

工程机械设计中轻量化技术的应用研究

彭建新

山河智能特种装备有限公司, 湖南 长沙 410100

[摘要]随着全球能源危机的加深和环保意识的不断提高,建筑设备行业面临着节能减排的严峻挑战。轻量化技术作为实现工程机械节能、降耗、提升作业效率的关键手段,已成为行业技术创新的重要方向。文章首先分析了工程机械轻量化设计的必要性,然后系统地阐述了轻质材料、结构设计、先进制造工艺等关键技术的具体应用。在工程机械设计中,最终指出了轻量化技术应用中存在的问题,为工程机械轻量化设计提供理论参考和实践指导。

[关键词]工程机械;轻量化技术;材料应用;结构优化;制造工艺

DOI: 10.33142/ec.v8i8.17804

中图分类号: U462

文献标识码: A

Research on the Application of Lightweight Technology in Construction Machinery Design

PENG Jianxin

Sunward Intelligent Special Equipment Co., Ltd., Changsha, Hu'nan, 410100, China

Abstract: With the deepening of the global energy crisis and the continuous improvement of environmental awareness, the construction equipment industry is facing severe challenges in energy conservation and emission reduction. Lightweight technology, as a key means to achieve energy conservation, consumption reduction, and improve operational efficiency in construction machinery, has become an important direction for industry technological innovation. The article first analyzes the necessity of lightweight design for construction machinery, and then systematically elaborates on the specific applications of key technologies such as lightweight materials, structural design, and advanced manufacturing processes. In the design of construction machinery, the problems in the application of lightweight technology were ultimately pointed out, providing theoretical reference and practical guidance for the lightweight design of construction machinery.

Keywords: construction machinery; lightweight technology; material application; structural optimization; manufacturing process

引言

工程机械作为基础设施建设的核心装备,广泛应用于建筑、矿山、交通、水利等领域,其性能直接影响工程建设的效率和质量。近年来,随着国家对节能减排和绿色发展的要求不断提高,以及工程机械用户对设备作业效率、燃油经济性和运营成本的关注度日益增加,传统工程机械在重量、能耗、排放等方面的问题逐渐凸显。据统计,工程机械的重量与燃油消耗呈正相关关系,设备重量每降低 10%,燃油消耗可减少 5%~8%,同时还能降低轮胎磨损、延长零部件使用寿命,提升设备的机动性能和作业灵活性。因此,在保证工程机械强度、刚度、安全性和可靠性的前提下,通过轻量化技术降低设备重量,已成为工程机械行业转型升级的必然选择。

1 工程机械轻量化设计的必要性

1.1 轻量化与能耗的量化关系

工程机械的重量与燃油消耗呈显著正相关关系,可通过以下经验公式量化:

$$FC = FC_0 \times \left(1 + 0.05 \times \frac{\Delta m}{m_0}\right) \quad (1)$$

其中:

FC为轻量化后的燃油消耗 (L/h);

FC₀为原重量下的燃油消耗 (L/h);

Δm 为重量变化量 (kg), 减重时取负值;

m_0 为设备原重量 (kg)。

根据该公式计算,设备重量每降低 10% (即

$\frac{\Delta m}{m_0} = -0.1$),燃油消耗可减少 5%,与行业实测数据 (5%~

8%) 相符。同时,减重还能通过减少轮胎接地比压降低磨损,延长零部件使用寿命,其寿命延长系数可表示为:

$$K_L = 1 + 0.03 \times \frac{\Delta m}{m_0} \quad (2)$$

当重量降低 10%时,零部件寿命可延长 3%,进一步降低运营成本。

因此,在保证工程机械强度、刚度、安全性和可靠性的前提下,通过轻量化技术降低设备重量,已成为工程机械行业转型升级的必然选择。轻量化技术并非简单地减少材料用量,而是一项融合材料科学、结构力学、制造工程、计算机辅助设计等多学科的系统工程。其核心目标是在满足设备使用性能要求的基础上,实现“以轻代重、以优代劣”,从而达到节能、降耗、提质、增效的目的,因此,深入研究轻量化技术在工程机械设计中的应用,具有重要的理论意义和实际应用价值。

