

探讨机械设计过程中的故障预测与健康管理方法

孙杰

成都市新筑交通科技有限公司, 中国·四川 成都 610000

摘要: 机械设计过程故障预测及健康管理, 是确保设备平稳运行, 提高使用寿命的重点。通过对机械故障进行防范, 提高了设备使用周期和减少了维修成本, 在故障预测和健康管理方面起到了至关重要的作用。文中讨论了 3 种主要故障预测技术, 分别是基于物理模型, 数据驱动以及混合模型, 对比选取。同时, 以机械设备健康管理方法为研究对象, 论文对健康指标选取, 以状态监测为基础的健康管理, 预测维护方法和健康管理系统整合实现等方面进行阐述。**关键词:** 故障预测; 健康管理; 机械设计; 状态监测

Exploring Fault Prediction and Health Management Methods in the Process of Mechanical Design

Jie Sun

Chengdu Xinzhu Transportation Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract: Fault prediction and health management in the mechanical design process are key to ensuring the smooth operation of equipment and improving its service life. By preventing mechanical failures, the equipment's service life has been improved and maintenance costs have been reduced, playing a crucial role in fault prediction and health management. The paper discusses three main fault prediction techniques, namely based on physical models, data-driven, and hybrid models, and compares and selects them. Meanwhile, taking the health management methods of mechanical equipment as the research object, this paper elaborates on the selection of health indicators, health management based on condition monitoring, predictive maintenance methods, and the integration and implementation of health management systems.

Keywords: fault prediction; health management; mechanical design; status monitoring

0 前言

机械设备故障预测和健康管理对现代机械设计有着十分重要的意义。在机械设备复杂性与精密度不断增加的情况下, 常规故障应急维修方法已经很难适应高效, 安全, 经济运行的需要。故障预测技术可以通过预先发现可能存在的故障问题使得设备管理者可以及时地采取预防性措施以缩短停机时间, 降低维修成本; 但健康管理方法侧重于对装备整体状态进行监控与维修, 实现对装备寿命周期的优化管理。

1 机械设计过程中的故障预测与健康管理的 作用

1.1 预防机械故障的发生

机械设备在工作中必然会遇到各种各样的潜在风险与故障隐患, 特别是高负荷或者恶劣的环境中工作, 更是极易遇到突发性的故障。若不能对这些问题进行及时的辨识与处理, 就有可能造成设备的停运, 对生产效率造成严重的影响。利用故障预测技术对机械设备进行状态监测与数据分析, 可以在设备运行过程中预先发现异常并确定潜在故障发生概率, 以避免故障突发。这一积极的故障预防措施能够帮助企业有效地避免因意外停机而造成损失并确保生产过程

持续稳定。同时, 健康管理系统可以通过对机械设备振动、温度、压力等关键参数及状态进行连续监控来实时掌握其运行情况。当设备运行参数偏离正常值范围时, 系统将自动发出信号进行预警, 以提醒操作人员进行必要维护。这类监测手段可在故障萌芽阶段介入, 以免小问题发展成严重的故障。另外, 利用基于预测模型的分析手段, 如物理模型、数据驱动模型或混合模型, 能够模拟和预测设备在各种运行环境下的行为模式, 有助于工程师们在设计阶段对设备结构、材料选择等方面进行优化, 从而降低失效的概率。

1.2 延长机械设备的使用寿命

机械设备每天都要承受磨损与老化, 特别是关键部件长期高负荷运行时更易产生疲劳与腐蚀, 这直接影响了设备整体的使用寿命。采取有效的健康管理措施可对设备运行状态进行连续监控, 及时发现其磨损情况及性能下降趋势并有针对性地采取维护措施以减缓其老化进程。另外, 根据故障预测制定的维护策略能够在装备还未完全发生故障之前就预先安排好计划进行预防性维护。该方法在保证关键零部件达到故障之前对其进行替换或者维修, 大大延长其使用寿命的前提下, 避免了常规定期维护会导致的资源浪费以及不必要的设备停运。结合该技术的健康管理技术通过分析设备在工作过程中出现的异常数据, 能够优化工作参数及工作模

式,降低疲劳及损伤积累速度。

1.3 降低维修成本

传统维修策略中,机械设备经常要在发生明显故障或者全部失效的情况下才会维修,这样不但会提高维修费用而且会造成生产停滞和产能损失等附加费用。相比较而言,故障预测技术对设备运行状态进行实时监控与数据分析,可以提前发现并预测可能发生的故障,使维修工作更加积极有效,进而显著降低维修成本。健康管理方法为维修策略提供数据与状态相结合的方法,使维修工作可以根据实际需求而非固定时间间隔或者故障发生时。采用本方法能够在保证需要检修时及时对装置进行处理的前提下,避免了不必要的检修作业。另外,预测维护技术还可以依据设备运行状况及历史数据精确地确定最佳维护时间及内容。该“根据需要进行保养”方式能够将维修成本降到最低,提高了设备使用效率。

