

冷却塔水泵联锁故障排查与逻辑优化

赵宏帅

山东华信电炉有限公司

摘要: 本文系统梳理了冷却塔水泵联锁系统的典型组成及工作原理, 针对运行过程中频发的液位、压力、流量传感器故障和控制执行元件失效等问题进行深入分析, 结合实际生产经验, 归纳了系统故障排查的原则与方法。

关键词: 冷却塔; 水泵; 联锁系统; 故障排查; 逻辑优化

冷却塔水泵联锁系统广泛应用于化工、电力、制药等行业中, 用于保证生产工艺设备的正常运行及安全性。然而, 在实际运行中, 冷却塔水泵联锁系统往往存在各种故障, 如传感器误报、执行元件失灵、控制逻辑缺陷等, 导致系统误动作甚至停机, 严重影响生产连续性和安全性^[1]。开展冷却塔水泵联锁系统的故障排查与控制逻辑优化研究有利于提高生产系统的安全可靠性^[2]。

1 冷却塔水泵联锁常见故障分析

1.1 传感器与检测仪表故障分析

液位传感器在长期运行过程中易受到腐蚀、结垢、污物附着等因素影响, 导致信号漂移或失真, 进而引发误联锁或联锁失效。例如, 传感器探头结垢后测量数据偏高, 会造成液位控制系统提前误动作, 频繁起停水泵, 缩短泵的使用寿命^[3]。液位传感器线路老化或接头松动也可能造成信号中断或不稳定, 影响联锁系统的正常响应。在液位传感器故障分析中, 应定期进行传感器校准和维护, 防止因液位信号误差导致系统异常运行。压力传感器负责监测管道压力变化, 若发生故障则会影响整个联锁系统的保护功能。压力传感器的常见故障

包括膜片损坏、压力接口堵塞或传感器线路损坏等, 导致压力信号失真或错误。例如, 膜片损坏引起的压力读数降低, 会导致系统误判为低压条件, 从而误停水泵, 造成工艺中断和经济损失^[4]。传感器的长期振动或腐蚀可能导致连接件密封不良, 也会引起信号不稳定。流量传感器主要用于检测冷却循环水流量的稳定性与准确性, 其故障表现通常为信号波动大、流量测量误差增大甚至无信号输出。常见故障原因包括流量传感器探头堵塞、涡轮叶轮损坏、信号线接触不良等。例如, 探头堵塞会直接导致流量测量不准确, 使 PLC 误判断系统异常, 触发联锁错误动作, 甚至导致工艺生产的严重波动。在日常维护中需要定期清洗和维护流量传感器, 确保其长期稳定可靠运行。

1.2 控制执行元件故障分析

控制阀门在联锁系统中负责调节冷却水流量, 其常见故障包括阀芯卡阻、密封泄漏、执行机构损坏或反馈信号错误。当阀门发生故障, 如阀芯卡死于某一位置时, 会直接导致系统流量无法精准控制, 影响联锁逻辑的有效性。密封件泄漏不仅会引起流量偏差, 还可能造成环境污染和能源浪费。阀门的反馈信

号故障会导致 PLC 无法正确判断阀门状态, 影响联锁逻辑响应的及时性。对控制阀门定期检查、维护与更换易损件至关重要^[5]。水泵与电动机是冷却塔联锁系统的关键执行元件, 其常见故障包括机械密封失效、电动机绕组烧毁、轴承损坏和起动电路故障等。这些故障不仅导致水泵无法起动或停止运行, 还可能引起工艺生产停顿甚至设备损坏。例如, 机械密封失效会造成泵体漏水, 严重时会导致泵的损坏; 电动机绕组烧毁则直接引起电动机无法起动。为了避免此类故障, 需建立定期巡检和预防性维护制度, 确保水泵和电动机处于良好的运行状态。

1.3 控制逻辑与联锁故障分析

1.3.1 联锁误动作与失效分析

联锁误动作通常表现为未达到联锁条件却自动起动或停止设备, 这种情况多因传感器误报、信号干扰或逻辑判断错误引起。联锁失效则指达到联锁条件时系统未正确响应, 通常与 PLC 控制逻辑编程错误或执行机构未能正确动作有关。这些问题均会导致系统运行安全风险增加, 严重情况下可能造成设备损坏或生产中断。为避免联锁误动作与失效, 应对逻辑条件设置进行反复核实

