

# 非煤矿山智能决策支持系统架构设计与关键技术

Architecture Design and Key Technologies of Intelligent Decision Support System for Non-Coal Mines

李永生<sup>1</sup>, 张宝金<sup>2</sup>, 翟建波<sup>1</sup>, 刘伟新<sup>2</sup>, 陈宇<sup>1</sup>, 迟强<sup>2</sup>, 陈小伟<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 鞍钢集团矿业有限公司, 辽宁 鞍山 114000)

**摘要:**随着工业互联网、人工智能技术和大数据技术的发展, 矿山行业迎来新一轮智能化建设的快速发展期, 一些非煤矿山企业逐步开始进行智慧矿山建设的探索。智能决策支持系统作为新一代决策支持系统, 已成为当前智慧矿山建设的重要组成部分, 且已在非煤矿山企业的业务场景中得到应用。本文在传统决策支持系统应用基础上, 归纳了智能决策关键技术, 并提出了一套基于智能决策技术的非煤矿山智能决策支持系统架构, 通过在某地下铁矿山的实际案例应用, 验证了架构的可行性, 对未来其他非煤矿山构建智能决策支持系统有一定指导意义。

**关键词:**非煤矿山; 智能决策支持系统; 智能技术

中图分类号: TD679

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2022)06-0017-07

**Abstract:** With the development of industrial Internet, artificial intelligence technology and big data technology, the mining industry ushered in a new round of rapid development period in intelligence construction, and some non-coal mining enterprises have gradually begun to explore the construction of intelligent mines. As a new generation of decision support system, intelligent decision support system has become an important part of current intelligent mine construction, and has been applied in the business scenarios of non coal mining enterprises. Based on the application of traditional decision support systems, this paper summarizes the key technologies of intelligent decision making, and proposes a set of intelligent decision support system architecture for non-coal mines based on intelligent decision making technology, and verifies the viability of the architecture through practical case application in an underground iron mine, which may have a certain guiding implications for building intelligent decision support system in other non-coal mines in the future.

**Key words:** non-coal mine; intelligent decision support system; intelligence technology

## 1 前言

矿产资源是保障国民经济健康发展的重要物质基础, 开发矿产资源是国家经济建设的支柱型产业<sup>[1]</sup>, 但现代化的矿业发展受到了其自身特点的限制, 特别是地下开采的非煤矿山, 生产和建设过程常受到多方面的条件约束, 如资源埋藏随机性、开采过程不确定性、作业区域离散性、生产设备移动性和生产环境高危性等。近年来, 我国非煤矿山开采逐步由浅层转向深部, 开采难度大, 生产效率低, 事故发

生频繁; 此外, 人工成本不断提升、国家对安全环保的要求愈发严格, 使得非煤矿山企业发展面临新的需求与挑战。

随着工业互联网、人工智能技术和大数据技术在矿山企业的广泛应用, 非煤矿山逐步找到企业发展问题的突破点, 开始从劳动密集型粗放管理向智能决策型科学管理进行转变, 智能化将是非煤矿山企业继工业化、自动化、信息化、数字化后下一个重要发展阶段<sup>[2]</sup>。为了能够科学、高效的利用智能化技术解决非煤矿山现代化发展上的难题, 需要为非煤矿山构建一套智能决策支持系统, 合理利用数据资源, 统一管理决策模型和智能算法<sup>[3]</sup>。智能决策支持系统作为矿山生产指挥调度的“大脑”, 以全局优化为目标实现企业“降本增效, 提质增安”的发展

[作者简介] 李永生(1981-), 男, 工程师, 主要从事智能矿山、矿业系统工程研究。

[引用格式] 李永生, 张宝金, 翟建波, 等. 非煤矿山智能决策支持系统架构设计与关键技术[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(6): 17-23.

