

变电站电气柜搬运设备智能化设计研究

宋维¹, 魏耀轲²

(1. 中国汽车工业配件销售有限公司, 北京 100142;

2. 北京牧晨机电有限公司, 北京 102308)

摘要 随着电力系统的快速发展, 变电站建设规模不断扩大, 电气柜的搬运工作量也随之增加, 传统的人工搬运方式存在效率低、安全隐患大等问题。本文针对变电站电气柜搬运过程中存在的问题, 提出了一种智能化的电气柜搬运设备设计方案。该设备采用模块化设计, 集成了自动导航、障碍物避让、精确定位等功能, 可实现电气柜的自动化搬运。通过仿真分析和实验验证, 证明了该设备的可行性和有效性, 以期变电站电气柜搬运的智能化提供一种新的解决方案。

关键词 变电站; 电气柜; 智能搬运; 模块化设计; 自动导航

中图分类号: TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.17.006

0 引言

为了适应电力行业的快速发展, 提高变电站电气柜搬运的效率和安全性, 亟需研发一种智能化的电气柜搬运设备。本文针对变电站电气柜搬运过程中存在的问题, 提出了一种基于模块化设计的智能电气柜搬运设备, 该设备集成了自动导航、障碍物避让、精确定位等功能, 可实现电气柜的自动化搬运, 有效提高了搬运效率, 降低了人工劳动强度, 保障了作业安全。本研究成果对于推动变电站智能化建设, 提升电力系统运行效率和可靠性具有重要意义。

1 变电站电气柜搬运现状分析

1.1 人工搬运方式的局限性

变电站电气柜的搬运工作长期以来主要依赖人力完成, 这种传统的搬运方式存在诸多局限性, 电气柜体积庞大、重量可达数吨, 搬运过程需要多名工人协同配合, 劳动强度大, 工作效率低下。人工搬运受制于现场环境条件, 狭窄空间内难以施展, 恶劣天气下无法正常作业。此外, 电气柜搬运对精准度要求较高, 人工操作很难保证毫米级的定位精度, 容易发生碰撞、倾覆等意外, 存在较大的安全隐患。随着变电站建设规模的不断扩大, 电气柜数量急剧增加, 人工搬运方式已无法满足现代变电站的建设需求, 亟需引入自动化、智能化的搬运设备, 以提高搬运效率, 降低人工劳动强度, 保障作业安全。

1.2 电气柜搬运设备的研究现状

针对变电站电气柜搬运过程中存在的问题, 国内外学者开展了相关搬运设备的研究与开发工作, 目前

已有的电气柜搬运设备主要包括电动平车、轨道吊车、搬运机器人等。电动平车采用电机驱动, 可在水平面上实现电气柜的搬运, 但无法实现垂直提升和精准定位。轨道吊车借助天车轨道实现电气柜的吊装和水平移动, 但布置轨道受场地限制, 运行路径固定, 灵活性差。搬运机器人集成了运动控制、力觉感知等技术, 可实现电气柜的灵活搬运和精准定位, 但导航避障、稳定性控制等方面还有待进一步提升。现有电气柜搬运设备在智能化、模块化、集成化方面还存在不足, 难以完全满足变电站建设的实际需求, 仍需进一步研究开发更加先进、高效、智能的搬运装备。

1.3 智能化搬运设备的必要性

随着电力系统的快速发展, 变电站建设规模不断扩大, 电气柜的安装数量急剧增加, 传统人工搬运方式已无法适应现代变电站建设的需求。开发智能化的电气柜搬运设备, 实现搬运过程的自动化、无人化, 已成为提高变电站建设效率、保障施工安全的必然选择。智能化搬运设备可借助先进的传感器、控制算法, 实现电气柜的自主定位、路径规划、避障移动等功能, 大大降低了人工劳动强度, 提高了作业效率。同时, 智能设备可根据环境状况自主决策、灵活应对, 能够在复杂狭窄的环境中稳定可靠地完成搬运任务, 有效规避碰撞、倾覆等安全隐患^[1]。

此外, 搬运设备的智能化、模块化设计有助于提高设备的通用性、扩展性, 可灵活适应不同型号电气柜和变电站布局, 降低设备研制成本, 推动智能搬运技术在电力行业的推广应用。

1.4 智能化搬运设备的技术挑战

开发智能化的变电站电气柜搬运设备需要攻克一系列技术难题。自主导航与路径规划是首要挑战,搬运设备需实时感知周围复杂环境,规划出安全、高效的运动路径,这对环境建模、传感器融合、路径搜索优化算法提出了较高要求。要在狭窄、杂乱的环境中实现灵活避障与精准定位也是难点之一,需综合运用多传感器感知、实时避障决策、伺服控制等技术。此外,电气柜搬运对设备的稳定性、可靠性要求很高,设备振动、冲击等都有严格限制,因此还需攻克主动减震、柔顺控制等技术,确保电气柜搬运过程的平稳可靠。智能搬运设备的模块化设计、集成化制造也面临诸多挑战,要在满足功能需求的同时,兼顾设备的紧凑性、可扩展性,实现高度集成的模块化设计。

