

基于双重语言信息联动的多阶段决策模型

郝晶晶, 朱建军, 刘思峰

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘要: 研究双重语言信息联动下多阶段决策信息的动态集结方法. 考虑决策依据信息和专家偏好信息的自身特点, 设计基于双重语言信息融合的多阶段决策问题分析框架; 分析决策信息的动态变化特征, 以两类信息之间差异最小为原则构建规划模型群, 探寻阶段权重和各阶段下属性权重的具体表现; 设定决策者的信息偏好程度, 集结方案的动态综合绩效和专家判断结果, 在多阶段情形下实现候选方案的优选决策. 最后通过算例验证了所提出方法的科学性和适用性.

关键词: 决策依据信息; 专家偏好信息; 语言标度; 二元语义; 多阶段决策

中图分类号: C943

文献标志码: A

Multi-stage decision model for aggregating dual linguistic evaluation information

HAO Jing-jing, ZHU Jian-jun, LIU Si-feng

(College of Economic and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China.

Correspondent: HAO Jing-jing, E-mail: redearjing@126.com)

Abstract: A multi-stage information aggregation method is studied, which concerns the influences of both decision information and judgment information. Specifically, an analysis frame is established according to the dual information structure which includes decision support information and experts' preference information. Additionally, a programming is constructed in multi-stage, in which the objective is minimizing the differences of the above decision information. Furthermore, a preference degree is studied to aggregate the information of both dynamic comprehensive preferences and expert's judgment information. Finally, a numerical case is conducted to verify the feasibility and rationality of the proposed method.

Key words: decision support information; preference information; linguistic label; two-tuple linguistic information; multi-stage decision-making

0 引言

在实际管理决策问题中, 决策者常常面临双重决策信息: 一类是决策者在主观上对事物整体优劣做出的比较与选择结论等信息, 另一类是反映决策者进行决策判断的背景信息. 例如在选择企业信息系统过程中, 除了要全面考虑专家对各系统的综合判断结果外, 还要分析各候选对象在可靠性、扩充升级能力、功能适应性和界面友好性等标准下的具体表现, 以验证专家判断的准确性. 本文将前者称为专家偏好信息, 后者称为决策依据信息, 如何合理地兼顾这两类信息是此类决策问题的重点. 专家偏好信息主要依据专家的经验 and 专业知识来对方案整体表现进行主观判断, 体

现了主观知识的直觉性. 决策依据信息往往来源于实际统计数据或实地调研结果, 具有一定的客观性, 但由于决策问题的复杂性和动态发展的特性, 决策依据信息的表现形式往往具有一定的模糊性和随机性. 两类信息之间具有较为复杂的关系: 一方面, 两类信息可能存在一定的内在关联, 偏好信息是决策者在依据信息基础上的深入认知和辨识; 另一方面, 两类信息存在不一致性, 偏好信息具有主观性和不确定性, 决策依据信息具有多源性(不同的信息采集和获取方式、不同的认识主体, 得到的决策依据信息将有所不同)、随机性(采集方式的随机性, 或者是事物特征表现的随机性)和模糊性. 在这种情况下, 如果单凭某一

收稿日期: 2012-08-30; 修回日期: 2012-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70701017, 70971064, 71171112).

作者简介: 郝晶晶(1983—), 女, 博士生, 从事不确定性决策理论与方法的研究; 朱建军(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事群决策理论与方法、灰色系统理论等研究.

类信息进行决策,可能会引起决策结果的错误及偏差.因此,对两类信息的联动分析是进行科学决策的前提和基础.

从近年来相关文献不难看出,国内外学者分别对决策依据信息和偏好信息的集结问题取得了丰硕的研究成果.其中,基于偏好信息的集结方法主要集中于互补判断矩阵^[1-2]、序关系^[3-4]、效用值^[5-6]以及混合偏好信息集结^[7-8]等领域.决策依据信息通常表现为多属性决策评价矩阵信息,其主要的集结方法有集结算子^[9]、TOPSIS^[10-11]、灰靶决策^[12]等.此外,由于决策信息形式的多样化,关于不确定信息下的决策问题已有丰富的研究成果^[13-15],主要涉及模糊数、区间数和语言变量等不确定信息类型.由于语言变量比较直观并能较好体现复杂问题的不确定和模糊性,基于语言信息的决策方法在实际决策领域具有广泛的应用,主要集中在语言变量处理^[16-17]、语言评价矩阵集结^[18]、语言判断矩阵一致性及排序^[19]、多粒度语言^[20]等方面.在很多情况下,决策问题需依靠多个阶段的决策信息以表征方案绩效,如人员绩效评估、医疗诊断、重大项目的风险评价、复杂产品的供应商选择等,多阶段决策问题也是目前的研究热点^[21-22].然而,现有文献对于多阶段下双重信息集结问题研究较少,重视程度还有待加强.

基于上述考虑,本文进行以下研究:1)研究双重结构信息的融合方法,使得两类信息在结构和本质上具有较强的继承性和相似性;2)分析多阶段情形下双重信息的动态变化特征,构建优化模型探寻阶段权重,对多阶段下双重语言信息进行有效集结;3)根据决策者的偏好程度,综合考虑方案动态综合绩效和专家判断信息,在多阶段情形下实现候选方案的优选决策.

1 预备知识

决策依据信息具有较强的客观特性,但由于决策背景问题的复杂性和动态发展的性质,决策依据信息的具体表现通常呈现一定的模糊性和不确定性.考虑到语言标度能够较好地表征决策信息的模糊性,决策依据信息和专家偏好信息均可由语言变量呈现.语言变量的处理有多种方式,可以转换为模糊数、二元语义或直接进行运算来处理.考虑到二元语义能够涵盖较多的不确定信息,本文将语言变量转化为二元语义形式开展研究.

