

文章编号: 1001-0920(2013)01-0147-05

基于2-可加模糊测度的仿真可信度评估方法

张忠, 方可, 杨明

(哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 哈尔滨 150080)

摘要: 传统的仿真可信度评估方法是基于同层指标之间相互独立的假设进行决策分析的, 该假设与仿真系统可信度评估的实际情况不相符. 针对这一问题, 首先, 结合摆幅置权法和比例标度法给出了一种新的2-可加模糊测度确定方法, 以此对指标间交互关系进行定量描述, 并在理论上证明了该方法的正确性; 然后, 基于所得2-可加模糊测度, 使用Choquet模糊积分对仿真系统的评估信息进行聚合, 得到仿真系统的可信度; 最后, 通过实例验证了所提出方法的有效性和合理性.

关键词: 可信度评估; 2-可加模糊测度; Choquet模糊积分; 摆幅置权法; 比例标度法

中图分类号: TH166

文献标志码: A

Method for simulation credibility evaluation based on 2-additive fuzzy measures

ZHANG Zhong, FANG Ke, YANG Ming

(Control & Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China. Correspondent: ZHANG Zhong, E-mail: zhangzhong0108@yahoo.cn)

Abstract: Decision-making using traditional methods for simulation credibility evaluation is based on the hypothesis of independence between indicators. This hypothesis does not conform to the actual condition of simulation credibility evaluation. Therefore, a new algorithm is proposed to identify 2-additive fuzzy measures based on the swing weighting and proportion criteria. The correctness of the algorithm is proved. Then, based on the identified 2-additive fuzzy measures, simulation credibility is obtained by using Choquet integral to aggregate the evaluation information. Finally, an example is given to validate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: credibility evaluation; 2-additive fuzzy measures; Choquet integral; swing weighting; proportion criteria

0 引言

随着仿真技术的不断发展和广泛应用, 仿真系统可信度评估受到了越来越多的关注^[1-3]. 仿真系统的可信度是仿真系统的使用者对应用仿真系统在一定环境、一定条件下仿真实验的结果, 解决所定义问题正确性的信心程度^[4]. 仿真可信度直接关系到仿真系统应用的成败, 缺乏足够可信度的仿真系统是无意义的.

传统的多属性评估方法一般均假设同层指标之间是相互独立的. 但是在实际的评估问题中, 评估对象自身的复杂性通常导致评估者无法建立满足指标独立性要求的评估指标体系. 针对这一问题, 文献[5]提出了一种基于相关矩阵的指标相关性消除方法, 但是该方法并不能完全消除指标间的相关性, 只能使指

标等价类之间的相关性减弱, 且指标等价类划分水平值 λ 的选取主观性过强. 文献[6]运用网络分析法建立了评估对象的网络化评估指标体系, 旨在全面地描述指标间的各种关联, 但是网络分析法自身就存在着各种缺陷. 文献[7]提出了一种基于“串并联”模型框架的作战效能评估方法, 其核心思想是将评价指标间关联分为串联、并联和混联3种形式, 并分别给出了计算模型, 但是该方法的适用条件较苛刻.

Sugeno于1974年提出了模糊测度和模糊积分概念. 模糊测度作为经典测度的延拓, 具有更强的表示能力, 能够定量描述指标间的交互关系. k -可加模糊测度是模糊测度的一种, 它覆盖了经典测度($k=1$)到一般模糊测度($k=n$)之间任意复杂度的模糊测度, 因此受到了越来越多的关注^[8-9]. 特别地, 2-可加模糊

收稿日期: 2011-07-17; 修回日期: 2011-12-12.

作者简介: 张忠(1986-), 男, 博士生, 从事仿真系统可信度评估的研究; 杨明(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂仿真系统评估、先进飞行器制导控制、基于视觉的运动参数测试与分析等研究.

