

工厂空调冷水电动阀拒动浮地故障分析与冗余改造优化

魏天华¹ 张一丹²

1.红塔烟草(集团)有限责任公司昭通卷烟厂 云南 昭通 657000^[1]

2.云南省昆明市五华区昌源中路139号6幢1单元201 云南 昆明 650032^[2]

【摘要】：针对工业厂房中央空调系统运行过程中频繁出现的西门子SKC60冷水电动执行器拒动故障，本文依托现场实际故障案例开展全流程、系统性的故障溯源与机理分析。在设备上位机控制状态正常的前提下，现场出现阀门无动作、阀位反馈超量程溢出、系统制冷失效等异常工况，严重影响厂房恒温恒湿生产环境的稳定性。本文通过现象梳理、分层电气测量、回路原理拆解、故障定位验证等一系列排查手段，精准锁定故障原因为控制柜端子虚接导致模拟量公共回路对地悬浮。深入剖析了0~10VDC模拟控制信号、阀位反馈信号因浮地失衡引发模块数据溢出、执行器闭锁拒动的深层电气机理。针对单一接线点失效造成整套自控回路瘫痪的薄弱问题，提出端子紧固整改+公共回路冗余并联的双重优化方案。现场实施验证表明，改造后设备控制精度、反馈准确度、回路抗干扰能力显著提升，彻底消除了端子虚接导致的突发性拒动故障。本文结合工程实操经验，总结形成工业模拟量自控回路浮地故障标准化排查流程与预防性维护策略，可为工厂暖通空调自控系统同类故障检修、设备隐患治理、回路可靠性升级提供可靠的工程参考与技术借鉴。

【关键词】：SKC60 电动执行器；阀门拒动；模拟量模块；信号浮地；数值溢出；回路冗余改造

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.009

1 前言

在现代化工业生产体系中，厂房中央空调系统承担着车间温湿度调控、空气除尘、环境恒温稳压的核心功能，是保障生产工艺稳定、设备安全运行、产品质量达标的重要辅助系统。冷水电动调节阀作为空调水系统流量调节的核心执行部件，可依据PLC控制系统下发的模拟量指令，实时调节冷冻水进水量，精准匹配环境负荷变化，对空调系统的自动调节精度、运行稳定性、节能性起到决定性作用。

工业现场空调自控系统长期处于连续运行状态，受环境震动、温湿度交变、线路老化、安装工艺偏差等因素影响，极易出现接线松动、信号干扰、回路虚接、模块异常等隐性电气故障。其中控制指令正常、设备本体拒动、反馈数据溢出属于隐蔽性极强、排查难度较高的典型疑难故障。此类故障不伴随明显的硬件烧毁、线路破损现象，常规点检无法提前预判，故障突发后会直接导致空调表冷器无冷水流通，车间降温除湿功能失效，造成生产环境温湿度超标，严重时可能引发生产线暂停、产品报废等生产损失。

本文以某工厂中央空调SKC60冷水电动阀实际故障案例为研究对象，完整记录故障现象、排查过程、数据对比、机理分析、整改实施及效果验证全过程。针对本次暴露的单一回路单点薄弱问题，创新性增加公共信号回路冗余导线，改变原有单路串联接线模式，大幅提升自控回路的容错能力与抗故障能力。同时总结模拟量浮地故障的判断方法与运维要点，完善工厂空调电气设备的故障处置体系与预防性维护体系，对提升工业暖通自控系统运行可靠性、降低非计划停机风险、优化设备运维管理具有重要工程意义。

2 故障现象与初步诊断

本次故障发生于2020年5月，工厂生产车间中央空调机组投入夏季高负荷制冷运行阶段。随着室外环境温度持续升高，车间室内温湿度逐渐超出工艺允许范围，PLC自控系统根据温度传感器采集数据，自动下发冷水阀开启调节指令。设备运行过程中出现典型异常故障：PLC及人机界面HMI控制状态显示正常，系统无报警代码，已正常输出阀门开启调节指令，但现场冷水电动阀阀芯始终保持原位，无任何开启动作，冷冻水无法正常通入空调表冷器，机组降温、除湿功能完全失效。

与此同时，上位机HMI界面监测到的阀门开度反馈数值严重异常，反馈读数稳定显示为119%，远超阀门0~100%的正常开度量程，出现明显的数值溢出超量程现象。现场运维人员第一时间开展初步排查，排除外部环境、介质供给、机械卡顿等外部诱因。

首先排查冷水系统管路状态，确认冷冻水主管道供水压力、供水温度均处于正常运行区间，系统冷源供给充足，管路手动阀门全部处于全开状态，不存在管路堵塞、阀门闭锁、缺水失压等问题。其次对电动阀本体机械结构进行手动测试，通过执行器手动调节旋钮操作阀芯，阀门开合顺畅、无卡顿、无锈蚀卡滞、无机械限位卡死故障，彻底排除设备机械故障与管路故障。