定义 1^[16] 令语言变量集 $S = \{s_\alpha | \alpha = 0, 1, \dots, g\}$, $g > 0$. 其中: g 为偶数, s_α 为决策者使用的语言变量. 语言变量满足下列条件: 若 $\alpha > \beta$, 则 $s_\alpha > s_\beta$; 存在逆算子 $\text{neg}(s_\alpha) = s_{g-\alpha}$. 特别地, $\text{neg}(s_{g/2}) = s_{g/2}$.

二元语义采用二元组 (s_k, a_k) 来表示决策者的语

言评价信息. 其中: s_k 表示语言评价集中的一个语言短语; a_k 表示决策者给出的语言评价信息相对于语言短语的偏差, $a_k \in [-0.5, 0.5]$ ^[17].

定义 2^[17] 若 $s_k \in S$ 为语言短语, 则其对应的二元语义形式可由如下转换函数 θ 得到:

$$\theta: S \rightarrow S \times [-0.5, 0.5], \theta(s_k) = (s_k, 0).$$

定义 3^[17] 设 $\beta \in [0, g]$ 为语言评价集 S 经某集结方法得到的实数, 令

$$\Delta: [0, g] \rightarrow S \times [-0.5, 0.5];$$

$$\Delta(\beta) = \begin{cases} s_k, & k = \text{round}(\beta); \\ a_k = \beta - k, & a_k \in [-0.5, 0.5]. \end{cases} \quad (1)$$

则称函数 Δ 为实数 β 对应二元语义信息的转换函数, 其中 round 为四舍五入取整算子.

定义 4^[17] 设 (s_k, a_k) 是一个二元语义信息, s_k 为 S 中的第 k 个元素, $a_k \in [-0.5, 0.5]$. 令

$$\Delta^{-1}: S \times [-0.5, 0.5] \rightarrow [0, g],$$

$$\Delta^{-1}(s_k, a_k) = k + a_k = \beta,$$

则称 Δ^{-1} 为转换函数的逆函数.

假设 (s_k, a_k) 和 (s_l, a_l) 为两个二元语义信息, 其序关系满足: 1) 若 $s_k > s_l$, 则 $(s_k, a_k) > (s_l, a_l)$; 2) 当 $s_k = s_l$ 时, 若 $a_k > a_l$, 则 $(s_k, a_k) > (s_l, a_l)$; 若 $a_k = a_l$, 则 $(s_k, a_k) = (s_l, a_l)$; 若 $a_k < a_l$, 则 $(s_k, a_k) < (s_l, a_l)$.

定义 5^[23] 设矩阵 $R = (r_{\alpha\beta})_{m \times m}$, 若其满足性质: $r_{\alpha\beta} \in S$, $r_{\alpha\alpha} = s_{g/2}$, 且 $r_{\alpha\beta} = s_k, r_{\beta\alpha} = \text{neg}(s_k)$, 则称矩阵 R 为语言判断矩阵.

对于语言判断矩阵 $R = (r_{\alpha\beta})_{m \times m}$, 其元素的含义如下: 1) $r_{\alpha\beta} = s_{g/2}$, 表示 x_α 与 x_β 同等重要(记为 $x_\alpha \sim x_\beta$); 2) $r_{\alpha\beta} = s_k \in S^L = \{s_0, s_1, \dots, s_{(g/2)-1}\}$, 表示 x_β 比 x_α 重要(记为 $x_\beta \succ x_\alpha$), 且 $r_{\alpha\beta}$ 越小, x_β 相对于 x_α 越重要; 3) $r_{\alpha\beta} = (s_4, 0) \{s_{(g/2)+1}, s_{(g/2)+2}, \dots, s_g\}$, 表示 x_α 比 x_β 重要(记为 $x_\alpha \succ x_\beta$), 且 $r_{\alpha\beta}$ 越大, x_α 相对于 x_β 越重要.

2 主要方法及结果

2.1 问题描述

设 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 表示备选方案集, 上述方案均存在 p 个评价阶段, 各阶段的评价信息在决策过程中权重不尽相同, 记为 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_t, \dots, \lambda_p)^T$, 其中 $\lambda_t \geq 0$ ($t = 1, 2, \dots, p$), $\sum_{t=1}^p \lambda_t = 1$. 设 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 为属性集, $w^t = (w_1^t, w_2^t, \dots, w_j^t, \dots, w_n^t)^T$ 为 t 阶段下属性权重向量, 且 $w_j^t \geq 0$ ($j = 1, 2, \dots, n$), $\sum_{j=1}^n w_j^t = 1$. 方案集和属性集构成了决策依据信息, 以多阶段决策评价矩阵 $X^t = (x_{ij}^t)_{m \times n}$ ($t =$

1, 2, \dots, p) 的形式呈现. 考虑到语言变量能很好地反映人类思维的模糊性, 决策依据信息和专家偏好信息都用语言形式表述. 此外, 专家对各备选方案的综合表现进行两两比较并用语言标度表征, 形成语言判断矩阵 $R^t = (r_{\alpha\beta}^t)_{m \times m} (t = 1, 2, \dots, p)$ 的专家偏好信息.

需要说明的是, 本文提到的决策依据信息, 可以由专家根据各自的信息获取渠道采集得到, 可以由决策组织方提供, 还可以由被评价的主体提供(例如供应商选择评价中, 供应商自我提供的有关参数等). 专家偏好信息来源于专家的主观判断, 主要由专家给出. 本文使用一个决策矩阵来表示决策依据信息, 适合于专家群体讨论后共同确定的决策信息、决策组织方提供和被评价主体提供的方式. 若专家群体各自提供决策信息和偏好信息(即表现为某一个阶段中, 存在多个评价矩阵和偏好矩阵), 则可先通过群体意见集结方法将多位专家的意见转化为群体意见, 即单一评价矩阵和单一判断矩阵, 再应用本文的方法进行双重信息的联动决策.

