

模糊综合评价法在仿真可信度评估网中的应用

方可, 何博夫, 杨明, 王子才

(哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 150080 哈尔滨, hitsim@163.com)

摘要: 提出了仿真可信度评估网(CENS, Credibility Evaluation Net for Simulation)的方法,建立了网的数学定义和原理,给出了网的图示、性质和计算方法.为了进一步反映专家在评估中的不确定性,更真实地评价仿真系统的可信度,将模糊综合评价法应用于CENS.在介绍了模糊综合评价原理的基础上,建立了模糊CENS体系,提出了模糊CENS的计算方法和使用步骤,并给出了1个仿真可信度评估的应用实例.

关键词: 仿真可信度评估;AHP;CENS;模糊综合评价

中图分类号: TH166

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)05-0030-07

Application of fuzzy comprehensive evaluation method to CENS

FANG Ke, HE Bo-fu, YANG Ming, WANG Zi-cai

(Control & Simulation Center, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China, hitsim@163.com)

Abstract: A CENS (Credibility Evaluation Net for Simulation) method is proposed in which the net mathematical definition and theory are established, and the net diagram, characteristics, and calculation formulas are presented. To reveal the uncertainty of expert evaluation further, and to evaluate the simulation systems credibility more factually, the fuzzy comprehensive evaluation method is applied to CENS. Based on the introduction of fuzzy comprehensive evaluation theory, the fuzzy CENS system is established, the calculation formulas and procedures of the method are proposed, and an application example of simulation credibility evaluation is given.

Key words: simulation credibility evaluation;AHP;CENS;fuzzy comprehensive evaluation

仿真系统的可信度一直是仿真研究领域内重点关注的问题.随着系统复杂程度的提升,仿真可信度往往依靠层次分析和指标综合的方法获取.以AHP(Analytic Hierarchy Process)及其评价树结构为代表的多因素决策方法,在实际仿真系统的可信度评估工作中得到了较广泛的应用^[1-3].

本文基于网络拓补原理,借鉴Petri网^[4]、多属性(多因素)决策^[5-7]等相关领域知识,提出一种仿真可信度评估网CENS(Credibility Evaluation Net for Simulation)方法.为了进一步解决评估专家较多、节点评估值不易确定等情况下网络计算结果比较粗糙的问题,将模糊综合评价法应用于CENS中.

模糊综合评价法以模糊数学为基础发展形成,它的算法能够反映人对事物分析和决策的模糊性质.模糊数学是1965年由美国著名控制论学者L. A. Zadeh创立的.模糊性是人类思维的特点之一,而评估依托于人对事物的看法,思维的本质决定了其带有模糊性质,所以模糊综合评价法在系统评估领域得到了较多的应用^[8-10].

对领域专家SME(Subject Matter Expert)在网络节点上的评估结果进行模糊化处理,并使用模糊评价集及模糊运算对各层评估结果进行综合,可在CENS框架内实现对仿真可信度的模糊综合评价,更真实地获取可信度结果.本文在介绍CENS原理和模糊综合评价法的基础上,重点阐述将模糊综合评价法运用于CENS的算法及应用实例,提供一种用于仿真可信度评估的全新且行之有效的办法.

收稿日期: 2010-01-09.

作者简介: 方可(1977—),男,讲师;

杨明(1963—),男,教授,博士生导师;

王子才(1931—),男,教授,中国工程院院士.

1 仿真可信度评估网 CENS

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评估问题,已成为普遍采用的方法.以 M&S 实现是否准确地代表了仿真对象作为目标层,经过逐级分解形成 1 个递阶层次,直到划分出评估结果可获取的方案层节点,可将仿真可信度评估问题转化为 1 个 AHP 决策问题^[11].

然而 AHP 的递阶层次属于一种静态网型,且含有邻层边连接等诸多限制.本文创新性地提出仿真可信度评估网 CENS 的概念,旨在建立一种新的评估体系,并科学地提出该体系的数学定义和组网规则,以便更好地解决仿真可信度评估问题.

1.1 CENS 的定义

仿真可信度评估网 CENS 是 1 个基于节点放射状分布的有向无环图,可以由下式来描述:

$$E = \{ \langle N, C \rangle; \langle V, W \rangle; T; M \}. \quad (1)$$

式中: E 表示 1 个 CENS; 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 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ 为网的节点集,简称点集.有 $N = \bar{N} \cup \dot{N} \cup \hat{N}$, 其中 \bar{N} 为确定点集; \dot{N} 为不确定点集; \hat{N} 为充分点集.