需求,是非煤矿山企业进行智慧矿山建设的重要组成部分。

## 2 非煤矿山智能决策支持系统简述

20世纪70年代开始,决策支持系统(Decision Support System, DSS)开始出现在非煤矿山的信息化建设中,通过对数据分析和初步挖掘,决策支持系统可以为企业决策者提供企业决策信息<sup>[4]</sup>。智能决策支持系统(Intelligent Decision Support System, IDSS)从决策支持系统发展而来,在传统决策支持系统基础上丰富了业务决策模型库,融入了智能决策算法,是新一代决策支持系统。随着数据科学和智能技术的高速发展,“数据+算法+控制”的综合应用在智能决策类业务中发挥出越来越重要的价值,使得智能决策支持系统得到

企业的广泛关注。非煤矿山智能决策支持系统是将人工智能技术、运筹优化技术和数据分析技术相结合,构建决策业务模型进行自主智能分析,系统具备一定知识积累和模式发现能力,可以在原始数据的基础之上为决策者提供深度分析后的高价值信息,辅助非煤矿山企业安全生产和科学管理,对于部分应用成熟的决策模型甚至还可以直接下达业务决策指令,进行自动化作业调度。然而,智能决策支持系统当前仍处于发展阶段,不同业务场景下智能决策支持系统使用深度各异。根据智能决策支持系统在决策中扮演的角色,可以分为系统辅助决策、系统增强决策、系统自动决策三个阶段,业务价值和智能决策支持程度逐步增强,具体决策功能划分如图1所示。

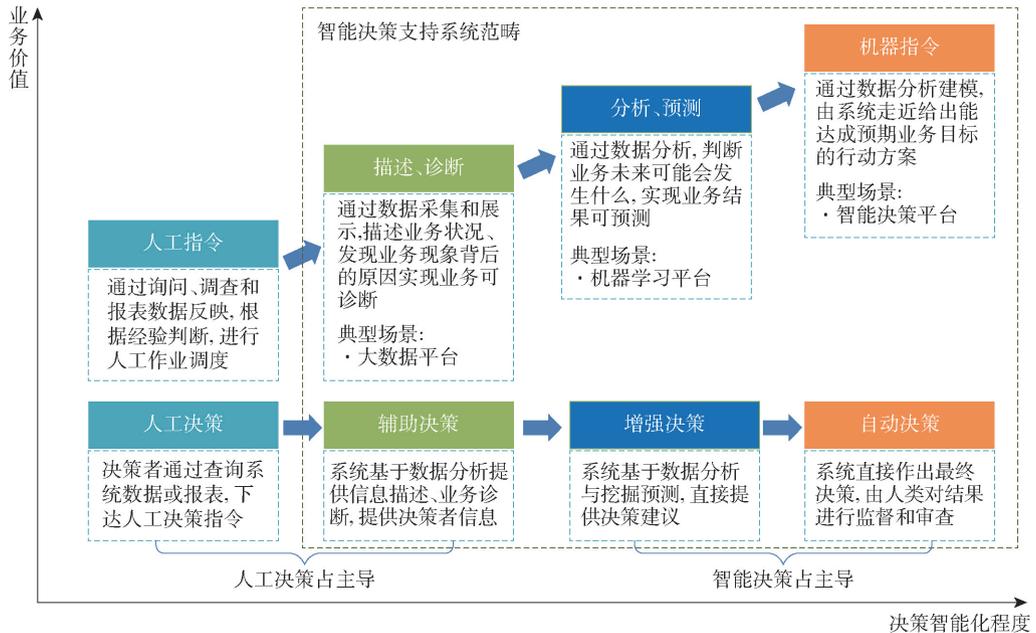


图1 智能决策支持系统决策功能划分图

### 2.1 非煤矿山智能决策支持系统关键技术

智能技术的发展水平决定了智能决策支持系统的应用高度,通常智能技术包括硬件装备和软件算法两个方面,本文主要研究软件算法层面的关键技术。近几年,AI摄像头、物联网平台、矿用特种机器人和5G通讯等技术不断发展,极大地提升了非煤矿山硬件装备及数据通讯水平,结合矿山部分生产工序少人化甚至无人化作业要求,越来越多的场景开始探索物体识别、信息预测、多目标优化、路径规划、模糊控制等智能应用。这就要求进一步优化完善此类智能应用的决策模型实例

和决策算法。通过对当前非煤矿山智能技术研究的应用统计,涉及非煤矿山的软件算法和优化技术主要包括决策支持系统、专家系统、神经网络、进化算法、支持向量机、机器学习、深度学习、运筹优化技术等。这些算法的典型算法模型、技术原理及适用场景等信息详见表1。

