

软件可信性的 MAGDM 度量模型

赵玉洁, 罗新星, 刘福军

(中南大学 商学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 建立了一个基于 MAGDM 的软件可信性度量模型. 在已建立的软件可信性综合评价指标体系的基础上, 采用群组多属性决策的方法对软件可信性进行度量, 分别利用主观赋权法对群决策专家的意见进行综合归纳和客观赋值法对群决策结果进行修正, 根据参评软件与“理想软件”距离的大小对软件可信性进行度量. 最后, 将该模型运用到某银行开发的网上银行软件的可信性评估中, 实例说明了 MAGDM 模型的具体过程, 结果验证了该模型的实用性和有效性.

关键词: 软件可信性; MAGDM; 主观赋权法; 客观赋权法

中图分类号: TP183

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)03-0017-06

The MAGDM Model for Measuring Software Trustworthiness

ZHAO Yu-jie, LUO Xin-xing, LIU Fu-jun

(School of Business, Center South University, Changsha 410083, China)

Abstract: This paper establishes a MAGDM (multiple attribute group decision making) model for measuring software trustworthiness. Based on the establish software trustworthiness comprehensive evaluation index system, it respectively uses subjective weighting method for summarizing the group experts judgment and objective weighting method for modify group decision results. According to the distance between the measured software and the ideal software, we can rank software trustworthiness. Finally, applying the model to the development of a bank's online banking software trustworthiness assessment, the given example illustrates the specific process of MAGDM model, and the result shows the practicability and validity of the above model.

Key words: software trustworthiness; MAGDM; subjective weighting method; objective weighting method

1 引言

软件是计算机系统的灵魂, 现代社会对计算机系统的依赖主要就体现在对软件的依赖上. 近十年来, 互联网技术的发展催生了信息技术的革命, 也使得软件的应用领域极度扩展, 社会对软件的需求量以极高的速度增长, 对软件的要求以及软件的开发环境也在不断地发生变化: 在需求方面, 社会需要软件实现的功能越来越复杂, 越来越多, 并且要求软件具备安全性、可靠性、时效性等特点; 在软件的运行和开发环境方面, 已经从传统的静态封闭的环境拓展为互联网环境下动态多变的环境. 在互联网环境

下, 计算实体的行为也存在着不可控性和不确定性, 这不仅对传统的软件开发方法和技术, 也对运行软件的可信保障提出了严峻的挑战.

在开放的互联网环境中, 构造可信的软件系统和提供可信的运行保障, 确保软件为人们提供可信的服务, 提高软件的可信度, 是国际软件产业和学术界关注的焦点, 更是未来软件技术发展和信息产业发展的关键技术基础. 国内外已经针对可信软件开展了大量的研究: 美国《国家软件发展战略(2006年—2015年)》将开发高可信软件放在首位, 并提出了下一代软件工程的构想; 我国国家自然科学基金委员会“十一五”期间重大研究计划—“可信软件基

收稿日期: 2013-07-01; 修回日期: 2013-08-29

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体项目(71221061)

基础研究”也于 2008 年正式启动^[1].

软件可信性涉及航空航天、原子核反应堆、军事科学、国防建设以及金融、证券、医疗卫生、汽车、电力等国民经济的各个高科技领域^[1]. 已有的研究结合软件应用实际和领域专业背景, 突出了许多用于考察一个或多个可信属性的可信性评估模型或方法, 其中有代表性的包括:

统一可信性模型 UMD^[2]、Bayesian 网模型^[3]、基于本体的集成评估方法^[4]、软件多维度评估 Web 模型^[5]、Markov 用例模型^[6]、基于模糊理论的多属性评估方法^[7]、可信度估算模型^[8]、自适应可信性模型^[9]和开源构件可信性评估方法^[10]等. 为了满足具有特定可信需求的软件可信性评估问题, 如航空飞行控制软件、智能控制软件等, 许多仅能度量或评估单一可信属性的模型也相继被提出. 但总结上述模型我们不难发现, 它们存在着以下三类缺点:

