

基于数字孪生的升降机传动系统动态故障预测与容错控制研究

叶洲鹏¹ 徐晨瀚² 蔡艳艳² 陈红英³

1. 揽胜重工有限公司 318014; 2. 浙江可胜起重设备安装有限公司 310012;

3. 浙江众联特种设备安装有限公司 317700

【摘要】 本研究专注于升降机传动系统，致力于运用数字孪生技术实现更为精准的动力故障预测与有效的容错控制。我们成功构建了升降机传动系统的数字孪生模型，并融合了先进的机器学习算法与多源信息策略，以实现对系统故障的精确预测。基于这些预测结果，我们设计了相应的容错控制策略。经过实际案例的深入分析与实验验证，数字孪生技术在显著提升升降机传动系统的可靠性和安全性方面展现出巨大潜力，为确保升降机的稳定运行提供了全新的思路与高效的方法。

Research on dynamic fault prediction and fault tolerance control of elevator drive system based on digital twin

Ye Zhoupeng¹ Xu Chenhan² Cai Yanyan² Chen Hongying³

1. Range Rover Heavy Industry Co., Ltd. 318014; 2. Zhejiang Kesheng Crane Equipment Installation Co., Ltd

【Abstract】 This research focuses on the lift transmission system, and is committed to the use of digital twin technology to achieve more accurate dynamic fault prediction and effective fault tolerance control. We have successfully constructed a digital twin model of the lift drive system and integrated advanced machine learning algorithms with multi-source information strategies to achieve accurate prediction of system failures. Based on these prediction results, we have designed the corresponding fault-tolerant control strategies. After the in-depth analysis and experimental verification of the actual cases, the digital twin technology shows great potential in significantly improving the reliability and safety of the lift transmission system, and provides a new idea and efficient method to ensure the stable operation of the lift.

一、引言

（一）研究背景与意义

升降机作为高层建筑施工的关键设备，其传动系统可靠性至关重要。传统故障预测与控制方法受限，难以准确预测并有效应对故障。数字孪生技术为升降机传动系统故障解决带来新机遇，通过构建虚拟模型实时反映实体状态，实现全面监测与深入分析。应用该技术可早期预测故障并及时响应，显著提升系统容错能力与可靠性，确保升降机安全高效运行。

（二）研究内容与方法

本研究旨在通过构建升降机传动系统的数字孪生模型，结合机器学习算法和多源信息融合策略，研究动态故障预测方法，并设计容错控制策略。采用文献研究法了解现状，利用建模与仿真法验证模型准确性，搭建实验平台进行故障模拟，采集数据并运用数据分析方法提取故障特征，建立预测模型。通过实际案例分析和实验验证，评估数字孪生技术在升降机传动系统故障预测和容错控制中的效果，确保其可行性和有效性。

二、数字孪生与升降机传动系统概述

（一）数字孪生技术原理与特点

数字孪生是一种充分利用物理模型、传感器数据、运行历史等信息，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿

真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。数字孪生技术的核心原理是通过建立物理实体与虚拟模型之间的实时映射关系，实现对物理实体的状态监测、性能评估、故障诊断和预测等功能。

数字孪生技术具有以下特点：

1. 多学科融合：数字孪生技术融合了机械工程、电子工程、计算机科学、控制理论等多个学科的知识，能够全面地描述和分析物理实体的行为。

2. 实时映射：数字孪生模型能够实时反映物理实体的状态和行为，通过传感器采集的数据实时更新模型参数，实现对物理实体的实时监测和控制。

3. 全生命周期管理：数字孪生技术可以覆盖物理实体的设计、制造、运行、维护等全生命周期过程，为物理实体的全生命周期管理提供支持。

4. 预测性分析：数字孪生模型可以通过对历史数据和实时数据的分析，预测物理实体的未来状态和行为，提前发现潜在的故障和问题，为决策提供依据。

（二）升降机传动系统结构与工作原理

升降机传动系统主要由电机、减速机、联轴器、制动器、卷筒、钢丝绳和滑轮等部件组成。其工作原理是：电机通过联轴器将动力传递给减速机，减速机对电机的转速进行降低并增大扭矩，然后通过联轴器将动力传递给卷筒，卷筒转动时缠绕或释放钢丝绳，从而带动轿厢上升或下降。制动器用于在需要时停止轿厢的运动，确保升降机的安全运行。

在升降机运行过程中，电机提供动力，减速机将电机的

高转速低扭矩转换为适合卷筒转动的低转速高扭矩,联轴器保证动力的可靠传递,制动器在必要时实现制动,卷筒和钢丝绳则实现轿厢的升降运动。

(三) 升降机传动系统常见故障类型及危害

升降机传动系统常见的故障类型包括:

