分布式控制系统在竹仔岭骨料厂的应用研究*

吴兴刚[1,2]，吴浩[1,2]，王学涛[3]，芦晓雯[1,2]，周泽坤[1,2]，赵虹洋[4]

（1.中铁十九局集团有限公司珠海分公司， 广东 珠海市 519100；
2.中铁十九局集团矿业投资有限公司， 北京 100071；
3.沈阳理工大学 材料科学与工程学院， 辽宁 沈阳 110159；
4.艾格工程技术有限公司， 辽宁 沈阳 110027）

摘要：针对传统骨料厂重资产、高能耗、设备可靠性低等痛点，采用分布式控制系统（DCS），通过硬件冗余配置、Modbus通信协议集成及先进控制算法的实施，对竹仔岭骨料厂破碎、筛分、制砂及水循环控制等全流程工艺进行设计和优化，分析DCS在物料平衡、设备监控、能耗管理等方面的应用效果。研究结果表明：系统投入运行后，设备空载能耗降低15%，综合能耗下降18%；吨骨料水耗从3.2 m^3 降至2.56 m^3，年节水25万t；平均故障间隔时间从1 200 h提升至2 100 h，平均修复时间缩短47%，设备综合效率由74%增至89%，备件周转率提高62%；设备全生命周期延长3～5 a，年产能提升15万t；同时，解决了高粉尘环境下的信号干扰、雷击及电源波动等技术难题。DCS能够系统性提升骨料厂的能效、可靠性与智能化水平，为同类企业的绿色化、智能化转型提供工程参考。

关键词：分布式控制系统；工业流程；智能控制；设备运维；节能降耗

中图分类号：TD679　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)05-0211-06

Research on the Application of Distributed Control System in Zhuziling Aggregate Factory

Wu Xinggang[1,2], *Wu Hao*[1,2], *Wang Xuetao*[3], *Lu Xiaowen*[1,2], *Zhou Zekun*[1,2], *Zhao Hongyang*[4]

(1.China Railway 19th Bureau Group Zhuhai Branch Co., Ltd. Zhuhai Branch, Zhuhai, Guangdong 519100, China;
2.China Railway 19 Bureau Group Mining Investment Co., Ltd., Beijing 100071, China;
3.School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110159, China;
4.Aige Engineering Technology Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110027, China)

Abstract: Aiming at the pain points of heavy assets, high energy consumption and low reliability of equipment in traditional aggregate plants, the Distributed Control System (DCS) has been adopted. Through the implementation of hardware redundancy configuration, Modbus communication protocol integration and advanced control algorithm, the DCS designed and optimized the whole process of crushing, screening, sand making and water circulation control in Zhuzailing Aggregate Factory. The application effect of DCS in material balance, equipment monitoring and energy consumption management were analyzed. The results show that since the system has put into operation, the no-load energy consumption of the equipment is reduced by 15%, and the comprehensive energy consumption is reduced by 18%. The average fault interval time is increased from 1 200 h to 2 100 h, the average repair time is shortened by 47%, the comprehensive efficiency of the equipment is increased from 74% to 89%, and the turnover rate of spare parts is increased by 62%. The whole life cycle of the equipment is extended by 3-5 a, and the annual production capacity is increased by 150 000 tons. At the same time, the technical problems such as signal interference, lightning strike and power fluctuation in high dust environment have been solved. DCS can systematically improve the energy efficiency, reliability and intelligence level of aggregate plants, and provide engineering reference for the green and intelligent transformation of similar enterprises.