双重语言信息的联动和融合关系如图 1 所示. 对于双重结构语言信息的多阶段问题而言, 如何将两类信息进行结构性融合, 挖掘多阶段下决策信息的变化特征, 集结多阶段下双重语言信息矩阵是本文研究的主要问题.

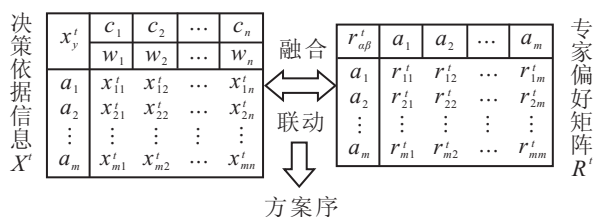


图 1 双重语言信息集结思路图

此类问题主要具有如下两个难点: 1) 两类信息实质上具有紧密的内在联系, 但单方面使用一类信息容易造成一定的决策风险, 即决策依据信息会遗漏部分信息, 专家偏好信息具有一定的主观特征, 使得决策结果可能存在矛盾, 而自然语言的表达形式进一步增加了两类信息融合的难度; 2) 在多阶段决策问题中, 两类信息结构不同, 各自具有特殊性质和变化特点, 在决策属性的权重未知和信息发展的动态特征影响下, 两者的关联程度和特点更加复杂.

2.2 基于双重语言信息联动的多阶段决策方法

2.2.1 基于语言决策矩阵的导出偏好矩阵确定

决策依据信息和专家偏好信息内容不同、结构各异. 结构的差异导致分析方法各具特点, 因此本部分考虑将两类信息进行结构转化, 以便分析两者的本质联系. 语言判断矩阵是专家对方案进行两两比较的结果, 其中元素 $r_{\alpha\beta}^t$ 与决策依据信息中各方案的综合

绩效有着紧密的联系.

定义 6 设 X_α^t 和 X_β^t 表示 t 阶段下备选方案 a_α 和 $a_\beta (\alpha, \beta \in \{1, 2, \dots, m\})$ 经属性集结后的综合绩效(以二元语义形式表达)

$$X_i^t = \Delta \left(\sum_{j=1}^n w_j \Delta^{-1}(x_{ij}^t) \right),$$

$$i = \alpha, \beta \in \{1, 2, \dots, m\},$$

则称 $\tilde{R}^t = (\tilde{r}_{\alpha\beta}^t)_{m \times m}$ 为决策矩阵 X^t 的导出偏好矩阵, 其中

$$\tilde{r}_{\alpha\beta}^t = \Delta \left(\frac{1}{2} \left(\Delta^{-1}(s_g, 0) + \Delta^{-1}(X_\alpha^t) - \Delta^{-1}(X_\beta^t) \right) \right). \quad (2)$$

定理 1 由定义 6 得到的导出偏好矩阵 $\tilde{R}^t = (\tilde{r}_{\alpha\beta}^t)_{m \times m}$ 是二元语义判断矩阵, 且满足判断矩阵的互补性, 即

$$\Delta^{-1}(\tilde{r}_{\alpha\alpha}^t) = g/2, \quad \Delta^{-1}(\tilde{r}_{\beta\alpha}^t) + \Delta^{-1}(\tilde{r}_{\alpha\beta}^t) = g.$$

证明 由定义 6 可知

$$\Delta^{-1}(\tilde{r}_{\alpha\alpha}^t) = \frac{1}{2} \left(\Delta^{-1}(s_g, 0) + \Delta^{-1}(X_\alpha^t) - \Delta^{-1}(X_\alpha^t) \right) = g/2,$$

$$\Delta^{-1}(\tilde{r}_{\beta\alpha}^t) + \Delta^{-1}(\tilde{r}_{\alpha\beta}^t) = \frac{1}{2} \left(\Delta^{-1}(s_g, 0) + \Delta^{-1}(X_\beta^t) - \Delta^{-1}(X_\alpha^t) \right) + \frac{1}{2} \left(\Delta^{-1}(s_g, 0) + \Delta^{-1}(X_\alpha^t) - \Delta^{-1}(X_\beta^t) \right) = g. \quad \square$$

定理 2 $\tilde{R}^t = (\tilde{r}_{\alpha\beta}^t)_{m \times m}$ 满足加性一致性条件

$$\Delta^{-1}(\tilde{r}_{\alpha\beta}^t) + \Delta^{-1}(\tilde{r}_{\beta\gamma}^t) = \frac{g}{2} + \Delta^{-1}(\tilde{r}_{\alpha\gamma}^t).$$

证明

$$\Delta^{-1}(\tilde{r}_{\alpha\beta}^t) + \Delta^{-1}(\tilde{r}_{\beta\gamma}^t) = \frac{1}{2} \left(\Delta^{-1}(s_g, 0) + \Delta^{-1}(X_\alpha^t) - \Delta^{-1}(X_\beta^t) \right) + \frac{1}{2} \left(\Delta^{-1}(s_g, 0) + \Delta^{-1}(X_\beta^t) - \Delta^{-1}(X_\gamma^t) \right) = \frac{1}{2} \Delta^{-1}(s_g, 0) + \frac{1}{2} \left(\Delta^{-1}(s_g, 0) + \Delta^{-1}(X_\alpha^t) - \Delta^{-1}(X_\gamma^t) \right) = \frac{g}{2} + \Delta^{-1}(\tilde{r}_{\alpha\gamma}^t).$$

由文献[24]中的二元语义判断矩阵的加性一致性条件可知 $\tilde{R}^t = (\tilde{r}_{\alpha\beta}^t)_{m \times m}$ 满足加性一致性条件. \square

由定义 6 可知, 对决策矩阵做相应的转化即可得到与专家偏好矩阵结构一致的导出偏好矩阵. 由于两者在结构和意义上都具有较大的相似性, 可进一步通过两者差异的测度来判断决策矩阵与专家偏好矩阵之间的接近关系.

