

变频器双控容错设计在铀矿山的应用

柳亚军^{1,2}, 高 志³, 邱军军³, 蔡高彦^{1,2}, 范 龙^{1,2}

(1. 新疆中核天山铀业有限公司, 新疆 伊宁 835000;
2. 新疆原地浸出采铀工程技术研究中心, 新疆 伊宁 835000;
3. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 随着铀矿开采自动化水平的提升, 电气控制系统的可靠性成为保障生产安全与效率的关键因素之一。针对新疆某铀矿项目中变频器控制系统出现的异常失效问题, 提出了一种基于 PLC 的“变频器通讯控制+硬线备用”双控方案。通过分析端子控制与通讯控制的技术特点, 设计了 Modbus RTU 通讯与端子控制相结合的容错架构。该方案有效解决了原系统通讯受干扰导致的控制失效问题, 系统平均无故障时间(MTBF)由 168 h 提升至 2 000 h, 控制响应时间缩短至 100 ms。该结果为铀矿行业高可靠性控制系统设计提供了参考, 特别适用于电磁环境复杂、可靠性要求苛刻的生产场景。

关键词: 铀矿; 自动化; PLC; 变频器; Modbus RTU; 容错

中图分类号: TM921.5; TP272; TP277; TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)02-0110-06

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.08.08

近年来, 随着自动化与信息化技术的发展与融合, 铀矿开采行业的自动化水平得到了显著提升。某铀矿山通过引入 PLC 控制系统, 实现了对地浸采铀过程中抽注液流量的实时监测, 以及对抽液变频器的远程精确控制^[1]。在此基础上, 采用自整定算法自动整定 PID 参数^[2], 有效替代了传统的人工参数调整方式, 提高了控制精度, 增强了系统的适应性与稳定性。在信息化建设方面, 部分铀矿企业已构建了覆盖生产全流程的数据信息系统^[3], 推进了自动化与控制层、信息化与管理层的系统融合^[4], 并实现了生产执行系统与管理信息系统的深度集成^[5], 整体自动化与信息化能力已达到国内领先水平。具体而言, 井场控制系统实现了对流量、压力等关键工艺参数的在线检测与监控; 通过 Modbus 现场总线技术, 控制系统完成了对数百台潜水泵变频器运行参数的全面采集与集中监控, 在保障信号传输可靠性的同时, 显著降低了布线及维护成本。此外, 系统还增强了流量、电流、浓度等参数异常状态报警与联动控制功能, 全面保障了铀矿生产长期、稳定、安全运行。部分矿山探索了 5G 无线控制技术的应用, 研究其在低时延、高可靠性传输方面的潜

力, 以进一步提升系统响应速度; 选择适用于铀矿采区的 5G 部署方式, 克服铀矿山有线网络固定布线和不可移动性问题; 并根据业务需求设置基站, 构建覆盖范围广、投资少、安全可靠的 5G 网络, 为铀矿智能装备信号高速采集传输、设备远程遥控、无人驾驶等智能化应用场景提供网络支撑^{[6]120}。

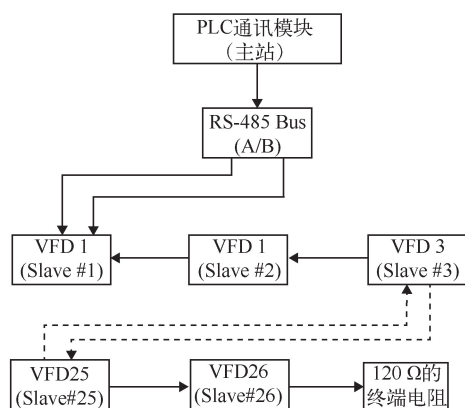
电气控制系统的可靠性是保障现代工业生产安全与效率的核心要素。可靠性高的控制系统能够有效避免意外停机、减少设备故障, 从而确保生产流程的连续与稳定运行; 同时, 它还能增强系统抗干扰能力, 降低安全事故风险, 提升产品质量和生产效率。因此, 不断提升电气控制的可靠性与冗余能力, 已成为实现企业安全增效和智能化升级的重要基础。

