

生成式AI驱动机械产品智能设计方法与应用研究

晏睿珊

太原理工大学, 中国·山西 太原 030024

摘要: 机械设计是装备制造产业链的重要组成部分, 对产品的性能及制造费用、寿命和工艺有根本性影响。传统设计所涉创新不多、更新缓慢、协作困难, 无法满足智能制造的发展需求。生成式 AI 依托大语言模型、对抗生成、扩散方法或拓扑生成等智能算法, 将设计各阶段统一起来, 重塑研发模式。本文针对生成式 AI 引发的机械设计新思路及其应用进行研究, 旨在用智能手段加快零部件设计进展、节省材料使用量, 为高端装备自主研发提供智能化技术支持。

关键词: 生成式 AI; 机械产品; 智能设计; 拓扑优化

Research on Generative AI-Driven Intelligent Design Methods and Applications for Mechanical Products

Yan Ruishan

Taiyuan University of Technology, China Shanxi Taiyuan 030024

Abstract: Mechanical design is a crucial component of the equipment manufacturing industry chain, fundamentally influencing product performance, manufacturing costs, lifespan, and processes. Traditional design methods involve limited innovation, slow updates, and collaboration challenges, failing to meet the demands of smart manufacturing. Generative AI, leveraging intelligent algorithms such as large language models, adversarial generation, diffusion methods, or topological generation, unifies various design stages and transforms R&D paradigms. This paper explores new design approaches and applications driven by generative AI, aiming to accelerate component design progress, reduce material consumption, and provide intelligent technical support for independent R&D of high-end equipment.

Keywords: Generative AI; Mechanical products; Intelligent design; Topology optimization

0 引言

目前, 我国有关生成式 AI 的机械设计尝试尚在局部试点中展开, 目前大模型所涉几何逻辑、工程现实、专业训练数据仍有缺项, 多数公司只用 AI 制作草图, 未建立全链条智能设计的标准方式。因此, 探究生成式 AI 驱动机械产品智能设计方法与应用至关重要。

1 生成式 AI 驱动机械产品智能设计核心技术体系

1.1 数据支撑层

高质量的机械工程数据集对生成模型的训练是基本前提, 包括四类核心数据。第一是三维零部件模型库, 包含齿轮、轴、箱体、机架、夹具一类的标准或特殊结构以 STEP、IGES 格式模型; 第二是多物理场仿真数据集, 包含应力、振动、温升、疲劳寿命仿真结果与对应结构参数; 第三是工艺限制类数据, 包括铸造、锻造、数控加工、3D 成型各项限制及材料公差、力学特性; 第四是文本形式的需求数据, 归纳所涉载荷、工、尺寸、费用等自然语言

条件。

目前, 行业通用模型所依附数据多来自网络一般图文, 机械相关实例不够丰富, 故行业落地多用 LoRA 微调处理, 按数百个零件完成适配即可, 企业不必投入大量数据搜集资源。同时要制定数据清理规范, 把无效仿真、非国标不适用结构予以剔除, 按逻辑绑定结构、性能、工艺各类标签。

1.2 模型算法层

1.2.1 大语言模型 (LLM)

负责自然语言的分析、设计依据查找、参数构造、仿真报告写作。如, 输入有关“模数 2.5、齿数 24、20 压力角的变速箱直齿轮, 要减重 15%”的文字, 模型即能对尺寸、材料及强度作出判断, 给出全部参数的说明及相应建模的指示性内容。

1.2.2 三维生成模型 (GAN、Stable Diffusion 3D)

基于文本、二维草图自动生成多版本三维结构方案, 支持轻量化拓扑创新造型, 解决传统建模造型单一、创新

度不足问题。

1.2.3 拓扑生成与强化学习优化模型

融合有限元仿真代理模型,以应力、重量、刚度、加工成本为多目标,迭代优化材料分布,自主生成仿生轻量化结构,适用于航空、工程机械承载构件设计。

1.3 智能设计功能层

以底层算法为手段把五种基本设计功能做封装,构成标准形式的智能模块:对需求做智能拆分、提出多方案概念、按参数建立模型、依约束优化性能、自动判断工艺可行性。模块开放 CAD/CAE 软件 API 接口,实现 AI 模型与 SolidWorks、UG、ANSYS 无缝联动,生成模型一键导入仿真软件开展精准校核^[1]。

1.4 工业协同应用层

面向企业研发团队搭建人机协同平台,集成版本管理、方案对比、仿真报告自动生成、设计数据归档功能,支持设计师、仿真工程师、工艺工程师在线协同修改 AI 生成方案,打通设计与下游加工环节数据链路。

2 生成式 AI 驱动机械产品一体化智能设计实施方法

2.1 多模态设计需求智能解析

传统设计所用的人工方法难以完整地按技术协议拆分各项指标,有遗漏风险。生成式 AI 是以大语言模型为基础的自动需求拆解工具,分为三步:第一是多模态输入,可处理文本、图纸、客户语音、二维草图等资料;第二为约束自动归类,将几何、性能、工艺及标准化等限制分别列出;第三是需求检查补缺,发现设计中未说明的参数即提醒设计者,不因缺项而使后期设计返工。例如,针对汽车变速箱齿轮设计来说,给出客户原始文本之后,AI 即能找出模数、齿数、载荷、转速、工艺等信息,指出无疲劳寿命数据,主动建议增加对应约束条件。

