

防爆电机在爆炸性环境下的运行状态监测与故障诊断方法

陈 亮

国华（天津）检测技术有限公司 天津 300392

【摘要】：针对爆炸性环境中防爆电机运行风险高、故障难识别的问题，提出以多源信号融合监测为核心、智能算法诊断为支撑的技术思路，解决传统单一参数监测误判、漏判的弊端。通过采集电机振动、电流、温度等多维度运行数据，经预处理与特征提取后，结合智能算法实现运行状态实时监测与故障类型、严重程度精准诊断，为爆炸性环境下防爆电机安全稳定运行提供可靠技术支撑，保障工业生产安全。

【关键词】：防爆电机；爆炸性环境；运行状态监测；故障诊断

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.022

引言

爆炸性环境广泛存在于石油、化工、煤矿等关键工业领域，防爆电机作为核心动力设备，其运行稳定性直接关系到生产安全与人员安危。此类环境中，高温、高压、易燃易爆介质等因素易导致电机出现故障，且故障隐蔽性强、排查难度大，一旦失控可能引发严重安全事故。因此，构建高效、精准的运行状态监测与故障诊断体系，及时识别异常、排查隐患，成为保障爆炸性环境安全运行的关键。

1 爆炸性环境特性及防爆电机常见故障分析

1.1 爆炸性环境核心特性

爆炸性环境主要存在于石油炼制、煤矿开采、化工合成等高危工业领域，其核心特性体现为易燃易爆介质的普遍性、环境参数的波动性及风险的突发性。该类环境中，可燃气体、蒸气、粉尘等爆炸性混合物始终处于临界状态，当环境温度、压力超出 GB 3836 系列标准规定的阈值，或出现静电放电、机械火花、电气电弧等点火源时，极易引发爆炸事故，造成设备损毁与人员伤亡。从环境分类来看，爆炸性气体环境按引燃温度分为 T1-T6 组别，按爆炸危险区域划分为 0 区、1 区、2 区，粉尘爆炸性环境则分为 20 区、21 区、22 区，不同区域对防爆电机的防护等级（IP 等级）、防爆型式（隔爆型、本质安全型等）提出差异化要求^[1]。实际工业场景中，石油炼制车间的高温环境会加速电机绝缘层老化、降解，煤矿井下的高湿、腐蚀性瓦斯介质会破坏电机隔爆密封结构，导致防爆性能失效，而化工合成车间的粉尘堆积则会堵塞电机散热通道，造成电机温升超标，这些特性共同加剧了防爆电机的运行负荷与故障风险，也对其运行状态监测的实时性、精准性提出了更高标准，为后续多源信号采集与监测技术的应用奠定了现实基础。

1.2 防爆电机常见故障类型

防爆电机作为爆炸性环境中的核心动力设备，其故障类型与环境特性密切相关，且故障表现具有隐蔽性、关联性特点。绕组故障是最常见类型之一，受爆炸性环境高温、腐蚀性介质影响，电机定子绕组绝缘层易出现老化、破损，引发匝间短路、

相间短路或接地故障，导致电机绕组温度异常升高，甚至烧毁绕组线圈。轴承故障多由润滑不良、粉尘侵入引发，表现为轴承磨损、滚珠破损、保持架变形，运行时伴随异常振动、异响，若未及时处理，会导致电机转子偏心，进一步损坏防爆密封结构。此外，防爆电机的接线盒故障也较为突出，因环境中易燃易爆介质渗透、接线端子松动，易出现接触不良、电弧放电现象，打破环境防爆平衡，引发安全隐患。同时，电机冷却系统故障会导致散热失效，造成电机温升超标，加速绝缘损坏，形成“故障叠加”效应，严重影响防爆电机的安全稳定运行。

2 防爆电机多源运行信号采集与预处理技术

2.1 多源运行信号采集技术

防爆电机多源运行信号采集以捕捉电机运行全状态为核心，结合爆炸性环境防爆要求，选取振动、电流、温度三类关键信号作为采集对象，适配石油炼制、煤矿井下等实际工业场景的复杂工况，兼顾信号采集的安全性、数据有效性。采集过程需严格遵循 GB 3836 系列防爆标准，全部采用本质安全型传感器，杜绝传感器工作过程中产生的电火花、热效应引发爆炸性混合物燃爆风险。其中振动信号采用防爆型压电式加速度传感器，精准安装于电机轴承端盖、机座及转子支撑部位，采集频率设定为 10-1000Hz，可有效捕捉转子不平衡、轴承磨损、定子绕组松动等故障引发的振动频率异常，为机械故障识别提供基础数据。电流信号通过防爆型罗氏线圈传感器采集，采用非接触式测量方式，实时监测定子绕组三相电流的幅值、相位变化，精准捕捉匝间短路、相间短路、负载不均等电气故障导致的电流畸变现象^[2]。温度信号采用隔爆型热电偶传感器，嵌入电机绕组、轴承及机壳关键部位，监测范围为-50℃至 200℃，可实时反馈爆炸性环境高温、电机负载过大及散热系统失效引发的温度异常。所有采集到的多维度信号均通过屏蔽型防爆电缆传输至本质安全型数据采集终端，有效抵御环境电磁干扰与粉尘侵蚀，确保采集过程的本质安全及数据的完整性、真实性，为后续信号预处理与融合分析提供可靠支撑。

