

王华银,傅呈勋,成鹏飞,等.基于 VIKOR 方法的钢铁企业大型设备维修方案决策模型[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(4):100-112. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.014

WANG H Y, FU C X, CHENG P F, et al. Decision Making Model for Maintenance Plan Selection of Large Equipment in Iron and Steel Enterprises Based on VIKOR Method [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021,36(4):100-112. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.014

基于 VIKOR 方法的钢铁企业 大型设备维修方案决策模型

王华银^{1,2},傅呈勋^{2,3},成鹏飞^{2,4*},周向红^{2,4}

(1.湖南科技大学 商学院,湖南 湘潭 411201; 2.产业发展大数据与智能决策湖南省工程研究中心,湖南 湘潭 411201;
3.湖南华菱湘潭钢铁有限公司,湖南 湘潭 411101;4.湖南科技大学 大数据与智能决策研究中心,湖南 湘潭 411201)

摘要:为准确评估钢铁企业大型设备的故障状况,推荐最优维修方案,建立了基于多源异构多准则折衷排序(Vise Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje, VIKOR)方法的大型设备维修方案决策模型.首先基于文献资料和专家经验构建主客观指标体系,主要包括大型设备状况、同类设备历史维修信息、维修团队的技术水平和维修条件等一级指标;然后针对多源异构信息,确定主观权重与客观熵权法相结合的综合指标权重;其次采用基于异构信息的 VIKOR 方法处理评价信息,得到钢铁企业大型设备维修方案的优先次序;最后通过钢铁企业大型设备维修方案的实例分析和灵敏度分析,验证多源异构 VIKOR 方法大型设备维修方案决策模型的可靠性和有效性.

关键词:多源异构;VIKOR;决策模型;维修方案

中图分类号:TB497 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2021)04-0100-13

Decision Making Model for Maintenance Plan Selection of Large Equipment in Iron and Steel Enterprises Based on VIKOR Method

WANG Huayin^{1,2}, FU Chengxun^{2,3}, CHENG Pengfei^{2,4}, ZHOU XiangHong^{2,4}

(1. School of Business, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Engineering Research Center for Intelligent Decision Making and Big Data on Industrial Development, Xiangtan 411201, China;
3. Hunan Valin Xiangtan Iron and Steel Co.Ltd, Xiangtan 411101, China;
4. Research Center of Big Data and Intelligent Decision, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To evaluate the fault condition of large-scale equipment of iron and steel enterprises and select the optimal maintenance plan, a decision model of large-scale equipment repair scheme was established, that based on the multi-source isomeric multi-criterion compromise sequencing method (Vise Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje, VIKOR). Firstly, based on the literature and expert experience, a subjective and objective index system was established, including the status of large-scale equipment, historical maintenance information of similar equipment, technical level of maintenance team and maintenance conditions. Secondly, according to the multi-source heterogeneous information, the comprehensive index weight combining subjective

收稿日期:2021-05-02

基金项目:国家社科基金后期资助项目(19FGLB011);湖南省社会科学成果评审委员会资助项目(XSP21ZDI004);湖南省教育厅重点资助项目(18A201)

*通信作者,E-mail:1180033@hnust.edu.cn

weight and objective entropy weight was determined. Furthermore, the VIKOR method based on heterogeneous information was used to deal with evaluation information, and obtain the priority of maintenance plan for large-scale equipment in iron and steel enterprises. Finally, the reliability and effectiveness of the model were verified by an experimental example of maintenance scheme selection for large equipment and sensitivity analysis.

Keywords: multi-source heterogeneous; VIKOR; decision model; maintenance plan

钢铁冶金在国民经济发展中具有重要的战略地位,其发展水平是衡量一个国家工业综合实力的重要标志.钢铁企业生产线主要由轧机、加热炉和热处理装置等大型设备组成^[1],这些大型设备的正常运转是钢铁冶金企业产量与质量的根本保证.设备检修与维护是避免设备故障发生以及降低设备故障损失的有效手段^[2],维修与养护方案是降低钢铁企业大型设备故障时间,提升使用效率的重要因素.因此,如何科学评估大型设备故障,为设备管理人员推荐最佳维修方案,提升设备正常运转时间,已成为钢铁行业亟待解决的重要问题.

近年来,决策方法和人工智能技术已逐步应用于工业控制、交通运输、医疗诊断和电子商务等领域,也有学者开展了将决策方法和人工智能技术应用到设备运维方案、设备健康状况诊断方案,以及设备故障维修方案的评价与决策的研究中^[3].如胡雷刚等^[4]在不确定信息环境下应用群决策方法对某型雷达的送修级别进行了评价,能显著地提高装备送修级别决策效率;侯艾君等^[5]针对不同季节气象因素及检修能力等约束条件,提出了一种输电设备状态维修日程的可靠性决策方法,以搜寻待修设备的最佳维修日程;晋民杰等^[6]针对属性值为区间粗糙数且权重未知的情况,提出了液压泵维修方式选择的多属性决策方法,决策过程中不仅考虑了可靠性指标,同时考虑了经济性、时效性等指标.还有学者使用多个客观准则来定量评价设备维修方案,如维修时间、维修费用以及维修条件等^[2,4,7-9].Opricovic等^[7]在研究中采用主观准则对维修方案进行评价,如不良影响严重程度和引发其他故障的严重程度等.也有学者对设备维修的评价信息进行了研究,Zhang等^[9]的研究成果将中智集作为反映文本评价模糊性的有效工具,而操作人员和管理人员对设备故障的评价信息通常是文本信息,具有一定的情感价值,但每个情感值不仅有一定程度的真实性,也有虚假度和不确定度,因此,需要将文本评价信息转化为具有积极、中立、消极等值的中智数;Pang等^[10]指出由于决策者在表达评价信息时,通常会在几个可能的语言学术语中产生犹豫,而概率语言术语集(Probabilistic Linguistic Term Sets, PLTS)更便于决策者表达自己的偏好,因此,PLTS能更准确地表达专家的语言信息.VIKOR方法与接近理想方案的序数偏好方案(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)等方法相比,能较好地解决数据间的不可公度性,并获得妥协最优解,因此,已有学者将基于异构信息的VIKOR方法应用于手术方案^[11-12]和协同创新伙伴^[13]等的评价与决策,但还没有将VIKOR方法应用到设备维修方案评价中.

由此可见,已有成果研究了将决策算法应用于设备维修方案评价,但都没有考虑维修方案评价信息的多源异构特性,即信息的来源除了设备状况或维修条件外,还有不同专家、维修条件、设备的历史维修方案及维修效果等;同时,评价信息类型既有概率语言、区间数和中智数等模糊信息,又有实数等确定信息,如果不考虑多种信息类型,有可能导致信息缺失或失真^[14],不能得到最优的维修方案.为有效地解决以上问题,文章将构建基于多源异构VIKOR方法的大型设备故障维修方案决策模型,在建立主客观指标体系的同时,将模糊理论与定量数据分析相结合,充分考虑维修方案评价中存在的多源异构信息,并运用VIKOR方法对多个可选的维修方案进行排序,为设备管理者、维修者和使用者的决策提供支持.

1 基础理论

1.1 区间数

定义 1^[15] 设 $a = [a^L, a^U]$, $a^L \leq a^U$, a 即为定义在实轴上的区间数, a^L 代表 a 的下界, a^U 代表 a 的上界.

