

车载变压器故障预测与健康管理研究进展

吴广宁¹, 李晓楠¹, 杨雁¹, 胡广才¹, 高波¹, 张文旭², 王子杰¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031; 2. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要: 车载变压器是高速重载列车的动力来源, 其设计结构复杂, 运行工况恶劣, 且传统计划检修方式存在欠维修和过度维修等问题。针对这些问题, 研究了车载变压器的油箱、绕组结构特点和运行特征, 分析了电压波动、激磁涌流、散热不良、高次谐波、机械振动等恶劣运行工况和外部环境对车载变压器绝缘系统的影响。进一步总结了目前车载变压器故障预测与健康管理(prognostic and health management, PHM)研究存在的关键问题, 给出了车载变压器 PHM 的体系结构及工作流程, 阐明了 PHM 各周期期间的逻辑关系, 分析了国内外车载变压器状态监测、状态评估、故障诊断、故障预测与维修决策等方面的研究现状及存在和待解决的问题, 并探讨了未来开展车载变压器 PHM 值得继续研究的方面。

关键词: 车载变压器; PHM; 大数据技术; 不确定性; 深度学习; 强化学习

Research Progress of Fault Prediction and Health Management for On-board Traction Transformers

WU Guangning¹, LI Xiaonan¹, YANG Yan¹, HU Guangcai¹, GAO Bo¹, ZHANG Wenxu², WANG Zijie¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The on-board traction transformers are the power source of the high speed and heavy load trains; however, there are some problems, such as the complexity of the structure, the bad operation environment, the shortage of maintenance or excessive maintenance of traditional scheduled repair. In addition, the insulation system of on-board traction transformers is affected by the voltage fluctuations, inrush current, poor heat, harmonics, and mechanical vibration. Therefore, the structure of oil tank and winding and the operating characteristics are studied. The effects of the above-mentioned operating environments and conditions on the insulation system of on-board traction transformers are analyzed. Moreover, the critical problems existing in the research of on-board traction transformer are summarized, the frameworks and flowcharts of prediction and health management (PHM) are given, and the logical relationship of PHM is illustrated. Then, the research status and development of condition monitoring and assessment, fault diagnosis and prediction, and maintenance decision for on-board traction transformer at home and abroad are systematically analyzed, and the future development trend of on-board transformer PHM combining with the special operating characteristics is discussed and prospected in detail.

Key words: on-board traction transformers; PHM; big data technology; uncertainty; deep learning; reinforcement learning

0 引言

随着我国高速重载铁路的发展, 动车组与电力机车运行的可靠性已成为铁路相关运营维护部门面临的巨大挑战^[1-2]。由于动车组与电力机车需要车载变压器提供动力^[3-4], 因此一般将车载变压器安装于动车组或机车车底。相比普通电力变压器的静态运

行状态, 车载变压器随列车长期处于动态运行状态, 因此其运行条件、工作环境均与普通电力变压器截然不同^[5-6], 且经常会遭受过电压、过电流、负载冲击、散热不良、高次谐波、机械振动等恶劣运行工况与运行环境的影响^[7], 长期的累积作用使得车载变压器绝缘性能下降, 甚至出现诸多故障, 例如击穿烧损, 进而造成不必要的人员伤亡与经济损失。如 2018 年 1 月 25 日, 青岛开往杭州东的 G281 次动车电气设备发生故障并起火, 导致 2 号车车体被烧穿, 损失约 2 000 万元, 据调查最先发生故障的

基金资助项目: 神华集团科技创新项目(SHGF-17-54); 牵引动力国家重点实验室自主研究课题(2017TPL_Z03)。
Project supported by Technology Innovation Program of China Shenhua (SHGF-17-54), Basic Research Program of China Traction Power Key Laboratory (2017TPL_Z03).

是安装于 2 号车底的车载变压器。

另外, 为适应其特殊的运行条件与应用条件, 车载变压器在安装方式、油纸绝缘系统、铁芯、绕组分布、油箱结构等方面均与普通电力变压器不同, 如车载变压器采用一体化结构, 它与滤波电抗器和平波电抗器共用一个油箱等; 且车载变压器一般采用单相多绕组变压器, 而普通电力变压器多采用三相变压器^[8]。所以, 车载变压器的结构更加复杂, 在遭受电磁-热-机械-环境的协同作用时, 其在正常状态与故障状态上所表现出的特征也不同^[8]。另外, 随着高速铁路与重载铁路的建成, 车载变压器受外形尺寸与轴重的严格限制, 逐渐向智能化、小型化、轻量化、数字化发展, 各部件间的耦合程度大大增强, 使其状态监测、状态评估、故障诊断与预测的难度增加, 从而导致普通电力变压器的研究成果不能完全适用于车载变压器。

目前, 对于车载变压器的研究大多基于油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)单一因素, 未综合考虑车载变压器的车载监测/检测数据、历史失效数据、数字仿真数据、跟踪试验数据、运行里程、运行时间、运行工况等信息^[9]。且诊断评估中大多采用普通电力变压器的分析方法, 使其进行车载变压器故障诊断的指向性不强。加之测试手段的局限性、知识的不精确等问题, 使获得的知识不完备、诊断结果的精度与准确度降低。因此, 开展车载变压器的故障预测与健康管理(prognostic and health management, PHM)技术, 可为实现动车组与电力机车的实时监测、科学评判、精准维修提供理论依据。

当前, 我国动车组与电力机车检修主要以传统的“计划修”为主^[10-11], 存在过度维修、欠维修和维修成本高等缺陷, 从而影响了动车组与电力机车整体的运输效率。针对上述问题, 铁道部提出从“计划修”到“状态修(condition based maintenance, CBM)”的设备维修理念。但现阶段, 该理念不具备根据设备状态监测进行故障诊断的功能, 仍需依靠专家经验判断设备的故障原因和故障位置, 缺少故障预测功能。随着信息技术的发展, 考虑系统经济性、安全性和可靠性, 美国军方提出以预测技术为核心的故障预测与健康管理技术^[2,12-13], 逐渐在航空^[13]、机械^[14]、船舶^[15]、电子^[16]、铁路^[2,12]等领域得到快速发展。该技术实现了由传感器诊断到智能系统预测的转变, 由反应式通信转向先导式 3R

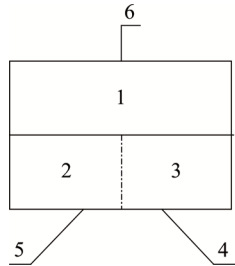
(right maintenance, right time, right location), 即在准确的时间对准确的部位采取准确的维修活动^[9,13,17]。

为此, 本文阐述了车载变压器的结构特征和运行特征, 分析了不同特殊运行工况对车载变压器的影响; 通过引入 PHM 概念与内涵, 分析车载变压器 PHM 体系存在的问题, 尝试揭示 PHM 技术的研究思路及其各个部分的逻辑关系, 分析其在状态监测、故障诊断、状态评估、故障预测与维修决策方面的研究现状, 探讨未来开展车载变压器 PHM 的若干研究问题, 以期对动车组与电力机车车载变压器及其他关键设备维修决策提供依据。

1 车载变压器复杂性分析

1.1 车载变压器特征

车载变压器是动车组与电力机车的动力来源, 具有如下特征: 1) 车载变压器采用一体化结构, 除了车载变压器外, 油箱中还包含滤波电抗器和平波电抗器^[18-19], 车载变压器油箱结构如图 1 所示, 而一般电力变压器的油箱中只有变压器器身。2) 车载变压器一般采用单相多绕组变压器, 由高压绕组、低压绕组、励磁绕组、辅助绕组组成, 部分绕组线圈采用 Nomex 纸包线, 其绝缘系统由油浸式复合绝缘系统构成, 绝缘油采用矿物油, 且依据运行区段环境温度决定, 而一般电力变压器多采用三相变压器^[18,20]。3) 车载变压器长期处于动态运行状态, 需承受连续强烈地机械振动与冲击, 而一般电力电压器处于相对静态运行状态。4) 车载变压器一般安装于动车组或机车车底, 受车载变压器高度、体积与重量的严格限制, 致使散热性较差^[21-23], 而一般电力变压器安置于变电站内, 长期处于静态环境。5) 车载变压器会承受较大的网压波动和电压冲击^[24], 电压波动范围为 19~29 kV, 允许电压偏差为 -24%~16%, 再生制动时, 网压可达到 32 kV, 而一般电力变压器的电压波动范围为 $\pm 5\%$ ^[8]。6) 车载变压器的负载为牵引变流器或整流器, 因此绕组中的电流含有较大的高次谐波^[25], 容易引起附加发热, 从而加速其绝缘介质老化。7) 车载变压器负载不停地波动, 其波动幅度变化大, 且负载情况与列车载重、速度、道路状况等因素有关, 而一般电力变压器的负载则相对稳定。8) 动车组和电力机车启动或运行中经过分相区时, 需经常断开和接通, 导致电压发生突变, 从而造成车载变压器因磁通饱和而出现励磁涌流现象^[26]。



