



神东煤炭集团上湾选煤厂鸟瞰图

国能神东煤炭集团智能化选煤厂 关键技术研究与应用

崔亚仲 白明亮 张磊 马涛 任艳艳

国能神东煤炭集团有限责任公司（以下简称国能神东煤炭集团）在2018年建成了上湾智能化示范选煤厂，在选煤智能排程、数据采集及分析、设备智能监控与管理、智能装车关键技术等方面开展了探索与实践，实现了传统选煤向智能选煤的跨越，取得了选煤厂智能化建设的阶段性成果。2019年，神东煤炭集团总结了选煤厂智能化建设经验，形成了智能化建设成套技术方案，开始全面推进智能化选煤厂建设，在吸取上湾智能化示范选煤厂建设经验的同时，有针对性地

转化实施行业内的先进技术。虽然选煤厂经过多次改造升级，但仍存在系统自动化和智能化程度不够完善等问题，距离实现智能化选煤厂仍存在以下4点差距：

（1）生产作业成本高

现有作业环境下，无法反映出各选煤厂不同生产方式下的成本情况，没有建立模型分析最优生产方式，无法为国家能源集团、神东煤炭集团、分选中心3级生产指挥和运营决策提供可靠支持。

（2）装备可靠性差



大型机器设备故障频发,电气故障时有发生。虽然固定岗位人员有所减少,但增加了维修人员的数量,随着设备智能化改造升级工作的逐步推进,装备材质、耐久设计、运转部位润滑等环节没有补强的问题逐渐凸显,导致设备故障率增高且不可控,临时性的检修任务增加导致检修人员需求量大,没有基础的装备耐久性改进和AI辅助检修系统的支持,设备无法实现预防性检修。

(3) 智能化改造可复制性差

神东煤炭集团各选煤厂建设时间不同,设备设施差距大,生产方式和生产工艺各有特点,智能化的升级改造需根据各选煤厂特点进行方案制定,初级方案不具备大面积推广的价值。

(4) 生产组织方式和产品结构固化,不能定制化生产

各选煤厂商品煤煤质固化,不能按照客户需求定制商品煤,需要设计计算模型按照煤质分选集成性测算与决策系统实现煤质掺配优化组合。

选煤厂为了实现减员增效的目标,已经不能依靠传统的技术和管理手段,而需要进一步应用5G、工业物联网、大数据分析、人工智能等先进技术。选煤厂运营可分解成生产工艺控制管理、软硬件运行维护、经营管理3个维度,现有选煤厂配备的巡检、调度、检修、管理4类人员穿插在这3个维度之间,实现把控生产的各个环节;可从人工智能及相关新技术应用的角度出发,从装备和工艺的可靠性提升、数字化感知、执行协调、数据资产积累和挖掘、故障预警5个环节介入,并最终代替人工。

国内外选煤厂智能化发展现状

国外选煤厂智能化发展程度较高,生产能力不断扩大,设备大型化,系统复杂程度的提升对自动化技术和传感系统的要求也越来越高,选煤技术从单机设备智能化到全厂智能化方向发展,同时安全效率也大幅提升。目前选煤厂智能化建设的重点还是体现在集中控制技术、传感器自动检测技术、

系统数据上传等方面;其中,计算机技术和传感器技术的配合使用,是选煤厂自动化、智能化发展主要研究方向。大量实用性传感器的开发与应用是核心,如放射性同位素密度仪、流量监测仪和液位监测仪等的使用,很大程度上可提升选煤厂的自动化水平。

英国有2座选煤厂已经全部使用计算机程序控制,全厂设备运转只需1人监控;美国1座年处理能力110万t的选煤厂,每班现场工作人员只有2人;法国1座选煤厂除了全厂计算机控制以外,也增加了视频监控和相应的设备监控传感器,生产工效达到164 t/工。关于商品煤混合作业,在德国和法国利用计算机程序控制可完成混煤堆或混煤仓的原煤自动均匀混合。法国1家选煤厂的装车系统,每班作业量达到3 000 t以上,系统操作人员只有1人。

国内选煤厂工艺发展经历了跳汰选煤、重介质选煤、清洁选煤3个阶段。目前,选煤装备实现了大型化、控制自动化与生产管理高效化,但智能化发展并没有在选煤装备、技术、工艺、管理等方面充分体现,影响了煤炭企业智能化发展、数字化转型进程。目前,国内选煤厂自动化技术得到较快的发展,智能化的发展主要体现在设备运行集中控制、工艺参数监控与调节、设备运行状态监控等方面。国内工艺控制技术实现了较高的智能化水平,例如跳汰机自动排料,选用了浮标和超声波结合的技术,通过连续的监测和计算机精确的计算,不断调整分选效果,逐步提高跳汰机生产质量的稳定性,满足较高的精煤回收率,同时通过传感器现场自动适应系统不断将跳汰机选煤参数向最优指标调整,以达到提高跳汰机工作效率的目的。

