

文章编号: 1001-0920(2011)05-0737-06

用于仿真系统可信度评估的CES网方法研究

方可, 王子才

(哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 哈尔滨 150080)

摘要: 在分析了仿真可信度评估需求及问题域的基础上, 提出了仿真可信度评估(CES)网的概念, 给出了网元素的数学定义、规则、性质、算式、节点优先级等, 并提供了一个仿真可信度评估的应用实例. CES网能够弥补传统层次分析(AHP)法在复杂系统中的不足, 更适合解决仿真可信度评估问题.

关键词: 仿真可信度评估; 校核、验证与验收; 层次分析; 仿真可信度评估网; 节点优先级

中图分类号: TH166

文献标识码: A

CES net method for simulation system's credibility evaluation

FANG Ke, WANG Zi-cai

(Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China. Correspondent: FANG Ke, E-mail: hitsim@163.com)

Abstract: Based on the analysis of simulation credibility evaluation's requirements and problem domain, the concept of credibility evaluation for simulation(CES) net is proposed, the net element's mathematical definitions, rules, characteristics, formulas, node priority etc. are provided, and an application example of simulation credibility evaluation is given. The CES net method can supply a gap of the traditional analytic hierarchy process(AHP), and it is more suitable to solve the simulation credibility evaluation problem.

Key words: simulation credibility evaluation; verification, validation & accreditation(VV&A); analytic hierarchy process(AHP); credibility evaluation for simulation net; node priority

1 引言

自从系统仿真技术出现以来, 仿真系统的可信性一直是相关研究领域内重点关注的问题. 从最初的仿真模型验证, 到20世纪90年代提出的校核、验证与验收(VV&A), 都在致力于回答建模与仿真(M&S)是否可信的问题^[1]. 然而随着系统复杂程度的提升, 仿真可信度仅通过少量指标和方法很难获取. 从国内VV&A工作的发展趋势来看, 应用评估指标体系解决系统级的仿真可信度问题已成为普遍采用的方法.

层次分析法(AHP)最初是为了解决定性到定量分析的决策问题^[2]而提出的, 目前它在基于指标体系的仿真可信度评估中应用较多. AHP能在复杂对象分解、指标重要性分配、定性一定量评估结果转化等方面解决一部分可信度评估问题^[3-5], 但它的递阶层次属于一种静态网型, 且含有邻层边连接等限制, 在实际工作中并不能完全解决仿真可信度的评估问题.

AHP在仿真可信度评估中暴露的缺陷主要是其评价树结构引起的. 要突破AHP的效能, 必须建立一种新的指标体系结构, 并提出该结构的数学原理和组网规则, 从而进一步提出新的可信度评估方法. 本文基于网络拓补学原理, 借鉴Petri网^[6]、多属性(多因素)决策^[7]等相关领域知识, 提出一种仿真可信度评估(CES)网方法, 目的在于突破传统AHP法的限制, 更好地解决仿真系统的可信度评估问题.

2 问题的提出

基于多因素决策的可信度评估方法在实际VV&A工作中较常使用. 多因素决策离不开指标体系的支撑, 仿真可信度水平也是指标综合作用的结果. 将影响系统可信性的因素整理为一个递阶层次, 可信度评估问题便转化为多因素决策问题.

2.1 仿真可信度评估的多因素决策实质

由于仿真可信度的影响因素多且存在关联, 要基

收稿日期: 2010-11-09; 修回日期: 2010-12-31.

基金项目: 国家“973”计划项目(613900201).

作者简介: 方可(1977-), 男, 讲师, 博士, 从事仿真系统VV&A的研究; 王子才(1931-), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 从事复杂仿真系统理论等研究.

于各参量推导出系统的可信度数学式具有相当的难度. 即便可以给出, 该可信度算式的适用范围也相对狭窄. 对于复杂大系统而言, 需要某种手段来解决系统级的可信度评估问题, 多因素决策不失为一种有效的方法. 考查下面的表达式:

$$\begin{cases} O = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}, \\ \text{IS} = \{(n_1, n_2, \dots, n_k), (c_1, c_2, \dots, c_k)\}, \\ F_C = f(n_1, n_2, \dots, n_k). \end{cases} \quad (1)$$

式中: O 为一个复杂对象, 可将其认定为仿真系统的可信度; $a_1 \sim a_k$ 为 O 依评估目标分解后的子对象, 可认为是影响仿真可信度的各因素; IS 为 O 分解后形成的评估指标体系; $n_1 \sim n_k$ 表示各评估指标, $c_1 \sim c_k$ 表示指标间的关联; F_C 为评估结果值, 即仿真可信度水平; f 为指标综合函数. IS 和 f 对于获取仿真可信度结果而言是至关重要的, 它们在很大程度上影响最终的结果. 目前 IS 较多采用递阶层次的评价树结构, f 较多采用加权平均模型. 然而, 这种处理方式并不能完全解决仿真可信度评估中遇到的问题.

