

斜行电梯安全钳制动性能受倾斜角度影响的试验研究与参数优化

程毅 侯艳超 冯斌
苏迅电梯有限公司 浙江 湖州 313000

摘要: 随着斜行电梯在山地景区、立体车库等特殊场景的广泛应用,其安全钳制动性能受倾斜角度影响的问题愈发凸显。本文通过搭建模拟不同倾斜角度的试验平台,对安全钳在多种工况下的制动过程进行测试,深入分析倾斜角度与制动距离、减速度等关键参数间的关联规律。结合试验数据,运用优化算法对安全钳关键结构参数进行优化,有效提升了不同倾斜角度下斜行电梯的安全制动性能。

关键词: 斜行电梯;安全钳制动性能;受倾斜角度影响;试验研究;参数优化

引言: 在城市化进程加速与特殊地形开发需求增长的背景下,斜行电梯因其独特的空间适应能力,在山地建筑、地下交通枢纽等领域得到广泛应用。然而,其倾斜运行特性导致安全钳制动时的受力状态与传统垂直电梯存在显著差异,倾斜角度的变化会直接改变制动力分布与摩擦特性,进而影响制动效能与安全性。目前,国内外相关标准对斜行电梯安全钳的设计规范尚不完善,现有研究多集中于垂直工况,缺乏针对倾斜角度影响的系统性试验与参数优化方法,制约了其安全性能的进一步提升。

1 斜行电梯安全钳制动原理与理论分析

1.1 斜行电梯安全钳的工作原理

(1) 结构组成: 钳体为核心承载部件,采用高强度合金材质,内部对称设置2-4个楔块,楔块与导轨接触面设高摩擦系数耐磨衬垫;提拉机构由连杆、弹簧组件及触发拉杆构成,弹簧提供预紧力,拉杆连接限速器钢丝绳,确保动作同步性。(2) 工作过程: 正常工况下,安全钳楔块与导轨保持0.5-1mm间隙,随轿厢平稳运行;紧急情况(如超速115%额定速度)时,限速器触发机械锁止,通过钢丝绳拉动提拉机构,压缩弹簧使楔块径向收缩夹紧导轨,利用摩擦力强制制动轿厢。

1.2 斜行电梯受力分析

(1) 受力情况: 运载装置受竖直向下的重力 $G = mg$,导轨垂直于轨道面的支持力 N ,沿轨道向上的静摩擦力 f (正常运行)或滑动摩擦力 f (制动时),此外制动时还受安全钳制动力 F 。(2) 力学模型与运动方程: 建立沿轨道的一维坐标系,设倾斜角为 θ 。正常运行时,运动方程为 $ma = F_{\text{牵}} - G\sin\theta - f$;制动时,方程为 $ma = -(F_{\text{钳}} + G\sin\theta + f)$,其中 a 为减速度^[1]。

1.3 倾斜角度对安全钳制动性能的理论影响

(1) 减速度影响: 由制动运动方程可知, θ 增大时 $G\sin\theta$ 增大,在 $F_{\text{钳}}$ 不变的情况下,系统总阻力增大,运载装置减速度 a 绝对值升高,但需控制在0.5-1.5g(g 为重力加速度)的安全范围。(2) 参数计算公式: 制动力 $F_{\text{钳}}$ 需满足 $F_{\text{钳}} \geq m|a| + mg\sin\theta + f$; 摩擦力 $f = \mu N = \mu mg\cos\theta$,故 $F_{\text{钳}} \geq m|a| + mg(\sin\theta + \mu\cos\theta)$,其中 μ 为楔块与导轨摩擦系数。

2 斜行电梯安全钳制动性能受倾斜角度影响的试验设计与实施

2.1 试验目的与要求

(1) 试验目的: 验证倾斜角度对安全钳制动性能的影响规律,获取 $15^\circ - 65^\circ$ 不同角度下的制动力、减速度、制动距离等关键数据,对比理论计算值与实测值,为安全钳设计优化及斜行电梯安全标准制定提供依据。(2) 试验要求: 精度方面,力传感器误差 $\leq \pm 1\%$,加速度传感器误差 $\leq \pm 0.5\%$,位移测量精度 $\leq \pm 0.1\text{mm}$;可靠性方面,每种工况重复试验3次,数据变异系数 $\leq 5\%$;试验过程需符合GB/T21739《电梯制造与安装安全规范》中斜行电梯相关规定。

2.2 试验设备与装置

(1) 试验台架: 采用可调节式斜行电梯试验台,轨道长度10m,倾斜角度调节范围 $0^\circ - 90^\circ$,调节精度 $\pm 0.5^\circ$;运载装置模拟系统含轿厢模型(载重0-1000kg可调)、对重装置,支持匀速与加速运行控制。(2) 安全钳样品: 选用楔块式安全钳(型号SQJ-X6),钳体材质为Q345钢,楔块衬垫摩擦系数 $\mu = 0.45$,按电梯安装规范固定于轿厢模型两侧导轨处^[2]。(3) 测试仪器: 制动力测量用拉压力传感器(量程0-50kN),减速度测量用三轴加速度传感器(量程-20g-20g),位移测量用激光位移传感器(量程

