

6-2-2020

Model Validation Method for Discrete Event Simulation

Niu Shuai

Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Shenglin Lin

Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Li Wei

Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Yang Ming

Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Model Validation Method for Discrete Event Simulation

Abstract

Abstract: Due to the discrete event system with some characteristics like unfixed operation process, flexible entity state and other issues, *a comprehensive validation method for discrete event simulation model based on qualitative and quantitative analysis* was proposed. The evaluation index system was composed of four aspects that are the consistency of simulation results, logic correctness of events occurrence sequence, consistency of condition events occurrence probability and consistency of activity execution time respectively. A qualitative and quantitative calculation method for the bottom evaluation indexes was proposed. The qualitative analysis method was used to validate logic correctness of events occurrence sequence and the quantitative analysis methods including hypothesis test and *vector similarity analysis* were used to validate the other bottom indicators. The results of the bottom indexes calculation were integrated to obtain the ultimate model validation result and the effectiveness of the method was verified by an example.

Keywords

discrete event system, model validation, consistency analysis, vector similarity analysis

Recommended Citation

Niu Shuai, Lin Shenglin, Li Wei, Yang Ming. Model Validation Method for Discrete Event Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 1984-1990.

一种离散事件仿真模型验证方法

牛帅, 林圣琳, 李伟, 杨明

(哈尔滨工业大学控制与仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对离散事件系统运行流程不固定、实体状态切换灵活等特点, 提出一种定性定量相结合的离散事件仿真模型综合验证方法。由仿真结果一致性、事件发生序列逻辑正确性、条件事件发生概率一致性及活动执行时间一致性4方面构成评估指标体系; 提出定性定量相结合的底层评估指标计算方法, 对事件发生序列逻辑正确性采用定性分析方法, 对其他底层指标采用假设检验和向量相似性分析的定量分析方法; 综合底层评估指标得到模型验证结果。通过实例分析, 验证了方法的有效性。

关键词: 离散事件系统; 模型验证; 一致性分析; 向量相似性分析

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2017)09-1984-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201709015

Model Validation Method for Discrete Event Simulation

Niu Shuai, Lin Shenglin, Li Wei, Yang Ming

(Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Due to the discrete event system with some characteristics like unfixed operation process, flexible entity state and other issues, a comprehensive validation method for discrete event simulation model based on qualitative and quantitative analysis was proposed. The evaluation index system was composed of four aspects that are the consistency of simulation results, logic correctness of events occurrence sequence, consistency of condition events occurrence probability and consistency of activity execution time respectively. A qualitative and quantitative calculation method for the bottom evaluation indexes was proposed. The qualitative analysis method was used to validate logic correctness of events occurrence sequence and the quantitative analysis methods including hypothesis test and vector similarity analysis were used to validate the other bottom indicators. The results of the bottom indexes calculation were integrated to obtain the ultimate model validation result and the effectiveness of the method was verified by an example.

Keywords: discrete event system; model validation; consistency analysis; vector similarity analysis

引言

仿真技术作为研究真实的或假想系统的行为、揭示系统的运行规律的重要手段, 已经成为认识和改造客观世界的重要方法^[1]。仿真是一种基于模型

的活动, 仿真模型是真实系统或假想系统的抽象和简化, 因此存在可信度的问题。

仿真模型验证的主要手段是对仿真数据与参考数据进行一致性分析。根据仿真输出数据是否与时间有关, 模型验证方法又可分为静态数据一致性分析方法和动态数据一致性分析方法^[2]。静态数据一致性分析方法主要有假设检验、参数估计等; 动态数据一致性分析方法主要包括时域分析中的TIC法、灰色关联分析^[3]和频域分析中的窗谱分析、



