



文章编号:1671-251X(2015)12-0025-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.12.008

王金凤, 杜雪珂, 翟雪琪, 等. 基于合作博弈的煤矿生产物流系统资源配置研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(12):25-30.

基于合作博弈的煤矿生产物流系统资源配置研究

王金凤¹, 杜雪珂¹, 翟雪琪¹, 冯立杰^{1,2}

(1. 郑州大学 管理工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省煤层气开发利用有限公司, 河南 郑州 450016)

摘要:针对煤矿生产物流系统复杂多变且子系统众多的现状,选择安全子系统与效率子系统作为局中人,运用合作博弈理论,构建了基于合作博弈的煤矿生产物流系统资源配置模型。该模型利用回归分析法确定资源投入与安全水平及效率水平间的作用关系,并运用合作博弈理论协调资源在系统间的配置。实例应用结果表明,在企业资源投入一定的情况下,运用合作博弈及纳什讨价还价解法从安全及效率两方面进行合理配置,能使煤矿生产物流系统安全水平控制在最佳范围的同时,确保效率水平处于最优,为实现系统的安全高效运营提供了科学的理论依据。

关键词:煤矿生产物流系统; 合作博弈; 纳什谈判解法; 回归分析法; 资源配置

中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:2015-12-04 15:38

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20151204.1538.008.html>

Research of resource allocation of coal mine production logistics system based on cooperative game

WANG Jinfeng¹, DU Xueke¹, ZHAI Xueqi¹, FENG Lijie^{1,2}

(1. Department of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. Henan Provincial Coal Seam Gas Development & Utilization Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: According to complex and changeable status of coal mine production logistics system, a resource allocation model of coal mine production logistics system was constructed by using cooperative games and choosing safety and efficiency subsystems as two sides of the game. The model uses regression analysis method to fit function relationship among resource investment and safety level and efficiency level, and uses cooperative game to coordinate the allocation of resources between safety and efficiency subsystems. The practical application results show that using cooperative game theory and Nash solution, the model can allocate resources rationally from aspects of safety and efficiency in situations of certain enterprise's resource input, and can control security level of coal mine production logistics system in the best range, meanwhile ensure the efficiency level is the optimal, which can provide scientific theory basis for safe and efficient operation of coal mine production logistics system.

Key words: coal mine production logistics system; cooperative game; Nash solution method; regression analysis method; resource allocation

收稿日期:2015-08-25;修回日期:2015-10-28;责任编辑:张强。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71271194);郑州市普通科技攻关计划项目(141PPTGG343)。

作者简介:王金凤(1963—),女,河南焦作人,教授,博士,博士研究生导师,现主要从事安全管理工程、物流工程、工业工程等方面的研究工作,
E-mail:jinfengwang@zzu.edu.cn。

0 引言

煤炭作为中国生产与生活不可或缺的资源,占全国能源生产总量的 3/4、消费总量的 2/3 左右^[1]。然而,中国煤炭生产的安全状况却令人堪忧,生产中伤亡事故时有发生。鉴于煤炭生产事故多发的严酷现实,煤炭生产企业往往不惜代价加大安全投入。

煤矿生产物流系统作为煤炭生产企业中存在物流形态最多、资源影响最复杂的系统之一,主要指当煤炭开采并破碎之后,将其随开采工作面、斜巷等运至大巷,由大巷运入煤仓,直至由主井搬运至地面等一系列过程^[2]。为保障这一系列过程安全高效进行,需要对该系统投入必要的资源,包括人力及物力、财力等各种无形及有形资源。然而,煤矿生产物流系统的资源是有限的,将有限的资源过度投入到某一子系统,将造成系统发展失衡,导致资源配置决策不科学、结构不合理,使有限的资源得不到高效充分利用,制约煤炭生产企业的安全高效运营。因此,如何对煤矿生产物流系统的资源进行合理配置是亟待解决的现实问题。

