

智能化技术在机械工程自动化中的应用研究

冯程程

大庆惠博普石油机械设备制造有限公司, 黑龙江 大庆 163000

[摘要]智能化技术正在改变机械工程自动化的发展方式和技术形态。对智能感知、自动控制、信息处理等关键技术进行系统分析,在机械设计、加工制造、设备维护、生产过程控制中给出具体的使用情况。从研究结果可知,智能CAD系统和知识工程的加入使得设计效率大大提高,用深度强化学习的多传感器融合方法来完成轴孔间隙小于0.1mm的刚性装配任务时效果最好,数字孪生以及人工智能驱动的动态优化方法可以将数控机床主轴系统的轮廓误差降低27.6%。就目前的应用中体系不健全、集成度不高、数据管理差、人才缺乏等状况而言,给出完善技术应用体系、加强设备与信息系统融合、改善数据管理水准、加强人才培育等改良途径,从而给机械工程的智能化转型升级赋予参照。

[关键词]智能化技术; 机械工程; 自动化

DOI: 10.33142/sca.v9i9.20362

中图分类号: TP271

文献标识码: A

Research on the Application of Intelligent Technology in Mechanical Engineering Automation

FENG Chengcheng

Daqing Huibopu Petroleum Machinery Equipment Manufacturing Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163000, China

Abstract: Intelligent technology is changing the development mode and technological form of mechanical engineering automation. Systematically analyze key technologies such as intelligent perception, automatic control, and information processing, and provide specific usage scenarios in mechanical design, manufacturing, equipment maintenance, and production process control. From the research results, it can be seen that the addition of intelligent CAD systems and knowledge engineering greatly improves design efficiency. The best performance is achieved when using deep reinforcement learning multi-sensor fusion methods to complete rigid assembly tasks with shaft hole clearances less than 0.1 millimeters. Digital twins and AI driven dynamic optimization methods can reduce the contour error of CNC machine tool spindle systems by 27.6%. In terms of the current situation of incomplete system, low integration, poor data management, and lack of talent in applications, this paper proposes improvement methods such as improving the technology application system, strengthening the integration of equipment and information systems, improving data management level, and enhancing talent cultivation, in order to provide reference for the intelligent transformation and upgrading of mechanical engineering.

Keywords: intelligent technology; mechanical engineering; automation

引言

机械工程是国民经济的支柱产业,它的自动化水平直接体现的是国家的工业化程度。伴随着工业4.0以及智能制造战略的不断推进,传统的自动化系统依靠固定的程序和预先设定的逻辑已经不能满足复杂的工况和个性化的生产要求。以人工智能、物联网、数字孪生为代表的人工智能技术,用赋予机械设备感知、学习和自主决策的能力来冲破这些瓶颈。机械工程全生命周期里怎样有效地把智能化技术融合进去,已经成为学术界和产业界共同研究的问题。系统整理出智能化技术在机械工程自动化中应用现状及改进方向,对于推进产业转型升级有着十分重要的理

论价值和现实意义。

1 机械工程自动化与智能化技术概述

机械工程自动化就是利用控制装置、计算机系统和执行机构,使机械设备运行和产品制造过程在很少的人工干涉下按照一定的规则自动完成的一种技术体系。其发展过程就是从继电器控制、数字控制到可编程逻辑控制器和分布式控制系统的发展过程,自动化程度不断提高。智能化技术就是把人工智能、机器学习、物联网、大数据分析这些前沿技术综合起来形成的技术体系。智能化技术相比于传统的自动化技术来说,更加重视系统对于环境的变化能够自行感知,对于复杂的工况可以进行动态分析,并且对

于最佳的决策有着智能的推理过程,最后通过控制策略的自适应来实现优化的目的。二者的相互关系可以这样理解,自动化给系统提供执行层面的“骨架和肌肉”,智能化给系统赋予决策层面的“大脑和神经”。伴随着深度学习、强化学习等算法在机械工程领域中的应用,自动化系统由原来的程序控制向数据控制转变,由原来的刚性执行向柔性适应转变。

