

转向架轻量化技术路径及材料应用趋势分析

李生新

中国铁路兰州局集团有限公司 甘肃 兰州 730000

摘要：转向架作为轨道车辆的核心承载组件，其轻量化设计对降低列车运行能耗、缓解轮轨磨耗、提升车辆的动力学性能有着重要的意义。本文较为系统地综述了转向架轻量化的主要技术路径与材料应用现状。首先，从结构优化设计、工艺优化以及轻量化材料的应用三个角度分析了转向架轻量化的方法。其次，分析了转向架部件轻量化设计的典型应用案例，在此基础上，分析各种轻量化所面临的困难。最后，展望了多种材料多工艺的多目标优化以及复合材料从非承载向承载结构逐步推进的发展趋势，为轨道交通轻量化设计研究及应用提供参考。

关键词：转向架、轻量化、结构优化、新材料应用

引言：转向架轻量化设计是轨道交通装备制造领域的核心技术，主要通过结构优化、轻量化材料的应用和工艺优化等手段，改善列车整体的节能减排效果、动力学性能以及生产制造成本。转向架的质量大约占据了整车重量的30%-40%，转向架的减重可直接减少牵引列车所需的能量；从实际使用效果来看，经过轻量化设计的转向架，大约可降低6%至15%车辆运行能耗。此外，当前全球气候变暖趋势日益严峻，轨道交通领域的节能减排十分重要，而转向架轻量化则是实现这一目标的重要途径。最后，转向架的轻量化有助于提升列车运行时的动力学性能，使转向架能够更灵活地适应复杂的线路变化，提升列车的曲线通过能力和运行的平稳性。

1 转向架轻量化设计的技术路径

当前转向架轻量化设计研究有三个主要技术路线：一是采用高强度金属材料或复合材料等轻量化材料替换部分零部件来实现转向架的直接减重；二是在结构形状、设计尺寸及材料优化空间较小时，通过优化工艺达到减重目的；三是利用数学建模与工程分析的方法，建立有限元模型，对转向架的材料分布情况、几何拓扑形状和关键设计变量进行优化，并满足相关标准的要求。

1.1 列车转向架结构优化

1.1.1 转向架结构优化的主要方法

结构优化是通过数学方法与工程分析，对材料分布、几何形状及尺寸进行优化调整，在满足约束条件的前提下使得目标函数趋近于最大化或最小化，从而实现目标性能指标的技术。当前主流方法包括拓扑优化、形状优化和尺寸优化^[1]。拓扑优化是指在给定设计空间内优化材料分布，通过调整单元密度或存在性，去除冗余材料、保留最优传力路径，生成轻量化、高承载效率的结构形态。形状优化是在拓扑优化基础上，通过连续改变实体

的曲率、截面、加强筋布局等边界形态，对材料的分布进行优化重组，改善力的传递路径从而消除应力集中现象。尺寸优化旨在通过调整截面尺寸、板厚、梁高、孔径等设计参数，在满足刚度、强度、模态等性能约束下实现质量的最小化。相较于拓扑优化与形状优化，尺寸优化计算效率高、收敛快、工艺兼容性强。在参数化模型中，优化结果对设计变量的改动较小，对冲压、铸造等传统工艺的工艺参数调整幅度有限，更易与现有制造体系衔接。

1.1.2 优化变量选取与灵敏度分析

在定义优化变量时，设计人员通常倾向于选择质量占比较大的零件作为优化的主要对象。然而在转向架整体设计中，这种方法可能忽略部分对质量敏感但自身质量较小的构件，导致优化效果不明显，降低整体优化效率。因此在开展复杂结构轻量化研究之前，有必要先对整体设计变量进行灵敏度分析，得出转向架各部件的灵敏度柱状图，从中筛选出对结构质量敏感度较高的设计变量，确定优化价值较大的零部件，为后续实现高效的轻量化设计提供理论支撑。

1.2 轻量化材料的应用

材料选择是转向架轻量化设计的基础，在列车转向架设计中，材料的选择与性能的评估占据着非常重要的地位，直接影响着转向架的动力学特性、制动性能、疲劳性能与转向架经济性，因此，针对转向架轻量化设计，从材料选择与性能评估两个方面入手进行深入研究和科学论证已成为当前研究的热点^[2]。当前，转向架常用的材料包括高强度钢、铝合金以及碳纤维复合材料等。高强度钢具有优越的强度和刚度，能够承受较大的载荷，是列车转向架的主要受力构件和最常用的材料。从表1中可以看出：与传统的钢材料相比较，铝合金拥有更小的密

