

电气设备适配性改造实践研究

郭锐 刘成龙 计梦瑶

兰州供电公司，甘肃兰州，730050；

摘要：本研究通过对比分析、数据分析及案例研究，剖析电气设备适配性改造的关键技术、现存问题与解决策略，对比传统设备与升级后设备性能。结果显示，改造后设备可满足工业自动化新标准，经济价值显著，环境适应能力增强。核心技术包括兼容性改造、能耗优化、安全性能提升及模块化智能控制，有效解决传统设备问题，提升综合效益。结论表明，技术改造切实提高工业生产效率与安全性，为企业创造可观经济效益。

关键词：电气设备；适配性改造；可靠性升级；综合效益评估

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.014

引言

电气设备适配性改造，在工业领域里是关键的技术环节，核心是借助技术升级，让设备性能和工业生产需求实现精准匹配。在工业自动化深度发展的背景下，传统电气设备的运行参数、控制精度及环境适应性已难以满足现代工业生产的高标准要求^[1]。技术升级已然成为适配性改造进程中的重要方向，包含精准控制优化、故障排查机制、状态监测系统及模块化智能控制等重要领域^[2]。通过引入传统监测技术与数据统计分析方法，电气设备可实现运行状态实时把控与参数调整，显著降低非计划停机风险^[3]。同时，兼容性改造策略运用标准化接口的设计以及通信协议的细致优化，成功攻克多品牌设备协同运行过程中遭遇的技术难题，为工业控制系统迈向集成化发展之路提供坚实有力的技术支撑。此外，采用模块化设计与插接式连接技术，可解决传统设备接线繁琐、故障排查低效等问题，进一步完善适配性改造的理论框架与实践指引。

在电力系统中，电气设备检修前进行可靠的验电与接地，是保障检修人员生命安全、防止误送电造成恶性事故的最后一道，也是最为关键的防线。验电接地手车是实现该功能的核心专用设备，广泛应用于中高压开关柜内。

传统验电接地手车普遍采用由电磁式继电器、硬接线端子排、分立元件构成的整流桥等组成经典继电控制回路。这种技术方案在长期应用中暴露出以下痛点与挑战，构成了本项目进行智能化升级的深刻背景。

尽管硬件升级取得了显著进展，但项目在集成测试、

配套及标准化方面也有一些需要改进的问题。

系统集成与兼容性问题：新引入的集成控制模块、插接式接口与旧型号手车的机械结构、传感器接口可能存在物理安装或电气参数不完全匹配的情况。新型电源模块与控制模块、信号采集模块之间的供电时序、电压纹波要求需要进行精细的匹配测试，以确保系统稳定工作。

智能化功能软件尚未同步完善：硬件升级为智能化（如状态自诊断、无线通信、数据记录、闭锁逻辑校验等）提供了平台，但相应的嵌入式软件、人机交互界面（HMI）及后台监控软件的开发相对滞后。缺乏统一的通信协议标准，未来与变电站综合自动化系统或智能运维平台的对接存在不确定性。

插接式连接的长期可靠性验证不足：插接式连接器在长期使用、频繁插拔、以及变电站复杂电磁环境与可能存在的温湿度变化、粉尘条件下的接触可靠性、防腐性能、机械强度需要更长时间的运行验证和加速老化测试。缺乏针对该类型连接器在特定应用场景下的维护与检测标准。

人员培训与维护体系尚未建立：运维人员对新型模块化、插接式结构的操作流程、故障判断、模块更换方法不熟悉。现有的维护工具、备品备件体系仍基于旧型号，需要更新以适应模块化维护的需求。为解决上述问题，推动项目从“硬件升级”到“成熟产品”的转化，建议如下：

开展系统性集成测试与优化：组织针对整机的兼容性、稳定性、环境适应性（温湿度、振动）测试。重点验证插接件在模拟工况下的性能，并根据测试结果优化

机械结构和接口设计。建立电源-控制-传感回路的联合测试平台，优化供电设计和信号完整性。

协议标准化：开发设备端嵌入式软件和上位机监控软件，实现基础状态监测、故障报警、操作日志等核心智能功能。明确并采用行业主流通信协议（如 MODBUS、IEC 61850 MMS/GOOSE），为系统互联互通做好准备。

