

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.023

# 某型飞行模拟器飞行性能验证数据预处理方法

王 哲, 李国辉, 肖景新

(空军航空大学 军事仿真研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要:**针对飞行模拟器的性能验证问题,对验证之前所采集的试飞数据和仿真数据进行了研究,对仿真模型验证的数据预处理方法进行了归纳和总结并指出了局限性,提出了对于模拟器动态数据和静态数据进行数据选段、去除异常值、采样点匹配、平稳性检验和平稳化处理、零均值处理、各态历经性检验和正态性检验的一套处理方法,并利用这些方法对所获得的试飞数据以及仿真数据进行了处理,通过预处理的验证数据再用于具体飞行性能的检验。研究表明:该预处理方法能够将所获得的数据处理为符合下一步具体验证的数据,为下一步验证工作奠定基础。

**关键词:**数据可靠性;性能验证;数据预处理

**中图分类号:**TP391.9;V211.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2017)11-1343-05

## Data preprocessing of ascertain type of flight simulator flight performance validation

WANG Zhe, LI Guo-hui, XIAO Jing-xin

(MSTI., Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Aiming at simulation performance verification problem of the flight simulator, the previously collected test flight data and simulation data was studied, the method of simulation model validation data preprocessing was carried on the induction and limitation was pointed out, A set of processing methods to dynamic data and static data of simulator was presented to passage data, remove outliers, sampling points matching, stationarity test and smooth processing, zero mean processing, ergodic property inspection and normality, and these methods were used to the flight test data and simulation data obtained for processing, the data after preprocessing was used for the verification of specific flight performance. The results indicate that the pretreatment method can be gained by the data processing to meet the specific data validation, and the foundation of validation work is laid for the next step.

**Key words:** data reliability; performance verification; data preprocessing

## 0 引 言

随着仿真技术运用程度的不断增加,对仿真的可信性提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。

飞行模拟器是一种典型的飞行实时仿真系统,对模拟器的仿真性能进行验证,前提条件是对试飞数据以及模拟器实验数据的采集和预处理<sup>[2]</sup>,经过

预处理的数据才能满足飞行模拟器性能验证的各种方法的要求。由于需要验证的数据量大以及各种验证方法比较多,并且由于保密原因,只能获取仿真数据而无法获得飞行试验数据。目前的研究大多数都是对于仿真模型的数据预处理和验证,而对于飞行模拟器飞行性能的验证数据预处理方法还没有形成完整的方法理论。文献[3]中提到了对于静态性能和动态性能的验证方法,如奇异值剔除法、数据正态

性检验法等,虽然对理论做出了阐述,但是没有完善的预处理方法理论;文献[4]中对模型验证的数据预处理提出了标准化处理、提取趋势项和季节差分等,但是论述也不够全面;文献[5]中采用仿真数据和相同输入情况下模型参考输出数据进行比较,参考数据也不能完全代替真实的实验数据,因此有一定的局限性。

综上所述,目前仿真验证工作中,对于仿真模型验证较多,对于模拟器的直接验证较少;对仿真数据与参考数据进行比较较多,而获取真实数据并与参考数据进行比较较少。所以,在基于选取试飞数据的基础上,应该提出针对飞行模拟器飞行性能相对完善的数据预处理方法。

基于此,笔者将对模拟器实验数据以及真实试飞数据进行原始数据采集,然后将数据处理成为满足下一步飞行模拟器飞行性能的具体验证数据。

## 1 验证方法对数据的要求

试飞数据首先最应该考虑的是获取的数据本身是否可靠,这与数据的来源和获取方法有关系<sup>[6]</sup>。

本研究中所采用的数据:(1)来源于某型飞机试飞过程所记录的数据;(2)基于飞行仿真实验平台,利用该型飞机的飞行模拟器进行实验所获取的数据。在对飞行模拟器进行性能验证的过程中,可以根据要求提取合适的数据段落进行对比验证。

由于实际中所获得的数据难免受到一些干扰因素的影响,出现异常值<sup>[7]</sup>,先将这些异常值剔除。

通过主观确认和各种标量指标对数据进行验证的方法,对数据没有特殊要求,不出现异常值即可<sup>[8]</sup>。对于时间序列统计也不用考虑样本长度及其统计分布规律。

