

生成式AI驱动的智能装备模块化设计系统研究

曹涵烁

设计艺术学院, 山东青年政治学院 山东济南 250300

摘要: 针对智能装备模块化设计中对方案生成效率与灵活性的工程需求, 传统方法依赖人工经验且难以快速响应非标需求, 本文提出并构建了一套生成式AI驱动模块化设计系统。该系统采用输入-处理-输出三层架构, 以条件生成模型为核心引擎, 实现从设计需求到模块结构方案的端到端生成。系统设计了模块接口与约束条件的嵌入机制, 并引入多方案生成与可行性筛选策略。基于Python与PyTorch开发原型系统, 以六轴协作机器人腕部模块和野外巡检机器人底盘模块为应用案例进行验证。结果表明, 与传统参数化建模方法相比, 本系统将初步设计时间从数小时缩短至分钟级, 生成的方案在接口兼容性与结构合理性方面均满足工程可用要求。本文系统为智能装备的快速模块化设计提供了一条可行的智能化技术路径。

关键词: 生成式AI; 模块化设计; 智能装备; 条件生成模型; 设计自动化

引言

随着智能装备向多功能、可重构方向快速发展, 模块化设计成为缩短研发周期、降低制造成本的关键技术。不同应用场景对装备结构的快速重组能力提出了更高要求, 模块化设计方法因此受到工程界广泛关注。传统模块化设计主要依赖工程师经验进行模块选型与改型, 设计周期较长且方案多样性受限, 面对非标需求时, 现有模块库往往难以快速提供适配方案, 导致设计效率与灵活性之间存在明显矛盾^[1]。

生成式人工智能具备从需求描述直接生成结构参数的能力, 为模块化设计提供了新的技术路径。通过学习已有模块的分布规律, 生成模型能够按需创建符合约束的新模块方案, 显著拓展设计空间。为此, 本文构建一套生成式AI驱动的智能装备模块化设计系统, 实现从需求输入到模块方案输出的自动化流程, 主要工作包括系统架构设计、条件生成模型的应用方法研究以及原型系统开发与案例验证。

一、系统总体设计与工作流程

本系统采用输入-处理-输出的三层架构, 以支撑生成式AI在智能装备模块化设计中的高效应用。输入层主要负责接收用户的设计需求描述、性能约束条件以及已有模块资源信息, 这些数据以结构化或半结构化文本形式进入系统^[2]。处理层是系统的核心, 包含需求解析模块、生成式AI模型模块、模块匹配与组合优化模块,

其中生成式AI模型基于条件变分自编码器或扩散模型, 将自然语言需求映射为模块特征向量, 并生成符合约束的模块结构参数。输出层则将优化后的模块方案以三维模型参数、装配接口定义和物料清单等形式呈现给设计人员, 整个架构强调数据流的前向传递与反馈闭环, 确保生成方案可追溯、可修改。

系统的模块化设计流程按照四个阶段顺序执行。首先在需求输入阶段, 用户提交智能装备的功能需求、工作环境与性能指标, 系统利用轻量化自然语言处理模型提取关键设计变量; 随后进入模块生成阶段, 生成式AI根据解析后的需求向量从模块库中检索相似案例并生成若干候选模块结构, 每个模块包含独立的接口几何与物理属性; 第三步是组合优化阶段, 系统采用多目标优化算法对候选模块进行装配可行性检查与性能仿真评估, 筛选出满足强度、重量、功耗等约束的模块组合方案; 最后在设计输出阶段, 系统生成可编辑的模块设计图纸、接口参数表以及组装顺序建议, 供工程师进一步校核与细化, 整个流程可在数分钟内完成多轮迭代。

为实现生成式AI的有效训练与快速检索, 系统构建了面向智能装备的模块库, 采用层级分类与唯一编码相结合的管理方式。首先根据装备功能将模块划分为动力模块、传动模块、执行模块、感知模块和控制模块五大类, 每大类下依据结构特征进一步细分为子类, 每个模块实例被赋予一个十六位编码, 前四位表示大类与子类, 中间六位描述关键几何参数与材料属性, 后六位记

