

1-20-2024

Result Validation Method of Simulation Models Based on Piecewise Feature Extraction

Yucheng Luo

School of Software Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China,
luoyucheng99@qq.com

Ming'en Zhang

Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China

Fei Liu

School of Software Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China,
feiliu@scut.edu.cn

Yingbo Lu

Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China

See next page for additional authors

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. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Result Validation Method of Simulation Models Based on Piecewise Feature Extraction

Abstract

Abstract: Verification, validation, and accreditation (VV&A) is a key means to ensure the credibility of simulation models, and model validation is the core link. In view of the unavailability of reference data, various sources of reference data, and strong subjectivity of expert validation in the result validation of the missile flight simulation model, a result validation method for the missile flight simulation model based on piecewise feature extraction of time series was proposed. Specifically, a comprehensive piecewise linear method for time series was first proposed. The method consisted of a linear piecewise algorithm based on the second-order derivative for extracting trend edge points and a top-down linear piecewise algorithm based on extreme point optimization, so as to achieve an efficient linear piecewise representation of the missile flight simulation data and reference data. Then, based on the segmentation results obtained above, features such as mean, variance, and slope of each time series could be extracted to assist experts in reducing subjectivity in validation. The Theil inequality coefficient (TIC) method, dynamic time warping (DTW), and other methods could also be used for objective consistency analysis. By taking advantage of piecewise features of time series, the results of the missile flight simulation model in various scenarios can be validated. Finally, a result validation case of the missile model demonstrates the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords

result validation of missile flight simulation model, reference data, objective validation, piecewise feature extraction, time series

Authors

Yucheng Luo, Ming'en Zhang, Fei Liu, Yingbo Lu, and Feng Ye

Recommended Citation

Luo Yucheng, Zhang Ming'en, Liu Fei, et al. Result Validation Method of Simulation Models Based on Piecewise Feature Extraction[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 272-281.

基于分段特征提取的仿真模型结果验证方法

罗宇成¹, 张明恩², 刘飞^{1*}, 陆营波², 叶丰³

(1. 华南理工大学 软件学院, 广东 广州 510006; 2. 上海机电工程研究所, 上海 201109; 3. 北京系统工程研究所, 北京 100124)

摘要: 校核、验证与确认(verification, validation, and accreditation, VV&A)是保证仿真模型可信度的关键手段, 其中模型验证是核心环节。针对导弹飞行仿真模型结果验证存在的参考数据不可获得、参考数据来源多样、专家验证主观性强等问题, 提出一种基于时间序列分段特征提取的导弹飞行仿真模型结果验证方法。提出了一种综合的时间序列分段线性方法, 由基于二阶导数提取趋势边缘点的线性分段算法和基于极值点优化的Top-Down线性分段算法两部分组成, 以实现导弹飞行仿真数据和参考数据进行有效的线性分段表示。基于上述分段结果, 对各段时间序列的均值、方差、斜率等特征进行提取, 以辅助专家进行验证, 从而降低验证中的主观性; 或者直接利用TIC系数法、动态时间规整(dynamic time warping, DTW)等方法进行客观的相似性分析。通过充分利用时间序列的分段特征, 可实现各种情形下的导弹飞行仿真模型结果验证。通过一个导弹模型结果验证案例演示了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 导弹飞行仿真模型结果验证; 参考数据; 客观验证; 分段特征提取; 时间序列

中图分类号: TP 391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)01-0272-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0122

引用格式: 罗宇成, 张明恩, 刘飞, 等. 基于分段特征提取的仿真模型结果验证方法[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(1): 272-281.

Reference format: Luo Yucheng, Zhang Ming'en, Liu Fei, et al. Result Validation Method of Simulation Models Based on Piecewise Feature Extraction[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 272-281.

Result Validation Method of Simulation Models Based on Piecewise Feature Extraction

Luo Yucheng¹, Zhang Ming'en², Liu Fei^{1*}, Lu Yingbo², Ye Feng³

(1. School of Software Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China; 3. Beijing System Engineering Institute, Beijing 100124, China)

Abstract: Verification, validation, and accreditation (VV&A) is a key means to ensure the credibility of simulation models, and model validation is the core link. In view of the unavailability of reference data, various sources of reference data, and strong subjectivity of expert validation in the result validation of the missile flight simulation model, a result validation method for the missile flight simulation model based on piecewise feature extraction of time series was proposed. Specifically, a comprehensive piecewise linear method for time series was first proposed. The method consisted of a linear piecewise algorithm based on the second-order derivative for extracting trend edge points and a top-down linear piecewise algorithm based on extreme point optimization, so as to achieve an efficient linear piecewise representation of the missile flight simulation data and reference data. Then, based on the segmentation results obtained above, features such as mean, variance, and slope of each time series could be extracted

收稿日期: 2023-02-11 修回日期: 2023-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61873094)

第一作者: 罗宇成(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为建模与仿真、人工智能。E-mail: luoyucheng99@qq.com

通讯作者: 刘飞(1976-), 男, 教授, 博士, 研究方向为建模与仿真、人工智能。E-mail: feiliu@scut.edu.cn

to assist experts in reducing subjectivity in validation. The Theil inequality coefficient (TIC) method, dynamic time warping (DTW), and other methods could also be used for objective consistency analysis. By taking advantage of piecewise features of time series, the results of the missile flight simulation model in various scenarios can be validated. Finally, a result validation case of the missile model demonstrates the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: result validation of missile flight simulation model; reference data; objective validation; piecewise feature extraction; time series