时序建模方法要求数据是平稳、正态、零均值的时间序列,同时应具备各态历经性<sup>[9]</sup>。所以在进行时序建模之前要对数据进行平稳性检验、平稳化处理、正态性检验、零均值处理和各态历经性检验。

窗谱估计和最大熵谱估计要求时间序列具有平稳性和各态历经性,在作谱估计前应进行平稳性检验和各态历经性检验<sup>[10]</sup>。若输出序列是非平稳序列,应先做平稳化处理使其转化为平稳序列。

在对于飞行模拟器的飞行验证工作当中,需要对

静态性能和动态性能进行验证。对于静态性能验证,往往根据经验已知试飞数据和仿真数据的总体分布,通常采用参数估计法,参数估计法需要对数据进行奇异值剔除、正态性检验和独立性检验等预处理。对于动态性能检验,往往采用频谱分析法中的最大熵谱分析法,最大熵谱分析法就需要在静态性能验证中的数据预处理基础上再进行时间序列零均化处理、平稳化处理、一致性处理。

## 2 数据处理

数据的预处理主要包括以下内容。

### 2.1 数据选段

真实的飞机和飞行模拟器都是比较复杂的系统,在进行模拟器验证过程当中,所选取的用于对比验证的数据应该反映出各个不同子系统的工作状态。而在模拟器系统中,飞行运动参数不仅能够反映出飞机的运动状态,还能够传输到其他系统,所以,飞行运动参数能够较好地反映出飞行模拟器的逼真度,也是在模拟器验证工作中主要进行对比验证的数据。

在获取真实飞机以及飞行模拟器所记录的数据后,所得的试飞数据和仿真数据是以时间历程的形式给出的,记录的数据量很大<sup>[11]</sup>。

要获取有效的连续时间历程,首先要从众多的时间历程中选出所要验证项目的相关数据段,比如包含某高度平飞加速过程的一段时间历程;然后从该历程中选出需要验证的数据,比如迎角、过载等数据。选取时应注意试飞数据和仿真数据的选取标准要一致,选取的时间段也要一致,使两者具有可比性。

### 2.2 去除异常值

由于试飞数据和仿真数据都是对飞机飞行状态的记录,带有一定的时间连续特性和规律性,可以使用数值分析中常用的插值和拟合方法来表示。试飞数据和仿真输出数据中的异常值一般可以通过图形直接观察出来,图形中明显不符合自身变化规律的点可以视为异常值。

也可以用拉依达准则去除异常值。假设数据样本 $\{x\}$ 服从正态分布,并且计算出其数学期望和标准差分别为 $\mu$ 和 $\delta$ ,根据正态随即过程的性质有:

$$P(|x - \mu| \geq 3\delta) \leq 0.003 \quad (1)$$

假设检验所得输出数据为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,均值为

$\bar{x}$ , 残差  $V_i = x_i - \bar{x}$ , 标准差  $\sigma = \sqrt{(n-1)^{-1} \sum V_i^2}$ , 如果其中某个测量值  $x_d$  的残差  $V_d$  满足  $|V_d| \geq 3\sigma$ , 则认为该测量值是异常值, 应予以剔除<sup>[12]</sup>。

异常值去除后, 还应保持数据的完整性, 在相应的点补入新的数据。笔者采用在异常值左右各取一点求平均作为参考值。

### 2.3 采样点匹配

基于标量指标、时序建模和频谱分析的验证方法必须采用具有相同采样点数目的时间序列。而一般得到的数据由于来源不同往往在采样点上是不匹配的, 或者不等距, 对于具有相同时间长度的 2 组数据序列, 需要使数据的采样点具有相同的数目和时间间隔。

飞行模拟器的仿真数据一般来源于模拟器的研制单位, 而作为验证标准的数据一般来源于真实飞机的飞行试验、风洞试验或理论计算, 两者一般是不匹配的, 可采用插值的方法使采样点匹配<sup>[13]</sup>。为了保证涵盖尽量多的信息和充分利用数据, 可以选择采样点较为密集的一组数据作为基准, 将另一组数据采用插值算法计算出每个采样点上的相应数值。