1—上油箱; 2—下油箱左半部; 3—下油箱右半部; 4—平波电抗器;
5—主变压器器身; 6—滤波电抗器

图1 车载变压器油箱结构图

Fig.1 Structure diagram of the oil tank of on-board transformer

1.2 车载变压器绝缘性能影响因素

如 1.1 节所述, 车载变压器的绝缘因长期遭受电应力(网压波动、过分相)、热应力(激磁过电流、散热不良、谐波)、机械应力(振动冲击力、强电磁振动、短时电动力)及运行环境(氧、水分、振动、灰尘)等各种影响因素的协同作用而加速老化, 使得其电气和机械性能下降, 导致绝缘产生缺陷, 甚至出现诸多潜伏性故障^[27-29]。而车载变压器各部件的故障或潜伏故障可能又会导致其运行状态发生变化, 从而出现多重故障并发的情况^[9]。影响车载变压器正常运行的主要因素如图 2 所示。

另外, 动车组与电力机车车载变压器在安装方式、工作条件、运行环境、负载、结构等方面与普通电力变压器均截然不同, 导致其在正常状态和故障状态所表现出的特征也不同, 使得车载变压器状态评估和健康管理所表现出的特征与普通电力变压器也不同。车载变压器状态评估与健康管理的特征如下: 1) 网压波动与激磁涌流、机械振动、谐波等协同效应导致车载变压器的健康管理中存在诸多不确定性, 增加了其研究难度, 且各因素间的协同作用使得车载变压器温度持续累积, 造成其状态评估及诊断结果不准确。2) 车载变压器状态监测数据获取困难, 且监测的数据与其他数据关联紧密, 因 IC 提取能够表征其状态的信息更困难, 如车载变压器连续承受机械振动, 其振动信号除了来自铁芯、绕组的振动外, 还包括来自车体的振动等。3) 车载变压器本身具有的特殊性, 如网压波动与激磁涌流、机械振动、谐波等协同效应, 负荷的冲击性、不平衡性和非线性, 以及车载变压器特殊的绝缘结构等, 决定了无法使用常规检测技术。4) 由于车载变压器状态监测及诊断装备工作在快速移动、频繁振动和

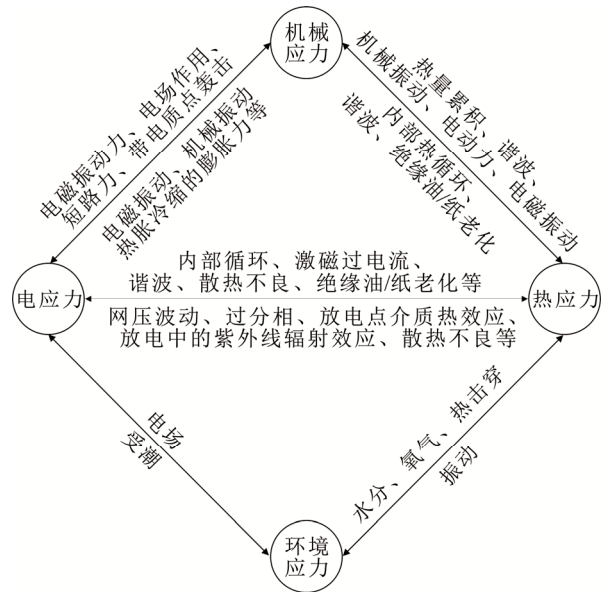


图2 影响车载变压器正常运行的主要因素

Fig.2 Main factors affecting the operation of on-board traction transformers

强电磁干扰的恶劣环境下, 从而导致监测诊断精度难以保证。5) 车载变压器具有特殊运行工况及绝缘结构, 其老化机制尚未明确, 如车载变压器采用的是 Nomex 纸, 而普通电力变压器采用的是普通纤维素纸, 两者绝缘纸的结构完全不同, 老化机理、分解过程及降解产物完全不同。

因此, 需结合车载变压器固有特征, 尝试使用机器学习、统计科学、信息科学和电气科学等方法, 以期车载变压器的健康状态的分析与维修管理提供可行方案和解决途径。

2 车载变压器 PHM 体系结构及工作流程

2.1 PHM 体系结构

PHM 技术可预测整个系统的剩余使用寿命 (remaining useful life, RUL), 从而改善系统的运行可靠性^[9,30]。国内外研究学者已从 PHM 概念与内涵^[30]、方法策略^[31-32]、方法体系与框架^[31]、标准^[33]等方面进行了初步研究。文献[15,32-33]介绍了 PHM 的概念与内涵、功能及结构, 指明 PHM 标准应规范的内容, 并介绍了国内外的研究现状; 文献[34-36]结合故障预测与健康管理的科技发展过程, 阐述了 PHM 的应用价值; 文献[37]对 PHM 方法的研究现状、分类及主要任务进行了研究。

上述文献从不同角度为车载变压器 PHM 的研究和发展提供了重要的参考价值。但仍存在复杂部

件或系统退化和剩余寿命模型构建困难, PHM 各个研究内容分散、逻辑关系不清, 当前对车载变压器 PHM 相关研究较少且车载变压器状态监测数据单一, 大部分基于 DGA 数据进行分析等问题。车载变压器的状态评估、故障诊断、故障预测大多基于 DGA 数据进行分析, 车载监测/检测数据、跟踪试验数据、数字仿真数据、运行数据(温度、振动信号)等信息很少被用于车载变压器的 PHM 中。

因此, 本文给出适合车载变压器 PHM 技术的体系结构如图 3 所示。利用先进的传感技术, 监测车载变压器的运行温度、振动、电压、电流等运行信息, 结合既有的车载监测/检测数据、历史失效数据、跟踪试验数据、数字仿真、产品参数等数据, 进行数据融合, 并对其进行清洗、去噪, 提取能够表征车载变压器健康状态的相关特征; 借助智能算法和模型, 评估车载变压器当前的运行状态及退化程度, 进行故障识别及定位, 预测车载变压器未来的健康状态和剩余寿命情况, 给出维修决策, 从而提高其效率和效能, 降低维修费用, 减少事故率。

2.2 PHM 工作流程

结合 2.1 节车载变压器 PHM 方法体系, 本文归纳了车载变压器的 PHM 工作流程, 如图 4 所示。车载变压器 PHM 一般性流程包括以下 6 个部分。

1) 状态监测: 是 PHM 流程的基础和源头, 有效地获取车载变压器的可用数据资源, 包括运行数据、车载监测/检测数据、历史失效数据、跟踪试验数据、数字仿真等数据, 通过降噪、清洗等数据预

处理技术, 提取能够表征车载变压器状态的特征量, 作为状态评估、故障诊断、故障预测的输入。

2) 状态评估: 根据获得的车载变压器特征参量, 确定车载变压器对应的失效阈值或退化模式的判断条件, 构建 HI 评估模型, 评估车载变压器状态演变规律、性能退化程度及当前健康状态, 明确是否对车载变压器进行诊断。

3) 故障诊断: 判定车载变压器状态是否异常, 若异常, 识别车载变压器是否已经发生故障及处于何种故障类型, 排查故障部位及原因, 进而采取相应的维修策略。另外, 其诊断结果作为故障预测的输入, 确定后续发生该故障的时间。

4) 故障预测: 当车载变压器状态未发生异常, 采用预测方法, 预测车载变压器未来的健康状态, 并估计其剩余使用寿命 RUL, 为未来维修策略的制定提供参考。

5) 维修策略制定与选择: 根据建立的风险评估模型评估车载变压器的运行风险, 设立风险阈值。若运行风险小, 则车载变压器继续运行; 若风险较大, 则应该进行维修策略的选择。

6) 全寿命周期可靠性模型与状态修技术验证: 验证评估方法、诊断方法、预测方法及风险评估方法及模型的适应性能及实际性能, 并进一步优化车载变压器关键零部件修程修制维修策略, 保证动车组与机车运用检修的可靠性、可用性、可修性和经济性。

