

文章编号: 1001-0920(2006)05-0567-05

## 基于隐Markov模型的复杂仿真系统 运行有效性评价方法及应用

宋恒杰, 马萍, 杨明, 王子才  
(哈尔滨工业大学 仿真中心, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 根据复杂仿真系统具备随机性、严格时序逻辑性等工程实际特点, 提出一种以隐Markov模型(HMM)为基础, 利用多元统计理论定量分析复杂仿真系统运行有效性的评价方法。在引入状态观测向量矩阵的基础上, 详细介绍了量化描述仿真剧情、复杂仿真系统运行状态的HMM的建立方法, 给出了复杂仿真系统运行有效性评价准则, 并对评价过程中的关键算法进行了深入研究。

**关键词:** 复杂仿真系统; 运行有效性; 隐Markov模型; 评价

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

### Application of Evaluation Method Based on HMM for Result Validity of Complex Simulation Systems

SONG Heng-jie, MA Ping, YANG Ming, WANG Zi-cai

(Simulation Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China Correspondent: SONG Heng-jie, E-mail: songhengjie@hit.edu.cn)

**Abstract:** According to the characteristic of randomization and temporal logic in complex simulation system, an evaluation method is presented, based on hidden Markov model (HMM) and multivariate statistical theory, to quantitatively evaluate the result validity of complex simulation system. On the basis of importing the matrix of observed state vector, the designing approach of HMM is proposed to quantify the scenario and state of complex simulation system. Furthermore, quantificational evaluation criterion of result validity of complex simulation system is provided and the critical algorithm adopted in the process of quantificational evaluation is studied in detail.

**Key words:** Complex simulation system; Results validity; HMM; Evaluation

### 1 引言

高层体系结构(HLA)是美国国防部于1995年提出的新一代仿真技术框架,其显著特点是通过运行支撑环境RTI提供通用的、相对独立的支撑服务程序,成功地将具体仿真功能实现、仿真运行管理和底层传输三者分离,隐蔽了各自的实现细节,从而在保证仿真系统互操作性和仿真资源可重用性的前提下,能够支持构建大规模仿真平台,为规模性和复杂性不断增加的仿真应用提供了环境支撑。

复杂仿真系统是在一定条件下对现实系统的抽

象描述,因此在利用基于HLA的仿真系统进行预测分析和辅助决策时,必须对仿真系统的有效性进行确认。仿真系统有效性确认主要包括理论系统有效性确认、数据有效性确认以及运行有效性确认<sup>[1]</sup>。作为仿真系统有效性确认的核心,运行有效性确认的结果将直接影响基于仿真结果的一系列应用决策过程<sup>[2]</sup>。

目前,量化分析仿真系统运行有效性均以获取参考系统数据为前提,通过比较仿真系统与参考系统在相同初始条件下的输出数据,实现有效性定量

收稿日期: 2005-03-11; 修回日期: 2005-05-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60434010)。

作者简介: 宋恒杰(1976—),男,辽宁复县人,博士生,从事VV&A理论及辅助工具、HLA仿真系统开发等研究;杨明(1963—),男,吉林蛟河人,教授,博士生导师,从事复杂系统仿真实理论与方法、分布交互仿真技术等研究。

分析 其中,参考系统主要包括实际系统和可比系统两种类型 在应用于军事领域的复杂仿真系统运行有效性确认过程中,由于存在大量未来武器装备和作战环境信息,因此无法获得参考系统数据,从而导致难以定量分析复杂仿真系统的运行有效性

针对以上问题,为实现量化分析仿真系统运行有效性的研究目的,本文提出采用隐Markov模型定量描述复杂仿真系统运行状态以及仿真剧情的新方法,该方法有效解决了复杂仿真系统评价过程中,由于无法获取参考系统输出数据而导致难以有效量化分析仿真系统的难点问题 在此基础上,给出了确定仿真系统运行精度范围的方法,并采用置信区间法定量分析仿真系统在既定仿真剧情下具有一定置信度的真值存在范围,实现了仿真系统运行有效性的量化计算 鉴于应用于军事领域的复杂仿真系统是多元输出系统,在应用上述方法时将置信区间(c i)推广为同时置信区间(s c i),最后对应用Roy-Boise多元统计法计算仿真系统与参考系统输出变量均值差的同时置信区间的方法进行了深入的探讨

