

智能制造背景下机电制造过程 关键技术应用研究

张 炯

(青岛乾程科技股份有限公司杭州分公司, 浙江 杭州 310012)

摘 要 在制造模式持续发展的背景下, 机电制造过程正面临生产节奏加快、系统复杂度提升以及质量稳定性要求提高等多重挑战, 传统制造方式在数据感知、过程协同与设备运维等方面逐渐显现局限, 难以支撑制造系统的持续优化与柔性运行。本文围绕机电制造全过程, 从智能化转型需求出发, 系统探讨工业互联网、数字孪生、智能机器人以及智能检测与预测维护等关键技术制造过程中的应用路径, 并结合系统集成与场景验证, 分析多技术协同对制造效率、质量控制与运行可靠性的支撑作用, 以期对机电制造领域智能化升级提供实践参考。

关键词 机电制造过程; 智能制造; 数字孪生; 预测性维护

中图分类号: TP2; TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.023

0 引言

智能制造通过深度融合先进的信息技术、制造技术、自动化技术和人工智能技术, 打破了传统制造业的界限, 实现了制造过程的智能化、柔性化和集成化。智能制造的核心在于数据的收集、分析和利用, 通过实时采集生产现场的数据, 运用高级算法进行优化决策, 使得制造过程更加精准、高效, 不仅提高了生产效率, 降低了生产成本, 还显著提升了产品质量和产品创新的速度。在智能制造日益成为工业发展核心趋势的背景下, 智能制造以数据驱动为核心重塑机电制造运行方式, 促使生产过程由经验控制向智能决策转变。这一转型为复杂制造流程的精细化管控与系统协同运行提供了基础, 也为机电制造在效率与质量层面的持续提高创造了条件。

1 机电制造过程智能化转型需求分析

1.1 机电制造流程特征与环节构成

机电制造通常以零件加工、部件装配、整机调试与出厂检测串联成主流程, 同时穿插工装夹具管理、物料配送与过程追溯等支撑环节, 加工段以数控机床为核心, 涉及刀具寿命、切削参数与几何精度的耦合控制, 过程数据既来自 CNC 系统也来自测量单元与环境传感; 装配段更强调多源不确定性, 包含定位误差、紧固力矩、间隙配合与装配顺序约束, 往往需要视觉

定位与力控策略协同; 检测段既有尺寸与形位的计量链, 也有电气性能与可靠性试验链, 数据形态从结构化量测到波形与图像并存^[1]。各环节节拍差异明显, 设备与工位呈离散分布, 导致信息流、物流与工艺流高度交织, 构成智能化改造的对象基础。

1.2 制造过程智能化升级的核心瓶颈

机电制造转型的阻力多出现在数据链与决策链断裂处。设备侧接口标准不一, CNC、PLC、机器人控制器与检测仪器常以不同协议输出数据, 采集依赖定制脚本或人工导出, 形成时序不连续与口径不统一的问题, 追溯时难以还原真实工况; 工艺侧知识沉淀不足, 关键参数窗口往往由师傅经验确定, 参数变更缺少可验证依据, 出现质量波动时只能依靠返修与抽检兜底; 管理侧计划与现场脱节, 排产更多基于静态产能假设, 未把设备状态、换型损耗与质量风险纳入同一约束, 导致局部最优与全局拥堵并存; 运维侧偏事后响应, 故障征兆未被有效利用, 停机损失与备件浪费叠加, 进而放大交付不确定性与成本压力。

1.3 全流程智能制造体系架构设计

面向上述特征与瓶颈, 体系架构宜以统一数据底座牵引跨环节协同。底层以边缘网关承接多协议接入, 完成数据采集、时间同步、信号清洗与事件化封装, 使 CNC 状态、机器人轨迹、检测结果与能耗振动等信息具备一致语义与可追溯链路; 中间层以制造执行与

作者简介: 张炯(1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电能表、设计开发、电能计量、电碳计量。

过程质量为核心,贯通工单、工艺规程、设备能力与物料批次,实现工序级数据关联与质量闭环,同时保留工艺变更的版本控制与审批轨迹;上层以模型驱动优化为抓手,将数字孪生用于节拍仿真、瓶颈识别与参数敏感性分析,把结果回写到排产与工艺窗口;运维层引入健康评估与寿命预测,将异常预警与维修策略联动备件与停线计划,形成从感知到决策再到执行反馈的连续闭环,从而支撑机电制造的柔性运行与稳定交付。