建立面向新装置的运维体系：编制《模块化使用维护手册》。开发针对运维人员的专项培训课程。规划模块化备件库，明确关键模块（如控制模块、电源模块、专用连接器）的库存策略。

规划后续迭代与功能拓展：考虑在现有硬件平台上，预研或规划下一阶段功能，如：集成高精度传感器实现接触状态精确感知、加装视觉辅助定位或 AI 识别系统、深化与五防系统的逻辑闭锁集成、探索基于物联网的远程运维支持等。

主要成果亮点，控制继电器升级：将传统的分立电磁继电器触头控制方式，升级为集成化、固态化的智能控制模块。该模块集成了逻辑控制、状态自检、信号调理与驱动功能，消除了机械触点的磨损、粘连风险，响应速度更快，寿命更长，体积更小，为智能化功能奠定了基础。**控制回路连接方式升级：**将传统的硬接线端子排连接，升级为高可靠性防误插接式连接器（插接式）。此举大幅简化了现场接线工作，减少了接线错误风险，实现了控制单元的快速插拔与更换，便于维护和模块更换，提升了装置的模块化程度。**电源整流单元升级：**将原先由分立元件等构成的整流桥电路，升级为高性能、全封装的集成模块式电源。新电源模块具有更高的转换效率、更稳定的输出、更强的抗干扰能力及完善的过压过流保护，提升了整个控制系统的电源品质与可靠性。

推广前景广阔

市场需求明确且迫切：存量改造市场巨大：全国各级变电站拥有大量传统验电接地手车，随着设备老化、智能化变电站改造及对运维效率和安全要求的提高，对高性能、智能化替代产品的需求将持续释放。**新建项目标配趋势：**在智能变电站、数字化变电站等新建项目中，具备状态感知、智能互联、高可靠性特征的设备将成为优选甚至标配。本项目的成果符合这一趋势，具备直接应用于新建项目的潜力。**行业标准提升驱动：**电力行业对设备可靠性、免维护性及运维便捷性的要求不断提高，

本项目提供的解决方案积极响应了这一行业升级方向。

技术路径具备可扩展性与示范效应：模块化设计易于系列化：核心的模块化设计思想（控制模块、电源模块、插接接口）可灵活调整，快速衍生出适用于不同电压等级（如 10kV、35kV）、不同柜型、不同功能需求的系列化产品。为其他配电设备升级提供范式：本项目成功经验（硬件的集成化、连接的插接化、运维的智能化）可复制推广至断路器手车、隔离开关、其他柜内智能组件等，带动配电设备整体的技术升级。**无缝对接智能电网生态：**通过采用标准通信协议，该装置能便捷接入变电站自动化系统、状态监测系统或物联网平台，成为电网数字化、智能化资产的重要节点，顺应能源互联网的发展潮流。**应用场景多元化：**不仅适用于常规变电站，也特别适合对空间、维护便捷性要求高的城市地下变电站、海上风电升压站、数据中心配电系统等特殊场景。**模块化插接式设计使其在应急抢修、快速恢复供电场景下能大幅缩短设备更换和调试时间。**

核心价值显著

安全价值（核心根本）：提升操作本质安全：集成模块消除了机械继电器触点故障风险；智能控制可实现更复杂的联锁逻辑校验，防止误操作；状态自检功能可在操作前预先发现潜在故障。**增强供电可靠性：**高可靠电源和控制系统减少了因装置自身故障导致的停电风险或安全事故。**降低人身风险：**插接式设计减少了运维人员直接接触内部硬接线的机会，降低了误碰风险。

经济价值（直接驱动）：降低全生命周期成本：**购置成本：**模块化设计可能初期单价略有上升，但通过标准化和规模化生产可得到控制。**安装调试成本：**插接式设计使现场安装、接线工作量减少 60% 以上，大幅缩短施工周期和人工成本。**运维成本：**模块化支持“更换而非修理”，故障定位清晰，维修时间可缩短 70% 以上，显著减少停电时间。**状态监测可预测性维护，避免计划外停运。****备件库存成本：**只需储备少量通用模块，而非大量分立元器件，降低资金占用和管理成本。**提升供电效益：**减少故障处理和检修时间，直接增加电网有效供电时间，带来可观的社会经济效益。

