

基于智能制造的机械设计分析

李林方

普瑞特机械制造股份有限公司 山东 泰安 271000

摘要: 在智能制造推动制造业深刻变革的背景下, 机械设计作为产品研发核心环节, 其与智能制造的融合成为行业发展关键。本文围绕智能制造与机械设计的融合展开研究, 首先界定智能制造(新一代信息技术与先进制造技术融合的智能生产模式)与机械设计(功能需求转化为产品方案的系统性活动)的概念; 剖析了数字孪生虚拟设计、模块化协同设计、AI参数优化、物联网数据集成、绿色全生命周期评价五大关键技术; 最后从流程重构与优化角度, 探讨设计流程向并行协同、决策向数据驱动、设计制造向数字贯通、流程向动态迭代的转型路径。研究旨在为智能制造环境下机械设计的高效化、精准化发展提供理论参考, 助力机械设计适应现代制造业发展需求。

关键词: 智能制造; 机械设计; 关键技术; 流程重构与优化

引言: 随着新一代信息技术与制造业的深度融合, 智能制造已成为推动制造业转型升级的核心方向, 传统机械设计模式在效率、精度与协同性上的局限性日益凸显, 难以适配智能制造对柔性化、个性化、绿色化的需求。在此背景下, 重新审视智能制造与机械设计的内在关联, 梳理融合过程中的关键技术, 重构并优化设计流程, 成为突破机械设计发展瓶颈的关键。

1 智能制造与机械设计的概念

1.1 智能制造的概念

智能制造是基于新一代信息技术与先进制造技术深度融合形成的新型生产模式, 其核心在于通过数字化、网络化、智能化手段实现制造全流程的高效协同与自主优化。从技术维度看, 智能制造以数据为核心驱动要素, 整合物联网、大数据、人工智能、云计算、数字孪生等技术, 构建起感知、决策、执行闭环的智能系统, 能够实时采集制造过程中的各类数据, 通过算法模型进行分析与优化, 实现生产资源的动态配置、生产过程的精准调控以及产品质量的实时追溯。从目标维度看, 智能制造不仅追求生产效率的提升与生产成本的降低, 更注重实现制造过程的柔性化、个性化与绿色化, 打破传统制造的时空限制与部门壁垒, 推动制造体系从“大规模标准化生产”向“大规模个性化定制”转型, 同时通过能耗监测与优化减少资源浪费, 满足现代制造业对高效、灵活、可持续发展的需求。

1.2 机械设计的概念

机械设计是指根据产品功能需求, 运用工程力学、材料科学、机械原理等学科知识, 对机械产品的结构、运动、性能、材料选型及制造工艺进行系统性规划与设计的过程, 其本质是将抽象的功能需求转化为具体、

可实现的机械产品方案的创造性活动。从设计内容看, 机械设计涵盖方案设计、结构设计、强度与刚度计算、传动系统设计、零部件选型等核心环节, 需综合考虑产品的使用性能、可靠性、安全性、经济性及可制造性, 确保设计方案既满足功能需求, 又符合生产实际与行业标准。从设计目标看, 传统机械设计以实现产品基本功能、保证结构稳定性为核心, 而随着制造技术的发展, 现代机械设计更强调多目标协同优化, 需在功能实现、成本控制、绿色环保、维护便捷性等维度建立平衡, 为后续制造、装配、运维环节奠定基础, 是机械产品全生命周期管理的起点与关键环节^[1]。

2 基于智能制造的机械设计关键技术

2.1 数字孪生驱动的虚拟设计技术

数字孪生技术是智能制造背景下机械设计突破物理限制的核心支撑, 其核心在于构建与机械产品全生命周期高度同步的虚拟模型, 实现设计阶段的“虚拟仿真-数据反馈-方案迭代”闭环。该技术通过整合三维几何建模、多物理场仿真(如力学、热力学、流体动力学)及实时数据交互技术, 将机械产品的结构特征、性能参数、运行工况等信息精准映射至虚拟空间。在设计过程中, 无需依赖物理样机即可完成性能验证、故障模拟与优化分析, 通过虚拟环境模拟产品在不同工况下的运行状态, 提前识别结构缺陷、运动干涉或性能不足等问题, 并基于仿真数据快速调整设计参数, 大幅缩短设计周期, 降低物理样机试制的成本损耗, 同时为后续制造、运维环节提供统一的数据基准。

