

漏电保护器全生命周期运维管理研究与应用

朱茂荣, 周渊, 雷济坤, 刘强博, 王健梅

华能甘肃能源开发有限公司, 甘肃 兰州 730070

DOI:10.61369/EPTSM.2025090014

摘要 : 针对电力行业漏电保护器 (RCD) 长期存在的“装而不管、坏而不知”的运维管理困境, 提出并构建了一种基于数字化平台的全生命周期运维管理模式。该模式通过集成高精度专用测试仪、移动端应用程序和云端数字化管控平台, 实现了对 RCD 测试数据的精准采集、线上实时录入、系统自动判据与缺陷处理闭环管理。核心创新在于建立了覆盖“计划生成、现场执行、数据溯源、自动判据、缺陷驱动、整改闭环”的标准化运维流程, 并为每一台 RCD 建立了全生命周期电子健康档案。实践应用表明, 该模式实现了 RCD 运维状态的透明化、维护决策的数据化以及安全责任追溯的精准化, 将运维管理模式从“被动响应、经验主导”成功转型升级为“数据驱动、主动预警”, 显著提升了电力作业现场的人身触电安全防护水平。

关键词 : 漏电保护器; 全生命周期管理; 数据驱动; 数字化运维; 预测性维护

Research and Application of Full-Lifecycle Operation and Maintenance Management for Residual Current Devices

Zhu Maorong, Zhou Yuan, Lei Jikun, Liu Qiangbo, Wang Jianmei

Huaneng Gansu Energy Development Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730070

Abstract : To address the long-standing operation and maintenance (O&M) dilemma of "installed but unmanaged, faulty but undetected" for residual current devices (RCDs) in the power industry, this study proposes and establishes a full-lifecycle O&M management mode based on a digital platform. By integrating high-precision dedicated testing instruments, mobile applications, and a cloud-based digital management and control platform, this mode enables accurate collection of RCD test data, real-time online data entry, automatic system criterion judgment, and closed-loop management of defect handling. Its core innovation lies in establishing a standardized O&M process covering "plan generation, on-site execution, data traceability, automatic criterion judgment, defect-driven action, and rectification closed-loop," and creating a full-lifecycle electronic health record for each RCD. Practical application shows that this mode achieves transparency in RCD O&M status, data-driven maintenance decisions, and precision in safety responsibility tracing. It successfully transforms the O&M management mode from "passive response and experience-driven" to "data-driven and proactive early warning," significantly improving the personal electric shock protection level at power operation sites.

Keywords : residual current device (RCD); full-lifecycle management; data-driven; digital operation and maintenance; predictive maintenance

引言

电力工业作为国民经济的基础命脉, 其安全生产至关重要。在电力生产、传输、建设的全链条中, 人身触电事故始终是威胁作业人员生命健康的“头号杀手”^[1]。RCD 作为防止人身触电事故的最后一道关键技术防线, 其运行的可靠性直接关系到作业人员的生命安全。然而, 传统的 RCD 运维管理普遍存在严重短板: 配置上“一刀切”, 运维上“靠人管”, 状态上“不可知”^[2]。现场普遍依赖人工按动试验按钮进行功能性检查, 这种方式无法获取 RCD 精准的动作电流和动作时间, 导致大量“亚健康”(动作特性漂移但未完全失效) 设备无法被及时发现, 形成了巨大的安全隐患。

随着《电力安全生产“十四五”行动计划》明确提出要“推进电力安全治理数字化转型升级”, 利用数字化、智能化手段解决传统安全问题已成为行业共识^[3]。当前, 已有研究侧重于 RCD 的配置选型^[4]或在线监测技术^[5], 但尚缺乏一套覆盖 RCD “采购–安装–运

作者简介: 朱茂荣 (1993.09-), 男, 甘肃秦安人, 本科, 工程师, 研究方向: 从事安全管理、电气设备维护研究。

维-报废”全生命周期、线上线下深度融合的运维管理体系的系统性研究。

本文立足于一线电力企业的迫切需求，旨在研究并构建一套以数据为核心、以流程为牵引、以平台为载体的RCD全生命周期数字化运维管理模式，有效解决了RCD状态不可知、管理不闭环、责任难追溯等问题，为提升电力企业本质安全水平提供一套可复制、可推广的解决方案。

一、RCD传统运维管理模式痛点分析

通过对近年来多起人身触电事故的深度剖析，本文总结出传统RCD运维管理模式存在以下三大核心痛点：

（一）运维状态“不可知”

传统的运维方式仅能通过人工按压试验按钮定性判断RCD“动”或“不动”，无法定量获取其动作电流值($I_{\Delta n}$)和动作时间(t)这两个关键参数。因此，对于动作特性已发生漂移(如动作电流从30mA漂移至40mA，动作时间从0.1s延长至0.3s)但尚未完全失效的RCD，传统方法无法识别，导致其带病运行，在发生漏电时无法有效起到保护作用。

（二）管理流程“不闭环”