选煤厂减员增效将是我国选煤厂智能化发展的一项重要参考指标。从自动化到智能化的发展阶段,生产组织模式和组织架构、生产现场人员架构均有改变,生产指挥扁平化、信息化,减少生产现场员工数量,落实无人则安的安全理念,但相对国外来说,国内大部分选煤厂生产工效低于100 t/工,工效相对较低。

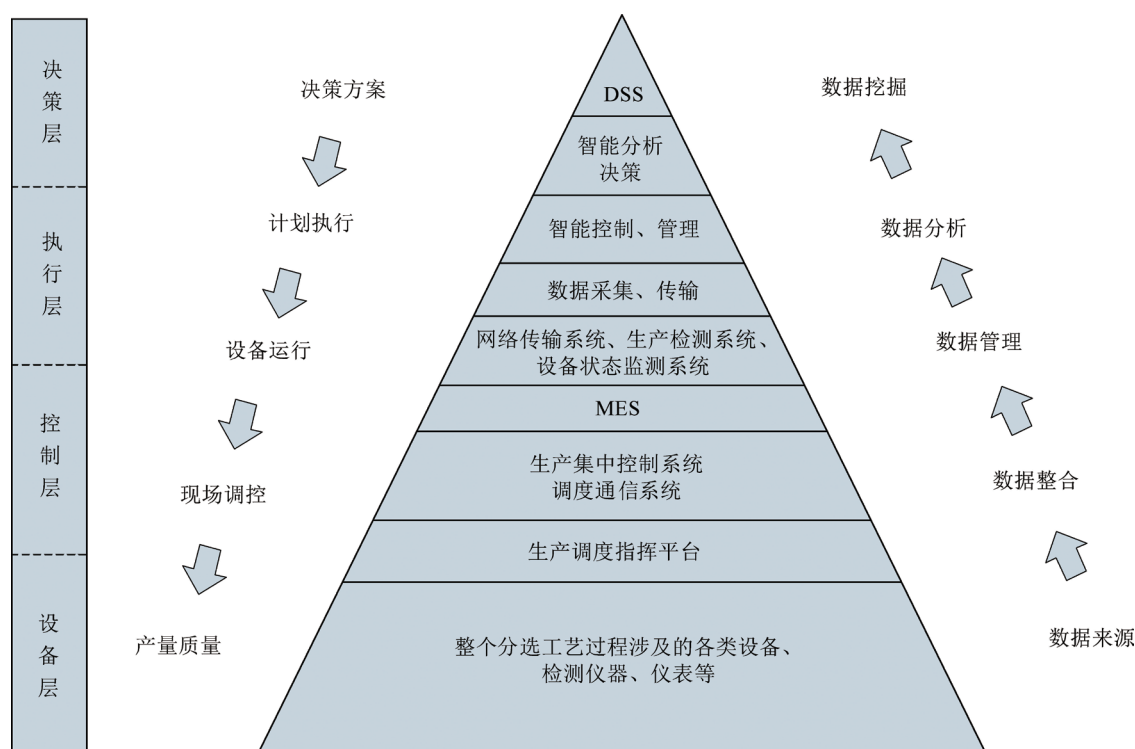


图1 智能化选煤厂的建设逻辑构架

智能化选煤厂建设架构

智能化选煤本质上是利用多专业、多领域的技术融合，形成系统性的智能化建设规划，打造适合自身的一种煤炭分选加工的实施模型。选煤厂的智能化建设要从战略高度出发，以整体高质量发展为出发点，设计选煤厂智能化建设“一张图”。类似于其他行业智能化建设的逻辑组成，智能化选煤厂的建设逻辑构架自下而上分为设备层、控制层、执行层和决策层，如图1所示。

(1) 设备层是通过不同的网络连接方式进行参数调节、设备控制，特别是在5G通信时代，物联网在选煤厂智能化改造中的作用越来越重要，设备高效互联可提升设备运行状况及现场监控信号的回传效率。

(2) 控制层主要是通过设备的集中控制以及对控制过程进行优化，为设备运行创造安全环境，通过控制层，选煤厂的配煤、重介质分选、浮选、浓缩、压滤、装车等操作都可以实现智能化。

(3) 执行层主要是对选煤设备和供电设备的全生命周期进行管理，对选煤厂的各个环节进行系统化、一体化管理，实现选煤安全生产执行效率。

(4) 决策层是选煤厂智能化的最上层设计，主要实现生产、管理、销售的智能化管理，经过智能化升级后的选煤厂，决策层大多数以控制云平台为基础，融合大数据分析 with 人工智能技术，对设备、成本等进行智能管理及销售。

在智能化选煤厂的建设逻辑构架下，各智能化系统通过统一的智能管控平台实现生产过程控制、生产辅助及安全保障、信息管理，以及基于大数据的智能决策等信息交互，将安全、生产、设备、决策、质量控制和物资等各环节紧密融合，从而提高生产系统的效率与智能化水平。

