

字孪生技术通过虚拟仿真与实际制造过程的融合,实现全生命周期设计优化。

3 机械工程自动化设计的智能化发展现状分析

3.1 智能化设计方法的应用现状及局限性

当前,机械工程自动化设计的智能化进程仍面临多重技术瓶颈。基于机器学习与深度强化学习的智能算法虽在参数优化、拓扑生成等场景中展现出潜力,但在工业级应用中受限于数据质量与算力约束。工业现场采集的工况数据普遍存在 15%~20% 的缺失率及 30dB 以上的噪声干扰,导致卷积神经网络与长短期记忆网络的预测误差率高达 8.6%~12.3%。此外,多目标优化算法在解决非线性耦合问题时易陷入局部最优,NSGA-II 算法在 10 维以上设计空间中的 Pareto 前沿收敛效率下降 37%,暴露出维度灾难对智能设计的制约。数字孪生技术虽能实现物理系统与虚拟模型的实时映射,但建模过程中 33.5% 的几何特征丢失率显著削弱了仿真置信度。

表 1 智能化设计技术瓶颈参数分析

技术瓶颈	测量指标	典型参数	影响维度
数据质量缺陷	传感器噪声水平	$\geq 30\text{dB}$	算法精度
算法维度限制	Pareto 前沿收敛效率	下降 37%	优化能力
模型保真度	几何特征丢失率	33.50%	仿真置信度
实时性约束	数据刷新频率	24,000 次/秒	控制响应
标准化缺失	协议兼容种类	6 类	系统集成

3.2 智能制造体系在自动化设计中的集成难度

智能制造体系的集成障碍主要体现在异构系统兼容性与算力资源配置层面。工业物联网设备间存在 OPC UA、MTConnect、PROFINET 等 6 类主流通信协议并存现象,导致数据交互延迟达 200-500ms,超出实时控制系统的阈值要求。云端-边缘计算架构中,嵌入式 PLC 的 32 位处理器难以满足数字孪生模型每秒 2.4 万次的数据刷新需求,造成 8.9% 的指令滞后。在工艺链协同方面,CAD/CAE/CAM 系统间的数据转换损耗达 14.7%,显著影响从设计到制造的端到端精度。更严峻的是,工业现场部署的智能传感器仅有 23% 支持 IEEE 1851.1 标准,严重制约了制造过程的质量追溯能力。

表 2 智能制造体系集成障碍参数统计

集成障碍	性能指标	实测数据	技术标准缺口
通信延迟	数据传输时延	200-500ms	实时控制
算力瓶颈	指令滞后率	8.90%	边缘计算
数据损耗	格式转换误差	14.70%	工艺协同
设备标准化	标准传感器占比	23%	质量追溯
能耗约束	边缘节点功耗	18.6W/节点	能效管理

4 智能化技术驱动机械工程自动化设计的优化策略

4.1 智能算法迭代,优化设计范式重构

基于深度强化学习的智能优化设计系统正推动机械工程领域范式变革,其核心在于构建多模态数据驱动的参数化设计框架。^[2]通过融合三维卷积神经网络与图注意力网络,系统可提取机械零部件的拓扑特征与载荷分布间的非线性映射关系,实现高维设计空间下的自主寻优。实验数据显示,在航空发动机叶片设计中,该架构使钛合金材料用量减少 42kg,同时将屈服强度提升至 1250MPa,较传统方法优化效率提升 6.8 倍。生成对抗网络(GAN)在轻量化结构设计中的应用取得突破性进展,其生成器网络通过对抗训练构建了包含 1.2×10^6 组参数组合的隐式设计空间,在汽车底盘设计中实现扭转刚度提升 18.3% 且质量下降 22.6%,突破传统拓扑优化方法的帕累托边界限制。

深度确定性策略梯度算法为解决多物理场耦合优化问题提供了新路径,其设计的奖励函数集成应力集中系数、疲劳寿命和制造成本等多目标约束条件。在液压阀块流道优化中,算法通过 3250 次迭代将压力损失系数从 0.47 降至 0.29,湍动能耗散减少 63.4%,同时将加工工时压缩至原方案的 54%。基于数字孪生的实时反馈机制进一步增强了系统鲁棒性,通过部署在边缘计算节点的联邦学习架构,设计模型能够同步处理来自 64 组振动传感器的时频域数据,在风电机组齿轮箱优化中将动态啮合误差峰值从 $7.8\mu\text{m}$ 降至 $4.2\mu\text{m}$ 。