## 2 仿真剧情及复杂仿真系统状态的量化描述方法

针对应用于军事仿真领域的复杂仿真系统而言,仿真剧情是以仿真系统应用目标及需求为基础,对作战背景、条件以及发展演化过程进行假设和描述 概括地说,仿真剧情是针对特定背景下仿真执行过程中所有事件情节的描述,主要包括仿真系统中的实体种类、数量、属性、活动以及实体间交互的初始条件、约束条件和结束条件等 由此可见,仿真剧情是对军事仿真过程所需背景、条件、约束、规则以及仿真资源的设定 图1形象地描述了应用于军事

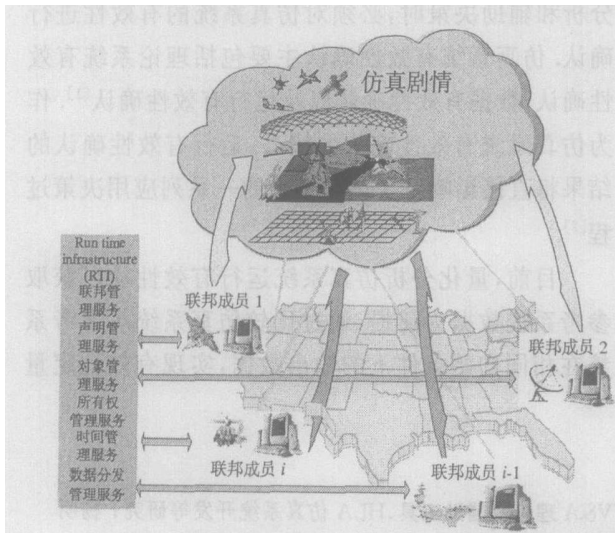


图1 仿真剧情与仿真实体的相互关系

领域的基于HLA的复杂仿真系统中仿真剧情与仿真实体的相互关系

由图1可以看出,仿真剧情是仿真系统应用目标以及需求的集中体现,因此,仿真系统运行有效性确认应以仿真剧情为基本评价依据 但长期以来,以文本和图表等形式表述的仿真剧情难以以为量化分析复杂仿真系统运行有效性提供有效的支持

当前应用于军事领域的基于HLA的复杂仿真系统其状态变化由随机事件驱动,即仿真系统按照仿真剧情,在规定时间内顺序地改变实体或设备状态 随着事件发生,系统状态发生相应变化,而事件发生具备随机性和不连续性 上述特征符合离散仿真系统的基本特征 鉴于此,研究者将隐Markov模型应用于量化描述仿真剧情及仿真系统状态,该描述方法能够实现两者的有机结合,以抽象形式有效支持仿真系统运行有效性的量化分析过程

### 2.1 隐Markov的基本概念

隐Markov模型(HMM)是在Markov链的基础上发展而来的<sup>[3,4]</sup> 作为双随机过程,HMM以Markov链表示基本随机过程,描述状态之间的转移;以另一随机过程描述状态和观测量之间的统计对应关系,即观测者通过随机过程感知状态的存在及其特性<sup>[5]</sup> 上述特点同应用于军事领域的复杂仿真系统相符合,即在仿真系统执行过程中,仿真实体作为仿真系统的有机组成,其输出参数是表征仿真系统状态存在及其特征的唯一方式

HMM的一般数学表述为

$$\lambda = (N, K, \pi, S, O), \quad (1)$$

其中: $N$ 为HMM中状态个数; $K$ 为HMM中对应的观测值个数; $\pi$ 为初始概率分布矢量,

$$\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N),$$

$$0 \leq \pi_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^N \pi_i = 1;$$

