



船闸控制系统中冗余技术的应用探究

周冬冬¹, 莫雄¹, 尹斌勇², 吴方威¹

(1. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南长沙 410011;

2. 长沙市湘江综合枢纽工程办公室, 湖南长沙 410200)

摘要: 针对船闸控制系统高可靠性的需求, 对冗余技术在湖南水运建设项目-船闸工程的应用进行了深入研究。采用多层次冗余设计, 在控制层部署双 PLC (programmable logic controller, 可编程逻辑控制器) 热备架构, 通过专用同步模块实现周期级数据镜像, 消除单点故障; 网络层构建物理隔离的双光纤环网, 通信丢包率降为零; 数据层采用双工程节点服务器热备, 构建了覆盖控制层、网络层、数据层的全栈容错体系。结合工程实际案例, 进行实用性分析和对比。结果表明: 多层次冗余设计可以显著提高系统的容错能力, 实现了船闸控制系统全年可用率 99.99%, 保障“黄金水道”零非计划停航。相关经验和方法可为类似项目提供参考, 根据现场实际需求, 采取动态冗余调节机制, 实现部分设备冗余, 以达到“高可靠-低成本-强适应”的效果。

关键词: 船闸; 控制系统; 冗余技术; PLC; 环网

中图分类号: U641.335

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0214-06

Exploration of application of redundancy technology in ship lock control systems

ZHOU Dongdong¹, MO Xiong¹, YIN Binyong², WU Fangwei¹

(1. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China;

2. Changsha Xiangjiang Comprehensive Hub Project Office, Changsha 410200, China)

Abstract: To the high reliability requirements of the ship lock control system, an in-depth study is conducted on the application of redundancy technology in the Hunan Water Transport Construction Project- Ship Lock Project. A multi-level redundancy design is adopted, with a dual PLC (programmable logic controller) hot standby architecture deployed at the control layer. Periodic data mirroring is achieved through a dedicated synchronization module, eliminating single point failures. At the network layer, a physically isolated dual-fiber ring network is constructed, reducing the communication packet loss rate to zero. At the data layer, dual engineering node servers are used for hot standby, forming a full-stack fault-tolerant system covering the control layer, network layer, and data layer. Combined with practical engineering cases, a practical analysis and comparison are conducted. The results show that the multi-level redundancy design can significantly improve the fault tolerance of the system, achieving an annual availability rate of 99.99% for the ship lock control system and ensuring zero unplanned downtime for the “Golden Waterway”. The relevant experience and methods can provide reference for similar projects. Based on actual on-site requirements, a dynamic redundancy adjustment mechanism can be adopted to achieve partial equipment redundancy, thereby achieving the effect of “high reliability-low cost-strong adaptability”.

Keywords: ship lock; control system; redundancy technology; PLC; ring network

湖南全省航道通航里程 11 968 km, 占全国内河航道总里程的 9.42%, 位居全国第三位, 处于国家规划建设“四纵四横两网”的高等级内河航

道网的长江、珠江“两网”之间; 其中“一横”长江干线经过湖南, 与之十字交汇的“一纵”汉湘桂通道建成后, 将纵贯湖南、联通“两网”^[1-2]。随着内

收稿日期: 2025-08-20 录用日期: 2025-09-29

作者简介: 周冬冬(1993—), 男, 中级工程师, 从事船闸设备运维、技术创新和课题攻关等工作。

河航运的高速发展,船闸作为航道咽喉节点,其控制系统一旦失效,将触发三级链式风险。1)设备级瘫痪:无法控制液压系统、闸阀门无法正常启闭;2)航道级阻断:船闸停运致航道船舶积压,通航效率降低;3)社会经济震荡:中断大宗物资运输(如电煤、建材、民生物资等),波及全省供应链。

为保障船闸高效、平稳运行,已积累了大量经验,三峡枢纽双线五级船闸对船闸控制系统冗余配置方案有过深入研究,该方案可靠性较高,但同时成本也较高^[3-5]。京杭大运河江苏段多座船闸选用两套 PLC(programmable logic controller, 可编程逻辑控制器)控制器,一套用于常规控制,一套用于应急操作。当常规设备出现故障时,将权限切换至备用的应急设备,以保障船闸的正常运行,该方案成本较低,但备用设备功能局限,仅适用于紧急情况下的临时性操作,不适用于长时间投入运行。本文以湖南典型船闸(株洲二线船闸、青山船闸)为依托,研究多层次冗余架构在控制系统的工程化应用,旨在破解“高可靠-低成本-强适应”三角矛盾,为内河智慧航运提供解决方案。

