

基于影响网的仿真风险分析

陈永兴, 吴晓燕, 滕江川, 卜祥伟

(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

【摘要】针对仿真风险难以量化分析的问题,提出了基于影响网的仿真风险分析方法。考虑到仿真失效影响的多样性,对仿真风险的描述进行了改进,以风险分析的失效模式、决策效应和严重等级为节点,建立仿真风险分析影响网模型,设计了影响网参数的确定方法,实现了失效模式及因果关系的定量化表达,给出了影响网因果关系的运算方法,通过引入二元语义方法实现了分析结果的综合,得到了半定量形式的仿真风险分析结果。通过实例应用证明了该方法的有效性和可用性。

关键词 因果强度; 影响网; 风险分析; 仿真风险

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.01.021

Simulation Risk Analysis Based on Influence Nets

CHEN Yong-xing, WU Xiao-yan, TENG Jiang-chuan, and BO Xiang-wei

(School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University XI'an 710051)

Abstract A simulation risk analysis method based on influence nets is proposed for simulation risk quantitative analysis. The simulation risk description is improved for considering variety impact of simulation failure. The influence nets model of simulation risk analysis is established by taking failure modes, decision effect and impact levels as influence nets nodes. A method for determining influence nets parameters is designed to make the quantitative description of failure mode and causal relationship to be reality. An algorithm to calculate the causal strength is given. The semi-quantitative express of simulation risk analysis is carried out by introducing two-tuple linguistic to mass the analysis results. Finally, an example is given to prove the validity and feasibility of this method.

Key words causal strength; influence nets; risk analysis; simulation risk

仿真技术的发展为人类提供了一种新的认识世界和改造世界的方法,但随着仿真对象复杂程度的提高,仿真会存在缺陷,不正确、不合适的仿真结果或存在较大风险的仿真系统将导致决策的失误,从而带来军事、经济损失,甚至威胁人员安全^[1]。

仿真风险是仿真可信性研究的重要内容,是仿真确认的重要依据。用户对仿真的信心取决于用户在利用仿真做决策时所愿意承担的风险。但实际上用户通常不可能详细地描述风险或者他们对这些风险的忍受能力,而且也几乎不可能用客观术语表达风险或忍受能力,导致风险的忍受限度常常很难量化,必须开发可操作的方法去区分和量化风险^[2]。本文在分析仿真风险评估存在问题的基础上,对仿真风险的描述形式进行了改进,为综合考虑失效模式的影响,提出了基于影响网^[3-4](influence nets, IN)的仿真风险分析方法,建立了基于影响网的仿真风

险分析模型,给出了影响网的建立方法,实现了仿真风险分析过程的定量化,采用二元语义方法^[5-6]对仿真风险分析结果进行综合,得到风险的半定量表达形式。

1 相关研究

仿真风险一直是国内外仿真领域研究的重要内容之一,在近几年的美国冬季仿真会议上都有仿真风险的专门讨论。美国国防部(DoD)VV&A RPG风险特别专题^[7]以美国军方标准“系统安全程序需求”(system safety program requirement, SSPR)MIL-STD-882C/D的风险定义^[8]为基础,对仿真风险评估、分类以及仿真风险和VV&A的关系进行了说明,并将风险分成了开发风险(development risk)和应用风险(operational risk),建议采用失效模式及影响危害性分析(failure modes and impact criticality analysis,

FMICA)来评估开发风险,而应用风险则按照MIL-STD-882C/D给出的方法来分析。Kilikauskas^[2]对仿真校核、验证与确认(Verification Validation and Accreditation: VV&A)和仿真风险的关系进行了研究,指出VV&A是仿真风险消减的有效措施,并对风险分析方法和分析准则进行了研究,对基于风险的VV&A项目进行了总结,建议采用FMICA方法进行风险分析。Elele^[9-10]对VV&A的风险水平评估进行了研究,提出了基于风险的VV&A过程,以风险分析为依据指导VV&A的实施,采用的方法仍然是FMICA。文献[11-12]分别对基于风险的VV&A管理和VV&A任务优选进行了研究,风险分析方法仍是FMICA类的分析方法。当前仿真风险研究主要集中在仿真风险的应用和单个失效模式上,风险分析方法的研究,特别是定量综合风险分析方法的研究相对较少。

