

知识驱动的冶金企业原料供应链订单分配方法

刘一顺, 阳春华, 黄科科

(中南大学自动化学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 原料供应链是安全稳定生产的前提和保障, 订单分配作为供应链的前置环节, 是企业关注的重点。冶金行业原料成分复杂、供应量大质异、信息耦合关联, 当前专家决策模式面对如此复杂的订单分配问题时劳动强度大且难以适应海量信息, 导致决策效率低、采购成本高、原料质量难以保障。针对该问题, 提出了知识驱动的冶金企业原料供应链订单分配方法。首先, 在确定多层次供应商评价体系的基础上, 通过熵权法和模糊层次分析法充分利用供货数据知识和专家经验知识, 结合兼容度和差异度合理分配评价指标的重要度。然后, 基于 TOPSIS 构建多属性决策评价模型, 自动获得各供应商综合绩效与排名, 实现对供应商的高效评价管理。最后, 综合考虑供应商供货特性知识、配矿机理知识、经营状况知识等, 建立多目标订货量分配模型, 自动获得复杂资源约束下各供应商的最优订货量。以国内某锌冶炼企业为例, 采用原料供应链相关数据对所提方法的有效性进行验证。结果表明, 所提方法可以自动地完成供应商评价、订货量分配等知识型工作, 极大地降低了人工劳动强度, 提高了决策效率, 并有效降低了采购成本, 提升了原料质量。

关键词: 供应链优化; 订单分配; 知识驱动; 冶金工业

中图分类号: TP2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202238

Knowledge-driven order allocation method for raw material supply chain in metallurgical enterprises

LIU Yishun, YANG Chunhua, HUANG Keke

School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: The raw material supply chain is the premise of safe and stable production with an important position. As the front link of the supply chain, order allocation is the focus of enterprises. Due to the complex composition of raw materials, large qualitative differences in suppliers, and information coupling in the metallurgical industry, the current expert decision-making model is labor-intensive and difficult to deal with such complex order allocation problems, resulting in low decision-making efficiency, high procurement costs, and difficult to guarantee the quality of raw materials. Aiming at this problem, a knowledge-driven order allocation method for the raw material supply chain in metallurgical enterprises was proposed. First, on the basis of a multi-level supplier evaluation system, the entropy weight method and the fuzzy analytic hierarchy process were adopted to make full use of data knowledge and experience knowledge, and compatibility degree and different degree were introduced to reasonably allocate the importance of each evaluation index. Then, a multi-attribute decision-making evaluation model was built based on the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) to automatically obtain the comprehensive performance and ranking of suppliers, so as to realize the efficient evaluation and management of suppliers. Finally, a multi-objective order quantity allocation model was es-

收稿日期: 2022-06-15; 修回日期: 2022-07-26

通信作者: 黄科科, huangkeke@csu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61988101, No.61860206014); 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFB1701100)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61988101, No.61860206014), The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1701100)

tablished by comprehensively considering the supplier characteristics knowledge, ore blending mechanism knowledge, business status knowledge, etc., and the optimal order quantity of the each supplier under complex resource constraints was automatically obtained. Taking a domestic zinc smelting enterprise as an example, the validity and applicability of the proposed method are verified by the relevant data of the raw material supply chain. The results show that the proposed method can automatically complete knowledge-based work such as supplier evaluation and order quantity allocation, which will greatly liberate manual labor, improve decision-making efficiency, effectively reduce procurement cost and improve the quality of raw materials.

Key words: supply chain optimization, order allocation, knowledge-driven, metallurgical industry

0 引言

冶金工业是国民经济发展的支柱产业和实体经济发展的基础,是制造强国的重要支撑,其产品是经济建设的基础性原料和国防军工的战略性物资,战略地位十分重要^[1-2]。经过数十年的发展,我国已成为世界上门类最齐全、规模最大的冶金大国,生产量和消费量连续20年位居世界第一^[3]。冶金过程作为典型的流程生产过程,对原料供应稳定性及品位质量要求极高。连续性生产方式下断料恢复成本巨大,原料供应质量直接影响生产过程稳定性及产品质量^[4]。进一步地,冶金企业原料采购成本通常占生产总成本的70%以上,资金占用高、运营风险大^[5]。据统计,每降低1%的采购成本,将为企业增加5%~10%的利润。原料供应链作为企业的“第一利润源泉”,对于企业的稳定生产及利润提升至关重要。

原料订单分配作为供应链的前置环节,主要指从现有供应商中选出优质供应商,并向各供应商采购特定数量的原料以满足生产需求,即供应商评价与订货量分配。企业的生产稳定顺利进行取决于整个供应链的持续有效,这很大程度上依赖于供应商,供应商是后续相关环节获取利益的前提和保障^[6]。正确地选择供应商并合理分配订货量有助于企业降低运营成本与供货风险、提升供应链总利润与核心竞争力^[7]。我国冶金企业的行业特性给订单分配任务带来了诸多问题与挑战:由于我国矿产资源具有“小矿多、大矿少,贫矿多、富矿少”等特点,大多冶金企业处于“吃百家矿”的状态,原料供应商数量多、类型杂;同时,冶金原料成分复杂、元素种类多,且不同供应商原料品位差异较大^[8-9];进一步地,订单分配通常和资金、产能、库存、质量等多种复杂因素相关,本质上是典型的多属性决策问题^[10]。总体来说,冶金企业订单分配呈现出决策变量多、约束信息复杂、因素关联耦合等特点。

在大多数冶金企业中,供应商评价选择、订货量分配等复杂决策依然依赖知识型工作者手动完成^[11-12]。知识型工作者具备丰富的经验知识,但面对如此复杂的订单分配问题时,人工劳动强度大、决策效率低,以往依赖于经验和少量关键指标的决策模式也难以处理当前种类和规模日益增长的海量工业大数据^[13]。进一步地,供应链中订单分配的决策水平取决于知识型工作者的知识水平,但经验知识传承困难、不同决策者知识差异性大导致决策不一致性十分明显,对知识型工作者的严重依赖也给企业带来了较大生产成本和运营风险^[14]。知识自动化通过人工智能技术等将工程技术人员的工作经验知识进行显性化和模型化的表达,将人的知识型工作转换为控制系统的自动化运行,从而取代人力并实现高效决策^[15]。基于知识自动化的订单分配实现采购知识的累积传承和高效利用,取代知识型工作者并自动高效地完成供应商评价、订货量分配等决策,提升了供应链运行效率,降低了企业生产成本与运营风险,促进了冶金原料供应链向高端、高效、敏捷方向发展。

目前围绕冶金企业供应商评价选择与订货量分配已有大量的研究,这些研究有效地促进了基于知识自动化的订单分配发展。供应商评价选择与订货量分配之间存在相互关联关系,但大多数现有工作将订单分配的两部分解耦,分别进行研究,供应链中的信息未能得到充分利用。进一步地,大多数供应商评价选择工作过于依赖数据知识、缺乏专家经验知识,难以反映企业偏好;冶金原料订货量分配只考虑经济成本,忽略了冶金配料过程对元素含量的需求等行业知识,这导致当前冶金企业供应商质量参差不齐、原料缺货风险大、杂质超标严重,影响了生产过程的稳定性、增加了生产成本。本文针对上述问题提出了知识驱动的冶金企业原料供应链订单分配方法,该方法首先综合考虑供应商历史供货数量、质量等数据知识以及专家偏好等经验

知识,将熵权法与模糊层次分析法结合以确定合理的评价指标权重;接着,采用优劣解距离法(technique for order of preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)有效处理专家知识,获得各供应商绩效评分及对应排序。最后,融合供应商供货特性知识、配矿机理知识、经营状况知识等构建多目标订货量分配模型,获得各供应商的原料最优订货量。其中,本文提出多属性决策和多目标决策集成的原料订单分配方法,通过对多源知识的高效利用,自动地完成了与订单分配相关的各项决策,极大地解放了沉重的人工劳动、降低了原料采购成本、提升了供应链管理效率。

