

# 带有区间信息的软件质量评价模型

岳川 彭小红

(广东海洋大学数学与计算机学院 广东 湛江 524088)

**摘要** 针对传统评价方法存在的缺陷,提出了一种新的软件质量评价模型。首先,针对已有投影模型存在的缺陷,给出了一个新的标准化的投影模型。在群决策环境下,使用区间数作为决策信息,借助所建的投影模型和 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)技术,建立了一种软件质量的评价模型,并给出了详细的评价程序。评价模型包括评价矩阵、加权评价矩阵、正负理想决策、加权评价矩阵到理想决策的投影测度以及它们的相关系数,评价信息来源于问卷调查。通过一个实例和实验分析,验证了该方法的可行性和有效性。实验结果表明,该评价模型具有较强的实用性、较好的鲁棒性和容易操作的特性。

**关键词** 软件质量,评价方法,区间数,标准化投影,群决策,TOPSIS 技术

**中图分类号** TP311.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/jsjcx.180801554

## Evaluation Model of Software Quality with Interval Data

YUE Chuan PENG Xiao-hong

(College of Mathematics and Computer Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China)

**Abstract** For the defects of traditional evaluation methods, a new evaluation model of software quality was developed in this paper. First, aimed at the existing problems of present projection measures, a new normalized projection measure is provided in this research. Second, an evaluation model of software quality with interval data is established, which is based on the new projection model and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) technique. Then an assessment procedure is elaborated in a group decision-making setting. The evaluation matrices, weighted evaluation matrices, positive and negative ideal decisions and relative closeness are involved in this model. The evaluation information is based on a questionnaire survey. Finally, the effectiveness and feasibility of the developed method are illustrated by a practical example and an experimental analysis. The experimental results show that the evaluation model has the advantages in robustness and practicability.

**Keywords** Software quality, Evaluation method, Interval data, Normalized projection, Group decision-making, TOPSIS technique

## 1 引言

随着计算机技术和软件产业的发展,软件质量评价已经成为软件工程领域的热点课题。软件质量的评价模型是评价的一个重要平台,它支撑着人们对软件质量的认知和理解。好的模型能对软件质量进行准确、科学的评价;差的模型可能会误导软件的研发和管理,甚至误导用户。目前,如何对软件质量进行科学的评价,已经成为一项重要的研究课题,并引起了许多专家和学者的重视。

国内,胡文生等<sup>[1]</sup>提出了一种基于 C&K 度量方法和灰色关联分析的类设计质量评估方法。针对用户需求,岳川<sup>[2-3]</sup>给出了一种基于符号信息的软件质量评价模型。刘启林等<sup>[4]</sup>通过分析混源软件质量的特性,提出了混源软件

质量的评价模型。

国外,文献[5]研究了软件开发者的协作活动对软件质量的影响。文献[6]介绍了异步变更模式对软件设计和编码的影响。文献[7]列出了影响软件质量的因素,并介绍了基于这些因素的评价方法和结果。文献[8]建立了一种软件产品的生命周期评价模型。文献[9]介绍了一种基于用户的软件质量评价模型。针对软件复用技术的相关研究工作,文献[10]进行了综述。文献[11]提出了一种带有区间信息的软件质量评价方法。文献[12]提出了基于顾客知识管理的软件质量评价模型。文献[13]介绍了一种用于大型关键任务系统工程的软件质量评价方法。基于多指标决策和层次分析法,文献[14]提出了一种软件质量的评价模型。文献[15]对软件质量测评研究进行了综述。

收稿日期:2018-08-23 返修日期:2019-01-06 本文受广东省教育厅青年创新人才项目(自然)(2016KQNCX064),广东海洋大学创新强校工程项目(GDOU2017052802),广东海洋大学 2017 年创新强校工程省财政资金支持项目(GDOU2017052605)资助。

岳川(1988—),男,硕士,讲师,主要研究方向为软件工程/项目决策与评价;彭小红(1968—),女,硕士,教授,主要研究方向为智能计算与应用,E-mail:lgdpxh@126.com(通信作者)。

上述研究极大地丰富和完善了软件质量的评价和管理,但还存在以下问题需要进一步探讨。

1) 现有的大部分文献侧重于软件的早期质量管理。比如,国际标准化组织自1991年以来,制定了许多软件质量的测量标准<sup>[16]</sup>。事实上,软件在使用之前,许多质量的特征是很难测试的<sup>[17-18]</sup>,如可维护性(maintainability)、可靠性(reliability)和可重用性(reusability)等。

2) 现有的许多模型尽管可以定量地测度软件的质量,但是仍缺乏对用户需求的关注<sup>[9]</sup>,并且也缺乏简单、实用、易操作的评价方法。

3) 现有的模型比较侧重于研究评价对象对指标的关联关系,而软件间的优选排序方法较为少见。

基于上述问题,本文产生了以下研究动机:

1) 针对现有投影测度存在的缺陷,给出一个新的投影模型。

2) 针对评价软件间的优选排序,提出一种新的群决策<sup>[19]</sup>方法。这种方法将用新的投影测度<sup>[20]</sup>来替代常用的距离测度,以此推广TOPSIS技术<sup>[21]</sup>,进而提出一种新的软件质量的评价方法。针对用户(这里指专家或决策者)在对软件质量量化时遇到的困难,新的方法拟将区间数作为得分信息。

研究动机1的实现将弥补现有投影测度的缺陷。研究动机2的实现在理论和应用两个方面都具有实际意义:在基础理论方面,期待进一步推进决策科学的发展;在实际应用方面,期待为软件用户、专家、学者提供更加方便、科学的软件质量评价技术和方法。