智能化选煤厂建设科技攻关方向

在神东煤炭集团选煤厂智能化建设工程中，针



对实际出现的工程问题和管理缺陷，总结出一些富有挑战性的突破方向与关键痛点。但这些方向仍需增加投入，结合工程实践，深入研讨，寻求突破。未来人工智能将全面介入管理，以下笔者从装备和工艺的可靠性提升、数字化感知、执行协调与控制、数据资产积累和挖掘、故障预警5个关键环节展开讨论。

装备和工艺的可靠性提升

目前，生产设备的运行数据已经大量积累，经过大数据分析可定位装备的薄弱环节，设备生产厂商在材质和工艺上可做相对的补强，从设备的设计环节开始加入耐久度考量，可在后续的生产、出厂、销售、采购、使用的全生命周期内得到很好的质量控制，运营选煤厂需建立完善的设备预防保养机制，为“黑灯选煤厂”提供了基础保障能力。此外，在产品煤质量方面，全方位实时在线监测，以预防为主，进行动态调整，确保产品煤的质量可靠性，不断优化和改进。

以设备故障类分析为例，其主要功能是对全厂的设备、系统运行状态进行监控，对运行状态数据进行分析、挖掘及建模，进行可靠性评价，异常状态下能够及时发出报警，通知现场的责任岗位进行排查及处置。设备运行数据分析模型建成后，经过不断地积累数据、迭代算法，可精确测算零部件寿命，并精准安排计划性检修；选煤厂管理机构可设置流动检修队伍，按系统推送时间表对各设备进行现场检修，实现现有的13座选煤厂只需保留1个流动检修队伍，即可按计划完成检修，并保证设备和系统稳定运行。

基于已搭建的智能化网络平台，PLC、视频、离线化验信息、在线监测数据、数据库等所有业务系统纳入到统一的AI智能分析控制平台中，实现数据关联和统一管理。需人工处理的报警类别为设备故障类、保护类、指标类以及参数类。设备故障类、保护类报警是指在生产和启停车过程中系统通过自检将检查出的各类设备故障报警，主要来自

PLC控制信号及视频监控的实时监测分析结果；指标类报警是指生产质量指标、介耗、药耗等异常指标的报警；参数类报警是指传感器监测到的设备运行参数或生产工艺参数，与预设定的参数正常范围及参数报警区间相比较，由智能逻辑对参数进行判断、分析报警原因，指导操作人员进行处理。

数字化感知技术应用

通过对实时生产数据的采集，进行统一调度，从原料、仓储、运输、分选、脱水、水循环、介质循环、产品装车等各环节，提高整体协作能力，使整个生产过程透明化、数字化。

现有分选设备的智能化程度较低，大部分设备仅具备初级自动化水平，没有安装环境感知和自身运行状态的传感器。目前，设备联动依靠集控系统程序设定仍存在很大弊端。数字化感知技术还有赖于传感器、检测仪器仪表的准确性及可靠性。智能化选煤厂的建设并非一蹴而就，许多成套技术还不成熟，需要重点研发、单点突破，如现有的集控和现场巡检人员合作控制整个工艺系统稳定运行，多数依靠人工操作经验，这一部分仍需长期的机器学习和模型训练；单个传感器也亟待解决无放射源的灰分仪、浓度计，精准定位且耐磨的智能阀门，可灵活调节开度的闸板等问题。

生产现场执行协调与控制

目前，需要为主要生产设备安装独立控制系统，使其具备自主“思考”的能力，接入工业互联网体系，联动设备交换运行信息，实现设备状态、原料煤供应状态、产品产生状态共享。通过训练AI模型实现设备协同作业，突发情况快速自检，智能应对，快速转换生产模式，减少人工干预。

对人员、设备、原料、产品等生产信息进行快速整合协调，保证生产作业计划顺利进行，及时应对生产突发状况。以选煤厂工艺控制为例，将人工控制的工艺类阀门、闸板接入集中控制，开关阀改



图2 机电业务智能闭环管理系统

为开度调节阀或增加限位开关,闸板增设位移传感器,实现工艺过程PID调节。安装工艺类传感器应用于补水阀、回流阀、鼓风机、泵入料阀、旋流器组入料阀、刮板输送机下料闸板等,增加高低压循环水流量及压力、尾矿磁性物含量、原煤仓及缓冲仓仓位、旋流器入口压力、高低压风管压力、浓缩池清水层高度、事故池液位、煤泥水浓度等过程参数检测装置。在选煤厂生产过程透明化的前提下,各执行机构在AI智能算法和机器学习技术的支撑下,自动调整、切换以实现生产过程的智能化控制。生产线快速转换,产品结构随时调整,最终可实现柔性生产。

数据资产积累和挖掘

对所有生产数据进行分类归档,包括生产过程中的物料信息、工艺参数、质量状况、设备运行情况等,确保实时动态记录,保证产品煤的可追溯性。例如,在神东煤炭集团最常用的块煤重介浅槽分选和末煤重介旋流器分选环节,最重要的分选参数是悬浮液密度,同时还要辅助控制重介泵的实施流量,达到煤矸分离的目的。在分选环节中,首先需要将影响产品质量和分选效率的参数梳理出来,

