

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)10-0037-06

一种基于深度学习的电阻片绝缘釉层自动喷涂设备的设计

许凯强¹, 向忠²

(1. 浙江理工大学机械工程学院, 浙江 金华 321000; 2. 浙江理工大学平阳研究院有限公司, 浙江 温州 325400)

摘要:为解决传统电阻片的喷涂绝缘釉层工艺效率低、人工成本高、质量不稳定等问题,在深入研究该工艺的基础上,设计了一套集视觉识别电阻片上料、电阻片循环加热、自动喷涂绝缘釉和下料摆盘功能的自动化喷涂设备。设计了一种泛用性视觉识别定位系统实现对随机摆放的电阻片进行定位的功能需求,采取链传动带动物料平台的方式实现电阻片在4个工位切换,采用预加热和自转移移动的方法,实现对电阻片侧面均匀喷涂、附着绝缘釉层。采用气缸与伺服模组联动实现搬对电阻片的搬运与摆盘。使用SolidWorks软件设计设备整体机械结构,对所需的驱动元器件进行计算选型。设计自动化控制系统与人机界面,实现了自动化作业、人机交互和运作监控。最终搭建设备投入生产,与人工进行相同时间内同种规格下,生产效率与合格率的对比试验。实验结果表明,该设备比传统人工作业所需工人数减少了80%,合格率提升至95%,生产效率提高了73%且运行稳定,实现设计目标,提高效率,降低成本,提高质量,满足企业自动化改造需求。

关键词:电阻片;视觉识别;自动喷涂;控制系统;自动化;绝缘釉层

中图分类号: TP278;TP18;TM215.3

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)10-0037-06

A design of automatic spraying equipment for insulation glaze layer of metal oxide varistors based on deep learning

Xu Kaiqiang¹, Xiang Zhong²

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Jinhua 321000, Zhejiang China;

2. Zhejiang Sci-Tech University Pingyang Research Institute Company, Wenzhou 325400, Zhejiang China)

Abstract: To address low efficiency, high labor cost and unstable quality in the traditional insulating glaze spraying process of resistor chips, an automatic spraying device integrated with visual feeding, cyclic heating, automatic glaze spraying, blanking and tray arranging functions is developed via in-depth process investigation. A universal visual positioning system is designed to locate randomly placed resistor chips; chain transmission drives the material platform to switch workpieces across four stations, and preheating combined with rotary motion achieves uniform coating and adhesion of insulating glaze on the side surfaces of resistor chips. Collaborative movement of cylinders and servo modules completes workpiece transportation and tray arrangement. SolidWorks is employed for overall mechanical structure design as well as calculation and model selection of driving components, and an automatic control system together with HMI is constructed to implement autonomous operation, human-machine interaction and equipment status monitoring. A physical prototype is fabricated and put into practical production, and comparative tests on production efficiency and product qualification rate between the proposed device and manual operation are conducted under identical duration and product specifications. Experimental results indicate that the proposed equipment reduces labor input by 80%, increases the qualification rate to 95% and improves production efficiency by 73% with stable operation. It satisfies the design objectives of efficiency improvement, cost reduction and quality promotion, and fulfills enterprises' demands for automation transformation.

Keywords: metal oxide varistors; visual identification; automatic spraying; control system; automation; insulation glaze layer

氧化锌电阻片是高压避雷器的核心组成部分,具有通流容量大、残压低和非线性指数高等优点,广泛应用于地铁、轻轨和高铁等轨道交通中,是避雷器、浪涌过电压保护器等核心组成部分^[1-3]。要提高氧化锌电阻片耐受陡波大电流冲击的能力,必须通过采用高性能侧面绝缘保护层来解决沿面闪络问题^[4-5]。喷涂侧面绝缘釉是电阻片