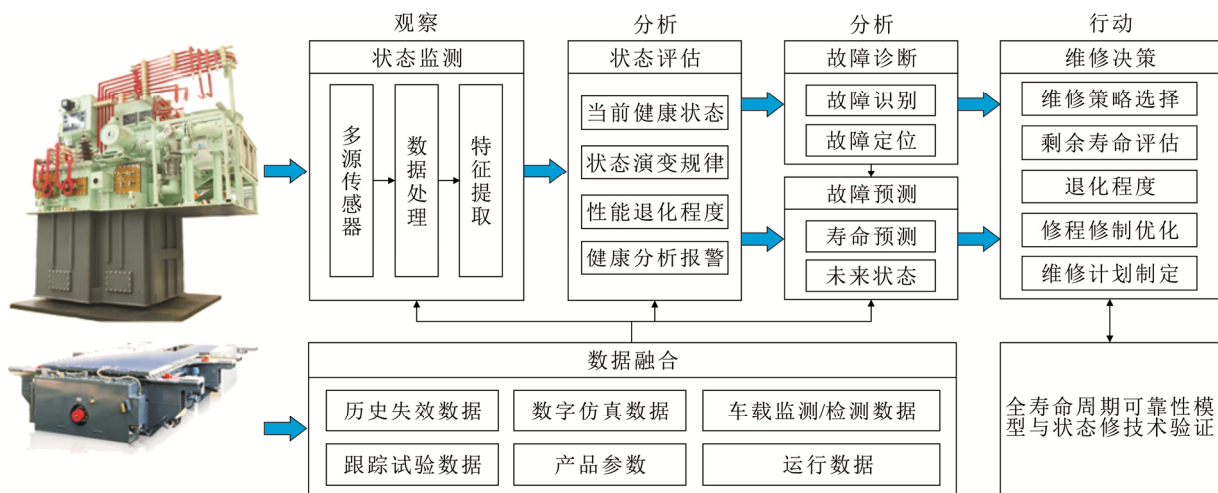


图 3 车载变压器 PHM 体系结构图

Fig.3 Framework for PHM of on-board traction transformers

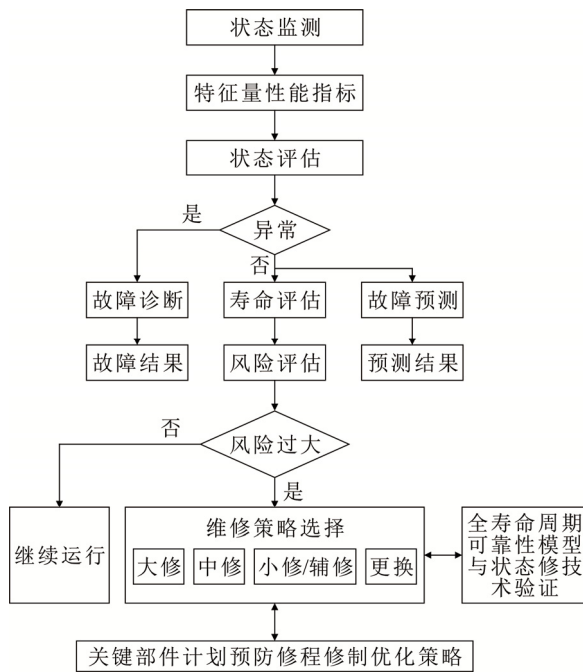


图4 PHM 工作流程

Fig.4 Work flowchart of PHM

3 车载变压器 PHM 研究现状及其存在的问题

根据 2.1 节与 2.2 节给出的车载变压器体系结构与工作流程,进一步从状态监测、状态评估、故障诊断、故障预测与维修决策 5 个方面,分析了车载变压器的研究现状及研究趋势。

3.1 状态监测

文献[38-39]采用油中溶解气体数据,判断 SS3 型电力机车牵引车载变压器因高压引出线绝缘距离小而导致的局部电弧兼高温过热故障;文献[40]结合电力机车车载变压器运用情况,给出控制油温的相应措施,并结合气相色谱分析,迅速判断车载变压器内部故障;文献[41]针对牵引变压器特殊的绕组连接、铁芯结构和电气特性,构建了 Scott 牵引变压器热路温升计算模型;文献[42]构建了高速电力机车车载变压器油箱三维温度场模型,利用有限元分析方法计算油箱稳态温度场分布;文献[43]构建了电力机车车载变压器仿真模型,分析谐波条件下车载变压器的铜损和铁损特性;文献[44]利用有限元方法构建了电力机车车载变压器三维实体模型,计算对应的场强分布,并给出了优化车载变压器绝缘结构的建议;文献[45]将微量水分分析方法应用到电力机车车载变压器维护中,并对绝缘油含水量检测周期、方法、质量指标等作了初步探讨;文献[7,46-47]为提高电力机车/动车组的行车安全,

提出了基于输出电流和输入输出电压差间的关系轨迹的车载变压器绕组状态在线监测方法;文献[48]针对牵引变压器铁芯多点接地故障问题,采用气相色谱分析方法监测牵引变压器铁芯早期故障;文献[49-50]西南交通大学吴广宁等人研制出我国第一套基于双路传感器阵列自适应的牵引变压器监测技术,采用信息融合技术实现了传感器阵列的自诊断,消除了故障气体在油纸中快速交替溶解对设备状态评估带来的不确定性,该设备为车载变压器的监测系统研究奠定了基础。文献[51]中南大学陈特放等人提出一种基于分布参数模型的非侵入式电力机车车载变压器绕组监测方法,理论分析正常运行和异常运行时车载变压器的输入输出电压与输入电流之间的关系,对比这 2 种情况下的轨迹差别,从而提高车载变压器绕组监测的准确性。

通过上述研究发现,车载变压器的健康状态监测存在下述问题:1) 状态监测数据大多是基于油中溶解气体(DGA)数据、采集数据及健康状态评价所依据的信息单一,对健康状态进行评价不够全面、准确,难以分类多重故障。2) 未考虑监测数据间的关联关系,可能造成对车载变压器健康状态的误判。3) 大多利用了车载变压器当前的运行状态值,未考虑其前期出厂试验值、历史监测数据、故障分析记录、大修/中修/小修/辅修等入库试验数据,缺乏对其全寿命周期数据及健康状态的全面把握。4) 车载变压器与普通电力变压器的工作条件、运行环境、负载和结构等不同,若采用普通电力变压器的监测方式进行诊断分析,易出现误判断,降低诊断精度。

为此,可借鉴普通电力变压器成熟的状态监测技术,如图 5 所示,主要有离线监测法和在线监测法,结合车载变压器特有的运行特征,发展车载变压器的状态监测技术,如绝缘油性能(油介损、油中水分、糠醛和酸含量)、绕组和铁芯的电气和机械性能(局部放电、铁芯绝缘电阻、绕组绝缘介损、绕组变形、铁芯接地电流、绝缘电阻/吸收比、绝缘纸/纸板聚合度)、频域介电特性(绕组绝缘频域介电谱、频域响应分析曲线)、声波/振动、运行温度等监测技术,为车载变压器的状态评估、故障诊断、故障预测提供数据基础。

3.2 状态评估

车载变压器是油浸式变压器,油浸式变压器状态评估重点研究状态量与状态值之间的映射关系,主要从评估信息、评估方法及评估内容、评估体系、

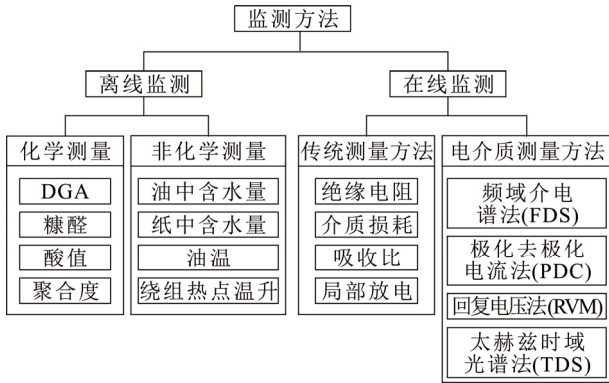


Fig.5 Monitoring method and data of power transformer

状态评级几个方面展开了研究。

1) 评估信息方面。油浸式变压器状态评估信息一般主要有: 油中溶解气体^[52-54]、电气实验数据^[55-59]、油质实验数据^[60-61]、运行数据^[62]、历史数据^[63]。其中, 油中溶解气体数据包括 H₂、CH₄、C₂H₂、C₂H₄、C₂H₆、CO、CO₂ 等的体积分数; 电气实验数据包括套管和绕组介损、绝缘电阻、铁芯接地电流、局部放电量、频域/时域介电特性等数据; 油质实验数据包括油中介质损耗、油中水分质量分数、糠醛质量分数、酸质量分数等数据; 运行数据包括负荷水平、运行温度、环境温度、声波/振动等数据; 历史数据包括检修记录、家族缺陷、短路情况、投运时间等数据。

2) 评估方法及评估内容。依据上述评估信息, 采用不同的评估方法, 即模糊理论^[64]、DS 证据理论^[64]、支持向量机(support vector machine, SVM)^[65]、灰关联分析^[66]、贝叶斯^[67]、云理论^[62]等方法, 构建基于状态因子(condition index, CI)与健康因子(health index, HI)的评估模型, 评估油浸式变压器油纸绝缘系统老化状态、绕组振动与变形状态^[68]、剩余寿命^[67]等, 判断变压器处于正常状态还是异常状态, 并对其进行分类或健康状况分级。

3) 评估体系。文献[62]以监测数据指标作为划分的依据, 选取油中溶解气体、电气实验数据、油质实验数据、运行数据和历史数据 5 种数据作为目标层指标; 选取 H₂ 体积分数等 25 个指标作为指标层指标, 建立电力变压器状态评估指标体系如图 6 所示; 文献[69]以监测的零部件作为划分的依据, 选取套管、绕组、铁芯、绝缘油等零部件作为项目层, 以油中溶解气体、油质试验数据等作为子项目层, 构建了牵引变压器的状态评估体系; 总体上讲,

