



基于数字孪生技术的选煤厂智能管控系统

王忠强 杨小勇

陕西小保当矿业有限公司选煤厂年入洗量2 800万t,选煤厂的经营决策、资源配置计划、生产调度与控制仍严重依赖工作经验,缺少对核心设备运行情况的在线监测,信息孤岛大量存在,洗选过程无法实现自动调节,视频监控无法实现生产区域全覆盖。

基于数字孪生技术的选煤厂智能管控系统采用三维激光扫描仪外业扫描技术,对选煤厂内部的建筑物、道路、设备进行1:1的建模,运用多元化的数据采集方式,以三维立体的形式展示选煤厂内的场景结构、设备布局;同时将智慧重介系统、智慧浓缩压滤系统、设备在线监测系统、人员定位与智能照明系统融合到智能管控系统中;并设置完善的视频感知、安全监测,对入选原煤杂物、人员不安全行为、人员越界、设备运行危险状态等进行监测,实现智能预测、预警。当设备出现报警时,选煤厂智能管控系统可自动弹出与之对应的监控画面,并精确定位到设备触发报警的位置,将该位置变色显示,提醒管理人员及时处理。实现了生产全流程的少人、无人值守。此外,在降低岗位工人操作强度、操作频率的同时,保证系统稳定运行,提高了产品质量、产率;同时,提升了设备的有效运行时间,实现了选煤厂生产管理从自动化向智能化的转变。

数字化选煤厂

数字镜像虚拟选煤厂搭建

数字孪生以物联网、大数据、人工智能为技术核心,采集现实选煤厂的数据;基于数据积累、数据分析、数据挖掘的应用,建立选煤工艺及设备的数学模型,预测其健康状态;随着采集数据的增

加,改进相应的数学模型,以保证采集数据的准确性,优化、反馈调节选煤厂工艺参数。

(1)采用三维激光扫描仪外业扫描技术搭建虚拟选煤厂

将数字孪生技术应用于选煤厂智能化的建设领域,基于激光点云建模技术为选煤厂打造数字孪生平台,创新性地将BIM、仿真、管理、控制、维护等领域进行有效融合,以选煤厂各项实际运行参数为基础,构建一套先行性的仿真选煤厂运行模型;在扫描过程中,合理设置FARO三维激光扫描仪的数据分辨率和质量以保证数据的可靠性。数据拼接按层进行,首先将每层的数据进行独立拼接,保证每层数据符合精度,之后将多层数据进行整体融合。

1)点云数据转换输出。点云数据提交格式为欧特克公司标准格式RCS,webshare网络发布数据为打包压缩后的直接可执行文件,通过网页浏览器访问和查看。

2)逆向建模。根据扫描的点云数据,利用点云逆向建模软件,建立现场结构及设备的三维粗模。为控制模型面片的数据,在建模过程中,可选择使用专业工业逆向软件来建模,之后将数据格式转为MAX格式。

(2)数字镜像虚拟选煤厂与现实选煤厂数据互联

采用多元化的数据采集技术,包括控制系统数据采集、智能仪表数据采集、集控系统数据采集以及电气系统数据采集。

1)控制系统数据采集。自动化控制系统PLC具有标准的数据通信协议,其数据采集方式是使用1台计算机作为数据采集网关机,通过数据采集网关机实现实时数据库服务器和控制系统的连接。