以浅槽为例,悬浮液密度、上升流流速流量、水平流流速流量、合格介质桶桶位、稀介质桶桶位、分流量、原煤实时给料量、原煤实时灰分等共同决定了最终的精煤灰分和矸石带煤量2个指标。人力运算已不能满足精准分析的要求,必须通过建立选煤生产数据仓库,将这些参数大量地记录下来,反复修正影响因子系数建立智能分选模型;并且借助智能集控系统,将实时运算的结果直接修改当前的分选参数,运用机器学习或者模糊运算理论不断修正模型,形成良性循环。目前,国能神东煤炭集团已在单生产线试用该智能分选模型,并达到了预期效果,经统计,智能分选生产线精煤产率提高了1.09%,矸石带煤率降低了0.8%,介质和清水的消耗也有明显下降。

故障预警模型建设

根据生产情况设定关键指标,实时监控指标完成情况,以最快的形式推送生产过程中的报警信息,提前反馈和快速响应处理,减少问题和故障的发生率。例如,生产过程中的杂物、大块矸石、物料偏载等,均可导致刮板输送机频繁出现拉斜、跳链、断链等故障,脱介筛跑粗或筛板脱落造成筛下

溜槽卡堵的现象也时有发生，仅靠人工周期性巡检无法解决偶发性的故障，而机器视觉技术可代替人眼完成精细测量和精准判断。为达到自动故障预警功能，需研发机器视觉系统，首先在刮板输送机槽体、煤介桶处安装高清摄像头实时采集被控对象运行视频信息，通过图像处理服务器将图像进行数字化处理、分析，主要采用亮度调整、视频降噪、增强、提取特征等技术和方法；然后通过对大量运行数据的统计和分析，利用机器视觉和图像算法建立模型，找出故障时的特征及阈值，依据规则对目标物的状态进行实时分析，并根据故障级别发出相应的动作指令。

针对刮板输送机，机器视觉系统不但能在刮板发生拉斜、跳链、断链时及时发出报警信息，还能在运输物料中出现大块铁器、木头、钢丝绳等杂物时进行识别并报警；针对筛板脱落，当生产系统出现筛板破损或其他原因导致的系统跑粗情况后，或当下方筛下水桶桶篦出现粗颗粒时，机器视觉系统

可以准确识别并发出异常报警，同时将异常图像推送至操作人员的个人终端，由岗位司机进行确认和处理。未来，该类特殊情况也将由可移动的故障处置机器人进行处理，进一步释放劳动力。

神东煤炭集团智能化选煤厂建设实践和技术应用

神东煤炭集团智能选煤厂建设主要分2个阶段进行，以上湾煤矿智能化选煤厂为例，第1阶段对生产指挥系统进行升级改造，第2阶段分系统对分选、加药、运输、配电等系统进行改造，形成了成套的技术解决方案，取得了阶段性成果。

