

引用格式:谢红辉,李孝飞.高冰镍精炼生产系统的层级构建及优化[J].有色设备,2024,38(6):69-75.

XIE Honghui, LI Xiaofei. Hierarchical construction and optimization of the nickel matte refining production system[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(6): 69-75.

高冰镍精炼生产系统的层级构建及优化

谢红辉, 李孝飞

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 伴随新能源汽车产业的迅猛发展,三元动力电池关键原料硫酸镍的市场需求呈持续扩张态势。高冰镍精炼作为获取硫酸镍及硫酸钴等原料的重要途径,其生产流程复杂且对系统控制与数据管理要求严苛。为此,本文结合高冰镍精炼生产特性,设计了四层架构生产系统:L0层集成现场仪表、电气设备及PLC控制系统,负责基础数据采集与设备初步控制;L1层DCS系统,统筹生产流程管控;L2层数据采集系统,负责数据汇总及存储;L3层MES系统,用于精细化管理决策。着重介绍了L0~L2层结构设计要点,定义了L1~L2层间OPC UA通讯数据类型,确保数据高效精准交互。目前该系统已成功运行,能实现生产现场远程实时监测、就地设备远程及自动化控制,自动采集存储全部生产数据,为MES系统稳定供源。最后针对现有结构提出优化策略,削减干扰、强化冗余,提升系统连接可靠性。

[关键词] 高冰镍精炼;层级结构;DCS系统;数据采集系统;Modbus TCP协议;OPC通讯

[中图分类号] TF815 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)06-0069-07

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.06.010

0 引言

MES(Manufacturing Execution System)^[1]是实现信息化和工业化融合,支撑企业各信息子系统有效集成,实现高质量、低成本等生产的重要手段^[2]。MES系统位于企业信息系统和过程控制系统的中间位置,其中过程控制系统包括分散控制系统(DCS)和安全仪表系统(SIS)等^[3]。控制系统过程生产数据通过通信通道传输至MES系统,MES系统通过相应管理模块进行优化管理,并为ERP系统进一步提供实时准确的数据^[4]。

过程控制系统的信息采集是MES系统的一项重要内容,本文结合某国外高冰镍精炼项目的生产流程,设计了一套生产系统,该生产系统将MES系统中的数据采集功能独立出来,并作为介于过程控制系统和MES系统之间的新层级。在这分层结构下MES系统可专注于生产计划、原料管理以及质量跟踪等管理模块的开发。目前该项目已经产出第一

批产品,整个生产系统运行状况良好,实现了生产现场运行状态的稳定远程监测,就地设备(含PLC系统)的远程及自动控制,同时将全部生产数据采集并存储在数据采集系统中,为后续MES系统的开发提供了可靠的数据来源。

1 工艺概述

高冰镍主要由铜镍混合精矿或镍精矿经电炉熔炼形成低冰镍后,再经转炉吹炼而成^[5],其成份主要包括硫镍矿(Ni_3S_2)、辉铜矿(Cu_2S)、铜镍铁合金(CuNiFe)以及少量金属铜和磁铁矿(Fe_3O_4)^[6]。高冰镍进一步精炼主要采用直接电解法和加压浸出法两种工艺。随着新能源汽车行业的快速发展,作为三元动力电池主要原料的硫酸镍市场需求不断扩大,加压浸出法得到越来越广泛的应用,成为行业主流工艺之一^[7]。

本项目采用中国恩菲工程技术有限公司(以下简称中国恩菲)核心专长的加压浸出技术,使用“常压浸出+加压浸出”工艺。整个项目分为浸出-过滤工段(100区)、萃取工段(200区)、蒸发结晶工段(300区)、酸碱制备工段(400区)、公辅工段(500区)和总降变电站(600区)。其中,浸出-过滤工

