

面向智能制造的机械设计与优化流程研究

张瑞军 410184198804271873

摘要

智能制造是当前制造业转型发展的核心方向，对机械设计的精度、效率与个性化适配能力提出了全新要求。本文围绕面向智能制造的机械设计方法展开分析，梳理了传统机械设计存在的响应滞后、迭代成本高、适配性不足等问题，探讨了数字化建模、模块化设计、基于数字孪生的协同设计等新型设计方法的应用逻辑，进而构建了从需求输入到量产验证的全流程优化体系。研究表明，依托数字化工具与数据驱动思路重构机械设计流程，能够显著缩短设计周期，降低研发成本，提升机械产品对智能制造场景的适配性，为制造业智能化转型提供设计层面的支撑。

关键词：智能制造；机械设计；设计方法；优化流程

一、引言

随着物联网、大数据、人工智能等技术与制造业的深度融合，智能制造已经成为全球制造业竞争的核心领域。不同于传统制造模式以大规模批量生产为核心，智能制造强调生产过程的柔性化、智能化与可追溯，能够根据市场需求快速调整产品参数与生产方案，这对上游机械设计环节提出了颠覆性的要求。传统机械设计多依赖设计人员经验，从方案绘制到原型验证的周期长，迭代调整成本高，难以适配智能制造场景下快速换型、个性化定制的生产需求。因此，探索适配智能制造体系的机械设计新方法，梳理清晰的设计优化流程，成为推动机械制造业智能化转型必须解决的关键问题。

二、智能制造对机械设计的核心要求

1. 设计过程的数字化与可交互

智能制造的生产环节全面实现了数据互通，机械设计方案需要以数字化模型的形式接入整个生产系统，为加工、装配、检测环节提供实时数据支撑。传统二维图纸的信息承载量有限，且无法实现跨环节的数据同步，已经无法满足智能制造的需求，要求机械设计输出全参数化的三维数字模型，覆盖产品的尺寸、材料、工艺、公差等全维度信息，实现设计与生产环节的数据无缝对接。

2. 响应需求的快速迭代能力

智能制造场景下，消费端的个性化需求不断向生产端传导，多品种小批量已

经成为主流生产模式之一。机械设计需要能够根据需求的变化快速调整方案，完成参数迭代与性能验证，这要求设计方法打破传统串行设计的局限，构建并行化、模块化的设计框架，降低设计调整的成本，缩短新产品的上市周期。

3. 全生命周期的可追溯与优化

智能制造强调对产品全生命周期的管理，从设计、生产到使用、回收的各个环节都需要实现数据可追溯。机械设计环节需要预留全生命周期的数据接口，能够收集产品使用过程中的性能数据，反哺设计方案的持续优化，形成“设计-生产-使用-优化”的闭环体系。

三、面向智能制造的机械设计核心方法

1. 参数化数字化建模方法

参数化数字化建模是面向智能制造机械设计的基础，该方法以参数约束的方式构建产品三维模型，设计人员只需要调整关键参数，就能自动生成新的设计方案，无需重新绘制整体模型，大幅提升了设计调整的效率。同时，参数化模型承载了产品的全维度设计信息，能够直接导入智能制造系统的加工、检测模块，实现设计与生产的无缝衔接，避免了信息转换过程中的误差。目前，主流的三维设计软件都已经支持全参数化建模，为该方法的普及提供了工具支撑。

2. 模块化标准化设计方法

针对智能制造场景下的多品种小批量生产需求，模块化设计方法通过将产品拆解为多个功能独立的标准模块，设计人员只需要根据用户需求组合不同模块，就能快速生成完整的产品方案，既能够满足个性化需求，又控制了设计与生产成本。例如在工业机床设计中，将主轴系统、进给系统、控制系统分别设计为不同规格的标准模块，用户可以根据加工需求选择对应的模块组合，设计周期可以从传统的数月缩短至数天，大幅提升了响应速度。同时，模块化设计也便于产品的维护与升级，延长了产品的全生命周期。

3. 基于数字孪生的协同设计方法

数字孪生技术是智能制造的核心技术之一，将数字孪生应用到机械设计环节，可以构建与物理原型完全一致的数字孪生模型，在虚拟环境中完成产品的性能测试、工艺适配测试，替代传统的物理原型试验，既降低了原型制作成本，又缩短了验证周期。同时，数字孪生模型可以实现设计、工艺、生产、质检等多部门的协同设计，不同部门可以在同一个数字模型上完成调整与标注，避免了串行设计过程中的信息沟通误差，提升了设计的整体效率。设计人员还可以通过数字孪生模型模拟产品在不同工况下的运行性能，提前发现设计缺陷，完成方案优化，提

升产品的实际运行可靠性。

4. 数据驱动的智能化设计方法

依托制造业积累的大量设计与生产数据，基于人工智能的智能化设计方法已经逐步投入应用。该方法通过训练深度学习模型，学习过往成功设计方案的参数与性能对应关系，能够根据设计需求自动生成初步设计方案，再由设计人员进行调整优化，大幅降低了设计人员的重复劳动量，提升了方案生成的效率。

四、面向智能制造的机械设计优化流程构建

第一阶段为需求数字化输入与拆解。该阶段首先将用户的功能需求、性能需求、成本限制转化为可量化的设计指标，拆解为各个模块的参数约束，为后续设计提供明确的方向，避免传统设计中需求模糊导致的反复调整。需求拆解过程中可以依托大数据分析，挖掘用户需求背后的潜在偏好，提升设计方案的市场适配性。

第二阶段为方案生成与模块化组合。该阶段依托参数化建模工具与智能化设计系统，根据拆解后的需求生成初步设计方案，通过标准模块的组合完成整体方案的构建，对于特殊需求则定制开发非标准模块，平衡定制化需求与设计成本的关系。初步方案生成后，通过数字孪生模型完成初步的性能模拟，筛选出符合基本要求的方案进入下一阶段。

第三阶段为多目标优化与验证。该阶段以产品的性能、成本、工艺性为优化目标，通过多目标优化算法对设计参数进行调整，获得综合最优的设计方案。之后依托数字孪生模型完成全工况模拟验证，模拟产品在不同使用环境下的运行状态，验证方案的可靠性与稳定性，同时对接智能制造生产系统，验证设计方案的可加工性，调整不合理的公差与工艺要求，降低生产难度。

第四阶段为小批量试生产与数据反馈。完成设计验证后，进入小批量试生产环节，通过智能制造系统采集生产过程中的数据，分析设计方案在实际生产中的适配性，收集试生产过程中暴露的设计问题，完成最终的方案调整。该阶段依托智能制造的数据采集能力，可以快速获得设计方案的实际生产数据，比传统试生产的反馈周期更短。

五、结论

面向智能制造的机械设计方法与流程重构，是制造业智能化转型的重要环节。传统机械设计方法已经无法适配智能制造的柔性化生产需求，参数化建模、模块化设计、数字孪生协同设计等新型方法，从效率、精度、成本多个维度优化了机械设计过程，而闭环式的优化流程则实现了设计需求到持续优化的全链路管理。未来随着人工智能与数字孪生技术的进一步发展，机械设计的智能化水平将持续提升，为智能制造的发展提供更有力的支撑。

参考文献

- [1] 李培根, 高亮. 智能制造与机械工程创新[J]. 中国机械工程, 2018, 29(1): 11-16.
- [2] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 数字孪生技术及其在机械产品设计制造中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-14.
- [3] 王健, 张怀存. 模块化设计在智能制造中的应用研究[J]. 机械设计, 2020, 37(S1): 12-15.