2.2 AHP方法的不足

AHP的不足体现在以下几方面:

1) AHP无法表达复杂的指标关联. AHP的递阶层次结构仅能表示“分解/融合”类型的节点关联, 即父节点到子节点的分解关系(或子节点到父节点的融合关系), 不能表示诸如超越、互斥、替代等其他关联. 虽然可以通过构造指标体系尽量避免互斥、替代等关联出现, 但超越等类型的关联却在仿真可信度评估中普遍存在且无法避免. AHP不能解决这类评估问题.

2) AHP无法表达动态层次结构. AHP的递阶层次结构一旦确定, 在评估过程中便不再变更, 是一种静态网型. 然而, 对于实际仿真系统的可信度评估工作而言, 某些含有设计元素的不确定层次结构是普遍存在的, 考查如图1所示的某仿真系统概念模型校核的部分AHP递阶层次.

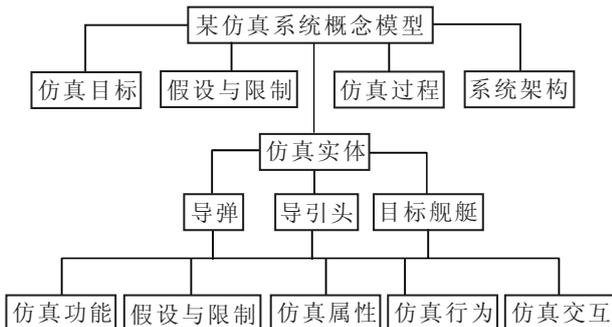


图1 某仿真系统概念模型校核的部分AHP递阶层次

图1中的“仿真实体”节点被分解为“导弹”、“导引头”和“目标舰艇”子节点, “仿真实体”校核的权重在这3个节点之间分配. 然而, 当前的设计并不一定

是正确的. 假设“导弹”实体在本次仿真中是不必要的, 则它不应参与实体节点间的权重分配(或权重为0); 再假设本次仿真应补充“箔条弹”实体, 则该实体也应参与权重分配, 且评估值为0. 显然, AHP无法处理该类问题.

3) AHP无法表达兄弟节点间的优先级. AHP的单一加权平均模型决定了其兄弟节点(拥有共同父节点的节点)间的评估是公平的, 评估并没有次序之分. 然而这种特性不符合可信度评估工作的实际情况. 仍以图1所示的AHP递阶层次为例, “导弹”节点的评估对“导引头”评估是有影响的, 应先于“导引头”节点进行评估, 但AHP无法表达这种兄弟节点间的优先级差异.

3 CES网

针对AHP法的不足, 提出一种超越AHP的CES网方法, 以便更好地支持仿真系统的可信度评估工作.

3.1 CES网的定义

CES网是一个基于节点放射状分布的有向无环图, 可描述如下:

$$E = \{(N, C); \langle V, W \rangle; T; M\}. \quad (2)$$

式中: E 表示一个CES网; N, C, V, W 分别表示 E 的节点集、有向边集、取值集和权重集; T 表示条件集; M 表示阈值集. 规定有向边的方向由分权点到授权点, 表示权重依附关系, 并进行如下定义:

定义1 称 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ 为CES网的节点集, 简称点集, 有 $N = \bar{N} \cup \hat{N} \cup \hat{N}$. 其中: \bar{N} 为确定点集, \hat{N} 为不确定点集, \hat{N} 为充分点集.

定义2 称 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 为CES网的有向边集, 简称边集, 有 $C = \dot{C} \cup \hat{C} \cup \tilde{C}$. 其中: \dot{C} 为普通边集, 且 $\dot{C} = \bar{C} \cup \hat{C}$, \bar{C} 为确定边集, \hat{C} 为不确定边集; \hat{C} 为充分边集; \tilde{C} 为超越边集. 用 $c = (n_i, n_j)$ 表示从节点 n_i 到 n_j 的一条有向边, n_i 称为边 c 的源点, n_j 称为边 c 的目标点(或终点).

