

机械电气一体化在智能制造中的应用

刘贵滕¹, 潘金霖¹, 陈雷², 魏清标³, 赵竣元⁴

- (1. 青岛宇通电力建设工程有限公司, 山东 青岛 266000;
2. 青岛中惠机械租赁有限公司建设工程有限公司, 山东 青岛 266000;
3. 山东山科合建项目管理有限责任公司, 山东 青岛 266000;
4. 青岛柏瑞通达建筑工程有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 机械电气一体化 (Mechatronics) 是现代机械设备发展的必然趋势, 越来越多的电气自动控制系统被用于机械设备之中, 在提高了机械设备控制的稳定性及加工精度的同时, 也有效地简化了机械电气线路与结构。本文探讨了机械电气一体化技术在智能制造领域中的具体应用, 重点涉及智能生产线、柔性制造系统、智能物流与仓储以及智能检测与预测性维护等应用场景, 并对系统集成复杂性、设备维护难题及数据安全风险等局限性提出了相应的解决策略, 以期对推动智能制造体系向更高效、更稳定、更安全的方向演进有所裨益。

关键词 机械电气一体化; 智能制造; 自动化控制; 柔性制造

中图分类号: TH-39

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.16.006

0 引言

全球制造业正处于由传统模式向数字化、智能化转型的关键阶段。在此背景下, 机械电气一体化技术以其多学科交叉融合的特性, 成为构建智能制造体系的重要支柱。该技术不仅整合了机械、电气、控制及计算机等核心领域的先进理论, 还借助传感、数据处理及闭环控制手段, 实现生产系统的智能自适应调节。当前, 新兴的信息技术如人工智能、物联网及 5G 通信的快速发展, 为机械电气一体化技术的进一步深化应用提供了有力支持。本文对该技术在智能制造中的多种应用场景进行系统梳理, 期望为产业升级提供理论支持与实践参考。

1 机械电气一体化的基本概念

机械电气一体化是一门融合机械工程、电气工程、计算机科学、控制工程等多学科的交叉学科, 旨在通过多领域技术的集成, 实现复杂系统的智能化、自动化和高效化。在机械电气一体化系统中, 机械部件与电子控制系统紧密结合, 形成高度集成的整体。这种集成不仅提升了系统的性能和可靠性, 还增强了其适应复杂环境的能力^[1]。机械电气一体化的核心在于将机械系统的精密性与电子控制系统的灵活性相结合。通过传感器实时获取系统状态信息, 利用计算机和控制算法进行数据处理和决策, 再通过执行机构对机械部件进行精确控制。这种闭环控制方式确保了系统的高精度和高效率。随着科技的进步, 机械电气一体化

技术不断发展, 逐渐融入人工智能、物联网等新兴技术。这使得系统具备更强的自主性和智能化水平, 能够在复杂多变的环境中自主完成任务, 进一步拓展了其应用领域。

2 机械电气一体化在智能制造中的应用场景

2.1 在智能化生产线中的应用

在现代智能制造环境中, 机械电气一体化技术被广泛应用于智能化生产线, 以实现高度自动化、精确控制及柔性制造。在该场景中, 机械、电气、控制和信息技术深度融合, 使得生产线具备实时感知、动态调整和自主优化能力。具体而言, 智能化生产线通常依赖于嵌入式传感系统来监测生产过程中的关键参数, 如温度、压力、速度和位移等, 并将数据传输至中央控制系统。中央控制系统基于采集的信息, 通过先进的控制算法优化生产节拍、调整设备工作状态, 确保整个生产流程的协调性与高效性。同时, 智能生产线普遍采用机器人自动化设备, 执行组装、焊接、喷涂等高精度任务。这些机器人搭载了高精度伺服电机和智能视觉系统, 使其能够精准识别工件并完成复杂操作。并且, 智能化生产线还利用工业互联网技术, 实现设备间的信息互联, 确保各个生产单元协同工作, 形成完整的智能制造体系。

2.2 在柔性制造系统中的应用

机械电气一体化在柔性制造系统 (FMS) 中发挥了关键作用, 使生产模式能够快速适应市场需求变化。

该系统依赖于模块化的数控机床、智能物流系统及自主调度控制策略,以支持多品种、小批量的生产模式。在具体实施过程中,数控机床与自动化加工单元通过网络化控制平台进行连接,并由统一的制造执行系统进行调度^[2]。机械电气一体化技术使得数控机床具备自适应加工能力,能够根据不同产品的规格和工艺要求,调整刀具路径、切削参数及进给速度,提高加工精度和生产柔性。此外,柔性制造系统通常配备智能物料搬运装置,如自动导引车或自主移动机器人,负责原材料和半成品的精准配送。这些智能物流设备采用激光雷达、视觉导航和 RFID 识别等技术,实现高效路径规划和避障操作,确保物料能够准确送达指定工位,从而提升整个系统的生产效率和智能化水平。

