

主动元模型的建模框架研究

李小波 雷永林 李群

(国防科技大学信息系统与管理学院系统工程系, 湖南, 长沙 410073)

摘要: 综合运用因果推理技术和统计元建模技术建立的主动元模型能较好的表述系统机理, 刻画系统关键部件, 提高预测有效性和增强评估质量, 从而很好的满足探索性分析、高层决策支持、高层的推理和交流等高层问题的要求。本文首先分析在高层仿真问题中提出主动元模型的背景和需求, 在研究主动元模型结构框架的基础上提出了面向高层仿真的主动元建模框架, 然后研究了建模框架的关键问题——模型结构设计, 最后给出了一个建立主动元模型的实例。

关键词: 统计元模型; 主动元模型; 建模框架; 元模型结构设计

中图分类号: TP391.9

Research on Modeling Framework of Motivated Meta-model

Li Xiao-bo Lei Yong-lin Li Qun

(School of Information System and management, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, 410073)

Abstract: Motivated meta-model-synthesis of cause-effect reasoning and statistical meta-modeling-is good in mechanism representation, identifying the critical components, improving the ability of prediction, and in some cases also improving the quality of evaluation. So it can finely meet the needs of high-level problems, such as exploratory analysis, decision support and high-level reasoning and communication. This article firstly analyzes the contexts and requirements of proposing motivated meta-model in high-level problems, proposes a meta-modeling framework for high-level application according to a study of motivated meta-model's structure framework, then studies the key issue of the modeling framework - model structure design, and finally give an example of building a motivated meta-model.

Keywords: Statistical Meta-models; Motivated Meta-models; Modeling Framework; Structure Design of Meta-model

1 引言

近年来, 对仿真模型输入输出进行统计拟合的统计元模型由于能够起到降低维数、建立关系和简化运算的作用, 在许多领域内得到了广泛的应用。但是, 统计元模型将目标模型处理为黑箱, 不关注其内部机理, 在探索性分析、高层决策支持和高层的推理与交流等方面的应用困难重重, 难以满足 Davis 提出的五个高层仿真问题中评价仿真元模型的标准^[1]: (1)预测有效性好; (2)简约

性强; (3)识别关键部件: 仿真人员在分析中使用的许多模型都包含如果自身失效将导致整个系统崩溃的关键部件, 对于每一个关键部件, 仿真元模型的结构中应该有对其进行表征的变量; (4)具有可解释性和可理解性: 对于这些高层问题来说, 元模型应该有物理上的或者心理学上的意义并且具有可理解性; (5)正确标明变量的重要度。

Davis 和 Bigelow 提出的综合运用因果推理与统计元建模技术的主动元建模(Motivated Meta-modeling)技术充分利用对模型机理的认识进行元建模。从建模原理上来说, 主动元模型能够较好的满足以上五个评价标准。从当前的理论研究和实践应用的现状来看: Davis 等人提出了主动元模型的一般理论^[1], 并将主动元建模用于阻断问题的研究^[2], 杨井奇最先在国内介绍了主动元模型的一般概念并与其他元模型作了比较^[3], 周少平将主动元建模用

基金项目: 武器装备预研基金项目, 编号 9140A04010106KG01

作者简介: 李小波(1983—), 男, 汉族, 湖南衡南人, 硕士生, 研究方向为探索性分析、元建模等; 雷永林(1978—), 男, 汉族, 陕西大荔人, 博士, 讲师, 研究方向为组合仿真、探索性分析等; 李群(1971—), 男, 汉族, 山东泰安人, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为建模与仿真理论、柔性仿真体系结构、武器装备的能力仿真等领域。

于探索性分析建模^[4],这些工作对主动元模型的理论和应用研究做出了重要贡献。但是,主动元建模技术的研究还刚刚起步,没有提出一个面向高层仿真的主动元建模框架,对主动元建模理论的研究也还有待深入。本文首先研究了主动元模型的结构框架,在此基础上提出了面向高层仿真的主动元模型的建模框架,然后对主动元建模的关键问题——模型结构设计作了深入研究,探讨了结构设计所需的知识,结构设计原则、策略和关键问题,最后根据对兰德公司阻断问题的研究给出了一个建立主动元模型的实例。