铀矿开采环节对自动化系统的可靠性、连续性与稳定性的要求较高^{[6]124}。为了降低人工干预风险, 确保地浸采铀生产能够长期稳定、可靠运行, 以新疆某地浸采铀矿山具体工艺段的自动化系统为研究对象, 针对实际运行中发现的 VFD25 站和 VFD26 站变频器控制异常、指令失效等问题, 提出了一种基于现有丹佛斯变频器功能特征

的冗余控制策略,旨在从根本上消除控制系统存在的安全隐患,提升系统长期运行的可靠性与稳定性。

1 项目概况

新疆某地浸采铀矿山具体工艺段的自动化系统由26台丹佛斯FC202系列变频器及一套西门子S7-1500系列PLC构成。其中,FC202系列变频器包含24台11 kW变频器与2台55 kW大功率变频器(站号分别为VFD25站和VFD26站)。系统采用RS-485接口(Modbus RTU协议)协议实现PLC与变频器之间的通讯,接线方式见图1。通讯命令包括写命令(用于发送控制字及启停指令)和读命令(用于实时采集电流、电压、频率、功率、运行状态及手/自动状态等参数),这些数据均集成于控制程序中,通过编程实现对变频器的全面监控与调度。



注释:1)箭头指示通讯信号沿RS-485总线流向;2)总线仅需在物理末端(Slave #26)连接一个120 Ω的终端电阻;3)PLC(主站)通过各变频器(从站1~26)的唯一地址向其发起通讯;4)“……”代表RS-485连接的中间变频器(从站4~24)。

图1 RS-485总线网络拓扑

Fig. 1 RS-485 bus network topology

2 问题分析与技术方案

2.1 故障现象

某地浸采铀自动化系统投运后,在首次停车操作过程中,VFD25站与VFD26站变频器出现异常:当上位机发出“停止”指令后,变频器未按预期自动停止运行,通过手动干预才实现停机。经过排查发现,变频器参数设置与物理接线均无异常,PLC程序执行也未见错误。

对变频器执行断电重启操作后,VFD25站与VFD26站的控制功能暂时恢复,频率给定与启停指令响应正常。鉴于故障未重复出现,初步判定为偶发事件。然而,在系统运行与工艺调整过程中VFD25站与VFD26站又出现频率给定失效现象,且其启停控制也完全失灵。通过对变频器本体、控制程序逻辑、通讯线路等开展全面排查,仍未找出明确的故障点。随后通过重新启动PLC与变频器之间的通讯程序块,暂时恢复了控制功能。

该故障仅发生在功率较大设备的变频器上(2台均为55 kW),而同网络中其他小功率设备未受影响。此外,故障并非永久性,通过断电重启可暂时恢复正常运行,但故障仍会间歇性复发。经检测与分析,故障原因可归纳为:1)位置与设备特性。VFD25站与VFD26站变频器均位于通讯链路末端,信号衰减较明显,且均为55 kW大功率设备,其自身运行时产生的电磁干扰较强。2)环境干扰严重。现场采区存在强电磁干扰环境,实测干扰强度有时达85 dB,远超常规工业环境的抗干扰容限,严重影响了通讯信号的稳定性。3)通讯抗干扰能力不足。现有通讯系统未采取充分的抗干扰措施,导致在恶劣电磁环境中无法可靠传输控制命令与频率给定值。

2.2 技术方案设计

提出一种基于现有丹佛斯变频器功能特征的冗余控制策略。通过增设2根双芯屏蔽电缆,并额外占用2个PLC模块输入输出点,构建冗余控制通道。

2.2.1 变频器控制方式对比

传统变频器控制主要采用面板操作、端子控制,以及通讯控制^[7]等基本方式(表1)。在实际应用中,每种控制方式各有其适用范围与局限性。根据相关故障显示,在长期连续运行过程中,受到复杂电磁环境、接地条件不佳等因素的影响,单一通讯控制方式存在信号中断、响应延迟等风险,难以满足高可靠性系统的要求^[8]。端子控制方式布线复杂、硬件成本高、维护难度大,需铺设多达8条双芯屏蔽电缆,同时还将占用PLC模块的8个I/O点数。因此,在高可靠性应用场合中,需综合考虑可靠性、经济性与可维护性等因素选择控制策略。