2)智能仪表数据采集。未接入控制系统,但

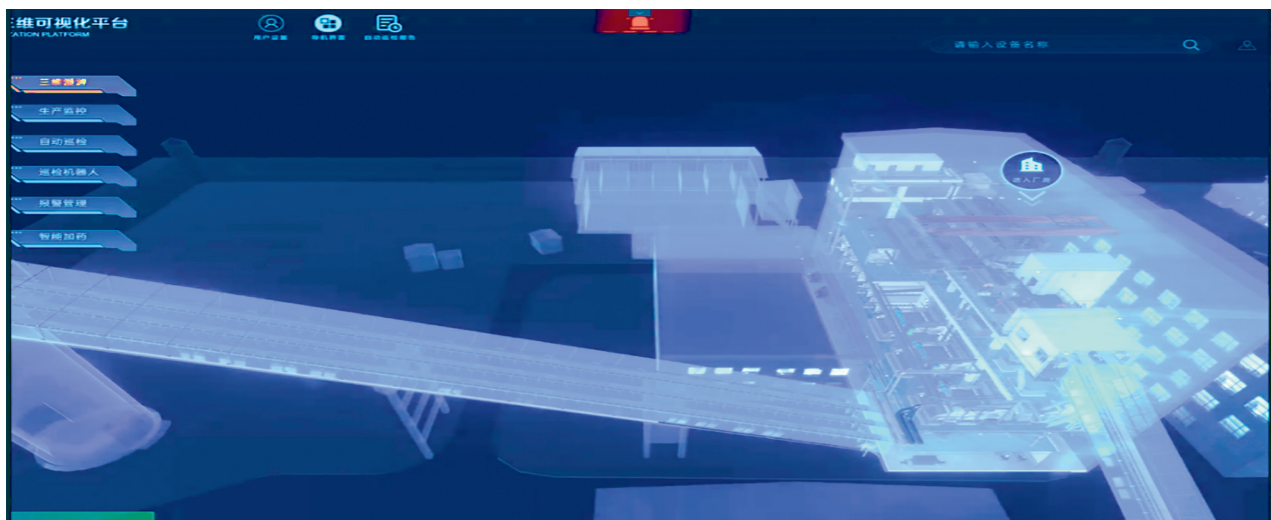


图1 数字孪生虚拟选煤厂

需要采集数据，根据所具备的通信接口类型采用不同的采集方式。

3) 集控系统数据采集。PLC数据采集分为2种情况：①有上位机，可以通过上位机的SCADA系统进行数据采集，数据采集方式与控制系统相同；②没有上位机，这样就需要从PLC通信端口直接进行数据采集，数据采集方式与智能仪表数据采集方式类似。

4) 电气系统数据采集。电气保护系统具有标准的数据通信协议，其数据采集方式是使用1台计算机作为数据采集网关，通过数据采集网关实现实时数据库服务器和电气系统的连接。

根据控制系统、智能仪表、集控系统、电气系统的系统特点，研究确定针对不同系统的数据采集方式，进行差异化的数据采集，可以解决选煤厂信息化通信方面存在的信息孤岛、数据不通的问题。实现了不同应用系统之间的数据共享和应用集成；同时，提供DDE、ODBC、Web、OPC等标准接口，实现了生产数据与其他应用程序、Internet的连接，为应用开发提供了统一的系统资源和共享资源。数字孪生虚拟选煤厂如图1所示。

智能交互

建立分布式的数据仓库，在数据仓库中按照选煤厂的业务流程搭建准备系统、洗选系统、运销

系统全厂业务模型及数字模型，匹配3D场景，可实现操作人员能够以第一视角的方式在数字化选煤厂内漫游。

动态实时监测

动态监测设备信息并实时在数字孪生管控平台上显示，实现定位并重点展示监测设备的具体位置，并将该监测设备的单点详细信息展示出来；同时，显示智能云端处理平台所推送的设备实时运行数据、评估的设备运行状态。

智能预警

智能管控系统监测到预警信号，及时推送预警数据给智能控制客户端，并在数字孪生管控平台中以三维可视化方式展现设备的典型故障，将故障点、产生原因和处理方法结合选煤厂及设备三维模型的位置进行表现，同时根据故障提供报警功能，并将报警数据推送至智能控制客户端。

基于循环神经网络模型的重介全流程洗选智能控制技术

循环神经网络（LSTM）作为循环神经

络 (RNN) 的升级改进, 模型结构更为复杂, 除了拥有原始 RNN 的隐藏层中一个对短期数据较为敏感的状态 h 外, LSTM增加了结构 c (细胞“cell”) 用来保存长期状态, 通过3个门控单元来自控制长期数据, 第1个为遗忘门 (forget gate, f_t), 决定了遗忘上一时刻 C_{t-1} 中不重要的信息量, 从而保存到当前时刻 C_t ; 第2个为输入门 (input gate, i_t), 负责当前时刻网络的输入 X_t 和 h_{t-1} 并保存到 C_t ; 第3个为输出门 (output gate, O_t) 控制单元状态 C 输出到当前 LSTM隐藏层值 h_t 的量。