现有关于煤矿生产物流系统资源配置的文献多集中于从安全资源配置或配置效率评价角度进行研究。TONG Lei 等^[3]针对煤矿安全资源配置不当造成的效率低下问题,运用数据包络分析方法(Data Envelopment Analysis, DEA)构建了安全投入与效率评估模型进行优化资源配置研究;WANG Hong 等^[4]以追求成本最低为目标,建立了煤炭企业联盟生产计划模型,同时运用多目标遗传算法将资源重新进行了优化配置;李红霞^[5]运用数据包络分析法对企业的安全效率进行了评价,为我国煤炭生产企业合理配置资源、提高安全效率提供了有益的参考;高艳芬^[6]为合理配置煤炭生产企业安全投入,提高安全效率,采用不变替代弹性生产函数分析方法对我国煤炭生产企业的安全效率进行了评价、分析与优化;王金凤等^[7]在确定煤矿生产物流系统资源配置效率评价指标体系基础上,构建了基于 DEA 方法的煤矿生产物流资源配置效率评价模型,为提高煤炭生产物流资源配置效率提供了理论依据。

但以上参考文献大多是从安全资源配置或效率单指标角度对煤矿进行整体性分析,鲜有从资源配置的角度对煤矿生产物流系统进行深层次的优化配置研究。此外,将有限的资源投入至某一层面,易造

成煤矿生产物流系统失衡。合作博弈是一种研究局中人达成合作时如何合理分配所得收益的方法,被广泛应用于时间排序、成本费用分摊以及收益分配研究等方面^[8-10]。因此,本文将运用合作博弈理论协调资源在系统间配置的博弈关系,构建煤矿生产物流系统资源配置模型,以期在一定范围内确定资源投入的最佳点组合,以保障煤矿生产物流系统的安全高效运营。

1 系统资源配置模型的构建与求解

合理的资源配置是实现煤矿生产物流系统可持续发展的关键,安全及效率作为影响煤矿生产的 2 个方面,两者的资源分配受资源投入所限,此消彼长。本文将煤矿生产物流系统划分为安全与效率 2 个子系统,根据子系统与资源投入的关系,确定资源投入最佳点组合,即将安全水平控制在最佳范围的同时确保效率水平处于最优。

合作博弈作为强调集体、效率与公平的方法,主要研究博弈双方达成合作时如何合理分配通过协作得到的收益^[11],对资源配置问题的解决具有较大的优势。按照博弈局中参与者的多少,合作博弈可分为二人合作博弈与 n 人合作博弈^[12]。其中,二人合作博弈的本质就是讨价还价,即博弈双方对特定利益进行合理的分割^[13]。该方法不仅可以描述资源在安全与效率间的配置,还能优化资源投入的最佳组合。鉴于此,结合煤矿生产物流系统安全子系统与效率子系统的投入特征,以二人合作博弈为工具,建立煤矿生产物流系统资源配置模型。

1.1 二人合作博弈模型的建立

二人合作博弈一般由局中人、策略集及效用函数等相关要素构成,具体模型描述如下:

(1) 局中人确定。煤矿生产物流系统作为一个复杂多变的大系统,其资源投入受众多因素影响,而安全与效率是影响其资源配置过程和结果的关键。因此,将安全子系统与效率子系统作为博弈双方^[14],局中人用集合 $N = \{1, 2\}$ 表示。

(2) 博弈策略集。在煤矿生产物流系统资源配置过程中,多存在因过分重视安全或效率子系统而大量投入资源以及为协同二者共同发展配置资源的行为。可将前者视为不合作博弈,将协同发展进行资源配置行为视为合作博弈。因此,安全子系统的策略集 $S_1 = \{\text{合作}, \text{不合作}\}$,效率子系统的策略集

