

# 空地导弹落点精度评估系统

傅修竹<sup>1</sup>, 胡晓<sup>2</sup>, 方洋旺<sup>1</sup>, 杨鹏飞<sup>1</sup>, 秦率刚<sup>3</sup>

(1.空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安,710038;  
2.95997部队,北京,100076;3.94810部队,江苏南京,210032)

**摘要** 为满足导弹设计与试验中高精度的落点精度评估要求,以落点精度评估系统为研究对象,从系统的总体设计思路出发,设计并开发了系统的数据库、数据处理子系统以及评估子系统,同时,详细给出了各模块的具体计算步骤及计算模型。最后通过软件的实例计算测试了系统的稳定性和维护性。该系统的设计开发可为装备定型、部队作战使用、研制单位验证设计思想和检验生产工艺提供技术支撑。

**关键词** 导弹;落点精度;圆概率偏差;评估系统

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.010

**中图分类号** TJ430.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0042-04

## A Research of Accuracy Evaluation System of Air-to-Ground Missile Fall Points

FU Xiu-zhu<sup>1</sup>, HU Xiao<sup>2</sup>, FANG Yang-wang<sup>1</sup>, YANG Peng-fei<sup>1</sup>, QIN Shuai-gang<sup>3</sup>

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 95997, Beijing, 100076; 3. Unit 94810, Nanjing 210032, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of the precision assessment of the fall points in missile design and experiment, this paper, taking missile accuracy evaluation system of the fall points as a research object, designs and develops system database, data processing subsystem and evaluation subsystem based on the needs of thinking way in general design of the system. And simultaneously the paper gives detailed calculation steps and computational models of modules. The stability and maintainability of the system are tested by an actual example of a software application. The design of the system provides a technological support for equipment stereotypes, operational application and for the research and development unit to verify the design idea and inspect the production technology.

**Key words:** missile; accuracy of fall points; circular error probability; evaluation system

空地导弹的试验与评定是空地导弹设计过程中的一个重要方面,而空地落点精度又是空地导弹的诸多战术技术指标评估中的一个很重要的评定内容,它对于后续的导弹改进和导弹的毁伤评估具有

重要作用。在导弹全程试验获得大量的试验数据后,如何利用这些数据快速方便的对导弹进行精度分析与鉴定,是打靶试验的重要环节。

目前,国外在武器试验评定方面特别是导弹落

收稿日期:2013-09-02

作者简介:傅修竹(1990—),男,四川阆中人,硕士生,主要从事机载武器试验精度评估研究.E-mail:975400799@qq.com

**引用格式:**傅修竹,胡晓,方洋旺,等.空地导弹落点精度评估系统研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(4):42-45. FU Xiu-zhu, ANG Yangwang, YANG Pengfei, et al. A research of accuracy evaluation system of air-to-ground missile fall points[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(4): 42-45.

点精度评估方面已有大量研究<sup>[1-4]</sup>。国内国防科技大学也做了大量的研究<sup>[5-6]</sup>。他们都是从理论上对各个精度的评估模型进行了研究,而没有专门针对空地导弹落地精度评估软件进行相应的研究,而目前试验基地对于这种评估系统具有迫切的需求。因此,研究针对落点精度评估的软件系统非常有意义。本文为满足机载武器试验任务高精度的综合数据处理和试验评估要求,研究了空地导弹落点精度评估系统的设计与实现。

### 1 系统构成及流程

软件的设计按照系统分析与定义、需求分析、总体设计、详细设计、系统实现、系统测试、验收交付 7 个阶段进行。在设计时,采用结构化的设计方法,注重系统的安全性、实时性、可靠性以及可维护性设计。本系统设计考虑了功能的可扩充性,在后期可继续开发其他试验评估内容,并且便于移植和修改。

空地导弹落点精度评估系统主要包括数据库模块、数据预处理模块、精度评估模块,全程采用 VV&A 技术。它们之间相辅相成,是一个有机的整体,系统的构成见图 1。

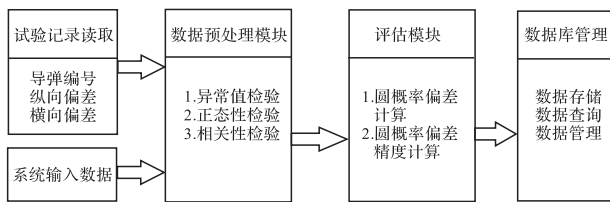


图 1 评估系统结构图

Fig.1 The structure diagram of evaluation system

数据库模块主要分为输入数据库和输出数据库。此模块主要在系统中用来存储并且日常管理每一任务的具体试验落点偏差数据、试验环境测量信息、导弹信息、人员信息以及精度评估结果数据。为了确保试验数据存储的高可靠性,在系统设计时考虑到数据库的备份与恢复。在本系统的设计中采用 Access 2007 数据库。

