

基于智能控制工程在机械电子工程中的应用探讨

张子豪

(湖北第二师范学院, 湖北 武汉 430205)

摘要 机械电子工程是融合机械、电子、控制、计算机与传感技术的交叉学科,是现代装备制造业与工业自动化的核心支撑。智能控制工程以人工智能、自适应算法、模糊逻辑、神经网络与深度学习为技术内核,能够在非线性、强扰动、时变参数与复杂约束场景下实现传统 PID 控制难以完成的高精度、高鲁棒性与自主决策控制。本文围绕智能控制工程与机械电子工程的技术融合机理,系统阐述智能控制的技术特征,并分析基于智能控制工程在机械电子工程中的应用,旨在为相关工作人员提供参考。

关键词 智能控制工程; 机械电子工程; 自适应控制; 神经网络; 数字孪生

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.009

0 引言

机械电子工程(Mechatronics Engineering)以“机—电—控—算”一体化为核心,面向高端制造、航空航天、新能源装备、智能物流与服务机器人等关键领域,承担着装备设计、系统集成、运动控制与运维保障的重要任务。随着工业 4.0 与智能制造的深入推进,传统机电系统在复杂工况、高精度任务与动态环境中的适应性不足、响应滞后、容错性弱等问题日益突出,依赖精确数学模型的经典控制理论已难以满足现代工程需求。智能控制工程突破模型依赖局限,以数据驱动、自主学习、在线优化与分布式协同为特征,为机械电子工程提供了全新的技术范式。将智能控制嵌入机电系统的感知、决策、执行与运维全流程,可显著提升系统的动态性能、抗干扰能力与自主化水平,推动机电装备从自动化向智能化、柔性化、网络化升级。

1 智能控制工程与机械电子工程的融合基础

智能控制工程是现代自动控制理论与人工智能技术深度交叉融合形成的高级控制技术体系,其核心价值在于突破传统控制方法对精确数学模型的过度依赖,面向非线性、强耦合、时变参数以及复杂扰动环境,实现系统的自主决策、自适应调节与优化运行^[1]。与依赖固定参数与线性模型的经典控制不同,智能控制以模糊逻辑、神经网络、专家系统、模型预测控制以及强化学习等技术为核心支撑,能够通过数据驱动与

在线学习不断优化控制策略,在动态工况下保持稳定可靠的运行效果。这种技术特性恰好与机械电子工程不断升级的发展需求高度契合,也为二者深度融合奠定了坚实的理论与技术基础。

机械电子工程是集机械结构、电子电路、控制技术、计算机技术与传感检测技术为一体的综合性交叉学科,是高端装备、智能制造、机器人及自动化产线的核心技术载体。随着工业制造向高速化、精密化、集成化与柔性化方向发展,传统机电控制系统在面对复杂作业任务、多变工况干扰以及微米、亚微米级精度要求时,逐渐暴露出响应滞后、抗干扰能力弱、容错性不足以及难以自主调节等局限。现代机电系统不仅需要完成指定动作,更要在温度漂移、机械磨损、负载波动以及外部振动等不确定因素下,持续保持高精度、高稳定性与高可靠性,这就对控制系统的智能化水平提出了更为迫切的现实需求。

智能控制工程与机械电子工程的深度融合并非简单的技术叠加,而是从感知、决策、执行到运维全流程的系统性重构,在实际工程体系中,多模态传感器通过采集设备状态、环境参数与运行信息为智能控制提供实时数据输入。智能控制算法依托边缘计算或嵌入式芯片完成在线辨识、故障诊断与控制指令生成,高性能伺服、液压或气动执行机构通过精准执行控制指令实现动作优化。同时,通过数字孪生与工业互联网技术实现远程监控、迭代优化与全生命周期管理,这

作者简介: 张子豪(2004-),男,本科,研究方向:机械电子工程。

种闭环式融合路径,通过有效提升机电装备的加工精度、运行效率与作业一致性,降低能耗与故障率,减少人工干预,推动传统自动化机电系统向自主化、智能化、柔性化的现代机电系统升级,为智能制造与高端装备发展提供核心动力^[2]。

2 智能控制在机械电子工程中的关键技术支撑

2.1 基于神经网络的高精度运动控制技术

凭借独特非线性映射与自学习核心能力成为解决机械电子系统控制难题关键技术之一的神经网络,针对机电系统运行过程中摩擦损耗、机械间隙、惯量波动等影响系统控制精度与动态响应性能且传统控制方法难以精准补偿的不确定性因素。通过实时采集系统运行数据自主学习其变化规律以实现在线动态补偿,有效提升机电系统的轨迹跟踪精度与动态响应速度;在多轴联动加工、高速切削、精密定位等对控制精度要求极高的场景中,将RBF神经网络、BP神经网络与PID控制复合应用,通过充分发挥各类算法优势,实现将系统定位误差精准压缩至微米级、显著提升响应带宽、大幅降低超调量,确保机电设备在高精度作业场景中保持稳定可靠运行状态以满足现代机械电子工程精密控制需求。

