

特别推荐



移动扫码阅读

王国法,赵路正,庞义辉,等.煤炭智能柔性开发供给体系模型与技术架构[J].煤炭科学技术,2021,49(12): 1-10. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.12.001

WANG Guofa, ZHAO Luzheng, PANG Yihui, et al. Model and technical framework of smart flexible coal development-supply system[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(12): 1-10. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.12.001

煤炭智能柔性开发供给体系模型与技术架构

王国法^{1,2}, 赵路正³, 庞义辉¹, 吴立新³, 管世辉³

(1.中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2.煤炭科学研究总院, 北京 100013; 3.煤炭工业规划设计研究院有限公司, 北京 100120)

摘要:针对新时期下我国煤炭资源安全稳定供给难题,系统分析了煤炭资源存在的开发供给不均衡、需求变化不确定等矛盾,剖析了提升煤炭高质量稳定供给能力存在的主要问题,提出了煤炭智能柔性开发供给技术体系与建设思路。系统分析了煤炭智能柔性开发供给体系的技术内涵与特征,提出了综合考虑煤矿生产能力柔性系数与煤炭运销能力柔性系数的煤炭开发供给柔性度的概念,采用运筹学等方法建立了煤炭智能柔性开发供给响应模型,基于物联网、区块链等技术建设全国煤炭供需监测预警平台(中心),采用分布式技术对煤炭全产业链数据进行监测分析,预测煤炭开发供给柔性度,确定由煤矿、运销中心和消费区组成的供应链最优供给方案。分析了构建煤炭智能柔性开发供给体系的核心要素,研究了基于全国煤炭供需监测预警平台(中心)的煤炭智能柔性开发供给支撑技术体系,主要包括生产端支撑技术、运输端支撑技术、消费端支撑技术与基础平台支撑技术,提出了煤炭智能柔性开发供给运行模式。

关键词:智能柔性开发供给响应模型;柔性系数;生产系统柔性;煤炭运输柔性;智能化开采

中图分类号:TD821;TD984

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)12-0001-10

Model and technical framework of smart flexible coal development-supply system

WANG Guofa^{1,2}, ZHAO Luzheng³, PANG Yihui¹, WU Lixin³, GUAN Shihui³

(1.CCTEG Coal Mining Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2.China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

3.Coal Industry Planning Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: Aiming at the problem of safe and stable supply of coal in China, this paper systematically analyzes the contradiction of unbalanced development and supply of coal resources and the uncertainty of demand change, analyzes the main problems existing in improving the ability of high-quality and stable supply of coal, and puts forward the technical system and construction idea of smart flexible coal development-supply. The technical connotation and characteristics of smart flexible coal development-supply system are systematically analyzed, and the concept of flexible coal development and supply is put forward, which comprehensively considers the flexible coefficient of coal production capacity and the flexible coefficient of coal transportation and marketing capacity. The response model of smart flexible coal development and supply is established by operational research methods. The national coal supply and demand monitoring and early warning platform/center should be built based on the Internet of Things, block chain and other technologies, and distributed technology is used to monitor and analyze the data of the whole coal industry chain, predict the flexibility of coal development and supply, and determine the optimal supply plan of the supply chain composed of coal mines, transportation and distribution centers and consumption areas. This paper analyzes the core elements of building a supply system for the smart flexible coal development, coal supply and demand is studied based on the national monitoring and early warning platform/center of coal supply support intelligent flexible development technology system, mainly including production side supporting technology, transportation and supporting technology, the consumption end support and foundation platform support technology, smart flexible coal development-supply operation mode is proposed.

Key words: smart flexible development-supply response model; flexibility factor; production system flexibility; coal transport flexibility; smart coal mining

收稿日期:2021-08-28;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674243,52004124);中国煤炭科工集团科技创新创业专项资金资助项目(2021-MS001)

作者简介:王国法(1960—),男,山东文登人,中国工程院院士,中国煤科首席科学家,博士生导师。E-mail: wangguofa@tdkcsj.com

0 引言

煤炭是我国的主体基础能源,是可以实现安全高效开发与清洁低碳利用最经济、最安全的矿产资源^[1-2],改革开放以来,我国煤炭开采量达到约 827 亿 t,为国民经济和社会发展提供了坚实的能源安全保障^[3]。

“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”目标的实现,必将推动我国广泛而深刻的经济社会系统性变革。但是碳达峰不是能源达峰,碳中和也不是“零碳”,美国、日本、德国等发达国家实现碳达峰后仍有 10~20 年的煤炭消费平台期^[4-5],且我国能源资源禀赋与发达国家存在本质差异,不能照搬国外的发展模式。基于我国经济、社会和能源发展规律与发展要求,能源供应安全是能源转型的根基,煤炭保障我国能源安全的主体地位短期内难以改变。

近年来,受极端天气、疫情等突发事件影响,我国能源需求呈现出较大的波动性与不确定性,新能源的不稳定性和国内外经济环境的变化,增加了能源需求侧的不确定性,亟需建立适应需求侧不确定性的能源智能柔性开发供给保障体系,保障国家能源安全稳定供给^[6]。2020 年,我国原油对外依存度达 73%,天然气对外依存度达 43%,在国际能源博弈和地缘政治冲突不断加剧的背景下,油气进口安全风险增加。风、光等新能源短期内难以形成稳定可靠的供给,且恶劣天气下其不稳定的供给增加了新能源体系的脆弱性,尚难以大规模接入我国现有能源供给体系。我国煤炭资源储量丰富,构建煤炭智能柔性开发供给体系,利用煤炭、煤电作为提升新能源占比的稳定器和压舱石,实现新能源和煤炭相互助力、耦合发展将是我国形成多种能源融合稳定供给的必由之路^[7-8]。

我国在推进高质量发展进程中,受产业调整和能源转型等多重因素影响,煤炭市场波动异常剧烈,煤炭价格不稳定性因素增大,甚至出现由于缺煤导致拉闸限电等现象,煤炭现有生产与供给模式将难以适应新发展要求,亟需建立以煤矿智能化为支撑的煤炭智能柔性生产和供给体系,充分发挥煤炭为能源安全兜底、为国家安全兜底的保障作用。

