

电梯曳引机制动性能检验方法及标准研究

郭峻成

湖南九宫格智能科技有限公司，湖南长沙，410001；

摘要：探讨电梯曳引机制动性能相关技术时，着重阐述在多物理场耦合状况下，制动系统动力学建模以及运用科学方法进行仿真分析，深入剖析基于振动监测技术与人工智能算法有机结合的精准检验技术，同时全面解析面向超高安全标准的量化指标体系构建，涵盖关键指标确定、阈值设定、评估模型构建及数据采集更新机制，以此提升电梯制动性能与安全性。

关键词：电梯曳引机；制动性能；多物理场耦合；振动监测；量化指标体系

DOI：10.69979/3029-2727.25.07.028

引言

随着城市化加速，电梯作为高层建筑不可或缺的垂直运输工具，其安全性直接关乎乘客生命安全，特别是电梯曳引机的制动性能，一旦失效后果不堪设想。但传统的制动性能评估方式存在检测手段有限、准确性欠佳等多种局限，难以契合如今超高安全标准所提出的严苛要求。

1 多物理场耦合下电梯曳引机制动系统动力学建模与仿真分析

1.1 多物理场耦合原理与电梯制动系统的内在联系

在电梯曳引机制动系统运行过程中，机械、热、电磁这三个物理场相互耦合，共同作用，对电梯的制动性能产生关键影响。在机械场范畴，制动闸瓦与制动轮紧密贴合，两者之间产生的摩擦力是实现电梯停止运行的关键要素。以石棉基闸瓦搭配铸铁制动轮的常见组合为例，其摩擦系数大致处于 0.3 至 0.5 的区间范围。在电梯制动操作时，制动闸瓦对制动轮地抱紧力与摩擦力呈正相关关系，即抱紧力越大，摩擦力相应增大，电梯便能以更快的速度实现制动停止。从热场层面分析，以一部常见的载重量达 1000 千克、运行速度为 2 米每秒的电梯为研究对象，在制动过程中，闸瓦与制动轮之间的摩擦会引发大量热量的产生，进而导致制动轮和闸瓦的温度急剧上升^[1]。随着温度的升高，材料的物理性能会发生变化，其中摩擦系数可能会随之改变，最终对电梯的制动效果产生影响。对于采用电磁制动的曳引机，电磁力在制动过程中发挥着决定性作用。当电流通过电磁

线圈时，会产生磁场，该磁场与金属部件相互作用，从而产生电磁力。电流大小以及磁场强度的不同，会导致电磁力的大小发生变化，而这些变化都会对电梯的制动性能产生影响。这三个物理场在电梯制动时相互关联，机械力促使热量产生，热量通过改变材料性能进而影响机械力，电磁力又与机械力相互作用，最终形成了复杂得多物理场耦合状态。

1.2 基于多物理场耦合构建电梯曳引机制动系统动力学模型的具体步骤

构建该动力学模型的首要步骤是对电梯曳引机的主要部件，如制动轮、制动闸瓦、弹簧以及传动轴等，依据实际运行状况进行合理简化，将其转化为刚体或者弹性体。以质量为 50 千克、半径为 0.2 米的制动轮为例，在计算其惯性参数时，需要充分考虑其质量分布情况。随后，运用专业的力学方程对各部件之间的力与运动关系进行精确描述。在成功建立机械模型之后，需要进一步考虑热模型的耦合。在电梯制动过程中，闸瓦与制动轮摩擦产生的热量需要通过特定的计算方式得出。例如，依据制动时的速度和摩擦力，能够计算出摩擦产生的功率，进而得出产生的热量。这些热量会导致部件温度升高，而温度变化又会使材料的弹性模量和热膨胀系数发生改变。将这些变化的数据反馈至机械模型中，对之前建立的力学方程进行修正，使模型更加符合实际运行情况。最后，加入电磁模型。对于具备电磁制动功能的部件，依据电磁感应原理，建立电磁力与电流、磁场之间的关系。随后，将电磁模型与已经建立完成的机械模型、热模型进行耦合，从而成功构建出完整的多物理场耦合下电梯曳引机制动系统动力学模型。

