

闸门启闭行程限位电气闭环控制系统优化设计

陈开智

湖北诚锦电气有限公司, 湖北 荆门 448000

[摘要] 闸门启闭设备在高水头、长行程、频繁启停及潮湿振动环境下运行, 传统单一机械限位控制容易受到触点粘连、凸轮松动、线路断线和惯性越程等因素影响, 难以同时满足位置精度、动作可靠性与故障可诊断性要求。本文依据液压式启闭机、水电工程启闭机设计及机械电气安全相关标准, 分析行程限位控制系统的信号链与典型失效模式, 提出由绝对位置检测、工作限位、终端极限限位和液压压力反馈组成的多源冗余闭环架构, 并从 PLC 逻辑、减速控制、联锁切断、失电保持及人机界面诊断等方面进行优化。在此基础上, 建立“位置比较—速度修正—终端校验—异常切断—状态追溯”的控制流程, 给出关键参数整定与验收方法。研究表明, 行程限位优化的核心不在于增加单个开关, 而在于形成检测、判断、执行和反馈相互校核的闭环, 使一般限位故障能够被及时识别并由独立保护链切断危险动作, 为水闸、船闸和泵站启闭设备的电气改造与运行维护提供技术参考。

[关键词] 闸门启闭; 行程限位; 闭环控制; 冗余检测; PLC 联锁; 故障诊断

DOI: 10.64635/ja.2026.1417

中图分类号: TV664

文献标识码: A

Optimization Design of an Electrical Closed-Loop Control System for Gate Hoist Travel Limit

Chen Kaizhi

Hubei Chengjin Electrical Co., Ltd., Jingmen, Hubei 448000, China

Abstract: Gate hoist equipment operates under conditions of high water head, long travel distance, frequent start-stop operation, humidity, and vibration. Traditional single mechanical limit control is easily affected by contact adhesion, cam loosening, circuit disconnection, inertial overtravel, and other factors, making it difficult to meet the requirements of positioning accuracy, action reliability, and fault diagnosability at the same time. Based on relevant standards for hydraulic hoists, hydropower engineering hoist design, and mechanical and electrical safety, this paper analyzes the signal chain and typical failure modes of travel limit control systems, and proposes a multi-source redundant closed-loop architecture composed of absolute position detection, working limit, terminal extreme limit, and hydraulic pressure feedback. The system is optimized in terms of PLC logic, deceleration control, interlock cut-off, power-loss holding, and human-machine interface diagnosis. On this basis, a control process of “position comparison—speed correction—terminal verification—abnormal cut-off—state tracing” is established, and key parameter setting and acceptance methods are provided. The study shows that the core of travel limit optimization lies not in adding a single switch, but in forming a closed loop in which detection, judgment, execution, and feedback verify one another, so that general limit faults can be identified in time and dangerous actions can be cut off by an independent protection chain. This study provides technical reference for electrical renovation and operation and maintenance of hoist equipment in sluices, ship locks, and pumping stations.

Keywords: gate hoist; travel limit; closed-loop control; redundant detection; PLC interlock; fault diagnosis

引言

闸门启闭行程决定闸门开度、止水状态与过流能力, 是水工金属结构运行控制中的基础参数。液压启闭机通常通过电磁换向阀、比例阀或泵组控制油缸运动, 并依靠行程开关、编码器或拉绳位移传感器判断闸门位置。当限位信号出现误动作或拒动作时, 轻则造成闸门开度偏差和双缸不同步, 重则引发活塞撞缸、钢丝绳松弛、闸门卡阻、

结构超载及水流调度失控。现行 GB/T 14627—2011 对液压式启闭机提出产品与运行要求, NB/T 10341.4—2023 用于液压启闭机设计, GB/T 5226.1—2019 和 GB/T 5226.32—2017 则为机械及起重类设备的电气安全设计提供依据。因此, 行程限位不应作为孤立的末端开关处理, 而应纳入位置检测、速度调节、动作许可、故障切断和状态记录的整体控制系统。本文按照“问题识别—闭环优化—调试验

收”的逻辑展开,重点讨论可在既有启闭机电控改造中实施的技术路径。

1 行程限位控制系统组成及主要问题

1.1 行程检测与执行控制逻辑

闸门行程限位电气系统由位置检测层、控制判断层、功率执行层和安全保护层组成。位置检测层用于获取闸门开度和终端状态,常见元件包括机械式行程开关、接近开关、旋转编码器、磁致伸缩位移传感器、拉绳编码器及油缸内置位移传感器。控制判断层以 PLC 或专用控制器为核心,将位置值与目标开度、减速点和终止点进行比较,并结合压力、速度、阀位和左右缸偏差决定继续运行、减速、停止或报警。功率执行层通过接触器、变频器、比例放大器及电磁阀驱动电动机或液压阀组,安全保护层则由急停、极限限位、液压锁、溢流保护和硬接线切断回路构成。正常启门时,控制器首先校验急停、油位、油温、电源和下游安全条件,随后发出启门命令;闸门进入终端减速区后,速度给定逐步降低,当绝对位置达到目标值且工作限位有效时停止输出;若工作限位失效,独立极限限位应直接切断危险方向的执行回路。闭门过程采用相同的分层控制思想,但还需重点监视闸门落底压力、钢丝绳或吊点受力以及水封接触后的速度变化,防止单纯依靠位置值造成过压。由此可见,可靠限位必须同时回答“闸门在哪里、正在向何处运动、是否应减速、是否必须强制停止”四个问题。