收稿日期: 2017-05-20 修回日期: 2017-07-17;
基金项目: 国家自然科学基金(61403097);
作者简介: 牛帅(1992-), 男, 河南焦作, 硕士生, 研究方向为仿真可信度评估; 林圣琳(1989-), 男, 黑龙江鹤岗, 博士生, 研究方向为仿真效能评估; 李伟(1980-), 男, 黑龙江望奎, 博士, 副教授, 研究方向为仿真分析和评估。

<http://www.china-simulation.com>

• 1984 •

最大熵谱分析等^[4]。

目前,模型验证方法主要集中在连续系统方面,关于离散事件仿真模型验证方法的研究较少^[5]。而且,离散事件系统具有运行流程不固定,实体状态切换灵活等特点,给离散事件仿真的模型验证带来困难^[6]。本文针对离散事件仿真模型验证问题,提出了一种定性定量相结合的综合验证方法。从仿真结果一致性和仿真运行过程一致性两个方面入手,建立验证指标体系;针对事件发生序列逻辑正确性采用定性的方法进行分析,同时引入了假设检验、向量相似性分析等定量一致性分析方法;最后采用加乘混合的指标综合方法得到综合验证结果。

1 离散事件仿真模型验证指标体系构建

在离散事件系统运行过程中,离散事件的发生时刻一般是随机的,对这类系统的仿真称为离散事件系统仿真^[7]。离散事件系统状态随着事件的发生而改变,同时系统存在着用户所关注的静态输出,因此本文从仿真运行过程一致性和仿真结果一致性两方面进行分析,进而建立了验证指标体系(如图 1 所示)。其中,仿真运行过程一致性又可以分为事件发生序列逻辑正确性、条件事件发生概率一致性和活动执行时间一致性 3 个方面。以下给出离散事件仿真模型的验证内容。

(1) 仿真结果一致性:仿真输出与参考输出的一致性程度是衡量仿真模型可信度的关键指标,一般通过假设检验、TIC 系数、频谱分析等方法得到^[8]。

(2) 仿真运行过程一致性:是指从系统运行过程的角度对仿真模型进行验证,以下简称为运行过程一致性。运行过程一致性又可分为事件发生序列

逻辑正确性、条件事件发生概率一致性和活动执行时间一致性 3 个方面。

① 事件发生序列逻辑正确性。离散事件导致系统状态的改变,离散事件系统仿真的过程与事件发生序列息息相关。引入“事件发生序列图”对离散事件发生序列进行描述,如图 2 所示。通过比较仿真和参考系统离散事件发生序列的一致性,进而度量仿真系统事件发生序列逻辑正确性。

② 条件事件发生概率一致性。在离散事件系统中,事件的发生具有随机性,即某一个离散事件发生可能导致多个随机离散事件的发生,且这些事件的发生需要满足一定的条件,本文将某一离散事件发生后多个可能发生的随机事件称为条件事件。此时离散事件间的转化就具有随机性,因此需要对仿真模型与参考系统中的条件事件发生概率进行一致性分析。离散事件的转化过程如图 3 所示,其中 $(P_{is}, P_{i(s+1)}, \dots, P_{il})$ 代表事件 E_i 向条件事件组 (E_{s+1}, \dots, E_l) 进行转化的概率。

