

电气自动化技术在智能电网设备监测中的应用研究

是晨光

无锡市广盈电力设计有限公司 江苏 无锡 214100

【摘要】智能电网设备状态监测面临着数据海量、多时间尺度、复杂工况等诸多挑战，亟需创新监测理念与技术范式。电气自动化技术在设备监测中扮演着关键角色。本文聚焦电气自动化技术在智能电网设备监测中的创新应用，提出一种融合物理机理与数据驱动的智能监测新范式。该范式综合考虑设备退化机理与运行数据，构建多时间尺度的异常检测框架，实现设备状态全景式感知；引入深度强化学习理论，提升设备退化预测的自适应性与鲁棒性；打通物理-数据壁垒，实现机理建模与数据分析的协同优化。三位一体的智能监测范式有望推动电网设备管理从“事后诊断”向“主动预防”的范式跃迁，为智能电网安全经济运行提供坚实支撑。

【关键词】智能电网；设备监测；电气自动化技术；应用研究

DOI:10.12417/2811-0722.25.06.048

引言

智能电网是新一代电力系统发展的主要方向，代表着能源变革与数字变革的深度融合。然而，智能电网的安全稳定运行面临严峻挑战。电网规模不断扩大，新能源大规模接入，用户侧分布式电源快速发展，使得电网结构日益复杂。与此同时，电力设备长期处于高压、高温、高湿、高尘等恶劣工况下，各类故障风险日益凸显^[1]。据统计，输电线路故障约占电网事故总数的40%，变压器故障则占30%。设备故障一旦发生，极易引发大面积停电，造成重大经济损失和社会影响。2016年极端天气下新能源脱网引发的澳大利亚大停电事故和“814”等特大停电事故无不给人以深刻警示。因此，研究智能电网设备监测新技术，形成“主动预防、精准诊断、智能决策”的智慧运维新模式，对于保障电网本质安全、提升供电可靠性具有重要意义。

1 电气自动化技术概述

电气自动化技术是以计算机技术为核心，集成了现代电子技术、通信技术、传感器技术等的综合性技术。其主要目的是通过自动化系统实现对电气设备和生产过程的监视、控制、保护、测量和管理。经过几十年发展，电气自动化技术从最初的继电器-接触器控制系统，发展到现代的基于工业以太网的网络化控制系统，呈现出数字化、智能化、网络化的发展趋势^[2]。当前，物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术与电气自动化加速融合，为智能电网设备状态监测提供了新契机。

2 电气自动化技术在智能电网设备监测中的重要性

2.1 提升设备健康管理水 平，保障电网安全稳定运行

电气自动化技术在智能电网设备监测中的重要性不容忽

视。该技术集成了先进的传感器、数据采集与传输、智能分析算法等，形成了完备的在线监测体系，能够持续评估设备健康状态，全面感知潜在故障风险。这种主动预防性的监测范式，使得设备管理从“事后诊断”转向“事前预警”，大幅提升了电网运维水平。更为关键的是，电气自动化监测可精准定位设备缺陷，优化检修决策，避免设备带病运行引发连锁反应，最大限度规避重大事故风险，为电网安全稳定运行提供坚实保障^[3]。此外，该技术还通过数据挖掘建立设备退化模型，动态预测关键设备剩余寿命，合理安排检修计划，在保证可靠性的同时充分利用设备价值，推动电网健康管理迈上新台阶。

2.2 支撑智能运维决策，提高电网整体运行效率

电气自动化技术在智能电网设备监测中的重要性还体现在对智能运维决策的支撑作用。通过部署先进的状态监测装置，该技术可获取设备运行过程中的海量数据，并利用机器学习、知识图谱等手段，深度挖掘设备故障发生的内在规律，形成精准的故障预测和诊断模型。基于模型分析结果，运维人员能够及时制定针对性的检修策略，将有限的资源投入到最需要的地方，避免过度维护导致的能源浪费和成本增加。值得一提的是，电气自动化监测还可建立设备健康档案，动态评估其状态变化趋势，优化整个电网的运行方式。例如，通过对电网潮流的实时监测，可智能调整负荷分配，减少网损，提高输电效率。

