

基于 FAHP 和 FMCDM 构建软件可信性 评估模型*

石莉, 余本功, 杨颖, 付磊

(合肥工业大学 计算机网络系统研究所, 合肥 230009)

摘要: 结合软件可信性评估的特点及模糊理论的最新进展, 提出一种基于模糊层次分析法和模糊多指标决策理论的评估模型。首先针对软件可信性没有一致定义的现状, 提出了相对可信性的概念; 接着基于模糊数理论, 用三角模糊数表示专家评估中语言变量的主观性和模糊性, 结合专家给出的模糊指标权重及待评软件可信等级的模糊评价, 得到软件可信性的集成模糊评价; 最后, 将该模型应用到国内某汽车制造企业整车产品开发项目管理软件评估中, 实例说明软件可信性评估的具体过程, 结果验证了该模型的实效性。

关键词: 可信软件; 软件可信性评估模型; 模糊层次分析法; 模糊多指标决策

中图分类号: TP31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)03-0933-05

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.03.034

Establishing evaluation model of software trustworthiness based on FAHP and FMCDM

SHI Li, YU Ben-gong, YANG Ying, FU Lei

(Institute of Computer Network System, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Integrating the characteristic of software trustworthiness evaluation and the latest development of fuzzy theory, this paper proposed a software trustworthiness evaluation model based on FAHP and FMCDM. Firstly, in view of lacking the consistent definition presently, presented a concept of relative trustworthiness. Then, dealt with the subjectivity and fuzziness of linguistic variables by using triangular fuzzy numbers based on fuzzy theory, and obtained the overall evaluation of software trustworthiness by incorporating the fuzzy criteria weightings and fuzzy evaluation of trustworthy ranking for each alternative. Finally, applied the proposed model on the evaluation of the project management software for a car manufacturer in China, which illustrated the assessment process, and the result shows the effectiveness of the evaluation model.

Key words: trustworthy software; software trustworthiness evaluation model; fuzzy analytic hierarchy process (FAHP); fuzzy multiple criteria decision making (FMCDM)

近年来,随着软件系统的急剧复杂化和应用领域的广泛深入,软件可信性问题日益受到全球的普遍关注,其研究意义不仅体现在促进理论界学术发展,更体现了实业界强烈的现实需求。目前,作为可信软件的一个研究分支,软件可信性的评估问题已成为国内外学术机构和软件产业界关注的重要课题^[1-3]。

软件可信性评估涉及指标过多、结构复杂,既包含大量的客观指标也包含很多主观指标,可归属于多指标决策(multi-criteria decision making, MCDM)问题。评估过程中,指标的相对重要性是不同的,如何确定指标权重对于评估的有效性起着关键作用。目前,确定权重的方法很多,其中层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)作为一种常用的多指标决策评估工具已经成功应用于许多领域^[3-5]。但是,这种方法却很少用于软件可信性评估中。此外,软件可信性评估中存在着难题,

具体体现在,专家评估时作出的判断具有很大的主观模糊性,评估中关于软件可信等级的描述没有明确的边界,这些都造成了可信评估中的不确定性及模糊性。因此,本文基于模糊理论特别是模糊层次分析法(FAHP)和模糊多指标决策方法(FMCDM)的最新进展,提出了多人多指标的软件可信性评估模型。其中,评估中的模糊信息用三角模糊数表示,FAHP法用于确定指标权重,FMCDM法用于对软件可信性进行排序。

最后,针对国内某汽车制造企业的整车产品开发项目管理软件,应用该评估模型对四个备选软件的可信性进行评估,结果验证了模型的合理性和实效性。

1 软件的相对可信性

软件可信性的定义是可信性评估的基础。自 20 世纪 70 年代初, Morris^[6]首次提出可信性软件的概念以来,软件的可

收稿日期: 2009-07-28; **修回日期:** 2009-11-10 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(90718037); 国家“863”计划资助项目(2007AA04Z183); 安徽高校省级自然科学研究重点资助项目(KJ2008A061); 国家教育部博士点基金资助项目(200803590007)

作者简介: 石莉(1978-),女,安徽淮北人,博士研究生,主要研究方向为软件工程、可信软件评估(sally_shili@yahoo.com.cn); 余本功(1971-),男,副教授,硕士,主要研究方向为信息管理与信息系统、项目管理; 杨颖(1975-),女,讲师,硕士,主要研究方向为项目与决策; 付磊(1981-),女,博士研究生,主要研究方向为项目管理。

信性问题就一直受到国内外学者的广泛关注。但是目前对于可信的定义并没有严格、一致的定义,因此,本文提出相对可信性的概念,即当无法准确、严格地定义软件可信性时,可以通过计算某几个软件的可信性排序,得到软件的相对可信性,从而为决策者提供评估的理论依据。

2 基于 FAHP 和 FMCDM 的评估模型

2.1 构建指标体系

可信指标体系的建立是可信性评估的关键,具有层次结构的指标体系基于分解的思想,面向对象进行系统分解。它由三类基本层次组成,即目标层、指标层、方案层。目标层处于最上层,通常只有一个元素,该模型的目标是评估软件可信性;中间层是指标层,由若干层元素组成,表示实现目标所涉及的各种指标;最底层是方案层,表示待评估的软件。