2.2 多方案概念自主生成与筛选

对所涉需求做完分析以后即启动三维生成程序,一次给出 8~15 个有差异的概念方案,避免人为主观定式。生成阶段已将基本工艺条件考虑在内,对不能由数控或 3D 打印实现的构造予以排除,少列无用方案。再以多维方式确定评价标准,按重量、刚度及加工/装配难易度来分项考察,AI 自行做初步打分、排位,选出前三个较优方案送交工程师处理,降低人工对比工作量。

2.3 参数化三维模型自动构建与轻量化优化

当最优概念方案已知时,大语言模型即给出完整尺寸

配置圆角、倒角及加强筋一类的工艺项,把公差作统一匹配。对所设计的承载部件采用拓扑方法训练强化学习模型,以有限元近似手段不断改进材料状态,在强度得到保证的情形下取得结构减重的效果。

实测工业机床床架经 AI 拓扑优化后,整体重量降低 22%,一阶固有振动频率提升 16%,兼顾轻量化与稳定性。

2.4 多物理场仿真校核与迭代修正

AI 所用的初始模型本身有几何错误或工程幻象的缺陷,不能脱离专业 CAE 系统做准确仿真,要以生成、仿真、反馈方式完成优化。完成一次仿真后即由 AI 抓取有关应力及疲劳的计算结果,分析可能的集中应力或共振点,按此提示修改结构参数来重做模型,直到各项性能达标为止。与旧式人工多次改模相比,AI 是对参数的自动迭代处理,所用优化时间(单次)可从 4~6 小时压缩到 20 分钟之内。

2.5 工艺适配校验与设计成果输出

对性能校核后,AI 可按照企业所用加工设备情况做工艺检验,分析结构与车床、铣床或 3D 打印机的匹配性,指出深孔、薄壁一类的难加工部分,提出简化方案。所提建议以三维形态、二维图样、BOM 表、仿真结论及加工说明的方式汇总起来,完整地给出设计结果,不需额外转换即能送入车间的生产流程。

3 生成式 AI 机械智能设计产业落地应用场景

3.1 汽车零部件智能设计

汽车所用的零部件多为标准化、批量型产品,是生成式 AI 初期可应用的领域。生成式 AI 可快速完成齿轮、转向节或电池支架一类部件设计。按传统方法处理变速箱齿轮(含参数、模型与强度)要花 3 小时,而借助 AI 设计只需 4 分钟,效率提高 45 倍以上;新能源汽车中所用的电池支撑结构如作拓扑优化,可使重量下降 18% 又不损抗冲击性能,降低单个零件材料成本。车企搭建专属汽车零部件微调生成模型,积累底盘、传动系统专业数据,抑制通用模型工程幻觉问题。

3.2 工业机床主机与机架轻量化设计

机床床身和立柱是大型重载所用的结构,过去设计多偏于保守、材料消耗大。若将生成式拓扑 AI 应用于这类设计,按给定载荷、振动条件及铸造可行性来计算,可自动获得仿生多孔轻型构造,既不损失刚度又较易减震,减轻重量^[2]。某机床厂试用 AI 设计手段之后发现,立柱铸件减重有 23% 的幅度,原材料费用因之降 17% 左右,高速运行振动减小 21%,所产机床的竞争力得到明显提升。

3.3 航空工程机械轻量化构件设计

航空装备所用材料必须满足重量、强度及疲劳寿命各项指标,而 3D 打印适合 AI 来设计复杂拓扑。AI 以应力、疲劳、气动等条件为依据自动构造仿生整体部件,不依赖多个零件的拼装焊接,有效避免缝隙、节省质量。从 NASA 已做试验的角度看,由 AI 创造的航空构件刚度是原设计的 3 倍左右,开发时间比以前少 90%,其表明生成式 AI 对高精轻型装备研发具有独特的优势。

3.4 非标工装、夹具快速定制设计

机械加工领域所用的非标夹具一般零散、更新次数较多,设计不易。利用已有夹具数据对三维生成方法作适当微调,按给定工件形状及夹紧要求、机床规格来计算,可在 10 分钟左右得到若干夹具配置,由系统自动验证夹紧强度,满足单件或小批生产的需要,使中、小型加工厂有关的人力开发成本减少 60% 以上。

4 生成式 AI 驱动机械智能设计现存瓶颈

4.1 专业工程数据集储备不足,模型适配性差

目前所用的通用生成模型主要靠一般性图像或文字做训练,机械三维模型及工艺类专门实例较少,若直接应用往往有几何错误或违背物理规律的幻觉现象。对于中小制造企业来说,已有零部件的三维资料、仿真说明未必完整,要建好标注数据集需要较多资源、较长时日,制约模型微调优化效果。

