基于 DS 证据理论的复杂产品仿真可信度评估方法①

刘博元 [1], 张凌宇 [1], 范文慧 [1], 曲慧杨 [2], 侯宝存 [2]

[1](清华大学 自动化系, 北京 100084)
[2](北京仿真中心, 北京 100854)

摘 要: 计算机建模仿真已经发展为重要的产品开发和系统测试手段. 仿真可信度对于仿真结果非常重要, 但评估仿真可信度的过程常常较为繁琐. 因此, 需要一个能够便捷正确地评价仿真可信度的评估方法, 来完成体系建立、定性定量评估、专家意见汇总等工作. 本文介绍了 DS 证据理论的原理及其应用, 并对传统 DS 证据理论在评价系统中应用的局限性进行了改进, 同时引入了凸证据作为辅助, 建立了基于 DS 证据理论的复杂产品仿真可信度评估方法. 文章最后结合一个算例具体说明了该理论在仿真可信度评估中的应用.

关键词: 复杂产品仿真; 仿真可信度; DS 证据理论; 专家打分; 凸证据

Methodology of Simulation Credibility Evluation for Complex Product Based on DS Evidence Theory

LIU Bo-Yuan[1], ZHANG Ling-Yu[1], Fan Wen-Hui[1], QU Hui-Yang[2], HOU Bao-Cun[2]

[1](Dept. of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
[2](Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: Computer modeling simulation has been developed as an important means of product development and system testing. Simulation credibility is critical to simulation results, but the procedure of credibility evaluation is usually very cumbersome. Therefore, there is a need for a proper method of simulation credibility evaluation, which can finish the work of system establishment, quantitative evaluation, qualitative evaluation and expert advice collection. This paper introduces the principle and application of DS evidence theory, and improves it for the implementation in evaluation system. With the auxiliary of convex evidence, a methodology of simulation credibility evaluation for complex product based on DS evidence theory is established. Finally, an example is showed to illustrate the concrete application of this method in the evaluation of simulation credibility.

Key words: complex product simulation; credibility evaluation; DS evidence; expert estimation; convex evidence

针对系统仿真可信度评估的研究很多, 比较常见的有扩展贝叶斯方法[1]、层次分析法[2]、DS 证据理论等评估方法及其扩展. DS 证据理论是一种模糊推理方法, 也称为 Dempster/Shafer 证据理论. 该理论先由 Dempster 的工作奠定基础, 再由他的学生 Shafer 进一步完善而成的[3]. 证据理论可以有效地根据多种信息来源所表达对不同策略的倾向, 进行决策选择出最受支持的方案.

随着 DS 证据理论的不断完善, 已有多位学者将证据理论应用到不同领域的可靠性、可信度评估中. 刘飞提出了一个可信度量化指导框架, 建立了适合复杂仿真系统的可信度评估指标体系, 并针对复杂仿真系统可信度量化主观性和不确定性比较强的特点给出可信度量化途径, 最终证据理论合并评估意见和评估指标[4]. 周光中以 D-S 证据理论为基础建立了一种简单实用的多遴选指标层次结构模型, 构建评审专家遴选指标体系, 提出了基于衰退系数的命中率和基于衰退系数的离散率两个定量指标及相应的计算方法[5]; 刘辉舟运用证据理论和多属性决策方法, 构建了复杂场景下的多 Agent 对抗实时决策模型, 开发出多 Agent

① 收稿时间:2013-09-11;收到修改稿时间:2013-10-28

对抗决策仿真实验平台[6]. 陈根忠利用 D-S 合成公式和多数据源对不同指标进行综合, 最终得到评估装备的作战效能[7]. 邵志平等通过证据聚合作用来综合多个不同类型专家的意见, 并成功运用到指挥自动化系统效能的评估中[8].

为了使仿真可信度评估这项复杂的工作能够便捷的按正确的流程运行下来, 最终得到一个较为可信的评估结果, 本文将对 DS 证据理论的应用做出一些改进, 提出一种基于 DS 证据理论的仿真可信度评估方法.

1 DS证据理论在评估中的应用

在仿真可信度评估中, 通常以专家的意见作为参考进行分析. 由于专家意见具有一定的主观性和模糊性, 所以通常使用九级标度划分的论域来表述: 将整个论域划分为九个等级, 专家使用对各等级的支持度来反应意见好坏程度. 如果评价结果的真值落在其中一个区间中, 那么需要一个方法来通过专家的不同意见综合出真值的可能分布, 那么专家意见合成的问题就转化为一个决策问题, 所以使用 DS 证据理论是合适的. 由于多个专家各自领域知识偏好侧重不同, 对于同一个评估指标给出的评估意见和结果往往存在差异, 这种差异或大或小, 为了将多位专家的意见综合成为一个更具权威性和可信性的结果, 采用 DS 证据理论作为融合方法.