本文结构如下:第1节对供应商评价选择和订货量分配的现有相关工作进行介绍与总结;第2节对所提的知识驱动的冶金企业原料供应链订单分配方法进行具体介绍;第3节通过实际案例验证所提方法的有效性,并对结果进行讨论分析;第4节对研究工作进行总结。

1 相关工作

目前国内外学者对供应链订单分配进行了大量研究,以实现订单分配知识型工作自动化:一方面是供应商评价选择,另一方面是供应商最优订货量分配。在供应商评价选择方面,现有方法主要分为三大类:多属性决策方法、数学规划方法和人工智能方法。多属性决策方法利用若干标准和专家知识构造评价模型,包括层次分析法(analytical hierarchy process, AHP)、TOPSIS、偏好顺序结构评估法(preference ranking organization methods for enrichment evaluation, PROMETHEE)等。Gupta H等人^[16]使用最坏场景法(best worse method, BWM)和TOPSIS对供应商的综合能力进行评价与选择。Govindan K等人^[17]利用西莫斯(Simos)过程确定各项评价指标权重,应用PROMETHEE根据各决策者的偏好对供应商进行排序。数学规划方法构造最大化输入输出效率的优化问题,基于效率值评价供应商。Wu T等人^[18]提出了一种基于增广数据包络分析的供应商评价选择方法,通过供应商历史数据计算投入产出比例,自动评价供应商综合效率。Hsu B M等人^[19]将模糊理论与非线性规划结合,基于供应商模糊偏好关系排序选择优质供应商。人工智能方法大多基于历史数据构造回归模型,从而无须先验知识,直接进行评价。Golmohammadi D等

人^[20]利用神经网络建立了选择供应商的决策模型,利用历史供应商绩效数据选择供应商,并利用遗传算法对网络的初始权制度和网络结构进行优化。李益兵等人^[21]提出了一种基于混合粒子群优化-自适应矩估计神经网络的外协供应商评价决策模型,有效降低了供应商评价难度。

最优订货量分配就是综合考虑多方面因素决定每个供应商不同商品的采购数量。大多数关于订单分配的研究以最小化采购成本为模型的目标。Kawtummachai R等人^[22]考虑订单价格、准时交货百分比等因素,以最小化总采购成本为目标来确定订单。鉴于社会、环境、安全等因素的影响,多目标订货量分配逐渐成为主流。孟懂懂^[23]在考虑各工厂需求不确定和总量折扣模式的情况下,建立了一个基于总成本、质量和交货提前期的多目标优化模型,并设计了基于第二代非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)的算法求解各供应商的最佳订货数量。Lin R H^[24]建立了采购成本最小、交货延迟最小、不良品数量最小、订单数量整体价值最大的多目标模型,以实现订单的最优分配。Çebi F等人^[25]将订单分配表述为满足数量折扣、交货期、产能和需求约束的多产品多供应商问题,并采用模糊规划进行求解。

已有很多关于订单分配的研究成果,在实际应用中也取得了很好的效果。但在冶金行业原料订单分配方面,现有的研究仍存在以下局限性。(1)供应商评价中的评价指标权重确定仅依赖数据或调查问卷,但单纯的数据过于客观,难以反映企业的偏好;人的经验知识主观性强、主体之间差异大,且人在进行判断时难以给出准确的定量描述,模糊性强。合适的供应商评价应该是通过主客观多种数据得到的混合型评价。(2)订货量分配时过于关注经济成本,而忽略了原料质量、履约程度等给生产带来的影响,行业知识的缺失导致原料质量不佳、杂质超标严重,影响生产的稳定性。(3)冶金行业中没有将供应商评价与订货量分配结合,大多数现有工作将这两部分分开研究,但事实上它们之间有很大的关联。

2 知识驱动的冶金企业原料供应链订单分配

通过对冶金企业原料供应链中运行数据知识、专家经验知识、行业机理知识的整合,本文提出了多属性决策和多目标决策集成的原料订单分配方法,帮助企业自动高效地完成供应商评价选择与订

货量分配。首先,在确定多层次供应商评价体系的基础上,通过熵权法和模糊层次分析法充分利用供货数据知识和专家经验知识,结合兼容度与差异度合理分配各评价指标的重要度;接着利用 TOPSIS 在基础数据及评价指标权重的基础上,自动高效地计算各供应商综合绩效并排序;最后,考虑供应商供货特性知识、配矿机理知识、经营状况知识等,建立最小化成本、最大化效用的多目标订货量分配模型,确定在一定资源约束下各供应商的最优订货数量。本文提出的知识驱动的冶金企业原料供应链订单分配方法总体框架如图 1 所示。

2.1 供应商评价指标体系

为了对冶金企业原料供应商进行综合全面的评价,需要从原料数量、质量、供应稳定性等方面建立多维度评价指标体系,并确定合适的指标权重。Dickson G W^[26]采用实证调查总结了 23 个评价

准则,Weber C A 等人^[27]在此基础上对各项评价准则进行了重要度排序,为供应商评价体系奠定了基础。本文在回顾现有研究工作的基础上,结合冶金企业特点及实际需求,遵循科学性、系统性、代表性、可比性、定量定性结合、区别性与实用性等原则,建立了基于目标层、准则层和指标层的冶金企业原料供应商三级评价指标体系,见表 1。

其中,目标层体现了供应商的综合能力,准则层包括供给数量、供给质量、履约程度、资质体系、服务水平 5 个维度,指标层包括将 5 个准则展开得到的具体评价指标。评价指标分为效益型指标和成本型指标,效益型指标数值越高越好,成本型指标数值越低越好。

2.2 供应商评价指标权重确定

由于不同评价指标的影响程度不同,因此需要合理地确定各评价指标的权重。利用数据知识能充

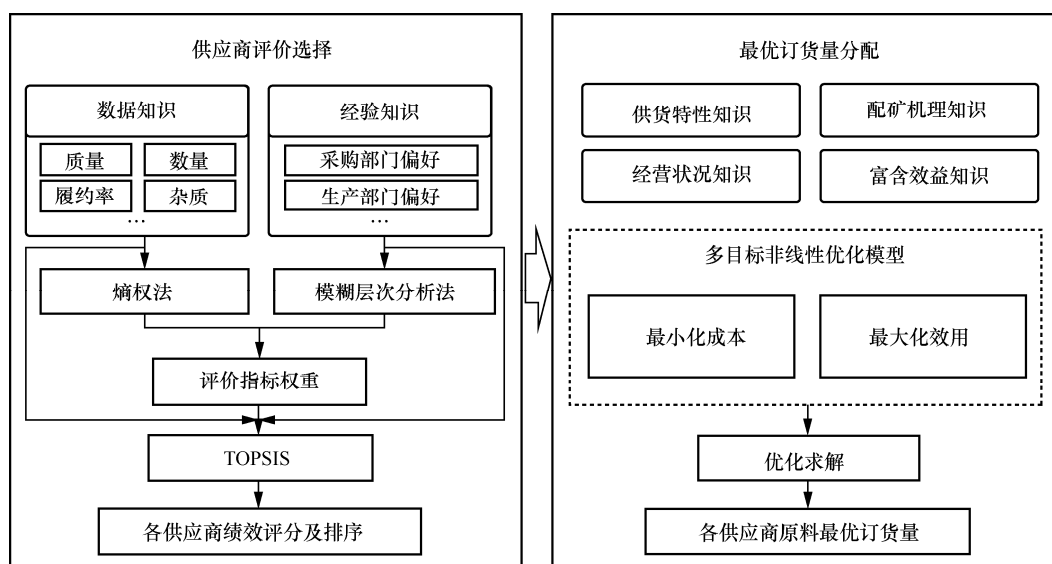


图 1 知识驱动的冶金企业原料供应链订单分配方法总体框架

表 1

冶金企业原料供应商三级评价指标体系

目标层 G	准则层 Z	指标层 C	指标类型	指标属性
冶金企业原料 供应商评价	供给数量 Z_1	原料到货量 C_1	定量	效益型
		平均主品位 C_2	定量	效益型
		杂质超标数量 C_3	定量	成本型
		额外富含效益 C_4	定量	效益型
	履约程度 Z_3	合同履约率 C_5	定量	效益型
	资质体系 Z_4	资质健全 C_6	定性	效益型
		公司规模 C_7	定性	效益型
		服务态度 C_8	定性	效益型
	服务水平 Z_5	配合程度 C_9	定性	效益型