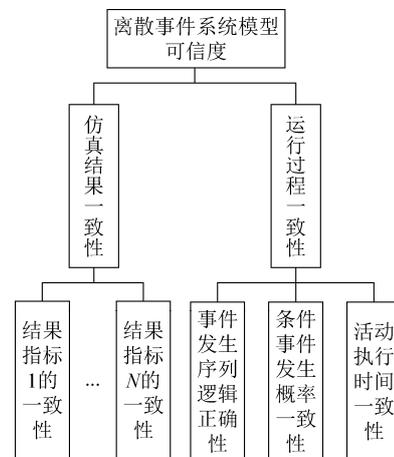


图 1 离散事件系统仿真模型验证指标体系

Fig. 1 Discrete event system simulation model credibility index system

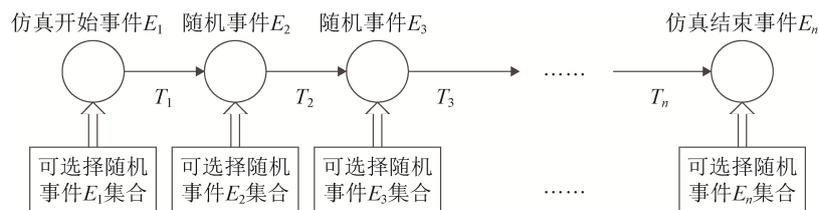


图 2 事件发生序列图

Fig. 2 Event sequence diagram

<http://www.china-simulation.com>

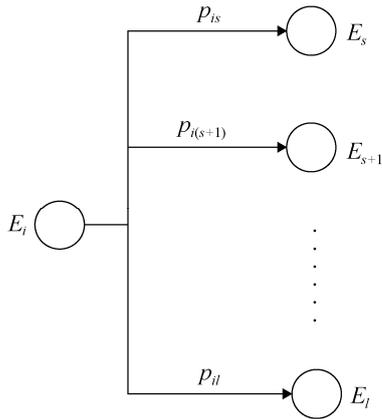


图 3 条件事件发生概率图
Fig. 3 Conditional event probability

③ 活动执行时间一致性。离散事件时间间隔的随机性表现为由一个离散事件向另一个离散事件转化所用时间是随机的。例如，由随机事件 E_k 向离散事件 E_l 转变时，记为 $E_k \rightarrow E_l$ ，运行时刻由 T_k 到 T_l ，记为 $T_k \rightarrow T_l$ ，也是随机的。即活动时间 $\Delta T = T_k - T_l$ 是时间特性的随机因素。

2 离散事件系统仿真模型验证方法和步骤

针对离散事件仿真模型验证指标体系中的底层指标，包括仿真结果一致性、事件发生序列逻辑正确性、条件事件发生概率一致性以及活动执行时间一致性进行分析，给出了定性、定量相结合的指标计算方法。

2.1 仿真结果一致性分析方法

为检验两组数据是否来自相同的总体分布，常用采用假设检验法进行分析。首先，检验仿真输出数据和参考输出数据是否符合正态分布。如果满足正态分布，则采用 t 检验法和 F 检验法进行分析^[9]。 t 检验法常用于两组样本的均值检验。其原理是，假设有 2 个独立的正态分布总体，记为 $X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ 和 $Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$ ， X_1, X_2, \dots, X_m 和 Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_2} 分别是 X 和 Y 的样本， \bar{X} ， \bar{Y} ， S_1^2 ， S_2^2 是相应的样本均值和样本方差。未知方差 σ^2 ，假设检验 $H_0: \mu_1 = \mu_2$ 。选取统计量

$$T = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_w^2 \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (1)$$

其中， $S_w^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$ ；

$$S_1^2 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (X_i - \bar{X})^2; \quad S_2^2 = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_2} (Y_i - \bar{Y})^2。$$

假定 H_0 成立的前提下， T 服从分布 $t(n_1 + n_2 - 2)$ ，对于给定的显著性水平 α ，查 t 分布表，取临界值 $t_{\frac{\alpha}{2}}(n_1 + n_2 - 2)$ ，由 $P\left(|T| \geq t_{\frac{\alpha}{2}}(n_1 + n_2 - 2)\right) = \alpha$ 得 H_0 的拒绝域为：

$$|T_0| \geq t_{\frac{\alpha}{2}}(n_1 + n_2 - 2) \quad (2)$$

F 检验法通过检验两组样本的方差进而判断是否服从同一总体分布^[9]。其原理是，假设有总体 $X \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ 和总体 $Y \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$ 。 x_1, x_2, \dots, x_{n_1} 是来自总体 X 的容量为 n_1 的样本， \bar{x} 和 s_1^2 分别为其样本均值和方差； y_1, y_2, \dots, y_{n_2} 是来自总体 Y 的容量为 n_2 的样本， \bar{y} 和 s_2^2 分别为其样本均值和方差；且这两个样本相互独立。假设 μ_1, μ_2 未知，并给出零假设 $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ 。选取统计量：

