

电梯曳引机构轻量化设计及有限元强度校核

伍跃辉¹ 徐开东² 谭杰³

1. 杭州新马电梯有限公司 浙江 杭州 311600

2. 浙江省特种设备科学研究院 浙江 杭州 311600

3. 温州市特种设备检测科学研究院 浙江 温州 311600

摘要: 本文聚焦电梯曳引机构轻量化设计及有限元强度校核。首先分析其结构与工作原理,明确功能、组成及受力情况。其次提出轻量化设计方案,涵盖工程可行的材料轻量化、符合安全规范的结构拓扑优化及尺寸参数优化。随后对轻量化后模型进行有限元强度校核,补充疲劳寿命分析、多工况载荷及规范化仿真流程。最后从技术性能、经济性、工艺性三方面综合评价轻量化效果,为电梯曳引机构优化提供理论与实践依据。

关键词: 电梯曳引机;轻量化设计;拓扑优化;有限元分析

引言: 电梯曳引机构作为电梯核心动力部件,关乎电梯运行效率与寿命。传统曳引机构存在重量大、能耗高、惯性力大等问题,影响电梯性能与成本。随着节能减排需求提升,轻量化设计成为重要方向。本文依据GB 7588-2023《电梯制造与安装安全规范》、GB/T 24478-2020《电梯曳引机》等相关标准,通过工程可行的材料轻量化、结构拓扑优化及尺寸参数优化等手段,实现曳引机构轻量化,并借助有限元强度校核验证其安全性与合理性,推动电梯行业技术进步。

1 电梯曳引机构结构与工作原理分析

1.1 曳引机构的功能与分类

电梯曳引机构是核心动力部件,通过曳引力驱动轿厢与对重运动,保障运行平稳安全,承受轿厢等重量。按驱动方式分有齿轮和无齿轮两类:有齿轮的通过减速箱增扭矩,适用于货梯等;无齿轮永磁同步曳引机能耗低、噪音小,广泛应用于家用梯、无机房电梯、中高速商用梯,是行业主流选型。按曳引轮数量和绕法,还可分为单轮/多轮曳引、单绕/复绕式,需根据额定载重量合理选用。

1.2 曳引机构的主要组成部分

电梯曳引机构由曳引机、曳引轮、曳引绳等组成,协同完成动力传递。曳引机为动力源,分有齿轮和无齿轮;曳引轮传递曳引力,轮槽与曳引绳贴合,材质耐磨;曳引绳承担轿厢和对重重量,采用高强度镀锌钢丝绳或压实股钢丝绳,符合GB/T 13435-2023要求;导向装置含导向轮和反绳轮;制动装置在故障时制动防坠落;联轴器传递扭矩并补偿偏差^[1]。

1.3 曳引机构的工作原理与受力分析

电梯曳引机构靠摩擦力传递动力,曳引轮与曳引绳

的摩擦力克服轿厢与对重力差,实现轿厢升降。曳引机驱动曳引轮转动,轮槽与曳引绳产生静摩擦力,带动轿厢和对重移动。受力上,曳引机构承受多种载荷:轿厢等重力,要考虑超载工况;曳引轮与曳引绳的静摩擦力,要满足曳引条件防打滑;紧急制动冲击载荷,要计入动载系数;曳引机输出扭矩,克服阻力和重力差;还有部件自身重力、惯性力等;以及钢丝绳偏载附加弯矩。合理分析受力是安全运行的前提。

2 曳引机构轻量化设计方案

2.1 轻量化设计原则与目标

曳引机构轻量化设计遵循“安全优先、性能达标、轻量化与经济性兼顾”原则,在保证强度、刚度、耐磨性及运行安全前提下最大限度降低自重,兼顾成本、工艺可行性和维护便利性。核心目标:降低自重,减少材料消耗与建筑承重要求;降低运行负荷与能耗;减少惯性力,提升平稳性、可靠性与寿命。设计需满足GB 7588-2023、GB/T 13435-2023、GB/T 24478-2020等标准要求。

2.2 材料轻量化

材料轻量化是曳引机构轻量化设计的核心途径之一,核心思路是采用高强度、适宜密度的工程材料替代传统厚重材料,在保证结构强度和使用性能的前提下,实现重量减轻。针对曳引机构各部件的功能需求,合理选用轻量化材料:曳引轮优先采用高强度球墨铸铁QT600-3,经正火+回火处理,布氏硬度控制在220~260HB,或采用高强度铸钢经正火+调质处理,屈服强度 $\geq 500\text{MPa}$;曳引绳选用高强度镀锌钢丝绳或压实股钢丝绳,商用梯、重载电梯必须采用此类材料,安全系数满足GB 7588-2023 ≥ 12 要求;高端家用梯、无机房轻型梯可试点采用

碳纤维复合钢丝绳,需额外进行抗剪切、耐弯折性能校核,安全系数提高至 ≥ 15 。机座、导向轮等部件:家用梯、轻型梯机座选用高强度压铸铝合金ZL114A(或挤压型材6061-T6),压铸成型后需进行T6时效处理,机座关键支撑部位增设加强筋,并补充蠕变校核(长期载荷下变形量 $\leq 0.1\text{mm/m}$);商用梯、重载电梯仍采用高强度钢板焊接或高强度铸铁^[2]。

