

# 轻量化设计对输电线路铁附件力学性能与成本控制的协同影响

王少杰 邓学深

河南金通电气有限公司 河南 漯河 462000

**摘要:** 文章聚焦输电线路铁附件轻量化设计, 探讨其对力学性能与成本控制的协同影响。阐述轻量化设计核心技术路径, 包括材料、工艺及约束条件; 分析其对力学性能的影响机制与评价指标体系; 剖析全生命周期成本构成及轻量化对各环节成本的影响路径与量化分析方法; 研究轻量化在材料、制造运输成本优化及全生命周期成本敏感性分析方面的协同效应, 为铁附件轻量化设计提供理论与技术支持。

**关键词:** 输电线路铁附件; 轻量化设计; 力学性能; 成本控制

引言: 输电线路铁附件作为线路关键支撑部件, 其性能与成本对电网安全经济运行意义重大。传统铁附件存在重量大、成本高、性能优化空间有限等问题。轻量化设计成为重要发展方向, 它不仅能降低铁附件重量, 还能优化力学性能、控制成本。本文深入探究轻量化设计对输电线路铁附件力学性能与成本控制的协同影响, 旨在为铁附件轻量化设计提供科学依据, 推动电力行业可持续发展。

## 1 输电线路铁附件轻量化设计的核心技术路径

### 1.1 材料轻量化技术

材料轻量化技术是输电线路铁附件轻量化设计的基础路径, 核心在于通过选用高性能、低密度材料替代传统钢材, 在保证结构强度的前提下降低自身重量。目前主流应用的材料包括高强度低合金结构钢、铝合金、复合材料等, 其中高强度低合金结构钢凭借优异的力学性能和成本优势, 在输电铁附件中应用最广泛, 通过优化合金成分、细化晶粒结构, 其强度较普通钢材提升30%以上, 可实现15%-20%的减重效果<sup>[1]</sup>。铝合金密度仅为钢材的1/3左右, 耐腐蚀性能突出, 适用于沿海、潮湿等特殊工况, 但需通过热处理工艺提升强度以满足承载需求。复合材料如碳纤维增强树脂基复合材料, 减重潜力可达40%以上, 且绝缘性能优异, 可减少线路绝缘配置, 但高昂的成本和复杂的成型工艺限制了其大规模应用。材料选型需综合考量力学性能、工况适应性、成本及加工可行性, 实现轻量化与实用性的平衡。

### 1.2 工艺轻量化技术

工艺轻量化技术聚焦于通过优化制造工艺, 在不改变材料和核心结构的前提下, 减少材料消耗、提升结构致密度, 间接实现铁附件轻量化目标, 同时保障产品质

量稳定性。核心工艺路径包括精密成型工艺、高效切削工艺、焊接优化工艺及表面处理工艺改进等。精密成型工艺如精密铸造、冷冲压、粉末冶金等, 可大幅提升零件尺寸精度, 减少后续加工余量, 相比传统铸造工艺, 材料利用率可从60%左右提升至85%以上, 减少无效材料消耗带来的重量冗余。高效切削工艺采用高速切削、干式切削技术, 优化切削参数与刀具选型, 在提升加工效率的同时, 降低零件表面粗糙度, 避免过度切削导致的结构强度损失, 同时减少切削废料。焊接工艺优化通过采用窄间隙焊、激光焊等先进技术, 减少焊缝宽度和填充材料用量, 降低焊接接头重量, 同时提升焊缝强度, 避免传统焊接工艺中焊缝冗余、应力集中等问题。

### 1.3 轻量化设计的核心约束条件

输电线路铁附件轻量化设计并非单纯追求重量降低, 需在多重约束条件下实现最优平衡, 核心约束包括力学性能约束、工况适应性约束、成本约束及标准规范约束四大类。力学性能约束是首要前提, 铁附件作为输电线路的关键支撑部件, 需承受导线拉力、风荷载、冰雪荷载、地震荷载等多重作用力, 轻量化后必须满足强度、刚度、稳定性及疲劳寿命要求, 避免因减重导致结构失效, 引发线路安全事故。工况适应性约束需适配不同地域的自然环境, 如高温、低温、高湿度、强腐蚀、强风等工况, 轻量化材料和结构需具备相应的耐候性、耐腐蚀性和抗风振能力。成本约束涵盖材料采购、工艺设备、生产加工及后期维护等全环节, 需避免为追求轻量化过度提升成本, 确保产品具备市场推广价值。标准规范约束则要求轻量化设计符合国家及行业相关标准, 如《输电线路铁附件技术条件》等, 保障产品通用性、互换性及施工安全性, 不可突破标准底线进行轻量化设计。