$S_2 = \{\text{合作}, \text{不合作}\}$ 。

(3) 效用集合确定。煤矿生产物流系统资源投入为 M , 资源在子系统间分配可作为一个博弈过程。在不合作条件下, 若安全与效率子系统的资源分别为 d_1 与 d_2 , 此时博弈双方获得的效用点称为“谈判破裂点”, 用 D 表示; 在双方合作的条件下, 资源在博弈双方之间合理分配, 安全子系统分配的资源用 s_i 表示, 效率子系统分配的资源用 s_j 表示, 则 $S = \{s_i, s_j\}$, 为 2 个博弈双方的可行分配集。将安全与效率方所分配的资源 s_i 与 s_j 产生的效用分别用 u_i 与 u_j 表示, 可得到相应的效用集合, 即 $U = \{u_i, u_j\}$ 。

(4) 效用函数确定。不同的资源分配所带来的效用不同。对于安全及效率子系统, 资源投入不同导致的安全及效率水平必然存在差异。从安全经济学角度来看, 随着资源投入的不断增加, 煤矿生产物流的安全及效率水平不断发生变化并有各自的资源投入曲线, 这 2 个曲线均满足边际效用递减规律, 可划分为以下 3 个阶段: 在初始阶段, 安全及效率水平的提高取决于资源投入量, 此时资源投入所带来的安全及效率水平提升速度较快, 其函数的边际效用大于 1, 在此阶段资源投入是该阶段提高安全与效率水平的关键; 当资源投入到达一定程度, 继续增加资源投入, 安全及效率水平增加缓慢, 此时安全与效率函数的边际效用大于 0 小于 1, 资源投入已不再是提高安全与效率水平的主要因素; 此后将出现资源投入冗余, 不仅浪费资源, 而且使得安全与效率水平下降, 安全与效率函数的边际效用小于 0, 即增加资源投入引起安全与效率水平下降。

回归分析是确定 2 种或 2 种以上变量之间相互依赖的定量关系的一种统计分析方法, 常用于分析数据的内在规律^[15]。因此, 本文选用回归分析确定效用函数。依据回归分析方法, 结合安全与效率子系统与资源配置的关系, 将资源投入作为自变量, 安全水平及效率水平作为因变量。定义输入指标 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 为自变量, 输出指标 u 为因变量, 测量误差、因素变异等各种影响称为系统误差 ϵ , 确定输入与输出的函数关系式:

$$u = f(s_1, s_2, \dots, s_n) + \epsilon \quad (1)$$

将资源投入作为煤矿生产物流系统安全及效率水平的影响变量, 利用回归分析的二阶模型拟合安全函数和效率函数, 并采用最小二乘法估计函数中

的各个参数。

安全函数用 $u_i = U_i(s_i)$ 表示, 效率函数用 $u_j = U_j(s_j)$ 表示, 此时效用集合为 $U = \{(U_1(s_1), U_2(s_2)) : \exists s \in S, \text{满足 } U_i(s_i) = u_i, i=1, 2\}$ 。安全及效率函数随着资源投入的变化大致呈现出 3 个阶段, 因此, 本文根据数值分析, 将安全与效率函数进行分段表示, 并采用逐点删除方法在资源轴上均匀地选择多个候选节点, 通过假设检验将作用小的节点(节点参数不显著的节点)逐点删去, 从而确定分段函数合适的节点, 分段函数表示如下:

$$u_p = U_p(s_p) = \begin{cases} \beta_0 + \sum_{p=1}^n \beta_{0p}s_p + \sum_{p=1}^n \beta_{0pp}s_p^2 + \epsilon, \\ a_1 \leq s_i < b_1, a_2 \leq s_j < b_2 \\ \beta_1 + \sum_{p=1}^n \beta_{1p}s_p + \sum_{p=1}^n \beta_{1pp}s_p^2 + \epsilon, \\ b_1 \leq s_i < c_1, b_2 \leq s_j < c_2, p = i, j \\ \beta_2 + \sum_{p=1}^n \beta_{2p}s_p + \sum_{p=1}^n \beta_{2pp}s_p^2 + \epsilon, \\ c_1 \leq s_i < d_1, c_2 \leq s_j < d_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: β 为二次函数系数; u 为安全或效率函数; s 为资源投入量; ϵ 为误差项, 服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$; a, b, c 为分段函数的节点。

