

基于物联网的选矿制造执行系统技术

柴天佑^{1,2}, 丁进良¹, 徐泉¹, 岳恒²

(1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学国家冶金自动化工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 针对选矿工业综合自动化系统智能化、网络化、集成化发展的趋势, 基于全互联制造网络实现生产全流程一体化控制的实际需求, 构建了底层物联网到互联网的纵向无缝融合与集成的选矿过程全互联制造网络总体架构, 设计了选矿工业生产中工业大数据的采集、传输和存储架构。在此基础上, 研发了基于物联网的选矿智能制造执行系统, 并重点讨论了物联网环境下选矿全流程生产指标一体化优化决策、设备安全视频监控与管理、人员车辆定位与跟踪、能源管理和移动与远程监控等新功能。通过在某选矿厂的工业应用验证, 表明了基于物联网的选矿智能制造执行系统的有效性。

关键词: 物联网; 云计算; 主动感知; 智能化制造; 制造执行系统

中图分类号: TP343.4

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00036

Manufacturing execution system of mineral processing based on Internet of things

CHAI Tianyou^{1,2}, DING Jinliang¹, XU Quan¹, YUE Heng²

1. State Key Laboratory of Synthetically Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China

2. National Metallurgical Automation Engineering Research Camber, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: With the development trend of intelligent, networked, integrated in the automation field of mineral processing industry, the longitudinal seamless fusion and integration from the Internet of things to the Internet of the full interconnection manufacturing network of mineral processing were constructed based on the actual demand of the enterprise management and control, data acquisition, transmission, storage and analysis framework were designed for industrial big data generated from mineral processing, the intelligent manufacturing execution system based on the Internet of things and the industrial cloud was developed. The new functions of integrated process production index optimization and decision making, equipment safety video surveillance and management, personnel vehicle location and tracking, energy management, mobile and remote monitoring, and so on were discussed. The manufacturing execution system based on the Internet of things and the industrial cloud was implemented and used in an iron and steel group. The effectiveness of the MES is verified.

Key words: Internet of things, cloud computing, active perceiving, intelligent manufacturing, manufacturing execution system

1 引言

流程工业综合自动化系统中的制造执行系统

(MES, manufacturing execution system)^[1]是生产过程控制与企业资源计划之间的桥梁和纽带, 是制造企业实现敏捷化和全局优化的关键环节^[2]。经过

收稿日期: 2018-02-10; 修回日期: 2018-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61525302); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2015AA043802); 工业和信息化部智能制造专项基金资助项目(No.20171122-6); 沈阳市双百工程基金资助项目(No.Y17-0-004)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61525302), The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2015AA043802), Project of Ministry of Industry and Information Technology of China (No.20171122-6), Key Research and Development and Technology Transfer Program Projects of Shenyang (No.Y17-0-004)

多年的研究, MES 的研究与应用取得了较大的进展^[3], 为生产过程的计划、调度、设备、能源等管理与优化提供了软件平台, 产生了巨大的应用效果和经济效益。当前, 制造业的转型迫在眉睫, 在企业走向智能生产的过程中, MES 至关重要, 也是实现企业生产高效化和绿色化的必要保障^[4]。

选矿过程属于典型的流程工业过程, 其生产过程中物质流、能量流、信息流相互作用, 且具有工艺复杂、多工序协同连续运行的特点。近年来, 结合选矿过程的特点, 选矿 MES 取得了长足的发展。文献[2]以酒泉钢铁公司选矿厂为背景, 分析和探讨了选矿生产过程制造执行系统的体系结构和功能, 实现了对选矿生产过程中的物流、能流、物料消耗、质量及设备管理和生产成本的监控及生产调度的管理, 产生了明显的应用成效。然而, 随着选矿企业对生产过程高效化、智能化、绿色化的需求, 原有的选矿 MES 面临着巨大挑战, 选矿企业对 MES 本身的功能需求将不再局限于之前的收集、分析与展现, 而是需要其实现现场实时分析、协同智能决策, 及时调整制造执行过程, 因此, MES 需要变得更加智能, 最终帮助企业实现智能生产, 打造智慧工厂。因此, 迫切需要研发新的智能化选矿 MES。

随着物联网^[5,6] (IoT, Internet of things)、云计算^[7,8]、大数据^[9,10]等新的信息技术的迅猛发展及其在制造领域的快速渗透, 生产过程已由传统的“黑箱”模式向“多维度、透明化、智能化泛在感知”模式发展^[11]。这些新的信息技术为选矿 MES 新功能的提升提供了新的途径和技术可行性。物联网为选矿生产过程实现全数据采集和传输提供了可能; 云计算和大数据技术可以采集、存储和分析选矿工业大数据, 为选矿生产过程实时分析、协同智能决策提供了技术支撑; 移动互联技术使对选矿生产过程的移动监控成为可能。

在新的信息技术引领和企业巨大需求下, MES 的研究得到了快速推进和应用。张映锋等^[4]在分析现有制造执行系统面临的挑战和机遇的基础上, 结合最新的物联网技术, 提出一种“物物互联, 感知制造”环境下的制造执行系统——基于物联技术的制造执行系统。韩江等^[12]提出了基于物联网的人机协同制造。文献[13]结合云制造的核心思想, 提出一种面向云制造的机床装备生产 MES, 并对其涉及的基于实例推理 (CBR, case based reasoning) 的零件检索方法、柔性制造单元构建方法等技术展开了

研究; 文献[14]针对分布式制造环境下的 MES 可配置效率和信息集成共享能力较差等问题, 提出一种基于云技术的 MES 解决方案, 并对该系统的功能架构和支持技术进行了研究; 文献[15]提出了下一代 MES 的发展方向——面向生产过程云服务的制造执行系统 (CloudMES), 并从系统体系架构、运行模式、关键技术等方面对 CloudMES 进行了研究, 以促进面向生产过程云服务的 MES 的研究、开发和应用, 为云制造模式向企业车间装备层发展提供相应的技术支撑。

本文主要针对目前选矿工业自动化领域智能化、网络化、集成化发展趋势, 基于全互联制造网络实现企业全局一体化集成优化管控的实际需求, 构建了底层物联网到互联网的纵向无缝融合与集成的选矿过程全互联制造网络总体架构, 研发了基于物联网和工业云的选矿智能 MES, 实现对选矿生产过程的实时分析、安全监控、协同智能决策等, 推动选矿工业智能化转型。

2 选矿过程对全互联制造网络技术的需求分析

选矿属于典型流程行业, 其生产过程的特点是流程长、工序多、设备多、地域分散。选矿厂往往由主体选矿生产线和公辅系统组成。主体工艺一般包括矿石处理、矿石焙烧、磨矿、强磁选别、脱水、弱磁选别、精矿处理和尾矿处理、精矿库、尾矿坝等, 如图 1 所示。公辅系统一般包括循环水泵站、药剂制备等。

1) 选矿生产过程海量信息有线采集需求

选矿生产中, 仅主体工艺通常都涉及长距离的矿石或料浆输送, 中间矿仓、筛分工序、浓缩大井、过滤间、精矿库、尾矿坝等的位置都比较分散, 常规的计算机分布式控制系统往往需要大量的布线以获取传感器的信息。除了布线的成本之外, 这些信息都需要占用大量的模拟量和开关量通道, 因此, 受技术和成本限制, 海量有用信息的采集、监视和控制不到位, 使选矿生产过程难以保持在优化运行状态。

选矿生产中还存在大量的第三方成套设备, 如破碎机、球磨机、过滤机等, 这些第三方成套设备往往都带有自身成套的控制系统, 用于实现成套设备自身内部的监视和控制操作, 如润滑系统、主电机状态、真空泵、离合器等。第三方控制系统往往通过现场总线网络 (Profibus、Modbus、ControlNet 以及