2 机械设计过程中的故障预测技术

2.1 基于物理模型的预测方法

以物理模型为基础的故障预测方法,依靠对机械系统物理特性及工作原理的透彻了解,并通过构建数学模型,模拟出不同条件下设备的工作情况。这一分析方法通常依赖于机械系统的各种物理特性,如刚度、质量和阻尼系数等,并结合外部因素,如载荷和环境状况,来对系统的行为进行深入的分析和预测。以物理模型为基础的预测方法,其核心是准确描述装置内的力学特性和相互作用关系,尤其是对于机械结构清晰、物理特性知道的系统故障预测。在实践中,该方法被广泛应用于复杂机械系统设计阶段,它通过对各种工况下应力,应变及振动情况进行仿真来确定可能存在的薄弱环节及故障点。例如,有限元分析这一技术经常被应用于模拟机械部件在受到应力和高温环境影响下的行为,以便更准确地预测可能出现的疲劳失效或断裂位置。物理模型也有助于关键部件设计优化方案的确定,从而降低应力集中、疲劳裂纹等缺陷的产生,增强整体设备运行可靠性。尽管基于物理模型的方法具有较高的精确度和可解释性,但其应用也面临一些挑战。模型的建立通常需要丰富的先验知识与准确的数据输入,尤其对于复杂系统,需考虑许多相互作用的因素,使建模与计算过程十分复杂。

2.2 数据驱动的预测方法

与传统基于物理模型方法相比较,数据驱动方法不需要对机械系统物理特性细致建模,直接利用数据特征预测故障发生的可能性及时机。该方法由于能有效利用丰富多样的数据找出潜在故障模式,尤其适合复杂系统或者物理模型不清晰的情况。在实际应用中数据驱动预测方法一般有监督学习与非监督学习两种技术手段。监督学习在标记后的故障数据集上对模型进行训练,使得模型能识别出正常状态和异常状态之间的差异,进而对未来故障进行预测。并且非监督学习利用了数据固有的特征进行异常行为检测,对于不能得到

足够标注数据的情况是合适的。例如,在故障预测领域,支持向量机、神经网络以及决策树等多种模型已经得到了广泛的应用,这主要是通过对设备运行数据进行持续的学习和更新来实现的,这些模型能动态地适应故障新模式,并提高了预测精度与及时性。数据驱动预测方法也有较强的自适应能力,可以不断地吸纳新的数据来优化模型,使预测精准度逐渐提升。

2.3 混合模型预测方法

混合模型预测技术融合了基于物理模型和数据驱动两种策略的优势,通过将物理模型的准确度与数据驱动方法的适应性结合起来,为我们提供了一个更全面的故障预测解决方案。该方法首先利用物理模型给出的初始条件与边界条件构造了粗略的预测框架,再以数据驱动方式对该模型做进一步修正与优化,以增强预测精度与鲁棒性。混合模型预测方法尤其适用于复杂机械系统,这些系统有一些已知的物理特性,并且能够得到大量的运行数据。在实践中,混合模型的预测方法一般都是通过各种技术手段来实现,如结合有限元分析和神经网络来预测机械零部件疲劳寿命等;或以物理建模计算结果为输入建立数据驱动模型,以增强预测精确度与适应性。以航空发动机故障预测为例,物理模型可准确描述发动机叶片应力与振动特性,数据驱动模型可基于历史运行数据对预测结果进行实时调整,更准确识别故障风险与趋势。

2.4 预测技术的比较与选择

选择适合机械设计过程的故障预测技术需考虑到设备特点,运行环境,数据可用性和预测精度要求等。以物理模型为基础的预测方法具有清晰的机械结构和已知物理特性的优异性能,适用于高精度工程应用场景。但它的应用范围有限,对先验知识及计算资源要求较高,在复杂动态变化环境中性能可能较差。相比较而言,数据驱动预测方法对复杂物理建模没有依赖性,更加适用于应对复杂、非线性故障模式,特别是当数据足够丰富时。它能迅速适应环境变化的新故障模式,灵活性与扩展性强,但是高度依赖于数据的质与量。混合模型预测技术在某种程度上成功地解决了物理模型和数据驱动方法各自存在的局限,通过融合这两种方法的优势,达到了更高精度和更灵活的故障预测效果。该方法应用于需同时兼顾已知物理特性与复杂故障模式,特别是高精度与高可靠性需求的场景中,如航空航天、核电等重点领域。选用混合模型需要在物理模型计算复杂度与数据驱动模型灵活性之间进行权衡,以保证二者有效融合。

