

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.03.007

引用格式:吴金美,凌晓冬.航天器项目试验评估新方法[J].电讯技术,2016,56(3):273-277. [WU Jinmei, LING Xiaodong. A new evaluation method for spacecraft project test[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(3): 273-277.]

## 航天器项目试验评估新方法\*

吴金美\*\*, 凌晓冬

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

**摘要:**合理的评估方法是使得航天飞行器项目的试验论证更具有科学性的有力手段。针对航天器项目试验评估的过程复杂且内容目标不明确现状,归纳总结了对航天器项目试验的关键技术的遴选和评估指标的确定方法,分析了航天器项目试验数据的特性,选择了差分检测法进行异常值的剔除,基于经典数理统计理论进行两类指标的估计,从而形成了完整的航天器项目试验的评估方法构建,为航天器项目试验的评估验证提供了技术途径。

**关键词:**航天器项目试验;评估方法;关键技术;评估指标

**中图分类号:**V417 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)03-0273-05

## A New Evaluation Method for Spacecraft Project Test

WU Jinmei, LING Xiaodong

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

**Abstract:** To improve the reasonableness in spacecraft project test and argumentation, an evaluation method is brought forward. For solving present problems that the test process of evaluation for spacecraft project is complex and both target and content are uncertain, methods of choosing key technologies and ascertaining evaluation indexes are collected and classified. The characteristics of the test data are analyzed and a differential detection scheme is chosen to reject outliers. Based on classical statistics, evaluation of two kinds of indexes is applied. Consequently, a whole process of quantificational evaluation is formed to support the evaluation test for spacecraft project.

**Key words:** spacecraft project test; evaluation method; key technologies; evaluation indexes

### 1 引言

21 世纪,太空已成为新的战略制高点,世界各国纷纷加大对航天工业的投入。我国航天器的研制也进入了快速发展的轨道,急剧的任务增加和高密度发射,使得航天器的研制项目已经成为关注重点。对新型航天器项目的试验和评估,可以早期发现和纠正存在的缺陷和问题,为改进航天器的性能,完善研制项目监控,保障用户的最终使用提供至关重要的信息<sup>[1]</sup>。为了保证日益增长的航天器型号研制任务能够顺利进行试验和评估,特别是进一步推动

航天器项目评估理论创新,完善和规范其试验与评估的内容及要求,有必要组织开展航天器研制项目的试验评估方法的研究。

目前国内外针对项目的评估理论主要集中在项目的安全性评估、财务效益估算、风险评估等<sup>[2-3]</sup>,针对航天器研制的评估又大多是对航天器机构或者产品的可靠性评估<sup>[4-5]</sup>,对武器装备的评估内容主要是武器的效能评估<sup>[1,6-7]</sup>或者评估系统设计<sup>[8-9]</sup>,所以目前针对航天器项目的试验和评估方法还只在摸索阶段。

\* 收稿日期:2015-07-23;修回日期:2015-11-18 Received date:2015-07-23;Revised date:2015-11-18

\*\* 通信作者:wim\_83@aliyun.com Corresponding author:wim\_83@aliyun.com

事实上,科研项目论证重点在风险和效益,而在航天器项目的试验评估阶段,关注点是各个方面的精确度、安全性和可靠性等,亦即航天器的“效能”。难点就在于如何将这么多的用试验数据无法直接运用的关注点转化为可以用试验数据能够体现的评估指标,如何用试验数据进行分析得到某一个指标上的具体得分,以及如何根据评估用的各种指标反过来决定试验过程中需要获得哪方面具体数据等。

航天器项目的试验相关的理论包括了试验的方法、标准的制定、组织领导、协调、策划、实施等<sup>[1]</sup>,试验的方法和管理不是本文的研究内容,本文的目的是解决航天器项目试验后怎么进行评估,试验过程获得的数据如何处理等问题。

本文在深入分析和充分调研的基础上,提出了针对航天器项目试验的评估方法,形成了从评估指标的确定到试验数据的预处理和评估计算的一整套评估流程,对进一步提高航天器项目试验的评估水平具有参考价值。

## 2 关键技术的遴选和评估指标的确定

如何将用试验数据无法直接看出来的评估目标转化为可以用试验数据能够体现的评估指标是进行评估要解决的第一个问题,也是后续进行数据分析的基础。

对一个航天器项目进行试验和评估,首先要确定所需试验评估的内容。航天器研制项目是一个复杂的系统工程,必然有着大量的技术点,因为试验的成本和条件限制,不可能为每个相关技术进行一次单独的试验和评估,所以在试验前就必须对试验评估内容进行遴选。