### 2.2 非煤矿山智能决策支持系统实施难点

矿山行业的生产过程与其他行业有所不同,特别是地下开采的非煤矿山,核心生产环节是矿石资源开采的动态生产过程,生产工艺连续性差,自动化程度较低,其生产建设本身就是一个复杂的离散型

表1 非煤矿山智能决策支持系统常用关键技术表

序号	名称	典型算法或模型	定义或原理	适用场景
1	决策支持系统(DSS)	①群决策支持系统; ②分布式决策支持系统	以企业信息管理系统为基础,通过对数据、知识和模型的综合应用,从而为决策者提供决策信息和依据	常用于统计分析、数据挖掘、联机分析类问题
2	专家系统(ES)		在专业知识与长期经验基础上,进行逻辑推理和判断,仿照人类专家处理解决复杂的专业问题	常用于解释、预测、诊断、规划类问题
3	神经网络(NN)	①反向传播算法; ②卷积神经网络; ③回归神经网络	是一种模仿动物神经网络行为特征,进行分布式并行信息处理的算法数学模型	常用于分类、函数拟合、压缩、图象识别类问题
4	支持向量机(SVM)	①线性 SVM; ②非线性 SVM; ③数值求解	是一种基于小样本数据的分类和预测技术,属于机器学习中的监督学习	常用于模式识别、文本分类类问题
5	进化算法(EA)	①遗传算法; ②蚁群算法; ③模拟退火算法; ④贪心算法	是受自然进化启发并模拟这一现象构建的一类启发式优化算法,按照自然界某种现象进行假设,然后模拟该现象的发展,进化构建出进化机制,进而使用该进化机制在算法的迭代过程中实现某一问题的优化目标	常用于组合优化、自适应控制、规划设计类问题
5	机器学习(ML)	①决策树; ②随机森林; ③人工神经网络; ④贝叶斯学习	是一门多领域交叉学科,专门研究计算机怎样模拟或实现人类的学习行为,以获取新的知识或技能,重新组织已有的知识结构使之不断改善自身的性能	常用于数据分析数据挖掘、模式识别、数据预测类问题
6	深度学习(DL)	①卷积神经网络模型; ②深度信任网络模型	是学习样本数据的内在规律和表示层次。它的最终目标是让机器能够像人一样具有分析学习能力,能够识别文字、图像和声音等数据	常用于搜索技术、数据挖掘、机器学习、机器翻译、自然语言处理类问题
7	运筹优化技术	①线性规划; ②混合整数线性规划; ③非线性规划; ④混合整数非线性规划	基于对现实问题进行准确描述刻画来建模,通过运筹优算法在一定约束条件下求目标函数最优解,对数据量的依赖性强,结果的可解释性强	常用于规划、调度、协同类问题

系统工程。非煤矿山进行智能决策支持系统建设同样无法摆脱矿山工程建设面临的本质特点:

(1)资源埋藏随机性。非煤矿山一般地质条件较为复杂,矿石品位分布不均,资源埋藏位置有一定随机性。

(2)开采过程不确定性。矿体赋存条件复杂多样决定了待开采区域地质状况多样性,且在时间和空间上呈动态发展的过程,开采过程中存在着大量不确定性。

(3)作业区域离散性。非煤矿山地下开采的作业场地一般不固定,采准工序、中深孔工序、回采工序和充填工序通常会在不同分层、不同位置同时作业,作业区域有一定离散性。

(4)生产设备移动性。受作业区域不固定影响,非煤矿山采矿设备和人员需随采矿进程进行不断转移,特别是采区关键生产设备具有一定的移

动性。

(5)生产环境高危性。非煤矿山通常位于偏远、高海拔和地下深部区域,一直以来都具备作业环境差、事故风险率高的特点。

(6)预算编制不合理性。对于矿山企业来说,在每年的11月份就要开始编制下一年的预算,由于缺乏数据分析模型和管理评价体系,往往只能根据往期历史数据,再结合实际经验进行修正调整,使得预算控制缺乏刚性约束,预算管理难以执行。

