

文章编号: 1003-207(2014)02-0040-08

# 具有不同类型信息的风险投资商与投资企业 多指标双边匹配决策方法

万树平<sup>1</sup>, 李登峰<sup>2</sup>

(1. 江西财经大学信息管理学院, 江西 南昌 330013; 2. 福州大学管理学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 根据现实风险投资商与投资企业双边匹配问题的特点, 构建了具有不同类型信息的风险投资商与投资企业双向选择的多指标评价匹配模型, 给出了一种多指标双边匹配决策方法。由于市场环境的不确定性和客观事物的复杂性, 评价信息采用实数、区间数、三角模糊数、语言变量和直觉模糊数 5 种类型表示。选取期望水平为参照点, 利用前景理论计算各指标的益损值, 考虑决策者损失规避的心理行为特征, 基于 TODIM(葡萄牙语, Interactive and Multicriteria Decision Making 首字母缩写)方法得到投资企业和风险投资商的总体感知价值, 据此建立了风险投资商、投资企业总体感知价值和投资中介收益最大化的多目标优化模型, 并提出了极大极小求解方法。实例分析表明决策方法的有效性和合理性。

**关键词:** 双边匹配; 心理行为; 前景理论; TODIM 方法; 多目标决策

**中图分类号:** C934 **文献标识码:** A

## 1 引言

风险投资是风险投资公司将自己的资金、品牌、网络、管理等资源与风险企业的技术、人力资源有机结合, 实现风险企业高速成长, 并从中获得高额利润的过程。投资企业的发展需要风险投资商的资金支持, 风险投资商也希望找到合适的投资企业进行投资<sup>[1]</sup>。风险投资商与投资企业的合理匹配能够尽量使双方都达到满意的结果, 有利于提高风险投资活动的成功率, 降低风险, 实现双赢。风险投资商与投资企业的匹配是一个双向选择过程, 为做出正确的投资决策, 风险投资商对投资企业的技术、市场潜力和规模以及管理队伍等方面进行仔细的审查与评

估; 寻求风险投资的投资企业在筛选投资公司时, 往往需要考虑多个因素, 比如: 企业所需投资的规模、地理位置、发展阶段和发展状况、销售额及盈利状况、经营范围等。因此, 风险投资商与投资企业的匹配可归结为一类多指标双边匹配问题。

匹配研究起源于男女婚姻匹配与大学录取问题<sup>[2]</sup>, 随后, 双边匹配问题研究引起了学者们的重视, 如电子商务环境下供需双边匹配<sup>[3-4]</sup>、人力资源管理中员工与岗位双边匹配<sup>[5-6]</sup>、IT 服务供需双边匹配<sup>[7]</sup>和电子中介的交易匹配<sup>[8]</sup>等。Sørensen<sup>[9]</sup>基于双边匹配模型构建了风险投资的结构模型, 用以解释得到拥有更多经验的风险投资商投资的公司, 更有可能公开上市。陈希等<sup>[1]</sup>构建了风险投资商与投资企业双方互评的匹配评价指标体系, 提出了基于公理设计的匹配决策方法。该方法能有效地衡量风险投资商与投资企业的匹配程度, 但仅考虑了指标评价信息为区间数和语言变量的情形。在现实的风险投资商与投资企业匹配问题中, 由于涉及多个不同的定性和定量评价指标, 评价信息经常是以多种形式给出的。对定量指标, 可能以实数、区间数或三角模糊数给出, 例如, 投资企业对风险投资商的回报率进行评价时, 会给出一个大致范围 $[8\%, 12\%]$ , 对投资成功率评价时表示为三角模糊数 $(0.5, 0.65, 0.7)$ , 即最可能是 0.65, 最低是 0.5, 最高是 0.7; 对定性指标, 可能以语言变量或直觉模糊数给

收稿日期: 2011-12-15; 修订日期: 2012-07-10

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(71231003); 国家自然科学基金资助项目(71061006, 61263018, 70861002, 71171055, 7124040); 教育部人文社科项目(09YGC630107); 江西省教育厅科技项目(GJJ12265); 江西省自然科学基金(20114BAB201012); 江西省社会科学“十二五”(2013)规划项目(13GL17); 江西财经大学优秀青年学术人才支持计划; 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-10-0020); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20113514110009)

**作者简介:** 万树平(1974-), 男(汉族), 江西乐安人, 江西财经大学信息管理学院, 教授, 博导, 博士, 研究方向: 决策分析的研究。

出,例如,风险投资商对投资企业的企业家素质进行评价时,往往会采用“高”、“较高”等语言变量来表示,对投资环境和税收优惠进行评价时可能会给出以 0.5 的隶属度满意,以 0.3 的非隶属度不满意,还存在 0.2 的不确定是否满意这三方面的信息,即采用直觉模糊数  $\langle 0.5, 0.3 \rangle$  表示。

现有的双边匹配方法大多是建立在期望效用理论基础之上的,即假设决策者是完全理性的。然而,在实际的决策过程中,决策者在行为上并不总是追求效用最大化,而是往往会根据某些参考点来衡量决策的收益和损失风险。可能会因参考点的选择不同,使得每次决策都随之改变,即表现为参照依赖。在参考点上,人们更重视预期与结果的差距而不是结果本身。决策者对待损失的感知比等量的收益更加敏感,即表现为损失规避<sup>[10-11]</sup>。这样,运用期望效用理论,有时就不能准确地描述决策者在实际决策过程中表现出的参照依赖和损失规避这种心理行为特征<sup>[12]</sup>,而已有的双边匹配方法难以处理考虑决策者有限理性特征与复杂心理行为的情况。为此,本文考虑决策者的心理行为,利用前景理论<sup>[10-12]</sup>和 TODIM (an acronym in Portuguese of Interactive and Multicriteria Decision Making)<sup>[13-14]</sup>方法研究具有不同类型信息的风险投资商和投资企业的多指标双边匹配问题。