2 智能制造背景下机电制造过程关键技术及应用

2.1 互联感知下制造数据实时采集技术

在机电制造场景中,制造数据实时采集已由单点参数获取转向对加工、装配与检测全过程状态的连续感知与关联建模。数控加工环节以 CNC 系统为核心,围绕主轴转速、进给速度、切削负载、伺服电流及刀具磨损状态等关键变量进行高频采样,依托 MTConnect、OPC UA 或私有接口接入边缘计算节点,实现亚秒级甚至毫秒级时间对齐,同时引入振动与声发射传感器,对切削异常和刀具劣化进行补充感知,以弥补控制系统原生数据粒度不足;装配环节强调多模态融合,工业相机用于获取零部件位姿与装配间隙,力矩与压力传感器记录紧固和压装过程的受力曲线,位置编码器与机器人控制器输出运动轨迹信息,这些数据在边缘侧完成同步融合,用于表征装配一致性与过程稳定性;检测环节将在线测量结果、电气性能测试数据与工序和设备信息绑定,形成可追溯的质量数据链。在系统层面,凭借统一数据模型、时间戳与设备标识机制,对异构数据进行规范化封装,并在边缘侧完成异常点过滤与特征提取,为后续制造优化与智能决策提供语义一致的数据基础^[2]。

2.2 数字孪生支撑的制造过程动态优化

数字孪生在机电制造中的核心价值体现在对复杂制造过程的动态刻画与可预演能力上,其实现基础在于构建与物理系统高度一致的多层级虚拟模型,该模型一般由设备模型、工艺模型与生产组织模型共同构成,其中设备模型刻画数控机床、装配机器人及检测设备的运动学特性与性能边界,工艺模型描述切削参数、装配顺序与公差传递关系,生产组织模型则反映工位布局、节拍约束与资源占用情况^[3]。依靠工业物联网采集的实时数据,孪生模型在运行过程中不断校正关键状态参数,使虚拟空间能够同步反映物理制造过程的实际演变。在加工环节,基于历史加工数据建

立切削力与表面质量预测模型,并结合实时负载与振动反馈,对进给速度、转速及切削深度进行在线仿真与风险评估,从而在保证加工精度的前提下优化效率;在装配环节,数字孪生用于分析不同装配路径、工序组合与工位配置对整体节拍的影响,提前识别潜在瓶颈并生成重排方案。相关优化结果依托接口回传至 MES 与控制系统,用于指导参数调整与排产修正,使制造过程由静态规划转向动态自适应调控。

2.3 柔性装配场景中的智能机器人应用

在机电制造装配环节中,产品结构复杂、零部件规格差异大以及装配公差链较长,使传统固定程序的自动化装配方式难以适应多品种与频繁切换的生产需求,柔性装配场景下的智能机器人系统通常以协作机器人或多轴工业机器人为主体,依托集成视觉、力觉与运动控制模块构建感知—决策—执行一体化能力^[4]。在感知层,基于工业相机获取零部件外形、孔位及姿态信息,并借助深度学习目标检测与位姿估计模型,实现对随机来料和装配偏差的稳定识别;控制层则引入力控与阻抗控制算法,在插装、压装和精密紧固过程中根据实时力矩、位移反馈动态调整运动轨迹与装配速度,防止因刚性控制引发的卡滞或结构损伤。针对多品种装配需求,装配工艺被拆分为标准化动作单元,与参数库和装配规则库关联存储,凭借 MES 下发工单自动匹配装配路径与参数配置,实现快速换型与一致性控制,由此机器人系统与视觉、工艺数据的深度协同,使机电装配过程在保证精度与可靠性的同时,具备对复杂结构和工况变化的柔性适应能力。

2.4 智能检测与设备预测维护协同应用

在机电制造体系中,智能检测与预测性维护的协同应用逐步成为保障制造稳定性与质量一致性的关键支撑,其核心在于打通质量数据与设备状态数据之间的关联关系。检测环节一般围绕尺寸精度、形位公差、装配完整性及功能性能展开,凭借工业相机、激光测量与电气测试装置获取多源检测信息,并利用图像处理与特征学习模型对表面缺陷、装配偏差及性能异常进行在线判别,检测结果不再作为孤立结论,而是与对应工序参数、设备运行状态和批次信息进行绑定,形成可用于分析质量成因的数据基础;设备预测维护则依托振动、温度、电流及润滑状态等连续监测数据,构建反映设备健康状况的特征指标体系,依靠趋势分析与模型推断识别异常演化特征,并对关键部件的剩余寿命进行动态评估,当质量检测结果出现异常波动