数据预处理模块主要对导弹打靶的落点数据进行异常值检验,正态分布检验和落点纵向横向偏差的相关性检验。此模块在系统中主要用来对试验的原始数据进行处理。试验中可能会由于环境、设备或人为因素的影响,使信息记录丢失,导致落点数据与目标运动规律明显不符,所以需要剔除异常值以及检验落点数据是否满足正态分布规律。

精度评估模块主要是完成落点的精度计算,包括圆概率偏差的评定和圆概率偏差评定的精度蒙特卡罗分析。

VV&A 是贯穿系统设计全程的活动,它主要是为了确保系统的设计模型,软件实现和计算结果都具有很高的可信性。

为了保证评估系统的数据流向清晰合理,设计了精度评估流程见图 2。

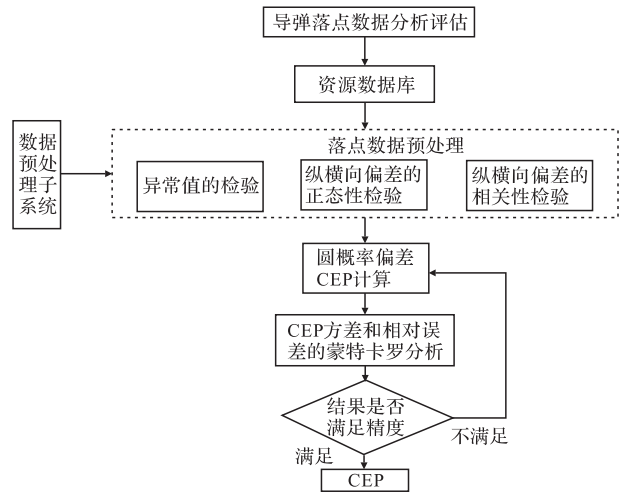


图 2 评估系统流程图

Fig.2 The flow chart of evaluation system

### 2 系统数学模型

落点精度评定的主要内容是通过试验、仿真得到的导弹落点数据计算,得到圆概率偏差 CEP<sup>[7-10]</sup>,并计算 CEP 的数学期望,均方差估计值以及相对误差,从而对导弹的落点精度进行评定。

#### 2.1 落点偏差异常值检验模型

设空地导弹的纵横偏差分别为  $\Delta Y$  和  $\Delta X$ ,  $n$  次靶试结果为  $(\Delta Y_1, \Delta X_1), (\Delta Y_2, \Delta X_2), \dots, (\Delta Y_n, \Delta X_n)$ , 样本  $(\Delta Y_1, \Delta Y_2, \dots, \Delta Y_n)$  与样本  $(\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n)$  分别服从正态分布  $N(\mu_{\Delta Y}, \delta_{\Delta Y}^2)$  和  $N(\mu_{\Delta X}, \delta_{\Delta X}^2)$ , 并且纵横偏差相互独立。

标准差未知时,判断和处理异常值的规则有:格拉布斯检验法,狄拉逊检验法,偏度-峰度检验法,最小二乘法。本系统中采用格拉布斯检验法来处理异常值。

纵向偏差和横向偏差的异常值检验方法一样,以下以纵向检验为例,样本  $(\Delta Y_1, \Delta Y_2, \dots, \Delta Y_n)$  以升序排列,记为  $(\Delta Y'_1, \Delta Y'_2, \dots, \Delta Y'_n)$ , 计算统计量:

$$G_n = \frac{\Delta Y'_n - \Delta Y'_1}{S_{\Delta Y}}, G'_n = \frac{\Delta Y'_1 - \Delta Y'_n}{S_{\Delta Y}} \quad (1)$$

式中:

$$\Delta Y' = \frac{\Delta Y'_1 + \Delta Y'_2 + \dots + \Delta Y'_n}{n} \quad (2)$$

$$S_{\Delta Y} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - n (\Delta Y')^2 \right]} \quad (3)$$

给定检出水平  $\alpha$ , 若  $G_n > G_{1-\alpha}(n)$ , 判定最大值  $\Delta Y'_n$  为异常值, 若  $G'_n > G_{1-\alpha}(n)$ , 判定最小值  $\Delta Y'_1$  为异常值; 反之, 为正常值。临界值  $G_{1-\alpha}(n)$  查 GB4883-85 表 A2 得到。

## 2.2 落点偏差正态性检验模型

以纵向偏差为例, 进行最小二乘正态性检验。在升序排列  $(\Delta Y'_1, \Delta Y'_2, \dots, \Delta Y'_n)$  中, 把纵向偏差样本的中位值作为总体累积分布的估计量, 即:

$$F(\Delta Y'_i) = \Phi\left(\frac{\Delta Y'_i - \Delta Y'}{S}\right) = \Phi(L_i) \quad (4)$$