根据LSTM 模型的趋势、关联、随机、周期、整体五大特性, 对选煤厂密度灰分的时间序列数据进行深入研究, 直接挖掘出数据中存在的潜在变化规律, 与传统使用数值模式预测洗选密度的方法相比更加简易, 无需考虑工艺流程各种相互制约、各种影响因素的耦合等。

重介全流程洗选智能控制系统采用 Python 语言利用 TensorFlow 框架构建了重介洗选过程密度预测的LSTM 模型, LSTM预测模型实施流程如图2所示。

建立的 LSTM 的预测模型, 需要调节的参数

有输入层节点数、输出层节点数、隐含层节点数、隐含层层数、学习率、时间步数等。输入层为原煤灰分、精煤灰分构成的二维时间序列, 输出层为预测悬浮液密度的一维数据。同时由于预测的悬浮液密度数据本身较小, 则着重调节的参数为隐含层节点数、隐含层层数以及时间步数。

为选择最佳隐含层和节点数量, 利用LSTM建立以原煤灰分、精煤灰分、磁性物含量、合介桶液位、分流阀开度作为预测输入变量, 洗选密度作为输出的算法模型, 通过不断的机器训练与学习, 实现对重介洗选密度的高精度控制; 同时与传统BP神经网络预测方法作对比分析, 不断优化算法模型, 最终获得预测的洗选密度; 实现重介洗选过程的全流程自适应自动调节, 在减少岗位工人的同时, 提高洗选精度。智慧重介控制系统如图3所示。

