

模型校验经济有效性问题的优化模型与方法

商长安, 聂成, 宋懋

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:模型校验中的经济有效性问题对于仿真系统,特别是大型复杂的军用仿真系统的模型校验十分重要。通过对模型校验策略的分析,讨论了如何建立这一问题的优化模型,并给出了基于线性规划和非线性规划的模型求解方法。

关键词:模型校验;置信度;经济有效性;优化模型

中图分类号:TP391.9;N945.15 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)03-0061-03

模型校验的经济有效性问题一直被人们所关注。对于大型复杂的仿真系统进行模型校验是需要巨大花费的,这一花费与模型校验进行的程度有关,而模型校验的程度又是直接受仿真应用目的影响的。那么,我们首先考虑的是要通过模型校验使仿真系统的置信度满足应用目标的要求,同时又使得这一过程的花费最省,这就是模型校验的经济有效性问题。

1 经济有效性问题的优化模型

建立模型校验的经济有效性问题的优化模型,必须以模型校验中采取的策略为依据。

1.1 模型校验的策略

由模型校验的全局性准则可以知道,子模型或子系统同整个仿真系统的有效性并不是完全兼容的^[1]。因此,在模型校验中,通常针对仿真系统的结构特点,采用层次化校验方法,即从基本的功能子模型(系统)校验开始,逐步扩展到整个仿真系统。这一方法将校验的内容分解成一系列因素,按照它们之间的本质联系建立树形的结构层次关系(见图1),选取适当方法逐级、逐层进行仿真系统的校验。

图1中,总体指标节点称为根节点,最底层的节点称为叶节点。

第*i*层上节点的置信度为 $C = \sum_{i=1}^M C_i \cdot W_i$,称为置信度等式,式中 C_i 为第*i*个子节点的置信度水平; W_i 为 C_i 对应的重要性权值,且 $W_1 + W_2 + \dots + W_M = 1$; M 为父节点的子节点数目。

1.2 费用函数

令 $f(x)$ 为校验过程的费用函数,我们的目标即为 $\min f(x)$ 。

由模型校验的策略可以知道,某一节点置信度水平与它的子节点的置信度水平及相应的重要性权值有关,而校验过程的费用与各节点达到的置信度水平有关。因此,我们选择各节点在校验过程中达到的置信度水平作为费用函数 $f(x)$ 的变量, $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$, 其中 n 为评价树中除根节点外的所有节点数。 x 的分量是按照在评价树中由底层向顶层的原则进行分配的,如图2所示。

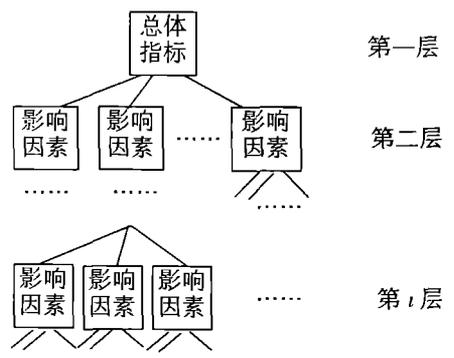


图1 置信度评价树

同时,由图1中描述的评价树的结构关系可以看出,叶节点以外的所有节点的置信度水平,都可以由其

收稿日期:2002-04-18

基金项目:国防科技预研基金项目(99J4.2.3.JB2203)

作者简介:商长安(1975-),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士生,主要从事防空作战优化理论与方法的研究。

所在分支中的叶节点置信度水平,根据树的结构关系和置信度等式加以适当表示。因此,在分配变量时,可以以叶节点的置信度水平作为基本变量,其它节点的置信度水平均由基本变量表示之。这样做可以缩简变量维数,减少计算量。现在要解决的问题就是在满足一定约束的条件下,求解使 $f(x)$ 达到极小时的最优解 $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_m]^T$ (m 为基本变量数)。以下未经说明 x 均表示基本变量。