Key words: Distributed Control System, Industrial process, Intelligent control, Equipment operation and maintenance, Energy saving and consumption reducing

---

* **收稿日期**：2025-05-13
基金项目：辽宁省教育厅基本科研项目（LJ212410144059）；第二期教育部供需对接就业育人项目（20230103958）
作者简介：吴兴刚（1979—），男，黑龙江双鸭山人，工程师，主要从事矿山智能化控制系统研发与应用研究。E-mail：wuxinggang2025@126.com

0 引言

分布式控制系统(Distributed Control System,DCS)是工业自动化领域的核心解决方案,以“分散控制、集中管理”为核心理念,依托模块化架构、冗余容错机制及分层控制结构,实现了对复杂工业流程的精准管理与协同优化[1-2]。DCS具有对工业设备实时控制的可靠性,同时可借助企业数据的深度融合能力,为智能决策提供技术基础。DCS应用边界已从化工、冶金等传统行业拓展至新能源、环保等新兴领域[3-5],展现出强大的技术普适性与产业适配价值。陈自春[6]研究表明,DCS系统通过可视化技术和实时监控的手段,实时调整生产参数,优化生产节点,提高某化工厂生产效率,残次品率降低15%,污染物削减20%。

近年来,学者们对如何优化DCS系统进行了大量研究。李进[7]针对工厂DCS系统常见故障类型进行深入分析,常见故障包括硬件故障、软件故障、人为故障及环境因素导致的故障。张海韵[8]阐述了在选型、硬件配置、现场仪表使用等方面可能存在的问题,提出相应的优化措施和建议,可供相关人员参考。

值得注意的是,骨料行业DCS应用在深度、广度和智能化水平上,相比成熟的化工、冶金领域存在巨大差距。这源于行业历史发展路径、对自身过程复杂性的低估、独特的技术挑战(原料波动、磨损、检测难度大)、认知偏差以及人才生态的不足。不过骨料行业也有优势,比如对安全联锁的要求比化工低,这反而降低了DCS实施难度[9-10]。

基于技术特性与行业验证,以竹仔岭骨料厂为工程背景,从系统设计、功能实现及优化策略等维度,阐述DCS在骨料加工全流程中的关键技术应用,聚焦“破碎-筛分-水洗-脱水”全流程协同控制,在系统架构设计、算法功能实现及动态优化方面展开技术攻关,旨在为骨料加工行业构建一体化智能控制系统提供理论支撑与实践参考。

1 行业痛点与DCS的技术优势

1.1 重资产与高能耗的行业痛点

传统骨料加工行业属于典型的重资产型工业领域,固定资产占比普遍超60%,设备维护费用与能源消耗成本合计占总运营成本的40%以上。以破碎机、球磨机为代表的核心生产设备,单机功率可达500~1 000 kW,在传统粗放式管理模式下,普遍存在设备空载率超过30%、每小时启停次数达5~8次的低效运行现象,致使无效电能损耗占比高达总能耗的25%。更为严重的是,由于缺乏智能监测系统,设备关键部件的隐性故障难以及时预警,平均每月非计划停机达3~5次,单次停机造成的产能损失可达200~500 t,直接导致设备综合利用率低于75%。这种恶性循环不仅造成每年逾千万元的能源成本浪费,更使得单位矿石处理成本上升18%~25%,显著削弱了企业的市场竞争力。

1.2 DCS的技术优势

DCS凭借以下核心特性,系统性解决了传统生产模式中的痛点问题,为骨料加工企业构建了智能化升级的技术底座[11-13]。以下是该技术在竹仔岭骨料厂的优势的详细分析。

(1)模块化冗余设计保障生产连续性。针对工业设备高负荷、长周期的运行特性,DCS采用控制器、电源及通信网络的1∶1冗余架构。当检测到主控制器异常时,备用单元可在10 ms内无缝接管控制权,配合环网拓扑的双通道通信冗余,确保破碎机、球磨机等核心设备在单点故障时仍能持续运转[12-14]。

(2)多层级能耗管理实现精细降耗。DCS通过嵌入式智能电表与传感器网络,实时采集设备电流、功率及负载率等300余项能耗参数,构建分时、分设备的能耗画像。同时,基于球磨机给料量与电机转速的耦合关系,自动优化变频器输出曲线,将空载功率损耗从28%压缩至9%以内[13-15]。

(3)全生命周期监控延长资产价值。DCS建立了涵盖12类关键设备的数字孪生数据库,持续记录运行时长、轴承温度、振动频谱等设备状态数据。基于蒙特卡洛算法预测衬板磨损周期,可提前14 d触发维护工单,使破碎机检修效率提升40%[10,13]。