## 2 具有不同类型信息的风险投资商与投资 企业双边匹配问题

在风险投资商与投资企业的匹配过程中,存在着三方决策主体:风险投资商、投资企业和投资中介。风险投资商将其对投资企业的期望水平信息提供给中介,中介客观地给出对投资企业的实际评价信息。投资企业将其对风险投资商的期望水平信息提供给中介,中介客观地给出对风险投资商的实际评价信息。中介根据双方的期望水平信息和实际评价信息,以使双方都达到满意为目标,聚合风险投资商和投资企业并形成合理的匹配对。图 1 为具有不同类型信息的双边匹配示意图。

所有风险投资商记做集合  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ , 其中  $A_i$  为第  $i$  个风险投资商。风险投资商对投资企业的的所有评价指标(属性)记做集合  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_f\}$ , 其中  $c_h$  为第  $h$  个评价指标;对应于  $C$  的指标权重向量为  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_f)$ , 其中  $\omega_h$  为指标  $c_h$  的权重,满足归一性要求:  $0 \leq \omega_h \leq 1, \sum_{h=1}^f \omega_h =$

1。所有投资企业记做集合  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ , 其中  $B_j$  为第  $j$  个风险企业。投资企业对风险投资商的所有评价指标记做集合  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_g\}$ , 其中  $y_k$  为第  $k$  个评价指标;对应于  $Y$  的指标权重向量为  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_g)$ , 其中  $\omega_k$  为指标  $y_k$  的权重,满足归一性要求:  $0 \leq v_k \leq 1, \sum_{k=1}^g v_k = 1$ 。

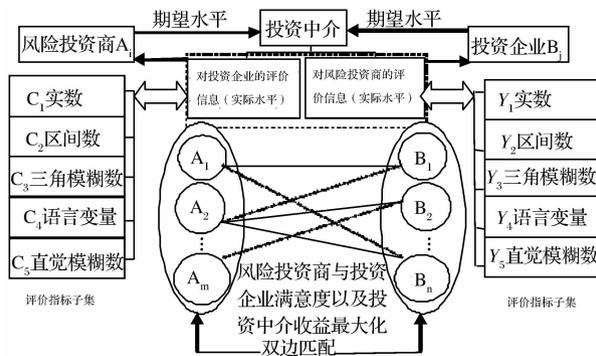


图 1 具有不同类型信息的风险投资商与投资企业双边匹配示意图

由于市场环境的不确定性和客观事物的复杂性,风险投资商与投资企业对各个评价指标的期望水平信息和实际水平信息具有模糊性、不确定性。对定量指标可能采用实数或区间数或三角模糊数表示;对定性指标,一般采用语言短语或直觉模糊数表示相关的评价信息。考虑双边的评价指标信息为实数、区间数、三角模糊数、语言变量和直觉模糊数 5 种类型,将双边的评价指标集分别写成  $C = C_1 \cup C_2 \cup C_3 \cup C_4 \cup C_5, Y = Y_1 \cup Y_2 \cup Y_3 \cup Y_4 \cup Y_5$ , 其中,  $C_i \cap C_j = \varnothing, Y_i \cap Y_j = \varnothing (i, j = 1, 2, 3, 4, 5; i \neq j)$ ,  $C_i, Y_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$  表示评价信息分别为实数、区间数、三角模糊数、语言变量和直觉模糊数所对应的指标集,  $\varnothing$  为空集。设  $C_i^o$  和  $C_i^c$  分别表示  $C_i$  中的效益型和成本型属性集合,且满足  $C_i^o \cup C_i^c = C_i, C_i^o \cap C_i^c = \varnothing$ 。  $Y_i^b$  和  $Y_i^c$  分别表示  $Y_i$  中的效益型和成本型属性集合,且满足  $Y_i^b \cup Y_i^c = Y_i, Y_i^b \cap Y_i^c = \varnothing$ 。由于不同指标(决策者)的重要性程度一般是不相同的,对指标集  $C_4$  和  $Y_4$  中的不同指标,其语言评价价值可能取值于不同粒度的语言标集。

设风险投资商  $A_i$  对指标  $c_h$  的期望水平为:

$$e_{ih} = \begin{cases} d_{ih}, & \text{if } c_h \in C_1 \\ [e_{ih}^-, e_{ih}^+], & \text{if } c_h \in C_2 \\ (a_{ih}, b_{ih}, c_{ih}), & \text{if } c_h \in C_3 \\ s_{ih} \in S_h, & \text{if } c_h \in C_4 \\ \langle \mu_{ih}, \nu_{ih} \rangle, & \text{if } c_h \in C_5 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $S_h = \{s_0^h, s_1^h, \dots, s_{N_h}^h\}$  为关于指标  $c_h$  的语言标记集。

投资中介对投资企业  $B_j$  进行评价, 给出其在指标  $c_h$  的实际水平为:

$$r_{jh} = \begin{cases} g_{jh}, & \text{if } c_h \in C_1 \\ [\underline{r}_{jh}, \bar{r}_{jh}], & \text{if } c_h \in C_2 \\ (p_{jh}, q_{jh}, t_{jh}), & \text{if } c_h \in C_3 \\ o_{jh} \in S_h & \text{if } c_h \in C_4 \\ < t_{jh}, f_{jh} >, & \text{if } c_h \in C_5 \end{cases}, \quad (2)$$

设投资企业  $B_j$  对指标  $y_k$  的期望水平分别为

$$e'_{jk} = \begin{cases} d'_{jk}, & \text{if } y_k \in Y_1 \\ [\underline{e}'_{jk}, \bar{e}'_{jk}], & \text{if } y_k \in Y_2 \\ (a'_{jk}, b'_{jk}, c'_{jk}), & \text{if } y_k \in Y_3 \\ s'_{jk} \in S'_k, & \text{if } y_k \in Y_4 \\ < \mu'_{jk}, \nu'_{jk} >, & \text{if } y_k \in Y_5 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $S'_k = \{s'_0, s'_1, \dots, s'_{N_k}\}$  为关于指标  $y_k$  的语言标记集。

