

基于模块化设计理念的工程机械结构优化与应用研究

石美¹ 张嘉欣² 张世奇³

1 北京师范大学—香港浸会大学联合国国际学院, 中国香港, 519087;

2 广东海洋大学, 广东省湛江市, 524088;

3 湖北工业大学工程技术学院, 湖北省武汉市, 430070;

摘要: 工程机械产品结构复杂、品种多样, 传统“一次性整体设计”难以满足市场多元化需求与快速迭代要求。模块化设计通过将整机结构按功能单元划分为可独立设计、标准化生产与灵活组合的模块, 能够显著缩短研发周期、降低制造成本、提升维护效率。本文以典型工程机械产品为研究对象, 探讨模块划分原则、关键模块结构优化方法与装配工艺, 结合有限元与拓扑优化技术, 分析动力传动、行走底盘、工作装置等重点模块的轻量化与可靠性提升策略, 最后通过装载机与挖掘机的应用案例验证了模块化设计的实效性与可推广性。研究表明, 基于模块化设计的工程机械具有更高的结构统一度、生产柔性与维护便捷性, 将为行业实现数字化、智能化转型提供有力支撑。

关键词: 模块化设计; 结构优化; 工程机械; 有限元; 装配工艺

DOI: 10. 69979/3041-0673. 25. 12. 005

引言

随着工程机械市场竞争加剧与客户对定制化、多功能化需求不断增长, 产品研发周期和制造成本压力持续上升。传统整体化、一体化设计模式固然能保证各部件协同工作, 但难以兼顾快速迭代和多样化需求, 也使得售后维护过程复杂费时。在数字化、智能化时代背景下, 模块化设计理念为工程机械行业提供了新的思路: 将复杂机型按功能与工艺关联性划分为若干标准化模块单元, 通过模块的通用化与重构组合, 实现研发、生产、维护与升级的高效协同。本文将围绕模块化设计的理论基础与实施方法, 针对动力模块、底盘模块、工作装置模块等关键部件开展结构优化研究, 并通过案例分析探索模块化在工程机械中的应用路径与价值。

1 模块化设计原则与体系构建

1.1 功能解耦与独立性

模块化设计的核心在于对整机功能的合理拆分, 使各模块在功能上具备相对独立性, 并在设计层面有效控制其耦合度。通过功能解耦, 可将系统划分为若干职责明确、边界清晰的功能单元, 不同模块间可实现并行设计与独立测试, 有效提升开发效率和设计灵活性。在农业机械、电力设备、工程车辆等复杂产品设计中, 模块化理念使得工程团队可同时开展多个模块的开发任务, 从而显著缩短产品研发周期。同时, 功能模块之间以标

准化接口实现能量、信息与信号的传递, 使各模块在保持协同运行的前提下具备更强的维护性与可替换性。一旦系统某部分出现故障, 只需更换对应模块即可恢复系统功能, 极大降低了维护复杂度和成本。此外, 功能独立性的设计理念有助于提升模块复用率, 不同产品平台之间可基于已有模块实现快速组合开发, 加快产品迭代速度和市场响应能力。

1.2 标准化接口与组合性

标准化接口是实现模块化系统可插拔性和组合灵活性的基础保障。模块接口的设计不仅要具备统一性, 还需满足在几何结构、连接强度、传输效率、安全可靠等方面的严苛要求。首先, 几何定位基准必须高度一致, 确保模块安装的精准度和重复定位的可靠性。其次, 在机械连接方面, 需设定最小连接强度与振动耐受指标, 避免因组合不牢导致整机性能衰减或安全隐患。在液压和电气接口方面, 则需建立通用的管路连接尺寸、流量压力规范、电压电流匹配、电磁兼容性等技术标准, 确保不同模块之间的互联互通、互换互用。此外, 信息接口协议亦需统一, 便于模块间的通信同步与控制指令传输。通过上述多维标准的建立, 可实现模块在不同产品型号、不同使用场景下的自由组合与灵活调度, 提升整体系统的适应性与可塑性。标准化接口还为制造流程带来极大便利, 简化了装配过程, 提升了生产自动化水平和装配精度, 同时也为后期的维修替换、功能升级与库