另一方面,我们注意到,对每一个项目而言,是其成败关键,体现了项目的各方面值得关注的地方,也就是前面所说的关注点。因此,对关键技术进行的试验和评估是最能体现项目工程评估要求的,明确项目工程的关键技术才能有的放矢地对项目开展试验和评估,所以对评估指标的确定其实就是选择关键技术及其相关指标的一个过程。

不同的航天器项目的试验中的关键技术都不相同,我们在实践中对关键技术的遴选一般遵从应用性、创新性、复杂度这三个基本原则,具体操作时可以分3步。

第一步,根据该项目的核心和创新技术以及有应用前景的技术,搭建初步的航天器项目的关键技

术的涵盖范围。

第二步,在文献调研和专家咨询的基础上,进行遴选,依据应用性、创新性、复杂度原则,对范围内的各关键技术进行比对分析,这一阶段可借助专家的评价和打分进行排序,依次确定最终所要的关键技术清单,对于复杂的大型项目,可以分层次分阶段定关键技术;对于相近或相关的关键技术,可以分组比较分析从而实现综合优选排序。

例如,表1列出的就是针对高超声速飞行器项目的飞行试验提炼出的部分关键技术<sup>[10]</sup>。

表1 高超声速飞行器飞行试验关键技术  
Tab. 1 Key technologies of hypersonic vehicle in flight test

技术分类	关键技术
飞行演示验证技术	飞行试验风险评估技术
	空中发射技术
	地面发射技术
	高超声速分离技术
飞行导航制导与控制技术	飞行试验遥测技术
	气动/推进一体化控制技术
	导航与控制技术
	远程打击和精确制导与控制技术

第三步,在充分调研基础上,广泛征询专家意见,对每一项关键技术,提出其相应的评估指标,总体而言,不管是哪一项关键技术,其评估指标均包括能够体现安全性和可靠性的参数标志和体现精确度的各种测值的精度指标,依此规律建立每项关键技术的相应评估后对评估指标的合理性方面进行论证,以完成整个关键技术及其指标体系的建立。

例如,对于表1中的导航与控制技术,其评估指标如表2所示。

表2 导航与控制技术的评估指标  
Tab. 2 Navigation and control index system

评估参数	评估指标
遥测参数(飞行器导航标志)	处于导航状态
遥测参数(定位信息)	位置、速度数据正常输出
位置精度(记为 $\sigma_1$ )	在要求范围内
速度精度(记为 $\sigma_v$ )	在要求范围内

## 3 试验数据的预处理

对航天器项目的飞行试验或仿真试验一般都会分不同类别多次进行,对某项关键技术而言,在不同试验中可能多次涉及到,而且飞行试验一般会持续

一段时间, 所以数据量是相当大的, 但是在利用测量数据进行评估之前, 必须排除某些突发因素导致的野值, 比如冲击、振动等干扰或者设备故障、读数记录的过程的明显过错导致的过失误差, 否则容易影响评估结果的正确性。

类似于表 2 中飞行器导航标志是否处于导航状态、定位信息是否正常输出这样的测量值来说, 其中的异常值可能是数据故障、读数、记录等原因造成的, 甚至有的是操作失误导致的错误数据, 这样的数据没法进行数学处理, 只能依靠人工进行分析和筛查, 排除比较明显的过失误差, 然后用数学剔除野值的方法对位置速度这一类的测量数据进行处理。

因为航天器的测量数据并非独立等精度的静态测量, 所以在一般的测量数据中常用的三  $\sigma$  准则、格拉布斯准则、肖维勒准则、 $t$  检验法<sup>[11]</sup> 均不适用, 对飞行器测量数据处理时常用的差分检测法<sup>[12]</sup> 算法简单而且对孤立型野值的剔除效果明显, 可以用于航天器项目的试验的野值剔除。

连续积累 4 点观测数据做三阶差分, 即

$$\Delta y(i) = y(i) - 3y(i+1) + 3y(i+2) - y(i+3),$$

如果  $|\Delta y(i)| \leq \delta$ , 则认为  $y(i)$ 、 $y(i+1)$ 、 $y(i+2)$ 、 $y(i+3)$  中没有异常点; 若  $|\Delta y(i)| > \delta$ , 则需要再判断  $|\Delta y(i-1)| \leq \delta$  是否成立, 如果成立, 则认为观测数据  $y(i+3)$  是异常值, 否则, 认为观测数据  $y(i)$  是异常数据。依次进行排除, 将剔除野值后留下的数据无需补点直接用作评估的数据源, 进行下一步评估。

