

## 基于特征曲线重构的仿真模型验证

白瑞阳, 吴晓燕, 陈永兴, 卜祥伟, 姚春明

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

**摘要:** 针对仿真模型动态验证过程中缺乏参考数据的情况, 提出了一种基于特征曲线重构的仿真模型验证方法。首先通过与领域专家交流得到仿真数据时序的特征曲线, 然后由特征曲线对仿真数据进行参数估计, 最后将所估计的参数与专家给出的范围进行比较, 完成仿真模型的验证。仿真分析表明, 该方法能有效解决模型验证中缺乏参考数据的问题, 具有一定的参考意义。

**关键词:** 模型验证; 缺乏数据; 特征曲线重构; 专家知识

**中图分类号:** V271.4; TP391.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-637X(2015)01-0084-04

## Validation of Simulation Model Based on Characteristic Curve Reconstruction

BAI Rui-yang, WU Xiao-yan, CHEN Yong-xing, BU Xiang-wei, YAO Chun-ming

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aiming at the situation of lacking of reference data in simulation model validation, a method based on characteristic curve reconstruction was proposed and used into model validation. Firstly, the characteristic curve of simulation data time series was acquired through communicating with related experts. Then the parameters of simulation data were estimated using the characteristic curve. Finally, the estimated parameters were compared with the parameters given by experts to validate the simulation model. The results of simulation analysis show that the proposed method can solve the problem of lacking of reference data in simulation validation effectively, and is of certain reference value.

**Key words:** model validation; lack of data; characteristic curve reconstruction; expert knowledge

### 0 引言

进行动态性能验证最直接的方法是考察在相同输入条件下仿真模型与实际系统输出的一致性程度<sup>[1]</sup>, 常用的方法有误差分析法、TIC 不等式系数法、灰色关联分析法<sup>[2-4]</sup>及各种形式的谱估计等<sup>[5]</sup>, 运用上述方法的前提是存在可参考的数据。但随着仿真技术的飞速发展, 大量仿真系统先于其对应的实际系统出现, 或者实际系统存在, 但运行一次即不复存在、或花费巨大、或运行有危险等<sup>[6]</sup>, 导致在对这些仿真系统进行模型验证时缺乏真实系统的输出数据(参考数据)。为了解决缺乏参考数据时的仿真模型验证问题, 本文将专家知识用于模型验证, 提出基于特征曲线重构的模

型验证方法。

### 1 特征曲线重构

通常情况下, 参考系统的动态输出时间序列是由规则运动和随机运动混合而成的<sup>[7]</sup>。其中, 规则运动在输入条件一定时其运动模式是固定的, 可以用一条曲线来描述, 即为特征曲线, 仿真模型动态输出时间序列的运动模式也应符合这样的特征曲线。因此, 在缺少参考数据时, 可以通过领域专家对参考系统的特征曲线进行重构, 从而对仿真模型动态性能进行验证。特征曲线的重构主要分为运动模式确定、曲线函数分割和函数参数限定3部分。

#### 1.1 运动模式确定

运动模式是通过对具体的个别事物进行观测所得到的具有时间和空间分布的信息, 模式所属的类别或同一类模式的总体被称为模式类, 系统的动态性能决定了系统的运动模式。系统的运动模式通常可划分为

收稿日期: 2014-03-03

修回日期: 2014-03-28

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2012JM8020)

作者简介: 白瑞阳(1991—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士生, 研究方向为系统建模与仿真 VV&A。

6个基本模式类,分别为常值类、上升类、下降类、上升下降类、下降上升类和振动类<sup>[8]</sup>,一般情况下,系统的规则输出是基本模式类的组合,可以用特征曲线来描述。

运动模式的确定通常由领域专家来进行,专家通过对参考系统的分析来确定其动态输出时间序列所应具有的运动模式。例如,针对某防空导弹系统的弹道倾角输出时间序列,专家分析后给出了上升类、上升下降类和振动类3个基本模式类的组合,如图1所示。