本研究中所采用的飞行模拟器仿真输出数据采样较为密集, 飞行过程中记录了 3 000 点数据, 采样周期为 0.02 s, 时间为 60 s, 本研究得到的飞行模拟器飞行性能验证数据具有采样点多, 时间步长较小, 其图像对收敛性和光滑性都有一定的要求, 需要兼顾收敛性和光滑性。所以, 采用线性插值的方法进行飞行模拟器飞行数据的插值计算得到每个对应点上的数据。迎角和仰角的数据曲线如图 1 所示。

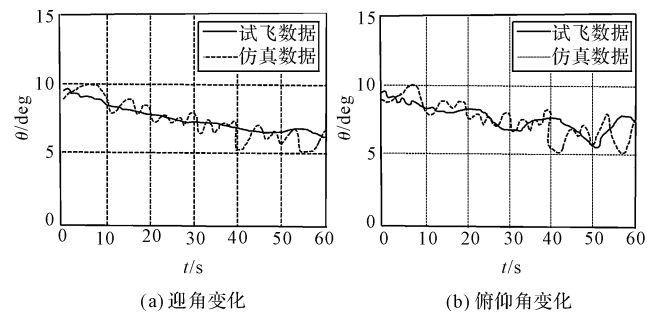


图 1 迎角和俯仰角的数据曲线

由图 1 可知, 飞行仿真模拟器的输出数据比试飞数据的起伏大, 可以通过启动运动平台和过载座椅提供过载来弥补。

### 2.4 平稳性检验和平稳化处理

得到试验样本曲线后, 判断所研究的时间序列是否为平稳过程, 要对样本数据进行平稳性检验。一般可以通过专业知识或定量分析来判断, 比如连续测量飞机飞行产生的测量误差以及波动在理论上是平稳过程<sup>[14]</sup>; 定量分析判断, 即用假设检验的方法来判断平稳性, 如游程检验<sup>[15]</sup>。除此之外, 目测也是一种简便常用的方法。一般用来初步判断样本数据的平稳性, 在需要严谨论证的情况下不采用该方法。

对于图 1 中迎角和俯仰角的变化, 可以看出两种飞行参数的变化过程明显含有非平稳成分, 属于非平稳时间序列。这时要对迎角和俯仰角的数据进行平稳化处理, 此处数据的方差在理论上是平稳的, 可以将记录的时间序列看成非平稳的确定性部分与平稳的随机部分叠加而成, 对 2 部分分别进行验证。对于非平稳的确定性部分, 可以进行差分处理将确定性部分直接剔除, 也可采用确定的函数关系式来描述, 然后再建立时序模型。

笔者对所研究的平飞加速过程中的迎角和俯仰角数据, 分别取一次、二次和更高阶次, 在最小二乘法意义下进行拟合, 得到的二次项系数和更高次项系数均为零, 故可将非平稳的趋势项看作一次多项式, 得到的表达式如表 1 所示。

表 1 非平稳部分趋势项多项式

数据	趋势项多项式
迎角试飞数据	$9.04 - 0.05t$
迎角仿真数据	$9.67 - 0.07t$
俯仰角试飞数据	$8.93 - 0.04t$
俯仰角仿真数据	$9.44 - 0.06t$

注:  $t$ —时间

利用趋势项多项式计算每个采样点处的值, 与原始数据相比较, 分别得到 4 组数据的平均误差为 0.06%、0.59%、0.59% 和 0.86%, 可见拟合得到的多项式较好地反映了原始数据的趋势。从原始数据中去除趋势项, 所得到的数据序列即可看作是平稳序列, 经过这样的平稳化处理, 就可以对平稳部分进行验证。

### 2.5 零均值处理

将得到的平稳时间序列的均值归零, 即作变换  $x' = x_i - \bar{x}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 其中  $\bar{x}$  表示时间序列  $\{x_i\}$  的均值,  $x_i$  为原来所取得样本数据各点的值, 则经过原始样本数据与样本平均数据相减, 得到的  $x'$  仍为

平稳序列<sup>[16]</sup>。之后就可以计算样本的自相关函数和偏相关函数,进行时序建模或功率谱统计。经过零均值处理的迎角和俯仰角的曲线的形状与去除趋势项后的平稳序列曲线是相同的,只是均值发生了变化。