2.2 面向协同的模块化设计技术

模块化设计技术是适配智能制造“多主体协同、柔性化生产”需求的关键设计方法, 其核心逻辑是将机械

产品拆解为功能独立、接口标准化的模块单元,通过模块的组合与重构实现产品的多样化设计。该技术需建立统一的模块划分标准与接口规范,明确各模块的功能边界、性能指标及连接方式,确保不同模块间具备良好的兼容性与互换性。在设计过程中,设计团队可基于标准化模块库进行快速选型与组合,无需对产品整体进行重复设计;同时,模块化架构支持多团队并行设计,不同团队可分别负责不同模块的研发,通过协同平台实现设计数据的实时共享与同步更新,避免设计冲突。模块化设计还为后续制造环节的柔性生产提供支撑,可根据客户需求快速调整模块组合,实现“大规模定制”生产,同时简化产品维护与升级流程,仅需更换或升级特定模块即可满足性能迭代需求^[2]。

2.3 融合人工智能的参数优化技术

人工智能技术的融入使机械设计从“经验驱动”转向“数据驱动”,其中参数优化技术是人工智能在设计环节的核心应用方向,旨在通过算法模型实现设计参数的智能化寻优。该技术以机械产品的性能目标(如强度、刚度、能耗、效率)为约束条件,基于历史设计数据、仿真数据及行业规范构建数据集,通过机器学习(如神经网络、遗传算法、粒子群优化)或深度学习模型挖掘设计参数与性能指标间的隐性关联。在设计过程中,算法可自动遍历参数组合空间,快速筛选出满足多目标优化需求的最优参数方案,无需依赖设计师的经验判断;同时,随着数据量的积累,模型可持续迭代优化,不断提升参数预测的精度与寻优效率。例如,在机械结构设计中,可通过算法自动优化零部件的尺寸参数、材料选型,在保证结构强度的前提下降低重量与制造成本;在传动系统设计中,可优化齿轮参数以减少摩擦损耗,提升传动效率,显著提升设计方案的科学性与精准性。

2.4 基于物联网的设计数据感知与集成技术

物联网技术为智能制造环境下的机械设计提供了全流程数据支撑,其核心作用是实现设计环节与制造、运维环节的数据贯通,构建“设计-生产-使用”的数据闭环。在设计阶段,该技术通过部署在生产设备、检测仪器上的传感器,实时采集制造过程中的工艺参数(如加工精度、切削速度、温度)、设备运行状态数据及零部件检测数据,并将这些数据集成至设计数据平台;设计师可基于实际生产数据调整设计方案,确保设计参数与制造能力相匹配,避免因设计与生产脱节导致的工艺无法实现或成本超支问题。同时,物联网技术还可采集已交付产品的运行数据(如载荷、振动、能耗),将其

反馈至设计环节,用于优化后续产品的设计方案,实现“以用代研”的迭代升级;此外,通过数据集成平台,可打破设计、工艺、生产等部门的数据壁垒,实现设计图纸、BOM清单、工艺文件等数据的标准化管理与实时共享,为协同设计与流程优化提供数据基础。

2.5 绿色设计与全生命周期评价技术

绿色设计技术其核心目标是在设计阶段融入环保理念,从源头降低机械产品全生命周期的资源消耗与环境影响,同时结合全生命周期评价技术实现设计方案的环保性量化评估。该技术需在设计过程中综合考虑材料选择(优先选用可回收、低污染、轻量化材料)、结构优化(减少材料浪费、简化制造工艺)、能耗控制(优化动力系统以降低运行能耗)及回收设计(预留回收拆解结构,便于报废后零部件的回收利用)。全生命周期评价技术则通过建立量化模型,对产品从原材料获取、制造、运输、使用到报废回收的全流程进行环境影响分析(如能耗、污染物排放、资源消耗),并生成评价报告,为设计师优化方案提供数据支撑。两者结合可确保机械产品在满足功能与性能需求的同时,实现环境友好与资源高效利用,符合智能制造的绿色发展导向^[3]。

3 智能制造环境下机械设计的流程重构与优化

3.1 设计流程的“线性串联”向“并行协同”重构

传统机械设计流程多遵循“需求分析-方案设计-结构设计-工艺设计-样机试制-设计修改”的线性串联模式,各环节依次推进,后续环节需等待前序环节完全结束才能启动,易因前序设计缺陷导致后续环节返工,延长整体周期。在智能制造环境下,设计流程需重构为“并行协同”模式,依托数字化协同平台打破环节间的时间与信息壁垒。需求分析阶段即同步接入工艺、生产、运维等环节的参与方,明确各环节对设计的约束条件(如制造设备精度、运维便捷性要求);方案设计与结构设计阶段,工艺设计团队可同步开展可制造性分析,提前排查工艺无法实现的设计问题;设计过程中生成的数字化模型与参数数据,可实时共享至生产、采购等部门,便于提前开展生产资源调配与零部件采购准备。这种并行模式将原本串联的环节转化为同步推进、动态反馈的协同过程,减少后期返工概率,缩短设计与生产的衔接周期。

