

煤矿井下仪器仪表检测技术现状和发展趋势

张 磊

煤科(北京)检测技术有限公司 北京 102608

摘要: 煤矿安全生产是国家能源战略和人民生命财产安全的基石,而井下仪器仪表作为感知矿井环境、监控设备状态、预警灾害风险的“神经末梢”与“眼睛耳朵”,其性能的可靠性与数据的准确性直接决定了矿井安全监控系统的效能。本文系统梳理了当前煤矿井下主要仪器仪表(包括气体监测、环境参数监测、设备状态监测及人员定位等)的检测技术现状,深入剖析了在极端复杂环境下检测所面临的严峻挑战,如高湿、高粉尘、强电磁干扰、本安防爆要求及标准体系滞后等问题。在此基础上,文章前瞻性地探讨了煤矿井下仪器仪表检测技术的未来发展趋势,重点聚焦于智能化、网络化、微型化、多参数融合以及基于数字孪生和人工智能的预测性维护等方向。最后,本文提出了构建新一代智能检测体系的建议,旨在为提升我国煤矿本质安全水平、推动矿山智能化转型提供理论参考和技术支撑。

关键词: 煤矿安全; 井下仪器仪表; 检测技术; 智能化; 发展趋势; 数字孪生

引言

煤炭是我国主体能源,但煤矿开采,尤其是井下开采,存在瓦斯突出、煤尘爆炸等重大安全风险。重特大煤矿事故多与灾害征兆感知滞后、预警失效或监控数据失真有关。煤矿安全监控系统(MSMS)是矿井安全生产的“守护神”,其井下仪器仪表作为核心,如同矿井“感官系统”,负责实时精准采集瓦斯、一氧化碳等有毒有害气体浓度,风速、温度等环境参数及大型机电设备运行状态。数据准确性、稳定性和实时性是安全监控系统决策控制的依据,仪器仪表若失灵或误报,后果严重^[1]。因此,科学高效检测校准仪器仪表是保障煤矿安全生产的关键。随着矿山智能化建设推进,对检测技术提出更高要求。本文将审视当前检测技术应用现状与瓶颈,展望未来发展方向。

1 煤矿井下仪器仪表检测技术现状

当前,我国煤矿井下仪器仪表的检测技术体系已初步建立,形成了以国家法定计量检定规程为基础,企业自检、第三方检测和定期送检相结合的多层次保障模式。主要检测对象和方法如下:

1.1 气体监测类仪表检测

气体监测是煤矿安全的重中之重,主要针对甲烷(CH₄)、一氧化碳(CO)、氧气(O₂)、二氧化碳(CO₂)、硫化氢(H₂S)等。目前主流的检测技术包括:(1)催化燃烧式(Cat)传感器:主要用于甲烷检测。其检测原理是利用甲烷在催化剂作用下燃烧产生的热量变化来测量浓度。检测时,通常采用标准气体(如1.0%CH₄/N₂)进行零点校准和量程校准。该方法成熟、成本低,但易受高浓度瓦斯“中毒”和硅蒸汽等抑制剂

影响,且需要氧气参与反应,在缺氧环境下失效。(2)红外(NDIR)传感器:应用日益广泛,可用于CH₄、CO₂等多种气体。其原理是基于气体对特定波长红外光的吸收特性。检测时同样使用标准气体进行标定。NDIR传感器具有选择性好、寿命长、不受背景气体干扰、无需氧气等优点,已成为高端气体检测仪的首选,但成本相对较高。(3)电化学传感器:主要用于检测O₂、CO、H₂S等。通过测量气体在电极上发生氧化还原反应产生的电流来确定浓度。检测过程也依赖标准气体。其优点是灵敏度高、线性好,但寿命有限(通常1-2年),且易受温度、湿度影响,存在交叉干扰问题。目前的检测流程多为离线式,即定期将传感器或整机拆下,送至地面实验室或使用便携式校准仪进行标定。这种方式存在检测周期长、无法实时反映井下真实工况下的性能等弊端。

1.2 环境参数监测类仪表检测

(1)风速/风量传感器:常用的有超声波式、热式(热膜/热球)和叶轮式。检测主要依据《风速表检定规程》(JJG(煤炭)01),在风洞实验室中,通过标准风速发生装置产生已知风速,对比被测传感器输出值进行校准^[2]。(2)温度/湿度传感器:多采用热敏电阻、热电偶或集成数字传感器(如SHT系列)。检测在恒温恒湿箱中进行,通过与高精度标准温湿度计比对完成校准。(3)压力传感器:用于监测负压、差压等,常用压阻式或电容式原理。检测在活塞压力计或数字压力校验仪上完成。这类仪表的检测相对成熟,但同样面临井下恶劣环境(如高湿凝露、粉尘覆盖)对传感器探头造成物理性堵塞或性能漂移的问题,而现有检测手段难以模拟这些复杂工况。