通过初步分层排查，可确定本次故障非冷源系统故障、非机械结构故障，故障核心区域锁定在电动执行器本体、模拟量控制回路、PLC模拟量输入输出模块及信号传输线路范围内，为后续精准电气排查与机理分析明确了方向。

3 技术原理与深入分析

3.1 设备工作原理

本次故障设备为西门子 SKC60 系列电动液压执行器，广泛应用于工业空调冷水阀、热水阀比例调节控制，具备 0~10VDC 模拟量无级调节功能，控制精度高、运行稳定，是工业暖通自控系统的主流执行设备。

该型号执行器采用双回路信号控制逻辑，分别为动力供电回路与模拟量信号回路：

(1) AC24V 动力电源回路：由 G、GO 端子接入，为执行器电机、液压机构、电路板提供工作电源，是阀门动作的基础供电保障；

(2) 0~10VDC 模拟量控制输入回路：由 Y、M 端子接收 PLC AO 模块输出的调节指令电压，电压数值对应阀门开度指令；

(3) 0~10VDC 阀位反馈输出回路：由 U、M 端子向 PLC AI 模块回传阀门实际开度信号，实现闭环精准控制。

设备正常运行的核心前提为：动力电源稳定、控制信号回路导通良好、模拟量公共端 M 接地电位稳定无压差。公共端 M 作为控制信号与反馈信号的共用参考地，是模拟量信号精准传输、模块正常识别数据的关键，一旦公共端虚接、断路、浮地，将直接导致信号失衡、数据异常、设备拒动。

3.2 逐级电气测量排查

为精准定位故障点位，运维人员采用万用表直流电压档、交流电压档，对 PLC 输出端、端子排转接点、电动阀端子端进行逐点对比测量，实测数据与标准正常值对照分析，关键测量数据如下表所示：

表 1 故障排查关键测量数据表

测量点	预期值	实测值	分析结论
电动阀 G、GO 端电压	AC24V	AC24V	设备动力电源正常，供电无异常
电动阀 Y、M 端控制电压	约 10VDC（全开指令）	0VDC	阀门终端无控制信号，指令传输中断
电动阀 U、M 端反馈电压	0~10VDC	12.5VDC	反馈信号超量程，存在异常升压
PLC 输出端 AO3-1M 电压	10VDC	10VDC	PLC 模块输出指令正常，无模块故障
信号公共端 SN-1M 压差	0VDC	10~13VDC 波动	公共端回路虚接，存在异常压差，公共端连接故障

通过数据对比可明确核心问题：PLC 端指令输出正常，但阀门终端控制信号丢失，公共参考地电位失衡。所有异常现象

均指向模拟量公共回路转接点位故障。

3.3 故障根本机理分析

根据现场接线原理图梳理线路走向：电动阀模拟信号公共端 M 依托 GO 端子统一接地，PLC 模拟量模块公共端 1M，通过控制柜 X5 端子排 18 号端子、X1 端子排 35 号端子（SN 端）实现回路贯通，构成整套模拟量信号参考地系统。

现场拆机检查发现，X5 端子排 18 号端子导线严重虚接松动，导线压接不紧实，端子与线芯之间形成高阻连接状态，未实现可靠电气导通。该隐性故障在设备长期震动、温度交变工况下持续恶化，最终导致公共回路近似断路状态。

故障机理可分为两层：第一，控制拒动机理：由于 1M 与 GO 公共地回路虚接断开，PLC 输出的 0~10VDC 控制信号失去参考地电位，Y、M 端子之间无法形成有效电压差，阀门终端检测控制电压为 0VDC，执行器无开启指令，直接保持闭锁状态，出现阀门拒动故障。

第二，反馈数值溢出机理：模拟量输入模块对信号回路状态高度敏感，西门子 PLC 模拟量 AI 模块技术特性明确规定：当电压型输入信号回路开路、对地悬浮时，模块内部电路会触发溢出保护机制，采集数值直接置顶为上限溢出值 7FFFH，对应十进制数值 32767，换算为阀位量程比例为 118.5%，设备取整显示为 119%，与现场 HMI 异常反馈数据完全吻合。

综上，本次故障并非模块损坏、设备损坏或程序故障，而是典型的电气接线工艺隐患引发的模拟量浮地故障，单点端子虚接直接造成整套自控系统功能瘫痪，暴露出原有单路串联接线模式容错率极低、抗干扰能力差、隐患隐蔽性强的缺陷。