按照MIL-STD-882C/D定义的风险评估方法,认为风险由三个因素组成,即事件、事件发生的可能性和事件发生产生的影响,其关系为:

$$R = I(E)P(E) \quad (1)$$

式中, E 为可能造成风险的事件; $I(E)$ 为事件 E 发生产生的影响; $P(E)$ 为事件 E 发生的可能性。

FMICA和FMECA(failure mode, effect and criticality analysis)即故障模式影响及危害性分析是仿真风险分析的常用方法,二者本质上是同一种方法,也都得到了一定的应用,但还存在如下问题: 1) 失效模式的影响分析不全面。失效产生的影响是多方面的,而且对各影响的作用大小也不同,FMICA没能给出详细的影响合成方法; 2) 只考虑失效发生时的危害性,没考虑失效修复或不发生时的影响和效益。失效发生时的危害性,在失效修复时会变成效益,而失效发生时的效益则可能转变为危害,因此,失效的影响应该是危害和效益的综合,单以危害性为依据进行风险分析和指导VV&A活动是不合理的; 3) 完全采用定性语言描述给风险分析结果带来了不确定性,其结果无法真正有效的指导VV&A活动。结合以上分析,将式(1)修改为:

$$R = I(E) \cdot P(E) + I(\bar{E}) \cdot P(\bar{E}) \quad (2)$$

式中, E 为可能造成风险的事件; $I(E)$ 为事件 E 发生时产生的危害和效益; $P(E)$ 为事件 E 发生的可能性; $I(\bar{E})$ 为事件 E 不发生时产生的危害和效益; $P(\bar{E})$ 为事件 E 不发生的可能性。

影响网是一种集事件的积极影响、消极影响以及事件发生概率于一体的表达方式,其网状结构能

够表达事件影响关系的复杂性,非常适合仿真风险的定量分析,通过建立事件的影响网模型,综合失效模式的危害性和效益来对仿真风险进行分析,更加符合仿真实际。

2 基于影响网仿真风险分析

2.1 影响网理论

影响网由美国George Mason大学Chang等人在1994年推广Noisy-Or贝叶斯网方法的基础上提出。它不仅考虑事件发生对结果事件的影响,也把事件不发生造成的影响也在模型中体现出来,应用中只需指定因果强度(causal strength, CAST)逻辑参数^[3],不需指定条件概率,指定的参数个数减少,参数表达的涵义更明确、直观,降低了主观因素的影响。同时利用循环信度传播算法的变种进行概率推理,是非NP-hard的^[4]。其典型结构如图1所示。

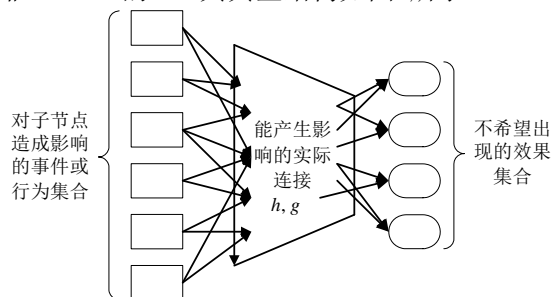


图1 影响网结构

影响网是一种有向无环图,可定义为:

$$IN = G(V, E, C, B) \quad (3)$$

式中, V 表示节点集,是决策者所关注的系统事件; E 表示边集,代表事件发生的因果关系。没有输入弧的节点为根节点,称为可控事件;没有输出弧的节点为叶节点,称为目标事件;既有输入弧又有输出弧的为中间节点(事件),在可控事件与目标事件之间起逐层传递影响的作用; C 表示连接强度,通常以一对CAST逻辑参数 (h, g) 来表示:

$$C: E \rightarrow \{(h, g), -1 \leq h, g \leq 1\} \quad (4)$$

式中, h 为根节点事件发生对叶节点事件产生的影响; g 为根节点事件不发生对叶节点事件产生的影响,其符号“+”表示促进关系,“-”表示抑制关系,数值“1”表示影响强度最大,数值“0”表示没有影响。