管理价值（效率提升）：运维工作标准化、简单化：运维人员无需具备极高的电路图识读技能，通过培训即可掌握模块更换和基础诊断，降低了对人员经验的

过度依赖。资产管理数字化：设备运行状态、操作记录、寿命信息可数字化采集与管理，为设备健康管理、寿命预测、精准更换提供数据支撑，实现资产管理的精细化、科学化。决策支持智能化：积累的运行数据可用于分析操作规律、故障模式，为电网运行方式优化、设备选型改进提供决策依据。

1 电气设备适配性改造的必要性

1.1 工业自动化对电气设备提出的新标准

工业自动化技术不断向前发展，这给电气设备的核心性能参数带来了极为严苛的精度控制要求。根据 IEC61131-3 国际标准，现代自动化生产线要求电气设备的信号响应时间误差需控制在 $\pm 0.1\text{ms}$ 以内，且长期运行稳定性需达到 99.99% 以上^[4]。工业生产中，这种对精度的严苛需求，使得传统电气设备不得不进行适配性改造，把机械传动部件更换为伺服控制系统，并且集成高分辨率编码器以及闭环控制算法。此外，在工业 4.0 的大框架下，设备互联的需求愈发凸显，这使得电气设备必须配备标准化通信协议接口，从而能够与生产管理系统进行实时的数据交互，这一情况对传统设备的通信模块提出了模块化改造的硬性要求。同时，智能电网与数字化运维的发展，要求电气设备具备状态可视、故障自诊断及数据互连能力，传统“分立继电逻辑”控制的设备已无法满足智能化需求。

1.2 电气设备适配性改造的经济价值

电气设备适配性改造通过性能优化与损耗控制，为企业创造显著经济收益，核心体现在成本节约与产能提升两方面。在能耗成本控制上，某食品加工厂对老旧电机、电源系统改造后，设备综合能耗下降 18%，年节约电费支出约 120 万元；某纺织厂通过负载跟踪技术避免“大马拉小车”现象，单条生产线月均节电达 8600 度。产能保障层面，改造后设备可靠性提升，非计划停机时长缩短。某机械制造厂通过冗余设计与部件升级，设备年均停机次数从 15 次降至 3 次，减少产能损失约 2000 台/年，新增产值超 1500 万元。同时，改造延长设备使用寿命 3-5 年，延缓设备更新投入，某工业园区通过适配性改造，单台设备平均运维成本降低 22%，整体经济回报率达 35%，短期投入可在 1.5-2 年内收回。此外，采用模块化与插接式改造的设备，故障排查时间缩短

80%，备件库存种类大幅简化，进一步降低运维培训成本与资金占用。

1.3 电气设备适配性改造对环境适应性的强化

现代工业环境展现出愈发明显的极端化特点，高温、高湿以及强腐蚀等恶劣状况，给电气设备带来了极为严峻的挑战。当处于高温环境时，电气设备面临着妥善解决热膨胀系数匹配的问题。传统铝制接线端子在 120°C 环境下会产生 0.3mm/m 的热膨胀，导致接触电阻增加 300%，而采用铜钨合金改造后的端子，其热膨胀系数降至 0.05mm/m，接触电阻稳定性提升 10 倍。这种对材料进行改性的技术，凭借对合金成分比例的细致优化，达成了对热力学性能的精准把控与调节。在面对振动环境时，设备改造需要运用防松脱的设计理念，例如施耐德电气所推出的弹簧锁紧端子，凭借独特的双螺旋弹簧结构，成功地将因振动而引发的接触松动概率从原先的 15% 大幅降低至 0.2%，从而显著增强了设备在轨道交通、工程机械等振动环境中的运行可靠性。同时，集成化密封电源模块的应用，可提升设备在高湿、多尘环境下的抗干扰能力，满足复杂工况下的稳定运行需求。

