

基于数字孪生的机械装配过程仿真与优化研究

姜 斌

弗兰德传动系统有限公司 天津 300000

摘要: 针对传统机械装配仿真静态化、优化针对性弱, 及装配干涉、精度不足、效率低下等问题, 本文结合数字孪生、三维建模与优化算法, 构建“物理-虚拟-数据”三层协同仿真模型, 实现装配全流程精准复刻与虚实实时联动。通过改进遗传算法, 从工艺、资源配置维度开展多目标优化, 经验证, 该方法可有效提升装配精度、缩短周期、降低成本, 破解传统痛点, 为机械装配智能化升级提供理论支撑与实践路径。

关键词: 数字孪生; 机械装配过程仿真; 优化

引言: 机械装配是机械制造的核心环节, 其质量与效率直接决定产品竞争力, 当前装配过程存在参数偏差、流程瓶颈、资源浪费等突出问题, 传统静态仿真与优化方法难以适配复杂动态装配场景。数字孪生技术的虚实双向映射、实时交互特性, 为解决上述难题提供新路径。本文聚焦装配全流程, 开展数字孪生驱动的仿真与优化研究, 突破传统局限, 提升装配智能化水平。

1 相关理论与技术基础

1.1 数字孪生技术核心理论

(1) 数字孪生是通过数字化手段构建物理实体的虚拟镜像, 实现虚实双向映射、实时交互与动态演化的技术体系, 其核心特征体现为虚实同步、全生命周期可控、多维度协同。核心要素包含物理实体(机械装配的零部件、设备等硬件载体)、虚拟镜像(精准复刻装配场景及参数的数字化模型)、数据链路(连接虚实两端的传输通道)、服务应用(装配仿真、故障预警等实际落地场景), 四者相互支撑、协同运转。(2) 数字孪生采用四层递进式层级架构, 感知层负责采集装配现场各类数据; 数据层对多源数据进行清洗、存储与整合; 模型层构建高精度、高保真的虚拟装配模型; 应用层落地仿真、优化等具体服务, 各层级通过数据无缝流转实现协同, 保障装配过程的精准管控。(3) 其在机械制造领域具有高精度、实时性、可追溯的应用特性, 能精准复刻机械装配的全流程, 与机械装配的标准化、流程化、高精度需求高度适配, 可有效衔接装配各环节, 提前规避潜在问题。

1.2 机械装配过程核心理论

(1) 机械装配是将分散的零部件按设计要求组合为合格成品的系统性过程, 分为组件装配、部件装配、总装配三类, 核心流程包括零件检验、定位夹紧、装配连接、调试检测, 关键装配参数涵盖装配精度、拧紧力矩、生产节拍等, 直接影响成品质量与生产效率。(2) 机械

装配过程中存在诸多关键难题, 主要包括零部件装配干涉、精度误差超标、流程瓶颈导致效率低下、人力与设备资源配置不合理造成的浪费等, 严重制约装配质量与生产效益提升。(3) 传统机械装配仿真与优化方法以静态仿真为主, 仅能模拟固定场景, 无法实时反馈现场装配状态, 且优化方案针对性较弱, 难以适配复杂多变的实际装配场景需求。

1.3 关键支撑技术

(1) 三维建模技术是核心支撑, 主要包括CAD正向建模与逆向工程建模, 其中Unity3D、Siemens Plant Simulation等工具, 可精准构建机械零部件及装配场景的虚拟模型, 适配机械装配仿真的高精度需求。(2) 数据采集与传输技术依托力传感器、视觉相机等设备采集装配数据, 结合工业物联网(IoT)与OPCUA通信协议实现数据高效传输, 通过多源数据融合方法提升数据准确性与完整性。(3) 仿真与优化算法包括离散事件仿真技术、遗传算法、强化学习等, 其中离散事件仿真适配装配流程模拟, 遗传算法与强化学习可针对性优化装配参数与流程, 提升装配效率与质量^[1]。

2 基于数字孪生的机械装配过程仿真模型构建

2.1 机械装配数字孪生体系架构设计

(1) 架构总体设计: 结合机械装配流程化、高精度、多环节协同的特点, 摒弃传统单一架构的局限性, 构建“物理装配系统—虚拟仿真系统—数据交互系统”三层协同架构。该架构以数据为核心纽带, 实现物理装配场景与虚拟仿真场景的深度融合, 打破虚实壁垒, 为后续仿真与优化提供稳定的架构支撑, 确保装配过程的可视化、可追溯、可调控。(2) 各子系统功能设计: 物理装配系统作为基础载体, 合理配置装配设备、专用工装夹具及专业操作人员, 明确各设备的运行参数与人员岗位职责, 保障物理装配过程有序开展; 虚拟仿真系统聚焦虚拟镜