第一, 孤立地考虑单个可信属性, 并未对软件可信性从整体上进行度量; 第二, 即便对软件可信性的多维可信属性进行总体上的评估, 但是所建立的评估模型不具结构性, 评估准则不具系统性; 第三, 针对特定软件领域建立的可信评估方法不具通用性. 故而, 针对如上两点不足, 本文提出了一个系统的具有可重复性的软件可信性度量模型. 本文提出的软件可信性度量模型, 对于评估国民经济各个领域的软件可信性具有普适性.

2 软件可信性综合评价指标体系

软件可信性 (Software Trustworthiness) 是指软件的行为和结果符合用户预期, 并在受到干扰时仍能提供连续服务的能力^[11]. 软件可信性是对软件行为的整体刻画, 是对可靠性、安全性、正确性和时效性等一系列可信属性的综合度量, 其实质就是软件可信属性的选取和度量、用户预期的表达和依据对被选择的可信属性度量值和用户预期对两者符合性的量化问题. 软件可信性的评估它涉及软件一系列定性和定量的可信指标. 早期对软件可信性的研究多数关注单维可信属性的分析、测试和验证, 但是随着软件应用环境越来越复杂, 在评估软件可信性时, 需要综合考虑可靠性、安全性、可用性等多维可信属性. 因此, 软件可信性评估可以看作是一种多属性决策 (Multiple Attribute Decision Making, MADM) 问题, 是软件系统特性的综合度量和评价的过程. 软件可信性可以表述为建立在多维可信属性度量基础上的函数:

$$P_{\text{trustworthiness}} = f(P_1, P_2, \dots, P_n, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$$

式中, $P_{\text{trustworthiness}}$ 表示软件可信性, $P_1, P_2, \dots, P_n$ 表示各个可信属性的度量值, $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 表示各个可信属性的权重分配结果. 这样, 就可以对软件在不同的设计、不同配置、不同应用领域和环境时的可信性做出定量的比较和分析.

本文根据软件可信分级规范^[12]归纳了一个包含软件可信属性及其度量的软件可信性综合评价指标体系 (表 1). 原始度量是指按照可信属性的特性所确定的初始度量, 分级度量则在原始度量的基础上对每个可信属性进行 5 级到 1 级的分割 (5 级为最好, 1 级为最差), 从而可以根据可信属性的原始度量来确定其所属的级别. 表 1 中所列的 20 个可信属性中, 15 个可信属性为数值型可信属性, 它们的原始度量可以通过公式在实际环境中由软件测试数据得到具体数值, 根据软件可信分级规范对应的度量等级为, 5 级: $X=1$; 4 级: $0.85 \leq X < 1$; 3 级: $0.7 \leq X < 0.85$; 2 级: $0.5 \leq X < 0.7$; 1 级: $0 \leq X < 0.5$. 其余 5 个可信属性为非数值型可信属性, 专家可根据原始度量释义, 再结合自己的经验, 根据实际情况对应其分级度量等级.

3 基于 MAGDM 的软件可信性评价模型

本文建立了一个基于 MAGDM (Multiple Attribute Group Decision Making) 的软件可信性度量模型如图 1 所示. 具体流程是: 在已建立的软件可信性综合评价指标体系的基础上, 采用群组多属性决策的方法对软件可行可信性进行度量. 首先, 利用主观赋权法得到群决策专家对各个可信指标的分级度量和主观权重, 考虑到群决策专家知识的有限性, 假定存在一个“理想专家”, 通过特征根法求解“理想专家”对各个可信指标的评价矩阵和主观权重; 再次, 利用客观赋值法中的熵值法对群决策结果进行修正; 最后, 计算出参评软件与“理想软件”的距离, 从而对软件可信性进行度量. 该模型的优点在于: 综合主观赋权法和客观赋权法, 既体现了群决策专家的主观意见, 又考虑可信指标之间的内在客观规律. 在软件可信性度量的初始阶段以群决策专家的主观意见为依据, 随着样本数据的不断积累, 利用可信指标之间的内在规律来调整权重, 在多次决策的基础上形成学习样本, 并把经验转化为知识, 随着决策过程的不断展开, 使得对于软件可信性的度量更趋于科学合理^[13-14].

