

铁路供电设备运行状态监测与故障诊断技术研究

张 鑫

陕西华电榆横煤电有限责任公司 陕西 榆林 719000

摘 要：面对超大规模路网、高密度行车及复杂多变的铁路运行环境，传统的以定期检修和事后处理为主的运维模式已显乏力，难以有效预防和应对日益频发的供电设备故障。因此，深入研究并应用先进的运行状态监测与故障诊断技术，实现对供电设备从“被动响应”到“主动预警”、从“经验驱动”到“数据驱动”的根本性转变，具有重大的现实意义与战略价值。本文系统梳理了铁路供电设备（主要包括牵引变压器、断路器、隔离开关、接触网等）在运行中面临的主要故障模式与失效机理，全面阐述了基于多物理场信息融合的全域状态感知技术体系，并重点探讨了从信号预处理、特征提取到智能诊断决策的完整技术链条。研究表明，通过深度融合传感器技术、现代信号处理理论、人工智能算法与大数据分析平台，构建一个集实时监测、精准评估、早期预警和智能诊断于一体的综合技术体系，是提升铁路供电设备可靠性、保障铁路运输安全、推动运维模式智能化转型的关键路径。

关键词：铁路供电；状态监测；故障诊断；多源信息融合；人工智能

引言

铁路是国民经济大动脉，电气化铁路凭借运能大、速度快、能耗低、污染少等优势，已成为我国铁路现代化的主流。其“心脏”——由牵引变电所、接触网、电力贯通线等构成的供电网络，为高速动车组提供持续、稳定、高质量电能，任何微小故障都可能引发列车晚点、停运甚至安全事故。统计显示，供电系统故障在铁路非行车事故中占比较高，多源于绝缘老化、机械卡滞、接触不良等可预见缺陷。传统运维依赖周期性计划检修与事后抢修，存在“过修”与“失修”并存、响应滞后等弊端，难以保障设备全周期健康。随着物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的发展，通过全方位、全时段、全要素的状态监测，结合智能算法对设备进行深度“体检”与“诊断”，可实现健康状态量化评估与故障精准预测。这不仅是一次技术升级，更是运维理念的革命，推动铁路供电运维迈向以“状态修”和“预测修”为核心的智能化新时代。本文旨在系统探讨该技术体系的内涵、关键技术及未来发展方向。

1 铁路供电设备的主要类型、故障模式与失效机理

要实现有效的状态监测与故障诊断，首先必须深刻理解被监测对象的内在特性、常见故障形式及其背后的物理化学机理。

1.1 牵引变压器

牵引变压器是牵引变电所的核心设备，负责将来自地方电网的高压电能转换为适合电力机车使用的电压等级。其运行中的主要威胁源于内部绝缘系统的长期劣化。在电场、热场和机械应力的共同作用下，绕组的匝

间、相间或对地绝缘会逐渐老化，局部放电现象随之产生并不断侵蚀绝缘材料，最终可能导致灾难性的击穿短路^[1]。此外，铁芯若出现多点接地，会形成环流引起局部过热；套管受潮脏污或分接开关触头磨损，均会引发异常发热；而冷却系统的失效则会加速整个绝缘系统的热老化进程。这些故障的发生并非一蹴而就，而是伴随着油中溶解气体成分的微妙变化、局部放电量的缓慢增长以及温度场的异常分布，为早期监测提供了可能。

1.2 高压开关设备（断路器、隔离开关）

这类设备主要用于电路的开合与隔离，其可靠性直接关系到电网的灵活性与安全性。高压开关设备的故障多表现为机械与电气性能的双重退化。操动机构的连杆变形、弹簧疲劳或润滑失效，会导致分合闸动作迟缓、不到位甚至完全拒动，严重威胁电网操作的灵活性与安全性。与此同时，触头在长期电弧烧蚀和氧化作用下，接触电阻会逐渐增大，形成恶性循环，导致局部温度急剧升高，进一步加剧材料劣化。支持绝缘子则面临着污秽、覆冰、雷击及自然老化的考验，一旦其绝缘强度不足以承受运行电压，便会发生闪络或击穿，造成系统短路。这些故障的前兆往往体现在分合闸过程中的异常振动、声学信号变化以及红外热像图上的热点。

1.3 接触网系统

接触网系统作为露天架设的动态机电接口，其工作环境最为严苛。它不仅承受自身重力、风载、温度变化引起的张力波动，还需与高速滑过的受电弓保持稳定接触。几何参数的超限，如导高或拉出值偏离设计值，会直接导致弓网离线拉弧，不仅损伤接触线，还可