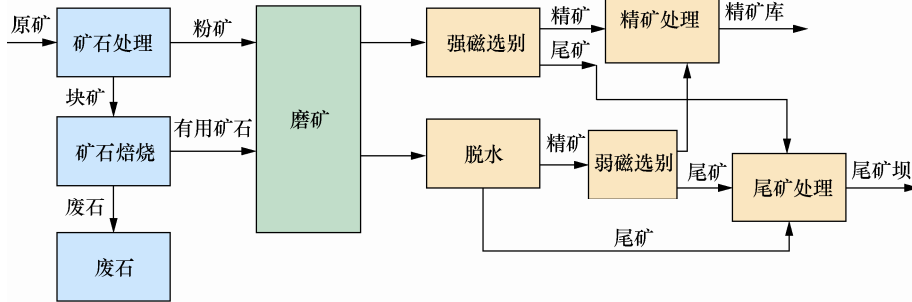


图 1 典型选矿生产过程工艺流程

DeviceNet 等)与选矿厂 DCS 主控系统进行通信,将自身的过程数据、内部设备状态及时发送给 DCS 主控系统,同时接受 DCS 主控系统的运行指令。

2) 选矿生产过程对无线数据采集需求

在选矿生产过程中存在大量移动的被控设备,如矿仓顶端通常配置可逆配仓式带式输送机,或配置移动卸矿小车,在卸料过程中要实时监控料仓料位,需要准确控制小车定位以确定下料位置,需要和上下游的皮带和料仓料位实现自动联锁,防止发生堆料、料位不均等现象,同时保证设备安全运行。常规的有线控制方式中,滑动电缆会出现磨损、断股、断芯等问题,导致信号丢失,严重影响布料系统正常运行,同时维修工作量大、环境恶劣、更换电缆费用较高。

公辅系统中能源介质数据的在线采集和计量对监控选矿生产成本具有重要意义。然而,选矿能源介质数据采集的特点是地域分散;检测仪表数量稀少但必须检测;单独为少数仪表的供电和信号传输进行挖沟、架杆的布线工作;成本往往比较高。

选矿生产的另一个特点是环境恶劣。矿石破碎、矿石输送、矿石存储等环节往往存在严重的粉尘污染。碎矿、筛分和磨矿车间长期存在严重的噪声污染。从改善劳动环境、降低环境污染、保证工人健康的需求出发,也需要选矿生产现场采用物联网技术,实现现场无人状况下的过程数据采集以及设备的远程操作。

此外,在选矿生产管理中,对人员和车辆的实时定位也有一定的需求。人员定位系统可对选矿现场人员进行实时监测,随时查看人员数量、人员位置等信息。如果发生事故,可立即从监控计算机上查询事故现场的人员情况,在软件中显示被困人员数量,为事故抢险提供科学依据。同时,也可利用系统的日常现场定位管理功能,对选矿厂区人员进行定位考勤管理。

3) 移动应用需求

通过移动终端和互联网或无线网络对云中的数据进行访问操作,可以实现用户对工厂运行情况的远程实时监控和移动式办公以及数据的统一管理与分析,有效解决了传统控制系统对工程师站的依赖,具有造价低廉、维护方便、不需通过特定计算机进行控制操作、生产状态监控实时化等优点。移动监控系统结合了新的计算机、互联网技术,通过采用广泛应用的智能终端加云控制方式,使管理层与研发人员可以随时随地通过手机、平板等智能终端访问并监视工业系统的控制及优化现状,查看企业运行分析报告,并根据需求随时下达生产指导意见。

结合以上需求,选矿生产中的全互联制造网络需要体现多种系统、多种设备、多种网络、多种协议的有机集成。其中,DCS 主控系统在常规意义上实现了选矿生产全流程的集中监控,是保证选矿生产过程的连续、稳定、安全运行的基础。

3 基于物联网的选矿 MES 架构

3.1 选矿 MES 体系架构

根据选矿过程的特点和选矿生产管理与运行优化的需求,提出了基于物联网和工业云的选矿 MES 的体系架构,如图 2 所示。该体系架构主要由选矿生产过程层、物联网感知层、数据传输与存储层、数据处理层、应用服务层和用户层这 6 个部分组成。

其中,选矿生产过程层是该系统的物理最底层,实现矿物的生产加工,产生原始生产过程数据;物联网感知层通过选矿全互联制造网络实现对生产过程数据采集,采集方式包括有线数据采集和无线数据采集,采集的数据包括生产状态数据和视频数据;数据传输与存储层实现对采集数据的传输和存储,数据传输通过建立高效、高可靠的数据传输系统,将传感器采集到的现场数据实时传输到工业

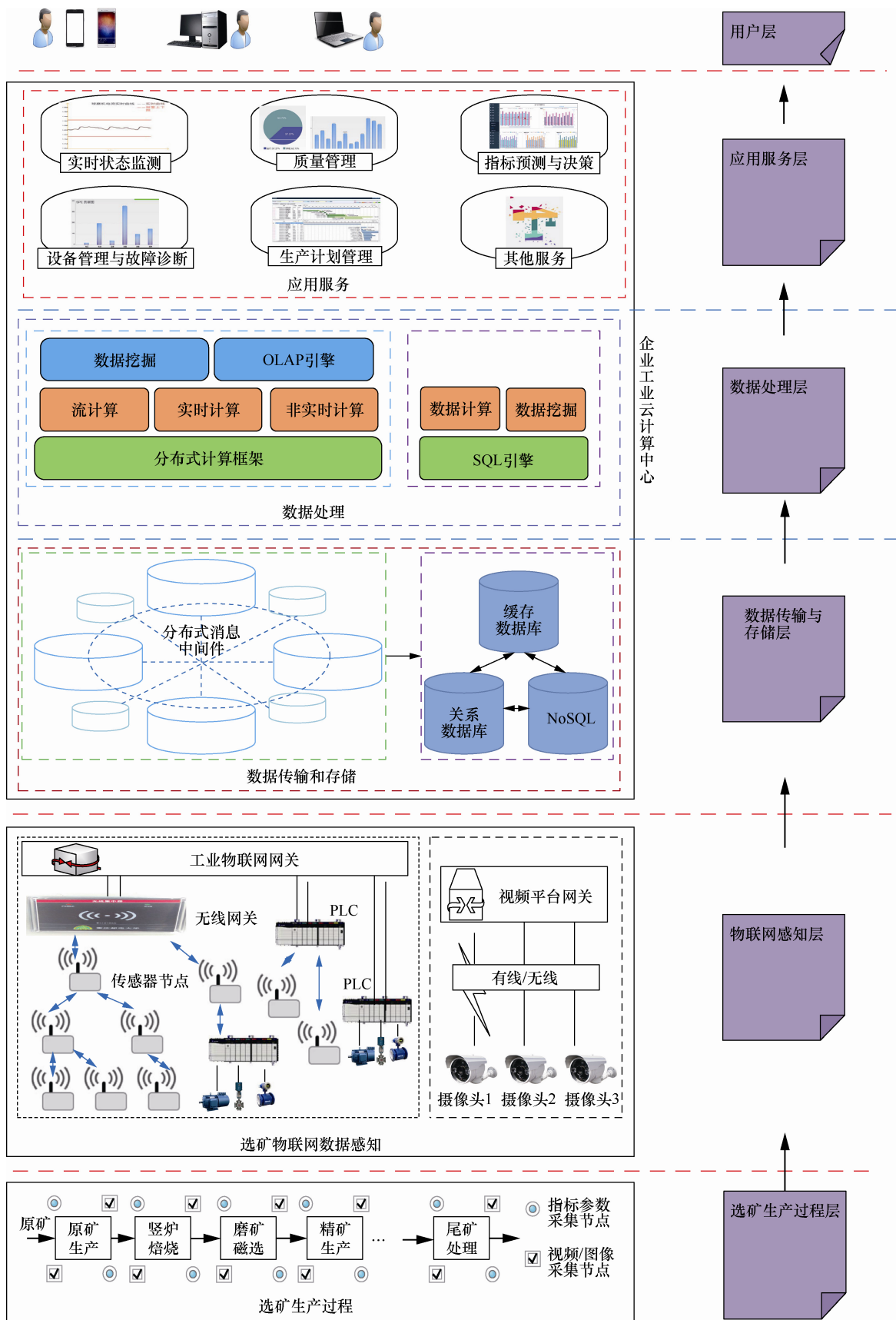


图2 选矿MES架构

云计算中心的分布式消息中间件集群，存储系统将分布式消息中间件集群的数据存储到数据库和分布式文件系统中；数据处理层包括工业大数据分析框架和关系数据库 SQL 计算引擎，负责对采集的实时数据（分布式消息中间件集群）和存储到数据库中的历史数据进行分析处理，并将分析结果发布成对应的基于微服务架构的应用服务；应用服务层主要将选矿 MES 通过在工业云上进行部署实现选矿 MES 功能的服务化，提供实时状态监测服务、质量管理服务、设备管理与故障诊断服务、生产计划管理服务、指标预测与决策服务、实时视频监控服务、能源管理服务、指标监控与优化服务以及其他应用服务等；用户层主要是终端用户通过台式电脑、笔记本电脑或移动终端实现对 MES 的访问和操作。

