

# 悬臂式掘进机健康状态监测技术发展现状分析

申国建 庞宇

经过改革开放40余年的发展，我国井工煤矿采掘、支护、运输与提升等技术从依赖国外设备，到参考国外技术设备进行学习，发展到如今的国产煤机设备自主核心技术研发应用，我国井工煤矿开采设备技术实现了从无到有、从弱到强的飞跃式发展，实现了从普通机械化、综合机械化、半自动化到自动化的飞跃，并开始探索向智能化转变的道路。为了加快煤矿智能化技术发展，全面提升我国煤矿智能化水平，2020年2月，国家八部委联合印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》，明确提出煤炭工业未来要将发展重心放到智能化上，将智能化作为行业发展的核心推动力，提升煤矿智能化水平，结合我国当前煤矿智能化发展现状及智慧煤矿发展要求，矿井设备群的系统健康状态预测和维护决策是智慧煤矿建设的重要研究方向。

部分断面悬臂式掘进机主要用于煤矿采掘，是以掘进炮头旋转的机械方式截割煤岩的掘进设备，分为纵轴式掘进机（图1）和横轴式掘进机

（图2）。掘进机截割头在截割煤岩时处于重载状态，且因煤岩硬度不均而存在负载突变的工况，对传动系统产生极大冲击，造成传动结构件损坏和使用寿命低等问题。对掘进机运行状态进行监测，并在故障前期进行监测、诊断可有效提高掘进机可靠性，降低故障率，减少设备维修甚至大修带来的维护成本和停工损失。我国矿山机械设备未来发展鼓励掘进、锚护、运输等设备具备完善的单机状态监测和故障自诊断功能，鼓励有条件的煤矿建设掘进工作面综合监测系统，实现各设备状态的实时监测。因此，对掘进机生命周期进行故障监测、诊断、预测和维护是掘进机智能化研究的关键研究方向。

## 悬臂式掘进机 PHM 技术

近年来，故障预测与健康管理技术（Prognostics and health-management, PHM）、融合传感器技术、大数据分析和挖掘技术，以及特征提取算法（FFT、Hilbert-Huang变换、小波变换



图1 纵轴式掘进机



图2 横轴式掘进机

等)和智能诊断算法模型(专家系统、模糊逻辑等)得到快速发展,为保证生产安全,提高设备可靠性,军事、航空航天、船舶、矿用机械等领域均开始重视PHM技术。

掘进机健康状态监测技术主要是对掘进机截割传动系统、供电系统、液压驱动系统和润滑冷却系统运行状态进行监测、预测和管理。掘进机健康状态监测系统构架如图3所示。

### 状态综合监测及管理

利用多传感器融合技术,通过对电流、电压、速度、压力、振动、温度和油液品质等能够反映掘进机状态信息的数据进行监测,可对掘进机运行状态进行全面了解,运用FFT、主分量分析、信息熵等手段对采集到的信号进行信息融合和故障特征提取,在机载端显示设备当前运行的特征信息并为故障诊断和寿命预测等后续工作提供数据。井下操作端可显示各传感器当前运行状态,可选择几种状态信息同屏显示,对掘进机某一系统或部件从多维度进行状态信息读取。机械、电气和液压系统通过机载端对相关采集信号的分析进行实时监控和状态判别,可实时直观地显示当前状态等级:健康、

一般、微弱故障、严重故障,为井下作业人员提供操作和简易维护指导。

### 故障诊断及预警

依靠状态监测、故障诊断算法对采集的信号特征信息进行分析,进而对掘进机运行状态参数进行监控、分析诊断,进行主动故障预警。通过对传感器采集的特征数据进行融合处理,采用机器学习多种故障诊断方法对设备故障类型、故障位置和严重程度进行识别,并结合分析给出的报警阈值及信息进行分级报警。PHM系统可以在设备发生超负荷运行和存在关键结构故障时发出报警,显示故障信息并通过控制回路对掘进机进行主动停机保护。在井下实现离线故障检测、故障诊断、故障预警和简单辅助决策等功能,可以避免早期故障的进一步扩展而造成的重大损失。