0 引言

建模与仿真技术在武器装备研制及作战分析等众多场景中起着非常重要的作用。模型校核、验证与确认(verification, validation and accreditation, VV&A)是建模与仿真研究的关键方向^[1-2]。任何模型只有经过严格的VV&A并具有必要的可信度,才能够被用户认可和使用。其中,仿真模型结果验证是VV&A过程中的核心环节,也是模型可信度的最终保障^[3-4]。

仿真模型结果验证的对象分为静态性能参数和动态性能参数两种。静态性能参数的值不随时间变化,如导弹的脱靶量、杀伤率等。动态性能参数的值则随时间变化而变化,如飞行过程中导弹的俯仰角、过载等。针对不同类型的模型输出数据,执行仿真模型验证所使用的具体验证方法虽然有所不同,但大概遵循下面的步骤^[5-6]:

(1) 根据模型结果验证需求,确定需要验证的具体指标,进而检查可用的参考数据,并选择具体的验证方法;

(2) 根据上述约束条件,确定模型初始化配置信息,进而构建相应的仿真实验,然后运行仿真模型,获取模型验证需要的仿真数据;

(3) 对仿真数据和所获取的参考数据进行预处理(如时间对齐、插值、剔除野值和平稳化等);

(4) 应用所选验证方法(如假设检验、时间序列相似性分析等)对仿真模型进行验证,并给出验证结论。

然而,上述验证过程看似简单,实则面临诸

多挑战,主要表现为以下几个方面^[6]:

(1) 在很多情形下,参考数据很难或者不可获取^[7]。模型验证是从模型预期应用角度确定一个模型是否准确地反映真实世界的过程,因此模型验证的核心问题就是获取模型对应的真实数据,在此称之为参考数据。然而,参考数据的获取不管对于蓝方模型还是红方模型来说都是异常困难的。对于蓝方模型来说,可能获取不到对应的真实装备,因此不能运行真实装备的实验,所以会导致不能获取到参考数据。对于红方模型来说,虽然可以获取到对应的真实装备,但是由于真实装备造价昂贵,因此很难进行充分的实验,获取到足够的参考数据。因此,从某种意义上讲,如何获取不同来源的参考数据就成为模型验证的关键。

(2) 参考数据来源多样,很难直接使用传统的验证方法^[8-10]。例如,外场数据存在大的偏差,需要进行特殊的处理,才能够与仿真数据进行对比分析,这种分析可能采用传统的TIC方法,也可能传统的方法不适用,从而只能利用专家对其趋势和特征进行对比分析。另外,仿真轨迹和参考轨迹的运行条件不一致或设置不一样,这会导致其时间点很难对齐,因此,传统的方法也很难使用。

(3) 专家验证主观性强的问题。在参考数据不可用或者客观方法不可用的情况下,可能不得不借助于专家来完成验证。然而,单单抛给专家整个时间序列可能会使得专家很难给出一个好的评价。在这种情况下,如何借助于数据分析手段,给出关于时间序列的特征来辅助专家验证也是一个重要的研究问题^[4,11]。

为解决上述模型结果验证的挑战, 本文针对导弹飞行仿真模型输出的时间序列数据, 提出了基于时间序列分段特征提取的导弹飞行仿真模型结果验证方法, 以期解决部分挑战, 进而提高红蓝双方模型的可信度评估水平。

1 时间序列线性分段

1.1 时间序列特征分析

按照序列值维度的变化方式的不同, 时间序列可以分为水平模式和趋势模式。如果时间序列围绕着一个恒定的数值波动时, 时间序列存在水平模式; 如果时间序列随着时间的改变数值呈现持续的上升或者下降, 则称为趋势模式。时间序列的特征主要分为基础特征、转换特征、分类特征等。基础特征包括: 均值、方差、极值、最值、分位数、周期性、自相关性、斜率、频率、随机噪音等。然而, 时间序列存在一些更深层次的信息难以直接发现, 这时可以使用一些变换方法对数据进行转换, 来得到转换特征, 如以 Box-Cox 变换^[12]为代表的统计转换特征、以格拉姆角场^[13]为代表的高维空间转换特征, 以及以傅里叶变换^[14]为代表时间频率分析特征。分类特征一般是在具体的任务背景下提出的, 如时序预测、时序分类等。分类特征一般通过机器学习和神经网络的方式进行提取, 不具有好的可解释性。

然而, 在很多场景中, 时间序列的时间跨度大, 数据点多, 直接采用特征提取进行分析存在困难。因为主要关注时间序列的变化趋势, 但是长时间序列变化频繁, 分析起来不直观。其次, 随着时间序列的增长, 数据量也会增大, 对时间序列进行特征提取操作时的计算量会显著增加。如图1所示(该曲线由UCR数据集^[15]中名为Coffee的数据生成), 如果能够将时间序列进行分段, 就能对不同趋势的时间段进行针对性的分析, 也能以更细的粒度对数据分析, 从而缩小下游算法输入数据的规模, 来提升整体算法的性能。