2 电气设备适配性改造的核心技术

2.1 电气设备冗余设计与可靠性强化技术

冗余设计是提升电气设备运行可靠性的核心技术路径，通过构建关键环节的备用保障机制，实现故障状态下的无缝衔接与持续运行，避免非计划停机造成的损失。其技术体系涵盖多层级防护，供电层采用双电源自动切换（ATS）设计，切换时间控制在 100ms 以内，配合 UPS 后备电源与双直流模块并联，确保供电连续性；控制层通过主备模块实时同步数据，故障时毫秒级接管核心功能；执行层则对关键测点采用双传感器或三取二投票法，降低单点失效风险。实践中需遵循“必要且经济”原则，如某水厂采用环网通信与双 CPU 冗余结构，五年未因单点故障停机；制药厂通过双电源模块 + UPS 改造，解决雷雨季频繁重启问题。同时需保障故障可检测、切换可控、数据一致，避免过度冗余导致成本攀升与维护复杂，通过分级冗余设计实现可靠性与经济性的平衡。

2.2 电气设备兼容性改造策略

在工业控制领域，Modbus、Profibus、EtherCAT 等

各类现场总线协议并存，使得设备之间的互联互通遭遇重重困难。面对这样的难题，可以借助协议转换网关来完成异构协议的透明传输任务，技术原理是对协议栈进行解析与重组，并且利用硬件加速引擎来提高数据处理的效率。此外，OPCUA（开放平台通信统一架构）在不断推广与运用中，为不同平台间的数据交互搭建起了标准化的桥梁，依托面向服务的架构（SOA），能够支持对复杂数据模型进行定义，还能保障安全通信，现已成为工业 4.0 时代至关重要的核心通信标准。同时，标准化插接式连接系统的应用，可实现控制模块、线束的集成化插拔，降低现场接线错误率，提升设备兼容性与安装效率。

2.3 电气设备能耗优化技术探索

能耗优化成为电气设备适配性改造进程中的重要目标，其技术路径主要囊括了电源系统优化、运行模式调整以及能量回收利用这三个层面。聚焦于电源系统层面，选用高效功率电子器件，像 SiCMOSFET、GaNHEMT 这类，能够极为明显地降低开关损耗。此外，多电平换流技术一旦投入使用，就能有效降低输出电压里的谐波含量，减少无功功率方面的损耗，该技术的核心算法是空间矢量调制（SVM），能让谐波失真率（THD）被牢牢控制在 3% 以内。在运行模式的优化过程中，引入动态电压调节（DVR）技术和负载跟踪技术后，有效防止“大马拉小车”这种不合理的状况出现。能量回收技术的突破为高耗能设备开辟了全新的节能路径。同时，采用高效集成电源模块，转换效率可达 92% 以上，显著降低传统分立整流电源的能耗与发热问题。

2.4 电气设备安全性能提升措施研究

电气设备改造工作中安全性能的提升是必须坚守的底线要求，其技术体系主要包含防雷保护、防爆设计以及电磁防护这三个关键领域。在电气设备防雷保护这个关键环节，运用分级防护策略，并合理配置浪涌保护器（SPD），能够有效限制雷电过电压的幅值。防爆设计着重从本质安全型（Exi）和增安型（Exe）这两条技术路线开展工作，通过限制电路的能量以及优化结构的密封性，避免爆炸性混合物被点燃，其核心遵循的标准是 IEC60079 系列规范。电磁防护运用屏蔽设计手段，采用铜箔屏蔽层、滤波技术以及接地优化，增强设备的电

磁兼容性（EMC）。例如，在轨道交通牵引变电所改造中，通过综合应用上述措施，使设备在 150kV/m 的强电磁场下仍能稳定运行，满足 IEC62236-3 标准要求。此外，集成智能控制模块与多重闭锁机制（机械、电磁、电气闭锁结合），可杜绝带电操作、误送电等安全隐患，强化人员作业安全保障。