2.3 结构拓扑优化设计

结构拓扑优化是曳引机构轻量化设计的重要手段,通过软件仿真,在给定设计空间、载荷与约束条件下优化材料分布,去除冗余材料,保留受力关键区域,实现重量与性能的最优平衡。拓扑优化主要针对机座、端盖、支架等非旋转非摩擦承载部件;旋转部件的非摩擦、非受力区域(如曳引轮轮毂、导向轮辐内侧)可进行局部尺寸优化,摩擦区、轮槽区、轴连接区严禁拓扑镂空。优化过程以强度、刚度、一阶固有频率为约束条件,明确设计空间、载荷约束、体积分数与最小柔度目标。机座设计可在保证支撑强度与刚度的前提下,去除内部非受力区域材料,采用筋板加强结构。曳引轮辐优先采用对称加厚辐条结构,大直径曳引轮($D > 800\text{mm}$)可采用对称镂空辐条设计,镂空处采用圆角过渡($R \geq 10\text{mm}$),避免应力集中,镂空后需进行动平衡校核(不平衡量 $\leq 0.5\text{g}\cdot\text{m}$),并验证共振频率避开电梯运行频率(1~10Hz)。拓扑优化后的结构需进行工艺性验证,去除不规则曲面、薄壁(厚度 $< 5\text{mm}$)结构,将镂空结构简化为直筋板、圆形减重孔,适配铸造、机械加工等常规工艺,模具制造复杂度增加率 $\leq 20\%$ 。

2.4 尺寸参数优化

尺寸参数优化是在拓扑优化基础上,对曳引机构各部件关键尺寸进行精细化调整,进一步降低重量、提升性能,确保尺寸匹配合理、满足运行需求。结合受力分析与性能要求,对核心部件尺寸参数进行优化:曳引轮的轮径、轮槽尺寸根据曳引绳直径与额定载重量优化,曳引轮与钢丝绳直径比按GB 7588-2023要求,对单绕式曳引,载货电梯 ≥ 40 ,乘客电梯 ≥ 45 ;复绕式曳引可降低至上述值的80%,且不得小于30;机座壁厚、筋板尺寸根据支撑载荷优化,在满足刚度要求前提下减小壁厚、优化筋板间距,减轻重量;导向轮、反绳轮的直径、宽度根据曳引绳数量与运动轨迹优化,在满足轮径比要求前提下合理减小尺寸,降低自身重量与运动阻力。优化过程中采用仿真分析与试验验证相结合的方式,避免尺寸过小导致强度不足,确保各部件尺寸匹配、无运动干涉,实现轻量化与性能的双重提升。

3 轻量化后曳引机构有限元强度校核

3.1 轻量化后模型的建立

轻量化后曳引机构有限元强度校核的前提是建立精准的有限元模型,结合轻量化设计方案,采用专业仿真软件构建各部件三维模型,再进行模型简化、网格划分、载荷施加和约束设定,确保模型与实际结构一致。模型建立过程中,首先根据轻量化设计后的尺寸参数、材料属性构建各部件三维实体模型,去除无细节,提高仿真效率;然后进行网格划分,有限元模型网格采用分区划分,曳引轮轮槽、钢丝绳接触区、螺栓预紧区等关键受力区采用细密网格(尺寸0.5~1mm),机座非受力区、支架外侧采用粗糙网格(尺寸5~8mm),并进行网格无关性验证,要求相邻两次网格细化后最大应力偏差 $\leq 5\%$;明确材料属性参数,包括弹性模量、泊松比、密度、屈服强度等;接触设置依据实际工况,曳引轮与曳引绳摩擦系数根据轮槽材质取值:铸铁本色轮槽取0.10~0.15,聚氨酯包覆轮槽取0.20~0.30,钢丝绳润滑状态下摩擦系数降低20%,仿真时考虑最不利工况(润滑态低摩擦系数);螺栓连接设为绑定或预紧接触;边界条件采用螺栓弹性约束,模拟实际安装状态。最后根据曳引机构实际工作状态施加合理载荷与约束条件,为后续有限元分析和强度校核奠定基础。

3.2 轻量化后结构有限元分析

轻量化后结构有限元分析主要针对曳引机构在典型工况下的应力、应变分布情况进行仿真计算,判断结构是否满足强度、刚度要求,识别应力集中区域,为结构优化提供依据。采用有限元软件对模型进行分析,选取多种校核工况:额定载荷正常运行工况、125%额定载荷超载工况、紧急制动冲击工况、制动扭矩工况、偏载载荷工况,分别计算各工况下各部件的应力分布、应变值和位移量。分析过程中重点关注曳引轮轮槽、机座支撑部位、曳引绳与曳引轮接触部位、螺栓连接区域等关键受力点,这些区域易出现强度不足问题。通过有限元分析可清晰获取各部件的最大应力值、最大应变值和最大位移量^[3]。同时,针对电梯交变载荷工况特点,必须补充疲劳寿命校核,提取应力时间历程,采用雨流计数法获取应力幅,依据材料S-N曲线和平均应力修正准则计算疲劳损伤,按电梯使用类型划分疲劳寿命要求:家用梯、轻型梯关键部件满足 ≥ 1000 万次循环不失效;商用梯、公共建筑电梯满足 ≥ 5000 万次循环不失效;公共交通梯(如商场、地铁)满足 ≥ 1 亿次循环不失效,均采用雨流计数法+Miner线性累积损伤准则校核。