与验证^[6]，水泵联锁逻辑如图 1 所示。

1.3.2 联锁逻辑设计缺陷分析

联锁逻辑设计缺陷主要表现为联锁条件设置不合理或逻辑流程复杂、条件交叉繁多，容易引起误判断或延迟响应。例如，逻辑中过于严格的起动保护条件或不必要的多层联锁嵌套，会导致设备频繁起动、停止，增加设备磨损和运行风险。缺乏容错机制的联锁逻辑也会降低系统可靠性。联锁逻辑设计应当追求精简、明确，适当增加冗余设计。

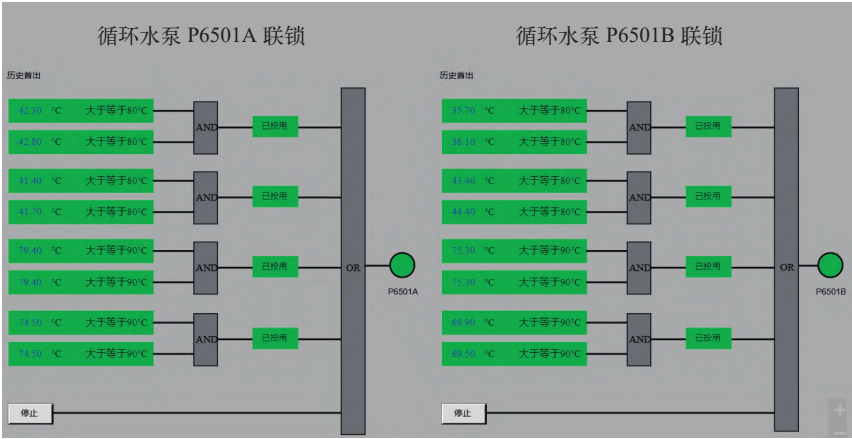


图 1 水泵联锁逻辑图

2 冷却塔水泵联锁系统的故障排查方法与流程

2.1 系统故障排查原则与基本步骤

冷却塔水泵联锁系统的故障排查应坚持系统性、科学性和高效性的原则，避免盲目拆检和重复劳动。首先需对系统运行状态进行全面了解，包括报警信息、操作记录和历史数据的分析。其次要按照“先电气后机械，先信号后执行”的基本流程，逐步定位故障部位。一般流程包括：确认故障现象，分析故障可能涉及的传感器、执行元件和 PLC 逻辑回路，逐项排查每一个疑点。实际操作时，优先检查易损部件及常见故障点，并结合在线监控与手动测试手段，提高排查效率和准确性。

2.2 检测仪表故障排查方法

针对液位、压力、流量等检测仪表，排查时需先核对现场测量值与系统显示是否一致。如有明显偏差，可通过手持仪表或旁路表复核。若发现信号异常，则检查传感器电源、信号线接线和屏蔽接地状况。对于传感器本体，可通过清洁、校准或更换测试判断其性能是否正常。还需检查仪表的定期维护和校验记录，及时排除因长时间未维护导致的失准现象。仪表排查结束后，需进行系统联动测试，确认各信号能准确传输至 PLC 并参与联锁判断。

2.3 执行机构故障排查方法

执行机构如控制阀门和水泵的排

查，首先应通过 PLC 或现场手动操作，观察其动作是否灵敏。若阀门或泵动作迟缓或无响应，可检查电源电压、接触器、继电器和控制回路。对于机械部分，要检查阀门的阀芯、传动机构及泵体的轴承、密封件是否存在卡阻、泄漏或磨损现象。对执行机构的反馈信号进行核查，确保实际状态与系统显示一致。遇到执行元件多次出现相同故障时，应考虑其选型、安装和运行工况是否匹配，并适当优化或更换。