3.2 选矿 MES 全互连网络系统架构

传统 DCS 主控系统主要通过有线网络接入；由于布线问题，少数偏远的控制系统采用无线网关接入有线主干网络；无线仪表通过无线网关接入有线网络，移动终端通过无线 AP（access point）或 2G/3G/4G 接入网络。在此，无线传感器采用的是专门为过程自动化应用设计的无线网格型网络通信协议 WirelessHART，用于满足流程工业对于实时工厂应用中可靠、稳定和安全的无线通信的关键需求；有线传感器采用典型的用于过程控制的 OLE（OPC, OLE for process control）工业标准。针对选矿生产特点和实际需求，本文构造了由设备层、控制层和管理层组成的选矿全互连制造网络系统的硬件架构和功能架构，如图 3 和图 4 所示。

1) 选矿 MES 全互连网络系统硬件结构

由图 3 可知，选矿全互连制造网络系统包括设备层、控制层和管理层这 3 层网络架构。

设备层包括选矿工艺流程中的成套设备、常规仪表、电器设备、现场总线仪表等，公辅环节的无线控制系统，实现智能化计量的智能仪表嵌入式系统和无线计量系统以及控制系统图像安全监控系统 and 实现人员车辆定位的远程定位系统。设备层的传输协议根据选矿生产的实时性、可靠性、传输距离、移动性等差异性特点，采用异构传输协议。

控制层由 DCS 控制器、总线控制器、成套设备通信模块、无线路由设备、边界网关、交换机、各类工程师站和操作员站以及保障工厂信息安全的防火墙组成。设备层的各类异构无线数据通过全互连边界网关接入交换机，选矿主工艺流程数据通过

工业以太网接入交换机，实现全网系统的全互连。

管理层包括制 MES、工业云服务器、移动监控和设备巡检等。设备层和控制层的各类数据统一进入工业云服务器中，为选矿生产执行系统提供完整的 MES 基础数据。在此基础上，选矿 MES 提供生产计划、生产调度、质量管理、能源管理、设备管理、生产指标监视、优化决策等 MES 功能模块；此外，管理层借助公网实现了远程移动监控和巡检。

2) 选矿 MES 全互连网络系统功能结构

选矿 MES 全互连网络系统功能结构由物联网泛在网络层、物联网数据层、物联网中间件层、MES 业务服务层以及应用终端层这 5 层组成，如图 4 所示。

物联网泛在网络层负责采集 DCS 主控系统、现场总线系统、嵌入式智能系统、无线能源计量系统、无线图像采集系统、人员车辆定位系统等采集的生产过程数据和公辅系统数据，并上传至实时数据库。

物联网数据层将泛在网络层的实时数据库作为前端信息采集控制平台，并对各类企业数据进行分类整理，形成物联网中间件层的关系数据库，利用分布式消息中间件技术实现企业大规模分布数据的采集汇聚及分发协作，允许用户方便地创建面向对象模式中跨网络通信的客户端以及服务器应用程序，实现全局各个节点协作计算任务的统一管理调度和基于标准接口完整的全互连信息集成处理平台的构建。

MES 业务服务层具有生产计划调度、运行工况监控、质量管理与监控、指标监控、运行指标优化决策、能源管理与监控、设备管理与监控、控制系统安全监控、生产安全监控等功能。

应用终端层采用统一的信息发布平台，把企业需要的各种信息，包括工艺流程参数、设备信息、调度信息、质量信息、成本信息等通过不同的应用展示给有不同需要的用户。

3.3 选矿大数据采集与传输架构

为了解决选矿生产过程海量数据采集与实时分析处理的需求，构建了基于分布式消息中间件的数据采集与传输架构，如图 5 所示。选矿生产过程数据采集平台提供对 OPC 和 OPC-UA（OPC unified architecture）协议支持，选矿生产过程有线采集主要由 DCS/PLC 通过现场总线网络（Profibus、Modbus、ControlNet 以及 DeviceNet 等）实现对传