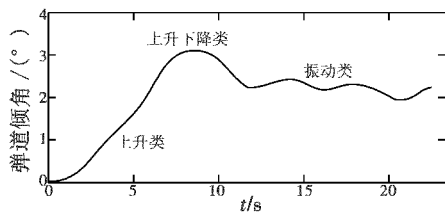


图1 弹道倾角运动模式

Fig. 1 Motion pattern of trajectory inclination angle

## 1.2 曲线函数分割

曲线函数分割是指根据系统动态输出的运动模式将特征曲线分割成若干片段,每一个片段用基本模式类中的一个模式变量表示。模式变量可以用一个函数表达式来描述,常用的曲线描述函数有多项式、指数函数、对数函数、三角函数等。例如,对图1所示的弹道倾角基本模式组合进行函数分割的结果分别为指数函数、直线、二次多项式和三角函数,特征曲线就可以用这4个函数通过设置适当的参数进行重构。

### 1.2.1 分割点的选择

每组仿真数据的特征曲线分割点都是不同的,如果分割点选择不恰当,将直接影响参数估计的准确度。因此,需要为每组仿真数据找到较好的分割点,使特征曲线在参数范围内更好地适应仿真数据的变化,以便更准确地判定仿真模型的有效性。文献[9]对仿真序列分割点的选择是通过专家人工确定的,但当仿真数据量大时验证效率较低,且准确度不高。本文提出了一种可以用程序实现的较为准确的分割点选择方法,具体如下所述。

特征曲线重构后得到一个曲线函数集合  $F = \{f_i(t), i = 1, 2, \dots, m\}$ ,其中,  $m$  为分割段数。设仿真模型输出时间序列为  $y_j (j = 1, 2, \dots, n)$ ,第  $i$  个片段的左端点为  $n_l$ ,第  $i+1$  个片段的右端点为  $n_r$ ,第  $i$  和第  $i+1$  个片段之间的分割点范围为  $n_m \in [n_l, n_r]$ 。在  $[n_l, n_r]$  上任取一点  $n_0$  作为初始分割点,在各自的分割点范围内任意选取  $n_l$  和  $n_r$  (如果  $n_l$  和  $n_r$  已经确定,则选取已确定好的值),则  $y_j$  的两个片段分别为  $y_j^i (j \in [n_l, n_0])$  和  $y_j^{i+1} (j \in [n_0, n_r])$ 。  $n_m$  的选择主要有以下

步骤:

1) 以  $n_0$  作为分割点,用  $f_i(t)$  和  $f_{i+1}(t)$  分别对  $y_j^i$  和  $y_j^{i+1}$  进行拟合,将拟合后得到的两条曲线分别在采样点上取值,得到两个时间序列  $x_j^i (j \in [n_l, n_0])$  和  $x_j^{i+1} (j \in [n_0, n_r])$ ;

2) 分别计算  $y_j^i$  与  $x_j^i, y_j^{i+1}$  与  $x_j^{i+1}$  的差值平方和,即  $S_i = \sum_{k=n_l}^{n_0} (y_k^i - x_k^i)^2, S_{i+1} = \sum_{k=n_0}^{n_r} (y_k^{i+1} - x_k^{i+1})^2$ ,则在  $n_l \sim n_r$  之间选取恰当的分割点  $n_m$ ,可使  $S_i + S_{i+1}$  最小;

3) 如果  $n_m \neq n_0$ ,则令  $n_0 = n_m$ ,返回步骤1),如果  $n_0 = n_m$ ,第  $i$  和第  $i+1$  个片段之间的分割点即为  $n_m$ ;

4) 按照步骤1)~步骤3),从第1和第2个片段的分割点开始,依次计算每组仿真模型输出时间序列各片段之间的分割点,记为  $N = \{n_k | k = 1, 2, \dots, m-1\}$ 。