论域的量化规则如表 1 所示:

表 1 论域空间的 9 级划分

定性意见	量化评价区间	代表值
最差	(-999,1.5)	1
很差	[1.5,2.5)	2
差	[2.5,3.5)	3
较差	[3.5,4.5)	4
一般	[4.5,5.5)	5
较好	[5.5,6.5)	6
好	[6.5,7.5)	7
很好	[7.5,8.5)	8
最好	[8.5,999)	9

由于专家的意见是一个模糊的概念, 专家在评价中可以选择三个评价来直接确定一个三元模糊数:

$$e=\begin{pmatrix} l \\ m \\ r \end{pmatrix}$$

亦可专家对自己的意见的确信程度进行评价来生成三元模糊数. 三个确信等级分别为: 很不确定(ε =1.5), 确定(ε =1.0), 很确定(ε =0.5). 再根据专家做出的评价意见的典型值(m)得到专家意见.

$$e=\begin{pmatrix} m-\varepsilon \\ m \\ m+\varepsilon \end{pmatrix}$$

将得到的三元模糊数按照隶属度计算其在所有量化评价区间上的隶属度, 将三元数对某区间的隶属度作为专家对该评价等级的证据质量.

当有多个专家对同一指标进行评价时, 各自所得的结果按照证据组合的方法进行融合:

1.如果 K 接近于 0, 可以直接使用正交和来进行证据组合.

2.如果 K 接近于 1, 则使用比正交和进一步的方法来进行证据组合, 来得到更加合理的结果.

通常两个证据来源对于同一策略集的 Mass 正交和运算为:

$$m_1+m_2(Z)=\sum_{\psi\cap\phi=Z} m_1(\psi)m_2(\phi)$$

但上式只取了证据源相符的部分, 但是当 m_1, m_2 存在冲突时会产生对策略集 Φ 的 Mass, 也就是对所有策略的反驳. 这部分意见因为和所有其他证据都矛盾, 所以在组合中只会增长不会减少, 而且对于决策没有意义. 所以引入标准化方法重新定义正交和运算:

$$m_1+m_2(Z)=\frac{1}{1-K}\sum_{\psi\cap\phi=Z} m_1(\psi)m_2(\phi)$$

其中 $K=\sum_{\psi\cap\phi=Z} m_1(\psi)m_2(\phi)$.

对于专家评估问题, 使用简单的正交和来进行证据组合是不够的. 用一个极端的例子来说明, 假设将整个评价论域分为 3 个评价:

$\theta=\{\theta_1=$差$, \theta_2=$一般$, \theta_3=$好$\}$

专家一给出评价: $m_1(\theta_1)=0.6$, $m_1(\theta_2)=0.2$, $m_1(\theta_3)=0.1$.

专家二给出评价: $m_2(\theta_1)=0.1$, $m_2(\theta_2)=0.2$, $m_2(\theta_3)=0.6$.

通过直接正交和的计算, 得到 K 为:

K=0.6×0.8+0.2×0.7+0.1×0.3=0.65

全局变量为:

$$\mathrm{m}_1+\mathrm{m}_2\begin{pmatrix}\theta_1\\\theta_2\\\theta_3\end{pmatrix}=\frac{1}{0.35}\times\begin{pmatrix}0.17\\0.11\\0.17\end{pmatrix}$$

可见结果显示支持评价结果“差”和“好”的证据充足，但评估并不应以两个极端的评价为结果，这样的结果并不能为评估提供参考意见.

这个问题的出现在于上述的证据组合理论并没有考虑到专家评价意见的连续性，即从差至好的递进关系. 所以在融合时仅仅考虑了相同意见支持的融合，而没有考虑相邻意见的融合.

根据专家问题的特性，在应用证据理论时对，再其进行一定改进:

先对问题进行简化，由于评价往往是对多个单一评价等级进行的支持，所以认为:

m(ψ)=0，ψ中元素个数不为 1

再借助类似凸函数的方法引入凸证据的概念.