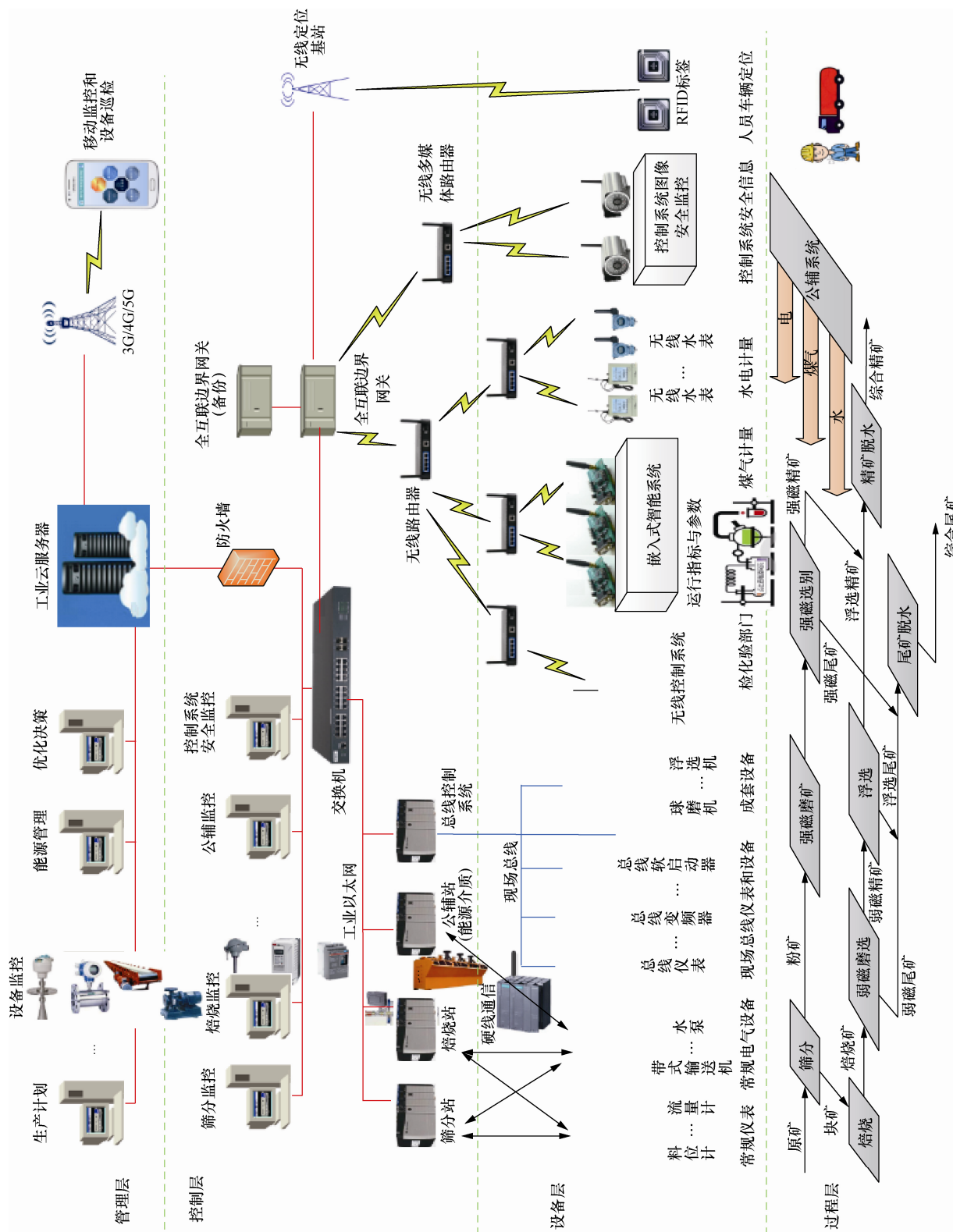


图 3 选矿全互联制造网络系统硬件架构

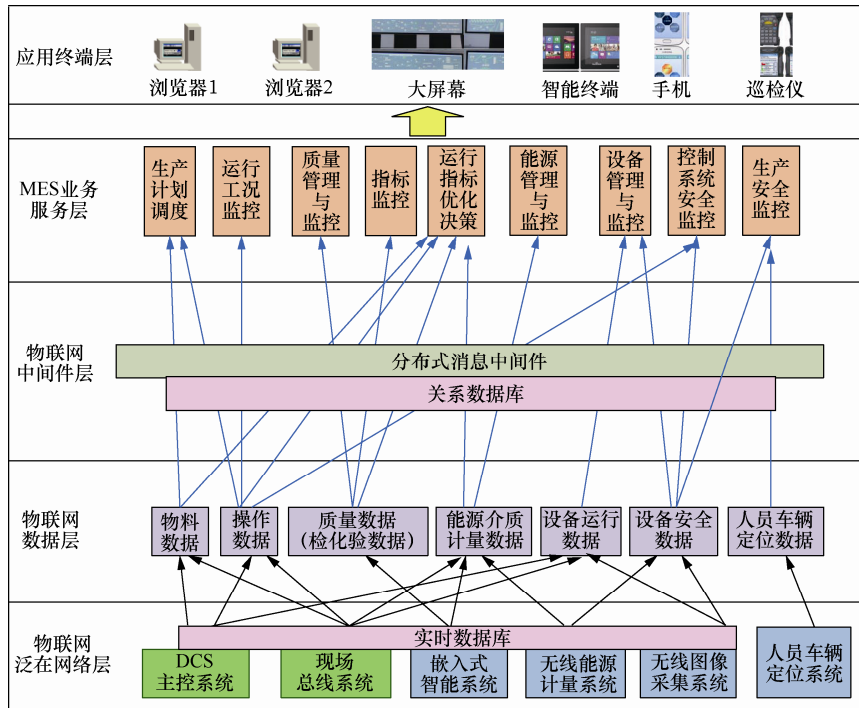


图 4 选矿全互联制造网络系统功能架构

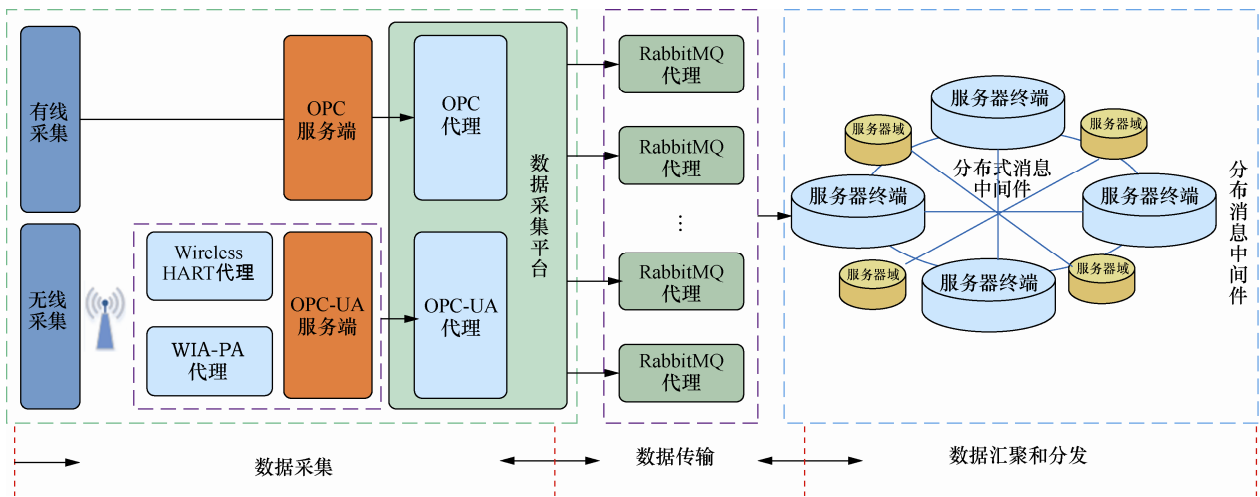


图 5 数据采集与传输架构

传感器数据采集，然后数据采集平台通过 OPC 协议实现对 DCS/PLC 数据的读取；无线数据采集由无线网关通过 WirelessHART、WIA-PA 等无线传输协议实现对无线传感器数据采集，然后数据采集平台通过 OPC-UA 协议实现对无线网关数据的读取。数据采集平台将采集的数据通过分布式消息中间件客户端将数据发送到企业工业云计算中心分布式消息中间件集群，分布式消息中间件集群负责对采集的数据进行汇聚和分发。

3.4 选矿大数据存储架构

随着物联网技术的应用，选矿生产过程面临海

量数据的采集和存储，传统的实时数据库+关系数据库的存储模式已经不利于工业大数据的存储和分析^[16]，因此，需要构建新的选矿海量数据存储架构，实现选矿数据的高效存储，以便满足对选矿数据分析和挖掘的需要。此外，实际应用中 MES 大部分数据采样相对控制系统采样频率而言是比较低的，所以设计选矿 MES 数据存储方案如图 6 所示，高频采样的实时结构化数据通过数据压缩直接存储到 NoSQL 数据库 HBase^[17]里，MES 应用所需的低频采样数据直接存储到关系数据库 Oracle 中，视频数据存储到分布式文件系统 HDFS 中，视频文

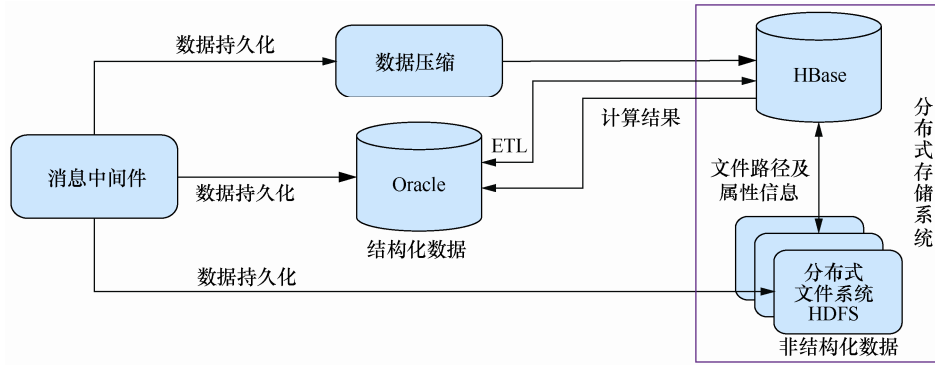


图 6 选矿 MES 数据存储方案

件路径和相关数据同时存储到 HBase 中，以便快速访问视频文件数据。对存储到 HBase 中的高频采样数据进行大数据分析处理，将相关结果返回到 Oracle 中，以方便 MES 调用，同时 HBase 也会利用 ETL 工具从 Oracle 中提取部分计算结果数据以便进行大数据分析。

4 基于物联网的选矿 MES 软件系统

4.1 基于物联网的选矿 MES 结构

针对传统选矿 MES 存在的信息断层和信息孤岛、实时监控能力弱等问题，采用物联网的感知识别技术、组网与泛在接入技术、大规模感知信息处理技术，构建选矿生产全过程的大数据平台，促进人机智能交互、智能物流跟踪、智能监控和智能优化等技术在生产过程中的应用，建立基于物联网的