(5) 二人合作博弈模型构建。根据上述分析, 煤矿生产物流系统资源配置二人合作博弈模型记为

$$B = (S, D; u_i, u_j) \quad (3)$$

式中: $S = \{(s_i, s_j) | s_i + s_j \leq M, s_i \geq 0, s_j \geq 0\}$ 。

1.2 纳什谈判解法介绍

纳什谈判解法是求解二人合作博弈问题的经典解法, 能够有效解决资源在安全与效率子系统间合理配置的问题。

考虑到模型构建及后期处理的可行性, 首先做出如下假设^[16]:

假设 1: 安全与效率双方地位均等;

假设 2: 安全与效率的效用度量尺度相同, 均可用效用水平表示;

假设 3: 资源能够根据任意方式分配给安全与效率双方, 即双方效用可转移;

假设 4: 对于煤矿生产物流系统, 安全与效率双方合作结果满足帕累托最优。

其次, 假定 u_i 为安全的一个任意效用, $u_i \in (U_i(0), U_i(M))$, 对于 u_i 存在唯一 $s_i \in [0, M]$, 满足

$U_i(s_i)=u_i$, 即有 $s_i=U_i^{-1}(u_i)$, U_i^{-1} 是 U_i 的反函数, 且 U_i^{-1} 是严格递增的凸函数, 定义域为 $[U_i(0), U_i(M)]$, 值域为 $[0, M]$ 。因此,

$$u_j = U_j(s_j) = U_j(M - s_j) = U_j(M - U_i^{-1}(u_i)) = g(u_i) \quad (4)$$

设 $g(u_i)=U_j(M-U_i^{-1}(u_i))$ 为安全方获得效用 u_i 时效率方获得的效用^[17], 则有

$$U_i(0) \leq u_i \leq U_i(M) \quad (5)$$

$$u_j = g(u_i) \quad (6)$$

再次, 依据安全与效率双方达成合理配置资源的协议, 得到安全与效率在合作情况下所有可获得的效用组成的有界闭凸集^[18]:

$$G = \{(u_i, u_j) | U_i(s_i) \geq U_i(d_1), U_j(s_j) \geq U_j(d_2), (u_i, u_j) \text{ 满足帕累托最优}\} \quad (7)$$

最后, 由纳什谈判公理可知, 任何具有有限纯策略的二人合作博弈至少有一个均衡点^[18]。为求解安全与效率子系统资源配置的纳什谈判模型 $B=(S, D; u_i, u_j)$, 设定函数 Ψ 对应每一个谈判模型 B 均有一个解法 $\Psi(S, D; u_i, u_j) = (u_i^*, u_j^*)$ 。若 S 中有 (s_1, s_2) 满足 $s_1 > d_1, s_2 > d_2$, 则

$$\Psi = f(u_1, u_2) = (U_1(s_1) - U_1(d_1)) \times (U_2(s_2) - U_2(d_2)) \quad (8)$$

该函数将在唯一一点 (s_1^*, s_2^*) 处得到效用函数最大值 (u_1^*, u_2^*) 。

因此, 得到基于合作博弈的煤矿生产物流系统资源配置的纳什解模型:

$$\max_{s_1, s_2} f(u_1, u_2) [(U_1(s_1) - U_1(d_1)) (U_2(s_2) - U_2(d_2))] \quad (9)$$

$$U = \{(u_1, u_2) \in G | U_1(s_1) \geq U_1(d_1) \text{ 且 } U_2(s_2) \geq U_2(d_2)\} = \{(u_1, u_2) | U_1(0) \leq u_1 \leq U_1(M), u_1(s_1) \geq u_1(d_1) \text{ 且 } u_2(s_2) \geq u_2(d_2)\} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 可得

$$\max_{s_1} f(u_1) = [(U_1(s_1) - U_1(d_1)) (U_2(M - s_1) - U_2(d_2))] = (u_1 - u_1^d) (g(u_1) - u_2^d) = u_1 g(u_1) - u_1 u_2^d - u_1^d g(u_1) + u_1^d u_2^d \quad (11)$$