1 冗余技术的定义

冗余技术(redundancy technology)是一种通过增加额外的硬件、软件或数据资源来提升系统可靠性和容错能力的设计策略。其核心思想是“用多余资源换取系统安全”,即在关键环节设置备份或并行组件,当主系统发生故障时,冗余部分可快速接管,确保系统持续稳定运行。

2 冗余技术在船闸控制中的重要性

1) 提升系统可靠性:通过增加冗余组件(如 PLC 双机热备),消除单点故障,确保关键系统在不同组件失效时仍能正常运行,避免因硬件或软件故障导致的全系统瘫痪。

2) 增强容灾能力:冗余设计通过物理隔离或分布式布局(如主备设备分置不同机柜),抵御局部灾害(火灾、水淹、雷击等),保障系统在极端

环境下的持续运行能力。

3) 增强安全性:冗余技术通过提供备用方案、备用模组、备用系统、备用电源等,能够在紧急情况下迅速切换,避免因系统崩溃导致的事故。

4) 减少停机损失:故障时无缝切换至备用单元,缩短维修时间,避免因停机造成的航道拥堵、经济损失或安全事故。例如,船闸电源冗余可防止断电导致闸门失控。

5) 提升维护效率:冗余设计允许对故障部件进行更换而不影响整体运行,降低了停机时间。

3 冗余技术在船闸控制系统中的应用

3.1 控制系统的构成

在高水头船闸船舶过闸过程中,控制系统运行的安全性、可靠性至关重要。船闸控制系统主要分为集中控制层、现地分散控制层、现地设备层,集中控制层由操作员工作站、数据库服务器、广播主机、打印机等组成,实现对船闸的集中控制、数据管理、统计报表、全局广播及打印功能等^[6]。现地分散控制层由触摸屏、柜门按钮、指示灯等组成,实现现地对闸首人字门、输水门等设备的现地控制,并显示现场设备的运行状态及数据。现地设备层则主要由断路器、空气开关、24 V 电源、继电器、接触器、软起动器、中间继电器、PLC 系统、比例放大板等组成,是对集中控制层和现地控制层所下达的指令的具体实施单元。

3.2 船闸控制系统中的冗余技术

在船闸控制系统中,主要运用到的冗余技术有硬件冗余、软件冗余、通信冗余,该设计可以显著提高系统的容错能力。

1) 核心控制器采用双 PLC 热备冗余架构,主/备 CPU(central processing unit, 中央处理器)通过实时数据同步保持状态一致。当主 CPU 故障时(如硬件失效、程序死锁或通信中断),备用 CPU 在 ≤ 50 ms 内实现无缝切换,接管控制权,确保系统全周期不间断运行。

2) 中心机房与各闸首机房的通信网络采用工业级环网交换机构建双光纤冗余环网。主环网与

备用环网物理隔离，分别通过不同路径敷设光缆；交换机支持 MRP 协议 (media redundant protocol, 介质冗余协议)，实现环网故障的毫秒级自愈 (切换时间 ≤ 50 ms)；双环网采用并行热备模式，任一环网中断不影响通信连续性，满足 IEC 62439-3 标准的高可靠性要求。

3) 在监控中心配备两台操作员工作站，每台操作员工作站均配置双千兆工业以太网网卡，通过物理隔离的双端口分别接入两台环网交换机，形成跨环网的链路冗余。主/备工作站运行完全镜像的组态软件平台，通过专用通道实现实时数据同步，支持毫秒级 I/O 标签、报警状态及用户会话同步等。当某一工作站失去连接时，集群管理服务在 ≤ 15 s 内自动切换 HMI (human machine interface, 人机界面) 服务至健康节点 (另一台工作站)，保障数据监控零中断。

3.3 实际应用案例

湖南省水运建设投资集团有限公司船闸管理分公司所辖多座船闸，结合自身实际运营情况，将冗余技术应用到船闸控制系统中，实现了船闸控制系统全年可用率 99.99%，保障了“黄金水道”零非计划停航。