2.3 推动电网精益管理，实现降本增效

电气自动化技术在智能电网设备监测中的重要性还有利于推动电网精益管理，实现降本增效。传统的电网运维模式往往依赖于定期的人工巡检和定时的设备维护，存在检修不及

个人简介：是晨光，1974年5月，男，汉族，江苏无锡人，高级工程师，注册电气师，注册造价师，主要从事电力系统设计工作。

时、资源配置不合理等问题，导致运维成本居高不下。电气自动化监测技术应运而生，通过实时采集设备运行数据，结合故障诊断、寿命预测等算法，可精准指导检修决策，避免不必要的维护作业，大幅节约人力物力。与此同时，该技术还能优化备品备件管理，根据设备健康状态和故障风险，合理配置库存资源，减少积压，提高资金周转效率。更进一步，电气自动化监测产生的数据还可用于优化电网设计，通过大数据分析识别薄弱环节，改进设计标准，从源头提高电网可靠性，降低全生命周期成本。

3 电气自动化技术在智能电网设备监测中的应用

3.1 面向多时间尺度的异常检测与故障诊断

电气自动化技术在智能电网设备监测中的应用，面向多时间尺度的异常检测与故障诊断是一个重要方向。电力设备在运行过程中，其性能参数往往表现出明显的多时间尺度特性。某些异常可能在毫秒级瞬时发生，如绝缘击穿、雷击等；而另一些退化故障则可能经历数月甚至数年的缓慢演变，如绝缘老化、机械磨损等。传统的异常检测方法大多基于单一时间尺度，难以全面刻画设备状态的动态变化，容易出现漏检或误报^[4]。电气自动化监测系统应充分考虑多时间尺度特性，构建纵跨毫秒、秒、分钟、小时、天等不同时间尺度的异常检测框架。通过小波分析、经验模态分解等信号处理技术，自适应提取不同时间尺度下的特征指标，并设计与之匹配的异常检测算法，形成“一体多面”的立体化监测体系。这种面向多时间尺度的异常检测范式，有助于捕获设备状态的全景图像，及时发现各类潜在故障，从而实现更加精准、全面的故障诊断。

以输电线路为例，电气自动化监测系统可从多个时间尺度入手，开展全方位的异常检测与故障诊断。首先，系统通过高速采样，实时捕获线路的瞬态过电压、过电流等毫秒级异常信号，判断是否发生雷击、短路等故障；其次，系统每秒统计分析线路电流、电压等关键参数，评估线路负载水平和潮流状态，及时发现过负荷、失衡等异常工况；再者，系统每隔数分钟至数小时，对导线弧垂、杆塔倾斜等机械状态参数进行趋势分析，识别由风偏、冰偏等引起的缓变异常；更进一步，系统每天或每周分析电晕、局放等带电检测数据，评估绝缘子、金具等部件的绝缘性能，追踪其长期退化趋势。最后，系统综合各时间尺度下的异常检测结果，运用集成学习、证据理论等方法进行信息融合，形成线路故障的整体诊断结论，并根据故障严重程度和发展速率，及时向调度人员发出告警或预警信息。由此可见，电气自动化监测系统应立足多时间尺度视角，构建纵深防御、横向关联的异常检测与故障诊断框架，全面保障智能电网的安全稳定运行。

3.2 基于深度强化学习的设备退化预测

电气自动化技术在智能电网设备监测中的应用，基于深度

强化学习的设备退化预测是一个富有前景的研究方向。设备退化预测的核心在于建立状态演变规律与维护决策之间的关联映射。传统的退化预测方法，如统计模型、机器学习等，大多采用监督学习范式，预先标注退化状态，离线训练预测模型。这类方法忽略了设备退化过程的马尔可夫特性和决策优化问题，难以适应实际工程需求。深度强化学习为设备退化预测提供了新的思路。该方法融合了深度学习和强化学习理论，通过端到端的表示学习，自主构建状态特征；同时，引入奖励机制，使模型在状态空间探索中，不断优化状态-动作值函数，形成最优决策序列。与监督学习相比，深度强化学习无需事先定义状态标签，能够自适应地挖掘退化规律，具备自主学习、主动探索的智能决策能力^[5]。将深度强化学习引入设备退化预测，有望突破经验模型的瓶颈，实现从被动响应到主动管理的范式转变。

