

基于RCM的风电机组健康度检测系统的研究和应用

王超^{1,2} 詹鹏^{1,2} 侯宇^{1,2} 郭进学^{1,2} 张文雨^{1,2} 朱林^{1,2} 魏陈凌文^{1,2}

1 中国华电科工集团有限公司, 北京 100160; 2 华电中光新能源技术有限公司, 北京 100160

摘要: 近年来, 风电行业的迅速发展对风电机组运维提出了更高要求。以可靠性为中心的维修(RCM)作为现代化的设备管理方法, 在风电机组健康度检测和维修中逐渐得到了应用。为此, 本文分析了RCM在风电机组健康度检测系统中的作用, 从数据收集、故障模式分析、健康度评估和优化维修策略四个方面探讨其应用价值。研究表明, 基于RCM的健康度检测系统能够显著提升风电机组的运维效率, 延长设备寿命, 降低运维成本, 为风电运维的智能化和精细化管理提供了有力支持。

关键词: RCM; 风电机组; 健康度检测; 故障模式分; 维修策略

Research and Application of Wind Turbine Detection System Based on RCM

Wang,Chao^{1,2} Zhan,Peng^{1,2} Hou,Yu^{1,2} Guo,Jinxue^{1,2} Zhang,Wenyu^{1,2} Zhu,Lin^{1,2} Wei,Chenlingwen^{1,2}

1China Huadian Engineering Co., Ltd.Fengtai District, Beijing 100160, China

2Huadian Zhongguang New Energy Technology Co., Ltd.Fengtai District, Beijing 100160, China

Abstract: In recent years, the rapid development of wind power industry has put forward higher requirements for the operation and maintenance of wind turbines. Reliability-centered maintenance (RCM), as a modern equipment management method, has been gradually applied in the detection and maintenance of wind turbines. Therefore, this paper analyzes the role of RCM in the detection system of wind turbines, and discusses its application value from four aspects: data collection, failure mode analysis, evaluation and optimized maintenance strategy. The research shows that the detection system based on RCM can significantly improve the operation and maintenance efficiency of wind turbines, prolong the service life of equipment and reduce the operation and maintenance cost, which provides strong support for the intelligent and refined management of wind power operation and maintenance.

Keywords: RCM; Wind turbine; Detection; Fault mode classification; Maintenance strategy

DOI: 10.62639/sspis02.20240104

随着全球能源结构向低碳和绿色转型, 风电产业作为重要的可再生能源形式得到了迅速发展。我国风电装机容量容量在世界上居于领先地位, 但同时也面临着巨大的运维成本和维护挑战^[1]。为保障风电机组的安全、稳定运行, 提升健康度检测和故障预测的精确性成为关键课题。

一、RCM在风电机组健康度检测中的作用

RCM(可靠性中心维护)的核心在于系统分析设备故障模式并根据故障影响程度与频率判定维修优先级, 以功能导向识别威胁风电机组核心运行的关键故障。RCM还可以实时

监测温度、压力、振动等关键参数, 匹配已知故障模式, 快速识别异常问题, 再结合历史数据与分析模型精准定位故障, 使潜在问题可预测、可控, 避免非计划停机。除此之外, RCM优化维护策略, 通过健康状态评估动态调整维修周期与资源分配, 优先保障关键部件, 减少“过度维修”或“维修不足”现象, 并在备件储备上进行精细化管理, 降低时间成本。最后, RCM建立设备健康档案, 记录运行数据、故障频率和维修历史, 提供全生命周期管理支持, 从长期决策、部件更换到退役规划, 帮助运营商精细化设备管理, 降低寿命周期成本, 实现科学运维。

(稿件编号: IS-24-4-X002)

作者简介: 王超(1985-11), 男, 汉族, 籍贯: 北京昌平人, 燕山大学电气工程及其自动化专业, 职称: 工程师, 本科学历, 研究方向: 新能源生产运维管理。