表 1 变频器控制方式比较

Table 1 Comparison of inverter control methods

控制方式	优点	缺点	备注
面板操作	简单直观	无法远程控制	本地运行及调试
端子控制	抗干扰强(>60 dB)	布线复杂(每台需 8 对以上电缆)	关键设备
通讯控制	布线简单(双绞线即可)	抗干扰差(<40 dB)	非关键设备

2.2.2 冗余控制方案

针对 2.1 中所述故障原因,设计采用主通道: Modbus RTU 通讯控制,采用屏蔽双绞线;增加 RS485 中继器,传输距离扩展至 300 m。备用通道:硬接线端子控制,启停、频率给定采用独立硬接线连接;PLC 模拟量输出信号配备隔离变送器(精度 0.1%)^[9]。设计方案“主-备”双通道控制架构见图 2。改造所增加的硬件有:RS485 中继器、AI/AQ 模块、模拟量输入输出信号隔离器。

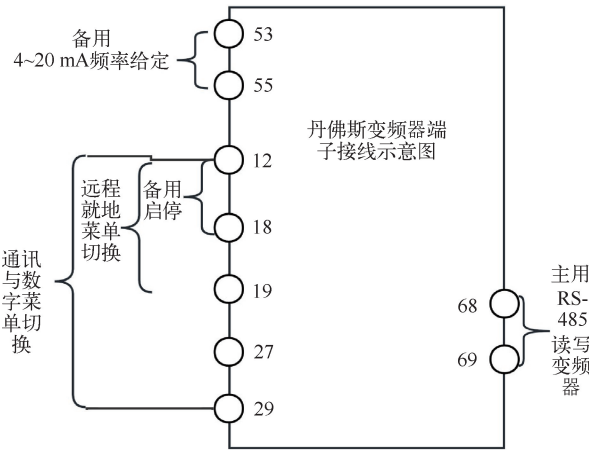


图 2 丹佛斯变频器主-备控制接线示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the master-standby control wiring of Danfoss converter

3 系统实现与测试

3.1 硬件改造

主通道: Modbus RTU 通讯控制。使用 FC202 内置 RS485 接口(端子 68/69);配置屏蔽双绞线(Belden 8761),用于变频器与 PLC 通讯模块连接。

备用通道:模拟量+硬线控制。模拟量输入:变频器端子 53/55 与 PLC 模拟量输出模块(AI1, 4~20 mA)连接,实现变频器频率给定。数字量输入:变频器端子 12/18(启停)、端子 12/19(远程就地菜单切换)、端子 12/29(通讯与数字菜单切换)分别与 PLC 数字量输出模块连接。

3.2 软件升级

3.2.1 变频器参数设置

变频器参数主要是根据通讯和端子控制来设置双重菜单,参数设置见表 2。

3.2.2 PLC 程序改进

PLC 程序开发主要通过下位机编程软件实现^[10],主要包括判断通讯失效及平滑的频率输出,防止变频器运行抖动,影响工艺参数,部分代码见图 3。

表 2 丹佛斯变频器多重菜单参数设置

Table 2 Multi-menu parameter settings of Danfoss inverter

参数名	菜单 1(远程)	菜单 2(本地)	备注
【0-01】语言	[10]中文	[10]中文	
【0-02】电动机速度单位	[1]Hz	[1]Hz	
【0-10】有效设置	[9]多重菜单	[9]多重菜单	
【0-11】编辑设置	[9]有效菜单	[9]有效菜单	
【0-12】此菜单链接到	[2]菜单 2	[2]菜单 1	
【3-13】参考值位置	[1]远程	[2]本地	
【3-15】参考值来源	[0]无功能	[0]无功能	
【3-16】参考值来源 2	[1]模拟量输入端 53	[1]模拟量输入端 53	
【4-16】转矩极限	120%	120%	根据电机实际调整
【4-18】电流极限	110%	110%	根据电机实际调整
【5-10】端子 18 数字输入	[9]自锁启动	[9]自锁启动	
【5-11】端子 19 数字输入	[23]菜单选择位 0	[23]菜单选择位 0	
【5-13】端子 29 数字输入	[0]无功能	[19]锁定参考值	

```
程序段 8: .....
注释
1 IF #M25#_Comm_Status" = 0 THEN
2     #M25#_Control_Mode" := 2; // 切换至端子控制
3 END_IF;
4 // 通讯中断时保持输出平滑过渡
5 IF #M25#_Control_Mode" = 2 THEN
6     #Analog_Output := #Last_Frequency * 327.6; // 转换为模拟量值
7 END_IF;
8
9 #AI_Output := UINT_TO_INT(REAL_TO_DINT(#Last_Frequency)); //赋值给模拟量输出通道
10
```