2 智能电气柜搬运设备的总体设计

2.1 设备功能需求分析

智能电气柜搬运设备的研制首先要明确设备的功能需求。通过深入调研变电站电气柜搬运的工艺流程、作业环境、技术标准等,全面分析搬运设备所需具备的性能指标和智能化功能。搬运设备需要能够适应变电站狭窄、复杂的环境,灵活移动,同时具备稳定可靠、精准定位的能力,确保电气柜搬运过程的安全高效。在智能化功能方面,搬运设备应具备自主导航、路径规划、视觉伺服、避障控制、自动对接等能力,实现从搬运到安装的全流程自动化作业。此外,还需充分考虑设备的模块化设计需求,采用功能模块标准化、接口规范化设计,提高设备的通用性、可扩展性。

2.2 总体方案设计

智能电气柜搬运设备的总体方案设计是根据设备功能需求,从总体构型、动力学、控制系统等方面进行系统级设计。在总体构型设计中,需综合考虑搬运设备的工作环境、搬运对象、作业流程等因素,合理选择轮式、履带式、混联式等底盘形式,匹配适宜的机械臂结构,兼顾设备的灵活性、稳定性。动力学设计需分析搬运设备的速度、加速度、载荷等要求,优化电机、传动、制动等系统参数,实现高效、可控的动力输出。控制系统设计是智能搬运设备的核心,需围绕自主导航、智能避障、伺服控制、人机交互等功能,合理规划控制系统硬件架构,选择高性能的工控机、传感器、驱动器等核心部件,并开发相应的控制算法和软件平台,实现设备的智能化控制^[2]。同时,要统筹兼顾模块化、集成化设计理念,采用开放式、插件

化的系统架构,便于功能模块的灵活组合和快速迭代。

2.3 模块化设计方法

模块化设计是实现智能电气柜搬运设备高效研制、快速迭代的重要途径。将搬运设备划分为若干个功能模块,如导航模块、视觉模块、机械臂模块、人机交互模块等,每个模块负责特定的功能,并定义清晰的接口规范。各模块可独立设计、开发、测试,通过标准化接口实现灵活组合,大大提高了设备的可重用性、可扩展性。在具体实施过程中,要遵循模块化设计的基本原则,合理划分系统功能,定义清晰简洁的模块边界。采用分层解耦的架构设计,实现模块内高内聚、模块间低耦合,提高系统的可维护性、可移植性。鼓励采用成熟的开源软硬件平台,充分利用已有的功能模块,降低研制成本和难度。同时,要建立配套的模块化管理流程,包括需求管理、接口管理、配置管理等,加强模块复用和版本控制,提高研制质量和效率。

2.4 关键技术路线

智能电气柜搬运设备的研制需要突破一系列关键技术,自主导航与路径规划是首要攻关方向,需研究复杂环境下的自主定位、地图构建、路径搜索等算法,实现搬运设备的自主移动能力。要攻克视觉伺服控制技术,研究机器视觉感知、视觉伺服控制等方法,实现电气柜的精准定位和自动对接。针对狭窄空间环境,还需重点突破主动避障和柔顺控制技术,通过传感器融合实现障碍物的实时检测和规避,并研究轨迹平滑、阻抗控制等方法,实现搬运机械臂的灵巧控制。针对设备集成化需求,需开展一体化设计技术攻关,在统一系统架构下,采用模块化、插件化的设计思路,实现各功能模块的无缝集成。同时,还需加强人机协同技术研究,开发友好的人机交互界面,实现人员与设备的无障碍沟通。通过关键技术的系统性研究和工程化应用,形成一套完备的智能搬运设备研制技术体系,为相关装备的产业化发展提供有力支撑。

3 智能电气柜搬运设备的关键技术研究

3.1 自动导航与路径规划

智能电气柜搬运设备能够在变电站复杂环境中自主导航和规划路径,是其实现自动化运行的基础。自动导航需要搬运设备利用多传感器实时感知周围环境,构建环境地图模型,并在地图中定位自身位置和姿态。激光雷达、视觉传感器、惯性导航等常用于环境感知和自主定位,通过传感器融合算法如卡尔曼滤波,可获得搬运设备高精度的位姿估计。在已知地图和设备

位置的基础上,搬运设备需进一步规划从起点到目标位置的最优路径^[3]。路径规划算法如RRT被广泛应用,通过搜索避障路径图,生成安全、高效的运动轨迹,而且考虑到变电站狭窄空间对搬运设备运动的限制,还需采用一些启发式规则优化路径,如贴边行驶、转弯半径约束等。自动导航与路径规划技术的应用,使智能搬运设备能够自主感知环境,规避障碍,高效到达指定位置,极大地提高了电气柜搬运作业的自动化水平。