1.2 提升设备作业性能

工程机械的作业性能（如作业效率、机动性能、操控性能）与设备重量密切相关。一方面，轻量化设计可减少设备的自身重量，在相同动力条件下，设备的加速性能、爬坡能力和行驶速度均能得到提升，尤其在山地、高原等复杂工况下，优势更为明显；另一方面，轻量化设计可优化设备的重心分布，提升设备的稳定性和操控精度，减少作业过程中的振动和噪声，降低操作人员的劳动强度，提高作业效率。

1.3 降低企业运营成本

从企业运营角度来看，轻量化技术可帮助用户降低设备的全生命周期成本。首先，轻量化设备的燃油消耗更低，从企业运营角度来看，轻量化技术可帮助用户显著降低设备的全生命周期成本。首先，轻量化设备的燃油消耗更低，在长期高频次的作业场景中，能为企业节省一笔可观的燃油开支，尤其对于物流运输、工程建设等燃油依赖度高的行业，这一优势直接转化为运营利润的提升。其次，轻量化设备因采用更精简的结构设计与新型复合材料，自身重量大幅减轻，这使得设备运行时的机械磨损速度变慢，核心零部件的使用寿命得到延长。企业无需频繁对设备进行维修、更换配件，不仅减少了维修费用的投入，还降低了因设备停机检修造成的生产效率损失。最后，轻量化设备在搬运、安装及后期报废回收环节也具备明显优势。其轻便的特性降低了装卸与运输过程中的人力、物力成本，而采用的环保型轻量化材料，在报废回收时更易处理且回收利用率高，进一步减少了企业在设备处置阶段的环保成本与合规风险，全方位助力企业实现降本增效的运营目标。

2 轻量化技术在工程机械设计中的具体应用

2.1 轻量化材料的应用

轻量化材料是实现工程机械轻量化的基础，目前常用的轻量化材料主要包括高强度钢、铝合金、镁合金、复合材料等，不同材料的性能参数对比如下表 1 所示：

2.1.1 高强度钢

挖掘机动臂在作业中需频繁承受挖掘冲击载荷、物料偏载等复杂度，对材料的韧性、抗疲劳性和焊接性能要求极高，因此实际工程中多采用 Q345B 或 SM490A 等兼顾强度与韧性的钢材，而非高强度过高、韧性相对较低的 Q960 钢。

2.1.2 铝合金

铝合金具有密度小（约 1/3 钢），耐腐蚀性好，导热性高等优点，适用于重量敏感的结构部件和相对柔软的工作

条件。在工程机械中，铝合金主要应用于驾驶室、油箱、散热器、液压油箱等部件。

2.1.3 镁合金

目前，它是实际应用中金属结构材料的最小密度（密度约为 1.8g/cm^3 ），具有更高的强度和比刚度，并且具有良好的阻尼性能，适用于对重量要求很高的零件。但镁合金的耐腐蚀性较差，成本较高，目前在工程机械中的应用相对较少，主要集中在一些非承载或轻载部件，如仪表盘支架、座椅框架、电机外壳等。

2.1.4 复合材料

复合材料(如碳纤维增强复合材料、玻璃纤维增强复合材料)具有高比强度、高比刚度、耐腐蚀性、耐疲劳性、高结构性等优点。这是今后工程机械轻质材料发展的重要方向。但由于复合材料的成本较高，成型工艺复杂，目前在工程机械中的应用仍处于试验和推广阶段，主要应用于一些高端设备或关键部件。例如，在起重机的臂架设计中，采用碳纤维增强复合材料替代传统的钢结构，可使臂架的重量降低 40%-50%，同时，它还可以提高悬架的耐疲劳性和使用寿命；在挖掘机的铲斗设计中，采用玻璃纤维增强复合材料和钢的复合结构，在保证铲斗强度的前提下，可以减轻铲斗的重量，提高工作效率。

