

机械结构轻量化与性能优化路径分析

田 皓, 陈晓红, 王帅彪

(辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114044)

摘 要 在当代机械工程领域, 随着产品性能指标、成本控制及环境可持续性要求的持续提升, 如何在确保机械结构强度与功能可靠性的前提下, 通过优化设计实现结构减重与性能提升, 已成为亟待解决的关键技术问题。结构轻量化与性能优化设计的协同推进, 不仅能够突破传统机械设计的技术瓶颈, 更有助于降低系统能耗、减少资源浪费, 从而显著提升整体经济效益。基于此, 本文聚焦机械结构设计的核心环节, 系统探讨材料选型优化、轻量化设计方法及先进制造工艺等关键技术路径, 旨在为相关领域的技术创新提供参考。

关键词 机械结构; 轻量化; 材料优化

中图分类号: TH12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.038

0 引言

实现机械结构轻量化与性能优化是一个系统性的工程。核心目标是在合理控制成本的前提下, 通过材料、设计、工艺等协同创新, 减少结构自重, 也能提升强度、刚度以及疲劳寿命等关键性能指标。在材料方面, 优化复合材料、金属材料等的应用。结构轻量化设计中可以进行拓扑优化、尺寸优化、形状优化等。在制造工艺中, 应用表面处理工艺和轻量化连接工艺等各种先进工艺, 实现轻量化的设计要求。通过综合应用, 可实现机械结构轻量化与性能优化, 促进机械工程的进一步发展。

1 机械设计中的材料优化

1.1 复合材料的优化

复合材料以纤维为增强相, 树脂为基体, 具有轻质高强、可设计性强的特点。常用的复合材料有碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料和混合复合材料。碳纤维复合材料, 密度仅为碳钢的 $1/4$, 比强度是高强度钢的 $3 \sim 5$ 倍, 而且有着良好的疲劳性能和抗腐蚀性。在汽车领域, 高端跑车采用碳纤维车身, 减重可达 $30\% \sim 40\%$, 但成本较高。玻璃纤维复合材料成本仅为碳纤维复合材料的 $1/5$, 比强度优于铝合金, 有着较强的耐腐蚀性, 适用于工程机械外壳、船舶甲板等非核心承力部件, 可减重 $20\% \sim 30\%$, 也能有效降低制造成本^[1]。混合复合材料是将碳纤维与玻璃纤维、金属纤维混合使用, 可在关键承力区域使用碳纤维, 非承力区域使用玻璃纤维, 有效平衡性能和成本。

1.2 金属材料的优化

金属材料进行轻量化应用, 可以实现有效减重。传统机械结构多采用普通碳钢, 而高性能金属材料可满

足轻量化的需求。先进高强钢是通过精密的微观组织控制实现高强度和高韧性的一种材料, 有着极高的强度, 抗拉强度可达 $1\ 000\ \text{MPa}$ 。某些级别的高强钢, 在碰撞时会吸收大量的能量, 适用于汽车防撞结构, 而且相比于铝合金和复合材料, 它有着明显的成本优势, 在汽车车身防撞梁工程机械的臂架中得到广泛应用^[2]。铝合金密度仅为碳钢的 $1/3$, 比强度是碳钢的 $1.5 \sim 2$ 倍, 具有良好的加工性和耐腐蚀性, 在笔记本电脑外壳以及汽车发动机、缸体、车轮、全铝车身框架中得到了一定应用。镁合金密度仅为碳钢的 $1/4$, 是目前实际应用中最轻的金属结构材料, 具有极高的比强度、优异的阻尼减震性能和良好的电磁屏蔽性, 但耐腐蚀性比较差, 需要通过表面处理进行改善, 且成本比较高, 限制了大规模的应用, 多应用于汽车座椅骨架、航空航天仪器支架等领域, 效果显著。钛合金密度为碳钢的 $1/2$, 比强度居金属材料之首, 同时有着优异的耐高温和耐腐蚀性, 可在 $400 \sim 500\ ^\circ\text{C}$ 下长期稳定工作, 在海水和氯化物环境下极其稳定, 在航空航天、化工与海洋等领域中的应用广泛。不过钛合金的原材料和加工成本都很高, 加工难度大, 也限制了其广泛应用。

1.3 新型材料的优化

新型材料的应用, 能实现机械结构的轻量化和性能优化。可应用多孔材料与泡沫金属, 主要通过粉末冶金、发泡工艺制备, 密度为传统金属的 $1/3 \sim 1/2$, 具有良好的吸能和减震性能。工程塑料与改性塑料也得到了应用, 如聚碳酸酯、增强聚丙烯等材料, 密度约为金属的 $1/2 \sim 1/3$, 通过纤维增强后, 强度可接近普通钢材, 适用于机械外壳、齿轮等非核心承力部件。