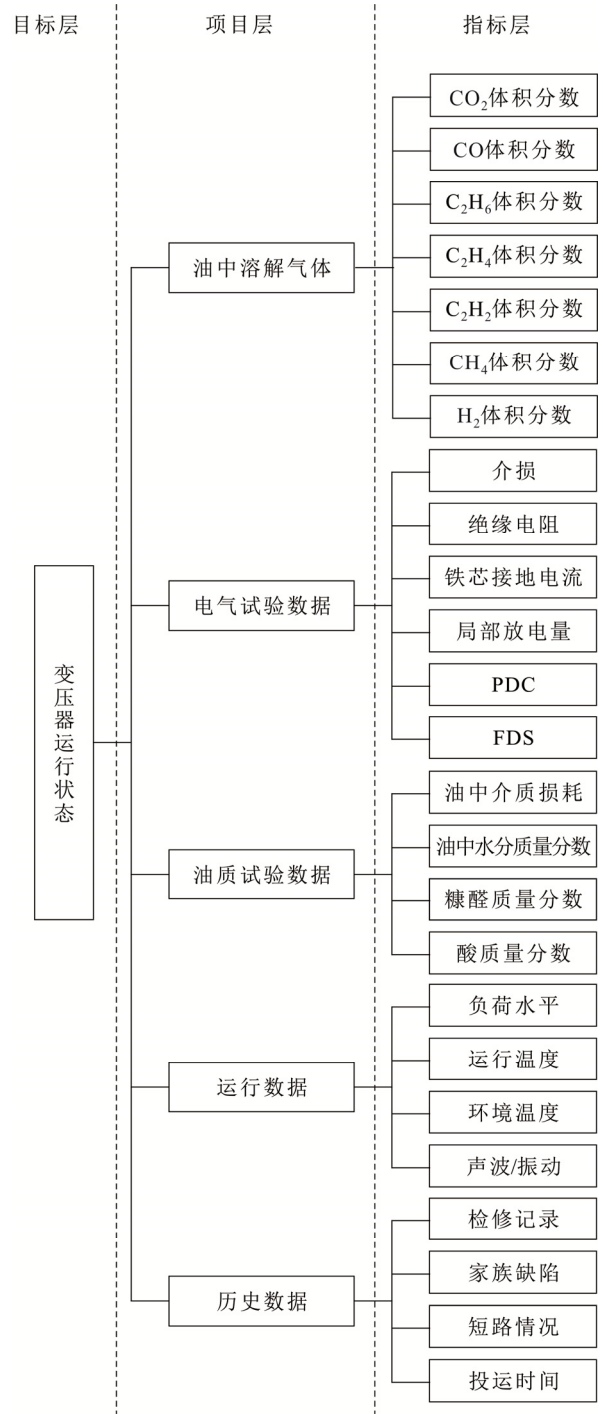


图6 普通油浸式变压器状态评估体系

Fig.6 Status evaluation index system of oil-immersed transformer

都是依据状态评估信息选取的原则, 建立一套完整的从指标层—项目层—目标层的普通油浸式变压器评估体系。

4) 状态评级。文献[63]将电力变压器状态划分为 4 个状态, 即: 正常、注意、异常和严重状态, 采用半梯模型对其进行量化, 并进行同向化处理,

使其量化结果均位于[0,1]区间内；文献[52]参考相关导则和已有研究成果，将普通电力变压器状态划分为4个状态，采用相对劣化度进行归一化处理，使其数值分布在[0,1]之间。文献[64]提出基于百分制的设备健康状态评分方案，该方案在评分操作中考虑了静态分值和动态分值2个指标，引入设备状态和试验项目的百分制评价方法，打破了是非制。

通过上述研究发现，车载变压器状态评估存在以下问题：1) 现有状态评估技术主要针对的是普通电力变压器，对于车载变压器的状态评估鲜有研究。2) 网压波动与激磁涌流、机械振动、谐波等协同效应导致车载变压器健康管理中存在诸多不确定性，造成其状态评估结果不准确。3) 车载变压器状态评估数据获取困难，且获取的数据与其他的数据关联紧密，提取能够表征其状态的信息较困难。4) 由于车载变压器状态评估装备工作在快速移动、频繁振动和强电磁干扰的恶劣环境下，从而导致评估精度难以保证。5) 车载变压器具有特殊运行工况及绝缘结构，其老化评估机制尚未明确。

3.3 故障诊断

对于牵引变压器故障诊断，文献[70]以收集的DGA数据为基础，利用灰关联分析具有处理小样本、贫信息的特点，构建了一种改进的灰关联分析模型，避免了局部关联和信息损失的缺陷；文献[71]在传统油中溶解气体分析方法的基础上，构建了牵引变压器全局故障诊断模型；文献[72]综合专家系统和基于模型的诊断方法的优势，诊断牵引变压器故障；文献[73]结合罗杰斯比值法，基于自适应粒子群优化算法和最小二乘支持向量机，提出一种牵引变压器绝缘故障诊断模型。

对于车载变压器故障诊断，文献[38]基于DGA数据，判断SS3型电力机车主变压器局部放电兼高温过热故障；文献[4]基于车载变压器特殊的工作环境和工作特点，利用其运行时的电压、电流数据，提出基于协调粒子群优化的小波神经网络方法诊断电力机车主变压器故障；文献[7]在不改变电力机车系统原有结构的前提下实现对主变压器绕组故障的实时检测，提出一种基于分布参数模型的非侵入式交流机车主变压器绕组故障在线诊断方法；文献[27]将色谱数据和电气实验数据作为小波神经网络的输入量，构建基于混合粒子群算法的小波神经网络模型。

通过上述研究发现，车载变压器故障诊断存在下述问题：1) 诊断数据种类少、数据量小，未充分

利用车载变压器的车载监测/检测信息、历史失效信息(大修、中修、小修/辅修信息)、运行信息、跟踪试验数据、数字仿真数据，使得诊断精度降低，诊断误差较大。2) 随着监测/检测设备增多及种类的增大，使得监测数据大量增加，多源融合数据和高维数据的处理成为急需解决的难题。3) 由于传感器技术的局限性及知识的不精确性，致使诊断信息具有模糊性，降低了故障诊断的准确性。4) 由于车载变压器结构的复杂性及运行工况的恶劣性，在电-热-机械-环境老化协同效应下加速其零部件绝缘快速老化，使得诊断中存在诸多的不确定性，易出现诸多潜伏性故障；5) 车载变压器诊断方法大多采用普通电力变压器诊断方法，使得诊断针对性不强，诊断精度降低；为此，未来车载变压器故障诊断应结合自身的特点，以全寿命周期完备数据为基础，进行多数据融合的深度故障诊断。

3.4 故障预测

故障预测中主要以油中溶解气体DGA气体体积分数^[74]作为预测输入信息，采用不同的预测方法构建不同的预测模型，得到下一期的气体体积分数，具体的预测流程如图7所示。近年，有学者尝试采用温度、振动等信息作为预测输入数据，如文献[75]提出一种基于特征点温度监视的油浸式变压器在线故障预测方法；文献[76]引入振动信号，构建云环境下电力变压器运行状态预测模型和短路预测模型。

当前油浸式变压器预测方法大体分为3类：基于模型、基于数据驱动、基于统计可靠性的故障预测技术^[30]。从系统的数学模型、数据的采集与处理、统计概率特性3种不同的角度研究，主要进行过热性故障预测^[77]、内部流场与温度场模拟^[75]、多重故障及短期故障预测^[78]。

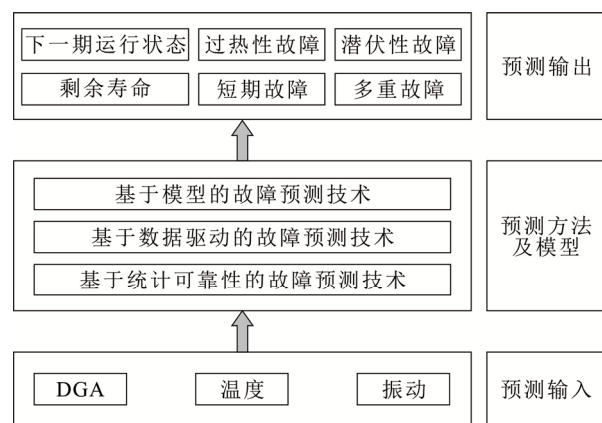


图7 油浸式变压器故障预测流程

Fig.7 Fault prediction flowchart of oil-immersed transformer

然而, 上述故障预测大多是针对普通油浸式变压器的研究, 对车载变压器故障预测鲜有研究。文献[79]尝试利用气相色谱分析法判断电力机车车载变压器潜伏性故障, 通过分析发现, 沿用现有的普通变压器故障预测的标准及方法, 降低了车载变压器预测的准确率。另外, 车载变压器缺乏相应的故障预测理论与技术, 且其状态监测装备工作在快速移动、频繁振动的恶劣环境下, 导致预测精度难以保证。

为此, 需借鉴电力变压器已有的故障预测技术经验, 结合车载变压器的特殊运行特征, 通过高性能传感技术和图像处理技术获得更多的预测数据, 并利用深度学习挖掘各特征量与故障点及故障趋势间的关联关系。处理高维数据的特征提取及数据间的联合概率分布, 并解决复杂系统建模困难等问题是未来的发展趋势。