投资中介对风险投资商  $A_i$  进行评价, 给出其在指标  $y_k$  的实际水平为

$$r'_{ik} = \begin{cases} g'_{ik}, & \text{if } y_k \in Y_1 \\ [\underline{r}'_{ik}, \bar{r}'_{ik}], & \text{if } y_k \in Y_2 \\ (p'_{ik}, q'_{ik}, t'_{ik}), & \text{if } y_k \in Y_3 \\ o'_{ik} \in S', & \text{if } y_k \in Y_4 \\ < t'_{ik}, f'_{ik} >, & \text{if } y_k \in Y_5 \end{cases} \quad (4)$$

风险投资商  $A_i$  至多可投资的投资企业数为  $\theta_i$  个, 一个投资企业至多可与一个风险投资商匹配。本文考虑的是依据上述期望水平和实际水平信息, 通过使用某种决策方法, 将风险投资商与投资企业匹配, 使得双方的满意度尽可能达到最大, 同时投资中介的收益也最大化。

### 3 具有不同类型信息的风险投资商与投资企业双边匹配决策模型及方法

为消除不同物理量纲对决策结果的影响, 首先需将各指标的评价信息进行规范化处理。类似于 Li Dengfeng<sup>[15]</sup> 的处理, 以  $e_{ih}$  为例说明规范化方法。

实数  $e_{ih} = d_{ih} (c_h \in C_1)$  规范化为:

$$l_{ih} = \begin{cases} d_{ih}/d_{maxh}, & \text{if } c_h \in C_1 \\ 1 - d_{ih}/d_{maxh}, & \text{if } c_h \in C_1^c \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $d_{maxh} = \max\{d_{ih} \mid i = 1, 2, \dots, m\}$ 。

区间数  $e_{ih} = [\underline{e}_{ih}, \bar{e}_{ih}] (c_h \in C_2)$  规范化为:

$$l_{ih} = \begin{cases} [\underline{e}_{ih}/\bar{e}_{maxh}, \bar{e}_{ih}/\bar{e}_{maxh}], & \text{if } c_h \in C_2^b \\ [1 - \bar{e}_{ih}/\bar{e}_{maxh}, 1 - \underline{e}_{ih}/\bar{e}_{maxh}], & \text{if } c_h \in C_2^c \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\bar{e}_{maxh} = \max\{\bar{e}_{ih} \mid i = 1, 2, \dots, m\}$ 。

三角模糊数  $e_{ih} = (a_{ih}, b_{ih}, c_{ih}) (c_h \in C_3)$  规范化为:

$$l_{ih} = \begin{cases} [a_{ih}/c_{maxh}, b_{ih}/c_{maxh}, c_{ih}/c_{maxh}], & \text{if } c_h \in C_3^b \\ [1 - c_{ih}/c_{maxh}, 1 - b_{ih}/c_{maxh}, 1 - a_{ih}/c_{maxh}], & \text{if } c_h \in C_3^c \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $c_{maxh} = \max\{c_{ih} \mid i = 1, 2, \dots, m\}$ 。

设基本语言标记集为  $S_0 = \{s_1, s_2, \dots, s_L\}, L \geq \max\{N_h, N_k \mid c_h \in C_4, y_k \in Y_4\}$ 。  $S_h = \{s_0^h, s_1^h, \dots, s_{N_h}^h\}$  与  $S_0$  的转换函数  $\varphi: S_h \rightarrow F(S_0)$  定义为

$$\varphi(s_i^h) = \left\{ \frac{\mu_{il}^h}{s_l} \mid \mu_{il}^h = \max_{y \in R} \min\{\mu_{s_i^h}^h(y), \mu_{s_l}(y)\} \right\}, (l = 0, 1, \dots, L) \quad (8)$$

其中,  $F(S_0)$  为定义在  $S_0$  上的模糊集,  $R$  为实数集,  $\mu_{s_i^h}^h(y)$  和  $\mu_{s_l}(y)$  分别为与语言标记  $s_i^h \in S_h$  和  $s_l \in S_0$  关联的模糊集隶属函数。

语言变量  $e_{ih} = s_{ih} \in S_h$  可由式(8)转化为模糊集  $\varphi(s_{ih})$ , 采用向量表示为  $\varphi(s_{ih}) = (\mu_{ih0}, \mu_{ih1}, \dots, \mu_{ihL}) (c_h \in C_4)$ , 简记为  $l_{ih} = (\mu_{ih0}, \mu_{ih1}, \dots, \mu_{ihL})$ 。

直觉模糊数  $e_{ih} = \langle \mu_{ih}, \nu_{ih} \rangle (c_h \in C_5)$  本身是介于 0 与 1 之间, 无需规范化, 这样根据式(5)–(8) 可将  $e_{ih}$  规范化为  $l_{ih}$ 。类似地, 可将  $r_{jh}$ 、 $e'_{jk}$  和  $r'_{ik}$  规范化。为简化符号, 将  $e_{ih}$ 、 $r_{jh}$ 、 $e'_{jk}$  和  $r'_{ik}$  规范化后的结果仍然分别记为  $e_{ih}$ 、 $r_{jh}$ 、 $e'_{jk}$  和  $r'_{ik}$ 。

针对指标评价信息具有不同类型, 给出规范化后的指标值期望水平和实际水平之间的距离。定义  $r_{jh}$  与  $e_{ih}$  的距离  $d(r_{jh}, e_{ih})$  为:

(1) 若  $r_{jh}$  与  $e_{ih}$  都为实数, 则  $d(r_{jh}, e_{ih}) = d(g_{jh}, d_{ih}) = |g_{jh} - d_{ih}|$ ;

(2) 若  $r_{jh}$  与  $e_{ih}$  都为区间数, 则:

$$d(r_{jh}, e_{ih}) = d([\underline{r}_{jh}, \bar{r}_{jh}], [\underline{e}_{ih}, \bar{e}_{ih}]) = \sqrt[p]{\frac{1}{2} (|\underline{r}_{jh} - \underline{e}_{ih}|^p + |\bar{r}_{jh} - \bar{e}_{ih}|^p)}$$