选矿智能 MES 软件系统，如图 7 所示。

该系统包括生产计划管理、生产调度管理、操作管理、质量管理、库存管理、物料管理、成本管理、能源管理、设备管理、统计管理和检化验管理等 MES 子系统。公共平台包括数据采集系统和工业云计算数据中心平台。在此基础上，新增了综合生产指标和工艺参数实时监测与优化决策和生产指标预测系统、人员车辆定位系统、设备巡检系统、设备安全监控系统和基于协作中间件的全互联分布式消息通信系统。

4.2 基于物联网的选矿 MES 新功能

1) 生产指标监控及优化

① 基于物联网的生产指标可视化监控

通过物联网技术对分布在选矿过程不同工序的检/化验数据进行采集，对选矿生产中产品质量、

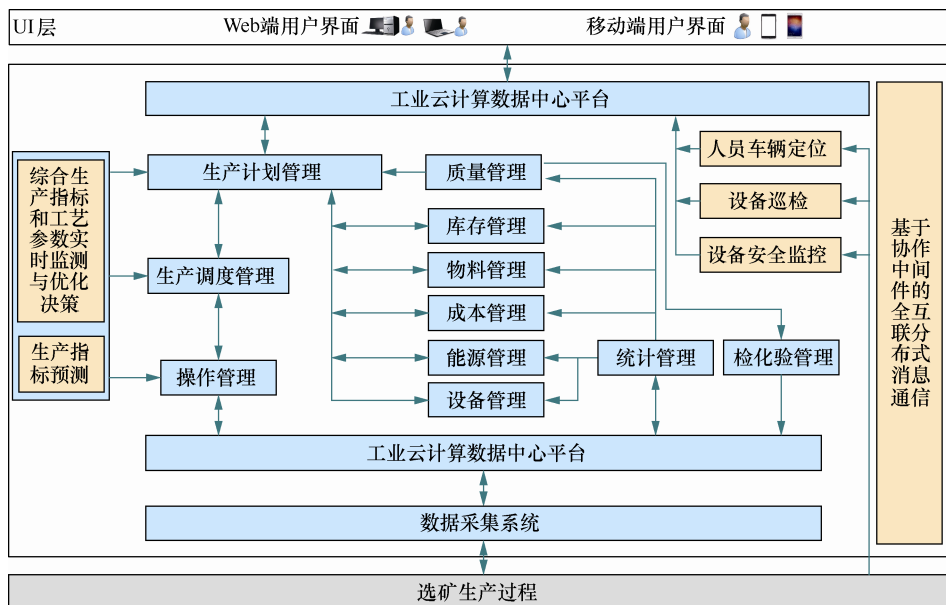


图 7 基于物联网的选矿 MES 软件系统结构

产量、能耗、物耗、成本等各项综合生产指标和各个工序的工艺指标进行可视化监控与分析。基于物联网的生产指标可视化监控不仅可以对单一指标进行监控，也可以对关键生产指标和与之有主要影响关系的生产指标进行关联监控，利用生产过程数据和生产指标数据构建多层次生产状态异常监测与诊断模型，实现对生产过程多层次监控，更有利于生产管理人员对全矿生产指标进行有效监控。

② 选矿全流程生产指标一体化优化决策

选矿生产过程中，为了完成既定目标，需要企业从上到下各个环节都准确地完成自己的生产任务。经营决策部门根据目标利润和市场环境等因素确定企业的综合生产指标目标范围，包括精矿品位、产量和金属回收率等；生产计划部门将企业的综合生产指标从时间尺度（年、月、日）上分解为日综合生产指标，包括日精矿品位、日产量、日金属回收率等；工艺技术部门在空间（工序）尺度上将日综合生产指标转化为各个工序的运行指标，包括磁选管回收率、磨矿粒度、强（弱）精品位、强

（弱）尾品位等；作业班工程师将运行控制指标转化为过程控制系统的回路设定值。当市场需求和生产工况发生变化时，上述部门根据生产实际数据，自动调整相应指标。当市场需求和生产工况发生频繁变化时，以人工操作为主体的上述部门不能及时准确地调整相应的指标，导致产品质量下降、生产效率降低和能耗增加，从而无法实现企业综合生产指标的优化控制。为使优化决策算法能够应用于企业生产过程中，设计开发选矿全流程生产指标一体化优化决策系统^[18]，如图8所示。

该系统对不同时间尺度的综合生产指标、全流程生产指标和运行指标优化按月、日和小时等不同的周期分层优化，采用以月为采样周期来优化月综合生产指标目标值，以日为采样周期来优化日全流程生产指标目标值，以小时为采样周期来决策运行指标目标值，以综合生产指标优化为目标实现选矿全流程生产指标一体化优化决策。总体结构由综合生产指标目标值优化、全流程生产指标目标值优化、运行指标目标值优化、全流程生产指标目标值优化、运行指标目标值多目标优化和过程自动化系统组成。

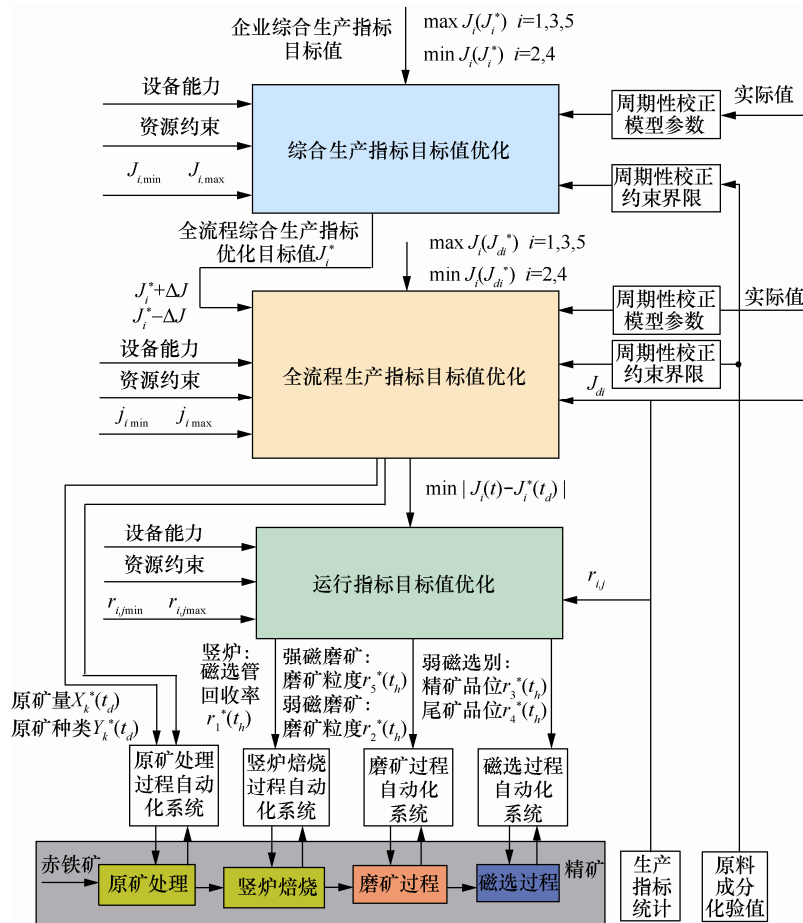


图8 选矿全流程生产指标一体化优化决策系统

综合生产指标目标优化决策月综合生产指标目标值,以尽可能提高精矿品位、金属回收率和产量(即 $\max J_i(J_i^*) (i=1,3,5)$)和尽可能降低选矿比和成本,即 $\min J_i(J_i^*) (i=2,4)$)为优化目标,决策出第 k 种原矿量目标值 $X_k^*(t_m)$,并计算综合生产指标目标值 J_i^* [19]。

将优化目标值作为全流程生产指标目标值优化的约束,即 $J_i^* \pm \Delta J$ 作为全流程生产指标目标值优化的约束,决策出日原矿种类 $Y_k^*(t_d)$ 和第 k 种原矿量目标值 $X_k^*(t_d)$ 作为原矿处理自动化系统的目标值,并计算日全流程生产指标目标值 $J_i^*(t_d)$ [20]。

运行指标目标值优化以日精矿品位和精矿产量的实际值与目标优化值 $J_1^*(t_d)$ 和 $J_5^*(t_d)$ 偏差最小化决策出竖炉、磨矿和磁选过程自动化系统的运行指标目标值 $r_i^*(t_h) (i=1,2,\dots,5)$ [21-23]。