RCD的定期校验工作多依赖人工记录，易出现漏检、超期、记录造假等问题。即使发现了缺陷RCD，其更换、维修过程也缺乏有效的跟踪与监督，缺陷整改是否完成、复测是否合格等环节管理松散，无法形成有效的计划(Plan)–执行(Do)–检查(Check)–处理(Act)闭环。

（三）决策支持“无数据”

由于缺乏历次测试数据的积累，运维决策(如备品备件采购、预防性更换)只能基于设备年限或故障后进行，属于典型的“经验判断”和“被动响应”模式的决策。管理人员无法从全局掌握所有RCD的健康状态分布，难以进行精准的资源调配和趋势预警。

二、数字化运维管理模式的系统构成与运行机制

为解决传统运维模式的系统性痛点，本研究构建了一套以数据为驱动、以流程为主线的RCD数字化运维管理系统。该系统围绕RCD全生命周期管理的核心环节，设计了五个关键功能模块，并通过标准化的业务流程将其串联，形成了一个协同高效、闭环管理的有机整体。

（一）系统核心功能模块

为实现RCD运维的标准化与闭环管理，本系统构建了五个协同运作的核心功能模块，将管理制度固化为线上流程，确保运维数据在系统内有序流动、闭环管理。

1.RCD设备数字身份与档案管理模块

该模块是实现设备个体化精细管理的基础。系统为每一台在册RCD建立并维护其唯一的数字身份和档案。此唯一身份是设备在系统中的关键索引，确保了所有运维数据都能准确无误地归集至对应设备，实现全流程可追溯。档案内容聚焦于设备的使用与运维过程，完整记录了其“初始健康状态”与动态运维历史，主要包括：设备安装位置、名称、配电系统级别、额定动作电流与

动作时间等基准参数，以及是否采用防溅型或防爆型等关键防护属性。当运维人员在系统中执行任何操作时，系统均自动关联并校验此档案，确保运维对象明确、数据记录精准，为后续所有流程提供了唯一、可信的数据源。

2.测试计划自动生成与派发模块

该模块是驱动运维工作从“被动响应”转向“主动预防”的引擎。系统基于预设的校验周期(可根据设备类型、安装区域、风险等级自定义)，结合RCD设备档案，自动、批量地生成周期性的测试工作计划。这些计划被自动转化为具体的工作任务单，并通过系统接口推送至相关责任人员的移动端APP或PC端任务列表。此举彻底取代了传统依赖人工记忆与手动派单的模式，从源头上杜绝了工作的疏漏与延迟，确保了运维工作的计划性、规范性与时效性。

3.移动端/PC端测试数据录入模块

该模块是确保运维数据“源头精准、过程真实”的关键环节，其设计充分考虑了不同现场环境的适用性。现场运维人员登录系统后，在待办任务列表中接收并执行具体的测试工单。每个工单已自动关联了目标RCD的设备信息与历史数据。人员依据标准作业流程，使用高精度RCD专用测试仪执行测试后，可根据现场网络条件，选择以下方式录入数据：在信号良好的区域，通过移动端APP实时在线录入；在偏远或信号不佳的作业现场，则启用移动端APP的离线模式进行数据暂存，待网络恢复后自动同步至平台；或返回驻地后，通过PC端进行集中录入。为保证数据真实性，系统在上述所有录入模式下均强制要求上传测试过程照片或仪器数据截图作为佐证。这种灵活的数据录入策略，确保了系统在各类复杂环境下的高可用性，同时实现了数据与任务、设备、人员的强绑定，为后续的智能判据提供了真实、可靠的输入。

4.状态自动判据与缺陷工单闭环模块

该模块是系统的“智慧大脑”，实现了运维管理的智能诊断与刚性闭环。系统自动比对实测数据与额定参数，实现智能诊断。对于动作时间超标或动作电流值超出允许误差范围的RCD，系统自动将其状态标记为“不合格”，并立即触发缺陷管理流程，生成一张“缺陷处理工单”。该工单被自动分配给相应的维修班组，并全程跟踪其更换或维修过程，直至相关人员完成处理并提交复测合格数据后，工单方可再系统中关闭。由此，形成了严格的线上PDCA管理闭环，确保每一个缺陷都被及时发现、有效处理。

5.RCD全生命周期电子档案模块

该模块是承载与升华运维数据价值的核心仓库，是前述所有模块运作成果的最终体现。它并非一个静态的数据库，而是一个随运维任务执行而动态生长、持续更新的有机体。系统以设备的唯一数字身份为主线，自动将从“测试计划”触发的任务信息、从“数据录入”环节采集的实测数据、以及由“状态判据”驱动的缺陷处理全记录，无缝归集至对应的设备档案中。这份日益丰

