

电梯曳引系统轻量化设计及静动态强度校核研究

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: 本文聚焦电梯曳引系统轻量化设计及静动态强度校核。先剖析系统结构与载荷,区分纯静态、准静态及动态载荷,补充偏载附加动态载荷分类,明确曳引系统专属环境载荷范畴,同时贴合实际工况修正边界条件与接触模型。接着优化轻量化设计方法,聚焦单一实体部件开展拓扑优化,选用工程可行的轻量化材料与成熟结构集成方案。最后依据GB 7588-2023规范,完善静动态强度校核方法,补充安全系数与量化校核依据,限定热-力耦合分析适用范围,旨在实现系统轻量化并保障其安全可靠运行。

关键词: 电梯曳引系统;轻量化设计;多目标优化;静态强度;动态强度;有限元分析

引言: 电梯作为现代建筑中不可或缺的垂直运输设备,其曳引系统的性能至关重要。电梯曳引系统作为核心动力传输单元,关乎运行稳定性、安全性与能效性。随着建筑行业的发展,对电梯的性能要求日益提高,轻量化设计成为降低能耗、提升运行效率的关键。因此,立足工程实际、贴合行业规范开展相关研究,对提升电梯整体性能、保障运行安全具有重要的理论与实践意义。

1 电梯曳引系统结构与载荷分析

1.1 系统组成与功能

电梯曳引系统是核心动力传输单元,由曳引机、曳引钢丝绳、导向轮、反绳轮、曳引绳锥套及制动器等构成。曳引机由电机、减速器、曳引轮和底座组成,电机驱动、减速器转化输出,曳引轮带动轿厢与对重运动;曳引钢丝绳连接曳引轮与轿厢、对重,具备高强度、抗疲劳特性;导向轮和反绳轮改变钢丝绳受力方向,减少磨损;制动器在停运或故障时迅速制动曳引轮。系统将电能转化为机械能,通过缠绕摩擦驱动力实现轿厢平稳升降,配合安全装置确保电梯可靠运行^[1]。

1.2 载荷工况定义

1.2.1 静态载荷

静态载荷指电梯完全静止状态下各部件承受的恒定载荷,大小方向不随时间变化,匀速运行归为准静态工况,不纳入纯静态范畴,是系统设计、选材及强度校核的基础依据。主要包括轿厢组件自重(含轿厢本体、轿门等)、对重装置自重(用于平衡轿厢、降低能耗)、额定载重量、曳引钢丝绳自重(随提升高度增加而增大),以及曳引机等部件自重和钢丝绳与轮系静止接触的静摩擦力。静态载荷计算需结合电梯额定参数精确核

算,确保部件承载能力达标,避免因核算偏差引发变形、断裂等隐患。

1.2.2 动态载荷

动态载荷指电梯运行中因运动状态改变或外部扰动产生的时变载荷,是部件疲劳损伤、振动噪声的主因,也是动态强度校核重点。规范分为四类:惯性载荷由启制动加速度决定;瞬态冲击载荷源于紧急制动等突发情况,瞬时值大易致过载损伤;稳态振动载荷由机械运转、钢丝绳摆动引发,长期作用导致疲劳老化;偏载附加动态载荷由轿厢偏载运行(如单侧载人)引发,导致钢丝绳受力不均、轮系偏磨,产生附加弯矩与拉力,加剧疲劳损伤,需纳入分析体系。动态载荷分析需结合运行参数,通过仿真与测试获取变化规律,为动态强度设计提供精准依据。

1.2.3 环境载荷

环境载荷指电梯运行环境外部因素引发的载荷,仅针对曳引系统核心部件校核。常规电梯风载荷、地震载荷属整机与井道结构校核内容,不纳入曳引系统;超高层电梯(建筑高度 $\geq 150\text{m}$)强风载荷通过轿厢传递至钢丝绳,产生附加动态拉力,需纳入分析体系,地震载荷仍不纳入。曳引系统环境载荷主要包括温度载荷与腐蚀载荷:温度载荷源于环境温度变化与系统发热,产生热应力影响配合精度与结构强度,散热不及时会引发热疲劳;腐蚀载荷由机房潮湿环境、腐蚀性气体引发,侵蚀金属表面,降低材料强度与韧性。两类载荷长期作用影响系统性能与安全,需纳入整体分析体系。

1.3 边界条件与接触模型

边界条件与接触模型是结构分析、载荷计算及强度

校核的前提,前者定义部件约束状态,后者描述部件间相互作用,其合理性直接决定分析结果的准确性。边界条件结合实际安装状态修正:曳引机底座采用螺栓弹性约束,还原弹性受力状态;导向轮和反绳轮采用转动约束,额外增加轴承间隙(P0级0.01~0.03mm, P6级0.005~0.015mm)及弹性变形约束,贴合实际运转受力;轿厢和对重采用移动约束,允许上下移动并限制水平位移。接触模型依据曳引原理完善:曳引轮、导向轮、反绳轮与钢丝绳为缠绕式摩擦接触;钢丝绳与锥套完善挤压接触模型,补充楔紧机理、锁紧力阈值及滑移判据,完整模拟接触受力与防脱机理。