式中: $g(u_1) = U_2(M - U_1^{-1}(u_1))$ 。

令

$$\frac{df}{du_1} = (u_1 g(u_1) - u_1 u_2^d - u_1^d g(u_1) + u_1^d u_2^d)' = 0 \quad (12)$$

求解式(12), 即可得到煤矿生产物流系统资源

配置模型的最优解。

2 实证分析

根据构建的煤矿生产物流系统资源配置合作博弈模型, 通过对相关数据的调研并将其代入模型求解, 得到资源在安全与效率子系统间分配的最佳解, 为煤矿生产物流系统的可持续发展提出相应优化建议。

2.1 数据来源

选取某矿下属矿井 A 为实证分析对象。该矿井煤炭储量丰富, 生产能力为 0.7 Mt/a, 服务年限长达 25 a。近年来, 为保障安全高效生产, 忽略了资源配置的合理性, 造成该矿井安全水平与效率水平严重失衡。2014 年该矿井资源总投入为 1 041 万元, 其中, 安全子系统的投入包括人员、设备、环境改善及管理等方面, 共计 394.17 万元, 效率子系统资源投入包括时间、成本、费用等, 共计 656.83 万元。

2.2 模型构建

将 2000—2015 年矿井 A 资源投入与安全水平、效率水平相关数据代入模型, 并采用逐点删除法确定函数节点, 可得到安全函数分段区间为 $[0, 450), [450, 850), [850, \infty)$; 效率函数分段区间为 $[0, 400), [400, 650), [650, \infty)$ 。

运用 Matlab, 根据最小二乘法拟合得到资源投入与安全、效率函数的拟合曲线, 如图 1、图 2 所示。

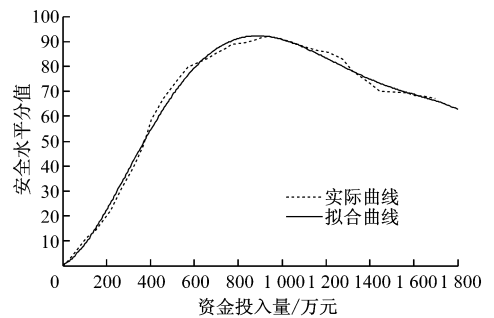


图 1 资源投入与安全函数拟合曲线

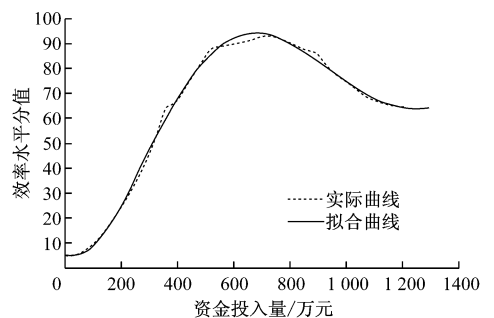


图 2 资源投入与效率函数拟合曲线

安全函数:

$$u_1(s_1)=\begin{cases} 0.000\ 5s_1+0.010\ 6s_1+1.781\ 8, & 0\leqslant s_1<450 \\ -0.000\ 1s_1+0.144\ 9s_1+19.164\ 7, & 450\leqslant s_1<850 \\ -0.000\ 6s_1+0.731\ 7s_1-192.056\ 7, & s_1\geqslant 850 \end{cases} \quad (13)$$

效率函数:

$$u_2(s_2)=\begin{cases} 0.000\ 9s_2-0.050\ 6s_2+5.682\ 5, & 0\leqslant s_2<400 \\ -0.000\ 2s_2+0.233\ 7s_2+11.553\ 1, & 400\leqslant s_2<650 \\ 0.000\ 1s_2-0.352\ 8s_2+289.778, & s_2\geqslant 650 \end{cases} \quad (14)$$