2.3 在智能物流与仓储中的应用

在智能制造体系中,物流和仓储环节直接影响生产效率及供应链响应速度,而机械电气一体化技术在这一领域的应用,使得物料输送、存储与管理更加高效和智能。具体应用方式包括自动化立体仓库(AS/RS)、智能分拣系统及智能搬运机器人。自动化立体仓库借助高精度电动堆垛机、传输系统及智能调度算法,实现对物料的自动存取。在该系统中,电机驱动的堆垛机按照指令精准移动,并通过传感器实时监测货物位置,以确保高效作业。智能分拣系统则采用光电识别、视觉检测及 AI 算法,对物料类别、尺寸及配送要求进行精准分类,并由机械臂或高速传输带完成自动分拣^[3]。此外,智能仓储系统通常配备 AGV 或 AMR,用于优化物料搬运路径。这些自主移动设备依赖电气驱动系统、智能导航技术和实时路径优化算法,使得物料搬运过程更具灵活性和可靠性,从而降低人工成本,提高仓储运作效率。

2.4 在智能检测与质量控制中的应用

在智能制造过程中,产品质量检测与控制至关重要,而机械电气一体化技术的应用,使得检测精度、效率及稳定性得到显著提升。典型的应用方式包括在线检测系统、智能视觉检测及自动校准技术。在线检测系统中,高精度传感器与数据采集系统协同工作,实时监测产品尺寸、形状及物理性能,并利用 PLC 或嵌入式控制单元分析数据,从而判断产品质量是否符合标准。智能视觉检测系统则采用高分辨率工业相机、深度学习算法及图像处理技术,对产品外观、表面缺陷及色差进行精准识别。该系统可集成于生产线上,通过高速摄像机采集图像,并借助 AI 模型对缺陷特征进行判别,进而触发报警或剔除不合格产品。另外,自动校准技术广泛应用于精密加工领域,其核心在于

利用伺服控制系统、位移传感器及智能反馈算法,对机床或生产设备进行实时调整,以确保加工精度和一致性,从而提升整体产品质量。

2.5 在预测性维护与智能运维中的应用

机械电气一体化在智能制造中的另一重要应用场景是预测性维护及智能运维,旨在降低设备故障率、延长使用寿命,并优化维护成本。具体实现方式包括智能传感系统、云端监测平台及 AI 预测算法。智能传感系统通过振动、温度、电流及声学信号采集设备运行状态,并借助边缘计算技术进行实时数据处理,以识别潜在故障。云端监测平台则整合多个设备的数据流,构建大数据分析模型,对长期运行趋势进行评估。AI 预测算法结合历史数据及机器学习技术,分析设备健康状态,并生成维修建议或自动调整设备运行参数。例如:在智能制造车间中,伺服电机、液压系统及轴承等关键部件均配备状态监测传感器,一旦检测到异常信号,系统可提前预警,并安排维护计划,以防止突发性故障。另外,部分智能工厂采用数字孪生技术,构建虚拟设备模型,与真实设备同步运行,从而模拟故障发生过程,并优化维护策略,提高运维管理的智能化水平^[4]。

3 机械电气一体化在智能制造中应用的局限与解决方案

3.1 系统集成复杂性与技术标准不统一

机械电气一体化系统涵盖多个学科领域,涉及传感器技术、自动化控制、嵌入式系统、工业通信等多个关键环节。然而,当前行业内缺乏统一的标准化接口和协议,导致不同厂商的设备在数据交互和控制策略上存在兼容性问题,影响整体系统的协同运作。

为了提升系统的集成效率,应从标准化、模块化以及智能化调试入手。可推动开放式通信协议(如 OPC UA、Profinet、EtherCAT 等)的广泛应用,使异构系统能够实现无缝互联。鼓励行业组织与科研机构合作,制定设备互联互通标准,确保不同厂商的机械电气一体化组件能够兼容运行。同时,在机械结构、电气驱动以及控制系统层面采用可重构模块,提高系统的可扩展性。各功能单元可独立升级,使设备适应不同生产需求,同时简化集成过程。另外,利用虚拟仿真环境对系统进行建模,提前验证各组件之间的兼容性,优化集成逻辑,降低因设备不兼容导致的调试时间。