3.3.1 案例 1

株洲二线船闸采用西门子 S7-400H 硬冗余

PLC 系统，双 CPU 通过同步光纤实现周期级数据镜像 (切换时间 ≤ 100 ms)，ET200M 分布式 I/O 站经冗余接口模块 IM153-2 (支持 PROFIBUS DP/PRP 协议) 实现双通道通信。IM153-2 模块集成双 PROFIBUS DP (process field bus-decentralized periphery, 过程现场总线-分布式外围设备) 接口，分别连接至 S7-400H 系统的主备 CPU 的 PROFIBUS 端口，形成两条物理隔离的通信路径 (Path A/B)。主备 CPU 同时向 IM153-2 发送相同的控制指令，IM153-2 仅执行主 CPU 指令，但双路径持续保持数据同步。正常状态下，主 CPU 通过激活的 PROFIBUS 链路 (如 Path A) 与 IM153-2 通信，实时读写 I/O 数据^[7]。备用 CPU 通过备用链路 (Path B) 监听主 CPU 数据流，同步 I/O 状态 (周期 ≤ 10 ms)。若单条 PROFIBUS 线缆损坏 (如 Path A 中断)，IM153-2 立即切换至 Path B，确保无数据丢失。同时，IM153-2 模块支持热插拔更换，故障模块移除时，备用链路自动维持通信^[8]。

株洲二线船闸控制系统，在网络层部署双光缆物理隔离的千兆环网，将上下游主侧机房与中心机房连接起来，见图 1。基于工业交换机启用 MRP 介质冗余协议，实现网络层 20 ms 级故障无缝切换，为船舶高效安全过闸构建了底层网络基石。

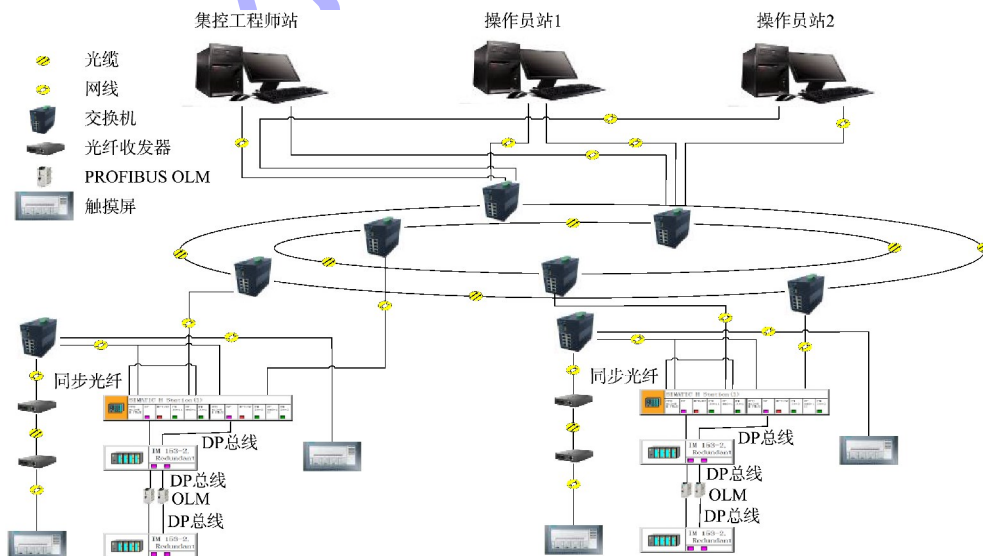


图 1 株洲二线船闸控制系统拓扑图

Fig. 1 Topological diagram of control system for Zhuzhou Second-line Ship Lock

监控中心双操作员工作站配备工业以太网双网卡, 各端口独立绑定至 A/B 环网交换机, 形成跨平面链路冗余; 工作站运行 Webaccess 8.2 软件, 通过工程节点冗余 (project node redundancy) 架构, 部署主/备双工程节点服务器, HMI 服务切换时间 ≤ 15 s, 确保控制指令零丢失, 见图 2。主工程节点服务器实时处理 HMI 服务、数据采集及控制指令下发, 备用工程节点服务器持续同步主节点数据 (实时库、报警状态等), 监听主节点心跳, 并通过 UDP (user datagram protocol, 用户数据报协议) 4592 端口每隔 5 s 发送心跳包, 连续 3 次 (15 s) 丢包, 则判定主节点失效, 备用节点立即接管虚拟 IP (ARP 广播刷新, 耗时 ≤ 1 s), 激活 WebAccess SCADA 服务, 加载最新同步的实时数据^[9]。

