

本文引用格式: 闫明明, 李宁, 唐梓敏, 等. 垂直电梯的故障预测技术研究综述[J]. 自动化与信息工程, 2024, 45(5): 1-9; 13.

YAN Mingming, LI Ning, TANG Zimin, et al. Overview of fault prediction technology for vertical elevators[J]. Automation & Information Engineering, 2024, 45(5): 1-9; 13.

# 垂直电梯的故障预测技术研究综述

闫明明<sup>1,2</sup> 李宁<sup>2</sup> 唐梓敏<sup>1,2</sup> 刘智学<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510641

2. 广州广日电梯工业有限公司, 广东 广州 511447)

**摘要:** 为促进故障预测技术在电梯维保领域的研究, 综述了垂直电梯故障预测技术的最新进展和研究成果。根据垂直电梯故障预测实现方式的不同, 将其分为基于经验模型的故障预测方法和基于数据驱动的故障预测方法, 并对这两类故障预测方法的特点进行分析和总结。针对垂直电梯故障预测技术发展面临的挑战, 未来应加强垂直电梯故障机理研究, 优化数据处理和特征提取算法, 进一步开发具有优良泛化能力和高准确度的故障预测模型。同时, 做好全生命周期的高价值数据积累工作, 为故障预测模型的持续优化提供坚实基础。

**关键词:** 故障预测; 电梯维保; 垂直电梯

中图分类号: TP206.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)05-0001-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.05.001

开放获取

## Overview of Fault Prediction Technology for Vertical Elevators

YAN Mingming<sup>1,2</sup> LI Ning<sup>2</sup> TANG Zimin<sup>1,2</sup> LIU Zhixue<sup>2</sup>

(1. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China 2. Guangzhou Guangri Elevator Industry Co., Ltd., Guangzhou 511447, China)

**Abstract:** To promote the research of fault prediction technology in the field of elevator maintenance, the latest progress and research achievements of vertical elevator fault prediction technology are summarized. According to the different implementation methods of vertical elevator fault prediction, it is divided into empirical model-based fault prediction methods and data-driven fault prediction methods, and the characteristics of these two fault prediction methods are analyzed and summarized. In response to the challenges faced by the development of vertical elevator fault prediction technology, future research on vertical elevator fault mechanisms should be strengthened, data processing and feature extraction algorithms should be optimized, and fault prediction models with excellent generalization ability and high accuracy should be further developed. At the same time, do a good job in accumulating high-value data throughout the entire life cycle, providing a solid foundation for the continuous optimization of fault prediction models.

**Keywords:** fault prediction; elevator maintenance; elevator

## 0 引言

垂直电梯作为现代建筑不可或缺的交通工具, 为人们出行提供了极大的便利。根据《2016—2022年中国电梯行业发展态势与十三五竞争战略研究报告》显示, 我国已成为全球最大的电梯生产国、消费国和出口国。随着垂直电梯的广泛使用, 电梯困人、溜车和非正常运行等现象偶有发生, 其安全性和可靠性

成为人们高度关注的问题。为了预防潜在电梯故障, 降低运维成本, 垂直电梯故障预测技术的发展备受关注。

电梯故障预测技术属于设备故障预测与健康管理的范畴, 其根据电梯关键零部件或系统当前和历史的性能退化状态信息, 如温度、声学信号、振动信号和电压电流等, 在故障发生前, 预测性地诊断关键零

部件或系统完成其规定功能的能力,主要包括关键零部件或系统的健康状态评估、潜在故障类型和影响程度评估、剩余使用寿命预测等<sup>[1-3]</sup>。目前,针对电梯故障预测的研究主要集中在电梯的故障诊断方面<sup>[4-6]</sup>,更关注电梯当前的运行状态,即电梯是否发生故障、故障的类型和位置等,而对电梯未来的运行状态预测研究相对较少。当前,国内外各大电梯公司均致力于电梯远程监控系统的研制和开发,但系统功能侧重于电梯的运行状态监测和远程故障诊断。

根据垂直电梯故障预测实现方式的不同,本文将分为基于经验模型的方法和基于数据驱动的方法,并分别对这两类方法进行总结和评价,并展望垂直电梯故障预测技术的未来发展方向。

## 1 基于经验模型的垂直电梯故障预测方法

基于经验模型的垂直电梯故障预测方法利用专家知识和行业经验建立预测模型,如故障树、专家系统或经验公式等,通过分析监测数据,预测电梯故障的位置、类型、程度和剩余使用寿命等。张从力等<sup>[7]</sup>构建了一种基于模糊推理的电梯故障预测专家系统,但在实践中专家系统的知识规则较难获取,且预测结果对模糊推理能力有较强的依赖性,导致该系统在工程应用中有较大的局限性。宗群等<sup>[8]</sup>提出了一种基于故障树的电梯故障诊断专家系统,将电梯系统故障树的最小割集和最小割集重要度作为诊断规则,并基于最小割集重要度进行推理和判断;试验结果表明,该系统能够有效地解决专家系统知识完整性差的问题,有利于快速诊断故障。在进一步的研究中,宗群等<sup>[9]</sup>通过分析电梯监测数据关键特征量的演变特征,基于故障树模型和专家规则,对故障类型或故障趋势进行相似度匹配判定,实现了电梯潜在故障类型、位置和剩余使用寿命的预测。NIU 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于专家知识和多源数据构建电梯故障树的方法,利用逼近理想解排序法来预测电梯的振动故障,并对故障原因的可能性进行排序;试验表明,该方法具有较高的诊断效率。在随后的研究中,NIU 等<sup>[11]</sup>又提出了一种基于客观数据与专家主观经验相结合的电梯运行性能评

