

# 工业电气自动化中智能控制的应用研究

李俊 宋兆文

特变电工沈阳变压器集团有限公司 辽宁 沈阳 116600

**摘要:** 工业电气自动化领域正经历由智能控制技术驱动的深刻变革,传统控制方法因依赖精确数学模型,在应对非线性、时变及强耦合的复杂工业场景时面临适应性瓶颈。智能控制通过融合机器学习、大数据分析 with 多模态感知技术,突破了这一局限,实现了对动态环境的实时感知与自主决策。本文系统梳理了智能控制在柔性生产线调度、能源管理优化、机器人协同控制及过程工业调控等关键场景的应用机制,旨在揭示智能控制如何通过技术创新重构工业生产模式,并为行业数字化转型提供理论参考与实践指引。

**关键词:** 工业; 电气自动化; 智能控制; 应用

## 引言

工业电气自动化是现代制造业的基石,其发展水平直接决定生产效率与资源利用效能。然而,随着工业场景复杂度提升,非线性动态、多变量耦合及不确定性干扰成为普遍挑战,传统方法在应对参数漂移、工况突变时暴露出适应性不足的问题。与此同时,工业互联网、物联网与人工智能技术的融合催生了智能控制新范式,其通过数据驱动决策、多模态感知融合与自主优化能力,为复杂工业系统提供了更灵活的解决方案。

### 1 智能控制的定义与核心特征

智能控制是工业电气自动化领域中一种基于多学科交叉融合的新型控制范式,其本质是通过集成人工智能、大数据分析、物联网感知及边缘计算等技术,构建具备环境适应性与自主进化能力的控制系统。区别于传统控制依赖固定数学模型和预设规则的局限性,智能控制以数据为驱动,通过机器学习算法从海量工业运行数据中提取特征规律,形成动态决策模型。这种系统不再局限于单一维度的参数调节,而是能够综合设备状态、工艺流程、能源消耗及外部环境等多源异构信息,实现全局优化控制<sup>[1]</sup>。其核心特征体现在三个层面,首先在认知层面具备环境感知能力,通过部署于生产现场的各类传感器网络,实时采集温度、压力、振动、电流等物理信号,结合视觉识别、语音交互等多元感知手段,构建覆盖设备、产线乃至车间的数字感知体系,为决策提供全面数据支撑。其次在决策层面实现自主进化,基于深度学习框架构建的神经网络模型能够持续吸收新数据并优化控制策略,通过强化学习机制在试错中积累经验,逐步形成针对特定生产场景的最优控制路径,这种学习能力使系统能够应对工艺参数漂移、设备老化等动态变化,保持控制精度与稳定性。最后在执行层面强调动态

优化,系统可根据实时感知数据与生产目标间的偏差,自动调整控制参数或切换运行模式。在质量管控场景中通过在线检测数据动态修正加工参数;在能源管理场景中结合电价波动与生产负荷优化设备启停策略;在柔性制造场景中根据订单变化重构产线布局与物流路径,这种闭环优化机制使生产系统始终运行于效率、成本与质量的平衡点。

### 2 智能控制在工业电气自动化中的核心应用场景

#### 2.1 智能制造系统

智能制造系统作为工业电气自动化与智能控制深度融合的典型场景,正通过多技术协同重构传统生产模式。(1)在柔性生产线控制领域,强化学习算法通过构建“状态-动作-奖励”的闭环机制,使生产系统具备动态适应能力。系统将订单需求、设备状态、物料库存等要素编码为环境状态,通过深度神经网络拟合不同动作的价值函数,在持续交互中学习最优任务分配策略<sup>[2]</sup>。这种机制突破了传统调度系统对固定规则的依赖,能够根据产线实时负荷自动调整工单优先级,在紧急插单或设备故障时快速重构生产序列。(2)路径规划模块则结合图神经网络与多智能体强化学习,在考虑工件尺寸、搬运距离、设备冲突等因素下,为AGV或机械臂生成时间最优且无碰撞的运动轨迹,实现多品种小批量生产的高效切换。(3)质量检测自动化环节通过计算机视觉与深度学习的融合突破人工检测的效率瓶颈。卷积神经网络对产品表面图像进行多尺度特征提取,结合迁移学习技术快速适配新产品的缺陷模式,在芯片封装、金属加工等场景实现微米级缺陷的亚秒级识别。系统通过在线学习机制持续更新检测模型,有效应对工艺变更导致的缺陷形态变化,同时利用生成对抗网络扩充缺陷样本库,解决实际生产中正负样本不均衡的问题。(4)预测性维护