定义 2 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 为网的有向边集,简称边集.有 $C = \dot{C} \cup \hat{C} \cup \tilde{C}$, 其中 \dot{C} 为普通边集,且 $\dot{C} = \bar{C} \cup \dot{\bar{C}}$; \bar{C} 为确定边集; $\dot{\bar{C}}$ 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 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ 为网的取值集,简称值集.有 $V = \bar{V} \cup \dot{V} \cup \hat{V}$, 其中 \bar{V} 为确定值集, \dot{V} 为不确定值集, \hat{V} 为充分值集.有 \bar{N} 与 \bar{V} ; \dot{N} 与 \dot{V} ; \hat{N} 与 \hat{V} 为一一映射,且 $\bar{V} = \{v \mid v = 0 \vee v = 1\}$.

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

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

定义 6 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ 为网的阈值

集,简称阈集.有 M 与 \tilde{C} 为一一映射.

定义 7 若 $\cdot n = \{x \mid x \in N \wedge (x, n) \in C\}$, 称 $\cdot n$ 为 n 的前集或输入集;若 $\dot{n} = \{y \mid y \in N \wedge (n, y) \in C\}$, 称 \dot{n} 为 n 的后集或输出集.有 $\cdot n \cup \dot{n} \neq \phi$; $n \in N$.

定义 8 若 $n_0 = \phi$, 称 n_0 为根节点.若 $\cdot n \neq \phi$ 且 $\dot{n} \neq \phi$, 称 n 为枝节点.若 $\cdot n = \phi$, 称 n 为叶节点.

定义 9 若 $(n_i, n_j) \in C$, 且 $(n_i, n_j) \notin \tilde{C}$, 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 $(n_j, n_p) \in C$; $(n_j, n_p) \notin \tilde{C}$, 称 n_i 与 n_j 互为兄弟节点.

定义 10 规定幂运算符满足 $(\dot{n})^0 = n$; $(\dot{n})^1 = \dot{n}$; $(\dot{n})^2 = (\dot{\dot{n}})$; \dots ; 若 $n_j \in (\dot{n}_i)^{s_1}$, $n_j \in (\dot{n}_i)^{s_2}$, \dots , $n_j \in (\dot{n}_i)^{s_k}$, 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 $\forall s, n_j \notin (\dot{n}_i)^s$, 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 $\forall n \in L; \cdot n \cap L = \phi; \dot{n} \cap L = \phi$, 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 为网的 1 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 $s(n_i \rightarrow n_j) \neq \infty$, 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, 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 需从网中删除, 并称之为垃圾节点.

根据网络的定义,设计必要的图元以充分表达 CENS.确定节点、不确定节点和充分节点分别由实线圆形(或矩形)、虚线圆形(或矩形)和双实线圆形(或矩形)表示;取值表示在节点旁.确定边、不确定边、充分边和超越边分别由单箭头实线

段、单箭头虚线段、圆头实线段和双箭头实线段表示;将权重表示在边上. 条件空心箭头实线段表示;阈值直接表示在超越边上. 图 1 显示了 1 个典型的 CENS 图示.

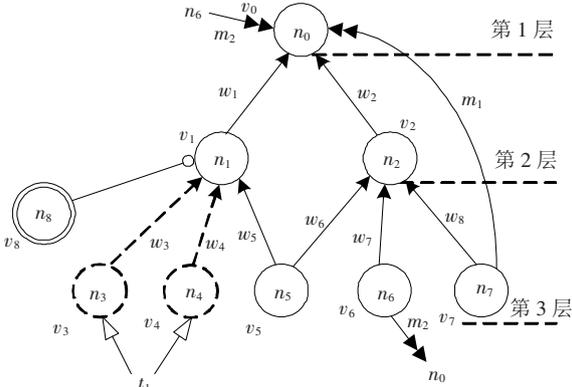


图 1 一个典型的 CENS 图示

1.2 CENS 的性质

由 CENS 的数学定义, 容易推出以下性质:

- 1) 网中没有孤立的节点和边, 且网是无环的;
- 2) 1 个网中只有 1 个根节点, 且必为确定点;
- 3) 兄弟节点间不存在边, 并规定从兄弟节点出发到父节点的所有边相对应的权重和为 1;
- 4) 1 个节点只能拥有 1 个充分节点, 且以充分节点为源点的边必为充分边;
- 5) 以不确定节点为源点的边必为不确定边;
- 6) 当超越边源点取值大于等于阈值时, 超越边断裂; 反之超越边终点的取值被置零.