1.3 费用函数的约束

关于费用函数的约束如何确定,我们以一个简单的例子加以说明。某一仿真系统的置信度评价树如图 3 所示。图中除正常的影响因素分解外,还加入了节点为满足应用目标的要求所应达到的最低置信度水平和对应的重要性权值,具体格式为 x_i (重要性权值,最低置信度水平), $i=1,2,3,4,5,6$ 。系统总体的置信度水平要达到 0.8, x_1, x_2, x_3, x_4 为基本变量。那么,由置信度等式可得到:

$$0.2x_5 + 0.8x_6 = 0.8, \begin{cases} 0.3x_1 + 0.7x_2 = x_5 \\ 0.6x_3 + 0.4x_4 = x_6 \end{cases} \text{。将这些等式整理后可以得到:}$$

$$3x_1 + 7x_2 + 24x_3 + 16x_4 = 40 \quad (1)$$

同时, x_5, x_6 的最低置信度水平均为 0.6, 所以还应有

$$\begin{cases} 0.3x_1 + 0.7x_2 = x_5 \geq 0.6 \\ 0.6x_3 + 0.4x_4 = x_6 \geq 0.6 \end{cases} \quad (2)$$

对于影响因素的置信度水平而言,它应该是介于 0 ~ 1 之间的。那么,为什么还要给各分量规定不等于 0 的下界呢? 因为由于优化算法的限制,若对节点的置信度不作非 0 下界的限定,势必在求出的最优解(由基本变量构成)中出现 0 分量,即由最优解推导出某些节点须达到的置信度为 0,那么,以这样的最优解为依据,往往会得出某些节点不需要校验的结论,这就显然使模型校验失去意义。

所以,对于 x 的每一个分量都要出于仿真应用目的的需要,人为的规定一个置信度水平的下限,如上例中的下限向量为 $l = [0.5, 0.6, 0.6, 0.6]$, 而上限向量 $h = 1$ 。将约束方程式(1)、式(2)与 x 分量的上、下限约束不等式联立,即可得到费用函数的约束方程组。由此,仿真系统校验费用方程的约束建立过程具体步骤为:①确定评价树中各节点的最低置信度水平;②根据评价树的结构层次关系,以基本变量为变元列出总体置信度水平满足应用目的所要求的等式约束;③根据非叶节点的最低置信度水平,以所在分支中的基本变量为变元得出不等式约束;④将已得到的约束与基本变量的上、下限约束不等式联立,得到费用函数的约束。

1.4 优化模型

综合上述建立费用函数及其约束的过程,我们可以得到模型校验经济有效问题的优化模型:

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ \text{s. t. } & Ax \geq b \\ & l \leq x \leq h \end{aligned}$$

其中,费用函数可以是线性函数或非线性函数形式,矩阵 A 和向量 b, l, h 可由费用函数约束的确立过程得到。

以图 3 所示为例,设其模型校验的费用函数为 $f(x) = x_1 + 2x_2 + x_3 + 4x_4$, 那么对关于它的模型校验的经济有效问题的完整描述为

$$\begin{aligned} & \min x_1 + 2x_2 + x_3 + 4x_4 & 0.6 \leq x_3 + 0.4x_4 \leq 0.6 \\ \text{s. t. } & 3x_1 + 7x_2 + 24x_3 + 16x_4 = 40 & \text{s. t. } 0.5 \leq x_1 \leq 1 \\ & 0.3x_1 + 0.7x_2 \geq 0.6 & 0.6 \leq x_2, x_3, x_4 \leq 1 \end{aligned}$$