1 煤炭高质量稳定供给需求分析

1.1 煤炭高质量稳定供给现状与挑战

我国相对富煤、贫油、少气的资源赋存条件决定了煤炭在今后相当长一段时间内仍将是我国的主体

能源,油气资源的高度对外依赖性需要稳定的煤炭供给发挥保障能源安全压舱石的作用,但我国煤炭资源开发供给的不均衡性和需求变化的不确定性给能源安全稳定供给带来巨大挑战,主要表现在以下 3 个方面。

1) 煤炭生产区域不均衡加剧了煤炭供需的区域性失衡局面^[9]。我国煤炭资源分布区域极不平衡,生产和消费空间格局存在很大错位。东部地区浅层煤炭资源逐渐枯竭,煤炭资源开发深度逐年增加,开发难度加大,但东部地区作为社会经济最发达的地区,是我国能源消费的主要区域,对能源的需求逐年增加,每年需要从外部调入大量的煤炭资源;西部地区对能源的需求较少,但优质煤炭资源储量丰富,开发潜力巨大,已经成为我国煤炭主产区^[10-11]。

截至 2021 年 6 月,我国西部地区煤矿数量、产能分别约为 2 316 处、23.37 亿 t,占全国的 55.1%和 54.3%。东部地区煤炭产量占比已经由 1978 年的 42.3%下降到 2020 年的 6.9%;西部地区煤炭产量占比由 1978 年的 21.2%增加到 2020 年的 59.7%。2020 年晋陕蒙三省(区)原煤产量 27.9 亿 t,占全国的 71.5%,三省(区)调出煤炭约 17.3 亿 t^[12]。2019 年,除晋陕蒙新四省(区)外,其他省(区)煤炭生产量均小于消费量,尤其是山东、江苏和河北煤炭缺口达 2 亿 t 以上,缺口达 1 亿 t 以上的省份还有广东、浙江、辽宁、河南和湖北等地区;东部地区煤炭产量为 2.23 亿 t,煤炭调入量为 13.24 亿 t,进口量为 1.64 亿 t,煤炭消费量为 15.24 亿 t,东部地区煤炭对外依存度高达 85%左右^[13]。随着煤炭生产继续向西部资源富集区聚集,将进一步加剧煤炭供需的区域性矛盾。

2) 煤炭需求季节性波动和时段性紧张局面加剧。煤炭需求季节性波动的峰谷差值逐渐加大,对煤炭供给柔性要求增加。2017—2020 年全国商品煤消耗量在每年的 12 月份出现峰值,平均约为 3.8 亿 t;在每年的 2 月份出现峰谷,平均约为 2.9 亿 t。近年来,煤炭消费的峰谷差值呈逐渐加大趋势,2017—2020 年峰谷差值分别为 0.58 亿 t、0.64 亿 t、0.7 亿 t 和 1.35 亿 t,如图 1 所示。

极端天气、新冠疫情等突发事件增大了煤炭需求的不稳定性。近年来由于极端天气逐年增加,煤炭供需频繁出现区域性、时段性紧张的现象,导致拉闸限电、煤价暴涨等一系列不良现象。如 2021 年 9 月,“拉闸限电”现象已波及黑龙江、吉林、辽宁、广东、江苏等 10 余个省份,而煤价也涨至历史高点,煤炭供需异常紧张的现象极不利于煤炭工业的可持续

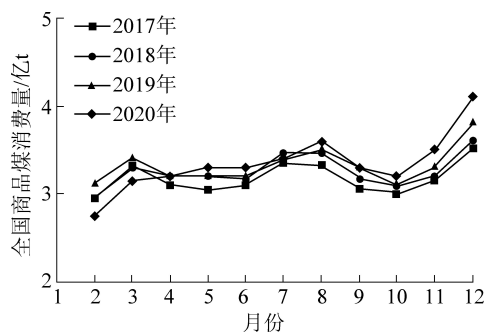


图1 2017—2020年全国商品煤月度消费量

Fig.1 National monthly consumption of commercial coal from 2017 to 2020

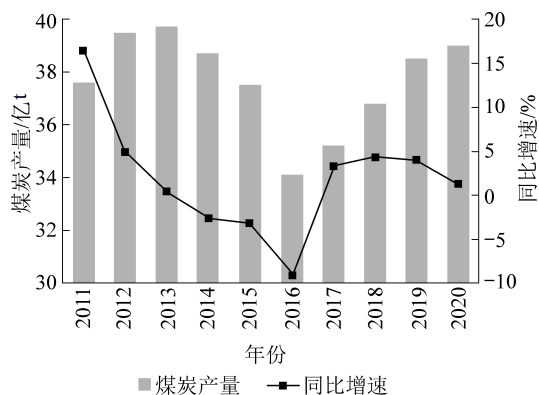


图2 2011—2020年全国煤炭生产情况

Fig.2 National coal production from 2011 to 2020

发展,对国家经济社会稳定发展也造成了较大影响。

3)煤炭对能源调峰作用的重要性逐年凸显,增强了构建煤炭智能柔性供给体系的迫切性与重要意义。2020年,风电、太阳能发电总装机容量突破5.3亿kW,发电量占比9.5%^[14];到2025年,风电、太阳能发电量预计占比16.5%;到2030年,风电、太阳能发电装机总量预计达到12亿kW。随着新能源加速发展和用电结构调整,由于风电、光伏等新能源的波动性和间歇性,电力系统对煤电调峰容量的需求将不断提高。同时,对煤电调峰能力要求越来越高,相应地对电煤供给柔性的需求也随之增大。

1.2 煤炭高质量稳定供给需求与趋势

当前,中国经济由高速增长阶段转向高质量发展阶段,高质量发展亟需高质量的能源供给支撑。受制于大规模、低成本储能技术还未能取得实质性突破,新能源尚难以全面或高比例纳入现有能源体系,煤炭资源清洁低碳开发利用和“新能源+储能”两大能源转型方向将长期并存。能源低碳转型迫切需要构建更高质量的煤炭供给保障体系,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中明确提出:“提高能源供给保障能力,增强能源持续稳定供应和风险管控能力,实现煤炭供应安全兜底”。2021年10月9日,国家能源委员会会议上强调:“能源需求不可避免继续增长,必须以保障安全为前提构建现代能源体系,不断丰富能源安全供应的保险工具”。