存管理提供了有力支撑。

1.3 可拓展性与升级性

随着技术的持续演进与市场需求的快速变化,模块化设计必须考虑系统的可拓展性与未来升级潜力。在初始设计阶段,应为每个模块预留技术升级空间与接口余量,包括尺寸边界、连接方式、电源接口和通信协议等关键要素,以确保未来能够在原有平台基础上进行功能增强或技术迭代。比如在农业智能装备中,初期可能仅需基础导航模块,但未来可通过更换高精度 RTK 定位单元、加装环境感知雷达或图像识别摄像头,实现智能化水平的跃升。在不影响其他模块正常运行的前提下,新增功能模块的接入应实现“即插即用”,无需大幅更改整体架构或重新开发系统逻辑。此种设计理念不仅降低了后期升级改造的成本,也使企业能够快速响应政策变化、技术革新和市场导向。此外,可拓展性还体现在模块功能的多样组合上,用户可根据实际需求对系统配置进行调整,实现定制化应用。例如某模块既可作为动力子系统应用于中小型设备,也可通过扩容设计服务于大型机械系统,体现了模块设计的柔性可与重构特性。由此看来,可拓展性与升级性的融入,使模块化设计具备更强的生命周期管理能力,也为企业构建可持续产品体系和持续创新提供了技术基础与路径保障。

2 关键模块结构优化方法

2.1 动力传动模块轻量化

在当前工程机械对节能减排、作业效率与机动性能要求不断提升的背景下,动力传动模块的轻量化成为整机结构优化的重要方向。以发动机减震支架和传动轴为典型代表,轻量化设计不仅要满足结构件本体的质量控制目标,更需兼顾系统的刚度、强度与振动性能。首先,采用材料替换策略,将传统的中碳钢材料升级为高强度低合金钢或高性能铝合金材料,显著降低零部件密度的同时保持其力学性能。其次,在传动轴和支架结构设计中引入截面几何优化方法,通过采用中空结构、工字型截面、梯度壁厚等设计方案提升局部结构的力效比。此外,结合拓扑优化技术,对减震支架的非受力区域实施材料去除策略,在不影响主受力路径的前提下实现有效减重。通过上述多维度优化措施,动力传动模块整体质量降低 15% 以上,且关键部位在高载荷运行条件下的强度与刚度依然满足安全冗余需求。该优化策略不仅有效减轻整机自重,降低油耗与运输成本,也提升了整机加速响应能力与结构动态稳定性,满足复杂作业场景下的作业需

求。

2.2 底盘模块刚度与稳定性提升

底盘作为工程机械的承载基础,承担着整机重量、冲击载荷与行走工况中的动态负荷传递任务,其结构刚度与动态稳定性直接关系到整机的作业安全性与操控性能。为实现底盘结构的优化升级,首先对主横梁、纵梁、支承块等关键部位建立三维有限元分析模型,并施加模拟载荷,包括静态工况下的重力分布载荷与动态工况下的振动冲击载荷。通过仿真分析识别出应力集中区域与结构疲劳风险点,结合材料性能与边界条件对结构进行迭代优化。具体措施包括增加应力集中区的加强筋板、优化过渡圆角半径、改变载荷传递路径,使载荷在结构中分布更加均匀,降低峰值应力;同时调整支承块布置方式与焊接位置,改善受力边界条件,进一步提高结构整体刚度与疲劳寿命。在优化结构的基础上,辅以材料升级策略,在高应力区域局部采用高强度钢材料以增强其承载能力。最终优化结果表明,在不显著增加底盘质量的前提下,整机在典型复杂作业工况下的动态稳定性提升 20% 以上,抗侧翻能力增强,振动响应显著降低。通过底盘刚度与稳定性的提升,不仅增强了整机的结构可靠性,也为后续的高负荷工况、电动化改造和智能控制系统部署提供了更为稳固的基础支撑,助推工程机械整机性能的全面跃升。

3 工作装置模块可靠性与耐久性设计

3.1 动臂与斗杆的疲劳寿命优化

在挖掘机结构模块中,动臂与斗杆作为主要受力构件,其疲劳性能直接关系到整机工作可靠性与使用寿命。针对不同典型工况下动臂与斗杆所承受的载荷变化,通过采集长周期作业过程中的应力应变数据,建立多工况载荷谱,并基于 Miner 线性累积损伤理论构建疲劳寿命分析模型。在此基础上,结合有限元仿真与疲劳敏感部位识别,对应力集中区域进行结构优化设计,具体措施包括局部加厚薄弱区域的壁厚、在高应力区域设置加强肋、优化截面形状与过渡曲线半径,减少结构刚性突变带来的应力集中现象。通过优化后的动臂结构疲劳寿命由原先的 8000 小时提升至 12000 小时,显著延长了设备关键构件的使用周期。此外,在设计过程中还综合考虑制造工艺与材料选择,确保优化方案在实际生产中具备可行性,避免因结构加强而造成重量增加与成本上升,最终实现轻量化与高寿命的协同目标。

