

# 煤矿机电系统智能化监测与故障诊断技术的研发与实践

刘永强

国能亿利能源有限公司黄玉川煤矿 内蒙古 鄂尔多斯 017000

**摘要：**煤矿是我国能源体系基石，其安全生产与高效运营关乎国家能源安全和社会稳定。煤矿机电系统是矿井生产核心支撑，运行状态影响矿井安全、效率与效益。但传统人工巡检和事后维修模式，难以应对复杂井下环境和更高安全要求。在此背景下，研发实践智能化监测与故障诊断技术，是推动煤矿行业转型升级的关键。本文阐述该技术内涵与核心价值，构建涵盖感知、网络、平台、应用层的四层技术架构体系，重点探讨多源异构数据融合等关键技术研发方向，还提出从顶层设计到生态协同的系统性实践路径，为煤矿企业实现机电系统智能化运维提供理论与实操参考。

**关键词：**煤矿；机电系统；智能化监测；故障诊断；数字孪生；深度学习

## 引言

煤炭是我国能源安全“压舱石”，“双碳”目标下，煤炭行业转向高质量发展，煤矿智能化建设成国家战略。机电系统作为矿井关键，其智能化水平决定智慧矿山成色。长期以来，煤矿机电设备运维依赖定期检修和事后抢修，这种被动模式弊端明显：人工巡检受井下环境限制，难精准感知设备状态，易遗漏故障征兆；故障后应急处理致非计划停机，经济损失大且可能引发重大安全事故。据统计，机电设备故障引发的煤矿事故占比高，凸显传统模式脆弱。新兴信息技术为破题提供机遇，构建智能化监测网络可实现设备健康评估、故障预警等。研究煤矿机电系统智能化监测与故障诊断技术，对提升安全水平、保障能源供应等意义重大，本文将就此深入探讨。

## 1 煤矿机电系统智能化监测与故障诊断的内涵与核心价值

煤矿机电系统智能化监测与故障诊断，是指综合利用现代传感技术、信息通信技术、数据处理技术和人工智能技术，对煤矿井上井下各类机电设备的运行状态进行全方位、全天候、全要素的在线感知、数据汇聚、智能分析与决策支持，最终实现设备故障的自动识别、精确定位、原因追溯和维修策略优化的一整套技术体系与解决方案。其核心价值主要体现在以下三个维度：

### 1.1 安全维度：构筑本质安全防线

通过高精度传感器（如振动、温度、声发射、油液、电流谐波等）对关键设备进行7×24小时不间断监测，能够捕捉到人耳无法分辨、肉眼无法察觉的微弱异常信号。基于这些信号构建的智能诊断模型，可以在故障萌芽阶段发出预警，为运维人员争取宝贵的处置时间窗口，有效避免小隐患演变为大事故<sup>[1]</sup>。例如，对主通风

机轴承的早期磨损或不平衡进行预警，可防止因风机停转导致的瓦斯超限风险。

### 1.2 效率维度：驱动精益化运营

智能化监测与诊断技术打破了传统固定周期的检修模式，实现了基于设备实际健康状况的“按需维修”（Condition-Based Maintenance, CBM）和“预测性维护”（Predictive Maintenance, PdM）。这不仅能显著减少不必要的预防性维护工作量，降低运维成本，更能最大限度地延长设备正常运行时间，提高设备综合效率（OEE），从而提升整个矿井的生产效能。

### 1.3 决策维度：赋能科学化管理

通过对历史故障数据、维修记录、备件消耗等信息的深度挖掘，可以揭示设备故障的内在规律和关联因素，为设备选型、采购、更新改造以及备件库存管理提供数据支撑。同时，形成的设备健康画像和知识图谱，能够辅助管理者进行更科学、更前瞻性的资产全生命周期管理决策。

## 2 智能化监测与故障诊断技术体系架构

本文提出一个由感知层、网络层、平台层和应用层构成的四层架构模型。

### 2.1 感知层：构建全域泛在的智能感知网络

这是整个体系的基础。需要部署高可靠、高精度、多参数的智能传感器，形成对关键机电设备“声、振、温、电、磁、油”等多物理场信息的全面感知。为了夯实这一基础，必须大力研发适用于井下特殊环境的新型本安型或隔爆型智能传感器，例如光纤光栅传感器和MEMS传感器，以克服传统传感器在恶劣工况下的局限性。同时，应在靠近数据源头的设备端部署具备初步数据清洗、特征提取和简单判断能力的边缘智能节点，通过“端边协同”的模式，不仅能在本地完成部分计算任