1.3 CENS 的计算

由 CENS 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:

$$v_i = \prod_{s=1}^c u_s(v_s) \cdot \left[\sum_{k=1}^a (v_k \cdot w_k \cdot t_k) + (1 - v_i) \cdot \sum_{n=1}^b (v_n \cdot w_n) \right]. \quad (2)$$

式中:

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

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

且 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 $v_n = 0$, 所以式(2)可以简化为

$$v_i = \prod_{s=1}^c u_s(v_s) \cdot \left[\sum_{k=1}^a (v_k \cdot w_k \cdot t_k) \right]. \quad (3)$$

由式(3) 容易推出网络根节点 n_0 的取值 v_0 可由下式计算:

$$v_0 = \sum_{i=1}^q (v_i \cdot \prod_{j=1}^{k_i} w_j \cdot \prod_{j=2; r=1}^{k_i; p} u_{j_r} \cdot t_j). \quad (4)$$

$$\text{式中: } u_{j_r} = \begin{cases} 0, & v_{j_r} < m_{j_r}; \\ 1, & v_{j_r} \geq m_{j_r}. \end{cases}$$

且 v_i 为 CENS 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.

2 模糊综合评价法

模糊综合评价将元素与集合的布尔型隶属关系扩展至 $[0, 1]$ 区间, 具有典型的数学描述模糊性, 其方法的原理及使用步骤如下所述.

2.1 建立因素集和评价集

因素集 F 是在研究域内影响评估对象的各属性所组成的集合, 用 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 表示.

评价集 C 是对评估对象做出的各评判结果所组成的集合, 用 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 表示. 表 1 显示了 1 个较严格的可信度评价集, 采用了 100 分制. 按照人们基于 7 等级自然语言判断的习惯, 将“不太可信”定位于 60 分, 向上和向下依次以 10 分为 1 个等级, 分别延展至“不可信”的 30 分和“可信”的 90 分.

表 1 较严格的仿真可信度评价集

评价	不可信	基本不可信	较不可信	不太可信	一般可信	比较可信	可信
数值	30	40	50	60	70	80	90

2.2 确定隶属度函数

为了将评估结果模糊化, 需要确定综合评价的隶属度函数. 通常采用三角形和梯形分布的隶属度函数, 比较符合评估人的思维特征. 针对表 1 描述的仿真可信度评价集, 可构造模糊综合评价的隶属度函数曲线, 如图 2 所示. 由图可确定每个评价等级的隶属度函数表达式, 这里不再赘述.

2.3 建立模糊判断矩阵

根据方案层(叶节点层)的专家评分结果, 代

入至隶属度函数算式,可求得叶节点的隶属度矩阵,称之为“模糊判断矩阵”,如下所示:

$$U_i = \begin{bmatrix} U_{i1} \\ U_{i2} \\ \vdots \\ U_{ib} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{i1}^1 & \mu_{i1}^2 & \cdots & \mu_{i1}^c \\ \mu_{i2}^1 & \mu_{i2}^2 & \cdots & \mu_{i2}^c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{ib}^1 & \mu_{ib}^2 & \cdots & \mu_{ib}^c \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: U_i 为准则层(枝节点层)第 i 个因素的模糊判断阵; b 为该因素的子节点数目; μ_{ij}^p 为准则层第 i 个因素第 j 个子节点的第 p 个隶属度值; $p = 1, 2, \dots, c$; c 为评价集的维度。

根据所有叶节点的专家评分结果,由式(5)可建立针对某个评估对象的模糊判断矩阵 $U = [U_1, U_2, \dots, U_a]^T$, 其中 a 为准则层因素的数目。