4.2 数字孪生赋能,仿真体系跨域融合

数字孪生驱动的智能仿真体系正突破传统 CAE 技术局限,其核心在于建立基于本构方程与数据同化的多尺度物理模型。通过融合有限元分析、计算流体动力学及多体动力学的混合仿真架构,系统可实现微米级几何特征与兆帕级应力场的跨尺度耦合计算。实验表明,在航空发动机叶片热力耦合仿真中,采用非结构化网格自适应加密技术后,温度场预测误差从传统方法的 9.8% 降至 2.3%,瞬态传热系数计算精度提升至 97.4%。基于非线性卡尔曼滤波器的数据同化机制,使数字孪生模型能实时融合 64 通道振动传感器的 50kHz 采样数据,将转子动力学仿真中的临界转速预测偏差控制在 $\pm 12\text{r/min}$ 以内。

多物理场协同仿真技术通过建立包含 Navier-Stokes 方程与 Johnson-Cook 本构模型的耦合求解器,在金属切削工艺优化中成功预测刀具前刀面 850-920°C 的温度梯度分布,进而将刀具寿命延长至传统设计的 1.8 倍。基于拓扑信号处理的虚拟装配验证系统取得突破性进展,其开发的接触力学算法可检测 0.05mm 级配合偏差,^[3]在航天器舱段对接仿真中发现传统公差分析中未识别的 23 处微观干涉。值得关注的是,采用时间敏感网络(TSN)协议的底层数据同步架构,将物理实体与虚拟模型间的状态更新延迟压缩至 1.2ms,确保数字孪生系统能实时响应 $10\text{kN} \cdot \text{m}$ 量级的扭矩波动,为

重型装备智能运维提供关键技术支持。

4.3 物联制造贯通，生产链的协同升级

工业物联网赋能的智能制造链正重塑产品全生命周期管理范式，其核心在于构建基于 OPC UA TSN 与 5G URLLC 融合架构的实时数据管道。通过部署支持 IEEE 802.1AS 时间同步协议的边缘计算节点，系统可实现制造现场 0.5ms 级的数据采集精度，在数控机床加工过程中将主轴振动信号的时频特征提取延迟压缩至 8 μ s。实验数据显示，采用 EtherCAT 总线集成的智能传感器网络，使分布式控制系统（DCS）的环网周期缩短至 250 μ s，同步抖动误差控制在 ± 15 ns，确保五轴联动加工中心的轮廓误差降低至 2.8 μ m。基于 AutomationML 标准构建的数字主线（Digital Thread）架构，实现从 CAD 模型到 PLC 代码的自动转换，在汽车焊接线中将工艺参数配置时间从传统模式的 72 小时缩减至 4.5 小时。

信息物理生产系统通过部署具有 16 核 RISC-V 处理器的边缘网关，实现每秒处理 2.4GB 级的生产数据流，在半导体晶圆制造中使缺陷检测算法的推理速度提升至 150fps。基于量子加密的工业数据安全传输协议，采用 Lattice-Based 后量子密码算法，在保证产线数据完整性的同时将密钥协商延迟控制在 3.2ms 以内。在质量追溯领域，^[4]应用超高频 RFID 与激光打标技术结合的物理 - 数字标识系统，实现零部件个体 ID 与加工参数的精准映射，其读取速率达到 1200 tags/s，

定位精度 ± 0.03 mm。值得关注的是，采用数字孪生驱动自适应控制策略，使柔性制造系统能实时补偿热变形导致的定位误差，在精密模具加工中将 Z 轴重复定位精度稳定在 $\pm 1.5\mu$ m，较传统 PID 控制提升 6.2 倍。

5 结语

智能化技术的不断进步，为机械工程自动化设计提供了新的思路 and 手段。基于人工智能、数字孪生和工业物联网等技术，机械自动化设计正向智能化、数据驱动化方向迈进，提高了设计效率、优化了制造过程，并增强了系统的自主适应能力。未来，随着智能优化算法的升级和跨学科技术的深度融合，机械工程自动化设计将在精度、效率和智能化水平方面取得更大突破，为制造业的数字化转型提供有力支撑。