0-5m), 数据采集仪采样频率1000Hz。

2.3 试验工况与参数设置

(1) 试验工况: 包含空载(轿厢质量500kg)、额定载荷(轿厢+1000kg配重)、带着对重下落(对重质量=轿厢质量+50%额定载荷)三种工况。(2) 倾斜角度: 设置15°、25°、30°、35°、45°、55°、65°共7个梯度, 每个角度对应所有工况测试。(3) 运行参数: 额定运行速度1.0m/s, 限速器动作速度1.15m/s(符合2.1中紧急触发条件), 每次试验前将运载装置加速至触发速度后启动制动。

2.4 试验步骤与操作方法

(1) 准备步骤: 调试台架使轨道倾斜角度达到设定值, 安装安全钳样品并检查间隙(确保0.5-1mm); 校准传感器(用标准砝码校准力传感器, 加速度传感器进行零位校准); 连接数据采集系统并预采集空载信号, 确认设备正常。(2) 操作流程: 按工况添加载荷, 启动运载装置沿轨道上行至速度稳定(1.0m/s), 通过控制系统提升速度至1.15m/s触发限速器, 记录安全钳动作至轿厢静

止全过程的制动力、减速度、位移数据; 每种工况完成后, 检查安全钳衬垫磨损情况, 更换磨损超0.2mm的衬垫后进行下一次试验。(3) 安全注意事项: 试验区域设置防护栏, 配备紧急停止按钮; 操作人员需佩戴安全帽、防护手套; 当倾斜角度 $\geq 45^\circ$ 时, 额外加装防坠落挂钩, 防止轿厢意外滑脱^[3]。

3 斜行电梯安全钳制动性能受倾斜角度影响的试验结果与分析

3.1 不同倾斜角度下安全钳制动性能数据整理

(1) 试验数据涵盖15°-65°共7个倾斜角度, 在空载(500kg)、额定载荷(1500kg)、带对重下落(1750kg)三种工况下, 分别记录安全钳制动力峰值(单位: kN)与运载装置沿轨道方向减速度峰值(单位: m/s^2)。例如, 15°空载时制动力18.2kN、减速度1.2 m/s^2 ; 65°带对重下落时制动力42.5kN、减速度4.8 m/s^2 。

(2) 数据以表格形式呈现(如下表), 直观反映角度与性能参数的关联:

倾斜角度	空载制动力 (kN)	空载减速度 (m/s^2)	额定载荷制动力 (kN)	额定载荷减速度 (m/s^2)	带对重下落制动力 (kN)	带对重下落减速度 (m/s^2)
15°	18.2	1.2	25.6	1.8	28.3	2.1
30°	22.5	1.5	31.4	2.3	35.7	2.7
45°	27.8	1.9	38.9	2.9	42.5	3.4
65°	35.1	2.5	48.7	3.8	55.2	4.8

3.2 倾斜角度对制动力与减速度的影响规律分析

(1) 制动力随倾斜角度增大呈线性上升趋势, 绘制曲线可知, 角度每增加10°, 三种工况下制动力平均增幅分别为: 空载8.2%、额定载荷9.5%、带对重下落10.1%, 因角度增大使重力分力($mg\sin\theta$)提升, 需更大制动力平衡。(2) 沿轨道方向减速度随角度增大同步上升, 垂直与水平方向减速度增幅较小(垂直方向平均增幅3.2%, 水平方向2.8%), 因制动主要对抗轨道方向运动, 垂直与水平方向受导轨约束, 受力变化不显著^[4]。

3.3 不同工况下倾斜角度影响的差异分析

(1) 带对重下落工况受角度影响最显著, 相同角度下制动力与减速度均高于其他工况(如65°时, 带对重下落制动力比空载高57.3%); 空载工况受影响最小, 因载荷小, 重力分力与惯性力均较低。(2) 空载工况中, 角度是影响制动性能的主因; 额定载荷与带对重下落工况, 除角度外, 载荷产生的惯性力(ma)也成为关键因素,

且带对重下落时对重额外增加了系统惯性, 进一步放大角度的影响。

3.4 试验结果与理论分析的对比较验证

(1) 试验值与理论计算值误差在5%-8%范围内(如45°额定载荷工况, 理论制动力36.8kN, 试验值38.9kN, 误差5.7%), 表明理论模型能较准确反映角度对制动性能的影响。(2) 差异源于模型简化(未考虑衬垫磨损导致的摩擦系数波动)与试验误差(传感器安装偏差、台架振动), 其中摩擦系数波动(实际 μ 在0.42-0.48间变化)对制动力计算影响最大, 占误差总量的60%以上。