测度兼顾了算法的复杂性和测度的表示能力,因此在实际中得到了广泛的应用^[10-11]. 模糊积分是定义在模糊测度上的一种非线性聚合函数,用于与模糊测度组合使用. 鉴于仿真系统可信度评估指标之间往往相互关联,本文引入模糊测度对指标间的关联进行描述,结合摆幅置权法^[12]、比例标度法^[13]、2-可加模糊测度和 Choquet 模糊积分,提出了基于 2-可加模糊测度的仿真可信度评估方法.

1 相关概念

为了便于叙述,假设 $X = \{1, 2, \dots, n\}$, 并用 μ_i, μ_{ij}, μ_K 分别表示 $\mu(\{i\}), \mu(\{i, j\}), \mu(K)$.

定义 1 设 X 是有限的集合, $P(X)$ 是 X 所有子集组成的集合,若集函数 $\mu: P(X) \rightarrow [0, 1]$ 满足如下条件,则称 μ 为定义在 $P(X)$ 上的模糊测度:

- 1) $\mu(\emptyset) = 0, \mu(X) = 1$;
- 2) $E \in P(X), F \in P(X), E \subset F, \mu(E) \leq \mu(F)$.

定义 2 若一个 n 维向量各分量的取值均为 0 或 1, 则称其为 n 维布尔向量. 用 $\{0, 1\}^n$ 表示所有 n 维布尔向量的全体, 实值函数 $f: \{0, 1\}^n \rightarrow R$ 称为伪布尔函数.

定义 3 若定义在 X 中的模糊测度 μ 对应的伪布尔函数是一个 k 次线性多项式, 则称其为 k -可加模糊测度.

对于 2-可加模糊测度, 若确定了测度 $\mu_i, \mu_{ij} (\forall i, j \in X \text{ 且 } i \neq j)$, 则由默比乌斯变换可知, 其他测度值为

$$\mu(K) = \sum_{\{i,j\} \subset K} \mu_{ij} - (|K| - 2) \sum_{i \in K} \mu_i, \forall K \subset X. \quad (1)$$

定义 4 设 μ 是定义在 X 上的模糊测度, f 是定义在 X 上的非负实值函数, 则 f 关于 μ 的 Choquet 模糊积分 $(c) \int f d\mu$ 定义为

$$\int f d\mu = \int_0^\infty \mu(\{x | f(x) > \alpha\}) d\alpha, \quad (2)$$

其中等式右边的积分是 α 的函数关于 Lebesgue 测度的积分.

若 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为有限集合, 则函数 f 是离散函数, 函数值为 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. 不失一般性, 假设 $a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_n$, 则 f 关于 μ 的 Choquet 模糊积分定义为

$$\int f d\mu = \sum_{i=1}^n (a_i - a_{i-1}) \mu(A_i). \quad (3)$$

其中: $a_0 = 0, A_i = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_n\}$.

2 基于 2-可加模糊测度的仿真可信度评估方法

2.1 2-可加模糊测度确定方法

本文结合摆幅置权法和比例标度法给出了一种

确定测度的新方法(以下简称 SR 算法), 具体步骤如下.

Step 1: 基于摆幅置权法的思想, 对指标集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中的指标进行两两比较, 构造摆幅矩阵 $V = (v_{ij})_{n \times n}$. 对于任意两个指标 x_i 和 x_j , 由专家从中挑选出一个最希望首先改进的指标, 不妨设为指标 x_i , 将专家所进行的这一改进工作的价值取为 100, 即 $v_{ij} = 100$. 从区间 $[0, 100)$ 选取一合理数值 v 作为指标 x_j 改进工作的价值, 即 $v_{ji} = v$. 显然, $\max(v_{ij}, v_{ji}) = 100, v_{ii} = 100, 0 \leq v_{ij} \leq 100, i, j = 1, 2, \dots, n$.