表1 软件可信性综合评价指标体系及分级度量

可信指标	评价指标 P_i	原始度量定义	分级度量定义(5级到1级)
可用性	符合性 P_1	$X = cf * (1 - \text{有问题功能数的比例})$ $cf = \text{用户的信任因子(信任度,下同)}$	{功能完全正确,功能略有问题,功能有问题,功能有较多问题,功能有很多问题}
	准确性 P_2	$X = 1 - \text{未达到所需精确度的功能数比例}$	{准确,比较准确,基本准确,部分准确,不准确}
	资源利用率 P_3	内存使用大小,CPU使用率等	{好,较好,中,较差,差}
	易理解性 P_4	$X = cf * (1 - \text{不能被理解的功能数比例})$	{好,较好,中,较差,差}
	易操作性 P_5	$X = 1 - \text{易操作的功能数比例}$	{极易,较易,可操作,较难,难}
可靠性	适应性 P_6	$X = 1 - \text{未能完成任务的功能数比例}$	{好,较好,中,较差,差}
	易安装性 P_7	$X = \text{用户成功改变安装操作次数的比例}$	{好,较好,中,较差,差}
	成熟性 P_8	$X = cf * \text{软件产品测试覆盖的充分度}$	{非常充分,较充分,中,不充分,差}
	容错性 P_9	$X = 1 - \text{损坏发生的次数} / \text{软件失效的数目}$	{好,较好,中,较差,差}
安全性	机密性 P_{10}		{验证保护级,强制保护级,可控存取保护级,自主安全保护级,无保护级}
	安全性 P_{11}		
可生存性	抗攻击性 P_{12}	$X = \text{被攻击次数} / \text{成功抵抗攻击次数}$	{好,较好,中,较差,差}
	攻击识别能力 P_{13}	$X = \text{被攻击次数} / \text{成功识别攻击次数}$	{好,较好,中,较差,差}
	恢复性 P_{14}	$X = \text{遭受攻击次数} / \text{成功恢复次数}$	{好,较好,中,较差,差}
	自我完善能力 P_{15}	$X = \text{成功抵抗攻击的种类数比例}$	{好,较好,中,较差,差}
实时性	实时性 P_{16}^*	$cf * \text{获得结果与完成命令的时间差}$	{快,较快,中,较慢,慢}
可维护性	易诊断性 P_{17}	$X = 1 - \text{不利于软件产品分析的因素比例}$	{极易,较易,可分析,较难,难}
	易改变性 P_{18}	$X = 1 - \text{不利于软件产品修改的因素比例}$	{极易,较易,可修改,较难,难}
	稳定性 P_{19}^*		{很稳定,较稳定,稳定,较不稳定,不稳定}
	易测试性 P_{20}	$X = \text{使用内置式测试方法用例数比例}$	{很有效,较有效,有效,效果较差,无效}