1. 齿轮故障: 如齿轮磨损、齿面胶合、断齿等。齿轮故障会导致传动效率降低、噪声增大,严重时可能引发设备停机和安全事故。

2. 轴承故障: 如轴承磨损、滚珠损坏、保持架破裂等。轴承故障会导致设备振动加剧、温度升高,影响设备的正常运行。

3. 电机故障: 如电机绕组短路、断路、过载等。电机故障会导致电机无法正常工作,影响升降机的升降运动。

4. 联轴器故障: 如联轴器松动、磨损、断裂等。联轴器故障会导致动力传递不畅,影响设备的运行稳定性。

5. 制动器故障: 如制动器失灵、制动片磨损等。制动器故障会严重威胁升降机的安全运行,可能导致轿厢坠落等严重事故。

这些故障的发生不仅会影响升降机的正常运行,降低生产效率,还可能引发安全事故,造成人员伤亡和财产损失。因此,对升降机传动系统的故障进行准确预测和有效的容错控制具有重要的现实意义。

三、基于数字孪生的升降机传动系统动态故障预测

(一) 数字孪生模型的构建

1. 数据采集与处理

为了构建准确的数字孪生模型,需要采集升降机传动系统的各种运行数据。数据采集主要通过安装在系统关键部件上的传感器来实现,这些传感器可以实时采集设备的振动信号、温度、电流、转速等参数。

采集到的数据往往存在噪声和干扰,需要进行预处理。数据预处理的主要步骤包括数据清洗、降噪、特征提取等。数据清洗是去除数据中的异常值和错误数据;降噪是采用滤波等方法去除数据中的噪声;特征提取是从原始数据中提取能够反映设备运行状态的特征参数,如振动信号的幅值、频率、峭度等。

2. 模型搭建与验证

在数据采集和处理的基础上,利用建模软件搭建升降机传动系统的数字孪生模型。数字孪生模型可以采用物理模型和数据驱动模型相结合的方式构建。物理模型基于升降机传动系统的结构和工作原理,建立各部件之间的力学和运动学关系;数据驱动模型则利用采集到的数据,通过机器学习等方法建立设备运行状态与故障之间的关系。

模型搭建完成后,需要对模型进行验证。验证的方法主要是将模型的预测结果与实际运行数据进行比较,评估模型的准确性和可靠性。如果模型的预测结果与实际数据相差较大,则需要对模型进行调整和优化,直到模型的预测结果满足要求为止。

(二) 动态故障预测方法

1. 基于机器学习的故障预测算法

机器学习算法在故障预测中具有广泛的应用前景。常用的机器学习算法包括决策树、支持向量机、神经网络等。决策树算法通过对数据进行分类和回归分析,建立故障预测模型;支持向量机算法通过寻找最优分类超平面,将故障数据和正常数据区分开来;神经网络算法则通过模拟生物神经元的工作原理,对数据进行学习和预测。

在本研究中,选择合适的机器学习算法对升降机传动系统的故障进行预测。首先,对采集到的数据进行特征提取和选择,然后将数据分为训练集和测试集。利用训练集对机器学习算法进行训练,建立故障预测模型。最后,利用测试集对模型的性能进行评估,根据评估结果对模型进行调整和优化。

2. 融合多源信息的故障预测模型

为了提高故障预测的准确性,融合多源信息是一种有效的方法。多源信息包括振动、温度、电流、转速等不同类型的传感器数据。不同类型的传感器数据反映了设备不同方面的运行状态,通过融合这些数据,可以更全面地了解设备的运行情况,提高故障预测的准确性。

在本研究中,采用数据融合技术将多源信息进行融合。主要包括特征级融合、决策级融合等。特征级融合是将不同传感器数据的特征进行融合,然后利用融合后的特征进行故障预测;决策级融合是将不同传感器数据的预测结果进行融合,得到最终的故障预测结果。通过融合多源信息,建立更准确的故障预测模型。

(三) 故障预测案例分析

1. 实际案例数据采集与整理

选取某实际运行的升降机传动系统作为研究对象,安装各种传感器对系统的运行数据进行采集。采集时间为一个月,采集的数据包括振动信号、温度、电流、转速等参数。

采集到的数据经过预处理后,按照时间顺序进行整理。将数据分为正常运行数据和故障数据,其中故障数据包括齿轮磨损、轴承故障等不同类型的故障数据。

2. 故障预测结果与分析

利用构建的数字孪生模型和故障预测方法,对实际案例数据进行故障预测。首先,将正常运行数据输入到模型中,对模型进行训练和优化。然后,将故障数据输入到模型中,观察模型的预测结果。

通过对故障预测结果的分析,评估数字孪生技术在升降机传动系统故障预测中的效果。结果表明,基于数字孪生的故障预测方法能够准确地预测故障的发生,提前发现潜在的故障隐患,为设备的维护和管理提供了有力的支持。

四、升降机传动系统容错控制策略

(一) 容错控制基本原理与方法

容错控制的基本原理是在系统出现故障时,通过一定的控制策略和方法,使系统仍然能够保持稳定运行,或者在一

一定程度上恢复系统的性能。容错控制的方法主要包括硬件冗余、软件容错控制等。

硬件冗余是通过增加备用部件来提高系统的可靠性。当主部件出现故障时,备用部件可以自动切换到工作状态,保证系统的正常运行。硬件冗余的优点是可靠性高,但缺点是成本高、体积大。