选煤厂智能化系统建设

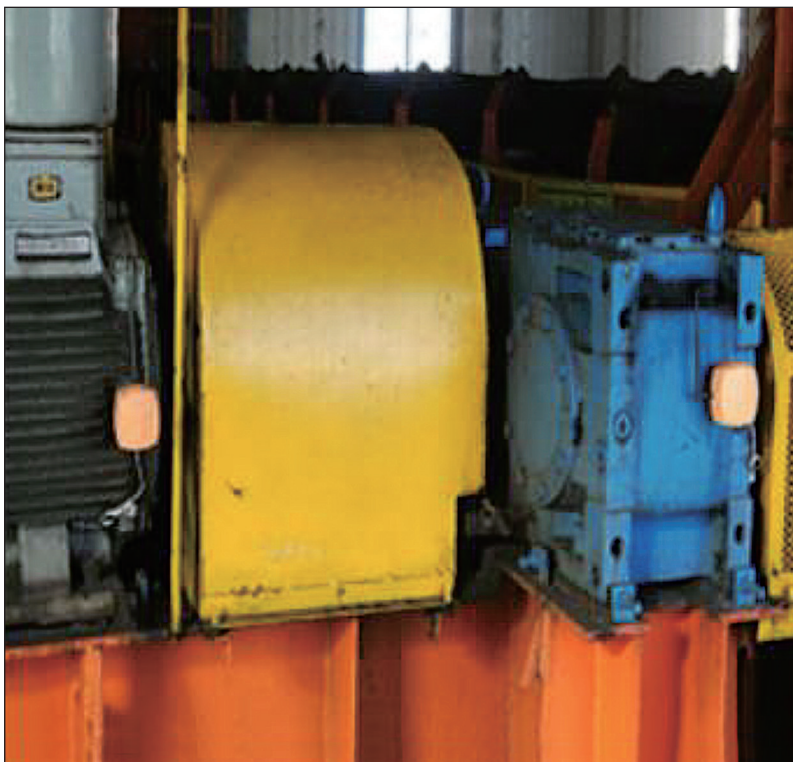
神东煤炭集团上湾煤矿智能选煤厂建成了机



(a) 设备温度无线传感器外形图



(b) 大型减速器温度震动有线传感器安装位置图



(c) 电机、减速器无线温度传感器安装位置图

图3 设备在线监测系统

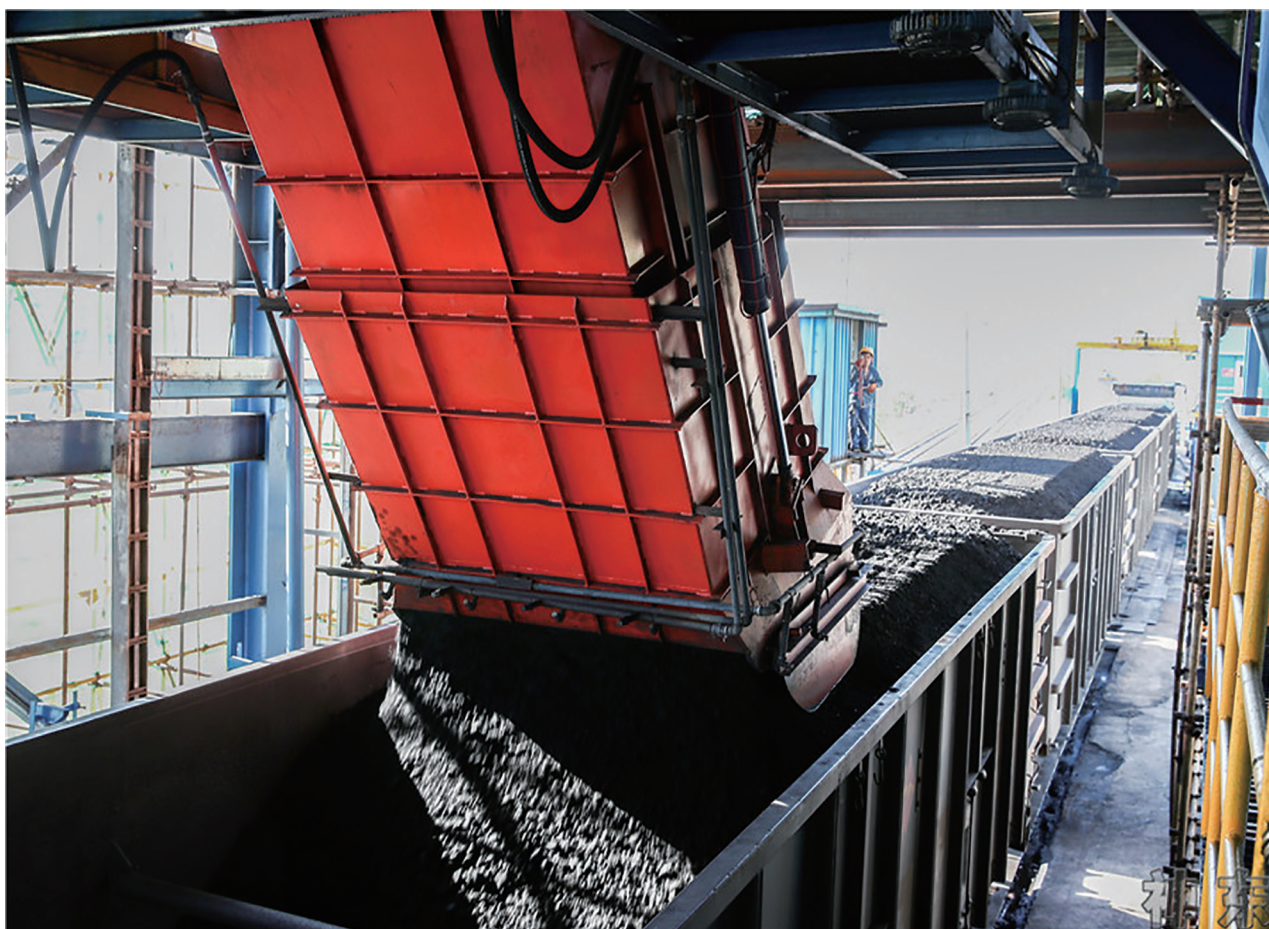


图4 全自动无人操作的运煤火车装车系统

电业务智能闭环管理系统（图2），涵盖了生产数量、生产质量、设备运行、设备维修、装车外运、作业绩效共6个维度32项指标，进行了数据的自动采集、存储、统计、分析、判断，可自动推送不同等级报警信息至手持终端，实现了机电管理周期性业务的定期推送和缺陷管理任务的实时推送，并将执行过程和结果反馈进行闭环管理，保障了相关工作的及时开展，通过数字配电系统的判断并推送实时指令，可有效减少人为执行过程中的安全风险，整套系统运行安全可靠。

通过大量应用在线温度或振动传感器，替代人工点检，安装在现场的传感器通过缆线与信号发射器相连，按照每10 min采集1次数据的频次，通过现场工业无线网络上传到数据采集服务器及选煤厂监控系统，完成实时数据显示及基于趋势和上下限阈值报警，进一步做到对设备健康状态的实时监测，