B 表示先验概率或基准概率,通常根据事件的统计结果获取,其定义为:

$$B: V \rightarrow [0, 1] \quad (5)$$

结合仿真风险分析的过程,建立的仿真风险影响网应包含失效模式层、决策效应层和严重等级层,

其中的决策效应层是指由依据失效仿真作出决策所产生的后果, 详细定义可参见文献[7], 而严重等级是指决策效应所产生影响大小, 仿真风险由影响层因素的加权综合。各层之间的影响通过因果强度进行传递, 定量计算通过因果强度逻辑算法实现。

2.2 因果强度逻辑算法

因果强度逻辑是影响网进行数据合成的核心算法, 图2为一个简单的因果关系, 它由三个父节点(A,B,C)和一个子节点X组成。下面以其为例说明因果强度逻辑算法。

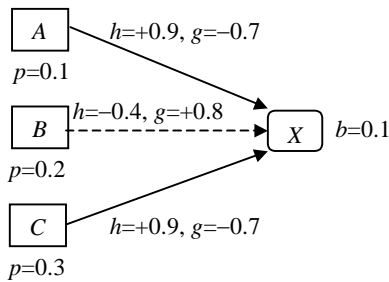


图2 影响网示例

图中实线表示父节点对子节点起促进作用, 虚线表示父节点对子节点起抑制作用, 子节点X的边缘概率为父节点组合共同作用的结果, 即:

$$\begin{aligned}
 P(X) &= P(X|A,B,C)P(A,B,C) + \\
 &P(X|\bar{A},B,C)P(\bar{A},B,C) + \\
 &P(X|A,\bar{B},C)P(A,\bar{B},C) + P(X|A,B,\bar{C})P(A,B,\bar{C}) + \\
 &P(X|\bar{A},\bar{B},C)P(\bar{A},\bar{B},C) + P(X|\bar{A},B,\bar{C})P(\bar{A},B,\bar{C}) + \\
 &P(X|A,\bar{B},\bar{C})P(A,\bar{B},\bar{C}) + P(X|\bar{A},\bar{B},\bar{C})P(\bar{A},\bar{B},\bar{C})
 \end{aligned} \tag{6}$$

其中条件概率的计算通过因果强度逻辑算法实现, 以 $P(X|\bar{A},B,C)$ 的计算为例, 需要获取连接A与X的弧上的g值以及连接B和C到X的弧上的h值, 组成因果强度集 $\{-0.7, -0.4, 0.9\}$, 经以下步骤可得到其值:

1) 合并正因果强度为:

$$PI = 1 - \prod_i (1 - S_i) \quad \forall S_i > 0 \tag{7}$$

式中, S_i 是因果强度集中对应的为正数的h或g值, 如 $PI = 1 - (1 - 0.9) = 0.9$ 。

2) 合并负因果强度为:

$$NI = 1 - \prod_i (1 - |S_i|) \quad \forall S_i < 0 \tag{8}$$

式中, S_i 为因果强度集中对应值为负的h或g的值,

如 $NI = 1 - (1 - 0.7)(1 - 0.4) = 0.82$ 。

3) 聚合正负影响, 得到完全网络影响强度为:

$$AI = \begin{cases} \frac{PI - NI}{1 - NI} & PI > NI \\ \frac{NI - PI}{1 - PI} & NI > PI \end{cases} \tag{9}$$

如 $AI = (0.9 - 0.82)/(1 - 0.82) = 0.44$ 。

4) 计算该组合下的条件概率为:

$$P(C|F) = \begin{cases} B_c + (1 - B_c)AI & PI > NI \\ B_c - B_c AI & PI < NI \end{cases} \tag{10}$$