此外,非煤矿山开采信息准确性取决于矿床的探明程度,岩体剥离前矿体数据往往是不完备、有缺损、甚至有局部错误的,这些因素都增加了非煤矿山智能决策支持系统实施的难度。

### 3 非煤矿山智能决策支持系统应用现状

近年来,以机器学习、深度学习、多目标优化

算法和神经网络等算法为代表的人工智能技术在非煤矿山决策相关智能应用中发挥着越来越重要的作用<sup>[5]</sup>。一些学者基于智能决策技术在智慧矿山领域取得了不错的研究成果。如徐海等利用灰色系统理论,构建了产能灰色关联决策模型,根据矿山现实资源储量情况及开采技术条件帮助企业预测合理产能<sup>[6]</sup>。李国清等基于 PCA-BP 神经网络技术,构建了成本预测模型,研究了适用于现代矿山的成本核算方法<sup>[7]</sup>。何煦春等介绍了基于数据仓库技术的矿山决策支持系统架构,研究了一

套利用数据仓库、联机分析与数据挖掘技术的决策分析方法并对某金属选厂质检业务成功应用<sup>[8]</sup>。付文俊等设计并实现了一套矿井通风智能决策支持系统,结合矿井通风管理系统基本实现矿井通风的智能处理<sup>[9]</sup>。柯丽华等研究了如何基于资源价值最大化原则,利用回归分析方法确定矿山成本-产量函数关系,并在乌龙泉矿构建生产能力规划模型,辅助该矿山决策出最佳的生产能力<sup>[10]</sup>。经分析,非煤矿山智能决策业务场景所使用的主要决策理论算法对照见表2。

表2 非煤矿山智能决策支持系统理论方法与研究内容对照表

序号	研究内容	支持 向量 机	智能决策理论与算法													
			神经 网络	专家 系统	决策 支持	机器 学习	深度 学习	进化算法				统计学	运筹学	其他 算法		
								多目标 优化	模拟退 火算法	遗传 算法	蚁群 算法	回归 分析	线性 规划			
1	矿山生产能力优化											√			√	
2	矿山的成本预测		√													
3	采场结构动态优化						√									
4	矿山采掘计划优化				√										√	
5	品位联合优化					√										
6	选厂产率与品位优化				√				√							
7	按需通风、智能排水			√		√										
8	短期生产执行计划		√	√	√		√			√	√					
9	矿产资源评价及预测		√	√	√											√
10	露天矿卡车调度优化		√			√			√	√	√					√
11	充填材料强度预测	√	√			√										√
12	充填优化设计		√	√		√	√					√		√		
13	矿坑回填设计优化	√	√			√				√						
14	采矿工艺及设备选型		√	√						√						

#### 4 非煤矿山智能决策支持系统架构设计

构建非煤矿山智能决策支持系统,需要对数据、模型、算法和应用进行综合集成。在数据采集方面,需要将不同来源、多种形式的业务数据按照统一标准进行集中存储;在数据治理方面,需要将数据抽取、转换、清洗后形成数据立方体,组建决策主题;在模型算法方面,需要将非煤矿山复杂的业务管理需求转换为决策模型实例,并从众多智能算法中寻找最优算法;在决策应用方面,需要将决策结果呈现或对其它系统优化指导。因此,智能决策支持系统应位于智慧矿山架构的顶层,是智慧矿山建设中“智慧”模块的核心。综上所述,本智能决策支持系统

架构包括数据源、数据汇接、模型分析、决策应用和平台管理五个核心模块,系统架构如图2所示。

(1)数据源模块。数据源模块是非煤矿山智能决策支持系统的数据来源,通常为已建成的系统,涵盖智慧矿山五级架构的二级过程控制系统(如有轨运输、破碎提升、胶带运输、通风系统、排水系统、供配电系统等)、三级生产执行系统(如生产管理、安全管理、设备管理、物资管理、质计量系统、能源管理等)和四级运营管理系统(如ERP系统)的业务数据。此外,还包括地测采业务的资源管理系统专业模型数据和视频监控系统的非结构化码流数据。根据矿山决策用户的实际生产经营管理需求,从对应