定义3 称 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ 为CES网的取值集, 简称值集, 有 $V = \bar{V} \cup \hat{V} \cup \hat{V}$. 其中: \bar{V} 为确定值集, \hat{V} 为不确定值集, \hat{V} 为充分值集. 有 \bar{N} 与 \bar{V} , \hat{N} 与 \hat{V} , \hat{N} 与 \hat{V} 为一一映射, 且 $\hat{V} = \{v | v = 0 \vee v = 1\}$.

定义4 称 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ 为CES网的权重集, 简称权集, 有 W 与 \dot{C} 为一一映射.

定义5 称 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ 为CES网的条件集, 有 T 与 $\bar{N} \cup \hat{N}$ 为一一映射, 且 $T = \{t | t = 0 \vee t = 1\}$.

定义6 称 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ 为CES网的阈值集, 简称阈集, 有 M 与 \tilde{C} 为一一映射.

定义 7 若 $\bullet n = \{x|x \in N \wedge (x, n) \in C\}$, 则称 $\bullet n$ 为 n 的前集或输入集; 若 $n \bullet = \{y|y \in N \wedge (n, y) \in C\}$, 则称 $n \bullet$ 为 n 的后集或输出集. 有 $\bullet n \cup n \bullet \neq \emptyset$; $n \in N$.

定义 8 若 $n \bullet_0 = \emptyset$, 则称 n_0 为根节点; 若 $n \bullet \neq \emptyset$ 且 $\bullet n \neq \emptyset$, 则称 n 为枝节点; 若 $\bullet n = \emptyset$, 则称 n 为叶节点.

定义 9 若 $(n_i, n_j) \in C$, 且 $(n_i, n_j) \notin \tilde{C}$, 则称 n_i 为 n_j 的子节点, 并称 n_j 为 n_i 的父节点; 若 $(n_i, n_p) \in C$, $(n_i, n_p) \notin \tilde{C}$ 且 $(n_j, n_p) \in C$, $(n_j, n_p) \notin \tilde{C}$, 则称 n_i 与 n_j 互为兄弟节点.

定义 10 规定幂运算符满足 $(n \bullet)^0 = n$, $(n \bullet)^1 = n \bullet$, $(n \bullet)^2 = (n \bullet) \bullet$, \dots . 若 $n_j \in (n_i \bullet)^{s_1}$, $n_j \in (n_i \bullet)^{s_2}$, \dots , $n_j \in (n_i \bullet)^{s_k}$, 则称 $S_{n_i \rightarrow n_j} = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ 为节点 n_i 到 n_j 的距离集, 非负整数 $s_1 \sim s_k$ 均为节点 n_i 到 n_j 的距离. 若 $\forall s, n_j \notin (n_i \bullet)^s$, 则规定 $s(n_i \rightarrow n_j) = \infty$. 若 n_0 为根节点, 则 $s_{n_i \rightarrow n_0}$ 可简记为 s_{n_i} .

定义 11 若对于点集 $L = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$, 有 $\forall n \in L, \bullet n \cap L = \emptyset, n \bullet \cap L = \emptyset$, 且当 $\forall n_i, n_j \in L, \forall s_k \in S_{n_i}, \forall s_m \in S_{n_j}$ 时, 有 $\max(s_k) = \max(s_m)$, 则称 L 为 CES 网的一个层 (或阶), 且为第 $\max(s_k)$ 层, 简记为 $s(n_i)$, 亦称 n_i 的层数 (或阶数) 为 $s(n_i)$.

定义 12 若 $s(n_i \rightarrow n_j) > 1$ 且 $s(n_i \rightarrow n_j) \neq \infty$, 则称 n_i 为 n_j 的后代节点, n_j 为 n_i 的祖先节点, 并称 n_i 与 n_j 互为直系血亲节点; 若 $s(n_i \rightarrow n_j) = \infty$, 且 n_i 与 n_j 不为兄弟节点, 则称 n_i 与 n_j 互为旁系血亲节点.

定义 13 对于 $(n_i, n_j) \in \tilde{C}$, m 为与 \tilde{C} 映射的满意度阈值, 若 $v_i \geq m$, 则 \tilde{C} 断裂; 若 $v_i < m$, 则 $v_j = 0$, 此时称 n_i 为 n_j 的关键节点, 并称 n_j 为 n_i 的超导节点.