2 主动元模型的结构框架

杨峰博士^[5]总结了统计元模型的相关理论,提出了统计元模型的三元组结构:元模型由(元模型数学结构+实验框架+剪裁实体结构)三元组加以表达;三元组结构可以完备的描述元模型的使用条件与基本信息。实验框架表达的是元模型的外部环境,剪裁实体结构反映的是元模型所逼近的仿真模型的实体结构。元模型数学结构则具体描述元模型的数学解析表达式。周少平博士^[4]根据主动元模型的建模原理,在杨峰博士的研究成果上提出了主动元模型的四元组结构框架:实验框架输入输出、内部关系、对应的实体结构(SES)和数学结构。

两者的主要差异在于主动元模型考虑了目标模型的机理,在结构框架增加了内部关系。内部关系是指根据主动元建模的目的,将目标模型和源系统的机理映射到主动元模型中产生的元模型部件和部件之间的关系。元模型的数学结构必须从元模型内部关系出发,按照高层仿真的需求描述元模型的主要内部关系(考虑到简约性要求,有些次要的内部关系可能被省略)。

如何建立主动元模型并将之用于探索性分析、高层决策支持等问题的关键是如何根据高层仿真的要求确定主动元模型的结构框架。主动元建模首先要明确主动元建模的目标模型所对应的源系统以及主动元模型与整个仿真系统的关系来确定对应的实体结构、确定输入输出参数和描述元模型内部关系并且在此基础上进行模型结构设计和获取仿真模型数据,然后采用设计的结构形式对数据进行拟合以确定主动元模型的数学形式。

3 主动元模型的建模框架

主动元建模的过程也是模型结构框架的构建过程。本节从上节的结构框架研究出发,以构建主动元模型的数学结构为重点,探讨了确定四元组结构的一般性步骤和原则。主动元建模框架的构建是一个包括主动元模型层次关系的确定、生成和评估三个步骤的有机过程,主动元模型的建模框架如图1所示。

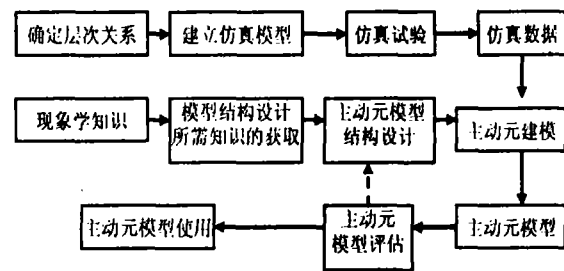


图1 主动元模型的建模框架

3.1 主动元模型层次关系的确定

主动元建模的层次关系是指主动元模型与仿真系统各个层次的关系。层次关系的研究是为了明确主动元模型在仿真系统中的地位和作用,确定主动元模型结构框架中的实体结构、输入输出和内部关系,是确定主动元模型的数学结构的前提。主动元建模的层次框架可按如下步骤确定。

(1)仿真系统层次分解:借鉴分层次仿真的研究思路,首先对所研究的系统进行深入分析,在低耦合、高内聚思想的指导下将系统进行多层次分解,部分或全部分解为若干个子系统,直至子系统不能再进行分解为止。

(2)实体结构定位:根据高层仿真问题的需要和仿真系统的层次特征,选定要进行元建模的仿真系统实体结构并对其进行分离。

(3)输入输出描述:在一定的实验框架下对分离出的实体结构进行考察,主要研究主动元模型的外部环境对主动元模型的影响以及主动元模型对外部的作用,并通过实验框架的输入输出来进行规范化描述。