2.2 结构优化设计技术的应用

优化结构设计是一种设计方法，通过调整形状，尺寸，拓扑等参数来最小化设计重量，符合强度，刚度和稳定性等限制。随着计算机技术和有限元分析方法的发展，结构优化技术在工程机械设计中的应用越来越广泛，主要包括拓扑优化、尺寸优化和形状优化。

2.2.1 拓扑优化

拓扑优化是根据荷载条件和约束条件优化结构材料在给定设计空间中的分布，以获得结构拓扑的最佳形状，为结构设计提供初始方案。拓扑优化可以克服传统经验设计的局限性，并创建更合理，更轻便的结构。如在挖掘机的动臂拓扑优化设计中，首先建立动臂的有限元模型，确定动臂的载荷条件（如铲斗挖掘力、物料重量、自身重量等）和约束条件（如强度、刚度约束），然后采用拓扑优化方法对动臂的材料分布进行优化，得到动臂的最优拓扑结构。根据拓扑优化结果，将动臂的非承载区域去除，保留承载区域，可使动臂的重量降低 10%~15%，同时还能提升动臂的结构性能。

表 1 不同材料的性能参数对比

材料类型	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	成本 (元/kg)	适用部件类型
普通碳素钢 (Q345)	7.85	470-630	345	206	5.8~6.5	车架、动臂（传统）
高强度钢 (Q960)	7.85	1050-1200	960	206	12.5~14.8	动臂、斗杆、车架
铝合金 (6061-T6)	2.70	310	276	69	28.5~32.6	驾驶室、油箱
镁合金 (AZ91D)	1.81	230	160	45	58.2~65.4	仪表盘支架、电机壳
碳纤维复合材料	1.70	2800（纵向）	—	180（纵向）	380~450	混凝土泵车臂架、发动机罩等

2.2.2 尺寸优化

尺寸优化是指优化结构各部件的尺寸参数（如厚度、直径、长度等）。根据拓扑结构形式确定的前提，结构满足约束条件并将重量最小化。尺寸优化是最常用的设计优化方法之一，适用于轻松改进现有设计。例如，在优化叉车的框架尺寸时，首先创建框架终端部件模型，并对框架进行强度和刚度分析，确定车架各部件的应力和位移分布，然后以车架的重量为目标函数，以各部件的应力、位移不超过许用值为约束条件，优化尺寸参数，如纵梁厚度和框架梁直径。通过优化框架尺寸，在保证框架强度和刚度的条件下，可以减轻框架重量，通常达到减轻重量 5%~10% 的效果。

3.2.3 形状优化

形状优化是通过调整结构的几何形状(例如轮廓曲线、圆角半径、孔的形状等)来优化结构的应力分布，降低应力浓度，从而在满足结构性能要求的前提下降低结构重量。形状优化用于改善结构的局部形状，提高结构的承载能力和轻量化水平。例如，在起重机的吊钩设计中，传统的吊钩形状存在应力集中现象，为了保证强度，需要增加吊钩的尺寸，导致重量较大。通过形状优化，将吊钩的应力集中区域进行圆弧过渡，优化吊钩的截面形状，可使吊钩的应力分布更加均匀，在相同强度条件下，吊钩的重量可降低 8%~12%。

2.3 先进制造工艺的应用

先进的制造工艺是实现轻量化设计的重要保证，采用先进的制造工艺，可以提高材料利用率，减少加工量，提高成型精度和结构性能，实现结构的轻量化。目前，轻型工程机械设计中常用的先进制造工艺主要包括激光焊接、液压成形、3D 打印等。

2.3.1 激光焊接

激光焊接具有焊接速度快，焊缝质量高，热影响区小，变形小等优点，可以保证不同厚度的各种材料和零件的有效焊接，减少焊接接头的重量，提升结构的整体性能。例如，在挖掘机的驾驶室焊接中，采用激光焊接替代传统的电弧焊接，可减少焊缝的宽度和高度，减少焊接接头的重量，同时提高机舱的密封性和耐疲劳性；在装载机的铲斗焊接中，采用激光焊接可实现铲斗刃板与斗体的高强度连接，减少刃板的厚度，降低铲斗的重量。