定义 14 若与充分点 n_i 映射的充分值 $v_i = 1$, 则从 n_i 出发的充分边 c_i 断裂; 若 $v_i = 0$, 则 n_i 需补充额外的兄弟节点, 并称补充的节点为影子节点. 规定影子节点的值为 0.

定义 15 若与不确定节点 n_i 映射的条件 $t_i = 1$, 则 n_i 转化为确定点; 若 $t_i = 0$, 则 n_i 需从 CES 网中删除, 并称之为垃圾节点.

3.2 CES 网的规则

基于 CES 网的数学基础 (定义 1~定义 15), 补充 CES 网的规则如下:

算法 1 若 $n \in N$, 则 $\exists c(n_i, n) \in C$ 或 $\exists c(n, n_i) \in C$; 若 $c \in C$, 且 $c = (n_i, n_j)$, 则 $n_i \neq \emptyset, n_j \neq \emptyset$.

算法 2 若 $n_i, n_j \in N$, 且 $s(n_i \rightarrow n_j) \neq \infty$, 则有 $s(n_j \rightarrow n_i) = \infty$.

算法 3 若 $N_0 = \{n|n \bullet = \emptyset\}$, 则有 $d(N_0) = 1$, 且 $N_0 \subset \bar{N}$.

算法 4 若 $(n_i, n_p) \in C, (n_j, n_p) \in C$, 且 $s(n_i) = s(n_j)$, 则 $(n_i, n_j) \notin C$.

算法 5 若 $N_p = \{n|(n, n_p) \in \tilde{C} \wedge n \in \bar{N}\}$, 则有 $\sum_{i=1}^k w_k = 1, w \in W_p, k = d(W_p)$. W_p 为与 N_p 一一映射的权集.

算法 6 若 $\hat{N}_p = \{n|(n, n_p) \in \hat{C}\}$, 则 $d(\hat{N}_p) = 1$.

算法 7 若 $n \in \hat{N}$, 则 $c = (n, n_i) \in \hat{C}$.

算法 8 若 $n \in \hat{N}$, 则 $c = (n, n_i) \in \hat{C}$.

算法 9 对于 $N_c = \{n|n = n_i, i = 1, 2, \dots, k\}, n_p \in \hat{N}, \forall n_c \in N_c, s(n_c \rightarrow n_p) > 1$ 且 $s(n_c \rightarrow n_p) \neq \infty$, 若 n_p 为垃圾节点, 则 $\forall n_c \in N_c, n_c$ 亦为垃圾节点.

3.3 CES 网的性质

由 CES 网的定义及规则, 容易推出以下性质:

- 1) CES 网中没有孤立的节点和边;
- 2) CES 网是无环的;
- 3) CES 网只有一个根节点, 且必为确定点;
- 4) 兄弟节点间不存在边;
- 5) 从确定兄弟节点出发到父节点的所有边相对应的权重和为 1;
- 6) 一个节点只能拥有一个充分子节点;
- 7) 以不确定节点为源点的边必为不确定边;
- 8) 以充分节点为源点的边必为充分边;
- 9) 垃圾节点的后代节点均为垃圾节点.

3.4 CES 网的图示

根据网络的定义, 设计必要的图元以充分表达 CES 网, 如图 2 所示, 并定义图示规则如下:

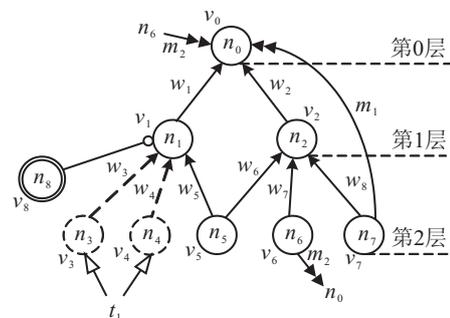


图 2 CES 网示意图

- 1) 以单实线圆形 (或矩形) 表示确定节点, 以单虚线圆形 (或矩形) 表示不确定节点, 以双实线圆形 (或矩形) 表示充分节点.
- 2) 节点内标定名称 (编号), 节点旁标定取值.
- 3) 以从分权点到授权点的单箭头实线段表示确定边, 以单箭头虚线段表示不确定边, 以圆头实线段

