

智能化背景下电气热控一体化控制系统设计

吴天杰

国能浙江北仑第一发电有限公司, 浙江 宁波 315800

DOI:10.61369/EPTSM.2026060018

摘 要 : 在工业智能化持续推进的背景下, 传统电气控制系统与热控系统分设运行所造成的数据割裂、联锁分散、响应滞后和运维复杂等问题逐渐显现。围绕连续型工业生产现场对安全性、实时性和协同性的要求, 提出一种电气热控一体化控制系统设计方案。该方案以统一设备对象模型为基础, 构建现场感知、边缘控制、协同决策和运维应用四层架构, 并从数据融合、标准通信、跨专业联锁、智能预警、权限审计及验证评价等方面开展系统设计。通过建立电气量、热工量、设备状态和控制指令之间的关联关系, 系统能够在负荷调整、设备启停和异常保护等典型工况下实现协同控制。研究结果可为火电机组及类似工业现场控制系统的智能化改造提供技术参考。

关 键 词 : 智能化; 电气系统; 热控系统; 一体化控制; 数据融合; 协同联锁

Design of Integrated Electrical and Thermal Control System in the Context of Intelligence

Wu Tianjie

CHN Energy Zhejiang Beilun No. 1 Power Generation Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315800

Abstract : With the continuous development of industrial intelligence, the separated operation of electrical control systems and thermal control systems has increasingly exposed problems such as data fragmentation, distributed interlock logic, delayed response and complicated operation and maintenance. According to the requirements of safety, real-time performance and coordination in continuous industrial production, an integrated electrical and thermal control system is proposed. Based on a unified equipment object model, the system adopts a four-layer architecture consisting of field perception, edge control, collaborative decision-making and operation application. The design focuses on data fusion, standardized communication, cross-discipline interlock, intelligent warning, authority auditing and verification evaluation. By establishing correlations among electrical variables, thermal process variables, equipment states and control commands, the proposed system supports coordinated control under typical operating conditions such as load regulation, equipment start-stop and abnormal protection. The study provides a technical reference for intelligent retrofit of control systems in thermal power units and similar industrial sites.

Keywords : intelligence; electrical system; thermal control system; integrated control; data fusion; collaborative interlock

引言

电气系统与热控系统是火电机组及连续型工业生产装置的重要控制单元。电气系统主要承担供电、设备启停、保护闭锁和负荷管理等功能, 热控系统主要承担温度、压力、流量、液位及相关工艺过程参数的检测与调节。两类系统的控制对象存在明显差异, 但在实际运行中又具有紧密的耦合关系。例如, 辅机电流变化会影响工艺介质输送能力, 温压参数变化也会反向约束电气设备的投入、退出和负荷调节。

在传统工程建设中, 电气与热控系统常按专业边界分别配置, 形成独立控制器、独立数据库和独立监控界面。该方式能够满足单专业控制要求, 但在机组负荷快速变化、辅机切换、设备异常和保护动作等工况下, 容易出现信息传递不及时、联锁逻辑不完整和运行处置依赖人工经验等问题。随着智慧电厂和工业互联网建设推进, 控制系统需要从单点自动化向跨专业协同控制转变, 一体化设计因此具有现实必要性。

本文围绕电气热控一体化控制系统的工程设计展开研究, 在分析传统分离式控制缺陷的基础上, 提出系统总体架构、关键功能模块、协同控制逻辑和安全验证方法, 力求形成既符合现场安全边界又具备智能化扩展能力的控制系统设计思路。

作者简介: 吴天杰 (1984—), 男, 汉族, 浙江宁波人, 工程师, 本科, 研究方向: 热工控制、智慧电厂。

一、传统电气热控分离控制系统存在的问题

（一）系统边界分离，协同响应能力不足

传统电气系统与热控系统通常分别完成数据采集、逻辑组态和运行监视。电气侧重点关注电流、电压、功率、开关状态和保护动作，热控侧重点关注温度、压力、流量、阀位和调节输出。由于两类系统缺少统一的设备对象模型和事件关联机制，运行过程中难以及时判断电气状态变化与热工参数波动之间的因果关系。尤其在升降负荷、辅机启停和工艺切换过程中，若热控指令与电气容量校核不同步，可能导致参数波动扩大、设备频繁动作或保护动作延迟。