参考文献

- [1] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2022, 51(1): 1-18.
- [2] 熊晓, 陈悦, 吴海波. 农业机械信息管理平台中会计智能化监测技术研究[J]. 农机化研究, 2022, 43(3): 245-248+253.
- [3] 刘婉茹, 张国忠, 周勇, 等. 智能化技术在水稻生产全程机械化中的应用研究与发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 105-122.
- [4] 唐晓华, 景文治. 人工智能赋能下现代柔性生产与制造业智能化升级研究[J]. 软科学, 2021, 35(8): 30-38.

Lightweight design for columns of machining tool based on orthogonal experimental method

Xinpeng Xu

Nantong Guosheng Electromechanical Group Co., Ltd., Nantong, Jiangsu, 226003, China

Abstract

Taking machine tool column structure of stiffened plate, thickness of steel plate, diameter of hole as test factors, and taking the weight of column, maximum deformation, the first-order frequency and maximum stress as the evaluation index. Orthogonal test was designed with three factors and four levels. Quadratic orthogonal experiment was used to get the best parameter combination after preliminary screening out several excellent combinations of parameter. After optimization, the lightweight effect is remarkable that the weight reduced by 288kg, maximum stress was reduced by 6%, the first order natural frequency also increased with the maximum deformation substantially unchanged.

Keywords

Orthogonal experimental method; Lightweight; Machine tool; Column

基于正交试验机床立柱轻量化设计

徐新朋

南通国盛智能科技集团股份有限公司, 中国·江苏 南通 226003

摘要

以数控机床立柱开窗圆孔、支撑肋板厚度、内部支撑结构,为主要三个试验因素,以立柱一阶固有频率、整体重量、最大变形量、最大应力为四个检验指标,设计正交试验;对立柱参数组合的优选方案进行筛选,筛选出最优化设计组合。在机床立柱承载基本不变的情况下,最大应力降低了6%立柱质量减轻了288kg,一阶固有频率增加1.58%,轻量化效果显著。

关键词

正交试验;轻量化;数控机床;立柱

1 引言

机床行业是制造业的基石,我国是机床生产和消费的大国;在机床的生产制造过程中,势必会出现材料浪费,环境污染等问题,伴随着绿色设计的力量逐渐深入人心,环保意识与可持续发展意识的不断加强,绿色机床将成为未来机床发展的一个重要方向^[1]。机床的结构轻量化,结构简单化是未来的机床的发展方向。

机床立柱作为机床众多零部件的支撑部件,其性能的优劣直接影响着机床零部件乃至整个机床的加工性能,因此,机床立柱必须具有良好的静动态性能。国内外众多学者对机床立柱做了大量的研究,刘成颖等人采用拓扑优化方法对机床立柱的肋板形式及结构尺寸进行了优化设计,提高了立柱的各项性能^[2]。仇家强等人采用参数化优化设计方法优

化元结构尺寸,提高了优化效率^[3]。何剑等人采用拓扑优化方法及有限元分析立柱受力变化的敏感方向,建立了立柱刚度与变形量之间的函数曲线关系,选择最佳结构模型,从而提高立柱刚性,减轻立柱质量^[4]。郭志全等人对立柱内部肋板元结构进行设计,讨论其对质量、一阶固有频率、变形量的影响^[5]。

本文中采用正交试验设计方法,以数控机床立柱开窗圆孔、支撑肋板厚度、内部支撑结构,为主要三个试验因素,以立柱一阶固有频率、整体重量、最大位移量、最大应力为四个检验指标,设计了正交试验;在立柱位移量和一阶固有频率基本不变的情况下,降低最大应力和减轻立柱质量,实现立柱轻量化设计。

2 对立柱进行有限元分析

立柱在非切削工作时,在竖直方向上除了受到自身重力作用外,还支撑着横梁、滑座、滑枕等零部件的重量。立柱初始设计内部的肋板结构为“#”型结构;对初始立

【作者简介】徐新朋(1983-),男,中国吉林榆树人,本科,工程师,从事数控机床领域研究。