务,减轻云端负担,还能显著提升对突发异常的响应速度,确保感知网络的实时性和有效性。

### 2.2 网络层:打造高速可靠的井下信息高速公路

该层负责将感知层采集的海量数据安全、高效地传输至数据中心。随着5G+UWB(超宽带)等新一代通信技术在井下的成功应用,为构建高带宽、低时延、高可靠的无线通信网络提供了坚实的技术支撑。然而,要真正实现“信息高速公路”的畅通无阻,还需着力解决多网融合的难题,即将有线与无线网络、工业控制网、视频监控网和安全监控网等进行有机整合,形成一张统一、高效的通信网络<sup>[2]</sup>。此外,必须高度重视网络安全防护和QoS(服务质量)保障机制的建设,确保关键监测数据在传输过程中的完整性、保密性和可用性,为上层应用提供稳定可靠的数据流。

### 2.3 平台层:建立统一的数据湖与智能引擎

这是整个体系的核心大脑,承载着数据治理与智能分析的重任。平台层首先需要构建一个统一的数据湖,其核心任务是打破各业务系统间的数据壁垒,将来自不同源头、不同格式的多源异构数据——无论是结构化的设备参数、半结构化的日志文件,还是非结构化的音视频流——进行标准化接入、集中存储和精细化治理,最终沉淀为高质量、可复用的“数据资产”。在此基础上,平台层还需集成一个强大的AI智能引擎,该引擎应提供丰富的机器学习、深度学习和知识图谱等算法工具库,支持从故障诊断、预测性维护到根因分析等多种智能模型的全生命周期管理,包括开发、训练、部署和持续迭代优化,从而为上层应用提供源源不断的智能动力。

### 2.4 应用层:面向场景的智能服务与决策支持

应用层是技术价值的最终体现,它基于平台层提供的强大能力,开发出一系列直接服务于一线生产和管理人员的智能应用。这些应用紧密围绕具体业务场景,旨在将复杂的算法和数据转化为直观、可操作的洞察。典型的应用包括设备健康状态可视化看板,它能实时、全景地展示全矿关键设备的健康指数、运行状态和预警信息;智能故障诊断与报警系统,能够自动识别故障类型、精确定位故障部位,并推送针对性的维修建议;预测性维护工单系统,则根据设备剩余寿命的科学预测结果,自动生成最优的维修计划和备件需求清单,实现维修资源的精准调度。此外,AR/VR辅助维修等创新应用,利用增强现实技术为现场维修人员提供远程专家指导和三维可视化操作指引,极大地提升了维修效率和准确性。

## 3 关键技术的研发方向

### 3.1 多源异构数据融合与特征工程

单一传感器的信息往往是片面的,难以全面反映设备的真实健康状态。通过融合振动、电流、声音、温度等多种信号,可以从不同物理角度交叉验证设备状态,从而大幅提升诊断的准确性与鲁棒性。为此,研发工作需聚焦于解决跨模态数据对齐与同步的技术难题,确保不同采样频率、不同时间戳的数据能够被有效整合。在此基础上,应深入探索深度特征提取方法,利用小波包变换、经验模态分解以及时频分析等先进信号处理技术,从原始、嘈杂的信号中提炼出更具判别性和稳定性的故障特征<sup>[3]</sup>。针对故障样本稀缺这一行业痛点,迁移学习与数据增强技术显得尤为重要。可以通过生成对抗网络合成逼真的故障数据来扩充训练集,或者巧妙地利用在实验室或其他矿井等源域学到的知识,迁移到目标矿井,有效缓解小样本困境,提升模型在新场景下的适应能力。

### 3.2 深度学习驱动的智能诊断模型

深度学习,特别是卷积神经网络、循环神经网络和Transformer等模型,在处理高维、非线性、时序性强的设备监测数据方面展现出巨大优势,正在成为智能诊断领域的主流技术。一维卷积神经网络能够自动学习振动信号中的局部故障特征模式,无需依赖繁琐的手工特征工程。长短期记忆网络或门控循环单元则擅长捕捉设备状态随时间演变的动态特性,特别适用于对设备劣化趋势进行预测。更进一步,图神经网络为系统级诊断开辟了新路径,它将复杂的机电系统抽象为图结构,其中节点代表设备,边代表连接关系,通过学习设备间的故障传播规律,能够实现从单一部件故障到整个系统级故障的精准溯源,这对于保障大型复杂机电系统的整体可靠性至关重要。

### 3.3 数字孪生赋能的预测性维护

数字孪生技术通过在虚拟空间构建物理设备的高保真动态映射,为预测性维护提供了强大的仿真与推演能力,标志着运维模式从“治已病”向“治未病”的深刻转变。其实现依赖于高保真建模,即综合运用设备的CAD几何模型、物理机理方程以及实时运行数据,构建一个能够精确反映其真实行为的数字孪生体。在此基础上,通过建立虚实交互与闭环优化机制,物理设备的实时数据持续驱动数字孪生体的动态更新,而数字孪生体则可以模拟设备在未来不同工况下的响应,科学预测其剩余寿命和潜在风险,并将优化后的控制指令或维护策略反馈给物理世界,从而形成一个“感知-分析-决策-执行”的完整闭环。例如,运维人员可以在孪生体上模