[收稿日期] 2024-09-06

[第一作者] 谢红辉(1986—),女,湖南冷水江人,高级工程师,硕士,主要从事有色冶金自动化工程设计与咨询工作。

段、萃取工段和蒸发结晶工段为主工艺工段。

镍铁硫化后的原料高冰镍先送到浸出-过滤工段,经过磨矿、常压浸出和氧压浸出以及过滤工序后,获得镍钴溶液,并被送往萃取工段。萃取工段中的萃取和除油工序,对镍钴溶液进行分离并除油除杂,获得纯净的硫酸镍、硫酸钴溶液。硫酸镍溶液、硫酸钴溶液送至蒸发结晶工段,经蒸发、结晶、干燥和包装等工序后得到符合外售标准的硫酸镍、硫酸

钴晶体。部分除油后硫酸钠溶液经蒸发、结晶获得副产品无水硫酸钠。酸碱制备工段用来贮存、中转和输送溶剂油、浓硫酸、液碱和盐酸,满足主工艺工段的使用。

2 生产系统的层级设计

本项目生产系统共分为4层,分别是L0~L3层,生产系统层级结构图如图1所示。

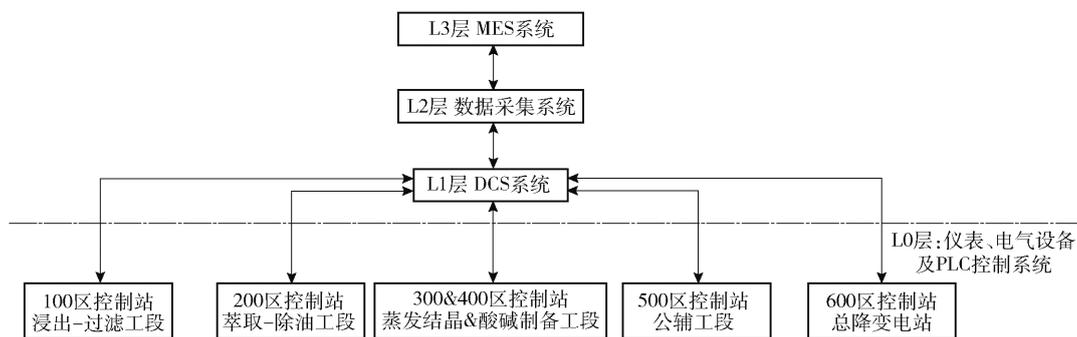


图1 生产系统层级结构

Fig.1 Hierarchical structure of the production system

L0层主要包括6个区域内的现场仪表、电气设备以及成套设备/装置带有的PLC控制系统。

L1层为DCS控制系统,作为整个生产系统的核心,起着重要承上启下的关键作用。整个项目共设计一套DCS控制系统。

L2层为数据采集系统,对L1层的全部生产实时数据进行采集,并将其存储在数据服务器中。

L3层为MES系统,通过整合全部生产、销售相关数据,实现从接收客户订单开始到生产计划的制定以及产品产出的全流程生产管理。此部分内容尚待后续开发。

2.1 L0层与L1层连接

本项目L1层DCS系统采用的是DeltaV V15系统,该控制系统基于数字结构设计,完全集成了多种总线的智能化工厂能力^[8]。整个控制系统软件为英文界面,可以满足业主的使用需求。在中央控制室共设置有6台操作员站,用于全项目生产过程的集中监控,并在100区、200区现场控制室各设置1台现场操作员站,500区设置2台现场操作员站。在中央控制室旁设置了1个工程师室,配置有1台主工程师站,1台历史数据服务器(兼OPC服务器)。考虑到调试阶段以及后期维护的需要,在主配电室中配置了1台工程师站。

本项目主要的现场仪表和电气设备的硬线信号集中在浸出-过滤工段(100区)和萃取工段(200区),蒸发结晶工段(300区)和酸碱制备工段(400区)的仪表和电气设备的硬线信号较少。其中,300区主体为带PLC系统的成套设备/装置。因此,本项目共设置5个控制站,300区和400区合并为1个控制站,其余控制站与各工段的设置保持一致,分别接收对应工段的现场仪表和电气信号。全部控制站的控制器为冗余配置。整个DCS控制系统采用星型网络结构,配置冗余的DELTA V控制网,作为中心节点的主、副交换机设置在中央控制室的网络柜内。工程师站、操作员站以及服务器的主、副网卡通过以太网线分别连接到主、副控制网络上,在各控制站配置的冗余交换机通过光缆连接到中心节点的主、副网络。

