

文章编号: 1002-0411(2003)05-0399-04

未确知数分析的仿真模型确认方法

杨 江^{1,2}, 李 治¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 文中首先指出了仿真模型确认中出现的 uncertainty 问题, 针对模型的 uncertainty 引出了未确知有理数的相关概念及其信息处理方法. 在此基础上, 给出了未确知数仿真模型确认方法, 并通过实例说明该方法的应用, 从而说明了该方法的应用前景.*

关键词: 建模与仿真; 仿真模型确认; uncertainty; 未确知有理数; 可信度

中图分类号: TP391 .9

文献标识码: B

THE METHOD OF SIMULATION MODEL VALIDATION BASED ON UNASCERTAINED NUMBER ANALYSIS

YANG Jiang^{1,2}, LI Zhi¹

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031 China;

2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, 621900 China)

Abstract: In this paper, the problem of uncertainty in the model validation is pointed out first. And then the concept of unascertained rational number and data operation is elicited. Finally the method of simulation model validation based on unascertained number analysis is presented. An example is given and the application perspective of the method is indicated.

Keywords: modeling and simulation; simulation model validation; uncertainty; unascertained rational number; confidence

1 引言 (Introduction)

随着仿真技术的不断发展, 其应用领域不断扩大, 尤其在军事领域方面的应用越来越广泛. 与此同时, 对仿真正确性和可信度的要求也越来越高, 只有保证了仿真的正确性和较高的可信度, 仿真结果才有实际应用的价值和意义. VV&A (validation, verification & accreditation) 是模型有效性评估的重要方面, 仿真模型的确认 (validation) 负责考察模型在其作用域内是否准确地代表了现实系统, 即考察数学模型与实际系统之间的一致性. 有关学者对仿真模型的确认提出了一些方法^[1-3], 这些方法大体上可分为两类: 一类为主观确认方法, 另一类为实验确认方法. 对于复杂系统的建模和仿真, 要想从理论上证明其正确性或得到其可信度是十分困难甚至是不可能的. 判断模型及其仿真结果是否正确的最终办法是“通过实践来检验”, 即通过对模型仿真输出与实验数据的比较, 考察两种结果的一致性来实现. 对于武器的静态性能仿真的检验一般采用点估计、区间

估计和假设检验等统计检验方法^[4]. 对于武器系统的动态性能仿真的检验一般有两类方法, 即定性和定量方法, 其中定性方法中常用的有 TIC's 不等式系数法^[5]、灰色关联分析和相似系数法^[6], 而定量方法中最常用的是基于频谱分析统计推断方法^[7,8]. 统计推断方法需要大量的样本数据, 而对于大型复杂的武器系统进行多次重复实验是很昂贵的, 甚至是不可能的. 另外, 仿真模型是对现实系统的一种抽象和近似, 在建模过程中总存在着 uncertainty, 这种 uncertainty 必然影响到仿真输出. 目前, 在人们已认识到的不确定信息中, 它们的 uncertainty 可归为随机性、模糊性、灰性和未确知性. 对于 uncertainty 信息的随机性可用概率统计方法进行表达和处理, 对于 uncertainty 信息的模糊性可用模糊数学进行表达和处理, 对于 uncertainty 信息的灰性可用灰色数学理论和灰色数学方法来表达和处理. 不确定信息的未确知性有别于随机性、模糊性和灰性, 未确知信息是由于条件限制在进行决策时无法准确知道的信息, 也就是说, 由于

决策者所掌握的数据不足,而不能确定事物的真实状态和数量关系而带来的纯主观认识上的不确定性。“未确知数学”的概念是由于建筑工程理论研究的需要而提出的,它的研究与应用开创了一条研究未确知信息数学表达和处理的全新路子。

2 不确定信息的未确知数表示^[9] (Expression of uncertainty information by unascertained number)

为了实现对不确定信息的表示,未确知有理数把一个量用它的取值范围,即区间 $[a, b]$ 及区间内各取值 $a = x_1 < x_2 < \dots < x_n = b$ 的可信度 $\Phi(x_i)$ 来表示。

定义1 对任意闭区间 $[a, b]$, $a = x_1 < x_2 < \dots < x_n = b$,若函数 $\Phi(x)$ 满足:

$$\Phi(x) = \begin{cases} a_i, & x = x_i (i = 1, 2, \dots, n) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{且 } \sum_{i=1}^n a_i = a, 0 < a \leq 1$$