能引发刮弓事故。遍布全线的各类零部件,如吊弦、定位器、线夹等,在交变应力和大气腐蚀的长期作用下,极易发生疲劳断裂或连接松脱。绝缘子的污秽闪络是接触网跳闸的常见原因,而承力索与接触线本身也会因硬点冲击、异常磨损或电化学腐蚀而出现断股乃至断线。所有这些隐患,都要求监测系统能够对接触网的几何形态、零部件完整性、线索张力及绝缘状态进行持续、动态的跟踪。

2 基于多物理场信息融合的全域状态感知技术

状态监测的首要任务是全面、准确、可靠地获取反映设备健康状况的原始信息。单一维度的监测(如仅测电流)往往不足以揭示复杂的故障本质,因此必须构建一个多物理场、多维度的感知体系。

2.1 电气量监测

这是最基础也是最重要的监测维度。除了常规的遥测“四遥”信息(电压、电流、功率、功率因数)外,还需引入更精细化的电气量监测:(1)局部放电(PD)监测:对于充油设备(如变压器、互感器),通过高频电流互感器(HFCT)或特高频(UHF)传感器捕捉设备内部绝缘缺陷处产生的局部放电信号。放电的幅值、相位、重复率等特征是评估绝缘劣化程度的关键指标^[2]。

(2)油中溶解气体分析(DGA):同样是针对充油设备,在线DGA装置可实时监测油中 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、CO、 CO_2 等特征气体的浓度及其增长速率。不同故障类型会产生特定的气体组合,是判断变压器内部潜伏性故障的“黄金标准”。(3)介质损耗因数($\tan\delta$)与电容量监测:用于评估套管、耦合电容器等容性设备的整体绝缘状况。 $\tan\delta$ 值的增大通常意味着绝缘受潮或老化。

2.2 非电气量监测

(1)温度监测:利用红外热像仪、光纤光栅(FBG)传感器或无线测温贴片,对变压器绕组、套管将军帽、断路器触头、隔离开关触指、接触网线夹等关键部位进行在线测温。异常温升往往是接触不良、过载或内部故障的直接表现。(2)机械特性监测:在断路器操动机构上安装直线/角位移传感器、振动加速度传感器,实时记录分合闸过程中的行程-时间、速度-时间曲线以及振动频谱。通过与标准曲线对比,可精准判断机构是否存在卡涩、缓冲失效等机械问题。(3)声学及超声波监测:采用高灵敏度麦克风阵列或超声波探头,捕捉设备运行中的异常声音(如变压器的“嗡嗡”声变化、断路器的机械撞击声、绝缘子的放电“嘶嘶”声)。声纹分析可有效识别早期机械松动或局部放电。

2.3 视觉与几何状态监测

视觉与几何状态监测技术则将关注点从设备内部延伸至其外部形态与空间位置。部署在变电所内的固定视频与红外摄像头,结合搭载于巡检机器人或无人机的移动视觉系统,能够自动识别设备外观破损、仪表读数、渗漏油迹等宏观缺陷。对于接触网,基于激光雷达和机器视觉的动态检测技术,可以在列车运行过程中实时测量接触线的高度、拉出值、硬点冲击等几何参数,全面评估弓网耦合的动态性能。所有这些来自不同物理域的异构数据,共同编织了一张覆盖设备内外、贯穿时空的感知网络,为后续的深度融合与智能诊断奠定了坚实的数据基础。

3 故障诊断的核心技术流程与方法

从海量、多源的原始监测数据到最终形成可靠的故障诊断结论,需要经过一系列严谨且相互关联的技术处理步骤,构成一个完整的智能诊断链条。

3.1 信号预处理与特征提取

信号预处理与特征提取是整个流程的基石。现场采集的原始信号不可避免地混杂着各种噪声和干扰,直接用于分析会导致误判。因此,必须首先采用小波去噪、自适应滤波等先进信号处理技术对数据进行清洗和净化。在此基础上,需要从洁净的信号中提炼出能够敏感、稳定地表征设备特定状态的特征量^[3]。例如,可以从振动信号中计算其时域的统计矩、频域的能量分布以及时频域的小波包熵;可以从局部放电信号中构建其相位解析的PRPD图谱并提取关键统计参数;也可以从DGA数据中计算特征气体比值或总烃的增长率。这些精心构造的特征向量,将复杂的原始信号转化为机器学习模型易于理解和处理的数值形式。