1.3 借助专业软件开展多物理场耦合仿真分析的详细流程

进行仿真分析时, ANSYS、COMSOL 等专业软件较为常用, 以 ANSYS 软件为例, 首先需将之前建立的动力学模型的几何结构导入其中。随后对模型实施网格划分, 针对制动闸瓦和制动轮接触这类关键区域, 运用自适应网格划分技术, 将网格尺寸设定为 0.01 米, 以此提升计算精度。网格划分完毕后, 需定义材料的各类属性, 涵盖机械性能层面的弹性模量、泊松比, 热性能方面的热导率、比热容, 以及电磁性能领域的磁导率等, 这些属性参数需依据实际使用材料精准设定。接着, 依照多物理场耦合关系, 设置边界条件与载荷, 模拟制动过程时, 假设施加 5000 牛的制动闸瓦抱紧力, 并设置好摩擦系数随温度变化的函数关系; 热场方面, 考虑对流散热与辐射散热, 例如将对流换热系数设为 10 瓦每平方米开尔文, 借助斯蒂芬 - 玻尔兹曼常数计算辐射散热; 电磁场中, 设置电流大小为 10 安并确定电流方向^[2]。再设置求解器参数, 选择适宜的求解算法, 如瞬态求解用于分析制动过程动态变化, 将时间步长设为 0.001 秒。完成设置后运行仿真, 仿真结束对结果后处理, 通过分析制动过程中机械力、温度、电磁力变化曲线以及部件的应力、应变分布云图, 深入了解电梯曳引机制动系统在多物理场耦合下的性能表现。

2 基于振动监测与人工智能算法的制动性能精准检验技术

2.1 振动监测技术在电梯制动系统中的应用原理

在电梯制动系统中, 振动监测技术基于独特的原理发挥着关键作用。电梯制动绝非简单的机械动作, 而是一个涉及多部件协同、力与运动相互作用的复杂过程。当制动指令下达, 制动闸瓦迅速抱紧制动轮, 二者之间剧烈的摩擦以及机械部件的联动运转, 都会引发振动的产生。这些振动并非杂乱无章, 而是蕴含着制动系统运行状态的关键信息。正常工况下, 制动系统的振动处于稳定的动态平衡中。以常见的商用电梯为例, 其制动轮在平稳制动时, 振动频率大概率集中在 50-100Hz 范围, 这是由于制动闸瓦与制动轮良好的贴合度、机械部件精准的配合所决定的。同时, 振动幅值也被严格限定在标准区间, 确保制动过程既高效又平稳。一旦制动系统出现故障隐患, 这种稳定的振动特征便会被打破。若制动

闸瓦磨损不均, 接触制动轮时受力就会失衡, 导致振动频率出现异常波动, 可能在特定频率处产生峰值。制动弹簧弹性不足时, 无法提供稳定的制动力, 振动幅值也会随之大幅变化。在制动轮、闸瓦等关键部位安装高精度振动传感器, 能实时捕捉这些变化, 为故障诊断和性能评估提供数据。

2.2 电梯制动系统振动监测的具体实施流程

在实施振动监测时, 首先要合理布置振动传感器。通常在制动轮的轴向和径向各安装一个传感器, 以便全面捕捉振动信息^[3]。在电梯制动前, 先记录一段时间的背景振动信号, 作为后续分析的参考基准。当电梯进行制动操作时, 以 1000Hz 的采样频率持续采集振动信号, 采集时间设定为制动全过程。采集完成后, 对原始振动信号进行预处理, 去除噪声干扰, 采用滤波算法滤除高频噪声, 通过均值滤波等方法去除低频漂移。然后, 对处理后的信号进行特征提取, 计算振动信号的峰值、有效值、频谱等特征参数。例如, 计算振动信号的峰值可以反映制动过程中的最大冲击力, 有效值可以衡量振动的平均强度, 频谱分析则能确定振动的主要频率成分。