式中, F为父节点的某一组合; B为事件C的基准概率。如 $P(X|\bar{A},B,C) = 0.1 + (1 - 0.1) \times 0.44 = 0.49$ 。

重复上述4个步骤计算出X在所有父节点组合的条件概率, 通过式(6)即可得到X的边缘概率。

2.3 确定影响网参数

VV&A是一项贯穿仿真生命周期的活动, VV&A专家对仿真具有较为全面的认识, 是仿真失效和影响的主要意见提供者, 因此, 仿真风险分析需要充分借鉴VV&A专家的意见, 基于影响网的仿真风险分析方法中影响网相关参数的确定可以通过专家调查法得到, 但调查不仅要关注是失效的危害性, 还要体现失效的效益。对于某一失效若认为其可能发生的专家个数为m, 则该失效的先验概率为:

$$p_i = m/S \tag{11}$$

式中, S为专家总数。决策效应和严重等级是失效产生的结果, 其基准率通常为0。各层间因果关系强度则通过调查统计的方式获取, 其中失效—决策效应因果强度调查如表1所示。

表1 因果强度调查表

决策效应	关系			
	失效1	失效2	...	失效n
人员死亡	√		√	√
人员重伤		√		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
少量经济损失		×		×
轻微经济损失			×	

表中, “√”表示促进作用, “×”表示抑制作用。将某一决策效应下的失效发生时的“√”和失效不发生时的“×”视为等价, 若失效发生时的调查统计结果为 m_h 个“√”和 n_h 个“×”, 失效不发生时的调查统计结果为 m_u 个“√”和 n_u 个“×”, 且 $m_h + n_h \leq S$, $m_u + n_u \leq S$, 则因果强度为:

$$h = \begin{cases} \frac{m_h + n_u}{2S} & m_h \leq n_h \\ -\frac{n_h + m_u}{2S} & m_h < n_h \end{cases}$$

$$g = \begin{cases} \frac{m_u + n_h}{2S} & m_u \geq n_u \\ -\frac{n_u + m_h}{2S} & m_u < n_u \end{cases} \quad (12)$$

按照统计方法的性质，该方法所提供的结果将随着样本数的增加更加接近真实情况。

2.4 基于影响网的仿真风险分析模型

基于影响网的仿真风险分析从仿真的需求和应用目的出发，通过建立仿真风险的影响网模型，将仿真风险分析过程量化表达，利用因果强度逻辑进行概率推理运算，以二元语义方法对严重等级进行集结得到风险等级半定量的表达形式，其具体实现步骤如下：

1) 获取仿真需求，明确应用目的，确定仿真失效可能产生的决策效应 $M_j (j=1,2,\dots,H)$ 。

2) 对仿真进行分解，确定失效模式 $F_i (i=1,2,\dots,N)$ 。

3) 建立仿真风险影响网模型。将失效模式作为根节点，决策效应为中间节点，以严重等级 $R_k (k=1,2,\dots,Q)$ 为叶节点建立影响网。

4) 计算节点边缘概率。根据风险分析目的分为两种情况：

① 计算仿真综合风险。由所有根节点概率值计算中间节点的边缘概率，由中间节点的边缘概率通过因果强度逻辑计算叶节点的边缘概率。

② 计算单失效模式风险。利用单独根节点计算

与其有因果联系的中间节点的边缘概率，由中间节点的边缘概率计算每个失效对应的叶节点的边缘概率。

5) 计算综合严重程度。将叶节点的边缘概率归一化，结合严重等级，通过式(13)得到失效模式的综合严重程度为：

$$C = \sum_{k=1}^Q \Delta^{-1}[\theta(R_k)] \times P(R_k) \quad (13)$$

式中， R_k 为严重等级； $P(R_k)$ 为严重等级 R_k 的边缘概率； θ 和 Δ^{-1} 为二元语义的转换函数，其定义可参考文献[5-6]。

6) 计算风险等级。定义风险等级为 $L = \{l_i\} (i=1,2,\dots,T)$ ， $T \neq M$ 且 $i < j$ 时 $l_i < l_j$ ，利用转换公式 ζ 将严重程度结果映射为风险等级，有：