则称 $[a, b]$ 和 $\Phi(x)$ 构成一个 n 阶未确知有理数,记作 $[[a, b], \Phi(x)]$,称 a 、 $[a, b]$ 和 $\Phi(x)$ 分别为该未确知有理数的总可信度、取值区间和可信度分布密度函数。 $\{x_i\}$ 称为该未确知有理数的可能值序列。 $\{\Phi(x_i)\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 称为该未确知有理数的可信度序列。由分布密度函数 $\Phi(x)$ 可知,取值区间 $[a, b]$ 中 x_i 的可信度为 $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。使 $\Phi(x)$ 非零的 x 取值个数为该未确知有理数的阶数。当 $n = 1$ 时,定义1为一阶未确知有理数。当 $n = 1, a = 1$ 时,定义1中的未确知有理数为实数,是实数的另一种表现形式。

定义2 设 $\{x_i\} (i = 1, 2, \dots, n), \{y_j\} (j = 1, 2, \dots, m)$ 分别为未确知有理数 A, B 的可能值序列, $f(x_i) (i = 1, 2, \dots, n), g(y_j) (j = 1, 2, \dots, m)$ 分别为 A, B 可信度序列,则矩阵:

$$\begin{bmatrix} x_1 + y_1 & x_1 + y_2 & \dots & x_1 + y_m \\ x_2 + y_1 & x_2 + y_2 & \dots & x_2 + y_m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n + y_1 & x_n + y_2 & \dots & x_n + y_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

称为 A 与 B 的可能值和矩阵,而矩阵:

$$\begin{bmatrix} f(x_1)g(y_1) & f(x_1)g(y_2) & \dots & f(x_1)g(y_m) \\ f(x_2)g(y_1) & f(x_2)g(y_2) & \dots & f(x_2)g(y_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(x_n)g(y_1) & f(x_n)g(y_2) & \dots & f(x_n)g(y_m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

称为 A 与 B 的可信度积矩阵。

定义3 A 与 B 可能值和矩阵中第 i 行第 j 列元素 $x_i + y_j$ 与它们可信度积矩阵中的第 i 行第 j 列元素 $f(x_i)g(y_j)$ 称为相应元素。

定义4 将 A 与 B 可能值和矩阵中的元素按从小到大的顺序排成一列: x_1, x_2, \dots, x_L ,其中相同的元素算作一个。 A 与 B 可信度积矩阵中 $k_i (i = 1, 2, \dots, L)$ 的相应元素排成一个序列为 k_1, k_2, \dots, k_L ,其中若 x_i 表示 A 与 B 可能值和矩阵中 M 个相同元素时, k_i 表示这 M 个相同元素在 A 与 B 可信度积矩阵中的 M 个相同元素的和,那么称未确知数 $[[x_1, x_L], \Phi(x)]$ 为 A 与 B 的和,记作 $A + B$,其中,

$$\Phi(x) = \begin{cases} k_i, & x = x_i (i = 1, 2, \dots, L) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

$[x_1, x_L]$ 称为 $A + B$ 的可能值区间, $\Phi(x)$ 称为 $A + B$ 的可信度分布密度函数。在定义2,3,4中将和运算中的可能值和矩阵的“和”改为“差”、“积”、“商”,从而把可能值和矩阵变为可能值差矩阵、可能值积矩阵、可能值商矩阵,其它一切不变,即可得到未知数的减法运算、乘法运算和除法运算。

也可对未确知数有理数数学期望和方差进行定义^[9]。

事实上,未确知有理数是实数的推广,实数是特殊的一阶未确知有理数。在工程上,我们把某一个量的测量结果用未确知有理数表示,每一个测量值为未确知有理数的不同取值,测量取值范围为未确知有理数的取值区间,每一个测量值具有一定的可信度,这些可信度组成可信度序列。

3 基于未确知数分析的仿真模型确认方法 (Method of simulation model validation based on unascertained number analysis)

仿真模型的确认可以通过对模型仿真输出与真实系统输出实验数据的比较,考察它们误差的大小来实现。仿真模型的仿真输出可以表示为:

$$y^* = f(A, x) \quad (5)$$

x 为输入向量,表示仿真的系统输入; A 为参数矩阵,表示控制系统的模型参数; y^* 为仿真输出向量,表示仿真模型的仿真输出。

仿真误差:

$$e_x = y(x) - y^*(x) \quad (6)$$

$y(x)$ 为真实系统实验输出数据向量; e_x 为真实系统实验数据与模型仿真输出的差。

在模型确认实验设计中选择一系列点 x ,在这

些 x 点上进行系统确认实验以及进行相对应的仿真输出.由于在建模时,参数 A 存在着不确定性,这种不确定性必然影响到仿真输出.为了实现系统仿真输出的不确定性分析,我们可以通过实验得到系统模型参数的不确定性,利用不确定性的传播分析,求出仿真输出的不确定性描述.