(4)内部关系描述:在确定实体结构和对输入输出进行描述以后,要综合运用对机理的认识、历史数据、专家经验等现象学知识对元模型的内部关系进行描述。

(5)层次关系确定:综合考察前面确定的实体结构、输入输出和内部关系,确定主动元模型与本层其他部分、与主动元模型相对应的下层和上层之间的实体结构耦合关系、输入输出响应关系和机理联系。此外,本文讨论的是如何对主动元模型用于高层仿真,所以还要根据高层仿真的要求研究主动元模型是通过怎样的应用方式聚合到高层仿真中去的,从而确定主动元模型在高层应用中的作用和地位。

3.2 主动元模型的生成

建立主动元模型,首先要根据层次关系的指导对主动元模型所对应的实体结构、主动元模型的内部关系及其输入输出进行分析,根据选定的实体结构对下层仿真系统建立仿真模型,结合问题需要和层次框架中的输入输出描述确定输入输出变量,接着采用一定的实验设计方案进行大规模的仿真实验,获取生成主动元模型所需

的实验数据。然后综合运用已有的专家经验、历史数据和对机理的认识等现象学知识,获取各种模型结构设计所需的知识,在结构设计原则和策略的指导下参照层次框架中的内部关系描述进行变量筛选和聚合、模型结构的设计。最后根据设计的模型结构对试验数据进行拟合生成主动元模型的数学形式。

3.3 主动元模型的评估

主动元模型的有效性评估是仿真元模型过程框架研究的重要内容,是主动元模型的应用基础。主动元模型的评估要充分考虑仿真系统各层次尤其是上层系统对主动元模型的要求,并根据层次关系对主动元模型的要求按照评价指标进行有效性评估。

主动元模型是一种元模型,评估元模型的指标同样可以用于评估主动元模型。评价元模型的指标包括精确性、鲁棒性、有效性、透明性和简明性。此外,根据引言部分提出的标准,主动元模型还应该具有可理解性和可解释性,能采用可信、合适的形式来解释,并且模型和数据应该能有效处理不确定性以及可能的大量不确定性,这样要求主动元模型具有外推能力,能够描述问题关键部件、能够正确标明变量的重要度等。主动元模型的生成和有效性评估是一个循环的过程,如果评估结果不满意,则必须重新进行结构设计生成新的主动元模型。

4 主动元模型结构设计

由以上的建模框架研究可以看出,如何综合运用各种现象学知识来设计主动元模型的结构(也称确定主动元模型的模型形式)是主动元建模的关键问题,也是主动元建模与统计元建模的主要区别。设计主动元模型的结构首先要通过各种途径获取专家知识和经验、历史数据、仿真模型的结果以及对目标模型机理的认识等现象学知识,然后基于这些现象学知识采用因果推理、数学分析和物理推测等手段得到各种类型的指导主动元建模的知识,再按照模型结构设计原则和策略运用这些知识进行输入变量的筛选和聚合,最终得到主动元模型的数学结构。由以上过程可知,如何获取各种类型的知识,如何根据五个要求确定结构设计原则和策略在主动元建模中有着非常重要的意义。

4.1 元模型结构设计所需知识的获取

主动元建模中的知识是指建模者采取各种手段获取的有关目标模型和源系统的对主动元建模有帮助的信息。主动元建模与一般统计元建模最大的区别在于主动元模型由已经获取的相关知识来设计其模型结构,但一般情况下由于对要进行主动元建模的子系统或部件了解不是很全面,获取到的相关信息也不是很多。在这种情

况下主动元建模应该采取多种方式来获取系统相关信息来设计元模型的结构,下面是几种主动元建模中常用的通过因果推理、数学分析和物理推测等多种方式获取的模型结构设计所需的知识。

(1)在主动元建模过程中可以采用量纲分析的方法来确定元模型输入参数和中间复合参数类型,例如知道模型的输出是距离量,而输入中有时间量和速度量,则可以把时间 \times 速度作为候选中间变量进行统计回归。

