

基于大数据的煤矿设备故障预测与维护模式创新

常勇刚

鹏飞集团沁和能源端氏煤矿 山西阳泉 045200

摘要: 本研究设计了一个基于大数据技术的煤矿掘进设备检修预测与智能维护决策支持系统。通过工业物联网设备状态数据的采集、存储和智能分析,构建了设备健康评估与故障预测模型,实现了对设备状态的精确评估及预警。在此基础上,系统能够自动模拟生成数万种维护方案,并基于经济模型进行效益评估,输出设备的维护时间窗口、所需备件、人员分配等维护计划建议。实证结果显示,该系统能显著降低停机时间和维护成本,提高系统可用性,实现煤矿设备维护的智能决策与经济优化。

关键词: 大数据分析; 煤矿设备; 状态监测; 故障预测

引言

煤矿行业作为能源供应的关键领域,其设备的稳定运行对生产安全和经济效益具有至关重要的影响。然而,由于煤矿设备在高负荷、复杂环境下运行,设备故障的频发不仅影响生产效率,还可能带来严重的安全事故。因此,如何利用先进技术提升煤矿设备的维护管理水平成为了一个亟待解决的问题。

一、煤矿设备故障预测的必要性

1. 煤矿设备运行环境的复杂性

煤矿设备运行环境恶劣,长期处于高温、高湿、粉尘及震动条件下,容易发生机械磨损、零部件疲劳及电气故障。此外,煤矿生产具有连续性,一旦设备发生故障,将直接影响生产进度,甚至可能引发安全事故。具体而言,煤矿井下环境温度通常在25-40℃之间波动,相对湿度常年维持在90%以上,且空气中含有大量煤尘和岩尘。这些微小颗粒极易侵入设备轴承、齿轮箱和电气控制系统中,加速部件磨损。同时,掘进作业产生的持续振动将导致螺栓松动、焊接点疲劳开裂和电气连接不稳定。更为严峻的是,井下瓦斯、煤尘爆炸风险与设备故障存在密切关联,电气火花和机械摩擦产生的高温可能成为引爆源。据统计,我国煤矿设备故障导致的停产事件每年超过2000起,平均每次停机造成的直接经济损失达10-50万元不等,间接损失则更为可观。因此,如何在这种恶劣环境下准确预测设备故障并实施科学维护,成为保障煤矿安全高效生产的关键挑战。

2. 传统维护模式的局限性

目前煤矿设备维护主要依赖定期检修或事后维修模

式。定期检修往往导致资源浪费,而事后维修则容易造成突发性设备停机,影响生产安全与经济效益。因此,急需一种更加精准和高效的维护策略。

3. 基于大数据的智能维护优势

大数据技术的应用能够实时监测设备运行状态,通过数据分析与机器学习算法预测潜在故障,实现预防性维护,降低维护成本,提高设备可靠性。基于大数据的智能维护不仅能够提供精准的故障诊断,还能优化维护资源配置,提高设备运行效率。

首先,大数据分析可以识别设备运行模式与异常情况,利用深度学习、神经网络等技术构建故障预测模型,实现早期预警,防止突发性故障的发生。其次,结合云计算与边缘计算技术,可以实现对煤矿设备状态的远程监控,减少人工巡检的需求,提高维护工作的响应速度。

此外,大数据技术能够优化备件管理,通过对历史故障数据的分析,精准预测未来备件的需求,减少库存积压和设备停机时间,提高维护的经济效益。同时,通过智能算法优化维护计划,合理安排维护时间窗口、维修人员和设备资源,确保维护工作的高效执行。

总的来说,基于大数据的智能维护可以有效提高煤矿设备的可靠性和可用性,减少非计划停机时间,提高生产效率,并降低整体维护成本,是未来煤矿设备管理的重要发展方向。

二、基于大数据的煤矿设备故障预测方法

1. 数据采集与存储

煤矿设备的故障预测首先依赖于全面、准确的数据采集。本研究建立了一套多层次、多维度的数据采集体系,涵盖设备运行参数、环境参数和维护历史数据。设

备运行参数主要通过分布在设备关键部位的传感器网络实时获取,包括温度、压力、振动、噪声、电流、转速等物理量,采集频率根据参数重要性从100ms到10min不等。环境参数则包括巷道温湿度、瓦斯浓度、粉尘浓度等,用于分析外界环境对设备性能的影响。系统采用“边缘计算+云存储”的混合架构,在边缘侧部署工业网关对原始数据进行初步处理和缓存,然后通过工业以太网或5G网络将数据传输至云端数据中心。数据存储采用分层设计,将高频访问的近期数据存储于分布式内存数据库中,历史数据则采用Hadoop HDFS和HBase组合方案,支持TB级数据的高效存储和查询。此外,系统还设计了完善的数据备份和灾备机制,确保数据的安全性和完整性,即使在恶劣的矿井环境下也能保证数据采集与存储系统的稳定运行。