估方法,并通过不同性能等级的电梯运行状态数据验证了该方法的有效性;该方法适用于整梯运行性能的评估,对指导整梯健康状态评估具有一定的参考意义。不同于电梯故障预测专家系统,王林林<sup>[12]</sup>提出了一种改进的 Holt-Winters 时间序列故障预测模型,通过分析电梯故障数据的变化趋势来预测电梯故障;但该模型未考虑定期维保对电梯故障数据变化趋势的影响。

基于经验模型的垂直电梯故障预测方法主要是根据专家分析问题的思路和经验建立知识库、规则库和推理机来解决问题。该类故障预测方法相对简单,易于工程实现,但对经验和系统规则的要求较高,对特征模糊集的表达能力的依赖性较强。

## 2 基于数据驱动的垂直电梯故障预测方法

基于数据驱动的垂直电梯故障预测方法是一种利用统计模型或机器学习,通过分析电梯的历史故障数据、运行统计数据或传感器数据进行故障预测的方法。因该方法不需要故障预测的先验知识,故在垂直电梯的故障预测领域得到广泛关注<sup>[13-14]</sup>。目前,常用的基于数据驱动的垂直电梯故障预测方法分为基于统计模型、基于人工智能和基于混合模型的 3 类预测方法。垂直电梯的故障预测方法如图 1 所示。

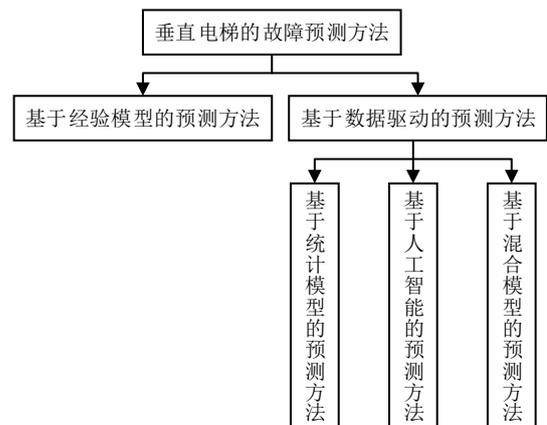


图 1 垂直电梯的故障预测方法

### 2.1 基于统计模型的垂直电梯故障预测方法

基于统计模型的垂直电梯故障预测方法采用基于经验知识的统计模型来描述电梯零部件或系统的性能退化过程,构建故障预测模型。故障预测模型的

参数通常为随机变量, 由样本序列的概率分布决定, 用于描述电梯零部件或系统性能退化过程的不确定性。

YAN 等<sup>[15]</sup>利用 Logistic 回归分析和最大似然技术建立了性能评估模型, 并基于自回归移动平均模型来评估关键零部件的剩余使用寿命, 在电梯开关门系统的剩余使用寿命预测上有较好的应用效果; 但在实际应用中, 电梯开关门系统的控制方式对预测结果的准确性有较大影响。李琪<sup>[16]</sup>提出了一种基于威布尔分布的电梯安全剩余使用寿命预测模型, 利用电梯的维保管理数据分别预测无维保和有维保的电梯安全剩余使用寿命; 试验结果表明, 该模型具有较强的实用性, 但模型参数值的确定有较强主观性, 需要对大量的电梯维保数据进行分析才能给出合理阈值, 以提高模型的稳定性。陈严嘉<sup>[17]</sup>分析了电梯块式制动器的性能退化机理, 并建立了由两个伽马过程组成的制动器性能退化模型来预测电梯的剩余使用寿命; 试验验证了该模型的有效性, 但考虑到不同型号的电梯制动器结构和性能的差异, 该模型的准确性仍需大量的工业数据来验证。王美德<sup>[18]</sup>建立了基于维纳过程的电梯曳引机性能退化模型来预测电梯的剩余使用寿命; 但电梯运行工况的差异性对该模型预测精度的影响仍需进一步验证。

基于统计模型的垂直电梯故障预测方法可以描述电梯零部件或系统性能退化过程的不确定性, 及其对故障预测结果的影响, 不依赖于描述垂直电梯性能退化过程的物理模型。但该类方法受限于统计模型的前提假设。

## 2.2 基于人工智能的垂直电梯故障预测方法

基于人工智能的垂直电梯故障预测方法, 采用人工智能技术从电梯全生命周期的运行状态监测数据中, 学习关键零部件或系统的性能退化行为, 构建垂直电梯关键零部件或系统的故障预测模型。

