

曳引式电梯振动特性分析与故障诊断研究

罗荣桢

(广东省特种设备检测研究院中山检测院, 广东 中山 528400)

摘要 曳引电梯作为现代建筑垂直交通的主动脉, 其运行平稳与安全是衡量城市基础设施品质的核心指标。振动直接决定了乘运品质与健康状态, 幅值过高既会降低舒适度, 也可能触发事故。本文先梳理主要振源: 曳引机、导向系统、钢丝绳及导轨; 随后搭建动力学模型, 并在现场同步测试, 采集电梯在多种工况下的振动信号; 接着用现代信号处理手段提取特征, 锁定与特定故障对应的特征频率; 最后以这些参数建立诊断模型, 可精确定位曳引轮槽磨损、导靴松动、导轨接头不平等常见故障, 以期为提升电梯的智能运维水平、保障公共安全提供有益参考。

关键词 曳引式电梯; 振动特性; 故障诊断; 动力学模型

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.010

0 引言

目前, 曳引式电梯已成为现代楼宇的垂直交通核心, 其可靠程度直接影响人们的生命财产安全和日常出行效率。设备服役年限延长、启停次数攀升, 使机械磨损加剧, 振动随之放大。电梯振动由曳引单元、导向装置等多部件耦合激励产生, 属于典型的多源耦合现象。异常振动不仅会降低乘坐品质, 更预示关键零件可能失效, 若放任可能酿成重大故障。厘清振动规律并构建智能诊断方法, 是电梯维护由定期检修迈向预测性维修的突破口。旋转机械振动诊断虽已相对成熟, 却缺少面向电梯耦合振动的系统研究。为此, 本文以系统动力学为主线, 融合理论建模、实验测试与信号处理, 尝试形成一条完整的故障诊断技术路径, 为高效在线监测系统的研发奠定基础, 助力电梯产业智能化升级。

1 曳引式电梯振动系统概述与振动源分析

曳引式电梯是一个由机电部件组成的复杂动力学系统。其主要的振动源可分为以下几类。

1.1 曳引传动系统振动源

曳引传动系统既是电梯的动力中枢, 也是主要振动来源。曳引机由电动机、制动器和曳引轮组成: 电动机转子动不平衡、轴承磨损以及齿轮箱(有齿机型)的齿形误差与啮合冲击, 都会激起高频振动; 制动器闸瓦若未完全脱离制动盘, 或摩擦状态异常, 则易诱发低频抖动。钢丝绳与曳引轮槽的相互作用同样关键——绳体在槽内的周期性滑移、挤压, 以及绳槽不均匀磨损, 产生与绳速和槽数同步的周期性激励, 成

为电梯垂直振动的重要诱因。上述激励经机械路径传递, 直接削弱轿厢运行的平稳性^[1]。

1.2 导向系统振动源

导向系统约束轿厢和对重的运动自由度, 是电梯平稳运行的核心部件。导轨的安装精度直接决定水平振动强度: 接头台阶、弯曲或扭曲, 以及表面不平顺, 都会在轿厢和对重通过时激起冲击振动。导靴与导轨的间隙同样不容忽视。无论是滑动还是滚动形式, 间隙过大或衬垫磨损都会让轿厢出现晃动与撞击; 滚动导靴的滚轮失圆或轴承损坏, 则带来周期性振动。这些扰动不经衰减便传入轿厢, 乘客的舒适感随之下降。

1.3 钢丝绳系统振动源

钢丝绳系统柔性大、阻尼低, 运行中常出现复杂的横向与纵向振动。多绳协同使模态更为丰富, 高速电梯中, 绳的纵向伸缩会直接降低轿厢平层精度并削弱乘坐舒适性^[2]。振动不仅源于绳自身的动力学, 还与曳引轮、导向装置等部件相互耦合, 使分析难度显著增加。

2 电梯振动特性的测试与信号分析方法

2.1 振动测试方案设计

可靠的振动测试方案是准确刻画电梯动态特性的前提。传感器应布设在关键位置: 曳引机底座用于捕捉主机振动; 轿厢顶部与底部分别记录垂直和水平方向的振动; 导轨支架处安装探头可识别导轨自激信号。为还原真实工况, 测试需覆盖上行、下行、启动、匀速及制动各阶段, 并考虑建筑高度差异, 在底层、中间层和顶层分别采集数据, 以评估导轨全程健康状况及系统在不同高度的动态响应。测点与传感器配置汇总于表1。