Step 2: 计算初始测度 $\mu'_i (1 \leq i \leq n)$. 由摆幅矩阵 V 求得比例标度意义下的两两比较判断矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n} = (v_{ij}/v_{ji})_{n \times n}$, 利用特征值法或幂法计算出每个指标的初始测度 $\mu'_i = \mu'(x_i), i = 1, 2, \dots, n$. 对判断矩阵 B 进行一致性检验, 如果检验通过, 则 $\mu'_i (1 \leq i \leq n)$ 即为 n 个指标的初始测度; 否则, 请专家调整摆幅矩阵 V 的赋值直至其通过检验.

Step 3: 根据两两指标间的交互关系和摆幅矩阵 V , 构造交合矩阵 $C = (c_{ij})_{n \times n}$. 当指标 x_i 和 x_j 为冗余关系时, 从区间 $[\max(v_{ij}, v_{ji}), v_{ij} + v_{ji}]$ 选取合理数值 v 作为同时改进指标 x_i 和 x_j 的价值, 即 $c_{ij} = v$; 当指标 x_i 和 x_j 为互补关系时, 从区间 $(v_{ij} + v_{ji}, +\infty)$ 选取合理数值 v 作为同时改进指标 x_i 和 x_j 的价值, 即 $c_{ij} = v$; 当指标 x_i 和 x_j 相互独立时, $c_{ij} = v_{ij} + v_{ji}$. 显然, $c_{ij} = c_{ji}, c_{ii} = 200, i, j = 1, 2, \dots, n$.

Step 4: 由摆幅矩阵 V 和交合矩阵 C 求得关联矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$, 其中

$$r_{ij} = (c_{ij} - v_{ij} - v_{ji}) / (v_{ij} + v_{ji}). \quad (4)$$

显然, $r_{ij} = r_{ji}, r_{ii} = 0, i, j = 1, 2, \dots, n$.

Step 5: 计算影响因子

$$\lambda = \min(1, k_1, k_2, \dots, k_n). \quad (5)$$

其中

$$k_i = \begin{cases} 1, & \forall r_{ij} \geq 0; \\ \frac{\mu'_i}{\sum_{1 \leq j \leq n, r_{ij} < 0} (-r_{ij})(\mu'_i + \mu'_j)}, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (6)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n.$$

显然有 $\lambda \geq 0$.

Step 6: 根据影响因子 λ 和关联矩阵 R , 利用式 (7) 计算初始测度 $\mu'_{ij} (i \neq j, 1 \leq i, j \leq n)$, 有

$$\mu'_{ij} = \mu'_i + \mu'_j + \lambda r_{ij} (\mu'_i + \mu'_j), \quad (7)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j.$$

Step 7: 计算 2-可加模糊测度. 根据 $\mu'_i (1 \leq i \leq n)$ 和 $\mu'_{ij} (i \neq j, 1 \leq i, j \leq n)$, 通过式 (1) 计算其他初始测

度值, 并对初始测度值进行归一化处理, 得到2-可加模糊测度.

下面证明SR算法求得的测度是2-可加模糊测度.

定理1 由SR算法确定的测度为2-可加模糊测度.

证明 首先证明SR算法确定的测度 μ 是模糊测度. 由于测度 μ 由初始测度 μ' 归一化所得, 只需证明初始测度 μ' 满足单调性. 下面分3种基本情况进行证明:

$$1) \mu'_i \leq \mu'_{ij}, \forall i, j \in X, i \neq j.$$

由式(7)可得 $\mu'_{ij} - \mu'_i = \mu'_j + \lambda r_{ij}(\mu'_i + \mu'_j)$, 当 $r_{ij} \geq 0$ 时, 显然有

$$\mu'_{ij} - \mu'_i = \mu'_j + \lambda r_{ij}(\mu'_i + \mu'_j) \geq 0,$$

即 $\mu'_i \leq \mu'_{ij}$. 当 $r_{ij} < 0$ 时, 由式(5)和(6)可知

$$\lambda \leq k_j = \frac{\mu'_j}{\sum_{1 \leq z \leq n, r_{jz} < 0} (-r_{jz})(\mu'_j + \mu'_z)} \leq \mu'_j / ((-r_{ji})(\mu'_j + \mu'_i)),$$