L0层的现场仪表中,流量计和物位计数量最多,此外还有分析仪表、液位开关、流量开关等。阀门包括气动调节阀、气动开关阀和电动开关阀3种类型,其中气动开关阀的数量较多,共计315台。现场仪表的I/O类型主要包括AI(二线制),AI(四线制)以及DI(干接点)和DO。

电气设备按照驱动方式可分为两大类:工频驱动和变频驱动。不同驱动方式下,电气设备信号I/

O 类型有所区别。本项目中全部电气设备在常规 I/O 配置基础上,均增加了“急停 DI 信号”和“联锁 DO 信号”,分别用于现场急停按钮状态检测和电气设备控制回路中“硬联锁”的触发。

以上 L0 层的现场仪表和电气设备信号均通过硬线连接的方式直接连接到 L1 层 DCS 系统。

本项目带 PLC 系统的成套设备/装置较多,主要集中在主工艺工段,各工段中的 PLC 系统如表 1 所示。

表 1 带 PLC 的成套设备/装置

Table 1 Complete set of Equipment/Devices with PLC

工段	成套设备/装置
浸出-过滤工段	压滤机、浓密机、絮凝剂制备装置、给料泵
萃取工段	压滤机、除油装置
蒸发结晶工段	镍蒸发结晶系统、钴蒸发结晶系统、干燥系统、包装系统、离心机、硫酸钠蒸发结晶系统
其他工段	空压机、干燥机、废水处理系统

为了尽可能地减少现场操作人员的数量,实行远程集中控制,本项目带 PLC 系统的成套设备/装置具有以下 2 种工作模式:1) PLC 模式:成套设备/装置的操作和设定在 PLC 的 HMI 上完成,DCS 的 HMI 仅具有监视功能;2) DCS 模式:成套设备/装置的操作和设定在 DCS 的 HMI 上完成,PLC 和 DCS 的 HMI 同时具有监视功能。2 种模式下成套设备/装置的控制功能均由 PLC 系统控制器独立完成,其中监视、操作、设定和控制功能包含的具体内容,如表 2 所示。

2 种模式的选择在 PLC 系统的 HMI 上完成。无论成套设备/装置处于何种工作模式,PLC 系统和 DCS 系统均实时跟踪设定值,以保证 2 种模式下的无缝切换操作。

本项目所有 PLC 系统以 Modbus TCP 的以太网通讯方式与 L1 层的 DCS 系统相连,采用了 DeltaV 系统的 Modbus TCP 通讯的卡件——EIOC (Ethernet I/O Card)。该卡件可直接通过网线与 DCS 系统的控制器相连,并可独立于控制器安装。在 Modbus TCP 通讯协议下,1 块 EIOC 最多可连接 256 个以太网设备,且能够处理多达 2 000 个控制模块中的数据。由于 600 区没有带 PLC 系统的成套设备/装

表 2 成套设备/装置工作模式功能定义表

Table 2 Working Mode Functions Definition for Complete set of Equipment/Devices

功能	内容
监视	过程量:温度、压力,变频电机频率,电机电流等;状态值:阀门位置,液位开关状态,电机运行状态和报警等;PID 回路设定值、过程值和调节值等
操作	电机:启动/停止;阀门:开/关
设定	PID 回路设定值和调节值;变频电机的频率给定;模式选择:手动/自动/串级等
控制	模拟量控制(反馈控制,比例控制,串级控制等);顺序控制

置,本设计仅在前 4 个控制站各设置 1 块 EIOC,安装在现场的 PLC 系统采用光纤连接到 EIOC,其余则采用网线连接到对应的 EIOC。详细的 L0 与 L1 层连接如图 2 所示。

2.2 L1 层与 L2 层连接

OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) 通讯协议^[9]是一套集信息模型定义、服务与通讯标准为一体的标准化技术框架,由 OPC 基金会组织管理并应用于工业通讯场景。OPC UA 作为一种面向服务的通信协议,构成了一个基于 UA 服务器端和 UA 客户端的实时数据库框架^[10]。