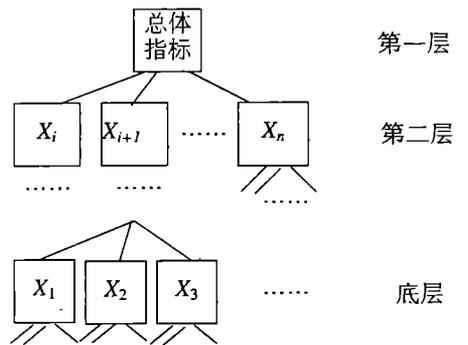


图 2 费用函数变量的分配

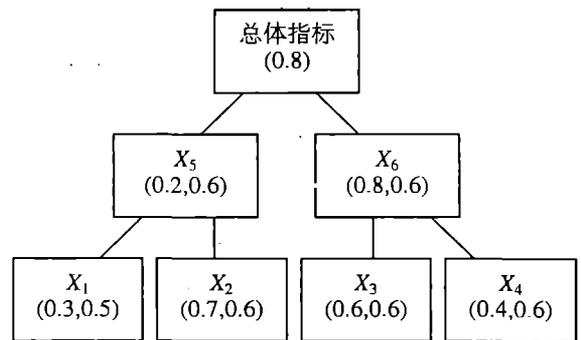


图 3 某仿真系统的置信度评价树

2 模型校验经济有效问题的解法

由上面建立优化模型的过程不难看出,模型校验的经济有效问题是一类优化问题。在具体求解的时候,可以分为两种情形:① $f(x)$ 为线性函数;② $f(x)$ 为非线性函数。

对于情形①,此时的模型可表示为

$$\begin{aligned} & \min c^T x \\ \text{s. t. } & Ax \geq b \\ & l \leq x \leq h \end{aligned}$$

这显然是一类有界变量的线性规划,可以采用有界变量的单纯形法^[2-3]来解决这一问题。

对于情形②,则宜采用非线性规划中的优化方法,如线性逼近法、罚函数法等。同样,采用非线性规划方法,也必须注意对约束中有界变量的处理。如线性逼近法中,在对费用函数进行其 Taylor 展式的逼近、迭代过程中,必须仍然采用有界变量的单纯形法进行迭代最优解的求解。

3 几点说明

1) 费用函数:费用函数应尽量表征出整个校验过程的费用特征,而且要便于求解;

2) 下限向量:下限向量的确定是基于对仿真系统的应用目的和建模者对仿真系统充分认识基础之上的,只有这样才能使确定的下限向量既满足问题的求解,又能满足仿真应用目的;

3) 最优解:问题的最优解可能不唯一,因此可以出于应用目的的需要,选择使权值高的节点达到较高置信度水平的最优解为最佳。同时,需要指出的是,得到的最优解只是在校验过程中的一种参考,可以以此为依据实现校验过程的经济有效;

4) 计算机辅助工具:文中的例子只是为说明问题举的一个非常简单的例子,对于大型的仿真系统而言,应考虑开发计算机辅助工具。

运筹学理论中的优化方法是解决模型校验经济有效问题的有益探索,这一问题在一般的小型仿真系统中不是很明显,但对于大型复杂的仿真系统,特别是军用大型仿真系统由于其结构层次关系复杂、校验难度很大、花费很高,这一问题就显得尤为重要,而且意义重大。

参考文献:

- [1] 商长安. 现代大型复杂仿真系统的特点及其置信度评估对策[D]. 陕西三原:空军工程大学导弹学院, 2001.
- [2] 魏权龄,王日爽,徐兵. 数学规划与优化设计[M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [3] 马仲蕃,魏权龄,赖炎连. 数学规划讲义[M]. 北京:中国人民大学出版社,1981.
- [4] 刘鹏,陈长兴,白云. 使用窗谱估计法验证仿真系统模型[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2002,1(2):69-71.

(编辑:田新华)

The Optimal Model and Methods of Economical – Effective Problem in Model Check

SHANG Chang – an, NIE Cheng, SONG Mao

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: The economical – effective problem in model check is very important for simulation system, especially for large – scale complicated military simulation system. This paper discusses how to found its optimal model through the analysis of model check countermeasure and proposes its solution based on linear and non – linear programming.

Key words: Model check; Confidence; Economical – effective; Optimal model