故有

$$\mu'_{ij} - \mu'_i = \mu'_j - \lambda(-r_{ij})(\mu'_i + \mu'_j) \geq 0,$$

即 $\mu'_i \leq \mu'_{ij}$.

$$2) \mu'_{ij} \leq \mu'_{ijz}, \forall i, j, z \in X, i \neq j \neq z.$$

由式(1)和(7)可得

$$\mu'_{ijz} - \mu'_{ij} = \mu'_z + \lambda r_{iz}(\mu'_i + \mu'_z) + \lambda r_{jz}(\mu'_j + \mu'_z).$$

当 $r_{iz}, r_{jz} < 0$ 时, 由式(5)和(6)可知

$$\lambda \leq k_z = \frac{\mu'_z}{\sum_{1 \leq i \leq n, r_{iz} < 0} (-r_{iz})(\mu'_i + \mu'_z)} \leq \mu'_z / ((-r_{iz})(\mu'_i + \mu'_z) + (-r_{jz})(\mu'_j + \mu'_z)),$$

故有

$$\mu'_{ijz} - \mu'_{ij} = \mu'_z - \lambda(-r_{iz})(\mu'_i + \mu'_z) - \lambda(-r_{jz})(\mu'_j + \mu'_z) \geq 0,$$

即 $\mu'_{ij} \leq \mu'_{ijz}$.

同理可证, 当 $r_{iz} \geq 0$ 或 $r_{jz} \geq 0$ 时, $\mu'_{ij} \leq \mu'_{ijz}$.

$$3) \mu'_K \leq \mu'_{K \cup \{i\}}, \forall i \in X, K \subset X \setminus \{i\}, |K| \geq 3.$$

由式(1)和(7)可得

$$\begin{aligned} \mu'_{K \cup \{i\}} - \mu'_K &= \sum_{j \in K} \mu'_{ij} - \sum_{j \in K} \mu'_j - |K| \mu'_i + \mu'_i = \\ &= \mu'_i - \lambda \sum_{j \in K} (-r_{ij})(\mu'_i + \mu'_j) \geq \\ &= \mu'_i - \lambda \sum_{1 \leq j \leq n, r_{ij} < 0} (-r_{ij})(\mu'_i + \mu'_j). \end{aligned}$$

又由式(5)和(6)可知

$$\lambda \leq k_i = \frac{\mu'_i}{\sum_{1 \leq j \leq n, r_{ij} < 0} (-r_{ij})(\mu'_i + \mu'_j)},$$

故有

$$\mu'_{K \cup \{i\}} - \mu'_K = \sum_{j \in K} \mu'_{ij} - \sum_{j \in K} \mu'_j - |K| \mu'_i + \mu'_i \geq 0,$$

即 $\mu'_K \leq \mu'_{K \cup \{i\}}$.

综上, 初始测度 μ' 满足单调性, 测度 μ 为模糊测度. 又因为SR算法首先确定模糊测度 μ_i 和 $\mu_{ij} (\forall i, j \in X \text{ 且 } i \neq j)$, 其他模糊测度值通过式(1)计算得出, 所以由SR算法确定的测度为2-可加模糊测度. \square

2.2 基于2-可加模糊测度的仿真可信度评估方法

指标互补是指两组指标 E, F 组合在一起的贡献大于这两组指标单独的贡献之和, 即 $\omega(E \cup F) > \omega(E) + \omega(F)$; 指标冗余是指两组指标 E, F 组合在一起的贡献小于这两组指标单独的贡献之和, 即 $\omega(E \cup F) < \omega(E) + \omega(F)$; 指标独立是指两组指标 E, F 组合在一起的贡献等于这两组指标单独的贡献之和, 即 $\omega(E \cup F) = \omega(E) + \omega(F)$.