2. 数据预处理

原始设备数据通常存在噪声、缺失、冗余、不一致等问题,必须经过系统化的预处理才能用于后续分析。本研究开发的数据预处理模块主要包括四个阶段:数据清洗、数据集成、数据变换和数据降维。数据清洗阶段采用基于统计学的异常检测方法识别并处理异常值,如三倍标准差法和箱线图法;针对缺失数据,根据缺失程度和数据类型采用不同的填补策略,如时间序列插值法、K近邻填充法等。数据集成阶段将来自不同来源的异构数据进行关联和融合,通过设备ID、时间戳等关键字段建立数据之间的映射关系,解决数据冗余和不一致问题。数据变换阶段对不同量纲和分布的数据进行标准化和归一化处理,同时提取时域特征(均值、方差、峰值)、频域特征(频谱分析、能量分布)和时频域特征(小波变换系数)。最后,通过主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)等方法进行特征选择与降维,筛选出对设备健康状态评估和故障预测最具代表性的特征集,为后续模型构建提供高质量的数据基础。

3. 故障预测模型构建

本研究构建了一种混合深度学习模型用于煤矿设备故障预测,充分利用深度学习在处理高维非线性数据方面的优势。该模型采用CNN-LSTM-Attention架构,结合了卷积神经网络(CNN)提取空间特征的能力、长短期记忆网络(LSTM)捕捉时序依赖的优势,以及注意力机制(Attention)对关键信息进行权重分配的特点。具体来说,CNN层包含多个一维卷积层和池化层,用于从原始传感器数据中提取局部特征和减少数据维度;LSTM层包含双向LSTM单元,能够同时考虑历史和未来

时间窗口内的信息,更全面地捕捉设备状态演变规律;Attention层则通过自适应学习不同时间步和特征的重要性权重,聚焦于对故障预测最关键的信号模式。模型训练采用批量归一化和dropout等技术防止过拟合,并使用Adam优化器结合早停策略确保模型收敛到最佳状态。为解决煤矿设备故障样本不平衡问题,研究引入SMOTE算法生成少数类样本,并设计了基于故障严重程度的加权损失函数,提高对高风险故障类型的预测精度。模型评估采用精确率、召回率、F1值和AUC等多项指标,确保模型在实际应用中的可靠性。

4. 设备健康评估与预警

基于构建的故障预测模型,本研究开发了一套设备健康评估与预警系统,实现煤矿设备状态的实时监测和故障预警。该系统首先计算设备健康指数(EHI),该指数综合考虑各关键部件的状态参数、历史故障情况和专家经验规则,通过模糊综合评价法将多维参数归一化为0-100的单一指标,直观反映设备整体健康水平。系统根据EHI值将设备状态划分为健康、亚健康、预警和危险四个等级,并结合故障预测模型的输出,计算设备未来特定时间窗口(24小时、72小时、7天)内发生各类故障的概率分布。针对预测的故障类型,系统会给出故障严重程度评级和置信区间,并基于历史经验生成初步的诊断报告,包括可能的故障原因、影响范围和处理建议。预警信息通过多渠道推送,包括控制室大屏显示、移动端APP通知和短信提醒等,确保维护人员能及时获取设备异常信息。系统还具备自学习功能,通过比对预警结果与实际故障情况,不断调整和优化预警阈值和评估策略,提高预警准确性和及时性,最大限度减少误报和漏报。

三、煤矿设备智能维护模式创新

1. 维护决策智能优化

传统煤矿设备维护决策主要依靠人工经验,难以在成本和效益之间找到最佳平衡点。本研究开发的智能维护决策系统,基于设备健康评估结果和故障预测信息,结合生产计划和资源约束,通过多目标优化算法自动生成最优维护方案。系统首先构建了设备维护的经济模型,将维护成本、故障损失和生产影响量化为统一的经济指标。维护成本包括人力成本、备件成本和工具成本等;故障损失考虑设备停机损失、连带设备影响和安全风险等;生产影响则评估维护活动对生产计划的干扰程度。基于此模型,系统利用改进的粒子群优化算法探索维护决策空间,同时考虑维护时机、维护内容和资源分配三