2.2.2 基于双重语言信息的属性权重确定方法

对于单阶段决策问题而言, 导出偏好矩阵 \tilde{R} 与专家判断矩阵 R 具有类似的含义, 均表示各方案综合表

现经过两两比较后的结果,二者之间存在较强的关联性和一致性.当属性权重未知时,可以通过两个矩阵之间的相似关系来寻求属性权重的特征.基于此思想,构建如下单阶段相似度优化模型以确定各阶段的属性权重,使得两个矩阵相似度最大,差异最小.此外,由于语言信息决策问题的属性权重本身具有较大的不确定性,确定属性权重应使其不确定性尽量减少.根据极大熵原理^[25],构建考虑极大熵目标的属性权重测算模型如下:

M-1:

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{\alpha \leq \beta} \left(\frac{1}{2} \left(\Delta^{-1}(s_{\alpha\beta}, 0) + \sum_{j=1}^n w_j \Delta^{-1}(x_{\alpha j}) - \sum_{j=1}^n w_j \Delta^{-1}(x_{\beta j}) \right) - \Delta^{-1}(r_{\alpha\beta}) \right)^2; \\ \max H &= - \sum_{j=1}^n w_j \ln w_j; \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \sum_{j=1}^n w_j = 1, \\ w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \end{aligned}$$

模型 M-1 的目标函数表示导出偏好矩阵 \tilde{R} 和专家判断矩阵 R 相应元素的欧氏距离最小,体现了决策依据信息和专家偏好信息间的偏差最小,以保证专家判断的一致性.

由于目标函数 Z 和 H 的量纲不同,需要先对两个目标函数做无量纲化和规范化处理.假设在同样的约束条件下, Z_{\max} 和 Z_{\min} 为 Z 的最大值和最小值, H_{\max} 和 H_{\min} 为 H 的最大值和最小值,则上述多目标优化问题可以转化为如下单目标优化问题:

M-2:

$$\begin{aligned} \min Z' &= \mu \frac{Z - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} + (1 - \mu) \frac{H - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}}; \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \sum_{j=1}^n w_j = 1, \\ w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \end{aligned}$$

其中 $0 \leq \mu \leq 1$, 表示两个目标的重要程度,可根据实际情况来确定.若对目标无特殊偏好,则取 $\mu = 0.5$.对于模型 M-2 而言,其实质为一个单目标规划模型.由约束条件不难看出,该模型可行域存在且有界.由于任意可行域有界的单目标规划一定可以在其可行域上达到最优^[26],模型 M-2 必存在最优解.结合 Matlab 和 Lingo 等软件求解,可以测算得到单阶段下的属性权重.最优方案下的属性权重可以在实现权重不确定性较小的基础上,最大限度地确保导出偏好矩阵与专家偏好之间具备较强的关联性和相似程度.

这里的建模思路具有较强的合理性.一方面,导出偏好矩阵的元素与专家判断矩阵具有相同的表征意义和矩阵结构,两者都可表示为二元语义,用于反映两两方案的综合比较效果,所以分析两者之间的相似关系是合理且必要的;另一方面,考虑到导出偏好矩阵和专家判断矩阵元素量纲一致,可以结合欧氏距离表征两者之间的差异并以差异最小为目标构建属性权重优化模型,测算得到单阶段下的属性权重.

2.2.3 基于双重语言信息的阶段权重测算模型

基于双重信息的多阶段决策问题涉及到两类结构和内涵不同的矩阵信息.两者的动态发展特征也有所不同.在实际决策问题中,事物的变化规律较为多样和复杂,阶段间的评价涉及多个属性特征,事物的特征在阶段间可能存在复杂的关联,很多时候难以量化和测度其变化情况.若考虑评价矩阵的阶段关联性,则将加大问题的难度.本文在确定评价矩阵时,主要参照方案单阶段的实际表现,使得阶段间的评价信息具有一定的独立性,可以通过阶段权重集结以表征方案的动态绩效.另外,在分析这类问题时,评价矩阵也可以采用阶段时期数据,例如年度报表或季度报告等形式,以规避评价矩阵阶段间的关联性.然而,在多阶段决策问题中,由于主观偏好的影响,专家在判断方案综合绩效时难免会受到以前阶段决策信息的影响,使得专家偏好矩阵在各阶段之间存在一定关联性.因此,不能简单地通过阶段权重对专家各阶段判断信息进行集结.

基于上述考虑,本文假设专家对方案的主观偏好是对方案动态总体绩效的评估结果,而不是只着眼于本阶段的方案表现(以三阶段为例,如图 2 所示).可以明显地看出,在第 1 阶段,决策问题符合 M-1 中的关系表现.当阶段 l 大于 2 时,导出偏好矩阵中元素随着方案的发展有所差异.