2.2 确定指标权重

多指标决策研究中,有很多确定指标权重的方法。其中,AHP 是美国运筹学家 Saaty^[7] 首先提出的一种将定性和定量相结合的多指标综合决策方法。Saaty 教授引入 1~9 标度法,作为判断两元素相对重要程度的依据,通过构造判断矩阵 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ (a_{ij} 为 i 元素比 j 元素的重要性等级),将人的决策判断数量化。作为一种常用的评估方法,AHP 将决策者的经验判断给予量化,把对复杂系统的评价思维过程数量化、系统化。但是,AHP 在利用 1~9 的整数及其倒数作为标度构造判断矩阵时,采用确定的数字表示决策者的主观判断,忽视了主观判断具有模糊性。因此,Buckley^[8] 将模糊理论与 AHP 结合起来,提出了模糊层次分析法 (fuzzy AHP, FAHP),该方法在构造两两比较判断矩阵时,用模糊数代替确定值来表示诸如专家判断等模糊信息,将两两比较值模糊化并得到模糊权重,最后通过非模糊化将模糊判断的不确定性在形式上转换为确定性。

2.2.1 模糊集和三角模糊数

为了解决人类判断的模糊性和不精确性,1965 年美国自动控制论专家 Zadeh^[9] 首次提出模糊集理论,将现实世界中的模糊信息加以量化。经典集合中,元素与集合的关系是属于或者不属于的非此即彼的鲜明关系;而在模糊集合中,元素对某一集合的关系很难明确,除了完全属于与不完全属于某集合以外,还可以部分属于这一集合,因此,描述类属不分明的事物时,既要考虑是否属于,又要考虑属于的程度。

定义 1 设 X 为论域, $u_{\tilde{A}}(x)$ 表示 X 到闭区间 $[0, 1]$ 上的函数,称 $u_{\tilde{A}}(x)$ 确定了一个 X 上的模糊集合 \tilde{A} ,记 $\tilde{A} = \{u_{\tilde{A}}(x) | x \in X\}$,并称 $u_{\tilde{A}}(x)$ 为对 \tilde{A} 的隶属函数。对确定的元素 $x_0 \in X$,函数值 $u_{\tilde{A}}(x_0)$ 称为元素 x_0 对于模糊集合 \tilde{A} 的隶属度。

如果 $u_{\tilde{A}}(x) = 0.8$,表示元素 x 以 0.8 的隶属度属于模糊集合 \tilde{A} ,而以 0.2 的程度不属于集合 \tilde{A} 。

定义 2^[10] 设 X 为论域, X 上的模糊数 \tilde{A} 称为三角模糊数 (triangular fuzzy number, TFN),如果 \tilde{A} 的隶属函数 $u_{\tilde{A}}$ 满足

$$u_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} (x-l)/(m-l) & l \leq x \leq m \\ (u-x)/(u-m) & m \leq x \leq u \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中: l 和 u 分别表示 \tilde{A} 的上限和下限, m 为最可能取的值。一般地,三角模糊数 \tilde{A} 可记为 (l, m, u) 。

若 $\tilde{A}_1 = (l_1, m_1, u_1)$ 、 $\tilde{A}_2 = (l_2, m_2, u_2)$ 为两个三角模糊数, \oplus 、 \otimes 分别代表模糊加法和模糊乘法算子,模糊数的运算法则如下^[11]:

模糊数的加法:

$$\tilde{A}_1 \oplus \tilde{A}_2 = (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (2)$$

模糊数的乘法:

$$\tilde{A}_1 \otimes \tilde{A}_2 = (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \quad (3)$$

模糊数的倒数:

$$\tilde{A}_1^{-1} = (l_1, m_1, u_1)^{-1} = (1/u_1, 1/m_1, 1/l_1) \quad (4)$$

模糊数的数乘:

$$K \otimes \tilde{A}_1 = (Kl_1, Km_1, Ku_1), K \in R, K \geq 0 \quad (5)$$

2.2.2 确定语言变量的三角模糊数

用 FAHP 评估软件可信性,首先要构造两两判断矩阵,描述 i 指标相对 j 指标重要程度的模糊比较值 \tilde{a}_{ij} 。为量化“ i 指标比 j 指标稍重要”等定性描述语言,本文在 Saaty 教授 1~9 标度法的基础上,采用三角模糊数表示语言变量的隶属度函数^[12,13],如表 1 所示。

表 1 语言变量的隶属函数

语言变量	模糊数 \tilde{a}_{ij}	三角模糊数 (l, m, u)
i, j 两指标同等重要	$\tilde{1}$	(1, 1, 3)
i 指标比 j 指标稍重要	$\tilde{3}$	(1, 3, 5)
i 指标比 j 指标明显重要	$\tilde{5}$	(3, 5, 7)
i 指标比 j 指标强烈重要	$\tilde{7}$	(5, 7, 9)
i 指标比 j 指标极端重要	$\tilde{9}$	(7, 9, 9)