2 基于DCS的工艺全流程设计实践

2.1 项目概况与工艺流程

竹仔岭骨料厂设计年处理矿石500万t,涵盖粗碎备料、中细碎筛分、制砂及水循环四大工艺段,涉及设备200余台。在此生产规模与工艺复杂度下,面临的主要难点包括:(1)物料平衡动态调控,如缓冲仓料位波动易引发设备过载或空转;(2)高能耗设备优化,如球磨机、洗砂机等能耗占比超50%;(3)复杂环境下的系统稳定性,如粉尘、湿度及电磁干扰影响信号传输。

2.2 DCS架构设计

设计骨料加工全流程DCS系统架构,如图1所示。

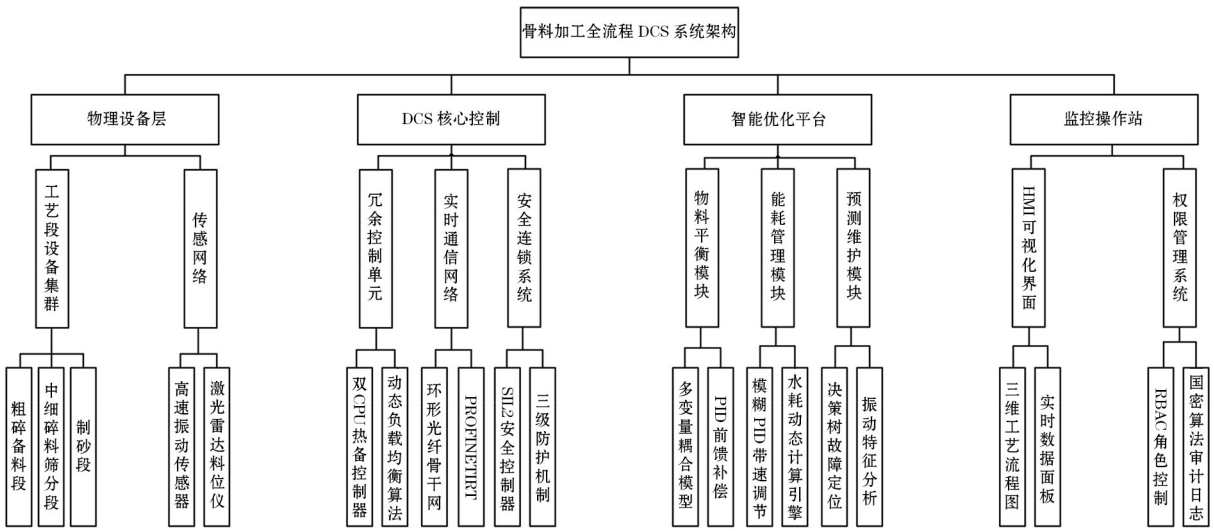


图 1　骨料加工全流程 DCS 系统架构

Fig.1　DCS system architecture for the entire process of aggregate processing

2.2.1　硬件配置与冗余策略

现场层－监控层－管理层的功能分布如图 2 所示。

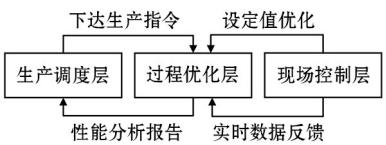


图 2　功能分布控制架构

Fig.2　Functional distribution control architecture

(1) 控制器设计。双 CPU 热备冗余控制器通过主备 CPU 同步运算与状态互检机制，实现毫秒级切换。基于动态负载均衡算法，设计 CPU 负荷率低于 60%，为突发指令、冗余切换预留 40%余量，同时，0.2～1 s 可调扫描周期确保在破碎机急停(响应时间≤0.5 s)等关键工艺段，通过优先级中断嵌套技术确保控制指令传输延迟＜10 ms。采用 FPGA 硬件加速模块处理 PID 闭环控制，相较传统 PLC，运算效率提升 3 倍，实测 CPU 故障切换成功率≥99.9%。