### 趋势预测和寿命评估

利用实时数据和历史数据库建立动态预测模型,进行设备各系统和重要构件寿命的预测评估,可分时段对监测对象采集的状态信息进行查询,对

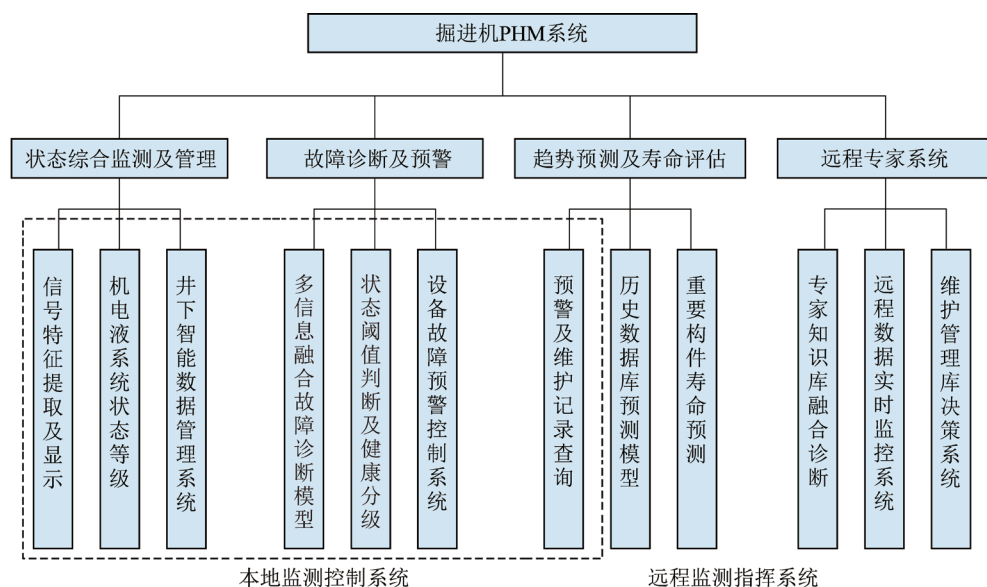


图3 掘进机PHM系统构架

缓变信号（如油温、油液品质、液压压力等）历史数据提供按时段查询并以曲线形式展示，以表格形式列出查询时段的所有报警记录时间，并给出具体数值信息，便于对设备故障演变过程进行回溯分析。寿命评估属于远程诊断、控制系统功能，可在远程控制中心专家端显示设备预计使用时长，并指导维护保障决策计划。

### 远程专家系统

远程专家系统主要任务是接收来自车载端的实时状态监测数据并存储、历史数据查阅和趋势分析、深度故障诊断、健康状态和使用寿命评估。远程专家系统需解决井下网络问题和数据模型问题，在大数据库信息和预测模型的基础上加上专家的专业分析，从而给出较为详细的设备运行状态分析及更为准确的维修决策报告。

## 悬臂式掘进机状态监测技术研究现状

### 常见故障形式及传感器安装

获取准确的状态信息是故障诊断率提高、故障源准确定位的保障。掘进机悬臂结构在掘进时截割部出现高频、大幅振动现象，且截割对象为半煤岩和全岩巷道，截割力大、负载变化大，掘进作业时存在空顶落矸、粉尘量较大、噪声大等恶劣环境。目前常见的掘进机故障类型见表1。

数据采集是掘进机智能化状态监测和故障诊断功能实现的基础环节和保障。采集信号的数据种类及数量决定了信号对掘进机整机运行工况表达的准确程度，理论上监测数据类型越多、数据库越大，对整机设备状态的监测程度越高，故障的诊断率越高。目前常见的掘进机制造厂家对设备状态的监测数据类型一般是采集电流、电压、速度、油缸压力等常规监测数据类型，可以掌握设备各主要系统状态信息，但无法对设备故障情况进行分析。

相比于普通掘进机电控箱监测对象，掘进机

健康状态监测系统增加了振动、油液温度、油液品质、噪声等类型传感器，对工作状态参数较多的掘进机采集到了更多维的状态信息，掘进机传感器的安装不仅要保证可以准确读取监测对象的监测数据（如振动传感器要遵守最小传递路径原则），同时还要考虑掘进机所处的恶劣工作环境。因此在掘进机设计之初就应考虑为传感器（包括采集分析仪等整套系统的安装）预留位置和接口，如在现有的掘进机上安装传感器，必须同时考虑系统的监测准确度和防护。