1.3 设备状态监测类仪表检测

随着预测性维护理念的普及,用于监测设备振动、温度、电流、油液等状态的仪表越来越多。(1)振动传感器:多为压电式加速度传感器。检测需在振动台上进行,通过标准振动信号源激励,校准其灵敏度和频率响应。(2)红外测温仪/热像仪:用于非接触式监测设备表面温度。检测需在黑体辐射源前进行,校准其测温精度和温度分辨率。(3)电流/电压传感器:通常为霍尔效应或罗氏线圈原理。检测使用高精度标准源和标准表进行比对。这类仪表的检测难点在于如何将实验室的标定结果有效映射到复杂的井下设备运行工况中,因为设备的振动、电磁环境等都会对测量结果产生耦合影响。

1.4 人员定位与通信类设备检测

以UWB(超宽带)、ZigBee、Wi-Fi等技术为基础的人员精确定位系统(KJsystem)已成为标配。其检测主要关注定位精度、通信距离、抗干扰能力等指标。通常在模拟巷道或专用测试场中,通过已知坐标点的信标和移动终端,验证系统的定位误差。然而,井下巷道结构复杂多变,金属支护、大型设备对无线信号的反射、衍射和吸收效应极强,使得地面或简单模拟环境下的检测结果与实际井下性能存在较大偏差。

2 当前检测技术面临的主要挑战

尽管现有检测体系在保障煤矿安全方面发挥了重要作用,但在智能化矿山建设的新要求下,其局限性日益凸显,主要体现在以下几个方面:

2.1 极端复杂工况模拟困难

井下环境是集高湿(近100%RH)、高粉尘、强腐蚀性气体、剧烈温度变化、强机械振动和复杂电磁干扰于一体的极端环境。现有的地面检测实验室难以全面、真实地复现这种多物理场耦合的复杂工况。例如,粉尘对光学窗口的覆盖、凝露对电路板的侵蚀、强电磁场对微弱信号的干扰等,这些因素在常规检测中往往被忽略,导致仪表在实验室“合格”,但在井下“水土不服”,性能迅速劣化。

2.2 本安防爆与检测精度的矛盾

煤矿井下属于I类爆炸性危险场所,所有电气设备必须满足严格的本安防爆(Exia/ib)要求。这意味着仪表的电路设计必须将能量限制在极低水平,以防止产生足以点燃瓦斯的火花或热效应。这一限制直接制约了传感器的驱动功率、信号处理能力和通信带宽,从而在根本上影响了检测的灵敏度和精度。如何在满足本安要求的前提下,实现更高性能的检测,是技术上的核心难题。

2.3 检测模式滞后,缺乏实时性

当前主流的“定期送检”或“离线校准”模式,存在明显的“时间盲区”。在两次检测间隔期内,仪表性能可能已发生漂移甚至失效,而系统无法感知。这种滞后性无法满足智能化矿山对“全时域、全要素”感知的要求^[1]。理想的检测模式应是在线的、自诊断的、甚至是预测性的。

2.4 标准与规范体系滞后

现有的国家和行业检定规程(如AQ、MT系列标准)多针对单一参数、单一原理的仪表,且更新速度较慢。面对多参数融合传感器、基于AI算法的智能仪表等新技术、新产品,现有标准体系缺乏相应的检测方法和评价指标,导致新产品“无法可依”,阻碍了技术创新和应用推广。

2.5 数据孤岛与信息割裂

不同类型的仪器仪表(气体、环境、设备状态)往往由不同厂商提供,采用不同的通信协议和数据格式。检测数据、运行数据、维护数据分散在各个系统中,形成了“数据孤岛”。这种信息割裂使得无法从系统层面进行综合健康评估和关联性分析,限制了检测价值的最大化。

3 煤矿井下仪器仪表检测技术的发展趋势

为应对上述挑战,煤矿井下仪器仪表检测技术正朝着智能化、网络化、精准化和前瞻化的方向加速演进。

3.1 智能化与自诊断/自校准技术

未来的仪器仪表将不再是简单的数据采集器,而是具备边缘计算能力的智能节点。其核心特征是内置自诊断(Self-Diagnosis)和自校准(Self-Calibration)功能。

(1)自诊断:通过内置的参考源(如微型标准气室、参考电阻/电容)、冗余传感器或基于物理模型的软件算法,仪表能够实时监测自身关键部件(如光源、探测器、电路)的健康状态。一旦发现性能异常(如灵敏度下降、零点漂移),可立即向监控中心发出预警。(2)自校准:更进一步,仪表可利用内置的微型标准物质或与其他可信节点的数据比对,自动进行零点或量程的微调。例如,某些高端红外气体传感器已能利用N₂作为零点参考气进行周期性自动归零。这将极大减少人工干预,实现“免维护”或“少维护”。