倒数,表示反比较

此外,评估过程中对软件的可信性描述分为五个等级:极高、高、中等、低、极低。每位专家根据其知识结构以及对软件可信性的理解来确定五个等级的隶属函数,每个等级用 0~100 的三角模糊数表示。

2.2.3 基于 FAHP 确定指标权重

1) 构造模糊判断矩阵

针对目标层 G_0 ,对第二层各指标进行两两比较,得到三角模糊判断矩阵:

$$\tilde{A}_{G_0}^k = [\tilde{a}_{ij}^k] = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12}^k & \cdots & \tilde{a}_{1n}^k \\ \tilde{a}_{21}^k & 1 & \cdots & \tilde{a}_{2n}^k \\ \tilde{u} & \tilde{u} & & \tilde{u} \\ \tilde{a}_{n1}^k & \tilde{a}_{n2}^k & \cdots & 1 \end{bmatrix}; k = 1, \dots, m \quad (6)$$

其中: $\tilde{A}_{G_0}^k$ 表示第 k 个专家给出的关于目标层的模糊判断矩阵。假设指标体系共有 β 层,针对 $\theta - 1$ 层的第 s 个指标 $C_s (s = 1, \dots, t)$,确定 θ 层各指标的模糊判断矩阵,第 k 个专家给出的模糊判断矩阵为

$$\tilde{A}_{C_s}^k = [\tilde{a}_{ij}^k] = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12}^k & \cdots & \tilde{a}_{1n}^k \\ \tilde{a}_{21}^k & 1 & \cdots & \tilde{a}_{2n}^k \\ \tilde{u} & \tilde{u} & & \tilde{u} \\ \tilde{a}_{n1}^k & \tilde{a}_{n2}^k & \cdots & 1 \end{bmatrix}; k = 1, \dots, m; s = 1, \dots, t \quad (7)$$

其中: $\tilde{a}_{ij} = \tilde{a}_{ji}^{-1}, i \neq j$ 。

2) 确定模糊指标权重

运用几何平均值法^[8]综合 m 位专家的模糊判断矩阵, 得到综合模糊数判断矩阵 $\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}]$ 。其中:

$$\tilde{a}_{ij} = (\tilde{a}_{ij}^1 \otimes \tilde{a}_{ij}^2 \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{ij}^m)^{1/m} \quad (8)$$

确定 i 指标相对同层各指标 (共 n 个) 的模糊比较值:

$$\tilde{N}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in})^{1/n} \quad (9)$$

计算 i 指标的模糊权重:

$$\tilde{w}_i = \tilde{N}_i \otimes (\tilde{N}_1 \oplus \tilde{N}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{N}_n)^{-1} \quad (10)$$

记为 $\tilde{w}_i = (l_{\tilde{w}_i}, m_{\tilde{w}_i}, u_{\tilde{w}_i})$ 。其中: $l_{\tilde{w}_i}, m_{\tilde{w}_i}, u_{\tilde{w}_i}$ 分别表示 i 指标模糊权重的下限、最可能取的值和上限。

3) 确定综合模糊权重

由式(9)(10)计算出 θ 层相对 $\theta - 1$ 层的三角模糊权重以后, 根据式(11)^[14]计算最底层指标层相对目标层的综合三角模糊权重为

$$W = \prod_{\theta=2}^{\beta-1} w^\theta \quad (11)$$

2.3 基于 FMCDM 集成待评软件的可信度

FMCDM 是一种基于多指标对评估对象进行综合分析的评估方法。MCDM 问题分为多目标规划和多指标评估^[15]两大类。本文属于后一类问题的研究。

1) 模糊评价待评软件的可信性

每位专家首先确定软件可信性的五个等级语言变量所对应的模糊数, 然后给出待评软件的可信度评价。若 E_{ij}^k 表示在第 j 个指标下, 第 k 个专家对第 i 个待评软件可信度的模糊评价, 那么, 在最底层指标下所有待评软件可信度的评价模糊数可记为 $E_{ij}^k = (l_{E_{ij}^k}, m_{E_{ij}^k}, u_{E_{ij}^k})$ 。由于专家背景和经验的差异, 以及对可信性等级评价模糊数的定义不同, 本文采用平均算子对专家的模糊评价进行集成, 假设每个专家的重要性相同, 得到基于 j 指标, m 位专家对第 i 个软件的平均模糊可信程度, 记为 $\tilde{E}_{ij} = (l_{\tilde{E}_{ij}}, m_{\tilde{E}_{ij}}, u_{\tilde{E}_{ij}})$:

$$\tilde{E}_{ij} = (1/m) \otimes (E_{ij}^1 \oplus E_{ij}^2 \oplus \dots \oplus E_{ij}^m) \quad (12)$$

$$l_{\tilde{E}_{ij}} = \frac{\sum_{k=1}^m l_{E_{ij}^k}}{m}, m_{\tilde{E}_{ij}} = \frac{\sum_{k=1}^m m_{E_{ij}^k}}{m}, u_{\tilde{E}_{ij}} = \frac{\sum_{k=1}^m u_{E_{ij}^k}}{m} \quad (13)$$