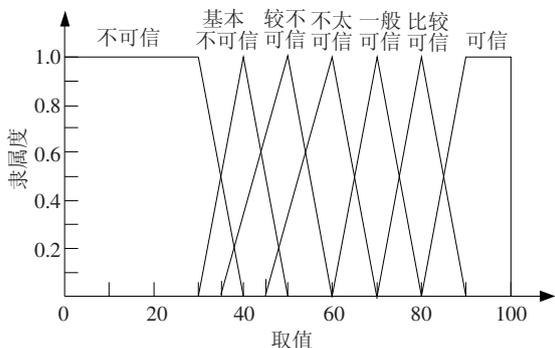


图2 模糊综合评价的七标度隶属度函数曲线

2.4 计算评价结果

使用指数标度 AHP 等方法求取准则层和方案层各兄弟节点间的权重分配值,利用模糊评价集和判断矩阵,可求取最终的目标层(根节点)结果. 首先按下式求取准则层的评价向量:

$$B_i = \omega_{Li} \times U_i \quad (6)$$

式中: B_i 为准则层第 i 个因素的评价向量; ω_{Li} 为准则层第 i 个因素的分权向量; U_i 为式(5)求得的模糊判断阵. 容易建立准则层评价矩阵: $B = [B_1, B_2, \dots, B_n]^T$.

然后按下式可求取目标层评价向量

$$A = \omega_{Bi} \times B \quad (7)$$

式中: A 为目标层评价向量; ω_{Bi} 为目标层(即根节点)的权重分配向量; B 为准则层评价矩阵.

最后按下式求取模糊评价结果:

$$F = A \times S^T \quad (8)$$

其中 F 为模糊评价结果; A 为目标层评价向量; S 为评价集向量. 按表 1 的评价集描述, $S = [30 \ 40 \ 50 \ 60 \ 70 \ 80 \ 90]$.

3 模糊 CENS

将模糊综合评价法引入 CENS 中,可建立用于仿真可信度评估的模糊 CENS,具体如下所述.

3.1 模糊评价层次扩展

模糊综合评价法的评价结果是基于 AHP 方案层、准则层、目标层的 3 级评价层次推导的,而 CENS 可表达无限级评价层次. 将模糊综合评价法的计算扩展至 n 级层次,则式(5)应表达为下式:

$$U_i^{n-1} = \begin{bmatrix} U_{i1}^{n-1} \\ U_{i2}^{n-1} \\ \vdots \\ U_{ib}^{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{i1}^1 & \mu_{i1}^2 & \cdots & \mu_{i1}^c \\ \mu_{i2}^1 & \mu_{i2}^2 & \cdots & \mu_{i2}^c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{ib}^1 & \mu_{ib}^2 & \cdots & \mu_{ib}^c \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: U_i^{n-1} 表示叶节点上一层第 i 个因素的模糊判断阵; $n-1$ 上角标表示该判断阵属于第 $n-1$ 层(即叶节点上一层).

由式(9)可建立第 j 层的模糊判断阵为

$$U^j = [U_1^j, U_2^j, \dots, U_a^j]^T \quad (10)$$

其中 a 为该层因素的数目;用上角标 j 表示判断阵所处的层; $j = 1, 2, \dots, n-1$; n 为评价体系的层数.

同理,式(6)、(7)可改写为如下形式:

$$B_i^j = \omega_i^j \times U_j \quad (11)$$

$$A = \omega_i^1 \times B^1 \quad (12)$$

且第 j 层的模糊判断阵为

$$B^j = [B_1^j, B_2^j, \dots, B_n^j]^T \quad (13)$$

根节点的评价值仍由式(8)计算获得. 此外,还可给出除叶节点外任一层第 i 个因素的模糊评价结果,如下式:

$$F_i = B_i^j \times S^T \quad (14)$$

3.2 模糊 CENS 的计算

由式(9)~(13)可知,扩展至 n 级层次的模糊综合评价是 1 个从叶节点层判断阵开始的逐级递推过程,这与 CENS 的计算完全类似. 所不同的是, CENS 的节点评估结果是 1 个确定的数值,而模糊综合评价则是 1 个隶属度向量. 将式(9)代入式(10)~(13)中,逐级计算并对结果进行归纳,可取得下式的结果:

$$A_i = \sum_{a=1}^l (\mu_a^i \cdot \prod_{b=1}^{n-1} \omega_a^b), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

式中: A_i 为第 i 个评价等级的根节点结果隶属度; m 为评价集维度; μ_a^i 表示第 a 个叶节点在第 i 个评价等级上的隶属度; l 为叶节点数目; ω_a^b 表示第 a 个叶节点的第 b 层上级节点权重; n 为评价体系的层数.