定义 2^[16] 令 $a = [a^L, a^U]$, $b = [b^L, b^U]$, a, b 均为区间数,则 a 与 b 之间的欧式距离可由式(1)计算得到.

$$d(a, b) = \frac{1}{2} \sqrt{[(a^L - a^U)^2 + (b^L - b^U)^2]}. \quad (1)$$

定义 3^[17] 区间数加权算术平均算子(IWAA 算子).

设 $\tilde{a}_i = [a_i^L, a_i^U]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 是一组区间数, 称映射 IWAA: $R^n \times R^n \rightarrow R \times R$ 为区间数加权算术平均算子, 则

$$\text{IWAA}_w(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) = \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i w_i = [\sum_{i=1}^n a_i^L w_i, \sum_{i=1}^n a_i^U w_i]. \quad (2)$$

其中, 加权向量:

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n), \sum_{i=1}^n w_i = 1; w_i \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

1.2 中智数

定义 4^[18] 设 X 为对象集, x 为 X 中的任一元素, X 中的一个中智集 A 可以由不确定程度函数 $I_A(x)$ 、真实程度函数 $T_A(x)$ 和谬误程度函数 $F_A(x)$ 表示, 可以表示为 $A = \{[x, T_A(x), I_A(x), F_A(x)] \mid x \in X\}$, 其中 $T_A(x), I_A(x)$ 和 $F_A(x)$ 满足 $T_A(x): X \rightarrow [0, 1], I_A(x): X \rightarrow [0, 1], F_A(x): X \rightarrow [0, 1], 0 < T_A(x) + I_A(x) + F_A(x) < 3$.

定义 5^[19] 设 X 为对象集, x 为 X 中的任一元素, X 中的一个单值中智集 $A \subset X$ 可以由不确定隶属度函数 $I_A(x)$ 、真实隶属度函数 $T_A(x)$ 和谬误隶属度函数 $F_A(x)$ 表示, 其中 $T_A(x) \in [0, 1], I_A(x) \in [0, 1], F_A(x) \in [0, 1]$. 一个单值中智集 A 的隶属度函数之和满足: $0 \leq T_A(x) + I_A(x) + F_A(x) \leq 3$.

定义 6^[20] 设 A 和 B 是 $x_i \in X (i = 1, 2, \dots, n)$ 上的 2 个单值中智集, 则其欧式距离可由式(4)计算得到.

$$d(A, B) = \sqrt{\frac{1}{3n} \sum_{i=1}^n \{(T_A(x_i) - T_B(x_i))^2 + (I_A(x_i) - I_B(x_i))^2 + (F_A(x_i) - F_B(x_i))^2\}}. \quad (4)$$

定义 7^[21] 设 A 为任一中智集, 则单值中智加权平均算子为

$$F_{A_i} = \psi_1 A_1 \oplus \psi_2 A_2 \oplus \dots \oplus \psi_n A_n = [1 - \prod_{i=1}^n (1 - T_{A_i})^{\psi_i}, \prod_{k=1}^n (I_{A_i})^{\psi_i}, \prod_{i=1}^n (F_{A_i})^{\psi_i}]. \quad (5)$$

式中: ψ_i 为 A_i 的权重向量, $\psi_i > 0, (i = 1, 2, \dots, n), \sum_{i=1}^n \psi_i = 1$.

1.3 概率语言术语集

定义 8^[12] 设 $S = \{s_0, s_1, \dots, s_r\}$ 是一个语言术语集, 则概率语言术语集(PLTS)可定义为 $L(p) = \{L^{(k)}(p^{(k)}) \mid L^{(k)} \in S, p^{(k)} \geq 0, k = 1, 2, \dots, \#L(p), \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \leq 1\}$, 其中 $L^{(k)}(p^{(k)})$ 是概率为 $p^{(k)}$ 的语言术语 $L^{(k)}$, $\#L(p)$ 是 $L(p)$ 中不同语言术语的个数.

定义 9^[11] 设 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 是任意 2 个概率语言术语集, 令 $\#L_1(p)$ 和 $\#L_2(p)$ 分别是 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 中语言术语的个数. 如果 $\#L_1(p) > \#L_2(p)$, 将 $\#L_1(p) - \#L_2(p)$ 个数的语言术语添加到 $L_2(p)$, 以确保 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 的语言术语的数量一致. 添加的语言术语是 $L_2(p)$ 中最小的一个, 且概率为 0.

定义 10^[11] 给定一个概率语言术语集 $L(p)$, $\sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} < 1$, 则标准化的概率语言术语集 $L(p)$ 定义如下:

$$\dot{L}(p) = \{L^{(k)}(\dot{p}^{(k)}) \mid k = 1, 2, \dots, \#L(p)\}, \text{ 其中对于所有 } k = 1, 2, \dots, \#L(p), \dot{p}^{(k)} = p^{(k)} / \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)}.$$

设 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 为任意 2 个概率语言术语集, 则标准化形式可由以下步骤计算得到:

1) 如果 $\sum_{k=1}^{\#L(p)} p_i^{(k)} < 1$, 则依据定义 10, 可计算得到 $\dot{L}_i(p)$, 其中 $i = 1, 2$.

2) 如果 $\#L_1(p) \neq \#L_2(p)$, 则将一些元素添加到元素数量较少的语言术语集中.

定义 11^[11] 设 $L_i(p) = \{L_i^{(k)}(p_i^{(k)}) \mid k = 1, 2, \dots, \#L_i(p)\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 是 n 个概率语言术语集, 其

中 $L_i^{(k)}$ 是 $L_i(p)$ 中第 k 个语言术语, $p_i^{(k)}$ 则是其概率,则概率语言加权平均算子如式(6)所示.

$$PLWA(L_1(p), L_2(p), \dots, L_i(p)) = w_1 L_1(p) \oplus w_2 L_2(p) \oplus \dots \oplus w_n L_n(p) = \bigcup_{L_1^{(k)} \in L_1(p)} \{w_1 p_1^{(k)} L_1^{(k)}\} \oplus \bigcup_{L_2^{(k)} \in L_2(p)} \{w_2 p_2^{(k)} L_2^{(k)}\} \oplus \dots \oplus \bigcup_{L_n^{(k)} \in L_n(p)} \{w_n p_n^{(k)} L_n^{(k)}\}. \quad (6)$$

式中: $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 是 $L_i(p)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 的权重向量, 且 $w_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n, \sum_{i=1}^n w_i = 1$.

定义 12^[22] 设 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 是 2 个概率语言术语集, 且 $\#L_1(p) = \#L_2(p)$, 则两者之间的距离可以定义为

$$d(L_1(p), L_2(p)) = \sqrt{\sum_{k=1}^{\#L_1(p)} (p_1^{(k)} r_1^{(k)} - p_2^{(k)} r_2^{(k)}) / \#L_1(p)}. \quad (7)$$

式中: $r_1^{(k)}$ 和 $r_2^{(k)}$ 分别是语言术语 $L_1^{(k)}$ 和 $L_2^{(k)}$ 的下标.

2 大型设备维修方案评价模型

2.1 维修方案指标体系

参考文献[13-14],同时考虑专家意见,重点从设备使用情况、维修情况、维修效果、维修团队的技术水平和维修设备条件 5 个方面构建钢铁企业大型设备检修方案评价指标体系,并由此设计了故障特征、维修效果、维修技术、维修情况和维修设备 5 个准则,同时,将每个准则细化为指标,每个指标都在一定程度上对维修方案的评价结果产生影响.钢铁企业大型设备维修方案评价指标体系具体如表 1 所示.由于所构建的维修方案评价指标体系信息来源渠道多样,导致其指标值相对复杂,有实数、区间数、语言标签和概率语言等多种形式.