煤泥浓缩压滤智能控制技术

煤泥水浓度的在线监测技术研发与应用是选煤厂智能化的前提之一, 煤泥水浓度实时数据监控与采集技术有突破性发展。将浓缩机接入集控系统

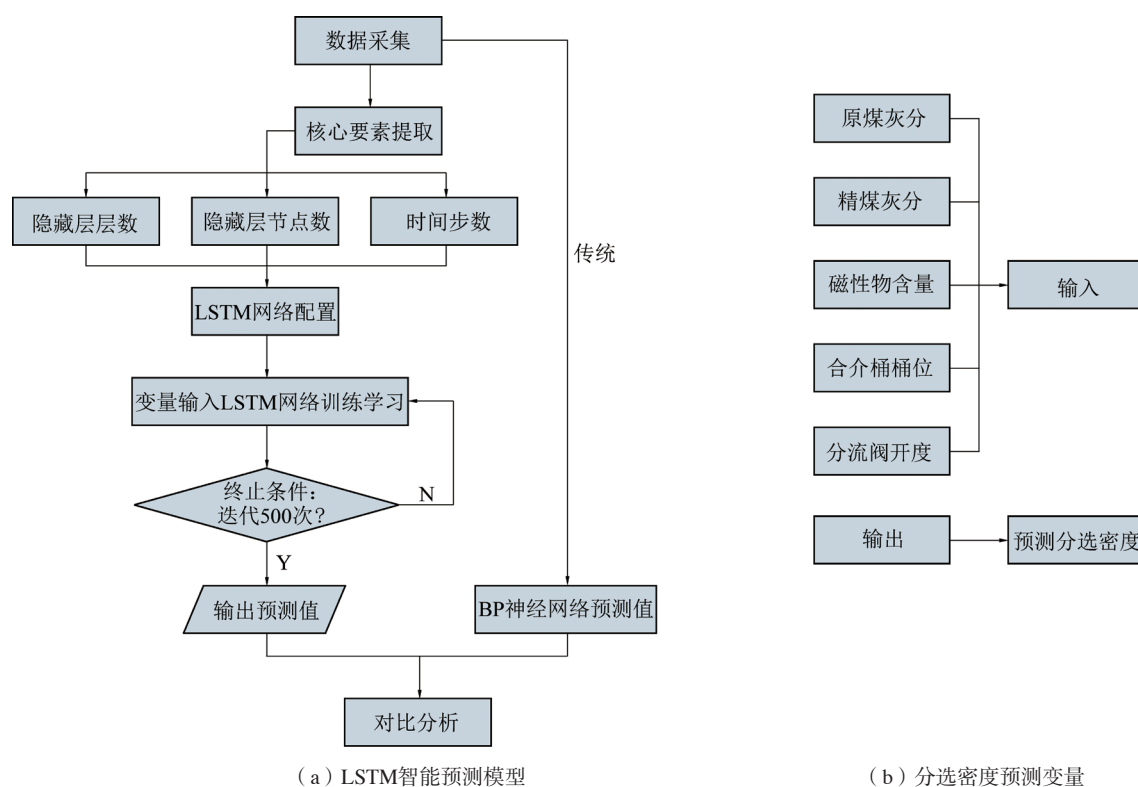


图2 LSTM预测模型实施流程

统，实现耙位监测和根据力矩限值自动提耙。采用电磁流量计、浓度计计算入料干煤泥量，用于前馈控制，计算初始药剂添加量。采用精准计量泵实现加药量远控调节，减少人工调节误差。

采用E+H界面仪实现对煤泥水沉降情况的实时监测，进行清液层高度关键指标测量，针对此多项煤泥水状态关键指标的实时测量与采集，获得直接数据，引入算法服务器进行数学建模与大数据分析，将历史数据作为模型的输入进行训练。根据目标设定的分层情况和实时分层状态之间的偏差及其变化量，结合干煤泥量来模糊调整加药泵的加药量。对于煤泥水浓缩系统内的数据进行深度挖掘与综合应用，实现浓缩智能化、加药智能化，以及浓缩、加药、压滤的调参联动运行。浓缩压滤智能控制系统如图4所示。

智慧浓缩

(1) 浓缩池澄清层高度实时监测

实现上位机远程监控药剂添加装置运行状态及各种参数；实现絮凝剂与凝聚剂自动调整加药量。

(2) 底流泵自动轮换

可自行设定切换周期，根据设定的时间周期自动切换备用泵，防止备用泵长期不用出现异常情况，避免投用泵出现故障后不能及时切换造成生产事故。

(3) 浓缩池澄清层高度监测

对现场浓缩池安装澄清层高度监测装置，实现对澄清层高度的实时监测，实时将数据反馈到加药控制系统中。

(4) 智慧浓缩系统监控

通过PAD终端远程控制加药泵启停、频率设定、配药时间；监测浓缩机电流、入料浓度、压滤机入料时间等参数。将影响药剂添加装置的操作信息与数据以可视化方式呈现出来，使岗位人员清晰迅速地了解到煤泥水沉降效果。