结合 CENS 的算式(4),引入超越元素和动态元素,可将式(15)改写为

$$A_i = \sum_{a=1}^l \left(\mu_a^i \cdot \prod_{b=1}^{n-1} (\omega_a^b \cdot t_a^b) \cdot \prod_{c=2; r=1}^{n-1; p} u_{a_r}^c \right),$$

$$i = 1, 2, \dots, m. \quad (16)$$

且

$$u_{a_r}^c = \begin{cases} 0, & v_{a_r}^c < m_{a_r}^c; \\ 1, & v_{a_r}^c \geq m_{a_r}^c. \end{cases}$$

式(16)中: t_a^b 为第 a 个叶节点在第 b 个评价等级上的祖先节点的条件值; $u_{a_r}^c$ 为第 a 个叶节点到达根节点路径上的超越边积因子; p 为路径上的超越边数目; $v_{a_r}^c$ 为路径上的超越边源点取值; $m_{a_r}^c$ 为满意度阈值。

根节点处的评价向量为 $A = [A_1, A_2, \dots, A_m]$, 最终的模糊 CENS 评价结果可由式(8)计算获得. 值得注意的是, 由于模糊 CENS 包含有超越元素, 其算式(16)中包含有超越边源点处的评价值. 这说明在网络含有超越边的情况下, 必须由式(14)先行计算出超越边源点处的评价值, 才能用式(16)直接计算根节点的模糊 CENS 评价值.

3.3 模糊 CENS 的使用步骤

综上所述, 给出模糊 CENS 的使用步骤如下:

- 1) 建立仿真可信度评估对象的 CENS;
- 2) 对网络进行动态元素分析, 判定不确定元素的条件, 将动态网转化为静态网;
- 3) 确定模糊评价集, 以及各评价等级的隶属度函数;
- 4) 对叶节点进行专家评定, 给出评估得分;
- 5) 由式(16)结合式(8)、(14), 计算结果.

4 仿真可信度评估应用实例

以某仿真系统剧情校核为例, 说明模糊 CENS 在仿真可信度评估中的应用. 该仿真系统要求在一个单弹单目标的仿真过程中, 获取导引头的信号级仿真结果, 以完成某型号导引头的效能评估.

4.1 模糊 CENS 评估

依据该系统的仿真剧情设计, 建立其用于校核工作的 CENS, 如图 3 所示.