### 掘进机健康状态监测

故障预测与健康管理工作可分为故障预测和健康管理工作2部分。故障预测就是对当前运行构件或系统进行诊断，通过监测数据对其正常工作的时间长度和预测故障类型作出准确描述；健康管理是根据传感器采集到的信号对设备进行故障诊断，结合历史数据库和所设置的正常使用条件对设备当前运行状态进行准确判断和故障预警，并在出现故障时给出维修决策。目前，PHM技术已广泛应用于航空航天、军事和远洋船舶等领域，处于关键技术研究阶段，尚未形成高效可靠的系统。

当前掘进机运行状态监测和健康管理系统缺乏有效方法与平台支持，以掘进机健康管理为研究对象，使掘进机运行状态评估与健康管理工作系统化和规范化是当前的研究重点。目前主流的掘进机状态监测方案见表2。

目前针对掘进机机械、电气和液压系统故障诊断技术的研究包括：自适应防卡链监控系统，实现岩巷掘进时刮板输送机转速和转矩随负载变化自适应调整，提高过载能力，解决岩石物料运输卡链问题；硬岩掘进机状态参数监测系统，结合专家系统，实现对硬岩掘进机运行过程中的故障诊断和健康管理工作进行辅助指导，减少非计划停机；从轴温、液位角度对掘进机截割臂轴承润滑油状态进行监测和预警；利用掘进机悬臂振动信号、升降油缸和回转油缸压力信号、截割机电流信号多源数据

表1 掘进机常见故障类型

故障类型	故障表现	可能故障原因
掘进机履带板断裂	掘进机行走中路面激励大	履带板磨损未更换
回转油缸漏油	油缸漏油	油缸受力过大
悬臂伸缩油缸漏油	油缸漏油	油缸受力过大
部分销轴孔变形	整机振动异常	截割载荷过大
截割头固定螺栓断裂	截割头松动，振动加剧	截割载荷大、煤岩磨损
截割炮头浮封磨穿	截割头漏油，减速机油泥多	煤岩卡入磨损
截割电机与连接筒螺栓断裂	螺栓断裂	截割载荷大，悬臂受力
液压油管破损	液压系统压力不稳定	油管磨损
截割减速机轴承故障	悬臂端异常振动	轴承润滑失效、截割载荷大

表2 掘进机状态监测方案

方案	原理	特点
传感器与机载数据处理器组合	被测量转换成电信号，传输到机载数据处理器进行采集、分析、存储及显示	有通信接口，可远程传输，便于现场处理故障，成本低
以工控机为核心	工控机与检测、控制单元之间以工业总线方式连接，形成网络结构	以全数字方式进行信息传递，准确性高
基于 CAN 总线分布式结构	以嵌入式工控机为控制核心，以单片机为各监测点控制器	接线量少，结构简单，监测功能齐全
CAN 总线与以太网组合	地面监测站与井下巷道监测站通过以太网连接，机身检测系统与巷道监测站通过 CAN 总线通信	可实现工作状态可视化
传感器与煤矿安全监控系统组合	被测量转换成电信号，以统一频率传输至煤矿安全监控系统	实施方便，但掘进机司机无法了解实时工况数据

融合的方法对掘进机运行状态进行监测；运用构建自动巡检和故障分析逻辑，通过温度、电流和电压监测，识别掘进机驱动电机故障，通过脉冲信号监测识别传感器故障，通过CAN通信状态分析仪实现对通信系统运行状态的实时监测；故障诊断与预测算法主要采用人工神经网络、机器学习及深度学习等智能算法，如基于优化BP神经网络的掘进机截割臂故障诊断方法，通过GA优化，在有限的状态参数情况下，对截割臂的故障进行快速判断；针对掘进机减速器故障复杂等不足，以实际数据为样本，运用一种基于反向传播(BP)神经网络的减速器故障智能检测方法，并利用遗传算法(GA)来优化BP神经网络的初始权值、阈值，解决网络收敛速度慢和易陷入局部极值的不足，建立了基于GA-BP网络的故障检测模型。掘进机运行工况复杂，悬臂端截割减速机的故障诊断技术的应用主要技术难点是振动信号的诊断。为提高故障诊断速度和精度，组合式故障诊断算法研究能够更好地对振