人工神经网络是故障预测领域应用较为广泛的人工智能技术<sup>[19]</sup>。李俊芳等<sup>[20]</sup>提出了一种基于神经网络的电梯门系统故障预测方法, 利用反向传播 (back propagation, BP) 神经网络模型, 建立电梯控制系统元

器件电信号与门系统故障的映射来预测故障类型; 通过试验验证了该方法的有效性, 但该方法仅适用于电梯门系统当前故障状态的识别。为降低神经网络初始参数值的随机性对预测结果的影响, WEN 等<sup>[21]</sup>提出了一种结合粒子群算法和 BP 神经网络的电梯故障预测模型, 利用粒子群算法确定初始权重和阈值, 以提高故障预测精度, 可预测电梯开关门系统的典型故障类型; 试验结果表明, 该模型具有较高的识别准确率, 但并未对电梯具体的故障类型、位置及影响程度进行预测和评估。为了提升粒子群算法的收敛速度, BAI 等<sup>[22]</sup>提出了一种改进的粒子群 BP 神经网络电梯故障预测模型; 试验结果表明, 该模型可准确预测电梯的冲顶和蹲底两类故障, 但其应用范围有较大的局限性, 且预测效果受限于训练样本的质量。冯鑫等<sup>[23]</sup>提出了一种基于遗传神经网络的电梯故障预测方法, 采用遗传算法来确定神经网络的初始权重和阈值, 以提升神经网络的收敛速度; 试验结果表明, 该方法可根据电梯运行状态的监测数据有效地预估电梯的健康状态, 但该方法只针对一台电梯进行研究, 应用范围具有一定的局限性。为了解决 BP 神经网络在电梯门锁故障诊断中泛化能力弱和预测精度低等问题, QIU 等<sup>[24]</sup>提出了一种基于多种群遗传 BP 神经网络的电梯门锁故障预测模型; 试验结果表明, 相比于传统的遗传 BP 神经网络, 该模型的故障预测性能有明显提升。段登等<sup>[25]</sup>利用径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络构建电梯故障预测模型, 根据电梯运行过程中的状态数据预测电梯的故障类型; 仿真结果表明, 该模型能够较准确地预测电梯系统的故障类型, 但在实际应用中的有效性有待进一步验证。车明浪等<sup>[26]</sup>提出了一种容积卡尔曼滤波辅助优化 RBF 神经网络的电梯故障预警方法, 先利用容积卡尔曼滤波方法来优化网络的结构和参数, 再利用 RBF 神经网络来预测电梯故障; 试验结果表明, 该方法在预测精度和收敛速度上优于基于单一 RBF 神经网络的故障预测方法。BP 神经网络具有良好的非线性特征拟合性能, 但存在收敛速度慢和易得到局部极小值的问题。利用智能优化算法调参可有效地解决上述问题, 提高模型的故障预

测性能。

近年来,随着深度学习技术的迅猛发展,其在垂直电梯故障预测领域的应用也越来越广泛。其中,循环神经网络具有记忆功能,能够学习数据在时间前后的关联性,常用于垂直电梯故障预测领域。LIU 等<sup>[27]</sup>提出了一种基于长短时记忆(long short-term memory, LSTM)神经网络的电梯故障预测方法,利用电梯预警系统中的故障时间序列数据来训练神经网络和构建预测模型;试验结果表明,该方法具有较高的预测精度,但未考虑长期预测时故障发生的随机性问题。为解决传统的电梯故障预测方法存在数据特征提取复杂和需要大量诊断经验的问题, JIA 等<sup>[28]</sup>提出了一种基于卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)的电梯故障预测方法,首先,利用奇异值分解和小波包分解的方法提取电梯振动信号的特征;然后,采用主成分分析方法进行数据降维;最后,利用保留的特征训练 CNN 和构建电梯故障预测模型;试验结果表明,该方法具有较高的故障识别准确率,但应用效果依赖于采集的振动信号质量。姜宇迪等<sup>[29]</sup>提出了一种基于自编码器长短时记忆(long short-term memory encoder-decoder, LSTM-ED)神经网络的电梯制动器故障预测方法,首先,采集电梯制动器从运行至失效的全生命周期数据作为训练算法的源领域数据,并利用 LSTM-ED 神经网络将源领域数据映射到特征空间;然后,通过计算最大平均差异值的方法将真实数据与全生命周期数据对应;最后,利用全连接神经网络回归特征空间的目标领域数据,预测电梯制动器的剩余使用寿命;试验结果表明,该方法可有效提高电梯制动器的剩余使用寿命预测的准确度,但在实际应用中受限于数据采集成本和时间因素。双向长短时记忆(bidirectional long short-term memory, BiLSTM)神经网络可以学习数据在时间前后的关联性,在处理长时间序列数据方面具有优势。胡昱<sup>[30]</sup>提出了一种基于双向注意力长短时记忆(attention bidirectional long short-term memory, ABiLSTM)神经网络的电梯关键部件故障预测方法,利用 BiLSTM 神经网络处理和学习的运行状态数据,采用注意力机制(attention