生产的重要工序。绝缘釉层的厚度、均匀性都会影响成品的抗大电流冲击能力、老化特性、热胀冷缩过程是否开裂。目前,针对喷涂工艺,人工使用喷枪喷涂的效率低下,使用单一喷枪喷台,对于电阻片绝缘釉的厚度、均匀性把控差,成品不合格率高、检测负担大、人力成本高,不利于大规模生产。国内针对具有自动上下料、自动喷涂、自动循环加

收稿日期:2025-06-09;录用日期:2025-08-14

作者简介:许凯强(2000—),男,硕士研究生,研究方向为机电一体化。

通信作者:向忠(1982—),男,博士,教授,研究方向为纺织印染装备智能化、绿色化、信息化。

引用本文:许凯强,向忠.一种基于深度学习的电阻片绝缘釉层自动喷涂设备的设计[J].自动化技术与应用,2026,45(10):37-42.(Xu Kaiqiang,Xiang Zhong. A design of automatic spraying equipment for insulation glaze layer of metal oxide varistors based on deep learning[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(10): 37-42.)

热的设备研究较少,所以对于研制实现电阻片自动喷涂设备的需求较为迫切。

本文提出一种电阻片绝缘釉层自动喷涂设备,通过采用深度学习模型实现电阻片上料的定位识别,采用三菱FX5U型号可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)作为控制主体实现设备自动化运行,保证自动上料、自动喷涂、循环加热、自动下料功能的实现。

1 绝缘釉层喷涂工艺与方案

1.1 喷涂工艺

进行喷涂流程前需要对电阻片进行加热处理,有利于绝缘釉与电阻片侧面的密致结合,同时减少实际应用过程中热胀冷缩造成的侧面釉层开裂的情况^[6]。同时部分产品需要多次多层喷涂,确保侧面绝缘釉层达到产品需要的质量。电阻片喷涂简要流程如图1所示。电阻片喷涂示意如图2所示。喷涂绝缘釉层过程示意图如图3所示。电阻片放置在支撑旋转台中心位置,支撑旋转台进入喷枪喷涂有效区域进行喷涂作业,在此过程中,支撑旋转台进行自转,使得侧面均能喷上釉料。

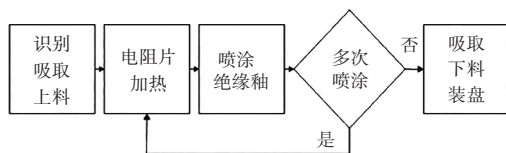


图1 电阻片喷涂工艺流程

Fig. 1 Spraying process of resistor chips

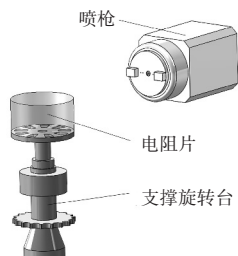


图2 电阻片喷涂示意图

Fig. 2 Schematic of resistor chip spraying

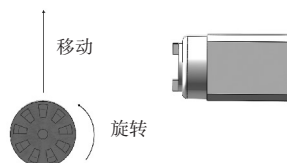


图3 喷涂绝缘釉层过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of insulating glaze spraying process

1.2 方案确定

通过对电阻片喷涂工艺流程的分析,抓取电阻片侧面不能有接触,常规喷涂工艺流程需要对受喷件加热,增加釉料附着力^[7]。本文将自动喷涂设备的总方案拆分为五大任务的实现,分别为利用视觉识别定位进行上料任务、电阻片加热任务、能控制喷涂厚膜喷的喷涂任务、实现多层摆盘的下料任务、运送物料在其他部分循环的任务。依