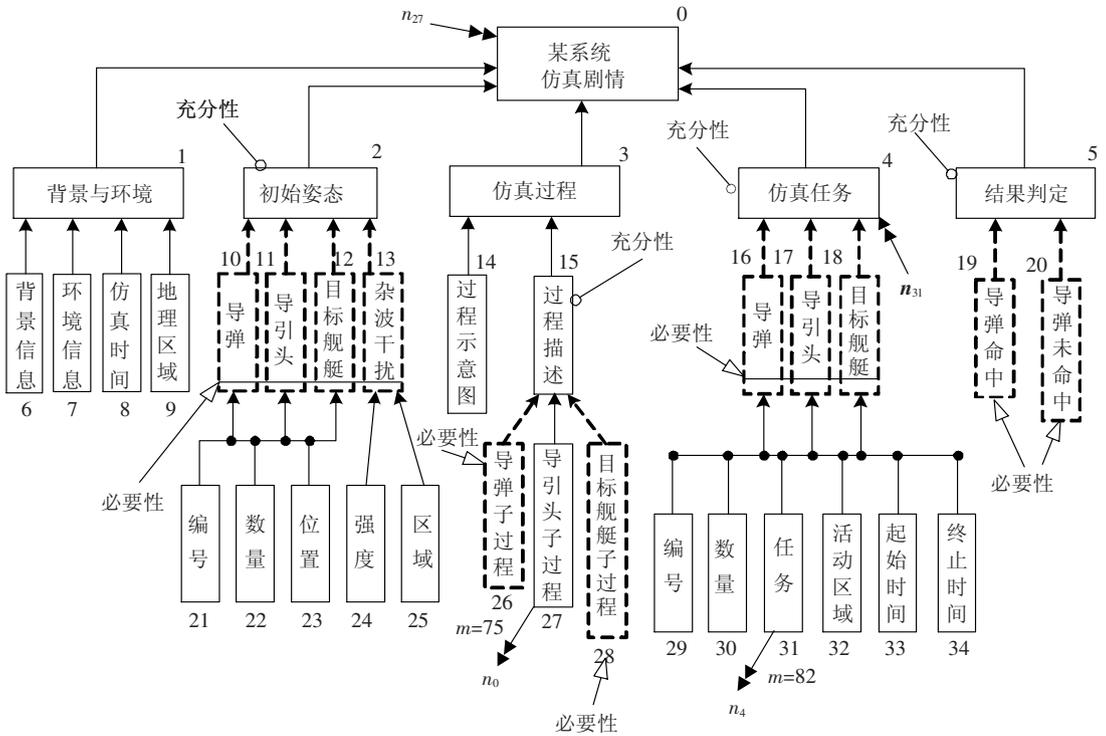


图 3 某仿真系统剧情校核的 CENS

首先对该 CENS 进行动态元素分析, 判定不确定节点 $n_{10} \sim n_{13}, n_{16} \sim n_{18}, n_{19}, n_{20}, n_{26}, n_{28}$ 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”. 按照动态元素分析的结果, 将该网络转化为图 4 所示的

静态 CENS. 使用指数标度 AHP 法^[12] 计算权重的向量如表 2.

组织 SME 对所有叶节点进行评估, 获得的评价结果如表 3 所示.

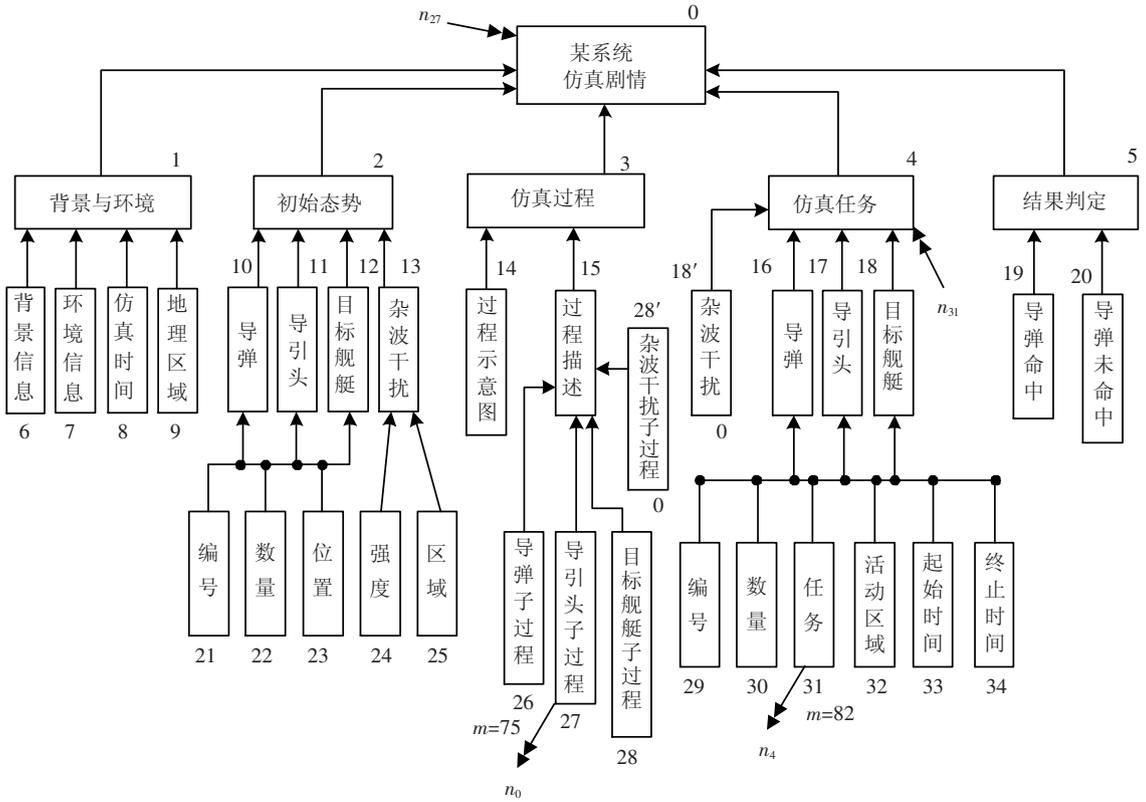


图 4 经动态元素分析转化后的 CENS

表 2 某 CENS 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 3 某 CENS 的叶节点评价向量

父节点	叶节点	评价向量
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 2、3 中的数据可知,节点 n_{27} 的评价值 $v_{27} = 87$, 大于其超越边满意度阈值 75; 节点 n_{31} 的评价值 $v_{31} = 87$, 大于其超越边满意度阈值 82. 由 CENS 的性质 6) 可知, 两条超越边均断裂.