表 1 维修方案评价指标体系

准则	指标	定义	指标类型
故障特征 G_1	故障严重适合方案程度 g_{11}	设备故障严重情况适合应用该维修方案的程度	效益型
	故障紧急适合方案程度 g_{12}	设备故障紧急情况适合应用该维修方案的程度	效益型
	故障经济损失适合方案程度 g_{13}	故障造成经济损失大小适合应用该维修方案的程度	效益型
维修情况 G_2	维修方案复杂程度 g_{21}	维修方案越复杂,风险越高	成本型
	维修成本 g_{22}	维修费用	成本型
	1 年完好率 g_{23}	维修后 1 年内设备完好的概率	效益型
	故障维修时间 g_{24}	故障维修所花费的时间	成本型
	维修对设备的损害 g_{25}	维修造成的设备损害大小	成本型
维修效果 G_3	修复的可能性 g_{31}	该维修方案修复设备的可能性	效益型
	引发其他故障的严重程度 g_{32}	维修引发其他故障的严重程度	成本型
	不良影响的严重程度 g_{33}	维修造成不良影响的严重程度	成本型
	故障复发的概率 g_{34}	维修后故障复发的概率	成本型
	维修影响生产时间 g_{35}	设备修复造成生产线不能正常生产的时间	成本型
维修技术 G_4	维修效果评分 g_{36}	维修后设备的性能状态	效益型
	功能修复程度 g_{37}	维修恢复设备功能的程度	成本型
	技术水平 g_{41}	维修团队的技术力量	效益型
	协作能力 g_{42}	维修团队的协作能力	效益型
维修设备 G_5	检修资源 g_{43}	该维修方案可获得的资源	效益型
	熟练程度 g_{44}	对该维修方案的熟练程度	效益型
	维修设备先进程度 g_{51}	维修设备的性能	效益型
	配套设施完备度 g_{52}	维修配套设施的配套设施完备度	效益型
	测试技术 g_{53}	测试与检测技术的完善程度	效益型
	维护设施完善度 g_{54}	维修设施的完善度	效益型

2.2 计算准则权重

应用最优最劣方法(Best-Worst Method, BWM) 计算准则权重的步骤如下:

步骤 1:确定准则集 $\{G_1, G_2, \dots, G_n\}$.

步骤2:从准则集 $\{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ 中选出最重要的(最好的)准则,记为 G_B ; 选出最不重要的(最差的)准则,记为 G_W .

步骤3:用1~9之间的整数表示最重要的准则相对其他准则的重要程度(1同等重要,9相对极度重要),构建比较向量 $C_B = (g_{B1}, g_{B2}, \dots, g_{Bn})$, 其中 g_{Bj} 表示最重要的准则 G_B 相对其他准则 G_j 的重要性,如 $g_{BB} = 1$.

步骤4:用1~9之间的整数表示其他准则相对最不重要准则的重要程度(1同等重要,9相对极度重要),构建比较向量 $C_W = (g_{1W}, g_{2W}, \dots, g_{nW})$, 其中 g_{jW} 表示其他准则 G_j 相对最不重要准则 G_W 的重要程度,如 $g_{WW} = 1$.

步骤5:计算最优准则权重 $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$.

对于准则 G_B, G_W 和 G_j ,其最优权重应同时满足 $w_B/w_j = g_{Bj}$ 和 $w_j/w_W = g_{jW}$. 为满足这2个条件,差异绝对值 $\left| \frac{w_B}{w_j} - g_{Bj} \right|$ 和 $\left| \frac{w_j}{w_W} - g_{jW} \right|$ 的最大值对于所有的 j 要最小化.同时为确保权重非负,且权重之和总等于1,可应用式(8)求解.

$$\min \max_j \left\{ \left| \frac{w_B}{w_j} - g_{Bj} \right|, \left| \frac{w_j}{w_W} - g_{jW} \right| \right\}.$$

s.t.

$$\sum_j w_j = 1;$$

$$w_j \geq 0, \text{ for all } j.$$

(8)

式(8)可转换为线性规划问题:

$$\min \xi^L$$

s.t.

$$|w_B - g_{Bj}w_j| \leq \xi^L, \text{ for all } j;$$

$$|w_j - g_{jW}w_W| \leq \xi^L, \text{ for all } j;$$

$$\sum_j w_j = 1;$$

$$w_j \geq 0, \text{ for all } j.$$

(9)

式(9)即为线性规划问题,有唯一解.解式(8)所表示的线性规划,可得到最优权重 $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ 和 ξ^{L*} ,其中 ξ^{L*} 是一致性比率,其值越接近0,越一致.由此即可计算得到故障特征 G_1 , 维修情况 G_2 , 维修效果 G_3 , 维修技术 G_4 和维修设备 G_5 等准则的权重向量 $(w_1^*, w_2^*, w_3^*, w_4^*, w_5^*)$.

2.3 获得评价矩阵

钢铁企业大型设备故障维修方案的评价信息涉及故障维修历史案例、维修工程师、设备操作维护人员等不同信息来源,评价信息值可能是实数、区间数、语言标签和概率语言等,如1年完好率和故障复发率等指标的评价值是实数;维修成本、维修时间和维修效果评分等指标的评价值是区间数;故障维修对设备的损害、团队能力、维修技术水平、熟练程度、检修资源、完善水平、先进设备、测试技术和维护设施完善度用语言标签来评价;故障严重程度、故障紧急程度、故障经济损失程度、维修方案的复杂性、修复的可能性、引发其他故障的严重程度、不良影响的严重程度和功能修复程度等指标的评价值是概率语言.由于信息的不确定性,设备操作人员提供的语言标签可以转化为中智数.因此,构建维修方案评价指标体系评价矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$, 其包括实数、区间数、中智数和概率语言值等类型的信息, r_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的实际值.

2.3.1 获得实数

大型设备修复率和故障复发概率等指标评价值主要依据该企业同类设备以往的维修案例情况统计得到.其中1年完好率是指设备经维修后,1年内保持完好且正常运行的设备相对于所有接受该维修方案的设备的百分比,而复发概率是指设备重复发生同样故障的台数与应用该维修方案修复的设备台数的比率.可见,大型设备修复率和故障复发概率是将比率数据作为评价值,而比率是根据钢铁企业设备管理系统历

史记录计算的,每种维修方案对应的只有一个数据,不需要进行集结,由此可得到评价矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 中 r_{23} 和 r_{34} 的值,分别用 g_{23} 和 g_{34} 的值代替.

2.3.2 获得区间数

根据钢铁企业设备维修的档案资料,对维修成本、维修时间、维修效果等指标进行评价.这些数据每次维修都不一样,不是准确数据,但通常在某个区间范围内,可用区间数表示,同时也可以利用区间算术平均算子式(2)和式(3)对这些区间评价信息进行集结,由此可得到评价矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 中 r_{22}, r_{24}, r_{35} 和 r_{36} 的值,分别用 g_{22}, g_{24}, g_{35} 和 g_{36} 的值代替.

2.3.3 计算中智数

通常,设备操作使用人员对维修效果的感知和评价是最现实、最客观的.因此,由操作过维修设备的操作员对维修方案中设备的损害、维修技术水平、检修资源、维修设备先进程度、熟练程度、团队能力、检测技术、完善水平和维护设施完善度等指标进行评价,可有效地提高评价的客观性和准确性.设备操作使用人员在评价设备维修情况时,通常将评价信息转化为具有谬误程度、不确定程度和真实程度的中智数.