3.2 故障模式识别与智能诊断

故障模式识别与智能诊断是整个技术链条的核心与灵魂。传统的阈值报警和专家规则库方法,在面对复杂的非线性关系和未知的故障模式时显得力不从心。现代智能诊断方法,特别是以支持向量机、随机森林为代表的机器学习算法,以及以卷积神经网络、长短期记忆网络为代表的深度学习模型,展现出强大的模式识别能力。它们能够在大量历史样本上自主学习不同故障模式与特征向量之间的复杂映射关系。卷积神经网络可以直接从原始振动波形或红外热像图中自动挖掘深层次的故障特征,省去了繁琐的人工特征工程;而循环神经网络则擅长捕捉DGA气体浓度等时间序列数据中的演化规律,用于预测故障的发展趋势。此外,将设备知识、故障机理和处理经验构建成知识图谱,可以实现基于语义

的智能推理,当系统检测到某个异常时,能快速关联到可能的原因和解决方案,为运维决策提供有力支持。

3.3 健康状态评估与剩余寿命预测

健康状态评估与剩余寿命预测代表了故障诊断技术的更高阶目标。它超越了简单的“好/坏”二元判断,致力于对设备当前的健康状况进行量化评分,并科学预测其在未来特定工况下的剩余使用寿命。这通常需要建立更为复杂的回归模型或生存分析模型,综合考虑设备当前的多维状态、历史劣化轨迹、运行负荷强度等多种因素^[4]。通过这种前瞻性的评估,运维部门可以精准制定检修计划,将有限的资源投入到最需要关注的设备上,从而实现从“被动抢修”到“主动预防”的根本性转变。

4 技术挑战与未来发展趋势

4.1 技术挑战

尽管铁路供电设备状态监测与故障诊断技术取得了长足进步,但在实际推广应用仍面临诸多深层次的挑战。现场环境的复杂性导致采集的数据质量参差不齐,且高质量的早期故障样本稀缺,使得监督学习模型的训练和验证变得困难。不同厂家、不同型号的设备在结构和材料上的差异,也给构建通用性强的诊断模型带来了障碍。如何有效地将来自电气、机械、声学、视觉等不同维度的异构信息进行深层次的时空对齐和语义融合,以形成对设备状态的一致性、综合性认知,仍是亟待攻克的技术难题。同时,在系统架构层面,如何平衡边缘侧的实时性、低功耗需求与云端的强大计算能力,实现高效的云边协同,也是工程落地的关键考量。

4.2 发展趋势

展望未来,该领域的研究与应用将沿着更加智能化、精准化和闭环化的方向演进。研究的重点将从故障发生后的“诊断”更多地转向故障发生前的“预测”,通过构建融合物理机理与数据驱动的数字孪生模型,实现对设备全生命周期的健康管理。针对安全攸关的铁路

应用场景,发展可解释的人工智能技术,让黑盒模型的决策过程变得透明可信,将是提升系统接受度和实用性的关键。5G通信技术提供的高带宽、低时延、广连接能力,以及北斗系统赋予的高精度定位授时服务,将为构建全域覆盖、毫秒级同步的智能监测网络注入强大动能。最终,打通设备从设计、制造、安装、运维到报废的全生命周期数据链,利用全量数据反哺上游的设计优化和下游的运维策略迭代,将形成一个持续自我完善、自我进化的良性技术生态。

5 结语

铁路供电设备运行状态监测与故障诊断技术是保障铁路运输安全、提升运维效率、实现智能化转型的核心支撑。本文系统论述了该技术体系的理论基础、关键技术与发展方向。研究表明,唯有构建一个以多物理场信息融合为基础、以先进信号处理和人工智能算法为核心、以大数据平台为载体的综合技术体系,才能真正实现对供电设备健康状况的全面感知、精准评估和智能预警。面对未来,应持续深化设备失效机理与状态表征等基础理论研究,加强核心算法、智能传感、自主诊断等关键技术攻关,推动产学研用深度融合,加快标准制定与工程应用验证,不断将铁路供电设备的运维水平从“被动响应”向“主动预防”和“自主决策”升级,为建设世界一流现代化铁路强国提供坚实技术保障。

参考文献

- [1]黄积江,潘春雷.铁路供电二次设备运维监测技术研究[J].电气化铁道,2023,34(S1):60-62.
- [2]凌源.铁路供电设备状态管理信息系统应用[J].电子测试,2021,(01):57-59+63.
- [3]于国旺,张志刚,翟延涛,等.朔黄铁路牵引供电设备智能运维技术研究[J].铁道运输与经济,2023,45(11):88-96.
- [4]刘浅.深圳都市圈城际铁路牵引供电设备机会维修模型研究[J].电气化铁道,2024,35(03):35-40.