其中: $l_{\tilde{E}_{ij}}, m_{\tilde{E}_{ij}}, u_{\tilde{E}_{ij}}$ 分别表示该平均模糊数的下限、最可能取的值及上限。

2) 综合集成

假设有 h 个待评软件 $S_i (i = 1, \dots, h)$ 。由式(11), 最底层指标相对目标层的综合模糊权重向量为 $\tilde{W} = (w_1, \dots, w_j, \dots, w_n)^T$; 基于最底层指标, 由式(12)计算得到 h 个待评软件的模糊可信矩阵为 $\tilde{E} = (E_{ij})$ 。集成 \tilde{W} 和 \tilde{E} 后, 最终得到第 i 个待评软件可信性的集成模糊数 $\tilde{Z}_i = (l_{\tilde{Z}_i}, m_{\tilde{Z}_i}, u_{\tilde{Z}_i})$, 有

$$\tilde{Z}_i = \tilde{E} \cdot \tilde{W} \quad (14)$$

$$l_{\tilde{Z}_i} = \sum_{j=1}^n l_{E_{ij}} \times l_{w_j}, m_{\tilde{Z}_i} = \sum_{j=1}^n m_{E_{ij}} \times m_{w_j}, u_{\tilde{Z}_i} = \sum_{j=1}^n u_{E_{ij}} \times u_{w_j} \quad (15)$$

其中: “ \cdot ”代表模糊数的算子, 这里采用模糊加法和乘法; $l_{\tilde{Z}_i}, m_{\tilde{Z}_i}, u_{\tilde{Z}_i}$ 分别表示第 i 个待评软件可信性的集成模糊数 \tilde{Z}_i 的下限、最可能取的值和上限。

2.4 非模糊化

为了得出待评软件的可信性排序, 需要将集成三角模糊数 \tilde{Z}_i 进行非模糊化, 即对模糊数进行排序。模糊数的排序方法很多^[16-19], 目前并没有通用的方法。其中, 计算最佳非模糊特性 (BNP) 值是一种简单、实用的三角模糊数排序方法, 因此, 本文采用该方法对第 i 个待评软件可信性的集成模糊数 \tilde{Z}_i 进行非模糊化:

$$BNP_i = [(u_{\tilde{Z}_i} - l_{\tilde{Z}_i}) + (m_{\tilde{Z}_i} - l_{\tilde{Z}_i})] / 3 + l_{\tilde{Z}_i}, \quad \forall i \quad (16)$$

根据式(16)计算所有待评软件的 BNP 值, 按照由大到小的顺序进行排列, 排序第一的软件相对其他软件可信性最高。

3 实例应用

汽车制造业的产品开发过程一般具有时间周期长、成本高等特点。为缩短产品开发周期, 规范产品开发行为, 增强市场竞争力, 国内某汽车制造企业准备引入项目管理的思想进行产品开发过程的管理。众多软件供应商为企业提供了信息化解决方案。经过初选, 四种企业级项目管理软件入了围, 分别记为 S_1, S_2, S_3 和 S_4 。下面运用 FAHP 及 FMCDM 评估模型对上述四种软件的可信性进行评估:

a) 基于 ISO/IEC9126 软件质量模型^[20], 针对项目管理软件的特点建立可信性评估指标体系, 如图 1 所示。

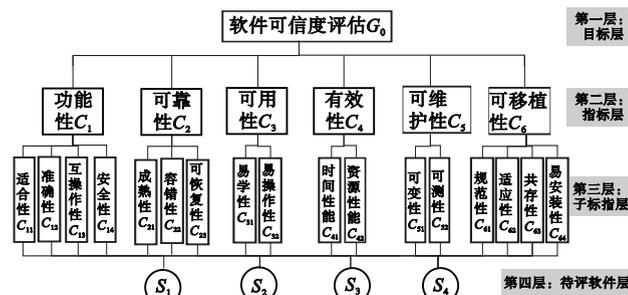


图1 软件可信性评估指标体系

b) 邀请企业高层领导、第三方(咨询顾问)以及产品研发中心、项目管理部门、企业信息中心的五位负责人组成专家评估小组, 分别记为 D^1, D^2, D^3, D^4, D^5 。五位专家给出各指标两两比较相对重要性判断矩阵 $\tilde{A}_{C_0}^k$ 和 $\tilde{A}_{C_s}^k (k = 1, \dots, 5; s = 1, \dots, 6)$ 。由于篇幅有限, 只列出第二层各指标的两两比较三角模糊数判断矩阵 $\tilde{A}_{C_0}^k$, 如下所示:

$$\begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ C_1 & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 & 9 \\ C_2 & 1/3 & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ C_3 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 5 & 7 \\ C_4 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ C_5 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \\ C_6 & 1/9 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{matrix} \quad \tilde{A}_{C_0}^1$$