2 机械结构轻量化的设计优化

2.1 拓扑优化

拓扑优化是基于荷载与边界条件,通过算法求解结构的最优材料分布,是结构创新的核心工具。拓扑优化不仅能改变结构的外形,同时也能通过在设计空间内合理分配材料,确保材料最优布局,满足最大强度和刚度的要求。常用的方法有变密度法和水平集法。变密度法指的是将设计空间离散为有限元网格,并为每个单元赋予一个假想的密度变量,通过优化算法将单位密度推向 0 或 1^[3]。最终结果中,中间密度的单元通过插值模型转化为实体材料。水平挤法是通过一个更高维的水平集函数的界面演化,来描述结构边界的变化,它能够产生边界光滑的优化结果,但计算相对复杂。拓扑优化在设计机械人臂、机床底座等设计中的应用比较广泛,可以打破传统思维定式,产生革命性的创新设计,实现大幅度的轻量化。

例如:在挖掘机臂架的设计中,可通过拓扑优化得到更加合理的结构形态,有效去除其中的无效材料,减轻臂架的重量,也能保障其在工作过程中的强度和刚度。工程机械传动系统主要包括齿轮箱、轴承座、传动轴等一些关键部件,通过拓扑优化设计,合理调整这些部位的材料分布情况,实现减重,并提高整体的承载性能。而且拓扑优化也能改善传动系统的振动特性,减少因振动引起的故障,提高系统的可靠性。在工程机械框架中采用拓扑优化设计,设计人员可以根据荷载分布,合理地优化框架结构,去除多余的材料,达到轻量化的目的。

2.2 尺寸优化

尺寸优化是在结构形状和拓扑形式确定以后,对关键尺寸参数进行优化,使结构满足性能要求前提下,实现尺寸最小化。将各类尺寸参数定义为设计变量,在满足应力、位移等约束条件下,寻找使目标函数最优的尺寸组合^[4]。可输出一组最优化的尺寸参数表,得到合理应用。例如:在壁厚设计中,可通过计算不同壁厚下的应力与变形,确定最小允许壁厚。在截面尺寸设计中,优化截面形状与尺寸。在相同重量下提升惯性矩,如空心轴相比实心轴,相同强度下可减重 50% 以上。在筋板设计方面,优化筋板的数量、高度和间距,避免筋板过密或过高,导致材料的浪费,同时也能有效提升结构强度。在实施过程中,可结合仿真软件和优化算法,建立尺寸参数与性能指标的映射关系,求解最优参数组合。

2.3 形状优化

形状优化技术主要通过改变结构的几何形状优化其性能,使其在特定的力学约束条件下,结构的受力分布可以实现最优,在框架结构、梁结构、壳体结构等的设计中应用十分广泛,可以合理分配材料,确保结构在受力情况下,既能保证强度,又能避免不必要的材料浪费。常见的形状优化方案有仿生结构设计、流线型设计和过渡结构优化。在仿生结构设计中,蜂窝结构具有轻质高强的特点,在车身内饰板中,可采用蜂窝夹层结构,相比实心结构减重 60% 以上,显著提升抗弯刚度。流线型设计可应用于高速运动部件中,如汽车车身、飞机机翼,可优化轮廓曲线,减少空气阻力,降低结构重量。将过渡结构进行优化设计,如将结构的直角、尖角改为圆角、倒角或渐变过渡,减少应力集中,避免局部疲劳失效,也能减少材料的用量^[5]。

例如:在汽车领域中,形状优化技术常应用于车身设计,通过调整车身的形状,优化材料的分布。同时也能在保障安全性能的前提下,减少车身的重量,提升燃油效率。在建筑领域中应用形状优化技术,可以合理地调整构件的形态,使得结构在满足承载能力的基础上,最大限度地减少材料的使用。

2.4 集成化与模块化设计

集成化与模块化设计可以将多个零件的功能整合为一个零件,减少零件数量与连接结构,从而实现减重和性能的提升。在集成化设计中,可进行功能集成,将分散的功能零件,如支撑、定位、导向等,整合为一体化结构。在汽车设计中,发动机缸盖集成化设计后,采用整体铸造的工艺,零件数量减少 60%,整体减重 20%,同时也能提升密封性能。简化连接结构,实现集成化设计,通过使用一体化成型替代螺栓连接和焊接,可减少连接部位的重量,同时提升结构整体性和刚度。在模块化设计中,将结构划分为多个功能模块,每个模块内部集成化设计,模块之间通过标准化接口连接,既能实现局部轻量化,又便于装配和维护。例如:在汽车工业中,同一个底盘平台,通过搭配不同的车身模块和动力模块,衍生出了多种车型,极大地降低了研发和制造成本,笔记本电脑内存、硬盘和电池均为独立模块,便于用户升级和维修。