$S$ 为状态转移概率矩阵,

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1N} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ s_{N1} & s_{N2} & \dots & s_{NN} \end{bmatrix},$$

$$0 \leq s_{ij} \leq 1, \quad \sum_{j=1}^N s_{ij} = 1;$$

$$s_{ij} = P(S_i = S_j),$$

$$i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, N;$$

$O$ 为观测向量概率矩阵,

$$O = (o_{jk})_{N \times K},$$

$$1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq K;$$

$$o_{jk} = P(v_k | S_j),$$

$$1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq K.$$

## 2.2 仿真剧情及复杂仿真系统状态的隐 Markov 描述

在应用于军事领域的复杂仿真系统中, 作战部队、武器装备及自然环境等都可统一抽象为仿真实体, 仿真实体是组成仿真系统的基本单元<sup>[6]</sup>。由此可见, 仿真系统状态是所有仿真实体的状态集合, 通过离散地描述其所含仿真实体的状态, 可以客观体现在某一特定时刻仿真系统的静态特征, 不同状态之间的转移则形成仿真系统的动态特征, 如图 2 所示

在将 HMM 用于描述仿真剧情以及复杂仿真系统状态时, 考虑到仿真剧情中各状态  $S_i (i = 1, 2, \dots, N)$  具备严格时序逻辑, 则式(1)可转换为

$$\lambda = (N, K, \pi, S, O). \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \pi &= (1, 0, \dots, 0); \\ S &= \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_{22} & s_{23} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s_{NN} \end{bmatrix}, \\ O &= \begin{matrix} 0 & s_{ij} & 1, & s_{ij} = 1, \\ & & & j=1 \\ & & & j=N \end{matrix}, \\ s_{ij} &= 0 (i \neq j, i = j - 1). \end{aligned} \quad (3)$$

此处,  $O$  采用 Thile 不一致系数法进行构造, 使其表示仿真系统状态观测向量同参考系统状态观测向量之间的一致性程度, 具体定义方法见 3.3 节

此时, 令矩阵  $A^{(m)}$  表示仿真系统在第  $m$  次运行结束后, 仿真系统的状态观测向量矩阵, 即

$$A^{(m)} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(m)} & a_{12}^{(m)} & \dots & a_{1K}^{(m)} \\ a_{21}^{(m)} & a_{22}^{(m)} & \dots & a_{2K}^{(m)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{N1}^{(m)} & a_{N2}^{(m)} & \dots & a_{NK}^{(m)} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{即 } A^{(m)} &= (a_{ij}^{(m)})_{N \times K}, i = 1, 2, \dots, N, \\ & j = 1, 2, \dots, K, m = 1, 2, \dots, M. \end{aligned}$$

其中:  $N$  为仿真系统状态数,  $K$  为仿真系统观测向量数,  $M$  为仿真系统运行次数;  $A^{(m)}$  中第  $i$  行表示仿真系统在状态  $S_i$  下的系统状态观测向量值;  $A^{(m)}$  中第  $j$  列表示系统状态观测向量  $a_j$  在仿真系统所有状态下的观测值

由式(3)可见, 针对既定仿真剧情而言,  $N$  取值越大, 对仿真剧情划分的粒度越细;  $K$  取值越大, 对仿真状态描述越完备

综上所述, 在分别以  $S$  定量描述仿真剧情, 以  $O$  定量描述系统状态观测向量一致性的基础上, 通过引入系统状态观测向量矩阵  $A^{(m)}$ , 能够将仿真剧情与复杂仿真系统运行状态二者紧密结合起来, 为实现仿真系统运行有效性量化分析奠定基础

## 3 运行有效性评价准则及计算方法

仿真领域通过比较  $A^{(m)}$  与参考系统状态观测向量  $B^{(m)}$  的偏差来计算仿真系统的精度, 并将之称为仿真系统运行有效性确认。其中, 仿真系统精度是判断仿真系统运行结果正确性的度量值, 一般以仿真系统可接受的精度范围表示