3.5 维修决策

文献[27]以动车组车载变压器为研究对象, 分析车载变压器的故障模式、故障原因、故障影响及故障检测方法, 对车载变压器维修决策方面具有指导性作用; 文献[45]结合电力机车车载变压器的实际情况, 对绝缘油含水量检测周期、方法、质量指标等作了初步探讨; 文献[80]对试验动车组的车载变压器出口油温进行了统计和分析, 结合动车组车载变压器的故障报警逻辑, 确定了车载变压器散热装置维修决策优化方案的故障阈值和处理措施。

通过分析发现: 车载变压器的维修决策研究较少, 且车载变压器实际中维修模型输入数据量少, 并不完整, 缺乏系统必要的状态数据、故障维修数据; 决策过程缺乏模型支持, 且大多数决策基于定性判断和分析者的经验; 同时, 目前车载变压器大多采用传统的定期检修方式, 这类变压器故障率曲线并不完全符合“浴盆曲线”, 使得传统的定期维修方式缺乏科学的理论依据, 易出现维修过度或维修不足等现象, 从而造成维修资源的极大浪费^[81-82]。

鉴于此, 需借鉴已有的电力设备维修决策技术经验, 依据车载变压器特殊运行特征, 结合《电力机车大修规程》及原铁道部、铁路总公司补充发布的各类技术管理文件, 提取车载变压器状态监测数据; 然后以单位时间成本最小、平均使用可用度最大、精准维修为决策目标, 利用深度强化学习获取在复杂高维状态空间中的感知决策能力; 在此基础

上, 构建状态监测数据、运行时间、运行里程和故障率彼此相关的多任务多目标决策模型, 以确定安全、经济、可靠、维修、可监测的最优预测性维修策略, 从而提高决策的准确性与精确度, 逐步推动现有的铁路动车组与机车计划预防检修制度的改革、建立全新的铁路动车组与机车状态修检修制度与技术标准, 为我国铁路检修行业打开新局面提供有力的技术支撑。

4 待解决的问题

由前文知, 车载变压器一般安装于动车组与机车车底, 受机车轴重与安装位置的严格限制, 在运行过程中受过电压冲击、散热不良、谐波及运行环境的影响, 与普通电力变压器有所不同, 致使其绝缘系统特性发生变化。为此, 研究者需进一步地加强和完善车载变压器 PHM 研究。

4.1 网压波动与激磁涌流

动车组与电力机车频繁的启动、运行、制动及动车组与机车运行数量变化时, 车载变压器不断地承受过电压冲击。一方面, 如此频繁、集中的重复作用使 Nomex 纸纤维结构劣化, 产生新生物物质附着在绝缘纸表面, 会加深表面结构的粗糙度, 给车载变压器油纸绝缘系统带来损伤。另一方面, 在车载变压器高压绕组上产生十分复杂的电磁振荡过程, 会使得高压绕组局部电场严重畸变, 其引入的空间电荷累积效应导致其绝缘损伤, 甚至失效^[23,83]。此外, 还会使车载变压器铁芯磁密大大增加, 励磁电流大幅增加, 致使车载变压器的绝缘电气性能降低, 严重时烧毁车载变压器。

因此, 在实施车载变压器 PHM 过程中, 综合考虑电压冲击与激磁涌流对车载变压器健康状态的影响十分必要, 但针对上述问题的相关研究较少。需从机理与数字仿真层面分析电压冲击与激磁涌流作用下车载变压器油纸绝缘和高压绕组的电老化累积效应, 揭示其在频繁网压冲击与激磁涌流作用下的累积击穿特性和失效机制, 消除其给车载变压器绝缘可靠性带来的隐患, 为考虑累积效应的多因素车载变压器绝缘寿命评估提供理论支撑。

4.2 散热不良与高次谐波引起的过热问题

动车组与电力机车车载变压器一般安装于机车车底, 受机车轴重与安装位置的严格限制, 其通风、冷却装置极易处于环境温度高、散热片被灰尘覆盖的环境下, 使得车载变压器散热不良^[23,83], 引

起过热，不仅使绝缘油老化变质，也会破坏 Nomex 纸的纤维形态和分子结构，加速其老化分解，降低机械强度和电气强度，影响其绝缘寿命。另外，牵引变流器与牵引电机作为车载变压器的负载，使得牵引绕组中含有较大的高次谐波。这不仅会使车载变压器的电压发生畸变，产生高频次、大幅值谐波过电压^[43]，而且会使得车载变压器内部产生谐波损耗，累积的热量使车载变压器温度升高，加速绝缘系统老化，从而加快局部放电的发展。

文献[43]尝试计算谐波条件下机车主变压器的铜耗及铁芯损耗功率，其分析结果可为车载变压器的设计优化提供参考。文献[84]提出发展轻量化、小型化、智能化、数字化、高可靠性的车载变压器已成必然的发展趋势。但并没有探明谐波与散热不良、温升之间的关系，也没有探索出耐热性能更好的绝缘材料。因此，谐波影响下的车载变压器绝缘研究仍需更为深入的探索。

4.3 运行环境问题

车载变压器较一般电力变压器工作条件恶劣，除了受到网压波动、激磁涌流、散热不良、谐波等运行条件的影响外，还要承受来自走行部 3 个方向的较大机械振动冲击。因此，搭建车载变压器环境-机械老化平台，模拟温度及机械振动等实际环境引起的老化问题，分析其油纸绝缘系统、绕组、铁芯的环境-机械老化机理及老化特性，研究安全、抗振的油箱材料及高机械强度、耐高温的先进绝缘材料，为车载变压器 PHM 提供理论依据。

在实施车载变压器的 PHM 过程中，需综合考虑环境及机械振动因素对车载变压器健康状态的影响，但针对该问题的相关研究较少。需进一步采用先进的传感技术、跟踪试验、入库检测/监测技术、数字仿真试验研究车载变压器在振动、潮湿、超高温、超低温、运行时速、重载、脏污、酸碱性等特殊环境下的绝缘性能，这是未来的研究方向。

4.4 车载变压器的大数据问题

基于 4.1、4.2 和 4.3 节的内容，综合考虑网压波动、激磁涌流、散热不良、谐波及运行环境等影响因素，结合车载变压器结构，通过仿真和试验等方式主要研究车载变压器绝缘故障特征及性能指标，初步确定其绝缘性能为状态监测项点。主要监测指标包括：油中溶解气体、入库检测数据和绝缘油试验数据等跟踪实验数据，振动信号、运行温度、电流、电压等车载监测/检测数据，大修、中修、小

修/辅修等历史失效数据，负荷、环境温度等运行数据及多物理场数字仿真数据。利用各种先进的传感器及终端，采集反映车载变压器状态的静态/动态的多源、异构数据，呈现大数据特征，这与文献[85]对大数据的基本概念、结构类型及本质特征的阐述，及归纳电力大数据与电力变压器大数据特征的观点基本一致。图 8 展示了车载变压器的大数据多维特征。

4.4.1 车载变压器大数据的多源不确定性

文献[9,85-87]按数据结构的不同将数据类型分为结构化数据、非结构化数据和半结构化数据 3 类。现有的研究多以结构数据为基础，逐渐向结构化、半结构化与非结构化融合的趋势发展。

另外，由于各类传感器、测试仪获取的多源数据，具有量大、异构、质量层次不齐等特点，且传感技术的局限性及知识的不精确性，导致获取到的信息具有模糊性、随机性，使得进行 PHM 分析时数据质量不高^[9,39]。同时，由于车载变压器整体及内部结构的复杂性、运行工况的特殊性、退化状态的不确定性、故障类型多样化等特征，使得健康诊断与评估中存在诸多模糊性和不确定性。这些因素致使车载变压器 PHM 分析的精度及准确度降低。

为此，国内外学者已使用神经网络、证据理论、粗糙集、模糊理论、贝叶斯理论等方法解决了油浸式变压器诊断中存在的确定性问题，提高了数据决策的质量。然而，目前车载变压器 PHM 领域针对不确定性的研究大多处理一种类型的不确定性，仅局限于支持不确定性表达，无法同时解决多种类型的不确定性信息，而深入的对多类型的不确定信息量化、挖掘之间的关联性及其融合各种智能方法，是车载变压器进行 PHM 分析的关键。



状态信息			生命周期			零部件
油色谱分析仪	极化去极化分析仪PDC	水分测试仪	基本参数	运行参数	检修工艺	油箱
局放分析仪		介损测试仪	出厂参数	大修失效记录	检修标准	绕组
温度传感器		振动分析仪	结构形式	中修/小修失效记录	分析报告	铁芯
绕组变形测试仪		运行速度	设计参数	辅修失效记录	检修记录	变压器油
频域分析测试仪FDS	运行里程	运行时间	零部件尺寸参数	检修规程	退役	套管