(2)对高分辨率实体模型建立其元模型过程中,虽然能获取的有关高分辨率模型的开发说明文档很少,也可能鉴别出由复杂模型输入变量组合而成的中间变量,这些中间变量在高层更适合进行分析或对结果进行解释,并且可能非线性,比较适合作为候选回归变量。

(3)基于高分辨率模型所描述的现象,对相应物理机理进行猜测获取可能的中间变量类型。

(4)通过对一些分辨率较高的仿真模型文档的查阅或通过仿真模型开发者进行讨论,也可能鉴别仿真模型中的分段、分类特性。

(5)通过聚焦感兴趣输出结果分析,结合简单物理推理和大胆假设,有可能可以给出在量纲上相符合的粗略解。

(6)通过对某些关键部件的单独考虑,虽然不能精确表述其形式,但可以通过因素乘积来表述其外部重要因素和非线性因素。例如,如果系统变量 X 、 Y 、 Z 为零的情况下系统会失败,则系统效能可以表述为:

$$E = C_1XYZ [1 + C_2F(X,Y,Z)]$$

(7)通过一些适当的代数方法分析,在有些情况下也可能对仿真模型给出有物理含义的初步估计解析解。

(8)通过对仿真模型进行大量采样,将仿真数据通过ATR神经网络进行聚类分析,发现仿真模型中的不同模式,将区别明显的模式作为主动元模型分类特征。

4.2 元模型结构设计的原则

主动元模型与统计元模型的主要区别不在于拟合精度方面,而是看能不能够满足引言中的五个要求。以下是主动元模型结构设计的基本原则。

(1)识别问题的关键元。这可能需要一些领域知识,但一般不需要对目标模型进行深入的数学解构。

(2)辨明目标模型重要分支。这意味着确定一个非线性元模型的特定形式,对不同的分支采用单独的元模型拟合,较全的目标模型文档对这项工作很有帮助。

(3)在统计中使用复合变量进行回归分析以识别“聚合部分”(例如对给定问题中的输入变量 x 、 y 、 z ,可以认为问题只与 xy/z 这种复合方式相关)。

(4)基于上述三个基本原则对主动元模型结构做一个假设,对其进行量纲分析、简单物理推理和粗略的近似(比

如对一个积分用其函数的一个典型值与该函数的取值范围相乘来表示其积分结果)来发现其内部机理。

(5)在“混沌因素”中建模:引进未知系数和误差项对假定的模型结构进行误差补偿。

(6)如果可行,对建模过程中的问题进行“博弈”以分析特别感兴趣的问题区域。这些区域包括对方特定策略下的最坏情况分析和具有战略关联意义的变量。这种博弈将有助于在实验设计中确定如何对目标模型进行测试以及确定已有的输出数据的采样方案。

4.3 元模型结构设计的策略

面向高层应用的主动元模型在建模过程中一般都要从仿真系统的层次结构出发,根据各个层次之间的内在联系设计模型结构。根据这种建模特征可以将元模型结构设计策略分为自底向上策略和白顶向下策略。

自底向上策略是指从低层系统本身的特性出发,运用各种反映低层机理的知识(例如4.1节中的(1)~(3))对低层结构进行简化和聚合,并产生满足上层系统需要的中间变量。自底向上策略能够对整个仿真模型的“枝叶”进行修剪,初步理清了变量之间的关系,为自顶向下策略的实施打下了坚实的基础。自底向上策略能有效标明变量的重要度并满足简约性要求。

自顶向下策略是指从仿真系统的总体现象学出发,选取反映高层机理和有助于模型结构设计知识(例如4.1节中的(1)、(4)~(8)),然后利用因果推理技术和选取的知识类型聚焦模型内部结构来识别源系统的关键部件、重要分支、分类分段特性等内部结构特点,最后按照4.2节中的结构设计原则,根据仿真系统总体的结构特点采用正确的数学形式描述模型机理以确定元模型的数学结构。自顶向下策略能够识别关键元并使模型具有可理解性和可解释性。