注: *表示非数值型可信属性,其余为数值型可信属性

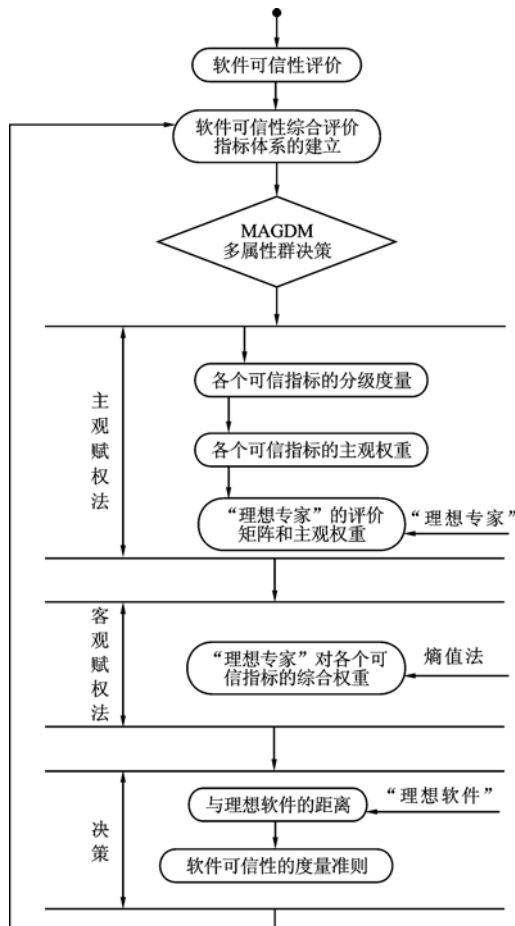


图1 基于 MAGDM 的软件可信性度量模型

3.1 专家群决策意见的综合

设有 l 个专家对 m 个软件的 n 个可信指标进行分级评价, $\mathbf{X}^k = (x_{ij}^k)_{m \times n} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, l)$ 为评级矩阵, 继而利用标准化公式(1)对可信指标的量纲进行统一, 将 $\mathbf{X}^k = (x_{ij}^k)_{m \times n}$ 转化为标准化矩阵 $\mathbf{R}^k = (r_{ij}^k)_{m \times n}$.

$$r_{ij}^k = \frac{x_{ij}^k - \min_i x_{ij}^k}{\max_i x_{ij}^k - \min_i x_{ij}^k} \quad (1)$$

考虑到群决策专家知识和经验的有限性, 现实中决策达到“完美”的专家不可能存在, 故而假设一个“理想专家”, 他的决策水平最“完美”, 即可靠性为 1 且不确定性为 0. “理想专家”的评分与群决策中各专家的评分最具一致性, 其评分向量与各专家的评分向量夹角之和最小, 记为

$$\mathbf{X}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)^T,$$

$\mathbf{X}^*$ 可以通过求解式(2)得到

$$\max_{\|b\|=1} \sum_{i=1}^m (b^T \mathbf{X}_i)^2 = \sum_{i=1}^m (\mathbf{X}_i^T \mathbf{X}_i)^2 = \rho_{\max} \quad (2)$$

式中, $\rho_{\max}$ 为矩阵 $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ 的最大特征根, $\mathbf{X}^*$ 为对应于 $\rho_{\max}$ 的正特征向量, $\|\mathbf{X}^*\| = 1$ 且 $\forall b = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T \in E^n, \|b\| = 1$, 将 $\mathbf{X}^*$ 归一化后, 可得专家的标准权重向量 $\mathbf{b}_j = (b_1^j, b_2^j, \dots, b_l^j)$.

再根据 l 个专家对 m 个不同软件的评分矩阵 $\mathbf{Z}^j$

$= (z_{ki}^j)_{l \times m} (k=1,2,\dots,l; j=1,2,\dots,n; i=1,2,\dots,m)$; z_{ki}^j 表示对第 j 个可信指标第 k 个专家对于第 i 个软件的评分值, 则 $b^j \cdot Z^j$ 为“理想专家”对各个软件的第 j 个可信指标的评分向量 $Z^{j*} = (Z_1^{j*}, Z_2^{j*}, \dots, Z_m^{j*})$, 进一步可以得到“理想专家”的标准化评分矩阵 $R^* = (r_{ij}^*)_{m \times n}$, 从而将群决策转化为单人决策。