表 1 振动测试测点与传感器配置表

测点编号	测点位置	传感器类型	测量方向	主要观测目的
MP1	曳引机底座	工业加速度计	垂直、水平	曳引机本体振动 (电机、轴承、齿轮)
MP2	轿厢顶部	三轴加速度计	垂直、水平 (X, Y)	轿厢整体振动响应, 尤其水平晃动
MP3	轿厢底部	三轴加速度计	垂直、水平 (X, Y)	接近导靴, 测量导向系统直接激励
MP4	导轨支架 (中部)	工业加速度计	水平	识别导轨自身的振动及传递特性

2.2 振动信号预处理与特征提取

现场拾取的原始振动信号往往混杂噪声与多频分量, 需经处理才能析出有效的故障特征, 常用做法如下:

1. 时域分析。时域分析侧重观察振动信号的幅值、均值、均方根值、峰值与峭度等统计量。RMS 值可直观反映振动的整体能量水平, 而峭度对冲击类故障, 如轴承点蚀或导轨接头冲击尤为敏感^[3]。

2. 频域分析 (FFT)。快速傅里叶变换 (FFT) 是振动分析的核心手段, 它把时域信号映射到频域, 使振动能量在各频率上的分布一目了然。若频谱出现异常峰值, 只需读出对应频率, 再与轴承故障特征频率、齿轮啮合频率或曳引轮转频等典型值对照, 即可初步锁定故障部位。

3. 时频分析 (小波分析)。传统 FFT 以信号平稳为前提, 而电梯启停段的振动显然不满足这一条件。小波变换把时间和频率放在同一框架下, 可捕捉瞬态冲击及频率随时间的漂移, 在启动抖动等非平稳故障的识别上优势明显。

3 基于振动特征的电梯故障诊断方法

3.1 常见故障振动特征分析

电梯不同故障在振动信号中呈现独特的特征模式, 为故障诊断提供关键依据。

1. 曳引轮槽不均匀磨损。该故障在振动信号中表现为明显的周期性特征。当曳引轮槽出现不均匀磨损时, 会导致轮槽与钢丝绳接触面产生周期性冲击。在频谱分析中, 主要表现为曳引轮转频 (通常为 1~5 Hz) 及其谐波成分 (2×、3× 转频等) 的幅值显著增大。同时, 由于磨损部位的周期性冲击会调制其他振动成分, 在频谱上还会出现以转频为间隔的边频带现象。这种特征在加速度传感器采集的垂直方向振动信号中尤为明显。通过监测这些特征频率成分的幅值变化趋势, 可以评估磨损程度的发展状况, 为预防性维护提供依据。

2. 导轨接头不平或弯曲。这类故障呈现瞬态冲击的典型特征。轿厢驶过异常接头时, 时域信号会突现持续 10~50 ms、幅值极高的冲击脉冲; 在频域上,

该脉冲激起数百赫兹的宽带振动。借助连续小波变换, 既能锁定冲击发生的时刻, 又能依据电梯运行速度把故障接头定位到 ±0.5 m 以内。由于冲击重复频率与轿厢通过接头的频率完全对应, 可据此将偶发冲击与持续故障区分开来^[4]。

3. 导靴磨损或松动。该故障主要表现为水平振动特性的改变。当导靴出现磨损或松动时, 轿厢在运行过程中会产生明显的横向晃动。振动测试数据显示, 水平方向的 RMS 值可能增加 50%~200%, 特别是在通过导轨接头时。频谱分析还会发现 1~3 Hz 的低频成分增强, 这与轿厢的摆动频率相关。长期监测发现, 随着磨损加剧, 振动信号中的高频成分 (> 100 Hz) 也会逐步增多, 这反映了导靴与导轨之间碰撞加剧的现象。通过对垂直和水平方向的振动能量比, 可以有效识别这类故障。

4. 轴承故障。轴承故障在频谱上呈现典型的特征频率。依据损伤位置, 信号会出现内圈故障频率 BPFI、外圈故障频率 BPFO 或滚动体故障频率 BSF, 这些分量多集中在 500 Hz~5 kHz 的中高频段, 并以清晰峰值显现。随着劣化加剧, 频谱两侧还会冒出以轴承转速为间距的边频带。早期缺陷对应的特征幅值往往偏低, 借助包络解调可显著提升捕捉灵敏度; 现场诊断时, 再引入声发射信号交叉验证, 可进一步降低误判风险。