通过上述自动化系统跟踪运行指标优化目标值,使综合生产指标实际值 $J_i (i=1,2,3,4,5)$ 跟踪目标值 $J_i^* (i=1,2,3,4,5)$,从而实现全流程生产指标一体化优化决策。

2) 设备安全视频监控与管理

通过将生产过程监控与视频监控相结合实现过程变量和视频信息的融合,利用工业云计算平台对摄像机拍摄的图像序列进行自动分析,包括目标检测、目标分割提取、目标识别、目标跟踪以及对监控场景中目标行为的理解与描述,实时分析提取监控视频中关键并且有用的信息以自动判断监控区域中出现的异常情况,与生产过程实时参数进行对比分析,迅速捕获和定位生产异常。同时结合移动互联网和流媒体技术,在移动终端上实现对选矿生产过程实时视频监控以及对生产过程移动视频监控。此外,通过智能移动终端采集选矿设备信息,实现及时准确的设备巡检。

3) 人员车辆定位与跟踪

实时精确地定位现场巡检工、现场维修工、现场岗位工、化验人员以及运输车辆。将人、车、物的位置信息显示在工厂控制中心,进行安全区域管控、人员在岗监控、车辆实时轨迹监控。通过划定安全区电子围栏、警报区和禁区电子围栏,一旦人员和车辆进入就触发相应级别的报警。

4) 能源管理

针对选矿能源介质数据采集地域分散、检测仪

表数量稀少但必须检测的特点,采用物联网技术将能源数据采集到工业云数据中心,为能源有效管理提供了基础。

选矿生产过程能源管理模块以能源消耗计划的编制、能源计划的下达与执行、能源消耗数据的采集、能源消耗情况的统计、各种报表的形成、能源消耗差异的分析和计划调整意见为核心功能。

在传统选矿生产过程中,生产部负责动力能源介质消耗计划的编制,建立生产部的能源消耗定额。能源消耗计划的编制主要是根据能源消耗部门前一段时间内的历史签证数据进行简单的数据统计,如求平均值、最大值及最小值的方法,而在大多数情况下仅仅是根据经验制订而成。由于能源指标的消耗受到多种因素的影响,具有很强的不确定性。因此,传统的能源消耗计划编制方法相比较下缺乏科学性与准确性,在实际生产过程中控制指导意义不大。本文系统的能源消耗计划编制模块采用基于预测的能源计划编制方法,是以集团本部的能源供给情况、选矿厂设备运行情况及股份公司制订的能源消耗粗计划为依据,以选矿厂制定的生产指标目标范围以及综合铁精矿品位要求为约束,采用智能能源预测模型来编制能源消耗计划。

5) 移动与远程监控

为了方便用户随时随地对选矿生产过程的监控,借助移动计算技术,实现选矿生产制造执行系统的移动化。通过采用广泛应用的智能终端加云控制方式,使管理层与操作人员可以随时随地通过手机、平板等智能终端访问并监控选矿生产状况,查看企业运行分析报告,并根据需求随时下达生产指导意见。系统可以通过移动网络即时将选矿生产状态报警信息推送到相关管理和操作人员移动通信终端中,以便及时对报警消息进行处理。可以根据现场报警消息的类别、等级等信息进行推送报警,使管理者和操作人能够及时得到报警消息而不需要时时刻刻关注着监控系统,极大地提升了生产过程监控的便捷性。

4.3 选矿 MES 软件系统开发

采用微服务架构和 B/S 模式来开发选矿 MES 软件系统。系统采用微服务架构以实现应用之间解耦,方便对服务进行维护和升级,此外,方便移动应用的开发和第三程序集成。选矿 MES 软件(底层开发)架构如图 9 所示。

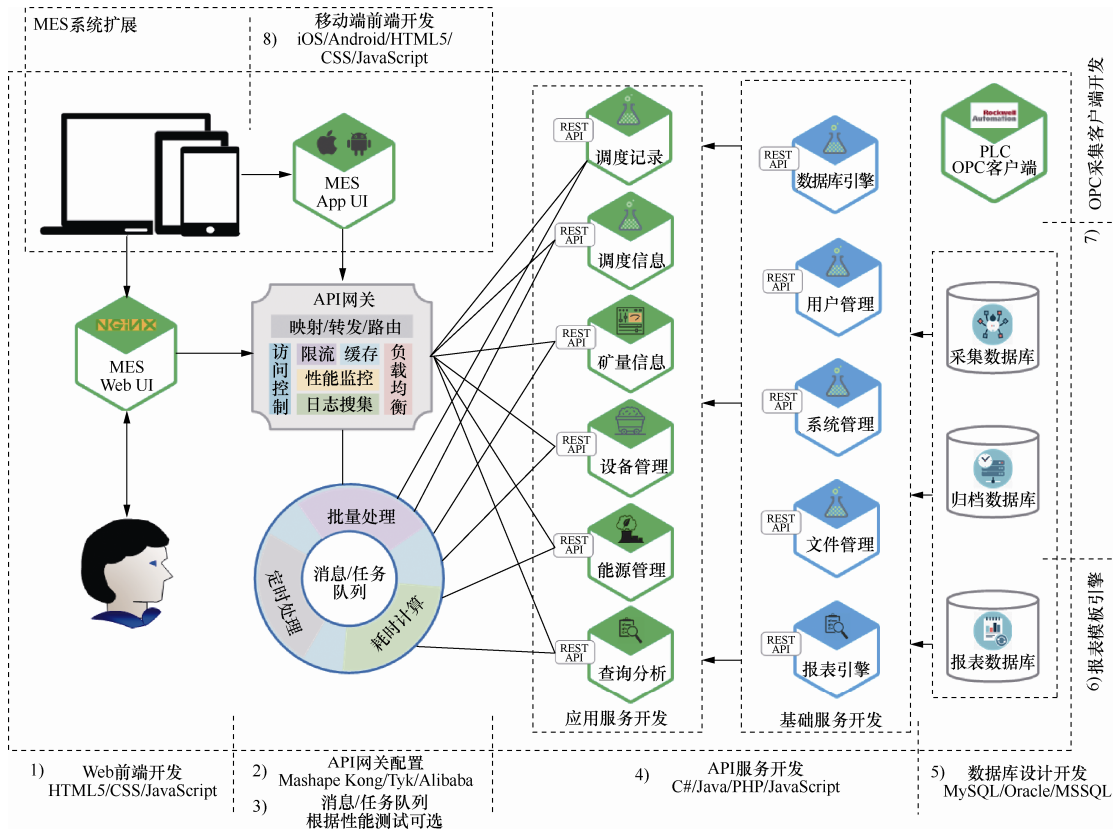


图 9 选矿 MES 软件（底层开发）架构

软件开发过程包括 Web 前端开发、API 网关配置、消息/任务队列、API 服务开发、数据库设计开发、报表模板引擎、OPC 采集客户端开发、移动端前端开发等。Web 前端开发实现 B/S 人机交互界面；API 网关配置实现对服务 API 的管理与监控，提高业务灵活性和安全性；消息/任务队列用来管理和处理整个系统消息交互，实现消息的发布/订阅、异步处理等；API 服务开发实现系统的业务逻辑，包括基础服务组件和应用服务组件，基础应用组件主要是实现系统的基础功能，应用组件是系统具体的业务逻辑；数据库设计开发实现整个系统数据存储；报表模板引擎实现对系统报表的加载、计算和管理；OPC 采集客户端开发实现采集选矿生产数据，然后统一保存到数据库中，以供上层应用访问；移动端前端开发实现对选矿过程管理移动监控功能。所开发的部分系统界面如图 10~图 13 所示。

5 工业实验研究

某钢铁集团选烧厂拥有 3 条平行的选矿生产线（一选、二选和三选），其中，三选厂为新

建生产线，一选厂和二选厂为老生产线，老生产线的选矿生产工艺均为“块矿竖炉焙烧—弱磁—反浮选”加“粉矿强磁选别”。新建三选厂将原一选厂和二选厂的粉矿合并，改造为“粉矿—高压辊磨—预先筛分—分级磨矿—悬浮焙烧—再磨—磁选—反浮选”生产工艺。3 个选矿生产线网络架构如图 14 所示。