图 3 PLC 程序改进部分代码

Fig. 3 Code improvements for the PLC program

3.2.3 人机界面优化

在 WinCC 监控系统的基础上,新增通讯质量实时监测界面,实时显示各站点的通讯错误率,从而准确判断其通讯状态,为操作人员选择最优通讯方式提供明确依据。

同时,将开发控制模式自动切换报警功能。当某一站点的通讯错误率超过预设阈值时,系统自动触发报警,提示操作人员及时进行控制模式切换,保障控制过程的可靠性与连续性^[11]。此外,在 PLC 程序执行控制模式切换过程中,界面可实时显示各通讯模式的当前状态,操作人员可全面监控系统运行状况、分析通讯性能,并实时掌握控制逻辑的切换过程,提升对生产过程的整体管控能力。

3.3 测试结果

改造完成后,测试人员对系统进行了多工况可靠性验证。具体测试内容:首先断开通讯连接(68/69),转由上位机通过端子控制(53/55 及 12/18)写入变频器状态命令与速度指令,经现场观察,此时变频器接收指令正常,运行正常;随后断开端子控制回路(53/55 及 12/18),恢复通讯连接(68/69),通过通讯协议对变频器进行读写操作。测试发现,所有数据读写准确,变频器响应正确,运行参数符合预期。该系统在 2 种控制方式下均表现稳定,数据传送可靠,切换过程未出现异常现象,充分验证了设计方案的可行性,具备在实际生产中投入运行的条件。改造前后运行数据对比见表 3。

表 3 改造前后系统性能对比

Table 3 Comparison of system performance before and after the transformation

指标	改造前	改造后	提升幅度
MTBF(平均无故障工作时间)	1 次/周	>6 个月	提升 26 倍以上
通讯故障响应切换时间	1 h	<500 ms	提升至工业级可靠水平
控制成功率	85.00%	99.99%	提升至工业级可靠水平
维护频率	1 次/周	0 次/周	基本消除

实际运行数据表明,该冗余控制系统特别适用于以下典型场景:1)大功率设备控制,如额定功率不低于 50 kW 的矿井提升机、大型离心机组等关键设备;2)强电磁干扰环境,包括背景噪声不低于 60 dB 的变频器密集区域、高低压混布配电场所等工业场合。

4 应用效果与行业价值

该变频器冗余控制方案可有效解决因电磁干扰及信号衰减导致的控制失效问题。该方式适用

于工况要求较严格的场合,如地浸行业集配液泵、加压泵、风机控制等工艺阶段。该方案首次在钽矿行业提出并实现了“变频器通讯控制+硬线备用”的双冗余控制架构,成功解决了高干扰环境下传统单一通讯控制模式可靠性不足的难题,同时克服了纯端子控制方式下布线复杂、PLC 输入输出点数多、投资成本高的缺点。创新性地采用了 4 进 1 出型 485 信号隔离中继器的传输方案,不仅将关键通讯节点的电磁隔离度提升至 90 dB,大幅增强抗干扰能力;还扩展了单网段内可连接

的变频器从站数量,减少了通讯模块的使用总量,进一步降低了系统建设和维护成本。该架构为存在电磁干扰且采用单一通讯控制的变频器系统提供了高性价比的改造思路。本策略在实际运行中显著提升了铀矿生产使用变频控制系统的稳定性。

该变频器冗余控制方案:在保持读写数据规模不变的条件下,系统整体投资较传统端子控制模式降低约60%,经济效益显著;开发了基于实时状态监测的智能切换算法,实现了主-备控制模式之间的无缝无扰切换,切换时间小于100 ms,完全不影响生产工艺过程的连续稳定运行。