但试验数据常常包括自主机动过程的飞行数据, 其位置和速度的测量数据往往不是平滑的曲线, 会有很大幅度的跳跃, 甚至是分段连续的, 因此在采用差分检测法时需要连续检出野值的情况进行处理。如果连续 4 点判断为野值, 则将这 4 点进行标记, 并从这 4 点起重新进行积累和差分检测, 这样就能避免在不连续的跳跃边界点处起连续被检测为野值。

## 4 基于经典统计理论的评估方法

航天器项目的评估过程中, 大量的试验数据完全可以满足经典统计理论的样本量。如表 2 中导航技术的指标中的导航标志是否处于导航状态, 定位信息是否正常输出等, 这类试验评估主要以成败结果来度量, 即试验的成功率, 通常成败型试验对应概率统计中二项分布。

记  $n$  次独立重复试验中事件 A (一般是成功事

件) 出现的概率是  $p$ , 通常成败型指标运用点估计, 若试验得到的失败次数为  $F$ , 则成功概率的点估计为  $\hat{p} = (n-F)/n$ 。由于样本的抽取具有不确定性, 这就造成了点估计的值也具有随机性、有抽样误差, 所以对指标的估计采用区间估计法更稳定。构造统计量为失败数  $f$ , 通常采用的置信下限估计即寻求一个使得  $P(f \leq F) \geq \alpha$  的  $p$  的下限估计  $\tilde{p}$ , 其中置信水平  $1-\alpha$  是给定的, 于是  $\tilde{p}$  由下式求解得到<sup>[11]</sup>:

$$P(f \leq F) = \sum_{i=1}^F C_n^i \tilde{p}^{n-i} (1-\tilde{p})^i = \alpha. \quad (1)$$

给定置信水平  $1-\alpha$ 、试验结果  $n$  和  $F$ , 可以计算得到结果, 对于常用的参数范围, GB4087.3-85《数据的统计处理和解释二项分布单侧置信下限》提供了数表, 可直接查找结果。

在航天器项目关键技术的试验中很大一部分性能指标都是有关精度的, 比如检验各类偏差, 包括角度偏差以及表 2 中的位置偏差、速度偏差等数值, 因为测量的随机误差近似正态分布是精度分析中的常用分布, 所以对于这类偏差类的性能指标通常先检验其是否服从正态分布, 具体方法见文献[1], 如果接受, 则可用正态分布的点估计和区间估计。

假设  $n$  次试验数据  $X_1, X_2, \dots, X_n$  是来自正态总体的样本, 均值为  $\mu$ , 方差为  $\sigma^2$ 。样本试验结果的实测值为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 构造统计量  $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ 、 $S^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ , 根据数理统计理论,  $\bar{X}$  和  $S^2$  分别是  $\mu$  和  $\sigma^2$  的最优无偏估计。计算超差在可接受范围  $L$  内的概率:

$$P(X \leq L) = \Phi\left(\frac{L-\mu}{\sigma}\right) \approx \Phi\left(\frac{L-\bar{X}}{\sqrt{S^2}}\right). \quad (2)$$

计算正态分布的分布函数或者查正态分布表, 可得到结果。

## 5 示 例

在某航天器项目的试验和评估中, 通过文献调研和专家咨询确定的关键技术中, 包括该航天器的相对导航技术, 分析该关键技术的主要评估项, 论证结果分别为稳定跟踪目标、实现相对导航, 在两种状态下的适应性 (在 A 状态下的相对导航、在 B 状态下的相对导航)、位置精度、速度精度。在对试验数据采用差分检测法剔除部分异常值后, 按照评估的方法验证该项关键技术, 如表 3 所示。