托物料循环方式和控制系统实现电阻片由托盘上料到摆盘下料过程的自动化,布局如图4所示。

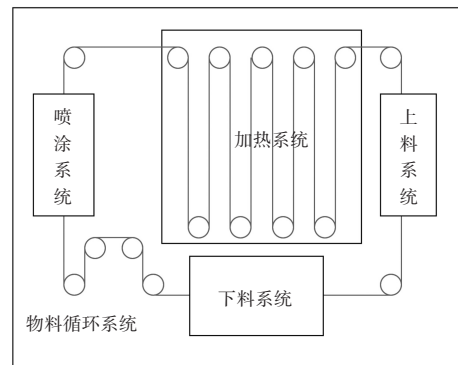


图4 设备布局

Fig. 4 Equipment layout

2 总体结构和工作原理

2.1 总体结构

电阻片绝缘釉层自动喷涂设备将分为5大系统,分别为带有视觉识别定位的上料系统、电阻片加热系统、绝缘釉喷涂系统、下料摆盘系统、生产线物料循环系统,整体结构如图5所示。

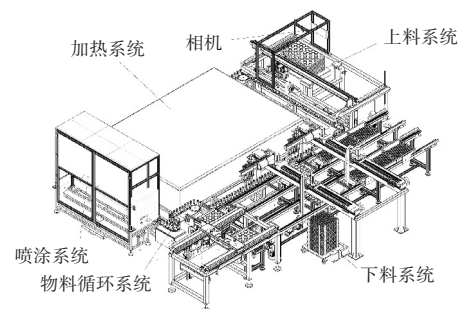


图5 设备总体结构

Fig. 5 Equipment overall structure

支撑旋转台和横向链条相连,电阻片放置在支撑旋转台上,电机驱动带动链条实现电阻片的工位切换;上料系统有升降机构,电机带动丝杆,实现升降台的上下移动,三轴伺服模组洗盘机构负责抓取和放置;喷涂系统有轴承卡槽,负责稳定支撑旋转台,缩口链传动结构使得支撑旋转台在移动的同时实现自转;下料系统包括托盘转移机构、电阻片吸取机构、隔板抓取机构,整盘抓取转移机构。

2.2 工作原理

各个工位的设置依托物料循环系统上物料循环的节拍进行合理规划和调节,可以实现循环线路和各个系统的不断配合工作^[8]。电阻片绝缘釉层自动喷涂设备的工作原理图如图6所示。PLC接收传感器信号,控制电机、气缸、电磁阀等电气元件,实现动作控制;电机减速器控制物料循环系统运作;简单运动控制器控制多轴运动,带动夹爪、气缸移动;气缸控制固定长度位移动作;电磁阀控制真空管道通放,实现吸嘴吸取和放开电阻片的动作;上位机接收相机图片识别电阻片位置,与PLC交互,提供坐标信息;触摸屏与PLC交互,实现数据监控和参数调整。

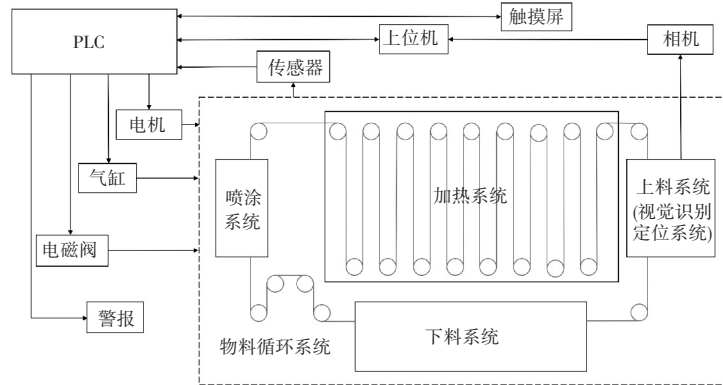


图6 电阻片绝缘釉层自动喷涂设备工作原理

Fig. 6 Working principle of automatic resistor chip insulating glaze spraying equipment