我国煤炭年产量达到近40亿t,如图2所示,单个工作面的年生产能力突破1500万t,基本实现了安全、高效、高采出率开采,但煤炭高质量稳定供给能力仍较低,主要表现在以下3个方面:

1)现有生产方式的产能调节能力有限,难以适应需求侧异常波动。传统煤炭开采方式需要大量的人力支撑,且生产效率较低、效益较差,为维持矿井正常运营及盈利目标,煤矿必须完成一定的产量目

标。由于传统煤炭开采方式对工人数量具有较强的依赖性,难以实现在煤炭需求高峰时段短期内进行增人、增产,并在煤炭需求低谷时段进行大规模裁员减产,因此,亟需加快推进煤矿智能柔性化建设,建立煤矿智能柔性供给生产系统,在保障生产安全、降低开采成本、保证开采效率与效益的前提下,根据需求侧的变化实现煤炭产量的智能柔性调整。

2)由于缺少对煤炭需求的精准预测、预警,现有煤炭生产与运输衔接方式制约了短期内实现煤炭智能柔性供给。煤炭运输主要通过铁路、公路和水运,但铁路的装车能力、公路的发车能力、港口码头的运输能力等需要国家对各种供应物资进行统筹安排,尤其是铁路运输,煤炭季节性、突发性调峰协调难度大。另外,由于煤炭运输时间较长,大秦线的运输需要20多天,由山西到中南地区、东南沿海地区铁路运输也要7~15d,应急功能有限,亟需基于新一代信息技术对煤炭需求进行超前预测、预警,提前对煤炭生产运输进行协调安排。

3)现有生产管理方式难以适应供给侧弹性变化要求。根据2021年4月应急管理部、国家矿山安全监察局、国家发改委、国家能源局联合发布修订后的《煤矿生产能力管理办法》相关规定,煤矿月度原煤产量不得超过生产能力的10%,调节范围较小,难以发挥调峰作用。

提高煤炭开发供给体系的柔性关键在于提高生产端、运输侧的柔性。近年来,新一代信息技术与煤炭开发、运输等技术进行了深度融合发展,推动构建了减人、增安、提效的煤矿智能化开发、运输系统,为传统开发方式受制于人数多、产能调整成本高、难以实现柔性供给等难题提供了解决方案^[15-19]。同时,基于物联网、大数据、区块链等技术,构建煤炭供需预测模型,优化现有煤炭运输仓储体系,为实现煤炭运输侧的超前预测与柔性供给提供了技术

支撑。

2 煤炭智能柔性开发供给响应模型

2.1 煤炭智能柔性开发供给体系内涵与特征

煤炭智能柔性开发供给体系是将新一代信息技术与煤炭开发、运输、仓储、需求预测等进行深度融合,建立以数字化为基础、智能化赋能的多层次网状煤炭开发供应链,实现对煤炭需求的超前精准预测,并基于预测结果对煤炭生产、运输、仓储等进行自动智能优化调节,实现煤炭资源安全、高效、稳定、柔性供给。

生产系统柔性是指生产系统能够根据外部市场的需求变化而进行生产能力调整的动态响应^[20],煤矿生产系统柔性是智能化柔性煤炭开发供给体系的核心,主要依托煤矿智能化开采技术装备及智能管理系统实现。由于煤矿智能化开采技术可以大幅减少井下作业人员数量,煤矿生产能力不再受煤矿作业人员数量的制约,可以根据外部需求变化对矿井生产能力进行动态调整,当市场需求旺盛时可快速增加产能,当市场需求低迷时可低成本抑制产能,能够充分满足订单式生产要求。

煤炭供给柔性则主要依托大数据、区块链等技术,对煤炭供给与需求的平衡度进行超前预测预警。基于区块链技术的分布式采集存储、信息不可篡改、智能合约等特点,并结合大数据技术对低价值密度、海量多源信息进行数据建模,构建全国煤炭供需监测预警平台/中心,对煤炭供需柔性度进行分析计算,如图3所示,根据供需柔性度对煤炭的需求量进行精准预测反馈,并将预测结果反馈给煤炭生产、运输、仓储等各个环节,使各环节能够及时进行调整。

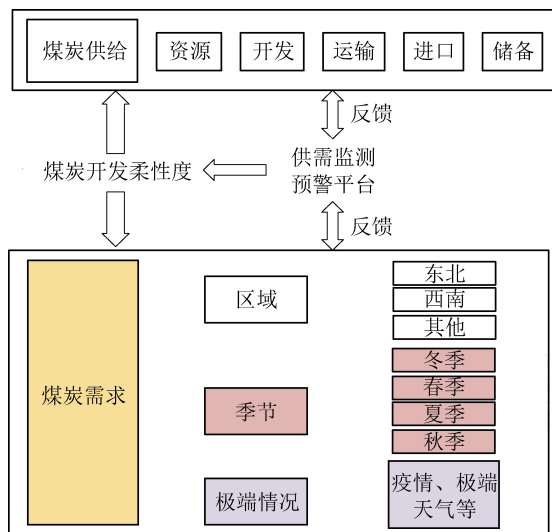


图3 煤炭开发供给柔性度计算逻辑

Fig.3 Coal development supply flexibility calculation logic

煤炭智能柔性开发供给体系应以最低的生产、运输成本和最优的调控能力对煤炭供需变化进行超前快速响应,该体系应具有敏捷性、精准性和协同性的特征。① 敏捷性。敏捷性的本质是对煤炭供需变化快速精准感知,并将市场信息高效地传递、反馈给煤炭生产供给系统。煤炭智能柔性开发供给体系基于大数据、物联网、区块链、人工智能等新一代信息技术,实现需求驱动、超前预测、智能预警、快速响应、按需生产,对生产运输侧进行灵活调整。② 精准性。采用物联网、区块链等技术对煤炭生产、运输、销售、利用等各种数据进行全面采集与深度挖掘,精准洞察生产运输侧与需求侧的变化,超前制定合理的生产、运输、仓储方案。③ 协同性。煤炭供需平衡体系是一个十分复杂的系统,需要生产、运输、仓储、消费等整个供应链上的各部门进行协同作业,且每个环节内部也需要多系统的协同,从而实现上下游产业链之间的协同。