mechanism, AM)优化特征权重,帮助 BiLSTM 神经网络选择关键特征进行学习,可有效提高电梯关键部件故障预测模型的泛化能力和准确率;试验验证了该方法的有效性和适用性,但在实际应用中对算力的要求较高。自编码器具有独特的编码和解码结构,可有效地提取非线性数据的特征,常用于电梯故障预测领域的特征提取。黄健鹏<sup>[31]</sup>提出了一种基于深度自编码器(deep auto encoder, DAE)和 t-分布随机邻域嵌入可视化算法的电梯轿厢系统故障预警模型,通过该模型对采集的轿厢振动信号进行分类,评估电梯轿厢系统的健康状况,并将结果进行可视化展示;试验结果表明,该模型可有效预测电梯的故障状态,考虑到电梯类型和工况的多样性,其应用范围有待进一步验证。孙庆港等<sup>[32]</sup>提出了一种基于多注意力长短时记忆自编码器(multi-attention long short-term memory auto encoder, MALSTM-AE)的电梯电气故障预测方法,首先,采用基于属性相关性密度排序的属性子集选择方法,剔除原始电梯运行参数集合的冗余特征参数,筛选关键特征向量;然后,将融合 BiLSTM 神经网络的滑动窗口 AM 引入到 LSTM-AE 算法中,以提高模型的时序特征提取能力;最后,构建基于 MALSTM-AE 的电梯电气故障预测模型;试验结果表明,该模型能够准确预测电梯的电气故障,且具有更快的训练速度和更强的泛化能力。孙庆港<sup>[33]</sup>提出了一种基于轻量化 CNN 的曳引机轴承故障预测方法,首先,利用分类聚合近似和格拉姆角场方法对轴承一维振动信号进行预处理,转换成包含时间维度信息的二维图像数据;然后,利用多尺度压缩提取 Xception 算法实现二维图像分类,预测曳引机轴承故障的类型;试验结果表明,该方法具有较高的曳引机轴承故障预测准确率。

基于人工神经网络的垂直电梯故障预测方法需要大量高质量的训练样本数据来训练模型,这在实际应用中具有一定的困难。此外,基于神经网络构建的垂直电梯故障预测模型可解释性差,受限于网络结构和初始参数等因素。

支持向量机(support vector machine, SVM)是基

于统计学习理论的人工智能技术,在处理机器学习小样本、非线性和高维数的问题上具有优势<sup>[34]</sup>。王健<sup>[35]</sup>构建了一种基于 SVM 的电梯故障预测模型,可通过电梯的运行状态数据预测卡梯、冲顶、蹲底、超速和开门走梯等 5 类故障,并采用序列最小优化算法训练 SVM 模型;试验结果表明,该方法具有较强的泛化能力,但需要高质量的电梯故障数据集来训练模型。徐姍<sup>[36]</sup>提出了基于时间序列高阶累积量系数的 SVM 电梯故障预测方法,分别以电梯振动加速度高阶累积量提取的特征值和电梯健康状态作为 SVM 的输入和输出,利用 SVM 的自学习能力构建预测模型;但该方法只能预测电梯的正常和故障状态,在实际应用中有一定的局限性。易士琳<sup>[37-38]</sup>提出了基于小波包分解和最小二乘支持向量机 (least squares support vector machines, LS-SVM) 的电梯故障预测方法,利用小波包分解电梯振动加速度信号提取特征值,运用 LS-SVM 建立信号特征值与电梯导靴故障的预测模型;试验结果表明,该方法可有效预测电梯导靴故障,但研究对象的样本数量较少,模型预测准确度有待进一步验证。朱晓玲等<sup>[39]</sup>在 SVM 的基础上进行了改进,提出了一种基于 Gabor 小波变换和多核 SVM 的电梯导靴故障诊断方法,采用 Gabor 滤波器处理增强信号的频率特征,利用多核 SVM 构建特征参数与电梯导靴故障的预测模型;试验结果表明,该方法具有较高的故障预测准确率,但样本训练时间较长。吉训生等<sup>[40]</sup>根据电梯曳引机运行状态数据在高维空间的分布特性,提出一种基于正负类双超球体 SVM 的电梯故障预测模型,克服了传统 SVM 数据描述鲁棒性差、识别准确度低等问题;试验结果表明,该模型可有效识别电梯的接触器故障、限位开关故障、变频器故障和电动机故障。

基于 SVM 的垂直电梯故障预测方法受限于训练样本数据的质量和核函数的选择等因素,处理大样本数据的能力不足。

提升决策树是人工智能领域一种应用广泛的算法。其中,极致梯度提升树 (extreme gradient boosting, XGBoost) 运算速度快、算法精度高,在垂直电梯故