表3 某航天器的相对导航技术评估

Tab.3 Evaluation of relative navigation technology for a spacecraft

评估项	指标项	评估内容	参数和试验数据	评估结果
稳定跟踪目标	遥测参数(数据有效标志、测量数据)	若给出数据有效标志,并稳定给出测量数据,则实现稳定跟踪,否则未实现	置信水平 $1-\alpha_1$ 、 $n_1$ 点的试验数据,未实现稳定跟踪失败数 $F_1$ ,专家给出判定是否实现稳定跟踪的判定标准比率值 $\theta_1$	根据式(1)计算 $\tilde{p}_1$ ,若 $\tilde{p}_1 \geq \theta_1$ ,判定实现稳定跟踪,否则未实现稳定跟踪
实现相对导航	遥测参数(相对导航标志、测量数据)	若相对导航收敛为有效且稳定给出测量数据,则实现相对导航;否则为未实现	置信水平 $1-\alpha_2$ 、 $n_2$ 点的试验数据,未实现相对导航的失败数 $F_2$ ,专家给出判定是否实现相对导航的判定标准比率值 $\theta_2$	根据式(1)计算 $\tilde{p}_2$ ,若 $\tilde{p}_2 \geq \theta_2$ ,判定实现相对导航,否则为未实现相对导航
在两种状态下的适应性	在 A 状态下的相对导航,遥测参数(相对导航收敛标志、测量数据) 在 B 状态下的相对导航,遥测参数(近程相对导航收敛标志、测量数据)	若两种状态下均稳定给出测量数据,则完全适应;若在一种状态下稳定给出测量数据,则基本适应;否则为不适应	与前面相对导航的参数和试验数据的种类一致  与前面相对导航的参数和试验数据的种类一致	分别在两种状态下的数据中评估出是否实现相对导航,若两种状态下均判定实现相对导航,则评估结果为在两种状态下完全适应;若仅一种状态下实现相对导航,则判定基本适应;若两种状态均判定未实现相对导航,则不适应
位置精度	要求偏差小于 50 m,最大可接受位置超差范围 $\varepsilon_1$	位置、速度均在精度要求范围内,为精度完全满足指标;其中之一为严重超差,为基本满足指标;若两者均为严重超差,则不满足指标	$m_1$ 组试验数据(位置分别在 $x, y, z$ 三个方向的偏差值)、专家给出偏差小于 50 m 的比率标准值 $\mu_1$ 和精度在最大可接受(即误差大于 50 m 且小于 $50 m + \varepsilon_1$ ) 的比率标准值 $\lambda_1$	根据式(2)分别对每个方向的偏差数据进行计算,得到精度在 50 m 内的概率 $p''_1$ 和精度在 $50 m \sim 50 m + \varepsilon_1$ 之间的概率 $p''_2$ ,若三个方向同时满足 $p''_1 \geq \mu_1$ ,则判定位置精度在要求范围内,上述不满足时,若三个方向同时满足 $p''_2 \leq \lambda_1$ ,则判定位置精度在最大可接受位置超差范围内;否则,必有一个方向 $p''_2 > \lambda_1$ ,判定位置精度严重超差
速度精度	要求偏差小于 0.3 m/s,最大可接受位置超差范围 $\varepsilon_v$		$m_2$ 组试验数据(速度分别在 $x, y, z$ 三个方向的偏差值)、专家给出偏差小于 0.3 m/s 的比率标准值 $\mu_2$ 和精度在最大可接受(即误差大于 0.3 m/s 且小于 $0.3 m/s + \varepsilon_v$ ) 的比率标准值 $\lambda_2$	根据式(2)分别对每个方向的偏差数据进行计算,得到精度在 0.3 m/s 的概率 $p''_3$ 和精度在 $0.3 m/s \sim 0.3 m/s + \varepsilon_v$ 之间的概率 $p''_4$ ,若三个方向同时满足 $p''_3 \geq \mu_2$ ,则判定速度精度在要求范围内,上述不满足时,若三个方向同时满足 $p''_4 \leq \lambda_2$ ,则速度精度在最大可接受速度超差范围内;否则,必有一个方向 $p''_4 > \lambda_2$ ,判定为速度精度严重超差

根据表3的方法可得出具体的评估结果。在评估后,对数据的分析也是相当重要的,因为分析结果可以直接反馈到技术的改进或者试验过程的修正,比如在精度评估时,结果表明没有达到可接受范围,分析试验数据发现含有较明显的系统误差,应该进行进一步的研究,是否设备原因或者试验过程中的因素导致试验数据有系统误差从而进行及时修正和完善,为尽早掌握该项关键技术做准备。

## 6 结束语

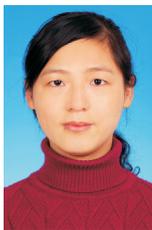
由于航天器项目试验的评估是一项复杂和庞大的前瞻性工作,本文提出的评估方法从总体上给出评估的方法和流程,搭建了评估框架,具体的评估实施过程中还会面对很多问题,需要进行深入研究。由于缺乏具体的试验数据,并且对航天器评估所需的试验数据进行仿真还需要相当的条件和时间,我们给出的示例展示了评估的方法和算法,目前无法提供