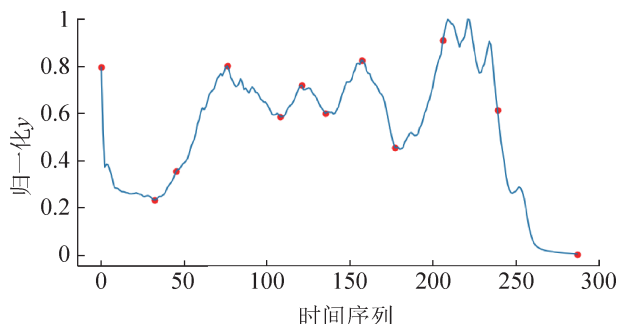


图1 时间序列分段效果图

Fig. 1 Segmentation results of time series

1.2 时间序列线性分段算法

时间序列的分段是指对原始时间序列数据分割成子段, 然后再进行处理。现有的时间序列分段算法大致可分为以下几种类型: ①控制分段数进行的时间序列分段, 如PAA(piecewise aggregate approximation)算法^[16-17]等。该类算法的性能受设定的分段数的影响较明显, 在分段数较小的情况下, 该类分段方法拟合误差较大。②控制每个分段误差进行的时间序列分段, 如Top-Down^[18]算法等。该类算法总体的拟合误差会比其他类型的方法更小, 但是复杂度较高, 运行的时间开销和内存开销也比其他方法更大。③基于关键特征点进行的时间序列分段, 如边缘点分段法^[19]、序列重要点分段法^[20]、导数突变点分段法^[21]等。该类算法可以避免直线拟合等方法中因曲线平滑化导致的信息点丢失, 运行的性能开销和拟合误差介于前面两类算法之间。

时间序列的变化趋势和极值点是刻画时间序列的重要特征, 然而传统的Top-Dwon算法对原始数据直接采用误差作为阈值, 分段效果并不理想。为了解决Top-Down算法不能综合考虑极值点和趋势点, 从而导致分段结果不能直观反映时间序列变化趋势的问题, 本文提出一种新的线性分段算法来对时间序列进行分段线性表示。本文提出的分段线性方法主要由基于二阶导数提取趋势边缘点的线性分段算法和基于极值点优化的Top-Down线性分段算法两部分组成, 如图2所示。

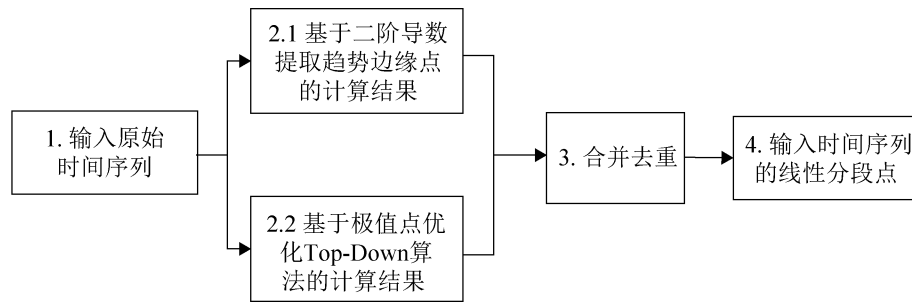


图2 本文的时间序列分段线性方法框架图

Fig. 2 Framework of proposed piecewise linear method for time series

1.2.1 基于二阶导数提取趋势边缘点的线性分段算法

斜率描述时间序列的变化趋势, 二阶导数则描述时间序列斜率的变化情况。如果时间序列中某个点的二阶导数值较大, 那么在局部范围内, 位于该点两端的时间序列的变化趋势相差较大, 这样的点称为趋势边缘点。先选取超过阈值的二阶导数最大值对应的点作为趋势边缘点, 再使用算法对该趋势边缘点周围点做非极大值抑制。该算法的流程如图3所示, 关键步骤描述如下。

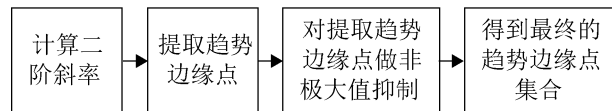


图3 基于二阶导数提取趋势边缘点的线性分段流程

Fig. 3 Linear piecewise process for extracting trend edge points based on second-order derivatives

(1) 趋势边缘点的提取算法

1) 输入一个时间序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其中 n 为时间序列的长度。

2) 首先计算一阶导数 $tg_i = x_i - x_{i-1}$ 和 $tg_{i+1} = x_{i+1} - x_i$ 。

3) 计算二阶导数 $dd = |tg_{i+1} - tg_i|$, 若二阶导数超过阈值 d_1 , 即 $|dd| \geq d_1$, 则记录下标 i 所对应的点, 即趋势边缘点。

4) 重复上述步骤2)和3), 最终得到所有的趋势边缘点的集合, 记为 $P = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ 。

(2) 趋势边缘点的非极大值抑制算法

1) 对上述得到的时间序列 P , 初始化目标输

出为空, $P' = \{\}$ 。

2) 重复以下步骤, 直到时间序列 P 为空。

a) 首先选择当前斜率改变最大的下标 i_k 。如果相邻的点和 i_k 距离小于给定的范围, 即

$$i_k - i_{k-1} \leq d_2, \dots, i_k - i_{k-l} \leq d_2,$$

$$i_{k+1} - i_k \leq d_2, \dots, i_{k+r} - i_k \leq d_2$$

其中, d_2 为非极大值抑制的范围阈值, 此时得到 i_k 和它相邻的点 $i_k, i_{k-1}, \dots, i_{k-l}, i_{k+1}, \dots, i_{k+r}$ 。

b) 然后在集合 P 中去除 i_k 以及和它相邻的点; 并将 i_k 添加入 $P' = \{P', i_k\}$ 。

3) 最终得到提取的趋势边缘点集合 $P' = \{i'_1, i'_2, \dots, i'_s\}$ 。

1.2.2 基于极值点优化的 Top-Down 线性分段算法

自顶向下 Top-Down 线性分段算法是常用的线性分段算法。传统的自顶向下 Top-Down 算法通过递归的方式进行分段, 并且新分出的分段点能够使得分段点到原来区间端点组成的直线距离最长。但是, 经过 Top-Down 分出的分割点, 在原始曲线中缺少直观的意义。为进一步提高算法结果的直观性, 本文提出基于极值点优化的自顶向下的线性分段算法, 如图4所示。