## 2 模型和方法

首先,给出群决策中的一些常用术语和记法。

1) 方案,即评价对象。所有方案构成的集合为  $A = \{A_i | i \in M\}$ ,  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 。

2) 指标,即评价属性。所有指标构成的集合为  $U = \{u_j | j \in N\}$ ,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。

3) 指标权重。所有指标权重构成的集合为  $w = \{w_j | j \in N\}$ , 满足  $0 \leq w_j \leq 1$ ,  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。

4) 专家,即决策者。所有专家构成的集合为  $D = \{d_k | k \in T\}$ ,  $T = \{1, 2, \dots, t\}$ 。

本文所提到的区间是非负的区间,专家的打分将采用这种形式。文献[22-23]将一个非负的区间记为  $\alpha = [a', a''] = \{x | 0 \leq a' \leq x \leq a''\}$ , 其中  $x$  为实数。区间是一个最简单的模糊数,使用方便,也便于计算。

投影是一个综合性的测度,它既能反映两个评价对象间的距离,又能反映它们之间的夹角<sup>[23-24]</sup>。为方便阅读,先介绍两个区间向量的投影。假设  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  和  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$  是2个区间向量,  $\alpha_j = [a'_j, a''_j]$ ,  $\beta_j = [\beta'_j, \beta''_j]$  ( $j \in N$ )。文献[24-25]给出了  $\alpha$  到  $\beta$  上的投影:

$$Proj_{\beta}(\alpha) = \frac{\alpha\beta}{|\beta|} \quad (1)$$

其中,  $\alpha\beta = \sum_{j=1}^n (a'_j\beta'_j + a''_j\beta''_j)$ ,  $|\beta| = \sqrt{\sum_{j=1}^n ((\beta'_j)^2 + (\beta''_j)^2)}$ 。

已有的研究结果认为:一般情况下,  $Proj_{\beta}(\alpha)$  越大,  $\alpha$  与  $\beta$

就越接近。然而,本研究发现了如下的反例:考虑  $\alpha = ([0, 4], [0, 5])$  和  $\beta = ([0, 3], [0, 4])$  是两个二维区间向量。显然,  $\alpha \neq \beta$ 。相比  $\alpha$  与  $\beta$  两者之间的接近程度,  $\beta$  应该更接近(此处实际是相等的)于自身。然而,  $\alpha\beta = 12 + 20 = 32$ ,  $|\beta| = \sqrt{25} = 5$ , 故有  $Proj_{\beta}(\alpha) = 32/5$ , 且  $Proj_{\beta}(\beta) = 25/5 = 5$ 。显然, 有  $Proj_{\beta}(\alpha) > Proj_{\beta}(\beta)$ 。也就是说, 从式(1)又推出  $\alpha$  与  $\beta$  的接近程度高于  $\beta$  接近自身的程度, 这是一个矛盾。

式(1)除了存在上述的漏洞外, 还有一个缺点, 即不满足标准化(即其值介于  $[0, 1]$ )的要求。其值可能非常大, 也可能非常小。在使用式(1)来判断两个向量的接近程度时, 将很难把握其精度。为此, 文献[20]给出了如下的公式:

$$N Proj_{\beta}(\alpha) = \frac{R Proj_{\beta}(\alpha)}{R Proj_{\beta}(\alpha) + |1 - R Proj_{\beta}(\alpha)|} \quad (2)$$

其中,  $R Proj_{\beta}(\alpha) = \alpha\beta / |\beta|^2$ 。

如果  $\alpha$  和  $\beta$  是非负向量, 则式(2)满足  $0 \leq N Proj_{\beta}(\alpha) \leq 1$ , 且  $N Proj_{\beta}(\alpha)$  越接近于1,  $\alpha$  就越接近于  $\beta$ 。然而, 式(2)需要改进的动机来自于如下的一个反例: 令  $\alpha = ([0, 1], [0, 2])$  和  $\beta = ([0, 1], [0, 0])$  是两个二维区间向量。显然,  $\alpha \neq \beta$ , 且  $\alpha\beta = |\beta|^2 = 1$ 。依据式(2)有:  $N Proj_{\beta}(\alpha) = N Proj_{\beta}(\beta) = 1$ 。由此判断:  $\alpha$  接近于  $\beta$  的程度等于  $\beta$  接近于自身的程度, 这又是一个矛盾。

为了解决这个问题, 本文提出如下的标准化投影公式:

$$N Proj_{\beta}(\alpha) = \frac{\min\{\frac{\alpha\beta}{|\alpha|^2}, \frac{\alpha\beta}{|\beta|^2}\}}{\max\{\frac{\alpha\beta}{|\alpha|^2}, \frac{\alpha\beta}{|\beta|^2}\}} \quad (3)$$

重新考查上面的例子, 由于  $\alpha = ([0, 1], [0, 2])$  和  $\beta = ([0, 1], [0, 0])$ , 且  $\alpha\beta = |\beta|^2 = 1$ ,  $|\alpha|^2 = 5$ ,  $\min\{\alpha\beta/|\alpha|^2, \alpha\beta/|\beta|^2\} = \min\{1/5, 1/1\} = 1/5$ ,  $\max\{\alpha\beta/|\alpha|^2, \alpha\beta/|\beta|^2\} = \max\{1/5, 1\} = 1$ , 因此由式(3)得到  $N Proj_{\beta}(\alpha) = 1/5$ 。为了计算  $N Proj_{\beta}(\beta)$ , 只要注意  $\min\{\beta\beta/|\beta|^2, \beta\beta/|\beta|^2\} = \min\{1, 1\} = 1$  和  $\max\{\beta\beta/|\beta|^2, \beta\beta/|\beta|^2\} = \max\{1, 1\} = 1$ , 就能看出  $N Proj_{\beta}(\beta) = 1$ 。因此, 式(3)比式(2)更加完善。