3.2 故障诊断模型的构建

从特征出发, 可搭建不同复杂度的诊断模型。最简易的阈值法给特定指标 (如某频率幅值或总振级) 划定安全线, 一旦越限即触发报警。其优点是实现简单, 却容易受工况扰动, 灵敏度与准确性都偏低。面对复杂故障或多故障耦合, 智能模型更显优势。支持向量机或人工神经网络可把多维特征向量, 例如各频段能量、峭度、峰值等, 一并送入网络, 以“正常”“轴承故障”等类别为输出, 通过大量已标定样本训练, 让模型自行归纳故障模式, 再对新样本自动分类。近年来, 卷积神经网络等深度方法更进一步, 直接读取原始信号或时频谱图, 自动抽取判别特征, 显著降低了人工设计特征的依赖^[5]。最终选型应兼顾数据规模、

故障复杂程度与实时性要求,表2为不同故障诊断模型性能对比。

4 案例分析:某商业大厦电梯水平振动异常诊断

为验证上述理论方法的有效性,本节结合一个实际案例进行分析。

4.1 问题描述

某商业大厦的一台曳引式电梯在运行至大楼中部楼层时,乘客普遍感到轿厢出现明显的水平晃动,乘坐舒适度因此下降;而在底层或顶层附近,晃动则明

显减轻。初步排查未发现机械部件明显松动,需借助振动测试锁定根本原因。

4.2 测试与数据分析

在轿厢底部沿垂直与水平方向布置PCB 352C03型加速度传感器,全程记录运行数据。采样率设为2 560 Hz,可覆盖至1 280 Hz的分析带宽。表3显示:时域层面,水平振动RMS值在中间楼层段明显高于两端;FFT谱则把能量控制在5~20 Hz的中低频带,并出现若干异常尖峰。小波时频图进一步揭示,强烈的水平冲击与

表2 不同故障诊断模型性能对比

诊断方法	优点	缺点	平均准确率
阈值判断法	简单、快速、计算量小	适应性差、易误报、难以处理复杂故障	≈ 75%
支持向量机(SVM)	适用于小样本、高维模式识别	核函数选择影响大、对大规模数据训练效率偏低	≈ 92%
人工神经网络(ANN)	强大的非线性映射能力、容错性好	需要大量训练数据、易过拟合、结构设计复杂	≈ 95%
卷积神经网络(CNN)	自动特征提取、图像识别能力强、精度高	需要大量标注数据、模型训练时间长	≈ 98%

表3 故障接头处与正常区域振动指标对比

测量区域	水平振动RMS (m/s ²)	水平振动峰值 (m/s ²)	5~20 Hz 频带能量
正常运行区域(低层)	0.05	0.15	0.008
故障接头区域(中层)	0.18	0.65	0.052
正常运行区域(高层)	0.06	0.18	0.009

轿厢掠过导轨接头的时刻几乎同步,且冲击幅值在中间楼层的几个特定接头处最为突出。综合时域与频域证据,问题集中在导轨系统的这些特定位置。

4.3 诊断与验证

综合振动特征判断,中间楼层部分导轨接头严重不平或弯曲,导靴经过时产生剧烈冲击与晃动。维护人员按诊断位置现场核查,确认两处接头平整度超标;打磨校正后复测,电梯水平振动恢复至正常范围,乘客反馈良好,验证了本次振动分析及诊断方法的准确性、有效性。

5 结束语

本文通过系统分析曳引式电梯的多源振动特性,构建了从测试、特征提取到智能诊断的完整技术框架。实践证明,结合时域、频域及时频分析能有效辨识各类故障特征,而智能诊断模型则提升了复杂故障的识别精度与效率。该研究为电梯的预测性维护提供了实用方法,有助于减少非计划停机,保障运行安全。未来

故障诊断模型的泛化能力仍有提升空间,可引入迁移学习或联邦学习策略,利用多场景、多型号电梯数据联合训练,增强模型对不同设备与运行环境的适应性。

参考文献:

- [1] 于艳杰,李庆昕,马玉华,等.涡流脉动压力下高速曳引电梯水平振动动态特性分析[J].冶金管理,2020(21):25-26,58.
- [2] 刘铭祥.高速曳引电梯机械系统振动特性的分析[J].中国高新区,2018(13):197.
- [3] 韩剑君.曳引电梯机械振动系统的固有特征分析与动力学响应研究[J].南方农机,2021,52(10):105-107.
- [4] 白坤举.曳引式电梯机械系统竖直振动的原因分析与抑制[J].海峡科技与产业,2019(10):75-77.
- [5] 李德庚,孙刚.曳引驱动电梯垂向时变振动特性研究[J].机械工程与自动化,2022(01):44-46,49.