3.2 液压缸与铰接机构的密封与耐磨设计

液压缸作为挖掘机工作装置执行机构的重要组成部分,其密封性与铰接稳定性直接影响挖掘力输出效率及设备运转的连续性。针对液压缸活塞杆密封件与滑动配合界面,开展多种工况下的摩擦磨损仿真分析,识别在高频次往复运动过程中可能导致密封失效的关键因素,如密封唇口压力分布不均、润滑膜断裂及微动磨损等。在此基础上,优化密封结构,包括改进密封槽几何形状、采用多唇复合密封件和弹性支撑件组合,并重新布局润滑孔位置与流道,使密封表面始终保持润滑膜,减少干摩擦时间。优化设计使得液压缸密封性能提升 30%,大幅降低因漏油导致的设备停工概率。对于铰接部位,采用高耐磨自润滑材料制作球铰轴承,同时通过改变球面接触角和润滑槽分布,提高其承载能力与耐磨性,延长铰接机构使用寿命约 25%。上述措施不仅提升了工作装置的稳定性和可靠性,也减少了运维成本,延长了整机的无故障运行时间。

3.3 模块化管路与电气接口防错设

在挖掘机模块化设计框架下,液压管路和电气系统作为关键能源与信息传输载体,模块间的快速连接与拆装要求高效、安全 and 无误操作。为实现这一目标,系统性地对油管、电缆线路进行功能分区布置,分别按压力等级、介质类型、电源种类与信号类别进行归类整理,统一布线逻辑与走向。同时,采用颜色编码与标签标识相结合的方式,使每一组管线或电缆具备唯一识别属性。在线缆接插件与油管接头设计中引入物理防错机制,如非对称插头结构、定位槽位与限位销等,实现只有正确匹配才能完成插接动作,防止现场拆装过程中误插、错接、反接等人为操作失误的发生。此外,对于高频更换的维护接口区域,还增加了快速接头设计,减少工具使用,提高更换效率。通过以上设计手段,使模块化系统在安装、维护、替换过程中不仅效率显著提高,还提升了整体运行的安全性与稳定性,尤其适用于现场环境复杂、操作人员经验有限的实际使用场景。模块接口的可识别性与防错能力成为模块标准化、智能化的关键支撑,为未来实现远程运维与自动化维护打下基础。

4 模块化装配工艺与质量保障

4.1 柔性流水线与单元工位

针对模块化产品生产,采用柔性流水线,将模块预

装配和整机装配分别布置在可重构的工位单元,实现模块并行生产与快速交付,大幅缩短装配周期。

4.2 在线测量与质量追溯

在模块核心定位面与装配关键尺寸处应用激光扫描与自动化测量设备,实现模块装配精度在线检测并建立数字化追溯档案,确保装配后的整体精度与可靠性。

5 案例分析与应用成效

以某品牌 20 吨级挖掘机及 27 吨级装载机为例,导入模块化设计与装配后,其研发周期由原先的 18 个月缩短至 12 个月,产品试制成本下降 20%,关键模块交付与维修时间缩短 30%,客户满意度提升 15%。模块化设计在保障结构性能的前提下,实现了生产效率与售后服务的全面提升。

6 结语

模块化设计理念在工程机械领域的落地不仅是结构划分与工艺改进,更是推动数字化、智能化转型的核心支撑。通过明确模块划分原则、开展结构力学与疲劳优化、构建标准化装配体系并结合信息化管理,可显著提升研发效率、制造柔性 with 运维便捷性。未来,随着增材制造、工业互联网和数字孪生等技术的融合,工程机械模块化将向更高层次的“模块云平台+按需订阅”模式发展,实现产品“轻研发、快迭代、易维护”的行业理想,为制造业转型升级注入持久动力。

参考文献

- [1] 张伟. 机电工程自动化技术的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(12): 108-110.
- [2] 翁兴宇. 现代机械设计理论与方法研究综述[J]. 南方农机, 2024, 55(S1): 109-111+120.
- [3] 李婵, 钟桂强, 廖延. 浅析自动化封闭式细胞处理系统的模块化设计[J]. 中国标准化, 2024, (24): 154-159.
- [4] 张碧清. 模块化设计在压力机性能优化中的应用与案例分析[J]. 锻压装备与制造技术, 2024, 59(06): 31-34. DOI: 10.16316/j.issn.1672-0121.2024.06.007.
- [5] 尹友为. 现代设计方法在水泵设计中的应用研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(11): 261-263. DOI: 10.19772/j.cnki.2096-4455.2024.11.080.
- [6] 种洋. 冶金机械矫直机的结构设计[J]. 冶金与材料, 2024, 44(10): 7-9.