表示充分边,以双箭头实线段表示超越边。

4) 原则上不允许网图中出现边的交叉,为避开边的交叉,允许将边进行折叠,在折叠处标明终点和源点的编号。

5) 普通边上标定与该边相对应的权重,超越边上标定与该边相对应的满意度阈值。

6) 以空心箭头实线段表示不确定点上的条件值,确定点条件省略。

在图 2 所示的 CES 网中,节点 n_3 和 n_4 为不确定点,其确定条件为 t_1 ,若 $t_1 = 0$,则 n_3 和 n_4 转化为垃圾节点。 n_1 带有一个充分子节点 n_8 ,说明需考查除 n_3, n_4 (若 $t_1 = 1$) 和 n_5 外, n_1 是否还包含其他影子节点。从 n_7 出发有一条直达 n_0 的超越边,其满意度阈值为 m_1 ,说明若 $v_7 < m_1$,则 $v_0 = 0$,其余子网均被废弃。此外,从 n_6 出发的超越边进行了折叠,在两折叠端标出了终点和源点。

3.5 CES 网的计算

由 CES 网的定义及规则,可推出网络中任一节点 n_i 的取值 v_i 的算式如下:

$$v_i = \prod_{s=1}^c u_s(v_s) \cdot \left[\sum_{k=1}^a (v_k \cdot w_k \cdot t_k) + (1 - v_i) \cdot \sum_{n=1}^b (v_n \cdot w_n) \right], \quad (3)$$

且

$$\sum_{k=1}^a w_k + \sum_{n=1}^b w_n = 1,$$

$$u_s(v_s) = \begin{cases} 0, & v_s < m_s; \\ 1, & v_s \geq m_s. \end{cases}$$

式中: v_k 为 n_i 的确定和不确定子节点对应的取值, t_k 为不确定子节点的条件值, w_k 为子节点权重, a 为子节点数, v_i 为 n_i 的充分子节点取值, v_n 为 n_i 的影子子节点取值, w_n 为影子子节点权重, b 为影子子节点数, $u_s(v_s)$ 为定义 13 导出的、以 n_i 为终点的超越边积因子, v_s 为超越边源点取值, m_s 为超越边阈值, c 为超越边数。

由于 n_i 的影子子节点取值 $v_n \equiv 0$, 式 (3) 可化简为

$$v_i = \prod_{s=1}^c u_s(v_s) \cdot \left[\sum_{k=1}^a (v_k \cdot w_k \cdot t_k) \right]. \quad (4)$$

由式 (4), 可推出根节点 n_0 的取值 v_0 为

$$v_0 = \sum_{i=1}^q \left(v_i \cdot \prod_{j=1}^{k_i} w_j \cdot \prod_{j=2;r=1}^{k_i;p} u_{j_r} \cdot t_j \right), \quad (5)$$

$$u_{j_r} = \begin{cases} 0, & v_{j_r} < m_{j_r}; \\ 1, & v_{j_r} \geq m_{j_r}. \end{cases} \quad (6)$$

式中: v_i 为 CES 网叶节点 n_i 的取值, q 为叶节点数目, w_j 为 n_i 的祖先节点权重, k_i 为 n_i 的祖先节点数, u_{j_r} 为 n_i 达到 n_0 路径上的超越边积因子, t_j 为 n_i 的祖先节点条件值, p 为 n_i 达到 n_0 路径上的超越边数, v_{j_r} 为 n_i 达到 n_0 路径上的超越边源点取值, m_{j_r} 为满意度阈值。

3.6 CES 网的动态元素分析

由 CES 网的定义和规则可知,网络中包含的不确定元素及充分元素,使得 CES 网超越传统的 AHP 评价树结构,从静态网升级为动态网。在使用 CES 网进行仿真可信度评估时,应首先分析不确定节点的条件和充分节点的取值,从而确定网络中的垃圾节点和影子节点,该工作称为“动态元素分析”。

动态元素分析应先于网络评估工作进行,这样可以避免垃圾节点引起的无效评估问题,以及影子节点引起的缺损评估问题。经动态元素分析的 CES 网中不再含有不确定点/边、充分点/边以及相应的取值和权重,而仅含有确定元素和超越元素。此时 CES 网由动态网退化为静态网。

3.7 CES 网的节点优先级

AHP 评价体系中叶节点的评估是公平的,没有优先级的区别。但 CES 网引进了不确定元素和超越元素,与超越边或动态网相关的节点,自然拥有更高的评估优先级。

为了简化问题的复杂性,首先借助动态元素分析过程,将 CES 网由动态网转化为静态网。此时网络中仅包含确定元素和超越元素,节点优先级问题转化为普通节点和超越边源点(或其后代节点)间的评估次序问题。这里给出经动态元素分析后的 CES 网节点优先级算式。