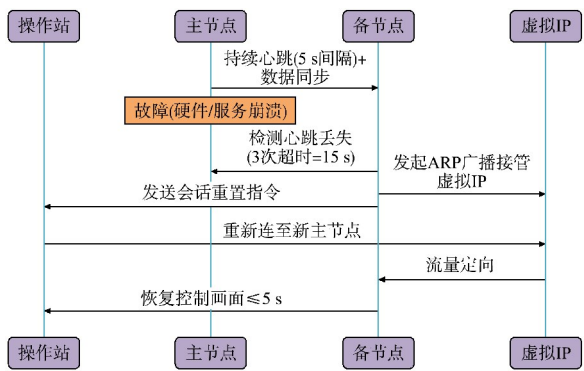


图 2 主/备切换流程

Fig. 2 Flow of main/standby switching

3.3.2 案例 2

青山船闸采用施耐德 Modicon M580 BMEH582040 热备 CPU, 通过双光纤同步模块 (BMXHS0402) 实现 ≤ 100 ms 无扰切换, 主备数据周期镜像 (同步周期 ≤ 10 ms), 在每次执行 MAST (master task, 主任务) 循环之前, 主 CPU 会向备用 CPU 传输应用程序变量、系统状态和 I/O 数据, 且两个 CPU 会周期性地交换 T_M_ECPU_HSBY DDT (热备信息) 的内容; 结合双路独立供电与 RIO 光纤环网 (MRP 协议自愈 ≤ 20 ms), 适配高水头、强震动环境, 系统可用率 $> 99.999\%$ (年中断 < 5 min)。

在网络层, 与案例 1 不同的是施耐德 M580 系列热备 PLC 的主 CPU、备用 CPU 与子站之间构成环网, 当出现网络故障, 其中一条线路断开时, 不影响设备正常运行^[10]。搭配中心机房与闸首机房之间部署的双环网链路, 为船闸控制系统正常运行提供了更高级别的保障, 青山船闸控制系统拓扑图见图 3。

在双环网链路方面, 案例 2 是在每个闸首机房与中心机房各部署 2 台交换机, 进行数据通信, 而案例 1 则是只在上左机房、下左机房与中心机房之间各部署 2 台交换机, 在对侧机房未部署。在 4 个闸首机房分别部署交换机, 便于控制设备与环网的连接, 可扩展性较高, 便于后续改造升级新增网络设备, 但是相应的, 设备出现故障的可能性也稍有增加。监控中心操作员工作站与组态软件的配置情况与案例 1 相似。