作为设备管理模式的革新,依托高精度传感器网络与边缘计算架构实现故障的提前干预。振动、温度、电流等多模态数据经特征工程处理后输入时序预测模型,长短期记忆网络通过捕捉数据长期依赖关系识别设备退化趋势,图注意力网络则分析多设备间的耦合关系预测级联故障风险。

## 2.2 智能能源管理

一方面,在微电网优化层面,AI算法为分布式能源的动态调度提供了核心决策支持,光伏阵列与风力发电机组的输出功率受天气条件影响呈现强波动性,传统调度策略难以应对这种不确定性,而基于深度强化学习的优化框架能够实时解析气象预测数据、负荷需求曲线及储能系统状态<sup>[3]</sup>。通过构建多时间尺度的优化模型,在分钟级至小时级时间窗口内动态调整发电单元出力与储能充放电策略,该算法通过持续探索不同调度方案下的经济性指标,逐步形成兼顾可再生能源消纳率与供电可靠性的最优控制策略,同时结合联邦学习技术实现跨区域微电网的协同优化,在保障本地能源自给率的前提下参与电网需求响应,提升整体能源系统的弹性与韧性。另一方面,能耗优化环节则依托数字孪生技术构建工厂能源系统的虚拟映射,通过集成设备级传感器数据、工艺流程参数及环境变量。在数字空间中实时复现物理系统的能源流动过程,该模型不仅能够精确量化各生产环节的能耗占比,还可通过仿真实验评估不同节能措施的潜在效益,基于历史数据训练的能耗预测模块可提前识别能耗异常波动趋势,为运维人员提供预警信息。在策略生成阶段,系统结合多目标优化算法,在满足生产质量与效率约束的前提下,自动生成涵盖设备启停优化、工艺参数调整及余热回收利用的综合节能方案,通过与生产执行系统的深度集成,实现能耗优化策略的闭环执行。

## 2.3 机器人与AGV控制

机器人与AGV控制作为工业智能化的关键载体,正通过多模态感知与智能决策技术的融合实现作业能力质的飞跃。(1)协作机器人凭借力控与视觉引导的深度集成,突破了传统工业机器人刚性作业的局限。其核心在于多传感器融合的力觉反馈系统与高精度视觉定位技术的协同工作,力控模块通过关节扭矩传感器实时感知接触力变化,结合阻抗控制算法动态调整运动轨迹,使机械臂在与人或环境交互时能够自动适应外力干扰,这种柔性控制能力使其能够安全完成精密装配、打磨抛光等需要力反馈的复杂任务。(2)视觉引导系统则通过双目摄像头或结构光传感器获取三维场景信息,利用深度学习算法实现工件位姿的实时识别与定位,即使面对形

状不规则或表面反光的物体,也能通过迁移学习快速适配新工件特征。力觉与视觉信息的时空同步校准技术确保了多模态数据在决策层的精准融合,使协作机器人在狭小空间或动态环境中的作业精度达到亚毫米级,同时通过共享工作空间与人类操作员形成高效的人机协作模式,大幅提升生产线的灵活性与响应速度。(3)自主导航AGV的控制架构则围绕SLAM技术与深度强化学习的深度融合展开<sup>[4]</sup>。激光雷达与视觉传感器的数据经多传感器融合算法处理后,构建出高精度的环境地图,该地图不仅包含静态障碍物信息,还通过语义分割技术识别可通行区域与危险区域,为路径规划提供语义级环境理解。深度强化学习模块以环境地图与实时定位信息为输入,通过构建包含状态空间、动作空间与奖励函数的价值网络,在持续探索中学习最优导航策略,其训练过程模拟了AGV在复杂场景中的避障、绕行、超车等行为,使系统能够根据动态障碍物的运动趋势预测碰撞风险,并自主选择代价最小的规避路径。

## 2.4 过程工业自动化

过程工业自动化通过智能控制技术的深度渗透,正在推动化工、冶金等流程型行业向高效化、绿色化方向转型。其中,在化工生产优化领域,模糊控制与神经网络的融合为复杂流程调控提供了创新解决方案。化工过程具有强非线性、多变量耦合及时变特性,传统PID控制难以应对原料成分波动、反应热积累等动态干扰,模糊控制通过将专家经验转化为语言变量规则,在缺乏精确数学模型时仍能实现粗放式调控,而神经网络凭借其强大的非线性拟合能力,可从历史数据中挖掘变量间的隐含关系,二者结合形成的混合智能控制器,既利用模糊逻辑处理不确定性信息,又通过神经网络实现参数的自适应优化。在反应器温度控制场景中,该系统能够根据进料流量、催化剂活性等参数的实时变化,动态调整加热功率与冷却水流量,在确保反应转化率的同时将能耗降低,同时结合在线分析仪器的数据反馈,系统可对控制规则进行持续修正,形成数据驱动与知识引导的闭环优化机制,显著提升复杂化工流程的稳定性与经济性。另外,冶金行业智能炼钢则依托大数据技术实现工艺参数的动态精准调整,炼钢过程涉及温度、成分、吹炼强度等多维度参数的协同控制。传统控制依赖固定工艺卡片与人工经验,难以应对铁水成分波动、设备状态变化等不确定性因素,基于大数据的智能控制系统通过构建涵盖历史生产数据、设备运行日志、质量检测记录的多源异构数据库,利用数据挖掘技术提取影响炼钢质量的关键特征,结合机器学习算法建立工艺参数与质量指标

