 现代电子技术,2024,47(9):124-130.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号:52-49 国际发行代号:BM529 定价:18.00 元/期 108.00 元/年
地址:西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编:710075 电话:029-81871277
网址:http://yb-zdh.shaangu-group.com 电子邮箱:gyybbjb@126.com