由上述分析可确定,煤矿生产物流系统资源配置二人合作博弈模型:

$$\left\{\begin{array}{l} B=(S,d;u_1,u_2) \\ D=(d_1,d_2)=(0,0) \\ S=\{(s_1,s_2)\mid s_1+s_2\leqslant 1041,s_1\geqslant 0,s_2\geqslant 0\} \\ u_1(s_1)=\begin{cases} 0.000\ 5s_1+0.010\ 6s_1+1.781\ 8, & 0\leqslant s_1<450 \\ -0.000\ 1s_1+0.144\ 9s_1+19.164\ 7, & 450\leqslant s_1<850 \\ -0.000\ 6s_1+0.731\ 7s_1-192.056\ 7, & s_1\geqslant 850 \end{cases} \\ u_2(s_2)=\begin{cases} 0.000\ 9s_2-0.050\ 6s_2+5.682\ 5, & 0\leqslant s_2<400 \\ -0.000\ 2s_2+0.233\ 7s_2+11.553\ 1, & 400\leqslant s_2<650 \\ 0.000\ 1s_2-0.352\ 8s_2+289.778, & s_2\geqslant 650 \end{cases} \end{array}\right. \quad (15)$$

2.3 模型求解

在煤矿生产物流系统资源配置过程中,无论侧重安全抑或是效率哪一方,均会使资源投入比例失衡,此时合作博弈视为无效。二人合作博弈无效时,安全与效率双方均达不到资源分配,此时 $d_1=0$, $d_2=0$,即谈判破裂点 $(d_1,d_2)=(0,0)$ 。

将数据代入模型,根据纳什谈判解法,对式(13)、式(14)中的分段函数分别求解,得

$$\begin{cases} \max_{s_{11},s_{21}}[(0.000\ 5s_{11}+0.0106\ 1s_{11}+1.781\ 8)\times \\ \quad (0.000\ 9s_{21}-0.050\ 6s_{21}+5.682\ 5)] \\ \text{s. t. } s_{11}+s_{21}\leqslant 1\ 041 \\ s_{11}\geqslant 0,s_{21}\geqslant 0 \end{cases} \quad (16)$$

根据约束条件得 $s_{21}=1\ 041-s_{11}$,将其代入目标函数并进行整理,可得到

$$\max_{s_{11}}[-12.75s_{11}+8\ 269.3s_{11}+2\ 448\ 550.1s_{11}+77\ 599\ 620s_{11}+8\ 063\ 197\ 358] \quad (17)$$

其一阶条件为

$$18.36s_{11}^3-26\ 479.62s_{11}^2+8\ 383\ 041.1s_{11}+59\ 467\ 935.8=0 \quad (18)$$

依次将分段函数按照式(16)、式(17)所示的方法整理,利用 Matlab 编程,对整理出的一阶条件求解,得到满足条件的最优解: $s_{14}^*=627.87,u_{14}^*=81.20$,从而求得 $s_{24}^*=413.13,u_{14}^*=94.26$ 。

对于该企业而言,将总资源 1 041 万元按照以上最优解进行分配,其中 627.87 万元应分配于安全子系统,413.13 万元应分配于效率子系统,由此可使得该资源配置之下的安全与效率水平达到最佳。

通过对上述模型求解,资源配置优化前后对比结果见表 1。

表 1 2014 年矿井 A 资源配置优化前后对比结果

资源配置	优化前	优化后
资源投入(s_1,s_2)/万元	(394.17,656.83)	(627.87,413.13)
效用水平(u_1,u_2)	(74.04,79.13)	(81.20,94.26)

结果显示优化前后矿井 A 中安全与效率子系统的资源投入由(394.17 万元,656.83 万元)重新分配为(627.87 万元,413.13 万元),此时不但安全水平有所提高(从 74.04 提高到 81.20),而且效率水平达到最优(94.26)。

优化结果一方面说明,矿井 A 安全水平偏低,是由安全子系统资源投入不足造成,企业需要充分考虑资源在安全子系统的投入,将资源合理用于提高井工人员素质、机械化水平及改善自然环境等,以利提高安全生产水平;另一方面说明,该矿井过于重视对效率子系统的资源投入,从而造成资源冗余高达 243.70 万元,不仅导致资源投入浪费,而且严重影响了效率水平。因此,该矿井应根据效益与资源投入实际,将企业有限的资源按照合理的配置比分配给安全与效率 2 个子系统,以达到使矿井的安全水平最高、效率水平最优的目的。

