

# 基于智能控制的汽车机械制造系统优化技术

王云志

220882\*\*\*\*\*0312

**摘要:** 随着全球汽车工业迈向智能化、网联化与绿色化的新阶段,传统汽车机械制造系统在生产效率、质量控制、资源利用及柔性响应等方面面临严峻挑战。以人工智能、大数据、工业物联网为代表的新一代信息技术与先进制造技术的深度融合,为制造系统的革新提供了核心驱动力。本文聚焦于智能控制技术在汽车机械制造系统优化中的深度应用,系统性地探讨了其理论基础、关键技术、实施路径与效能评估。首先,分析了传统制造系统的局限性与智能化转型的必然趋势;其次,深入阐述了基于机器学习的工艺参数优化、基于机器视觉的在线质量检测、基于数字孪生的生产全过程仿真与调控、以及基于多智能体系统的柔性生产调度等核心智能控制技术;继而,构建了一个集成感知、分析、决策与执行闭环的智能优化系统框架,并讨论了其实施过程中的数据集成、模型构建、系统融合等关键问题;最后,通过分析典型应用案例,验证了智能控制技术在提升制造精度、降低能耗物耗、增强生产柔性方面的显著成效,并对未来技术发展挑战与研究方向进行了展望。

**关键词:** 智能控制; 汽车制造; 机械制造系统; 优化技术; 数字孪生; 机器学习; 工业物联网

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.04.067

## 引言

汽车产业作为国民经济的支柱产业,其制造水平是国家工业竞争力的重要体现。传统的汽车机械制造系统,虽然历经自动化改造,但其核心控制逻辑多依赖于预设程序与固定规则,在面对产品型号快速迭代、市场需求动态变化、质量要求极致严苛以及资源环境约束日益增强的当代制造环境时,表现出明显的适应性不足。具体问题体现在:生产过程“黑箱”化,工艺参数依赖经验调整,难以全局最优;质量检测滞后且抽样率有限,缺陷追溯与预防能力弱;生产线刚性较强,换产调序耗时费力;能源与物料消耗缺乏精细化管理。

在此背景下,智能制造成为产业转型升级的主攻方向。智能控制作为智能制造的大脑与神经中枢,其核心在于利用先进的计算模型与算法,使制造系统具备自感知、自学习、自决策、自执行与自适应能力。它将制造过程中的物理实体与信息空间深度融合,通过对海量运行数据的实时采集与分析,动态调整控制策略,从而实现制造系统在效率、质量、成本、柔性及绿色等多目标维度上的综合优化。因此,深入研究智能控制技术在汽车机械制造系统优化中的应用,不仅具有重要的理论价值,更是推动汽车产业高质量发展的迫切现实需求。本文旨在对这一交叉领域的技术体系进行梳理与深化,为相关研究与实践提供参考。

## 1 智能控制与汽车制造系统优化的理论融合

汽车机械制造系统是一个涉及冲压、焊接、涂装、总装及动力总成机加等多工艺环节的复杂巨系统。其优化问题本质上是多变量、强耦合、非线性、高动态环境下的多目标优化与控制问题。传统控制理论(如PID控制、PLC顺序控制)在解决此类复杂问题时渐显疲态。

智能控制理论,特别是其与机器学习、运筹学、信息论的交叉分支,为解决上述问题提供了新范式。它不依赖于或不过分依赖于被控对象的精确数学模型,而是通过数据驱动与知识引导相结合的方式,构建能够模拟人类专家经验的控制器<sup>[1]</sup>。在汽车制造场景中,这种融合体现在:将制造设备、物料、产品、环境等物理实体映射为信息空间中的可计算模型;将工艺知识、操作规则、优化目标转化为算法可处理的约束与目标函数;将实时传感数据流作为系统状态的反馈输入。通过这种理论融合,智能控制技术能够突破传统控制方法的局限性,实现对汽车制造系统从局部到全局、从静态到动态的精准调控。例如,在多工艺环节协同优化中,智能控制理论可将冲压工艺的材料变形参数、焊接工艺的热输入参数、涂装工艺的漆膜厚度参数等多维度变量纳入统一的优化框架,通过构建多目标优化模型,在满足产品质量约束的前提下,实现生产节拍的最大化与能耗的最小化。同时,智能控制理论中的自学习机制能够使系统不断积累制造过程中的经验数据,动态更新控制策略,以适应