假设 $S = \{s_i | i = -t, \dots, t\}$ 是由 n 位设备使用人员决定的有限的离散语言标签集.构建一个语义分析系统,在这个系统中令 $t = 3, s_i$ 代表一个可能的语言学术语.具体的语言标签集可能是 $S = \{s_{-3} = \text{very bad}, s_{-2} = \text{bad}, s_{-1} = \text{slightly bad}, s_0 = \text{ok}, s_1 = \text{slightly good}, s_2 = \text{good}, s_3 = \text{very good}\}$.利用 R 语言进行情感分析计算得到表 2 中的语义值,根据不同的情感词,将语言变量分配为积极的、中立的和消极的值作为中智数,积极的值是 T ,中立的值是 I ,消极的值是 F ,积极的值的平均值是 \bar{T} ,消极值的绝对值的平均值是 \bar{F} 值.如果 s_0 存在, I 值是 1,如果 s_0 不存在,则为 0.例如,假设一个语言集 $S = \{s_{-1}, s_0, s_1, s_2, s_3\}$, 则中智数为 $\left[\frac{s_1 + s_2 + s_3}{3}, s_0, |s_{-1}| \right]$.然后,利用式(5)所示的单值中智加权平均算子对中智数进行集结,其中, $\psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_p)^T$ 是与这些指标对应的权重向量.由此可得到评价矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 中 $r_{25}, r_{41}, r_{42}, r_{43}, r_{44}, r_{51}, r_{52}, r_{53}$ 和 r_{54} 的值,分别用 $g_{25}, g_{41}, g_{42}, g_{43}, g_{44}, g_{51}, g_{52}, g_{53}$ 和 g_{54} 的值代替.

表 2 情感值

评价	非常差	差	稍差	一般	稍好	好	非常好
情感度	-0.954 6	-0.750 0	-0.106 1	0.000 0	0.106 1	0.750 0	0.954 6

2.3.4 获得概率语言值

大型设备的故障严重程度、故障紧急程度、故障经济损失程度、维修复杂性、修复可能性、引发其他故障的严重程度、功能修复程度和不良影响的严重程度等维修方案指标评价值,是设备管理人员和维修人员根据特定情况评价给出的概率语言值.根据概率语言术语集的定义,参与评审的专家可能会用 $S = \{s_0 = \text{very low}, s_1 = \text{low}, s_2 = \text{medium low}, s_3 = \text{medium}, s_4 = \text{medium high}, s_5 = \text{high}, s_6 = \text{very high}\}$ 语言术语集来对指标进行评价,然后使用概率语言加权平均算子式(6)进行集结,因此,可得到评价矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 中 $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{31}, r_{32}, r_{33}$ 和 r_{37} 的值,分别用 $g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{21}, g_{31}, g_{32}, g_{33}$ 和 g_{37} 等概率语言值代替.

2.4 计算指标权重

利用主客观相结合的原则来计算指标权重,首先计算大型设备维修指标的熵权,然后将维修指标的熵权与 BWM 计算得到的准则权重结合,计算得到综合指标权重.

2.4.1 计算数值型指标的熵权

用式(10)将评价矩阵 R 标准化,并将标准化矩阵正规化处理,得到正规化评价矩阵,记为 $R = (Z_{ij})_{m \times n}$.

$$Z_{ij} = \begin{cases} \frac{r_{ij} - r_j^{\min}}{r_j^{\max} - r_j^{\min}}, & \text{如果 } j \text{ 为效益型指标;} \\ \frac{r_j^{\max} - r_{ij}}{r_j^{\max} - r_j^{\min}}, & \text{如果 } j \text{ 为成本型指标.} \end{cases} \quad (10)$$

利用正规化数据所形成的矩阵,在有 m 个评价指标, n 个被评价对象的评估问题 (m, n) 问题中求相关指标的熵权,其公式为

$$E_{ij} = (1 - e_i) / \sum_{i=1}^m (1 - e_i);$$

$$e_i = -k \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}, k = 1/\ln n, \sum_{i=1}^m E_i = 1. \quad (11)$$

式中: $[p_{ij}]_{m \times n} = [Z_{ij} / \sum_{i=1}^m Z_{ij}]_{m \times n}$, 因此,可以算出熵权 E_{23} 和 E_{34} .

2.4.2 计算区间值指标的熵权

首先用式(12)对区间数进行标准化,得到标准化的区间值.

$$\beta_{ij} = \begin{cases} [a_{ij} / \sum b_j, b_{ij} / \sum a_j], & \text{效益型;} \\ [((a_{ij})' / \sum (b_j)', (b_{ij})' / \sum (a_j)')], & \text{其中 } (a_{ij})' = \max a_{ij} - a_{ij} + \min a_{ij}, \text{成本型.} \end{cases} \quad (12)$$

然后区间值指标的熵权计算如下:

$$h_j = \lambda \left(-\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m H_{ij} \ln H_{ij} \right) + (1 - \lambda) \left(-\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m L_{ij} \ln L_{ij} \right);$$

$$E_{ij} = \frac{1 - h_j}{\sum_{j=1}^n (1 - h_j)}. \quad (13)$$

式中: $H_{ij} = \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij})$; $L_{ij} = \frac{1 - (b_{ij} - a_{ij})}{m - \sum_{i=1}^m (b_{ij} - a_{ij})}$; λ 为区间数的中位数与决策者的不确定之间的平衡系数,且 $0 < \lambda < 1$. 在本文中,取 $\lambda = 0.5$, 可以计算出熵权 $E_{22}, E_{24}, E_{25}, E_{35}$ 和 E_{36} .

2.4.3 计算中智数指标的熵权

中智数的标准化公式如下:

$$r_{ij} = \begin{cases} T_{ij}, I_{ij}, F_{ij}, & \text{如果 } j \text{ 为效益型指标;} \\ 1 - T_{ij}, 1 - I_{ij}, 1 - F_{ij}, & \text{如果 } j \text{ 为成本型指标.} \end{cases} \quad (14)$$

式中: T_{ij} 为积极的值; I_{ij} 为中立的值; F_{ij} 为消极的值.

根据文献[23],单值中智集 A 的中智熵为

$$E(A) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{x_i \in X} [T_A(x_i) + F_A(x_i)] \otimes |I_A(x_i) - I_{A^e}(x_i)|. \quad (15)$$

式中: A^e 为 A 的补集.

对于评价矩阵 $R = [r_{ij}]_{m \times n}$ 中的任意元素 $r_{ij} = \langle T_{ij}, I_{ij}, F_{ij} \rangle$, 其熵可由式(15)计算得出,即

$$E(r_{ij}) = 1 - (T_{ij} + F_{ij}) \cdot |I_{ij} - I_{ij}^c|. \quad (16)$$

式中: $I_{ij}^c = 1 - I_{ij}$.

则属性 G_j 的熵为 $E_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E(r_{ij})$, 则 G_j 的权重可以由式(17)计算得出:

$$\omega_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^n (1 - E_j). \quad (17)$$

2.4.4 计算概率语言的熵权

将评价矩阵进一步规范化,当属性中有效益型和成本型时,可以将成本型转化为效益型,方法如下:

$$L_{ij}(p) = \begin{cases} L_{ij}(p), & \text{效益型;} \\ [L_{ij}(p)]^e, & \text{成本型.} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $[L_{ij}(p)]^e$ 为 $L_{ij}(p)$ 的补集, $[L_{ij}(p)]^e = \{\text{neg}(L_{ij}^{(k)})(p_{ij}^{(k)}) \mid k = 1, 2, \dots, \#L_{ij}(p)\}$, 效益型的值由

定义 10 得到.