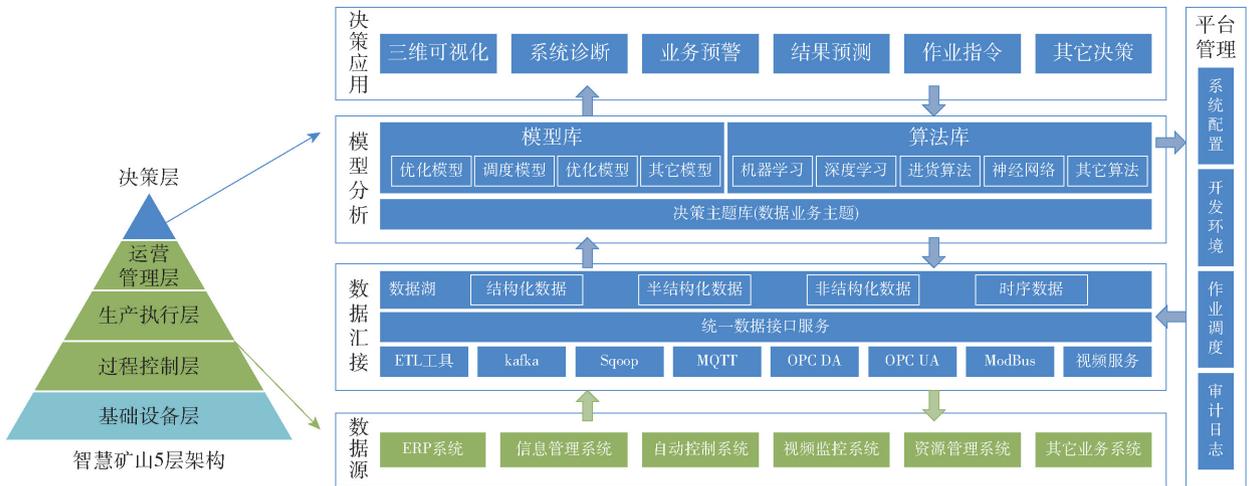


图2 非煤矿山智能决策支持系统架构图

的业务系统中采集元数据构建决策主题。

(2)数据汇接模块。数据汇接模块南向与数据源模块衔接,主要负责数据源模块的数据采集、数据清洗、接口服务和数据存储。数据汇接模块包含ETL工具和多种接入协议(如Kafka、Sqoop、MQTT、Modbus、OPCUA、视频协议等),可以对接可编程控制器(PLC)、分布式控制系统(DCS)、数据采集与监视控制系统(SCADA)、关系数据库和自定义API接口。此外,数据汇接模块还包含统一接口服务,用于接口管理、数据集成和消息集成管理。接口管理能够从接口设计、开发、管理到发布进行全生命周期管理;数据集成能够支持文本、消息、API接口、结构和非结构化数据等多种数据源之间的灵活、快速、无侵入式的数据集成;消息集成能够提供发布订阅、消息轨迹、资源统计、监控报警等消息云服务。最后再将统一接口服务下的结构化数据、半结构化数据、非结构化数据和时序数据在数据湖中进行分布式存储。通过数据汇接模块可以将各系统的设备数据打通、汇聚,统一进行管理,解决各个系统烟囱式发展的问题,让数据的价值最大化。

(3)模型分析模块。模型分析模块是智能决策支持系统的核心模块,主要负责决策主题管理、决策算法库管理和决策模型库管理。模型分析模块南向与数据汇接对接,根据矿山用户实际管理需求定制决策任务,抽取数据湖中相关数据创建决策主题,结合业务机理构建解决问题的决策模型,并利用模型库对各类决策模型实例进行统一管理,如评价类的矿山重点作业区域安全等级评价模型、优化类的排产计划优化模型、调度类的设备时间调度模型、预测

类的设备预维护模型、其他还有成本核算模型、急演练决策支持模型等。算法库是智能决策支持系统的“智能化”的主要驱动力,包含主流的算法工具管理,如机器学习、深度学习、进化算法、神经网络、支持向量机等,这些算法工具对处理和优化决策模型提供了必要的保障。