不同批次原材料特性的波动、设备老化带来的性能变化以及新产品工艺参数的快速迭代需求,从而为汽车制造系统的持续优化提供坚实的理论支撑。

## 2 核心智能控制优化关键技术

### 2.1 基于机器学习的工艺参数自适应优化

工艺参数(如焊接电流电压、切削速度进给量、喷涂流量压力等)直接决定了加工质量与效率。传统参数设定基于工艺手册与工程师经验,难以适应设备磨损、材料批次波动等扰动。基于机器学习的优化技术为此提供了解决方案。首先,通过历史数据与在线传感器,系统性地采集加工输入参数、过程状态(如振动、温度)与输出质量(如强度、粗糙度、尺寸)数据。随后,应用监督学习算法(如神经网络、支持向量回归)建立从输入到输出的高精度预测模型。进而,以质量最优化、能耗最低或效率最高为目标,结合约束条件,利用强化学习、遗传算法或贝叶斯优化等优化算法,在预测模型的基础上进行迭代寻优,动态推荐或直接下发最优工艺参数组合。例如,在发动机缸体加工中,通过深度学习模型实时分析切削力与振动信号,自适应调整主轴转速与进给率,在保证表面质量的前提下最大化材料去除率<sup>[2]</sup>。

### 2.2 基于机器视觉与多传感融合的在线质量智能检测

质量检测是保证汽车可靠性的关键环节。传统人工目视或接触式检测效率低、一致性差、易漏检。基于深度学习的机器视觉技术实现了革命性突破。通过高分辨率工业相机获取零部件、焊点、涂装表面、装配间隙等的高清图像或三维点云数据,利用卷积神经网络等模型进行特征自动提取与缺陷识别(如划痕、焊渣、色差、装配错位)。结合激光测距、超声波、光谱等多传感器信息融合,可进一步提升检测的鲁棒性与准确性<sup>[3]</sup>。更前沿的是,将在线检测数据实时反馈至上游工艺控制环节,形成“检测-诊断-调整”的闭环质量控制。例如,在车身焊接站,视觉系统实时识别焊点位置与形貌,若发现异常,立即触发机器人进行补焊或通知前序工位调整参数,实现质量问题的原位遏制。

### 2.3 基于数字孪生的制造全过程仿真与动态调控

数字孪生通过构建与物理制造系统完全镜像的虚拟模型,并实现虚实之间的实时数据交互与同步,为制

造系统提供了前所未有的透明化管控能力。在汽车制造中,数字孪生体集成了设备几何模型、物理特性、行为逻辑与控制规则。它不仅可以用于产线布局规划、工艺可行性仿真等前期设计,更能在生产运行阶段发挥核心优化作用:实时映射生产进度、设备状态、物料库存、能源消耗;基于仿真模型对生产计划变更、设备故障预案、维护策略调整进行“先先行先试”,预测不同决策下的系统性能输出;根据预测结果,动态优化生产调度指令、设备运行模式、物流配送路径。例如,当总装线某台拧紧设备预警可能故障时,数字孪生系统可快速模拟不同的设备替换与生产重排方案,选择对整体生产节拍影响最小的方案并下发执行,最大限度减少停机损失。

### 2.4 基于多智能体系统的柔性生产调度与协同控制

面对多车型混流生产的复杂需求,制造系统的柔性至关重要。多智能体系统将生产线上的每个工作站、运输设备(AGV)、乃至每个在制品都视为具有自主决策能力的智能体。这些智能体通过通信网络进行信息交互与协商,共同完成生产目标。每个智能体根据局部信息(如自身状态、任务队列、邻位信息)和全局目标(如订单交货期、整体效率),基于分布式算法(如合同网协议、市场拍卖机制、强化学习)进行自主决策。这种分布式架构避免了中央调度器计算复杂度高、单点失效风险大的问题,赋予了系统高度的敏捷性与鲁棒性。当插入紧急订单或某设备突发故障时,相关智能体可快速协商,自主调整加工顺序、路径选择,实现生产任务的动态再平衡与资源的自组织优化<sup>[4]</sup>。

## 3 智能优化系统架构与实施挑战

### 3.1 集成系统框架

一个完整的基于智能控制的汽车机械制造优化系统通常呈现分层递阶的集成架构。底层是智能感知与执行层,由配备先进传感器和智能控制器的设备、机器人、AGV等构成,负责数据采集与指令执行。中间层是边缘/雾计算与平台层,部署数字孪生模型、机器学习算法库、优化求解引擎及工业物联网平台,负责数据的汇聚、处理、模型运行与实时优化决策生成。顶层是云服务与协同层,进行跨工厂、跨供应链的大数据分析、知识沉淀与协同优化。各层之间通过高速工业网络实现数据与指令的畅通流动,形成“感知-传输-分析-决策-执行-反馈”的闭环优化环路。