按照上述方法确定的分割点组合并不是最优的选择,因为  $n_l$  和  $n_r$  的选取并不精确,导致  $n_m$  的确定有偏差。将  $N$  作为  $n_l$  和  $n_r$  取值的集合,重新执行步骤1)~步骤4),就又得到一组分割点  $N'$ ,则  $N'$  较  $N$  更为准确。重复上述步骤,直到  $N' = N$  为止,则  $N$  即为较准确的分割点组合。

### 1.2.2 特征曲线参数估计

仿真数据的特征曲线分割点确定之后,根据仿真模型输出时间序列对每一个片段的特征曲线函数进行参数估计,常用的参数估计方法是最小二乘法<sup>[10]</sup>,其原理是使特征曲线函数在各点误差的平方和最小。对于线性行为函数,采用求多元函数极值的办法来得到参数估计值。对于非线性行为函数,分两种情况:

1) 非纯非线性行为函数,可采用变量代换将其化为线性行为函数来处理;

2) 纯非线性行为函数,无论采用什么样的变换都不可能实现其线性化,所以不能像线性最小二乘法那样用求多元函数极值的办法得到特征估计值,而需要采用复杂的优化算法来求解,常用的算法有两类,即 Gauss-Newton 算法和 Newton-Raphson 算法<sup>[11]</sup>。

## 1.3 函数参数限定

经过运动模式确定和曲线函数分割后,系统动态输出时间序列规则运动的定性描述就确定了。然而,要想对仿真模型动态性能进行验证,还需要对特征曲线进行定量限定,也就是要对分割好的特征曲线各个片段的相关函数参数进行限定,以完成对特征曲线的重构。

## 2 基于特征曲线重构的模型验证

综上,基于特征曲线重构的仿真模型动态性能验证流程如图2所示。

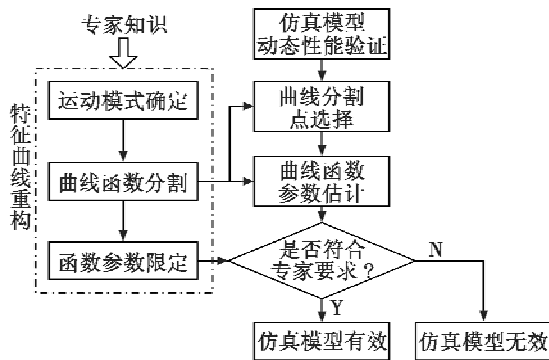


图2 基于特征曲线重构的仿真模型验证流程

Fig.2 Simulation model validation process based on characteristic curve reconstruction

基本步骤如下:

- 1) 通过与领域专家的交流沟通,收集关于被仿真对象动态输出的动态性能特征参数的知识,对特征曲线进行重构,并将相关数据存储到专家知识库中;
- 2) 按照特征曲线确定仿真数据的分割点,对每一个片段进行参数估计;
- 3) 将参数估计所得到的数据与特征曲线参数限定中专家给出的参数范围进行比较,如果每组仿真数据每一段的特征曲线函数参数均满足专家要求,则认为仿真模型有效,否则,仿真模型无效。

### 3 仿真分析

图3所示为某反导仿真模型中雷达所测弹道导弹z方向速度误差的输出时间序列,共有两组数据,分别为 $X_1$ 和 $X_2$ ,采样间隔为0.05s,序列长度为325。

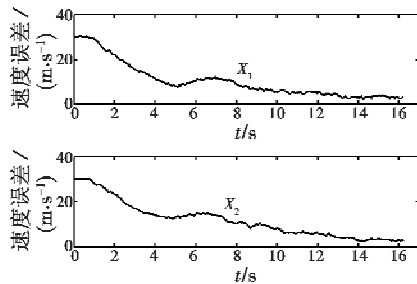


图3 雷达探测的导弹z方向速度误差

Fig.3 Velocity error of z direction detected by radar

由于没有获得相应的参考数据用于仿真模型验证,故应用基于特征曲线重构的方法对该仿真模型进行验证,分析该模型的动态性能是否满足专家要求,从而判定仿真模型的有效性。

在缺乏参考数据的情况下,与领域专家沟通,对弹道导弹z方向速度误差输出的特征曲线进行重构,重构后的特征曲线相关数据如表1所示。由表可见,后面两段的分割点取值范围较大,这主要是因为分割点越靠后,受前面分割点变化的影响越大。

