老旧厂房电气自动化升级改造难点与实施策略研究

张冬阳
中广核核电运营有限公司　广东　深圳　518124

摘　要：随着我国制造业转型升级深入推进，大量老旧厂房面临电气自动化系统升级改造的迫切需求。本文系统分析了老旧厂房电气自动化改造面临的技术兼容性差、施工窗口期短、系统集成难度大、安全风险高等核心难点，从前期评估、方案设计、施工实施、系统调试四个阶段提出了全流程实施策略。研究指出，改造应以“兼容优先、分步实施、安全托底”为基本原则，通过过渡接口设计、虚拟调试、模块化替换等关键技术手段，在保障生产连续性的前提下实现系统平稳升级。本文可为同类改造项目的科学决策与规范实施提供实践参考。

关键词：老旧厂房；电气自动化；升级改造；系统集成；实施策略

引言：我国大量建于20世纪90年代至21世纪初的工业厂房电气自动化系统，已运行15—25年，普遍存在设备老化、备件停产、通信协议封闭、系统孤立等问题，难以适应智能制造与数字化转型要求。老旧厂房改造面临施工空间受限、生产不能中断、历史图纸缺失、原系统技术资料不全等特殊约束，其复杂性和风险远高于新建项目。本文从工程实践角度出发，系统梳理改造的核心难点并提出全流程实施策略，以期为同类项目提供参考。

1 老旧厂房电气自动化系统的现状与改造需求

1.1 系统现状与典型问题

老旧厂房电气自动化系统按建设年代可划分为三个阶段。第一阶段（1995年以前）以继电器—接触器控制为主，基本无可编程控制器（PLC）参与，系统硬接线复杂，故障排查困难。第二阶段（1996—2005年）以PLC和集散控制系统（DCS）为核心，但多为欧美日厂商早期产品，如西门子S5系列、AB PLC-5系列、三菱A系列等，采用专用通信协议和编程软件，备件已停产，维护成本高昂。第三阶段（2006—2015年）虽已采用现代PLC架构，但系统间仍多为“信息孤岛”，未实现网络化互联和数字化管理。

典型问题表现为：控制柜内元器件老化严重，接触器触点氧化、继电器线圈绝缘下降，年均故障停机时间达80—120小时；通信总线速率低于1Mbps，无法承载实时数据采集和远程运维需求；人机界面（HMI）仍为Windows 2000/XP时代的触摸屏，不支持现代工业以太网协议；原系统供应商已不再提供技术支持，企业被迫依赖第三方维修，存在知识产权和技术保密风险。

1.2 改造驱动因素

推动老旧厂房电气自动化升级的动力来自内外两个维度。外部压力方面：国家《“十四五”智能制造发展规划》明确要求规模以上工业企业到2025年基本实现数字化转型，工信部对数字化车间和智能工厂的认定标准中对自动化系统投运年限有明确要求；环保与能耗监管趋严，老旧系统无法满足实时能耗监测和碳排放核算要求[1]。内部动力方面：设备老化导致故障率升高、维护成本逐年攀升，部分企业年维护费用已占设备原值的8%—12%；系统开放性差导致生产数据无法接入企业资源计划（ERP）和制造执行系统（MES），制约管理效率提升；人工操作占比高，产品质量一致性难以保证，影响市场竞争力。

1.3 改造的复杂性特征

老旧厂房改造的复杂性远超新建项目，表现为“三个不确定性”。技术状态不确定性：大量老旧系统经过多年运行和多次维修，实际接线与图纸不符，元器件型号被替换，系统真实状态难以精确掌握。外部边界不确定性：改造施工必须在有限停产窗口内完成，周边生产区域不能中断，施工组织受制于生产调度。系统行为不确定性：新旧系统切换时，接口时序匹配、信号电平兼容、接地系统差异等微观问题可能引发宏观系统异常，调试阶段不可预见问题占比达30%—40%。

2 升级改造的核心难点分析

2.1 技术兼容性难题

技术兼容性是改造的首要障碍。老旧PLC多采用专用通信协议，如西门子S5的3964R、AB的DH+、Modbus串行等，与Profinet、EtherNet/IP等现代工业以太网在物理层、数据链路层及应用层均不兼容，直接替换控制器后原有从站设备无法通信，若一并更换则投资剧增。更深层问题在于信号接口差异：模拟量信号供电方式、负载阻抗、隔离方式与现代仪表不匹配，直接接入可能信号失真或损坏模块；数字量信号电压等级