(2) I/O 系统架构。基于工艺段特征，采用 I/O 系统架构，如破碎段配置 213DI(含 64 路高速振动传感器输入)和 53AI(含 8 路 4～20 mA 称重信号)，各工艺段采用独立背板总线架构。通过双路隔离继电器实现物理层 100%故障隔离，结合软件层面信号镜像技术，在单控制器失效时，自动启用备用通道，隔离响应时间＜50 ms。采用 Class 1 Div 2 防爆认证 I/O 模块，支持在线热插拔更换，平均修复时间(Mean Time To Repair，MTTR)控制在 15 min 内。

(3) 通信网络拓扑。构建环形冗余光纤骨干网，中心控制室与 5 个现场控制室(Factory Control Room，FCR)通过 2 芯单模光缆(OS2 等级)形成自愈环网，采用 PRP/HSR 协议实现零丢包冗余。过程控制层部署 PROFINET IRT 协议，10 Mbps 带宽保障 2000 个 I/O 点实时刷新，抖动＜1 μs；管理监控层采用 OPC UA over TSN 技术[13-15]，100 Mbps 带宽支持 4K 视频流、历史数据库同步及 MES 系统集成，配置 QoS 策略确保关键数据优先级传输，实现网络可用性 99.99%。

2.2.2　核心功能实现

(1) 物料平衡优化。构建基于多变量耦合的旋回破碎机动态数学模型，如图 3 所示。基于实时采集的振动电流、破碎腔压力及排料粒度分布参数，利用模型预测控制算法动态调节板式给料机驱动电机频率。采用双缓冲仓协同控制策略，通过激光雷达料位扫描仪实现 ±1 cm 精度监测，结合 PID 前馈补偿机制，使缓冲仓料位标准差从±15%降至±11.2%。系统集成 OPC-UA 协议，实现与 DCS 的数据交互，通过设备启停逻辑优化，使空转时间由日均 4.2 h 缩减至 2.9 h，年节省电费超 80 万元[15-17]。

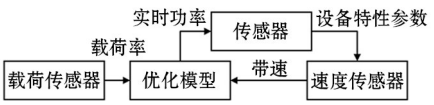


图 3　物料平衡控制回路

Fig.3　Material balance control loop

(2) 能耗闭环管控。通过部署智能电表网络，采集设备三相电压/电流谐波数据，计算空载率。建立皮带机载荷－速度－功率三维图谱，通过模糊 PID

控制实现带速自适应调节,建立相应规则库实现载荷与速度调节的平衡,实际节电率为15.7%。水循环系统采用V锥流量计与超声波液位计,构建HMI组态界面,通过电动调节阀精确控制流量设定值,使吨骨料水耗从3.2 m^3 降至2.56 m^3,年节水25万t。

(3) 安全联锁与故障自愈。构建三级安全防护体系,实现安全联锁与故障自愈:一级防护基于PLC硬接线实现<50 ms紧急停机,二级防护采用SIL2认证的安全控制器处理设备互锁,三级防护通过SCADA系统实现工艺链保护。此外,故障树分析(FTA)数据库,可存储8 000多条报警事件,并支持模糊匹配检索。硬件诊断模块集成HART协议,实现设备自检功能。基于决策树的故障定位系统内置182种故障模式识别规则,实测平均故障定位时间4.3 min,关键设备平均修复时间降低68%。

2.3 软件组态与界面优化

(1) 智能算法集成。系统采用智能PID技术,通过实时采集棒磨机的振动、电流及音频信号,基于模糊控制算法动态调整给料量,使负荷稳定在最优区间,避免设备堵塞或能源浪费。基于工业物联网架构,配置序列控制模块,实现破碎机-振动筛-制砂机的全流程协同控制。通过预设逻辑顺序和联锁保护机制,一键启停时各设备按0.3 s级差逐级动作,确保系统启停过程冲击电流降低40%,且紧急停机时设备反向隔离保护响应达毫秒级,显著提升产线安全性与能效比。

(2) 人机交互设计。HMI界面集成三维工艺流程图与设备拓扑图,支持400多条传感器数据的颜色渐变、动画流转等多模态呈现,关键参数刷新频率达10 Hz。历史数据库采用时序压缩存储技术,可同步对比分析16个变量的72 h趋势曲线,并自动标注工艺拐点。基于RBAC模型,构建权限体系,操作员仅具备启停/报警确认权限,工程师和管理员在工艺规则约束下可修改设定值,经双重认证后程序自动更新,实现操作闭环可追溯。