表1 特征曲线相关数据

Table 1 The relevant data of characteristic curve

| 运动模式 | 曲线函数  |                       | 参数限定                               |              |
|------|-------|-----------------------|------------------------------------|--------------|
|      | 函数名称  | 函数表达式                 | 函数参数范围                             | 分割点范围        |
| 下降类  | 直线    | $a_0x + 30$           | $[-1, 0]$                          | $[15, 25]$   |
|      | 指数函数  | $a_1a_2^x + a_3$      | $[30, 50], [0.5, 0.8], [-10, 10]$  |              |
| 上升   | 二次多项式 | $a_4x^2 + a_5x + a_6$ | $[-2, -0.5], [10, 20], [-60, -10]$ | $[90, 110]$  |
| 下降类  | 直线    | $a_7x + a_8$          | $[-2, -0.5], [10, 30]$             | $[140, 180]$ |
| 常值类  | 常值    | $a_9$                 | $[1, 5]$                           | $[250, 300]$ |

按照1.2.1节所提出的方法分别确定 $X_1$ 和 $X_2$ 的分割点,如表2所示。

表2 特征曲线分割点

Table 2 The split points of characteristic curve

| 分割点   |                |
|-------|----------------|
| $X_1$ | 18,102,173,262 |
| $X_2$ | 18,91,149,288  |

将分割好的仿真数据,在每个片段上对特征曲线函数进行参数估计,所得参数估计值如表3所示。

表3 特征曲线函数参数估计值

Table 3 The estimated value of characteristic curve function parameters

|       | 直线    | 指数函数               | 二次多项式                | 直线           | 常值   |
|-------|-------|--------------------|----------------------|--------------|------|
| $X_1$ | -0.39 | 42.97, 0.79, -5.01 | -1.37, 18.56, -51.64 | -0.61, 11.93 | 2.97 |
| $X_2$ | -0.42 | 34.34, 0.74, 3.56  | -0.90, 11.13, -19.83 | -1.26, 20.67 | 3.12 |

按照上面计算的分割点和函数参数估计值,分别绘制两组仿真数据对应的特征曲线,结果如图4所示。

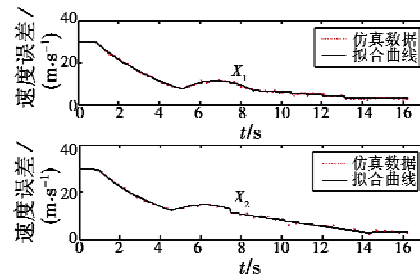


图4 仿真数据分段拟合结果

Fig.4 The piecewise fitting result of simulation data

由图可见,分割点的选择和参数估计值比较准确,可以作为判定模型有效性的参考数据。

对比计算结果与专家知识可知,两组数据的特征曲线函数参数估计值均满足专家要求,弹道导弹z方向速度误差的输出动态性能验证通过,仿真模型有效。

### 4 结语

模型验证是仿真技术的关键点之一,它对提高模型的可信性至关重要,针对仿真模型验证中缺乏可参

考的实际系统输出问题,研究了利用领域专家知识对特征曲线进行重构的模型验证方法。该方法不需要模型所对应真实系统的参考数据,有效地解决了缺乏参考数据情况下的模型验证问题。但本文的研究还不够全面、深入,例如文中只是从领域专家获取模型的时域特征进行验证,还是比较片面,如何利用频域特征或时频域特征相结合在缺乏参考数据的情况下对模型进行验证将是下一步的研究重点。