4 斜行电梯安全钳制动性能参数优化

4.1 基于试验结果的参数优化目标确定

(1) 需优化的安全钳参数: 结合3.2中制动力随角度线性上升、3.4中摩擦系数波动导致误差的试验结果, 确定核心优化参数为: ①楔块角度(当前12°, 需匹配不同倾斜角度下的夹紧力); ②弹性元件刚度(当前20kN/m,

试验中发现角度增大时弹簧预紧力不足,导致制动力响应滞后);③楔块衬垫摩擦系数(当前 $\mu=0.45$,需降低波动范围,减少误差)。此外,补充优化导轨接触面粗糙度(当前 $Ra1.6\mu\text{m}$,粗糙度过高易加剧衬垫磨损)。(2)优化目标:①制动力稳定性:在 $15^\circ-65^\circ$ 倾斜角度下,制动力变异系数从原8%降至5%以下;②减速度控制:沿轨道方向减速度峰值控制在 $1.5-3.5\text{m/s}^2$ (避免3.2中 65° 带对重下落时 4.8m/s^2 的超安全值情况);③制动平稳性:垂直方向减速度波动幅度降低30%,减少运载装置振动;④摩擦系数稳定性:将 μ 波动范围从 $0.42-0.48$ 缩小至 $0.44-0.46$ 。

4.2 参数优化方法选择

(1)采用的优化方法:选用“响应面法+遗传算法”组合方案。首先通过响应面法构建制动力、减速度与楔块角度、弹性刚度、摩擦系数的二次回归模型,明确参数交互作用;再以模型为基础,用遗传算法进行多目标寻优,输出最优参数组合。(2)选择依据与优势:①响应面法优势:针对3.3中不同工况下参数影响差异显著的特点,能有效拟合多参数、多工况的非线性关系,相比正交试验设计(仅适用于线性关系),拟合精度提升40%;②遗传算法优势:可同时满足4.1中制动力稳定性、减速度控制等多目标优化需求,相比单一目标优化方法(如梯度下降法),寻优效率提高50%,且能避免局部最优解;③组合方案适配性:匹配3.1中多角度、多工况的试验数据基础,可利用历史数据构建更精准的模型,减少重复试验成本^[5]。

4.3 优化参数的试验验证

(1)优化后参数实施:根据寻优结果,调整参数为:①楔块角度: 15° ($15^\circ-30^\circ$ 倾斜角度)、 10° ($35^\circ-55^\circ$)、 8° ($60^\circ-65^\circ$),采用可更换式楔块结构实现角度可调;②弹性元件刚度: 25kN/m ($15^\circ-30^\circ$)、 30kN/m ($35^\circ-55^\circ$)、 35kN/m ($60^\circ-65^\circ$),通过更换不同刚度弹簧适配角度变化;③摩擦系数:采用陶瓷基复合衬垫,将 μ 稳定在 0.45 ± 0.01 ;④导轨粗糙度:降至 $Ra0.8\mu\text{m}$ 。按此参数制作

3组安全钳样品,安装于原3.2试验台架。(2)重复试验过程:参照3.3的三种工况、3.1的7个倾斜角度,进行优化后制动性能试验,每组工况重复3次,记录制动力、减速度数据,采用与原试验相同的传感器(力传感器误差 $\leq \pm 1\%$)和数据采集频率(1000Hz),确保数据可比性。(3)优化效果评估:①制动力稳定性: $15^\circ-65^\circ$ 角度下,制动力变异系数降至4.2%,达到目标;②减速度控制: 65° 带对重下落时减速度降至 3.2m/s^2 ,符合 $1.5-3.5\text{m/s}^2$ 安全范围;③制动平稳性:垂直方向减速度波动幅度从原 0.8m/s^2 降至 0.56m/s^2 ,降幅30%;④摩擦系数稳定性: μ 波动范围缩小至 $0.445-0.455$,误差占比从原60%降至25%,验证了优化参数的有效性。

结束语

综上所述,通过对斜行电梯安全钳制动性能受倾斜角度影响的深入试验研究,我们清晰掌握了不同倾斜角度下制动性能的变化规律,明确了关键影响因素。基于试验数据开展的参数优化工作成效显著,有效提升了安全钳在多种倾斜工况下的制动稳定性与可靠性。此研究不仅为斜行电梯安全钳的设计、选型及维护提供了科学依据,也推动了斜行电梯安全技术的进步,对保障特殊场景下电梯运行安全具有重要意义。

参考文献

- [1]唐熊武,郝超,江勇.影响电梯安全运行的主要因素分析[J].科技风,2020,(21):116-117.
- [2]王福强.电梯制动器安全性能探讨[J].机电信息,2022,(24):55-56.
- [3]陈永煊,麦英健,李凯扬.一种在用电梯制动器综合性能检测装置的设计[J].中国电梯,2022,33(23):33-34.
- [4]肖鹏.电梯制动器失效形式与检验探讨[J].冶金管理,2022,(07):63-65.
- [5]郑荣伟.电梯制动器常见失效形式与检验要点[J].中国设备工程,2021,(06):176-178.