2.2 煤炭开发供给柔性度

煤炭开发供给柔性度可用煤矿生产能力柔性系数和煤炭运销能力柔性系数表征。煤矿生产能力柔性即煤矿生产能力、实际产量能够灵活变化以及时应对煤炭需求变化的能力;煤炭运销能力柔性即煤炭供应链上的铁路、港口等煤炭运输能力应对煤炭需求变化的能力。

1) 煤矿生产能力柔性系数。煤矿生产能力柔性系数表示方式如下:

$$U_1 = \frac{\sum (\varphi_i + z_i)}{\sum X_i} \quad (1)$$

式中: U_1 为煤矿生产能力柔性系数; i 为某煤矿 ($i = 1, \dots, I$); φ_i 为煤矿 i 的基本生产能力; z_i 为煤矿 i 的科学增产能力; X_i 为煤矿 i 的实际产量。

核定基本生产能力是矿井常态生产计划依据,科学增产潜能是根据矿井生产技术条件和智能化水平核定的具有安全可靠增产能力。若 $U_1 = 1$, 则说明煤矿正处于全负荷生产;若 $U_1 > 1$, 则说明煤矿具有柔性增产潜力;若 $U_1 < 1$, 则说明煤矿正处于超安全能力生产。

2) 煤炭运销能力柔性系数。煤炭运销能力柔性系数表示方式如下:

$$U_2 = \frac{\alpha + \alpha_z}{(M + X_p)/2} \quad (2)$$

式中: U_2 为煤炭运销能力柔性系数; α 为煤炭每周实际运输量; α_z 为每周可增加运量潜力; M 为每周煤炭销售量; X_p 为每周煤炭生产量。

若 $U_2 = 1$, 则说明产-运-销能力基本平衡; 若 $U_2 > 1$, 则说明运输能力富裕, (因生产侧、消费侧一般都会有一定库存, 用短期生产与消费量可以体现产-运-销情况, 敏感捕捉运输销售端的问题); 若 $U_2 < 1$, 则说明运力不足。

3) 煤炭开发供给综合柔性度。煤炭开发供给柔性度表示方式如下:

$$U = \frac{X_p + \alpha}{2(K - H)} \quad (3)$$

式中: U 为煤炭开发供给柔性度; K 为每周煤炭消费总量; H 为每周煤炭进口量。

令 $U=1$ 为供给平衡点, 可设定 $U=0.99$ 为紧平衡点, 高于 1 则表明供应侧宽松或出现过剩, $0.9 \leq U < 0.95$ 黄色预警, $U < 0.90$ 红色预警。

可结合煤矿生产能力柔性系数与煤炭运销能力柔性系数对煤炭开发供给综合柔性度的具体内涵及产生原因进行分析判断。

2.3 煤炭智能柔性开发供给响应模型

基于上述分析, 将煤炭开发供给体系细分为煤矿(I 个)、运销中心(J 个)、煤炭消费区(K 个)及全国煤炭供需监测预警平台/中心, 全国煤炭供需监测预警平台/中心采用区块链技术实现数据的分布式采集分析, 利用区块链技术的不可篡改性、可追溯和集体维护等特性, 可有效解决煤炭供给运销过程中的寡头垄断、信息壁垒等诸多问题。采用大数据技术对监测信息进行数据建模分析, 制定最优的供给运销方案并自动向产业链各节点进行分发, 如图 4 所示。

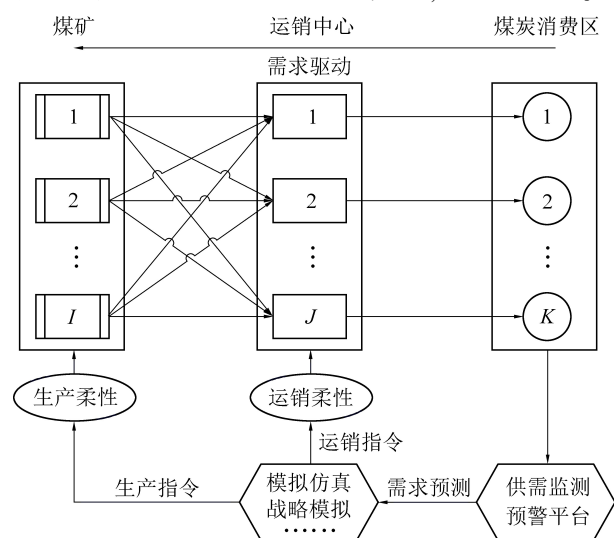


图4 煤炭智能柔性开发供给体系模型

Fig. 4 Model of coal smart flexible development supply system

煤炭供应链的柔性主要体现在煤矿生产、煤炭运销环节中, 表现为生产柔性和运销柔性, 根据需求预

测值, 以及每种柔性系数对供应链总体柔性度的贡献不同, 确定期望柔性, 以总成本最小为优化准则, 通过模型确定整个供应链最优的生产、运输方案。

煤炭产销柔性响应模型是煤炭智能柔性开发供给体系的底层逻辑, 主要目的是基于不同的煤炭开发供给柔性, 以煤矿、运销中心和煤炭消费区组成的供应链最优成本为准则, 确定供应链结构和煤矿产量。借鉴原油等领域, 采用运筹学方法^[21-26], 建立煤炭产销供应链的总成本模型如下:

$$\min Y = \left(\sum_i f_{li} q_{li} + \sum_i m_{li} X_i \right) + \left(\sum_j f_{2j} q_{2j} + \sum_{jk} m_{2j} D_k y_{jk} + \sum_{ij} c_{ij} C_{ij} \right) + \left(\sum_{jk} d_{jk} D_k y_{jk} \right) \quad (4)$$