(1) 计算出所有滑动窗口中的极值点集合 P 。

(2) 在 Top-Down 线性算法区间内, 算出原始分割点 p_0 , 使得分割点到原有区间连线所在直线的距离 l_0 最大。

(3) 在极值点集合 P 中, 选取和 p_0 最相近的点 p_1 , 计算最近的极值点到原有区间连线所在的直线的距离 l_1 。

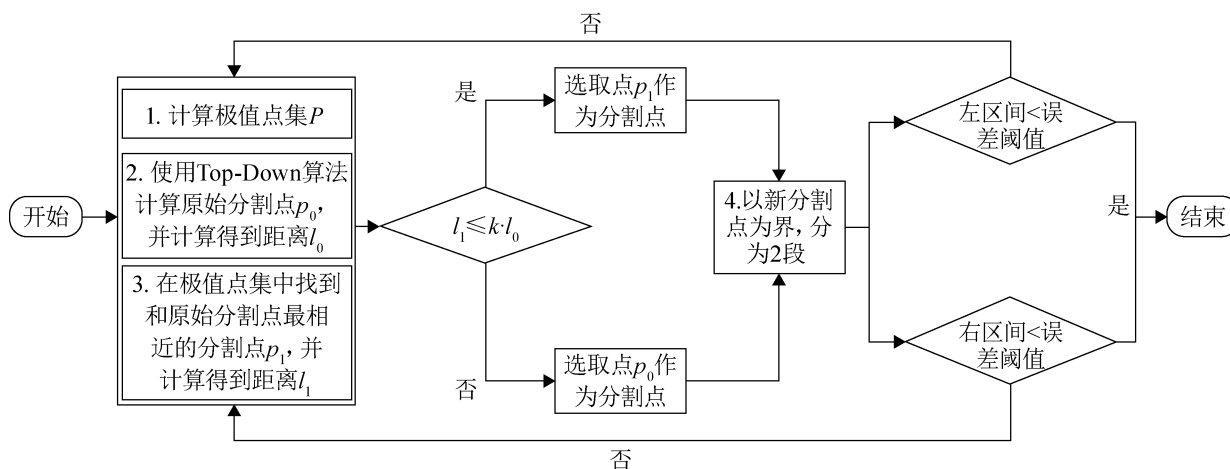


图 4 基于极值点优化的自顶向下线性分段算法

Fig. 4 Top-down linear piecewise algorithm based on extreme point optimization

(4) 如果 $l_1 \leq k \cdot l_0$, 其中 k 为可配置的阈值, 则优先考虑在区间内的极值点 p_1 , 否则选取原有的分割点 p_0 。

(5) 对左右区间分别进行递归, 直到左右区间的距离在误差阈值的范围以内。

1.2.3 实验结果和分析

(1) 极值点优化的自顶向下分段结果

图 5 给出了导弹飞行攻角曲线的线性分段结果表示(该曲线由本文第 4 章描述的导弹模型生成)。从图中可以看到, 相对 Top-Down 算法, 本文提出的改进算法较好地适配了极值点, 让线性分段点更准确地落在了极值点上。

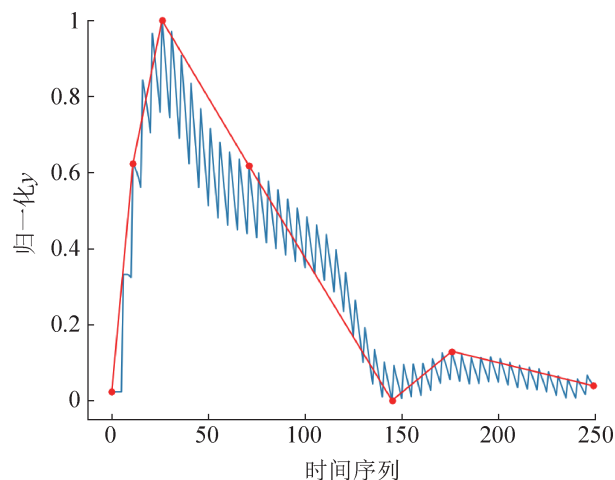


图 5 导弹攻角曲线线性分段结果

Fig. 5 Linear piecewise results of missile attack speed angle curve

(2) 边缘趋势点优化的自顶向下分段结果

图 6 给出了导弹飞行侧滑角曲线的线性分段结果表示(该曲线由本文第 4 章描述的导弹模型生成)。在线性分段点序列中的第二点细致地捕捉了曲线由平整到快速下滑的变化趋势, 从而能够更好地观察时间序列的趋势变化。