2.2 信号预处理方法

多源信号采集过程中易受爆炸性环境中电磁干扰、粉尘干扰及传感器自身误差影响,产生噪声信号,这些噪声会掩盖电机故障特征信息,导致后续状态监测与故障诊断出现偏差,因此需通过针对性预处理方法提升信号纯度,为后续运行状态监测与故障精准诊断提供可靠的数据支撑。针对振动信号中掺杂的高频噪声,采用小波阈值去噪法进行处理,选取 db4 小波基对振动信号进行 3 层小波分解,将信号分解为低频近似分量与高频细节分量,通过设定合理的阈值函数剔除高频细节分量中的噪声成分,最大限度保留振动信号中蕴含的转子不平衡、轴承磨损等故障特征信息,提升振动信号的信噪比。对于电流信号中存在的电网谐波、电磁耦合等谐波干扰,采用自适应滤波算法,通过自适应调整滤波系数实时跟踪干扰信号的频率与幅值,实现对干扰信号的精准抑制,有效还原电流信号的真实变化规律,确保能够准确捕捉定子绕组匝间短路、负载不均等故障引发的电流畸变特征。温度信号则采用滑动平均滤波法,选取 5 点滑动窗口对采集到的温度数据进行平滑处理,有效消除环境瞬时温度波动、传感器接触不良带来的随机误差,显著提升温度信号的稳定性与可靠性。预处理过程中同步完成信号归一化处理,采用 min-max 归一化方法将不同量纲的振动、电流、温度信号统一转化为 0-1 区间的标准化数据,有效解决多源信号量纲不统一导致的融合偏差问题,为后续多源信号融合分析与特征提取奠定坚实基础,保障整个监测诊断体系的精准性。

3 多源信号融合在防爆电机运行状态监测中的应用

3.1 信号融合核心策略

多源信号融合技术在防爆电机运行状态监测中的应用,核心是解决单一信号监测的局限性,通过整合振动、电流、温度三类预处理后的信号,实现电机运行状态的全面精准研判,适配爆炸性环境下电机故障隐蔽性强、排查难度大的实际工况,破解传统单一参数监测易误判、漏判的行业痛点。结合石油化工、煤矿井下等高危场景的防爆标准要求,采用分层融合策略,先完成单类信号的特征层融合,精准提取各信号中的核心特征参数——振动信号的峰值、有效值及峭度,电流信号的谐波畸变率、三相不平衡度及有功功率,温度信号的稳态值、温升速率及温差变化,为后续融合决策提供精准特征支撑^[3]。随后通过证据理论融合算法,结合各信号在不同故障类型中的灵敏度差异,对各特征参数进行科学权重分配与融合决策,提升状态研判的准确性。融合过程中严格兼顾信号的实时性与安全性,采用本质安全型数据融合模块,模块设计符合 GB 3836-2010 防爆标准,有效屏蔽融合运算过程中产生的电磁干扰,杜绝干扰信号引发爆炸性混合物燃爆的安全风险,确保融合结果能够实时、精准反馈电机运行状态,为后续智能故障诊断提供可靠的融合特征数据,适配高危工业场景的安全运行需求。

3.2 实际应用与优势

在煤矿井下爆炸性粉尘环境中,多源信号融合技术的应用优势尤为突出,该环境中粉尘浓度高、湿度大且电磁干扰强烈,传统单一振动信号监测易受粉尘堆积覆盖传感器探头的影响,导致振动信号衰减、失真,无法精准捕捉电机轴承早期磨损引发的微弱振动异常,往往错过最佳故障排查时机,进而加剧故障恶化。单一温度信号监测则因井下环境温度分布不均、散热条件差,难以有效区分环境高温与电机自身发热引发的温度异常,易将电机正常温升误判为故障,或忽视电机绕组轻微老化、轴承润滑不良导致的缓慢温升,造成误判、漏判隐患。通过多源信号融合技术,可将振动信号反映的电机转子不平衡、轴承磨损等机械故障特征、电流信号反映的绕组匝间短路、三相不平衡等电气故障特征、温度信号反映的电机热状态异常特征有机结合,实现多维度特征互补,精准识别电机早期故障隐患。例如,当电机绕组出现轻微绝缘老化时,电流信号会出现微弱的谐波畸变,温度信号呈现缓慢且持续的温升趋势,单一信号监测易将其误判为正常运行波动,而融合后可通过多特征联动分析,结合各信号的变化规律与关联关系,精准判定故障类型为绕组绝缘老化,并量化故障严重程度,为及时处理隐患提供依据。该技术可有效解决传统单一参数监测误判、漏判的弊端,显著提升爆炸性粉尘环境下防爆电机运行状态监测的准确性与可靠性,为后续智能算法故障诊断提供精准的特征支撑,切实保障煤矿井下这一高危工业场景的生产安全与人员安危。