采用表 1 规定的模糊评价集和图 2 规定的隶属度函数, 由式 (16) 计算可得, 根节点处的评价向量为

$$A = [0.246 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.019 \ 0.069 \ 0.666].$$

再由式 (16) 计算可得, 该系统仿真剧情校核的模糊 CENS 评价结果为 $F = 74.17$.

4.2 结果分析

使用图 2 所示的 7 标度模糊评价隶属度曲线对评估结果进行分析, 可知 $F = 74.17$ 落于“一般可信”和“比较可信”的区域内. “一般可信”的隶属度为 $\mu = 0.583$, “比较可信”的隶属度为 $\mu = 0.417$, 二者的隶属度基本一致, 说明该仿真系统的剧情设计相对于需求来说, 其可信任程度介于“一般可信”和“比较可信”之间.

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 2 中的向量数据, 并参照式 (16) 中的组合权重部分 $\prod_{b=1}^{n-1} \omega_a^b$, 可求得影子节点 $n_{18'}$ 的组合权重为 $\omega_{n_{18'}} = 0.1768$, 影子节点 $n_{28'}$ 的组合权

重为 $\omega_{n_{28}'} = 0.06885$, 二者对根节点的权重和为 $\omega_{n_{18}'} + \omega_{n_{28}'} = 0.24565$, 基本达到了 $1/4$ 的影响程度. 而根据 CENS 的定义, 影子节点 n_{18}' 与 n_{28}' 的取值均为 0, 这导致了模糊评价值跌落至“一般可信”和“比较可信”之间, 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

仿真可信度评估网 CENS 应用动态元素和超越元素拓展了 AHP 评价树的静态网结构, 并建立了跨层的有向边连接. 通过进一步将模糊综合评价法在 CENS 中进行应用, 结合二者的优势形成模糊 CENS 方法, 并将其应用于仿真系统的可信度评估工作中. 模糊 CENS 考虑了 SME 对仿真节点评估的不确定性, 获取的可信度结果更加科学.

参考文献:

- [1] 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 (Sup. 2): 52 - 54.
- [2] 朱岩. 基于 AHP - Fuzzy 的航电综合化仿真系统可信度评估[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (3): 404 - 406.
- [3] RABELO L, ESKANDARI H, SHALAN T, *et al.* Supporting simulation-based decision making with the use of AHP analysis [C]//Proceedings of Winter Simulation Conference. Orlando: Winter Simulation Conference, 2005:2042 - 2051.
- [4] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1 - 103.
- [5] XU D L. Application of multiple criteria decision analysis in impact assessment of carbon labelling [C]//Proceedings of IEEE Industry Engineering & Engineering Management. Hong Kong: [s. n.], 2009: 2251 - 2255.
- [6] 魏翠萍, 夏梅梅, 张玉忠. 基于区间直觉模糊集的多准则决策方法[J]. 控制与决策, 2009, 24 (8): 1230 - 1234.
- [7] 叶帆, 应祖备, 吴治平. 不完全信息下的区间直觉模糊数的多属性决策方法[J]. 应用数学与计算数学学报, 2010, 24 (1): 70 - 76.
- [8] CHEN Dingjun. Fuzzy comprehensive evaluation based on rough set [C]//Proceedings of 2009 sixth international conference on fuzzy systems and knowledge discovery. Washington DC: IEEE Computer Society, 2009: 91 - 93.
- [9] DONG Deng, LI Yijie. Application of rough set and fuzzy comprehensive evaluation method in water quality assessment [C]//2010 international conference on computing, control and industrial engineering. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010: 126 - 128.
- [10] QIN Xiaohui, ZHANG Jun. “Three-dimensional” fuzzy comprehensive evaluation and selection of the currency channel members [C]//International conference on transportation engineering 2007. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2007: 3569 - 3575.
- [11] 张淑丽, 叶满昌. 导弹武器系统仿真可信度评估方法研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23 (5): 48 - 52.
- [12] BAI Hanbin, WANG Nuanchen. Research on the selection of scale in AHP [C]//Proceedings of 2010 3rd international conference on advanced computer theory and engineering (ICACTE). Chengdu: [s. n.], 2010: 108 - 111.

(编辑 张 宏)