分地挖掘数据中隐藏的信息,可以依据数据特性客观地计算各评价指标权重。但数据知识解释性较差,且难以反映冶金企业的偏好,可能出现计算结果与现实需求相悖的情况。人工经验确定评价指标权重的方式基本能够符合企业发展理念,但由于主观性强,其难以准确表示不同评价指标的重要性程度。基于上述考虑,本文提出了基于熵权法与模糊层次分析法的冶金企业原料供应商评价指标权重计算方法,将数据知识与专家经验知识有机融合,获得更为合理的评价指标权重。

(1) 熵权法确定评价指标权重

熵权法是一种基于信息论的客观赋权法,根据指标的相对变化程度对系统整体的影响来决定指标权重^[28]。熵权法通过计算评价体系中各评价指标的信息熵值,基于数据知识获得各指标的权重。某个评价指标的信息熵越大,该指标变异程度越大、提供的信息越多、在评价中所起的作用越大,其权重也越大,反之则权重越小。其计算过程如下。

步骤 1: 收集、整理原始数据。冶金企业基于先前建立的评价指标 $C_j (j=1,2,\dots,n)$ 对与原料供应商 $S_i (i=1,2,\dots,m)$ 相关的数据进行收集,该多属性决策问题原始数据矩阵如下。

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

其中, x_{ij} 是原料供应商 S_i 在评价指标 C_j 下的客观绩效值或决策者的评估值。对于某项指标 C_j , 样本的离散程度越大,则该指标在综合评价中所起的作用就越大。如果该指标的数值全部相等,则该指标在综合评价中不起作用。

步骤 2: 对异质指标进行同质化处理。不同评价指标的数值变化范围不同,因此需要对各评价指标进行归一化处理,以消除量纲不同对评价结果的影响。由于效益型指标和成本型指标数值代表的含义不同,因此分别进行处理。

$$\text{效益型指标: } x'_{ij} = \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

$$\text{成本型指标: } x'_{ij} = \frac{x_{\max} - x_j}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

其中, $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为第 j 个评价项指标的最大值和最小值。

步骤 3: 计算样本比重。计算第 j 个评价指标下第 i 个样本值占该指标的比重。

$$\sigma_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4)$$

步骤 4: 根据信息论计算评价指标熵值及信息熵冗余度。第 j 个评价指标的熵值如下。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m \sigma_{ij} \ln \sigma_{ij} \quad (5)$$

其中, $k = 1/\ln m$ 且 $k > 0$, $e_j > 0$ 。对应信息熵冗余度为:

$$d_j = 1 - e_j \quad (6)$$

步骤 5: 计算评价指标权重。根据各个评价指标的差异程度计算相应的权重。

$$w_j^e = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (7)$$

(2) 模糊层次分析法确定评价指标权重

层次分析法是一种基于经验知识的系统分析方法,决策者对评价指标进行两两对比,分析判断指标的重要程度,对重要程度进行变换,然后得到各评价指标的重要度^[29]。层次分析法基于人的经验知识,结构严谨、运行简便、决策易被接受,因此得到广泛应用。但当面对数量较多的评价指标时,传统层次分析法难以完全保证人的思维一致性,难以用确定的数值准确衡量不同评价指标的重要程度。针对上述问题,本文采用模糊层次分析法确定评价指标权重,用模糊数值代替传统的准确数值,有效解决了经验知识模糊性的问题^[30]。具体实现过程如下。

步骤 1: 构建模糊判断矩阵。专家对评价指标的重要性进行两两判断,并以三角模糊数形式对重要度进行表达,得到模糊判断矩阵。

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (8)$$

其中, $a_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ 是与指标 j 相比,指标 i 的相对重要度,用三角模糊数表示。 l_{ij} 和 u_{ij} 分别表示三角模糊数的下界值和上界值,表示判断的模糊程度,区间范围越大,判断越模糊,反之判断越清楚。中值 m_{ij} 表示最有可能的取值,本文采用 9 分位标度法确定中值 m_{ij} ,见表 2。

表2 供应商评价指标重要性评估的9分位标度值

三角模糊数中值 m_{ij}	标度含义
1	与后一指标相比, 前一指标同等重要
3	与后一指标相比, 前一指标稍微重要
5	与后一指标相比, 前一指标明显重要
7	与后一指标相比, 前一指标强烈重要
9	与后一指标相比, 前一指标极度重要
2, 4, 6, 8	相邻两标度之间折中时的标度
上列标度的倒数	指标 i 对指标 j 的标度为 m_{ij} , 反之则为 $1/m_{ij}$

为了进一步避免专家经验知识的主观性影响, 可邀请来自不同部门的 K 位专家进行评价, 并取结果的几何平均值为综合三角模糊数:

$$l_{ij} = (l_{ij}^1 \times l_{ij}^2 \times \cdots \times l_{ij}^K)^{1/K} \quad (9)$$

$$m_{ij} = (m_{ij}^1 \times m_{ij}^2 \times \cdots \times m_{ij}^K)^{1/K} \quad (10)$$

$$u_{ij} = (u_{ij}^1 \times u_{ij}^2 \times \cdots \times u_{ij}^K)^{1/K} \quad (11)$$

步骤 2: 三角模糊判断矩阵 (以下简称判断矩阵) 一致性检验。专家在评判各个评价指标的重要性时, 难免会出现相互矛盾的地方, 因此要对判断矩阵进行一致性检验。此处采用中值矩阵对判断矩阵进行一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (12)$$

其中, $\lambda_{\max}$ 是中值矩阵的最大特征值, CI 是一致性检验指标。 CI 越小, 判断矩阵的一致性程度越高, 当 $CI = 0$ 时, 判断矩阵完全一致。为了衡量判断矩阵是否具有令人满意的一致性, 引入平均随机一致性比率 $CR = CI / RI$, 其中 RI 为平均随机一致性指标, 不同阶矩阵的 RI 取值不同, 可见参考文献[31]。当 $CR < 0.1$ 时可认为判断矩阵具有令人满意的一致性。

步骤 3: 计算评价指标权重。在判断矩阵一致性检验通过的前提下, 可计算各评价指标权重。首先根据判断矩阵构造模糊判断因子矩阵 H 。

$$H = (h_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & 1 - \frac{u_{12} - l_{12}}{2m_{12}} & \cdots & 1 - \frac{u_{1n} - l_{1n}}{2m_{1n}} \\ 1 - \frac{u_{21} - l_{21}}{2m_{21}} & 1 & \cdots & 1 - \frac{u_{2n} - l_{2n}}{2m_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 - \frac{u_{n1} - l_{n1}}{2m_{n1}} & 1 - \frac{u_{n2} - l_{n2}}{2m_{n2}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $h_{ij} = (u_{ij} - l_{ij}) / 2m_{ij}$ 是标准离差率, 表示专家