2.5 薄壁化与中空结构设计

薄壁化设计是在满足高度、强度和稳定性的前提下,尽可能减少结构的壁厚。壁厚的减小直接导致材料用量和重量的线性下降,而且通过等强度设计,使

壁厚均匀化,避免局部材料堆积。需要注意的是,刚度与壁厚的三次方成正比,薄壁化会显著降低结构刚度,因此可以通过形貌优化,在薄壁上设计加强筋,使用极少的材料,大幅提升刚度和抗失稳能力。薄壁结构在压力作用下容易发生屈曲,需进行屈曲分析,确保设计载荷高于屈曲临界载荷^[6]。可以通过设置加强筋、折边或填充泡沫来提高稳定性。中空结构设计是将实心或者壁厚结构改造为内部为空心的结构。根据材料力学、弯曲刚度与截面惯性矩成正比,将材料从实体内部移至外部,形成中空截面,可极大地增加惯性矩。

3 机械结构与性能的制作工艺优化

3.1 增材制造

应用增材制造工艺,优化结构轻量化和相关性能。采用分层制造和逐层叠加的方法,直接根据三维CAD模型制造零件,无需模具,可以轻松制造拓扑优化后的复杂有机形状、内部点阵结构和一体化构建,而且材料利用率近乎100%,几乎没有材料浪费,可打印出集成了散热器、导管、轴承座等多个功能的单一零件,实现系统级减重。常用的技术有金属粉末床熔融、定向能量沉积和材料挤出。金属粉末床熔融包括选择性激光熔化和电子束熔化,使用高能束选择性熔化金属粉末床上的特定区域,精度高,表面质量好,可制作极其复杂的结构。定向能量沉积,会通过喷嘴将粉末或丝材送入熔池,同时高能束将其熔化沉积在基板上,可制造大尺寸零件,修复受损部位,实现多材料混合打印。材料挤出,如熔融长丝制作,将热塑性聚合物长丝加热挤出后沉积。

3.2 应用表面处理工艺

表面处理工艺的应用,可有效提升结构的耐腐蚀性和耐磨性,也能避免因防护需求增加额外的重量,从而实现轻量化和防护的双重目标。采用阳极氧化方法,适用于铝合金和镁合金结构,在表面形成一层致密的氧化膜,不显著增加重量,而且提升耐腐蚀性和耐磨性。应用气相沉积法,通过物理或化学方法,在结构表面沉积一层薄膜,重量增加可忽略不计,能够有效提升表面的硬度和耐磨性,适用于齿轮等部件。应用轻量化涂层,如水性涂料和粉末涂料,替代传统溶剂型涂料,可以有效减少涂层厚度和整体的重量。

3.3 轻量化连接工艺

轻量化连接工艺的应用,可替代传统重型连接,减少一些额外增加的重量,而且也能通过一体化连接,

提升结构的整体性。在焊接工艺中,采用激光焊接搅拌摩擦焊,替代传统电弧焊。激光焊接热影响区小、焊缝窄,可减少焊接变形与材料损耗,适用于薄板和异种材料连接^[7]。搅拌摩擦焊无熔化、无飞溅,接头强度高,适用于铝合金结构。另外,也可应用胶接工艺,通过结构胶将两个零件连接,无需连接件,有着良好的减重效果,而且胶接面应力分布均匀,可减少应力集中,适用于复合材料和金属材料的连接。铆接工艺升级,使用自冲铆、盲铆替代传统铆钉。自冲铆无需预先钻孔,可实现薄板快速连接,有效减重,且连接强度高。

4 结束语

在机械设计领域,通过材料选型优化与多尺度轻量化设计方法的协同应用,可显著提升结构性能与能效比。具体而言,采用拓扑优化、尺寸优化及形状优化等先进设计手段,结合高强度轻量化材料的选用,可实现结构减重,同时确保关键性能指标满足设计要求。在制造环节中,通过增材制造技术实现复杂结构一体化成型,配合表面强化处理及轻量化连接工艺,可进一步降低系统重量并提升结构可靠性。随着高强度钢、铝合金、复合材料等新型材料的持续突破,以及智能制造、数字孪生等技术的深度融合,未来机械结构设计将在保障功能完备性的前提下,实现减重效率提升、疲劳寿命延长的突破性进展,为工程机械行业向高效、绿色、智能化方向发展提供关键技术支撑。

参考文献:

- [1] 张远兴.汽车机械结构轻量化设计应用与性能提升分析[J].汽车维修技师,2025(14):64-65.
- [2] 斯俊.码垛机械结构轻量化设计与优化[C]//2025工程技术与材料应用学术交流会议论文集.2025.
- [3] 陈茂宏,毛荣欢,樊金宝,等.工程机械产品结构设计与优化研究[J].工程机械,2025,56(07):150-154.
- [4] 陈娟,姜雪燕.探测器机械结构静力学分析与轻量化设计[J].山东工业技术,2024(01):48-53.
- [5] 李明.基于有限元分析的机械结构优化与性能改进[J].数码设计,2024(01):112-114.
- [6] 徐向明.机械结构设计中的创新与优化分析[C]//2025工程技术与材料应用学术交流会议论文集.2025.
- [7] 曹雍华.机械结构优化设计在工程领域中的应用研究[C]//2025人工智能与工程管理学术交流会议论文集.2025.