设从叶节点 n_i 出发的超越边终点集为 N_{ip} , 从 n_i 祖先节点出发的超越边终点集为 N_{iq} , 若 $N_{ip} \cup N_{iq} \neq \emptyset$, 有 $n_{ia} \in N_{ip} \cup N_{iq}$, 且对 $\forall n_j \in N_{ip} \cup N_{iq}$ 有 $s(n_{ia}) \leq s(n_j)$, 则 n_i 的 CES 网优先级为

$$p(n_i) = s(n_{ia}) + \min(s_{n_i \rightarrow n_{ia}}); \quad (7)$$

若 $N_{ip} \cup N_{iq} = \emptyset$, 则 n_i 的 CES 网优先级为

$$p(n_i) = s(n_i). \quad (8)$$

规定优先级数值越小,叶节点的优先级越高。值得注意的是,式 (6) 和 (7) 所定义的优先级不一定是数集内连续的。

考查图 3 所示的经动态元素分析后的 CES 网。由式 (6) 和 (7) 可计算出叶节点 $n_1 \sim n_9$ 的优先级向量为 $P = \{1, 1, 3, 3, 2, 3, 3, 3, 0\}$ 。显然,应优先评估与低阶节点有超越边关联的叶节点。假设图 3 中 n_9 节点评估值没有达到满意度阈值,则由式 (5) 可知,根节点

取值被0因子化,网的其他部分无需再评估, n_9 自然拥有最高优先级,其他叶节点同理.

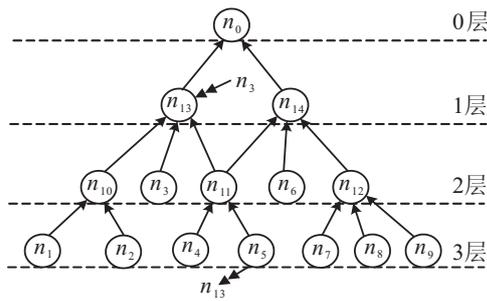


图3 CES网优先级的计算

4 仿真可信度评估应用实例

本节以某仿真系统剧情校核为例,说明CES网在仿真可信度评估中的应用.该系统要求在一个单目标的仿真中,获取引导头的信号级仿真结果.

4.1 CES网的评估过程

依据该系统的仿真剧情设计,建立其用于校核工作的CES网,如图4所示.首先对该CES网进行动态元素分析,判定不确定节点 $n_{10} \sim n_{13}, n_{16} \sim n_{20}, n_{26}, n_{28}$ 均为必要,且 n_4 需补充影子节点 n_{18}' “杂波干扰”, n_{15} 需补充影子节点 n_{28}' “杂波干扰子过程”.

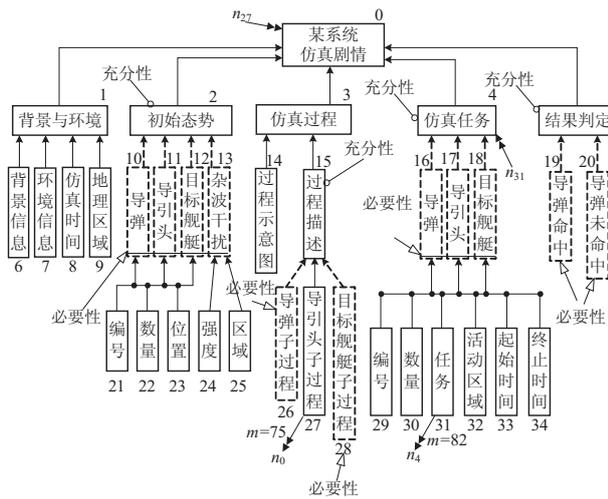


图4 某仿真系统剧情校核的CES网

由式(6)和(7)求得各叶节点的CES网优先级为:
 $p(n_6 \sim n_9) = 2, p(n_{18}') = 2, p(n_{21} \sim n_{25}) = 3, p(n_{26}, n_{28}, n_{28}') = 3, p(n_{27}) = 0, p(n_{29}, n_{30}) = 3, p(n_{31}) = 1, p(n_{32} \sim n_{34}) = 3, p(n_{19}, n_{20}) = 2.$

使用指数标度AHP法^[8]计算权重向量,如表1所示.优先对节点 n_{27} 进行校核,得到其评估值为 $v_{27} = 87$,满足阈值 $m_{27} = 75$.对 n_{31} 节点进行校核,得到 $v_{31} = 86$,亦满足阈值 $m_{31} = 82$.按优先级顺序对其他叶节点进行评估,结果如表2所示.