2.4 技术挑战与创新解决方案

2.4.1 高粉尘环境下的信号可靠性

(1) 硬件防护。机柜采用IP54防护等级,外壳可有效阻挡灰尘侵入,并抵御各方向低压喷水,适应现场恶劣环境。信号通道创新性采用光电隔离技术,通过光耦器件实现电气隔离,消除地环路干扰,可吸收高达6 kV的瞬态电压,确保控制电路在雷击或电源波动时安全运行。

(2) 通信优化。在RS485总线每1 200 m加装数字中继器,通过信号整形再生,突破传输距离限制。Modbus RTU协议[18-20]采用16位CRC校验,配合自适应波特率匹配技术,实时检测并纠正位反转错误。

2.4.2 异构系统集成

(1) 数据融合。基于OPC UA标准化通信协议,PLC设备与MIS集成,实现设备参数、能耗统计等生产数据的结构化传输。该架构采用TLS加密技术,实时将生产工单完成率、设备OEE等关键指标推送至ERP系统,使订单排产效率提升40%。

(2) 边缘计算应用。在DCS控制器层级部署边缘计算节点,对振动传感器、视觉检测等高频数据进行本地化预处理。通过滑动窗口算法实施数据降采样,将10 kHz原始信号压缩为1 kHz特征向量传输至云平台,带宽占用降低90%。边缘节点同步运行异常检测模型,对温度漂移、压力突变等工况进行毫秒级响应,系统整体延迟从800 ms优化至50 ms以内。

3 实施效果与经济效益分析

3.1 系统验证与性能测试

工厂验收(Factory Acceptance Test,FAT)与现场验收(Site Acceptance Test,SAT)关键指标对比数据见表1,测试标准及验证方式见表2。

表1 工厂验收与现场验收关键指标对比

Table 1 Comparison of key indicators for factory acceptance test and site acceptance test

测试项目	I/O点功能符合性/%	冗余切换成功率/%	通信丢包率/%	系统可用性/%	控制指令延迟/ms
FAT	≥99	100	≤0.01	≥99.9	≤50
SAT	100	100	0.002	99.97	≤32

表2 测试项目标准及验证方式

Table 2 Testitem standards and verification methods

测试项目	I/O点功能符合性	冗余切换成功率	通信丢包率	系统可用性	控制指令延迟
测试标准依据	IEC 61131-2	IEC 61508 SIL2	IEC 62439-3	ISO 13849-1	IEC 61784-2
验证方式	仿真信号注入测试	主控制器强制触发	72 h流量压力测试	全年运行统计分析	示波器捕捉信号时延

工厂验收(FAT)是设备出厂前的关键测试环节,旨在验证系统设计与功能的合规性。测试中,通过仿真信号模拟实际工况,对40%的I/O点进行功能性验证,涵盖典型工况和异常场景,确保信号采集、逻辑处理及输出控制的准确性。冗余切换测试要求主备模块在故障时无缝切换,且切换成功率达到100%,证明系统的高可靠性设计。

现场验收(SAT)是系统投入运行前的最终考核,聚焦实际环境下的稳定性和性能表现。72 h连续运行测试模拟真实生产负荷,验证长时间运行中软硬件的抗疲劳性,确保系统无死机、数据阻塞或控制延迟等问题。通过冗余网络架构和实时监测技术,丢包率低于0.01%,有效避免因丢包导致控制指令失效。通过容错设计、快速自诊断及热插拔功能,系统可用性≥99.9%,表明全年非计划停机时间少于8.8 h,SAT的通过标志着系统具备工业化投用条件。

3.2 应用成效

DCS投入运行前后设备运行指标对比见表3。

表3 DCS投入运行前后设备运行指标对比

Table 3 Comparison of equipment operating indicators before and after the commissioning of DCS