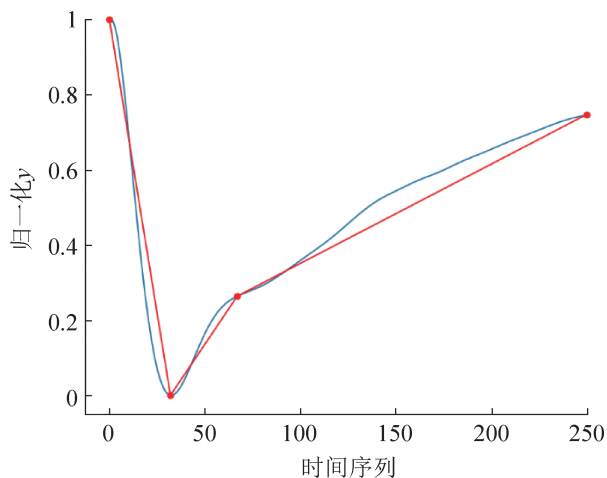


图 6 导弹侧滑角曲线线性分段结果

Fig. 6 Linear piecewise results of missile sideslip angle curve

2 时间序列分段特征提取及相似性度量

针对导弹飞行仿真模型结果验证场景, 可以考虑以下几种时间序列的相似性度量。

(1) 基于斜率的相似性度量

基于斜率的相似性度量^[9]是指首先对时间序列进行分段, 得到一系列直线段后, 通过每一个线段的斜率特征来对原时间序列进行相似性度量。利用特征点对时间序列进行斜率提取之后, 可以有效度量时间序列变化趋势的相似程度。与 TIC 不等式系数法、灰色关联系数分析法等基于点的相似性度量方法相比, 基于斜率的分析方法可以度量序列的变化趋势。

假设有 2 个在线性分段基础上以斜率集表示的时间序列 X 、 Y , 分别为

$$X = (k_1, t_1), (k_2, t_2), \dots, (k_{n-1}, t_{n-1}) \quad (1)$$

$$Y = (k'_1, t'_1), (k'_2, t'_2), \dots, (k'_{n-1}, t'_{n-1}) \quad (2)$$

可以通过 2 个序列的斜率偏离度 D_{bias} 对 2 组时间序列的一致性进行分析, 计算公式为^[9]

$$D_{\text{bias}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta d_{k_i}}{d_{t_i}} - \frac{\Delta d_{k_{i-1}}}{d_{t_{i-1}}} \right)^2 \quad (3)$$

(2) 等时间的距离度量

TIC(theil's inequality coefficient)系数法^[22]通过用 2 组样本数据代入公式, 计算出 TIC 系数来度量 2 组数据的一致性。TIC 系数越小, 则代表两者相似度越高。在仿真模型验证中, 如果计算出仿真输出和参考输出的时间序列数据之间的 TIC 系数小于给定阈值, 则可视为仿真模型的真实性和可信度达到目标要求, 仿真模型真实可信。该方法计算简单, 效果显著, 但是需要 2 组时间序列数据的采样时间点严格对齐, 即 x_i 和 y_i 对应的时间点都是 t_i , 所以对样本的要求较高, 在实际应用中适用的场景较少。

灰色关联系数法^[23]的基本思想是通过分析 2 组时间序列曲线之间的几何形状相似度来度量它们之间的一致性, 并且可以对影响模型输出的不同因子分别独立分析。

(3) DTW 距离

动态时间规整(dynamic time warping, DTW)算法^[24]通过采用动态规划的方式, 扭曲时间序列, 在时间轴上进行时间序列的局部缩放, 可以对长

度和采样间隔不一致的时间序列之间进行距离度量。

给定 2 个时间序列 $X' = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 和 $Y' = [y_1, y_2, \dots, y_m]$, 长度分别为 n 和 m , 那么利用 DTW 计算 X' 和 Y' 相似度的计算过程如下:

1) 构建大小为 $n \times m$ 的矩阵 D , 矩阵元素 $d_{i,j} = \text{dist}(x_i, y_j)$, 其中 dist 表示距离计算函数, 一般可以采用欧几里得距离。

2) 使用动态规划算法在矩阵 D 中搜索从 $d_{1,1}$ 到 $d_{n,m}$ 的最短路径。

$$dp_{ij} = \text{dist}(x_i, y_j) + \min(dp_{ij}, dp_{i,j-1}, dp_{i-1,j-1}) \quad (4)$$

3) 搜索到的最短路径的长度作为 X' 和 Y' 序列的距离。其中距离越小, 表示 2 条曲线相似度越高。

DTW 算法是一种非常有效的计算序列最小距离的方法, 它的最大特点是允许时间序列在时间轴上进行伸缩, 从而能够找到 2 个序列中的最佳匹配策略。

3 基于时间序列分段特征的导弹飞行仿真模型结果验证

利用上述时间序列分段特征提取和相似性度量, 提出了如图 7 所示的基于时间序列分段特征的导弹飞行仿真模型结果验证框架。根据参考数据可获得性、时间点的对齐特性、验证方法的特点等因素, 该框架将结果验证分为多个情形:

(1) 验证情形 1: 专家验证。如果参考数据不存在, 只有仿真轨迹。在这种情况下, 可以先进行线性分段, 然后进行特征提取(如斜率等特征), 继而专家可以根据这些结果, 进行仿真轨迹的趋势分析。这种方式主要适用于蓝方模型的结果验证以及其他参考数据不可获得的情形。

(2) 验证情形 2: 客观验证。如果在相同的运行条件下, 仿真轨迹和参考轨迹都能获得, 那么可以采用这一验证路径。根据仿真和参考轨迹的时间点是否可对齐, 进一步分为以下 2 种情况:

①如果时间点已经对齐或者可以利用插值等方式对齐，那么可以针对每个分段利用 TIC、灰色关联分析等方法进行相似性分析，进而根据预设的阈值，给出验证结论。②如果时间点不可以对齐，这种情况多发生在仿真时间和参考数据采样时间不同，那么可以采用 DTW 距离来计算相似性。此处要通过分段线性结果先确定相似的时间序列部分，这可能涉及到多个分段。