4.4 变量筛选和聚合

模型结构设计的一个关键问题是如何对仿真模型原有的输入变量进行筛选和聚合。变量的筛选和聚合能够有效标明变量的正确度并满足简约性要求。

变量筛选是剔除那些对所研究的问题影响程度相对较小的变量。变量筛选首先要根据历史数据、专家经验、高分辨率模型运行结果和对模型机理的认识确定一些可能影响程度较小的变量。如有必要,可采取灵敏度测试对确定所关注变量的重要度。最后得出这些输入变量对输出变量影响的重要度排序,在此基础上进行筛选。

变量聚合是指将具有逻辑关系或者数学关系的多个变量聚合成较少的几个变量或一个变量,聚合后产生的变量称为聚合变量。对具有逻辑关系的变量的聚合要运用现象学知识对聚合变量进行识别和聚合,而对有数学

关联的变量的聚合要对这些变量进行回归分析。变量的聚合有时需要对模型机理的深刻认识,尤其需要从模型的结构特点出发,引入一些新的中间变量来对模型原有的一些看似逻辑关系不强的变量进行聚合。变量聚合近似方法分为局部问题变量聚合近似和全局问题变量聚合近似。局部问题变量聚合近似方法包括减少约束变量、区域化变量。全局问题变量聚合近似方法包括简化物理模型、中间变量、简化原理技术。

5 实例分析

阻断问题是美国军事研究的一个热点,根据对近年来兰德公司有关阻断问题的系列文献^{[2][6-8]}的研究,本节通过在阻断问题中建立的一个主动元模型来例释主动元建模的过程。该模型是一个用于探索影响阻断距离的各种因素的分析模型。由于篇幅有限,本节主要讨论建立该主动元模型的关键问题——元模型结构设计。

主动元建模的目标模型是一个分辨率较高的模型,描述的是蓝方在特定环境中采用最佳策略所能达到的对红方装甲部队的阻断距离 $Best_d_{halt}$ (蓝方摧毁一定数量 x_i 的红方装甲车视为阻断成功,红方到达目标距离 Obj 后停止前进)。蓝方攻击开始于 D_Day , 蓝方初始部队数 A_0 , $A(t)$ 表示 t 时刻战场范围内的蓝方攻击武器的数量。蓝方部队在最初的 T_{wait} 天(等待时间)内不能投入战斗,蓝方武器的 F_{post} 部分可以在 T_{wait} 和 T_{seed} 天(压制红方防空所需的时间)之间投入战斗, T_{seed} 以后所有的蓝方武器都可投入战斗。 R 是蓝方的部署速率, $Losses$ 是蓝方损失。蓝方采取的打击策略分为全纵深打击策略和打击领头部队策略。 T_{delay} 表示红方攻击前停顿时间, V 表示红方前进速度。

针对以上模型进行主动元模型的结构设计,首先采用自底向上策略对低层变量进行聚合。如果阻断时间大于 T_{seed} , 可以适度的将这三个变量用一个变量 T_x 来代替。

$$T_x = F_{post} \times T_{wait} + (1 - F_{post}) \times T_{seed}$$

然后考虑系统的重要分支特点——策略选择来确定模型形式。先引进 RSD_dep 和 RSD_le 在全纵深打击策略和打击领头部队策略的“必需的武器数量及投入时间”。用 T_{shoot_dep} 表示等待时间后蓝方不断攻击的时间长度有:

$$\int_{T_x}^{T_x + T_{shoot_dep}} A(t) dt = RSD_dep$$

可以看出这是一个攻击时间和蓝方攻击武器数量的平均值 A_{bar} 的乘积,因此估计的攻击持续时间是 RSD_dep/A_{bar} 。在该模型中蓝方攻击武器的数量很好确定,如下所示。

$$A(t) = A_0 - Losses + R \times T_x + R \times (t - T_x) \quad (t \geq T_x \text{ 时})$$