$$(l_i, \alpha_i) = \zeta(L) = \Delta^{-1} \left\{ \frac{\Delta^{-1}[\theta(C)]T}{Q} \right\}$$

$$\forall i \in [1, T], \forall j \in [1, Q] \quad (14)$$

式中， α_i 为符号转移值，表示结果与等级 l_i 的偏差。

3 实例分析

仿真技术是评估建筑物疏散性能的有效工具，仿真结果为建筑设计方案的修改提供重要依据。但不合适的仿真结果被应用时，可能会导致财产损失和人员伤亡。文献[11]对大型建筑人员疏散仿真风险因素进行了分析，得到了各失效模式的风险分析结果，未对综合风险进行分析，单个失效的风险分析结果无法为仿真确认提供有效的支撑。为对其综合风险进行分析，按照步骤1)~步骤3)建立人员疏散仿真风险分析的影响网模型，如图3所示。

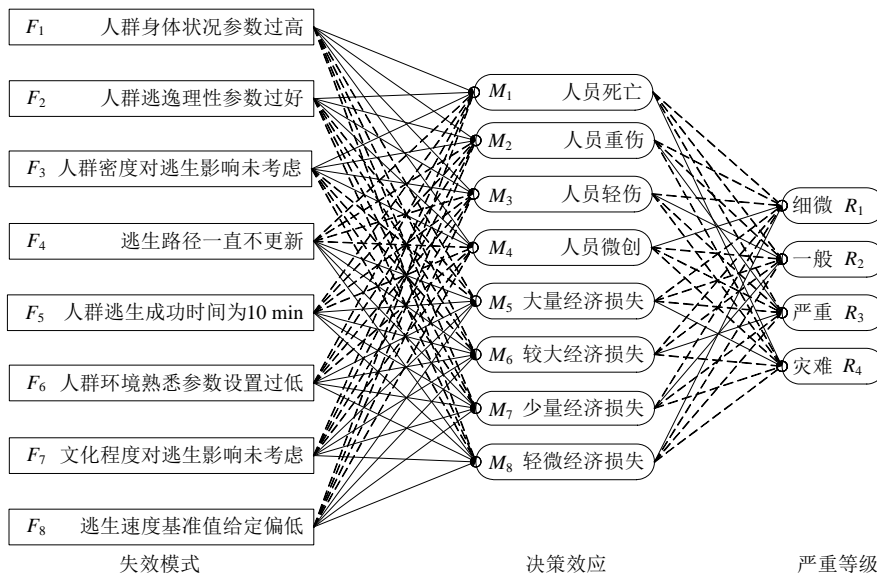


图3 人群疏散影响网模型

由图3可以看出, 失效模式和决策效应在人员疏散仿真中具有一定的普遍性, 相关VV&A专家对因

果强度的判定更加准确, 经专家调查法得到失效模式层与决策效应层的影响网参数如表2所示。

表2 失效模式-决策效应影响网参数

失效模式 (先验概率)	决策效应							
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
$F_1(0.7)$	(0.5, -0.6)	(0.7, -0.6)	(0.7, -0.7)	(0.8, -0.8)	(-0.4, 0.5)	(-0.5, 0.5)	(-0.7, 0.6)	(-0.7, 0.7)
$F_2(0.6)$	(0.6, -0.5)	(0.6, -0.5)	(0.6, -0.7)	(0.7, -0.7)	(-0.5, 0.4)	(-0.6, 0.6)	(-0.6, 0.6)	(-0.8, 0.8)
$F_3(0.8)$	(0.6, -0.4)	(0.6, -0.6)	(0.6, -0.5)	(0.7, -0.6)	(-0.5, 0.5)	(-0.6, 0.7)	(-0.5, 0.6)	(-0.7, 0.8)
$F_4(0.8)$	(-0.4, 0.5)	(-0.6, 0.6)	(-0.7, 0.5)	(-0.8, 0.6)	(0.8, -0.6)	(0.7, -0.4)	(0.8, -0.5)	(0.6, -0.7)
$F_5(0.6)$	(-0.4, 0.5)	(-0.5, 0.5)	(-0.6, 0.7)	(-0.7, 0.8)	(0.6, -0.5)	(0.7, -0.5)	(0.7, -0.6)	(0.7, -0.6)
$F_6(0.7)$	(-0.3, 0.4)	(-0.4, 0.5)	(-0.5, 0.6)	(-0.6, 0.5)	(0.4, -0.5)	(0.6, -0.3)	(0.5, -0.4)	(0.6, -0.5)