3 核心系统和机构的设计分析

3.1 电阻片上料吸盘机构

电阻片上料吸盘机构,主要负责单个电阻片吸取上料动作。主要由伺服模组、固定连接板、气缸支架、导杆气缸、小吸盘、隔板吸盘、吸盘支架组成,结构如图7所示。

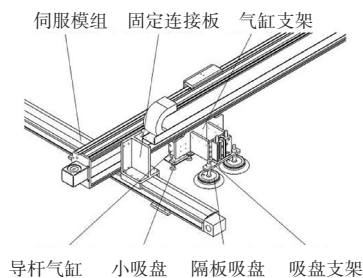


图7 上料吸盘机构

Fig. 7 Feeding suction mechanism

电阻片吸取采用吸盘方案,采用对射传感器限制吸取平面,可以适应直径与厚度不同型号的电阻片;电阻片上下层之间由隔板隔开,保证持续上料就需要设计大吸盘吸取隔板,保证上料的持续性;上料吸盘机构采用2自由度伺服模组,可以实现XY平面定位和XY轴不同方向转移电阻片、隔板;固定连接板设计加强筋确保伺服模组稳定性,提高定位精度;多组吸盘加快单次吸取数量,提高运作效率。

3.2 料盘堆叠下料机构

电阻片摆盘后,需要将料盘堆叠,方便叉车搬运。升降机架子上,安装有一个自由度的伺服模组,移动支架作为夹持机构的支撑与伺服模组连接;Z轴的上升和下降功能由安装在移动支架上的薄型气缸实现;联动板与薄型气缸相连,同时支持和固定下方的导杆气缸,限定夹取机构的夹取范围;夹片与导杆气缸连接,与料盘直接接触,夹住托盘;为了联动板的稳定,在4个角上安装直线导柱与移动支架连接。料盘堆叠机构如图8所示。

3.3 视觉识别上料系统

该设备采用深度学习视觉识别模型方案解决上料过程中托盘上的电阻片摆放位置具有随机性较难定位的问题。

视觉识别系统主要由相机、灯源、上位机等组成^[9]。

工业相机选取海康威视型号为MV-CU120的相机,工业相机和光源安装在固定支架上,确定与识别平面固定间距且保证竖直安装。识别模型采用改进的YOLOv11目标检测模型,采样训练得到部署模型。标定任务采用九点标定法,利用相机坐标和伺服模组坐标数据进行仿射变换,利用得到的仿射矩阵对识别坐标进行转换。上位机与PLC采用MODBUS TCP/IP通讯协议进行通讯,PLC启动拍照信号和识别任务结束均采用二次握手通讯方式。发送的信息包括识别个数和转换后的坐标信息。视觉识别定位流程如图9所示。

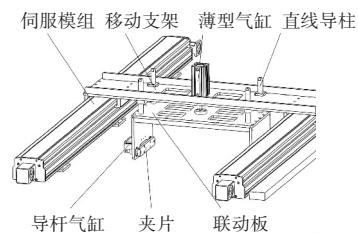


图8 料盘堆叠机构

Fig. 8 Tray stacking mechanism

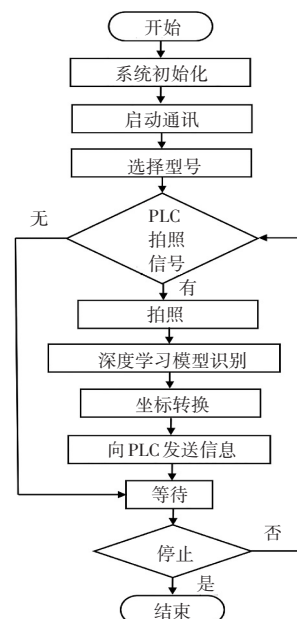


图9 视觉识别定位流程

Fig. 9 Flowchart of visual positioning

4 控制系统设计

本设备控制系统由数据采集装置、PLC 逻辑控制、上位机、加热装置、操作界面、控制电源等主要部分组成^[10-13]。控制系统架构如图 10 所示,光电热等传感器接收信号,产生电信号发送给 PLC 控制器,为其提供可靠的实时信息;上位机处理物料识别信息与 PLC 进行任务启停和数据反馈交互;触摸屏提供人机交互功能,显示设备运行状态同时能控制系统运作;PLC 作为主控制器,控制各个子系统中不同执行机构的动作实现和配合。