本次 MES 实施覆盖全部 3 条生产线（替换一选和二选已有的 MES），首先，各选厂通过分布式数据采集服务器实现对各自选厂的数据采集，然后，数据中心通过数据采集调度服务器对各选厂分布式数据采集服务器进行管理调度，实现对一选厂、二选厂和三选厂采集的数据进行同步，实现数据的统一存储与管理。此外，为了利用一选厂和二选厂历史数据，系统提供了对一选厂和二选厂数据集成。最后，利用所采集的数据面向整个选矿厂提供统一的 MES，各选厂通过浏览器实现对 MES 的访问，如图 15 所示。MES 实现对集团 SAP 和其他第三方系统的数据集成，同时提供 RESTful 风格的 API，方便其他系统调用 MES 系统数据。



图 10 生产指标监控界面



图 11 生产指标可视化监控界面

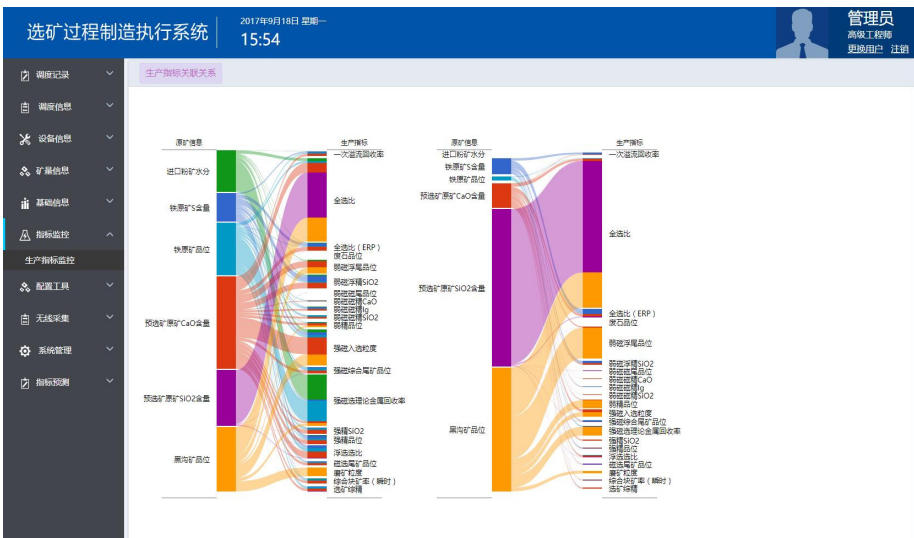


图 12 生产指标关联关系可视化监控界面



图 13 移动监控界面

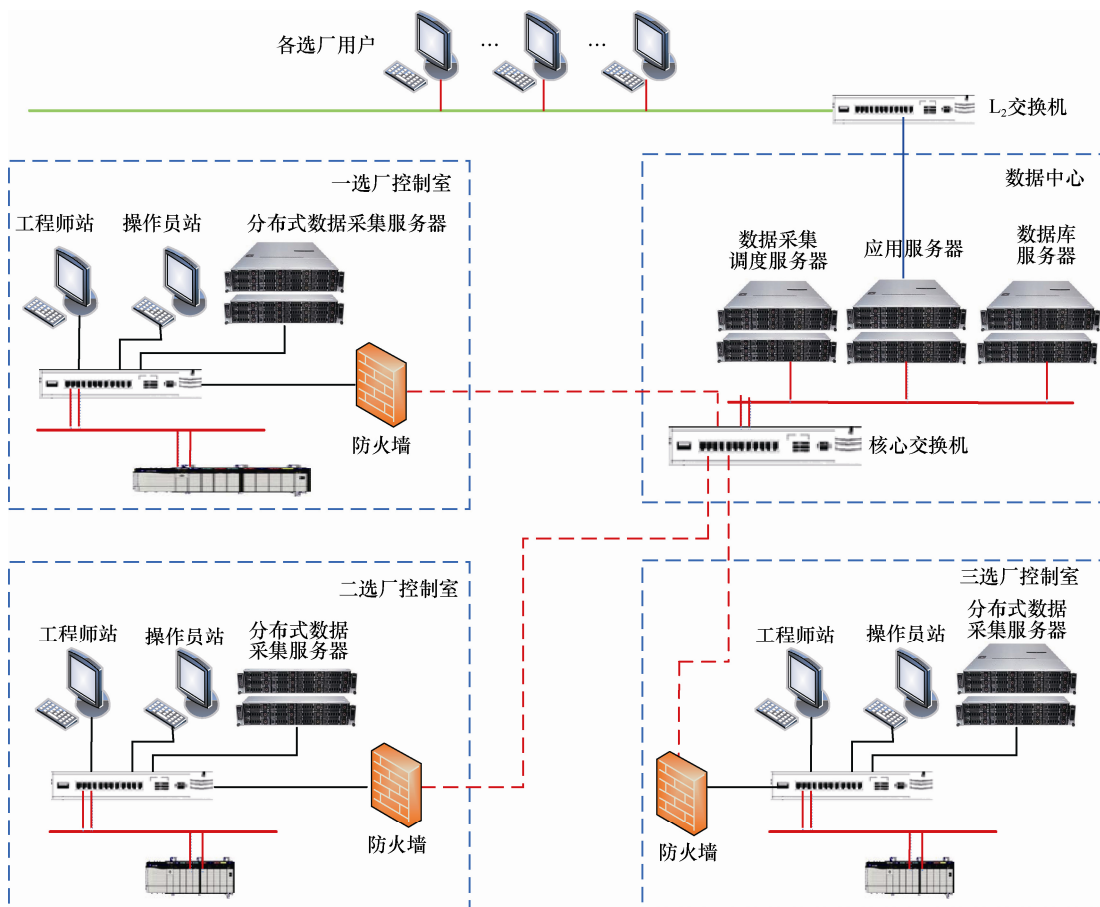


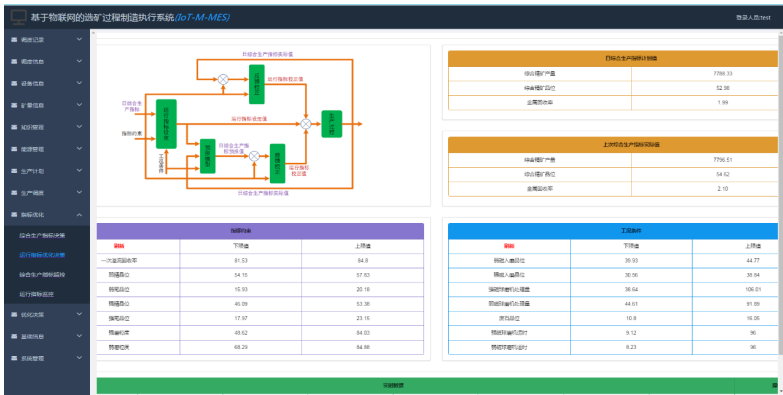
图 14 选烧厂网络架构



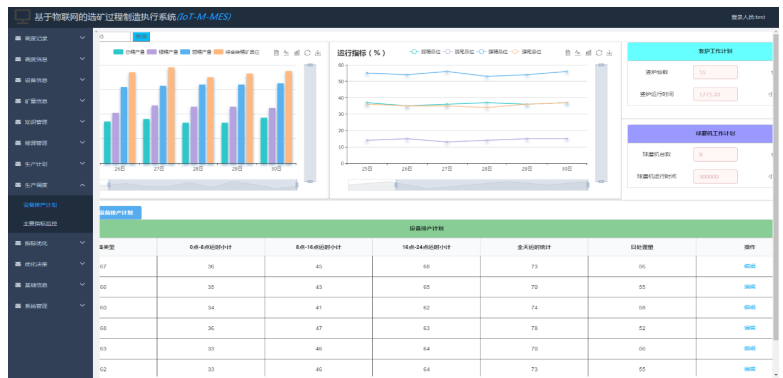
(a) 能源消耗计划



(b) 主要指标监控



(c) 生产指标优化



(d) 生产调度管理

图 15 选矿 MES 功能实现

将多项物联网无线设备应用于选烧厂, 包括无线煤气报警仪和无线粉尘报警仪应用于竖炉炉顶, 实现对煤气泄漏和粉尘的有效监测。安装在炉顶布料小车上的无线料位计和无线编码器有效解决了常规滑缆信号传输不可靠的问题, 实现了 MES 对竖炉炉顶矿仓料位信息和布料小车位置信息的全方位监控以及竖炉配料过程的布料小车辅助调度功能。针对选矿生产中能源介质检测计量地点分散的问题, 以无线仪表和无线网关的形式将能源数据采集并上传至 MES。竖炉的排风机和引风机以常规硬线方式接入主控 DCS, 将重点电机的电量信息以无线方式上传至 MES, 有效提升了能源管理水平。