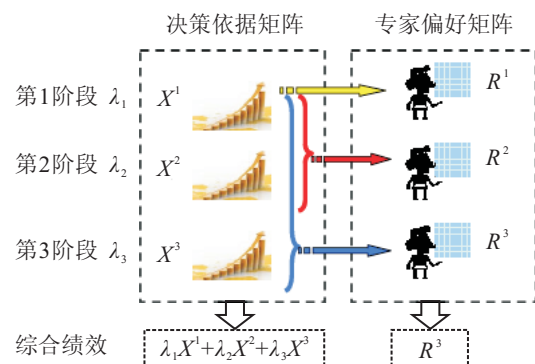


图 2 双重信息模型多阶段变化特征

定义 7 当阶段总数 $l \geq 2$ 时,决策矩阵 X^t 的导出偏好矩阵为 $\tilde{R}^t = (\tilde{r}_{\alpha\beta}^t)_{m \times m} (t = 2, \dots, l)$, 其中

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{\alpha\beta}^t = & \frac{1}{2} \sum_{t=1}^l \lambda_t \left[\begin{array}{c} \Delta^{-1}(s_g, 0) + \sum_{j=1}^n w_j^t \Delta^{-1}(x_{\alpha j}^t) \\ - \sum_{j=1}^n w_j^t \Delta^{-1}(x_{\beta j}^t) \end{array} \right] = \\ & \frac{1}{2} \Delta^{-1}(s_g, 0) + \\ & \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{l-1} \sum_{j=1}^n \lambda_t w_j^{t*} (\Delta^{-1}(x_{\alpha j}^t) - \Delta^{-1}(x_{\beta j}^t)) + \\ & \frac{1}{2} \lambda_l \sum_{j=1}^n w_j^l (\Delta^{-1}(x_{\alpha j}^l) - \Delta^{-1}(x_{\beta j}^l)). \end{aligned} \quad (3)$$

w_j^{t*} 是 l 阶段终止前各阶段的属性权重, 可根据 M-1 求得最优属性权重.

当阶段 l 大于 2 时, 构造如下多阶段相似关系优化模型 M-3 以获得阶段权重和各阶段下的属性权重:

M-3:

$$\begin{aligned} \min Z^l = & \sum_{\alpha \leq \beta} \left(\frac{g}{2} + \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{l-1} \sum_{j=1}^n \lambda_t w_j^{t*} (\Delta^{-1}(x_{\alpha j}^t) - \Delta^{-1}(x_{\beta j}^t)) + \right. \\ & \left. \frac{1}{2} \lambda_l \sum_{j=1}^n w_j^l (\Delta^{-1}(x_{\alpha j}^l) - \Delta^{-1}(x_{\beta j}^l)) - \Delta^{-1}(r_{\alpha\beta}^l) \right)^2; \\ \max H = & - \sum_{j=1}^n w_j^l \ln w_j^l; \\ \max H' = & - \sum_{t=1}^l \lambda_t \ln \lambda_t; \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_j w_j^l = 1, \\ w_j^l \geq 0, j = 1, 2, \dots, n; \\ w_j^{h*} = \arg \min Z^h, h = 1, 2, \dots, l-1; \\ \sum_{t=1}^l \lambda_t = 1, l = 2, 3, \dots, p. \end{cases} \end{aligned}$$

其中 l 阶段之前的属性权重 w_j^{t*} 可通过 $l-1$ 之前的多阶段优化模型获得.

随着方案的动态发展和多阶段评估工作的日益深入, 由于新信息的补充, 决策者对各阶段中属性权重可能存在新的看法和认识. 本文参照这一变权的思想, 根据各阶段决策信息对各阶段属性权重进行综合权衡和处理. 这样处理既可满足多阶段决策问题的实际需要, 又符合评价对象动态发展的特征.

在多阶段决策问题中, 阶段权重的确定是研究的热点内容. 现有阶段权重的确定方法有主观赋权和基于阶段权重分布特征的确定方法, 例如阶段权重方差最小^[27]、新信息优先原则^[28]、阶段权重服从指数分布或正态分布^[29]等. 此外, 确定阶段权重还要综

合考虑决策信息的特殊要求, 例如方案绩效差异最大^[30]、方案投影值最大^[31]等. 本文确定阶段权重的方法既体现了阶段权重本身的一般特征, 又能满足专家主观判断一致性的要求, 从判断的一致性角度来看具有合理性.

实际上, 本文阶段权重确定方法同样符合企业的现实需求. 在本文中, 多阶段评价信息体现了备选方案在各属性下的具体绩效, 主要由专家根据单一阶段的属性测度来评价, 表现了备选方案的短期评价效果; 各阶段判断矩阵信息由专家对阶段结束时方案的整体表现进行比较得出, 若决策的阶段较长, 则可以在某种程度上表征方案的一些发展态势预期和要求, 符合企业的较高层次的决策特点. 此外, 若企业的现实需求较为复杂, 出于战术或战略的考虑对阶段权重存在某种特殊要求 (如阶段权重的范围限制, 不同阶段权重间比例的主观判定等), 可以在模型 M-3 中添加一定的约束条件.

类似上述解决多目标优化模型的方法, 多目标优化模型 M-3 可转化为如下单目标模型:

M-4:

$$\begin{aligned} \min = & (1 - \rho_1 - \rho_2) \frac{\sum_{\alpha \leq \beta} Z^l - Z_{\min}^l}{Z_{\max}^l - Z_{\min}^l} + \\ & \rho_1 \frac{H - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} + \rho_2 \frac{H' - H'_{\min}}{H'_{\max} - H'_{\min}}; \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_j w_j^l = 1, \\ w_j^l \geq 0, j = 1, 2, \dots, n; \\ w_j^{h*} = \arg \min Z^h, h = 1, 2, \dots, l-1; \\ \sum_{t=1}^l \lambda_t = 1, l = 2, 3, \dots, p. \end{cases} \end{aligned}$$

其中: $\rho_1, \rho_2 \in [0, 1]$, 用于表示 3 个目标的重要程度, 可根据实际情况确定. 若对目标无特殊偏好, 则一般取 $\rho = 1/3$. 由于模型 M-4 为单目标规划问题且可行域存在、有界, 同样由最优解存在定理^[26]可知, 模型 M-4 必有最优解. 由 M-4 不仅可以计算 p 阶段终止时的各阶段权重, 而且可以得到 p 之前任一阶段终止时的阶段权重. 可以看出每增加一个阶段时, 之前所得各阶段权重都会相应发生变化. 因为新的阶段信息会使得之前各阶段的权重比重进行重新分配. 此外, 本模型也可以对任一阶段之前的各方案实现动态评价.