3.3 校核结果对比分析

轻量化后曳引机构有限元强度校核结果对比分析,主要将轻量化后结构的分析结果与轻量化前、材料许用值、国标许用变形量进行对比,全面评价轻量化设计的合理性和安全性。对比内容主要包括三个方面:一是轻量化前后各关键部件的最大应力、应变和位移对比,验证轻量化后结构是否在强度、刚度允许范围内,同时统计重量降低率、应力降低率等量化指标;二是将轻量化后结构最大应力与材料许用应力对比,确保最大应力小于许用应力,安全系数满足国标要求,避免出现结构损坏失效;三是对比国标许用变形量要求,确保轻量化后结构变形在允许范围内。通过对比分析,若轻量化后结构应力、应变均满足要求且重量显著减轻,说明轻量化设计方案可行;若存在应力集中、强度不足等问题,则需针对薄弱环节进行二次优化。某家用梯曳引机机座经优化后,最大应力由112MPa降至96MPa,重量由86kg降至72kg,减重16.3%,疲劳安全系数1.8,满足1000万次循环寿命要求。

4 轻量化效果综合评价

4.1 技术性能评价

轻量化后曳引机构的技术性能评价,主要围绕强度、刚度、运行平稳性、安全性、能耗等核心指标展开,全面评估轻量化设计对技术性能的影响。强度方面,通过有限元强度校核验证,轻量化后结构最大应力小于材料许用应力,安全系数满足国标要求,无应力集中和结构失稳问题;刚度方面,轻量化后各部件位移量控制在允许范围内,无明显变形,确保运行平稳,避免振动、异响等问题;疲劳寿命方面,经校核关键部件满足相应使用类型的循环寿命要求,具备足够抗疲劳能力。运行性能方面,轻量化后自身重量减轻,惯性力减小,曳引机负荷降低,电梯启动、制动更加平稳,运行噪音显著降低,提升乘坐舒适性;安全性方面,制动装置响应更加灵敏,曳引绳受力更加均匀,降低打滑、坠落等安全隐患^[4]。

4.2 经济性分析

轻量化后曳引机构的经济性分析主要从制造成本、运行成本、维护成本三个方面展开,评估轻量化设计的经

济可行性。制造成本方面,轻量化设计初期因新材料采购、模具改造,制造成本较传统设计上升5%~10%;当年产量 ≥ 1 万台时,因材料用量减少、加工工时降低,整体制造成本与传统设计持平,年产量超2万台后成本降低3%~5%;运行成本方面,轻量化后重量减轻,曳引机能耗降低8%~12%(中高速电梯 $> 10\%$),长期运行可节省可观电费,全生命周期(15年)节能收益覆盖初期成本增加;维护成本方面,轻量化结构更简洁,维护难度降低,维护工时减少,费用相应降低,同时惯性力减小,部件磨损减少,延长了曳引绳、曳引轮等易损部件使用寿命。

4.3 工艺性评价

工艺性评价评估方案是否符合加工工艺要求。材料工艺方面,高强度球墨铸铁、铸钢、压铸铝合金均为常用材料,加工工艺成熟。结构工艺方面,拓扑优化后结构经工艺性验证,适配常规加工。量产时新增专项检测:铝合金机座检测蠕变性能、动刚度;曳引轮检测动平衡、轮槽硬度($\geq 220\text{HB}$);检测设备改造投入 ≤ 10 万元。装配方面,重量减轻降低装配难度,提升效率。轻量化设计遵循模块化、标准化要求,关键尺寸符合GB/T 24478-2020及行业规范,确保适配性。

结束语

通过对电梯曳引机构轻量化设计及有限元强度校核研究,依据GB 7588-2023、GB/T 24478-2020等相关标准,采用工程可行的材料轻量化方案、符合安全规范的结构拓扑优化及尺寸参数优化,实现了在保证结构强度、刚度、疲劳寿命及运行安全性的前提下,提升运行平稳性与可靠性。综合评价显示,轻量化设计在技术性能、经济性和工艺性上均表现良好,具有较高可行性。未来可进一步探索新材料、新工艺,持续优化设计,推动电梯行业向更高效、节能、安全的方向发展。

参考文献

- [1]雷意楠,李万莉.电梯曳引轮有限元分析及拓扑优化设计[J].今日制造与升级,2024(12):43-46.
- [2]金仲平,王涤宇,张雍,等.不同工作状态下的电梯曳引系统关键部件受力分析[J].中国电梯,2022,33(13):13-15.