（二）数据标准不统一，诊断支撑能力不足

数据是智能化控制和状态诊断的基础。分离式系统中，电气数据、热工数据、报警记录和检修记录往往分散存储，采样周期、命名规则、单位口径和质量标识不一致，影响了后续分析的完整性和准确性。以泵、风机、电动阀门等设备为例，电机电流、轴承温度、出口压力、流量变化和阀位反馈之间具有较强关联性。若上述信息无法形成统一数据链条，故障诊断只能停留在单测点越限报警层面，难以实现趋势识别、原因定位和处置建议。

（三）联锁逻辑分散，异常处置链条不完整

在分离式控制模式下，联锁条件可能分别布置在电气保护装置、DCS逻辑、PLC或独立控制柜中。不同专业之间的逻辑版本、点表接口和投退状态缺少统一管理，工程改造后容易出现动作条件重复、闭锁条件缺失或信号对应错误等问题。当发生异常时，运行人员需在多个界面之间进行状态核对，处置链条较长，故障根源定位效率较低。

（四）系统扩展与安全边界不足

智能化改造通常需要接入边缘计算、状态检修、远程运维和生产管理平台。若原有系统缺乏标准通信接口和分区分域安全设计，新增数据链路可能引入协议适配困难、权限边界模糊和审计记录不完整等风险。因此，一体化控制系统不能仅关注功能集成，还应在设计阶段同步明确网络分区、访问权限、数据流向和故障降级策略。

二、电气热控一体化控制系统设计目标与原则

（一）设计目标

电气热控一体化控制系统的目标是构建统一的数据基础、控制逻辑和运维界面，使电气量、热工量、设备状态和控制指令能够在同一平台中进行采集、分析、联动和追溯。具体而言，系统应实现以下目标：建立统一设备编码和测点模型；实现跨专业数据实时交互与历史追溯；形成典型工况下的协同控制逻辑；构建分级告警、故障闭锁和状态诊断机制；预留标准接口，为后续状

态检修、能效分析和智能优化提供数据支撑。

（二）设计原则

一是安全优先。电气保护和热工保护属于安全关键功能，上层优化算法和协同控制策略不得绕过底层保护边界。二是分层解耦。现场采集、实时控制、协同决策和运维应用应分层部署，避免上层应用故障影响基本调节和保护动作。三是数据可信。关键数据应具备时间戳、来源、质量码和单位信息，异常数据不得直接进入控制决策。四是渐进改造。对于存量系统，应优先复用可靠设备和成熟逻辑，通过接口适配、点表治理和逻辑重构逐步实现一体化。五是开放可控。系统在支持标准化通信和后续扩展的同时，应落实最小权限、白名单访问和操作审计等安全措施。

三、智能化电气热控一体化控制系统总体架构

结合工业现场控制系统实时性、可靠性和可维护性要求，本文将电气热控一体化控制系统划分为现场感知层、边缘控制层、协同决策层和运维应用层。各层之间通过标准化通信接口和统一数据模型实现协同，既保证底层控制的独立可靠，又为上层智能分析和运维管理提供数据基础。

表1 电气热控一体化控制系统分层架构			
层级	主要对象	核心功能	设计重点
现场感知层	电量传感器、智能仪表、开关量模块、温度、压力、流量和液位测点	采集电气量、热工量和设备状态	统一测点编码、量程单位、采样周期和质量码；关键测点设置校验或冗余
			实时控制与上层应用解耦；关键保护逻辑在本地闭环运行
边缘控制层	DCS、PLC、保护装置、边缘网关	执行基本调节、联锁保护、协议转换和本地缓存	建立设备对象模型和跨专业联锁矩阵，输出可解释的控制建议或指令
协同决策层	一体化控制服务、历史数据库、规则引擎、诊断模型	进行数据融合、规则匹配、状态评估和协同决策	按岗位授权展示和操作；关键操作留痕并支持追溯
运维应用层	监控界面、报警管理、报表、权限审计、远程运维接口	支持集中监视、趋势分析、故障追溯和运维管理	