（24VDC/110VAC/220VAC混杂）和逻辑极性（源型/漏型）不统一，转换工作量巨大。大量非标设备通信规约不公开，难以集成至新系统。

2.2 施工实施约束

老旧厂房改造面临新建项目不具备的特殊约束。空间上，电气室狭小无机柜位置，桥架满载无线缆路径，操作箱被设备包围无作业面。时间上，连续生产型企业全年检修窗口仅3—7天，而完整系统替换需15—30天。安全上，带电机柜旁作业、运行桥架上敷缆、粉尘高温环境施工均为高风险作业，事故概率数倍于新建项目。大多数改造要求不停产完成新旧切换，对施工方案精细度要求极高。

2.3 系统集成与数据贯通难题

改造终极目标是实现设备层到管理层的数据贯通，但面临多层次障碍。设备层异构：不同年代设备采用Profibus、DeviceNet、CC-Link等不同总线，难以统一接入。控制层协同：新旧系统时钟同步机制不同，数据交互存在时序错乱风险。管理层对接：OPCUA/MQTT数据模型需与ERP、MES语义映射，但老旧系统标签命名混乱、数据类型不规范，数据治理工作量远超预期[2]。据行业统计，数据贯通工作量通常占改造总工作量的25%—35%。

2.4 安全与可靠性风险

改造涉及供配电变动，安全风险贯穿全程。电气安全方面，临时用电、带电作业、接地系统改造中，新旧系统共用接地极可能引入地环路干扰，轻则信号漂移，重则烧毁模块。功能安全方面，原系统多未按IEC61508/61511设计，修改安全联锁逻辑可能改变危险失效概率，若改造后PFDavg或PFH不满足SIL要求，将构成重大隐患。此外，若未充分测试，投运初期存在“浴盆曲线”早期失效风险。

3 升级改造的实施策略

3.1 前期评估与方案设计策略

改造工程的成功60%取决于前期评估和方案设计的质量。前期评估应包括四个维度：设备状态评估，对现有控制系统硬件进行寿命分析和故障统计，确定必须更换和可保留的设备清单；接口边界评估，逐点梳理新旧系统对接的信号清单、协议清单和电源清单，识别所有潜在不兼容点；施工条件评估，测量电气室空间、桥架容量、施工通道，编制施工约束条件清单；风险影响评估，识别各类设备故障对生产安全、产品质量、环保达标的影响程度和影响范围。方案设计应遵循“最小影响、最大保留”原则。核心策略包括：采用网关协议转换方案解决通信兼容问题，如通过Profinet转Modbus网关、EtherNet/IP转DH+网关等，尽量保留原有从站设备；采用“新旧并行、逐步切换”的过渡方案，新建系统与旧系统并行运行一段时间，确认稳定后再切断旧系统；采用接口适配器解决信号不匹配问题，设计专用的信号调理模块实现电压转换、隔离放大等功能。方案中必须包含详细的切换操作流程和应急预案，对每一步操作规定时间窗口、执行人和验证标准。

3.2 施工组织与过程控制策略

施工阶段的核心策略是“化整为零、分段实施”。将整体改造分解为多个独立子项目，每个子项目在独立的计划停机窗口内完成，避免一次性大范围停机。典型的分解方式包括：按生产线分段（如1号线、2号线分步改造）、按区域分段（如原料区、成品区独立实施）、按功能分层（先改造PLC系统、再改造HMI系统、最后改造通信网络）。施工过程应实施“两图一表”精细化管理：编制施工进度网络图，明确各工序的前后关系和关键路径，识别不可压缩的关键工序并优先保障资源；编制施工平面布置图，规定材料堆放区、临时用电点、安全通道和应急疏散路线；编制风险控制表，逐项列明每个施工活动的危险源、控制措施和责任人[3]。同时建立“每日三检”制度（开工前检查、过程中巡查、收工后复查），确保施工质量可追溯。

3.3 调试与验收策略

调试阶段是改造工程的“惊险一跃”，策略重心在于“充分预演、逐步投运”。强烈建议采用虚拟调试技术：在改造实施前，利用数字孪生平台搭建新旧系统的虚拟模型，完成80%以上的逻辑验证和时序测试，将现场调试时间压缩50%以上。虚拟调试可提前发现接口时序冲突、数据溢出、死循环等逻辑问题，避免现场反复修改程序带来的工期延误。现场调试应遵循“先离线后在线、先手动后自动、先空载后负载”的三级递进原则。离线调试确认新系统自身硬件完好、程序无语法错误；手动模式下确认各执行机构动作正确；自动空载运行验证顺序逻辑和联锁条件；带料负载运行确认控制精度和响应特性。验收应采用“双指标”体系：功能性指标包括控制精度、响应时间、可用率等；兼容性指标包括新旧系统数据交互正确率、通信延迟、故障切换时间等。特别重要的是，验收阶段必须进行故障注入测试，人为模拟传感器断线、通信中断、电源失电等异常工况，验证系统的安全响应是否符合设计要求。