图 8 车载变压器大数据多维特征

Fig.8 Multi-dimensional characteristics of on-board traction transformers

4.4.2 车载变压器大数据的深度融合与诊断

多源数据反映了车载变压器的多种特性, 如绝缘油性能、绕组和铁芯的电气和机械性能、局部放电相位分布(phase resolved partial discharge pattern, PRPD)谱图特性、整体频域介电特性、声波/振动特性、车载变压器内部电/热/磁/流场分布特性、历史失效规律等特性。如何利用这些信息, 建立混合融合模型, 及借鉴电力变压器已有的模型, 进行车载变压器大数据的信息深度融合, 提高数据的完整性、及时性、有效性、关联性和 PHM 的分析能力, 挖掘多源数据间内在关系, 为深度故障诊断提供数据基础。

另外, 车载变压器 PHM 深度诊断需从宏观到微观, 故障部位到故障原因进行分级深度诊断。然而, 针对故障诊断的研究, 多是变换不同的诊断方法, 对故障数据进行分类, 诊断过热、放电、过热兼放电等故障, 对维修人员的决策分析不够具体。为此, 华北电力大学李刚等人^[88-89]尝试采用深度置信网络(deep belief network, DBN)与证据理论相结合的方法, 构建电力变压器综合多级决策诊断模型, 结果表明该方法可以解决大量多源异构数据的融合与特征提取问题, 实现由故障部位到故障原因的分级深度诊断;

对于车载变压器的深度融合与故障诊断, 笔者借鉴电力变压器已有的经验, 结合车载变压器的特殊运行特征, 探索适合车载变压器的深度融合与故障诊断技术。文献[90-91]尝试提出基于 CPU 和 GPU 混合架构的异构高性能分布式计算框架, 并利用 CUDA 加速, 采用深度学习方法解决多源异构数据的深度分析问题, 通过增加网络层数和输入节点数, 加大深度学习规模, 提取特征知识。文献[92-94]尝试采用深度置信网络、深度自编码网络、深度神经网络方法对电力变压器进行诊断, 获得了较好的诊断效果。

5 结论

1) 车载变压器在结构、安装方式、运行环境、工作条件、负载等方面均与普通电力变压器不同。

2) 车载变压器长期运行于散热性差、连续振动冲击、过电压冲击、过载、强激磁电流、强电磁的特殊环境中, 论文总结分析了不同运行工况对车载变压器绝缘性能的影响机理。

3) 依据车载变压器的特征与绝缘性能的影响

因素分析, 结合现有研究存在的问题, 提出了车载变压器 PHM 体系结构和 workflows, 并阐明了 PHM 各周期的逻辑关系。

4) 从状态监测、状态评估、故障诊断、故障预测、维修决策几个方面阐述了车载变压器的研究现状及存在的问题, 并尝试给出了解决思路及研究方案。

5) 尝试拟利用最新的深度学习和强化学习方法解决车载变压器 PHM 中的多维异构数据及决策问题。

参考文献 References

- [1] DING F, ZHENG Y H, QI W. A reliability assessment method for traction transformer of high-speed railway considering the load characteristics[C]// 2015 IEEE Conference on Prognostics and Health Management. Austin, TX: IEEE, 2015: 104-111.
- [2] LIN S, SUN X J, DING F. A failure rate model for traction transformer based on PHM considering multiple factors[C]// 2016 Prognostics and System Health Management Conference. Chengdu, China: IEEE, 2016: 1-6.
- [3] 付强, 陈特放, 朱佼佼. 采用自组织 RBF 网络算法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1368-1375.
FU Qiang, CHEN Tefang, ZHU Jiaojiao. Transformer fault diagnosis using self-adaptive RBF neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1368-1375.
- [4] 朱佼佼, 陈特放, 付强. 车载牵引变压器智能故障诊断技术新研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(23): 27-32.
ZHU Jiaojiao, CHEN Tefang, FU Qiang. New research on intelligent fault diagnosis technology of on-board traction transformer[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(23): 27-32.
- [5] 周利军, 吴广宁. 牵引负荷对变压器绝缘老化和寿命损失的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 90-94.
ZHOU Lijun, WU Guangning. Effect of traction loads on insulation aging and loss-of-life of transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 90-94.
- [6] 戴晨曦, 刘志刚, 胡珂珽, 等. 基于模型与模糊 Petri 网融合的高铁牵引变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 26-32.
DAI Chenxi, LIU Zhigang, HU Keting, et al. Fault diagnosis for traction transformer of high speed railway on integration of model-based diagnosis and fuzzy petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 26-32.
- [7] 田睿, 伍珣, 成庶, 等. 非侵入式机车主变压器绕组故障在线诊断方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 143-149.
TIAN Rui, WU Xun, CHENG Shu, et al. Non-invasive on-line diagnosis method for winding faults of main transformer in AC electric locomotive[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 143-149.
- [8] 付强. 电力机车主变压器故障诊断技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 14-16.
FU Qiang. The research on fault diagnosis technology of electric locomotive main transformer[D]. Changsha, China: Central South University, 2013: 14-16.
- [9] 李刚, 于长海, 刘云鹏, 等. 电力变压器故障预测与健康管理:

- 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 156-167.
- LI Gang, YU Changhai, LIU Yunpeng, et al. Challenges and prospects of prognostic and health management for power transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 156-167.
- [10] 中国铁路总公司运输局. 铁路动车组运用维修规程[M]. 北京: 铁道出版社, 2007.
- China Railway Corporation Transportation Bureau. Railway EMU use maintenance procedures[M]. Beijing, China: Railway Publishing Press, 2007.
- [11] 贾武通, 王治强. 铁道机车车辆检修与维护[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2015.
- JIA Wutong, WANG Zhiqiang. Railway locomotive vehicle maintenance and maintenance[M]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University Press, 2015.
- [12] 何正友, 程宏波. 高速铁路牵引供电系统健康管理及故障预警体系研究[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 259-264.
- HE Zhengyou, CHENG Hongbo. Research on health management and early warning system for traction power supply system of high-speed railway[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 259-264.
- [13] 马宁, 吕琛. 飞机故障预测与健康管理体系研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(增刊1): 207-209.
- MA Ning, LÜ Chen. Research on PHM architecture of aircraft[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(Supplement 1): 207-209.
- [14] LIU X, SONG P, YANG C, et al. Prognostics and health management of bearings based on logarithmic linear recursive least-squares and recursive maximum likelihood estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1549-1558.
- [15] 马剑, 吕琛, 陶来发, 等. 船舶主推进系统故障预测与健康管理体系设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(增刊1): 119-124.
- MA Jian, LÜ Chen, TAO Laifa, et al. Design of prognostics and health management for marine main propulsion system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(Supplement 1): 119-124.
- [16] TSUI K L, CHEN N, ZHOU Q, et al. Prognostics and health management: a review on data driven approaches[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2015: 1-16.
- [17] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理综述[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 481-495.
- PENG Yu, LIU Datong. Data-driven prognostics and health management: a review of recent advances[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 481-495.
- [18] 许荣华. SS4B型电力机车(7)—主变压器及电抗器[J]. 机车电传动, 1997(4): 26-29.
- XU Ronghua. SS4B electric locomotive(7)-main transformer & reactor[J]. Electric Drive for Locomotive, 1997(4): 26-29.
- [19] 杨朝晖, 杨守君. HXD3型交流传动货运电力机车主变压器[J]. 电力机车与城轨车辆, 2009, 32(6): 5-7.
- YANG Zhaohui, YANG Shoujun. Main transformer for type HXD3 AC drive freight electric locomotive[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2009, 32(6): 5-7.
- [20] BOSE B. Adjustable speed AC drive systems[M]. New York, USA: IEEE Press Selected Reprint Series, 1981.
- [21] 凌云, 余明杨. 电力机车主变压器综合测试及故障诊断系统[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(5): 93-96.
- LING Yun, YU Mingyang. Integrated tests and fault diagnosis system for the main transformer of electric locomotive[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(5): 93-96.
- [22] 许荣华. 交流传动机车和动车主变压器综述[J]. 机车电传动, 2001(3): 1-4.
- XU Ronghua. Survey of main transformer for AC drive locomotives and railcars[J]. Electric Drive for Locomotive, 2001(3): 1-4.
- [23] 马灵宝, 姜悦礼, 张金平. 交流传动机车牵引变压器设计时应考虑的几个问题[J]. 变压器, 2000(5): 22-25.
- MA Baolu, JIANG Yueli, ZHANG Jinping. Questions on traction transformer design of AC driving locomotive[J]. Transformer, 2000(5): 22-25.
- [24] ZHU J J, CHEN T F, FU Q. The research and application of wnn in the fault diagnosis technology of electric locomotive main transformer[C] //The 7th IET International Conference on Power Electronics Machines and Drives. Manchester, UK: IET, 2014: 1-6.
- [25] 付强, 陈特放, 朱佼佼. 基于HPSO-WNN的牵引变压器故障诊断算法研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(9): 26-32.
- FU Qiang, CHEN Tefang, ZHU Jiaojiao. Research on traction transformer faults diagnosis algorithm based on HPSO-WNN[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(9): 26-32.
- [26] 王慧芳, 何奔腾. 电气化铁路负荷最大电流突变量的估算方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 79-83.
- WANG Huifang, HE Benteng. Calculation method of maximal current mutation in electrical railway load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 79-83.
- [27] 刘诗佳, 杨宏博, 王华胜, 等. 动车组主变压器故障模式影响分析[J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(1): 73-78.
- LIU Shijia, YANG Hongbo, WANG Huasheng, et al. Failure mode effects analysis of EMU traction transformer[J]. Railway Locomotive & CAR, 2014, 34(1): 73-78.
- [28] SHROFF D H, STANNETT A W. A review of paper aging in power transformers[J]. IEE Proceedings C of Generation, Transmission and Distribution, 1985, 132(6): 312-319.
- [29] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 144-154.
- [30] 彭宇, 刘大同, 彭喜元. 故障预测与健康管理技术综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 1-9.
- PENG Yu, LIU Datong, PENG Xiyuan. A review: prognostics and health management[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(1): 1-9.
- [31] KHAN S, YAIRI T. A review on the application of deep learning in system health management[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 107: 241-265.
- [32] MING Z L, SHENG L, DING F, et al. Design of the prognostics and health management platform of high-speed railway traction power supply equipment[C] //2017 Prognostics and System Health Management Conference. Harbin, China: IEEE, 2017: 1-7.
- [33] 景博, 汤巍, 黄以锋, 等. 故障预测与健康管理相关标准综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1301-1307.
- JING Bo, TANG Wei, HUANG Yifeng, et al. Summary of PHM system standards[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(12): 1301-1307.
- [34] VACHTSEVANOS G, LEWIS F, ROEMER M, et al. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems[M]. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [35] 曾声奎, PECHT M G, 吴际. 故障预测与健康管理(PHM)技术的现状与发展[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 626-632.
- ZENG Shengkui, PECHT M G, WU Ji. Status and perspectives of prognostics and health management technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 626-632.
- [36] LEE J, WU F, ZHAO W, et al. Prognostics and health management design for rotary machinery systems-reviews, methodology and appli-