3.2 设备维护复杂度高与故障诊断难度大

在机械电气一体化系统中,设备高度集成,涉及精密机械部件、智能控制单元及电气驱动系统。长期

运行后,机械磨损、电气老化以及控制参数漂移等问题可能导致系统稳定性下降。此外,由于系统内部多个部件协同工作,单个部件的故障可能引发连锁反应,增加故障排查的难度。因此,需构建智能监测与预测性维护系统,即利用振动传感器、温度传感器、电流监测模块等实时采集设备运行数据,并结合人工智能算法分析运行趋势,预测关键部件的寿命,提前进行维护,减少非计划停机。并且,使用边缘计算技术于现场实时数据处理,提高响应速度,而云计算平台可存储长期运行数据,并进行大规模分析,生成设备健康状态评估报告,辅助决策制定^[5]。另外,还可结合机器学习和深度学习算法,使系统能够根据设备的运行状态自动调整维护策略。例如:在设备运行负荷较大时,调整关键部件的工作参数,降低故障发生概率。

3.3 数据安全与网络安全隐患

智能制造体系依赖大规模的工业物联网(IIoT)与云端存储,机械电气一体化系统的数据互联使其面临潜在的网络攻击、数据泄露及恶意篡改风险。例如:未经授权的访问可能导致设备运行参数被恶意修改,影响生产安全。需构建多层次的信息安全防御体系保证系统的稳健性与数据完整性,可采用区块链技术进行数据加密与溯源。区块链的分布式账本特性可确保数据不可篡改,提高制造数据的可信度,同时提升供应链数据透明度,避免因数据泄露导致的生产风险。同时,构建工业网络安全防御体系。利用深度防御策略(Defense-in-Depth, DiD),在网络层、设备层及应用层构建多级安全保护,包括使用VPN、工业防火墙、入侵检测系统(IDS),确保数据传输的安全性。除此以外,还需引入双因素认证(2FA)、零信任架构(Zero Trust Architecture)及基于区块链的身份管理系统,防止未经授权的设备或人员访问关键生产控制系统,提高整体安全性。

4 实践案例分析

某集团作为全球领先的工程机械制造商,其18号智能工厂被誉为“灯塔工厂”,充分体现了机械电气一体化在智能制造中的深度应用。该工厂通过集成智能装备、工业物联网和数字化仿真等技术,实现了生产过程的高度自动化和智能化。在生产过程中,工厂采用了大量智能装备,如机器人自动化设备,承担焊接、喷涂等高精度任务。这些设备配备高精度伺服电机和智能视觉系统,能够精确识别工件并执行复杂操作。同时,工厂构建了工业物联网平台,将机台设备联网,实现生产信息的实时采集、设备互联以及自动控制与

数据传输,最大化提升了设备利用率。此外,工厂在规划阶段利用三维仿真技术,对整个生产工艺流程进行建模,在虚拟场景中试生产,优化规划方案。通过仿真实验进行节拍平衡分析与优化,规划最优的装配任务和资源配置。

某集团旗下的青岛互联工厂是智能制造实践中的典型案例,充分展示了机械电气一体化在高度定制化生产中的深度融合。该工厂依托COSMOPlat工业互联网平台,实现了从用户下单到产品交付全过程的数据驱动和协同控制。在制造环节,自动化装配线集成了机器人系统、高速数控设备与智能传感装置,能够实时感知产品加工状态,并根据工艺要求动态调整生产参数。此外,工厂广泛应用机械电气一体化技术构建柔性生产单元,使其具备快速切换产品类型和自动调整生产节拍的能力,从而支持大规模个性化定制。整个系统通过统一的工业控制网络进行协调,保障了设备间的高效通信与联动,显著提高了生产效率与响应速度。

5 结束语

通过系统阐述机械电气一体化在智能制造中的典型应用,包括智能生产线、柔性制造系统、智能物流与仓储以及智能检测与预测性维护等环节,指出机械电气一体化技术凭借高度集成、精准控制和实时反馈机制,显著提升了制造过程的智能化水平。然而,系统集成复杂性、设备维护管理难度以及数据安全隐患等问题依然存在。为解决这些问题,建议构建标准化模块接口、推广智能预测维护体系、优化柔性制造架构及实施多层次网络安全防护策略。未来,随着人工智能、工业互联网及数字孪生等技术的不断进步,机械电气一体化在智能制造领域的应用将更加深入。

参考文献:

- [1] 蒋太强,王晓文,孙振明,等.机械电气一体化设备安装技术要点研究[J].造纸装备及材料,2023,52(05):70-72.
- [2] 何慧锋.纸箱包装机械电气设计在智能制造中的创新应用[J].现代制造技术与装备,2024,60(08):222-224.
- [3] 姜东全,陈秀.智能制造技术在农机设计优化中的应用研究[J].南方农机,2024,55(17):39-41.
- [4] 丁漪.机电一体化技术在汽车智能制造中的应用[J].汽车测试报告,2025(02):34-36.
- [5] 凌洪青.智能制造背景下机电一体化技术的发展探索[J].造纸装备及材料,2025,54(01):66-68.