障预测领域有较好的应用。LIANG 等<sup>[41]</sup>提出了一种基于 XGBoost 的电梯门系统故障预测方法;试验结果表明,该方法能够有效识别电梯开关门系统的故障类型。为降低电梯正常样本与故障样本的数量差异对故障诊断准确率的影响, QIU 等<sup>[42]</sup>提出了一种基于特征递归削减的 XGBoost 电梯故障预测方法,首先,对提取的电梯振动信号特征进行递归削减,去除冗余特征;然后,运用 SMOTR-Tomek 对少数类样本进行过采样,提高样本中有效特征的比例;最后,采用天鹰优化算法对 XGBoost 电梯故障预测模型参数进行优化,构建新的基于 XGBoost 的电梯故障预测模型;试验结果表明,该方法能够准确预测电梯的故障状态。XGBoost 算法调参过程复杂,适用于处理中低维的结构化数据,在垂直电梯故障预测领域具有一定的应用前景。

基于人工智能的垂直电梯故障预测方法不依赖于机械性能退化机理,可以较容易地扩展到电梯不同零部件或系统的故障预测。CHEN 等<sup>[13]</sup>较为系统地总结了基于人工智能的电梯故障诊断方法的应用情况。该类方法具有良好的应用前景,但需要大量的历史数据。在工程实践中,设备全生命周期数据的采集难度较大、周期较长,限制了其应用范围。此外,该类方法的故障预测性能受限于模型结构参数、训练样本的数量和质量等因素。

### 2.3 基于混合模型的垂直电梯故障预测方法

基于混合模型的垂直电梯故障预测方法通过组合或集成基于统计模型和基于人工智能的预测方法,整合不同预测方法的优势,构建混合的垂直电梯故障预测模型,可有效提高故障预测模型的鲁棒性和泛化能力。

王海波<sup>[43]</sup>和王志平<sup>[44]</sup>构建了结合模糊系统和 BP 神经网络的电梯故障预测方法,分别对电梯控制系统故障和高速电梯急停故障建立预测模型,首先,通过模糊系统将电梯的运行状态数据进行模糊化处理;然后,将模糊化处理后的数据输入到 BP 神经网络进行故障预测;该方法有效地解决了数据量纲不统一、实时性差的问题,但电梯故障原因复杂,对于非典型电梯故障的预测能力有待进一步验证。王爽等<sup>[45]</sup>基于电

梯运行状态大数据平台,首先,利用模糊聚类算法进行电梯故障状态分级;然后,采用BP神经网络预测电梯的安全运行时间;但该方法的故障预测准确度需要进一步验证。XU等<sup>[46]</sup>提出了一种基于自回归模型和SVM的电梯故障预测方法,利用加权移动平均法滤波处理后的数据建立自回归模型,提取自回归模型的系数作为SVM输入,以正常和故障状态作为SVM输出,通过训练SVM构建电梯故障预测模型;试验结果表明,该方法可有效预测电梯运行的故障状态。

陈志平等<sup>[47]</sup>利用聚类分析与回归分析的数据挖掘手段,首先,从电梯轿厢振动数据中提取特征参数;然后,综合运用聚类分析与回归分析的方法预测电梯故障;但该方法的具体实现方式有待进一步研究,同时需要考虑电梯载重变化和外部其他振动源对振动信号信噪比的影响。胡海博<sup>[48]</sup>提出了一种基于融合聚类算法的电梯故障预测方法,首先,利用K-means聚类算法分析电梯的历史维保数据;然后,利用Adaboost集成学习方法学习每一类数据集;最后,预测电梯的未来状态;该方法为电梯故障预测提供了新的思路,但还需要进一步提高电梯故障小样本数据的利用率和故障预测时间的准确率。蒋文博等<sup>[49]</sup>提出了一种基于比例风险模型与机器学习混合的电梯故障预测方法,首先,从电梯参数信息和历史故障信息中提取协变量;然后,利用比例风险模型分析寿命与协变量之间的关系;接着,通过累计风险函数得到寿命预估值;最后,利用机器学习算法对寿命预估值与故障间隔时间序列进行建模,预测电梯剩余使用寿命;试验结果表明,混合模型的预测效果优于传统机器学习模型的预测效果。WANG等<sup>[50]</sup>利用分类模型和专家监督学习的数据挖掘技术,通过对电梯设计、安装、运行、维护和监测等全生命周期的数据进行分析 and 处理,根据电梯的运行状态信息预测电梯的典型故障类型;但该方法的具体实现方式有待进一步研究。

ZHANG等<sup>[51]</sup>提出了一种基于CNN和随机森林(random forest, RF)的电梯门系统故障诊断方法,首先,采用CNN提取电梯门系统的运行过程特征;然后,利用RF进行故障分类和识别;试验结果表明,