模式	平均故障间隔/h	平均修复时间/min	设备综合效率/%	备件周转率/(次/年)
传统模式(2024)	1 200	210	74	2.1
DCS模式(2025)	2 100	112	89	3.4

通过设备变频改造、热能循环系统升级及智能能耗监控平台部署,企业实现综合能耗下降18%。引入光伏发电系统与余热回收装置,年减少标煤消耗3 200 t,结合错峰用电策略优化,年节约电费达360万元。同时,二氧化碳年减排8 600 t,形成经济效益与环保效益双重效益。

采用预防性维护体系与物联网传感技术,设备在线健康监测覆盖率达100%。基于动态调度算法,优化生产排程,设备作业率提升至98%。应用预测性维护模型后,突发故障率降低42%,维护成本同比下降25%,年度产能提升15万t,设备全生命周期延长3~5 a。

移动运维与5G网络的应用,使技术人员响应速度提升60%。通过模块化快修方案和战略备件前置部署,平均修复时间压缩至112 min,非计划停机次数从年均26次降至17次,保险理赔额减少280万元/年。

4 结论

(1) DCS显著提升骨料加工能效与资源利用率。通过硬件冗余、智能算法及多层级能耗管控,系统使设备空载能耗降低15%,综合能耗下降18%,吨骨料水耗由3.2 m^3降至2.56 m^3,年节水25万t,实现了绿色生产目标。

(2) 有效降低故障率并提高运维效率。采用三级安全防护、故障树数据库及故障定位系统,平均故障定位时间仅4.3 min,关键设备平均修复时间降低68%;实际投入运行后,在平均故障间隔时间、设备综合效率、备件周转率方面分别提高了75%、20%、62%,平均修复时间降低了47%。

(3) 延长设备寿命并优化资产利用率。结合预测性维护模型与健康监测技术,设备全生命周期延长3~5 a,非计划停机次数由年均26次降至17次,维护成本同比下降25%,年产能提升15万t。

(4) 有效应对了骨料行业特殊技术难题。通过IP54防护、光电隔离等措施,有效应对了高粉尘环境、雷击或电源波动对信号传输与电路运行的影响;基于OPC UA和边缘计算的异构系统集成,使控制指令延迟降至50 ms以内,订单排产效率提升40%。

参考文献(References):

[1] 谢威.分布式计算机控制系统DCS在自动化控制中的应用[J].集成电路应用,2022,39(6):110-111.
Xie Wei. Application of distributed computer system DCS in automation control[J]. Application of IC, 2022, 39(6): 110-111.

[2] 井彦荣,王卫.DCS控制系统运行与维护研究[J].中国机械,2023(15):62-65.
Jing Yanrong, Wang Wei. Research on the operation and maintenance of DCS control system[J]. Machine China, 2023(15): 62-65.

[3] 尹小军,程华,杨荣力,等.环保DCS系统在钢铁企业环保管理中的应用与改进[J].冶金设备管理与维修,2024,42(6):25-28.
Yin Xiaojun, Cheng Hua, Yang Rongli, et al. Application and improvement of environmental protection DCS system in environmental protection management of iron and steel enterprises[J]. Metallurgical Equipment Management and Maintenance, 2024, 42(6): 25-28.

[4] 符国谊.DCS系统架构设计与实时性能分析:以某化工单位DCS为例[J].数字通信世界,2024(11):68-70.
Fu Guoyi. Architecture design and real time performance analysis of DCS control system: taking the DCS control system of a certain chemical unit as an example[J]. Digital Communication World, 2024(11): 68-70.

[5] 郑剑云.污水处理厂DCS控制系统应用[J].自动化应用,2016(6):125-127.
Zheng Jianyun. Application of DCS control system in sewage treatment plant[J]. Automation Application,2016(6):125-127.

[6] 陈自春.DCS系统对化工生产的影响[J].化学工程与装备,2022(2):171-172.
Chen Zichun. The impact of the DCS system on chemical production[J]. Chemical Engineering & Equipment,2022(2):171-172.

[7] 李进.化工厂DCS系统中的故障与处理路径探究[J].当代化工研究,2025(7):140-142.
Li Jin. Exploration of faults and handling paths in DCS systems of chemical plants[J]. Modern Chemical Research,2025(7):140-142.