动信号进行故障诊断见表3。

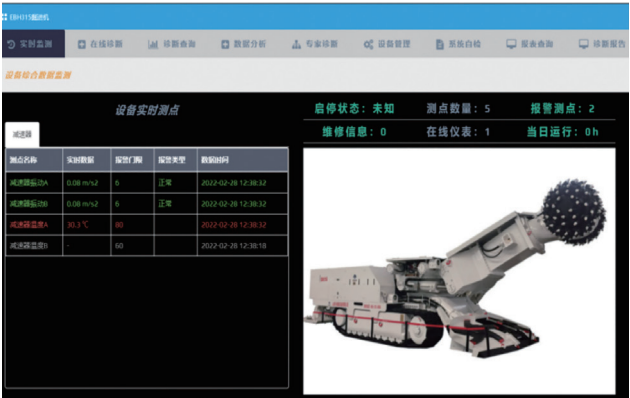
人机交互和远程监控

随着近年来智能化矿山建设的加快，当前综采工作面的智能化水平有了一定的发展和成效，但综掘工作面相较于综采工作面的工作环境更为恶劣，大部分矿井的井下工业环网在综掘工作面尚未覆盖。随着信息传输技术的发展，尤其是5G技术的出现和发展，未来井下掘进机健康状态监测系统技术会朝着集成化、网络化方向发展。井下机载端采集到的状态信号可以实时上传到远程监控中心，并实时接收远程控制中心发送的维护决策信息以及设备关键构件的状态信息和预期寿命信息。掘进机健康状态监测如图4所示。

这方面研究工作重点在远程监测技术，掘进机健康状态监测系统构架如图5所示。大数据和物联网技术是智能化健康管理方式的发展趋势。目

表3 典型的组合式故障诊断方法

组合方法	原理及特点	适用场合
模糊理论与神经网络	采用模糊理论对数据进行处理后输入神经网络进行故障信息识别，具有模糊理论简单、有效的非线性控制性能，以及神经网络的学习和适应能力	截割臂、截割头、齿轮箱故障识别与诊断，可用于煤炭识别系统
粒子群算法与随机森林	采用粒子群算法加权优化随机森林参数（如剪枝阈值、决策树数量等），可快速筛选出最优解	掘进机电器系统故障识别与诊断
专家系统与神经网络	神经网络与专家系统解释机制相互支撑，知识获取模块通过对新实例的学习自动更新权值分布	掘进机液压系统故障识别与诊断
主成分分析与支持向量机	通过主成分分析降低数据维度，通过支持向量机提高诊断精度	掘进机截割系统、液压缸故障识别与诊断



(a) 本地监测



(b) 地面集控中心

图4 掘进机健康状态监测

前，车载端健康状态监测系统处于离线监测阶段，可以完成状态信息获取、数据转换、实时数据存储、数据预处理、简单特征提取、阈值判断与故障预警、简单故障状态信息显示等功能。地面远程监控系统的主要功能是完成状态监测数据存储、历史数据显示和趋势分析、深度融合故障诊断、故障和寿命预测、健康状态评估模型和维护决策方法，研究热点包括基于数字孪生、MCU为核心技术等的煤矿井下智能掘进机器人监控技术。目前部分煤矿井下关键数据主要采用无线+有线的组合方式实现数据的远程传输，其中无线传输采用4G、5G、WiFi 6 等通信技术，可实现井下集控中心和地面集控中心远程延时时间 $\leq 300\text{ ms}$ ，有线传输采用千兆网络以上。

悬臂式掘进机健康状态监测系统关键技术

(1) 掘进机复杂工况下振动信号提取技术

掘进机激励源复杂，掘进作业时截割部负载振动、截割电机振动能量大，落矸冲击等原因造成掘进机截割减速机振动信号获取困难，采集到的振动信号有效信息少。应研究截割减速机加速度传感器布置优化方法和微弱故障特征提取方法，优化信号处理方法和故障诊断算法，深入探究截割减速机传动结构振动机理特性。

(2) 掘进机嵌入式传感器安装方式和多传感器信息融合技术

井下空间有限，掘进机机身结构紧凑，不利于传感器的安装、防护和数据传输。嵌入式安装方式可以有效保证传感器更靠近掘进系统关键部件，减少传递路径上信号失真。多传感器信息融合技术通过融合设备的多种状态信息，能更好地对设备运行状态进行诊断分析，为设备寿命预测提供更多分析数据。