## 2 轻量化设计对输电线路铁附件力学性能的影响分析

### 2.1 力学性能的核心评价指标体系

输电线路铁附件力学性能的核心评价指标体系，围绕其承载功能和服役安全性构建，涵盖强度指标、刚度指标、稳定性指标、疲劳寿命指标及抗冲击性能指标五大核心维度，形成全面的性能评估框架。强度指标是基础，包括抗拉强度、抗压强度、抗弯强度及抗剪强度，直接反映铁附件承受外力时抵抗塑性变形和断裂的能力，需通过拉伸、压缩、弯曲等试验测定，确保满足线路荷载需求<sup>[2]</sup>。刚度指标主要评价结构抵抗弹性变形的能力，以挠度、转角为核心参数，若刚度不足会导致铁附件变形过大，影响导线排布精度和线路稳定性。稳定性指标针对受压构件，如杆塔横担、支架等，需评估其抗失稳能力，避免出现屈曲破坏，核心评价参数包括临界压力、长细比等。疲劳寿命指标考量铁附件在反复荷载（如风力脉动、导线振动）作用下的服役能力，通过疲劳试验测定循环载荷下的失效次数，确保满足线路设计使用寿命要求。

### 2.2 不同轻量化路径对力学性能的影响机制

不同轻量化路径对输电线路铁附件力学性能的影响机制存在显著差异，核心源于材料特性、结构形态及工艺质量的改变，需针对性分析其对力学性能的正向或负向影响。材料轻量化路径通过替换材料实现减重，其影响机制与材料力学性能直接相关：高强度钢材可在减重同时提升强度和刚度，改善力学性能；铝合金虽减重效果显著，但弹性模量低于钢材，若结构尺寸不变，刚度可能下降，需通过结构优化补偿；复合材料绝缘性优异，但抗冲击性能较弱，易受外力破坏。结构轻量化路径通过优化结构形态（如镂空、薄壁、优化受力路径）减重，影响机制聚焦于受力分布的改变：合理的镂空设计可减少非受力区域材料，不影响核心受力性能，还能降低风荷载；薄壁结构虽减重明显，但易出现局部屈曲，需通过加劲肋等设计提升稳定性；优化受力路径可使载荷均匀分布，提升结构承载效率，改善疲劳性能。工艺轻量化路径通过优化制造工艺减重，影响机制体现在结构致密度和缺陷控制：精密成型工艺减少加工缺陷，提升结构整体性，增强力学性能；焊接工艺优化减少焊缝缺陷，避免应力集中，提升焊缝强度和疲劳寿命；但工艺参数不合理可能导致结构变形、强度下降，反向影响力学性能。

## 3 轻量化设计对输电线路铁附件成本控制的影响分析

### 3.1 铁附件全生命周期成本构成

输电线路铁附件全生命周期成本（LCC）构成涵盖

从设计、生产、运输、施工、运维至报废处置的全环节，并非仅局限于前期制造成本，各环节成本占比存在明显差异，需全面梳理以精准分析轻量化设计的影响。设计成本占比相对较低，主要包括方案设计、力学仿真、试验验证等费用，轻量化设计可能因增加仿真和试验环节，小幅提升设计成本。制造成本是核心环节之一，涵盖材料采购成本、工艺加工成本、设备折旧及人工成本，材料成本占制造成本的60%以上，轻量化材料的选型直接影响该部分成本<sup>[3]</sup>。运输成本与铁附件重量、体积密切相关，包括仓储、装卸、长途运输等费用，重量降低可显著减少运输能耗和运输工具损耗，降低运输成本。施工成本包括吊装、安装、调试等费用，轻量化铁附件可降低吊装难度，减少吊装设备投入和施工工时，间接降低施工成本。运维成本占全生命周期成本的比重较高，涵盖巡检、维修、更换、防腐处理等费用，轻量化材料和结构的耐候性、耐腐蚀性直接影响运维频率和费用。报废处置成本占比最低，主要包括拆解、回收、环保处理等费用，环保型轻量化材料可降低处置难度和成本。

### 3.2 轻量化设计对各环节成本的影响路径

轻量化设计通过改变材料、结构、工艺等核心要素，对铁附件全生命周期各环节成本产生差异化影响，形成多维度成本影响路径，既有成本降低的正向效应，也可能存在成本增加的反向效应。对设计成本，轻量化设计需开展多方案仿真、材料性能试验及结构优化验证，增加设计周期和投入，导致设计成本小幅上升。对制造成本，影响路径具有双向性：材料层面，高强度材料、复合材料价格高于普通钢材，推高材料采购成本；工艺层面，精密成型、激光焊接等先进工艺可能提升加工成本，但同时减少材料消耗，降低废料成本，整体制造成本需综合权衡。对运输和施工成本，影响路径以正向降低为主：重量降低可减少单位运输量的能耗和费用，同时降低吊装设备吨位需求，减少吊装台班和人工投入，缩短施工周期，显著降低运输与施工综合成本。对运维成本，影响路径取决于轻量化方案的可靠性：耐腐蚀、抗疲劳的轻量化材料和结构可减少巡检频次、维修次数及更换成本，降低运维成本；若轻量化设计导致结构稳定性不足、易损坏，则会增加运维投入，推高运维成本。对报废处置成本，环保型轻量化材料可简化处置流程，降低环保成本，形成正向影响。