$F_7(0.5)$	(-0.1, 0.2)	(-0.3, 0.3)	(-0.3, 0.3)	(-0.5, 0.4)	(0.2, -0.2)	(0.3, -0.2)	(0.3, -0.2)	(0.2, -0.2)
$F_8(0.8)$	(-0.2, 0.3)	(-0.3, 0.4)	(-0.4, 0.4)	(-0.5, 0.4)	(0.3, -0.3)	(0.4, -0.3)	(0.4, -0.3)	(0.3, -0.3)

经因果强度逻辑算法将表2中失效模式的先验概率映射到各决策效应的边缘概率上, 并将其作为决策效应-严重等级因果关系合成时的先验概率, 得到决策效应-严重等级的因果强度关系, 如表3所示。

表3 决策效应-严重等级因果强度

决策效应 (先验概率)	严重等级			
	R_1	R_2	R_3	R_4
$M_1(0.454\ 8)$	(-0.8, 0.2)	(-0.6, 0.3)	(-0.6, 0.3)	(0.6, -0.6)
$M_2(0.399)$	(-0.5, 0.3)	(-0.5, 0.4)	(0.7, -0.6)	(-0.5, 0.3)
$M_3(0.308\ 2)$	(-0.6, 0.3)	(0.3, -0.7)	(-0.3, 0.6)	(-0.6, 0.4)
$M_4(0.317\ 7)$	(0.5, -0.6)	(-0.4, 0.6)	(-0.4, 0.5)	(-0.5, 0.3)
$M_5(0.519\ 4)$	(-0.4, 0.2)	(-0.3, 0.3)	(-0.5, 0.3)	(0.5, -0.5)
$M_6(0.559\ 7)$	(-0.3, 0.3)	(-0.4, 0.4)	(0.6, -0.7)	(-0.6, 0.3)
$M_7(0.534\ 2)$	(-0.5, 0.3)	(0.3, -0.6)	(-0.5, 0.3)	(-0.5, 0.2)
$M_8(0.365\ 1)$	(0.6, -0.5)	(-0.5, 0.3)	(-0.6, 0.4)	(-0.6, 0.2)

利用因果强度逻辑算法得到严重等级的边缘概率为[0.116 8, 0.177 3, 0.361 7, 0.186 4], 可以看到各失效模式所产生的综合影响的严重程度为 R_3 , “严重”的概率最大, 其次为 R_4 “灾难”。利用式(13)得到其仿真综合严重程度值为2.733 3, 取风险等级为 $L=\{l_1=\text{低}, l_2=\text{中}, l_3=\text{高}\}$, 通过式(14)可得到其对应等级的二元语义表示为 $(l_2, 0.085\ 1)$, 即仿真综合风险略高于 “ l_2 ”。

由于失效模式影响的多效性和决策效应产生的综合性, 仿真综合风险的分析结果与单个失效的分析结果必然存在一定的差异。正是考虑到这两方面的影响, 基于影响网的风险分析过程不仅能更全面地反映失效发生时的危害和效益, 而且还能反映失

效不发生时的危害和效益, 因此, 其结果比FMICA更合理和符合实际, 而且量化的分析过程更利于被用户所接受。利用二元语义方法实现的风险分析结果定量运算, 克服了风险矩阵主观性, 结果更直观。