(4)决策应用模块。该模块在智能决策支持系统中主要负责决策结果的展示和交互。在辅助决策和增强决策层面,可实现三维可视化、系统诊断、业务预警和结果预测等展示。对自动决策层面,将决策指令下发给控制系统或智能设备,同时进行作业执行状况监测,对执行偏差的任务再次下达决策指令进行决策纠偏,从而形成决策执行闭环。

(5)平台管理模块。该模块是智能决策支持系统的运行管理模块,包含系统配置、作业调度、开发环境、审计日志等功能。系统权限用户可以通过参数配置和调整,实现与矿山业务系统的无缝对接。

本系统架构结合非煤矿山决策业务特点,有针对性地进行系统架构设计,兼顾系统健壮性、可拓展性和可维护性的同时,重点突出智能决策支持的功能和作用,使用户在建设智能决策支持系统时,将重点放在数据分析、智能算法和模型库构建等内容,而非花更多精力研究数据采集、存储、接口管理等数据基础管理类工作。

## 5 案例应用

本文提出的非煤矿山智能决策支持系统成功应用在辽宁某铁矿山企业,其铁矿石生产规模600万t/a,采用无底柱分段崩落法采矿工艺,阶段高度

180 m,分段高度 18 ~ 22 m。与其他非煤矿山类似,生产计划是指导该矿山有序生产的核心指标,利用智能决策支持系统对该矿山中长期生产计划和生产执行计划进行决策优化。通过数据汇接模块采集资源管理系统、生产管理系统、设备管理、物资管理和质量管理的相关业务数据,经过抽取、转换后将数

据进行统一存储管理,调用智能算法,处理年生产计划决策模型、月生产计划决策模型和生产执行计划决策模型,最终将决策信息发送给生产管理系统相关环节,进行作业优化调整,保障矿山科学合理开采,取得良好效果。生产计划决策支持流程如图 3 所示。