评价结果的模糊程度。 h_{ij} 越小, 模糊程度越小, 结果可信度越高。

接着, 将中值矩阵 M 和模糊判断因子矩阵 H 相乘, 获得调整判断矩阵 Q , 并对其进行列变换, 得到对角元素均为 1 的判断矩阵 Q' 。在此基础上, 计算各评价指标的权重:

$$w_j^a = \frac{t_j}{\sum_{j=1}^n t_j}, j = 1, 2, \cdots, n \quad (14)$$

其中, $t_j = \left(\prod_{j=1}^n q_{ij} \right)^{1/n}$ 是判断矩阵 Q' 每行元素的 n 次方根。

(3) 熵权法-模糊层次分析法计算综合权重

模糊层次分析法计算的权重结果趋向主观, 熵权法计算的结果趋向客观。本文采用线性加权方式将数据知识和专家经验知识结合, 主客观组合赋权的方式弥补了单一赋权的不足。将主观性和随机性控制在一定范围内, 能够得到更加科学、可信的评价指标权重:

$$w_j = \gamma w_j^e + (1 - \gamma) w_j^a \quad (15)$$

其中, $\gamma \in [0, 1]$ 是组合权系数, w_j 是第 j 个评价指标的最终权重。进一步地, 为了获得科学合理的组合权系数, 本文综合考量不同方法结果的差异程度, 采用基于兼容度和差异度的择优方法确定组合权系数 γ 。当熵权法所得各评价指标权重的差距比模糊层次分析法所得各评价指标权重的差距更大时, γ 建议在 $(0.5, 1]$ 取值; 当两种方法所得各权重的差距差别不大时, 建议 γ 取值 0.5; 当熵权法所得各评价指标权重的差距比模糊层次分析法所得各指标权重的差距更小时, γ 建议在 $[0, 0.5)$ 取值。

初步确定合适的取值范围后, 可基于不同组合权系数下供应商排序结果的兼容度和差异度评价方案的优劣性^[32], 进一步确定组合权系数具体的数值。首先, 基于初步范围制订 u 个组合权系数取值方案, 计算不同取值方案下的评价指标综合权重值, 并按照供应商绩效评估方法获得对应的供应商排序 $R^k = (r_i^k), k = 1, 2, \cdots, u, t = 1, 2, \cdots, m$, 其中 r_i^k 为第 k 个方案中第 t 个供应商的排序。进一步地, 计算不同取值方案所得供应商排序的兼容度 E 。兼容度是该取值方案与其他取值方案的等级相关系数的加权平均值。各取值方案的等级相关系数如下:

$$g_{ij} = 1 - \frac{6}{m(m^2 - 1)} \sum_{t=1}^m (r_i^t - r_j^t)^2, i, j = 1, 2, \cdots, u \quad (16)$$

其中, g_{ij} 为方案 i 和方案 j 的等级相关系数。对于第 k 个

取值方案，其与其他 $u-1$ 个取值方案的兼容度如下：

$$E_k = \sum_{j=1}^u \beta_j g_{kj}, j \neq k \quad (17)$$

其中, $\sum_{j=1}^u \beta_j = 1, \beta_j > 0$ 为第 j 个取值方案的权重, 通常在对各方案没有特别偏好时可取 $\beta_j = 1/(u-1)$ 。取值方案的兼容度越大, 则该方案的代表性越强、可靠性越高。

接着, 计算不同取值方案的差异度 Φ , 取值方案的差异度越小, 该方案越优。对于第 k 个取值方案, 其差异度如下:

$$\Phi_k = \frac{1}{u-1} \sum_{j=1}^u \phi_{kj}, j \neq k \quad (18)$$

其中, ϕ_{kj} 是以第 k 个取值方案的排序为基准, 位于某一序号范围内的评价对象, 在其余各个方案中超出规定序号范围的对象个数。

最后, 依据兼容度和差异度对取值方案进行排序, 分别得到各取值方案的兼容度排序 ζ_j^1 和差异度排序 $\zeta_j^2, j=1, 2, \dots, u$, 并按照式 (19) 计算第 k 个取值方案的综合排序:

$$\chi_k = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \zeta_k^i, k=1, 2, \dots, u \quad (19)$$

其中, $\alpha_i (0 \leq \alpha_i \leq 1)$ 为兼容度和差异度的权重, $\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1$ 。若更关注整体排序结果, 则 $\alpha_i > 0.5$; 若更关注局部排序结果, 则 $\alpha_i < 0.5$ 。选择综合排序最高的取值方案为最终组合权系数。

2.3 供应商绩效评估

对供应商进行评价和选择是复杂且困难的, TOPSIS 作为一种典型的多属性决策方法是解决这个问题的重要途径。它根据正理想解的最短距离和负理想解的最短距离对备选供应商进行优劣性评估和排序, 它简化了分析过程, 提供了符合管理者期望的结果。使用 TOPSIS 对供应商进行综合绩效评估的具体过程如下。

步骤 1: 数据预处理。对原始数据矩阵 $\mathbf{X}$ 进行归一化以保持准则的尺度一致性, 无量纲化处理可消除不同属性评价指标之间的量纲和数量级影响, 从而解决属性指标不可公度的问题。归一化后的数据矩阵如下。

$$\tilde{z}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (20)$$

将其与对应评价指标权重相乘, 得到加权归一化分析矩阵 $\mathbf{Z} = [z_{ij}] (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$:

$$z_{ij} = \tilde{z}_{ij} \cdot w_j \quad (21)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \tilde{z}_{11} \cdot w_1 & \tilde{z}_{12} \cdot w_2 & \cdots & \tilde{z}_{1n} \cdot w_n \\ \tilde{z}_{21} \cdot w_1 & \tilde{z}_{22} \cdot w_2 & \cdots & \tilde{z}_{2n} \cdot w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{z}_{m1} \cdot w_1 & \tilde{z}_{m2} \cdot w_2 & \cdots & \tilde{z}_{mn} \cdot w_n \end{bmatrix} \quad (22)$$

步骤 2: 寻找正理想解和负理想解。找出各项评价指标的正理想解和负理想解, 分别为各项评价指标的最大值和最小值, 建立正理想解向量和负理想解向量。

$$\mathbf{z}^+ = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+) \quad (23)$$

$$\mathbf{z}^- = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-) \quad (24)$$

其中, $z_j^+ = \max_i \{z_{ij}\}, z_j^- = \min_i \{z_{ij}\}, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ 。

步骤 3: 计算每个评价对象与正理想解和负理想解之间的距离。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad (25)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad (26)$$

步骤 4: 计算每个评价指标与正理想解的贴合系数, 得到各个供应商的绩效值。贴合系数 (即供应商绩效值) 如下。

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, i=1, 2, \dots, m \quad (27)$$

利用 TOPSIS 中的贴合系数 CC_i 对各供应商进行排序, 贴合系数值越大, 评价对象越优。供应商绩效评价及排序结果可整合到订单分配模型中, 以协助后续采购计划的执行。

2.4 供应商多目标订货量分配

企业对多供应商进行订货量分配时, 会根据多个指标进行衡量与选择, 目前常见的订货模型大多以经济成本为目标。但在冶金行业订货量分配问题上, 冶金行业的特殊性以及行业知识的缺乏导致现有大多模型难以直接应用。因此, 本文将冶金行业知识融入订货量分配模型, 以形成综合全面的决策。例如, 冶金原料主要包括用于提纯的主成分金属、少量有价的富含金属以及需要剔除的杂质金属, 原料主品位过低或杂质含量过高将会影响产品质量、缩短设备寿命、增加生产过程净化除杂成本。因此在订货量模型中需考虑配矿机理知识, 从生产的角度出发, 让原料中的各项元素成分满足一定的含量要求。进一步地, 由于冶金原料中含有少量有价的富含金属, 将给企业带来

额外富含效益,因此在计算采购成本时并非传统地计算采购单价与采购量之积,还应考虑冶金原料中的富含效益知识。此外,为了保证生产过程的连续稳定,应尽量向供货履约率高、原料品质好的供应商采购原料,即考虑供应商供货特性知识,应尽量与综合绩效高的供应商合作。本文在学界研究与企业实践经验的基础上,综合考虑冶金行业特性知识,从降成本、保质量的角度出发,以最小化采购总成本、最大化效用为目标函数,建立了多目标非线性整数规划模型,自动获得各供应商的最佳订货量。