鉴于仿真系统可信度评估指标之间通常存在着冗余、互补等关系, 本文结合上节给出的SR算法, 提出了基于2-可加模糊测度的仿真可信度评估方法, 具体步骤如下.

Step 1: 在遵循指标体系的完备性、可比性、可行性等设计原则的前提下, 由仿真系统用户、系统开发人员和评估人员反复磋商论证, 构建仿真系统的可信度评估指标体系. 这里特别注意, 评估指标不能过于细化, 否则会带来附加误差和增加不必要的工作; 评估指标不够细化则会增加底层指标可信度的评估难度.

Step 2: 请专家组对评估指标体系中同层指标间的关联性进行分析, 基于专家组的分析结论, 利用SR算法确定各层指标的2-可加模糊测度, 从而有效地对指标间独立、互补、冗余等关系进行定量描述.

Step 3: 根据对仿真系统校核和验证的工作成果, 由专家组协商给出底层指标的可信度. 该可信度可以通过数学推理、实验测试等客观确定, 也可以由领域专家根据自身的专业知识和经验主观确定, 但一定要得到专家组多数成员的认可. 当专家组成员无法达成共识时, 可以采用统计分析方法来综合专家组成员的不同意见, 得到所需的底层指标可信度.

Step 4: 根据评估指标体系中各层指标的2-可加模糊测度和底层指标的可信度, 利用Choquet模糊积分, 自下向上逐层对仿真系统的评估信息进行聚合, 最终获得仿真系统的整体可信度.

3 应用实例

下面以某野战防空群仿真系统的可信度评估为例,说明方法的有效性.

1) 根据专家组对该野战防空群仿真系统的结构功能分析,建立可信度评估指标体系.限于篇幅,本文对指标体系进行了简化,如图 1 所示.

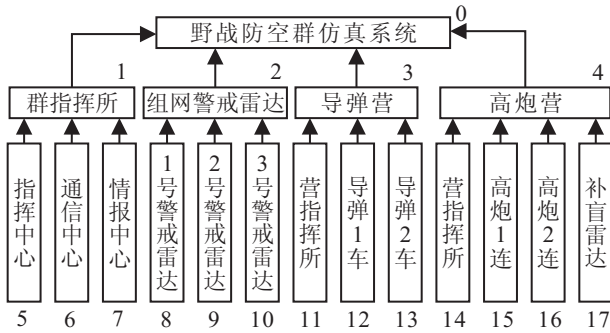


图 1 野战防空群仿真系统的可信度评估指标体系

2) 由专家组对同层指标间关联性的分析可知,指标集{5,6,7}, {11,{12,13}}, {14,{15,16}}存在互补关系;指标集{8,9,10}, {12,13}, {15,16}存在冗余关系.基于上述分析结论,利用 SR 算法确定各指标层的 2-可加模糊测度.限于篇幅,这里只给出指标集{8,9,10}的 2-可加模糊测度确定过程.

Step 1: 基于摆幅置权法的思想,对指标集{8,9,10}中的指标进行两两比较,得到摆幅矩阵 V 和相应的判断矩阵 B 分别为

$$V = \begin{bmatrix} 100 & 92 & 100 \\ 100 & 100 & 100 \\ 95 & 93 & 100 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0.920 & 1.053 \\ 1.087 & 1 & 1.075 \\ 0.950 & 0.930 & 1 \end{bmatrix}.$$

采用特征值法求得单个指标的初始测度: $\mu'_8 = 0.330$, $\mu'_9 = 0.351$, $\mu'_{10} = 0.319$. 判断矩阵 B 的随机一致性比率 $CR = 0.0005 < 0.1$,符合一致性要求.