凸证据是指在连续的论域中，一个给定的证据，任意两个评价等级之间的评价等级的证据质量均大于等于这两个等级证据质量中的最小者，这样的证据就是凸证据. 也即有如下的性质.

$$\forall i\le j\le k, \mathrm{M}(\theta_j)\ge\min(\mathrm{m}(\theta_i),\mathrm{m}(\theta_k))$$

这样的证据更加贴近可以接受的评价结果，同时容易说明有三元模糊数生成的证据都是凸证据.

在进行凸证据的组合时，引入一个向心修正，先求 n 个专家的在九个评价意见上的意见重心:

$$g=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{\sum_{i=1}^{9}\mathrm{i}\cdot\mathrm{m}_k(\theta_i)}{\sum_{i=1}^{9}\mathrm{m}_k(\theta_i)}$$

而后，定义凸组合 $\sum\mathrm{m}_k$

$$\left(\sum\mathrm{m}_k\right)(\theta_i)=\frac{\mathrm{M}(\theta_i)}{\sum\mathrm{M}(\theta_i)}$$

$$\mathrm{M}(\theta_i)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{\mathrm{m}_k(\theta_i)}{|i-g|+0.5}$$

可以证明 $\sum\mathrm{m}_k$ 所得新的证据仍然是凸证据.

上面简单例子经过这个改进后的算法组合得到的组合证据为:

g=2

$$m_1+m_2\begin{pmatrix}\theta_1\\\theta_2\\\theta_3\end{pmatrix}=\frac{1}{2}\times\begin{pmatrix}\frac{0.8}{1.5}\\\frac{0.4}{0.5}\\\frac{0.8}{1.5}\end{pmatrix}=\frac{1}{7}\times\begin{pmatrix}2\\3\\2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0.286\\0.429\\0.286\end{pmatrix}$$

符合作为评估结果的要求. 即结果显示专家意见结果支持“一般”意见.

2 D-S证据理论计算示例

为了评估“某系统仿真可信度”中某个定性指标“可视化系统”中的“正确性”，可以使用 DS 证据理论来处理专家对这个指标的意见.

首先收集专家意见数据，共 4 位专家打分如表 2 所示下:

表 2 专家打分

	L	M	R
专家 1	4.5	6	7.5
专家 2	8	9	10
专家 3	6	7	8
专家 4	7.5	8	8.5

然后分别计算四位专家打分在 9 级论域划分标准下对各等级的支持度:

表 3 专家打分对各等级的支持度

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
专家 1					0.222	0.555	0.222		
专家 2								0.125	0.875
专家 3						0.125	0.75	0.125	
专家 4								1	

根据凸证据理论，先计算出 g=7.469，再根据下式进行综合专家结果如下:

$$\mathrm{M}(\theta_i)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{\mathrm{m}_k(\theta_i)}{|i-g|+0.5}$$

表 4 最终计算结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
结果					0.0404	0.1340	0.2380	0.3992	0.1883

可见结果主要集中于“好”、“很好”和“最好”之中，同时综合结果也令人满意

3 结语

通过 DS 证据理论并结合在复杂仿真系统可信度评估中的实际应用需求，本文对 DS 证据理论做了改进，提出了基于 DS 证据理论的复杂产品仿真可信度评估方法，得到的凸组合的结果更加符合逻辑判断组合的方式，从而得到了表达更为合理的结果. 文章还通过算例验证了该理论在仿真可信度评估中的可用性.

参考文献

1 黄炎焱,杨峰,雷震,王维平.基于扩展贝叶斯方法融合的作战效能评估研究.系统仿真学报,2007,19(4):856–864.

2 李家宽,杨惠珍,谢会桄.基于群体 AHP 的仿真可信度评估方法研究.系统仿真学报,2010,(9):2065–206.

3 Shafer G. A mathematical theory of evidence. Princeton: Princeton university press, 1976.

4 刘飞,马萍,杨明,王子才.复杂仿真系统可信度量化研究.哈尔滨工业大学学报,2007,(1):1–3.

5 周光中.基于 D_S 证据理论的科学基金立项评估问题研究[博士学位论文].合肥:合肥工业大学,2009.

6 刘辉舟.基于证据理论的多 Agent 对抗决策研究[硕士学位论文]. 合肥:合肥工业大学,2012.

7 陈根忠,刘湘伟,杜红兵.D-S 证据理论在作战效能评估中的应用.电光与控制,2010,(2):88–91.

8 邵志平,沈威力.D-S 理论在指挥自动化系统效能评估中的应用.哈尔滨工业大学学报,2001,(5):693–696.