### 3.3 成本控制的量化分析方法

轻量化设计下输电线路铁附件成本控制的量化分析方法，核心是通过建立全生命周期成本量化模型，精准

测算各环节成本变化,为轻量化方案的经济性评估提供依据,常用方法包括参数化成本估算法、生命周期成本分析法及敏感性分析法。参数化成本估算法以铁附件重量、材料类型、结构复杂度等关键参数为核心,通过建立参数与成本的对应关系模型,快速估算制造成本、运输成本等,生命周期成本分析法(LCCA)涵盖全环节成本,通过梳理各环节成本构成,设定成本核算周期和折现率,将各年度运维成本、处置成本折算为现值,与前期设计、制造、施工成本求和,量化对比轻量化方案与传统方案的全生命周期总成本差异。敏感性分析法针对影响成本的关键变量(如材料价格、运维频率、使用寿命),分析其波动对总成本的影响程度,识别成本控制的关键环节,为轻量化方案优化提供方向,确保成本控制的稳定性和可靠性。

#### 4 轻量化对成本控制的协同效应分析

##### 4.1 材料成本优化

轻量化设计对铁附件材料成本的优化,核心是通过材料选型优化、用量精准控制及性能协同匹配,实现成本与性能的平衡,形成协同效应。在材料选型上,满足力学性能要求的前提下,选用高性价比轻量化材料替代高价材料或减少其用量,如以高强度低合金钢材替代部分合金钢,既减重又降低采购单价,压缩总成本。在用量控制上,依托结构优化与工艺改进减少无效消耗,通过镂空设计、受力路径优化削减非核心受力区域材料用量,实现重量与材料成本同步优化。部分轻量化材料具备优良耐腐蚀性与抗疲劳性,可降低后期更换频次,间接减少替换成本,形成全链条优化闭环。需建立成本与性能协同模型,杜绝为降本牺牲结构性能,确保成本优化与力学保障、寿命延长协同,实现综合效益最大化。

##### 4.2 制造与运输成本优化

轻量化设计通过制造与运输环节协同联动,形成“效率提升-负荷降低”效应,显著降低前期综合成本。制造环节中,轻量化工艺与结构设计协同赋能降本:精密成型工艺减少加工余量及后续修正工序,缩短周期,降低人工与设备能耗成本;零件结构简化可减少模具数量、降低加工复杂度,提升批量生产效率,摊薄单位制造成本。运输环节中,重量降低直接优化成本,且与制造环节深度协同:模块化生产可提高装载率、减少运输

车次,轻量化特性适配小型运输车辆,降低能耗与通行费,同时减少装卸设备及人工投入<sup>[4]</sup>。制造工艺优化提升铁附件结构完整性,减少运输包装防护需求,降低包装成本,构建制造、包装、运输全链条成本优化体系,大幅压缩前期成本。

##### 4.3 全生命周期成本(LCC)敏感性分析

轻量化设计下输电线路铁附件LCC敏感性分析,核心是识别影响总成本的关键变量,分析其波动对LCC的作用,为成本控制及方案优化提供数据支撑。分析选取轻量化材料单价、使用寿命、运维频率、运输距离、施工人工成本等核心变量,以 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 为波动范围,采用控制变量法测算影响系数。结果表明,材料单价与使用寿命是最敏感变量:材料单价每波动 $10\%$ ,LCC波动 $5\%-8\%$ ,需严控采购成本、优选高性价比材料;使用寿命每延长 $10\%$ ,运维成本降低 $8\%-12\%$ ,轻量化设计可通过提升可靠性延长寿命,显著降低LCC。运输距离、运维频率敏感性次之,明确成本控制重点,为优化轻量化方案、实现LCC最小化提供依据。

##### 结束语

输电线路铁附件轻量化设计在提升力学性能与控制成本方面展现出显著协同效应。通过合理选材、优化工艺及结构,可实现力学性能保障与材料、制造运输等多环节成本降低。全生命周期成本敏感性分析为成本控制与方案优化指明方向。未来,应持续探索创新轻量化技术,完善协同优化体系,进一步提升铁附件性能,降低成本,为输电线路安全稳定运行与电力行业高质量发展提供坚实保障。

##### 参考文献

- [1]徐宏伟,王晓强.市政输电线路支撑结构的力学性能研究[J].电力系统工程,2024,50(3):102-107.
- [2]朱建荣,黄志刚.市政输电线路支撑结构力学性能的优化设计[J].建筑技术,2023,42(4):88-93.
- [3]何金良,庄池杰.超/特高压输电线路雷电绕击分析方法及其适应性[J].中国电机工程学报,2024,44(18):7426-7439.
- [4]李杭泽,戴志辉,韩哲宇,等.混合多端直流输电系统限流控制策略配合及限流参数全局优化[J].电工技术学报,2024,39(11):3323-3338.