间的非线性映射模型。在转炉吹炼环节,系统根据铁水硅含量、温度等初始条件,动态计算最佳供氧量与造渣剂加入时机,通过实时监测炉口火焰特征与烟气成分,利用深度学习模型预测终点碳含量与温度,并提前调整吹炼参数以减少过氧化或回磷现象,部分先进系统还引入数字孪生技术。

### 3 智能控制与传统控制的对比优势

智能控制相较于传统控制,在适应性、效率精度、故障容错及资源利用等核心维度展现出显著优势。(1)其适应性提升源于突破了对精确数学模型的依赖,传统控制基于线性系统理论设计,需通过微分方程或传递函数精确描述被控对象动态特性,而实际工业场景中普遍存在非线性、时变及强耦合特性,如化工反应中的温度压力耦合、冶金流程的成分波动<sup>[5]</sup>。智能控制通过数据驱动模式,利用神经网络、模糊逻辑等工具直接从历史数据中挖掘输入输出映射关系,无需建立复杂数学模型即可实现有效控制,这种特性使其能够应对参数漂移、设备老化等动态变化,在复杂工业环境中保持控制性能稳定。(2)效率与精度优化则体现在实时决策能力上,传统控制采用周期性采样与固定参数调节,难以应对突发干扰或工况突变。智能控制依托高带宽传感器网络与边缘计算架构,实现毫秒级数据采集与处理,结合强化学习算法在线优化控制策略,在机械加工场景中可根据材料硬度变化实时调整切削参数,在电力调度中可动态平衡可再生能源波动与负荷需求,这种实时性不仅缩短了系统响应时间,更通过持续优化控制轨迹提升了加工精度与能源利用效率,同时减少了对人工经验判断的依赖,降低了操作失误风险。(3)故障容错能力是智能控制的核心优势之一,其自诊断机制通过多传感器数据融合与异常检测算法,能够实时监测设备状态参数,利用时序分析或模式识别技术提前识别潜在故障,结合知识图谱定位故障根源。自修复机制则基于数字孪生技术构建虚拟修复模型,在数字空间中模拟不同维护策略的效

果,自动生成最优修复方案,部分系统还具备容错控制能力,在局部故障发生时通过重构控制律或切换备用通道维持系统基本功能,显著提升了生产连续性。(4)资源利用率最大化通过动态平衡生产负荷与能源消耗实现,智能控制结合生产计划与设备状态数据,利用优化算法在满足交货期约束的前提下,合理分配生产任务以避免设备过载或闲置。在能源管理场景中,通过解析能耗数据与生产效率的关联关系,自动调整工艺参数以降低单位产值能耗,这种全局优化能力使资源分配从静态规划转向动态调整,在提升设备综合效率的同时降低了运营成本,为工业企业的可持续发展提供了技术支撑。

### 结语

综上所述,智能控制技术的深入应用标志着工业电气自动化进入数据驱动与自主决策的新阶段。从柔性产线的动态调度到能源系统的智能优化,从人机协作的精准控制到过程工业的绿色转型,智能控制通过突破传统控制的理论边界,显著提升了工业系统的鲁棒性、效率与可持续性。未来,随着数字孪生、边缘计算与通用人工智能技术的进一步融合,智能控制将实现从单点优化到全局协同的跨越,构建覆盖设计、生产、维护全生命周期的智能生态。

### 参考文献

- [1]宋超.智能控制在工业电气自动化中的应用[J].今日自动化,2024,(3):10-12.
- [2]韦统革,赵明华,李明.浅析智能控制在工业电气自动化中的作用[J].数字通信世界,2023,(12):129-131.
- [3]史志宏.基于人工智能技术的电气自动化智能监控与数据研究[J].电气技术与经济,2024,(11):66-68.
- [4]李书奎.PLC技术在电气工程及自动化控制中的应用[J].电子产品世界,2024,31(11):58-60+64.
- [5]杨淇,郑建梓,彭昊杰.电气自动化技术的应用与趋势展望[J].电子技术,2024,53(10):72-74.