詹鹏(1991-02), 男, 汉族, 籍贯: 江西九江, 华北电力大学, 职称: 高级工程师, 硕士研究生学历, 研究方向: 控制理论与控制工程。

侯宇(1976-10), 男, 汉族, 籍贯: 北京, 郑州粮食学院机械设计与制造专业, 职称: 工程师, 本科学历, 研究方向: 新能源工程及生产经营管理。

郭进学(1973-11), 男, 汉族, 籍贯: 陕西渭南, 北京交通大学, 职称: 工程师, 本科学历, 研究方向: 新能源工程及生产经营管理。

张文雨(1990-07), 男, 汉族, 籍贯: 重庆市开州, 山东理工大学, 职称: 中级工程师, 学士学历, 研究方向: 流体传动与控制。

朱林(1985-09), 男, 汉族, 籍贯: 湖南省邵阳市, 湖南科技大学能源与安全工程学院, 职称: 工程师, 本科学历, 研究方向: 流体传动与控制。

魏陈凌文(1996-05), 男, 汉族, 籍贯: 云南建水, 格拉斯哥大学, 职称: 初级 硕士研究生学历, 研究方向: 能源经济管理。

二、基于RCM的风电机组健康度检测系统设计

基于RCM的健康度检测系统主要包括数据采集、故障模式识别、健康度评估和预防性维修建议等模块。具体设计思路如下:

(一) 数据采集与监测

数据采集与监测是RCM健康度检测系统运行的核心环节,其设计思路在于获取精确、全面的数据,为设备健康状态的评估和故障模式的分析提供基础支持。在风电机组运行过程中,传感器和监测设备承担着“感知器官”的角色,这些设备需安装在如齿轮箱、主轴轴承、液压系统等关键部件的高风险区域,用于实时追踪温度、振动、压力、转速等关键参数。以齿轮箱为例,其运行中的温度和振动数据可以直接反映润滑状态和机械负载情况。这些数据被高灵敏度传感器采集后,经由无线网络或有线通信的方式传输至风场监控系统(SCADA)。SCADA作为整个监测系统的中枢,将实时采集的多维数据进行整合、处理和存储,利用图形化界面呈现出风电机组的动态运行状态。在这一过程中,传感器的选择和布置不仅要考虑精度和可靠性,还需兼顾设备的运行环境特点,具备抗腐蚀性、耐高温的性能。数据采集频率不可过低,否则可能遗漏早期故障特征;过高则会增加存储和计算的负担。因此,在设计中需要结合部件的运行特性选择最优的采样参数。设计者还需要合理规划采集数据的分类和存储逻辑,将实时数据与历史数据关联存储,方便后续的趋势分析和模式识别。

(二) 故障模式与影响分析(FMEA)

完成数据采集后,第一步是梳理各部件可能的故障模式,例如齿轮箱常见的润滑失效、轴承疲劳裂纹或液压系统中的管路泄漏。这些模式需要根据设备运行特性和历史故障数据加以归类,明确其发生条件。FMEA的核心在于分析每种故障模式可能引发的后果,从性能退化到功能丧失,再到对整个机组的安全性、经济性及环境影响的潜在危害。例如,齿轮箱润滑失效可能导致过热和摩擦增大,进而引发齿轮咬死或轴承卡滞,而这些问题通常会导致风电机组停机并产生高昂的维修费用。为了评估故障的严重性,设计中引入了风险优先数(RPN),以发生概率、后果严重程度及检测难易度三个维度量化每种故障模式的风险等级。基于此,系统对故障模式的优先级进行排序,将高风险模式纳入重点监控范围。例如,如果液压制动系统的压力异常频率较高,FMEA会建议提前安排检修或改进设计以降低风险。此外,在FMEA的实施过程中,还要做好分析工具的选择工作。常用方法包括故障树分析(FTA)和因果图,可从多角度揭示故障的根本原因。整个设计流程的关键在于数据与经验相互结合,不仅依赖实时监测数据,还需要运维团队的专