其中: Y 为煤炭供应链的总成本; f_{li} 为煤矿固定成本; q_{li} 为煤矿设置, 取值为 1 或 0, 取 1 时代表选择该煤矿供给, 取 0 时代表不选择该煤矿供给; m_{li} 为煤矿 i 生产煤炭的单位成本; f_{2j} 为运销中心的固定成本; m_{2j} 为运销中心 j 运销煤炭的单位运销成本; D_k 为煤炭消费区 k 的煤炭需求量; c_{ij} 为从煤矿 i 到运销中心 j 的运输煤炭的单位成本; C_{ij} 为从煤矿 i 运输到运销中心 j 的煤炭数量; d_{jk} 为从运销中心 j 到煤炭消费区 k 运输煤炭的单位成本; q_{2j} 为运销中心设置, 取值为 1 或 0; y_{jk} 为运销中心 j 对煤炭消费区 k 的服务, 取值为 1 或 0, 取 1 时代表选择该运销中心为煤炭消费区服务, 取 0 时代表不选择。即煤炭产销供应链总成本包括 3 部分: ①煤矿生产的固定成本和变动成本; ②运销中心搬运和库存产品变动成本和从煤矿到运销中心的运输成本; ③运销中心到煤炭消费区的运输成本。约束条件如下:

$$X_i \leq (\varphi_i + z_i) q_{li} \quad (\forall i) \quad (5)$$

$$\xi_i \leq X_i \leq \zeta_i q_{li} \quad (6)$$

$$\alpha_j q_{2j} \leq \sum_k D_k y_{jk} \leq \beta_j q_{2j} \quad (\forall j) \quad (7)$$

$$\sum_j y_{jk} \geq 1 \quad (\forall k) \quad (8)$$

$$X_i = \sum_j C_{ij} \quad (\forall j) \quad (9)$$

$$\sum_{ij} C_{ij} = \sum_k D_k \quad (10)$$

$$\sum_i C_{ij} = \sum_k y_{jk} D_k \quad (\forall j) \quad (11)$$

$$X_i, C_{ij} \geq 0 \quad (\forall i, j) \quad (12)$$

$$q_{li}, q_{2j}, y_{jk} = 0 \text{ 或 } 1 \quad (\forall i, j, k) \quad (13)$$

式(5)为生产约束, 表示煤矿产量不能超过其生产能力; 式(6)为煤矿产量维持在煤矿最大生产规模和最小规模之间, 其中 ξ_i 和 ζ_i 分别为煤矿的最小和最大生产规模; 式(7)保证运销中心分销数量

在最大和最小分销规模之间, α_j 和 β_j 分别为运销中心 j 的最大和最小分销量; 式(8)保证每一个煤炭消费区都至少有 1 个运销中心; 式(9)保证煤矿运输到运销中心的数量等于煤矿产量; 式(10)保证所有的需求都能够得到满足, 即运输到煤炭消费区的数量等于煤炭需求的预测值; 式(11)保证每个煤炭消费区的需求都得到满足。

实际决策中, 将煤炭开发供给柔性作为约束条件, 根据煤炭需求形势, 选择适当的柔性期望值 ε , 然后令

$$U \geq \varepsilon \quad (14)$$

式(1)—式(14)组成了煤炭产销柔性响应模型, 在约束条件式(5)—式(14)条件下求目标函数式(4)的最小值, 即求解 $X_i, C_{ij}, q_{2j}, y_{jk}$ 的优化问题。首先采用相关数学模型、人工智能等方法预测煤炭消费区域的煤炭需求量 D_k , 然后根据需求量的预测值设定柔性期望 ε ; 其次, 利用煤炭工业物联网、大数据平台等途径采集的各个煤矿的核定产能、智能煤矿柔性调节产能、生产成本、各煤矿到各运销

中心的运输成本、各运销中心的运销成本、各运销中心到各煤炭消费区的运输成本等基础数据, 通过模型可求得成本最优条件下各个煤矿的最优煤炭产量, 以及通过何种运输方式运送到何地的煤炭量。该模型可以采用优化搜索算法(如进化规划算法)进行求解^[27]。

3 煤炭智能柔性开发供给技术体系

3.1 煤炭智能柔性开发供给体系核心要素

智能煤矿建设是构建煤炭柔性开发供给体系的基础, 将新一代信息技术(5G、人工智能、物联网、云计算、大数据、区块链等)与煤炭开发、运输、销售、利用等进行深度融合, 支撑构建煤炭智能柔性开发供给体系。煤炭智能柔性开发供给体系以煤矿生产系统柔性和运输柔性为核心, 以煤炭开发供给柔性度为基础, 以物联网、大数据、区块链等新一代信息技术为代表的支撑技术和以横向集成、纵向扩展等使能技术为支撑, 实现煤炭供给的智能柔性生产、安全稳定供给、动态供需平衡目标, 如图 5 所示。

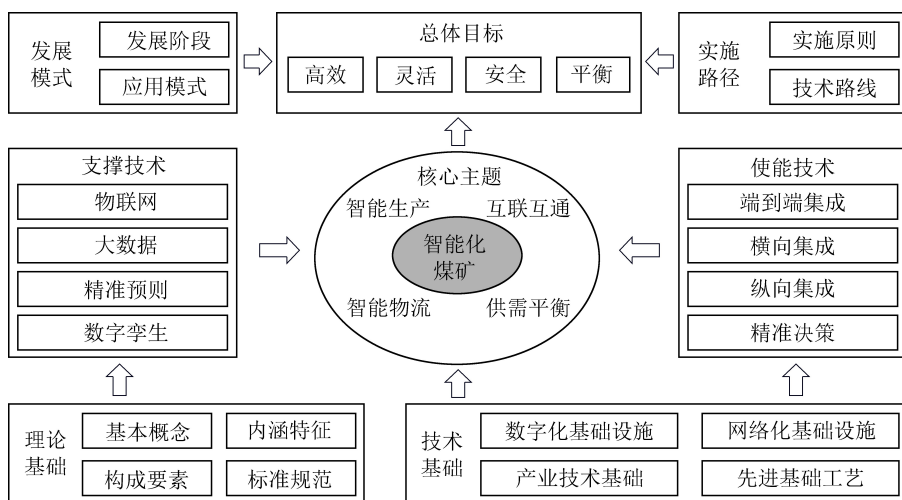


图 5 煤炭智能柔性开发供给体系架构

Fig.5 Coal smart flexible development and supply system architecture

煤炭智能柔性开发供给体系具有以下 3 点核心要素:

1) 智能化柔性煤矿是建设煤炭智能柔性开发供给体系的关键^[28]。提高煤炭开发供给体系的柔性, 关键在于提高生产端的柔性, 由于传统煤炭开发方式的产能利用率普遍呈刚性, 由式(1)可知, 增加煤矿生产能力柔性系数的关键在于通过智能化开采技术对煤矿的产能进行柔性调节。

2) 新一代信息技术与煤炭开发、运输、销售进行融合是建设煤炭智能柔性开发供给体系的基础。5G 通信技术以其特有的大带宽、低延时和广连接优

势, 不仅可以为煤矿智能化建设构建数据高速稳定传输通道, 还可以为煤炭智能柔性供给体系的构建搭建数据传输高速公路, 确保信息高速、可靠传输。运用物联网、大数据等技术不仅可以对煤矿进行实时、多维度安全监控, 从而实现煤矿减人、增安、提效, 而且可以为煤炭供需响应模型的构建提供数据、算法支撑。区块链、大数据技术将助力实现信息的安全、可靠及深度挖掘与融合应用, 通过区块链的去中心化、信息共享和数据不可篡改性等特征可以保证煤炭产销量数据的准确性, 并利用大数据算法对煤炭产销平衡及供给方案进行数据建模与优化。因

此,新一代信息技术与煤炭开发、运输、销售进行融合,是构建广泛互联、精准预测、智能运行和科学决策的煤炭智能柔性开发供给体系的基础。

3)构建柔性协同管理系统是实现煤炭智能柔性供给的保障。建设煤炭智能柔性开发供给体系,不仅需要支撑技术、使能技术等方面发力,更需要用系统思维对供应链中的信息流、物流进行规划和

控制,围绕智能柔性供给目标,促进信息共享和协调经营,以提高各环节运作效率和动态响应水平,实现安全、稳定、柔性的供需关系。基于新一代信息技术构建从集团至矿业公司再至矿井的多级大数据中心,通过煤矿开采全过程的数据链条,支撑煤矿决策的智能化和运行的自动化,达到集成化管理,实现煤炭智能柔性供给,如图 6 所示。

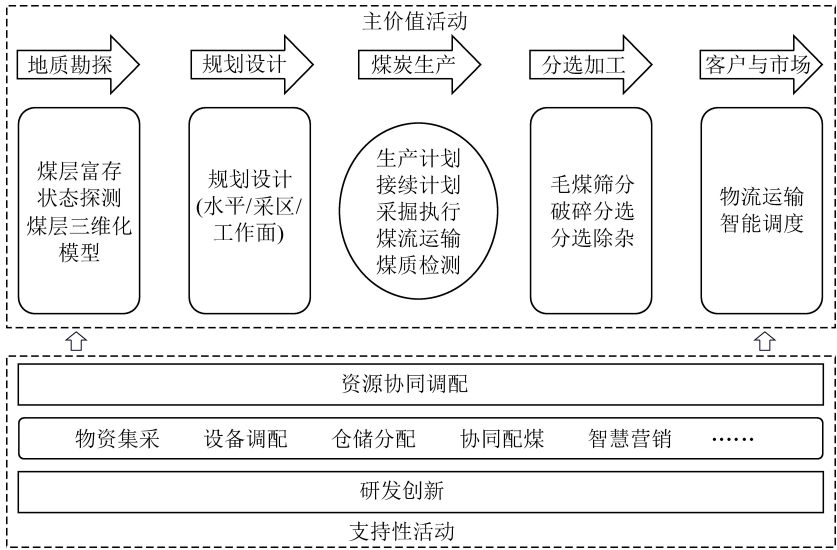


图 6 煤矿智能柔性协同管理

Fig.6 Cooperative management of smart flexible operation in coal mine

3.2 煤炭智能柔性开发供给支撑技术

煤炭智能柔性开发供给支撑技术主要包括生产端支撑技术、运输端支撑技术、消费端支撑技术及基础平台支撑技术。

1)生产端支撑技术。智能化柔性煤矿是煤炭智能柔性开发供给体系的关键,建设智能化柔性煤矿仍需深入开展井下海量多源异构数据融合分析、复杂环境与开采系统耦合机理、重大危险源致灾机理与智能预测预警等基础理论研究,并对井下智能地质探测仪器、高可靠性智能采掘装备、井下防爆作业重载机器人等短板技术进行攻关,解决制约复杂条件煤矿智能化发展的理论与技术短板;加大对高端综采综掘智能化装备、智能化无人值守运输提升装备、重大灾害应急救援智能装备和煤矿机器人等重大装备的研发和应用,为煤矿智能化建设提供高可靠性的先进装备保障;建设安全、共享、高效的全国煤矿大数据中心,开发煤矿多源异构数据的深度融合处理与高效利用技术、煤矿系统装备云端运维的远程专业化分析处理等增值服务,形成煤矿全时空多源信息实时感知,安全风险双重预防闭环管控,生产运营全流程人-机-环-管数字互联高效协同,智能决策自动化运行的能力和高质量运行新模式。

2)运输端支撑技术。构建煤炭智能物流运输体系需要从煤炭企业自营铁路建设、公路运输建设、港口建设等多个方面入手,共同推动煤炭物流运输数字化、网络化和智能化水平提升,形成高效的煤炭物流运输系统。煤炭企业自营铁路需建设机车车载数据传输系统、车辆调度和导航系统、铁轨故障预警系统等;铁路运输专线要加快 5G、物联网、自动驾驶技术的研发推广应用,大力提高列车安全、稳定和智能化调度运行水平;构建覆盖全国的煤炭运输地理信息平台 and 感知网络,推进铁路、公路、水路运输数字化展现。深度挖掘 5G、物联网、大数据、区块链等技术在煤炭物流体系的运用潜力,研究基于区块链架构的“供应链-物流链”双链融合技术、基于大数据分析的智能化物流运营管理新模式,整合煤矿、铁路、公路、水路和港口信息资源,提高煤炭物流应急、调度、决策、监控分析和管控能力。