加药系统具体呈现信息包括以下5种：

1) 通过计算显示当前加药过程中的药剂配比浓度；通过压滤机平均入料时间反映当前底流浓度情况。

2) 澄清层高度，通过澄清层高度的实时监测及超限报警，保障澄清层高度稳定。

3) 瞬时药耗，将药耗情况数据化，以历史数据作为加药量调节依据。

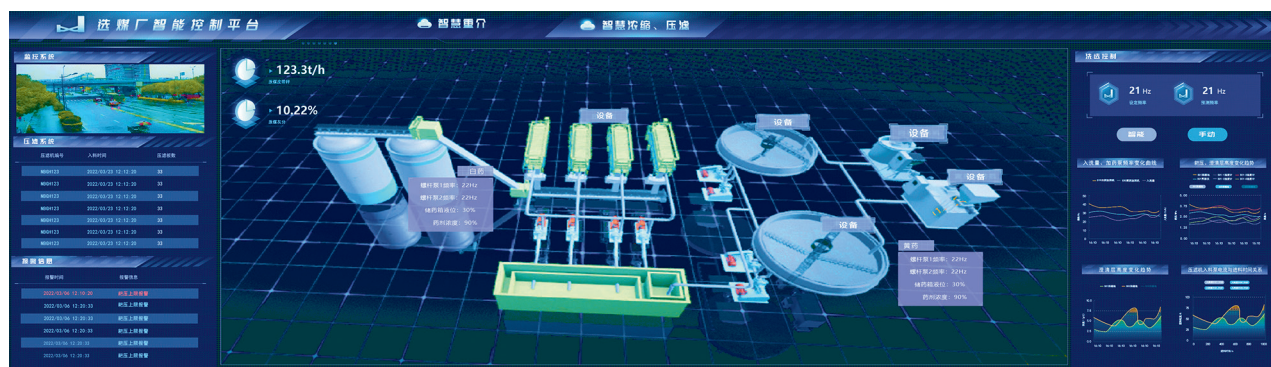


图3 智慧重介控制系统



图4 浓缩压滤智能控制系统

4) 瞬时入料浓度, 浓缩机瞬时入料浓度直观反映当前煤泥水浓度。

5) 入洗原煤量, 根据入洗原煤量以及化验数据等判断系统煤泥量。

(5) 絮凝剂与凝聚剂自动加药

引入絮凝剂与凝聚剂加药量自动调节逻辑, 根据浓缩池入料情况实现絮凝剂与凝聚剂加药量前馈调节, 根据澄清层高度变化情况实现絮凝剂加药量反馈调节, 稳定澄清层高度在需求范围内。通过电导率仪实时监测浓缩池入料煤泥水电导率情况, 引入凝聚剂加药量自动调节算法, 根据设定电导率目标值自动调节凝聚剂加药量。

(6) 凝聚剂储药

降低岗位劳动强度, 搭建凝聚剂储药平台, 平台储药通过电葫芦将药剂运至平台上, 再由人工将药剂添加至加药斗。

智慧压滤

智慧压滤系统打破了传统的就地控制或者工控机集中控制的控制方式, 采用软件与 PLC 工控

系统相结合的方式, 通过对压滤环节工艺参数的实时监测, 将设备的监控信息做到移动端实时推送, 在保证安全的前提下方便了岗位司机对生产系统的监管。通过服务器与交换机实现各系统间通信, 实现压滤系统的全流程自适应调节, 智慧压滤系统框架如图5所示。

智慧压滤系统可实现以下3种功能:

(1) 自动判断进料结束

通过在压滤机滤液水管道加装电磁流量计, 实时监测压滤机滤液水流量, 结合智能视频系统, 实现对压滤机进料结束的自主判断。

压滤机自动结束进料有手动和自动2种模式, 手动模式由岗位人员手动触发进料结束指令; 在自动模式时, 压滤机会根据设定的流量值、进料时长等结束指令。自动模式下进料结束有“弹窗确认”和“系统自动”2种触发模式, 在“弹窗确认”模式时, 达到条件时出现进料结束的提示弹窗, 需人工确认是否执行进料结束指令; 在“系统自动”模式时, 达到进料结束条件时将自动触发进料结束指令, 无需要岗位人员进行确认。