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (3)$$

假定 H_0 成立的前提下，统计量 F 服从分布 $F(n_1 - 1, n_2 - 1)$ 。对于给定的显著性水平 α ，查表得临界值 $F_{1-\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1, n_2 - 1)$ 和 $F_{\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1, n_2 - 1)$ 使得：

$$P\{F \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1, n_2 - 1)\} = \frac{\alpha}{2} \quad (4)$$

$$P\{F \geq F_{\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1, n_2 - 1)\} = \frac{\alpha}{2} \quad (5)$$

由上式可得出 H_0 的拒绝域为

$$F \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1, n_2 - 1) \text{ 或 } F \geq F_{\frac{\alpha}{2}}(n_1 - 1, n_2 - 1)。$$

若仿真输出数据和参考输出数据不符合正态分布，则采用秩和检验方法进行分析。秩和检验是一种检验两组样本是否服从同一分布的非参数检验方法^[9]，其原理如下：

(1) 将两组样本观测值 x_1, x_2, \dots, x_m 和

y_1, y_2, \dots, y_n 混合后, 按其值由小到大的顺序排列, 可以得到 $m+n$ 个秩。将 X_i 的秩记为 R_i , Y_j 的秩记为 S_j , 把得到的秩代替原来的样本得到两组样本的秩为: $R_1, R_2, \dots, R_m; S_1, S_2, \dots, S_n$

(2) 比较两组样本容量的大小, 选择其中较小的。不失一般性, 假定 $m \leq n$, 取容量为 m 的样本, 将样本的秩累加得到秩和, 如下

$$T = \sum_{i=1}^m R_i \quad (6)$$

由上式可知, 秩和为一个离散型随机变量, 可能值为 $\left\{ \frac{m(m+1)}{2}, \frac{m(m+1)}{2} + 1, \dots, \frac{m(m+1)}{2} + mn \right\}$ 。

进而以秩和 T 为统计量检验零假设 $H_0: F(x) = G(x)$ 。

当零假设为真时, 证明两组样本来自同一总体, 因此第一组样本的秩一定随机均匀分散在 1 到 $m+n$ 个自然数中, 而不会过度集中在较小或较大的数中, 即秩和 T 不会太靠近取值范围的两端。如果太靠近两端的值, 认为出现了小概率事件, 即 $P(T \leq T_1) + P(T \geq T_2) = \alpha$ 。一般取 T_1 和 T_2 满足 $P(T \leq T_1) = P(T \geq T_2) = \frac{\alpha}{2}$ 。对于给定的 α , 通过查表得到 T_1 和 T_2 , 拒绝域为 $T \leq T_1$ 或 $T \geq T_2$, 否则接受 H_0 。

2.2 事件发生序列逻辑正确性分析方法

事件发生序列逻辑正确性是指仿真模型的离散事件发生序列与参考系统的吻合程度。对参考系统进行分析, 建立参考系统的事件发生序列图, 得到参考系统所有的事件发生序列集合。运行仿真实验 $N(N \geq 50)$ 次, 通过观察对比, 得到与参考系统事件发生序列不相符的次数, 记为 M 。定义事件发生序列逻辑正确性为

$$R = \frac{N-M}{N} \times 100\% \quad (7)$$

将得到的事件发生序列逻辑正确性分析结果交由领域专家进行分析, 最终得到事件发生序列逻辑正确性评估结果。若正确则验证结果为 1, 否则记为 0。

2.3 条件事件发生概率一致性分析方法

将仿真模型和参考系统运行过程中的条件事件发生概率看成多维向量, 从向量的夹角和模长两个角度度量条件事件发生概率的一致性。将多组离散事件发生序列集合看作总体, 分别计算出条件事件转化的频率。根据大数定律, 当运行足够多次仿真实验时, 计算出的频率可以近似当成概率^[10]。