下面, 针对参考系统状态观测向量  $B^{(m)}$  的构造方法, 以及定量计算仿真系统运行有效性的方法、步骤和实现过程中的若干关键问题分别进行详细讨论

### 3.1 参考系统状态观测向量以及观测向量概率矩阵的构造方法

针对应用于军事领域的复杂仿真系统而言, 由于在仿真系统中存在大量未来武器装备以及战场环境等相关数据, 从而难以获取参考系统状态观测向量  $B^{(m)}$ , 进而直接导致难以将仿真系统精度应用于复杂仿真系统运行有效性确认的量化分析过程<sup>[7]</sup>。为解决该问题, 本文在系统观测向量矩阵  $A^{(m)}$  的基

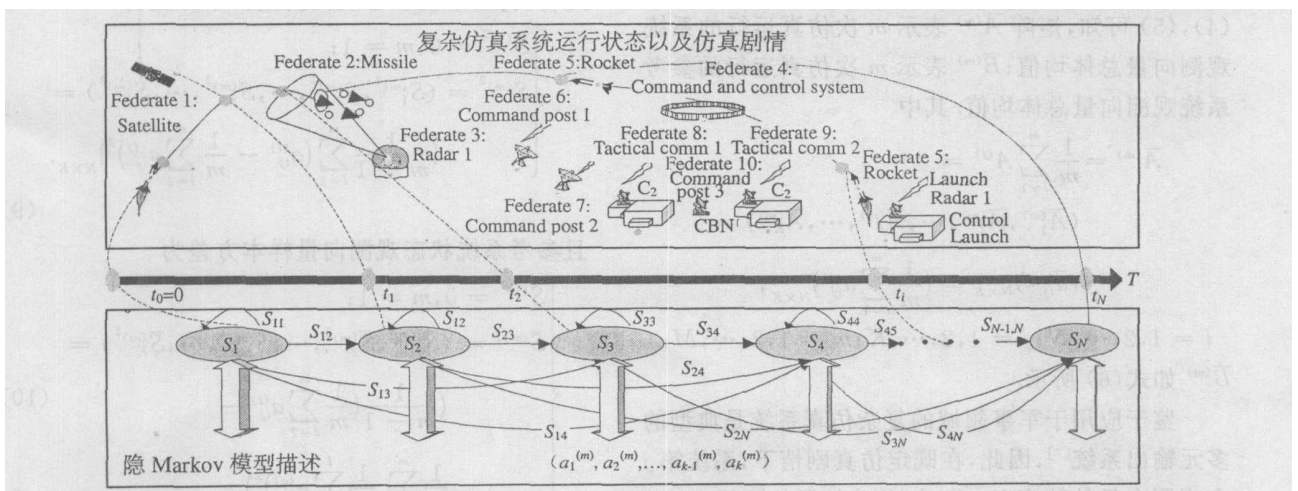


图 2 复杂仿真系统状态以及仿真剧情的隐 Markov 描述

基础上,采用如下构造方式:令

$$B^{(m)} = (b_{ij}^{(m)})_{N \times K},$$

其中

$$b_{ij}^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m a_{ij}^{(l)}, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, K, m = 1, 2, \dots, M. \quad (5)$$

则

$$\begin{aligned} \bar{B}^{(m)} &= \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m B^{(l)} = (\bar{B}_1^{(m)}, \bar{B}_2^{(m)}, \dots, \bar{B}_j^{(m)}, \dots, \bar{B}_K^{(m)}) = \\ &(\bar{b}_{ij}^{(m)})_{N \times K} = \left( \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m \left( \frac{1}{l} \sum_{q=1}^l a_{ij}^{(q)} \right) \right)_{N \times K}, \\ &i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, K; m = 1, 2, \dots, M. \end{aligned} \quad (6)$$