(2) 底流泵自动轮换进料

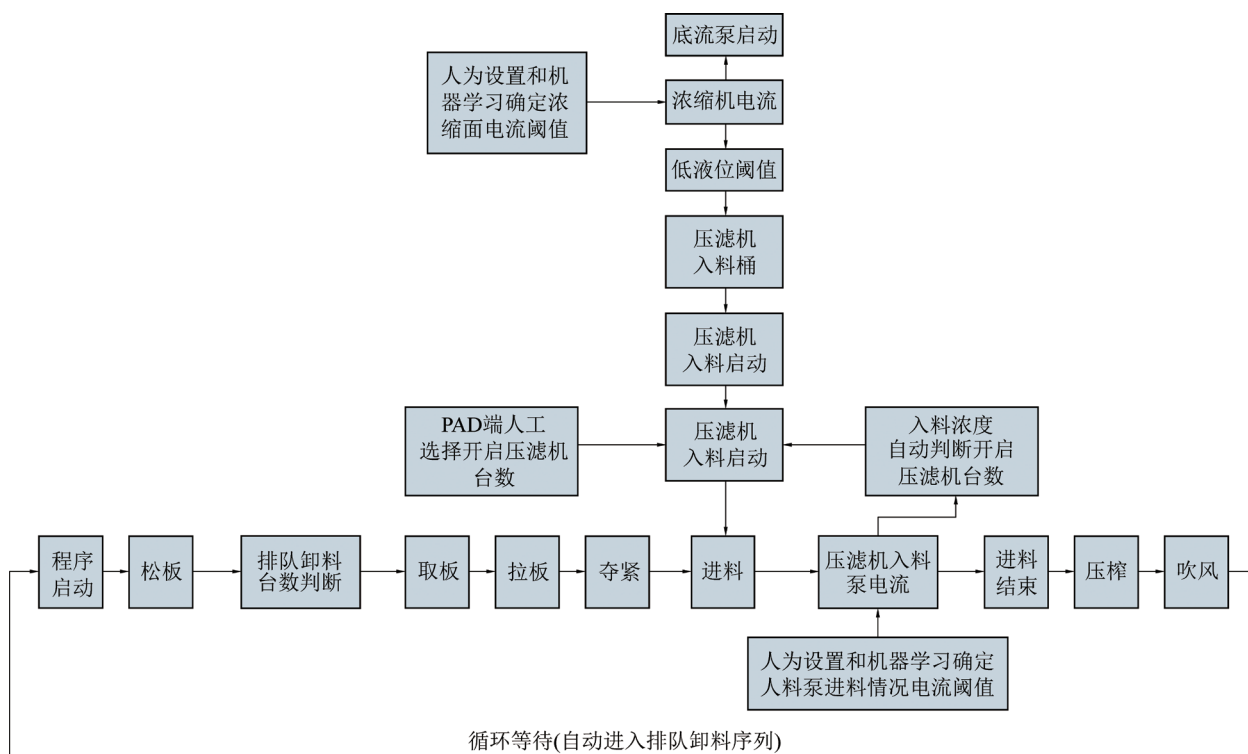


图5 智慧压滤系统框架

开发底流泵自动切换功能，可设定切换周期，根据设定的时间周期自动切换备用泵，防止备用泵长期不用出现异常情况、投用泵出现故障后不能及时切换造成生产事故。

底流泵运行日志主要显示浓缩机底流泵工作进程记录，主要包括启停设备编号、智能模式（模式选择）、启动时间、停止时间、持续时长等信息。

（3）压滤入料桶补料控制

根据澄清层高度、浓缩机转矩、压滤机最近1次进料时长反馈浓缩池沉淀效果，当沉淀物料较少时可延迟压滤入料桶补料，保证压滤机入料浓度相对稳定。

人员定位与智能照明技术

将UWB精准定位技术与LORA通信技术融合集成到防爆工业照明设备中，实现精准定位与照明

控制的深度结合；将人员定位与智能照明技术融合到数字孪生管控平台，实现人员位置的实时三维展示，同时与智能照明系统联动，真正实现了“人走灯灭、人来灯亮”的效果。人员定位系统框架及其界面分别如图6、图7所示。

