

火电厂热工保护逻辑的优化

杨思珮 邹振宇 孙艳莉 张海亮

内蒙古上都发电有限责任公司 内蒙古 锡林郭勒盟 027200

摘要：火电厂热工保护系统是保障机组安全稳定运行的关键防线，其逻辑设计直接影响设备可靠性与经济效益。本文围绕火电厂热工保护逻辑优化展开研究，剖析热工保护系统传感器、逻辑控制等组成结构，明确降低误动拒动率、平衡安全经济等优化目标与原则。提出逻辑架构、算法模型、硬件信号链优化及仿真验证闭环方法，包括多重判据融合、神经网络应用、传感器冗余设计等技术手段。同时给出强化逻辑诊断、深化智能融合等实践策略。研究成果为提升火电厂保护系统可靠性与运行效率提供理论与实践支撑，助力实现安全高效生产。

关键词：火电厂；热工保护逻辑；优化方法；策略

引言：随着火电机组向大容量、高参数发展，传统保护逻辑在复杂工况下暴露出误动、拒动等问题，难以满足现代电力生产需求。本文针对热工保护逻辑现存缺陷，系统阐述优化目标、原则与方法，结合工程实践提出可行策略，旨在提升保护系统响应精准性与运行稳定性，为火电厂智能化升级提供技术参考。

1 火电厂热工保护系统的组成

火电厂热工保护系统作为保障机组安全稳定运行的核心防线，其组成结构严密且功能分工明确，主要由以下部分构成。（1）传感器系统负责实时监测机组运行参数。温度、压力、流量、液位等各类传感器遍布锅炉、汽轮机、发电机等关键设备，将温度、压力、转速等物理量转化为电信号，为系统提供判断依据。如锅炉汽包水位传感器通过差压原理精确测量水位，一旦水位异常，信号即刻传输至控制层。（2）逻辑控制系统承担信号处理与决策功能。它以可编程逻辑控制器（PLC）、分散控制系统（DCS）为载体，内置预设保护逻辑程序。当传感器信号触发预设阈值或逻辑条件时，系统快速分析判断，发出保护指令。如汽轮机紧急跳闸系统，当转速超过额定值110%，逻辑控制器迅速判定超速故障，触发停机指令。（3）执行机构负责将控制指令转化为实际动作。常见的执行机构包括电磁阀、气动调节阀、电动闸阀等。以锅炉主燃料跳闸系统为例，逻辑控制器发出指令后，执行机构迅速切断燃料供应管道，关闭燃烧器，避免爆燃事故。（4）辅助系统则为保护系统的可靠运行提供支撑。涵盖电源、通信、人机界面等模块^[1]。冗余电源设计确保系统在突发断电时仍能正常工作；通信网络实现数据快速传输与共享；人机界面则方便运行人员实时监控状态、修改参数。

2 热工保护逻辑优化的目标与原则

2.1 热工保护逻辑优化的目标

热工保护逻辑优化以保障火电厂安全稳定运行、提升经济效益为核心目标，具体体现在以下三个层面。

（1）降低保护误动与拒动率。误动会导致机组非计划停运，造成巨大经济损失；拒动则可能引发设备损坏甚至安全事故。通过优化逻辑，减少因信号干扰、阈值单一等问题导致的误判断，提高保护动作的精准性。（2）增强系统响应速度与可靠性。在故障发生时，保护逻辑需快速识别异常并触发相应动作，缩短故障处理时间，避免事故扩大。通过冗余设计、多判据融合等手段，提升系统整体可靠性。（3）平衡安全与经济。优化后的保护逻辑要保障设备与人员安全，还需兼顾经济性，减少因过度保护导致的不必要停机，提升机组运行效率与发电效益。

2.2 热工保护逻辑优化的原则

热工保护逻辑优化需遵循以下科学、严谨的原则，确保优化方案的可行性与有效性。（1）安全性优先原则。任何优化措施都不能削弱保护系统的基本功能，必须保障在极端工况下，系统能可靠触发保护，防止重大事故发生。（2）可靠性与经济性平衡原则。要求在优化过程中，避免因过度追求可靠性而大幅增加成本，需综合评估硬件升级、算法改进等措施的投入产出比，选择性价比最优方案。（3）可追溯性与可维护性原则。强调优化后的逻辑需具备清晰的判断流程与数据记录，便于故障分析与排查；逻辑设计应简洁明了，降低运维难度，提高检修效率。（4）兼容性与扩展性原则。优化后的保护逻辑需与现有系统无缝对接，并预留升级接口，以适应火电厂未来技术发展与设备改造需求^[2]。