### 2.6 各态历经性检验

随机信号的各态历经性又称为遍历性,直观的含义是:只要观测的时间足够长,随机过程的每个样本函数将遍历各种可能的状态。对于平稳随机信号 $\{x_i\}$ 来说,如果它的所有样本函数在某一固定时刻的一阶和二阶特性与单一样本函数在长时间内的统计特性一致,则称 $\{x_i\}$ 为各态遍历信号。

在实际工作中,要获得一个随机信号的所有样本集合是不可能的,尤其是对于飞机实验来说,只能获得一个或有限的几个时间历程,但如果所得的时序具有各态历经性,就可以用一个时间历程来推测整个过程的统计特性,并且通过单个样本序列的时间平均完全可以描述一平稳离散随机信号的统计特性。

一个时间序列具有各态历经性的前提是本身必须为平稳时间序列,在已知平稳过程具有各态历经性时,就可以用一条样本曲线来估计均值、相关函数和功率谱。文献[17]给出了各态历经性的一些判别准则,在实际中几乎所有的平稳过程都是各态历经的,这对于估计数据特性非常重要,也给我们工作带来很大方便<sup>[18]</sup>。

### 2.7 正态性检验

模型验证中很多方法都是基于假设检验的,要求数据服从或近似服从正态分布,大多数的统计方法也要求样本总体服从或近似服从正态分布,当不是近似满足正态分布时就会产生方法误差,所以要对数据进行正态性检验。

正态性检验的方法有很多,通用的有 $\chi^2$ 检验和 $k$ 检验,但是一般精度偏低;当样本总体无任何先验信息且均值、方差未知情况下,用 $lilliefor$ 检验方法; $D$ 检验对大样本数据比较敏感; $W$ 检验对未知对称分布数据敏感;而偏度峰度检验法对于大样本数据、对称或者非对称分布以及长尾分布较敏感。

所以,在综合各种正态性验证方法的情况下,本研究采用偏度峰度检验法进行正态性检验。对于时间序列 $\{x_i\}$ ,偏度用于衡量 $x$ 的对称性,对于正态分布或严格对称分布来说,偏度为零;峰度用于衡量 $x$ 偏离某分

布的情况,正态分布的峰度为3。

假设数据 $\{x_i\}$ 是长度为 $N$ 的样本序列,检验的方法如下:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \tag{2}$$

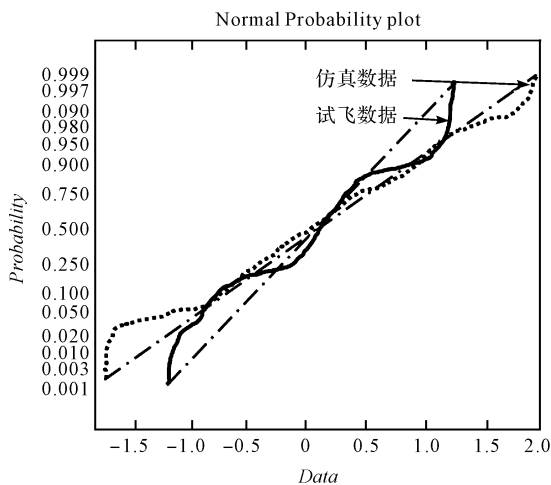
$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \tag{3}$$

$$m_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - \bar{x}}{S} \right)^3 \tag{4}$$

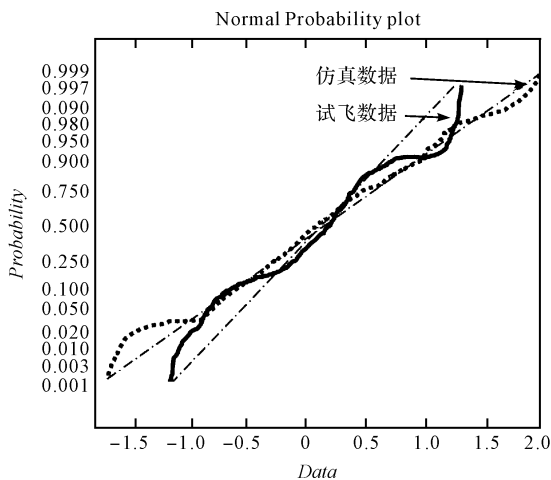
$$m_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - \bar{x}}{S} \right)^4 - 3 \tag{5}$$