智能照明管理

（1）对LED防爆灯具照明系统实现智能控制，感应距离可人工调节，触发响应时间不超过3 s，生产区域内亮度不得低于800 lux。

（2）作业区域内以智能照明灯具为载体，搭建无线控制网络，实现智能照明灯具的远程管理与监控。

（3）灯具可远程开关及调光控制，可自由分区域、分组、分时段控制，提高现场作业管理的灵活性与可控性，调光响应时间不超过3 s。

（4）对灯具状态进行实时监测、记录和统

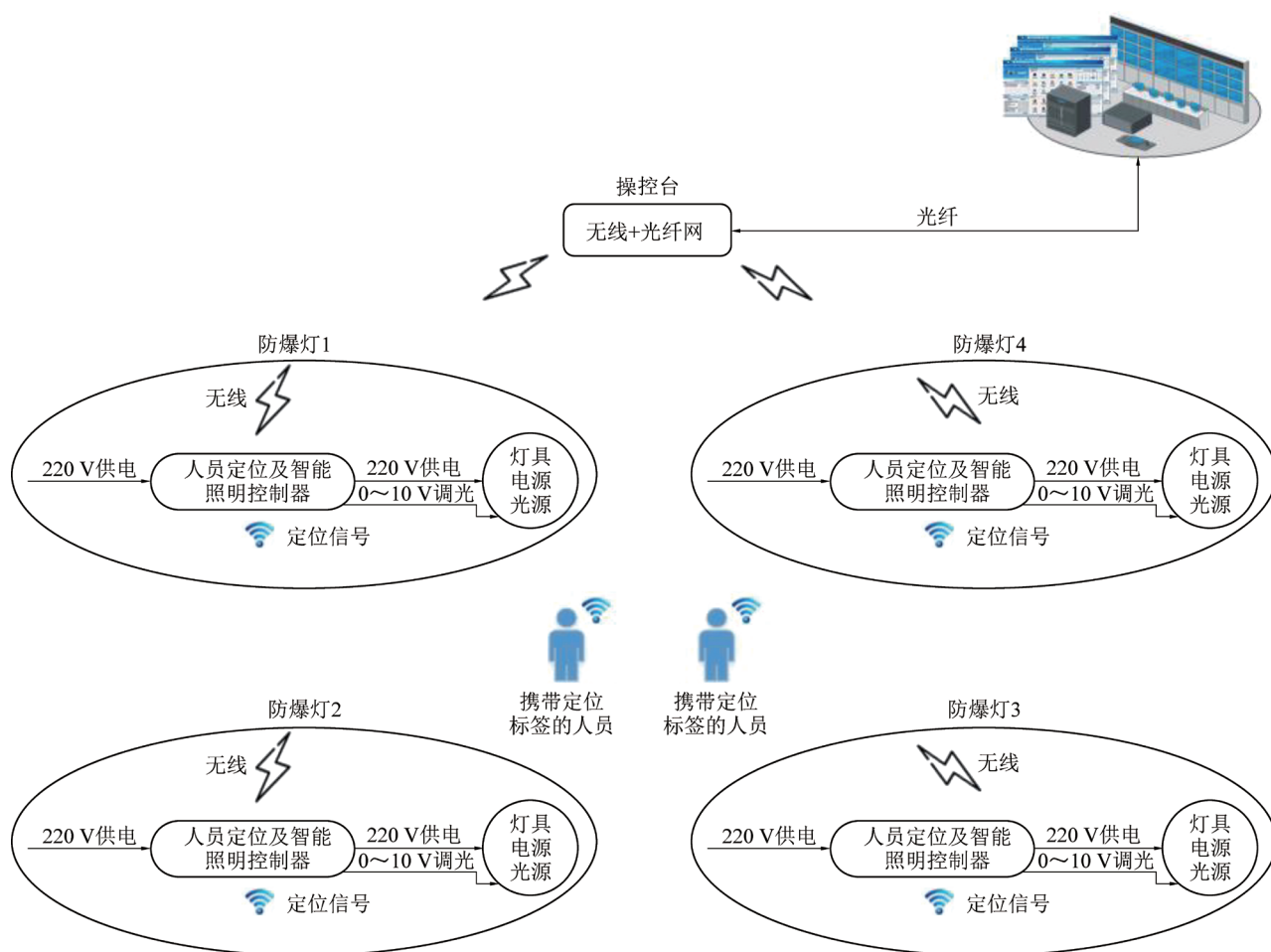


图6 人员定位系统框架



图7 人员定位系统界面

计。通过智能照明系统可对每一盏智能灯具做实时监控,根据监控的状态统计可及时发现故障灯具,及时报警。智能照明系统能够监控并统计所有灯具的用电量,并通过用户配置实现对全区域或部分区域,全时段或部分时段的照明能耗统计和分析。

人员定位管理

(1) 定位人员位置并实时显示

人员定位系统实时显示人员当前位置,结合安全帽式定位标签和工牌式标签确保定位位置延迟不超过5 s,静态情况下定位精度 ≤ 30 cm,动态情况下定位精度 ≤ 1 m。该系统可统计当前系统定位人数、各区域定位人数等信息。

(2) 人员历史轨迹存储及回放

实时记录和存储所有人员的运动轨迹信息,可对任意指定人员的任意指定时间段内历史运动轨迹进行查询和回放。

(3) “人来灯亮、人走灯灭”功能的实现

将灯具设置为“人来灯亮、人走灯灭”的工作模式,人员定位卡与现场灯具近场通信,真正实现“按需照明”。

(4) 人员定位信息查询功能

管理人员可以随时通过监视显示设备,查看定位区域内,任意区域的人员的实时活动情况,并且可以查看、编辑每个ID的资料信息,以及生成报表,历史数据查询,为管理者带来很大便利。其中个人信息包括姓名、年龄、职务、进出时间和停留时间等。