$$\begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ C_1 & 1 & 5 & 5 & 7 & 9 & 9 \\ C_2 & 1/5 & 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ C_3 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 5 & 7 \\ C_4 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ C_5 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \\ C_6 & 1/9 & 1/9 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{matrix} \quad \tilde{A}_{C_0}^2$$

$$\begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ C_1 & 1 & 3 & 3 & 5 & 7 & 7 \\ C_2 & 1/3 & 1 & 3 & 5 & 7 & 7 \\ C_3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 5 & 7 \\ C_4 & 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ C_5 & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \\ C_6 & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \end{matrix} \quad \tilde{A}_{C_0}^3$$

$$\begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ C_1 & 1 & 3 & 3 & 5 & 7 & 7 \\ C_2 & 1/3 & 1 & 3 & 5 & 7 & 7 \\ C_3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 5 & 7 \\ C_4 & 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ C_5 & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \\ C_6 & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \end{matrix} \quad \tilde{A}_{C_0}^4$$

$$\begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ C_1 & 1 & 3 & 3 & 5 & 7 & 7 \\ C_2 & 1/3 & 1 & 3 & 5 & 7 & 7 \\ C_3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 5 & 7 \\ C_4 & 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ C_5 & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \\ C_6 & 1/7 & 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \end{matrix} \quad \tilde{A}_{C_0}^5$$

c) 运用式(8)综合五位专家的三角模糊数判断矩阵, 得到综合模糊数判断矩阵 \tilde{A}_{C_0} 和 \tilde{A}_{C_s} 。其中, 矩阵某元素 $\tilde{a}_{ij} = (\tilde{a}_{ij}^1 \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{ij}^5)^{1/5}$ 。

$a_{ij}^2 \otimes a_{ij}^3 \otimes a_{ij}^4 \otimes a_{ij}^5$, 以 \tilde{a}_{21c_0} 为例说明计算过程:

$$\tilde{a}_{21c_0} = \left((1, 3, 5) \otimes \left(\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3}\right) \otimes \left(\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1\right) \otimes \left(\frac{1}{7}, \frac{1}{5}, \frac{1}{9}\right) \otimes \left(\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{7}\right) \right)^{1/5} = \left(\begin{matrix} (1 \times \frac{1}{7} \times \frac{1}{5} \times \frac{1}{7} \times \frac{1}{9})^{1/5}, (3 \times \frac{1}{5} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{5} \times \frac{1}{9})^{1/5}, \\ (5 \times \frac{1}{3} \times 1 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{7})^{1/5} \end{matrix} \right) = (0.2144, 0.3385, 0.6025)$$

综合计算结果如下:

$$\tilde{A}_{c_0} = \begin{pmatrix} 1 & (1.699, 2.954, 4.434) & (2.292, 5.076, 6.881) & (2.141, 3.322, 5.249) & (4.076, 6.185, 8.193) & (0.844, 1.401, 2.062) \\ (0.2144, 0.3385, 0.6025) & 1 & (0.6025, 1.1247, 1.7188) & (0.5720, 1.1247, 1.8103) & (1.0000, 1.6069, 2.7131) & (0.3686, 0.5818, 0.8891) \\ (0.1453, 0.1949, 0.4366) & (0.5818, 0.8891, 1.699) & 1 & (0.3253, 0.7905, 1.4758) & (0.6118, 1.2457, 2.2552) & (0.3165, 0.6118, 1.1076) \\ (0.1907, 0.3005, 0.4670) & (0.5524, 0.8891, 1.7483) & (0.6776, 1.2651, 1.9057) & 1 & (0.6676, 1.0155, 1.7188) & (0.4082, 0.6544, 1.0000) \\ (0.1229, 0.1634, 0.2453) & (0.3686, 0.6223, 1.0000) & (0.4434, 0.8027, 1.6345) & (0.5818, 0.9847, 1.4758) & 1 & (0.2580, 0.4670, 1.1076) \\ (1.0000, 1.3797, 1.8384) & (1.1247, 1.7188, 2.7131) & (0.9029, 1.6345, 3.1988) & (1.0000, 1.5281, 2.4496) & (0.9029, 2.1411, 3.8762) & 1 \end{pmatrix}$$