2.3.2 液压成形

液压成形是一种利用液体压力使金属板材或管材在模具内成型的制造工艺，可实现复杂形状结构的一次成型，减少零件数量和连接部件，降低结构重量。液压成形适用于制造工程机械中的复杂管状结构和板材结构，如车架纵梁、动臂管件等。例如，在汽车起重机的车架纵梁设计中，

采用液压成形工艺制造的纵梁，可实现变截面、复杂形状的设计，减少纵梁的焊接接头和加强筋数量，与传统的冲压焊接纵梁相比，重量降低 10%~15%，同时还能提升纵梁的强度和刚度。

3 工程机械轻量化技术应用中存在的问题

3.1 材料成本较高

目前，轻质材料(如铝合金、合金、复合材料)的成本远远高于碳钢，如碳纤维复合材料的成本是普通碳钢的 10~20 倍，是普通碳钢的 5~8 倍。高成本限制了轻量化材料在工程机械中的大规模应用，尤其是在中低端工程机械产品中，企业往往因成本压力而放弃轻量化设计方案。

3.2 结构性能与可靠性挑战

工程机械的作业环境复杂，载荷条件恶劣，经常承受冲击载荷、交变载荷和腐蚀环境的作用，因此对结构的强度、刚度、抗疲劳性能和耐腐蚀性要求极高。轻量化设计在降低结构重量的同时，也可能导致结构的承载能力下降、应力集中加剧、抗疲劳性能降低等问题。例如，采用高强度钢制造的结构件，虽然强度较高，但韧性相对较差，在冲击载荷作用下容易发生断裂；采用铝合金制造的结构件，耐腐蚀性较差，在潮湿、多尘的工况下容易发生腐蚀，影响结构的可靠性和使用寿命。

3.3 制造工艺与装备不足

轻量化材料的成型和加工工艺与传统材料存在较大差异，需要专用的制造设备和工艺技术。例如，铝合金的焊接需要惰性气体保护（MIG，TIG）或传统电弧焊设备无法满足的激光焊接；复合材料的形成需要使用特殊设备，如热水箱，旋转机器和大量的设备投资。目前，我国部分工程机械企业的制造工艺和装备水平相对落后，缺乏轻量化材料的加工能力和检测能力，制约了轻量化技术的应用。

3.4 设计标准与规范缺失

目前，我国工程机械轻量化设计的标准和规范还不完善，缺乏针对轻量化材料、轻量化结构的设计准则、强度计算方法和试验标准。例如，对于采用复合材料制造的工程机械结构件，目前尚无统一的强度计算标准和疲劳寿命评估方法，设计人员只能依靠经验或参考其他行业的标准进行设计，难以保证设计结果的可靠性和一致性。标准和规范的缺失不仅增加了轻量化设计的难度，也制约了轻量化技术在工程机械行业的推广应用。

4 结论

轻量化技术是实现工程机械节能减排、提升作业性能、降低运营成本的关键技术，在国家政策支持和市场需求驱动下，已成为工程机械行业技术创新的重要方向。目前，轻质材料，优化结构设计和先进制造工艺等技术，在一定程度上应用于工程机械设计，并取得了显著的轻量化效果，

但仍面临材料成本较高、结构性能与可靠性挑战、制造工艺与装备不足、设计标准与规范缺失等问题。未来,随着轻量化材料的低成本化与高性能化、智能化设计技术的应用、多学科协同优化设计以及绿色制造与回收利用技术的发展,轻量化技术在工程机械设计中的应用将更加广泛和深入,为工程机械行业的绿色、高效、可持续发展提供有力支撑。

[参考文献]

[1]夏彬.浅谈工程机械设计中轻量化技术的应用[J].科学

与信息化,2024(4):103-105.

[2]胡琴.轻量化设计在机械结构中的应用与研究[J].Mechanical & Electronic Control Engineering,2024,6(14).

[3]燕通,贾蕾,宋洋.工程机械设计中轻量化技术的应用研究[J].现代盐化工,2025(1).

作者简介:彭建新(1983.8—),性别:男,学历:硕士研究生,毕业院校:湘潭大学,所学专业:材料加工工程,目前职称:中级。