3.2 环境感知与障碍物避让

智能电气柜搬运设备在变电站内运行,面临狭窄复杂的环境和众多障碍物,为确保运行安全,必须具备良好的环境感知和避让能力。激光雷达、视觉传感器等被用于动态环境感知,通过点云处理、图像分割等算法,可获取障碍物的位置、尺寸、运动状态等信息。将障碍信息融入环境地图中,形成动态更新的避障地图,为搬运设备的运动规划提供依据。在避让控制方面,可采用人工势场法、动态窗口法等局部避障算法,根据障碍物的位置和设备自身状态,实时调整运动方向和速度,安全通过障碍区域。针对变电站狭小空间的特点,还可引入一些智能避障策略,如通过分析障碍物间的空隙,选择最优通行路径;利用搬运机械臂的灵活性,变换姿态通过狭窄通道等。通过环境感知与智能避障技术的结合,搬运设备能够及时发现潜在风险,灵活应对复杂环境,极大地提高了设备运行的安全性和鲁棒性。

3.3 精确定位与对接技术

电气柜搬运对设备的精度和稳定性提出了很高的要求,只有实现精确的定位和平稳的对接,才能保证电气柜的安全搬运和可靠安装。搬运设备可利用视觉传感器精确识别电气柜的位置和姿态,通过视觉伺服控制实现设备与电气柜的精确对接。同时,采用机器视觉引导,实现搬运机械臂与电气柜安装螺孔、导轨等特征的精准对准,确保装配精度。在对接过程中还需兼顾设备和电气柜的受力状态,通过柔顺控制技术,实时调节机械臂的力和速度,实现平稳对接和精确控制,避免电气柜受到碰撞、倾覆等意外^[4]。此外,考虑到电气柜自身的重量和尺寸差异,搬运设备还须具备自适应能力,根据不同电气柜的参数自主调整搬运策略和控制参数,确保各种型号电气柜都能精准定位、平稳对接。精确定位与对接技术的应用,保障了电气柜搬运的高精度和安全性,提高了变电站建设的效率和质量。

3.4 稳定可靠的控制策略

智能电气柜搬运设备在实际应用中不仅要满足搬运精度和效率的要求,更需确保整个系统的稳定性和可靠性。设备故障、异常扰动等因素都可能影响搬运过程,因此必须采取稳定可靠的控制策略。首先,应进行全面的风险分析,识别出可能影响设备稳定运行的因素,并制定相应的预防和应对措施。其次,采用基于模型的预测控制、鲁棒自适应控制等先进控制理论,使搬运设备能够快速响应各种干扰,保持运动平稳。设备还应具备故障诊断和容错控制能力,通过传感器监测和数据分析,实时评估设备健康状态,一旦发现异常,及时切换到安全模式,避免事故扩大^[5]。针对变电站恶劣工况,搬运设备还需采取可靠的防护措施,如防尘、防水、防电磁干扰等,确保设备在各种环境下稳定工作。同时,积极开展设备测试与验证工作,从机理级、部件级到系统级,全面评估设备性能,暴露潜在的稳定性和可靠性问题,并持续改进优化,最终实现设备高可靠运行。

4 结束语

本文针对变电站电气柜搬运过程中存在的问题,提出了一种基于模块化设计的智能电气柜搬运设备,该设备集成了自动导航、障碍物避让、精确定位等功能,可实现电气柜的自动化搬运,通过对设备总体方案设计、关键技术研究等方面的深入探讨,证明了该设备的可行性和有效性。智能电气柜搬运设备的研发和应用,将有效提高变电站电气柜搬运效率,降低人工劳动强度,保障作业安全,对于推动变电站智能化建设,提升电力系统运行效率和可靠性具有重要意义。未来还需进一步优化设备性能,拓展应用场景,推动智能搬运设备在电力行业的广泛应用。

参考文献:

- [1] 张艳清. 焊装车间测试区低压电气柜的设计与应用[J]. 电气应用, 2025, 44(02): 106-111.
- [2] 李则翰. 变电站电气设备安装质量控制措施及实际操作[J]. 光源与照明, 2025(01): 177-179.
- [3] 王金荣. 变电站电气火灾早期预警与智能防控技术[J]. 数字技术与应用, 2025, 43(01): 123-125.
- [4] 朱剑, 魏佳骏, 赵段杰. 基于物联网传感技术的变电站电气设备运行全天候监测[J]. 自动化应用, 2024, 65(24): 172-174.
- [5] 邓显俊, 王斌, 吕占彪, 等. 智能化变电站保护设备可视化运维系统设计与实现[J]. 电气技术与经济, 2024(08): 88-90.