与传统的CNN模型和RF模型相比,该方法具有更高的识别准确率。针对电梯系统常见的故障类型,MISHRA等<sup>[52]</sup>提出了一种基于DAE和RF的电梯故障诊断方法,首先,利用DAE模型从电梯运行过程的加速度信号和电磁信号中提取特征;然后,采用RF算法对关键特征进行分类和构建电梯故障预测模型;最后,利用训练好的模型来识别电梯故障类型;试验结果表明,该方法对关键特征具有较高的分类准确率,但未能对电梯的其他故障类型进行分析和研究,应用范围具有一定的局限性。针对高速电梯曳引机主轴的剩余使用寿命预测,郭俊等<sup>[53]</sup>提出了一种结合降噪稀疏自动编码器(denoising sparse auto-encoder, DSAE)与RF算法的电梯曳引机主轴剩余使用寿命预测方法,首先,采用DSAE算法提取电梯曳引机主轴的运行状态特征;然后,利用RF算法预测电梯曳引机主轴的剩余使用寿命;该方法为预测高速电梯曳引机主轴在动态扭矩作用下的剩余使用寿命提供了参考。

仲家寅<sup>[54]</sup>建立了一个基于CNN和LSTM神经网络的电梯故障预测模型,首先,采用CNN提取电梯的故障数据特征,并将该故障数据特征输入到LSTM神经网络进行学习;然后,建立电梯运行状态与故障状态的映射模型;试验结果表明,该模型可预测电梯的早期典型故障,但在预测电梯其他故障类型方面有待进一步研究。VERMA等<sup>[55]</sup>采用DAE算法从电梯的运行状态数据中提取特征,并利用LSTM神经网络预测电梯故障;试验结果表明,该方法具有良好的故障预测效果,但在实际应用中需要大量不同类型的电梯运行状态数据做支撑。吉训生等<sup>[56]</sup>提出一种结合LSTM-AE与多层感知机(multi-layer perception, MLP)的电梯故障早期预测模型,首先,采用一元线性回归对数据进行预处理;然后,利用LSTM-AE提取时间序列特征,并通过相关特征选择法提取主要预测特征;最后,通过MLP预测电梯故障;试验结果表明,该模型具有较高的故障预测准确率。

垂直电梯不同故障预测方法及其特点的对比如表1所示。

表 1 垂直电梯不同故障预测方法及其特点对比

方法	文献	特点	
基于经验模型的垂直电梯故障预测方法	[7] [8] [9] [10] [11] [12]	优点：预测方法相对简单，有利于快速实现电梯故障预测 缺点：对经验和系统规则的要求较高，对特征模糊集的表达能力有较强的依赖性	
基于数据驱动的垂直电梯故障预测方法	基于统计模型的垂直电梯故障预测方法	[15] [16] [17] [18]	优点：不需要建立精确的物理模型，可描述预测结果的不确定性 缺点：预测能力受限于统计模型的前提假设
	基于人工智能的垂直电梯故障预测方法	[20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42]	优点：不需要建立精确的物理模型，AI 模型类别选择性强 缺点：需要大量高质量的数据训练，预测性能受限于模型的结构和类型设计
	基于混合模型的垂直电梯故障预测方法	[43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53] [54] [55] [56]	优点：不需要建立精确的物理模型，预测模型的鲁棒性和泛化能力强 缺点：需要大量高质量的数据训练，预测方法的适用性有待进一步验证

由于垂直电梯关键零部件或系统的故障发生具有非线性、随机性和非一致性等特点，采用单一的建模方法难以准确地描述其从性能退化至发生故障的过程，且因自身的局限性，经常得到不理想的预测结果。然而，基于混合模型的故障预测方法，集成了不同故障预测方法的优势，可有效地提升故障预测性能，未来会逐渐成为垂直电梯故障预测领域的主要研究方向<sup>[2]</sup>。

### 3 垂直电梯故障预测技术的应用发展方向

垂直电梯故障预测技术推动了电梯维保模式从被动维保向按需维保的转变，促进了电梯维保行业的发展。目前，垂直电梯故障预测技术的应用还处于起步阶段，仍需要对以下问题进行深入研究。

#### 3.1 关键零部件失效模式和故障机理研究

关键零部件的失效模式和故障机理研究是垂直电梯故障预测技术的基础，需要考虑关键零部件的结构变形非线性、载荷时变性和故障耦合性等对故障演变的影响。垂直电梯不同关键零部件的失效模式和故障机理相差较大，因此由这些关键零部件构成系统的

故障演变规律更加复杂。目前，垂直电梯许多关键零部件的失效模式和故障机理尚未探明，在此方面有待进一步研究。

#### 3.2 多源异构数据处理

在垂直电梯工作过程中，不同类型的传感器被安装在关键零部件或子系统中，这些传感器采集的数据在不同的物理层面反映了垂直电梯在不同时间和工况下的运行状态信息，包含了垂直电梯故障的演变规律。这些数据具有海量性、耦合性、非线性、高纬低特征性和多时空时间序列性等特点。如何有效地利用这些数据构建垂直电梯健康状态的评估指标是一个难题。

#### 3.3 高准确度、强泛化能力的故障预测模型建立

目前，垂直电梯的故障预测模型大多采用深度学习算法，模型依赖于大量高质量的样本数据，样本标签制作费时费力；模型结构复杂，参数调节困难，训练难度大；模型自学习能力差，泛化能力弱。此外，垂直电梯的工作环境复杂，其关键零部件在不同工况下的性能退化过程与失效模式具有差异性，使故障发生呈现不确定性、并发性和耦合性等特点，现有的故