那么,令式(2)中

$$O = (o_{jk})_{N \times K}, 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq K, o_{jk} = \frac{1/m \sqrt{\sum_{l=1}^m (a_{jk}^{(l)} - \bar{b}_{jk}^{(l)})^2}}{1/m \sqrt{\sum_{l=1}^m (a_{jk}^{(l)})^2} + 1/m \sqrt{\sum_{l=1}^m (\bar{b}_{jk}^{(l)})^2}}. \quad (7)$$

此时  $0 \leq o_{jk} \leq 1$ , 称  $o_{jk}$  为 Theil 不一致系数  $o_{jk}$  表征在状态  $S_j (j = 1, \dots, N)$  下, 系统状态观测向量  $v_k (k = 1, \dots, K)$  同参考系统状态观测向量之间的一致程度  $o_{jk} = 0$  表示二者完全一致;  $o_{jk} = 1$  则表示二者差异性最大

将式(3), (7)代入式(2), 即可确定在既定仿真剧情下, 用以量化分析仿真系统运行状态的 HMM 模型

### 3.2 运行有效性评价准则

在以置信区间法定量分析仿真系统运行有效性时, 通常感兴趣的是仿真系统状态观测向量与参考系统状态观测向量的均值之间的差异<sup>[8]</sup>, 那么由式(4), (5)可知, 矩阵  $\bar{A}^{(m)}$  表示  $m$  次仿真运行的系统观测向量总体均值;  $\bar{B}^{(m)}$  表示  $m$  次仿真运行的参考系统观测向量总体均值 其中

$$\begin{aligned} \bar{A}^{(m)} &= \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m A^{(l)} = (\bar{A}_1^{(m)}, \bar{A}_2^{(m)}, \dots, \bar{A}_j^{(m)}, \dots, \bar{A}_K^{(m)}) = \\ &(\bar{a}_{ij}^{(m)})_{N \times K} = \left( \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m a_{ij}^{(l)} \right)_{N \times K}, \\ &i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, K; m = 1, 2, \dots, M; \end{aligned}$$

$\bar{B}^{(m)}$  如式(6)所示

鉴于应用于军事领域的复杂仿真系统是典型的多元输出系统<sup>[7]</sup>, 因此, 在既定仿真剧情下, 系统第  $j$  个观测向量的精度以  $\bar{A}_j^{(m)}$  与  $\bar{B}_j^{(m)}$  的置信区间(c i)给出, 仿真系统同时置信区间(s c i)可由所有  $K$  个

系统观测向量的 c i 表示

由此可见, 在以  $\epsilon$  表示状态观测测量  $j$  的精度要求,  $\epsilon$  表示仿真系统运行精度要求的情况下, 若  $|\bar{A}_j^{(m)} - \bar{B}_j^{(m)}| \leq \epsilon$  成立, 且  $|\bar{A}^{(m)} - \bar{B}^{(m)}| \leq \epsilon$  成立, 则认为第  $m$  次仿真系统运行有效

### 3.3 确定仿真系统运行精度

在以置信区间法分析仿真系统运行精度时, 需要首先确定仿真系统精度的上限和下限, 即表达式  $L \leq |\bar{A}^{(m)} - \bar{B}^{(m)}| \leq U$  中的  $L$  和  $U$ .

应用于军事领域的复杂仿真系统是典型的终止型仿真系统, 即仿真系统在满足终止条件时结束运行<sup>[9]</sup>. 因此在相同初始运行条件下, 采用重复运行方法获取仿真系统的观测向量, 从而保证仿真系统在所有  $M$  次仿真运行中获得的观测向量相互独立 令

$$L = (L_1, L_2, \dots, L_j, \dots, L_K), U = (U_1, U_2, \dots, U_j, \dots, U_K).$$

上式中  $L$  和  $U$  的构造方法有很多种, 可参考文献<sup>[10, 11]</sup>. 此处为简化计算, 由仿真领域专家根据仿真目的和应用需求直接给出相应的  $(L_j, U_j)$ .