2 行程限位电气闭环控制系统优化

2.1 多源冗余检测与终端保护设计

优化系统宜构建“连续位置检测+工作限位+独立极限限位”的三级检测体系。连续位置检测可采用绝对值编码器、磁致伸缩传感器或高可靠拉绳编码器,用于实时计算开度、速度和运行方向;工作限位布置在正常全开、全关位置之前,负责触发减速和正常停机;极限限位设置在工作限位之后且保留必要安全距离,通过具有明确机械动作特性的开关直接切断危险方向控制电源。对于双油缸或双吊点闸门,两侧应分别设置位置传感器,PLC 实时计算行程差,并将偏差划分为预警和停机两级。位置传感器和机械限位不宜共用同一安装支架,以免支架松动造成共因失效;极限限位信号宜采用常闭回路,使电缆断线、端子脱落和触点损坏能够表现为失电故障。室外接线盒、限位开关和连接器应依据 GB/T 4208—2017 选择与环境相匹配的防护等级,一般露天潮湿位置宜按不低于 IP65 进行设计,并设置电缆下弯滴水、密封接头和防凝露措施。元件

选型可参照 GB/T 14048.5—2017 对机电式控制电路电器的要求,避免将普通微动开关直接用于长期振动和水汽环境。连续传感器应设置零点、满量程和方向合理性校验,当位置变化方向与阀指令不一致、位置值突跳或长时间不变化时,系统立即冻结自动控制并报警。

2.2 PLC 闭环逻辑与安全联锁优化

控制程序应采用状态机组织启门、闭门、减速、保压、停止和故障复位过程,避免大量并联触点造成逻辑交叉。接到运行命令后,PLC 先进行许可条件扫描,只有电源正常、急停释放、液压站就绪、极限回路完整、位置传感器有效且无反向命令时,才允许启动。运动过程中,控制器按固定周期采集位置并计算速度,以目标开度与实际开度之差作为控制偏差;远离目标时采用正常速度,进入减速区后分段降低阀开度或电机频率,接近目标时转入低速爬行并执行防抖判断。停止条件不应只依赖单个位置点,而应综合目标位置、工作限位、速度接近零和压力变化进行确认。对于闭门落底工况,可采用“位置窗口+低速+压力上升”联合判据,避免水封压缩和结构弹性造成假到位。安全链应与 PLC 功能链分离:急停和上下极限限位通过安全继电器或硬接线直接切断危险方向接触器、比例阀使能或电磁阀电源,PLC 仅用于读取状态和记录原因。输出回路设置接触器反馈或阀线圈电流检测,若停止命令发出后执行元件仍保持吸合,则触发输出粘连报警并切断上级使能。系统还应配置命令互锁、启闭方向互锁、超时保护、速度超限、位置突变、双侧偏差、传感器断线和通信中断等诊断功能。人机界面显示实际开度、设定开度、减速点、限位状态及最近故障时间,参数修改采用分级权限并保留操作记录,防止随意改变终端位置。在通信架构方面,现场传感器宜优先采用屏蔽电缆或抗干扰能力较强的工业总线,模拟量输入设置断线和超量程判断,编码器数据设置有效位、时间戳及变化率校验。远程监控系统只能发送目标开度和运行许可,不应绕过现场极限保护直接驱动输出。当上位机通信中断时,现场控制器应保持当前安全状态或按预设策略停止,而不能因指令刷新失败继续运行。对关键输出采用“命令—反馈”一致性监视,运行命令发出后若压力、位置和接触器反馈均无变化,应在限定时间内停机,防止电机缺相、阀线圈烧毁或液压泵空转。

3 参数整定、故障排查与运行验收

3.1 闭环参数整定及工况验证

闭环系统投运前应先完成机械基准复核,再开展电气标定和动态整定。机械基准包括闸门全开、全关实体位置、

油缸有效行程、撞块位置及两侧吊点高差；连续传感器标定应在机械固定点进行，避免以未经校验的旧限位位置作为新系统零点。调试时先在水或低负载条件下确认方向、量程和极性，再以低速完成全程运行，记录位置曲线、速度曲线、工作限位动作点和极限限位剩余距离。减速区应依据最大运行速度、阀件响应时间、油液压缩性和闸门惯性确定，并预留压力及环境变化余量。表 1 中的数

