

# 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、导轨接头不平常见故障, 以期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<sup>[1]</sup>。

### 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层精度并削弱乘坐舒适性<sup>[2]</sup>。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）	接近导轨，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<sup>[3]</sup>。

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<sup>[4]</sup>。

3. 导轨磨损或松动。该故障主要表现为水平振动特性的改变。当导轨出现磨损或松动时，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，这反映了导轨与导轨之间碰撞加剧的现象。通过对比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 BPF<sub>I</sub>、外圈故障频率 BPF<sub>O</sub> 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<sup>[5]</sup>。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 ( $\text{m/s}^2$ )	水平振动峰值 ( $\text{m/s}^2$ )	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.