随着基于物联网和工业云的智能 MES 在该钢铁集团运行, 利用物联网、云计算和大数据等技术实现了对选矿厂海量生产数据的实时采集与计算分析, 通过对 3 个生产线合理的生产管理与调度, 提高了资源利用率和生产效率。对生产指标数据进行实时监控和预测, 为操作人员提供了全方位的生产状态信息, 对生产过程中出现的异常情况, 快速帮助操作人员进行定位, 动态调整生产参数, 提供对生产作业管理与控制的决策支持, 提高了生产作业管理与控制水平。系统自动处理和分析海量的选矿生产过程数据和视频数据, 使生产管理人员能更直观地了解整个选矿厂的生产过程, 对生产活动的调节更能全面考虑整个选矿厂的综合效益, 这对生产过程的优化和决策起着非常显著的作用, 有力地推动了企业向高效化和绿色化方向发展。

6 结束语

选矿行业正在向高效化和绿色化方向发展, 对生产过程中海量信息的采集以及实时分析、动态监控、优化和预测、协同智能决策提出了更高的要求。物联网、云计算、大数据等新的信息技术为这一制造需求提供了技术保障和实现途径。本文利用物联网、云计算、大数据等新的信息技术, 构建了基于物联网和工业云的智能 MES, 对其系统架构、全互联制造网络架构、海量数据采集、传输与存储、生产指标实时监控与优化、生产管理与调度等核心技术进行了较为深入的探讨和实现。通过在某钢铁集团选烧厂的实施, 验证了该系统的重要价值, 提高企业生产效率和智能化水平, 为企业向智能化生产奠定重要基础。

参考文献:

- [1] MESA.Execution-driven manufacturing management for competitive advantage[M]. Pittsburgh: MESA International-White Paper Number5,1997.
- [2] 黄肖玲, 初延刚, 李慧莹, 等. 选矿制造执行系统的研究与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2004(9):1079-1083.
HUANG X L, CHU Y G, LI H Y, et al. Study and application of ore concentration manufacturing execution system[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2004(9): 1079-1083.
- [3] 柴天佑, 郑秉霖, 胡毅, 等. 制造执行系统的研究现状和发展趋势[J]. 控制工程, 2005, 12 (6): 505-510.
CHAI T Y, ZHENG B L, HU Y, et al. Current research situation and development of manufacturing execution system[J]. Control Engineering of China, 2005, 12(6): 505-510.
- [4] 张映锋, 赵曦滨, 孙树栋, 等. 一种基于物联技术的制造执行系统实现方法与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(12): 2634-2642.
ZHANG Y F, ZHAO X B, SUN S D, et al. Implementing method and key technologies for IoT-based manufacturing execution system[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2012, 18(12): 2634-2642.
- [5] CHUI M, LÖFFLER M, ROGER R. The Internet of things[J]. McKinsey Quarterly, 2010(2):1-9.
- [6] 沈苏彬, 范曲立, 宗平, 等. 物联网的体系结构与相关技术研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2009(6):1-11.
SHEN S B, FAN Q L, ZONG P, et al. Study on the architecture and associated technologies for Internet of things[J]. Journal of Nanjing of Posts and Telecommunications(Natural Science), 2009(6):1-11.
- [7] BUGHIN J,CHUI M,MANYIKA J. Clouds, big data, and smart assets: ten tech-enabled business trends to watch[J]. Mckinsey Quarterly, 2010, 56(1): 75-86.
- [8] 罗军舟, 金嘉晖, 宋爱波, 等. 云计算:体系架构与关键技术[J]. 通信学报, 2011(7): 3-21.
LUO J Z, JIN J H, SONG A B, et al. Cloud computing: architecture and key technologies[J]. Journal on Communications, 2011(7): 3-21.
- [9] DEAN J, GHEMAWAT S. MapReduce: simplified data processing on large clusters[J]. ACM, 2008, 51(1): 107-113.
- [10] 张引, 陈敏, 廖小飞. 大数据应用的现状与展望[J]. 计算机研究与发展, 2013(S2):216-233.
ZHANG Y, CHEN M, LIAO X F. Big data application: a survey[J]. Journal of Computer Research and Development, 2013(S2):216-233.
- [11] 中国科学院先进制造领域战略研究组. 中国至 2050 年先进制造科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Group of the strategic research on the advanced manufacturing field. Development route of the advanced manufacturing field in China from now to 2050 [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [12] 韩江, 朱念恩, 夏链. 基于移动互联网的人机协同制造研究[J]. 轻工机械 2011, 29(6): 50-52.
HAN J, ZHU N E, XIA L. Research on man-machine coordinated manufacturing mode based on mobile substance Internet[J]. Light Industry Machinery, 2011, 29(6): 50-52.
- [13] 王云. 面向云制造的制造执行系统优化技术及其在机床生产企业中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
WANG Y. Optimization technologies of manufacturing execution system in cloudy manufacturing and applications in machine production

enterprise[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

- [14] HELO P, SUORSA M, HAO Y, et al. Toward a cloud-based manufacturing execution system for distributed manufacturing[J]. *Computers in Industry*, 2014,65(4):646-656.
- [15] 李孝斌, 尹超. 面向生产过程云服务的制造执行系统[J]. *计算机集成制造系统*, 2016(1): 177-188.
- LI X B, YIN C. Manufacturing execution system oriented to production process cloud service[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2016(1):177-188.
- [16] JIANG L, CAI H, JIANG Z, et al. An IoT-oriented data storage framework in cloud computing platform[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(2): 1443-1451.
- [17] GEORGE L. HBase: the definitive guide[J]. *Andre*,2011,12(1):1-4.
- [18] CHAI T Y, DING J L, YU G, et al. Integrated optimization for the automation systems of mineral processing[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(4): 965-982.
- [19] YU G, CHAI T Y, LUO X C. Multiobjective production planning optimization using hybrid evolutionary algorithms for mineral processing[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2011, 15(4): 487-514.
- [20] YU G, CHAI T Y, LUO X C. Two-level production plan decomposition based on a hybrid MOEA for mineral processing[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(4): 1050-1071.
- [21] DING J L, MODARES H, CHAI T Y, et al. Data-based multi-objective plant-wide performance optimization of Industrial processes under dynamic environments[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016,12(2):454-465.
- [22] DING J L, CHAI T Y, WANG H. Knowledge-based global operation of mineral processing under uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(4): 849-859.
- [23] DING J L, CHAI T Y, WANG H. Offline modeling for product quality prediction of mineral processing using modeling error PDF shaping and entropy minimization[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2011, 22(3): 408-419.

[作者简介]



柴天佑 (1947-), 男, 中国工程院院士, 东北大学教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂工业过程智能解耦控制、智能运行反馈控制和综合自动化系统。



丁进良 (1976-), 男, 东北大学教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂工业过程的智能建模与运行优化控制、制造执行系统 MES。



徐泉 (1982-), 男, 东北大学讲师, 主要研究方向为制造执行系统、工业云及工业大数据分析、工业过程可视化监控。



岳恒 (1968-), 男, 东北大学教授, 主要研究方向为选矿自动化技术及系统、工业物联网、多变量解耦控制及自动化教学。