2.3 决策过程及步骤

由上节可知, 利用导出偏好矩阵和专家判断矩阵之间的相似关系, 可以求得各阶段权重和属性权重, 并由此得到各方案的综合绩效 $X = (X_1, X_2, \dots,$

$X_m)^T$, 其中 $X_i = \Delta \left(\sum_{t=1}^p \sum_{j=1}^n \lambda_t w_j^t \Delta^{-1}(x_{ij}^t) \right)$. 假设专家每一阶段的判断都是对方案在全阶段的综合表现进行两两比较的结果, 则各方案的最终表现需由决策矩阵的动态集结结果和最后阶段的专家判断得到. 因方案排序面临着决策依据信息和专家判断矩阵两类信息, 故根据决策者对两类信息的偏好程度来评价方案综合绩效.

定义 8 假设决策者对决策矩阵动态绩效 X_i 的偏好程度为 η ($\eta \in [0, 1]$), 对专家判断矩阵信息的偏好程度为 $1 - \eta$, X_i 为决策矩阵动态绩效, r_i 为专家判断的各方案的综合排序得分, 则各方案的最终排序向量为 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$. 其中

$$\omega_i = \eta \Delta^{-1}(X_i) + (1 - \eta)r_i, \quad (4)$$

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{\beta=1}^m \Delta^{-1}(\tilde{r}_{\alpha\beta}), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

决策者根据决策依据信息的完备度、不确定性或专家偏好的可信度等因素来确定 η , 并依据排序向量 ω 对各方案进行排序选优.

至此, 考虑双重信息联动的多阶段决策步骤可归纳如下.

Step 1: 根据文献 [19] 中的方法对语言判断矩阵一致性进行检验, 并将决策依据矩阵 $X^t = (x_{ij}^t)_{m \times n}$ 和专家偏好矩阵 $R^t = (r_{\alpha\beta}^t)_{m \times m}$ 中的语言变量转换为二元语义形式.

Step 2: $t = 1$ 时, 对 M-2 求解可得第 1 阶段的属性权重, 继而得到第 1 阶段各方案属性集结的综合绩效. $t = l$ ($l \geq 2$) 时, 由式 (3) 计算导出偏好矩阵, 将前 $l - 1$ 个阶段的属性权重代入 M-4, 可得第 l 阶段的属性权重和 l 阶段为止的阶段权重; $t = p$ 时, 可得阶段终止时的各阶段权重, 利用此权重可以对各阶段的决策依据信息进行集结.

Step 3: 根据 λ_t 和 w_j^t 对决策依据信息进行集结, 可得各方案的动态综合绩效 X_i .

Step 4: 由式 (5) 计算 p 阶段专家判断的排序得分 r_i .

Step 5: 确定决策者的偏好程度 η , 由式 (4) 计算方案的排序向量 ω , 并依据 ω 对候选方案进行优选排序.

3 应用研究

高校组建技术转移中心是建设创新型国家的需要, 也是提升我国自主创新能力的客观需求. 为了实现技术创新成果的高效转化, 保证江苏省产学研联合创新专项资金的有效利用, 江苏省科技厅对 4 所高校技术转移中心进行了考评, 涉及技术转移规模、技术

转移项目等级、筹集经费能力和技术转移工作成效 4 个指标. 由于高校技术转移活动是个长期的战略行为, 很多技术创新转移效果需要较长周期才能凸显, 需要涉及多个阶段的指标评价. 通过调研已经获得 3 个阶段各项目的属性指标表现 (X^1, X^2, X^3) 和专家对 4 所高校技术转移中心绩效两两比较的语言判断矩阵 (R^1, R^2, R^3), 即

$$X^1 = \begin{bmatrix} s_3 & s_4 & s_8 & s_1 \\ s_1 & s_2 & s_5 & s_1 \\ s_4 & s_1 & s_8 & s_7 \\ s_6 & s_5 & s_4 & s_0 \end{bmatrix}, \quad X^2 = \begin{bmatrix} s_4 & s_4 & s_7 & s_3 \\ s_6 & s_3 & s_8 & s_4 \\ s_3 & s_0 & s_3 & s_6 \\ s_7 & s_1 & s_3 & s_4 \end{bmatrix},$$

$$X^3 = \begin{bmatrix} s_6 & s_3 & s_7 & s_3 \\ s_4 & s_6 & s_6 & s_3 \\ s_2 & s_1 & s_6 & s_7 \\ s_4 & s_4 & s_5 & s_7 \end{bmatrix};$$

$$R^1 = \begin{bmatrix} s_4 & s_5 & s_3 & s_4 \\ s_3 & s_4 & s_2 & s_3 \\ s_5 & s_6 & s_4 & s_4 \\ s_4 & s_5 & s_4 & s_4 \end{bmatrix}, \quad R^2 = \begin{bmatrix} s_4 & s_3 & s_6 & s_5 \\ s_5 & s_4 & s_6 & s_5 \\ s_2 & s_2 & s_4 & s_3 \\ s_3 & s_3 & s_5 & s_4 \end{bmatrix},$$

$$R^3 = \begin{bmatrix} s_4 & s_5 & s_6 & s_5 \\ s_3 & s_4 & s_5 & s_4 \\ s_2 & s_3 & s_4 & s_3 \\ s_3 & s_4 & s_5 & s_4 \end{bmatrix}.$$

其中语言评价标度集合为 $S = \{s_0 = \text{极差}, s_1 = \text{很差}, s_2 = \text{差}, s_3 = \text{稍差}, s_4 = \text{一般}, s_5 = \text{稍好}, s_6 = \text{好}, s_7 = \text{很好}, s_8 = \text{极好}\}$.

决策分析步骤如下.