度,在列车转向架的轻量化设计领域有着广阔的应用前景。复合材料具有强度高、质量轻且耐腐蚀的优点,由

于其优异的力学性能,碳纤维复合材料在列车转向架中的应用越来越广泛。

表1 不同材料的性能对比

材料	密度/(g*cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
钢材料	7.80	431	210
铝合金	2.71-2.88	150-250	70
碳纤维	1.76-1.93	2000-5000	230-450

1.3 列车转向架制造工艺优化

当结构的外形、尺寸及所选材料均已固定、无法再做调整时,若想进一步实现减重,就只能从工艺环节入手。当前,通过工艺优化达到轻量化目标的主要思路有两条:第一,针对加工方法开展工艺参数的优化,获取更为理想的成型效果;第二,可采用先进的连接工艺,如激光焊接、搅拌摩擦焊等。值得关注的是,工艺参数是零件的最终质量、性能参数以及生产效率的重要影响因素,因此,工艺参数的优化能有效支撑轻量化设计的落地。在汽车行业,工艺参数优化已发展得相对成熟,而在轨道车辆制造领域仍处于探索阶段。

2 轻量化转向架国内外典型实施案例分析

2.1 重载铁路货车转向架轻量化案例分析

2.1.1 摇枕与侧架的结构优化设计

中车齐齐哈尔车辆有限公司大连研发中心针对30t轴重稳定型转向架开展了结构优化与轻量化设计^[3]。在摇枕优化中,通过有限元方法对整体结构进行调整,优化后摇枕侧壁厚度为19mm、中部加强筋厚度为17mm、底壁厚度为26mm,原中部两道加强筋精简为一道,同时加大旁承盒缺口及工艺孔尺寸,在保证摇枕强度和刚度的前提下实现了减重,摇枕减重约80kg。在侧架优化中,壁厚调整为14mm至15mm,对弹簧承台和侧架下弦壁厚进行局部加强,对有限元计算中应力较小的侧架头部断面高度予以减小、工艺孔尺寸加大,固定轴距根据车辆整体结构设计优化为1778mm,在保证侧架强度和刚度协调的同时实现了轻量化,侧架减重约70kg,整体轻量化效果显著。

2.1.2 铝合金部件应用与材质兼容性问题

除结构优化外,该转向架的承载鞍和旁承座采用了高强度铝合金材质。静载荷试验和疲劳测试结果表明,铝合金材质的承载鞍和旁承座强度能够满足使用要求,完成疲劳试验后,承载鞍经磨耗的环带直径、素线度、挡肩距离等关键尺寸均符合相关规定,耐久性不亚于传统钢制转向架。但需引起关注的是,铝合金材质的承载鞍、旁承座与钢制材料长期接触,叠加雨水、防冻

液、抑尘剂等介质的作用,会形成化学电池并产生电位差,长期作用下将导致不同材质零部件在接触部位发生电化腐蚀。因此,针对使用多种金属材料的转向架,有必要采取相应的防腐措施并定期监测腐蚀状况。

2.2 城轨车辆转向架拓扑优化轻量化案例分析

2.2.1 拓扑优化方案与建模过程

中车青岛四方机车车辆股份有限公司针对某型号铝合金城轨车辆转向架,提出了一种基于拓扑优化的轻量化方案。该方案首先遵循"承载可调性与工艺约束型原则",筛选出可优化承载区与非优化功能区;并基于固体各向同性材料惩罚模型(SIMP),采用经典体积最小化模型进行计算,实现了材料向承载关键区域的高效聚集。与此同时,采用移动渐进线法更新设计变量,在保证结构性能的前提下,提升城轨转向架部件的减重效率^[4]。在求解手段上,采用ANSYS Workbench、ABAQUS等有限元软件求解拓扑优化模型,将求解得出的理论模型重构,进而得到可制造的、兼顾轻量化优势与工程实用性的铝合金转向架结构。