3.2 可信指标的综合权重

由于各个可信指标的相对重要性不同, 所以要求群决策专家对 n 个可信评价指标赋予一定的主观权重 λ_j^k . 利用群决策特征根集结群决策专家意见, 求出“理想专家”对各个可信指标的主观权重 λ_j^* , 然后利用客观赋权法中的熵值法对其进行修正. 在对 m 个软件的 n 个可信指标评价时, 定义第 j 个 ($j=1,2,\dots,n$) 可信指标的熵为

$$H_j^* = -k \sum_{i=1}^m f_{ij}^* \cdot \ln f_{ij}^* \quad (3)$$

其中 $f_{ij}^* = \frac{r_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m r_{ij}^*}$; $k = \frac{1}{\ln m}$; $H_j \geq 0$; $k \geq 0$

定义第 j 个可信指标的熵权 w_j^* 为

$$w_j^* = \frac{1 - H_j^*}{n - \sum_{j=1}^n H_j^*} \quad (4)$$

熵是信息论中的概念, 是信息无序程度的度量^[14]; 某项可信指标值的变异程度越小, 熵越小, 该可信指标所提供的信息量越大, 该可信指标的权重也应越大; 反之, 某项可信值的变异程度越大, 熵越大, 该可信指标提供的信息量越小, 该指标的权重也越小. 根据熵权可以衡量各个可信指标客观权重的大小. 进一步结合群决策专家的主观意见, 根据式(5)得到可信指标的综合权重:

$$\lambda_j^* = \frac{\lambda_j^* w_j^*}{\sum_{j=1}^n \lambda_j^* w_j^*} \quad (5)$$

表 2 第一位专家对各方案中的 20 个可信指标评级结果

方案及评分 \ 可信指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₂₀
A ₁	5	3	4	2	3	4	4	2	2	4	3	2	5	3	2	1	4	5	3	2
A ₂	4	4	2	5	3	3	5	1	2	3	4	3	4	2	5	3	3	1	4	3
A ₃	5	4	3	4	4	5	3	4	4	3	3	5	4	3	4	2	2	3	2	1
A ₄	4	5	2	3	2	2	3	4	5	2	1	4	3	2	3	4	3	2	4	2

根据式(1)将 6 位专家对 20 个可信指标的评分矩阵标准化, 得到矩阵 $R_j (j=1,2,\dots,20)$. 然后分别计算“理想专家”对 4 个软件中 20 个可信指标的

3.3 软件可信性度量

通过上述步骤, 得到“理想专家”对各个可信指标的评分矩阵和综合权重后, 对于参评软件, 利用与“理想软件” Y^* 的距离大小来度量软件可信性.

分别计算各软件方案的 n 个可信指标到“理想软件” $Y^* = (1,1,\dots,1)_{1 \times n}$ 的距离 d_p :

$$d_p = \left[\sum_{j=1}^n \lambda_j^{*p} (1 - r_{ij}^*)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (6)$$

根据 d 值的大小对各个软件的可信性进行度量: d_1 的最小值所对应的软件可信性的度量值与“理想软件”的距离最小, 为最优; 当 d_1 值相等时, d_2 值较小的软件可信性较优.

$$d_1 = 1 - \sum_{j=1}^n \lambda_j^* r_{ij}^* \quad (7)$$

$$d_2 = \left[\sum_{j=1}^n \lambda_j^{*2} (1 - r_{ij}^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

4 实例应用

本文选取某银行拟开发的网上银行软件作为评估对象, 经过初选后得到四个入围软件 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 , 根据本文中建立的基于 MAGDM 的软件可信性度量模型对入围的四个软件进行可信性度量, 从而为企业决策提供参考.