障预测模型难以发挥有效作用。

### 3.4 故障预测模型验证

垂直电梯故障预测模型的验证需要大量的试验数据做支撑,这些数据蕴含垂直电梯健康状态退化的信息。目前,垂直电梯的运行状态监测数据价值密度低,缺乏设备关键零部件从正常状态到故障状态的全生命周期数据;对于部分关键零部件或系统,监测数据中包含垂直电梯性能退化过程的有效信息匮乏,正常运行状态监测数据与故障监测数据存在严重不平衡。对于垂直电梯故障预测模型的性能评估和适用性验证,未来需要做好全生命周期的数据采集和积累工作。

## 4 结束语

本文总结了国内外垂直电梯故障预测技术的相关研究成果,分析了垂直电梯故障预测技术存在的主要挑战和发展趋势。从研究的侧重点来看,大多数研究侧重于垂直电梯故障发生后的状态分类,而非故障发生前的迹象识别;从研究的范围来看,目前主要对垂直电梯的单个关键零部件或子系统进行故障预测研究,对电梯整机系统运行状态的健康评估和故障预测的研究较少,方法的适用性有待进一步验证;从研究的趋势来看,基于人工智能的混合预测模型在垂直电梯故障预测技术领域的应用会逐渐增多。目前,垂直电梯故障预测技术的研究还较为薄弱,后续应加强垂直电梯故障机理研究,优化数据处理和特征提取算法,进一步开发具有优良泛化能力和高准确度的故障预测模型,同时做好全生命周期的高价值数据积累工作。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

### 参考文献

- [1] 刘美芳,尹纪庭,余建波.基于 SOA 的工程机械远程智能预诊断维护系统研究[J].中国机械工程,2012,23(19):2320-2326.
- [2] 彭喜元.数据驱动的故障预测[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2016.
- [3] LEI Y, LI N, GUO L, et al. Machinery health prognostics: A

systematic review from data acquisition to RUL prediction[J].

Mechanical Systems and Signal Processing, 2018,104:799-834.

- [4] 鲁玉坤,赵振虎.大数据时代下的电梯故障预诊断分析研究[J].中国设备工程,2017(16):79-80.

- [5] 陶杰,蒋曦阳,黄健鹏,等.电梯智能运维技术发展与趋势[J].科技资讯,2023,21(3):43-46.

- [6] WANG K, DAI G, GUO L. Intelligent predictive maintenance (IPdM) for elevator service-through CPS, IOT&S and data mining[C]//6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation. Atlantis Press, 2016:1-6.

- [7] 张从力,张昆,段其昌.基于 ControlNet 的软测量技术及其在电梯故障预测中的应用[J].仪器仪表学报,2004(S2):245-247.

- [8] 宗群,李光宇,郭萌.基于故障树的电梯故障诊断专家系统设计[J].控制工程,2013,20(2):305-308.

- [9] 宗群,李敬轩,杨智宇.基于物联网的电梯故障智能预测与诊断及维护方法: CN105731209A[P].2016-07-06.

- [10] NIU D, QI C, LI G, et al. Rapid fault diagnosis method of elevator system based on multiattribute decision making[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021:1-9.

- [11] NIUD, GUOL, ZHAOW, et al. Operation performance evaluation of elevators based on condition monitoring and combination weighting method[J]. Measurement, 2022,194:91-99.

- [12] 王林林.电梯故障预测及远程监控平台的研究与实现[D].沈阳:东北大学,2013.

- [13] CHEN Lian, LAN Shengnan, JIANG Saihua. Elevators fault diagnosis based on artificial intelligence[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019,1345:1-11.

- [14] AN Z, BAI D, GAN N, et al. The enlightenment on prediction and health management technology of elevator system[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021,1939(1):12-17.

- [15] YAN Jihong, KOC Muammer, LEE Jay. A prognostic algorithm for machine performance assessment and its application [J]. Production Planning & Control, 2004,15(8):796-801.

- [16] 李琪.电梯安全剩余使用寿命模型及应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.

- [17] 陈严嘉.乘客电梯块式制动器剩余寿命预测方法研究[D].杭州:浙江理工大学,2023.

- [18] 王美德.电梯曳引机工作寿命预测方法研究[D].杭州:浙江理工大学,2020.

- [19] 陆剑峰,徐煜昊,夏路遥,等.数字孪生支持下的设备故障预测与健康管理方法综述[J].自动化仪表,2022,43(6):1-7;12.

- [20] 李俊芳,曲照伟,窦立谦,等.基于神经网络的电梯门系统故障预测方法的研究[J].天津理工大学学报,2009,25(1):8-10.