假设  $X = (x_{kj})_{t \times n}$  和  $Y = (y_{kj})_{t \times n}$  是两个评价矩阵, 其中  $x_{kj} = [x'_{kj}, x''_{kj}]$ ,  $y_{kj} = [y'_{kj}, y''_{kj}]$  ( $k \in T, j \in N$ ), 借助于式(3),  $X$  到  $Y$  上的标准化投影为:

$$N Proj_Y(X) = \frac{\min\{\frac{XY}{|X|^2}, \frac{XY}{|Y|^2}\}}{\max\{\frac{XY}{|X|^2}, \frac{XY}{|Y|^2}\}} \quad (4)$$

其中,  $XY = \sum_{k=1}^t \sum_{j=1}^n (x'_{kj}y'_{kj} + x''_{kj}y''_{kj})$ ,  $|X|^2 = \sum_{k=1}^t \sum_{j=1}^n ((x'_{kj})^2 + (x''_{kj})^2)$ ,  $|Y|^2 = \sum_{k=1}^t \sum_{j=1}^n ((y'_{kj})^2 + (y''_{kj})^2)$ 。

在本文中, 评价的方案为被评价的软件(质量), 评价的专家为每个被调查的人员, 他们同时为软件的使用者。假设方案  $A_i$  的评价矩阵为:

$$X_i = (x_{kj}^i)_{t \times n}, i \in M \quad (5)$$

其中,  $x_{kj}^i = [x'_{kj}^i, x''_{kj}^i]$  ( $i \in M, k \in T, j \in N$ )。

对于给定的指标权重  $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , 式(5)的加权评价矩阵为:

$$Y_i = (y_{kj}^i)_{t \times n}, i \in M \quad (6)$$

其中,  $y_{kj}^i = [\omega_j x_{kj}^i, \omega_j x_{kj}^{ii}] (i \in M, k \in T, j \in N)$ 。

假设评价指标  $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  的类型仅有效益型(越大越好)和成本型(越小越好), 则正理想决策矩阵<sup>[24]</sup>为:

$$\mathbf{Y}_+ = (y_{kj}^+)_{i \times n} \quad (7)$$

其中,  $y_{kj}^+ = [y_{kj}^{+l}, y_{kj}^{+u}] (k \in T, j \in N)$ 。若  $u_j$  是效益型, 则  $y_{kj}^{+l} = \max_{i \in M} \{y_{kj}^i\}$ ,  $y_{kj}^{+u} = \max_{i \in M} \{y_{kj}^{ii}\}$ ; 若  $u_j$  是成本型, 则  $y_{kj}^{+l} = \min_{i \in M} \{y_{kj}^i\}$ ,  $y_{kj}^{+u} = \min_{i \in M} \{y_{kj}^{ii}\}$ 。

类似地, 负理想决策矩阵<sup>[24]</sup>为:

$$\mathbf{Y}_- = (y_{kj}^-)_{i \times n} \quad (8)$$

其中,  $y_{kj}^- = [y_{kj}^{-l}, y_{kj}^{-u}] (k \in T, j \in N)$ 。若  $u_j$  是效益型, 则  $y_{kj}^{-l} = \min_{i \in M} \{y_{kj}^i\}$ ,  $y_{kj}^{-u} = \min_{i \in M} \{y_{kj}^{ii}\}$ ; 若  $u_j$  是成本型, 则  $y_{kj}^{-l} = \max_{i \in M} \{y_{kj}^i\}$ ,  $y_{kj}^{-u} = \max_{i \in M} \{y_{kj}^{ii}\}$ 。

依据 TOPSIS 技术, 需要计算加权评价矩阵与理想决策之间的偏差。这里的偏差采用标准的投影测度(见式(4))。加权评价矩阵  $\mathbf{Y}_i$  在正理想决策矩阵  $\mathbf{Y}_+$  上的投影为:

$$N Proj_{\mathbf{Y}_+}(\mathbf{Y}_i) = \frac{\min\{\frac{\mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_+}{|\mathbf{Y}_i|^2}, \frac{\mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_+}{|\mathbf{Y}_+|^2}\}}{\max\{\frac{\mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_+}{|\mathbf{Y}_i|^2}, \frac{\mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_+}{|\mathbf{Y}_+|^2}\}} \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_+ = \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^n (y_{kj}^i y_{kj}^{+l} + y_{kj}^{ii} y_{kj}^{+u})$ ,  $|\mathbf{Y}_i|^2 = \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^n ((y_{kj}^i)^2 + (y_{kj}^{ii})^2)$ ,  $|\mathbf{Y}_+|^2 = \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^n ((y_{kj}^{+l})^2 + (y_{kj}^{+u})^2)$ 。

类似地, 加权评价矩阵  $\mathbf{Y}_i$  在负理想决策矩阵  $\mathbf{Y}_-$  上的投影为:

$$N Proj_{\mathbf{Y}_-}(\mathbf{Y}_i) = \frac{\min\{\frac{\mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_-}{|\mathbf{Y}_i|^2}, \frac{\mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_-}{|\mathbf{Y}_-|^2}\}}{\max\{\frac{\mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_-}{|\mathbf{Y}_i|^2}, \frac{\mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_-}{|\mathbf{Y}_-|^2}\}} \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{Y}_i \mathbf{Y}_- = \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^n (y_{kj}^i y_{kj}^{-l} + y_{kj}^{ii} y_{kj}^{-u})$ ,  $|\mathbf{Y}_i|^2 = \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^n ((y_{kj}^i)^2 + (y_{kj}^{ii})^2)$ ,  $|\mathbf{Y}_-|^2 = \sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^n ((y_{kj}^{-l})^2 + (y_{kj}^{-u})^2)$ 。