为了简单起见, 设定 A_{bar} 是红方前进一个标准距离 D_{std} 后蓝方在战场中的武器数量:

$$A_{bar} \approx A_0 - Losses + R \times (T_{delay} + D_{std} / V)$$

在每个因素前添加系数, 得到一个线性函数:

$$L_{dep} = c_0 - c_1 \times V \times T_{delay} + R \times c_2 \times V \times T_x + c_3 \times V \times RSD_{dep} / A_{bar}$$

同理对打击领头部队策略进行考察, 不同的是该策略要考虑反转距离 ΔD (过程省略), 可以得到以下公式:

$$L_{le} = c_0 - c_1 \times V \times T_{delay} + R \times c_2 \times V \times T_x + c_3 \times V \times RSD_{le} / A_{bar} - c_4 \times \Delta D$$

综上, 设定元模型的函数形式为:

$$Best_dhalt = \text{Max} \{0, \text{Min}\{L_{dep}, L_{le}, \text{Obj}\}\}$$

完成模型结构的设计后, 通过对目标模型数据的回归拟合确定系数值从而建立主动元模型。此外, 尝试一系列的 D_{std} 值, 最后发现取 400 时结果最符合原数据。

将建立的主动元模型对目标模型的初始数据进行运算, 发现其具有以下特征: 预测有效性较好; 元模型运算的结果对实验区域以外的数据仍然能够进行较高精度的预测; 简约性强: 模型只有五个变量; 能进行关键元的识别: 由于 $V \times T_x$ 和 $V \times RSD_{le} / A_{bar}$ 的系数是正的, 减少一个并不能消除另一个值很大的影响, 也就是说, 让两个变量的值都很小非常有必要, 这对应到模型的实际情况中就说明, 如果蓝方不能足够早的攻击红方, 即使拥有大量的高效能的攻击武器, 蓝方也很难得到满意的阻断距离; 具有可理解性和可解释性: 模型是一个有说服性的故事做基础的, 只要采取用词语等式来替代符号等式, 以及聚焦于一个实例等简单的手段, 就足够将模型解释清楚。

6 结束语

主动元模型综合考虑了目标模型机理和仿真模型数据, 并在建模框架中将对机理的认识用于主动元模型结构的设计。因此, 主动元模型能够反映目标模型内部机

理, 预测有效性好, 简约性强, 能进行关键元识别, 具有可理解性和可解释性并且能正确表明变量的重要度, 满足了探索性分析、高层决策支持和高层推理与交流等问题建立低分辨率模型的需要。

参考文献

- [1] P. K. Davis and J. H. Bigelow. Motivated Meta-models Synthesis of Cause-Effect Reasoning and Statistical Meta-modeling, RAND[Z], MR1570, 2003
- [2] Bigelow J. H. and P. K. Davis. Developing Improved Meta-models by Combining Phenomenological Reasoning with Statistical Methods[A], Proceedings of the SPIE2002[C], Vol. 4716, 167-180
- [3] 杨井奇, 许瑞明等. 仿真元模型及其在军事领域的应用. 军事运筹与系统工程[J], 2004.11
- [4] 周少平. 面向武器装备体系论证的探索性分析方法研究[D]. 博士学位论文, 国防科学技术大学研究生院, 2006.3
- [5] 杨峰. 面向效能评估的平台级体系对抗仿真跨层次建模方法研究[D]. 博士学位论文, 国防科学技术大学研究生院, 2003.10
- [6] P. K. Davis, J. McEver, and B. Wilson. Measuring Interdiction Capabilities in the Presence of Anti-Access Strategies: Exploratory Analysis to Inform Adaptive Strategy for the Persian Gulf, RAND[R], MR1471, 2002
- [7] P. K. Davis, J. H. Bigelow, and J. McEver. EXHALT: An Interdiction Model for Exploring Halt Capabilities in a Large Scenario Space[R], Santa Monica, CA: RAND, Vol. MR-1137-OSD, 2000
- [8] Paul K. Davis and Manuel J. Carrillo. Exploratory Analysis of "The Halt Problem" [R], Santa Monica, CA: RAND, 1997.8