(3) 掘进机数据信息传输交互方法研究

主要包括机-机接口和人-机接口，机-机接口

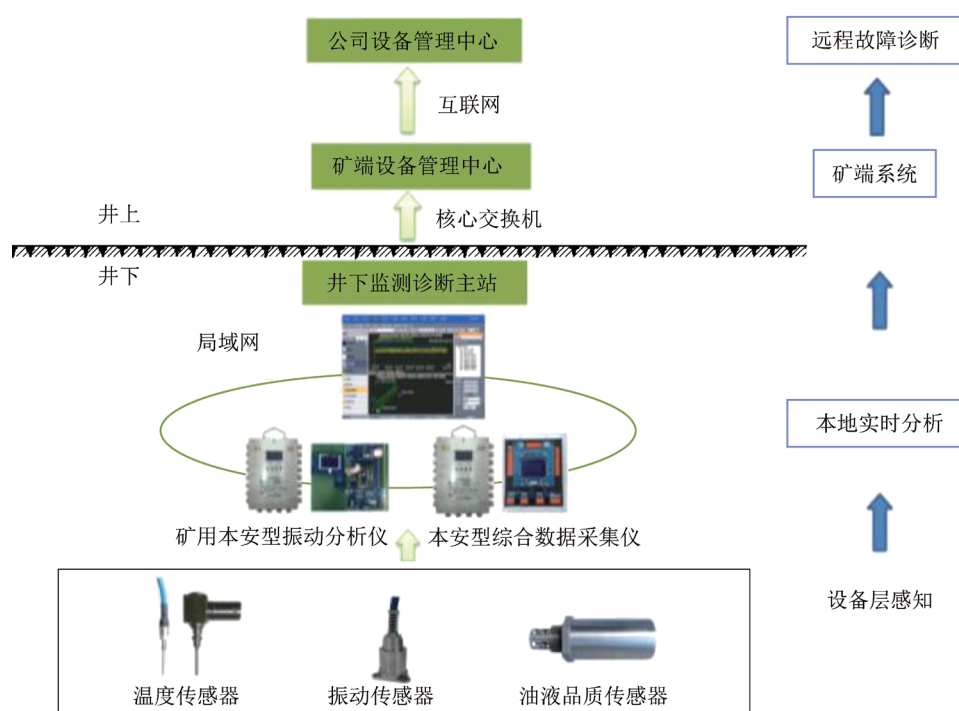


图5 掘进机健康状态监测系统构架

使得状态监测、故障诊断和故障预警等各功能模块之间的数据能够进行高效实时传递交互，人-机接口主要包括状态监测模块的报警信息、故障诊断结构、故障及寿命预测和维护决策信息的数据显示等。进一步的人-机交互包括井下机载端和远程控制中心的信息交互和沟通，保证及时准确地做出判断和决策，并帮助井下设备操作人员采取相应的措施。

## 总结

(1) 巷道掘进机健康状态监测系统包含传感器技术、大数据分析和挖掘技术、数据处理方法、故障诊断方法和寿命预测方法等，可对掘进机工作状态信息进行多个维度的全过程实时监测和故障检测，优化设备维护检修策略、防止误操作等人为因素导致的设备异常运行、提高设备可靠性。

(2) 井工煤矿掘进机故障诊断和寿命预测技术的重点是井下环境复杂，传感器、数据采集设备等硬件设备本身可靠性问题尚未完全解决，且在

复杂工况下振动、温度等掘进机状态信号提取难度大，信号有效信息成分少，信号特征提取难度大等问题是阻碍掘进机PHM技术发展的主要因素，仍需要开展深入考察和研究工作。

(3) 现阶段我国大部分矿井井下工业环网仍无法满足掘进机状态监测数据实时通过网络上传到远程控制中心，无法满足专家系统功能应用条件。因此，对掘进工作面有线网络、无线网络技术发展提出了更高的要求。

■ 责任编辑：李金松

### 作者简介：

第一作者：中国建，硕士，主要从事煤矿传动设备设计及智能化故障诊断工作。

E-mail: 929172305@qq.com

通讯作者：庞宇，博士研究生，主要从事装备智能化故障诊断技术研究工作。E-mail: 763948196@qq.com

作者单位：山西天地煤机装备有限公司；中国煤炭科工集团太原研究院有限公司；煤矿采掘机械装备国家工程实验室；南京航空航天大学