3.4 典型改造模式选择

根据企业实际情况，改造模式可分为三种典型路

径。路径一为“整体替换式”：在较长的年度大修窗口内（一般需10天以上），一次性拆除旧系统、安装新系统、完成调试投运。适用于生产弹性大、有备用产能的企业，改造工期最短但风险最高。路径二为“逐步过渡式”：先完成新系统机柜安装和离线调试，在多个短期停机窗口内逐段切换I/O信号，每次切换一个区域或一条子线，直至全部切换完毕。适用于连续生产、不能长时间停产的企业，风险可控但工期拉长。路径三为“混合式”：核心控制器一次性替换，保留大部分I/O和现场仪表，通过协议网关实现新旧过渡，后续再分批升级外围设备。该路径综合了前两者的优点，是目前工程实践中采用最多的模式，占比约65%。企业应根据自身生产特征、停机窗口长短、资金预算和技术力量综合选择适宜的改造模式。

4 改造策略的保障体系

4.1 组织保障与人员培训

老旧厂房改造不仅是技术工程，更是组织工程。应建立“业主主导、设计院把关、集成商实施、原厂支持”的四方协同架构。业主方设专项项目部，由生产副总经理挂帅，统筹协调生产与施工矛盾；设计院负责方案审核与技术把关；集成商负责具体实施；原厂提供核心技术支持和备件保障。四方应建立每日碰头会制度，及时协调解决问题。培训分三阶段：改造前理论培训，使运维人员了解新系统架构与原理；调试阶段跟班实操培训，在工程师指导下上手操作；投运后深化培训，针对实际问题专项讲解。培训效果须通过理论与实操双重考核验证，确保运维人员具备独立处理常见故障的能力[4]。

4.2 备品备件与应急保障

改造过渡期需建立完善的备品备件和应急保障体系。一方面，在旧系统拆除前应建立“备件银行”，对关键元器件（CPU模块、电源模块、通信模块）保留足够数量的备件，以应对新系统投运初期的不稳定因素。另一方面，应与系统供应商签订技术服务协议，确保在重大故障时能够获得48小时内到场支持。改造期间应准备应急恢复方案：若新系统在切换后出现短期内无法排除的重大故障，应具备快速回退至旧系统的能力和预案，回退时间应控制在4小时以内。

4.3 文档资料与知识管理

老旧厂房改造中暴露出的共性问题之一是文档管理混乱，导致后续运维困难。改造项目应建立完整的文档交付体系，包括但不限于：竣工图纸（含新旧系统对接点的详细接线图）、I/O信号分配表（含新旧地址对照关系）、程序注释文档（含关键逻辑的说明）、调试记录（含故障排除过程）、操作手册和维护手册。所有文档应采用电子化方式归档，纳入企业设备管理系统统一管理。文档交付应在项目验收时一并完成，作为验收的前置条件，避免“工程完了、图纸丢了”的痼疾重现。

结束语

本文系统分析了老旧厂房电气自动化改造面临的技术兼容性差、施工约束强、系统集成难度大、安全风险高等核心难点，并提出了从前期评估到验收交付的全流程实施策略。研究表明，改造成败取决于对既有系统状态的精确把握、对施工约束的充分尊重及对新旧系统过渡的精细管控。协议转换网关、虚拟调试、分段切换等手段的组合运用，可在保障生产连续性的前提下实现系统平稳升级。建议企业摒弃“小修小补”的被动应对，将升级纳入中长期规划统筹推进，系统性破解存量资产数字化转型瓶颈。

参考文献

[1]姚维雁.基于BIM技术的厂房电气系统施工集成研究[J].电气技术与经济,2026(4):62-65.

[2]李蓓.工业厂房建筑中电气节能设计的应用探析[J].科技资讯，2025，23(18)：153-155.

[3]王小虎,金超.标准厂房电气设计探讨[J].建筑电气,2023,42(4):22-27.

[4]刘雪东,刘鑫,吴宪.喷漆厂房通风控制系统自动化设计[J].设备管理与维修，2025(13):168-171.