计算指标的熵,第 j 个指标的熵值可以通过式(19)计算得到.

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (\bar{L}_{ij}(p)) \ln(\bar{L}_{ij}(p)). \quad (19)$$

式中: $\bar{L}_{ij}(p) = \sum_{k=1}^{\#L_{ij}(p)} r^{(k)} p^{(k)} / \# \bar{L}_{ij}(p)$.

则指标熵权的计算公式为

$$E_{ij} = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}. \quad (20)$$

2.4.5 计算维修方案指标的综合权重

根据 2.2 节中 BWM 方法和上述步骤求出主观准则权重 w_i^* 和指标熵权 E_{ij} , 将主观准则权重分配到指标,得到综合指标权重,具体方法如式(21)所示.

$$w_{ij} = w_i^* E_{ij}. \quad (21)$$

2.5 维修方案排序

假设某大型设备故障维修方案评价涉及 k 个专家 $e_k(k=1,2,\dots,K)$, 存在 n 个维修方案 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 则实质上是一个多准则群决策问题,记为 $\Omega = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$. 本节将应用多准则群决策 VIKOR 方法来解大型设备故障维修方案的评价选择问题.由于维修方案的评价存在实数、区间数、中智数、概率语言术语集等异构信息,故障维修准则集 $G = (G_1, G_2, G_3, G_4, G_5)$ 的评价信息可分为 4 个子集 $O_i(i = 1,2,3,4)$, O_i 表示评价信息是实数、区间数、中智数和概率语言的准则集.异构信息多准则群决策 VIKOR 方法求解步骤如下所示.

步骤 1:根据式(10)、式(12)、式(14)和式(17)计算得到标准化评价矩阵.

步骤 2:根据式(21)和式(22)确定正理想解(PIS)和负理想解(NIS).

$$y_i^+ =$$

$$\begin{cases} e_i^+ = \max\{e_{ij} \mid j = 1, \dots, n\}, \text{ if } A_i \in O_1^b \text{ or } e_i^+ = \min\{e_{ij} \mid j = 1, \dots, n\}, \text{ if } A_i \in O_1^c; \\ [a_i^+, b_i^+] = \max\{a_{ij}, b_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n\}, \text{ if } A_i \in O_2^b; \text{ or } [a_i^+, b_i^+] = \min\{a_{ij}, b_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n\}, \text{ if } A_i \in O_2^c; \\ [T_i^+, I_i^+, F_i^+] = [\max T_{ij}, \min I_{ij}, \min F_{ij}], \text{ if } A_i \in O_3^b; \text{ or } [T_i^+, I_i^+, F_i^+] = [\min T_{ij}, \max I_{ij}, \max F_{ij}], \text{ if } A_i \in O_3^c; \\ L_i(p)^+ = \max\{L_{ij}(p) \mid j = 1, 2, \dots, \#L_{ij}(p)\}, \text{ if } A_i \in O_4^b; \text{ or } L_i(p)^+ = \max\{(L_{ij}(p))^c \mid j = 1, 2, \dots, \#L_{ij}(p)\}, \\ \text{ if } A_i \in O_4^c. \end{cases} \quad (22)$$

$$y_i^- =$$

$$\begin{cases} e_i^- = \min\{e_{ij} \mid j = 1, \dots, n\}, \text{ if } A_i \in O_1^b \text{ or } e_i^- = \max\{e_{ij} \mid j = 1, \dots, n\}, \text{ if } A_i \in O_1^c; \\ [a_i^-, b_i^-] = \min\{a_{ij}, b_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n\}, \text{ if } A_i \in O_2^b; \text{ or } [a_i^-, b_i^-] = \max\{a_{ij}, b_{ij} \mid j = 1, 2, \dots, n\}, \text{ if } A_i \in O_2^c; \\ [T_i^-, I_i^-, F_i^-] = [\min T_{ij}, \max I_{ij}, \max F_{ij}], \text{ if } A_i \in O_3^b; \text{ or } [T_i^-, I_i^-, F_i^-] = [\max T_{ij}, \min I_{ij}, \min F_{ij}], \text{ if } A_i \in O_3^c; \\ L_i(p)^- = \min\{L_{ij}(p) \mid j = 1, 2, \dots, \#L_{ij}(p)\}, \text{ if } A_i \in O_4^b; \text{ or } L_i(p)^- = \min\{(L_{ij}(p))^c \mid j = 1, 2, \dots, \#L_{ij}(p)\}, \\ \text{ if } A_i \in O_4^c. \end{cases} \quad (23)$$

式中: $O_i^b(i = 1,2,3,4)$ 为效益型准则集; $O_i^c(i = 1,2,3,4)$ 为成本型准则集.

步骤 3:计算 S_i, R_i 和 Q_i 的值^[15].

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{d(r_i^+, r_{ij})}{d(r_i^+, r_i^-)};$$

$$R_i = \max\left(w_j \frac{d(r_i^+, r_{ij})}{d(r_i^+, r_i^-)}\right);$$

$$Q_i = \nu \frac{S_i - \min S_i}{\max S_i - \min S_i} + (1 - \nu) \frac{R_i - \min R_i}{\max R_i - \min R_i} \quad (24)$$

式中: S_i 为群效用值; R_i 为个人后悔值; Q_i 为折中排序指标; ν 为决策机制系数, $\nu \in [0, 1], \nu > 0.5$ 表示依据最大化群效用的决策机制进行决策, $\nu < 0.5$ 表示依据最小化个体遗憾的决策机制进行决策, $\nu = 0.5$ 表示依据决策者经协商达成共识的决策机制进行决策^[14,24].

步骤4: Q_i 按升序排序, 记为 $G^{(1)}, \dots, G^{(i)}, \dots, G^{(m)}$. 如果 $G^{(1)}$ 满足评价准则 D_1 和 D_2 , 则 $G^{(1)}$ 就是最优方案, Q_i 值最小.

$D_1: Q[G^{(2)} - Q(G^{(1)})] \geq 1/(n - 1);$

$D_2:$ 根据 S_i, R_i 和 Q_i 的排序可知, $G^{(1)}$ 的值最小.

3 实例分析

某钢铁企业从设备管理专家和维修专家中抽调3人 $e_i (i = 1, 2, 3)$ 组成了维修评估专家团队, 为宽厚板轧制生产线大型设备(记为“HC1”)进行故障诊断, 设备情况具体如表3所示. 根据设备的故障情况、故障维修情况、同类设备故障维修效果、维修团队技术水平和维修设备条件等, 对故障部件在线维修、故障部件返厂维修和故障部件报废(新部件替换)3种可能的维修方案(记为 x_1, x_2 和 x_3), 利用提出的评价模型, 按适合设备维修的程度进行排序, 从而得到最适合设备 HC1 的故障维修方案, 并进行灵敏度分析, 以验证评价模型的有效性和可靠性.

表3 设备故障情况

设备编号	使用年限	故障经济损失/百万元	故障紧急程度	故障严重度
HC1	8	2.53±0.9	中	中

3.1 维修方案排序

3.1.1 计算准则权重

依据相关定义和说明, 维修方案的5个评价准则分别用 $G_1 \sim G_5$ 表示. 根据专家团队分析判断, 确定故障特征 G_1 是所有准则中最重要准则, 而维修设备 G_5 是最不重要准则. 根据2.2节所介绍的BWM方法, 可计算得到最重要的准则相对于所有准则的比较向量, 以及最不重要的准则相对于所有准则的比较向量, 分别如表4和表5所示. 其中表4表示最重要的准则相对于其他准则的偏好程度, 表5则表示其他准则相对于最不重要的准则的偏好程度.