为将来利用大数据和机器学习构建故障诊断专家知识库，以及为实现机电设备预知性维修做铺垫。设备在线监测系统如图3所示。

神东煤炭集团上湾煤矿智能选煤厂建成了全自动无人操作的运煤火车装车系统（图4），实现了智能精准配煤、智能装车、装车智能化管理。通过对自动化装车系统PLC数据进行自动判断和捕获，系统后台可对数据进行计算和处理，最终以各类统计分析图表形式展现装车外运的实时和周期性情况，从而可实时有效地对实装吨数进行精准监测。整个生产过程，选煤厂厂房仅需2名巡检人员，加上其他辅助人员，仅需100人就可实现日处理原煤6.25万t。通过生产执行系统运行分析，全自动且无人操作的火车装车系统运行效率可以提升5%以上，每日平均生产时间可以缩短1 h左右，可控成本下降4%以上。

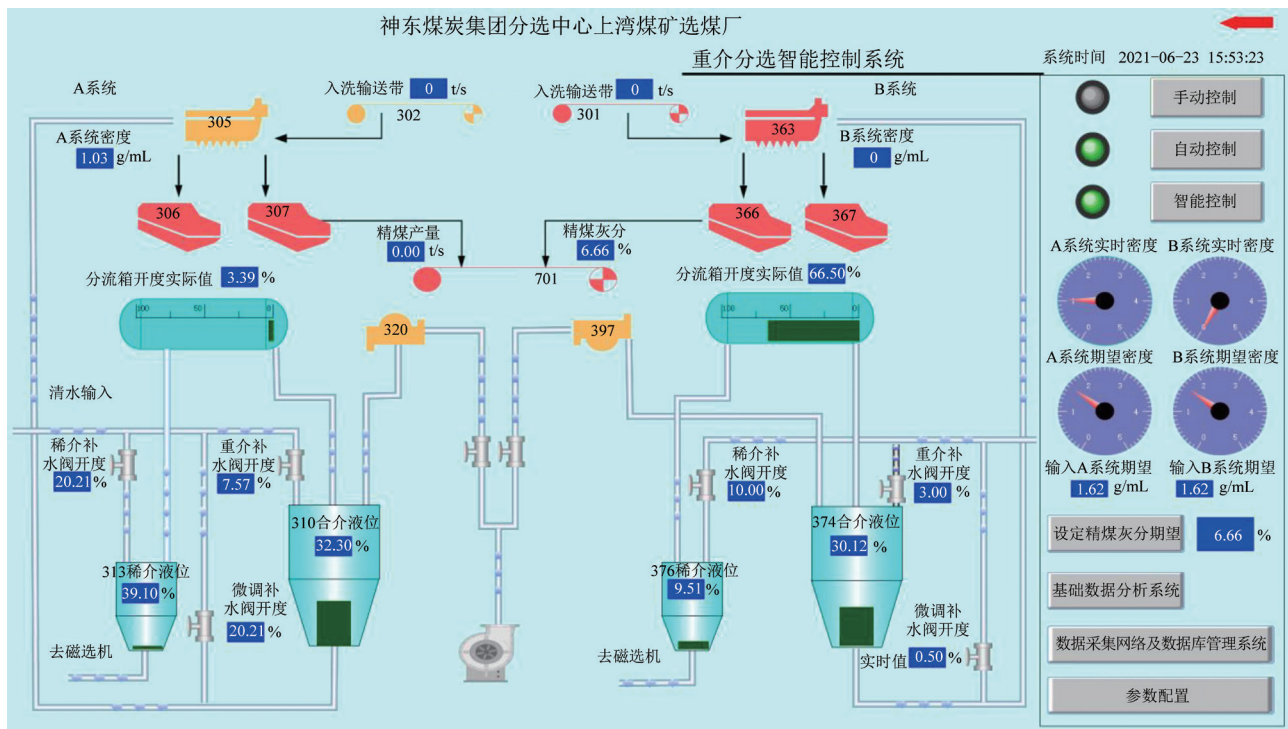


图5 智能分选系统

新技术应用

(1) 利用视频AI识别技术对危险区域越界、个人安全防护、人员不安全行为、环境温度异常等进行智能识别与报警。利用高清黑光、热成像摄像头实现了从原煤入厂至装车全生产系统的远程巡检。可对刮板输送机跳链、带式输送机跑偏、杂物铁器、煤流温度和堆料等设备进行检测,并实现提醒与报警。通过将智能识别信号搭接至PLC工控系统,设备监控信号和设备控制进行有机集成整合,实现了生产工控系统直接调取设备关联监控画面,并实时抓拍。当现场发生故障时,可自动弹出故障区域的监控画面,及时查看并判断现场情况,对传统的传感器保护形成有效的补充和强化,是选煤厂安全运行的又一道保险。

(2) 利用视频识别技术对煤流中的物料进行超粒度物料识别。当发现产品煤中的物料超过规定粒度范围时,立即发送不同等级的报警信息至岗位工人的手持终端,避免发生生产事故。在煤流中对铁器进行识别,当检测到小型铁器时,带式输送机机头的除铁器会联动开启,当检测到大型铁器时则