d) 运用式(9)~(11)计算指标的三角模糊权重,结果如表 2 所示。

表 2 各指标三角模糊权重及综合模糊权重

指标	子指标	各指标相对	
		子指标的权重	子指标相对目标层的综合权重
功能性 C_1	适用性 C_{11}	(0.1645, 0.3824, 0.7445)	(0.0215, 0.1255, 0.5622)
	准确性 C_{12}	(0.1082, 0.2473, 0.6240)	(0.0178, 0.0946, 0.4646)
	可操作性 C_{13}	(0.0535, 0.1190, 0.3118)	(0.0088, 0.0455, 0.2321)
	安全性 C_{14}	(0.1293, 0.3056, 0.6792)	(0.0213, 0.1167, 0.5057)
可靠性 C_2	成熟性 C_{21}	(0.0858, 0.2018, 0.5656)	(0.0002, 0.0241, 0.1455)
	容错性 C_{22}	(0.2290, 0.5963, 1.3637)	(0.0006, 0.0713, 0.3509)
可用性 C_3	可恢复性 C_{23}	(0.0858, 0.2018, 0.5656)	(0.0002, 0.0241, 0.1455)
	易用性 C_{31}	(0.0427, 0.0958, 0.2357)	(0.0119, 0.0555, 0.2811)
有效性 C_4	易操作性 C_{32}	(0.2778, 0.5798, 1.1925)	(0.0087, 0.0473, 0.2073)
	时间性能 C_{41}	(0.2049, 0.4936, 0.8796)	(0.0491, 0.1086, 0.2357)
可维护性 C_5	资源性能 C_{42}	(0.2868, 0.5421, 1.0371)	(0.0141, 0.0589, 0.2444)
	可变性 C_{51}	(0.2442, 0.4580, 0.8463)	(0.0120, 0.0497, 0.1995)
可移植性 C_6	可测性 C_{52}	(0.0359, 0.0806, 0.1865)	(0.0087, 0.0439, 0.2253)
	规范性 C_{61}	(0.2416, 0.5447, 1.2079)	(0.0074, 0.0359, 0.1918)
	适应性 C_{62}	(0.2056, 0.4453, 1.0283)	(0.0930, 0.2127, 0.4611)
	共存性 C_{63}	(0.1109, 0.3008, 0.6711)	(0.0103, 0.0640, 0.3094)
	易安装性 C_{64}	(0.1050, 0.2508, 0.6485)	(0.0098, 0.0533, 0.2990)
		(0.1128, 0.2862, 0.7913)	(0.0105, 0.0609, 0.3649)
		(0.0651, 0.1622, 0.4285)	(0.0061, 0.0345, 0.1976)

e) 每位专家根据自己对可信性的理解,分别确定可信性评价等级语言变量的隶属函数,如表 3 所示。

表 3 专家关于软件可信性评价等级语言变量的隶属函数

专家	评价等级语言变量极低				
	极低 (VL)	低 (L)	中等 (M)	高 (H)	极高 (VH)
D ¹	(0,0,40)	(40,50,60)	(60,70,80)	(80,88,95)	(95,100,100)
D ²	(0,0,30)	(30,40,50)	(50,60,70)	(70,80,90)	(90,100,100)
D ³	(0,0,60)	(60,65,68)	(68,70,75)	(75,80,92)	(92,100,100)
D ⁴	(0,0,30)	(30,40,50)	(50,60,70)	(70,80,90)	(90,100,100)
D ⁵	(0,0,20)	(20,30,40)	(40,55,60)	(60,70,80)	(80,100,100)

同时,根据供应商提供的成功案例、技术文档和试用软件产品,五位专家给出四个待评软件基于子指标的可信等级,由式(12)(13)计算出五位专家对四个待评软件的平均模

糊可信程度,结果如表 4 所示。这里仅举一例进行说明。在子指标 C_{11} (适用性)下,五位专家对待评软件 S_1 的可信性给出如下判断:

$$\begin{matrix} D^1 & D^2 & D^3 & D^4 & D^5 \\ [M & M & L & L & H] \\ D^1 & D^2 & D^3 & D^4 & D^5 \\ [(60,70,80) & (50,60,70) & (60,65,68) & (30,40,50) & (60,70,80)] \end{matrix} = D^5$$

故

$$\tilde{E}_{11} = ((60 + 50 + 60 + 30 + 60)/5, (70 + 60 + 65 + 40 + 70)/5, (80 + 70 + 68 + 50 + 80)/5) = (52.0, 61.0, 69.6)$$