2 智能化技术在机械工程自动化中的应用基础

2.1 智能感知与数据采集技术

智能感知属于机械工程智能化的基础条件。传统的轴孔装配方式只依靠光学或者力、力矩传感器,精度不高或者对准效率低。多传感器融合技术就是将视觉、力觉、温度、振动等各种传感器结合起来,从而对设备的状态和加工过程进行全方位的感知。中国科学院团队提出的基于深度强化学习的多传感器融合方法,把二维相机和力/力矩传感器的数据结合起来,模仿人类的手眼协调机制,在轴孔间隙小于 0.1mm 的刚性装配任务上表现很好,成功率和安全性都很高。另外,基于 Transformer 的跨任务交互基元分割模型可以从点云数据里准确地分割出平面、球体、圆柱等几何基元,给复杂环境下目标识别和定位提供可靠的技术支持。在工业现场部署上,以边缘智能为支撑的分布式感知架构把数据采集、特征提取以及异常检测下沉到离设备最近的边缘节点,很好地解决了由于海量传感数据上传云端而造成的带宽压力和延迟问题,使关键状态参数的响应速度达到了毫秒级,给之后的实时控制和动态决策提供高质量的数据基础。

2.2 自动控制与信息处理技术

自动控制技术就是把感知和执行联系起来的纽带。非线性模型预测控制被用来做重载机械臂高精度的轨迹规划工作,利用数字孪生系统进行可视化的监测以及自主的决策。智能控制工艺上,由于铸造件形貌复杂、特征随机、工序多等特点,多模式控制策略可以达到自适应工艺参数调节和柔性化工艺规划的目的,使机器人具有感知、决策、执行的闭环能力^[1]。信息处理技术对采集到的海量数据进行清洗、融合、分析,深度学习算法在设备故障预测、加工质量评价等地方有很强的能力。人工智能算法控制的机械自动化控制系统,对复杂的工况有较好的节能效果和较好的轨迹跟随精度。

3 智能化技术在机械工程自动化中的具体应用

3.1 智能化技术在机械设计中的应用

智能化技术正在对机械设计的流程和方式产生改变。用智能 CAD 系统、知识工程、人工智能技术来提高机械

设计的设计效率和设计准确性。智能 CAD 系统把设计规则和工程约束嵌入其中,可以自行对零部件进行选择、尺寸优化以及装配干涉检查。知识工程的方法把领域专家的设计经验变成知识库,帮助设计人员做方案的决策。在并联机器人创新设计上,代数字化构型综合理论被用来发明出有实际应用价值的并联加工机构,从而形成尺度、结构、性能三者一体化的设计方法。拓扑优化和生成式设计技术的加入,使得设计人员可以在一定的约束下自动寻找出最优的结构方案,大大缩短了产品的开发时间。数字孪生技术借助于虚拟空间来创建产品的高保真模型,从而达成设计方案快速验证以及改进的效果^[2]。在参数化设计和多目标优化方面,利用有限元分析结果和遗传算法等智能优化算法嵌套迭代的方法,可以实现质量、刚度、成本等各方面的结构尺寸协同优化。基于代理模型的近似优化方法可以有效地降低高成本仿真评估的次数,在保证计算精度的基础上,使复杂机械结构的设计空间探索效率提高几倍,给大型装备轻量化设计提供了一条可靠的途径。

3.2 智能化技术在机械加工中的应用

智能加工属于智能化技术应用最直接的领域。机械制造领域智能化加工、组装、质量检测技术可以大大提高生产效率和产品质量。在数控加工环节,数字孪生和人工智能驱动的动态优化方法,用物理层、数据层、模型层、功能层、应用层构成的五维数字孪生体系,借助深度强化学习机制在虚拟孪生环境里培育智能体,让数控机床主轴系统轮廓误差降低 27.6%,能耗减少 7.9%。并联磨切加工机器人把串联机器人的灵活性同机床高刚度的优点结合起来,解决了铸造件高效、高品质、多尺度复杂加工的技术难题,在潍柴动力、中国兵器等 30 多家头部企业中部署了超过 500 台套。柔性生产环境下,用感知、传输、控制、决策四个层次的机电设备技术模型,通过各种传感器融合以及多目标优化算法来达到单位时间内产能提升 35.2%、设备利用率提高 21.4 个百分点的目的。