闭锁带式输送机并停机,同时进行人工定点清除,可有效预防铁器造成的各类事故。

(3) 应用智能分选系统(图5)。通过机器学习和专家决策智能调整分选过程参数,构建了分选智能控制系统。应用智能加药系统可自动采集煤泥水特性数据,由后台策略机给定,实现了煤泥水处理环节的智能精准控制,药剂消耗量降低了8.8%、溢流浓度 $<1\text{ g/L}$,提高了煤泥水处理效率;智能分选系统可自动采集及分析煤泥水各环节样品的浓度及粒度组成,为压滤机参数调整和浓缩池加药控制提供依据,实现脱水设备异常报警,提高了全流程数据综合诊断能力;智能分选系统可自动采集煤泥水特性数据,由后台策略机给定,实现了煤泥水处理环节的智能精准控制,药剂消耗量降低了8.8%、溢流浓度 $<1\text{ g/L}$,提高了煤泥水的处理效率。

通过应用一系列技术手段,煤质稳定率提高了12%,商品煤产率增加了1.09%,发热量提高了58.6 kJ。由于生产组织智能化和产品质量提升,上湾智能化选煤厂在2019—2021年分别增加销售收

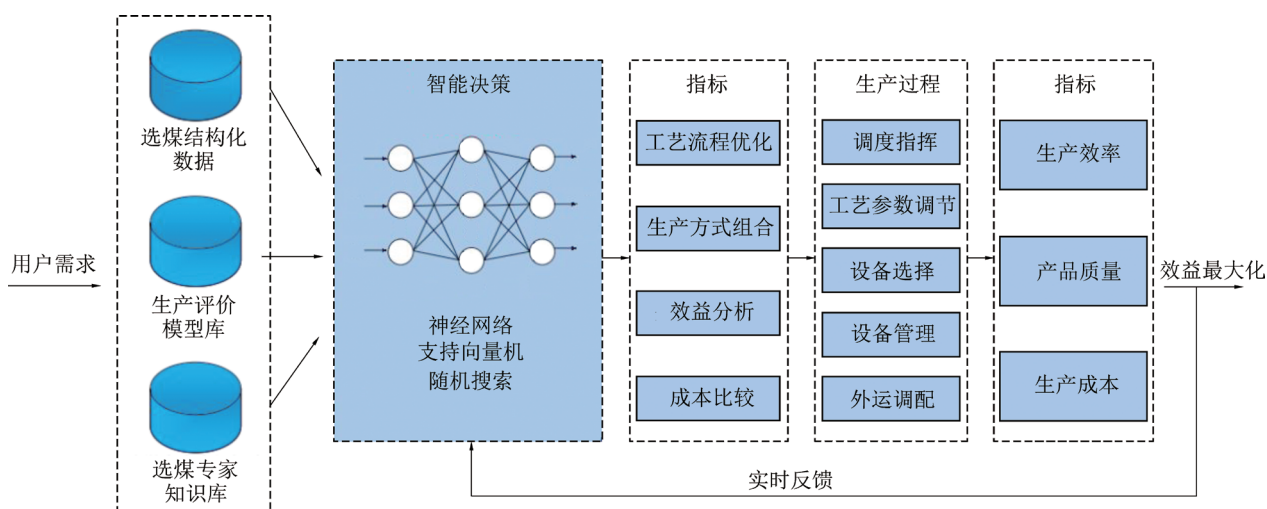


图6 定制精准生产开发与应用模型

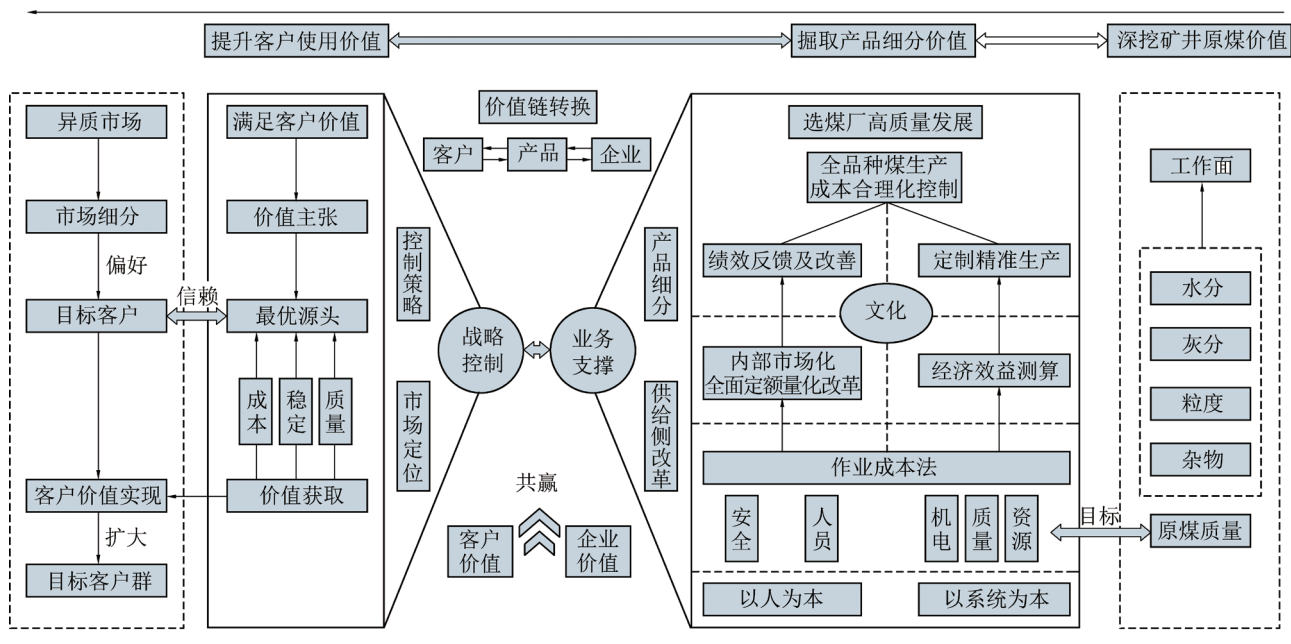


图7 成本精细化管控模型

入22 478.13万、25 908.49万、29 271.24万元，累计增加销售收入77 657.86万元，新增税收9 802.76万元。

数据分析与预测

(1) 神东煤炭集团上湾智能化选煤厂建立了定制精准生产开发与应用模型(图6)，与神东ERP、业务执行系统数据对接，获取生产计划、装车计划、煤质数据等手工录入数据，从自动化系统

中获取现场实时数据，对数据进行分析并实时存储，把生产现场的统计数据真实、实时地显示给管理层。该模型可根据原煤质量信息预测不同生产方式下的产品质量，再结合作业成本法在相关系统中对不同生产方式下的产品成本、效益进行统计分析，以效益最大化为原则分析出最优的生产方式组合，为管理层及决策层提供支持。

(2) 神东煤炭集团上湾智能选煤厂建立了成本精细化管控模型(图7)，根据用户需求和生产