表4 最重要准则的比较向量

准则	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
最重要准则 G_1	1	2	3	4	5

表5 最不重要准则的比较向量

准则	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
最不重要准则 G_5	5	4	3	2	1

根据式(8)与式(9), 即可计算得到准则的权重向量 $w^* = (0.438, 0.219, 0.146, 0.109, 0.088)$.

3.1.2 计算并规范化评价矩阵

首先, 根据2.3节所介绍的方法获得实数、区间数、中智数以及概率语言等信息类型的评价信息; 然后, 对评价信息进行集结, 并由此得到3个潜在维修方案的综合评价, 具体详见表6和表7. 最后, 将其与规范化的评价信息融合得到综合评价矩阵, 具体如表8所示.

表6 对维修方案定量指标的评价值

指标	维修方案		
	x_1	x_2	x_3
g_{22}	[27, 71]	[243.42, 312.45]	[109.33, 153.98]
g_{23}	0.943	0.969	0.965
g_{24}	[51, 131]	[177.1, 310.9]	[120.7, 239.1]
g_{25}	<0.670 1, 0, 0>	<0.310 1, 0, 0>	<0.400 3, 0, 0>
g_{34}	0.051	0.07	0.052

续表

指标	维修方案		
	x_1	x_2	x_3
g_{35}	[12.8, 18.2]	[22.86, 33.48]	[14.11, 20.95]
g_{36}	[72.9, 90.1]	[49.0, 68.1]	[60.9, 85.1]
g_{41}	<0.760 1, 0, 0>	<0.670 1, 0, 0>	<0.809 9, 0, 0>
g_{42}	<0.740 1, 0, 0>	<0.809 8, 0, 0>	<0.800 1, 0, 0>
g_{43}	<0.769 8, 0, 0>	<0.771 9, 0, 0>	<0.680 1, 0, 0>
g_{44}	<0.790 1, 0, 0>	<0.650 2, 0, 0>	<0.809 8, 0, 0>
g_{51}	<0.800 1, 0, 0>	<0.801 0, 0, 0>	<0.859 8, 0, 0>
g_{52}	<0.712 9, 0, 0>	<0.704 0, 0, 0>	<0.785 0, 0, 0>
g_{53}	<0.806 9, 0, 0>	<0.765 0, 0, 0>	<0.790 1, 0, 0>
g_{54}	<0.720 1, 0, 0>	<0.745 1, 0, 0>	<0.752 9, 0, 0>

表 7 专家对维修方案定性指标的评价值

指标	专家	维修方案		
		x_1	x_2	x_3
g_{11}	e_1	{ $s_3(0.3), s_4(0.3), s_5(0.4)$ }	{ $s_0(0.2), s_1(0.4), s_2(0.4)$ }	{ $s_3(0.4), s_4(0.5)$ }
	e_2	{ $s_4(0.4), s_5(0.2)$ }	{ $s_1(0.6), s_2(0.3)$ }	{ $s_4(0.2), s_5(0.3)$ }
	e_3	{ $s_4(0.6), s_5(0.2)$ }	{ $s_1(0.6), s_2(0.2)$ }	{ $s_3(0.3), s_4(0.5), s_5(0.2)$ }
g_{12}	e_1	{ $s_3(0.2), s_4(0.3), s_5(0.5)$ }	{ $s_1(0.2), s_2(0.5), s_3(0.2)$ }	{ $s_4(0.4), s_5(0.5)$ }
	e_2	{ $s_4(0.3), s_5(0.5)$ }	{ $s_2(0.5), s_3(0.2)$ }	{ $s_4(0.3), s_5(0.4), s_6(0.2)$ }
	e_3	{ $s_4(0.3), s_5(0.5), s_6(0.2)$ }	{ $s_1(0.3), s_2(0.5)$ }	{ $s_5(0.4), s_6(0.2)$ }
g_{13}	e_1	{ $s_3(0.2), s_4(0.4), s_5(0.2)$ }	{ $s_2(0.5), s_3(0.2), s_4(0.1)$ }	{ $s_4(0.2), s_5(0.4), s_6(0.2)$ }
	e_2	{ $s_3(0.3), s_4(0.3), s_5(0.4)$ }	{ $s_2(0.3), s_3(0.5)$ }	{ $s_4(0.3), s_5(0.7)$ }
	e_3	{ $s_4(0.5), s_5(0.4)$ }	{ $s_3(0.5), s_4(0.2)$ }	{ $s_5(0.4), s_6(0.2)$ }
g_{21}	e_1	{ $s_4(0.3), s_5(0.2)$ }	{ $s_2(0.5), s_3(0.5)$ }	{ $s_3(0.4), s_4(0.6)$ }
	e_2	{ $s_4(0.7), s_5(0.3)$ }	{ $s_2(0.4), s_3(0.3)$ }	{ $s_3(0.2), s_4(0.5), s_5(0.3)$ }
	e_3	{ $s_4(0.6), s_5(0.3)$ }	{ $s_2(0.2), s_3(0.6)$ }	{ $s_3(0.4), s_4(0.5)$ }
g_{31}	e_1	{ $s_4(0.3), s_5(0.7)$ }	{ $s_4(0.2), s_5(0.8)$ }	{ $s_4(0.5), s_5(0.3)$ }
	e_2	{ $s_4(0.4), s_5(0.6)$ }	{ $s_4(0.4), s_5(0.6)$ }	{ $s_3(0.2), s_4(0.5), s_5(0.3)$ }
	e_3	{ $s_4(0.3), s_5(0.6), s_6(0.1)$ }	{ $s_4(0.3), s_5(0.5), s_6(0.2)$ }	{ $s_4(0.3), s_5(0.6)$ }
g_{32}	e_1	{ $s_3(0.6), s_4(0.2)$ }	{ $s_4(0.5), s_5(0.5)$ }	{ $s_3(0.5), s_4(0.3)$ }
	e_2	{ $s_2(0.3), s_3(0.5), s_4(0.2)$ }	{ $s_4(0.4), s_5(0.4), s_6(0.2)$ }	{ $s_3(0.3), s_4(0.5), s_5(0.2)$ }
	e_3	{ $s_2(0.3), s_3(0.4), s_4(0.3)$ }	{ $s_4(0.2), s_5(0.8)$ }	{ $s_4(0.6), s_5(0.3)$ }
g_{33}	e_1	{ $s_3(0.6), s_4(0.4)$ }	{ $s_4(0.6), s_5(0.2)$ }	{ $s_3(0.6), s_4(0.3)$ }
	e_2	{ $s_2(0.2), s_3(0.5), s_4(0.3)$ }	{ $s_3(0.4), s_4(0.4), s_5(0.2)$ }	{ $s_3(0.3), s_4(0.5), s_5(0.2)$ }
	e_3	{ $s_2(0.4), s_3(0.4), s_4(0.2)$ }	{ $s_4(0.4), s_5(0.2)$ }	{ $s_3(0.4), s_4(0.6)$ }
g_{37}	e_1	{ $s_3(0.6), s_4(0.4)$ }	{ $s_4(0.5), s_5(0.2)$ }	{ $s_3(0.6), s_4(0.3)$ }
	e_2	{ $s_2(0.2), s_3(0.5)$ }	{ $s_3(0.4), s_4(0.4)$ }	{ $s_3(0.3), s_4(0.5)$ }
	e_3	{ $s_2(0.4), s_3(0.4)$ }	{ $s_4(0.4), s_5(0.3)$ }	{ $s_3(0.4), s_4(0.6)$ }