其中,  $p > 0$  为距离参数;

(3) 若  $r_{jh}$  与  $e_{ih}$  都为三角模糊数, 则

$$d(r_{jh}, e_{ih}) = d((p_{jh}, q_{jh}, t_{jh}), (a_{ih}, b_{ih}, c_{ih})) = \sqrt[p]{\frac{1}{3} (|p_{jh} - a_{ih}|^p + |q_{jh} - b_{ih}|^p + |t_{jh} - c_{ih}|^p)}$$

(4) 若  $r_{jh}$  与  $e_{ih}$  都为语言变量, 则:

$$d(r_{jh}, e_{ih}) = d(o_{jh}, s_{ih}) = \frac{1}{L} |\lambda_{jh} - \lambda_{ih}|$$

其中,  $\lambda_{jh} = \frac{\sum_{l=0}^L \mu_{jhl}}{\sum_{l=0}^L \mu_{jhl}}$ ,  $\lambda_{ih} = \frac{\sum_{l=0}^L \mu_{ihl}}{\sum_{l=0}^L \mu_{ihl}}$ ;

(5)若  $r_{jh}$  与  $e_{ih}$  都为直觉模糊数,则:

$$d(r_{jh}, e_{ih}) = d(\langle t_{jh}, f_{jh} \rangle, \langle \mu_{ih}, v_{ih} \rangle) =$$

$$\sqrt[p]{\frac{1}{3} (|t_{jh} - \mu_{ih}|^p + |f_{jh} - v_{ih}|^p + |\gamma_{jh} - \pi_{ih}|^p)}$$

其中,  $\gamma_{jh} = 1 - t_{jh} - f_{jh}$ 、 $\pi_{ih} = 1 - \mu_{ih} - v_{ih}$  为犹豫度。

类似地,可定义  $e'_{jk}$  和  $r'_{ik}$  的距离  $d(r'_{ik}, e'_{jk})$ 。

然后针对决策者参照依赖的心理行为特征,即决策者把结果看作相对于参照点的收益或损失<sup>[10]</sup>,风险投资商  $A_i$  以对指标  $c_h$  的期望水平  $e_{ih}$  作为参照点,将投资企业  $B_j$  关于指标  $c_h$  的实际水平  $r_{jh}$  与之比较,根据前景理论<sup>[10]</sup>,可定义实际水平  $r_{jh}$  相对于期望水平  $e_{ih}$  的益损值为:

$$\Delta(r_{jh}, e_{ih}) = \begin{cases} d(r_{jh}, e_{ih}), & r_{jh} \geq e_{ih} \\ -d(r_{jh}, e_{ih}), & r_{jh} < e_{ih} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $d(r_{jh}, e_{ih})$  为  $r_{jh}$  与  $e_{ih}$  的距离,  $r_{jh} \geq e_{ih}$  表示  $r_{jh}$  不小于  $e_{ih}$ ,此时  $\Delta(r_{jh}, e_{ih})$  为收益;  $r_{jh} < e_{ih}$  表示  $r_{jh}$  小于  $e_{ih}$ ,此时  $\Delta(r_{jh}, e_{ih})$  为损失。当  $r_{jh}$  与  $e_{ih}$  分别为区间数、三角模糊数和直觉模糊数时,其大小比较可采用文献[16-19]给出的方法。

考虑决策者损失规避的心理行为特征,即决策者对待损失的感知比等量的收益更加敏感<sup>[11]</sup>,依据 TODIM 方法<sup>[13-14]</sup>的基本思想,计算决策者对每个方案在各属性下的益损值的感知价值。为了将各属性下的益损值的感知价值转化到同一维度上<sup>[14]</sup>,需要计算每个属性相对于参照属性的相对权重,例如,对属性  $c_h$ ,其相对于参照属性的相对权重为:

$$w'_h = w_h / w^*, (h = 1, 2, \dots, f) \quad (10)$$

其中,  $w^* = \max\{w_h | h = 1, 2, \dots, f\}$ , 对应于  $w^*$  的属性  $c^*$  被视为参照属性,  $c^* \in C$ 。

进而计算风险投资商  $A_i$  对益损值  $\Delta(r_{jh}, e_{ih})$  的感知价值为:

$$v(r_{jh}, e_{ih}) = \begin{cases} \sqrt{\Delta(r_{jh}, e_{ih}) w'_h / \sum_{h=1}^f w'_h}, & r_{jh} \geq e_{ih} \\ -\frac{1}{\theta_i} \sqrt{-\Delta(r_{jh}, e_{ih}) (\sum_{h=1}^f w'_h) / w'_h}, & r_{jh} < e_{ih} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $\theta_i$  为风险投资商  $A_i$  的损失规避系数,  $\theta_i \in$

$(0, (\sum_{h=1}^f w'_h) / w'_h)$ , 且  $\theta_i$  越小表明  $A_i$  的损失规避程度越高。

由式(11),对于某一收益  $\Delta(r_{jh}, e_{ih}) > 0$ ,有

$$\left| \sqrt{\Delta(r_{jh}, e_{ih}) w'_h / \sum_{h=1}^f w'_h} \right| < \left| -\frac{1}{\theta} \sqrt{-\Delta(r_{jh}, e_{ih}) (\sum_{h=1}^f w'_h) / w'_h} \right|,$$

表明  $A_i$  对损失  $-\Delta(r_{jh}, e_{ih})$  感知的负向价值比获得等量的收益  $\Delta(r_{jh}, e_{ih})$  感知的正向价值更大,即  $A_i$  是损失规避的。

由式(11)可计算风险投资商  $A_i$  对投资企业  $B_j$  的总体感知价值为:

$$V(A_i, B_j) = \sum_{h=1}^f v(r_{jh}, e_{ih}) \quad (12)$$

$A_i$  对  $B_j$  的总体感知价值是  $A_i$  所能感知到的收益和损失进行权衡后对  $A_i$  期望水平与  $B_j$  实际水平吻合程度的总体评价,  $V(A_i, B_j)$  的值越大,则  $A_i$  对其期望水平与  $B_j$  的实际水平吻合程度越满意,因而两者的匹配度越高。