业判断。FMEA成果最终会以报告的形式输出,为后续的健康评估和维修策略优化提供逻辑基础,同时减少资源分配的不合理性。

(三) 健康度评估模型

模型的建立以收集的实时监测数据和FMEA分析结果为基础,首先明确齿轮箱的振动幅度、主轴轴承的温升以及液压系统的压力波动等不同部件的关键性能指标,这些指标直接反映部件的性能劣化程度。在此基础上,还需要预测部件的剩余寿命。常用的建模方法包括基于统计分析的健康指数模型和基于人工智能的预测性模型。前者基于数据的历史趋势建立数学关系,例如时间序列分析,捕捉部件劣化的渐变特征^[5];后者利用机器学习算法和大数据训练模型,对复杂非线性问题进行精确预测。以齿轮箱为例,其振动信号可以被输入到健康度模型中,模型随后会提取信号的频谱特征,结合历史数据预测其未来的振动趋势,从而量化当前的健康状态和潜在的故障风险。在评分量化的设计上,模型通常以百分制或分级标度呈现,例如,将部件的健康状态划分为“优”、“良”、“警告”、“危急”四个等级,每个等级对应不同的维修优先级。为了提升模型的适应性,还需要引入多源数据融合技术,将不同数据源的异构信息整合为一致性的输入变量,例如将SCADA系统的运行数据与人工点检记录进行对比,进一步校正模型输出。健康度评估模型不仅强调精准性,还需要兼顾实时性和鲁棒性,设计中应充分考虑计算资源和现场环境的限制,使其能够在复杂的风电场环境下稳定运行。

(四) 预防性维修决策与策略优化

预防性维修决策与策略优化是健康度检测系统中直接影响运维效率和成本的核心部分,其设计思路需要结合RCM逻辑决策框架,对设备健康数据和故障风险进行全面分析,从而提出科学、精准的维修建议。首先,系统根据健康度评估模型输出的结果,将各部件的状态分为不同优先级,例如高风险部件标记为“需立即维修”,中风险部件标记为“定期监测”,而低风险部件则归类为“延期检修”。这种优先级划分不仅依赖健康评分本身,还需要结合设备运行的关键性和潜在故障的影响范围。例如,主轴轴承的健康状况直接关系到整台风电机组的运转,因此即使健康评分略低于临界值,也可能被划入优先维修类别。其次,决策逻辑中引入了基于成本效益分析的动态调整机制,综合考虑维修费用、设备停机损失和长期运行效益,从而优化维修周期和资源分配。在润滑系统滤芯更换过程中,系统会根据运行数据预测滤芯的使用寿命,再与备件成本和更换时间进行对比,得出最优更换时点。这一过程既避免了过早更换导致资源浪费,也降低了滤芯堵塞引发设备磨损的风险。

三、风电机组健康度检测系统的应用分析

(一) 提高故障预测的精确性

在风电机组的运维中, 精确预测故障是实现在风电场稳定运行的核心。RCM方法借助实时数据监测技术和故障模式分析, 将风电机组的健康状况精准地展现出来, 尤其对关键部件如齿轮箱、轴承、液压系统等设备, 健康度检测系统可以识别出故障前的早期异常。一个典型的应用案例表明, RCM健康度检测系统能够基于连续采集的实时数据构建出每个关键部件的“健康曲线”。这些曲线反映了部件的温度、振动、转速等运行参数的变化情况^[6]。当系统检测到某个参数的波动超过设备设计范围, 系统便会将这一异常标识为潜在故障点。在实际风电场应用中, 齿轮箱的润滑系统在冬季负荷变化时易出现流量不足现象, RCM检测系统能够识别这一变化, 将其作为潜在故障进行分析, 从而有效规避了故障带来的停机风险。这样既减少了风电机组的故障率, 也实现了智能化的故障预测, 为风电场持续稳定的发电运行提供了参考。

(二) 提升维护工作的经济效益

传统的风电场定期检修模式带来了“过度维修”和“维修不足”的困扰: 有些部件在不完全磨损前进行更换, 造成了材料的浪费, 而另一些部件则可能因未及时维护而发生外故障。基于RCM的健康度检测系统则以风险排序与健康评估来优化维护计划, 精确匹配维修资源与设备健康状态。例如, 某风电场引入RCM检测系统后, 针对不同部件的健康状况来动态安排维修作业, 从而消除了“满负荷维修”的不必要支出。据测算, 这样的精细化管理模式降低了运营方的维修费用约15%。健康度检测系统还能根据不同部件的磨损速度设定维修周期, 将维修资源配置在“关键部件”上, 非核心部件则适当延长维修周期, 提高了资金的使用效率。