4.1 PLC 控制系统设计

该设备采用型号为 FX5U 的三菱 PLC 为核心控制器。

由于设备需要的输入输出点位较多,硬件增加了 I/O 拓展模块^[14]。PLC 通过简单运动控制器控制伺服模组的多轴运动控制;通过以太网 CC-Link IE Field Basic 网络协议直连变频器,控制电机运动;通过 MODBUS TCP/IP 协议与上位机通讯实现数据信息交互。

根据选择 PLC 的型号,在 Windows11 环境下使用三菱的 GXworks3 编程软件编写控制程序^[15-16]。编写的控制程序主要包括上电初始化、手动、自动、报警、复位/急停程序等^[17]。主要实现的功能包括设备的启动/复位/停止/急停、伺服点位参数配置示教调整、自动运行动作实现、单步或多步手动控制、报警提示与报警信息显示。控制系统流程如图 11 所示。

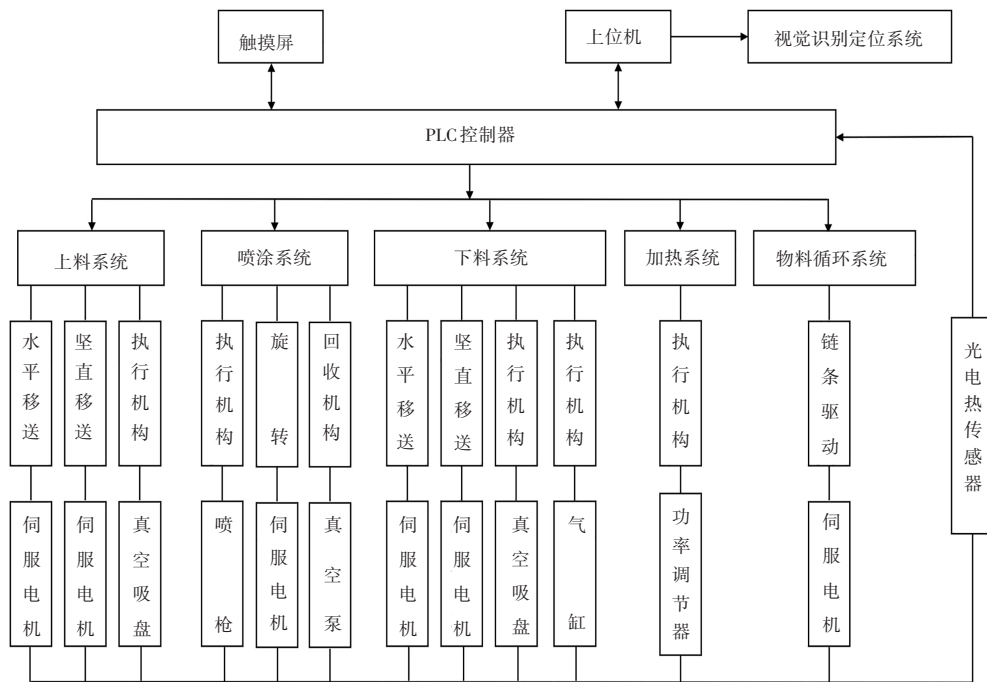


图 10 控制系统架构图

Fig. 10 Control system architecture diagram

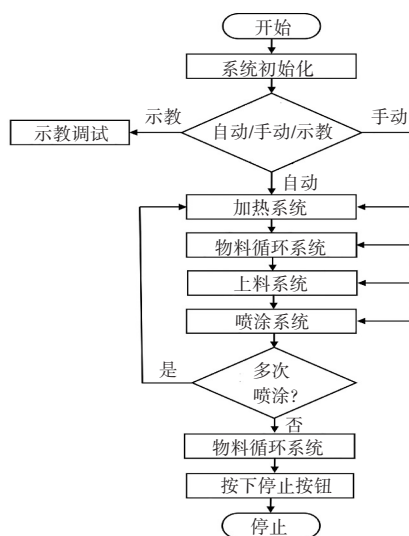


图 11 控制系统流程

Fig. 11 Flowchart of control system

4.2 人机界面设计

该自动化设备操作系统由两部分组成:控制主要自动化运作与 PLC 连接的三菱型号 GS2110-WTBD-N 的人机界面(human machine interface, HMI)、搭载视觉定位系统的上位机。