在 TOPSIS 技术中, 其相关系数展示了模型的精华, 具体体现为正、负理想决策的一种合理折中。一个基于标准化投影的综合相关系数<sup>[24]</sup>定义为:

$$NRC_i = \frac{N Proj_{\mathbf{Y}_+}(\mathbf{Y}_i)}{N Proj_{\mathbf{Y}_+}(\mathbf{Y}_i) + N Proj_{\mathbf{Y}_-}(\mathbf{Y}_i)} \quad (11)$$

且  $NRC_i$  越大, 方案  $A_i$  就越好。

### 3 评价程序

为了便于实际的操作, 结合上文建立的评价模型, 给出以下的评价程序。

步骤 1 建立评价矩阵。根据式(5)建立方案  $A_i$  的评价矩阵  $\mathbf{X}_i$ 。

步骤 2 建立加权评价矩阵。对于决策者给定的指标权重  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ , 根据式(6)建立方案  $A_i$  的加权评价矩阵  $\mathbf{Y}_i$ 。

步骤 3 确定理想决策。对于加权评价矩阵  $\mathbf{Y}_i$ , 根据式(7)和式(8)分别建立正、负理想决策。

步骤 4 计算标准化的投影。对于方案的正、负理想决策, 根据式(9)和式(10)分别计算加权评价矩阵  $\mathbf{Y}_i$  在正、负理想决策上的标准化的投影。

步骤 5 计算相关系数。基于加权评价矩阵在正、负理

想决策上的标准化投影, 根据式(11)计算其相关系数。

步骤 6 方案排序。基于相关系数给出方案的序关系。排序的准则为: 相关系数  $NRC_i$  越大, 对应的方案  $A_i$  就越优。

### 4 实例

本节针对广泛使用于广东某高校的 4 个软件, 给出其软件质量的详细评价过程。为表述方便, 记这 4 个软件的集合为  $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\} = \{\text{软件 1, 软件 2, 软件 3, 软件 4}\}$ 。首先, 对这 4 个软件的质量进行问卷调查。将专家集合记为  $D = \{d_1, d_2, d_3\}$ , 其中  $d_1, d_2, d_3$  为该高校的 3 个学院的被测评者, 他们同时是软件的使用者。依据测评人员的关注, 本文的测试指标为  $U = \{u_1, u_2, u_3\} = \{\text{可维护性, 可靠性, 可重用性}\}$ 。

依据问卷调查统计的结果和步骤 1, 我们得到 4 个软件质量的评价矩阵  $\mathbf{X}_i = (x_{kj}^i)_{3 \times 3} (i = 1, 2, 3, 4)$ ,  $x_{kj}^i = [x_{kj}^{il}, x_{kj}^{iu}]$ , 其中,  $x_{kj}^{il}$  是第  $k$  个学院的使用者给出的第  $i$  个软件  $A_i$  关于第  $j$  个指标  $u_j$  的最低得分,  $x_{kj}^{iu}$  是第  $k$  个学院的使用者给出的第  $i$  个软件  $A_i$  关于第  $j$  个指标  $u_j$  的最高得分, 且得分均采用百分制。4 个参评软件的评价矩阵如表 1 所列。

表 1 软件的评价矩阵

Table 1 Evaluation matrices of software

评价矩阵	专家	$u_1$	$u_2$	$u_3$
$\mathbf{X}_1$	$d_1$	[76.0, 86.0]	[80.0, 97.0]	[65.0, 93.0]
	$d_2$	[75.0, 89.0]	[81.0, 93.0]	[69.0, 81.0]
	$d_3$	[84.0, 89.0]	[78.0, 82.0]	[80.0, 91.0]
$\mathbf{X}_2$	$d_1$	[68.0, 86.0]	[82.0, 90.0]	[86.0, 92.0]
	$d_2$	[76.0, 86.0]	[65.0, 87.0]	[77.0, 86.0]
	$d_3$	[72.0, 92.0]	[81.0, 97.0]	[76.0, 91.0]
$\mathbf{X}_3$	$d_1$	[72.0, 86.0]	[85.0, 92.0]	[71.0, 89.0]
	$d_2$	[69.0, 93.0]	[83.0, 88.0]	[80.0, 98.0]
	$d_3$	[59.0, 87.0]	[68.0, 85.0]	[67.0, 90.0]
$\mathbf{X}_4$	$d_1$	[60.0, 90.0]	[77.0, 81.0]	[80.0, 96.0]
	$d_2$	[77.0, 83.0]	[93.0, 98.0]	[79.0, 85.0]
	$d_3$	[85.0, 86.0]	[79.0, 88.0]	[62.0, 83.0]

由参评人员商议, 确定出 3 个指标的权重, 结果为  $\{\omega_1, \omega_2, \omega_3\} = \{0.3, 0.4, 0.3\}$ 。由步骤 2 可以得到加权评价矩阵  $\mathbf{Y}_i = (y_{kj}^i)_{3 \times 3} (i = 1, 2, 3, 4)$ , 其中,  $y_{kj}^i = [y_{kj}^{il}, y_{kj}^{iu}] = [\omega_j x_{kj}^{il}, \omega_j x_{kj}^{iu}]$ 。4 个加权评价矩阵如表 2 所列。