3.2 网络化与在线/远程检测

依托矿山工业互联网和5G/F5G等高速通信网络,检测模式将从离线走向在线,从本地走向远程。(1)在线检测:在关键区域部署固定的在线校准装置。例如,在回风巷等气体成分相对稳定的区域设置标准气体注入点,可定期对沿线的气体传感器进行在线标定。对于振

动传感器，可通过安装标准激励源进行在线功能验证^[4]。

(2) 远程检测：地面监控中心的技术人员可以通过网络，远程读取井下仪表的自诊断信息、历史数据和性能曲线，并远程下发校准指令或诊断程序。这不仅提高了检测效率，也降低了人员下井的风险和成本。

3.3 微型化、集成化与多参数融合检测

微机电系统 (MEMS) 和微纳制造技术的发展，使得传感器可以做得更小、更轻、功耗更低，同时集成多种感知功能。(1) 多参数融合传感器：一个微型探头可同时检测温度、湿度、多种气体浓度、甚至颗粒物 (PM2.5/PM10)。通过多源信息融合算法 (如卡尔曼滤波、神经网络)，不仅可以相互校验，提高整体测量精度，还能识别单一传感器无法察觉的复合风险。例如，CH₄浓度异常升高伴随温度骤升，可能预示着火灾或突出前兆，其风险等级远高于单一参数报警。(2) 片上实验室 (Lab-on-a-Chip)：未来，复杂的化学分析功能有望集成到芯片上，实现对矿井水、油液等样本的井下原位快速分析，为水灾预警和设备润滑状态评估提供新手段。

3.4 基于数字孪生的虚拟检测与预测性维护

数字孪生 (DigitalTwin) 技术为解决复杂工况模拟难题提供了全新思路。(1) 构建仪表数字孪生体：为每一台关键仪器仪表建立一个高保真的虚拟模型，该模型不仅包含其物理结构和传感原理，还集成了其在各种环境应力 (温、湿、粉尘、振动) 下的老化、漂移规律。(2) 虚拟检测与仿真：在虚拟空间中，可以任意设置和组合极端工况，对仪表的性能进行“压力测试”和“寿命预测”，而无需真实的物理实验。这为新产品的研发和可靠性验证提供了强大工具。(3) 预测性维护 (PdM)：结合井下实时运行数据和数字孪生模型，系统可以精准预测每台仪表的剩余使用寿命 (RUL) 和潜在故障点，从而实现从“定期维修”到“按需维修”的转变，最大化设备可用性，最小化非计划停机。

3.5 人工智能驱动的智能检测与决策

人工智能 (AI)，特别是深度学习，将在检测数据

分析和智能决策中扮演核心角色。

(1) 异常检测与数据清洗：AI模型可以学习海量历史数据中的正常模式，自动识别并剔除由传感器故障、电磁干扰等引起的异常数据 (野值)，确保上层应用接收到的是高质量、可信的数据。(2) 智能标定与补偿：AI可以建立传感器输出与环境参数 (如温湿度) 之间的非线性映射关系，实现动态的、自适应的环境补偿，显著提升在复杂环境下的测量精度。(3) 风险智能评估：融合来自各类仪表的多维数据，AI可以构建更精准的灾害风险评估模型，实现从“阈值报警”到“风险态势感知”的跨越，为矿井安全管理提供更前瞻、更智能的决策支持。

4 结语

煤矿井下仪器仪表检测技术正处在向智能化转型的关键阶段。目前虽已构建基本检测框架，但面对井下复杂环境及智能化矿山建设要求，仍存在模拟难、模式滞后、标准缺失等问题。未来，该技术将迎来多技术深度融合的系统性变革，智能化自诊断/自校准让仪表更具“活力”，网络化在线/远程检测突破时空束缚，微型化与多参数融合提升感知能力，数字孪生破解复杂工况模拟难题，AI成为检测“智慧大脑”，推动数据向决策转化。为加速转型，建议加快制定更新检测标准规范，加大智能传感器等核心技术研发投入，推动矿山工业互联网建设以打通数据壁垒，并鼓励产学研用协同，构建开放共享的智能检测技术生态。

参考文献

- [1] 国家矿山安全监察局. 煤矿用仪器仪表安全技术要求: GB43067-2023[S]. 中国标准出版社, 2023.
- [2] 张煜. 煤矿通风安全仪器仪表检测分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (17): 33-34.
- [3] 李剑峰. 煤矿井下安全检测仪器仪表校准管理[J]. 劳动保护, 2020, (04): 66-67.
- [4] 谢冬冬. 煤矿井巷矿压测试方法及仪器仪表应用分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, (09): 18-20.