- cations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 42(2): 314-334.
- [37] SUTHARSSAN T, STOYANOV S, BAILEY C, et al. Prognostic and health management for engineering systems: a review of the data-driven approach and algorithms[J]. The Journal of Engineering, 2015, 7(1): 9-10.
- [38] 杨景艳, 吴娟, 何宏群. SS3型电力机车牵引变压器油中溶解气体分析及故障诊断[J]. 机车电传动, 2008(1): 77-78.
YANG Jingyan, WU Juan, HE Hongqun. Dissolved gas analysis and fault diagnosis of traction transformer for SS3 electric locomotives[J]. Electric Drive for Locomotive, 2008(1): 77-78.
- [39] 盛进路, 吴广宁, 周利军, 等. 牵引变压器绝缘在线监测技术研究[J]. 中国测试技术, 2006, 32(2): 127-129.
SHEN Jinlu, WU Guangning, ZHOU Lijun, et al. Study on on-line monitoring technique of traction transformer insulation[J]. China Measurement Technology, 2006, 32(2): 127-129.
- [40] 李霞. 控制机车主变压器油温的必要性及改进措施[J]. 铁道机车车辆, 2004, 24(4): 53-55.
LI Xia. Necessity and measure to ameliorate oil temperature control of locomotive main transformer[J]. Railway Locomotive & CAR, 2004, 24(4): 53-55.
- [41] 周利军, 吴广宁, 汤浩, 等. 计算 Scott 牵引变压器内部温升的热路模型法[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 136-139.
ZHOU Lijun, WU Guangning, TANG Hao, et al. Heat circuit method for calculating temperature rise of Scott traction transformer[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 136-139.
- [42] 李季, 罗隆福, 许加柱. 电力机车主变压器油箱三维温度场有限元分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 21-23.
LI Ji, LUO Longfu, XU Jiazhu. Finite element analysis of the 3D thermal field of main transformer oil tank of electric locomotive[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 21-23.
- [43] 董安平, 艾兵, 吴广宁, 等. 交流传动机车主变压器谐波损耗分析[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 98-103.
DONG Anping, AI Bing, WU Guangning, et al. Analysis on harmonics losses of main transformer of AC drive locomotive[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 98-103.
- [44] 朱丹, 杨朝晖, 贾鹏, 等. JQFP-10160/25型电力机车主变压器绝缘结构电场分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2016, 39(4): 18-20.
ZHU Dan, YANG Zhaohui, JIA Peng, et al. Analysis on electrical field of insulation structure in type JQFP-10160/25 main transformer of AC drive electric locomotive[J]. Electric locomotives & Mass Transit Vehicles, 2016, 39(4): 18-20.
- [45] 刘新良. 微量水分分析在电力机车主变压器维护中的应用[J]. 机车电传动, 1999(2): 32-34.
LIU Xinliang. Application of trace moisture analysis in maintenance of main transformer of electric locomotive[J]. Electric Drive for locomotive, 1999(2): 32-34.
- [46] BHOWMICK S, NANDI S. Online detection of an interturn winding fault in single-phase distribution transformers using a terminal measurement-based modeling technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 1007-1015.
- [47] 朱佼佼, 陈特放, 付强, 等. 一种新的交流机车主变压器绕组状态在线监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2280-2288.
ZHU Jiaojiao, CHEN Tefang, FU Qiang, et al. A new online status monitoring method for the windings of AC locomotive main transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2280-2288.
- [48] SONG J, LIN X N, ZHENG Y, et al. Traction transformer core multipoint grounded fault on-line monitoring system[C]//Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists. Hong Kong, China: IAE, 2014: 17-20.
- [49] 周利军, 吴广宁, 周志成, 等. 绝缘油中多组分气体在线监测装置[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(4): 141-144.
ZHOU Lijun, WU Guangning, ZHOU Zhicheng, et al. On-line monitoring device for multi-component gases dissolved in insulation oil[J]. China Railway Science, 2007, 28(4): 141-144.
- [50] 周利军, 吴广宁, 汤浩, 等. 牵引变压器油中溶解气体的自适应监测方法及其装置: 101059525[P]. 2007-05-16.
ZHOU Lijun, WU Guangning, TANG Hao, et al. Adaptive monitoring method and device for dissolving gas in traction transformer oil: 101059525[P]. 2007-05-16.
- [51] 朱佼佼, 陈特放, 付强, 等. 一种新的机车主变压器铁心状态在线监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5688-5695.
ZHU Jiaojiao, CHEN Tefang, FU Qiang, et al. A new online status monitoring method for iron cores of locomotive main transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5688-5695.
- [52] 赵文清, 朱永利. 电力变压器状态评估综述[J]. 变压器, 2007, 44(11): 9-12.
ZHAO Wenqing, ZHU Yongli. Summary of condition assessment for power transformer[J]. Transformer, 2007, 44(11): 9-12.
- [53] LI Y L, ZHAO X Z. Estimation of dissolved gas concentrations in transformer oil from membranes[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(2): 30-33.
- [54] 李春茂, 周妹末, 刘亚婕, 等. 基于邻域粗糙集与多核支持向量机的变压器多级故障诊断[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3474-3482.
LI Chunmao, ZHOU Momo, LIU Yajie, et al. Multi-level Fault diagnosis of transformer based on neighborhood rough set and multiple kernel support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3474-3482.
- [55] 辛东立, 姚梦熙, 徐正, 等. 羧酸含量对变压器绝缘纸老化速度的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2587-2594.
XIN Dongli, YAO Mengxi, XU Zheng, et al. Influence of acid content on the aging rate of insulating papers in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2587-2594.
- [56] LIAO R J, YANG L J, LI J. Aging condition assessment of transformer oil-paper insulation model based on partial discharge analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 303-311.
- [57] 吴广宁, 夏国强, 宋臻杰, 等. 基于小波分析和时域介电谱的变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 226-233.
WU Guangning, XIA Guoqiang, SONG Zhenjie, et al. Status assessment of aging condition of transformer oil-paper insulation based on time domain dielectric spectroscopy and wavelet analysis[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 226-233.
- [58] 吴广宁, 袁海满, 宋臻杰, 等. 基于粗糙集与多类支持向量机的电力变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3668-3674.
WU Guangning, YUAN Haiman, SONG Zhenjie, et al. Fault diagnosis for power transformer based on rough set and multi-class support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3668-3674.
- [59] 吴广宁, 袁海满, 高波, 等. 基于特征评估与核主元分析的电力变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2533-2540.
WU Guangning, YUAN Haiman, GAO Bo, et al. Fault diagnosis of power transformer based on feature evaluation and kernel principal component analysis[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2533-2540.
- [60] 吴广宁, 宋臻杰, 杨飞豹, 等. 基于时域介电谱和去极化电量的变压器油纸绝缘老化特征量研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 195-202.