当 $N$ 足够大时,如果 $m_3$ 和 $m_4$ 近似于零,则可认为序列 $\{x_i\}$ 具有正态性。

要对一组样本进行正态性检验,还可以直接应用Matlab中的相关命令画出样本,如果都分布在一条直线上,则表明样本来自正态分布,否则就是非正态分布。用该方法绘制出迎角和俯仰角时间序列的正态概率图,如图2所示。



(a) 迎角正态检验



(b) 俯仰角正态检验

图2 经平稳化和零均值处理的迎角和俯仰角数据曲线

图 2 中的试飞数据和仿真数据均近似分布在一条直线上,可视作近似服从正态分布。经过对以上数据的预处理,对照相应的验证方法选择符合要求的数据,就可以进行一致性验证。

### 3 结束语

笔者对用于飞行性能验证的试飞数据和仿真数据的可靠性进行了说明,对不同的验证方法对数据的要求进行了归纳,并结合这些要求对数据进行了去除异常值、采样点匹配、平稳性检验和平稳化处理、零均值处理、各态历经性检验、正态性检验等一系列的预处理,使之符合验证方法的使用条件,可进行下一步的静态性能和动态性能的具体验证。

本研究对于解决飞行性能验证问题,特别是飞行模拟器的飞行性能验证数据预处理提供了参考方法。

#### 参考文献(References):

- [1] 方可,周玉成,赵开斌. 含有迭代运算的仿真模型验证方法[J]. 系统工程与电子技术,2017,39(2):445-450.
- [2] 李 斌,李春洪,刘苏洋. 探索性仿真数据预处理需求分析[J]. 计算机仿真,2012,29(11):64-67.
- [3] 赵希尧. 基于静态性能一致性分析的仿真模型验证方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学航天学院,2012.
- [4] 刘藻珍. 基于飞行试验数据的仿真模型验证方法的研究[J]. 系统仿真学报,2002,14(3):281-284.
- [5] 焦 松,李 伟,杨 明. 基于经验模态分解和灰色关联度分析的仿真模型验证方法[J]. 系统工程与电子技术,35(12):2613-2618.
- [6] 吴 方. 时频域分析方法在仿真模型验证中的应用研究

- [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学控制与仿真中心,2013.
- [7] 温 瑶. 飞行过程中不安全因素的防范分析[J]. 技术与市场,2015,36(11):145.
- [8] 刘惠英,孙 真,刘 昕. 导弹仿真模型系统的验证与实现[J]. 现代电子技术,2012,35(3):1-4.
- [9] 许天一. FPGA 静态时序分析的研究与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学深圳研究生院,2014.
- [10] 裴立业. 卫星信号自动检测与识别技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学信息工程学院,2013.
- [11] 王志超. 典型歼击机动力学仿真建模及性能参数调整方法的研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学航空学院,2011.
- [12] ZHANG Zheng-xin, HU Chang-hua, SI Xia-sheng, et al. Stochastic degradation process modeling and remaining useful life estimation with flexible random-effects[J]. **Journal of the Franklin Institute**,2016,30(6):56-62.
- [13] 谢保川,范毅晟,曾 鸣,等. 基于飞参数据的飞行仿真模型验证方法研究[J]. 现代计算机,2014(2):3-8.
- [14] 刘 爽. 影响飞机平衡性试飞因素的验证与分析[C]. 2012 航空实验测试技术学术交流会,桂林:中国航空学会,2012.
- [15] 曾 鸣,李雪青,谢保川,等. 基于飞参数据的飞行仿真模型验证[J]. 指挥控制与仿真,2011,33(6):80-83.
- [16] 路翠华,王 瑛,徐君明. 基于零均值特性的箕舌线变步长 LMS 算法[J]. 海军航空工程学院学报,2013,28(5):485-488.
- [17] 何迎辉,钱伟明. 随机过程简明教程[M]. 1 版. 上海:同济大学出版社,2004.
- [18] MANOLAKIS D, INGLE V, KOGON S, et al. *Statistical signal processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2003.

[编辑:周昱晨]

#### 本文引用格式:

王 哲,李国辉,肖景新. 某型飞行模拟器飞行性能验证数据预处理方法[J]. 机电工程,2017,34(11):1343-1347.

WANG Zhe, LI Guo-hui, XIAO Jing-xin. Data preprocessing of a certain type of flight simulator flight performance validation[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(11):1343-1347.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>