3.2 设计决策的“经验驱动”向“数据驱动”优化

传统机械设计决策多依赖设计师的经验积累,对设计参数的选择、性能指标的平衡往往缺乏量化数据支撑,易导致设计方案存在性能冗余或成本浪费。智能制造环境下,设计决策需通过“数据驱动”实现优化,构建覆盖设计全流程的数据集与决策模型。一方面,通过物联网采集

历史设计数据（如成功方案的参数组合、失败案例的问题归因）、仿真数据（如多物理场仿真的性能模拟结果）、生产数据（如零部件加工精度数据、工艺参数与产品质量的关联数据）及运维数据（如产品运行中的载荷、能耗、故障数据），形成结构化数据库；另一方面，利用人工智能算法对数据进行挖掘分析，建立设计参数与性能、成本、可靠性等目标的关联模型。在设计决策环节，通过模型对不同设计方案进行量化评估，如预测方案的制造成本、运行能耗、使用寿命等，为设计师提供数据化决策依据，替代传统经验判断，提升设计方案的科学性与精准性，减少主观决策带来的偏差。

3.3 设计与制造的“脱节独立”向“数字贯通”重构

传统机械设计与制造环节存在明显的信息脱节，设计环节输出的二维图纸或三维模型需经人工转化为生产工艺文件，且设计阶段难以实时掌握制造环节的实际能力，易出现“设计可行但制造不可行”的问题。智能制造环境下，需通过“数字贯通”实现设计与制造的深度融合，构建“设计-制造”一体化数据链路。设计环节生成的数字化模型（如三维标注模型、数字孪生模型）可直接作为制造环节的数据源，无需人工二次转化，通过CAM（计算机辅助制造）系统自动生成适配生产设备的数控加工程序；同时，制造环节的实时数据（如设备运行状态、加工精度偏差、原材料性能波动）可通过工业互联网反馈至设计系统，设计师基于这些数据动态调整设计参数，如根据实际加工精度修正零部件公差，确保设计方案与制造能力精准匹配。这种数字贯通模式消除了设计与制造间的信息转化损耗，实现设计方案向制造执行的无缝衔接，提升生产效率与产品质量一致性。

3.4 设计流程的“静态固化”向“动态迭代”优化

传统机械设计流程多为静态固化模式，设计方案经评审确认后即进入固化阶段，仅在样机试制或产品使用过程中发现严重问题时才进行有限修改，难以快速响应市场需求变化或技术升级。智能制造环境下，设计流程需优

化为“动态迭代”模式，依托数字孪生与实时数据反馈构建持续优化机制。设计方案确定后，并非进入静态固化状态，而是通过数字孪生模型模拟产品在实际使用中的运行状态，结合物联网采集的产品运维数据，持续监测设计方案的性能表现（如是否满足动态载荷需求、能耗是否超出预期）；若发现性能偏差或市场需求调整，可基于实时数据快速启动设计迭代，通过参数修改、结构优化等方式更新方案，并同步将迭代后的数字模型推送至制造环节，实现设计与生产的动态同步。动态迭代流程还支持“小批量试产-数据反馈-快速优化”的循环，通过小批量生产验证设计方案的可行性，再基于试产数据优化方案后推进大规模生产，降低大规模生产的风险，提升设计对市场与技术变化的响应速度^[4]。

结束语：智能制造为机械设计带来了从概念内涵到技术方法、从流程模式到决策逻辑的全方位变革。数字孪生、AI、物联网等技术的融入，打破了传统设计的物理与信息壁垒；设计流程向并行协同、数据驱动、数字贯通与动态迭代的转型，显著提升了设计效率与精准性。随着智能制造技术的持续演进，机械设计需进一步强化数据驱动能力与跨环节协同水平，不断优化全生命周期设计思维。

参考文献

- [1]鞠洪德,史振涛,谭树海.基于智能制造的机械设计分析[J].造纸装备及材料,2025,54(2):88-90.
- [2]柴琪,郑德荣,赵训茶,曹慧英.智能制造背景下机械设计制造及其自动化技术发展路径[J].新潮电子,2025(2):40-42.
- [3]刘伟龙,程振东,邱召春.智能制造时代的机械设计制造自动化技术分析[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(4):021-024.
- [4]谢伟东,李运强,姜澎涛,顾晓宇.机械设计制造中可靠性优化设计分析[J].现代制造技术与装备,2025,61(1):216-218.