### 3.2 关键实施挑战与对策

尽管前景广阔,但技术落地仍面临诸多挑战:其一,数据治理难题。制造现场数据多源异构(时序数据、图像、文本),存在噪声、缺失、碎片化问题。需建立统一的数据标准与接口规范,运用数据清洗、对齐、融合技术,构建高质量的数据资产。其二,模型泛化与可信赖问题。在特定产线或工况下训练的模型,换线或换料后性能可能下降。需研究迁移学习、领域自适应、小样本学习技术,并引入可解释 AI 方法,增强模型的泛化能力与人类信任度。其三,信息物理系统安全风险<sup>[5]</sup>。系统的深度联网与开放增加了遭受网络攻击的风险,可能导致生产中断甚至设备损坏。必须构建覆盖终端、网络、平台、应用的全方位安全防护体系,并设计具备韧性的控制策略。其四,人才与组织壁垒。智能控制系统的开发与维护需要既懂制造工艺又精通信息技术的复合型人才。企业需加强跨领域团队建设,并推动组织架构与业务流程的适应性变革。

### 4 应用案例分析

以国内某知名汽车企业的高端白车身智能焊装车间为例。该车间实施了全方位的智能控制优化:在工艺优化方面,基于焊接机器人的电流电压实时数据与后续视觉检测的焊点质量数据,建立了 LSTM 神经网络预测模型,并采用强化学习算法在线优化焊接参数,使焊点合格率从 99.3%提升至 99.8%。在质量控制方面,部署了数十套高精度 3D 视觉传感器,对每个车身的数百个关键尺寸与匹配间隙进行 100%在线检测,数据实时上传至质量大数据平台,实现缺陷的毫秒级判定与分类追溯。在生产调度方面,应用了基于数字孪生与多智能体的调度系统,面对每日多达 5 种车型的混流生产,系统动态规划每个车身的流转路径与工位作业序列,将生产换型时间缩短了 35%,整体设备综合效率(OEE)提升了 18%。在能耗管理方面,通过数字孪生模型对生产线各设备的能耗进行实时监测与仿真预测,优化了非生产时段的设备待机策略与空调送风方案,实现了单位产品

能耗下降 15%的目标。该案例综合体现了多项智能控制技术集成应用带来的协同倍增优化效应。

### 5 结语

智能控制技术正深刻重塑汽车机械制造系统的运行模式与优化范式。本文系统论述了从机器学习、机器视觉到数字孪生、多智能体系统等关键智能控制技术在工艺优化、质量检测、生产调度等核心环节的应用机理,构建了集成化的系统框架,并分析了实践中的挑战与对策。实践表明,智能控制的引入能够显著提升汽车制造系统的综合性能,是实现高效率、高质量、高柔性、低消耗智能制造的关键使能技术。

展望未来,该领域的研究将向更深层次发展:一方面,技术融合将更趋深入,大语言模型与知识图谱将赋予系统更强的工艺知识理解与自然交互能力;生成式 AI 可能用于创新工艺与调度方案的自动设计;边缘 AI 芯片的普及将推动智能进一步下沉至设备端。另一方面,优化维度将更加系统化与可持续化,从单一线体、单一工厂的优化扩展到供应链全局优化,并从经济性目标扩展到全面的碳足迹追踪与最小化,推动汽车制造向真正的绿色智能制造迈进。然而,通往全面智能化的道路仍需攻克模型可解释性、数据安全与隐私、标准化互操作以及人才储备等根本性难题。唯有产学研用协同创新,持续突破,方能充分释放智能控制技术的潜力,驱动汽车制造业迈向卓越。

### 参考文献

- [1] 张晓宇,杨佳举,张雷. 基于智能控制的汽车机械制造系统优化技术[J]. 汽车维护与修理,2026,(01):117-118.
- [2] 罗达. 机械加工技术在汽车制造领域的应用[J]. 汽车测试报告,2025,(22):4-6.
- [3] 崔敏. 面向智能制造的汽车生产机械设备数字化改造路径与实现[J]. 中国机械,2025,(33):144-147.
- [4] 叶标. 机械制造自动化在汽车零部件精密加工中的应用[J]. 汽车电器,2025,(09):143-145.