2.2.2 试验验证与效益评估

为验证该方案的有效性,分别设计了两类核心工况进行实验验证:一是垂向载荷与制动载荷的静力学试验,二是平直轨道与曲线轨道的动力学实验。实验结果表明,经过拓扑优化后的铝合金转向架关键部位应力、刚度均满足规范要求,且相较于传统Q235钢质转向架,最大应力明显下降,优化后的结构固有频率也明显提高,车体振动加速度降低了12.5%,有效提高了车辆运行的动力学稳定性与乘坐舒适性。在经济性方面,转向架质量减轻了105kg,轻量化率为27.6%。虽然采用铝合金材质使总成本增加了6520元,但加工成本下降了1200元,且在全生命周期内节能方面可节省7200元,综合经济性优于传统转向架。

2.3 碳纤维材料的应用案例分析

碳纤维增强复合材料在轨道交通领域的应用研究,国外起步较早,并已成功应用于车辆的主承载与非主承载部件。起初的碳纤维材料大多应用于列车转向架重的

非主承载部件,将碳纤维材料推广至主承载部件的较为典型案例,是日本川崎重工研发的efWING型碳纤维转向架。该型号转向架将传统的H型构架完全替换成碳纤维增强复合材料,其自身类似于“扁担”的形状使得构架本身具备了悬挂的功能,实现了构架与一系悬挂的合二为一,因此efWING型转向架无需安装一系悬挂,如图1所示。此外碳纤维的密度仅为传统钢材料的四分之一,这使得该型号转向架质量仅为传统转向架的60%。这种全新的转向架模式大大降低了轮轨间的动载荷,使得列车在运行的过程中更加安全、舒适和平稳,并且降低的脱轨的风险^[5]。实验数据显示,efWING型转向架落地反弹轮重减载率为0.4,相比传统转向架减小了50%;曲线行走时轮重减载的峰值比传统转向架下降约20%;efWING型转向架在加装抗蛇行减震器后,在JR综合研究所的试车台上实验0-350kph的脱轨系数在0.1以下;在节能方面,以一个八节编组的电动车组为例,全列可减重约7.2t,轻量化的转向架不仅减轻了运行时对路轨的冲击,在节能上有也相当的优势。

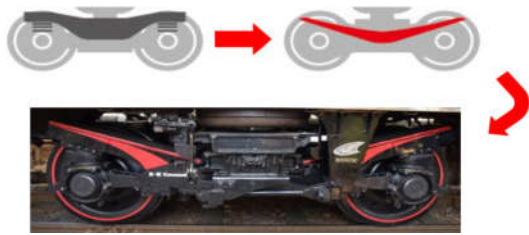


图1 efWING型转向架的全新模式

然而,该型号转向架在市场推广中却被各大铁路公司持有怀疑的态度。造成这一现象主要原因有两点:首先,该转向架采用了全新的设计模式,其安全性与耐久性需要大量的测试来证明。其次,铁路公司通常习惯于

采购传统单一型号的转向架,并建设相应的运维系统^[6]。尽管这种新型转向架在检修运维方面具有显著的经济性优势,但是针对这种全新模式的转向架大量投资更换现有的设施,意味着需要同步配备全新的维保设备并重新培训技术人员,整体风险较高,因此所带来的潜在隐患也是未知的。

结束语

转向架轻量化已从单一材料或结构优化,发展为“结构-材料-工艺”协同优化。高强度钢仍是受力构件首选,铝合金与碳纤维应用日益广泛,但先进连接工艺的工程应用尚不充分。典型案例验证了拓扑优化可实现约27%减重,多材料混合与分区协同设计将成热点。未来,碳纤维有望在主承载部件中规模化应用,轻量化与高可维护性的协同发展也将成为重要方向。转向架轻量化正处于从理论向工程应用跨越的关键阶段,将持续推动轨道交通装备向更轻、更节能、更可靠方向进化。

参考文献

- [1] 刘海涛,姜瑞金,李晓军,等.铁路货车轻量化设计浅析[J].中国设备工程,2025,(01):117-119.
- [2] 张磊,许帅康,陈洁,等.列车车体轻量化设计研究进展[J].机械工程学报,2023,59(24):177-196.
- [3] 王玮琪,宋宇博.面向转向架构架轻量化的灵敏度分析研究[J].机车车辆工艺,2024,60(05):20-26+32.
- [4] 何宇,曾飞,王安斌,等.某型动车组动力转向架构架优化设计[J].机电工程技术,2021,50(10):101-104.
- [5] 张磊,许帅康,陈洁,等.列车车体轻量化设计研究进展[J].机械工程学报,2023,59(24):177-196.
- [6] 王彦昌.基于拓扑优化的铝合金城轨车辆转向架轻量化设计方法[J].现代制造技术与装备,2026,62(02):16-18.