(3) 验证情形 3：主客观对比验证。如果上述客观相似性分析结果不满足阈值要求，或者不可接受，那么可以采用这种方法继续对其趋势进行对比分析，进而得出验证结论。此外，这一验证情形也适用于初始条件不一致的仿真和参考轨迹的验证，即在不同的运行条件下，如何根据参考数据来验证仿真结果。这种情况客观的时间序列分析方法显然不适用。

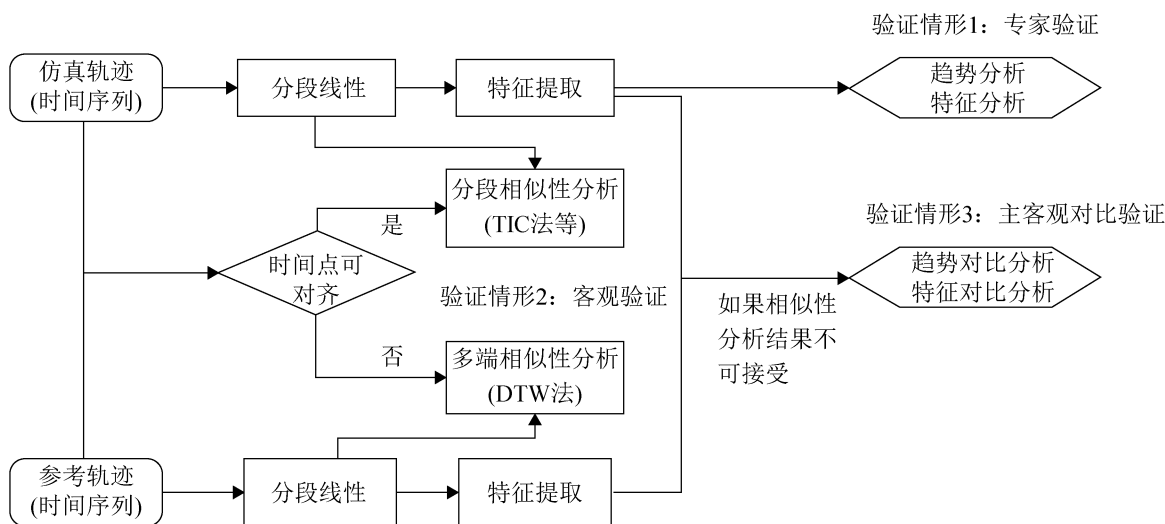


图 7 基于时间序列分段特征的导弹飞行仿真模型结果验证框架

Fig. 7 Framework of result validation of missile flight simulation model based on piecewise feature of time series

4 案例演示

本实验采用 Matlab Simulink 软件，根据经典导弹动力学和导弹运动学方程，实现了一个无控导弹的弹体飞行仿真模型，包含质心动力学模块、绕质心动力学模块、姿态动力学模块和姿态解算模块。初始参数如表 1 所示。通过运行该模型，可产生导弹的位置、攻角、侧滑角、姿态角等数据。图 8(a)是某次运行该仿真模型后，得到的导弹飞行过程中侧滑角 β 的变化曲线。

然后将该 Simulink 仿真模型转化为 FMU (functional mock-up unit) 仿真模型^[25-26]，并设计一种基于事件的模型调度算法后运行改进后的 FMU 模型进行仿真，得到第 2 条侧滑角 β 的变化曲线，如图 8 (b)所示。下面将这 2 条曲线分别作为参考

曲线(a)和仿真曲线(b)。

首先使用本文提出的分段算法，分别对两条曲线进行线性分段，见图 8 中的红色数字标记。如图 8 所示，本文算法可以使得分割点准确地落在趋势点和极值点上。相比 Top-Dwon 算法，本文算法更直观地展现了曲线的变化趋势，并能为验证阶段提供更多信息。例如，在参考曲线(a)中，用红色标注的点 2 精准地刻画了曲线由相对平缓到迅速下降的变化趋势，而在仿真曲线(b)中则不存在类似的点，这有助于更好地分析 2 条曲线的差异。此外，在参考曲线(a)中的点 3、4、5 能较好地反映曲线的极值，与参考曲线(b)中的点 2、3、4 形成直观的对应，有助于在验证阶段分析 2 条曲线的共性。

表1 导弹模型初始参数值

Table 1 Initial values of parameters of missile model

参数	初始值
发射速度/(m/s)	(200, 0, 5)
投放高度/m	8 000
地球半径/m	6 378 000
地球引力常数/(m ³ /s ²)	3 986×10 ¹¹
弹体质量/kg	280
弹体横截面积/m ²	0.12
弹体长度/m	1.958 3
海平面空气标准压强 P_{SL} /(kg/m ²)	101 325
海平面空气标准密度 ρ_{SL} /(kg/m ³)	1.225