表 1 智能化技术在不同加工场景中的应用效果对比

应用场景	关键技术	主要效果指标
数控加工	数字孪生+深度强化学习	轮廓误差降低 27.6%, 能耗降低 7.9%
铸件磨切	并联机器人+多模式控制	替代人工工序, 部署超 500 台套
柔性生产	四层架构+多目标优化	产能提升 35.2%, 设备利用率 89.7%
轴孔装配	多传感器融合+深度强化学习	间隙<0.1mm 刚性装配任务

3.3 智能化技术在设备运行监测中的应用

设备运行监测是保证机械系统正常运转的重要环节。

改进的 LSTM 网络用来预测设备故障,用深度强化学习做在线优化控制参数。利用振动分析、温度监测、油液检测等多种数据的融合诊断,可以达到对设备健康状况实时评价以及退化趋势预估的目的。传统的 RANSAC 方法调参耗时且对于复杂的曲面处理能力较差,但是基于深度学习的基元分割方法在处理边缘和复杂的邻接区域时效果更好。高危场景下环境感知要获取实例和语义信息来识别定位孔洞、管道、焊缝等目标,智能化感知技术大大提高了作业的安全性和可靠性。时间敏感网络技术的应用很好地解决了传统自动化生产线设备故障预测难的问题。在数据驱动预测性维护的架构中,边缘计算节点可以对振动时频特征以及温度变化率进行实时的提取,再利用轻量化的卷积神经网络来实现对设备健康状况的在线推算,从而把关键旋转机械的故障预警时间提前到 48h 以上,避免出现突发性的停机情况引发的生产中断和安全问题。

3.4 智能化技术在生产过程控制中的应用

生产过程控制包含生产计划调度、质量追溯和供应链协同等内容。智能制造技术对于推动机械制造工程的转型升级起到关键性的作用,智能传感、自动化控制、数据驱动决策等技术被用在了生产流程的优化当中。在生产排产环节,利用人工智能的智能调度算法可以对设备状态、订单优先级、物料供应等各方面进行综合考虑,从而达到生产计划的动态优化^[3]。在质量控制方面,利用机器视觉和深度学习技术对产品的表面缺陷进行自动检测、分类。在柔性化生产上,产品切换时间由原来的 30min 缩短到现在的 15min,订单变更响应延迟由原来的 45min 缩短到现在的 25min,设备无故障运行时间由原来的 30min 增加到现在的 40min,控制指令偏差由原来的 $\pm 0.05\text{mm}$ 减少到现在的 $\pm 0.02\text{mm}$ 。物联网平台把分布在各个工位上的设备、物料和人员连成信息物理系统,给生产过程的透明化管理赋予了数据根基。在质量追溯环节,依靠区块链和工业标识解析技术创建的产品全生命周期追溯系统,把加工参数、检测成果以及操作人员的信息全部绑定到一个唯一的编码上,倘若成品检测出现异常状况,就能迅速找到它所处的具体工序批次和工艺参数区间,从而给根因剖析和工艺改良赋予精确的参照。

4 机械工程自动化中智能化技术的应用优化策略

4.1 完善智能化技术应用体系

目前智能化技术在机械工程上的应用存在着碎片化的现象,没有形成系统的顶层设计。应该建立包含感知层、网络层、平台层和应用层在内的完整技术架构,确定各个层次的功能定位以及接口标准。在感知层推进多传感器融

合和边缘计算部署,网络层优化工业以太网和第五代移动通信技术协同传输,平台层建设统一数据中台和算法仓库,应用层开发面向具体场景的智能应用软件和决策工具。工业 4.0 的背景之下,要对机械制造自动化生产线的升级需求做进一步的剖析,对生产灵活性不够等痛点进行系统的改造。在体系构建过程中还要建立覆盖技术选型、系统集成、运维管理全过程的标准化指南和评估机制,确定各个层次之间数据接口协议及通信规范,保证不同厂家设备以及异构系统之间的互联互通互操作。通过试点示范项目检验体系框架的可行性和适用性,形成可以复制、推广的标准化解决方案,逐步推进智能化技术应用由局部试点走向全局部署。