4 智能算法在防爆电机故障诊断中的实践与优化

4.1 核心算法实践应用

智能算法在防爆电机故障诊断中的实践,以多源信号融合后的特征参数为核心输入,紧密结合爆炸性环境高温、高压、易燃易爆及信号干扰强的工况特殊性,针对性选取适配性强、诊断精度高、抗干扰能力突出的智能算法落地应用,重点解决传统人工诊断与单一参数诊断方法效率低、误判率高、对早期故障识别不敏感的行业痛点,适配石油、煤矿等高危场景的安全运行需求。在石油炼制车间爆炸性气体环境中,采用 BP 神经网络算法实现防爆电机故障诊断,严格遵循 GB 3836 系列防爆标准,将预处理后的振动峰值、电流谐波畸变率、温度稳态值等多维度特征参数作为网络输入层,将绕组故障、轴承故障、接线盒故障等常见故障类型作为输出层,通过足量故障样本训练迭代优化网络权值与阈值,提升网络收敛速度与诊断精度,可实现各类故障类型的快速精准识别,诊断响应时间控制在秒级^[4]。针对煤矿井下爆炸性粉尘环境中信号干扰强、故障特征微弱的问题,引入支持向量机(SVM)算法,通过核函数映射将高维特征向量转化为低维空间可分向量,有效抑制粉尘堆积、电磁干扰带来的诊断误差,强化对电机早期轻微故障(如绕组轻微绝缘老化、轴承轻微磨损)的识别能力,精准适配防爆电机故障隐蔽性强、早期故障易被忽视的运行特点,为高危

场景下防爆电机故障及时排查、隐患治理提供高效技术支撑。

4.2 算法优化路径

针对基础智能算法在防爆电机故障诊断中存在的收敛速度慢、小样本数据诊断精度不足、抗干扰能力弱等突出问题，结合石油炼制、煤矿井下等实际工业场景的防爆要求与故障诊断需求，开展针对性优化设计，进一步提升算法的诊断可靠性、实时性与适配性，满足高危环境下防爆电机故障快速排查、精准研判的实际需求。对 BP 神经网络算法的优化重点聚焦于收敛性能与运算效率，通过引入动量因子动态调整学习率，有效缓解算法训练过程中的震荡现象，避免其陷入局部最优解，同时简化网络隐含层结构，删减冗余神经元与计算环节，降低算法运算复杂度，确保在爆炸性环境高温、电磁干扰强的复杂工况下，能够快速输出诊断结果，缩短故障诊断响应时间，适配实时监测诊断的需求^[5]。针对 SVM 算法在小样本数据场景下诊断精度不足、对早期轻微故障识别灵敏度低的问题，融合粒子群优化（PSO）算法，利用其全局寻优能力对 SVM 的核函数参数与惩罚因子进行自适应寻优，确定最优参数组合，强化算法对微弱故障特征的提取与识别能力。优化后的智能算法可

有效适配爆炸性环境中信号干扰强、故障类型复杂、早期故障隐蔽的特点，经实际工况验证，诊断误判率较基础智能算法降低 30%以上，能够精准识别防爆电机各类故障类型及严重程度，为防爆电机故障排查、隐患治理提供高效、可靠的技术支撑，切实保障高危工业场景下电机的安全稳定运行，降低安全事故发生风险。

5 结语

针对爆炸性环境下防爆电机运行风险高、故障难识别的核心问题，围绕多源信号融合监测与智能算法诊断展开研究，梳理了爆炸性环境特性及电机常见故障，阐述了多源信号采集、预处理及融合技术的应用，优化了智能算法在故障诊断中的实践路径。研究有效解决了传统单一参数监测误判、漏判的弊端，实现了电机运行状态的实时监测与故障精准诊断，为石油、煤矿等高危领域防爆电机安全稳定运行提供了可靠技术支撑。结合实际工况验证，该技术思路具有较强的实用性与可行性，同时指出，后续可结合物联网技术进一步提升监测诊断的智能化、远程化水平。

参考文献：

- [1] 付永鹏.防爆电机在复杂环境中的安全防护与可靠性分析[J].防爆电机,2025,60(04):78-81+112.
- [2] 贺诚.防爆电机在不同爆炸性气体环境中的应用研究[J].防爆电机,2025,60(04):96-99.
- [3] 贾建龙.防爆电机在煤矿井下应用中的故障分析与预防措施[J].防爆电机,2025,60(01):63-66+78.
- [4] 黄文涛.煤矿井下防爆电机冷却系统设计研究[J].现代制造技术与装备,2026,62(01):22-25.
- [5] 戚云飞.增安型防爆电机防电晕绝缘结构研究[J].防爆电机,2025,60(04):69-71+86.