表 8 规范化的群决策评价矩阵

指标	维修方案		
	x_1	x_2	x_3
g_{11}	{ $s_{2.18}, s_{1.38}, s_{0.67}$ }	{ $s_{0.47}, s_{0.52}, s_{0.27}$ }	{ $s_{1.27}, s_{2.41}, s_{0.33}$ }
g_{12}	{ $s_{1.11}, s_{2.27}, s_{1.23}$ }	{ $s_{0.68}, s_{1.07}, s_{0.22}$ }	{ $s_{2.14}, s_{2.33}, s_{0.46}$ }
g_{13}	{ $s_{1.3}, s_{1.8}, s_{1.08}$ }	{ $s_{1.11}, s_{1.02}, s_{0.17}$ }	{ $s_{1.83}, s_{2.68}, s_{0.5}$ }
g_{21}	{ $s_{1.27}, s_{0.35}, s_0$ }	{ $s_{1.76}, s_{1.68}, s_0$ }	{ $s_{1.04}, s_{1.11}, s_{0.1}$ }
g_{22}	[0.776 7, 0.910 7]	[0, 0.220 3]	[0.505 6, 0.648 0]
g_{23}	0	1	0.88
g_{24}	[0.582 1, 0.832 9]	[0, 0.432 0]	[0.233 0, 0.608 5]

续表

指标	维修方案		
	x_1	x_2	x_3
g_{25}	$\langle 0.662\ 1, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.302\ 7, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.401\ 5, 0, 0 \rangle$
g_{31}	$\{s_{1.33}, s_{3.17}, s_{0.2}\}$	$\{s_{1.2}, s_{3.17}, s_{0.4}\}$	$\{s_{1.47}, s_{2.42}, s_{0.5}\}$
g_{32}	$\{s_{1.55}, s_{1.07}, s_{0.33}\}$	$\{s_{0.73}, s_{0.57}, s_0\}$	$\{s_{1.36}, s_{0.7}, s_{0.07}\}$
g_{33}	$\{s_{1.4}, s_{1.17}, s_{0.33}\}$	$\{s_{1.35}, s_{0.43}, s_{0.07}\}$	$\{s_{1.36}, s_{0.96}, s_{0.07}\}$
g_{34}	1	0	0.375
g_{35}	$[0.456\ 4, 0.617\ 7]$	$[0, 0.317\ 2]$	$[0.374\ 3, 0.578\ 6]$
g_{36}	$[0.819\ 2, 1]$	$[0.543\ 5, 0.755\ 6]$	$[0.688\ 6, 0.945\ 3]$
g_{37}	$\{s_{1.65}, s_{1.48}, s_0\}$	$\{s_{1.35}, s_{0.57}, s_0\}$	$\{s_{1.43}, s_{1.05}, s_0\}$
g_{41}	$\langle 0.759\ 1, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.665\ 6, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.811\ 2, 0, 0 \rangle$
g_{42}	$\langle 0.739\ 7, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.812\ 9, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.799\ 5, 0, 0 \rangle$
g_{43}	$\langle 0.770\ 6, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.772\ 7, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.678\ 4, 0, 0 \rangle$
g_{44}	$\langle 0.785\ 1, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.646\ 9, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.813\ 4, 0, 0 \rangle$
g_{51}	$\langle 0.791\ 4, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.785\ 1, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.862\ 6, 0, 0 \rangle$
g_{52}	$\langle 0.713\ 3, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.703\ 5, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.784\ 8, 0, 0 \rangle$
g_{53}	$\langle 0.807\ 2, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.764\ 8, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.789\ 7, 0, 0 \rangle$
g_{54}	$\langle 0.719\ 4, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.744\ 2, 0, 0 \rangle$	$\langle 0.753\ 3, 0, 0 \rangle$

3.1.3 计算指标权重

根据 2.4 节介绍的方法,确定维修方案各指标的熵权,结合计算的主观准则权重,可得到各指标的综合权重,计算结果见表 9.

表 9 准则与指标权重

准则	权重	指标	权重
G_1	0.438	g_{11}	0.262 6
		g_{12}	0.375 7
		g_{13}	0.361 7
G_2	0.219	g_{21}	0.300 1
		g_{22}	0.045 5
		g_{23}	0.418 6
		g_{24}	0.023 4
		g_{25}	0.212 4
G_3	0.146	g_{31}	0.542 8
		g_{32}	0.083 5
		g_{33}	0.102 8
		g_{34}	0.128 1
		g_{35}	0.009 5
		g_{36}	0.010 5
		g_{37}	0.122 7
G_4	0.109	g_{41}	0.246 9
		g_{42}	0.259 8
		g_{43}	0.245 4
		g_{44}	0.248 0
G_5	0.088	g_{51}	0.264 6
		g_{52}	0.238 8
		g_{53}	0.256 2
		g_{54}	0.240 5

3.1.4 计算各维修方案 S_i, R_i 和 Q_i 的值并排序

根据第 2.5 节中所提到的 VIKOR 方法在异质多准则群决策中的应用,令 $\nu = 0.5$, 分别计算 3 种维修

方案的 S_i, R_i 和 Q_i 值,如表 10 所示.

表 10 维修方案的 S_i, R_i 和 Q_i 值

维修方案	x_1	x_2	x_3
S_i	0.408 2	0.842 6	0.279 7
R_i	0.960 0	0.040 0	0.029 4
Q_i	0.462 9	1.000 0	0.114 1

根据表 10 中的 Q_i 值,即可得到各潜在维修方案的优先排序为 $x_3 > x_1 > x_2$,可见维修方案 x_3 的 Q_i 值最小.根据评价准则 D_1 可知: $Q[G^{(2)} - Q(G^{(1)})] = 0.885 9 > 1/2$, 满足评价准则 D_1 ,且维修方案 x_3 满足 S_i, R_i 排序仍为最优方案,满足评价准 D_2 .因此,维修方案 x_3 即将故障部件返厂维修是最合适大型设备 HC1 的维修方案.

3.2 灵敏度分析

为了有效地分析决策机制系数 ν 的不同取值对排序结果的影响, ν 从 0.2~0.8 取不同值,计算得到对应的 Q_i 值和维修方案排序,不同 ν 值对所构建的维修方案评价模型排序结果的影响如图 1 和表 11 所示.由图 1 和表 11 可知:0~1 之间的不同 ν 值,评价模型计算得到的排序结果基本相同,意味着评价结果对参数 ν 不敏感,也就是说,尽管维修方案的选择评价涉及决策机制系数 ν 值的选取,但 ν 值不影响最终排序结果.

在分析了评价模型对决策机制系数值灵敏度的基础上,还应分析模型对区间值指标熵权的灵敏度.假设决策机制系数 $\nu = 0.5$,对区间值指标的加权参数 λ 从 0.2~0.8 进行调整,重新计算维修方案的排序结果,并观察模型对区间值指标熵权的灵敏度如图 2 和表 12 所示.由图 2 和如表 12 可知:不同的 λ 值,得到的维修方案排序依然一致,说明评价结果对 λ 值不敏感,最适合大型设备 HC1 的维修方案仍然是 x_3 .