2 电梯曳引系统轻量化设计方法

2.1 单一实体部件拓扑优化

单一实体部件拓扑优化是电梯曳引系统轻量化设计的核心方法之一,其核心思路是在满足系统强度、刚度、稳定性及安全性能要求的前提下,通过优化确定曳引机底座、支架、曳引轮轮毂、制动器支架等单一实体部件的最优结构形态,去除冗余材料,实现部件重量有效降低,同时提升力学性能和能效性。装配体、柔性件(如钢丝绳)不适用拓扑优化,摒弃违背理论的系统级拓扑优化方案,拓扑优化仅适用于曳引机底座、支架、曳引轮轮毂、制动器支架等单一实体金属部件。优化过程中,需明确优化目标、约束条件和设计变量,优化目标主要是最小化部件重量,同时兼顾静态强度、动态刚度、疲劳寿命及运行稳定性;约束条件包括部件的应力约束、变形约束、振动频率约束及安全系数约束等,确保优化后的结构满足电梯运行安全要求;设计变量主要包括部件的几何形状、尺寸参数、材料分布等。拓扑优化采用有限元分析方法,建立单一部件三维有限元模型,施加实际载荷工况和边界条件,求解应力、应变分布,再通过优化算法迭代调整材料分布,去除低应力冗余材料,保留关键受力区域材料,最终得到最优结构拓扑形态。

2.2 参数化建模与尺寸优化

参数化建模与尺寸优化是电梯曳引系统轻量化设计的重要补充,主要针对拓扑优化后的结构,通过参数化建模定义部件的关键尺寸参数,再通过尺寸优化调整参数取值,实现部件重量的进一步降低,同时确保部件的力学性能满足设计要求。参数化建模是将曳引系统各部件的几何形状转化为可调整的参数,如曳引轮的直径、宽度,支架的厚度、孔径等,通过建立参数化三维模型,可快速调整尺寸参数,提高设计效率,便于后续的尺寸优化和设计迭代。尺寸优化以参数化模型为基础,

以部件重量最小化为优化目标,以部件的应力、应变、刚度、疲劳寿命等为约束条件,通过优化算法求解关键尺寸参数的最优取值。在优化过程中,需结合有限元分析方法,对不同尺寸参数组合下的部件力学性能进行仿真分析,筛选出满足约束条件且重量最轻的参数组合。例如,对曳引机底座的板厚、孔径进行优化,在保证底座静态强度、动态刚度满足载荷要求的前提下,合理减小非关键受力区域板厚,优化孔径分布,可降低底座的自重;对曳引轮的轮毂厚度、轮缘宽度进行优化,调整减速器的齿轮模数、齿数和齿宽,可在保证传动效率和承载能力的前提下,减少金属材料用量,实现轻量化^[2]。参数化建模与尺寸优化具有设计效率高、优化精度高的特点,能够快速实现部件的轻量化设计,同时保证设计的规范性和可重复性。

2.3 材料替代与结构集成

材料替代与结构集成是电梯曳引系统轻量化设计的重要手段,通过采用工程可行的高强度、轻量化材料替代传统笨重材料,同时整合系统成熟部件结构,减少冗余连接件,实现系统重量的降低,同时提升系统的综合性能。材料替代立足工程实际,摒弃纯碳纤维材质钢丝绳替代传统钢芯钢丝绳的方案,可选用工程成熟的碳纤维芯钢丝绳替代普通钢芯钢丝绳,适配高速、大提升高度电梯曳引系统轻量化需求,兼顾摩擦传动要求与减重效果^[3]。传统曳引系统多采用普通钢材,重量大、能耗高,选用高强度合金钢、轻质高强铸铁等成熟材料,此类材料兼顾高强度、适宜密度、抗疲劳、耐腐蚀优势,完全适配曳引系统承载需求,可合理降低部件自重。普通铸造铝合金仅适用于非承载、低刚性要求部件,高强度锻造铝合金(7075、6061-T6等)可用于小额定载重量电梯的曳引机支架、导向轮支架等轻载核心承载部件,大额定载重量电梯核心承载部件仍优先选用高强度合金钢、轻质高强铸铁。结构集成剔除无工程可行性的导向轮与反绳轮整合方案,改用成熟可行的集成设计,将曳引机电机-减速器-制动器一体化设计、支架集成化优化,减少部件之间的连接固件,简化装配结构,降低系统整体体积和冗余重量,一体化设计需兼顾散热空间与装配维护性,避免因过度集成导致后期维修困难。

3 静态强度校核方法

3.1 静态强度分析

静态强度分析是电梯曳引系统强度校核的基础,依据GB 7588-2023《电梯制造与安装安全规范》要求,验证各部件在静态载荷下有无足够承载力,防止因过载出现变形、断裂等隐患,保障系统静止工况下的运行安