为了规范化表达, 提出条件事件转换概率的矩阵表达形式, 如式(8)所示。

$$P^s = \begin{bmatrix} p_{11}^s & p_{12}^s & \cdots & p_{1n}^s \\ p_{21}^s & p_{22}^s & \cdots & p_{2n}^s \\ \vdots & \vdots & p_{ij}^s & \vdots \\ p_{n1}^s & p_{n2}^s & \cdots & p_{nm}^s \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: n 代表系统中包含的所有离散事件总个数; 上标 s 代表仿真模型, 下标表示由事件 i 向事件 j 进行转化的统计概率。矩阵中第 i 行代表事件 i 向其他事件转化的概率。

同理, 对于参考系统, 有

$$P^r = \begin{bmatrix} p_{11}^r & p_{12}^r & \cdots & p_{1n}^r \\ p_{21}^r & p_{22}^r & \cdots & p_{2n}^r \\ \vdots & \vdots & p_{ij}^r & \vdots \\ p_{n1}^r & p_{n2}^r & \cdots & p_{nm}^r \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: 上标 r 代表参考系统。由公式(8)和(9), 条件事件发生概率的一致性分析可以转化为矩阵 P^s 和 P^r 的一致性分析。分析知矩阵每一行元素之和为 1 或 0, 中间存在的一行或多行全为 0, 表示该行代表的事件不会向其他的离散事件转化, 在实际应用中, 删除矩阵中的全 0 行。针对这一特点, 考虑将矩阵转化为向量形式更便于数学方法分析。首先, 将矩阵 P^s 和 P^r 的每一行转变为列向量, 记为向量 \vec{a}_i 和向量 \vec{b}_j , 即

$$\vec{a}_i = [p_{i1}^s, p_{i2}^s, \dots, p_{iq}^s]^T (i=1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

$$\vec{b}_j = [p_{j1}^r, p_{j2}^r, \dots, p_{jq}^r]^T (j=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

而后基于向量点积公式, 计算得到向量 \vec{a}_k 和 \vec{b}_k 之间夹角, 进而得到两向量夹角的一致性程度, 如公式(12)所示。同时给出两向量模长的一致性程度如公式(13)所示。

$$A_k = 1 - \frac{\arccos \frac{\vec{a}_k \cdot \vec{b}_k}{\|\vec{a}_k\| \cdot \|\vec{b}_k\|}}{90^\circ} \quad (12)$$

$$L_k = \begin{cases} 0, & \|\vec{b}_k\| \geq 2\|\vec{a}_k\| \\ 1 - \frac{\|\vec{a}_k\| - \|\vec{b}_k\|}{\|\vec{a}_k\|}, & \|\vec{b}_k\| < 2\|\vec{a}_k\| \end{cases} \quad (13)$$

最后, 加权综合两向量夹角和模长的一致性程度, 得到事件 E_k 向其他事件转化的一致性 C_k 如下

$$C_k = W_1 \cdot A_k + W_2 \cdot L_k, C_k \in [0,1], k = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$W_1 + W_2 = 1$$

其中, W_1 和 W_2 为相应一致性分析结果的权重。根据相应的条件事件发生的重要程度赋予 C_k 相应的权重, 最终得到矩阵 P^s 和 P^m 的一致性程度 \bar{C} , 如式(15)所示。

$$\bar{C} = C_k \times w_k (k = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1$$