Step 2: 根据指标 8、指标 9 和指标 10 间的冗余关系,结合摆幅矩阵 V ,得到交合矩阵 C ,再利用式 (4) 求得关联矩阵 R ,分别为

$$C = \begin{bmatrix} 200 & 176 & 183 \\ 176 & 200 & 169 \\ 183 & 169 & 200 \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 & -0.083 & -0.062 \\ -0.083 & 0 & -0.124 \\ -0.062 & -0.124 & 0 \end{bmatrix}.$$

Step 3: 根据式 (5) 和 (6) 计算影响影子

$$\lambda = \min(1, k_8, k_9, k_{10}) = 1.$$

Step 4: 根据影响因子 λ 和关联矩阵 R ,由式 (7) 求得初始测度: $\mu'_{8,9} = 0.625$, $\mu'_{8,10} = 0.609$, $\mu'_{9,10} = 0.587$.

Step 5: 根据 $\mu'_i (8 \leq i \leq 10)$ 和 $\mu'_{ij} (i \neq j, 8 \leq i, j \leq 10)$,利用式 (1) 计算其他初始测度值.对初始测度值做归一化处理,得到指标集{8,9,10}的 2-可加模糊测度值,见表 1.

表 1 指标集{8,9,10}的 2-可加模糊测度值

A	μ_A	A	μ_A	A	μ_A
\emptyset	0	{10}	0.389	{9,10}	0.715
{8}	0.402	{8,9}	0.761	{8,9,10}	1
{9}	0.428	{8,10}	0.742		

指标集{1,2,3,4}, {5,6,7}, {11,12,13}, {14,15,16,17}的 2-可加模糊测度值见表 2~表 5.

表 2 指标集{1,2,3,4}的 2-可加模糊测度值

A	μ_A	A	μ_A	A	μ_A
\emptyset	0	{1,3}	0.561	{1,2,4}	0.733
{1}	0.294	{1,4}	0.485	{1,3,4}	0.752
{2}	0.248	{2,3}	0.515	{2,3,4}	0.706
{3}	0.267	{2,4}	0.439	{1,2,3,4}	1
{4}	0.191	{3,4}	0.458		
{1,2}	0.542	{1,2,3}	0.809		

表 3 指标集{5,6,7}的 2-可加模糊测度值

A	μ_A	A	μ_A	A	μ_A
\emptyset	0	{7}	0.214	{6,7}	0.522
{5}	0.258	{5,6}	0.453	{5,6,7}	1
{6}	0.183	{5,7}	0.666		

表 4 指标集{11,12,13}的 2-可加模糊测度值

A	μ_A	A	μ_A	A	μ_A
\emptyset	0	{13}	0.293	{12,13}	0.546
{11}	0.453	{11,12}	0.747	{11,12,13}	1
{12}	0.293	{11,13}	0.747		

表 5 指标集{14,15,16,17}的 2-可加模糊测度值

A	μ_A	A	μ_A	A	μ_A
\emptyset	0	{14,16}	0.537	{14,15,16}	0.707
{14}	0.341	{14,17}	0.634	{14,15,17}	0.829
{15}	0.195	{15,16}	0.366	{14,16,17}	0.829
{16}	0.195	{15,17}	0.488	{15,16,17}	0.659
{17}	0.293	{16,17}	0.488	{14,15,16,17}	1
{14,15}	0.537				

3) 根据对该野战防空群仿真系统的校核和验证工作,经专家组协商可得底层指标的可信度值为

$$S_5 = 83.52, S_6 = 80.67, S_7 = 61.58, S_8 = 81.74,$$

$$S_9 = 84.33, S_{10} = 88.94, S_{11} = 83.88, S_{12} = 86.17,$$

$$S_{13} = 86.17, S_{14} = 78.33, S_{15} = 94.36,$$

$$S_{16} = 94.36, S_{17} = 81.05.$$

4) 依据底层指标的可信度和各层指标的模糊测度值, 利用 Choquet 模糊积分, 自下向上逐层计算, 求得野战防空群仿真系统的可信度为 81.00, 其中 $S_1 = 70.96$.