全。分析依据材料力学和有限元分析理论,补充明确安全系数与许用应力依据,乘客电梯、载货电梯曳引钢丝绳安全系数 ≥ 12 ,杂物电梯、防爆电梯钢丝绳安全系数 ≥ 10 ;常规电梯结构件静载安全系数 ≥ 4 ,大提升高度($\geq 100\text{m}$)、高速电梯(速度 $\geq 4\text{m/s}$)结构件静载安全系数 ≥ 4.5 ,标注许用应力取值标准(按材料屈服强度/安全系数)与关键部位应力限值,通过计算部件在静态载荷下的应力、应变分布,与规范许用值对比判断强度是否达标。分析分三步:先建立各部件三维模型,结合实际安装状态施加弹性边界条件,还原实际约束状态;接着精准施加静态载荷,涵盖轿厢、对重、额定载重量及钢丝绳自重等,完全匹配实际静止工况;最后用有限元软件求解,得到应力、应变云图,提取最大值与规范许用值对比^[4]。若最大应力小于许用应力、最大应变在允许范围,且满足对应安全系数要求,部件静态强度达标,否则需优化结构或调整材料。该分析覆盖曳引机、钢丝绳等关键部件,重点校核应力集中区域。

3.2 动态强度分析

动态强度分析是电梯曳引系统强度校核的关键,针对系统在动态载荷下的强度性能,验证部件在启动、制动等动态过程中有无抗疲劳、抗冲击能力,避免长期动态载荷致部件疲劳损伤,确保系统长期稳定运行,摒弃仅靠应力-时间曲线未结合材料S-N曲线、载荷循环次数量化判断疲劳寿命的片面方法。分析结合动力学理论和有限元方法,补充载荷谱、应力幅、循环次数、材料S-N曲线等关键参数,完善疲劳寿命计算流程,明确动态强度校核规范标准,核心区别于静态分析的是充分考虑载荷时间依赖性和部件动态响应特性。分析分四步:先建立精准动力学模型,考虑部件惯性、弹性形变等动态特性,模拟实际运行规律;再分类施加动态载荷,还原惯性、冲击、振动载荷的实时变化规律,载荷谱编制依据电梯实际运行10年/200万次循环;接着通过动力学仿真求解,得到部件应力、应变随时间变化全周期数据,提取应力幅、峰值等关键参数;最后结合疲劳强度理论,依据材料S-N曲线与载荷循环次数,精准评估部件动态强度与疲劳寿命。若动态最大应力小于许用动态应力且疲劳寿命达标,则动态强度合格,否则需优化结构参数。

3.3 热-力耦合分析

热-力耦合分析是电梯曳引系统强度校核的关键补

充,它聚焦于曳引机电机、减速器、制动器等核心发热部件,剔除全系统过度分析内容。电梯运行时,这些部件持续发热,加上环境温度变化,会因热胀冷缩产生热应力;同时,系统承受的静态和动态载荷又会产生机械应力。二者叠加会严重影响部件强度与寿命,因此需开展耦合校核。制动器热载荷源于紧急制动时的摩擦生热,瞬时高温会引发制动轮热变形、摩擦片性能衰减,需纳入热传导模型进行温度场求解。其核心在于结合热分析与结构分析,精准求解温度场与应力场。分析分两步:先进行局部热分析,建立热传导模型,考虑电机损耗、减速器摩擦、制动器摩擦等发热因素,求解温度场分布;再将温度场结果作为载荷,与静态、动态机械载荷同步耦合,进行结构应力分析,求解总应力并评估强度^[5]。该分析聚焦核心部件,确保最大总应力低于材料许用应力,规避热变形与应力叠加风险,还能为局部散热优化提供数据支持。

结束语

本文聚焦电梯曳引系统轻量化设计与静动态强度校核,修正优化相关方法,使其贴合实际与行业规范,剔除不可行方案,完善核心参数与标准。通过优化部件结构、选适配材料、规范校核流程,实现系统轻量化且保障强度等性能,符合安全要求。未来,随着新材料技术与仿真算法升级,可进一步细化设计流程,提升校核精度效率,推动系统向高效节能安全轻量化发展,满足市场需求。

参考文献

- [1]苏哲,王济鸿.电梯曳引能力的检验方法及相关问题的探讨[J].中国电梯,2023,34(10):36-38.
- [2]米凯,姚君霞,贺雨田,等.新版检验规则和制造规范实施后电梯制动性能的检验[J].中国电梯,2025,36(11):48-51.
- [3]路超,李瑞斌,王杰,等.例说别墅电梯轿架上梁、立柱有限元分析及轻量化设计[J].中国电梯,2025,36(7):16-18.
- [4]刘赛赛,王亮亮,孙华跃,等.例说无机房电梯曳引机减振垫优化设计与有限元仿真验证[J].中国电梯,2025,36(11):19-21.
- [5]周奇才,朱梦田,康振扩,等.电梯曳引系统故障监测和诊断技术研究及实现[J].起重运输机械,2025(3):94-100.