2.2 模糊自适应与鲁棒控制技术

模糊控制所具备的无需依赖精确数学模型这一特性,使其能够借助模糊规则推理的方式来达成动态调节的效果,这种特性特别适合应用于具有时变特性、存在滞后现象以及受到强扰动的系统之中。而当把模糊算法与自适应控制以及滑模控制进行有机结合之后,便可以有效地对负载的突变情况、外部产生的振动影响以及参数出现的漂移现象起到抑制作用,进而能够确保机电系统在较为恶劣的工况条件下依然可以保持稳定运行的状态。另外,在数控机床领域以及机器人柔顺控制方面,模糊自适应控制的应用能够显著提升系统的抗干扰能力,同时也有助于提高作业的一致性水平。

2.3 数字孪生与模型预测控制(MPC)协同技术

数字孪生通过构建物理装备与虚拟模型的实时映射实现状态可视化、仿真预演与远程调试,模型预测控制基于滚动优化与反馈校正对多变量、强耦合系统进行全局最优控制。二者结合在实现加工过程仿真、误差预补偿、能耗优化与故障溯源的同时也在航空发动机、新能源汽车电驱动系统等复杂机电装备中获得广泛应用。

2.4 边缘智能与分布式协同控制技术

边缘计算通过在现场控制器部署智能算法以降低云端延迟、满足实时控制需求,分布式协同控制借助

工业以太网与高速总线实现多设备、多轴、多机器人协同动作以支持柔性产线、集群作业与全域调度。边缘智能与分布式控制共同以提升机电系统的实时性、可靠性与扩展性的方式支撑智能制造车间级与工厂级智能化运行^[3]。

3 智能控制工程在机械电子工程中的典型应用

3.1 精密加工装备:智能误差补偿与动态最优控制

精密数控装备是机械电子工程的核心载体,也是高端制造领域中实现高精度加工的关键支撑,其加工精度直接决定产品核心性能和质量等级。在实际加工过程中,它的加工精度很容易受到多种因素的影响,其中温度变化造成地主轴和横梁等关键部件热变形,切削力波动引发地刀具振动,还有长期作业带来的刀具磨损以及设备自身几何偏差,都会明显地影响加工精度,而且传统控制方法很难实现全面又实时的误差补偿^[4]。但是,智能控制技术的投入使用,借助多传感器融合感知技术实时采集温度、切削力、振动等多维度运行数据,再结合神经网络在线建模能力,可以很准确地捕捉各类误差产生规律,实现热误差、几何误差与动态误差的实时补偿,很好地突破传统控制技术的精度瓶颈。在五轴联动加工中心实际应用当中,LSTM神经网络凭借很强的时序预测能力对主轴温升、横梁变形还有刀具磨损情况进行准确预判,再结合模型预测控制技术实时动态地调整进给量、主轴转速以及刀具姿态,保证装备在长时间连续作业过程里一直保持稳定的加工精度。同时,针对复杂曲面这类高难度加工任务,基于强化学习的轨迹优化算法可以自主地平滑加工路径,减少空行程和加工冲击,不仅可改善工件表面粗糙度,还能有效地提升加工效率。另外,智能控制还可以按照加工材质、刀具类型等参数实现切削参数的自寻优,在保障加工质量的前提下有效地降低设备能耗和刀具损耗,延长精密加工装备的使用寿命,提升整体加工的经济性和稳定性。

3.2 智能机器人系统:自主感知决策与柔顺协同控制

机械电子工程朝着智能化方向不断地推进,主要地体现在工业机器人服务机器人以及特种机器人这几大类上,这些设备的作业表现能够直接地反映出机电系统整体的智能化水平,传统机器人大多采用示教再现这类工作方式,所以作业时灵活程度较低,对现场环境地适应能力也不够好,很难满足复杂场景下的工作要求,但是将智能控制技术深度地融入机器人系统后,可以为机器人赋予环境感知自主定位动态避障柔