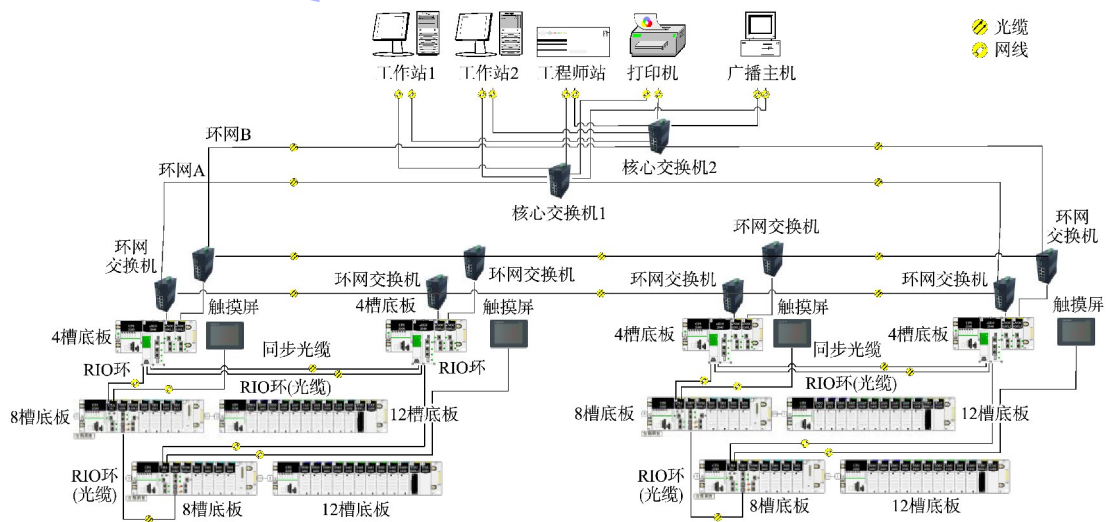


图 3 青山船闸控制系统拓扑图

Fig. 3 Topological diagram of control system for Qingshan Ship Lock

4 控制系统方案分析对比

4.1 功能性需求分析

在船闸设备运行过程中，控制系统需要实时监控液压启闭机、人字门、输水门、开度仪、水位计、控制柜电气元器件等设备的运行状态并采集相关数据。而在船舶过闸过程中，更为重要的是闸首机房之间的网络通信状态，上下游机房需要实时传递对方阀门的状态，且仅有上/下游闸阀门属于全关状态下，下/上游才具备运行权限。上/下游机房必须在接收到下/上游机房传输的闭锁信号后，才能进行开阀、开闸操作，保证船舶过

闸过程中的安全性。当冗余技术应用到船闸控制系统中后，消除了设备单点故障，使得控制系统全年利用率达 99.99%，减少了因设备故障导致的停航时间。

4.2 实用性需求分析

在船闸工程中仅仅运用到冗余技术远远不够，还需要考虑如何发挥冗余技术的作用，从图 1、3 中可以看出，基于西门子 S7-400H 硬冗余 PLC 系统是将主/备 CPU 放置在同一个机柜中，而施耐德 M580 系列冗余 PLC 则是将主/备 CPU 分置在左右两个机房，对比两种方案，各有优缺点，见表 1。

表 1 冗余方案优缺点对比
Tab. 1 Comparison of advantages and disadvantages of redundancy solutions

方案	成本	维护便捷性	容灾能力	抗干扰能力	灵活拓展性	信号同步效率
西门子 S7-400H	主备模块间通信距离短,布线简单,信号衰减小	集中管理主备设备,便于调试、监控和固件升级,同步模块短距离连线,无需跨机柜布线	机柜遭遇物理损坏(如电源故障、雷击、火灾、水浸等),主备 CPU 可能同时失效,冗余失效	同一机柜内的电磁干扰(EMI)或温度过高等环境问题,可能同时影响主备设备	机柜空间有限,不便于升级拓展	短距离通信(如板总线或短电缆)降低数据同步延迟,切换时间更快
施耐德 M580 冗余 PLC	主备模块位于左右闸首机房,距离较远,需通过光纤链路传输数据,初期投资较大	分散布局增加巡检和故障排查工作量	物理隔离主备设备,避免同一机柜故障导致双机同时宕机,显著提升系统可靠性。适合极端环境(如潮湿、高振动)下的船闸场景,降低环境风险	分散布局减少电磁干扰(EMI)对双机同步的影响。可独立配置电源和接地系统,避免共模干扰	便于未来升级(如新增模块或更换硬件),无需重新规划机柜空间	长距离通信可能引入信号延迟或抖动,可能影响切换速度和数据一致性

上述两种冗余方案可互相转换，如前期建设时若选择方案 1，在后续使用过程中发现该项目更适合方案 2，可对控制系统进行改造升级，将其中一套设备移至另一机柜中，并通过光纤链路将设备连接起来即可，在系统硬件配置、程序等方面均不需要做调整。

尤其是，若无法判断项目更适合哪种方案，在项目建设时要提前规划机柜内部空间，预留可改造升级的余地，可大幅节省人力、物力成本。

5 未来发展方向

1) 智能化冗余设计：基于数字孪生与 BIM 技术的深度融合，结合人工智能和大数据技术，进一步提升冗余系统的智能化水平，实现设备运维全流程数字化升级。通过 BIM (building information

modeling, 建筑信息模型)构建高精度三维模型，结合数字孪生实时数据映射，形成与物理船闸同步的“虚拟双胞胎”。系统集成物联网传感器网络，实时监测闸门、液压系统等关键设备，智能诊断故障并推送解决方案；依托结构力学模型与北斗监测数据，动态评估闸室墙体安全状态，模拟极端工况识别风险点。

2) 多级冗余策略：在智能化冗余设计的基础上，构建多物理场耦合环境，探索多层次、多维度的冗余设计方案，以应对暴雨、地震等 23 种极端场景，并验证冗余设计在复杂环境下的应急响应能力。