故障根本原因分析：

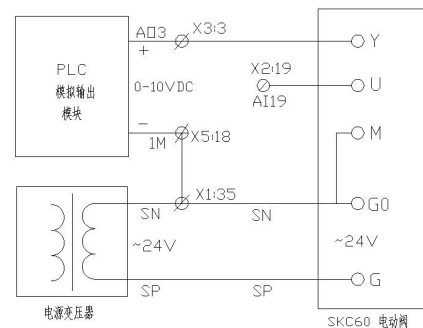


图 1 PLC 与冷水阀之间的实际接线原理图

如图 1 所示，电动阀的模拟信号公共端(M)是通过 GO 端子引入的。而柜内 PLC 的模拟量公共端(1M)至阀门 GO 端子的路径中，经过 X1 端子排的 SN 端（35 号端子）与 X5 端子排的 1M 端（18 号端子）之间的一根导线。实际检查发现，X5-18 端子接线松动（如图 2），导致此连接点存在高阻虚接。



图2 X5端子排的18号端子松动

正是这个虚接点,在SN与1M之间产生了约10V的波动干扰电压,该电压实际为PLC的控制输出(10VDC)通过电动阀的电路板返回来的电压。由于1M与G0之间因虚接断开,所以电动阀的Y、M之间测得的电压为0V,从而致使电动阀不会动作。同时,由于电动阀反馈信号公共端(M)与PLC的模拟量地端(M)断开而导致PLC的模拟量输入端断线悬空,通过查阅PLC模拟量模块的相关技术资料证实,当电压或者热电偶类型的输入信号回路开路时,会导致该模拟量输入模块出现溢出故障,使得PLC的模拟量输入模块输出测量值7FFFH(十进制值32767),其值为正常最大值的118.5%,导致反馈信号超量程而溢出,在HMI上显示为119%的阀位反馈异常值。

4 解决方案与效果验证

针对本次故障根源及设备原有设计缺陷,本次整改采用故障根治+可靠性升级双重方案,既消除现有故障,又规避同类隐患复发。

4.1 故障点位整改

对控制柜X5端子排18号松动端子进行彻底整改,重新剥除线芯氧化层、整理线芯,规范压接工艺,紧固端子螺丝,确保导线与端子排完全贴合、电气导通可靠,消除虚接高阻点,恢复模拟量公共回路正常接地电位。

4.2 回路冗余升级改造

针对原有单路串联接线单点失效、全盘瘫痪的缺陷,实施公共回路冗余优化。利用控制柜原有端子排连通特性:X1端子排35号端子与40号端子内部连通,X5端子排18号端子与

20号端子内部连通。在X1-40与X5-20之间新增一根并联冗余导线,为模拟量公共信号回路增加备用导通路径,形成双回路并联冗余结构。改造后即使单一端子松动、线路断开,另一路冗余回路可正常导通,保证公共地电位稳定,彻底杜绝单点故障导致系统停机的问题。

4.3 改造效果验证

整改及冗余改造完成后,对各关键点电压进行复测:信号公共端SN-1M之间压差恢复标准0VDC,电位平衡稳定无波动。下发阀门开度0%~100%阶梯调节指令,冷水电动阀动作灵敏、开合顺畅、无滞后卡顿;HMI阀位反馈数值与设备实际开度完全匹配,无超量程、无溢出、无偏差。

系统满负荷投运后,空调制冷调节功能恢复正常,车间温湿度调节精准稳定。经过长期跟踪观察,改造后回路运行稳定,彻底消除了端子虚接引发的拒动故障,冗余改造显著提升了自控回路的鲁棒性和运行可靠性。

5 结论与运维心得

本文通过工厂空调SKC60冷水电动阀拒动典型故障案例,完整剖析了端子虚接—公共回路浮地—信号失衡—数据溢出—设备拒动的完整故障链条,厘清了工业模拟量控制系统浮地故障的核心机理。

本次故障验证了工业自控系统中,模拟量公共地回路的可靠性远重于信号主线,多数超量程、溢出、无动作、反馈异常等疑难故障,并非模块程序故障,而是隐蔽性接地不良、端子虚接导致。在日常设备检修中,应遵循“先查地、后查信号、先查接线、后查模块”的排查原则,大幅提升疑难电气故障排查效率。

同时,本次采用的端子紧固+双回路冗余并联改造方案,低成本、高可靠性,完美解决了传统单路接线容错率低的短板,非常适用于工厂空调、暖通自控、楼宇自动化等关键调节回路的可靠性升级。

基于本次故障处置经验,在后续设备预防性维护工作中,应重点强化控制柜端子排年度紧固、震动设备线路专项检查、模拟量回路接地检测,建立浮地故障隐患台账,从被动维修转向主动预控,有效降低自动化设备非计划停机故障率,保障工业生产环境及辅助系统长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 廖常初.S7-300/400PLC应用技术(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [2] 西门子(中国)有限公司.电动液压阀门执行器技术文档[Z].CM1N4566C,2003.
- [3] 王兆宇.工业自动化控制系统常见故障分析与运维策略[J].电工技术,2019.
- [4] 张建军.模拟量信号浮地干扰故障排查与整改技术研究[J].自动化应用,2020.