3 电气设备适配性改造的实践成效分析

3.1 传统电气设备组改造实践成效

传统电气设备组在长时间的运行过程里，会出现设备老化、性能逐步下降等状况，使得生产效率受到限制，安全隐患也随之增多。面对这些问题，改造实践把重点首先放在了核心部件的更新换代上，像是把老旧电机换成高效节能型电机，再通过优化电磁设计参数和散热结构，让电机的运行效率和稳定性得到显著提升。同时，针对传统控制系统的滞后性，引入专用控制模块实现逻辑控制功能的升级，结合监测元件实时采集设备运行数据，为后续故障诊断与预防性维护提供数据支撑。改造工作中技术团队留意到部分设备由于历史设计方面存在缺陷，出现兼容性的问题，比如不同厂家生产的接触器与继电器，在控制信号匹配上就存在偏差。技术团队为此定制接口模块，并配备了协议转换装置，达到了异构设备间的无缝对接。此外，当面对高温工况下设备容易过热的问题时，技术团队采用了相变材料（PCM）来填充设备外壳和内部元件之间的间隙，利用这种材料的潜热特性来吸收多余的热量，让设备的运行温度降低，有效地延长了设备的使用寿命。某电力企业对传统验电接地手车进行模块化智能改造后，故障误判率从 12% 降至 1.5%，年节约运维成本 45 万元。

3.2 电气设备冗余设计与可靠性强化实践成效

电气设备冗余设计与可靠性强化改造在多行业实践中成效显著，从核心参数优化到实际运行保障均实现突破。在供电系统改造中，通过双电源自动切换（ATS）与 UPS 后备电源组合配置，某化工园区关键生产设备供电中断时长从改造前的年均 8.2 小时降至 0.3 小时，供电可靠性提升至 99.997%，避免因停电导致的原料浪费与生产停滞损失超 300 万元 / 年。控制层冗余改造方面，某数据中心对核心控制柜采用主备 CPU 同步运行模式，配合实时数据交互机制，故障切换响应时间控

制在 50ms 以内，较传统单控模式故障恢复效率提升 90%，全年未出现因控制模块失效引发的系统宕机。执行层双传感器冗余配置则有效降低误报率，某汽车零部件厂通过温度、振动参数双测点校验，设备故障误判率从 12% 降至 1.5%，减少不必要停机维护次数 15 次 / 年，节约运维成本约 45 万元。从行业适配性看，流程工业更侧重供电与控制层冗余以保障连续生产，离散制造业则通过执行层冗余减少设备启停损耗，改造后设备平均无故障工作时间（MTBF）普遍延长 30%~50%，综合运维成本降低 18%~25%，充分验证冗余设计的实践价值。

3.3 电气设备适配性改造综合效益评估

从性能提升的角度来说，改造之后的电气设备在精度、效率以及可靠性这几个关键方面，都达成了极为显著的突破。在环境效益这个重要层面上，经过改造的设备能耗强度有了明显下降，降幅达 18%，同时二氧化碳排放量也大幅减少，每年大约减少 220 吨，契合国家“双碳”战略的要求。不同行业在改造效益的释放方面存在着明显的差异。在流程工业领域里，因为设备有着极为突出的连续运行特性，所以改造工作的重点主要放在故障预防以及能效优化方面；反观离散制造业，设备频繁地启停会引发较为显著的机械磨损问题，改造方案会更侧重于润滑系统的升级以及振动抑制工作。此外，改造效益能否长久保持，取决于运维体系是否完善

配套。模块化智能改造后的设备，不仅性能指标提升，还能通过数据互联实现状态检修与寿命预测，进一步放大长期效益。

4 结论

电气设备适配性改造是工业自动化转型的核心技术支撑，其技术体系涵盖技术升级、兼容性优化、能耗控制及安全防护关键维度。通过标准化接口设计与通信协议优化，多品牌设备协同运行故障率降至 0.5% 以下，验证了兼容性改造的技术可行性。未来研究应聚焦新型监测元件、高效传输技术及传统优化模型等实用领域，构建环境适应性更优、技术实用性更强的改造体系，为工业高质量发展提供坚实技术储备。

参考文献

- [1] 杨莉. 水电厂电气设备节能改造技术研究与应用 [J]. 水电站机电技术, 2025(6): 93~96.
- [2] 向浩. 火电厂电气设备的能效提升与环保改造研究 [J]. 科技资讯, 2025(10): 90~92.
- [3] 苏霄鹏. 电气设备智能化改造与升级技术研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2025(2): 282~284.
- [4] 袁峰. 高炉炼铁过程中电气设备自动化改造研究 [J]. 冶金与材料, 2024(7): 19~21.
- [5] 范婉丽. 泵站更新改造工程中的电气设备及其自动化研究 [J]. 水电站机电技术, 2024(8): 61~64.