3)消费端支撑技术。将电厂、化工、钢铁、建材等重点耗煤用户纳入监控体系,基于区块链技术的分布式采集存储及去中心化的思想,建设国家级煤炭消费智能监测系统,制定信息采集与传输、存储、共享与交换、服务等相关标准,保证煤炭的产-运-储-销-用数据全生命周期管理与多源异构数据的

深度融合及高效利用,基于重点用煤行业、企业、区域的煤炭消费大数据,建立煤炭消费预报、预警技术体系,为煤炭产-运-储-销-用全链条柔性供给提供信息和决策支持。

4)基础平台支撑技术。构建全国煤炭供需监测预警平台(中心),涵盖生产端、运输端、销售端、用户以及物流服务商、银行保险金融机构等各环节,将现有的煤炭行业和区域级交易统一纳入其中;基于新一代信息技术实现对煤炭的存量信息、消耗量信息、交易信息等全面及时可靠采集,对煤炭的实时交易信息进行监管;基于区块链技术实现煤炭交易的透明化、公平化,提高市场对煤炭供需的引导水平。研究广覆盖的多样用能精准监控技术,基于AI数据驱动模式的用能负荷精准预测,借助5G低时延、广覆盖的特性,结合人工智能技术的强感知、挖掘、预测能力,在获取海量用户数据基础上对能源、煤炭消费情况做出精准预测,实现煤炭流动展

示、煤炭生产消费战略推演模拟等,建立煤炭供需科学决策体系。

4 煤炭智能柔性开发供给运行模式

基于新一代信息技术与煤炭开发、运输、消费等全产业链的深度融合,形成需求驱动、精准预测、上下游协同、一体化运行的煤炭智能柔性开发供给运行模式,实现煤炭供给的精准化、平台化、协同化。

煤炭智能柔性开发供给体系运行主要包括4个方面:①进行智能化煤矿可柔性调节科学增产潜能评估和备案;②建设“煤矿-集团-省级-国家级”煤矿生产和交易智能化平台,进行安全生产、高效产能精准分析及预测,实现供需信息共享;③建立生产、销售、运输和消费监测分析服务机构与机制,确定合理的供应链柔性度;④强化政府指导调节和政策激励机制,如图7所示。

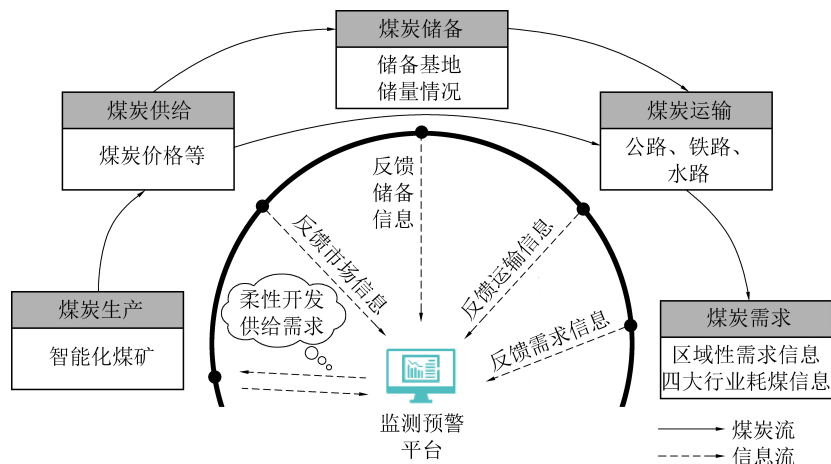


图7 智能柔性煤炭开发供给体系运行方式

Fig.7 Operation mode of smart flexible coal development and supply system

1)进行智能化煤矿可柔性调节科学增产潜能评估和备案。对传统煤炭开发方式进行智能化升级改造,提升煤矿生产系统的柔性度,对改造后的智能化煤矿可柔性调节科学增产潜能进行综合评估,并将评估结果进行备案。

2)建设“煤矿-集团-省级-国家级”煤矿生产和交易智能化平台。该平台涵盖生产端、供货端、销售端、用户以及物流服务商、银行保险金融机构等各环节,采用区块链技术将现有的煤炭行业和区域级交易统一纳入其中,进行安全生产、高效产能精准分析及预测,实现供需信息共享。

3)建立生产、销售、运输和消费监测分析服务机构与机制。基于“煤矿-集团-省级-国家级”煤矿生产和交易智能化平台监测数据,构建全国煤

炭供需监测预警平台(中心),设立专业数据分析服务机构,对煤炭产-运-储-销-用全流程进行全方位信息分析、预测、预警,确定合理的供应链柔性度。

4)强化政府指导调节和政策激励机制。虽然采用物联网、区块链等技术实现了煤炭产-运-储-销-用全流程数据的可靠采集与精准预测,并自动将最优的柔性供给方案向各节点进行推送,但根据柔性供给方案进行煤矿生产能力调节、运输能力调整等还需要政府进行干预和指导,制定相关的激励机制,推动煤炭智能柔性开发供给实现需求牵引、数据模型驱动、市场调节、政策激励、柔性供给的全产业链协同运行,确保国家能源的安全稳定供给。

5 结 论

1)我国煤炭供给具有明显的区域不平衡特征,且煤炭需求存在季节性波动大和时段性紧张的问题,传统煤炭生产方式,产-运-储-用运行模式难以满足煤炭对能源调峰的作用,亟需构建煤炭智能柔性开发供给体系。

2)综合考虑煤矿生产能力柔性系数和煤炭运销能力柔性系数,构建了煤炭智能柔性开发供给响应模型,可以根据不同的煤炭开发供给柔性需求,对煤矿产能、产量、运输等进行优化调整,确定最优的供应链结构参数、运行成本及运行模式。

3)智能化煤矿是建设煤炭智能柔性开发供给体系的基础和关键,新一代信息技术与煤炭开发、运输、销售等深度融合为煤炭智能柔性开发供给体系赋能,构建柔性协同管理系统是实现煤炭智能柔性供给的保障。