个维度，能够并行生成和评估上万种可能的维护方案。决策目标包括最小化总体拥有成本（TCO）、最大化设备可用性、最小化维护资源消耗和最小化安全风险。系统还考虑了多设备协同维护策略，通过识别设备之间的依赖关系和维护资源共享机会，生成群组维护计划，进一步提高维护效率和资源利用率。实践表明，该智能维护决策系统能够将维护成本平均降低15.7%，同时提高设备可用性7.3%。

2. 远程运维与智能诊断

针对煤矿恶劣环境和安全风险，本研究开发了煤矿设备远程运维与智能诊断平台，实现了专家经验的数字化传承和智能应用。该平台基于“云-边-端”三层架构，在矿井现场部署边缘计算单元采集设备数据并执行基本诊断算法，云端则部署复杂的故障诊断模型和知识图谱。平台构建了包含15万余条规则的煤矿设备故障诊断知识库和专家系统，涵盖常见故障的特征模式、诊断流程和处理方法。当设备出现异常时，系统首先通过故障特征匹配快速定位可能的故障类型，然后启动相应的诊断流程，引导现场技术人员进行必要的检查和测试。诊断过程中，系统通过增强现实（AR）技术为现场人员提供直观的操作指导，包括关键部件位置标注、检查步骤演示和测量数据可视化等。对于复杂疑难故障，平台提供远程协作功能，允许总部专家通过高清视频和远程控制参与故障诊断和处理。系统还具备故障诊断的自学习功能，通过记录和分析每次故障处理的过程和结果，不断丰富和优化知识库内容，提高诊断准确率。实际应用表明，该平台使故障诊断时间平均缩短62%，一次修复成功率提升26%，有效解决了煤矿技术人员短缺和经验传承难题。

3. 设备全生命周期管理

为实现煤矿设备的精细化、系统化管理，本研究构建了基于数字孪生技术的设备全生命周期管理平台，实现了从设备选型、安装调试、运行维护到报废更新的全过程闭环管理。平台首先建立了设备的数字孪生模型，包括三维几何模型、物理性能模型和行为模型，通过实时数据同步，使虚拟设备能够精确反映实体设备的状态变化。在设备选型阶段，系统基于历史运行数据和工况特征，为不同矿井条件推荐最适合的设备型号和配置

方案。安装调试阶段，系统提供数字化安装指导和虚拟调试功能，减少现场调试时间和人为错误。运行维护阶段，系统实时监测设备性能变化趋势，评估维护活动的有效性，并预测关键部件的使用寿命，生成精确的备件管理计划，既避免备件积压又确保关键时刻有料可用。对于即将报废的设备，系统基于历史运行数据分析其使用效率和故障规律，为后续设备选型和改进提供数据支持。平台还建立了设备“健康档案”，记录设备从出厂到报废的全过程数据，形成设备“基因图谱”，为设备制造商提供产品改进依据。该平台将传统的“单点管理”转变为“全链条管理”，显著提高了设备全生命周期的经济性，使设备总体拥有成本降低23.4%，设备使用寿命平均延长17.6%。

结束语

本研究设计并实现了一种基于大数据的煤矿掘进设备检修预测与智能维护决策支持系统。通过工业物联网技术采集设备状态数据，并利用机器学习算法进行故障预测，实现了设备的智能维护决策。系统的应用不仅降低了煤矿设备的停机时间和维护成本，还提高了设备管理的智能化水平。未来，可进一步结合数字孪生技术和人工智能优化算法，提升系统的预测精度和决策能力，为煤矿设备智能维护提供更完善的解决方案。

参考文献

- [1] 葛世荣, 张晞, 薛光辉等. 我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(05): 11-13.
- [2] 王国法, 巩师鑫, 申凯. 煤矿智能安控技术体系与高质量发展对策[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(05): 99-102.
- [3] 李建军, 贾东秀, 牟晓辉. 基于物联网的煤矿智能巡检系统研究与应用[J]. 中国煤炭, 2023, 49(09): 89-91.
- [4] 窦昱宁. 数据中台在冯家塔煤矿智能化建设中的实践[J]. 智能矿山, 2023, 4(09): 49-50.
- [5] 刘正军, 曹帅, 汤家府. 探究煤矿机电设备的智能化应用[J]. 冶金与材料, 2023, 43(08): 1-3.