像构建与仿真流程设计,精准复刻物理装配场景,模拟装配全流程,提前预判潜在问题;数据交互系统承担数据采集、传输与同步功能,搭建物理与虚拟系统的双向数据通道,实现多源数据的实时流转与同步更新^[2]。(3)架构运行机制:明确各层级数据流向与虚实交互逻辑,物理装配系统通过数据采集模块获取各类运行数据,经数据交互系统处理后传输至虚拟仿真系统;虚拟仿真系统基于接收的数据更新虚拟镜像状态,开展仿真分析并生成优化指令,再通过数据交互系统反馈至物理装配系统,实现物理装配与虚拟仿真的实时联动、闭环管控。

2.2 物理装配系统数字化建模

(1)物理实体数字化:采用三维扫描技术对机械零件、装配设备、工装夹具进行全方位扫描,获取精准的几何参数与物理属性,结合CAD建模技术构建高精度数字化模型。建模过程中严格校准尺寸、材质等参数,确保数字化模型与物理实体的一致性,为后续虚拟仿真的准确性奠定基础。(2)装配工艺数字化:全面拆解机械装配工序,梳理各工序间的约束关系与先后顺序,明确每道工序的操作标准与技术要求。将装配工艺参数(如拧紧扭矩、生产节拍、装配顺序、定位精度)精准融入数字化模型,实现装配工艺的数字化、标准化表达,确保虚拟仿真过程与实际装配工艺高度契合。(3)数据采集系统搭建:根据装配过程的监测需求,部署全覆盖的传感器网络,选用力传感器、视觉相机、位置传感器等设备,实时采集装配过程中的零件位置、拧紧扭矩、设备运行状态、人员操作数据等多源信息。同时建立统一的数据标准,对采集的数据进行分类、编码与规范,确保数据的准确性、完整性与兼容性。

2.3 虚拟仿真系统构建与虚实映射

(1)虚拟镜像构建:以物理实体数字化模型为基础,利用Unity3D、Siemens Plant Simulation等工具构建1:1比例的虚拟装配场景,完整还原物理装配车间的布局、设备分布与工装置置。同时将装配工艺逻辑、工艺参数及约束条件集成至虚拟镜像,实现虚拟场景与物理场景的精准对应。(2)虚实映射机制建立:设计数据驱动的虚实同步方法,基于OPCUA通信协议与工业物联网技术,实现物理装配过程与虚拟仿真的实时对应,重点完成位置同步、状态同步与参数同步。物理系统的运行数据实时传输至虚拟系统,驱动虚拟镜像同步运动;虚拟系统的仿真数据反向反馈,为物理装配提供操作指导。(3)仿真系统调试:针对虚拟仿真过程中出现的精度误差、数据传输延迟、虚拟镜像与物理实体不匹配等问题,通过校准虚拟模型参数、优化数据传输链路、调整仿真算法等方式进

行调试。反复验证虚拟模型与物理系统的一致性,确保虚拟仿真结果的可靠性,满足后续装配优化的需求^[3]。

2.4 装配过程仿真实现

(1)仿真参数设置:结合实际机械装配场景,确定装配仿真的边界条件、工序约束参数、仿真步长等关键参数。边界条件贴合车间实际生产环境,约束参数严格遵循装配工艺要求,仿真步长兼顾仿真精度与运行效率,确保仿真过程贴合实际、结果精准。(2)全流程仿真运行:启动虚拟仿真系统,模拟机械装配的完整过程,包括零件定位、夹紧固定、装配连接、干涉检测、工序衔接等各个环节。仿真过程中实时监测各零部件的运动状态、装配精度及设备运行情况,精准捕捉装配过程中可能出现的干涉、精度偏差等问题。(3)仿真结果输出:仿真结束后,系统自动提取仿真过程中的关键数据,包括装配时间、精度误差数值、干涉发生位置与类型、设备运行效率等,以图表、报表等直观形式输出。这些数据为后续装配工艺优化、参数调整、资源配置优化提供可靠的理论依据与数据支撑。