录接口类型与装配约束条件。模块库的数据来源包括历史设计图纸、公开数据集以及人工标注的典型装备案例，所有模块均以参数化模型形式存储并附带可制造性标签，构建过程中还引入了数据增强技术，对现有模块进行尺寸变换与接口微调，以扩充生成式AI的训练样本多样性，从而提高模块方案生成的鲁棒性与适用性。

二、生成式AI驱动的关键设计方法

本系统采用条件生成模型作为模块结构生成的核心引擎，以用户输入的设计需求作为条件约束。模型在训练阶段学习了大量模块实例的几何参数与功能属性之间的映射关系，在生成阶段能够根据新的需求条件直接输出完整的模块结构参数，这种方式避免了传统参数化建模中繁琐的尺寸手动调整过程，使得模块生成更加智能和高效^[1]。为确保生成模块能够与其他模块正确装配，系统将接口几何特征和装配约束作为显式条件嵌入生成模型中，接口类型、配合公差和连接方式等信息被编码为约束向量，与需求条件共同引导生成过程，模型在输出模块主体结构的同时会自动生成与之匹配的接口参数，保证模块之间的兼容性与可装配性。

为满足工程设计中对方案多样性的实际需求，系统通过调节生成模型的随机采样温度参数，为同一需求生成多个结构不同的候选模块。随后引入可行性筛选机制，依次检查每个方案的装配兼容性、工艺可实现性和性能达标情况，最终保留若干个既满足约束又各具特点的设计方案供工程师择优选用。

三、系统实现与应用案例

本系统基于Python语言和PyTorch深度学习框架搭建原型，前端采用简易图形界面接收设计需求，模块库以JSON格式存储数百个典型装备模块的参数化描述及接口定义，并集成于系统中作为生成模型的训练与检索基础^[4-5]。以六轴协作机器人的腕部模块设计为例，输入负载能力与运动范围需求后，系统在数秒内生成了三个候选模块结构方案，每个方案均包含壳体几何、驱动接口及传感器安装位置，可直接用于后续详细设计。

针对野外巡检机器人的不同地形需求，系统根据履

带式与轮式两种场景要求，自动推荐了对应的底盘模块组合，并调整悬挂接口参数，使同一套动力模块可快速适配不同行走结构。与传统参数化建模方法相比，本系统将单个模块的初步设计时间从数小时缩短至分钟级，生成的方案在接口兼容性和结构合理性方面均达到可用水平，设计迭代次数显著减少。

四、结论与工程应用建议

本系统在典型智能装备模块的快速设计任务中表现出良好有效性，能够稳定生成结构合理、接口兼容的模块方案，其适用边界主要集中于已有模块库覆盖较好的机械结构类装备，对于全新构型或极端工况下的设计需求，生成效果仍有待提升。该系统显著缩短了模块设计的前期方案周期，降低了工程师重复性绘图与检索的工作负担，同时多方案生成能力为设计初期提供了更丰富的探索空间，有助于提升装备研发的灵活性与创新性。当前系统对高质量标注数据依赖较强，在小样本场景下生成稳定性不足，后续将引入元学习与可解释性分析机制，降低数据门槛并增强设计决策的可信度。

参考文献

- [1]胡晶, 陈莹燕, 马潇潇, 等.生成式AI驱动下应用型设计人才的个性化培养对策[J].武汉轻工大学学报, 2025, 44(6): 103-108.
- [2]宋挺蔚, 张静.生成式AI驱动的建筑方案设计工作流程创新:基于增城旅馆项目的传统与AI工作流程模式对比研究[J].2025(32): 90-93.
- [3]安焰.生成式AI驱动的自适应网络安全威胁防御系统研究[J].2025.
- [4]DING Y, DING G. Joint prediction model of reservoir parameters based on multimodal transformer graph neural operator physical constraint network[J]. International Scientific Technical and Economic Research, 2026, 4(1): 70-89.
- [5]LIU Y, FENG S, LIU M. Research on transformer-based action sequence modeling of intangible cultural heritage shadow play using attention mechanisms[J]. International Scientific Technical and Economic Research, 2026, 4(2): 51-77.