四、系统关键功能与控制逻辑设计

（一）统一数据模型设计

统一数据模型以设备对象为核心，将同一设备相关的电气测点、热工测点等信息绑定到同一对象下，如给水泵对象关联电机电流等信息。数据模型至少包括设备编码、测点名称等字段。

（二）标准化通信与接口适配

通信接口设计兼顾实时性、兼容性和安全性。新建系统优先采用标准化工业通信方式实现数据互联，存量系统改造通过协议适配器或边缘网关兼容既有通信方式。接口设计明确数据生产者等内容，对重要控制指令设置权限校验等，避免误发等操作。

（三）跨专业联锁控制

跨专业联锁控制是电气热控一体化系统核心。系统可建联锁矩阵，统一描述触发条件、前置条件、动作对象、动作方式、保护优先级、延时设置和复归条件。通过矩阵化管理，能集中校核原本分散在不同专业图纸和控制器中的逻辑，减少漏项、冲突和重复动作风险。

表2 典型工况下的电气热控协同控制逻辑

典型工况	输入条件	协同控制逻辑	安全约束
升负荷 / 升温	目标负荷提高，关键温压参数处于允许区间，电气容量满足要求	热控侧按设定斜率提升目标值；电气侧同步校核电流、电压和功率裕度，必要时分段投入辅机	限制负荷变化率，禁止超过电机、变频器和工艺设备保护阈值
			防止参数骤降
降负荷 / 降温	负荷指令降低或工艺需求下降	热控侧先按设定曲线降低过程目标值；电气侧按设备状态逐步退出相关负荷	引起热应力或工艺波动，保留必要冷却和润滑设备
辅机启动	启动许可满足，母线电压正常，热工介质条件满足	电气侧完成启动许可和电机状态确认；热控侧同步检查阀门、压力、流量和联锁旁路状态	启动失败后禁止频繁重复启动，异常时转入保护流程
			保护动作优先于优化控制，所有越权操作均需审计
异常保护	超温、超压、过流、欠压、振动或通信异常	根据故障等级触发告警、降载、闭锁或停机，并冻结故障前后过程数据	

（四）智能预警与状态诊断

智能预警不应仅单测点越限报警，可结合阈值规则、趋势判断和关联分析。阈值规则识别安全边界，趋势判断发现缓慢劣化，关联分析判断多测点因果一致性。如电机电流升高、出口流量下降且轴承温度升高，提示泵效率下降等；电压波动与热工调节输出频繁变化同步，提示复核负荷调节策略等。

为保证预警结论可应用，系统应保留触发测点等信息。不可解释或置信度不足的模型输出作辅助提示，避免智能算法输出直接进入安全关键控制链。

（五）运维权限与审计管理

系统应按运行、检修等角色设置差异化权限。运行人员可查看全局状态并执行授权操作；检修人员可查看设备履历等；专业工程师可维护逻辑版本等；系统管理员负责账号等。所有关键操作应记录相关信息，形成完整追溯链。

五、系统安全与验证评价

（一）安全分区与访问控制

一体化控制系统打通数据链路时，要避免无边界网络。系统按现场控制区、协同决策区、运维管理区和外部接口区分区，不同区域通过工业防火墙等实施访问控制。关键控制器等采用最小权限等机制；外部平台原则上只获取授权数据，不直接写入底层控制指令。

（二）冗余容错与故障降级

系统可靠性设计覆盖控制器等关键环节。关键控制回路设冗余通信和本地保护闭环；上层诊断和运维应用故障不影响底层调节和保护动作。协同决策层不可用时，边缘控制层维持功能；通信链路异常时，现场控制器切换策略；数据质量异常时，智能控制功能自动退出并提示人工确认。