### 3.4 统计计算

设  $(1 - r_j)$  是  $(\bar{A}_j^{(m)} - \bar{B}_j^{(m)}) (l_j, u_j)$  的置信度, 则  $(1 - r)$  是  $(\bar{A}^{(m)} - \bar{B}^{(m)}) (l, u)$  的同时置信度 令  $x_j = 1 - r_j (j = 1, \dots, K), Y = 1 - r$ , 则可表示为  $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_K)$ .

上式中, 为保证状态向量与仿真系统置信度的逻辑一致性<sup>[9]</sup>, 本文令  $\partial Y / \partial x_j > 0$ ; 且当  $x_j$  递增,  $x_i \leq x_j (i, j = 1, \dots, K)$  时, 满足  $\partial Y / \partial x_j < 1$ .

于是,  $(\bar{A}^{(m)} - \bar{B}^{(m)})$  的  $100(1 - r)\%$  的同时置信区间为  $[l, u]$ , 且

$$l = (l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_K), u = (u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_K). \quad (8)$$

此时, 仿真系统状态观测向量样本方差为

$$S^{(m)2} = \begin{cases} S^{(1)2} = 0, m = 1; \\ S^{(m)2} = (S_1^{(m)2}, S_2^{(m)2}, \dots, S_j^{(m)2}, \dots, S_K^{(m)2}) = \\ \left( \frac{1}{m-1} \sum_{l=2}^m (a_{ij}^{(l)} - \frac{1}{m} \sum_{l=2}^m a_{ij}^{(l)})^2 \right)_{N \times K} \end{cases} \quad (9)$$

且参考系统状态观测向量样本方差为

$$S^{(m)2} = \begin{cases} S^{(1)2} = 0, m = 1; \\ S^{(m)2} = (S_1^{(m)2}, S_2^{(m)2}, \dots, S_j^{(m)2}, \dots, S_K^{(m)2}) = \\ \left( \frac{1}{m-1} \left( \frac{1}{m} \sum_{l=2}^m a_{ij}^{(l)} - \frac{1}{m} \sum_{l=2}^m \frac{1}{l} \sum_{q=2}^l a_{ij}^{(q)} \right)^2 \right)_{N \times K} \end{cases} \quad (10)$$

由 3.3 节可知, 在仿真系统观测向量相互独立

的情况下, 通过式(4)所构造的参考系统观测向量也相互独立, 且假设两者都服从多元正态分布, 那么利用 Roy-Bose 多元统计法, 令置信度为  $(1 - r_j)$  时的  $c_i$  为

$$(l_j, u_j) = \frac{\bar{A}_j^{(m)} - \bar{B}_j^{(m)}}{\sqrt{N}} \pm \sqrt{\frac{4(m-1)^2 (S_j^{(m)})^2 - \bar{S}_j^{(m)2}}{m \sqrt{N}} T_{r_j, \tau, 2m-\tau-1}^2}, \quad (11)$$

其中  $T_{r_j, \tau, 2m-\tau-1}^2$  是自由度为  $\tau$  和  $2m - \tau - 1$  的 Hotelling  $T^2$  分布的上  $r_j$  百分位点 将式(11)代入(8)中, 即可得到仿真系统的同时置信区间  $[l, u]$

若  $[l, u] \subset [L, U]$ , 则认为该次仿真运行有效, 且置信度为  $100(1 - r)\%$ ; 若  $[l, u] \not\subset [L, U]$ , 那么增大  $m$ , 或在可接受范围内增加相应的  $r_j$ , 重新计算  $[l, u]$ ; 在  $m$  足够大, 或在可接受范围内不允许再增加  $r_j$  时, 认为该仿真系统运行无效