4.2 加强设备与信息系统集成

设备孤岛和信息壁垒是造成智能化效能发挥不好的主要障碍。机电一体化技术在智能制造生产线上的应用要解决系统对接、人才适配、成本投入等各方面的难题。应推进设备层、控制层和管理层的纵向贯通,使现场数据可以实时反映到决策端,管理指令可以准确地下达给执行端。从横向看,要使产品生命周期管理、企业资源计划、制造执行系统等信息系统的数据可以互通、流程可以协同。对于聚变装置等复杂环境的维护要求,将视觉伺服和深度强化学习结合起来的自动化算法,结合跨域迁移、柔顺装配策略来实现毫米级间隙的自主装配。该类跨域集成的经验可以给一般的机械工程场景提供借鉴。

4.3 提升机械工程数据管理能力

数据是智能化技术发挥作用的基石。目前机械工程领域存在着数据质量好坏不一、标注标准不同、没有共享机制等问题。根据机器人自动技术的数控机床产线设计,采用机械、电子、控制、计算机、人工智能等技术相结合的方式,证明了数据驱动方案具有更高的生产效率和加工质量。应制定统一的数据采集标准和质量评价准则,创建数据清洗、标注、存储等基础架构。从数据应用角度来讲,推进工艺参数优化、设备健康管理、质量预测等数据模型的开发和检验。数据安全和隐私保护要重视起来,创建起分级分类的数据访问权限管理体系。

4.4 强化智能化人才与技术保障

人才缺乏成了机械工程智能化转型的硬伤。传统的机械工程人才知识结构重在机械设计和制造工艺,缺少对人工智能、大数据分析等新兴技术的认识;信息技术人才又缺乏对机械工程场景的深刻理解。应该推进校企协同的复合型人才培育模式,把机器学习、数据科学、工业物联网等内容加入到机械工程专业课程体系当中。从企业角度来

说,创建起内部技术培训同外部专家引进相融合的人才培育体系。天津大学机构学与机器人系统实验室在国家重点研发计划等 30 多个项目的支持下,不断拓展了机器人机构理论、高刚度磨切加工机器人、高速重载操作机器人等研究方向,产学研深度融合的模式给行业人才的培养和技术攻关提供了一个成功的范例。

5 结语

智能化技术正在从感知、控制、决策等各方面对机械工程自动化的技术体系进行重新塑造。智能 CAD、知识工程提高了机械设计的效率和创新性,在加工制造环节中数字孪生、深度强化学习使精度和能效得到双重提升,在设备运维方面多传感器融合、深度学习加强了故障预测和健康管理的能力,在生产管控上,数据驱动的智能调度提高了系统的柔性以及响应速度。经过实践证明,智能化技术和机械工程相融合已经由原来的理论研究走向了大规

模的应用。未来的研究要更多地去关注人工智能算法的工程化适配、跨场景迁移学习、人机协同决策这些新的研究领域,并且要尽力克服在技术应用过程中浮现出来的人才、标准、生态等各方面系统性难题,促使机械工程由自动化向智能化迈进全面升级。

[参考文献]

- [1]徐一凡.智能化技术在机械设计制造及其自动化中的应用研究[J].模具制造,2025,25(2):23-25.
 - [2]蔡亚运.基于机器人自动技术的数控机床产线设计研究[J].自动化应用,2025,66(8):9-11.
 - [3]张锋.多传感器数据融合的破碎机齿板磨损状态在线监测系统开发[J].现代制造技术与装备,2025,61(8):58-60.
- 作者简介:冯程程(1983—),女,满族,黑龙江省大庆市人,本科,东北石油大学过程装备与控制工程专业,研究方向/现从事工作为油田地面设备加工制造。