采用传统的仿真可信度评估方法进行验证, 不考虑指标间的关联, 直接利用可加性聚合模型对指标 5、指标 6 和指标 7 的评估信息进行聚合, 则有

$$S'_1 = \frac{S_5\mu_5 + S_6\mu_6 + S_7\mu_7}{\mu_5 + \mu_6 + \mu_7} = 75.25.$$

因为指标 5、指标 6 和指标 7 为互补关系, 三者兼顾才能保证指标 1 的可信度, 所以指标 7 过低的可信度导致指标 1 的可信度也较低. $S_1 < S'_1$ 这一结果表明本文所提方法能够有效弥补传统可信度评估方法的不足, 使得评估结论更趋于客观合理.

4 结 论

传统的仿真可信度评估方法使用可加性聚合模型对仿真系统不同方面的评估信息进行聚合, 然而, 仿真系统的可信度评估指标之间往往存在各种关联, 并不满足可加性聚合模型的指标间独立性假设. 针对这一问题, 本文给出了一种确定 2-可加模糊测度的新方法, 进而提出了基于 2-可加模糊测度的仿真可信度评估方法. 此方法能够有效地帮助评估者对指标间的交互关系进行描述和确定, 在仿真可信度评估领域中具有较好的应用前景.

参考文献(References)

- [1] Liu Fei, Yang Ming. An optimal design method for simulation verification validation and accreditation schemes[J]. Simulation, 2009, 85(6): 375-386.
- [2] 方可, 王子才. 用于仿真系统可信度评估的 CES 网方法研究[J]. 控制与决策, 2011, 26(5): 737-742.
(Fang K, Wang Z C. CES net method for simulation system's credibility evaluation[J]. Control and Decision, 2011, 26(5): 737-742.)
- [3] 张忠, 方可, 杨明. 基于群组 AHP 的复杂仿真系统可信度评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(11): 2569-2572.
(Zhang Z, Fang K, Yang M. Method for complex simulation credibility evaluation based on group AHP[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(11): 2569-2572.)
- [4] 王子才. 关于仿真实理论的探讨[J]. 系统仿真学报, 2000, 11(6): 604-608.
(Wang Z C. Research on simulation theory[J]. J of System Simulation, 2000, 11(6): 604-608.)
- [5] 徐祥发, 肖人彬. 评价指标相关性的消除方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 1-5.
(Xu X F, Xiao R B. An approach of eliminating correlation of assessment index[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2002, 22(11): 1-5.)
- [6] 石福丽, 杨峰, 许永平, 等. 基于 ANP 和仿真的武器装备作战能力幂指数评估方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6): 1086-1094.
(Shi F L, Yang F, Xu Y P, et al. Power index method for operational capability evaluation of weapon equipment based on ANP and simulation[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2011, 31(6): 1086-1094.)
- [7] 金伟新. “串并联”模型框架与作战效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(7): 41-43.
(Jin W X. The series-parallel connection models frame and the combat capability evaluation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(7): 41-43.)
- [8] Combarro E F, Miranda P. On the structure of the k-additive fuzzy measures[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2010, 161(17): 2314-2327.
- [9] Miranda P, Grabisch M, Gil P. Axiomatic structure of k-additive capacities[J]. Mathematical Social Sciences, 2005, 49(2): 153-178.
- [10] Mayag B, Grabisch M, Labreuche C. A characterization of the 2-additive Choquet integral through cardinal information[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2011, 18(1): 84-105.
- [11] Buyukozkan G, Feyzioglu O, Ersoy M S. Evaluation of 4PL operating models: A decision making approach based on 2-additive Choquet integral[J]. Int J of Production Economics, 2009, 121(1): 112-120.
- [12] Keeney R L, Raiffa H. Decisions with multiple objectives: preference and value tradeoff[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993: 1-569.
- [13] 黄德才, 胥琳. AHP 法中判断矩阵的比例标度构造法[J]. 控制与决策, 2002, 17(4): 484-486.
(Huang D C, Xu L. Proportion criteria and method for building comparison matrices in the analytic hierarchy process[J]. Control and Decision, 2002, 17(4): 484-486.)