2.4 控制逻辑回路故障排查方法

控制逻辑回路的排查以 PLC 程序和系统联锁逻辑为重点。首先要检查各输入信号在 PLC 中能否正确识别，逐条对照联锁逻辑判断条件，查找逻辑环节中的漏洞或矛盾。通过手动或模拟输入各类信号，验证联锁逻辑能否正确响应预期动作。若发现逻辑误判、响应迟缓或死区，应结合实际工况优化控制流程和参数。对涉及多信号组合的逻辑回路，还应逐步剥离各条件，独立测试其作用，确保每个逻辑分支都能单独实现正确控制。

3 冷却塔水泵联锁控制逻辑优化设计

3.1 控制逻辑优化原则与目标

控制逻辑优化以提升系统安全性、可靠性和响应速度为目标，兼顾设备保护与能效管理。优化原则包括：确保逻

辑简明、避免冗余、强化容错、提升响应速度。优化过程中应结合工艺需求与实际运行情况，动态调整联锁触发条件和控制参数，防止误动作和误停机现象。还需根据历史故障数据，优化故障报警和保护机制，实现预警、报警与应急处置的层级联动，从而保障生产连续和设备安全。

3.2 联锁条件与信号容差的优化

针对液位、压力、流量等关键信号，建议为联锁条件设置合理的上下限及容差带，增加动作延时，避免因瞬时波动或信号干扰引起误动作。可采用多信号互锁或趋势判断方法，结合历史数据和波动特征，设置动态容差，提升系统对异常的识别准确性。同时引入信号一致性校验，防止单点故障导致系统误判，提升整体联锁判断的鲁棒性和可靠性。

3.3 水泵起停联锁逻辑的优化设计

水泵起停联锁逻辑应根据工艺实际负荷变化和运行状况灵活调整。可采用主备泵自动切换、负荷均衡和顺序启停逻辑，减少泵的频繁起动和单泵长时间运行，延长设备寿命。对泵起停条件设置多重保护，如液位与压力双条件联锁，起停过程增加软起动及延时保护机制，防止系统冲击和误操作。同时联锁动作应与报警和人工干预流程联动，提升系统的智能化和安全性。

3.4 信号冗余与安全保护逻辑设计

优化设计应引入信号冗余与双重

保护机制。关键传感器建议采用双回路或异型传感器交叉验证，重要执行机构设置状态反馈与自诊断功能。联锁保护应分级设置，重要工艺点引入多级报警与应急停机逻辑，避免单点故障引发系统性风险。安全保护逻辑还应与安全仪表系统联动，定期测试联锁动作可靠性，提升整体防护水平。

3.5 联锁逻辑精简与清晰化方案

联锁逻辑应精简为必要且高效的控制路径，避免多层嵌套与重复判断，确保故障时动作路径明确、易于追溯。对逻辑分支进行层级梳理和功能划分，制定详细的逻辑流程图与动作清单。对于频发故障环节，应设立专用逻辑分支和故障自恢复流程，提升系统易用性和可维护性。

4 实际案例分析与优化效果评估

4.1 冷却塔水泵联锁故障案例分析

某化工企业 450A 循环水站运行中, 多次发生因液位传感器信号漂移导致泵组误动作的现象。通过排查发现, 原有联锁逻辑对液位瞬时波动无容忍度, 导致水泵频繁起停, 影响设备寿命。经过更换高可靠性传感器、优化信号滤波算法及调整联锁条件后, 误动作现象大幅减少, 系统运行趋于稳定, 潜污泵联锁逻辑如图 2 所示, 排污泵联锁逻辑如图 3 所示。

4.2 联锁逻辑优化实施过程

优化过程中,首先对所有联锁信号和控制逻辑进行梳理,制定优化方案并在仿真平台上进行测试。对液位和压力信号分别设置容差带和延时判据,完善主备泵切换与报警联动机制。优化方案经现场测试验证有效后,逐步推广至全系统,并建立了定期回顾和优化机制。