顺操作以及多机协同这些核心能力,从根本上打破传统示教再现模式带来的限制,让机器人可以灵活地应对更多样更复杂的工作场景^[5]。在工业生产环节当中,焊接装配分拣等对操作精度和灵活度要求很高的场景里,借助机器视觉和力觉传感器的融合使用,再搭配模糊控制以及神经网络相关算法,机器人可以实时地识别工件位置和姿态上存在的偏差,并且自主地自适应调整运动路线和接触时的力度,既可以完成高精度地装配工作,又能够实现无损伤地抓取夹持,很好地避免工件出现损伤,同时提高整体地作业质量。在仓储物流和无人搬运这类场景中,针对要应对环境实时变化的智能机器人,采用深度强化学习的 AGV 路径规划技术可以很快地响应环境改变,就算现场存在动态障碍物也能自主地规划出最合理的搬运路线,显著提高整体作业效率。

3.3 高端机电装备:健康诊断与预测性智能维护

高端机电装备作为广泛应用于新能源、工程机械、航空航天、石油化工等关键领域且因结构复杂、集成度高而多运行在高温、高压、强振动、强电磁等恶劣工况下的设备,其运行可靠性直接关系到生产安全与经济效益。传统定期维护模式因存在易出现过度维修以增加维护成本、难以发现潜在故障隐患而导致故障漏检并引发非计划停机造成巨大经济损失等明显局限性,被智能控制技术与大数据、深度学习技术相结合构建的完整状态监测、故障诊断、寿命预测、主动维护闭环系统改变。该系统通过部署在装备关键部位的传感器实时采集振动、温度、电流、压力等多源时序运行数据,采用 CNN-LSTM 混合模型深度分析处理数据,能在故障早期精准识别轴承磨损、齿轮点蚀、电机匝间短路等典型故障以争取充足故障排查处理时间。同时,依托边缘计算技术实时评估装备健康状态、精准预测设备剩余使用寿命并自动生成科学合理的维护策略与备件建议,达到有效减少非计划停机次数、降低维护成本的效果,尤其在风电、光伏与储能等新能源机电系统中,这种预测性智能维护模式可显著提升设备可用率、保障能源输出稳定性,助力绿色制造与低碳运行目标的实现。

3.4 工业机电系统:分布式协同与全域能效优化

随着智能制造的深入推进,由多台机电设备、物流装置与检测单元组成并呈现多变量、强耦合、大滞后显著特征的现代工业生产线复杂系统,因不再是单一机电设备的独立作业而使传统单机控制模式难以满足整线高效运行需求。智能控制技术则通过构建基于工业

物联网与边缘智能技术、采用 EtherCAT 与 Profinet 等高速工业总线实现设备间毫秒级数据交互的车间级分布式协同控制系统,突破单机控制局限以实现多设备多单元协同联动与全域能效优化,为智能制造与绿色生产提供有力支撑。该系统还通过多智能体强化学习算法对生产节拍、物料流转与能源消耗进行全局协同优化,实现生产资源合理配置以避免生产瓶颈与资源浪费,在汽车零部件、3C 电子与锂电等规模化生产场景中有效提升整线生产协调性、优化生产流程并提升产品合格率。同时,智能控制技术针对泵、风机、压缩机等高耗能通用机电设备,通过负载感知实现自适应变频控制与运行模式智能切换,在严格满足生产工艺要求前提下合理调节设备运行参数,有效降低设备电耗,实现工业机电系统高效、稳定、低碳运行,既能提升生产效益,又践行绿色发展理念。

4 结束语

智能控制工程为机械电子工程应对复杂工况、高精度需求与智能化升级提供了核心技术支撑,是推动装备制造制造业向高端化、智能化、绿色化转型的关键力量。从精密加工的微米级控制,到机器人的自主决策,再到高端装备的预测性维护与工业系统的全域协同,智能控制已深度融入机械电子工程的全场景与全生命周期。未来,随着轻量化 AI、数字孪生、边缘计算与工业互联网的持续突破,智能控制将进一步解放机电系统的性能潜力,降低工程应用门槛,推动机械电子工程从自动化单体装备向自主化、网络化、集群化、服务化智能系统发展。面向智能制造与工业强国建设需求,持续深化智能控制与机械电子工程的交叉融合,开展关键技术攻关与工程化验证,对提升我国高端装备核心竞争力、促进产业升级具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 倪绍凯. 智能控制技术在机械电子工程中的集成应用与效能评估[J]. 电子元器件与信息技术,2025,09(08):240-242.
- [2] 徐小娟. 智能控制工程在机械电子工程中的运用探讨[J]. 中国设备工程,2024(14):33-35.
- [3] 周建鹏. 基于智能控制工程在机械电子工程中的应用探讨[J]. 中国设备工程,2024(09):40-42.
- [4] 陈建军. 智能控制工程在机械电子工程中的运用分析[J]. 仪器仪表用户,2024,31(04):23-25,28.
- [5] 赵玉斌. 智能控制工程在机械电子工程中的应用[J]. 电子元器件与信息技术,2021,05(08):87-88.