(三) 延长设备的使用寿命

RCM检测系统的核心理念在于对设备进行预防性维修, 这种方式在提升设备可靠性的同时大幅延长了设备的使用寿命。以风电机组中的关键部件为例, 齿轮箱的磨损和润滑油劣化是设备老化的重要因素之一, RCM系统将这些磨损参数纳入监控范围, 从而对部件的磨损程度进行动态评估。例如, 润滑油的实时监测数据显示, 温度超过某一阈值时, 润滑效率会显著降低, 容易导致齿轮箱的加速磨损。RCM系统根据此类数据提示运维人员采取油品更换或冷却措施, 从而延缓了齿轮箱的损耗进程。研究数据显示, 在应用RCM健康度检测系统后, 风电机组的关键部件故障率下降了20%, 设备寿命周期平均延长了3-5年。这一成果充分表明, RCM检测系统可以显著延长风电机组的寿命, 从而在无形中提升了设备的投资回报率, 为风电场的长期稳定运营打下了坚实的基础。

(四) 支持全生命周期管理

在风电机组的运维管理中, 全生命周期管理越来越受到重视。基于RCM的健康度检测系统可以根据设备在不同生命周期阶段的状态和可靠性数据来动态调整维护策略, 确保运维管理的科学性和灵活性。具体而言, RCM健康度检测系统能够结合历史数据与实时数据, 逐步完善风电机组的生命周期健康档案。这些数据能够详细地记录风电机组在安装、运行、维修等各个阶段的健康状况与磨损情况, 并形成一套完整的设备健康历史档案。比如, 在风电机组的初期运营阶段, 系统会以高频次监控来确定设备的工作负荷和磨损规律。随着设备逐步进入稳定期, 监测频率可以适当降低, 而当设备接近寿命末期, 系统则会加大监控力度, 为退役和更换提供数据支持。

四、结语

总体而言, 基于RCM的风电机组健康度检测系统不仅有效提升了故障预测的精度、降低了维护成本、延长了设备的使用寿命, 还实现了风电机组的全生命周期管理, 为现代风电运维管理注入了新的活力。然而, 该系统在具体应用中, 也面临着虚度挑战, 特别是如何在成本控制与系统集成之间取得平衡, 仍需进一步探索。随着智能算法和数据技术的深入发展, RCM检测系统在风电行业的应用前景将更加广阔, 但其持续的优化与推广需依赖行业内外的共同努力。这不仅要求技术层面的创新, 更需要管理模式的调整和人才的综合培养, 在可再生能源的应用与运维中实现更高效的管理模式。

参考文献:

- [1] 尹子康, 林忠伟, 吕广华, 李东泽. 基于数据驱动的风电机组变桨系统故障诊断与健康状态预测研究[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43 (05): 1-11+17.
- [2] 高晨, 童博, 张宇, 姚中原, 谢小军, 赵勇. 基于动态规整与Park矢量离心变化率的风电机组变流器健康状态评估[J]. 热力发电, 2023, 52 (03): 49-57.
- [3] 饶雷, 何璇, 吴沁, 倪远翔, 唐磊, 张浩. 基于改进DS证据理论的海上风电机组变桨系统健康状态评估方法[J]. 船舶工程, 2022, 44 (S2): 20-26.
- [4] 李进友, 李媛, 王海鑫, 李超然. 基于XGBoost-Bin自动功率极限计算的风电机组健康性能评估及预测[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30 (06): 2172-2185.
- [5] 尹诗, 侯国莲, 迟岩, 弓林娟, 胡晓东. 风电机组发电机前轴承健康度预测方法及实现[J]. 系统仿真学报, 2021, 33 (06): 1323-1333.
- [6] 景彤梅, 齐咏生, 刘利强, 高学金, 李永亭. 基于KECA-GRNN的风电机组齿轮箱状态监测与健康评估[J]. 太阳能学报, 2021, 42 (06): 400-408.