富的电子健康档案，不仅是进行设备状态趋势分析、实现预测性维护和优化管理策略的宝贵数据资产，也为安全责任追溯与绩效管理提供了客观、公正的数据依据。

（二）模块化协同运行机制

以上五个核心模块并非孤立运作，而是通过数据流与业务流紧密衔接，形成一个协同高效的运行整体。

其运行机制如下：“测试计划模块”自动触发生任务工单；“数据录入模块”在执行任务中确保源头数据的精准与真实；“状态判断模块”对数据进行即时诊断并驱动缺陷处理流程，实现业务闭环；整个过程的所有动态与静态信息，最终都归集于“全生命周期电子档案模块”，并以此丰富和夯实“设备档案模块”的数据基础。档案数据的积累又反过来为优化测试计划周期、精准定位薄弱设备提供了数据洞察，从而开启新一轮更精准、更高效的运维循环。

这一模块化架构确保了RCD运维管理从传统的“人治、经验主导”向“流程化、数据驱动”的根本性转变，为实现“主动预警、本质安全”的运维目标奠定了坚实的系统基础。

三、数据驱动的运维决策与优化机制

在上述系统构成的支撑下，该模式通过以下机制实现数据驱动的运维决策优化：

（一）运维状态透明化与管理定向化

平台集成了RCD的台账信息与实时测试数据，生成企业统一的《RCD安全状态一览表》及基于GIS地图的可视化看板。管理人员可全局掌控所有RCD的分布、状态（以“合格”“待测”“不合格”“超期”等颜色区分），并可一键筛选定位所有“不合格”或“超期未测”设备，生成批量处理工单。这使得管理资源能够精准、高效地投向最薄弱环节，实现了从“粗放管理”到“精准施策”的转变。

（二）维护决策从“经验判断”到“数据支撑”

平台内置的数据分析引擎能够对RCD的历年测试数据进行趋势分析，自动绘制“性能衰减曲线”。系统可自动识别那些虽然当前测试“合格”，但动作值或时间已连续多次逼近标准上限的RCD，并发出“早期预警”，提示重点关注或提前更换，实现预测性维护。例如，华能陇东公司基建现场实际应用中，该功能已成功预警并提前更换了数十台存在潜在失效风险的RCD，有效防范了事故于未然。同时，基于大量历史数据建立的寿命预测模型，可为制定科学的备品备件采购计划和预防性更换策略提供数据依据。

（三）责任追溯与绩效管理闭环化

整个运维管理过程的所有关键节点均在平台中完整留痕，实

现了责任的可追溯。平台可自动统计各基层单位的RCD“测试完成率”“一次合格率”“缺陷整改及时率”等关键绩效指标，并生成分析报告，为安全绩效考核与评先选优提供客观、公正的数据支持，形成有效的激励与约束机制。

四、应用成效分析

该模式在华能甘肃公司系统内部全面推广后，取得了显著的经济效益与社会效益。

（一）管理效能显著提升

效率提升：RCD缺陷的发现、上报、处理、复核平均时长从过去的数周缩短至3天以内。

质量提升：通过专用测试仪的精准校验和系统的强制流程，RCD运维工作的质量得到根本性保障。全公司因漏电引起的越级跳闸事件同比下降超过90%。

（二）安全可靠性根本性增强

实现了对“亚健康”RCD的早期发现和干预，避免了保护失效。在八〇三电厂电动工具故障漏电的案例中，一台30mA高灵敏度RCD在0.08秒内成功切断故障电流，使流经人员的电流被限制在10mA以下，作业人员仅感轻微麻刺感，实现了“电不伤人”的防护目标。

运维模式从“事后维修”向“预测性维护”进阶，设备健康水平和系统安全冗余度大幅提高。

五、结论与展望

本研究成功构建并应用了一套基于数字化平台的RCD全生命周期运维管理模式。该模式的核心创新，在于通过“流程闭环”确保了运维过程的规范性，通过“数据驱动”实现了管理决策的科学性，二者的深度融合构成了一个能够自我迭代优化的智能系统。这一根本性变革，有效解决了电力行业RCD“装而不管、坏而不知”的长期困境。应用数据证实，该模式能将缺陷处理周期从数周缩短至3天以内，极大提升了运维效能与人身安全防护的可靠性。

本模式不仅为RCD管理提供了具体方案，更为电力安全治理的数字化转型树立了可复制、可推广的范式。展望未来，研究工作将从三个维度持续推进：一是开发嵌入式的RCD物联网监测单元，实现从“定期检测”到“实时感知”的跨越；二是将现有模式拓展至接地线、绝缘工具等更广泛的安全工器具管理领域；三是引入人工智能算法，深度挖掘数据价值，实现从“预警”到“预测”的进阶，最终构筑起更加智慧主动的安全风险防控体系。

参考文献

- [1] 国家能源局.电力安全生产“十四五”行动计划 [R].2021.
- [2] 李建国,王磊.电力作业现场漏电保护器应用现状与故障分析 [J].电力安全技术,2020,22(5):1-5.
- [3] 刘强,陈晓云.数字化转型驱动电力安全管理变革的路径研究 [J].中国电力,2022,55(8):203-210.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 13955-2017剩余电流动作保护装置安装和运行 [S].北京:中国标准出版社,2017.
- [5] 张华,李昕,等.基于无线传感网络的剩余电流保护器在线监测系统设计 [J].电测与仪表,2021,58(12):125-130.