3 火电厂热工保护逻辑的优化方法

3.1 逻辑架构优化

3.1.1 多重判据融合策略

在锅炉主燃料跳闸（MFT）逻辑优化中，可构建“基础参数+辅助参数+趋势分析”的三重判断体系。以燃料中断故障为例，除监测燃料压力、流量等基础参数外，引入炉膛火焰强度（采用红外传感器阵列捕捉火焰分布）、烟气氧量（通过氧化锆探头实时测量）、火检信号稳定性等辅助参数，通过逻辑门电路组合判断。如当燃料压力骤降且火焰强度低于阈值，同时氧量出现异常波动时，触发MFT动作，避免因单一参数波动导致的误触发。引入数据相关性分析，通过皮尔逊相关系数等算法评估参数间关联度，动态调整判据权重，提升复杂工况下的判断准确性。

3.1.2 动态时序逻辑优化

传统固定延时逻辑难以适应不同故障的响应需求。可建立分级延时决策模型：对威胁设备安全的紧急故障（如汽轮机超速、轴振超标），采用“零延时触发+快速响应”机制；对需观察趋势的异常工况（如汽包水位缓慢波动、主蒸汽温度渐变），设置阶梯式延时策略。如当汽包水位偏离正常范围时，先设置10秒观察期，若偏差持续扩大则触发报警；若在30秒内未恢复正常，则启动保护动作。结合故障发展预测模型，利用历史数据训练时序预测算法（如ARIMA模型），提前预判参数变化趋势，实现延时时间的自适应调整。

3.1.3 故障树分析（FTA）与逻辑重构

通过FTA模型系统梳理故障传播路径，识别关键节点与薄弱环节。以汽轮机跳闸逻辑优化为例，构建包含润滑油压低、轴向位移超限、真空下降等分支的故障树，分析各故障间的耦合关系。基于分析结果，优化逻辑分支结构：对相互独立的故障分支采用“或门”并联，确保任一故障发生即触发保护；对存在因果关系的故障链（如润滑油温升高导致油压下降），采用“与门+时序判断”串联，避免误判。引入故障树动态更新机制，根据设备运行状态实时调整故障概率分布，提升逻辑的适应性。

3.2 算法模型升级

3.2.1 神经网络与故障预测

利用长短期记忆网络（LSTM）处理时间序列数据，对汽轮机振动、轴承温度等参数进行趋势预测。通过收集机组历史运行数据（包含正常工况与故障案例），训练LSTM模型学习参数变化模式。当模型预测到振动值即将突破阈值时，提前发出预警，并联动保护逻辑做好响应准备。引入卷积神经网络（CNN）处理图像数据，如通过炉膛火焰图像识别燃烧异常，结合深度学习算法提取火焰特征（如亮度分布、形态变化），为燃烧稳定性

评估提供更直观的判断依据。

3.2.2 模糊逻辑与模糊决策

针对边界模糊的工况判断问题，构建模糊逻辑系统。以锅炉燃烧稳定性评估为例，将火焰强度、烟气温度、氧量等参数划分为“强-中-弱”等模糊集，建立模糊规则库（如“若火焰强度弱且氧量高，则燃烧不稳定”）。通过模糊推理计算得出燃烧稳定性的模糊隶属度，结合去模糊化算法输出明确的保护决策。相比传统阈值判断，模糊逻辑能更灵活地处理参数波动，减少因精确阈值导致的误判风险。

3.2.3 贝叶斯网络与不确定性推理

构建贝叶斯网络模型综合考虑设备老化、环境温度、电网负荷等因素对故障概率的影响。以发电机定子绕组过热保护为例，将绕组温度、冷却水压、环境湿度等变量作为节点，通过历史数据训练确定节点间的条件概率分布。当监测到温度异常时，贝叶斯网络自动更新各节点概率，计算故障发生的后验概率，为保护决策提供量化依据。通过敏感性分析确定关键影响因素，指导运行人员采取针对性预防措施。

3.3 硬件与信号链优化

3.3.1 传感器冗余与智能诊断

对关键参数（如汽包水位、主蒸汽压力）采用三取二表决冗余配置**，并引入传感器健康诊断算法。当三个传感器数据出现分歧时，通过中值滤波、卡尔曼滤波等算法剔除异常值，选择有效数据。在传感器内部集成自诊断模块，实时监测传感器零点漂移、量程偏差等故障，当检测到异常时自动触发报警并切换至备用传感器。

3.3.2 信号传输链路强化

采用光纤通信+屏蔽电缆的混合传输方案，关键信号（如跳闸指令）优先使用光纤传输，避免电磁干扰。在电缆敷设环节，严格执行屏蔽接地规范，设置独立信号通道，减少信号串扰。在DCS系统输入模块前加装硬件滤波电路（如二阶巴特沃斯滤波器），对高频噪声进行衰减；在软件层面采用数字滤波算法（如滑动平均滤波、中值滤波），进一步提升信号质量。

3.3.3 执行机构可靠性提升

选用具备故障安全特性的智能型执行机构，如带位置反馈的电动调节阀、失电动作型电磁阀。建立执行机构性能在线监测系统，通过采集阀门行程时间、动作电流、泄漏量等参数，评估执行机构健康状态。对汽轮机跳闸电磁阀组采用双线圈冗余设计，当主线圈故障时自动切换至备用线圈，确保跳闸指令可靠执行。