本项目中 L1 层的历史数据服务器作为 OPC 服务器,用来与 L2 层的数据采集系统之间进行 OPC UA 通讯,实现 L1 层系统与 L2 层系统之间的数据传输。

L2 层共 3 个 OPC 客户端,分别是 1#~2#P/C 系统和 IBA 数据采集系统。其中:1#P/C 系统主要用于过程变量的存储和显示;2#P/C 系统用于报警信息的存储和显示;IBA 系统用于过程变量的分析。3 个 OPC 客户端均配有对应的服务器。L1 层与 L2 层的连接如图 3 所示。

若 L1 层的 OPC 服务器与 L2 层的数据采集系统交换机直接相连,这样将会增加网络中非安全端口数量,网络风险性大幅增加。为此,本项目在 OPC 服务器与 L2 层交换机之前配置有艾默生的 NextGen Smart 硬件防火墙。该防火墙是一款专用边界式防火墙,专为 DELTAV 分布式控制系统设计,采用动态端口映射的方式,用来加强外部网络

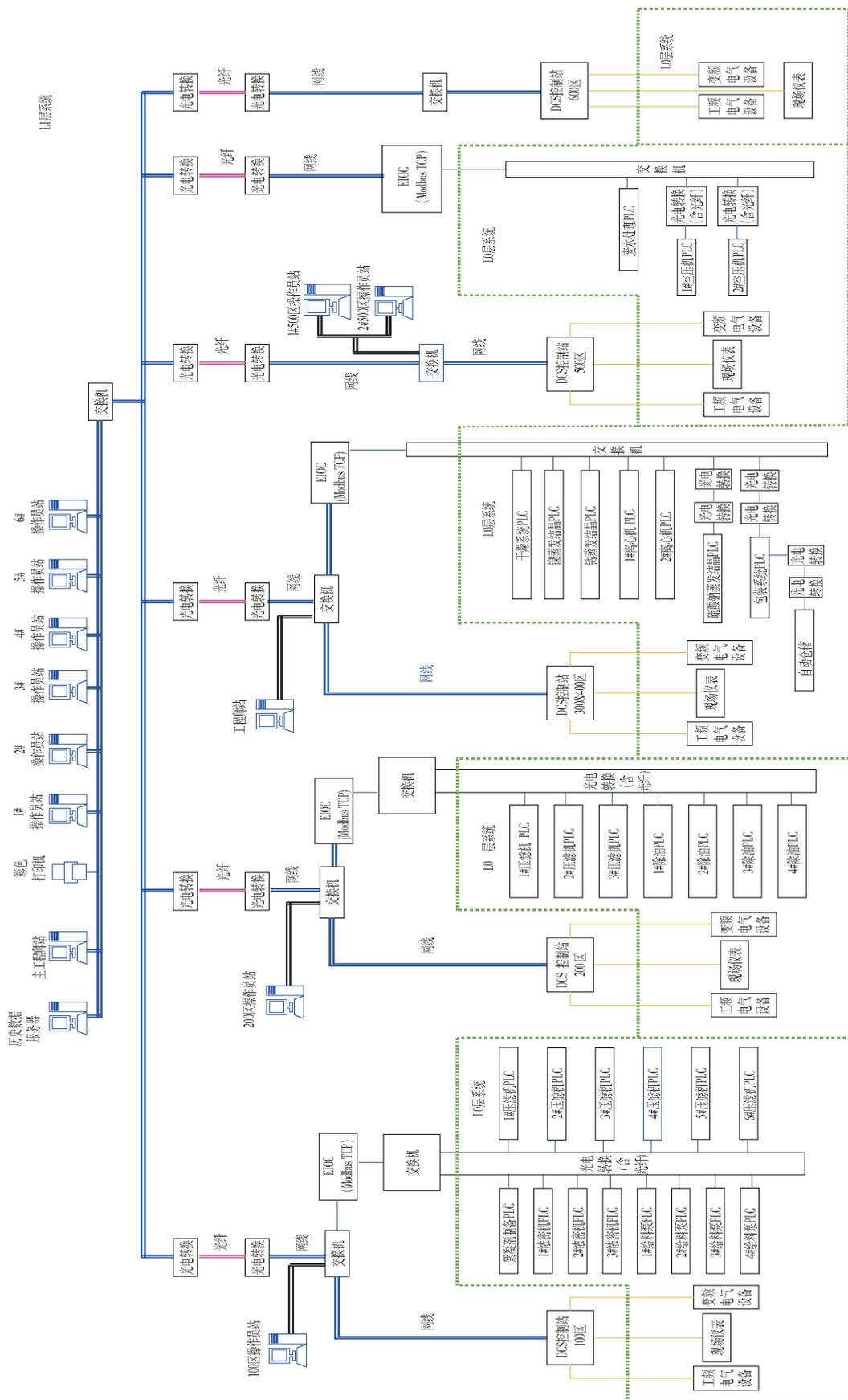


图2 L0与L1层连接

Fig.2 Connection diagram of L0 and L1 layers

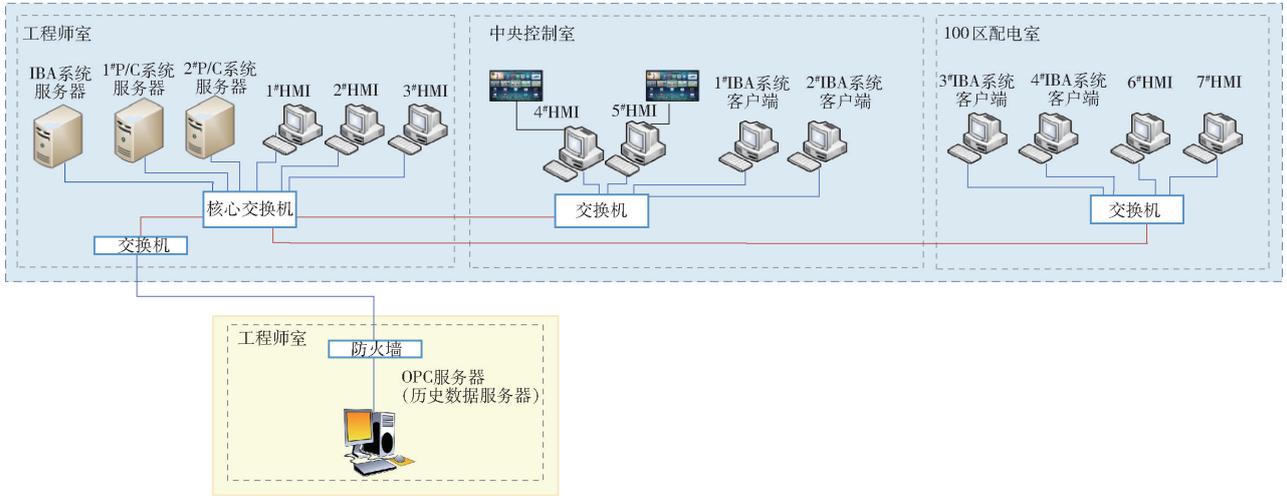


图3 L1与L2层连接

Fig. 3 Connection diagram of L1 and L2 layers

接入 DELTAV DCS 系统的严密控制。

2.3 L2层与L3层连接

本项目中 L3 层系统尚未开发,后续工作中需要首先明确 L2 层数据采集系统与 L3 层 MES 系统之间传输的数据内容以及处理方法,然后进一步明确传输的数据结构和格式,定义数据采集和传输的逻辑流程,经开发和测试,最后部署上线 MES 系统。L2 层和 L3 层之间可采用 OPC UA、TCP IP 等通讯协议进行数据互通。

3 调试与优化

3.1 Modbus TCP 通讯

由 2.1 可知本项目 PLC 系统与 DCS 系统之间采用的是 Modbus TCP 协议。Modbus TCP 协议是一种通用的工业网络应用层的标准,不同厂商的控制设备可以连接成工业网络,进行集中监控^[11-13]。

不同于 Profibus DP 通讯的菊花链路连接方式,PLC 系统的 Modbus TCP 通讯采用星型连接,如图 2 所示。EIOC 作为以太网通讯的主设备,与之通讯的 PLC 系统均连接到 EIOC 对应的交换机上。