3) 国产化替代：结合国际前沿技术，研究国产 PLC 及其他控制设备在船闸冗余系统中的应用，推动自主可控技术的发展。

6 结论

1) 经实际应用案例验证,研究所涉及的两艘船闸控制系统冗余方案均具备切实可行性,能够满足船闸运行对系统可靠性的基础需求,为船闸控制系统冗余设计提供了有效的实践参考。

2) 综合考量初期投入成本、维护便捷性、容灾能力、抗干扰能力、可拓展性及数据同步效率等核心指标,后续船闸工程建设中,建议采用动态冗余调节机制,依据现场实际需求灵活配置部分设备冗余,实现冗余设计的经济性与实用性平衡。

3) 针对环境条件较好的船闸场景(无雷暴、高振动等极端干扰因素),控制系统冗余设计可简化配置。将主备 CPU 部署于同一机房,缩减光纤链路数量;网络层采用单环网配置,减少环网交换机部署规模,通过精简冗余环节降低建设与运维成本。

4) 对于周边环境复杂、极端天气频发的船闸场景,需提升冗余设计等级。从控制层(核心设备冗余)、网络层(双环网冗余)、数据层(数据备份与同步冗余)多维度统筹规划,通过全链路冗余配置最大化保障设备稳定运行,提升系统抗风险能力。

参考文献:

- [1] 张胜,卢毅,伍慧,等.加快水运发展 促进湖南运输结构调整[J].中国水运,2024(3):15-17.
ZHANG S, LU Y, WU H, et al. Accelerating the development of water transportation to promote the adjustment of transportation structure in Hunan Province[J]. China water transport, 2024(3): 15-17.
- [2] 万新宁,刘红.我国内河航运发展历程及趋势分析[J].中国港湾建设,2025,45(6):25-32.
WAN X N, LIU H. Analysis on development process and trends of inland waterway navigation in China[J]. China harbour engineering, 2025, 45(6): 25-32.
- [3] 卢爱菊.三峡永久船闸集中监控系统结构分析与比较[J].继电器,2000,28(9):28-30,34.
LU A J. Analyzing and comparison of the configuration for Three-Gorges ship gate central monitor and control

system[J]. Relay, 2000, 28(9): 28-30, 34.

- [4] 屈斌.三峡工程永久船闸电气控制系统简介[J].电气时代,2000(11):6-8.
QU B. Brief introduction of electrical control system for permanent ship lock of the Three Gorges Project [J]. Electric age, 2000(11): 6-8.
- [5] 张孟军.三峡永久船闸现地子站电气控制系统原理[J].水利电力机械,2004,26(1):36-38.
ZHANG M J. The principle of electric control system of the site subunit of permanent ship lock in the Three Gorges Project [J]. Water conservancy & electric power machinery, 2004, 26(1): 36-38.
- [6] 冀文峰,马慧卿.长洲三、四线船闸的控制系统方案[J].水运工程,2018(11):104-107.
JI W F, MA H Q. Control system scheme of Changzhou ship locks No. 3 and 4 [J]. Port & waterway engineering, 2018(11): 104-107.
- [7] 刘二龙.西门子 S7-400H 冗余 PLC 系统信息诊断[J].山西冶金,2016,39(6):117-119,124.
LIU E L. Diagnosis of S7-400H redundancy PLC system [J]. Shanxi metallurgy, 2016, 39(6): 117-119, 124.
- [8] 连俊.西门子 PLC 双机热备冗余系统在散货港口带式输送机自动化控制系统中的应用[J].科技视界,2020(22):71-74.
LIAN J. Application of Siemens PLC dual-machine hot standby redundancy system in automatic control system of belt conveyor in bulk cargo port [J]. Science & technology vision, 2020(22): 71-74.
- [9] 刘展海,何伟.基于 WebAccess 组态软件实现 MES 数据采集和现场监控[J].科学技术创新,2019(30):97-98.
LIU Z H, HE W. Implementation of MES data collection and on-site monitoring based on webaccess configuration software [J]. Scientific and technological innovation, 2019(30): 97-98.
- [10] 鲁聪.施耐德昆腾系列与 M580 系列 PLC 组建冗余通信[J].自动化应用,2024,65(23):59-61,64.
LU C. Redundant communication between schneider QUANTUN PLC and M580 PLC [J]. Automation application, 2024, 65(23): 59-61, 64.

(本文编辑 赵娟)