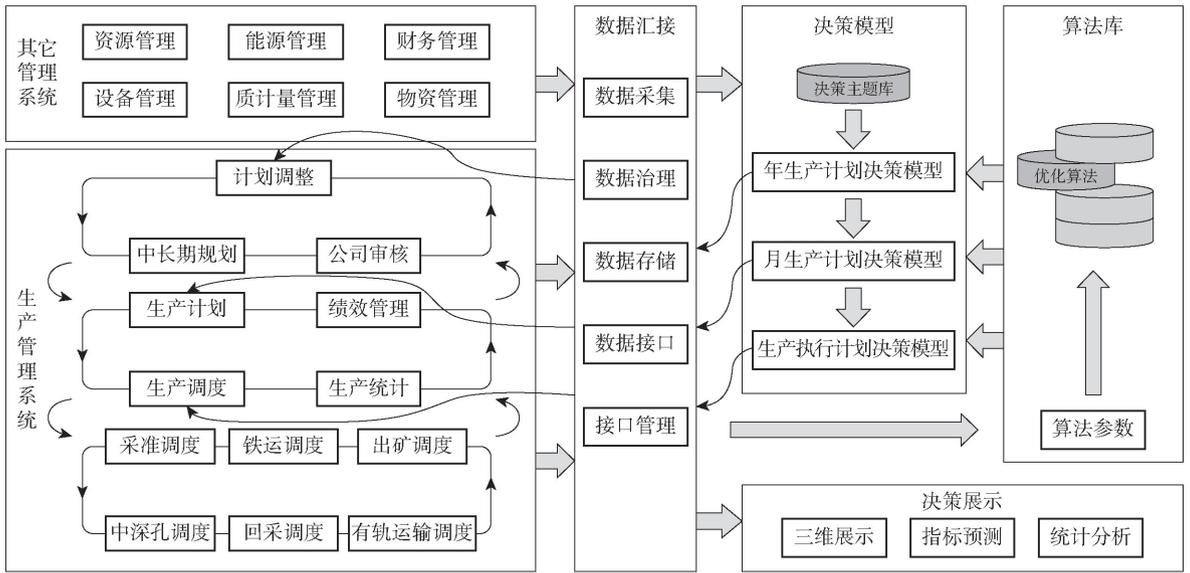


图 3 某铁矿生产计划智能决策支持流程图

生产计划优化模型属于非线性最优化问题,采用整数规划与动态规划结合的数学规划方法进行求解。根据矿山三级矿量、地质空间信息、年度预算、设备生产能力、设备良机率、设备维修计划等参数,采用回归分析方法对矿山实际情况进行拟合,以反映各参数差别对生产能力的影响,据此构建矿山生产能力规划模型,用于决策规划年度生产计划、月度生产计划和生产执行计划,提升人工排产设计的科学性。除生产计划优化决策外,该矿山还利用机器学习技术从设备运行历史数据中提取关键特征并进行学习训练,构建故障预测模型;利用机器视觉技术进行胶带运输系统的皮带跑偏、撕裂和洒料等监测,均取得良好效果。

系统采用 B/S 架构,前后端分离方式开发,开发工具分别为 Ant design React 和 Springboot,利用 ROMA + IOT + OpenGauss 组合构建了系统数据汇接模块,进行业务元数据采集、数据清洗和数据存储。智能决策支持系统功能界面如图 4 所示。

## 6 结论

通过智能决策支持系统的建设,可以将先进的

智能技术应用到非煤矿山整个生产过程中,帮助企业探索非煤矿山的最优规划、最优管理和最优控制。本文针对非煤矿山生产建设特点和智能技术发展现状,提出了一套适用于非煤矿山企业的智能决策支持系统架构设计,对其所涉及的关键技术进行了研究,并成功应用在某铁矿山。文中详细描述了铁矿山系统架构、功能体系和实现过程的应用情况,通过良好的应用实践表明,本非煤矿山智能决策支持系统架构具有以下优点:

(1) 专业性强。系统面向决策用户的实际管理需求,将矿山复杂的决策问题转换为决策业务主题,再结合决策案例选择最优算法并快速构建决策业务模型,为决策者提供深度分析的信息,提升决策效率和准确度。

(2) 进化性强。系统设计了独立算法库,有效管理适用于矿山业务特点的现代数学和智能算法,保障系统不断提升自身的核心运算能力,加快最优决策算法的遴选过程。

(3) 适用性强。系统设计了独立模型库,支持单维度简单决策模型和多维度复杂决策模型,具有较强的系统柔性,适应非煤矿山决策主题中多因素、



图4 某铁矿智能决策支持系统界面

多目标、动态性的业务特点。

(4)集成性强。系统设计了数据汇接模块,有效进行业务数据整合集成,结合决策指导后的历史数据还能验证上线决策模型的决策质量,建立决策优化闭环。

#### [参考文献]

- [1] 于润沧. 中国矿业现代化的战略思考[J]. 中国工程科学,2012,14(3):27-36.
- [2] 周文略,连民杰. 地下矿山智能生产控制与管理建设体系研究[J]. 非煤矿山,2015(2):117-121.
- [3] 罗香玉,李嘉摘,郎丁. 智慧矿山基本内涵、核心问题与关键技术[J]. 工矿自动化,2019,45(9):61-64.
- [3] 顾清华,江松,李学现,等. 人工智能背景下采矿系统工程发展现状与展望[J]. 非煤矿山,2022(5):10-25.
- [4] 黄解军,叶发旺,齐培培,等. 基于GIS的矿山决策支

持系统[J]. 非煤矿山,2009(3):96-99.

- [5] 贺耀宜. 智慧矿山评价指标体系及架构探讨[J]. 工矿自动化,2017,43(9):16-20.
- [6] 徐海,罗周全,王雪艳. 地下非煤矿山合理产能灰色关联优选[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012,31(3):327-330.
- [7] 李国清,吴炳书,侯杰,等. 地下非煤矿山采矿成本预测模型[J]. 非煤矿山,2022(5):62-69.
- [8] 何煦春,胡乃联,李国清. 基于数据仓库的矿山企业决策支持系统研究[J]. 中国矿业,2007,16(4):4-7.
- [9] 付文俊,杨富强,倪景峰,等. 矿井通风智能决策支持系统研究[J]. 建井技术,2018,39(5):29-32.
- [10] 柯丽华,胡谱,叶义成,等. 乌龙泉矿生产能力规划及决策分析[J]. 矿冶工程,2017,37(3):148-151.