HMI 触摸屏的界面设计主要分为 5 部分:自动界面、手动界面、IO 监控界面、伺服参数界面、报警记录界面^[18]。自动界面负责自动程序执行、提供设备自动运作时的信息;手动界面用于单步或多步控制机构或系统运作,利于安装调试;I/O 监控界面实现对 PLC 输入输出点位的状态监控。伺服参数界面提供现场调试功能的实现。报警界面确保故障的实时记录,利于检修和排查^[14]。如图 12 所示为 HMI 部分显示界面。

上位机界面主要显示识别画面、型号选择、状态信息、错误信息。如图 13 所示为上位机界面。



图 12 HMI 部分显示界面

Fig. 12 HMI partial display interface

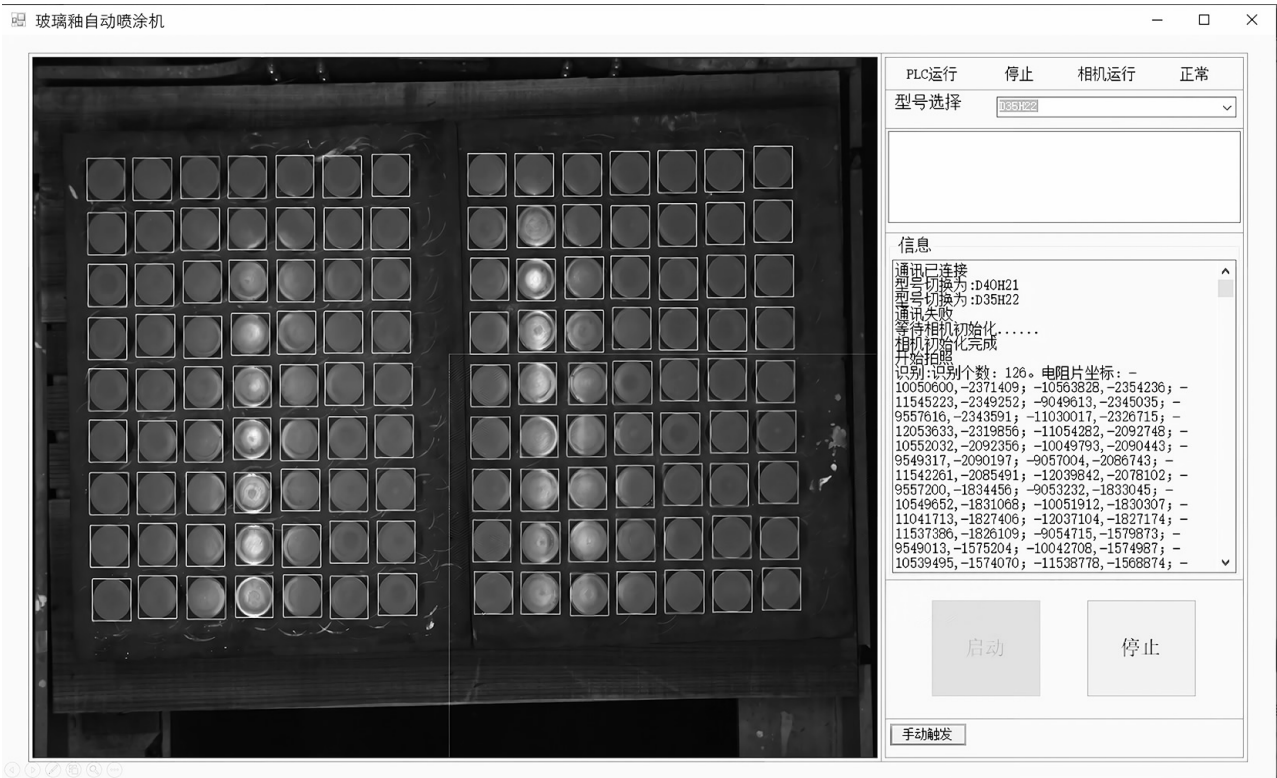


图 13 上位机界面

Fig. 13 Upper PC interface

5 应用效果

设计的电阻片绝缘釉层自动喷涂设备已实际应用于工厂生产中,设备使用现场如图 14 所示。

将本设备与传统人工操作喷涂绝缘釉作业进行对比,对比结果如表 1 所示。设计的设备自动运行需要 1 个工人,每小时可以喷涂 900 片电阻片并进行摆盘;完成整套

工序传统人工需要 3 个工人,每小时可以处理 520 个电阻片,根据每个人每小时生产电阻片总片数,传统人工为 173 片/(人·h),自动化设备为 900 片/(人·h)。