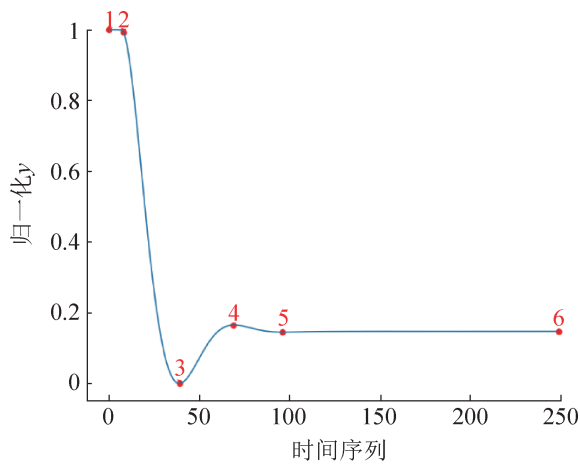
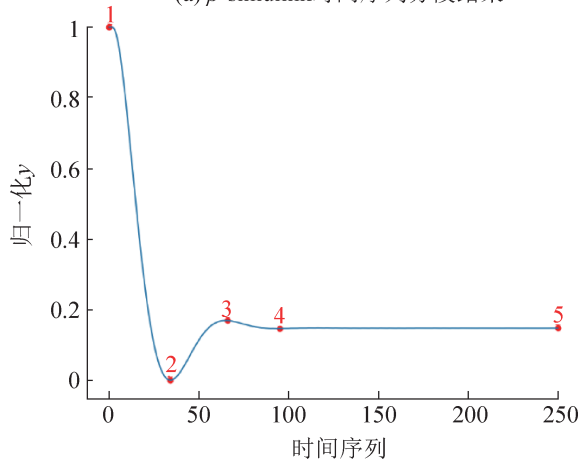
(a) β -simulink时间序列分段结果(b) β -FMU时间序列分段结果

图8 仿真曲线和参考曲线时间序列分段结果

Fig. 8 Piecewise results of time series of simulation curve and reference curve

(1) 主观验证。如果只存在图8(b)的仿真曲线, 那么针对该仿真曲线, 可以先分段, 然后计

算每一段的斜率特征, 如表2所示。从表中的斜率(正负和大小)可以看出, 曲线直接急速下降到谷底, 然后稍微回升到波峰, 最后稍微下降并趋近平缓。上述变化趋势与真实导弹侧滑角的变化趋势是基本一致的。通过这样定量加定性的分析, 可以对模型输出做简单、直观且有效地验证。而且, 准确地对时间序列进行分段并提取其特征, 将有效辅助专家做出更准确的判断, 从而显著降低评估中的主观性。

表2 仿真曲线每个分段端点连线的斜率

Table 2 Slopes of line connecting endpoints of each segment of simulation curve

斜率	-2.94e-2	5.28e-3	-7.90e-4	7.95e-6
正负	-	+	-	+

(2) 客观验证。首先对分段后的每一段数据两两计算DTW距离, 如表3所示。表格中的第*i*列和第*j*行, 代表仿真曲线的第*i*段(分割点*i*和分割点*i*+1之间的数据)和参考曲线的第*j*段的DTW距离。这里DTW距离越小, 相似度越大。然后对每一个仿真曲线片段, 选择和DTW距离最小的参考曲线片段作为匹配结果, 如表3中加粗数字所示。从表格中加粗的数字能够看出, 仿真曲线的第一段和参考曲线的DTW距离较大, 但是其他段的匹配结果的DTW距离都很小, 说明第一段和参考曲线不同, 而其他段都能较好地匹配参考曲线。综上所述可以看出, 仿真曲线在开始时的特征和参考曲线不同, 其余阶段特征两条曲线高度吻合。

表3 仿真曲线和参考曲线每个分段间的DTW距离

Table 3 DTW distances between segments of simulation curve and reference curve

参考曲线	仿真曲线				
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
1-2	3.76	0.02	3.28	2.77	2.86
2-3	5.12	2.87	0.01	0.49	0.43
3-4	4.55	2.34	0.50	0.01	0.07
4-5	10.60	2.42	0.44	0.05	0.01

(3) 主客观综合验证。此外, 如果对客观验证结果存在疑义, 还可以结合仿真/参考数据的特征和客观验证结果, 通过主客观两个角度来综合分

析仿真模型的可信度。

5 结论

模型校核、验证与确认(VV&A)是建模与仿真研究的重要方向。针对导弹飞行仿真模型结果验证存在的问题,本文提出了一种基于时间序列分段特征提取的导弹飞行仿真模型结果验证方法。为实现该方法,本文进而提出了一种精确的时间序列分段算法。基于本文提出的方法,可以有效解决多种情形下的导弹飞行仿真模型结果验证问题,包括专家验证、客观验证、主客观对比分析。在以后的研究工作中,将继续探索如何结合机器学习的方法来更精确的提取时间序列特征,以便更好地辅助仿真模型的结果验证。

参考文献:

- [1] Sargent R G. Verification and Validation of Simulation Models[J]. *Journal of Simulation*, 2013, 7(1): 12-24.
- [2] Storm S M, Hill R R, Pignatiello J J, et al. Point-wise Model Validation Over Experimental Regions Using Regression Confidence and Tolerance Intervals with Bayesian Relaxations[J]. *Simulation*, 2020, 96(1): 75-87.
- [3] 孙茂义, 王志恒. 基于动态参数的仿真模型验证方法[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(3): 261-263, 417.
Sun Maoyi, Wang Zhiheng. Validation Method of Simulation Model Based on Dynamic Parameter[J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(3): 261-263, 417.
- [4] 李亚男, 刘飞, 杨明. 基于知识的仿真模型验证方法的研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(8): 2277-2280.
Li Yanan, Liu Fei, Yang Ming. Research of Knowledge-based Method to Simulation Model Validation[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(8): 2277-2280.
- [5] 刘飞, 杨明, 王子才. 仿真验证工具研究[J]. *电机与控制学报*, 2007, 11(6): 655-658, 665.
Liu Fei, Yang Ming, Wang Zicai. Research on Simulation Validation Tool[J]. *Electric Machines and Control*, 2007, 11(6): 655-658, 665.
- [6] Liu Fei, Yang Ming. The Management of Simulation Validation[M]//Claus Beisbart, Nicole J Saam. *Computer Simulation Validation: Fundamental Concepts, Methodological Frameworks, and Philosophical Perspectives*. Cham: Springer International Publishing, 2019: 587-606.
- [7] 宋婷. 小样本数据仿真模型验证方法及面向服务工具研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Song Ting. Research on Model Validation Method for Small Sample and Service-oriented Tools[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [8] 陶久亮, 于一帆, 王晨, 等. 火箭飞行仿真系统VV&A应用技术研究[J]. *宇航总体技术*, 2022, 6(1): 22-30.
Tao Jiuliang, Yu Yifan, Wang Chen, et al. Research on VV&A Application Technology of Launch Vehicle Flight Simulation System[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2022, 6(1): 22-30.
- [9] 白瑞阳, 吴晓燕, 陈永兴, 等. 基于数据挖掘的仿真模型验证[J]. *现代防御技术*, 2015, 43(1): 168-172.
Bai Ruiyang, Wu Xiaoyan, Chen Yongxing, et al. Validation of Simulation Model Based on Data Mining[J]. *Modern Defence Technology*, 2015, 43(1): 168-172.
- [10] 宁小磊, 赵新, 吴颖霞, 等. 基于概率关联分析的仿真模型验证方法研究[J]. *西北工业大学学报*, 2021, 39(5): 1158-1167.
Ning Xiaolei, Zhao Xin, Wu Yingxia, et al. Research on Simulation Model Validation Based on Probability Relational Analysis[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(5): 1158-1167.
- [11] Laili Yuanjun, Zhang Lin, Luo Yongliang. A Pattern-based Validation Method for the Credibility Evaluation of Simulation Models[J]. *Simulation*, 2020, 96(2): 151-167.
- [12] Atkinson A C, Marco Riani, Aldo Corbellini. The Box-cox Transformation: Review and Extensions[J]. *Statistical Science*, 2021, 36(2): 239-255.
- [13] Xu Hongji, Li Juan, Yuan Hui, et al. Human Activity Recognition Based on Gramian Angular Field and Deep Convolutional Neural Network[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 199393-199405.
- [14] 王鹏新, 荷兰, 李俐, 等. 基于时间序列叶面积指数傅里叶变换的作物种植区域提取[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 207-215.
Wang Pengxin, Xun Lan, Li Li, et al. Extraction of Planting Areas of Main Crops Based on Fourier Transformed Characteristics of Time Series Leaf Area Index Products[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21): 207-215.
- [15] Dau H A, Bagnall A, Kamgar K, et al. The UCR Time Series Archive[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 6(6): 1293-1305.
- [16] Keogh E, Chakrabarti K, Pazzani M, et al. Dimensionality Reduction for Fast Similarity Search in Large Time Series Databases[J]. *Knowledge and Information Systems*, 2001, 3(3): 263-286.
- [17] Yi B K, Faloutsos C. Fast Time Sequence Indexing for

- Arbitrary Lp Norms[C]//Proceedings of the 26th International Conference on Very Large Data Bases. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2000: 385-394.
- [18] Keogh E, Chu S, Hart D, et al. An Online Algorithm for Segmenting Time Series[C]//Proceedings 2001 IEEE International Conference on Data Mining. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 289-296.
- [19] 殷炜宏, 王若愚, 段倩倩, 等. 基于时态边缘算子的时间序列自主分段表示法[J]. 计算机工程与科学, 2021, 43(6): 1104-1111.
- Yin Weihong, Wang Ruoyu, Duan Qianqian, et al. An Autonomous Segmental Representation of Time Series Based on Temporal Edge Operator[J]. Computer Engineering & Science, 2021, 43(6): 1104-1111.
- [20] 江艺羨, 张岐山. 基于重要点与灰色GM(1, 1)模型的时间序列分段算法[J]. 统计与决策, 2016, 32(24): 28-30.
- [21] 林意, 王智博. 基于一阶滤波的时间序列分段线性表示方法[J]. 计算机工程, 2016, 42(9): 151-157.
- Lin Yi, Wang Zhibo. Time Series Piecewise Linear Representation Method Based on First-order Filtering[J]. Computer Engineering, 2016, 42(9): 151-157.
- [22] Leuthold R M. On the Use of Theil's Inequality Coefficients[J]. American Journal of Agricultural Economics, 1975, 57(2): 344-346.
- [23] 魏华梁, 李钟武. 灰色关联分析及其在导弹系统仿真模型验证中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 1997, 19(2): 55-61.
- Wei Hualiang, Li Zhongwu. Grey Relational Analysis and Its Application to the Validation of Computer Simulation Models for Missile Systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 1997, 19(2): 55-61.
- [24] Meinard Müller. Dynamic Time Warping[M]//Information Retrieval for Music and Motion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 69-84.
- [25] Cremona F, Lohstroh M, David Broman, et al. Hybrid Co-simulation: It's About Time[J]. Software & Systems Modeling, 2019, 18(3): 1655-1679.
- [26] Maurizio Palmieri, Cinzia Bernardeschi, Masci P. A Framework for FMI-based Co-simulation of Human-machine Interfaces[J]. Software and Systems Modeling, 2020, 19(3): 601-623.