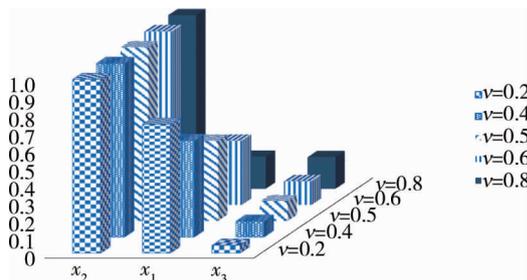


图 1 不同 ν 值灵敏度分析的柱状图

表 11 不同 ν 值情况下的维修方案排序

不同的 ν 值	维修方案 Q_i 值			排序
	x_1	x_2	x_3	
$\nu = 0.2$	0.740 7	1.000 0	0.045 6	$x_3 > x_1 > x_2$
$\nu = 0.4$	0.555 5	1.000 0	0.091 3	$x_3 > x_1 > x_2$
$\nu = 0.5$	0.462 9	1.000 0	0.114 1	$x_3 > x_1 > x_2$
$\nu = 0.6$	0.370 4	1.000 0	0.137 0	$x_3 > x_1 > x_2$
$\nu = 0.8$	0.185 2	1.000 0	0.182 6	$x_3 > x_1 > x_2$

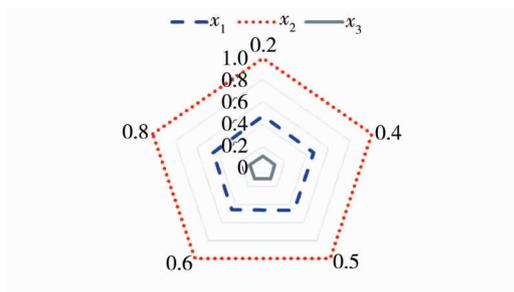


图 2 不同 λ 值的灵敏度分析的雷达图

表 12 不同 λ 值情况下的维修方案排序

不同的 λ 值	维修方案 Q_i 值			排序
	x_1	x_2	x_3	
$\lambda = 0.2$	0.472 2	0.990 7	0.111 9	$x_3 > x_1 > x_2$
$\lambda = 0.4$	0.465 4	0.996 9	0.113 5	$x_3 > x_1 > x_2$
$\lambda = 0.5$	0.462 9	1.000 0	0.114 1	$x_3 > x_1 > x_2$
$\lambda = 0.6$	0.459 0	1.000 0	0.115 0	$x_3 > x_1 > x_2$
$\lambda = 0.8$	0.452 8	1.000 0	0.116 3	$x_3 > x_1 > x_2$

灵敏度分析结果表明:所构建的模型评价结果对 ν 和 λ 值不敏感,验证了所构建模型的稳健性.

4 结论

- 1) 所构建的钢铁企业大型设备故障维修指标体系结合了主客观准则,能将模糊信息与定量数据进行有效地融合,能将实数、区间数、中智数和概率语言等异构信息有效应用于大型设备故障维修方案的评价.
- 2) 采用 VIKOR 方法进行多准则群决策能有效解决维修方案的排序问题,有助于选择最合适的维修方案.
- 3) 基于多源异构 VIKOR 方法大型设备故障维修方案选择决策模型模拟了钢铁企业实际的维修方案

决策情境,用于决策的信息更加全面、准确,能有效地实现维修方案的评价排序,可为维修工程师和设备管理人员选择维修方案提供辅助决策。

参考文献:

- [1] Smarandache F. A unifying field in logics: Neutrosophy, Neutrosophic Probability, Set and Logic[M]. Rehoboth: American Research Press, 1999.
- [2] Zhang H Y, Ji P, Wang J Q, et al. A novel decision support model for satisfactory restaurants utilizing social information: A case study of TripAdvisor.com[J]. *Tourism Management*, 2017, 59:281-297.
- [3] 郑晶,王应明,陈圣群.考虑方案有效性的应急案例决策方法[J].*控制与决策*,2016,31(10):1824-1830.
- [4] 胡雷刚,李五洲,张佳强,等.不确定条件下装备送修级别粗糙群决策方法[J].*系统工程与电子技术*,2020,42(12):2819-2824.
- [5] 侯艾君,熊小伏,沈智健,等.一种输电设备状态维修日程安排的可靠性决策方法[J].*电力系统保护与控制*,2012,40(22):108-112.
- [6] 晋民杰,王快,范英,等.多属性决策方法在液压设备维修中的应用[J].*煤矿机械*,2015,36(12):201-203.
- [7] Opricovic S, Tzeng G H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 156(2):445-455.
- [8] Sayadi M K, Heydari M, Shahanaghi K. Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, 33(5):2257-2262.
- [9] Zhang N, Wei G. Extension of VIKOR method for decision making problem based on hesitant fuzzy set[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(7):4938-4947.
- [10] Pang Q, Wang H, Xu Z. Probabilistic linguistic term sets in multi-attribute group decision making[J]. *Information Sciences*, 2016, 369: 128-143.
- [11] Hu J, Pan L, Chen X. An Interval Neutrosophic Projection-Based VIKOR Method for Selecting Doctors[J]. *Cognitive Computation*, 2017, 9(6):1-16.
- [12] 贺吉群,李丹萍,成鹏飞,等.异质 VIKOR 方法在 1 例直肠癌患者手术方案选择中的应用[J].*中南大学学报(医学版)*, 2019,44(8):945-950.
- [13] 周向红,李丹萍,成鹏飞,等.面向云制造协同创新伙伴选择的多源异构 VIKOR 群决策方法[J/OL].[2021-05-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20201203.1439.017.html>.
- [14] Wu Y, Liu L, Gao J, et al. An Extended VIKOR-Based Approach for Pumped Hydro Energy Storage Plant Site Selection with Heterogeneous Information[J]. *Information*, 2017, 8(3):106.
- [15] 潘亚虹,耿秀丽.一种基于 VIKOR 的混合多属性群决策方法[J].*机械设计与研究*,2018,34(1):177-182.
- [16] 周志祥,王征.直肠癌手术方式选择策略[J].*肿瘤防治研究*,2012,39(8):887-891.
- [17] 毛军军,王翠翠,姚登宝.基于多专家区间数的多属性群决策方法[J].*计算机应用*,2012,32(3):649-653.
- [18] Peng S Y. Selection of surgical procedures for gallbladder cancer[J]. *Chinese Journal of Digestive Surgery*, 2011, 10(2):87-90.
- [19] 彭淑牖,洪德飞.胆囊癌手术方式的合理选择[J].*中华消化外科杂志*, 2011,10(2):87-90.
- [20] Hu J, Yang Y, Chen X. A novel TODIM method-based three-way decision model for medical treatment selection[J]. *International Journal Fuzzy Systems*, 2018, 20:1240-1255.
- [21] Sevastjanov P, Tikhonenko A. Direct Interval Extension of TOPSIS Method[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(12):4841-4847.
- [22] Ghadikolaei A S, Madhoushi M, Divsalar M. Extension of the VIKOR method for group decision making with extended hesitant fuzzy linguistic information[J]. *Neural Computing and Applications*, 2018,30(12):3589-3602.
- [23] Biswas P, Pramanik S, Giri C. Entropy Based Grey Relational Analysis Method for Multi-Attribute Decision Making under Single Valued Neutrosophic Assessments[J]. *Neutrosophic Sets and Systems*, 2014, 2:102-110.
- [24] Li D P, He J Q, Cheng P F, et al. A Novel Selection Model of Surgical Treatments for Early Gastric Cancer Patients Based on Heterogeneous Multicriteria Group Decision-Making[J]. *Symmetry*, 2018, 10(6):223-239.