Step 1: 根据文献 [19] 中的方法对语言判断矩阵一致性进行检验, 显示专家偏好矩阵满足满意一致性, 并根据定义 3 将决策信息中的语言变量转化为二元语义形式.

Step 2: 根据定义 6 构造导出偏好矩阵, 使用 Lingo 软件对 M-2 进行求解, 可得第 1 阶段的属性权重为 $w^1 = (0.5383, 0.0919, 0.2194, 0.2414)^T$; 将 w^1 代入 M-4 可得第 2 阶段的属性权重为 $w^2 = (0.2508, 0.2481, 0.2226, 0.2785)^T$ 和两阶段终止时的时间权重为 $\lambda^2 = (0.9100, 0.0900)^T$; 将 w^1 和 w^2 代入 M-2 可得第 3 阶段的属性权重 $w^3 = (0.0299, 0.3562, 0.096, 0.5179)^T$ 和三阶段终止时的时间权重 $\lambda^3 = (0.258, 0.1188, 0.6232)^T$. 由结果可以看出, 由于决策矩阵各属性值的重新测度和专家对各方案评估的调整, 使得不同阶段下属性权重发生了变化. 同时, 由于新阶段的信息补充, 使得前两阶段的权重也有所调整.

Step 3: 利用属性权重和时间权重对决策依据信息进行集结, 可得各方案的综合表现为 $X = ((s_4,$

$(-0.29), (s_4, -0.13), (s_5, -0.29), (s_5, 0.14))^T$. 结果表明, a_4 综合绩效最优, a_1 表现最劣.

Step 4: 由式(5)计算 p 阶段的专家判断排序得分数为: $r_1 = (s_4, -0.5), r_2 = (s_4, 0), r_3 = (s_5, -0.5), r_4 = (s_4, 0)$, 表明专家综合判断 a_3 最优, a_1 最劣.

Step 5: 假设决策者的偏好程度为 $\eta = 0.5$, 由式(4)计算可得方案的排序向量为 $\omega = ((s_4, -0.39), (s_4, -0.06), (s_5, -0.39), (s_5, -0.43))^T$. 根据二元语义的序关系可得各方案排序为 $a_3 \succ a_4 \succ a_2 \succ a_1$.

通过上述结果可以看出, 单独依靠决策依据信息的方案排序为 $a_4 \succ a_3 \succ a_2 \succ a_1$, 单独依靠专家偏好信息得到的方案排序结果是 $a_3 \succ a_4 \sim a_2 \succ a_1$. 这两类信息都有其优缺点, 单独依靠某一种信息来考量方案的表现都是不全面的. 兼顾两类信息联合决策可以弥补单独依靠某一种信息的缺憾. 决策者对两类信息的偏好程度不同, 也会影响方案最终绩效表现(分析结果见表1). 决策者的偏好程度可以依靠决策依据信息的有效程度或专家的可信度来确定合适的水平.

表1 不同 η 水平下方案绩效及排序

η	ω	排序
0.1	$(s_4, -0.48), (s_4, -0.01)$ $(s_5, -0.48), (s_4, 0.11)$	$a_3 \succ a_4 \succ a_2 \succ a_1$
0.3	$(s_4, -0.44), (s_4, -0.04)$ $(s_5, -0.44), (s_4, 0.3)$	$a_3 \succ a_4 \succ a_2 \succ a_1$
0.5	$(s_4, -0.39), (s_4, -0.06)$ $(s_5, -0.39), (s_5, -0.43)$	$a_3 \succ a_4 \succ a_2 \succ a_1$
0.7	$(s_4, -0.35), (s_4, -0.09)$ $(s_5, -0.35), (s_5, -0.2)$	$a_4 \succ a_3 \succ a_2 \succ a_1$
0.9	$(s_4, -0.31), (s_4, -0.11)$ $(s_5, -0.31), (s_5, 0.3)$	$a_4 \succ a_3 \succ a_2 \succ a_1$

4 结 论

大型复杂项目的决策问题往往涉及多阶段下多源多重结构的决策信息, 研究多重结构下的决策信息融合及决策问题具有重要的理论意义和实际价值. 本文针对包含决策依据信息和专家偏好信息的双重结构语言信息下的多阶段决策问题, 将双重信息下的语言变量转换为二元语义形式, 并设计了双重结构信息的融合方法; 以导出偏好矩阵和专家语言判断矩阵的差异最小为目标, 构建了多目标优化模型, 测算单阶段属性权重; 分析了多阶段下决策依据信息和专家判断矩阵的变化特征, 并构建了多阶段规划模型以探寻阶段权重的表现特征; 研究决策者的信息偏好程度水平, 对方案动态综合绩效和最终阶段专家偏好信息进行集结选优. 关于双重以及多重结构下决策信息集结问题尚有较大的研究空间, 作者将在双重及多重结构其他表现形式的结构融合及联合推理等方面开展深入的探索.

参考文献(References)