3.3.4 电源系统冗余保障

采用双路市电+柴油发电机+UPS的三级供电保障体系。双路市电通过静态切换开关实现无缝切换；柴油发电机作为应急电源，在市电中断时10秒内启动；UPS系统采用在线式双变换架构，提供至少30分钟的持续供电能力，确保保护系统在极端情况下仍能正常运行。

3.4 仿真验证与闭环优化

3.4.1 数字仿真平台搭建

基于MATLAB/Simulink构建火电机组全系统动态模型，包含锅炉、汽轮机、发电机等子系统，并精确模拟各设备的热力学特性与控制逻辑。通过设置典型故障场景（如锅炉爆管、汽轮机甩负荷），对优化后的保护逻辑进行功能测试，对比动作时间、保护范围等指标。利用Aspen Plus等流程模拟软件，对热力系统进行热力学仿真，验证保护动作对机组运行参数的影响。

3.4.2 半物理仿真与现场验证

搭建半物理仿真平台，将优化后的逻辑下载至实际DCS控制器，连接模拟量输入输出设备（如压力变送器、电动门），模拟真实运行环境。在现场应用阶段，采用分阶段投运策略：先在非关键保护回路（如辅机联锁保护）试运行，收集运行数据；通过对比试验，设置优化前后的A/B侧对照，量化评估优化效果。当试运行稳定后，逐步推广至主保护系统。

3.4.3 反馈优化机制

建立长期运行数据监测平台，收集保护动作记录、设备运行参数、故障报警信息等数据。通过数据挖掘算法，识别保护逻辑存在的潜在问题。如若某保护频繁误动，通过分析关联参数确定误动原因，针对性调整逻辑阈值或算法^[3]。建立专家知识库，将优化经验与案例进行结构化存储，为后续优化提供参考，形成持续改进的良性循环。

4 提升热工保护逻辑优化的策略

提升热工保护逻辑需从实际运行痛点出发，通过技术升级与管理优化双管齐下，实现保护系统精准可靠运行。以下从四个维度提出贴合工程实践的优化策略：

（1）强化逻辑诊断与动态优化。建立常态化逻辑评估机制，每季度对保护逻辑进行系统性审查，重点排查过时逻辑、冗余环节及参数阈值合理性。引入大数据分析技术，对历史保护动作数据、设备故障记录进行深度挖掘，识别逻辑漏洞。如通过分析误动案例中传感器数据

波动规律，优化信号滤波与延时逻辑；针对频繁触发的非必要保护，重新评估阈值设置或增加复合判据。（2）深化智能技术融合应用。在现有DCS系统中嵌入轻量化AI算法模块，利用边缘计算设备对关键参数进行实时分析。部署基于LSTM的故障预测模型，提前4-6小时预判异常趋势并预警；对模糊工况采用模糊逻辑控制器，替代单一阈值判断。（3）构建硬件健康管理体系。实施传感器与执行机构分级管理，对主保护回路设备采用“双重化配置+在线诊断”模式。每台传感器加装自监测模块，实时上报零点漂移、传输异常等故障；执行机构（如跳闸电磁阀）配置动作计数器与行程校验装置，定期自动测试响应性能。建立硬件劣化趋势模型，根据运行时长、动作频次预测故障概率，提前安排检修更换。（4）完善验证与协同机制。推行“仿真预演-局部试点-全面推广”的实施流程，重大逻辑优化前在数字孪生平台进行72小时连续压力测试；选择非核心回路开展为期1个月的现场试运行，对比优化前后动作数据^[4]。建立跨部门协作小组，由热控、运行、设备三方联合评审优化方案，确保逻辑既满足安全要求，又符合运行习惯。通过季度性反事故演习验证保护逻辑有效性，持续优化响应策略。

结束语：热工保护逻辑优化是火电厂保障安全、提升效益的重要举措。本文通过多维度优化方法与实践策略，有效解决传统逻辑存在的不足，实现保护系统性能的显著提升。随着数字孪生、人工智能等技术的深入应用，热工保护逻辑将向智能化、自适应方向发展。后续研究可进一步探索新技术与保护系统的深度融合，持续完善优化体系，为火电厂安全高效运行提供更强有力的保障。

参考文献

- [1]韩刚,许金辉,宋超楠,等.火电厂热工主保护配置的优化改进[J].电力安全技术,2025,27(3):67-71.
- [2]司俊.浅析电厂热工保护系统误动与逻辑优化[J].机电信息,2021(19):14-16.
- [3]马超.火电厂热工保护可靠性优化配置[J].百科论坛电子杂志,2020(10):103.
- [4]杨焱.浅析电厂热工保护系统误动与逻辑优化[J].国际援助,2022(17):139-141.