表 2 软件的加权评价矩阵

Table 2 Weighted evaluation matrices of software

评价矩阵	专家	$u_1$	$u_2$	$u_3$
$\mathbf{Y}_1$	$d_1$	[22.8, 25.8]	[32.0, 38.8]	[19.5, 27.9]
	$d_2$	[22.5, 26.7]	[32.4, 37.2]	[20.7, 24.3]
	$d_3$	[25.2, 26.7]	[31.2, 32.8]	[24.0, 27.3]
$\mathbf{Y}_2$	$d_1$	[20.4, 25.8]	[32.8, 36.0]	[25.8, 27.6]
	$d_2$	[22.8, 25.8]	[26.0, 34.8]	[23.1, 25.8]
	$d_3$	[21.6, 27.6]	[32.4, 38.8]	[22.8, 27.3]
$\mathbf{Y}_3$	$d_1$	[21.6, 25.8]	[34.0, 36.8]	[21.3, 26.7]
	$d_2$	[20.7, 27.9]	[33.2, 35.2]	[24.0, 29.4]
	$d_3$	[17.7, 26.1]	[27.2, 34.0]	[20.1, 27.0]
$\mathbf{Y}_4$	$d_1$	[18.0, 27.0]	[30.8, 32.4]	[24.0, 28.8]
	$d_2$	[23.1, 24.9]	[37.2, 39.2]	[23.7, 25.5]
	$d_3$	[25.5, 25.8]	[31.6, 35.2]	[18.6, 24.9]

根据步骤 3 确定正负理想决策矩阵  $\mathbf{Y}_+ = (y_{kj}^+)_{3 \times 3}$  和  $\mathbf{Y}_- = (y_{kj}^-)_{3 \times 3}$ 。两个理想决策矩阵如表 3 所列。

表3 理想决策矩阵  
Table 3 Ideal decision matrices

评价矩阵	学院	$u_1$	$u_2$	$u_3$
$Y_+$	$d_1$	[22.8, 27.0]	[34.0, 38.8]	[25.8, 28.8]
	$d_2$	[23.1, 27.9]	[37.2, 39.2]	[24.0, 29.4]
	$d_3$	[25.5, 27.6]	[32.4, 38.8]	[24.0, 27.3]
$Y_-$	$d_1$	[18.0, 25.8]	[30.8, 32.4]	[19.5, 26.7]
	$d_2$	[20.7, 24.9]	[26.0, 34.8]	[20.7, 24.3]
	$d_3$	[17.7, 25.8]	[27.2, 32.8]	[18.6, 24.9]

根据步骤4分别计算加权评价矩阵 $Y_i$ 在正、负理想决策上的标准化投影。基于测评软件的投影,根据步骤5计算其相关系数。然后,依据步骤6对参评软件的质量进行排序。4个参评软件的标准化投影以及它们的序关系如表4所列。

表4 标准化投影、相关系数以及软件质量的排序  
Table 4 Normalized projections, relative closeness and rankings of software qualities

测评软件	$N Proj_{Y_+}(Y_i)$	排序	$N Proj_{Y_-}(Y_i)$	排序	$NRC_i$	排序
$A_1$	0.8715	1	0.8270	1	0.5131	1
$A_2$	0.8677	3	0.8306	3	0.5109	3
$A_3$	0.8445	4	0.8535	4	0.4973	4
$A_4$	0.8714	2	0.8271	2	0.5130	2

由表4可以看出,4个参评软件依据相关系数 $NRC_i$ 的质量序关系为:

$$A_1 > A_1 > A_2 > A_3$$

即,第1个软件的质量排第一,其次是第4软件,然后是第2个软件,最后是第3个软件。

### 5 实验分析

为了验证本文所建模型的优势,本节将标准化的投影模型与经典的投影模型进行对比。为了便于比较,本节仍采用第4节的实验数据。

#### 5.1 一个静态的实验分析

首先分析表4列出的结果。由式(3)可知,式(9)中的标准化投影 $N Proj_{Y_+}(\cdot)$ 也是一个测度,且投影值 $N Proj_{Y_+}(Y_i)$ 越大,对应的方案 $A_i$ 就越好。表4中的第3列列出了依据测度 $N Proj_{Y_+}(\cdot)$ 所导出的软件质量的排序。同理,式(10)中的标准化投影 $N Proj_{Y_-}(\cdot)$ 也是一个测度,且投影值 $N Proj_{Y_-}(Y_i)$ 越小,对应的方案 $A_i$ 就越好。表4中的第5列列出了依据测度 $N Proj_{Y_-}(\cdot)$ 所导出的软件质量的排序。从表4可以看出,3个排序的结果是完全一致的。这一结果从侧面反映了该模型具有一定的鲁棒性。

一般来说,一种新方法的优劣也应体现在与已有方法的对比上。为此,将式(9)替换为传统的投影方法,其测度模型为:

$$Proj_{Y_+}(Y_i) = \frac{Y_i Y_+}{|Y_+|}, i \in M \quad (12)$$

其中, $Y_i Y_+$ 与式(9)中的 $Y_i Y_+$ 相同,并且 $|Y_+| = \sqrt{\sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^n ((y_{kj}^{+l})^2 + (y_{kj}^{+u})^2)}$ 。一般来说,投影值 $Proj_{Y_+}(Y_i)$ 越大,方案 $A_i$ 就越好。