表 4 四个待评软件基于子指标的平均模糊可信数

	S_1	S_2	S_3	S_4
C_{11}	(52.0, 61.0, 69.6)	(78.0, 86.0, 92.4)	(71.0, 79.6, 89.4)	(48.0, 58.0, 65.6)
C_{12}	(61.0, 70.0, 79.0)	(80.6, 90.0, 93.0)	(73.6, 81.6, 88.0)	(67.0, 76.0, 81.6)
C_{13}	(59.0, 69.0, 78.4)	(71.0, 80.6, 87.4)	(74.4, 83.6, 91.0)	(76.6, 84.0, 89.0)
C_{14}	(65.6, 73.6, 82.0)	(86.0, 96.0, 98.4)	(77.6, 85.6, 90.0)	(68.0, 78.0, 81.6)
C_{21}	(49.6, 59.0, 67.0)	(78.0, 86.0, 92.4)	(67.0, 76.6, 85.4)	(63.0, 73.0, 86.4)
C_{22}	(57.6, 66.0, 75.0)	(78.0, 86.0, 92.4)	(67.0, 76.0, 86.4)	(67.0, 77.6, 85.4)
C_{23}	(52.0, 62.0, 69.6)	(69.6, 77.6, 86.0)	(63.0, 73.0, 82.4)	(59.0, 69.0, 78.4)
C_{31}	(74.4, 84.6, 89.0)	(59.0, 68.0, 73.6)	(73.6, 81.6, 88.0)	(56.0, 63.0, 72.6)
C_{32}	(81.4, 90.0, 94.0)	(70.0, 79.0, 84.4)	(71.0, 80.6, 87.4)	(52.0, 62.0, 69.6)
C_{41}	(57.6, 66.6, 74.0)	(73.6, 81.6, 88.0)	(68.6, 77.0, 83.0)	(53.6, 62.0, 71.0)
C_{42}	(67.0, 77.6, 85.4)	(68.0, 77.0, 83.6)	(71.0, 79.0, 89.4)	(50.0, 69.0, 77.6)
C_{51}	(48.0, 58.0, 65.6)	(64.0, 71.6, 80.6)	(74.4, 84.0, 90.0)	(52.0, 59.0, 77.0)
C_{52}	(59.0, 68.0, 78.4)	(57.6, 67.0, 75.0)	(67.0, 76.6, 85.4)	(55.0, 64.0, 74.4)
C_{61}	(57.6, 66.6, 74.0)	(78.0, 86.0, 92.4)	(69.6, 78.6, 84.0)	(64.6, 72.0, 79.0)
C_{62}	(53.6, 63.6, 68.0)	(71.0, 80.6, 87.4)	(61.6, 71.0, 99.0)	(56.0, 65.0, 69.6)
C_{63}	(48.0, 58.0, 65.6)	(69.6, 78.6, 84.0)	(67.0, 76.0, 86.4)	(72.6, 81.0, 85.0)
C_{64}	(71.0, 89.6, 89.4)	(64.0, 72.6, 80.6)	(61.6, 70.6, 78.0)	(57.6, 65.0, 75.0)

f) 对四个待评软件的可信性进行排序。

根据算出的子指标相对目标层的综合权重(表 2)及四个待评软件基于子指标的平均模糊可信数(表 4),运用式(14)(15)计算四个待评软件 $S_i (i = 1, \dots, 4)$ 可信性的集成模糊数 $\tilde{Z}_i = (l_{\tilde{z}_i}, m_{\tilde{z}_i}, u_{\tilde{z}_i})$,并且运用式(16)计算四个软件的 BNP 值,由此得到可信度的排序。以 S_1 为例说明具体计算过程:

$$\tilde{Z}_1 = (l_{\tilde{z}_1}, m_{\tilde{z}_1}, u_{\tilde{z}_1}) = \left(\sum_{j=1}^{17} l_{\tilde{E}_{1j}} \times l_{w_j}, \sum_{j=1}^{17} m_{\tilde{E}_{1j}} \times m_{w_j}, \sum_{j=1}^{17} u_{\tilde{E}_{1j}} \times u_{w_j} \right) = (10.3056, 69.6224, 367.9635)$$

接着,由式(16)计算 BNP 值:

$$BNP_1 = [(367.9635 - 10.3056) + (69.6224 - 10.3056)]/3 + 10.3056 = 149.2972$$

同理,可以得到其他三个待评软件的 BNP 值,结果如表 5 所示。

表 5 BNP 值及可信度排序

待评软件 S_i	集成模糊数 \tilde{Z}_i	BNP _i 值	排序
S_1	(10.3056, 69.6224, 367.9635)	149.2972	4
S_2	(12.4129, 105.5781, 433.796)	183.9290	1
S_3	(12.0662, 77.6459, 432.6814)	174.1312	2
S_4	(10.0736, 69.9941, 381.0361)	153.7013	3

由表 5 可得四个待评软件的可信性排序,即 $S_2 > S_3 > S_4 > S_1$ 。Primavera 公司的 P3e/c 作为相对可信性最高的软件产品成为最佳的选择。将该项目软件应用到开发系统平台后,与没有采用该软件产品前相比,该汽车制造企业的轿车整车开发周期缩短了 3~6 月,开发成本降低了 10%~15%,产品设计开发质量得到了大幅度的提升。事实证明,运用基于 FAHP 和 FMCDM 的软件可信性评估模型对软件产品的可信性进行评

估,具有一定的实效性和合理性。

4 结束语

针对软件可信性评估过程中模糊信息难以量化的特点,提出了一种基于FAHP和FMCDM的新的评估模型。首先,根据软件的特点建立评估指标体系;其次,在专家组给出各层指标三角模糊权重的基础上,计算最底层指标层相对于目标层的综合三角模糊权重 \tilde{W} ;同时,专家组模糊评价待评软件在最底层各指标下的可信等级,集成后得到基于最底层各指标, h 个待评软件的模糊可信矩阵 \tilde{E} ;最后,综合集成 \tilde{W} 和 \tilde{E} ,得到第 i 个待评软件可信性的集成模糊评价 \tilde{Z}_i ;再通过对 \tilde{Z}_i 非模糊化,得到待评软件的可信性排序,从而将多层次指标的模糊性评价在形式上进行了量化。通过国内某汽车制造企业的项目管理软件的实例评估,验证了评估模型的合理性与实效性。该模型的建立,对于评估国民经济各领域的软件可信性具有普遍的适用意义。