#### 4 结 论

本文结合实际工程特点, 提出了基于隐 Markov 模型的复杂仿真系统运行有效性评价方法 通过采用隐 Markov 模型定量描述仿真剧情以及复杂仿真系统运行状态的方法, 有效支持了复杂仿真系统运行有效性定量分析 在此基础上, 针对评价过程中的关键问题进行了深入研究, 为实现定量分析复杂仿真系统运行有效性提供了新的技术途径

#### 参考文献(References)

- [1] Chew J, Sullivan C. Verification, Validation, and Accreditation in the Life Cycle of Models and Simulations[A]. *Proc of Winter Simulation Conf* 2000 [C]. Orlando, 2002: 813-818
- [2] 李伯虎, 王行仁, 黄柯棣, 等. 综合仿真系统研究[J]. *系统仿真学报*, 2002, 12(5): 429-434  
(Li B H, Wang X R, Huang K D, et al. The Research

of Synthetic Simulation System [J]. *J of System Simulation*, 2002, 12(5): 429-434)

- [3] Young S J. Competitive Training in Hidden Markov Models [A]. *Proc ICASSP* [C]. Cambridge: Cambridge University, 1990: 681-684
- [4] 谢锦辉. 隐 Markov 模型(HMM)在语音处理中的运用 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995  
(Xie J H. *The Application of HMM in Speech Processing* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1995)
- [5] Satish L, Gururaj B. Use of Hidden Markov Models for Partial Discharge Pattern Classification [J]. *IEEE Trans on Electrical Insulation*, 1993, 28(2): 172-182
- [6] Gwendolyn H Walton, Robert M Patton, Douglas J Parsons. Usage Testing of Military Simulation Systems [A]. *Proc of the Winter Simulation Conf* 2001 [C]. Arlington, 2001: 771-779
- [7] Don Caughlin. An Integrated Approach to Verification, Validation, and Accreditation of Models and Simulations [A]. *Proc of Winter Simulation Conf* 2000 [C]. Orlando, 2000: 872-881
- [8] Seong Kyu Yoon, John F MacGregor. Fault Diagnosis with Multivariate Statistical Models, Part I: Using Stead State Fault Signatures [J]. *J of Process Control* II, 2001, 11(4): 387-400
- [9] Balci O. How to Assess the Acceptability and Credibility of Simulation Results [A]. *Proc of Winter Simulation Conf* [C]. Orlando, 1989: 62-71
- [10] Ephraim Y, Rabiner L R. On the Relation between Modeling Approaches for Information Source [A]. *Proc ICASSP* [C]. New York, 1988: 24-27
- [11] 李健, 王作英. HMM 转移概率的新的重估算法 [J]. *电子学报*, 2001, 29(12A): 1832-1835  
(Li J, Wang Z Y. A New Estimation Algorithm of HMM's Transition Probability [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(12A): 1832-1835)

(上接第 566 页)

- [2] 郑斌祥, 席裕庚, 杜秀华. 基于离群指数的时序数据离群挖掘 [J]. *自动化学报*, 2004, 30(1): 70-77  
(Zheng B X, Xi Y G, Du X H. Outlier Mining for Time Series Data Based on Outlier Index [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(1): 70-77.)
- [3] Breuning M, Kriegel H, Ng R. Optics of: Identifying Local Outliers [A]. *Proc of the 3rd European Conf on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases* [C]. Prague, 1999: 262-270
- [4] Dorigo M, Maniezzo V, Colnari A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents [J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics B*, 1996,

26(1): 29-41

- [5] Tsai C F, Tsai C W, Wu H C. Acof: A Novel Data Clustering Approach for Data Mining in Large Databases [J]. *J of Systems and Software*, 2004, 73(3): 133-145
- [6] Kuo R J, Kuo Y P, Chen K Y. Developing a Diagnostic System through Integration of Fuzzy Case-based Reasoning and Fuzzy Ant Colony System [J]. *Expert Systems with Applications*, 2005, 28(6): 783-797
- [7] He Z Y, Xu X F, Deng S C. Discovering Cluster-based Local Outliers [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(12): 1641-1650