类似地,将式(10)替换为传统的投影方法,其测度模型为:

$$Proj_{Y_-}(Y_i) = \frac{Y_i Y_-}{|Y_-|}, i \in M \quad (13)$$

其中, $Y_i Y_-$ 与式(10)中的 $Y_i Y_-$ 相同,且 $|Y_-| =$

$\sqrt{\sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^n ((y_{kj}^{-l})^2 + (y_{kj}^{-u})^2)}$ 。一般来说,投影值 $Proj_{Y_-}(Y_i)$ 越小,方案 $A_i$ 就越好。

进一步地将式(11)替换为传统的投影方法,其测度模型为:

$$RC_i = \frac{Proj_{Y_+}(Y_i)}{Proj_{Y_+}(Y_i) + Proj_{Y_-}(Y_i)}, i \in M \quad (14)$$

且一般来说,相关系数 $RC_i$ 越大,方案 $A_i$ 就越好。

依据式(12)一式(14),表5列出4个参评软件的投影以及它们的序关系。

表5 软件的投影以及质量的排序  
Table 5 Projections, relative closeness and rankings of software qualities based on classical projection

测评软件	$Proj_{Y_+}(Y_i)$	排序	$Proj_{Y_-}(Y_i)$	排序	$RC_i$	排序
$A_1$	119.127	1	126.700	2	0.485	2
$A_2$	118.698	3	127.518	4	0.482	3
$A_3$	117.210	4	126.825	3	0.480	4
$A_4$	119.108	2	124.708	1	0.489	1

由表5可得出如下结论:1)依据 $RC_i$ 的排序为 $A_4 > A_1 > A_2 > A_3$ ,这个序关系与基于标准化投影的序关系 $A_1 > A_4 > A_2 > A_3$ (见表4)是不一致的;2)依据相关系数 $RC_i$ 的排序与依据 $Proj_{Y_+}(Y_i)$ 的排序亦不一致;3)相关系数 $RC_i$ 的排序与依据 $Proj_{Y_-}(Y_i)$ 的排序亦不一致;4)两组投影值 $Proj_{Y_+}(Y_i)$ 和 $Proj_{Y_-}(Y_i)$ 均大于1。

表5中的3个测度得出了3种不同的序关系。从模型的鲁棒性来看,它暴露了经典投影的劣势,也凸显了本文所建模型的优势。表5中的两组投影值 $Proj_{Y_+}(Y_i)$ 和 $Proj_{Y_-}(Y_i)$ 均较大。从标准化上来看,这就给界定软件产品质量增加了困难,也从另外的侧面凸显了标准化投影在 $[0,1]$ 之间的优势。

#### 5.2 一个动态的实验分析

上述实验均是基于实例中的一组样本数据。这样的实验可认为是一种静态的实验,它局限于一组数据。为解决这个问题,下文的动态实验能为所建的模型提供一种较为全局的对比和认识。

考虑表1中评价矩阵 $X_1$ 的元素 $x_{12}^1$ ,注意到 $x_{12}^1 = [x_{12}^{1l}, x_{12}^{1u}]$ ,让左端点 $x_{12}^{1l} (=80)$ 变为一个参数 $\delta$ ,考虑到 $x_{12}^{1u} = 97$ ,使 $\delta \in [0, 97]$ ,并且保持表1中 $X_i = (x_{ij}^i)_{3 \times 3} (i=1, 2, 3, 4)$ 的其他数据不变。令 $\delta$ 从0增加到97。这样,基于式(11)的4种方案 $A_1, A_2, A_3, A_4$ 的相关系数就形成了4条曲线,这4条曲线的上下关系反映了方案 $A_1, A_2, A_3, A_4$ 的优劣关系,其动态变化如图1所示。

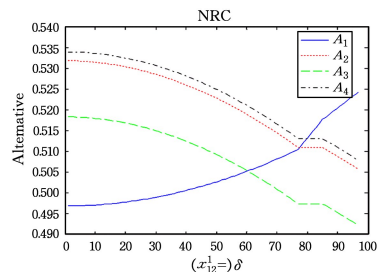


图1 基于式(11)的4种软件 $A_1, A_2, A_3, A_4$ 的动态变化  
Fig. 1 Dynamic changes of software  $A_1, A_2, A_3, A_4$  based on Eq. (11)

从图1可以看出,由于参数 $\delta$ 位于 $A_1$ 的决策矩阵 $X_1$ 中,

因此随着参数  $\delta$  的增加,方案  $A_1$  一直处于上升状态是正常的。除  $A_1$  外的其他 3 种方案的序关系是稳定的,且这个序关系与表 4 中的序关系是一致的,反映出了该模型有较好的鲁棒性。

为便于与基于标准化的相关系数的动态变化进行比较,图 2 给出了基于经典投影的相关系数(见式(14))的动态变化。

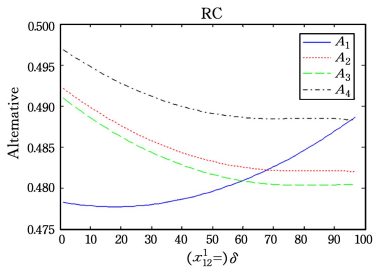


图 2 基于式(14)的 4 种软件  $A_1, A_2, A_3, A_4$  的动态变化  
Fig. 2 Dynamic changes of software  $A_1, A_2, A_3, A_4$  based on Eq. (14)

类似于图 1,从图 2 中可以看出,随着参数  $\delta$  的增加,除  $A_1$  以外的 3 种方案的序关系也是稳定的,且这个序关系与图 1 中的序关系也是一致的,从而说明基于经典投影的相关系数在这一变化过程中是支持基于标准化投影的相关系数的。