2.4 活动执行时间一致性分析方法

根据图 1 建立的验证指标体系, 需对活动执行时间一致性进行分析。检验仿真模型和参考系统运行过程中, 同一活动执行时间是否服从同一总体分布。以离散事件 E_i 向离散事件 E_j 这一活动执行过程为例, 其活动执行时间如式(16)所示。与仿真结果一致性分析方法相同, 采用假设检验与秩和检验相结合的一致性分析方法进行验证。

$$\{\Delta T_i^r\}, i = 1, 2, \dots, n_m \quad (16)$$

$$\{\Delta T_i^s\}, i = 1, 2, \dots, n_s$$

3 应用实例

以飞机起飞流程离散事件仿真模型验证为例, 具体说明本文验证方法的使用步骤。分析系统存在的所有离散事件有: 地勤人员开始检查 E_1 、通过地勤人员检查 E_2 、未通过地勤人员检查 E_3 、通过飞行员检查 E_4 、未通过飞行员检查 E_5 、请求飞行请求 E_6 、未通过飞行请求 E_7 、启动引擎 E_8 、启动加速发动机 E_9 、到达指定速度 E_{10} 、起飞结束 E_{11} 。

分析参考系统特点及仿真应用目的, 建立如图 4 所示的飞机起飞流程仿真模型验证指标体系。

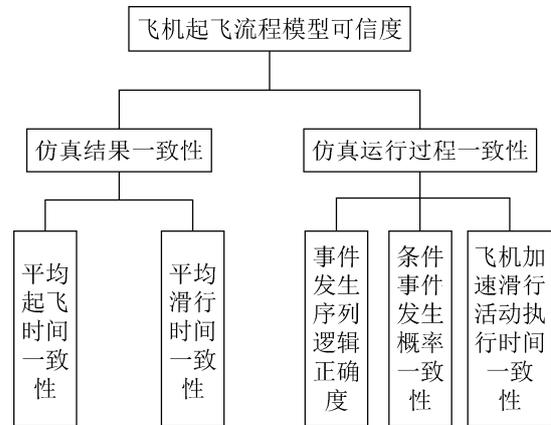


图 4 飞机起飞流程模型验证指标体系

Fig. 4 Aircraft takeoff process model validation index system

(1) 仿真结果一致性分析。假定所关注的输出是平均起飞时间(整个起飞流程时间)和平均滑行时间(启动引擎至起飞结束)。从参考系统和仿真系统运行结果各得到 30 组数据。首先, 对平均起飞时间进行一致性分析, 利用 $K-S$ 检验对这两组数据进行正态分布检验, 显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。正态分布检验结果如表 1 所示。

表 1 平均起飞时间样本正态分布检验结果
Tab.1 Normal distribution test results of average takeoff time sample

数据来源	计算统计量	临界值	检验结果
仿真数据	0.15	0.24	正态分布
参考数据	0.21	0.24	正态分布

由表 1 可知, 两组数据满足正态分布, 进而使用 t 检验和 F 检验对两组数据正态分布的均值和方差进行一致性分析(见表 2)。由此得出仿真输出数据与参考数据通过了 t 检验而未通过 F 检验。同时, 采用加权综合的方法获得该指标的一致性分析结果, 给定 t 检验方法所得结果的权重为 0.75, F 检验方法所得结果的权重为 0.25。

同时, 对 30 组平均滑行时间仿真和参考数据进行一致性分析, 得到的检验结果是通过了正态分布检验、 F 检验和 t 检验。并采用加权的方法综合

均值和方差检验的一致性分析结果, 分配权重分别为 0.75、0.25。

表 2 平均起飞时间样本均值和方差检验结果

Tab. 2 Normal distribution mean and the variance test results of average takeoff time sample

方法	计算统计量	临界值	检验结果
F 检验	2.08	$F_{0.05}(30,30)=1.84$	不一致
t 检验	1.52	$t_{0.05}(30)=1.6973$	一致