3 结语

为保证煤矿生产物流系统安全高效地运转,实现其资源的合理配置是亟待解决的现实问题。依据合作博弈理论构建了煤矿生产物流系统资源配置模型,将煤矿生产物流系统分为安全子系统与效率子系统,并将其作为合作博弈的局中人,运用回归分析法确定资源投入与安全水平及效率水平间的作用关系,拟合博弈效用函数,然后采用纳什谈判解法对模型求解。实证分析表明,合理的资源配置能够使煤矿生产物流系统安全水平控制在最佳范围的同时确保效率水平处于最优,为实现系统的安全高效运营提供了科学的理论依据。然而,纳什谈判解法一般用于解决 2 个局中人位置对称的问题,且其对于分段函数的求解比较繁琐,具有一定局限性。关于二人合作博弈的解法还有最大最小谈判解法、威胁谈判解法以及 K-S 解法等,运用其他方法解决煤矿生产物流系统资源配置问题还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] CHEN Sensen, XU Jinhua, FAN Ying. Evaluating the effect of coal mine safety supervision system policy in China's coal mining industry: a two-phase analysis[J]. Resources Policy, 2015,46(12):12-21.
- [2] 王金凤,翟雪琪,冯立杰. 面向安全硬约束的煤矿生产物流效率优化研究[J]. 中国管理科学, 2014, 22(7):59-66.
- [3] TONG Lei, DING Rijia. Efficiency assessment of coal mine safety input by data envelopment analysis[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008,18(5):88-92.
- [4] WANG Hong, ZHONG Weiqi. Research on optimization of coal production in new mine basis of strategic alliance[C]//2010 International Conference on Management and Service Science, Wuhan, 2010: 1-4.
- [5] 李红霞,蔡林美,李琰. 基于 DEA 的我国煤炭企业安

- 全效率分析[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(3): 167-171.
- [6] 高艳芬,贾明涛,陈忠强,等. 我国煤炭企业安全效率评价及其优化[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(4): 134-136.
- [7] 王金凤,朱怡晨,冯立杰. 煤矿生产物流系统资源配置效率研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(8):114-117.
- [8] 金霁. 加工时间是开工时间线性函数的两人合作排序博弈问题[J]. 南京师范大学学报:工程技术版, 2012,12(4):87-92.
- [9] 黄昶生. 基于合作博弈的我国石油公司间竞合利益分配模型的构建与应用[J]. 价值工程, 2010, 29(14): 47-49.
- [10] 薛俭,谢婉林,李常敏. 京津冀大气污染治理省际合作博弈模型[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(3): 810-816.
- [11] 鲍新中,刘小军. 合作博弈理论对成本分配技术的改进[J]. 工业工程, 2009, 12(2):68-71.
- [12] 王光净,杨继君,刘仲英. 基于合作博弈的区域产业结构优化模型[J]. 工业工程与管理, 2010, 15(1): 53-58.
- [13] 姚天宝,申惟文,任建民. 逐步回归和偏最小二乘回归模型在混凝土重力坝变形监测中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(2):81-84.
- [14] 郑士源. 基于核心解的运输联盟的成本分摊[J]. 系统工程, 2013, 31(8):47-53.
- [15] RASHEDI N, KEBRIAEI H. Cooperative and non-cooperative Nash solution for linear supply function equilibrium game [J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 244(10):794-808.
- [16] 张大林,郭晓春. 纳什讨价还价解及应用[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版, 2012, 30(6):955-957.
- [17] 顾新,郭耀煌,罗利. 知识链成员之间利益分配的二人合作博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 2004(7): 24-29.
- [18] 张启平,刘业政,李勇军. 考虑受益性的固定成本分摊 DEA 纳什讨价还价模型[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(3):756-768.