2.3 人工智能算法在制动性能数据分析中的应用

在运用人工智能算法对电梯制动性能数据进行分析时, 神经网络算法展现出强大的优势。以构建的多层神经网络模型来说, 其输入层就像是信息的入口。从振动监测设备获取的振动峰值、有效值、各频率成分的幅值等特征参数数据, 会被有序地输入到这一层。例如, 设置 10 个神经元, 每个神经元对应不同的关键特征, 就像 10 个专门的接收器, 各司其职收集数据。隐藏层则是整个模型的“智慧大脑”, 神经元数量在 20-30 个之间灵活调整。这些神经元利用权重和偏置对输入的数据进行复杂的非线性变换。就如同在大脑中进行信息的深度加工, 把原始的振动数据转化为更具代表性的关键特征信息, 挖掘出数据背后潜在的规律和联系。输出层是结果呈现的地方, 它依据预先设定的训练目标, 输出直观的制动性能评估结果。无论是判断电梯制动系统有无故障, 还是精准识别故障类型以及评估严重程度, 都能一目了然。在训练模型时, 收集 1000 组不同电梯制动系统检测与运行数据, 不断调整权重和偏置, 提升模型准确性与泛化能力。

2.4 基于人工智能算法的制动性能预测与诊断方

法

训练好的人工智能模型在电梯制动性能预测与诊断方面发挥着关键作用。在预测环节,借助实时运行及振动监测设备,持续采集电梯运行中的各类数据,并将其快速输入到已训练成熟的模型中。模型会依据此前学习到的大量振动特征参数规律,对未来一段时间内的制动性能进行预测。例如,通过对振动峰值、频率等参数变化趋势的分析,预测未来 1000 次制动循环内制动系统出现故障的可能性。当进入诊断阶段,一旦监测到异常数据,模型便迅速响应。它会以极快的速度对相关数据展开深度分析,就像一位经验丰富的医生精准判断病因一样。若振动信号中的某个特征参数超出正常范围,模型会综合考虑多个相关因素,准确判断是制动闸瓦磨损、制动弹簧弹性不足,还是其他部件问题导致。随后,模型会给出针对性的维修建议,如更换制动闸瓦、调整制动弹簧等,在故障发生前就及时排除隐患,确保电梯安全稳定运行。

3 面向超高安全标准的电梯曳引机制动性能量化指标体系构建

3.1 确定电梯曳引机制动性能的关键量化指标

制动减速度、制动响应时间和制动距离是衡量电梯制动性能的重要指标,制动减速度体现电梯制动时速度降低的快慢,对于额定速度 2.5m/s 、满载 1000kg 的电梯,其制动减速度在 $1.0\text{--}1.5\text{m/s}^2$ 为理想状态。在电梯轿厢安装加速度传感器,实时采集加速度数据,经积分运算即可得出制动减速度。制动响应时间是从制动指令发出到制动系统实际产生制动力的时间间隔,高性能电梯一般要求不超过 0.2s 。通过高精度时间测量装置,从电气控制系统发出制动信号开始计时,到制动闸瓦与制动轮接触产生制动力瞬间结束计时,以此获取准确的制动响应时间。制动距离指电梯从开始制动到完全停止所行驶的距离,依据电梯速度和载重不同有相应标准。如速度 1.75m/s 、载重 800kg 的电梯,制动距离应在 $1.0\text{--}1.5\text{m}$ 范围内。在电梯导轨上安装位移传感器,记录轿厢位移变化,便可确定制动距离。

3.2 基于超高安全标准设定量化指标的阈值

依据超高安全标准设定电梯制动量化指标阈值时,以制动减速度为例,将下限阈值设为 1.0m/s^2 ,此数值

能保证在各类工况下,电梯凭借足够制动力使轿厢及时减速,保障安全运行。上限阈值设为 1.5m/s^2 ,旨在防止减速度过大给乘客带来不适或伤害。制动响应时间阈值设定为 0.2s ,以此要求制动系统具备快速响应能力,以应对突发情况^[4]。实际应用中,需分析大量不同品牌和型号电梯的制动性能测试数据,结合安全标准和乘客舒适度要求,确定合理阈值范围。考虑电梯使用环境、年限等因素,对阈值进行适当调整。比如在高温、高湿度等恶劣环境下使用的电梯,制动响应时间阈值可放宽至 0.25s ,但要增加对制动系统的维护和检测频率。