(1) 目标函数

采购总成本:采购总成本为原料采购费用与原料富含金属价值之差,从企业利润出发,应使采购总成本 F_1 最小。

$$\min F_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} (p_{ij} f_{ij} - p_{ij} v_{ij}) \quad (28)$$

其中, p_{ij} 、 f_{ij} 、 v_{ij} 分别为第 i 个供应商第 j 类品级原料的采购量、价格和富含金属价值, N_i 为第 i 个供应商能提供的原料品级数量。

供应商总效用:为了保障原料质量及供应满足率,应尽量向综合绩效较高的高质量供应商采购原料,即应最大化供应商的总效用 F_2 。

$$\max F_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} p_{ij} CC_i \quad (29)$$

其中, CC_i 为 TOPSIS 的供应商绩效值。

(2) 约束条件

供给能力约束:第 i 个供应商第 j 类品级的原料采购量 p_{ij} 不应超过其供给能力 τ_{ij} 。

$$p_{ij} \leq \tau_{ij}, i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,N_i \quad (30)$$

主成分金属量约束:采购原料的主成分金属量总和应满足生产计划需求 B 。

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} p_{ij} \theta_{ij} \geq B \quad (31)$$

其中, θ_{ij} 是第 i 个供应商第 j 类品级的原料主成分含量。

采购总量约束:原料采购总量应与采购计划量 G 大致保持一致,即大于或等于采购计划量但不得大幅超过采购计划量。

$$G \leq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} p_{ij} \leq 1.02 \times G \quad (32)$$

库存约束:原料采购总量不得超过仓库剩余仓储能力限制 O 。

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} p_{ij} \leq O \quad (33)$$

主成分含量约束:采购原料中平均主成分含量

应不低于最低含量限制 ρ_m 。

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} p_{ij} \theta_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} p_{ij} \geq \rho_m \quad (34)$$

杂质含量约束:采购原料中的各项主要杂质平均含量不应超过对应最高含量限制 ρ_δ 。

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} p_{ij} \eta_{ij}^\delta / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} p_{ij} \leq \rho_\delta \quad (35)$$

其中, $\delta \in \Delta$ 是某种杂质元素, Δ 是主要杂质元素集合, η_{ij}^δ 是第 i 个供应商第 j 类品级的原料中杂质 δ 的含量, ρ_δ 是杂质 δ 的最高含量限制值。

订货量整数约束:实际原料订货量通常为整数,因此决策变量应为非负整数。

$$p_{ij} \in N, i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,N_i \quad (36)$$

上述模型是典型的多变量多目标非线性整数规划问题,难以直接进行求解。本文采用线性加权法将多目标优化问题转化为单目标优化问题,并将约束条件转化为线性整数规划问题,即可在优化器 Gurobi 中进行求解。

3 案例分析

本节对国内某大型锌冶炼企业的真实运营数据进行案例分析,以验证所提知识驱动的原料订单分配集成模型的有效性。在日益激烈的市场竞争下,目前该企业原料供应链订单分配面临以下问题。(1) 该企业虽然有一个供应链管理系统,但该系统主要完成信息的收集汇聚,仍然依赖人根据知识手动完成供应链中的复杂分析、创新决策,该企业供应商数量多、原料特性各异、影响因素关联复杂,面对规模庞大、信息复杂的订单分配问题,知识型工作者工作量大、劳动强度高、决策效率低下。(2) 供应商评价指标的权重主要由部门经理确定,然而不同部门经理的关注点和领域知识存在很大差异,采购部门认为成本是最重要的,而生产部门认为质量是最重要的,难以形成一个综合有效的供应商评价体系。(3) 在供应商订货量分配中,采购部门经理往往根据自己的经验从经济角度来分配订货量,没有很好地考虑供应商之间的绩效差异以及生产过程配矿对原料质量的要求,导致原料质量参差不齐、难以满足生产需求。该企业迫切地希望通过智能化手段代替当前的人工决策模式,以提升供应链决策效率与原料供应质量,提高企业的竞争力。本文利用该企业供应链的运营数据对所提知识驱动的原料订单分配集成模型进行有效验证,以期为该

通过综合模糊判断矩阵一致性检验、模糊判断因子矩阵分析等操作,获得基于企业经理人经验知识的评价指标权重 $w_j^a, j=1,2,\dots,9$ 。从表 5 可以看出,模糊层次分析法所得的评价指标权重的差异程度高于熵权法所得结果,因此组合权系数 γ 的取值范围应为 $[0,0.5]$ 。进一步地,在建议取值范围内制订不同的组合权系数取值方案,并按照供应商绩效评估方法计算不同取值方案对应的供应商排名,获得对应的兼容度与差异度排名,见表 4。由于供应商评价更倾向于整体排序结果,此处取兼容度权重 $\alpha_1=0.8$,即可得到不同组合权系数方案最终的综合排序。从表 4 可以看出, $\gamma=0.2$ 在兼容度评价中有最高的排名,且在差异度评价中表现优秀,在综合排序中表现最佳。因此,将 0.2 作为熵权法结果与模糊层次分析法结果的组合权系数。

不同方法下的供应商评价指标权重见表 5。从表 5 可以看出,CRITIC 法总体上能够根据实际数据客观地给出指标权重,例如资质健全与公司规模重要性相同,但资质健全与服务态度的重要性超过了平均主品位、杂质超标数量、额外富含效益等企业更为关心的指标,且原料到货量的重要程度不够明显,这与冶金企业尤其重视连续稳定生产的实际情况偏离较大。对于变异系数法,显然平均主品位、额外富含效益这两个冶金企业十分关注的指标被赋予了很低的权重;同时,原料到货量被赋予超过一半的重要度,过分放大了对原料到货量的重视程度,而其他评价指标的重要性大多处于同一水平,这显然与企业的实际偏

好相悖。

对于熵权法,原料到货量、服务态度的重要性较高,其余评价指标重要性有一定差异,但大致在同一水平。熵权法总体上能够客观地给出评价指标权重,但相关评价指标的重要程度与冶金企业的发展需求有所偏差。例如,虽然冶金企业为保证生产过程连续稳定对原料供应量十分关注,但熵权法中原料到货量的权重过高,相比之下其他评价指标的重要性微乎其微;同时,冶金企业从经济角度比较重视原料品位(主品位、富含元素品位等),但熵权法结果中平均主品位、额外富含效益的权重却普遍偏小,而服务态度并不是那么重要却占有第二高的权重。基于专家经验的模糊层次分析法所得结果大体上符合企业的发展偏好,但由于主观性强导致部分评价指标权重偏低,例如服务态度和配合程度的权重明显偏小,这在一定程度上不利于企业与供应商的合作管理。通过线性加权法将数据知识所得权重与经验知识所得权重进行融合,这种主客观结合的方式弥补了单一方面知识的不足,可以得到更为合理的评价指标综合权重,综合权重下各评价指标重要度排序为:原料到货量>平均主品位>额外富含效益>合同履约率>杂质超标数量>服务态度>资质健全>公司规模>配合程度。该评价指标重要度排序与企业发展偏好一致,且评价指标的重要性程度符合冶金流程型企业对原料供应稳定性及品位质量的高要求,所得评价结果更加科学可信。

表 4 不同组合权系数下的兼容度和差异度

组合权系数	兼容度	兼容度排序	差异度	差异度排序	综合排序
0	0.828217	6	10	6	6
0.1	0.829293	4	9.8	5	4
0.2	0.831006	1	6.8	4	1
0.3	0.830786	2	5	2	2
0.4	0.829337	3	4.8	1	3
0.5	0.829007	5	6.4	3	5