在利用未知数进行确认分析时,我们把(5)式的参数 A 用未知有理数表示,它由取值区间及取值序列的可信度组成.在实际应用中有时需要由系统的物理参数求出系统模型参数.即:

$$A = g(P) \tag{7}$$

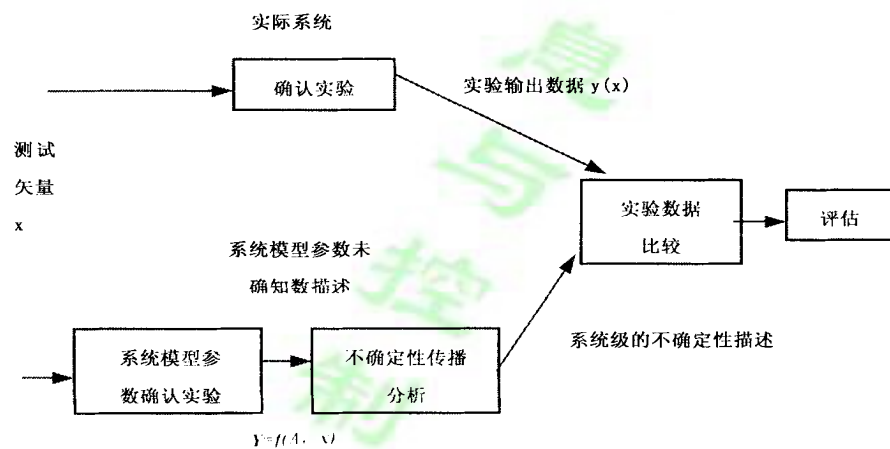


图1 仿真模型确认方法原理框图

Fig.1 Principle figure of simulation model validation

在图1中通过对系统参数的确认实验得到对系统参数不确定性的未知数描述,然后根据系统模型 $Y = f(A, x)$ 通过未知有理数的运算推导出系统级不确定性未知数描述,把实际系统确认实验得到的系统实验输出数据与系统级的不确定性描述进行比较,从而得到确认评估结果.

4 应用实例 (Application example)

我们可以应用未知数分析方法对控制系统的性能仿真模型进行确认.某导弹的一个控制参数是系统很重要的性能指标,如果控制参数不合适,将使导弹的威力大大降低.为了考察导弹控制参数的离散程度,我们给出控制参数的表达式:

$$h = H - S_v(t) \approx H - [a_1 a_2 t + a_3 t^2] \tag{8}$$

$$a_i = g_i(v_0, \beta, \rho, g, k) \tag{9}$$

其中, H 为再入高度; S_v 为再入高度到控制点的距离; a_1, a_2, a_3 为系统模型参数; v_0, β, ρ, g, k 为系统物理参数,分别为再入速度、再入俯角、大气密度、重

P 为物理参数向量; A 为仿真模型参数矩阵.把用未知有理数表示的参数 A 代入(5)式,求出仿真输出的未知有理数表达式,包括取值区间及取值序列的可信度,并计算出仿真输出未知有理数表示的期望和方差.根据仿真输出未知数的取值序列及其可信度以及置信度水平 p_a 确定一可信区间,考察实验数据是否落入此区间,如果落入此区间,我们具有 p_a 置信度水平接受此模型.也可考察一组实验数据的置信度水平.

图1给出了利用未知数分析的仿真模型确认方法原理框图.

力加速度、气动参数; t 为控制定时.