3 机械设计过程中的健康管理方法

3.1 健康指标的选择

健康指标作为反映机械设备运行状态及性能水平的定量数据,对其进行筛选与监控可准确地评价设备健康状况及预测可能发生的故障。常用的健康指标主要有振动,温度,

压力, 噪声, 转速及电流, 它们可以直接或者间接地反映出设备运行状态及性能变化情况。以振动监测为例, 振动监测在机械设备健康管理方面应用最为广泛, 由于设备内部存在着磨损, 松动, 不平衡或者不正确等现象, 一般都会引起振动特征发生异常改变。选择适宜的健康指标需综合考虑装置种类, 工作条件及运行环境。例如, 在涉及旋转机械设备, 如泵、压缩机和风机的情况下, 振动和轴承的温度被视为关键的健康指标, 因为这些数据可以揭示设备在操作过程中可能遭遇的磨损或故障; 在电气设备方面, 如电机和发电机, 电流和绝缘电阻的监测显得尤为重要, 因为这些指标直接影响到设备的安全性和使用寿命。健康指标的合理选取与优化可以达到机械设备精准监控、提升健康管理准确性与有效性的目的, 从而为后续状态监测与预测维护打下坚实的基础。

3.2 基于状态监测的健康管理

以状态监测为核心的健康管理方法, 是指通过对机械设备运行状态数据进行实时监控, 从而对机械设备健康状况进行评价的一种策略。这种方法采用多种传感器和监测工具, 持续地收集设备的关键操作参数, 如振动、温度、压力和电流等, 并对这些数据进行深入的分析 and 处理, 以确保设备处于最佳的健康状况。状态监测有助于确定早期故障征兆, 如振动信号不正常可能指示轴承磨损、温度不正常上升可能提示电机过载或者润滑不良等。该健康管理方法具有能提供设备实时状态信息等优点, 使设备管理者能依据设备实际运行状况进行及时决策。通过对实时监测数据进行分析, 能够准确地判断出是否有必要对设备进行检修, 避免传统定期维护模式下可能造成的检修过多或者检修不到位等情况。以状态监测为核心的健康管理能够快速发现并应对可能发生的故障风险而不影响其正常工作, 显著提高了其效率与可靠性。

3.3 基于预测维护的健康管理

基于预测维护的健康管理方法就是依靠对设备运行数据及历史数据分析来对设备故障出现的时间及方式做出预先预测从而积极实施维修的一种策略。该方法利用健康指标历史数据建模分析确定不同运行状态下设备健康变化趋势及可能存在的故障风险, 以便在设备确实发生故障之前采取防范措施。采用预测维护技术能有效地缩短因设备出现故障而导致的非计划停机时长, 从而提升设备的使用效率和整体生产性能。在预测维护的实现中, 一般综合运用时间序列

分析, 机器学习算法以及统计模型的各种数据分析技术。这些技术有助于构建设备运行状态 - 故障关联模型并基于实际运行数据对未来健康状态及可能故障点进行预测。如应用神经网络模型可对设备运行数据进行非线性特征分析, 并对复杂运行条件下设备故障趋势进行预测; 且回归分析方法有助于辨识健康指标变化和故障之间相关性, 进而找出最佳维修时机。

3.4 健康管理系统的集成与实施

现代工业环境下, 机械设备通常类型多样且结构较为复杂, 单一健康管理方法很难满足多样化管理需求。为此, 有必要整合各种健康管理方法, 包括基于状态监测与预测维护的健康管理方法, 构成综合健康管理系统, 从而达到综合监控与主动维护设备的目的。实施集成健康管理通常涉及硬件与软件两个方面的整合。硬件上, 需将传感器, 数据采集设备及通信模块安装到设备关键部位才能实现运行状态实时监控。在软件上, 健康管理需包含数据存储, 分析及可视化功能模块, 并对采集到的数据全面的处理与分析, 从而产生设备的健康状态报告及维护建议。此外, 为了支持与其他信息系统的整合, 如企业资源计划系统和制造执行系统, 系统必须拥有出色的互操作性和可扩展性。

4 结语

总结机械设计过程故障预测及健康管理方法、讨论不同预测技术优缺点和适用性、健康管理整合实施策略。今后, 我们要对这些技术在各种机械设计场景下的具体运用与优化进行深入研究, 从而更好的保证机械设备运行的安全性, 可靠性以及经济性。

参考文献:

- [1] 刘美仙. 机械设计与制造中绿色设计理念的应用研究[J]. 福建轻纺, 2024(1): 35-37+42.
- [2] 王建兴. 机械设计制造中渗透绿色理念的实践研究分析[J]. 大众标准化, 2023(18): 65-67.
- [3] 朱洛申. 典型机械设备实时状态监测及健康管理系统设计[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
- [4] 李丹曦. 基于混合算法的采煤机故障诊断与预测系统设计应用[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(2): 186-188+191.
- [5] 孙旭升, 周刚, 于洋, 等. 机械设备故障预测与健康管理综述[J]. 兵工自动化, 2016, 35(1): 30-33.