- WU Guangning, SONG Zhenjie, YANG Feibao, et al. Study on aging characteristics of transformer oil-paper insulation based on the time domain dielectric spectroscopy and depolarization charge quantity[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 195-202.
- [61] LI S B, GAO G Q, HU G C. Aging feature extraction of oil-impregnated insulating paper using image texture analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1636-1645.
- [62] 徐岩, 陈昕. 基于合作博弈和云模型的变压器状态评估方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 88-93.
XU Yan, CHEN Xin. Transformer status assessment based on cooperative game and cloud model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 88-93.
- [63] 石少伟, 王可, 陈力, 等. 基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别和预警[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 60-66.
SHI Shaowei, WANG Ke, CHEN Li, et al. Power transformer status evaluation and warning based on fuzzy comprehensive evaluation and Bayes discrimination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 60-66.
- [64] LIAO R J, ZHENG H B, GRZYBOWSKI S, et al. An integrated decision-making model for condition assessment of power transformers using fuzzy approach and evidential reasoning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1111-1118.
- [65] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.
- [66] 蔡金锭, 祝顺才. 基于灰色聚类-集合赋权法的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 765-771.
CAI Jinding, ZHU Shuncai. Evaluation of transformer oil-paper insulation statement based on gray clustering and set weighting methods[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 765-771.
- [67] LI S B, MA H, WU G N. Bayesian information fusion for probabilistic health index of power transformer[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(2): 279-287.
- [68] 曹辰, 林莘, 李辉, 等. 电力变压器绕组变形状态信息融合评估方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1107-1113.
CAO Chen, LIN Xin, LI Hui, et al. Method for state evaluation of transformer winding deformation based on information fusion[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1107-1113.
- [69] 郝思鹏, 张济韬, 张仰飞, 等. 融合在线监测数据的变压器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 176-181.
HAO Sipeng, ZHANG Jitao, ZHANG Yangfei, et al. State evaluation of transformer based on information fusion of on-line monitoring data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 176-181.
- [70] 赵峰, 李硕. 基于DGA和改进型灰关联度模型的牵引变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 41-45.
ZHAO Feng, LI Shuo. Fault diagnosis for traction transformer based on DGA and improved grey correlation analysis model[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 41-45.
- [71] 刘循, 赵时旻, 董德存. 基于模糊神经网络的牵引变压器全局故障诊断方法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 103-107.
LIU Xun, ZHAO Shimin, DONG Decun. Global fault diagnosis method of traction transformer based on fuzzy neural network[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 103-107.
- [72] 高松, 刘志刚, 徐建芳, 等. 基于模型诊断和专家系统的牵引变压器故障诊断研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(7): 42-49.
GAO Song, LIU Zhigang, XU Jianfang, et al. Research on fault diagnosis for traction transformer on the basis of model-based diagnosis and expert system[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(7): 42-49.
- [73] 方科, 黄元亮, 刘新东. 基于自适应 PSO 算法的 LS-SVM 牵引变压器绝缘故障诊断模型[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 85-89.
FANG Ke, HUANG Yuanliang, LIU Xindong. Insulation fault diagnosis model based on adaptive PSO and LS-SVM for traction transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 85-89.
- [74] GHONEIM, SHERIF S M. Intelligent prediction of transformer faults and severities based on dissolved gas analysis integrated with thermodynamics theory[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12(3): 388-394.
- [75] 涂惟民, 崔国民, 李瑜, 等. 油浸式变压器内部流场模拟及在线故障预测方法[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 195-200.
TU Weimin, CUI Guomin, LI Yu, et al. Internal streaming simulation of oil-immersed transformers and on-line fault prediction method[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 195-200.
- [76] BAGHERI M, NEZHIVENKO S, NADERI M S, et al. A new vibration analysis approach for transformer fault prognosis over cloud environment[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 100: 104-116.
- [77] 全玉生, 谌军, 李巍, 等. 基于突变理论的油浸式变压器过热性故障预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 100-106.
QUAN Yusheng, CHEN Jun, LI Wei, et al. Methodology of forecasting the oil-immersed transformer over-hot fault tendency based on catastrophe theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 100-106.
- [78] 周淦, 孙超, 廖瑞金, 等. 基于云理论的变压器多重故障诊断及短期预测方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1453-1460.
ZHOU Quan, SUN Chao, LIAO Ruijin, et al. Multiple fault diagnosis and short-term forecast of transformer based on cloud theory[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1453-1460.
- [79] 王艳云, 孙咏红. 电力机车变压器潜伏性故障的预测方法[J]. 机车电传动, 1996(2): 36-37.
WANG Yanyun, SUN Yonghong. Prediction method for latent fault of electric locomotive transformer[J]. Electric Drive for Locomotive, 1999(2): 32-34.
- [80] 廖小东, 叶丹, 谢名源, 等. CRH380B(L)型动车组主变压器散热装置维修决策优化研究[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(1): 81-87.
LIAO Xiaodong, YE Dan, XIE Mingyuan, et al. research on maintenance optimization for heat exchanger of main transformer in CRH380B(L) EMU[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(1): 81-87.
- [81] 岳国良, 梁敏, 王永强, 等. 基于PHM的油浸式变压器维修决策研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(7): 23-28.
YUE Guoliang, LIANG Min, WANG Yongqiang, et al. Research of oil-immersed transformer maintenance decision based on proportional hazards model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(7): 23-28.
- [82] JARDINE A K, LIN D M, BANJEVIC D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition based maintenance[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(7): 1483-1510.
- [83] 王硕禾, 蔡清亮, 许继勇, 等. 基于模态分析的牵引供电系统谐波谐振过电压研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(7): 32-41.
WANG Shuohe, CAI Qingliang, XU Jiyong, et al. Harmonic resonance over-voltage of traction power supply system based on modal

analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(7): 32-41.

- [84] 张雪原, 吴广宁, 何常红, 等. 车载牵引变压器小型轻量化研究[J]. 机车电传动, 2007(4): 5-8.
ZHANG Xueyuan, WU Guangning, HE Changhong, et al. Study on miniaturization and lightening of on-board traction transformer[J]. Electric Drive for Locomotive, 2007(4): 5-8.
- [85] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合(二)应用及探索[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 1-13.
XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking part two applications and explorations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 1-13.
- [86] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合(一)大数据与电力大数据[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 1-8.
XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking part one big data and power big data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 1-8.
- [87] CHEN C L P, ZHANG C Y. Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: a survey on big data[J]. Information Sciences, 2014, 275: 314-347.
- [88] 李 刚, 于长海, 范 辉, 等. 基于多级决策融合模型的电力变压器故障深度诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 138-144.
LI Gang, YU Changhai, FAN Hui, et al. Deep fault diagnosis of power transformer based on multilevel decision fusion model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 138-144.
- [89] 李 刚, 于长海, 范 辉, 等. 基于多级决策融合模型的电力变压器故障深度诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 138-144.
LI Gang, YU Changhai, FAN Hui, et al. Deep fault diagnosis of power transformer based on multilevel decision fusion model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 138-144.
- [90] 朱建章, 石 强, 陈凤娥, 等. 遥感大数据研究现状与发展趋势[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(11): 1425-1439.
ZHU Jianzhang, SHI Qiang, CHEN Feng'e, et al. Research status and development trends of remote sensing big data[J]. Journal of Image and Graphic, 2016, 21(11): 1425-1439.
- [91] FONSECA A, CABRAL B. Prototyping a GPGPU neural network for deep-learning big data analysis[J]. Big Data Research, 2017, 8: S2214579616300405.
- [92] 石 鑫, 朱永利, 萨初日拉, 等. 基于深度信念网络的电力变压器故障分类建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 71-76.
SHI Xin, ZHU Yongli, SA Churila, et al. Power transformer fault classifying model based on deep belief network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 71-76.
- [93] 石 鑫, 朱永利, 宁晓光, 等. 基于深度自编码网络的电力变压器故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 122-126.
SHI Xin, ZHU Yongli, NING Xiaoguang, et al. Transformer fault diagnosis based on deep auto-encoder network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 122-126.
- [94] 代杰杰, 宋 辉, 杨 祎, 等. 基于油中气体分析的变压器故障诊断 ReLU-DBN 方法[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 658-664.
DAI Jiejie, SONG Hui, YANG Yi, et al. Dissolved gas analysis of insulating oil for power transformer fault diagnosis based on ReLU-DBN[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 658-664.



WU Guangning
Ph.D., Professor

吴广宁

1969—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事电气设备状态监测、故障诊断、寿命评估方面的研究工作
E-mail: gnwu@home.swjtu.edu.cn



LI Xiaonan
Ph.D.

李晓楠

1988—, 女, 博士
主要从事电气设备绝缘性能机理分析、故障预测与健康管理方面的研究工作
E-mail: lixiaonan1989@163.com



YANG Yan
Ph.D.

杨 雁(通信作者)

1984—, 女, 博士
主要从事电气设备状态监测、绝缘性能机理分析方面的研究工作
E-mail: yangyanyy@home.swjtu.edu.cn

Corresponding author



GAO Bo
Ph.D.

高 波

1976—, 男, 博士, 副教授
主要从事电气设备状态监测、故障诊断、故障预测方面的研究工作
E-mail: bogao@home.swjtu.edu.cn



HU Guangcai
Ph.D.

胡广才

1984—, 男, 博士
主要从事电气设备绝缘性能、寿命评估方面的研究工作
E-mail: 183972230@qq.com

收稿日期 2019-03-07 修回日期 2019-06-05 编辑 何秋萍