同理,投资企业  $B_j$  以对指标  $y_k$  的期望水平信息作为参照点,类似于式(9),可定义  $B_j$  相对指标  $y_k$  的益损值  $\Delta(r'_{ik}, e'_{jk})$ ,类似于式(11),可定义  $B_j$  相对益损值  $\Delta(r'_{ik}, e'_{jk})$  的感知价值为:

$$v(r'_{ik}, e'_{jk}) = \begin{cases} \sqrt{\Delta(r'_{ik}, e'_{jk}) \omega'_k / \sum_{k=1}^g \omega'_k}, & r'_{ik} \geq e'_{jk} \\ -\frac{1}{\theta_j} \sqrt{-\Delta(r'_{ik}, e'_{jk}) (\sum_{k=1}^g \omega'_k) / \omega'_k}, & r'_{ik} < e'_{jk} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $\omega'_k = \omega_k / \omega^*$ ,  $\omega^* = \max\{\omega_k | k = 1, 2, \dots, g\}$

,  $\theta_j$  为  $B_j$  的损失规避系数,  $\theta_j \in (0, (\sum_{k=1}^g \omega'_k) / \omega'_k)$ , 且  $\theta_j$  越小表明  $B_j$  的损失规避程度越高。

由式(13)可计算投资企业  $B_j$  对风险投资商  $A_i$  的总体感知价值为:

$$V(B_j, A_i) = \sum_{k=1}^g v(r'_{ik}, e'_{jk}) \quad (14)$$

$V(B_j, A_i)$  的值越大,则  $B_j$  对其期望水平与  $A_i$  的实际水平吻合程度越满意,两者匹配的程度越高。

设矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ , 其中,  $x_{ij} = 1$  表示风险投资商  $A_i$  与投资企业  $B_j$  匹配;  $x_{ij} = 0$  表示风险投资商  $A_i$  与投资企业  $B_j$  不匹配,构建如下多目标优化模型:

$$\max\{Z_1(X), Z_2(X), Z_3(X)\} \quad (15a)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \theta_i, i = 1, 2, \dots, m & (15b) \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1, j = 1, 2, \dots, n & (15c) \\ x_{ij} = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n & (15d) \end{cases}$$

其中,  $Z_1(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n V(A_i, B_j)x_{ij}$  为所有风险投资商对所有投资企业的总体感知价值,  $Z_2(X) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m V(B_j, A_i)x_{ij}$  为所有投资企业对所有风险投资商的总体感知价值。总体感知价值越大, 则投资企业的实际水平(期望水平)与风险投资商的期望水平(实际水平)越吻合, 投资企业与风险投资商的匹配度越高。  $Z_3(X) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m x_{ij}$  是投资企业与风险投资商成功匹配的个数。若设投资中介按照成功匹配的个数收取佣金, 则  $\max Z_3(X)$  即为中介的最大收益。约束条件式(15b)表示风险投资商  $A_i$  至多可投资的企业为  $\theta_i$  个。式(15c)表示一个投资企业至多可与一个风险投资商匹配。

设  $Z_k^{\max}$  和  $X_k^*$  ( $k = 1, 2, 3$ ) 为  $\max Z_k(X)$  和(15b)–(15d)所构成的单目标优化模型的目标函数最大值和最优解,  $Z_k^{\min} = \min\{Z_k(X_1^*), Z_k(X_2^*), Z_k(X_3^*)\}$  ( $k = 1, 2, 3$ ), 则模型(15)中三个目标函数的隶属函数  $\mu_{z_k}$  ( $k = 1, 2, 3$ ) 可定义为:

$$\begin{aligned} \mu_{z_1} &= (Z_1 - Z_1^{\min}) / (Z_1^{\max} - Z_1^{\min}) \\ \mu_{z_2} &= (Z_2 - Z_2^{\min}) / (Z_2^{\max} - Z_2^{\min}) \\ \mu_{z_3} &= (Z_3 - Z_3^{\min}) / (Z_3^{\max} - Z_3^{\min}) \end{aligned} \quad (16)$$

选取模糊多目标最优解集  $\tilde{F}$  在  $x$  处的集结函数<sup>[20]</sup> 为  $\mu_{\tilde{F}}(x) = \frac{1}{2}[\min\{\mu_1(x), \mu_2(x), \mu_3(x)\} + \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 \mu_k(x)]$ , 则上述多目标优化模型(15)可采用如下极大极小方法<sup>[20]</sup> 求解:

$$\max \{\mu\} \quad (17a)$$

$$3\mu_{z_k} + \mu_{z_1} + \mu_{z_2} + \mu_{z_3} \geq 6\mu, k = 1, 2, 3 \quad (17b)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \theta_i, i = 1, 2, \dots, m & (17c) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1, j = 1, 2, \dots, n & (17d) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{ij} = 0 \text{ 或 } 1, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n & (17e) \end{cases}$$

极大极小方法确定的模糊最优解或满意解  $X^*$  可保证最差的目标函数的优属度达到最大, 是一种

保守的处理方法, 适合于保守型决策者采用。模型(17)中目标函数和约束条件均是线性的, 可采用整数规划方法进行求解。

根据上面的讨论, 可将考虑多种形式信息的双边匹配决策方法的具体步骤归纳如下:

Step 1 识别风险投资商与投资企业的评价指标;

Step 2 抽取风险投资商与投资企业的各个评价指标信息(或评价值);

Step 3 利用式(5)–(8)将各个指标评价值规范化;

Step 4 根据式(9)–(12)计算风险投资商  $A_i$  对投资企业  $B_j$  的总体感知价值( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ );

Step 5 根据式(13)–(14)计算投资企业  $B_j$  对风险投资商  $A_i$  的总体感知价值( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ );

Step 6 求解模型(17)得到最优匹配结果。

### 4 实例计算与分析

风险投资匹配的三方决策主体是: 6 个风险投资商(即: 今日资本  $A_1$ , 联想投资有限公司  $A_2$ , 摩根士丹利  $A_3$ , 美国华平投资集团  $A_4$ , 天使投资人  $A_5$ , 大学捐赠基金  $A_6$ )、10 个投资企业(即: 甲骨文  $B_1$ , 思科  $B_2$ , 双汇集团  $B_3$ , 半导体芯片公司  $B_4$ , 南孚电池  $B_5$ , 腾讯  $B_6$ , 哈药集团  $B_7$ , 蒙牛  $B_8$ , 阿里巴巴  $B_9$ , 软件企业  $B_{10}$ ) 和某风险投资中介。

风险投资商选取 8 项指标(即: 投资回收期  $c_1$ (单位为年), 年投资报酬率  $c_2$ , 期望风险  $c_3$ , 技术水平  $c_4$ , 市场的可进入性  $c_5$ , 企业家素质  $c_6$ , 投资环境  $c_7$ , 税收优惠  $c_8$ ) 对投资企业进行评价, 根据以往经验和市场调查以及统计分析, 给出 8 项指标的期望水平, 如表 1 所列, 其中,  $c_1$  与  $c_2$  为定量指标, 由于市场环境的不确定性和客观事物的复杂性,  $c_2$  只能给出大致的范围, 即采用区间数表示;  $c_3$  采用百分比、 $c_4$  采用 10 分制给出最可能性值和上、下限, 即采用三角模糊数表示; 指标  $c_5$  和  $c_6$  的评价值分别取自语言短句集  $S_5 = \{\text{弱/低 } W, \text{中等/一般 } M, \text{强/高 } S\}$  和  $S_6 = \{\text{非常差/非常低 } VL, \text{较差/较低 } L, \text{中等/一般 } M, \text{较好/较高 } VG, \text{非常好/非常高 } VG\}$ ; 指标  $c_7, c_8$  采用直觉模糊数表示。投资中介聘请律师和会计师等专业人士对 10 个投资企业进行评价, 给出投资企业在指标  $\{c_1, c_2, \dots, c_8\}$  下的实际水平, 如表 2 所列, 指标权重向量由专家给定为  $w = (0.15,$

$0.25, 0.20, 0.15, 0.06, 0.12, 0.08, 0.09)^T$ 。

投资企业选取 5 项指标(即:投资额度  $y_1$  (单位为万元),投资回报率  $y_2$ ,投资成功率  $y_3$ ,信誉  $y_4$ ,企业家素质  $y_5$ )对风险投资商进行评价,分别采用实数、区间数、三角模糊数、语言变量和直觉模糊数表示,给出 5 项指标的期望水平,如表 3 所列,其中,指标  $y_4$  的评价值取自语言短语集  $S_6$ 。投资中介聘请风险投资机构领域的资深专家对风险投资商进行评价,给出风险投资商在指标  $\{y_1, y_2, \dots, y_5\}$  下的

实际水平,如表 4 所列,专家给出的指标权重向量为  $\omega = (0.20, 0.35, 0.22, 0.13, 0.10)^T$ 。每个风险投资商最多可投资的投资企业数  $\theta_i$  为  $2(i = 1, 2, \dots, 6)$ 。

投资中介需要根据收到的信息,考虑尽量满足风险投资商和投资企业的意向和要求,使两者在各自评价指标下的期望水平和实际水平的吻合程度最高,即保证风险投资商和投资企业的匹配程度最高,

表 1 风险投资商对投资企业的期望水平

	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$
$A_1$	3	7% ~ 10%	(0.5, 0.75, 1)	(5, 7.5, 10)	S	G	< 0.70, 0.25 >	< 0.70, 0.25 >
$A_2$	4	10% ~ 12%	(0.75, 0.75, 1)	(6, 8, 10)	S	G	< 0.70, 0.25 >	< 0.70, 0.25 >
$A_3$	4.5	8% ~ 11%	(0.25, 0.5, 0.75)	(2, 6, 8)	S	G	< 0.70, 0.25 >	< 0.40, 0.50 >
$A_4$	3.5	9% ~ 15%	(0.5, 0.75, 1)	(1, 3, 5)	S	VG	< 0.70, 0.25 >	< 0.70, 0.25 >
$A_5$	6.5	8% ~ 12%	(0.5, 0.75, 1)	(2, 4, 6)	S	G	< 0.70, 0.25 >	< 0.40, 0.50 >
$A_6$	5	10% ~ 15%	(0.75, 0.75, 1)	(3, 6, 9)	S	G	< 0.70, 0.25 >	< 0.70, 0.25 >

表 2 投资企业的实际水平

	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$
$B_1$	3.5	8% ~ 10%	(0.5, 0.75, 1)	(3, 7, 9)	S	G	< 0.40, 0.50 >	< 0.70, 0.25 >
$B_2$	4.5	10% ~ 11%	(0.25, 0.5, 0.75)	(1, 4, 6)	S	G	< 0.70, 0.25 >	< 0.40, 0.50 >
$B_3$	3.5	8% ~ 10%	(0, 0.25, 0.5)	(2, 3, 5)	S	G	< 0.70, 0.25 >	< 0.40, 0.50 >
$B_4$	2.5	9% ~ 11%	(0.25, 0.5, 0.75)	(3, 5, 7)	S	VG	< 0.70, 0.25 >	< 0.70, 0.25 >
$B_5$	6.5	8% ~ 12%	(0.5, 0.75, 1)	(1, 6, 9)	S	G	< 0.40, 0.50 >	< 0.40, 0.50 >
$B_6$	3.5	10% ~ 12%	(0.5, 0.75, 1)	(2, 5, 9)	S	G	< 0.70, 0.25 >	< 0.40, 0.50 >
$B_7$	4.5	7% ~ 9%	(0.5, 0.75, 1)	(3, 7, 9)	M	G	< 0.40, 0.50 >	< 0.70, 0.25 >
$B_8$	3.5	8% ~ 10%	(0.25, 0.5, 0.75)	(4, 5, 7)	M	G	< 0.40, 0.50 >	< 0.70, 0.25 >
$B_9$	4.5	6% ~ 8%	(0, 0, 0.25)	(5, 7, 10)	S	L	< 0.70, 0.25 >	< 0.70, 0.25 >
$B_{10}$	4	10% ~ 11%	(0.5, 0.75, 1)	(4, 6, 9)	M	G	< 0.70, 0.25 >	< 0.70, 0.25 >