- [1] Chiclana F, Herrera F, Herrera-Viedma E. Integrating three representation models in fuzzy multipurpose decision making based on fuzzy preference relations[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, 97 (1): 33-48.
- [2] Fan Z P, Jiang Y P. A Chi-square method for ranking alternatives based on the fuzzy judgement matrix[J]. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems Series A: Mathematical Analysis*, 2004, 11(5): 731-740.
- [3] 何峻, 赵宏钟, 肖立, 等. 混合型多属性决策问题的序关系求解方法[J]. *控制与决策*, 2009, 24(4): 579-582.
(He J, Zhao H Z, Xiao L, et al. Preference method for solving hybrid multiple attribute decision making problems[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(4): 579-582.)
- [4] 陈小卫, 王文双, 宋贵宝, 等. 基于模糊偏序关系的混合型多属性决策方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(3): 529-532.
(Chen X W, Wang W S, Song G B, et al. Hybrid multiattribute decision making based on fuzzy preference relation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(3): 529-532.)
- [5] 姜艳萍, 樊治平. 一种具有不同形式效用值的群决策方法[J]. *运筹与管理*, 2005, 14(2): 1-4.
(Jiang Y P, Fan Z P. A method for group decision making problems with different forms of utility values[J]. *Operations Research and Management Science*, 2005, 14(2): 1-4.)
- [6] 徐选华, 陈晓红, 王红伟. 一种面向效用值偏好信息的大群体决策方法[J]. *控制与决策*, 2009, 24(3): 440-445.
(Xu X H, Chen X H, Wang H W. A kind of large group decision-making method oriented utility valued preference information[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(3): 440-445.)
- [7] Wang Y M, Fan Z P, Hua Z S. A Chi-square method for obtaining a priority vector from multiplicative and fuzzy preference relations[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 182(1): 356-366.
- [8] 朱建军. 群决策中两类不确定偏好信息的集结方法研究[J]. *控制与决策*, 2006, 21(8): 889-892.
(Zhu J J. Group aggregation approach of two kinds of uncertain preference information[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(8): 889-892.)
- [9] Yager R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1988, 18(1): 183-190.
- [10] Wei G W. Extension of TOPSIS method for 2-tuple linguistic multiple attribute group decision making with incomplete weight information[J]. *Knowledge and Information Systems*, 2010, 25(3): 623-634.

- [11] Chen C T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 114(1): 1-9.
- [12] 宋捷, 党耀国, 王正新, 等. 正负靶心灰靶决策模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(10): 1822-1827.
(Song J, Dang Y G, Wang Z X, et al. New decision model of grey target with both the positive clout and the negative clout[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(10): 1822-1827.)
- [13] Wei G W, Zhao X F, Lin R, et al. Generalized triangular fuzzy correlated averaging operator and their application to multiple attribute decision making[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2012, 36(7): 2969-2976.
- [14] Xu Z S. Multiple attribute decision making based on different types of linguistic information[J]. *J of Southeast University*, 2006, 22(1): 134-136.
- [15] Garcia J M T, Moral del M J, Martinez M A, et al. A consensus model for group decision making problems with linguistic interval fuzzy preference relations[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(11): 10022-10030.
- [16] Bordogna G, Fedrizzi M, Passi G. A linguistic modeling of consensus in group decision making based on OWA operator[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1997, 27(1): 126-132.
- [17] Herrera F, Martinez L. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(12): 746-752.
- [18] Pang J F, Liang J Y. Evaluation of the results of multi-attribute group decision-making with linguistic information[J]. *Omega*, 2012, 40(3): 294-301.
- [19] 樊治平, 肖四汉. 基于自然语言符号表示的比较矩阵的一致性及其排序方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2002, 22(5): 87-91.
(Fan Z P, Xiao S H. The consistency and ranking method for comparison matrix with linguistic assessment[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2002, 22(5): 87-91.)
- [20] Jiang Y P, Fan Z P, Ma J. A method for group decision making with multi-granularity linguistic assessment information[J]. *Information Sciences*, 2008, 178(4): 1098-1109.
- [21] Xu Z S. Multi-period multi-attribute group decision-making under linguistic assessments[J]. *Int J of General Systems*, 2009, 38(8): 823-850.
- [22] Xu Z S. A method based on the dynamic weighted geometric aggregation operator for dynamic hybrid multi-attribute group decision making[J]. *Int J of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2009, 17(1): 15-33.
- [23] Marimin M, Umamo M, Hatono I, et al. Linguistic labels for expressing fuzzy preference relations in fuzzy group decision making[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 1998, 28(2): 205-218.
- [24] 姜艳萍, 邢艳楠. 二元语义判断矩阵的一致性分析[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2007, 28(1): 129-132.
(Jiang Y P, Xing Y N. Consistency analysis of two-tuple linguistic judgement matrix[J]. *J of Northeastern University: Natural Science*, 2007, 28(1): 129-132.)
- [25] 王正新, 党耀国, 宋传平. 基于区间数的多目标灰色局势决策模型[J]. *控制与决策*, 2009, 24(3): 388-392.
(Wang Z X, Dang Y G, Song C P. Multi-objective decision model of grey situation based on interval number[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(3): 388-392.)
- [26] Winston W L. *Operations research application and algorithms*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 144-207.
- [27] 郭亚军, 姚远, 易平涛. 一种动态综合评价方法及应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 27(10): 154-158.
(Guo Y J, Yao Y, Yi P T. A method and application of dynamic comprehensive evaluation[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2007, 27(10): 154-158.)
- [28] 钱吴永, 党耀国, 刘思峰. 基于差异驱动原理与均值关联度的动态多指标决策模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(2): 337-341.
(Qian W Y, Dang Y G, Liu S F. Model of dynamic multiple index decision based on driving principle of difference and mean correlation degree[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(2): 337-341.)
- [29] Xu Z S, Yager R R. Dynamic intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making[J]. *Int J of Approximate Reasoning*, 2008, 48(1): 246-262.
- [30] 朱建军, 刘思峰, 李洪伟, 等. 群决策中多阶段多元判断偏好的集结方法研究[J]. *控制与决策*, 2008, 23(7): 730-734.
(Zhu J J, Liu S F, Li H W, et al. Aggregation approach of multiple stages multiple judgment preferences styles in group decision-making[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(7): 730-734.)
- [31] 金菊良, 汪淑娟, 魏一鸣. 动态多指标决策问题的投影跟踪模型[J]. *中国管理科学*, 2004, 12(1): 64-67.
(Jin J L, Wang S J, Wei Y M. Projection pursuit model for dynamic multiple attribute decision problems[J]. *Chinese J of Management Science*, 2004, 12(1): 64-67.)

(责任编辑: 李君玲)