通过简单的 IP 地址、子网掩码、通讯协议和端口的设置,即完成了对 EIOC 通讯卡的组态。EIOC 卡与各个 PLC 系统通讯的组态过程与 Profibus DP 通讯类似。

在实际调试过程中发现,星型连接方式使得单台 PLC 系统与 EIOC 之间成为一一的对应关系,Modbus TCP 通讯的可扩展性增强,可以根据各 PLC

系统的安装和调试进度来进行通讯线路的连接,连接方式也更为灵活。取消了 Profibus DP 通讯需要设置终端电阻这一要求,工程师调试 Modbus TCP 通讯更容易。

本项目成套设备/装置带有的 PLC 系统较多,EIOC 作为连接 PLC 系统与 DCS 系统的纽带。当成套设备/装置采用 DCS 操作模式时,PLC 系统与 DCS 系统通讯的可靠性就至关重要。为了进一步提高本系统的安全性,考虑将 L1 层系统的 EIOC 配成冗余型,并在 PLC 系统的单控制器与冗余 EIOC 之间增加一个冗余盒 (RedBox),以实现冗余 EIOC 与单 PLC 控制器的通讯。

3.2 OPC UA 通讯

结合 L2 层数据采集需要,且基于项目配置的 OPC 通讯授权容量限制,本项目分 2 种情况设置 OPC 通讯数据。

1) 对于通过硬线与 DCS 相连的仪表和电气设备,按照 DeltaV 软件中组态的模块类型 (Module Class) 进行区分,定义了 L1 层向 L2 层传送的 OPC 通讯数据,如表 3 所示。

2) 对于带有 PLC 的成套设备/装置,DCS 系统与 PLC 系统之间通讯的数据均传送至 L2 层系统。

本项目 L1 层的控制网络和 L2 层的数据采集网络均为冗余网络,但 OPC 服务器仅配置了单一 OPC 通讯网卡,使得 L1 层与 L2 层的网络连接成了单网,作为 L3 层 MES 系统基础的数据采集系统的网络可靠性降低,一旦 L2 层交换机与 OPC 服务器之间的

唯一网络连接中断,则整个 L2 层系统和 L3 层系统就失去了数据来源,故本项目需考虑在 OPC 服务器增加 1 块网卡,并通过冗余的硬件防火墙与 L2 层交

换机相连,以此来提高 L2 层系统及以上系统的网络可靠性。

表 3 OPC 通讯数据类型
Table 3 Data types of OPC communication

模块类型(class)	OPC 通讯数据(DeltaV 系统中变量)
模拟量输入	“/PV.CV”, “/AII/HI_HI_ACT.CV”, “/AII/HI_ACT.CV”, “/AII/LO_ACT.CV”, “/AII/LO_LO_ACT.CV”
模拟量输出	“/AOI/OUT.CV”, “/AOI/READBACK.CV”
开关量输入	“/DII/OUT_D.CV”, “/DII/DISC_ACT.CV”
开关量输出	“/DOI/OUT_D.CV”
PID 控制	“/PV.CV”, “/SP.CV”, “/OUT.CV”, “/PID1/HI_HI_ACT.CV”, “/PID1/HI_ACT.CV”, “/PID1/LO_ACT.CV”, “/PID1/LO_LO_ACT.CV”
电机控制	“/PV.CV”, “/SP.CV”, “/REMOTE/OUT_D.CV”, “/FAULT/OUT_D.CV”, “/READY/OUT_D.CV”, “/E-STOP/OUT_D.CV”, “/INTERLOCK/OUT_D.CV”, “/CURRENT/PV.CV”
流量累积	“/TOTAL.CV”

4 结语

针对国外某高冰镍精炼项目流程复杂、成套设备种类和数量多等特点,本文设计了一套四层生产系统,有效地满足了生产数据高效传输与系统稳定运行的要求。

首先对该生产系统的各层职能进行了精细规划,重点研究了 L0 ~ L2 层的结构。对 L0 层 PLC 系统与 L1 层 DCS 系统间的 Modbus TCP 通讯组态方法进行了介绍,并依数据重要性定义了 L1 与 L2 层间 OPC 通讯数据。最后对该生产系统结构提出了相应的优化策略,以削减干扰,进一步提升系统连接的可靠性。