表1 某CES网的权重向量

父节点	兄弟节点	权重向量
n_0	$n_1 \sim n_5$	{0.05, 0.12, 0.25, 0.52, 0.06}
n_1	$n_6 \sim n_9$	{0.13, 0.40, 0.22, 0.25}
n_2	$n_{10} \sim n_{13}$	{0.25, 0.51, 0.13, 0.11}
n_3	n_{14}, n_{15}	{0.19, 0.81}
n_4	$n_{16} \sim n_{18}, n_{18}'$	{0.15, 0.41, 0.10, 0.34}
n_5	n_{19}, n_{20}	{0.50, 0.50}
$n_{10} \sim n_{12}$	$n_{21} \sim n_{23}$	{0.10, 0.34, 0.56}
n_{13}	n_{24}, n_{25}	{0.46, 0.54}
n_{15}	$n_{26} \sim n_{28}, n_{28}'$	{0.15, 0.41, 0.10, 0.34}
$n_{16} \sim n_{18}$	$n_{29} \sim n_{34}$	{0.04, 0.12, 0.55, 0.15, 0.07, 0.07}

表2 某CES网的叶节点取值向量

父节点	兄弟节点	权重向量
n_1	$n_6 \sim n_9$	{100, 100, 100, 100}
n_3	n_{14}	{76}
n_4	n_{18}'	{0}
n_5	n_{19}, n_{20}	{100, 100}
$n_{10} \sim n_{12}$	$n_{21} \sim n_{23}$	{100, 100, 100}
n_{13}	n_{24}, n_{25}	{100, 82}
n_{15}	$n_{26} \sim n_{28}, n_{28}'$	{100, 87, 93, 0}
n_{16}	$n_{29} \sim n_{34}$	{100, 100, 100, 100, 100, 100}
n_{17}	$n_{29} \sim n_{34}$	{100, 100, 86, 100, 91, 90}
n_{18}	$n_{29} \sim n_{34}$	{100, 100, 92, 88, 100, 100}

依据表1和表2中的数据,由式(5)计算可得,该系统仿真剧情的最终校核结果为 $v_0 = 70.70$.

4.2 结果分析

使用图6所示的七标度模糊评判隶属度曲线对评估结果进行评价,可知 $v_0 = 70.70$ 落于“一般可信”和“比较可信”的区域内.由于其“一般可信”的隶属度接近于1,而“比较可信”的隶属度接近于0,说明该剧情设计属于“一般可信”的程度.

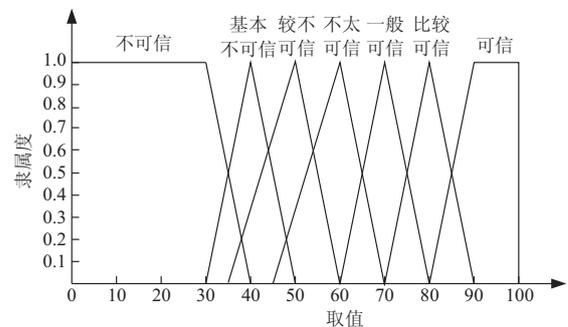


图5 七标度模糊评判隶属度曲线

由于节点 n_{27} 和 n_{31} 的评估结果满足阈值,超越边均断裂,其评估值未对根节点和 n_4 产生直接影响.依据表1中的向量数据,并参照组合权重算式 $W = \prod_{j=1}^{k_i} w_j$,可求得影子节点 n_{18}' 的组合权重为 $W_{n_{18}'} = 0.1768$,影子节点 n_{28}' 的组合权重为 $W_{n_{28}'} = 0.06885$.二者对根节点值 v_0 的权重和为 $W_{n_{18}'} + W_{n_{28}'} = 0.24565$,基本达到了1/4的影响程度.而根

据 CES 网的定义 14, 影子节点 $n_{18'}$ 与 $n_{28'}$ 的取值均为 0, 这直接导致了 v_0 跌落至“一般可信”区间, 说明该剧情设计忽略的“杂波干扰”仿真任务与“杂波干扰子过程”仿真过程在较大程度上影响了最终的评估结果.