### 参考文献

- [1] SARGENT R G. Verification and validation of simulation models[C]//Proceedings of the Winter Simulation Conference, Orlando, FL; IEEE Press, 2003; 37-48.
- [2] 吕栋雷,曹志耀,邓宝,等. 利用方差分析法进行模型验证[J]. 计算机仿真, 2006, 23(8): 46-48. (LÜ D L, CAO Z Y, DENG B, et al. Using variance analysis method for model validation[J]. Computer Simulation, 2006, 23(8): 46-48.)
- [3] 吴静,吴晓燕,陈永兴,等. 基于改进灰色关联分析的仿真模型验证方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(8): 1677-1679. (WU J, WU X Y, CHEN Y X, et al. Validation of simulation models based on improved grey relational analysis[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(8): 1677-1679.)
- [4] 孙勇成,周献中,李桂芳,等. 基于灰色关联分析的仿真模型验证及其改进[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 522-524. (SUN Y C, ZHOU X Z, LI G F, et al. Validation of simulation models based on grey relational analysis and improvement[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(3): 522-524.)
- [5] 郑智琴,孟秀云. 某型导弹系统仿真模型验证[J]. 计算机仿真, 2004, 21(10): 38-40. (ZHENG Z Q, MENG X Y. Statistical validation of a missile system simulation method[J]. Computer Simulation, 2004, 21(10): 38-40.)
- [6] 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 Y N, LIU F, YANG M. Research of knowledge-based method to simulation model validation[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(8): 2277-2280.)
- [7] 沈恩华,蔡志杰,顾凡及.  $C_0$  复杂度的数学基础[J]. 应用数学和力学, 2005, 26(9): 1083-1090. (SHEN E H, CAI Z J, GU F J. Mathematical basis of  $C_0$  complexity[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2005, 26(9): 1083-1090.)
- [8] BARLAS Y, KANAR K. A dynamic pattern-oriented test for model validation[C]//Proceedings of 4th System Science European Congress, Spain; Valencia, 1999: 269-286.
- [9] 李亚男. 仿真系统模型验证方法和工具研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. (LI Y N. Research on validation methodology and tool for models of simulation system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.)
- [10] 陈祝良. 线性模型参数估计的实证分析及相对效率研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007. (CHEN Z L. Empirical analysis and research on relative efficiency of parameter estimation of linear models [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.)
- [11] 王新洲. 非线性模型的参数估计理论与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. (WANG X Z. Parameter estimation theory and application of nonlinear models[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.)
- (上接第75页)
- 制律设计中的应用[J]. 飞行力学, 2008, 26(3): 82-85. (JIN Y, SONG J L, WANG W J. Tracking-differentiator for an UAV's altitude-holding control law design[J]. Flight Dynamics, 2008, 26(3): 82-85.)
- [5] 孙彪,孙秀霞. 离散系统最速控制综合函数[J]. 控制与决策, 2010, 25(3): 473-477. (SUN B, SUN X X. Optimal control synthesis function of discrete-time system[J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 473-477.)
- [6] HODEL A S, HALL C E. Variable-structure PID control to prevent integrator windup[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(2): 442-451.
- [7] SMITH H W, DAVISION E J. Design of industrial regulators • Integral feedback and feedforward control [J]. Proceedings of IEE, 1972, 19(8): 1210-1216.
- [8] VINNICOMBE G. Frequency domain uncertainty and the graph topology[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 38(9): 1371-1383.
- [9] ZHOU K, DOYLE J C. Essentials of robust control[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1998: 349-373.
- [10] VINNICOMBE G. Uncertainty and feedback [M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1998: 349-373.
- [11] 陈怡然,孙秀霞,彭建亮. 一种简洁的离散快速无振荡跟踪-微分器的设计[J]. 电光与控制, 2011, 18(1): 77-81. (CHEN Y R, SUN X X, PENG J L. Design of a discrete high-speed tracking-differentiator without chattering[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(1): 77-81.)