4.3 优化前后运行效果对比与分析

优化前,系统平均每月因联锁误动作导致停机次数达5次,泵组起停频率高,维护成本居高不下。优化后,月度误停机次数降至1次以内,设备运行

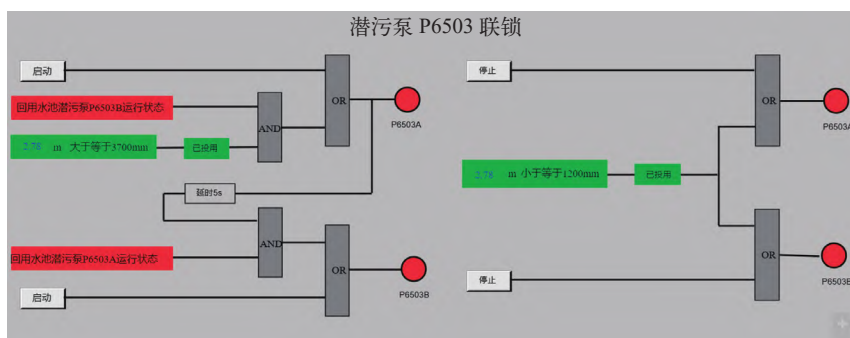


图 2 潜污泵联锁逻辑图

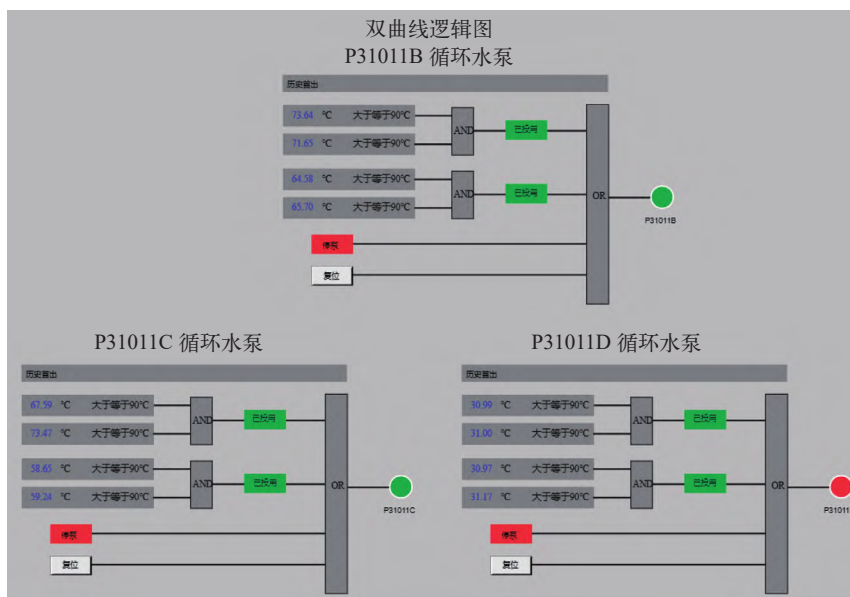


图3 排污泵联锁逻辑图

稳定性和系统响应速度显著提升,泵体与关键阀门的寿命延长,维护工作量和生产损失明显减少,经济效益和安全水平同步提高。

5 结语

本文针对系统运行中的常见故障类型,分别从传感器、执行机构和控制逻辑 3 个方面进行了系统分析,并提出了切实可行的优化设计策略。通过案例分析,验证了故障排查方法和逻辑优化措施的有效性。实践表明,科学的排查流程与合理的控制逻辑优化,不仅显著提升了设备运行的稳定性,也降低了维护成本和生产风险。

参考文献:

[1] 庞宗强, 张晓晓, 毛连鑫. 冷却塔

在造纸废水降温冷却处理中的应用
[J]. 中华纸业, 2025, 46 (04): 90-91.

- [2] 杨利, 李旋, 李禹江, 等. 局部配水对高位收水冷却塔防冻节能特性影响的数值研究 [J]. 山东电力技术, 2025, 52 (03): 86-96.
- [3] 胡家源, 王新成, 徐若羽. 冷却塔内外再生资源收集与控制系统的的设计 [J]. 电子技术, 2025, 54 (03): 188-189.
- [4] 林希. 水轮机在水泥厂冷却塔中的应用 [J]. 水泥, 2025 (03): 67-69.
- [5] 袁飞. 基于 DCS 的冷却塔控制系统优化研究 [J]. 设备管理与维修, 2025(05): 51-56.
- [6] 凌国庆, 薛刚, 何鑫, 等. 冷却塔填料强化换热改造数值模拟研究 [J]. 化学工程与装备, 2025(02): 26-28.