目前,该方案已在新疆铀矿山中实现规模化推广应用,主要应用于集配液泵站、加压泵站。

5 结论与展望

5.1 结论

对丹佛斯变频器通讯的双冗余架构设计改造方案,在铀矿特殊环境(如高电磁干扰、强腐蚀等)中展现出显著优势,能够有效解决控制系统的可靠性不足问题,满足铀矿安全生产要求。通过硬件电路优化设计及软件算法的改进,系统平均无故障工作时间(MTBF)由约168 h提升至2 000 h。

5.2 展望

基于无线通讯在地浸采铀矿山工业自动化中的应用,对于网络的适应性、稳定性、安全性需开展进一步的现场试验和研究。为地浸分散采区,提供可靠的通讯技术方案,提高地浸采铀采区的数字化程度。

开发基于深度学习算法的智能故障预测系统,通过实时监测设备状态参数,实现故障早期预警与健康状态评估,为预防性维护提供决策支持。

参考文献:

- [1] 伍宪玉,侯江,施建明,等.计算机自动监控在通辽某地浸采铀系统中的应用研究[J].铀矿冶,2013,32(4):189-194.
- [2] 侯录,侯江,闫晔,等.基于自整定PID自动调节地浸抽液流量[J].铀矿冶,2018,37(4):273-277.
- [3] 关键,于长贵,柳亚军,等.地浸铀矿山自动化数据中间件系统设计与实现[J].铀矿冶,2017,36(1):51-55.
- [4] 伍宪玉,侯江,侯录,等.地浸铀矿山自动化和信息化系统融合设计及应用[J].湿法冶金,2021,40(6):523-526.
- [5] 陈刚.OA办公系统与地浸铀矿山生产数据系统集成应用技术研究[J].铀矿冶,2018,37(2):78-83.
- [6] 侯录,闫晔,伍宪玉,等.铀矿井下无线网络技术适用性分析[J].铀矿冶,2024,43(3):120-125.
- [7] 丹佛斯变频器操作手册[M].丹麦:丹佛斯集团,2009:103-107.
- [8] 岳永泽.注配间变频器安全联动控制技术研究[J].中国管理信息化,2021,24(10):117-118.
- [9] 许宏鹏.变频器在矿井带式输送机智能控制系统中的应用[J].机械管理开发,2024,39(9):232-236.
- [10] SIMATIC S7-1500与ATI博图软件使用指南[Z].北京:机械工业出版社,2019.
- [11] 李成泽.基于PLC和变频器协同控制的海洋油气

装备智能制造优化策略[J]. 中国战略新兴产业, 2024(6):131-133.
LI Chengze. Intelligent manufacturing optimization strategy for marine oil and gas equipment based on

the collaborative control of PLC and frequency converter[J]. China Strategic Emerging Industry, 2024 (6):131-133.

Application of Inverter Dual-control Fault-tolerant Design in Uranium Mines

LIU Yajun^{1,2}, GAO Zhi³, QIU Junjun³, CAI Gaoyan^{1,2}, FAN Long^{1,2}

(1. Xinjiang Tianshan Uranium Co., Ltd., CNNC, Yining 835000, China;

2. Xinjiang In-situ Leaching Uranium Mining Engineering Technology Research Center, Yining 835000, China;

3. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: With the continuous improvement of automation levels in uranium mines, the reliability of electrical control systems has become a key factor in ensuring production safety and efficiency. This paper addresses the abnormal failure issues of the frequency converter control system in a uranium mining project in Xinjiang and proposes a PLC-based frequency converter communication control and hardwired backup redundancy control scheme. By comparing and analyzing the technical characteristics of terminal control and communication control, a redundant architecture combining Modbus RTU and terminal control is designed and implemented. Practical application shows that this scheme effectively solves the control failure issues caused by communication interference in the original system. The mean time between failures (MTBF) of the system has increased from 168 h before the transformation to over 2 000 h, and the control response time has been shortened to less than 100 ms. The research content provides an important reference for the design of high-reliability control systems in the uranium mining industry, especially for production scenarios with complex electromagnetic environments and stringent reliability requirements.

Key words: uranium mines; automation; PLC; frequency converter; Modbus RTU; redundancy