（三）验证评价指标

为避免一体化控制系统停留在概念设计阶段，投运前后均开展验证评价。投运前通过逻辑仿真等验证功能正确性；投运后结合运行记录等评价系统效果。评价维度包括功能正确性、实时性等。

表3 一体化控制系统验证评价指标

评价维度	指标示例	验证方法	判据说明
功能正确性	点表一致率、联锁动作正确率、顺控步骤完成率	逻辑仿真、离线数据回放、FAT/SAT 测试	安全关键逻辑应逐项验证并形成记录
	采集延迟、指令响应时间、事件排序准确性	通信抓包、时钟同步检查、负荷变化工况测试	满足现场控制周期和事故追忆要求
实时性	冗余切换时间、通信中断恢复时间、故障降级能力	断链、断电、主备切换和服务器故障演练	上层故障不得影响底层保护和基本调节
	账号权限覆盖率、越权拦截率、关键操作审计完整性	权限测试、日志审计和分区访问测试	符合工业控制系统分区分域和最小权限要求
安全性	报警压缩率、故障定位时间、重复录入减少量	投运前后运行记录对比、人员访谈和事件复盘	以现场运行数据评价改造收益

六、实施路径与应用保障

对于存量电厂或类似工业现场，一体化改造宜分阶段实施。第一阶段开展资产梳理、点表核对和数据字典建设，解决设备对象和数据口径问题；第二阶段建设统一数据平台和运维展示界面，实现数据可视化与历史追溯；第三阶段重构典型工况下的联锁矩阵和顺控流程并验证；第四阶段选低风险对象试点投运，再扩展至关键辅机和主流程；第五阶段接入状态检修等平台，形成持续优化机制。

实施中，应重点避免三类问题：一是只合并监控画面，不重构数据模型和联锁逻辑；二是过度强调算法优化，忽视现场保护边界；三是为求系统互联，弱化网络安全分区。电气热控一体化控制的工程价值，需在安全边界清晰、数据可信、逻辑可审计和故障可降级的前提下才能充分体现。

七、结语

智能化背景下，传统电气系统与热控系统分离运行模式已难

以满足连续型工业生产对协同性、安全性和运维效率的要求。本文从系统架构、数据模型、通信接口、联锁控制、智能预警、安全防护和验证评价等方面提出电气热控一体化控制系统设计方案。该方案以统一设备对象模型为基础，通过四层架构实现现场采集、边缘控制、协同决策和运维应用之间的有机衔接，并通过跨专业联锁矩阵和状态诊断机制提升典型工况下的协同控制能力。

研究表明，电气热控一体化控制的关键并非简单合并硬件或监控界面，而是建立电气量、热工量、设备状态和控制逻辑之间的可追溯关联。后续可结合具体机组运行数据，对系统响应时间、故障定位效率、报警治理效果和运维成本变化进行量化分析，进一步验证该设计方案的工程应用价值。

参考文献

- [1] IEC. IEC 62541 OPC Unified Architecture[S].
- [2] International Society of Automation. ISA/IEC 62443 Series of Standards: Industrial Automation and Control Systems Security[S].
- [3] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. GB/T 22239-2019 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求 [S]. 2019.
- [4] 吴成坤. 基于 PLC 的工程机械电气设备智能化控制优化策略 [J]. 电气应用, 2026, 45(04): 95-99.
- [5] 宋春雨. 智能化仪器仪表抗电气干扰技术研究 [J]. 中国仪器仪表, 2026(05): 47-50.
- [6] 陈永强, 尹金鑫, 于明伟. 智能化技术在电气安装与调试中的应用 [J]. 安装, 2026(05): 48-50.
- [7] 王洪生, 高毅. 建筑智能化照明电气系统的节能控制策略与实践研究 [J]. 光源与照明, 2026(04): 71-73.
- [8] 周正山. 电气柜装配车间智能化升级投资论证分析 [J]. 企业改革与管理, 2026(07): 72-74.