式中:  $\Phi(\cdot)$  为标准正态分布函数,  $\Delta Y'$  与  $S$  分别为样本的均值和样本标准差;  $L_i$  为  $F(\Delta Y'_i)$  的分位数。

若纵向偏差服从正态分布, 则  $L_i = (\Delta Y'_i - \Delta Y')/S$  的线性相关程度越好, 其正态性越好, 线性相关程度可用相关系数表示为:

$$r_{\Delta Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta Y'_i - \Delta Y')(L_i - \bar{L})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta Y'_i - \Delta Y')^2 \sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}} \quad (5)$$

式中  $\bar{L}$  为  $L_i$  的均值。  $r_{\Delta Y}$  的绝对值越接近 1, 正态性越好。

## 2.3 落点偏差横向和纵向相关性检验模型

纵向偏差和横向偏差相互独立时, 它们的相关性可用线性相关系数表示为:

$$r_{\Delta Y, \Delta X} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta Y'_i - \Delta Y')(\Delta X'_i - \Delta X')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta Y'_i - \Delta Y')^2 \sum_{i=1}^n (\Delta X'_i - \Delta X')^2}} \quad (6)$$

式中:  $\Delta Y'$  为纵向偏差样本的均值;  $\Delta X'$  为横向偏差样本的均值。  $r_{\Delta Y, \Delta X}$  的绝对值越小, 相关性越弱, 一般认为在 0.3 ~ 0.4 时, 认为是弱相关的。

## 2.4 圆概率偏差计算模型

纵横向偏差分别服从正态分布, 相互独立, 圆概率偏差 CEP 是指以瞄准点为圆心, 弹着概率为 0.5 的圆形区域半径  $r$ , 可表示为:

$$\frac{1}{2\pi\sigma_{\Delta Y}\sigma_{\Delta X}} \iint_{(\Delta Y)^2 + (\Delta X)^2 \leq r^2} \exp\left[-\frac{(\Delta Y - \mu_{\Delta Y})^2}{2\sigma_{\Delta Y}^2} - \frac{(\Delta X - \mu_{\Delta X})^2}{2\sigma_{\Delta X}^2}\right] d(\Delta Y)d(\Delta X) = 0.5 \quad (7)$$

经过简化得:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta X}} \int_{-r}^r \left[ \Phi\left[\frac{\sqrt{r^2 - (\Delta Y)^2} - \mu_{\Delta Y}}{\sigma_{\Delta Y}}\right] - \Phi\left[\frac{-\sqrt{r^2 - (\Delta Y)^2} - \mu_{\Delta Y}}{\sigma_{\Delta Y}}\right] \right] \exp\left[\frac{(\Delta X - \mu_{\Delta X})^2}{2\sigma_{\Delta X}^2}\right] d(\Delta X) = 0.5 \quad (8)$$

通过迭代求解, 选取一定步长  $\Delta r$  在  $[-r, r]$  内搜索, 当满足  $|\text{左边} - 0.5| < \text{eps}$  (eps 为迭代精度) 时, 跳出循环。

## 2.5 圆概率评定精度模型

在完成 CEP 计算以后, 还需要对圆概率评定的精度进行分析, 通过蒙特卡罗仿真来进行。

如果纵向偏差样本  $(\Delta Y_1, \Delta Y_2, \dots, \Delta Y_n)$  与横向偏差样本  $(\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n)$  分别服从正态分布  $N(\mu_{\Delta Y}, \delta_{\Delta Y}^2)$  和  $N(\mu_{\Delta X}, \delta_{\Delta X}^2)$ , 通过蒙特卡罗仿真, 从正态分布  $N(\mu_{\Delta Y}, \delta_{\Delta Y}^2)$  和  $N(\mu_{\Delta X}, \delta_{\Delta X}^2)$  中随机的抽取  $n$  个样本, 作为假设的  $n$  次抽样试验, 就可得到圆概率偏差的方差  $\sigma_{\text{CEP}}^2$  和相对误差  $\delta$ , 如果蒙特卡罗数字仿真次数为  $s$ , 则:

$$\sigma_{\text{CEP}}^2 = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (\text{CEP}_i - \text{CEP})^2 \quad (9)$$

$$\delta = \frac{\sigma_{\text{CEP}}}{\text{CEP}}$$

式中: CEP 为  $n$  个试验样本得到的圆概率偏差的估计;  $\text{CEP}_i$  为蒙特卡罗数字仿真方法  $n$  次抽样得到的圆概率偏差估计。