4.2 三维几何推理能力薄弱,复杂装配生成精度不足

目前所知的 3D 扩散方法及 GAN 都适合于单个零件的构造,若用于多零件装配或传动系统,如齿轮、连杆类组合时对空间限制的判断不够准确,常有干涉、尺寸不符现象。一般大语言模型只给出各零件数值而不处理整体联动关系,较难满足复杂装置的设计要求,仍要靠人做很多补充性修改与调整。

4.3 人机协同流程不规范,过度依赖 AI 存在工程风险

一些企业设计师简化校对步骤,用 AI 模型直接来指导生产,所用通用模型有隐含的尺寸或强度问题,往往造成设备断裂及事故。目前行业尚缺一标准,未明确 AI 生成方案强制仿真校核、工程师终审权责,人机分工边界模糊。

4.4 工业软件接口融合度低,全流程数据闭环未打通

现在一般企业所用的 CAD、CAE、ERP 也是孤立系统,生成式 AI 的模型目前只做单方面输出模型文件,不能利用车间反馈做逆向修正。设计、模拟、工艺及生产等信息彼此分开,无法持续改进智能设计结果,降低 AI 长期迭

代进化能力。

5 生成式 AI 机械智能设计优化发展路径

5.1 分层搭建行业专属机械工程数据集

按行业及企业分别来考虑数据的使用,由行业协会组织通用标准件或典型构件类公共数据的建设,给出微调用的轻量样本;制造企业应将既往设计都做数字归档,对零件、模拟、工艺统一做标注式数据库管理。利用 LoRA 方法做微调的轻量化处理,使各企业所用训练资源不致过大,能靠少量专有样本来引导模型进入行业状态,减少工程幻觉^[9]。

5.2 研发机械专用多模态三维生成模型

要解决通用模型在几何推理上的不足,应把有关机械约束的内容纳入专用生成方法中,以齿轮传动或连杆构造、装配干涉为基本规则,提高多件装配及传动设计的自动性。用有限元仿真所获代理模型作为生成算法的基础工具,在生成物形成时即检查强度与振动限制,从起点上减少有缺陷的方案数量。

5.3 建立标准化人机协同设计规范,明确权责边界

制定机械 AI 智能设计操作规范,把“由 AI 提出方案、由工程师最后定夺”当作基本准则,强制要求所用的 AI 模型要按全物理场仿真及工艺分析两项标准加以检验,保存设计者修改、校核的痕迹,对设计质量作终身责任追究。按人机分工处理任务,AI 做大量方案、做参数试验、做常规建模;工程师要掌握需求、判断方案、分析风险、把握创新的可行性与方向。

5.4 推进工业软件一体化集成,构建全链路数据闭环

应把生成式 AI 所用平台同 CAD 三维设计及 CAE 仿真、CAM 加工、ERP 生产等软件连接起来,使设计、仿真、加工、售后信息能双向流动。按车间实际缺陷或设备运行状况反馈数据给 AI 做长期训练,持续提升智能设计方案工艺适配性。

5.5 培育复合型机械智能设计人才

一般机械工程师不熟悉 AI 模型或有关数据的处理,而人工智能专家缺少对机械、工艺的基本了解。高校应和企业共同组织“机械+人工智能”类课程,把机械构造、仿真计算、AI 方法都纳入人才培养内容,培养复合型研发人员;企业有计划地展开人工智能设计实操培训,建立工程师 AI 工具考核上岗制度。

6 结语

生成式人工智能取代过去机械设计所依赖的线性研发思路,以多模态生成及多目标自动优化为手段完成对需求

的分析、对方案的构思、对模型的改进、对仿真的验证,使各阶段都可得到智能处理,能较好地克服传统设计周期长、创新少、轻量化不易达成等困难,在汽车、机床、航空、非标夹具等领域中展现显著提质降本增效价值。目前,生成式 AI 机械智能在实际应用上还存在专业数据少、三维几何推理弱、人机配合不完善、工业软件不兼容等困难。有关制造行业应把协会及软件公司纳入协作体系,按层次组织专门的工程数据资源,考虑机械类专用生成方法,制定统一的人机审核流程,使整条产业链的工业软件能相互对接,同时注意对复合人才的培养,持续推动我国高端机械装备自主创新与智能制造产业高质量发展。

参考文献:

- [1] 林庆旭. 人工智能在机械设计制造及自动化中的运用分析[J]. 现代制造技术与装备, 2025,61 (12):183-185. DOI:10.16107/j.cnki.mmte.2025.0817.
- [2] 任莹莹, 丁淑敏. 简述人工智能在机械设计制造及其自动化中的应用[J]. 上海轻工业, 2025(6):103-105.
- [3] 向成刚. 人工智能在汽车配件机械设计与制造中的应用研究[J]. 大众汽车, 2025(10):25-27.

作者简介: 晏睿珊(2005.05-), 女, 汉族, 陕西商洛人, 大三在读, 学生, 研究方向: 从事机械设计制造及其自动化研究。