(2) 仿真运行过程一致性分析, 首先进行事件发生序列逻辑正确性分析。通过分析参考系统的运行状态, 得到参考的事件发生序列由图 5 所示。

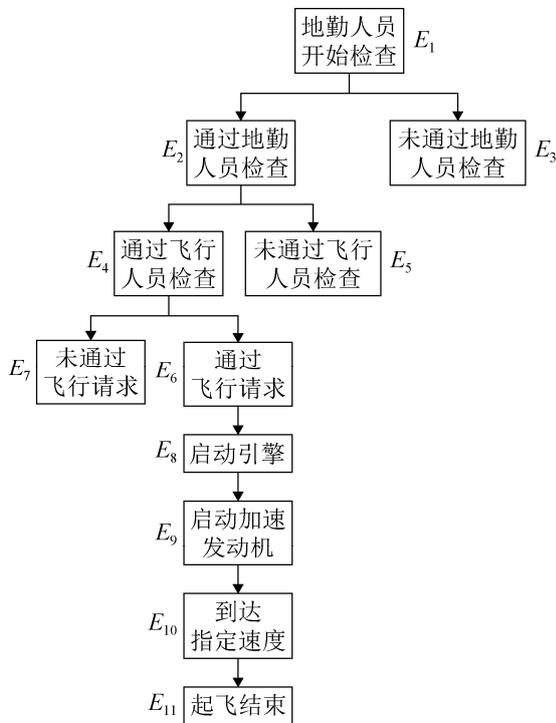


图 5 飞机起飞流程分析

Fig. 5 Analysis of aircraft takeoff process

将若干次仿真运行得到的事件发生序列与图 5 所示的事件发生序列进行比对。经过 100 次仿真, 其中 95 次仿真运行的事件发生序列与参考事件发生序列是一致的。由此得到事件发生序列正确率为 95%, 将结果交由专家评定, 得到事件发生序列的逻辑正确性分析结果为 1。

其次, 进行条件事件发生概率的一致性分析。需要分析事件 E_1 到事件 E_7 转化概率的一致性。其

中事件 E_1 、 E_2 和 E_4 包含了若干条件事件, 通过仿真和参考系统运行过程得到各条件事件的发生概率, 进而得到矩阵 P^s 和 P^r , 如下所示。

$$P^s = \begin{bmatrix} 0 & 0.85 & 0.15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.86 & 0.14 \end{bmatrix}$$

$$P^r = \begin{bmatrix} 0 & 0.66 & 0.34 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.74 & 0.26 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \end{bmatrix}$$

依据式(12)~(15), 假定令权重 $W_1 = W_2 = 0.5$, $w_1 = w_2 = w_3 = 0.33$, 计算得到条件事件发生概率的一致性分析结果如表 3 所示。

表 3 条件事件发生概率一致性分析结果

Tab. 3 Conditional event occurrence probability consistency analysis results

条件事件名称	向量夹角一致性	向量模长一致性	单个向量综合结果	综合分析结果
$E_1 \rightarrow E_2, E_3$	0.808	0.860	0.8340	
$E_2 \rightarrow E_4, E_5$	0.855	0.862	0.8585	0.84
$E_4 \rightarrow E_6, E_7$	0.845	0.874	0.8595	

再次, 进行活动执行时间的一致性分析。以飞机加速滑行活动为例进行分析, 飞机加速滑行是启动加速发动机和飞机到达指定速度两个事件间的活动。首先, 对 20 组验证数据进行正态分布检验, 即 K-S 检验, 显著性水平为 $\alpha = 0.05$, 结果如表 4 所示。

表 4 正态分布检验结果

Tab. 4 Normal distribution test results

数据来源	计算统计量	临界值	检验结果
仿真数据	0.34	0.294	非正态分布
参考数据	0.41	0.294	非正态分布

由表 4 可知仿真数据和参考数据不服从正态分布, 故采用秩和检验进行分析。随机抽取仿真和参考数据 9 组, 选取显著性水平 $\alpha = 0.05$, 结果如表 5 所示。由此可得仿真和参考数据样本来自同一总体, 进而得到活动执行时间的一致性分析结果为 1。