值为适用于一般液压启闭机改造的工程建议范围，不替代设备设计计算和产品说明书。正式验收应覆盖就地、远方、自动、手动和应急模式，分别验证正常到位停机、工作限位失效、编码器断线、极限限位动作、输出粘连模拟、双缸偏差和失电恢复。每项试验均记录命令时间、限位动作时间、最终位置、越程量、压力峰值和报警信息，确认故障发生后系统进入确定的安全状态。

表 1 行程限位闭环控制系统关键参数建议值

控制项目	工程建议值或设置原则	功能说明
PLC 位置采样周期	20~50ms	兼顾位置变化捕捉与程序负载，采样周期应明显小于执行机构响应时间
终端减速区	额定行程的 3%~5%起步整定	依据最大速度、阀关闭时间和惯性实测修正，避免到位前高速冲击
到位位置窗口	$\pm 0.1\% \sim \pm 0.2\%$ 额定行程	用于目标位置确认；不得替代独立工作限位和极限限位
双侧行程差预警值	不大于额定行程的 0.5%	达到预警值降低速度并提示检查同步状态
双侧行程差停机值	不大于额定行程的 1.0%	立即停止并闭锁继续运行，具体值应经结构与设备计算确认
工作限位与极限限位间距	大于最大越程量并保留安全裕度	通过低速、额定速度及最大负载试验确定，不采用固定经验距离替代实测
现场限位箱防护	露天潮湿位置宜不低于 IP65	按 GB/T 4208—2017 及现场积水、冲洗和凝露条件选定
极限限位回路	常闭、硬接线、独立切断危险方向	断线即报警并禁止运行，避免仅依赖 PLC 软件限位

3.2 故障排查与预防性维护闭环

限位故障排查应遵循“先确认机械位置，再核对信号链，最后检查程序与执行回路”的顺序。出现闸门未到位提前停机时，先检查撞块、支架和传感器是否移位，再测量限位触点及端子状态，确认 PLC 输入是否存在抖动；若机械位置和输入信号正常，则检查减速区、目标窗口和超时参数。出现越程时，应重点分析工作限位动作至执行元件完全卸载的时间链，包括输入滤波、程序扫描、输出模块、继电器、阀芯关闭和液压惯性，必要时通过趋势记录定位延迟环节。双缸偏差报警应同时检查位置传感器零点、油路阻力、缸内泄漏、闸门卡阻和同步控制参数，不能直接认定为传感器故障。若系统频繁出现限位断线报警，应检查常闭回路绝缘、接线盒凝露、电缆拖曳和端子振动，而不是简单屏蔽报警。运行维护中，汛前应进行全行程低速试验和极限链人工触发试验，检查支架紧固、撞块间隙、接线盒密封及 UPS 或直流电源状态；汛期按运行次数和环境条件检查位置漂移、故障次数和动作时间趋势。每次修改限位位置、传感器量程或程序参数后，应重新完成受影响工况的验证并保存版本。通过建立“故障现象—现场测量—原因判定—整改措施—复验结果”台账，可逐步识别共性薄弱点，使限位控制由被动抢修转向基于趋势的预防性维护。检修完成后的复位也应受到严格控制。极限限位、双侧偏差和输出粘连等故障不得通过自动延时清除，必须由具备权限的人员在现场确认机械状态后

手动复位；复位前控制器应验证所有运行命令已经撤销，相关接触器和电磁阀处于释放状态。对重复出现的同类报警，应统计发生工况、持续时间和关联信号，超过设定次数后转为维护闭锁，防止运行人员长期依靠复位维持设备带病运行。

4 结论

闸门启闭行程限位系统的可靠性取决于检测、判断、执行和保护四个环节的协同。单一机械开关只能完成末端触发，无法识别速度、方向、传感器漂移和双侧不同步，也难以抵御触点粘连、线路断线及程序故障。优化设计应采用连续位置反馈、工作限位和独立极限限位三级架构，通过 PLC 状态机实现目标位置比较、分段减速、到位确认和故障诊断，同时保留急停与极限限位的硬接线切断链。该闭环方案能够提高终端停位稳定性、故障可诊断性和保护独立性，适用于水闸、泵站及船闸启闭设备的新建控制和技术改造。

[参考文献]

[1]应纯侃.某工程钢闸门电气自动化控制系统设计与应用[J].精密制造与自动化, 2026,(1):61-64.DOI:10.16371/j.cnki.issn1009-962x.2026.01.014.

[2]黄锡意.水利电气在水工闸门运行中的应用与优化[J].水上安全,2025,(8):40-42.

[3]陈月.水电闸门结构优化设计及电气控制升降研究[J].中国机械,2024,(35):20-23.