综上,本设备可以节约大约 4 个人的人力成本。

表 1 对比得出结论:自动装配设备比传统人工操作所需工人数减少了 80%,产品合格率提升至 95%,生产效率提高了 73%。实践证明:该设备具有生产效率高、产品质

量好、人力成本低的优点,满足企业的生产要求。



图 14 设备实物照片

Fig. 14 Equipment physical photograph

表 1 自动喷涂设备与人工生产效果对比

Tab. 1 Production effect comparison: automatic equipment vs manual work

生产方式	每人生产速度/(片·h ⁻¹)	需要工人数	合格率/%
传统人工	520	3	85
自动化设备	900	1	95

6 结论

本文设计的一种电阻片绝缘釉层自动喷涂设备,通过设计带有视觉识别定位的上料系统、电阻片加热系统、绝缘釉喷涂系统、下料摆盘系统及生产线物料循环系统实现工艺流程的完全遍历,完成自动上料、恒温加热、自动喷涂、自动下料、自动摆盘等任务需求。使用SolidWorks软件建立模型,对所需的驱动元器件进行了计算选型。编写了PLC、上位机和触摸屏的控制程序,成功交付企业应用实际生产。实际试验表明:本设备满足了电阻片喷涂绝缘釉的工艺要求,完成同等任务量所需工人数减少80%,产品合格率提升至95%,生产效率提高了73%;较好地解决了传统生产工艺效率低、人工成本高、质量不稳定等问题,