3 基于数字孪生的机械装配过程优化

3.1 装配过程优化目标与约束条件

(1)优化目标:采用多目标优化设计思路,兼顾装配质量、效率、成本与设备稳定性,核心目标包括装配精度最大化,减少零件装配偏差与干涉,提升成品合格率;装配周期最短化,梳理工序瓶颈,缩短生产耗时;装配成本最低化,降低物料损耗、设备能耗与人力成本;设备负载均衡化,合理分配设备工作任务,延长设备使用寿命,实现装配过程的整体优化。(2)约束条件:明确装配过程中的双重约束,硬约束为不可突破的技术与工艺要求,包括零件公差范围、装配设备的性能参数、工序先后顺序,确保装配过程符合设计标准;软约束为可灵活调整的资源与管理要求,包括成本预算上限、人员配置数量与技能水平,兼顾优化效果与实际生产可行性。(3)优化指标体系构建:对各优化目标进行量化处理,构建可量化、可考核的优化指标,如以装配尺寸偏差值衡量装配精度,以单件装配耗时衡量装配周期,以单位产品物料与能耗成本衡量装配成本,以设备平均负载率衡量负载均衡性;同时结合实际生产需求,明确各指标的权重,突出核心优化目标的优先级^[4]。

3.2 装配优化算法选型与改进

(1)现有优化算法对比:对比遗传算法、强化学习、Petri网等主流优化算法的优缺点,遗传算法全局搜索能力强但收敛速度慢,强化学习适应性强但对初始数据要求高,Petri网擅长流程建模但优化精度不足;结合机械装配

多工序、多参数、动态变化的场景特点,选取遗传算法作为核心优化算法,适配多目标优化需求。(2)算法改进:针对遗传算法收敛速度慢、易陷入局部最优的不足,结合数字孪生实时性、虚实联动的特性进行改进,引入虚拟仿真反馈的数据动态调整算法参数,优化交叉、变异概率,加入局部搜索机制,提升算法的优化效率与精度,确保算法能快速找到全局最优解。(3)算法验证:设计简单机械部件装配场景,将改进后算法代入虚拟仿真系统进行测试,对比改进前后算法的收敛速度、优化精度,验证算法的有效性与稳定性,确保其能够适配复杂机械装配场景的多目标优化需求。

3.3 基于数字孪生的多维度装配优化实现

(1)装配工艺优化:基于数字孪生虚拟仿真结果,精准识别装配过程中的瓶颈工序与薄弱环节,优化装配顺序,调整工序衔接逻辑,避免工序冲突;优化拧紧扭矩、定位精度等工艺参数,减少装配干涉与尺寸偏差,提升装配工艺的合理性与科学性。(2)资源配置优化:结合虚拟仿真与实时采集的数据,分析装配设备、工装夹具、人员的负载情况,优化资源配置方案,合理分配设备与人员任务,避免部分资源闲置、部分资源过载的情况,实现资源负载均衡,提高资源利用率,降低生产成本。(3)动态实时优化:利用数字孪生的实时数据反馈优势,实时监测物理装配过程中的设备运行状态、零件装配精度等信息,当出现设备故障、零件偏差等突发异常时,快速调整优化方案,动态调整工序与资源配置,确保装配过程稳定有序推进^[5]。

3.4 优化效果验证

(1)仿真验证:将优化方案代入数字孪生虚拟仿真系统,模拟实际装配过程,对比优化前后的装配精度、装配

周期、装配成本、设备负载率等核心指标,通过数据对比验证优化方案的有效性,确保优化目标达成。(2)对比分析:将基于数字孪生的装配优化效果,与传统静态优化方法的优化结果进行对比,重点分析两者在优化精度、效率、适应性上的差异,凸显基于数字孪生的装配优化实时性强、针对性强、优化效果更优的优势。(3)可行性分析:结合实际生产车间的设备条件、人员配置、成本预算等场景,分析优化方案的可实施性,梳理方案落地过程中可能遇到的问题,提出设备调试、人员培训、参数校准等注意事项,为优化方案的实际落地提供指导。

结束语

本文完成基于数字孪生的机械装配过程仿真与优化研究,构建高精度仿真模型,提出针对性优化方案,验证了该技术在提升装配质量效率、降低成本中的有效性。研究虽有成果,但在复杂多部件协同仿真精度、算法实时性上仍有提升空间。未来将完善虚实映射机制,优化算法,推动其在各个领域规模化应用,助力制造产业高质量发展。

参考文献

- [1]王建华.数字孪生在机械加工过程中的应用研究[J].机械工程学报,2021,57(12):45-52.
- [2]李志强.基于数字孪生的智能制造工艺优化方法探讨[J].制造业自动化,2022,44(3):67-73.
- [3]张宏伟.数字孪生驱动下的机械加工工艺改进与动态仿真研究[J].中国机械工程,2023,34(9):101-108.
- [4]孙东东.数字孪生技术在机械制造中的应用研究[J].机械制造,2022,49(2):35-40.
- [5]李浩,赵宇.数字孪生驱动的机械制造过程优化方法研究[J].制造技术与机床,2023,59(1):28-33.