本文提出的软件可信性评估模型没有考虑软件的动态演化,其应用仅限于软件可信性的静态评估。由于不同软件项目在不同应用领域对可信性评价指标的要求不同,软件可信性评估指标体系应该是动态的、开放的。此外,对于不同指标体系、不同的软件开发阶段,评估方法也应具有动态性,软件可信性的动态评估将是今后研究工作的重点。

参考文献:

- [1] PAENAS D L, SCHOUWEN J, KWAN S P. Evaluation of safety-critical software[J]. *Communications of ACM*, 1990, 33(6): 636-648.
- [2] ZHU Li-ming, AURUM A, GORTON I, et al. Tradeoff and sensitivity analysis in software architecture evaluation using analytic hierarchy process[J]. *Software Quality Journal*, 2005, 13(4): 357-375.
- [3] OSSADNIK W, LANGE O. AHP-based evaluation of AHP-software[J]. *European Journal of Operational research*, 1999, 118(2): 578-588.
- [4] CHEUNG F K T, KUEN J L F, SKITMORE M. Multi-criteria evaluation model for the selection of architecture consultants[J]. *Construct Manage Econ*, 2002, 20(7): 569-580.
- [5] CHANG Che-wei, WU Cheng-ru, LIN C T, et al. Evaluating digital video recorder systems using analytic hierarchy and analytic network processes[J]. *Information Sciences*, 2007, 177(16): 3383-3396.
- [6] MORRIS F L. Advance on structuring compilers and proving them correct[C]//Proc of the 1st Annual ACM SIGACT-SIGPLAN Symposium on Principles of Programming Languages. 1973: 144-152.
- [7] SAATY T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw Hill, 1980.
- [8] BUCKLEY J J. Fuzzy hierarchical analysis[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1985, 17(1): 233-247.
- [9] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338-353.
- [10] LAARHOVEN P J M, PEDRYCZ W. A fuzzy extension of Saaty's priority theory[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1983, 11(3): 229-241.
- [11] CHEN S J J, HWANG C L. Fuzzy multiple attribute decision making, methods and applications[C]//Proc of Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. New York: Springer, 1993.
- [12] CHIOU H K, TZENG G H. Fuzzy hierarchical evaluation with grey relation model of green engineering for industry[J]. *International Journal Fuzzy Systems*, 2001, 3(3): 466-475.
- [13] MON D L, CHENG C H, LIN J C. Evaluating weapon system using fuzzy analytic hierarchy process based on entropy weight[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, 62(2): 127-134.
- [14] 高会生,冉静学,孙逸群.基于改进的FAHP电力通信网风险评估[J]. *系统工程理论与实践*, 2008, 28(3): 133-138.
- [15] HWANG C L, YOON K. Multiple attribute decision making methods and applications[C]//Proc of Lecture notes in Economics and Mathematical Systems. New York: Springer, 1981.
- [16] BORTOLAN G, DEGANI R. A review of some method for ranking fuzzy subsets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1985, 15(1): 1-19.
- [17] LIOUS T S, WANG M J J. Ranking fuzzy numbers with integral value[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 50(3): 247-255.
- [18] LEUNG L C, CAO D. On consistency and ranking of alternatives in fuzzy AHP[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 124(1): 102-113.
- [19] HSIEH T Y, LU S T, TZENG G H. Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings[J]. *International Journal of Project Management*, 2004, 22(7): 573-584.
- [20] ISO/IEC 9126-1, Software engineering-software product quality (part 1): quality model[S]. [S. l.]: ISO/IEC, 2001.
- [1] COHEN D M, DALAL S R, FREDMAN M L, et al. The AETG system: an approach to testing based on combinatorial design[J]. *IEEE Trans on Software Engineering*, 1997, 23(7): 437-444.
- [2] TAI K C, LEI Y. A test generation strategy for 2-dimension testing[J]. *IEEE Trans on Software Engineering*, 2002, 28(1): 109-111.
- [3] WILLIAMS A W, PROBERT R L. A measure for component interaction test coverage[C]// Proc of ACS/IEEE International Conference on Computer System and Applications. Washington DC: IEEE Computer Society, 2001: 304-314.
- [4] SCHROEDER P J, KOREL B. Black-box test reduction using input-output analysis[C]// Proc of ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis. New York: ACM Press, 2000: 173-177.
- [5] SARAPH P, LAST M, KANDEL A. Test case generation and reduction by automated input-output analysis[C]// Proc of IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003: 5-8.
- [6] CHENG C, DUMITRESCU A, SCHROEDER P. Generating small combinatorial test suites to cover input-output relationships[C]// Proc of the 3rd International Conference on Quality Software. Washington DC: IEEE Computer Society, 2003: 76-82.
- [7] 史亮,聂长海,史宝文.基于解空间树的组合测试数据生成[J]. *计算机学报*, 2006, 29(6): 849-857.
- [8] 王珊. 数据库系统概论[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [9] [EB/OL]. <http://www.juedui100.com/register/register1.jsp>.
- [10] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R L, et al. Introduction to algorithms[M]. Cambridge: MIT Press, 2001.

(上接第932页)