的原煤，追求效益最大化，在生产方式数据库的基础上，实现生产组织方式、工艺参数和作业成本测算，为定制化生产提供智能决策。建立了成本与吨煤之间的关系，将分选成本分解到原煤、筛分、主选、上仓和装车系统5个作业点，实现了成本的精细化管控；建立了生产效能与设备运行模型，自动记录设备停机的开始时间、结束时间、停机现象、停机分类、停机原因等，并按照故障现象、原因进行时间和次数对比统计，对故障智能诊断分析、维修策略、生产组织安排等提供科学数据；配备了智能操作辅助系统，通过手持终端智能分析故障原因、推送标准工单指导检查维修。通过效能分析和智能操作辅助等系统，对生产一线30名工人进行了岗位优化和转岗，改变了人员管理模式，推进了知识型员工的培养。

总结

（1）神东煤炭集团智能化选煤厂建设过程中，新增了大量的传感器，收集了大量的运行数据，对选煤装备、工艺流程、集控软件中的易损环节做了清晰的梳理建模。

（2）在生产管理方面，开发了诸如停送电管理、移动操控、智能加药、智能加介等辅助系统，现场运行取消或减少了调度和巡检岗位人员，实现了扁平化管理。

（3）在机电维护方面，通过生产执行系统优化，实现了润滑保养、点检、机电检查、标准检查和维修工单、故障快速定位和处理业务经验知识化的机电业务管理体系，方便了施工及检修人员。并将在此基础上进一步与选煤装备制造厂商合作，在机械设计阶段借助故障分析结果来补强易损环节，运用新材料、新工艺定制使用可靠装备，从根本上解决设备耐久度、运行稳定性差的问题，进一步减少检修维护人员；应用数字化感知技术代替巡检人员；从工艺设计上持续优化系统对原煤的适应能力，提高系统运行的稳定性，保证了产品质量的稳定；通过对生产过程中物料信息、工艺参数、质量状况和设备运行情况等数据资产的积累和挖掘，辅助生产决策；在提升了设备耐久度和可靠性后，通过故障预警真正地实现计划性检修，设备保养维护任务也可探索社会化服务外包模式，最终实现无人化智能选煤厂。

■ 责任编辑：李艾稣

作者简介

崔亚仲

教授级高级工程师，硕士，现任国能神东煤炭集团有限责任公司智能技术中心主任

先后获得中国煤炭工业协会“两化融合先进个人”、通讯行业2021年度5G创新人物、中国设备管理协会“第六届全国设备管理优秀工作者”、国家能源集团和神东煤炭集团“科技创新先进个人”“科技英才”等荣誉称号。主持或参与完成了“综采工作面智能供液方法、存储介质、电子设备和系统”“综采工作面来压步距自动测量方法及电子设备”等10多项技术创新项目，参加完成了“8.8 m超大采高智能综采关键技术与成套装备研发”“一体化集中管控系统（ERP）建设项目”等多项国家科技项目。