(5) 人员告警信息的实时上报

定位人员可以通过定位卡上的SOS按键发送告警信息至监控中心,监控中心的专用软件会在控制界面中对此报警信息进行实时显示。

(6) 人员离开或进入指定区域告警

可以设置某些特定的区域在某特定时间段为禁止离开或禁止进入区域,如有定位人员离开或进入此区域则可以触发自动告警。

(7) 系统网络可扩展加入其他传感器

人员定位系统支持多种传感器接入,如PM2.5、一氧化碳、温湿度、光照度等,但传感器需采用该系统共同的通信技术。此外,灯控网络能够支持种传感器的接入,并可根据环境参数做一些照明或其他控制联动。

(8) 高精度定位,定位精度可控制在1 m内

(9) 违章自动识别功能

通过人员身份识别、精确定位以及各种逻辑

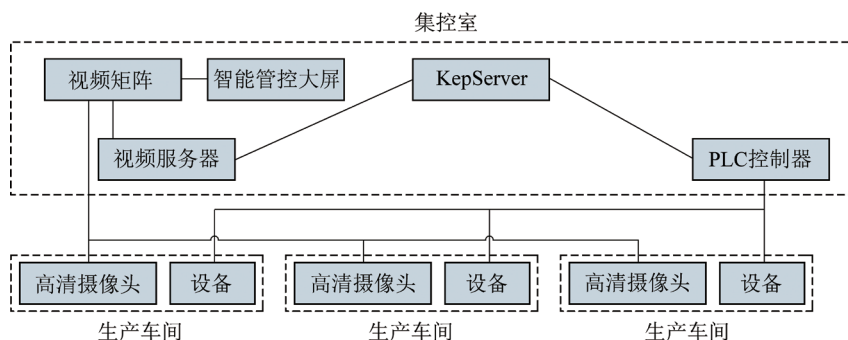


图8 智能视频系统架构

关系相互组合，与服务器相互关联，将工作区域现场采集的实时信息与数据库标准的静态要求比对分析，系统可自动辨识出安全隐患和违章行为，并及时向当事人和相关管理人员发出预警信息，帮助管理人员随时掌握工作区域现场动态、当事人及时纠正错误，可有效地预防事故发生。

（10）动态点名功能

动态点名功能可具体呈现应到人数、已到人数和未到人数。

智能视频联动技术

选煤厂工业视频系统可采用WEB方式浏览，可通过管理中心平台实时浏览，也可通过智能手机播放（RTSP协议），录像文件可直接播放。智能视频系统架构如图8所示。智能视频联动技术可实现以下3项功能：

（1）视频跟踪

视频信号自动跟随正在启动的重要设备、危险性较高区域以及故障点的设备并显示实时画面。

（2）视频随动

将现有的SCADA生产监控系统的报警信号通过智能软件套件和视频监控系统连接，当现场设备出现报警或集控启车时，将报警设备附近的摄像机视频信号弹出，用来查看现场设备的实际运行情况。同时能与人的不安全行为实现联动控制，可以即时启动相近的摄像机，并调整摄像方向对所报警设备和区域进行监控。

（3）对人员的不安全行为进行智能分析

采用智能分析系统，在摄像机监控画面的指定区域画警戒线，当有人越过警戒线时，摄像机将自动报警，并进行实况画面弹窗、声音报警等动作，提醒值班人员及时处理，对安全事故等起到预警作用。

结 语

基于数字孪生技术的选煤厂智能管控系统的研发与应用，为多系统数据融合、人机交互、综合管控提供了平台和窗口。同时，将智能洗选技术、智能视频技术、人员定位与智能照明技术融合到数字孪生管控系统，真正实现了选煤厂数据的“采集—分析—管控—决策”的全周期管控，很大程度上降低了人工干预，减少了行业用工人员，实现了选煤厂生产管理全流程的数字化、智能化。通过采集精煤灰分建立密度预测数学模型，反馈调节当前洗选密度，实现了洗选过程的高精度控制，在减少岗位工人数量的同时，将精煤产率提高0.5%，很大程度上提高了选煤厂的经济效益。

■ 责任编辑：李艾稣

作者简介：

第一作者：王忠强，硕士，主要从事煤矿智能化建设、自动化控制系统优化与设计方向的研究工作。

E-mail: 763372840@qq.com

作者单位：陕西小保当矿业有限公司