4 结 论

可信性是系统建模与仿真的生命线, 风险评估明确了仿真可信性需要的信息的数量和种类, 是仿真确认的重要依据。本文从失效影响的多面性角度研究了仿真风险问题, 针对仿真风险难以量化和风险分析方法存在的问题, 对仿真风险描述形式进行了改进, 提出了基于影响网的仿真风险评估方法, 结合二元语义方法研究了仿真风险的量化表示。该方法不仅考虑失效模式发生时产生的影响, 也考虑了失效模式不发生所产生的影响, 是对失效模式影响的全面考虑; 给出的风险分析模型计算简单, 便于实现, 能够得到半量化的风险分析结果, 为仿真风险的定量分析提供了一条可行的途径。但是采用专家意见调查法获取影响网参数, 具有一定的主观性, 如何更客观合理地获取影响网参数, 将是下一步研究解决的重要问题。

参 考 文 献

[1] 吴晓燕, 许素红, 刘兴堂, 等. 现代军用仿真系统的新特点及技术对策[J]. 空军工程大学学报, 2002, 3(6): 29-32.
WU Xiao-yan, XU Su-hong, LIU Xing-tang, et al. The new trait and technology countermeasure of modern military simulation system[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2002, 3(6): 29-32.

[2] KILIKASKAS M, HALL D H. The use of M&S VV&A as

- a risk mitigation strategy in defense acquisition[J]. Journal of Defense Modeling and Simulation, 2005, 2(4): 209-216.
- [3] HAIDER S, LEVIS A H. Dynamic influence nets: an extension of timed influence nets for modeling dynamic uncertain situations[C]//10th International Command and Control Research and Technology Symposium. Washington D C, USA: [s.n.], 2005: 2-18.
- [4] 杨翠蓉, 王明哲, 廖晶静. 用影响网分析复杂系统关键事件[J]. 应用科学学报, 2010, 28(6): 639-645.
YANG Cui-rong, WANG Ming-zhe, LIAO Jing-jing. Analysis of key events in complex systems using influence nets[J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 28(6): 639-645.
- [5] 陈永兴, 吴晓燕, 吴静. 二元语义方法在仿真系统可信性评估中的应用[J]. 电光与控制, 2010, 17(12): 41-43.
CHEN Yong-xing, WU Xiao-yan, WU Jing. Application of two-tuple linguistic method in credibility evaluation of simulation system[J]. Electronics Optics&Control, 2010, 17(12): 41-43.
- [6] 李洪燕, 樊治平. 一种基于群体语言判断矩阵的群决策问题的二元语义解法[J]. 系统工程, 2003, 21(5): 104-108.
LI Hong-yan, FAN Zhi-ping. A decision making method for group linguistic judgment matrix based on two-tuple[J]. Systems Engineering, 2003, 21(5): 104-108.
- [7] Department of Defense. Risk and its impact on VV&A-special topics paper of verification validation and accreditation recommended practice guides (VV&A RPG) BUILD 3.0[EB/OL]. [2007-06-27]. http://vva.dmsomil/Special_topics/Risk/default.htm.
- [8] U S Department of Defense. Standard practice for systems safety[S]. Military Standard MIL-STD-882D, 2000.
- [9] ELELE J N. Assessing risk levels of verification, validation, and accreditation of models and simulations[J]. International Test and Evaluation Association Journal, 2008, 29(2): 190-200.
- [10] ELELE J N, SMITH J. Risk-based verification, validation, and accreditation process[C]//Modeling and Simulation for Defense Systems and Applications V. S Orlando, FL: SPIE, 2010.
- [11] 郑利平, 刘晓平. 基于SimFMECA的仿真风险和VV&A等级研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(15): 3934-3939.
ZHENG Li-ping, LIU Xiao-ping. Analysis of simulation risk and VV&A based on extended FMECA[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(15): 3934-3939.
- [12] 吴征宇, 刘胤田. 一种VV&A任务选择的优化方法[J]. 现代防御技术, 2008, 36(2): 138-142.
WU Zheng-yu, LIU Yin-tian. Approach to the selection optimization of VV&A activity[J]. Modern Defence Technology, 2008, 36(2): 138-142.

编辑 黄 莘