目前,该系统已成功投运,在实际生产中表现良好,实现了生产现场实时远程监测无卡顿;就地设备远程操控精准高效,能灵活应对各类工况;底层数据完整采集存储率超 99.5%,为深度分析提供坚实支撑。综合而言,该系统在同类生产系统中优势显著,极具推广价值。

[参考文献]

[1] 崔光现. 有色金属加工企业 MES 系统设计与实现[J]. 有色金属加工, 2011, 40(4): 53 - 55.
 [2] 李平, 王学雷. 氧压浸出锌冶炼 MES 系统规划与实施[J]. 自动化仪表, 2014, 35(12): 19 - 24.

[3] 孙旭. MES 对过程控制系统的信息采集[J]. 中国仪器仪表, 2011(8): 61 - 65.
 [4] 齐瑞超. 石化行业面向对象的集成建模与仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
 [5] 刘广龙. 高冰镍分离技术探讨[J]. 有色矿山, 2003(6): 22 - 26.
 [6] 陆斌刚, 刘立彦, 郑永梅, 等. 超细磨对某高冰镍选矿指标优化的试验研究[J]. 云南冶金, 2021, 50(2): 25 - 28.
 [7] 陈龙义, 玉日泉. 高冰镍加压浸出技术[J]. 世界有色金属, 2022(21): 1 - 3.
 [8] 谢红辉, 李泽宇. DeltaV 控制系统与氧气底吹炼铜工厂工艺设备的 PROFIBUS - DP 通讯[J]. 有色设备, 2019(2): 94 - 97.
 [9] 李敏峰, 欧阳帆. 基于 OPC UA 协议的设备数据采集系统开发[J]. 信息技术与信息化, 2018(7): 70 - 72.
 [10] 顾小红, 胡洋, 陈旭, 等. 基于 OPC UA 的电厂水务数据采集系统设计开发[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(6): 114 - 115, 118.
 [11] 刘建斌. 虚拟模块网关在 DeltaV 控制系统中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2009(4): 13.
 [12] 司俊起, 赵云, 王传强. 吉恩镍业转炉吹炼生产高冰镍生产实践[J]. 中国有色冶金, 2019, 48(6): 30 - 33.
 [13] 赵云. 吉恩镍业冶炼厂卧式转炉吹炼生产高冰镍工艺及实践[J]. 中国有色冶金, 2019, 48(6): 34 - 37.

Hierarchical construction and optimization of the nickel matte refining production system

XIE Honghui, LI Xiaofei

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: With the rapid development of the new energy vehicle industry, the market demand for nickel sulfate, a key raw material for batteries, has been continuously expanding. Nickel matte refining, as an important approach to obtaining raw materials such as nickel sulfate and cobalt sulfate, features a complex production process and has stringent requirements for system control and data management. To address this, this paper designs a production system with a four-layer architecture in combination with the production characteristics of nickel matte refining. Specifically, the L0 layer integrates field instruments, electrical equipment and PLC control systems, responsible for basic data collection and preliminary equipment control. The DCS system in the L1 layer coordinates the management and control of the production process. The L2 layer, which is a data acquisition system, takes charge of data acquisition and storage. And the MES system in the L3 layer is utilized for refined management and decision-making. This paper mainly introduces the key points of the structural design of the L0 ~ L2 layers, defines the data types of OPC UA communication between the L1 ~ L2 layers, ensuring efficient and accurate data interaction. Currently, this system has been successfully put into operation. It can achieve remote real-time monitoring of the production site, remote and automatic control of local equipment, automatically collect and store all production data, and stably provide data sources for the MES system. Finally, optimization strategies are also proposed for the existing structure to reduce interference, strengthen redundancy, and improve the reliability of the system connection.

Keywords: high nickel matte refining; hierarchical structure; DCS system; data acquisition system; modbus TCP protocol; OPC communication