表 3 投资企业对风险投资商的期望水平

	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
$B_1$	900	8% ~ 12%	(0.5, 0.65, 0.7)	G	< 0.70, 0.25 >
$B_2$	800	10% ~ 15%	(0.3, 0.35, 0.4)	G	< 0.70, 0.25 >
$B_3$	500	3% ~ 5%	(0.1, 0.2, 0.25)	VG	< 0.70, 0.25 >
$B_4$	300	6% ~ 8.5%	(0.1, 0.2, 0.3)	G	< 0.95, 0.05 >
$B_5$	700	6% ~ 8%	(0.2, 0.3, 0.34)	G	< 0.70, 0.25 >
$B_6$	900	16% ~ 20%	(0.2, 0.4, 0.5)	G	< 0.70, 0.25 >
$B_7$	200	1% ~ 3%	(0.25, 0.3, 0.4)	G	< 0.70, 0.25 >
$B_8$	300	5% ~ 7%	(0.4, 0.65, 0.8)	VG	< 0.95, 0.05 >
$B_9$	400	6% ~ 7.5%	(0.5, 0.6, 0.7)	VG	< 0.70, 0.25 >
$B_{10}$	600	12% ~ 16%	(0.2, 0.41, 0.5)	VG	< 0.70, 0.25 >

表 4 风险投资商的实际水平

	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
$A_1$	600	9% ~ 12%	(0.5, 0.75, 1)	G	< 0.70, 0.25 >
$A_2$	700	2% ~ 4.5%	(0.25, 0.5, 0.75)	G	< 0.70, 0.25 >
$A_3$	400	14% ~ 20%	(0.5, 0.75, 1)	VG	< 0.70, 0.25 >
$A_4$	600	4% ~ 7%	(0.5, 0.75, 1)	G	< 0.95, 0.05 >
$A_5$	300	6% ~ 8.5%	(0.5, 0.75, 1)	G	< 0.40, 0.50 >
$A_6$	800	6% ~ 9%	(0.75, 0.75, 1)	G	< 0.70, 0.25 >

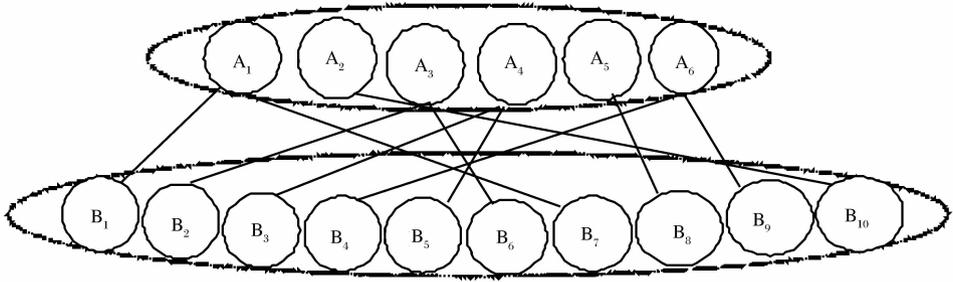


图 2 匹配结果

同时投资中介的收益最大。

采用本文的匹配决策方法,首先利用式(5) — (8)将表 1 至表 4 中的数据规范化,然后按照上述 Step3—5 计算风险投资商和投资企业的总体感知价值(取  $p = 2, \theta_1 = 0.7, \theta_2 = 0.62, \theta_3 = 0.63, \theta_4 = 0.66, \theta_5 = 0.69, \theta_6 = 0.7, \theta'_1 = 0.78, \theta'_2 = 0.81, \theta'_3 = 0.75, \theta'_4 = 0.77, \theta'_5 = 0.74, \theta'_6 = 0.73, \theta'_7 = 0.72, \theta'_8 = 0.72, \theta'_9 = 0.82, \theta'_{10} = 0.8$ )。最后求解模型(17)得到最优解  $x_{11} = x_{17} = x_{210} = x_{32} = x_{36} = x_{43} = x_{45} = x_{58} = x_{64} = x_{69} = 1$ ,其余的  $x_{ij} = 0$ 。因此,最优的匹配结果为  $A_1 \leftrightarrow B_1, B_7, A_2 \leftrightarrow B_{10}, A_3 \leftrightarrow B_2, B_6, A_4 \leftrightarrow B_3, B_5, A_5 \leftrightarrow B_8, A_6 \leftrightarrow B_4, B_9$ ,如图 2 所示。另外,我们也计算了当  $p, \theta_i$  和  $\theta'_j$  取不同值时,由模型(17)得到的最优解不全相同,由此说明,距离参数与风险投资商和投资企业的损失规避系数均会直接影响匹配结果。

与陈希等<sup>[1]</sup>相比,本文方法优点主要体现在:

(1) 考虑了指标评价值为不同类型信息,且相对于不同的指标,语言变量取值于不同粒度的语言标记集,而陈希等<sup>[1]</sup>仅考虑了区间数和语言变量(不同指标的语言评价值取值于同一语言标记集)的情形,所以无法处理类似于上述具有不同类型信息的匹配决策问题。

(2) 构建的匹配模型不仅考虑了风险投资商、投资企业的总体感知价值尽能达到最大,而且考虑了投资中介的收益最大化,模型更加吻合实际,而陈希等<sup>[1]</sup>没有考虑投资中介的收益。

(3) 利用总体感知价值度量风险投资商、投资企业的匹配度,充分考虑了决策者的参照依赖和损失规避的心理行为,而陈希等<sup>[1]</sup>未考虑决策者有限理性特征与复杂心理行为的情况。