表 5 不同方法下的供应商评价指标权重

方法	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
CRITIC 法 ^[33]	0.1644	0.1171	0.1107	0.0701	0.0924	0.1291	0.1291	0.1148	0.0723
变异系数法 ^[34]	0.6057	0.0230	0.0614	0.0357	0.0814	0.0264	0.0264	0.0602	0.0798
熵权法	0.4170	0.0508	0.0310	0.0749	0.0476	0.0752	0.0752	0.1584	0.0699
模糊层次分析法	0.3289	0.2041	0.0605	0.1922	0.0918	0.0407	0.0376	0.0261	0.0181
所提方法	0.3465	0.1734	0.0546	0.1687	0.0830	0.0476	0.0451	0.0526	0.0285

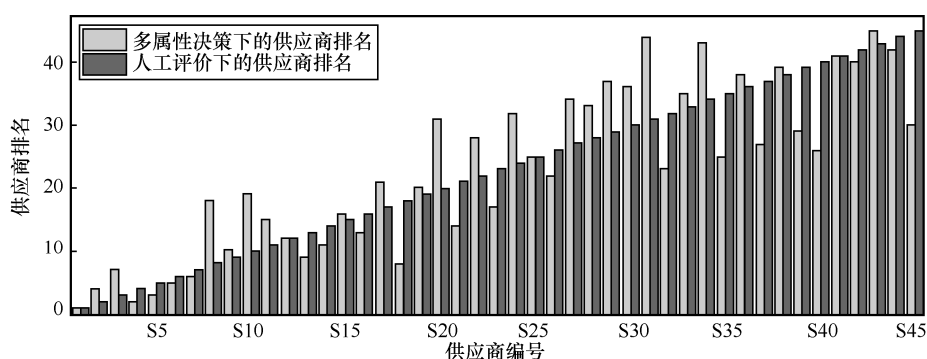


图2 供应商排名情况

在此基础上，应用 TOPSIS 对供应商评价指标权重和原始数据进行整合，得到各供应商的综合绩效和整体排序。图2给出了所提多属性决策下的供应商排名与企业中人工评价下的供应商排名情况。总体上两种方法所得的供应商排名趋势大致相同，但在具体排名上存在差异。以供应商 S8 为例，人工评价下排名第 8，但通过分析其具体数据可知，与其后续供应商相比，供应商 S8 在其他指标大致相同的情况下原料到货量明显小很多。尽管供应商 S8 到货主品位比较好，但在供应商考核指标中最为重要的因素原料到货量上，其相对于其他供应商有十分明显的劣势，人工评价下却有着更高的排名，这与现实中的判断依据差别较大。多属性决策方法对供应商 S8 的多方面指标进行综合考量，得出的排名 18 更能反映出该供应商的真实水平。类似地，人工评价下供应商 S10、S20、S25、S32 等都出现排名过高的情况，而所提方法给出了更为合理的排名。

再以供应商 S35 为例，人工评价下排名第 35，而通过原始数据分析可知，该供应商相比于人工评价下排名在其前面的供应商有着更高的主品位、更少的杂质，其他评价指标大致相同，甚至有明显更多的到货量，人工评价下却有着更低的排名。人工评价下供应商 S18、S35、S37、S40、S45 等均出现明显的排名过低问题，而多属性决策下的排名更能够反映供应商的真实状况。总体上，多属性决策方法将相关数据知识和专家经验知识有效融合，给出了更为全面、客观、合理的供应商排名。

为了进一步对结果进行定量分析，将不同方法下供应商的评价值进行对比分析，见表 6。从表 6 可以看出，人工评价下的供应商评分难以明显体现出供应商之间的差异性。以供应商 S1 为例，与排

名在后的几名供应商相比，其原料到货量具有显著的优势且其余指标大体相似，按道理其评价价值应比其他供应商明显高出许多。事实上，人工评价下该供应商评分仅比后续供应商多几分，过小的评分差距无法体现供应商的差异；而多属性决策评价下供应商 S1 的绩效值相比其他供应商有明显的提升，能够真实地反映出供应商质量的差异程度。进一步，人工评价下多个供应商均存在评分相同的情况，这导致供应商之间难以排序，而多属性决策方法能够用绩效值更精准地刻画不同供应商之间的差异性，有更好的区分度，在实际场景中应用性更强。

3.2 供应商订货量分配

对于该锌冶炼企业原料供应商订货量分配，原料锌精矿中主品位锌 (Zn) 金属应不低于特定含量，银、铟、铜、铅作为有价金属可为企业带来额外富含效益，铁 (Fe)、铅 (Pb)、二氧化硅 (SiO_2)、钴 (Co) 等元素作为杂质不能超过含量限制。从经济角度出发，采购总成本应最小，即采购费用与有价金属富含价值之差应最小；从生产角度出发，主成分锌含量及其他杂质含量应满足限制范围；从原料供应总体质量角度出发，应向高效益供应商订货，即供应商总效用应该最大。从 ERP 系统获取该企业某月订货的相关数据，对所提方法的有效性进行验证，其相关设定见表 7。

各供应商所能提供原料的基本情况见表 8。

基于表 7 和表 8 数据，可得到不同订货模式下的订货量分配结果，见表 9。其中人工决策订货表示企业采购部门给出的供应商订货量分配结果，经济成本订货表示以最小化采购总成本为目标，满足供给能力、采购总量、库存能力约束下的结果。

为了更清晰地分析不同订货方案之间的差异性，表 10 统计了不同订货方案的订货总价、供应

表 6 供应商评价结果

多属性决策评价			人工评价		
供应商	绩效值	排名	供应商	评分	排名
S1	0.9669	1	S1	92	1
S2	0.3187	4	S2	91	2
S3	0.2716	7	S3	90	3
S4	0.3697	2	S4	89	4
S5	0.3615	3	S5	88	5
S6	0.2997	5	S6	88	6
S7	0.2991	6	S7	88	7
S8	0.1102	18	S8	88	8
S9	0.1475	10	S9	87	9
S10	0.1029	19	S10	86	10
...	...	...	...	...	...
S36	0.0654	38	S36	71	36
S37	0.0836	27	S37	71	37
S38	0.0654	39	S38	70	38
S39	0.0823	29	S39	70	39
S40	0.0843	26	S40	70	40
S41	0.0649	41	S41	70	41
S42	0.0652	40	S42	69	42
S43	0.037	45	S43	69	43
S44	0.0632	42	S44	66	44
S45	0.0810	30	S45	65	45

表 7 订货量分配设定

指标	Zn 含量	SiO ₂ 含量	Pb 含量	Fe 含量	Co 含量	生产计划/吨	采购计划/吨	库存限制/吨
设定值	≥47%	≤3%	≤1.8%	12%	0.004%	23 700	51 640	53 250

表 8 各供应商所能提供原料的基本情况

供应商	绩效值	供给能力/吨	主品位	单价/元	富含价值/元	SiO ₂ 含量	Pb 含量	Fe 含量	Co 含量
S1	0.9669	1 875	0.56	11 441	474	0.88%	2.75%	6.87%	0.00263%
S1	0.9669	1 863	0.46	9 776	430	0.95%	1.84%	11.74%	0.00638%
S1	0.9669	610	0.42	8 481	732	1.33%	2.17%	6.89%	0.00758%
S2	0.3187	750	0.48	10 751	617	1.70%	1.28%	10.06%	0.00555%
S2	0.3187	1 655	0.52	10 740	848	2.02%	1.45%	14.07%	0.00339%
S3	0.2716	1 960	0.5	10 313	393	1.64%	1.36%	10.07%	0.02474%
S3	0.2716	2 585	0.47	9 483	678	2.17%	1.69%	7.76%	0.01507%
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
S40	0.0843	690	0.47	10 654	675	2.00%	1.34%	7.39%	0.01285%
S41	0.0649	695	0.39	8 477	805	2.75%	2.08%	12.38%	0.00326%
S42	0.0652	200	0.46	9 410	378	1.47%	1.37%	8.40%	0.00094%
S43	0.037	632	0.38	7 800	561	1.05%	1.31%	3.24%	0.00117%
S44	0.0632	420	0.41	8 892	741	1.49%	5.03%	15.26%	0.01830%
S45	0.0810	800	0.46	10 148	614	1.49%	0.94%	4.21%	0.00112%