- [21] WEN P, ZHI M, ZHANG G, et al. Fault prediction of elevator

- door system based on PSO-BP neural network[J]. Engineering, 2016,8(11):761-766.
- [22] BAI D, AN Z, WANG N, et al. The prediction of the elevator fault based on improved PSO-BP algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021,1906:12-17.
- [23] 冯鑫,夏洪山,冯月贵,等.基于遗传神经网络的电梯故障诊断技术研究[J].起重运输机械,2017,503(1):28-32.
- [24] QIU J, QIU B, YANG L. Fault prediction of elevator door lock based on MPGA-BP algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021,2179:1-8.
- [25] 段登,邱意敏,周力.基于神经网络的多电梯运行系统故障预测[J].计算机系统应用, 2011,20(9):252-255.
- [26] 车明浪,杨添玺.基于深度学习的电梯故障预警研究与应用[J].电子世界,2021(6):110-113.
- [27] LIU J, ZHANG C, LI N. Fault prediction of elevator operation system based on LSTM[C]//2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2021:6762-6766.
- [28] JIA M, GAO X, LI H, et al. Elevator running fault monitoring method based on vibration signal[J]. Shock and Vibration, 2021(8):1-10.
- [29] 姜宇迪,胡晖,殷跃红.基于无监督迁移学习的电梯制动器剩余寿命预测[J].上海交通大学学报,2021,55(11):1408-1416.
- [30] 胡昱.数据驱动的电梯关键部件健康状态评估及故障预测方法[D].广州:广东工业大学,2022.
- [31] 黄健鹏.基于物联网的电梯典型故障监测与预警系统研究[D].南京:南京理工大学,2021.
- [32] 孙庆港,王呈.改进 LSTM-AE 算法的电梯知识库故障征兆预测[J].计算机工程与应用,2023,59(7):311-318.
- [33] 孙庆港.融合预测性维护的智能电梯运维知识库系统[D].无锡:江南大学,2022.
- [34] HUANG H Z, WANG H K, LI Y F, et al. Support vector machine based estimation of remaining useful life: current research status and future trends[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2015,29(1):151-163.
- [35] 王健.电梯故障预测系统的设计与实现[D].济南:山东大学, 2018.
- [36] 徐姗.基于高阶谱和支持向量机的电梯故障诊断[D].厦门:华侨大学,2013.
- [37] 易士琳.基于振动特征提取的电梯故障诊断方法研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.
- [38] WAN zhou, YI Shilin, LI kun, et al. Diagnosis of elevator faults with LS-SVM based on optimization by K-CV[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2015, 2015:67-70.
- [39] 朱晓玲,李琨,张长胜,等.基于 Gabor 小波变换和多核支持向量机的电梯导靴故障诊断方法[J].计算机科学,2020, 47(12):258-261.
- [40] 吉训生,王大智.正负类双超球体模型在电梯故障诊断的应用[J].信息与控制,2020,49(3):377-384.
- [41] LIANG T, CHEN C, WANG T, et al. A machine learning-based approach for elevator door system fault diagnosis[C]// 2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering(CASE). IEEE, 2022:28-33.
- [42] QIU C, ZHANG L, LI M, et al. Elevator fault diagnosis method based on IAO-XGBoost under unbalanced samples[J]. Applied Sciences, 2023,13(19):10968.
- [43] 王海波.基于模糊神经网络的电梯实时监控和在线故障诊断的研究[D].沈阳:东北大学,2013
- [44] 王志平.基于高速电梯运行特征大数据分析的急停故障诊断技术及应用[D].杭州:浙江大学,2016.
- [45] 王爽,冯文龙.基于故障预测和安全评价技术的电梯按需维保平台研究[J].物联网技术,2019,9(11):41-44.
- [46] XU S, HUANG Y J. The fault diagnosis of elevator based on the autoregressive model and the support vector machine[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013,271:1689-1694.
- [47] 陈志平,汪赞,张国安,等.基于大数据的电梯故障诊断与预测研究[J].机电工程,2019,36(1):90-94.
- [48] 胡海博.基于小样本数据的社区电梯故障预测[J].工业控制计算机,2020,33(12):20-23.
- [49] 蒋文博,胡澜也,宋斐,等.基于比例风险模型与机器学习混合方法的电梯故障预测[J].工业工程与管理,2021,26(4):19-27.
- [50] WANG C, FENG S. Research on big data mining and fault prediction based on elevator life cycle[C]//2020 International Conference on Big Data & Artificial Intelligence & Software Engineering (ICBASE). IEEE, 2020:103-107.
- [51] ZHANG A, CHEN C, WANG T, et al. Fault diagnosis of elevator door machines based on deep convolutional forest [C]//2022 27th International Conference on Automation and Computing (ICAC). IEEE, 2022:1-6.
- [52] MISHRA K M, KROGERUS T R, HUHTALA K J. Fault detection of elevator system using profile extraction and deep autoencoder feature extraction for acceleration and magnetic signals[C]//2019 23rd International Conference Information Visualisation (IV). IEEE, 2019:139-144.
- [53] 郭俊,吕焕培,潘以军,等.基于动态扭矩的高速电梯曳引机主轴状态检测与寿命预测方法[J].中国电梯,2023,34(7):32-35;38.
- [54] 仲家寅.基于物联网的电梯故障预测维保系统研究[D].上海:上海海洋大学,2022.

(下转第 13 页)