为了表达以上参数的离散性,由标准数据库、实验数据库以及实验数据的分析,并由式(9)计算给出模型参数 a_1, a_2, a_3 未知数的表示形式.

$$a_1 = [[6.3, 7.3], Q_1(x)], \text{其中:}$$

$$Q_1(x) = \begin{cases} 0.1 & x = 6.30 \\ 0.3 & x = 6.55 \\ 0.4 & x = 6.80 \\ 0.1 & x = 7.05 \\ 0.1 & x = 7.30 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$a_2 = [[0.34, 0.46], Q_2(x)], \text{其中:}$$

$$Q_2(x) = \begin{cases} 0.1 & x = 0.34 \\ 0.2 & x = 0.37 \\ 0.3 & x = 0.40 \\ 0.3 & x = 0.43 \\ 0.1 & x = 0.46 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$a_3 = [[0.0045, 0.0054], Q_3(x)], \text{其中:}$$

$$\Phi_3(x) = \begin{cases} 0.1 & x = 0.0045 \\ 0.1 & x = 0.0047 \\ 0.4 & x = 0.0049 \\ 0.2 & x = 0.0051 \\ 0.2 & x = 0.0053 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

此处, H, t 为确定数, 用一阶未确知数表示:

$H = [[80, 80], \Phi_H(x)]$, 其中:

$$\Phi_H(x) = \begin{cases} 1 & x = 80 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$t = [[23, 23], \Phi_t(x)]$, 其中:

$$\Phi_t(x) = \begin{cases} 1 & x = 23 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

根据定义 4 及未确知数运算规则可进行运算, 把相关的未确知数代入(8)式求出控制参数 h 的未确知数表示形式, 它包括取值区间及取值序列的可信度.

$h = [[0.175, 28.143], \Phi_h(x)]$, 其中:

$$\Phi_h(x) = \begin{cases} 0.01 & x = 0.175 \\ 0.01 & x = 2.820 \\ 0.07 & x = 5.300 \\ 0.06 & x = 7.097 \\ 0.15 & x = 10.246 \\ 0.12 & x = 12.595 \\ 0.17 & x = 14.071 \\ 0.11 & x = 17.287 \\ 0.12 & x = 19.541 \\ 0.07 & x = 21.887 \\ 0.06 & x = 24.026 \\ 0.03 & x = 26.193 \\ 0.01 & x = 28.143 \end{cases}$$

$$E(h) = \left[\left[\frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^k x_i \alpha_i, \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^k x_i \alpha_i \right], \Phi(x) \right]$$

$$= [[14.701, 14.701], \Phi_h(x)]$$

$$\Phi_h(x) = \begin{cases} 0.99 & x = 14.701 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

根据分析计算结果可知, h 的期望为 14.701, 其

可信度为 99%. 分布区间为 [0.175, 28.143], 在此区间的置信度水平 p_α 为 0.99. 而 h 在区间 [10.246, 19.541] 置信度水平 p_α 为 0.67. 通过考察系统小样本实验数据是否落入检验区间来实现对仿真模型的确认.

5 结论 (Conclusion)

通过以上分析, 我们可以看出, 未确知数分析方法是一种有效的仿真模型确认手段, 尤其是在含有不确定性数据的处理以及小样本系统实验数据方面. 通过对该方法的不断完善, 将使它具有极大的应用前景. 但要更有效地应用该方法, 还有待于对未确知数理论的不完善及其相关应用技术的进一步研究.

参 考 文 献 (References)

- [1] Balci O. Verification, validation and accreditation of simulation model [A]. Proceeding of the 1997 Winter Simulation Conference [C]. Virginia: Virginia Tech, 1997. 135 ~ 141.
- [2] Elmpert M R. Issues and challenges in validation military simulation model [D]. USA: Ohio. Air University. 1995.
- [3] 王维平, 朱一凡, 华雪倩, 等. 仿真模型有效性确认与验证 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [4] 吴立人. 仿真模型有效性定量确认方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2000, 246: 23 ~ 26.
- [5] 董居中. THEIL 不等式法在水下自航器仿真模型验证中的应用 [J]. 计算机仿真, 1998, 15(2): 51 ~ 53.
- [6] 柳世考, 刘兴堂, 张文利. 用相似度对仿真系统可信度进行定量评估 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(2): 143 ~ 145.
- [7] 李鹏波, 谢红卫. 频谱分析方法在仿真可信性研究的应用 [J]. 系统仿真学报, 1998, 10(3): 18 ~ 21.
- [8] 魏华梁, 翟宏伟, 王式安. 最大熵谱估计在导弹系统仿真模型验证中的应用 [J]. 北京理工大学学报, 1996, 16(3): 234 ~ 237.
- [9] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军. 不确定性信息数学处理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 43 ~ 77.

作者简介

杨 江(1960 -), 男, 副研究员, 博士研究生. 研究领域为测控技术, 系统仿真, 仿真与建模的有效性评估.

李 治(1933 -), 男, 教授, 博士研究生导师. 研究领域为计算机控制, 控制系统故障诊断, 系统仿真.