[8] 张海韵.探究DCS系统运用在化工企业中的问题及解决措施[J].天津化工,2023,37(3):140-142.
Zhang Haiyun. Investigation of the problems and solutions in the application of DCS system in chemical enterprises[J]. Tianjin Chemical Industry,2023,37(3):140-142.

[9] 向峥,荆语飞,张园园,等.ABB-AC900F DCS系统在骨料生产线中的应用[J].水泥技术,2023(2):72-78.
Xiang Zheng, Jing Yufei, Zhang Yuanyuan, et al. Application of ABB-AC900F DCS system in aggregate production line[J]. Cement Technology,2023(2):72-78.

[10] 杜自彬.砂石骨料自动装车控制系统设计[J].水泥工程,2020(1):59-60+68.
Du Zibin. Design of automatic loading control system for aggregate[J]. Cement Engineering,2020(1):59-60+68.

[11] 王槐,卢致明,李镇宏,等.DCS集散控制系统在选矿厂应用的重要性[J].世界有色金属,2021(4):13-14.
Wang Huai, Lu Zhiming, Li Zhenhong, et al. The importance of DCS application in concentrator[J]. World Nonferrous Metals,2021(4):13-14.

[12] 马亮.选煤厂集散控制DCS系统的设计与实现[J].微型电脑应用,2023,39(11):160-163.
Ma Liang. Design and implementation of DCS system for coal preparation plant[J]. Microcomputer Applications,2023,39(11):160-163.

[13] 仓冰南,王俊鹏,李云庆,等.采用DCS和FCS相结合的自动化系统在黄金选矿厂中的应用[J].山东工业技术,2014(23):58-60.
Cang Bingnan, Wang Junpeng, Li Yunqing, et al. Application of automation system combining DCS and FCS in gold beneficiation plant[J]. Journal of Shandong Industrial Technology,2014(23):58-60.

[14] 廖志伟,刘洋,白应光.自主安全可控DCS在智能选煤厂的应用[J].工矿自动化,2023,49(增刊2):56-58.
Liao Zhiwei, Liu Yang, Bai Yingguang. Application of autonomous safety and control able DCS in intelligent coal preparation plant[J]. Journal of Mine Automation,2023,49(Suppl.2):56-58.

[15] 雷斌,沈宁.DCS技术在选煤厂集中控制系统中的研究与应用[J].工矿自动化,2021,47(增刊1):119-121.
Lei Bin, Shen Ning. Research on DCS technology in integrated control system of coal preparation plant and its application[J]. Journal of Mine Automation,2021,47(Suppl.1):119-121.

[16] 贾布衣.选矿过程DCS系统的设计与应用[J].中国矿业,2019,28(增刊2):200-204.
Jia Buyi. Design and application of DCS system in mineral processing[J]. China Mining Magazine,2019,28(Suppl.2):200-204.

[17] 孙亦非,贺诗波,郭苗,等.工业互联网发展新趋势:OPC UA TSN[J].新型工业化,2023,13(6):19-26.
Sun Yifei, He Shibo, Guo Miao, et al. OPC UA TSN: new development trend of industrial internet[J]. The Journal of New Industrialization,2023,13(6):19-26.

[18] 孙毅.基于分布式C/S结构的皮革企业智能化管理系统设计与实现[J].中国皮革,2022,51(10):16-20.
Sun Yi. Design and implementation of leather enterprise intelligent management system based on distributed C/S structure[J]. China Leather,2022,51(10):16-20.

[19] 房锦生.MODBUS TCP与MODBUS RTU的通讯仿真测试[J].科技创新与应用,2015(22):100.
Fang Jinsheng. Communication simulation test of MODBUS TCP and MODBUS RTU[J]. Technology Innovation and Application,2015(22):100.

[20] 周春卫,邓全亮.多模式生产与AI决策研究及其应用[J].中国水泥,2024(5):62-65.
Zhou Chunwei, Deng Quanliang. Research on multi-modal production and AI decision-making and its applications[J]. China Cement,2024(5):62-65.