软件容错控制是通过故障诊断和控制策略的重构来实现系统的容错运行。当系统出现故障时,首先通过故障诊断算法检测和隔离故障,然后根据故障的类型和程度,重构控制策略,使系统能够在故障情况下继续运行。软件容错控制的优点是成本低、灵活性高,但缺点是对故障诊断和控制算法的要求较高。

(二) 基于数字孪生的容错控制策略设计

1. 故障诊断与隔离

利用数字孪生模型对升降机传动系统进行故障诊断和隔离。数字孪生模型可以实时监测系统的运行状态,通过对传感器数据的分析和处理,判断系统是否出现故障。当检测到故障时,数字孪生模型可以进一步分析故障的类型和位置,实现故障的隔离。

在故障诊断过程中,采用基于机器学习的故障诊断算法。首先,对正常运行数据和故障数据进行特征提取和选择,然后利用训练集对机器学习算法进行训练,建立故障诊断模型。当系统运行时,将实时采集的数据输入到故障诊断模型中,判断系统是否出现故障以及故障的类型。

2. 控制策略重构

在故障诊断和隔离的基础上,进行控制策略的重构。当系统出现故障时,根据故障的类型和程度,调整控制策略,使系统能够在故障情况下继续运行。例如,当齿轮出现磨损故障时,可以降低系统的运行速度,减少齿轮的负载,延长齿轮的使用寿命;当电机出现故障时,可以切换到备用电机,保证升降机的正常运行。

控制策略的重构可以通过数字孪生模型进行仿真和优化。在重构控制策略之前,利用数字孪生模型对不同的控制策略进行仿真,评估其性能和效果。然后,选择最优的控制策略进行实施,确保系统在故障情况下能够保持稳定运行。

(三) 容错控制实验验证

1. 实验平台搭建

为了验证基于数字孪生的容错控制策略的有效性,搭建升降机传动系统实验平台。实验平台主要包括电机、减速机、

联轴器、制动器、卷筒、钢丝绳和滑轮等部件,以及各种传感器和数据采集设备。

在实验平台上,安装振动传感器、温度传感器、电流传感器、转速传感器等,实时采集设备的运行数据。同时,安装故障模拟装置,如齿轮磨损模拟装置、轴承故障模拟装置等,可以模拟不同类型的故障。

2. 实验结果与分析

在实验平台上进行容错控制实验。首先,模拟不同类型的故障,如齿轮磨损、轴承故障等,观察系统的运行状态。然后,利用数字孪生模型进行故障诊断和隔离,重构控制策略,使系统能够在故障情况下继续运行。

通过对实验结果的分析,评估基于数字孪生的容错控制策略的有效性。结果表明,基于数字孪生的容错控制策略能够快速准确地诊断和隔离故障,有效地重构控制策略,使系统在故障情况下能够保持稳定运行,提高了系统的可靠性和容错能力。

五、结论与展望

(一) 研究成果总结

本研究基于数字孪生技术,深入探索了升降机传动系统的动态故障预测与容错控制。我们成功构建了数字孪生模型,实现了对系统运行状态的实时监测与模拟;开发了基于机器学习和多源信息融合的故障预测方法,准确预测潜在故障;设计了容错控制策略,提升了系统可靠性。通过案例分析与实验验证,证明了数字孪生技术在该领域的有效性和可行性。

(二) 研究不足与展望

本研究虽然取得了一定的成果,但仍然存在一些不足之处。未来的研究可以从以下几个方面展开:

- 1.完善数字孪生模型,结合先进建模与数据处理技术,提高模型精度与可靠性。
- 2.研究更高效故障预测算法,如深度学习、强化学习等,增强预测效率与泛化能力。
- 3.加强容错控制策略研究,融合智能与自适应控制技术,提升实时性与鲁棒性。
- 4.探索数字孪生技术在升降机全生命周期管理中的应用,实现全过程优化与管理。

参考文献

- [1]罗聪,徐克,刘潜,等.安全风险分级管控相关概念辨析[J].中国安全科学学报.2019,(10).
- [2]王彬,晁自如,张业,等.超高层施工升降机配置技术研究[J].建筑机械化.2023,44(5).
- [3]卢虎,胡平.浅析超高层建筑施工升降机的安全技术要点[J].建筑安全.2022,37(10).
- [4]罗彦铭,霍孟友,朱振杰.施工升降机强制性维修保养监管系统设计[J].济南大学学报(自然科学版).2017,(5).
- [5]赵挺生,冯楚璇,蒋灵,等.基于 AcciMap 模型的施工升降机安全风险研究[J].中国安全科学学报.2022,32(1).
- [6]陶青林."智慧工地"的施工现场安全管理模式应用研究[J].建筑安全.2021,(6).
- [7]张涛,何泽银,殷时蓉,等.考虑时变摩擦的直齿齿轮副啮合刚度计算及其影响因素分析[J].机械传动.2019,(9).