表 5 秩和检验结果
Tab. 5 Rank sum test results

方法	计算统计量	临界值	检验结果
秩和检验	92	[63, 108]	一致

随后,采用加乘混合的指标综合方法,针对事件发生序列逻辑正确性指标采用乘法的方式向上综合,针对其他指标则采用加权的方法向上综合,给定专家赋权值,如表 6 所示。进而计算得到该飞机起飞流程仿真模型的可信度为 0.87。

表 6 指标重要性配置表
Tab. 6 Indicator importance configuration table

序号	指标名称	权重
1	仿真结果一致性	0.5
2	仿真过程一致性	0.5
3	平均起飞时间一致性	0.6
4	平均滑行时间一致性	0.4
5	事件发生序列逻辑正确性	/
6	条件事件发生概率一致性	0.7
7	飞机加速滑行活动执行时间一致性	0.3

4 结论

针对离散事件系统运行流程不固定,实体状态切换灵活等问题,提出了一种定性定量相结合的离散事件仿真模型综合验证方法。从仿真结果一致性和仿真运行过程一致性两方面建立验证指标体系,其中仿真运行过程一致性又包括事件发生序列逻辑正确性、条件事件发生概率一致性和活动执行时间一致性三个部分。该方法从多个角度度量离散事件仿真模型与参考模型的一致性,进而得到更加全面的离散事件仿真模型验证结果。同时通过飞机起飞流程仿真模型验证实例证实了该方法的可行性,具有一定的工程应用价值。后续将在连续离散混合系统的仿真模型验证方面进行深入研究。

参考文献:

[1] 王子才. 仿真技术发展及应用 [J]. 中国工程科学, 2003, 5(2): 40-44. (Wang Zicai. Development and Application of Simulation Technology [J]. Engineering

Sciences, 2003, 5(2): 40-44.)

- [2] 乔剑锋, 胡骏. 仿真模型离散状态的验证 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 794-796. (Qiao Jianfeng, Hu Jun. Validation of Discrete Event State of Simulation Model [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(4): 794-796.)
- [3] 胡玉伟, 马萍, 杨明, 等. 基于改进灰色关联分析的仿真数据综合一致性检验方法 [J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(7): 711-715. (Hu Yuwei, Ma Ping, Yang Ming, et al. A Comprehensive Consistency Test Method Based on Improved Grey Relational Analysis for Simulation Results [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(7): 711-715.)
- [4] 张忠. 仿真系统可信度评估方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 7-10. (Zhang Zhong. Research on Evaluation Method for Credibility of Simulation System [D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2014: 7-10.)
- [5] 刘勇, 王德才, 冯正超. 离散事件系统仿真建模与仿真策略 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2005, 30(6): 1019-1025. (Liu Yong, Wang Decai, Feng Zhengchao. Discrete Event System Simulation Modeling and Simulation [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2005, 30(6): 1019-1025.)
- [6] Tako A A, Robinson S. Comparing model development in discrete event simulation and system dynamics [C]// Winter Simulation Conference. USA: Winter Simulation Conference, 2009: 979-991.
- [7] Raunak M, Olsen M. Quantifying validation of discrete event simulation models [C]// Winter Simulation Conference. USA: IEEE Press, 2014: 628-639.
- [8] Dhananjayan A, Seow K T. A Formal Transparency Framework for Validation of Real-Time Discrete-Event Control Requirements Modeled by Timed Transition Graphs [J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems (S2168-2291), 2015, 45(3): 350-361.
- [9] 周品. MATLAB 概率与数理统计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 206-212. (Zhou Pin. MATLAB Probability and Mathematical Statistics [M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2012: 206-212.)
- [10] 郭运瑞, 谭德俊. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 人民出版社, 2006: 120-123. (Guo Yunrui, Tan Dejun. Probability Theory and Mathematical Statistics [M]. Beijing, China: People's Publishing House, 2006: 120-123.)