为推进制造车间智能化改造提供科学依据和可行性指导。

参考文献

- [1] 戴立庆,徐铁胜. 330 kV 氧化锌避雷器故障诊断及处理[J]. 机电工程技术, 2023, 52(7): 172-176.
- [2] 杨帆,韩睿,蒋鹏,等. 基于状态量优化的氧化锌避雷器健康状态评估研究[J]. 电瓷避雷器, 2026(3): 35-42.
- [3] 吴顺成. 基于红外热像技术的氧化锌避雷器故障检测方法[J]. 实验室检测, 2024, 2(11): 51-53.
- [4] 万帅,曹伟,谷山强,等. 非线性直流氧化锌电阻片侧面无机绝缘涂层研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(3): 159-165.
- [5] 朱成洋,田冰,郭向洋. 侧面釉微裂纹对氧化锌压敏电阻片电气性能影响的探究[J]. 电瓷避雷器, 2021, 301(3): 156-161.
- [6] 王兰义,任鑫,黄海,等. 国内外避雷器用氧化锌电阻片的技术现状与发展趋势[J]. 电瓷避雷器, 2021(6): 30-44.
- [7] 范凤艳,窦艳容,陈桂平,等. 玻璃瓶喷釉釉料与挥发性有机物的作用效应关系研究[J]. 化纤与纺织技术, 2022, 51(1): 37-39.
- [8] 秦志刚,张洪亮. 汽车焊装生产线节拍分析及优化[J]. 汽车工艺与材料, 2021(8): 57-60.
- [9] 施航杰. 基于机器视觉引导的电容高精度装配系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(5): 71-76, 81.
- [10] 陈旋,莫日根. 基于 PLC 控制的 SF6 断路器智能加热系统装置研究[J]. 电力设备管理, 2024(15): 195-197.
- [11] 王发好,张彩虹,姜鲁艳,等. 基于 PLC 的日光温室混施肥系统设计[J]. 农机化研究, 2025, 47(12): 126-135.
- [12] 文恒,文家雄. 基于 PLC 秧苗繁育大棚控制系统的设计与应用[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(12): 153-154, 160.
- [13] 高健. 基于 PLC 的免耕播种施肥控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2025, 47(10): 252-258.
- [14] 邵幔幔,刘益剑,庄盛秋,等. 高压互感器自动化检定系统设计与开发[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(11): 71-73.
- [15] 张莹,孟江,程荣. 常减压装置电脱盐系统改造及运行效果[J]. 河南化工, 2024, 41(9): 46-48.
- [16] 苏东彦. 基于 PLC 的变压吸附制氮装置控制系统设计[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(12): 151-152.
- [17] 张田龙,雷志伟,郝存明,等. 骨架油封硫化工序自动化生产系统研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(8): 89-93.
- [18] 焦磊,向忠. 6 工位熔管自动压装设备的设计研究[J]. 轻工机械, 2024, 42(1): 85-91.
- [19] algorithm for path planning of UAVs [J]. Internet of Things Journal, 2022, 9(22): 22547-22558.
- [11] 吴钧皓,戚远航,罗浩宇,等. 带交叉策略的粒子群算法求解多无人机路径规划问题[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(10): 94-95, 168.
- [12] 杨旭,王锐,张涛. 面向无人机集群路径规划的智能优化算法综述[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(11): 2291-2302.
- [13] 叶梓菁,魏文红,李环,等. 基于改进粒子群算法的无人机路径规划[J]. 东莞理工学院学报, 2023, 30(3): 18-23.
- [14] 杜云,彭瑜,邵士凯,等. 基于改进粒子群优化的多无人机协同航迹规划[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(32): 13258-13264.
- [15] 王浩然,石永康,赵玉花,等. 基于改进人工鱼群算法的植保无人机路径规划[J]. 农机化研究, 2025, 47(8): 40-45.
- [16] 张旭东,于丽娅,李少波,等. 元启发式算法在植保无人机路径规划中的研究进展[J]. 农机化研究, 2025, 47(3): 1-9.
- [17] 方斌,胡诚,万娇,等. 长距离输电线路无人机巡检路径智能规划方法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(1): 28-32.

(上接第 23 页)

- [4] 刘英尧. 无人机技术在消防救援中的效能及应用研究[J]. 森林防火, 2023, 41(4): 139-143.
- [5] 刘飞. 无人机在火灾扑救中的应用[J]. 今日消防, 2023, 8(12): 36-39.
- [6] 王飞,杨清平. 基于改进粒子群算法的城市物流无人机路径规划[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(30): 13187-13194.
- [7] 广鑫,耿增显. 基于离散粒子群算法的集群无人机飞行路径规划[J]. 现代电子技术, 2025, 48(4): 119-122.
- [8] 毕文豪,张梦琦,高飞,等. 无人机集群任务分配技术研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(3): 922-934.
- [9] Kumar G, Anwar A, Dikshit A, et al. Obstacle avoidance for a swarm of unmanned aerial vehicles operating on particle swarm optimization: a swarm intelligence approach for search and rescue missions [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44(2): 1-18.
- [10] Yu Z, Si Z, Li X, et al. A novel hybrid particle swarm optimization