拟不同润滑方案或负载策略对关键轴承寿命的影响，从而在物理世界实施前就选出最优方案，实现真正的预见性、主动性维护。

#### 4 系统化的实践路径

技术研发只是第一步，如何将其成功应用于千差万别的煤矿现场，需要一套系统化的实践路径。

##### 4.1 顶层设计与战略规划先行

煤矿企业应将机电系统智能化纳入智慧矿山建设的整体蓝图之中，避免陷入零敲碎打的碎片化建设陷阱。必须明确短期、中期、长期的战略目标，制定详细的技术路线图和分阶段的投资计划，确保各项建设工作有章可循、有序推进，从而保障智能化转型的系统性和可持续性。

##### 4.2 构建统一标准与开放生态

行业主管部门和龙头企业应积极牵头，共同制定统一的数据接口、通信协议、模型评价等标准规范，从根本上打破不同厂商之间的技术壁垒。同时，鼓励采用微服务、容器化等云原生架构来构建技术平台，以打造一个开放、可扩展、易于集成的生态系统，吸引更多的开发者、科技公司和合作伙伴共同参与，丰富应用服务，加速技术迭代。

##### 4.3 分步实施，试点示范引领

在具体推进过程中，应遵循“先易后难、重点突破”的务实原则。优先选择那些对安全生产影响最大、且数据基础相对较好的关键设备，如主通风机、主排水泵等，进行智能化改造的试点示范<sup>[4]</sup>。通过小范围的成功实践，不仅可以充分验证技术的可行性与经济性，还能在实战中积累宝贵的经验、培养复合型人才队伍，并以此为标杆，逐步向全矿其他系统和设备推广应用，降低整体转型风险。

##### 4.4 强化“产学研用”深度融合

智能化转型是一项复杂的系统工程，单靠任何一方都难以独立完成。煤矿企业、高校、科研院所和科技公司必须建立起紧密的协同创新机制。高校和院所应聚焦于前沿基础理论和共性关键技术的研究，科技公司则专注于将科研成果进行产品化和工程化落地，而煤矿企业作为最终用户，不仅要提供真实的测试场景、宝贵的运行数据，更要及时反馈一线的实际需求和痛点。只有通

过这种深度融合，才能形成从理论创新到产业应用的完整闭环，确保技术研发始终与产业需求同频共振<sup>[5]</sup>。

#### 4.5 注重人才培养与组织变革

智能化转型不仅是技术的升级，更是人的升级和组织的重塑。企业必须双管齐下：一方面，要加强对现有运维人员的系统性技能培训，帮助他们掌握新工具、新方法，顺利实现角色转型；另一方面，要积极引入数据科学家、算法工程师等新型数字化人才，为智能化建设注入新鲜血液。更重要的是，必须同步推动组织管理模式的深刻变革，建立与智能化运维相匹配的绩效考核、激励机制和 workflows，破除阻碍创新的制度藩篱，为智能化技术的深度应用营造良好的组织文化氛围。

#### 5 结语

煤矿机电系统智能化监测与故障诊断技术的研发与实践，是涵盖技术、管理等多方面的系统性变革。这既是应对煤矿安全生产挑战的迫切需求，也是煤炭工业高质量发展的必由选择。当下，该领域面临数据获取、模型泛化等难题，需坚持系统思维，以构建“感知-网络-平台-应用”一体化架构为基础，以多源数据融合等关键技术为突破，通过顶层设计等系统性路径推进。未来，煤矿机电运维将实现人、机、物、数在智能算法驱动下的和谐共生。持续创新探索下，更安全、高效、智能的煤炭工业新图景正逐步呈现，这不仅会重塑煤炭行业，还将为全球矿业智能化转型提供中国智慧与方案。

#### 参考文献

- [1]张阳,李超,符立梅,等.基于物联网技术的煤矿机电设备运行状态智能监测系统研究与应用[J].中国煤炭,2025,51(07):164-169.
- [2]白恩强,宁建平,吝腾.煤矿机电设备智能监测系统在安全生产中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2025,(08):160-162.
- [3]陈云龙,仇凯,颜雷.煤矿机电设备智能监测与远程管理系统[J].内蒙古煤炭经济,2024,(05):16-18.
- [4]苗壮,王龙,徐彦兵.基于物联网的煤矿机电设备状态监测与智能维护系统[C]//广西网络安全和信息化联合会.第二届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集.陕煤集团神木柠条塔矿业有限公司,;2024:158-160.
- [5]王博沙,人工智能技术在煤矿机电设备中的应用研究[J].产业科技创新,2024(02):52-55.