4) 提出极大极小方法求解多目标优化模型(15),无需确定目标的权重,而陈希等<sup>[1]</sup>用隶属度线性加权平均方法进行求解时需要给出目标的权重,且当权重不同时会导致不同的匹配结果。陈希等<sup>[1]</sup>

的  $Z_k^{\min}$  需求解 2 个优化模型得到,而本文直接由  $Z_k(X_1^*), Z_k(X_2^*), Z_k(X_3^*)$  比较大小得到,大大减少了计算的难度与工作量。

### 5 结语

本文根据现实风险投资商与投资企业多指标双边匹配问题的特点,提出了具有不同类型信息的匹配决策方法。该方法针对决策者参照依赖和损失规避的心理行为特征,基于前景理论和 TODIM 方法计算投资企业和风险投资商的总体感知价值。所构建的匹配模型考虑了投资中介的收益,更加吻合实际,给出的匹配方法概念清晰,计算简单,具有较强的实用性。本文中对于各指标考虑的是期望水平与实际水平信息形式相同的情形,但在现实问题中,某指标的期望值与实际值也可能采用不同信息形式描述,此时,只需要将不同类型的期望水平与实际水平信息转化为相同类型的形式<sup>[1,15,20]</sup>,则仍可采用本文定义的期望水平与实际水平的距离公式,因而所提出的匹配方法仍然适用。例如,期望水平是区间数  $[a, b]$ ,实际水平是实数  $c$ ,则可将实数  $c$  转化为区间数  $[c, c]$ 。

### 参考文献:

[1] 陈希, 樊治平. 基于公理设计的风险投资商与风险企业双边匹配[J]. 系统工程, 2010, 28(6): 70—75.  
 [2] Gale D, Shapley L. College admissions and the stability of marriage [J]. American Mathematical Monthly, 1962, 69(1): 9—15.  
 [3] Janssen M, Verbraeck A. Comparing the strengths and weaknesses of Internet-based matching mechanisms for the transport market [J]. Transportation Research Part E, 2008, 44(3): 475—490.  
 [4] Sarne D, Kraus S. Managing parallel inquiries in agents' two-sided search [J]. Artificial Intelligence, 2008, 172 (4—5): 541—569.  
 [5] Lin H T. A job placement intervention using fuzzy approach for two-way choice [J]. Expert Systems with

- Applications, 2009, 36(2): 2543–2553.
- [6] Huang Denghui, Chiu H N, Yeh R H, et al. A fuzzy multi-criteria decision making approach for solving a bi-objective personnel assignment problem [J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(1): 1–10.
- [7] 陈希, 樊治平, 李玉花. IT服务供需双边匹配的模糊多目标决策方法[J]. 管理学报, 2011, 8(7): 1097–1011.
- [8] 蒋忠中, 袁媛, 樊治平. 电子中介中具有数量折扣的多属性商品交易匹配问题研究[J]. 中国管理科学, 2010, 18(6): 122–130.
- [9] Sørensen M. How smart is smart money? A two-sided matching model of venture capital [J]. Journal of Finance, 2007, 62(6): 2725–2762.
- [10] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk [J]. Econometrica, 1979, 47(2): 263–291.
- [11] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4): 297–323.
- [12] Schmidt U, Zank H. A simple model of cumulative prospect theory[J]. Journal of Mathematical Economics, 2009, 45(3): 308–319.
- [13] Gomes L F A M, Lima M M P P. TODIM: Basic and application to multi-criteria ranking of projects with environmental impacts [J]. Foundations of Computing and Decision Sciences, 1992, 16(4): 113–127.
- [14] Gomes L F A M, Rangel L A D. An application of the TODIM method to the multicriteria rental evaluation of residential properties[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 193(1): 204–211.
- [15] Li Dengfeng, Huang Zhigong, Chen Guohong. A systematic approach to heterogeneous multiattribute group decision making[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 59(4): 561–572.
- [16] 徐泽水, 达庆利. 区间数排序的可能度法及其应用[J]. 系统工程学报, 2003, 18(1): 67–70.
- [17] 徐泽水. 对方案有偏好的三角模糊数型多属性决策方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(8): 9–13.
- [18] Hong D H, Choi C H. Multi-criteria fuzzy decision-making problems based on vague set theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 114: 103–113.
- [19] Wan S P, Li D F. Fuzzy LINMAP approach to heterogeneous MADM considering the comparisons of alternatives with hesitation degrees[J]. Omega, 2013, 41(6): 925–940.
- [20] 李登峰. 模糊多目标多人决策与对策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

## Decision Making Method for Multi-attribute Two-Sided Matching Problem between Venture Capitalists and Investment Enterprises with Different Kinds of Information

WAN Shu-ping<sup>1</sup>, LI Deng-feng<sup>2</sup>

(1. College of Information Technology, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China;  
2. School of Management, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** According to the character of two-sided matching problem between venture capitalists and investment enterprises in real-life, the two-sided matching model between venture capitalists and investment enterprises with multiple attributes and different kinds of information is constructed and a corresponding decision method is proposed. Due to the uncertainty of market environment and complexity of objective things, real numbers, intervals, triangular fuzzy numbers, linguistic variables and intuitionistic fuzzy numbers are used to represent the evaluation information. Taking the expectation levels as the reference points, the gain or loss relative to the reference points for each attribute value is computed according to prospect theory. Considering the loss aversion trait of the decision maker's psychological behavior, the comprehensively perceived values of venture capitalists and investment enterprises are calculated by using TODIM (an acronym in Portuguese of Interactive and Multicriteria Decision Making) method. The multi-objective optimization model which maximizes the comprehensively perceived values of venture capitalists and investment enterprises and the income of investment intermediary is established. The maxmin method is proposed to solve this model and then the matching results can be obtained. The example analysis shows the effectiveness and reasonability of the method.

**Key words:** two-sided matching; psychological behavior; prospect theory; TODIM method; multi-objective decision making