本文具有针对性地从网上银行软件的用户、项目开发以及此领域教授中, 各选取 2 名共 6 名专家, 成立群决策评价小组. 对软件可信性综合指标体系中涉及的 20 个可信指标 $P = (P_1, P_2, \dots, P_{20})$, 根据表 1 中提到的原始度量及分级度量, 对四个参评的软件 20 个可信指标进行评级. 由于网上银行软件对软件可信性的要求较为全面, 故而本文中群决策专家对 20 个可信指标的主观权重相等, 即 $\lambda_j^k = 0.05, j=1,2,\dots,20$. 限于篇幅, 本文仅列出第一位专家对四个参评软件的 20 个可信指标所给出的相应评级, 如表 2 所示.

评分值. 表 3 给出了 6 位专家对四个软件的可信指标—符合性 P_1 的评分标准化矩阵 Z^1 :

$$Z^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0.500 & 0 & 0.500 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.500 & 0.500 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

利用 minitab16 软件,求得 $Z^1 Z^{1T}$ 最大特征值为 6.133 27,对应的特征向量为 (0.455 0, 0.425 0, 0.277 2, 0.311 7, 0.423 2, 0.509 2), 归一化后,得 $b_1 = (0.189 5, 0.177 0, 0.115 4, 0.129 8, 0.176 2, 0.212 1)$. $Z^{1*} = b^1 \cdot Z^1 = (0.366 1, 0.203 5, 0.796 1, 0.504 5)$ 即为“理想专家”对四个软件的可信指标—符合性 P_1 的评价向量. 同理,可以得到“理想专家”对四个软件的其他 19 个可信指标的评

价向量 $Z^{2*} \sim Z^{20*}$.

$Z = (Z^{1*}, Z^{2*}, \dots, Z^{20*})^T$ 即为“理想专家”对软件可信性指标体系中所有 20 个可信指标的评价矩阵:

$$Z^* = \begin{bmatrix} 0.366 1 & 0.442 6 & 0.468 3 & \cdots & 0.598 6 \\ 0.203 5 & 0.209 8 & 0.392 8 & \cdots & 0.678 4 \\ 0.796 1 & 0.621 0 & 0.275 0 & \cdots & 0.867 4 \\ 0.504 5 & 0.836 1 & 1 & \cdots & 0.231 0 \end{bmatrix}_{4 \times 20}$$

对 Z^* 标准化后得到矩阵 R^* , 根据式(3)、式(4)计算出各个可信指标的熵和熵权. 因本文中专家对各个可信指标的主观权重均相等,故而计算得到的熵权即为结合了主观权重的综合权重 λ_j^* . 表 3 给出了熵值及综合权重计算表.

表 3 熵值及综合权重计算表

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
H_j^*	0.778	0.625	0.564	0.789	0.658	0.459	0.658	0.316	0.459	0.258
λ_j^*	0.024	0.040	0.046	0.022	0.036	0.057	0.036	0.073	0.057	0.079
	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}
H_j^*	0.689	0.258 5	0.331	0.445	0.845	0.421	0.372	0.216	0.537	0.898
λ_j^*	0.033	0.079	0.071	0.059	0.016	0.061	0.067	0.083	0.049	0.011

最后,计算四个软件与“理想软件”的距离(表 4).

表 4 四个软件与理想点距离表

	A_1	A_2	A_3	A_4
d_1	0.589	0.521	0.864	0.329
d_2	0.232	0.198	0.326	0.165

由表 4 可得,四个参评软件的可信性排序为 $A_4 > A_2 > A_1 > A_3$,故而,在其他条件相同时,该银行在采用网上银行软件时,应优先考虑软件可信性度量值较高的第三个方案.

5 结束语

软件可信性研究虽然已成为正在兴起的热点研究领域之一,但以往的研究多是孤立地关注单维可信属性,鲜有综合考虑多维可信属性地对软件可信性综合度量的方法^[15]. 本文提出的软件可信性的 MAGDM 度量模型,研究多维可信属性的多尺度量化指标系统的建立、获取、度量以及评估. 本文通过实例验证了度量模型的合理性和有效性,对其他领域的软件可信性评估问题也具有一定的适用性.