表 9 不同订货方案下不同供应商订货量分配情况（单位：吨）

订单号	供应商	人工决策订货	经济成本订货	所提模型	订单号	供应商	人工决策订货	经济成本订货	所提模型
1	S1	1 875	0	1 875	29	S19	758	0	0
2	S1	1 863	1 863	1 863	30	S20	1 350	0	1 546
3	S1	0	610	610	31	S20	1 000	1 000	1 000
4	S2	250	0	750	32	S21	1 250	1 250	0
5	S2	1 655	1 655	1 655	33	S22	1 506	1 965	1 965
6	S3	1 960	1 960	0	34	S23	780	0	0
7	S3	1 450	2 585	2 585	35	S24	595	184.4	595
8	S4	444	752	752	36	S25	695	695	695
9	S4	0	0	0	37	S26	2 230	2 230	2 230
10	S5	595	0	595	38	S27	0	1 815	0
11	S5	1 637	1 637	1 637	39	S28	765	0	765
12	S6	2 850	2 850	2 850	40	S29	670	670	670
13	S6	150	0	180	41	S30	660	1 370	1 370
14	S7	1 195	0	1 150	42	S31	725	775	775
15	S8	200	0	490	43	S32	855	1 200	0
16	S8	1 750	1 750	1 750	44	S33	950	1 220	1 220
17	S9	1 600	1 800	1 800	45	S34	310	810	810
18	S10	548	0	567	46	S35	1 000	1 000	1 000
19	S11	1 113	2 120	2 120	47	S36	0	920	0
20	S11	960	0	960	48	S37	340	850	0
21	S12	1 870	0	0	49	S38	635	635	0
22	S13	1 650	1 650	1 650	50	S39	590	590	590
23	S14	2 630	2 630	2 630	51	S40	690	339	0
24	S15	950	0	1 220	52	S41	0	695	695
25	S16	865	1 955	1 955	53	S42	135	200	200
26	S17	400	742	742	54	S43	497	632	632
27	S17	1 696	1 696	1 696	55	S44	215	420	0
28	S18	0	1 120	0	56	S45	800	800	800

表 10 不同订货方案统计指标结果

方案	人工决策订货	经济成本订货	所提模型
订货总量/吨	521 57	51 640	51 640
订货总价/元	539 661 266	511 304 427	528 423 237.4
金属量/吨	24 932	23 699.98	24 512.63
主品位	47.80%	45.89%	47.47%
金属单价/元	21 645.33	21 574.04	21 557.18
富含值/元	33 463 424	34 830 326	34 935 660
供应商效用	11 123.98	9 659.23	11 555.13
平均 SiO ₂ 含量	1.77%	1.81%	1.77%
平均 Pb 含量	1.36%	1.43%	1.36%
平均 Fe 含量	8.83%	8.84%	8.77%
平均 Co 含量	0.0063%	0.0099%	0.0040%

商效用、杂质含量等指标。显然,3种订货量分配模式均满足订货总量、金属量的需求。对于人工决策订货,由于人工难以综合考虑数量繁多的信息给出精准决策,其原料订货总价高、富含金属价值低、钴元素超标严重,且供应商效用不高,原料供应履约率及质量难以得到稳定保障。对于经济成本订货模式,由于其目标在于最小化采购成本,因此其订货总价最低;然而其极大地忽略了生产部门的需求,主品位明显不达标且钴元素超标严重,供应商效用最低,极大地影响了生产过程稳定性,增加了生产成本。对于所提多目标订货分配模型,由于其全面考虑了供应商供货特性、生产配矿需求等因素,其各项元素含量均满足要求且供应商效用最高,优质的供应商将为企业的稳定连续生产提供坚实的保障。进一步地,虽然所提模型的订货总价比经济成本订货要高,但所提模型采购的原料总体质量更佳、有价金属富含效益更高,金属量单价也更低,从整体上来看采购总成本更低。

进一步地,引入订单执行率(订单实际订货量与该订单供给能力之比)来分析不同订单的实际执行情况,如图3所示。横坐标是所有的订单编号,纵坐标是不同的订货方案,不同的颜色代表了不同的订单执行率(范围在0~1)。总体上,在人工决策订货模式下,大部分订单会按一定比例被执行,订货量分布无特定规律。这是因为人工决策难以同时考虑价格、供应商质量、主品位、杂质等信息,通常在满足采购量的前提下按照个人意愿分配订单,所做决策整体上表现出较强的主观性和随意性,因此在采购成本、原料质量及供应商效用上表现不佳。对于经济成本订货模式,总体上排名靠后的供应商订单执行率更高,而排名靠前的供应商订单执行率明显更低。这是因为经济成本订货模式致力于获得最小的采购成本,而排名靠后的供应商由于其原料质量不佳通常报价较低,因此该模式将大部分订单分配在单价较低的供应商上。该订货模式采购成本小,但大部分订单给了绩效偏低的供应商,难以保证原料质量及供应保障率,往往出现主品位偏低、杂质含量超标严重的情况。对于所提模型,排名相对靠前的供应商的订单执行率较高,而排名靠后的供应商的订单执行率较低。这是因为所提模型综合考虑了经济成本和供应商绩效,在最小化采购成本的同时最大化供应商总绩效,避免了单纯经济成本订货下原料质量偏低的情况。总体上,

所提模型既有较低的采购成本,又有高绩效的供应商供货,保证了原料质量与供货稳定性。

总体来说,多属性决策和多目标决策集成的原料订单分配方法将冶金企业中的供货数据知识、专家经验知识、生产机理知识等进行数字化表达与综合利用,为企业在供应链管理中选择供应商和制订采购计划提供了一种系统化的方法。自动化的执行方式代替人工完成复杂的知识型工作,极大地减轻了人工决策负担,提升了决策效率。科学可靠的决策方式也避免了人为因素的干扰,提升了决策质量,有效降低了采购成本,提升了原料供应稳定性与质量,对于提升冶金企业在产业链中的核心竞争力具有重要意义。

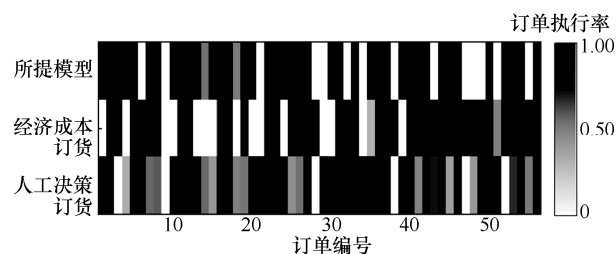


图3 不同订货模式下订单执行率情况

4 结束语

订单分配是冶金企业原料供应链中的关键问题,本文针对人工订单分配劳动强度大、决策效率低,现有方法缺乏冶金行业知识的问题,提出了知识驱动的冶金企业原料供应链订单分配方法。首先,在确定多层次供应商评价体系的基础上,通过熵权法和模糊层次分析法充分利用供货数据知识和专家经验知识,引入兼容度和差异度合理分配各评价指标的重要度。然后,基于TOPSIS构建多属性决策评价方法,自动获得各供应商综合绩效与排名。最后,综合考虑供应商供货特性知识、配矿机理知识、经营状况知识等,建立多目标订货量分配模型,自动获得复杂资源约束下各供应商的最优订货量。使用真实企业数据进行验证,结果表明,所提多属性决策和多目标决策集成的原料订单分配方法可以自动地完成供应商评价、订货量分配等知识型工作,极大地降低了人工劳动强度,提高了决策效率,可有效降低采购成本、提升原料质量。

参考文献:

- [1] 柴天佑,丁进良. 流程工业智能优化制造[J]. 中国工程科学, 2018,

- 20(4): 51-58.
- CHAI T Y, DING J L. Smart and optimal manufacturing for process industry[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(4): 51-58.
- [2] LIU Y S, YANG C H, HUANG K K, et al. Non-ferrous metals price forecasting based on variational mode decomposition and LSTM network[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2020, 188: 105006.
- [3] 袁小锋, 王雅琳, 阳春华, 等. 深度学习在流程工业过程数据建模中的应用[J]. *智能科学与技术学报*, 2020, 2(2): 107-115.
- YUAN X F, WANG Y L, YANG C H, et al. The application of deep learning in data-driven modeling of process industries[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2020, 2(2): 107-115.
- [4] LIU C L, WANG K, WANG Y L, et al. Learning deep multimani-fold structure feature representation for quality prediction with an industrial application[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(9): 5849-5858.
- [5] TSAI W C, WANG C H. Decision making of sourcing and order allocation with price discounts[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2010, 29(1): 47-54.
- [6] WANG L, DENG T H, SHEN Z J M, et al. Digital twin-driven smart supply chain[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2022, 9(1): 56-70.
- [7] HAMDAN S, CHEAITOU A. Supplier selection and order allocation with green criteria: an MCDM and multi-objective optimization approach[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 81: 282-304.
- [8] 袁小锋, 桂卫华, 陈晓方, 等. 人工智能助力有色金属工业转型升级[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(4): 59-65.
- YUAN X F, GUI W H, CHEN X F, et al. Transforming and upgrading nonferrous metal industry with artificial intelligence[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(4): 59-65.
- [9] HUANG K K, TAO Z, LIU Y S, et al. Adaptive multimode process monitoring based on mode-matching and similarity-preserving dictionary learning[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022: 1-14.
- [10] KUMAR D, RAHMAN Z, CHAN F T S. A fuzzy AHP and fuzzy multi-objective linear programming model for order allocation in a sustainable supply chain: a case study[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2017, 30(6): 535-551.
- [11] 丁进良, 杨翠娥, 陈远东, 等. 复杂工业过程智能优化决策系统的现状与展望[J]. *自动化学报*, 2018, 44(11): 1931-1943.
- DING J L, YANG C E, CHEN Y D, et al. Research progress and prospects of intelligent optimization decision making in complex industrial process[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(11): 1931-1943.
- [12] 牟天昊, 李少远. 流程工业控制系统的知识图谱构建[J]. *智能科学与技术学报*, 2022, 4(1): 129-141.
- MOU T H, LI S Y. Knowledge graph construction for control systems in process industry[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2022, 4(1): 129-141.
- [13] 桂卫华, 陈晓方, 阳春华, 等. 知识自动化及工业应用[J]. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46(8): 1016-1034.
- GUI W H, CHEN X F, YANG C H, et al. Knowledge automation and its industrial application[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2016, 46(8): 1016-1034.
- [14] 桂卫华, 曾朝晖, 陈晓方, 等. 知识驱动的流程工业智能制造[J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(9): 1345-1360.
- GUI W H, ZENG H Z, CHEN X F, et al. Knowledge-driven process industry smart manufacturing[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2020, 50(9): 1345-1360.
- [15] 柴天佑, 丁进良, 桂卫华, 等. 大数据与制造流程知识自动化发展战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- CHAI T Y, DING J L, GUI W H, et al. Research on the development strategy of knowledge automation of big data and manufacturing process[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [16] GUPTA H, BARUA M K. Supplier selection among SMEs on the basis of their green innovation ability using BWM and fuzzy TOPSIS[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 152: 242-258.
- [17] GOVINDAN K, KADZIŃSKI M, SIVAKUMAR R. Application of a novel PROMETHEE-based method for construction of a group compromise ranking to prioritization of green suppliers in food supply chain[J]. *Omega*, 2017, 71: 129-145.
- [18] WU T, BLACKHURST J. Supplier evaluation and selection: an augmented DEA approach[J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(16): 4593-4608.
- [19] HSU B M, CHIANG C Y, SHU M H. Supplier selection using fuzzy quality data and their applications to touch screen[J]. *Expert Systems With Applications*, 2010, 37(9): 6192-6200.
- [20] GOLMOHAMMADI D, CREESE R C, VALIAN H, et al. Supplier selection based on a neural network model using genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2009, 20(9): 1504-1519.
- [21] 李益兵, 宋东林, 王磊. 基于混合 PSO-Adam 神经网络的外协供应商评价决策模型[J]. *控制与决策*, 2018, 33(12): 2142-2152.
- LI Y B, SONG D L, WANG L. Based on hybrid PSO-Adam neural networks decision making model for outsourcing supplier evaluation[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(12): 2142-2152.
- [22] KAWTUMMACHAI R, VAN HOP N. Order allocation in a multiple-supplier environment[J]. *International Journal of Production Economics*, 2005, 93/94: 231-238.
- [23] 孟懂懂. 集中采购模式下多目标订单分配模型研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- MENG D D. Research on multi-objective order allocation model under centralized procurement[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [24] LIN R H. An integrated FANP-MOLP for supplier evaluation and order allocation[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, 33(6): 2730-2736.
- [25] ÇEBİ F, OTAY İ. A two-stage fuzzy approach for supplier evaluation and order allocation problem with quantity discounts and lead time[J]. *Information Sciences*, 2016, 339: 143-157.
- [26] DICKSON G W. An analysis of vendor selection systems and decisions[J]. *Journal of Purchasing*, 1966, 2(1): 5-17.
- [27] WEBER C A, CURRENT J R, BENTON W C. Vendor selection criteria and methods[J]. *European Journal of Operational Research*, 1991, 50(1): 2-18.
- [28] ZHANG W Y, DING J P, WANG Y, et al. Multi-perspective collabora-

- tive scheduling using extended genetic algorithm with interval-valued intuitionistic fuzzy entropy weight method[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 53: 249-260.
- [29] AL-HARBI K M A S. Application of the AHP in project management[J]. International Journal of Project Management, 2001, 19(1): 19-27.
- [30] LIU Y, ECKERT C M, EARL C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements[J]. Expert Systems With Applications, 2020, 161: 113738.
- [31] 王金星, 汪海涛, 姜瑛, 等. 基于三角模糊数层次分析法的软件质量评价模型研究[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(9): 1693-1697.
- WANG J X, WANG H T, JIANG Y, et al. Research on software quality evaluation model based on triangular fuzzy number analytic hierarchy process[J]. Computer & Digital Engineering, 2017, 45(9): 1693-1697.
- [32] 张益, 张俊容. 基于兼容度和差异度的多属性评价方案优化方法[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(11): 78-82.
- ZHANG Y, ZHANG J R. A multi-attribute optimization method based on compatibility degree and difference degree[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2010, 32(11): 78-82.
- [33] 刘传修, 张菁, 刘小康, 等. 基于 IVIF-AHP 与改进 CRITIC 法的配电网规划方案综合评估[J]. 控制工程, 2022, 29(2): 322-329.
- LIU C X, ZHANG J, LIU X K, et al. Comprehensive evaluation of distribution network planning scheme based on IVIF-AHP and improved CRITIC method[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(2): 322-329.
- [34] 白丽丽, 白尚旺, 党伟超, 等. 基于离差最大化组合赋权的煤矿安全评价研究[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(4): 82-87.

BAI L L, BAI S W, DANG W C, et al. Coal mine safety assessment based on maximum deviation combination empowerment[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(4): 82-87.

[作者简介]



刘一顺(1995-), 男, 中南大学自动化学院博士生, 主要研究方向为供应链优化、工业过程监测、工业互联网等。



阳春华(1965-), 女, 博士, 中南大学自动化学院院长、教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化控制、智能感知与自动化装置、工业大数据分析 with 深度学习、流程工业智能优化制造等。



黄科科(1990-), 男, 博士, 中南大学自动化学院人工智能系副主任、教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂系统与复杂网络、大数据分析 with 处理、智能制造与工业互联网等。