5.1 节已说明式(9)中的标准化投影  $NProgy_+(\cdot)$  也是一个测度。图 3 给出了基于式(9)的 4 种方案  $A_1, A_2, A_3, A_4$  的动态变化。

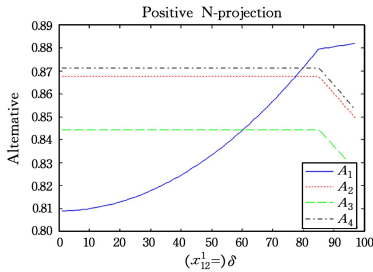


图 3 基于式(9)的 4 种软件  $A_1, A_2, A_3, A_4$  的动态变化  
Fig. 3 Dynamic changes of software  $A_1, A_2, A_3, A_4$  based on Eq. (9)

从图 3 中可以看出,随着参数  $\delta$  的增加, $A_1$  以外的 3 种方案的序关系也是稳定的,且这个序关系与图 1 中的序关系也是一致的,说明标准化投影  $NProgy_+(\cdot)$  是支持基于标准化投影的相关系数的。

为便于对比,图 4 给出了基于经典投影的式(12)的动态变化。

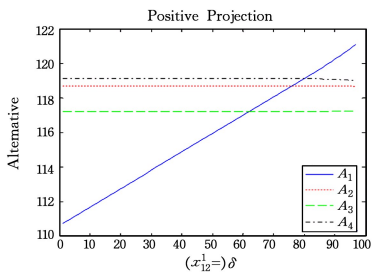


图 4 基于式(12)的 4 种软件  $A_1, A_2, A_3, A_4$  的动态变化  
Fig. 4 Dynamic changes of software  $A_1, A_2, A_3, A_4$  based on Eq. (12)

从图 4 能看出,4 种方案在正理想决策  $Y_+$  上的投影均介于 110 到 122 之间,这给界定软件质量带来了困难。比如,直觉上, $A_1$  和  $A_2$  之间的区分较小, $A_2$  和  $A_3$  之间的区分较大。与基于标准化投影的图 3 相比,很难判断图 4 中的“区分小,小多少?”“区分大,大多少?”。

类似于式(9),式(10)中的  $NProgy_-(\cdot)$  也是一个测度。为便于观察,现将它修改为:

$$NNP_{Y_-}(Y_i) = 1 - NProgy_-(Y_i) \quad (15)$$

这里,显然有:修正值  $NNP_{Y_-}(Y_i)$  越大,方案  $A_i$  就越优。图 5 给出了基于式(15)的 4 种方案  $A_1, A_2, A_3, A_4$  的动态变化。

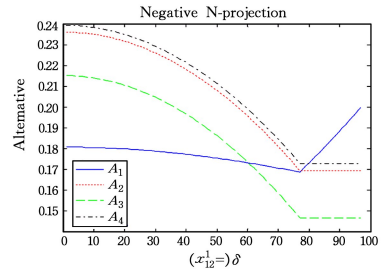


图 5 基于式(15)的 4 种软件  $A_1, A_2, A_3, A_4$  的动态变化  
Fig. 5 Dynamic changes of software  $A_1, A_2, A_3, A_4$  based on Eq. (15)

从图 5 中能看出,随着参数  $\delta$  的增加, $A_1$  以外的其他 3 种方案的序关系也是稳定的,且这个序关系与图 1 中的序关系也是一致的。这反映出了该模型总体上有较好的鲁棒性。

最后,类似于式(15),将基于经典投影的式(13)转化为:

$$NP_{Y_-}(Y_i) = 128 - Progy_-(Y_i) \quad (16)$$

其中,128 是  $Progy_-(Y_i)$  的一个上界。一般来说,较大的  $NP_{Y_-}(Y_i)$  意味着较好的方案  $A_i$ 。图 6 给出了基于式(16)的 4 种方案  $A_1, A_2, A_3, A_4$  的动态变化。

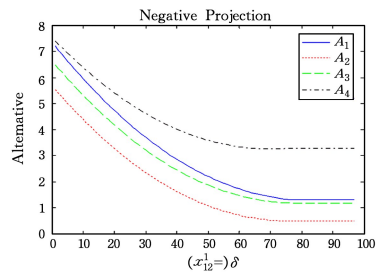


图 6 基于式(16)的 4 种软件  $A_1, A_2, A_3, A_4$  的动态变化  
Fig. 6 Dynamic changes of software  $A_1, A_2, A_3, A_4$  based on Eq. (16)

从图 6 中能看出,随着参数  $\delta$  的增加,4 种方案的序关系是稳定的。但是,这个序关系与表 4 中的序关系不一致,也与图 2 中的序关系不一致。这就进一步说明了经典投影的劣势,从而凸显了本文所建标准化投影的优势。

总之,与现有软件质量评价模型相比,本文所建的标准化投影模型具有较好的鲁棒性。

**结束语** 基于一种新建的投影测度,以不确定决策信息作为信息载体,在群决策环境下,本文给出了软件质量的一种评价方法。此方法的主要优势如下:

- 1)决策信息人性化。本文采用区间作为得分的信息载体,

与精确值形式的记分方式相比,专家打分更方便,更人性化。

2)测度工具综合性强。本文采用标准化的投影测度来度量决策矩阵与理想决策之间的偏离。这种测度既能反映两个对象间的距离,又能反映两个对象间的夹角。因此,本方法所用的测度更加综合。

3)模型技术综合性强。在群决策环境下,采用标准化的投影来测度评价矩阵与正、负理想决策之间的偏差,并将这些偏差融合在TOPSIS技术中。这里的正、负理想决策是所有评价矩阵的2种极端情况,TOPSIS技术中的相关系数对此进行了折中和综合。