下一步的工作中,我们仍需要加强现代化方法如元模型、数据挖掘、形式化语义分析及量化方法等关键领域的技术研究,并且在考虑多维可信属性间相互关系后,对模型近一步完善.

参考文献:

- [1] 刘克,单志广,王戟,等. “可信软件基础研究”重大研究计划综述[J]. 中国科学基金, 2005, 2(3): 145-151.
- [2] Basili V, Donzelli P, Asgari S. A unified model of dependability: Capturing dependability in context [J]. IEEE Software, 2004, 21(6): 19-25.
- [3] Uzunov K, Nguyen T. Dependability of software in airborne mission systems[R]. Australian Government Department of Defence, DSTOTR-2111, Defence Science and Technology Organization, 2008.
- [4] Paul R. An ontology-based integrated assessment framework for high-assurance systems[C]//The IEEE International Conference on Semantic Computing (ICSC). California, 2008: 386-393.
- [5] Whitworth B, Fjermestad J, Mahinda D. The web of system performance[J]. Communications of the ACM, 2006, 49(5): 93-99.
- [6] Water J G. Software dependability evaluation based on

- markov usage models[J]. Performance Evaluation, 2000, 40(4): 199-222.
- [7] Shi H L, Ma J, Zou F Y. Software dependability evaluation model based on fuzzy theory[C]//International Conference on Computer Science and Information Technology. France; Paris, 2008:102-106.
- [8] Ma Y F, Zhang M. A computation model of trustworthy degree[C]//International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops. Shanghai, 2008:523-526.
- [9] Mei L, Xu Y S. An adaptive dependability model of component-based software[J]. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 2003, 28(2):10-14.
- [10] Zhang Y, Fang B, Xu C Y. Trustworthy metrics models for internetwork[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2008, 13(5):547-552.
- [11] Zhu M X, Luo X X, Chen X H, et al. A non-functional requirements tradeoff model in Trustworthy Software[J]. Information Sciences, 2012(191):61-75.
- [12] 王怀民. 软件可信分级规范[EB/OL]. [2009-06-01]. <http://www.trustie.com>.
- [13] 邱苑华. 群组决策特征根法[J]. 应用数学和力学, 1997, 18(11):1027-1033.
- [14] 邱苑华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [15] 周剑, 张明新. 软件可信评估综述[J]. 计算机应用研

究, 2012, 29(10):3609-3613.

作者简介:



赵玉洁 女, (1986—), 博士研究生. 研究方向为管理信息系统和软件可信性评估.



罗新星 男, (1956—), 教授, 博士生导师. 研究方向为管理信息系统和软件可信性评估.



刘福军 男, (1989—), 硕士研究生. 研究方向为软件可信性评估.

(上接第 16 页)

- [2] Woodhouse D. JFFS: The Journaling flash file system [C]//Linux Symposium, 2001. Ottawa, 2001.
- [3] Manning C. YAFFS, the first NAND-specific flash file system[R]. Linux Devices, HK Trade Development Council, 2002.
- [4] Schmidt D. TrueFFS wear-leveling mechanism[J]. Technical Note(TN-DOC-017), M-Systems Flash Disk Pioneers, 2002(20):1-4.
- [5] 黄珊. 军用嵌入式系统中的 Flash 文件系统设计[J]. 现代电子技术, 2003(16):45-47.
- [6] 陈文华, 郭培源, 陈岩. S3C44BOX 嵌入式系统中 Flash 文件系统的设计与实现[J]. 北京工商大学学报:

自然科学版, 2006, 24(3):40-43.

- [7] 张明磊, 尚利宏. 几种源码开放的嵌入式文件系统分析与比较[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2007(11): 15-18.

作者简介:

李书根 男, (1985—), 硕士研究生. 研究方向为计算机应用技术.

潘海燕 男, (1964—), 研究员. 研究方向为实时嵌入式软件等.

王培 男, (1983—) 博士, 工程师. 研究方向为嵌入式计算机.