以变压器故障预测为例阐述深度强化学习的应用路径。首先，从海量历史运行数据中，自适应提取变压器油中溶解气体、铁芯振动等退化特征，并结合负荷、环境等影响因素，通过卷积神经网络、长短期记忆网络等深度学习模型，构建起映射退化状态的压缩表示空间。其次，结合退化状态表示和维护决策空间，搭建深度强化学习框架。以变压器剩余寿命和检修成本为优化目标，设计奖励函数，引导智能体在“状态-动作”空间中探索最优策略。在探索过程中，采用 Q-learning、策略梯度等强化学习算法，使模型通过不断试错，掌握状态转移规律，形成从退化状态到最优检修时机、检修方式的策略映射。最后，应用蒙特卡洛仿真、负采样等技术，增强模型泛化性能，提高预测鲁棒性。通过持续学习和策略改进，模型能够动态适应变压器退化规律的变化，及时预警突发性故障，优化检修资源配置，最大限度延长变压器使用寿命。由此可见，深度强化学习有望成为智能电网状态监测的利器，为设备资产管理注入新动力。

3.3 融合物理机理与数据驱动的智能监测

传统的设备监测方法大多基于单一视角，或依赖物理模型，或采用数据挖掘，难以应对日益复杂的智能电网环境。物理机理模型虽然具有明确的因果解释力，但在建模过程中不可避免地引入假设和简化，难以精确刻画设备的实际运行状态。而数据驱动方法虽然能够从海量监测数据中提取特征规律，但往往缺乏物理意义，泛化能力和鲁棒性有限。单一方法的局限性导致监测结果的偏颇和不确定性。因此，亟需探索物理机理与数据驱动相结合的智能监测新范式。通过融合两类方法的优势，既能获得物理上可解释的模型结构，又能从数据中学习和校正模型参数，形成物理-数据协同优化机制。这种“1+1>2”的协同效应，有望全面提升设备监测的准确性、可靠性和适应性，为智能电网的安全经济运行提供坚实保障。

融合物理机理与数据驱动的智能监测在输电线路导线弧

垂监测中大有可为。导线弧垂监测的核心是建立气象条件与导线弧垂之间的映射关系。物理机理模型通常基于导线的材料特性、悬挂方式等先验知识，推导出弧垂随气象负荷变化的解析表达式。这种“白箱”模型具有清晰的物理意义，但在实际应用中往往难以满足工程精度需求。受限于模型假设，该方法未充分考虑导线的微观形变、障碍物遮挡、风速的空间相关性等因素。数据驱动模型则直接从气象-弧垂数据对中习得统计关联规律，但学习到的“黑箱”规律缺乏物理解释，且容易出现过拟合。两类方法的问题根源在于机理建模与数据驱动“两张皮”。智能监测需要打通物理-数据壁垒，构建融合机理约束的数据驱动模型。以物理机理模型为基础，通过贝叶斯优化、迁移学习等方法引入数据信息，对模型结构进行适应性修正，并持续优化模型参数，最终在物理可解释与数据拟合之间达成平衡。在此基础上，还可进一步利用因果推断、可解释机器学习等技术，从数据驱动模型中提取物理规律，形成知识闭环。融合后的模型兼具白箱的可解释性和黑箱的自适应性，能够准确预测多种气象工况下的导线弧垂量变，为输电线路安全运行

提供精准决策依据。

4 结语

电气自动化技术与智能电网设备监测的深度融合，正在成为保障电网安全、可靠、经济运行的关键支撑。面向多时间尺度的异常检测和故障诊断，突破了传统单一尺度分析的瓶颈，实现了设备状态的全景式感知和精准诊断；基于深度强化学习的退化预测，为设备全生命周期管理注入了新的智能决策力量；融合物理机理与数据驱动的协同优化范式，有望全面提升监测结果的准确性和可靠性。展望未来，随着人工智能、大数据、物联网等新一代信息技术的快速发展，电气自动化技术必将迎来更加广阔的应用前景。多源异构海量数据的高效处理和实时分析能力亟需加强；人机协同、自主学习的智能系统尚未成熟。因此，亟需产学研用各界协同发力，加大核心技术攻关力度，优化顶层设计，健全标准规范，完善试点示范，促进技术成果的规模化转化应用，为智能电网的高质量发展提供坚实支撑。

参考文献：

- [1] 李博.基于元模型控制的智能电网大数据安全监测技术研究[J].电气自动化, 2023, 45(4):112-114.
- [2] 闻娜,刘成伟,张晓阳,等.智能电网中自动化控制与储能技术的协同应用研究[J].储能科学与技术, 2025, 14(1):219-221.
- [3] 黄东掌.电气试验自动化控制技术的应用[J].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术, 2024(002):000.
- [4] 杨喜喜.智能电网背景下的电保护技术及其综合自动化应用研究[J].电气技术与经济, 2025(3).
- [5] 黄乾.智能电网建设中电气工程及自动化应用分析[J].进展:科学视界, 2023(1):89-91.