本文的评价信息是以百分制给出的实数,这是一个限制。未来计划将决策科学<sup>[25]</sup>的信息推广到区间直觉模糊数、语言和含混信息等,以大大方便决策者的评价过程。

## 参 考 文 献

- [1] HU W S, YANG J F, ZHAO M. Methodology for classes design quality assessment[J]. *Computer Science*, 2017, 44(12): 150-155. (in Chinese)  
胡文生, 杨剑锋, 赵明. 类设计质量评估方法的研究[J]. *计算机科学*, 2017, 44(12): 150-155.
- [2] YUE C. A model for evaluating software quality based on symbol information[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2016, 36(1): 85-92. (in Chinese)  
岳川. 基于符号信息的软件质量评价模型[J]. *广东海洋大学学报*, 2016, 36(1): 85-92.
- [3] YUE C. A projection-based estimation approach to software usability[J]. *Computer Engineering & Science*, 2017, 39(6): 1112-1117. (in Chinese)  
岳川. 基于投影的软件易用性评价方法[J]. *计算机工程与科学*, 2017, 39(6): 1112-1117.
- [4] LIU Q L, DONG W, YIN L Z, et al. Research on mixed source software quality model and measurement method. *Computer Science*, 2017, 44(4): 82-84, 95. (in Chinese)  
刘启林, 董威, 尹良泽, 等. 混源软件质量模型与度量方法研究[J]. *计算机科学*, 2017, 44(4): 82-84, 95.
- [5] ÇAGLAYAN B, BENER A B. Effect of developer collaboration activity on software quality in two large scale projects[J]. *Journal of Systems & Software*, 2016, 118: 288-296.
- [6] JAAFAR F, LOZANO A, GUÉHÉNEUC Y G, et al. Analyzing software evolution and quality by extracting Asynchrony Change patterns[J]. *Journal of Systems & Software*, 2017, 131: 311-322.
- [7] BANDYOPADHYAY S, BHATTACHARYA S, SENSARMA R. An analysis of the factors determining crime in England and Wales: A quantile regression approach[J]. *Discussion Papers*, 2011, 35(2): 235-242.
- [8] ENRÍQUEZ J G, SÁNCHEZ-BEGINES J M, DOMÍNGUEZ-MAYO F J, et al. An approach to characterize and evaluate the quality of Product Lifecycle Management Software Systems[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2019, 61: 77-88.
- [9] YUE C. A projection-based approach to software quality evaluation from the users' perspectives[J]. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2018. DOI: /10. 1007/ s13042-018-0873-y.
- [10] IRSHAD M, PETERSEN K, POULDING S. A systematic literature review of software requirements reuse approaches[J]. *Information and Software Technology*, 2018, 93: 223-245.
- [11] YUE C. A novel approach to interval comparison and application to software quality evaluation [J]. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 2018, 30(5): 583-602.
- [12] KHOSRAVI A, HUSSIN A R C, NILASHI M, et al. Toward software quality enhancement by customer knowledge management in software companies [J]. *Telematics & Informatics*, 2018, 35(1): 18-37.
- [13] CARROZZA G, PIETRANTUONO R, RUSSO S. A software quality framework for large-scale mission-critical systems engineering [J]. *Information & Software Technology*, 2018, 102: 100-106.
- [14] SIAVVAS M G, CHATZIDIMITRIOU K C, SYMEONIDIS A L. QATCH-An adaptive framework for software product quality assessment[J]. *Expert Systems with Applications*, 2017, 86: 350-366.
- [15] NGUYEN-DUC A, CRUZES D S, CONRADI R. The impact of global dispersion on coordination, team performance and software quality-A systematic literature review[J]. *Information and Software Technology*, 2015, 57(1): 277-294.
- [16] International Organization for Standardization (ISO) and the International Electrotechnical Commission (IEC), *Software and Systems Engineering. ISO/IEC JTC 1/SC 7 [EB/OL]*. [2016-11-25]. <http://www.jtc1.org/directives/toc.htm>.
- [17] CONDORI-FERNANDEZ N, LAGO P. Characterizing the contribution of quality requirements to software sustainability[J]. *Journal of Systems & Software*, 2018, 137: 289-305.
- [18] GARCÍA-MIRELES G A, MORAGA M Á, GARCÍA F, et al. Interactions between environmental sustainability goals and software product quality: A mapping study[J]. *Information & Software Technology*, 2018, 95: 108-129.
- [19] YUE C. A geometric approach for ranking interval-valued intuitionistic fuzzy numbers with an application to group decision-making[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 102: 233-245.
- [20] YUE Z L, JIA Y Y. A direct projection-based group decision-making methodology with crisp values and interval data [J]. *Soft Computing*, 2017, 21(9): 2395-2405.
- [21] LU L L, YUAN Y Y. A novel TOPSIS evaluation scheme for cloud service trustworthiness combining objective and subjective aspects[J]. *Journal of Systems and Software*, 2018, 143: 71-86.
- [22] WU Y N, XU H, XU C B et al. Uncertain multi-attributes decision making method based on interval number with probability distribution weighted operators and stochastic dominance degree [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 113: 199-209.
- [23] YUE C. Two normalized projection models and application to group decision-making [J]. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2017, 32(6): 4389-4402.
- [24] YUE C. Normalized projection approach to group decision-making with hybrid decision information [J]. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2018, 9(8): 1365-1375.
- [25] YUE C. Entropy-based weights on decision makers in group decision-making setting with hybrid preference representations [J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 60: 737-749.