时,系统可同步调取设备健康状态进行交叉分析,判断问题源于工艺参数偏移还是设备性能退化,并据此给出参数修正或维护干预建议。通过此类检测与运维的协同机制,机电制造过程由事后纠偏逐步转向基于状态感知的主动预防,为稳定生产节拍与产品质量提供了技术保障^[5]。

3 关键技术集成应用与制造案例验证

3.1 多技术融合的智能制造平台构建

面向机电制造的多环节协同,平台建设宜采用“边缘接入—数据中台—业务应用”一体化架构,将设备互联、过程建模与智能分析纳入同一技术栈^[6]。底层以边缘网关承接CNC、PLC、机器人控制器及在线检测设备的异构接入,完成协议适配、采样频率统一与时间同步,保证高频信号与工序事件能够在同一时间轴上对齐;数据层以统一设备模型与工艺语义模型为核心,将主轴负载、伺服电流、紧固曲线、尺寸测量结果等要素按工单、工序、设备与批次建立关联索引,形成可追溯的数据链;应用层将数字孪生、质量分析与运维评估作为核心服务模块,依靠API对接MES,实现工单下发、参数调用、异常告警与处置闭环。平台运行时,数据并非简单汇聚,而是以特征化、事件化方式沉淀,使切削异常、装配偏差与设备劣化具备可计算、可定位的表达,从而为后续场景验证与效果评估提供统一的技术底座。

3.2 典型机电制造场景应用流程分析

以某机电减速器制造为例,场景覆盖齿轮轴加工、箱体装配与整机测试三个关键段,用于检验关键技术制造过程中的协同运行效果,加工段在CNC侧接入负载、电流与振动信号,边缘节点对切削过程进行窗口化特征提取,识别负载突增与振动谱异常,并将事件回传至孪生模型进行工况校核,当孪生预测显示刀具磨损风险上升时,系统在不改变工艺路线的前提下调整进给与换刀策略,避免精度漂移。装配段依托视觉定位获取轴承与齿轮位姿,力矩传感记录紧固曲线并与工艺参数库对照,若出现扭矩爬升异常或装配偏差超限,系统触发返工或工位复核,同时同步检查机器人末端工具状态与夹具磨损信息。检测与运维段将尺寸测量、噪声振动测试结果与设备健康指标关联,当质量波动与设备劣化同步出现时,优先定位为设备侧退化并安排计划性维护,若设备健康正常则回溯工艺参数与来料批次,实现从异常触发到处置反馈的闭环验证。

3.3 应用效果评估与过程优化对比

为评估集成应用的实际收益,对同一条减速器装配线在改造前后各运行4周的数据进行对比,指标涵盖质量、节拍与设备可用性三类。质量层面,在线视觉与紧固曲线判别投入后,装配一次合格率由92.4%提升至97.1%,关键紧固点扭矩超限事件占比由3.6%降至1.2%,返工工时占比由7.8%下降到4.1%;效率层面,依托孪生节拍分析与工位重排,平均单台装配节拍由168s缩短至152s,换型准备时间由38min降低至24min,生产节拍波动范围由±9.5%收敛至±5.2%;运维层面,基于振动与电流特征的预测维护使计划外停机次数从每周2.1次降至0.9次,设备综合可用率由86.3%提升至91.7%,备件非计划消耗金额在统计周期内下降约18.5%。上述结果表明,多技术协同并非局部改良,而是凭借数据贯通与闭环处置带来质量稳定性与产线可靠性的同步增强。

4 结束语

本文围绕机电制造过程的智能化转型需求,从数据感知、过程建模、柔性装配以及检测与运维协同等方面,对关键技术的应用路径与集成效果进行了系统梳理与验证。实践表明,多源数据贯通与模型驱动优化能够显著改善制造过程的可控性与稳定性,为复杂机电产品的高质量生产提供支撑。未来,随着制造场景进一步复杂化,如何在现有体系基础上引入更高层次的智能决策能力、增强跨系统自适应协同水平,将成为机电制造智能化持续发展的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 杨梓嘉. 机电一体化技术在智能制造中的应用[J]. 电子技术, 2023, 52(09): 49-51.
- [2] 韩文杰. 机械制造智能化技术与机电一体化的融合研究[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(04): 93-95.
- [3] 王赞, 何俊峰. 智能制造背景下机电一体化技术的应用与发展[J]. 南方农机, 2023, 54(15): 141-143, 158.
- [4] 杨张海, 徐盼盼. 机电自动化在工程机械制造中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(01): 26-28.
- [5] 母国才, 莫日华. 机电产品制造质量特性预防控制关键技术研究[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(12): 158-161.
- [6] 李俊青. 机械制造的智能化技术与机电一体化的融合[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(12): 86-88.