4)煤炭智能柔性开发供给支撑技术主要包括生产端支撑技术、运输端支撑技术、消费端支撑技术及基础平台支撑技术,需要进一步攻关解决煤炭智能柔性开发供给支撑技术存在的一些“瓶颈”技术和管理难题,才能保障煤炭智能柔性开发供给体系高质量稳定运行。

参考文献(References):

- [1] 王国法,任世华,庞义辉,等.煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J].煤炭科学技术,2021,49(9):1-8.
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, *et al.* Development achievements of China's coal industry during the 13thFive-Year Plan period and implementation path of "dual carbon" target[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9):1-8.
- [2] 王国法.“双碳”目标下,煤炭工业如何应对新挑战[N].中国煤炭报,2021-09-24.
- [3] 刘 峰,曹文君,张建明.持续创新 70 年硕果丰盈:煤炭工业 70 年科技创新综述[J].中国煤炭,2019,45(9):5-12.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming. Continuous innovation and remarkable achievements in past 70 years[J]. China Coal, 2019, 45(9):5-12.
- [4] 王国法.碳中和目标下,煤炭的坚守与转身[N].中国煤炭报,2021-02-06.
- [5] 谢和平,任世华,谢亚辰,等.碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J].煤炭学报,2021,46(7):2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, *et al.* Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7):2197-2211.
- [6] 王国法,刘 峰,庞义辉,等.煤矿智能化:煤炭工业高质量发展的核心科技支撑[J].煤炭学报,2019,44(2):349-357.
WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, *et al.* Coal mine intellectualization: the core technology of high quality development[J].

- Journal of China Coal Society, 2019, 44(2):349-357.
- [7] 朱 妍.中国工程院院士王国法:提高煤炭开发利用效率本身就是碳减排[N].中国能源报,2021-05-03.
- [8] 李元丽.王国法院士:能源革命不是把煤炭“革”掉[N].人民政协报,2021-05-18.
- [9] 煤炭工业规划设计研究院有限公司.推动煤炭调峰能力建设的政策措施研究[R].北京:煤炭工业规划设计研究院有限公司,2019.
- [10] 中国煤炭工业协会.煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见[Z].北京:中国煤炭工业协会,2021.
- [11] 张 博,彭苏萍,王 佟,等.构建煤炭资源强国的战略路径与对策研究[J].中国工程科学,2019,21(1):96-104.
ZHANG Bo, PENG Suping, WANG Tong, *et al.* Strategic paths and countermeasures for constructing a "great power of coal resources" [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1):96-104.
- [12] 中国煤炭工业协会.2020 煤炭行业发展年度报告[R].北京:中国煤炭工业协会,2021.
- [13] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 2020[M].北京:中国统计出版社,2021:1.
- [14] 电力规划设计总院.中国能源发展报告 2020[R].北京:电力规划设计总院,2020.
- [15] 王国法,庞义辉.特厚煤层大采高综采综放适应性评价和技术原理[J].煤炭学报,2018,43(1):33-42.
WANG Guofa, PANG Yihui. Full-mechanized coal mining and carving mining method evaluation and key technology for thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1):33-42.
- [16] 王国法,庞义辉,刘 峰,等.智能化煤矿分类、分级评价指标体系[J].煤炭科学技术,2020,48(3):1-13.
WANG Guofa, PANG Yihui, LIU Feng, *et al.* Specification and classification grading evaluation index system for intelligent coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3):1-13.
- [17] 庞义辉,王国法,任怀伟.智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术[J].煤炭科学技术,2019,47(3):35-42.
PANG Yihui, WANG Guofa, REN Huaiwei. Main structure design of intelligent coal mine and key technology of system platform construction [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3):35-42.
- [18] 王国法,徐亚军,张金虎,等.煤矿智能化开采新进展[J].煤炭科学技术,2021,49(1):1-10.
WANG Guofa, XU Yajun, ZHANG Jinhu, *et al.* New development of intelligent mining in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1):1-10.
- [19] 王国法.基于新一代信息技术的现代能源治理体系建设研究[J].煤炭经济研究,2020,11:7-12.
WANG Guofa. Research on the construction of modern energy governance system based on new generation information technology [J]. Coal Economic Research, 2020, 11:7-12.
- [20] 王 晶,齐京华,刘晓宇.生产系统柔性的度量方法研究[J].管理工程学报,2003,3:63-66.
WANG Jing, QI Jinghua, LIU Xiaoyu. A method of measuring the flexibility of production system[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2003, 3:63-66.
- [21] 李 新,王宛山,韩 洋,等.一种柔性供应链仿真系统的研

- 究与实现[J].系统仿真学报, 2013, 25(6):1270-1278.
- LI Xin, WANG Wanshan, HAN Yang, *et al.* Novel flexible supply chain simulation system[J].Journal of System Simulation, 2013, 25(6):1270-1278.
- [22] 齐懿冰.供应链柔性演化及与绩效关系研究[D].吉林:吉林大学, 2010.
- QI Yibing. Research on the evolution of supply chain flexibility and its relationship with performance [D]. Jilin: Jilin University, 2010.
- [23] 许 晶.原油供应链柔性仿真研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2019.
- XU Jing. Research on flexible simulation of crude oil supply chain [D]. Harbin : Harbin University of Technology, 2019.
- [24] 邓 宁.供应链柔性研究[M].北京:中国财政经济出版社, 2008.
- DENG Ning, Research on supply chain flexibility[M].Beijing: China Finance and Economics Press, 2008.
- [25] BANDINELLI R, RAPACCINI M, TUCCI M, *et al.* Using simulation for supply chain analysis: reviewing and proposing distributed simulation frameworks [J].Production Planning & Control, 2006, 17(2): 167-175.
- [26] TANNOCK J, CAO B, FARR R, *et al.* Data-driven simulation of the supply-chain: insights from the aerospace sector [J].International Journal of Production Economics, 2007, 110(1/2):70-84.
- [27] 周 明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999;168-175.
- [28] 王国法,王 虹,任怀伟,等.智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J].煤炭学报,2018,43(2):295-305.
- WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, *et al.* 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2):295-305.