## 2.6 系统的 VV&A 过程

为了在设计此系统的过程中随时确保设计的可信性, 采用了 VV&A, 即校核, 验证和确认。

系统在设计的一开始就启动了 VV&A 计划, 对系统的计算模型进行了校核, 对系统的程序代码进行了验证, 对系统的仿真计算结果进行了确认。

对于计算模型的校核方面, 在设计一开始就进行了这项工作, 验证了系统计算模型是否完整地反映了系统设计的需求并进行校核。

对于程序代码的验证方面, 采用了静态技术, 从故障分析、语义分析、语法分析 3 方面进行了验证。

对于计算结果方面, 通过该领域专家对试验计算的结果进行可信度评估, 从而得到确认。

## 3 评估系统的运行及结果

输入用户名和密码后, 进入导弹落点精度评估系统主界面, 主界面包括树状导航菜单、文件菜单、数据库菜单、数据预处理菜单、精度评估菜单、应用程序外观菜单和帮助菜单。算例分析: 从数据库导入 6 枚空地导弹的试验落点数据见表 1, 并进行数据预处理见图 3。首先剔除异常值, 在数据处理模块中点击异常值处理按钮进行异常值处理。然后通过分别计算横向偏差和纵向偏差的线性相关系数来检验正态性, 最后计算纵横向偏差的相关系数来检验它们的相关性并保存处理后的数据。

数据处理结果为:无异常值,  $r_{\Delta X} = 0.976\ 532$ ,  $r_{\Delta Y} = 0.985\ 623$ ,  $r_{\Delta Y, \Delta X} = 0.168\ 952$ 。

表 1 落点数据

Tab.1 The placement data

导弹试验编号	$\Delta Y/\text{km}$	$\Delta X/\text{km}$
1	-2.256	-1.245
2	-0.618	-0.214
3	1.201	-2.111
4	-0.974	0.328
5	1.061	1.230
6	0.160	0.611



图 3 数据处理界面

Fig.3 The data processing interface

设定仿真次数为 100,步长为 0.05,迭代精度为 0.001。通过软件计算,得到评估结果。评估结果为:  $CEP = 1.534\ \text{km}$ ,  $\sigma_{CEP}^2 = 0.1117$ , 相对误差为 0.235。

### 4 结语

通过导弹落点精度评估数学模型的研究,开发了以 Visual C++ 作为平台的精度评估系统。该系统经过反复的测试及验证,能真实准确的计算导弹落点精度,并且运行稳定,操作简单,便于维护,窗口界面有较好的人性化设计。该系统可以运用到装备的定型工作、部队使用、研制单位验证设计思想和检验生产工艺中去。

### 参考文献 (References):

[1] Tracy Hammond, Krzysztof Gajos, Randall Davis, et al. Sketch recognition in software design[M]. Boston: MIT artificial intelligence laboratory, 2002.

[2] Booch G, Rumbaugh J, Jacobson I. The unified modeling language user guide[J]. Addison-wesley, 1998, 5(5): 450-453.

[3] Coen Michael H, Brenton Phillips, Nimrod Warshawsky, et al. Meeting the computational needs of intelligent environments: the metaglu system[J]. In proceedings of manse, 1999, 4(6): 12-16.

[4] Preece A, Hui K, Gray A. Kraft architecture for

knowledge fusion and transformation[J]. Knowledge-based systems, 2000, 3(2): 113-120.

[5] 程光显, 张士峰. 导弹落点精度的鉴定方法——概率圆方法[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(5): 13-16. CHENG Guangxian, ZHANG Shifeng. Missile accuracy of identification methods——probability circle method[J]. Journal of the national defense university, 2001, 23(5): 13-16. (in Chinese)

[6] 王正明, 卢芳云, 段晓君, 等. 导弹试验的设计与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2010. WANG Zhengming, LU Fangyun, DUAN Xiaojun, et al. Design and evaluation of missile tests[M]. Beijing: Science press, 2010. (in Chinese)

[7] 魏诗卉, 王明海. 导弹作战使用命中精度 CEP 评定方法研究[J]. 飞行力学, 2005, 12(4): 52-56. WEI Shihui, WANG Minghai. Missile use CEP assessment methods[J]. Flight mechanics, 2005, 12(4): 52-56. (in Chinese)

[8] 张士峰, 沈振康. 导弹落点精度评估的仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2002, 11(14): 52-55. ZHANG Shifeng, SHEN Zhenkang. Missile accuracy assessment simulation analysis[J]. Journal of system simulation, 2002, 11(14): 52-55. (in Chinese)

[9] 汶小泥, 祝小平. 命中精度 CEP 的估计[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 25(2): 367-381. WEN Xioani, ZHU Xiaoping. Hit accuracy CEP estimates[J]. Missiles and guidance, 2004, 25(2): 367-381. (in Chinese)

[10] Florios Bardanis. Killvehicle effectiveness for boost phase interception of ballistic missiles[J]. Master of science in electrical engineering, 2004, 6(6): 20-25. (编辑: 田新华)