具体评估结果。对于评估方法的效果,需要结合数据做进一步分析,这也是我们下一步的研究内容。

### 参考文献:

- [1] 武小悦,刘琦. 装备试验与评价[M]. 北京:国防工业出版社,2008:284-286.  
WU Xiaoyue, LIU Qi. Equipment test evaluation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 284-286. (in Chinese)
- [2] 秦兆伟. 项目论证与评估[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011:1-9.  
QIN Zhaowei. Project demonstration and evaluation[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2011: 1-9. (in Chinese)
- [3] ROSSI P H, LIPSCY M W, FREEMAN H E. Evaluation: a systematic approach[M]. 7th ed. Los Angeles: Sage Publications Inc., 2004: 1-20.
- [4] 刘志全. 航天器结构的可靠性试验方法[J]. 中国空间科学技术, 2007, 6(3): 39-45.  
LIU Zhiquan. Reliability test methods of spacecraft mechanisms[J]. Chinese Space Science and Technology, 2007, 6(3): 39-45. (in Chinese)
- [5] 周正伐. 航天可靠性工程[M]. 北京:中国宇航出版社,2007:192-199.  
ZHOU Zhengfa. Reliability of aerospace engineering[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2007: 192-199. (in Chinese)
- [6] 杨峰,王维平. 武器装备作战效能仿真与评估[M]. 北京:电子工业出版社,2010:155-194.  
YANG Feng, WANG Weiping. Weapons and equipment operational effectiveness simulation and evaluation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 155-194. (in Chinese)
- [7] 朱宝鏊,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 2版. 北京:航空工业出版社,2006:50-107.  
ZHU Baoliu, ZHU Rongchang, XIONG Xiaofei. Effectiveness evaluation of combat aircraft[M]. 2nd ed. Beijing: Aeronautics Industry Press, 2006: 50-107. (in Chinese)
- [8] 黄俊,武哲,孙惠中,等. 作战飞机总体设计评价准则和评估方法研究[J]. 航空学报,2000,21(1):70-73.  
HUANG Jun, WU Zhe, SUN Huizhong, et al. Study on evaluation criteria and assessment method technology for conceptual/preliminary design of combat aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(1): 70-73. (in Chinese)
- [9] 王纪南,位晓峰,鲁浩. 弹载捷联惯导试验评估系统设计[J]. 电光与控制,2009,16(10):58-61.  
WANG Jinan, WEI Xiaofeng, LU Hao. Design of a test/evaluation system for SINS onboard missiles[J]. Electronics Optics and Control, 2009, 16(10): 58-61. (in Chinese)
- [10] 徐大军,蔡国飙. 高超声速飞行器关键技术量化评估方法[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(1):110-113.  
XU Dajun, CAI Guobiao. Quantificational evaluation method for key technologies of hypersonic vehicle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(1): 110-113. (in Chinese)
- [11] 叶川,伍川辉,张嘉怡. 计量测试中异常数据剔除方法比较[J]. 计量与测试技术,2007,34(7):26-27.  
YE Chuan, WU Chuanhui, ZHANG Jiayi. Comparison about how to get rid of abnormal data in metrology and measurement[J]. Metrology and Measurement Technique, 2007, 34(7): 26-27. (in Chinese)
- [12] 卓宁. 靶场外弹道数据处理中的野值点剔除方法[J]. 测试技术学报,2008,22(4):313-317.  
ZHUO Ning. Study on outlier eliminating method for data processing of exterior trajectory[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(4): 313-317. (in Chinese)

### 作者简介:



吴金美(1983—),女,江苏扬州人,2008年于国防科技大学获硕士学位,现为工程师,主要从事数据处理、计算机软件及其应用方面的研究;

WU Jinmei was born in Yangzhou, Jiangsu Province, in 1983. She received the M. S. degree from National University of Defense Technology in 2008. She is now an engineer. Her research concerns data processing and the application of computer software.

Email: wim\_83@aliyun.com

凌晓冬(1978—),男,江苏宝应人,2009年于国防科技大学获博士学位,现为工程师,主要从事数据处理、资源调度、试验评估等方面的研究。

LING Xiaodong was born in Baoying, Jiangsu Province, in 1978. He received the Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2009. He is now an engineer. His research concerns data processing resource scheduling, test evaluation, etc.