3.3 构建电梯曳引机制动性能的综合评估模型

运用层次分析法(AHP)构建综合评估模型,先确定评估指标层次结构,把制动减速度、制动响应时间、制动距离等设为一级指标,每个一级指标再细分多个二级指标,如制动减速度细分为平均、最大、最小制动减速度。然后用专家打分法确定各指标相对权重,邀请电梯行业资深专家,依据经验和专业知识对不同指标重要性两两比较打分,构建判断矩阵。例如,若专家认为制动减速度相对制动响应时间重要性为 3,就在判断矩阵对应位置赋值 3,反之赋值 $1/3$ 。通过计算判断矩阵的特征向量和最大特征值确定各指标权重。最后将采集的电梯制动性能数据代入评估模型,依据各指标权重算出综合评估得分,全面评估电梯曳引机制动性能是否符合超高安全标准。

3.4 建立量化指标体系的数据采集与更新机制

在数据采集环节,借助电梯远程监控系统,实时采集电梯运行时的制动性能数据。在电梯关键部位安装各类传感器,轿厢处安装加速度、位移传感器,制动系统安装压力、温度传感器等,采集的数据通过物联网传输至数据中心^[5]。定期开展现场检测,每月对制动系统进行全面检测,获取制动闸瓦磨损程度、制动弹簧弹性系数等详细准确数据。在数据更新方面,依据新采集的数据和电梯实际运行状况,定期更新量化指标体系。每半年重新评估和调整各指标的阈值和权重,使指标体系契合超高安全标准和电梯实际运行需求。建立历史数据存储和分析机制,通过对长期数据的深入分析,把握电梯制动性能的变化趋势,为指标体系的持续优化提供有力依据。以下是关于电梯曳引机制动性能量化指标体系关键数据的汇总:

表 1：电梯曳引机制动性能量化指标体系关键数据汇总

类别	具体指标	数值详情
关键量化指标	额定速度	2.5m/s（用于制动减速度参考）
	载重量	1000kg（用于制动减速度参考）
	理想制动减速度范围	1.0 - 1.5m/s²（额定速度 2.5m/s、满载 1000kg 时）
	高性能电梯制动响应时间上限	0.2s
	速度	1.75m/s（用于制动距离参考）
阈值设定	载重量	800kg（用于制动距离参考）
	制动距离范围	1.0 - 1.5m（速度 1.75m/s、载重 800kg 时）
	制动减速度下限阈值	1.0m/s²
	制动减速度上限阈值	1.5m/s²
	一般制动响应时间阈值	0.2s
	恶劣环境制动响应时间阈值	0.25s
	综合评估模型构建	专家打分示例（制动减速度对制动响应时间） 3（制动减速度相对重要性）， 1/3（制动响应时间相对重要性）
	数据采集与更新机制	现场全面检测周期 每月 1 次
		阈值和权重重新评估调整周期 每半年 1 次

4 结语

通过精准确定关键量化指标、科学设定阈值、精心构建综合评估模型以及有效建立数据采集更新机制，多维度构建的电梯曳引机制动性能量化指标体系，为提升电梯安全性能并保障其稳定运行提供了关键支撑。

参考文献

[1] 沈海燕. 电梯曳引机制动装置的设计与实验研究[J]. 机电工程技术, 2021, 50(12): 263-265.
[2] 周振华. 电梯曳引机制动系统分析及其试验验证[D]. 江苏科技大学, 2019.

[3] 叶亮. 电梯曳引机制动力矩在线检测台的研制[J]. 中国特种设备安全, 2021, 37(08): 10-12+16.
[4] 房文娜. 电梯曳引机制动系统的设计与研究[D]. 东南大学, 2015.
[5] 吴纪超, 鲁云飞. 电梯曳引机综合性能试验设备的设计思路和试验过程[J]. 中国电梯, 2018, 29(05): 15-17.

作者简介：郭峻成，男，（1989.07—），汉族，湖南长沙人，本科学历，工程师，主要研究方向：电梯、起重机械等设备检验检测。