5 结 论

虽然 AHP 法利用层次分析思想和权重分配算法广泛运用于仿真可信度评估中, 但它存在结构单一、静态描述等缺陷. CES 网引入了动态元素和超越元素, 并结合这些元素的取值和分权计算, 较好地弥补了传统 AHP 法在仿真可信度评估中的不足. 严格的数学定义、规则、算法等, 为 CES 网的应用提供了科学依据. 通过结合网络节点上相对应的定性与定量分析方法, 使用 CES 网技术能够获取更趋近于真实的仿真可信度评估结果, 为 VV&A 工作提供了参考.

参考文献(References)

- [1] Office of the director of defense research and engineering, DMSO. DoD verification, validation and accreditation recommended practice guide[EB/OL]. [1996-11-02]. <http://www.dmsol.mil>
- [2] Saaty T L. Modeling unstructured decision problems: A theory of analytical hierarchy[C]. Proc of the 1st Int Conf on Mathematical Modeling. Rolla, 1997: 59-77.
- [3] 杨惠珍, 康凤举, 阎晋屯. 一种基于 AHP 的仿真可信度评估方法研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(增2): 52-54. (Yang H Z, Kang F J, Yan J T. A methodology of simulation credibility evaluation based on AHP[J]. J of System Simulation, 2006, 18(S2): 52-54.)
- [4] Rabelo L, Eskandari H, Shalan T, et al. Supporting simulation-based decision making with the use of AHP analysis[C]. Proc of Winter Simulation Conf 2005. Orlando, 2005: 2042-2051.
- [5] Balci O, Adams R J, Myers D S, et. al. A collaborative evaluation environment for credibility assessment of modeling and simulation applications[C]. Proc of Winter Simulation Conf 2002. San Diego, 2002: 214-220.
- [6] 吴哲辉. Petri网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1-103. (Wu Z H. Petri theory[M]. Beijing: Mechanism Industry Press, 2006: 1-103.)
- [7] 徐泽水. 部分权重信息下对方案有偏好的多属性决策法[J]. 控制与决策, 2004, 19(1): 85-88. (Xu Z S. Method for multi-attribute decision making with preference information on alternatives under partial weight information[J]. Control and Decision, 2004, 19(1): 85-88.)
- [8] 吕跃进, 张维. 指数标度在 AHP 标度系统中的重要作用[J]. 系统工程学报, 2003, 18(5): 452-456. (Lv Y J, Zhang W. Kernal function of index scale in AHP scale system[J]. J of Systems Enginerring, 2003, 18(5): 452-456.)
- [9] 赵文杰. 不确定非线性系统的变结构控制研究[D]. 保定: 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 2004. (Zhao W J. Variable structure control for uncertain nonlinear systems[D]. Baoding: School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, 2004.)
- [10] 胡剑波, 辛海良. 新型增益调度变结构控制器的性能比较研究[J]. 控制与决策, 2009, 24(5): 769-772. (Hu J B, Xin H L. Performance comparison for new gain-scheduling variable structure controllers[J]. Control and Decision, 2009, 24(5): 769-772.)
- [11] 管成, 朱善安. 电液伺服系统的多滑模鲁棒自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 931-938. (Guan C, Zhu S A. Multiple sliding mode robust adaptive control of an electro-hydraulic servo system[J]. Control Theory & Applications, 2005, 22(6): 931-938.)
- [12] 杨青, 李树荣. 基于 Backstepping 设计的不确定非线性系统的预测控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(4): 525-529. (Yang Q, Li S R. Model predictive control for nonlinear systems with uncertainty by using backstepping design[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(4): 525-529.)
- [13] 胡剑波, 庄开宇. 高级变结构控制理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008. (Hu J B, Zhuang K Y. Advanced variable structure control theory and applications[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008.)
- [14] Swaroop S, Hedrick J K, Yip P P, et al. Dynamic surface control for a class of nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(10): 1893-1899.
- [15] Khalil H K. Nonlinear systems[M]. 3rd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2002: 145-146.
- [16] 周丽, 姜长生, 都延丽. 一种基于反步法的鲁棒自适应终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 678-682. (Zhou L, Jiang C S, Du Y L. A robust and adaptive terminal sliding mode control based on backstepping[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(6): 678-682.)

(上接第 731 页)