

doi: 10.7690/bgzdh.2021.04.010

## 非标准条件弹道诸元解算精度检验方法

方晓帆<sup>1</sup>, 李 隽<sup>2</sup>, 吴婷飞<sup>1</sup>, 刘 斌<sup>1</sup>

(1. 西南计算机有限责任公司技术中心, 重庆 400060; 2. 重庆军代局, 重庆 400060)

**摘要:** 为满足火炮弹道诸元解算精度检验的需求, 设计一种基于正交试验设计的非标准射击条件弹道诸元解算精度检验方法。分析国内外研究现状, 采用正交试验设计确定多因素、多水平的模拟射击条件, 在符合射表和单项修正量精度检验方法的基础上开展非标准射击条件精度检验方法研究, 并在某新型项目中进行检验验证。结果表明, 该方法能实现对弹道诸元解算软件进行自动测试、检验, 并统计、分析弹道诸元解算软件的整体精度情况。

**关键词:** 弹道诸元解算精度检验; 非标准射击条件; 正交试验设计

**中图分类号:** TJ012.3 **文献标志码:** A

## Accuracy Inspection Method of Nonstandard Condition Trajectory Data Calculation

Fang Xiaofan<sup>1</sup>, Li Cui<sup>2</sup>, Wu Tingfei<sup>1</sup>, Liu Bin<sup>1</sup>

(1. Technology Center, Southwest Computer Co., Ltd., Chongqing 400060, China;  
2. Military Representative Bureau in Chongqing, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** Aiming at requirement of artillery trajectory data calculation accuracy inspection, the nonstandard firing condition trajectory data calculation accuracy inspection method based on orthogonal test design is designed. Analyze the current research situation at home and abroad, use orthogonal test design to ascertain multi-factor, multi-level simulation firing conditions. Based on firing table and single modification vector accuracy inspection method to carry out research on accuracy inspection method of nonstandard firing condition, then verify it in new project. The results show that the method can realize automatic test and inspection for trajectory data calculation accuracy inspection, and make statistics and analysis for the trajectory data calculation accuracy.

**Keywords:** trajectory data calculation accuracy inspection; nonstandard firing condition; orthogonal test design

### 0 引言

在对火炮弹道诸元解算软件进行精度检验的过程中, 针对射表表定弹道诸元(包括基本诸元和修正诸元2个部分)<sup>[1]</sup>, 一般采用常规的符合射表和单项修正量精度检验方法, 并以射表表定诸元数据为标准值。该方法主要满足标准射击条件弹道诸元解算精度检验和某一单项条件改变时弹道诸元解算精度检验, 未考虑实战环境下非标准射击条件弹道诸元解算精度检验问题; 因此, 在某新型研究项目中, 为满足对弹道诸元解算软件计算精度进行检验的需求, 除安排常规符合射表和单项修正量精度检验外, 经过理论研究、分析, 设计了基于正交试验设计的非标准射击条件弹道诸元解算精度检验方法。

### 1 国内外研究现状

正交试验设计是根据正交性, 采用正交表进行试验方案的组合, 找到科学全面反映最优组合的试验方法<sup>[2]</sup>。正交试验法因其高效率、快速和经济, 在军事领域已有较多应用<sup>[3-4]</sup>。弹道诸元解算软件是

用来计算弹丸弹道诸元的软件。随着武器系统的发展, 新型弹种的研发, 射击诸元解算精度的检验工作也十分重要。为了正确检验其计算精度是否达标, 需要有一个正确、合理的精度检验方法。传统的研究和实践一般采用弹道模拟试验方法, 即以编拟射表的弹道方程及其基础数据为依据, 以弹道方程的数值积分结果作为标准值, 根据射击条件的分布规律及其特征值模拟实际射击条件、按照数量统计方法确定抽样方案, 并对试验结果进行统计、评估<sup>[5]</sup>。目前国内外对射击诸元精度检验有一定的研究, 采用随机生成算法进行射击条件设计<sup>[6]</sup>, 更符合被试装备实际情况的二次抽样试验法<sup>[7]</sup>和典型射击条件设计的均匀设计法<sup>[8]</sup>等。笔者综合考虑模拟实际射击条件和试验次数, 采用正交法进行试验设计和弹道诸元软件解算精度检验。

现有弹道诸元解算软件精度检验主要开展符合射表和单项修正量精度检验, 验证标准射击条件下弹道诸元解算软件计算得出的弹道诸元值与射表标准值之间的符合程度; 因此, 有必要对非标准射击

收稿日期: 2020-12-13; 修回日期: 2021-01-24

作者简介: 方晓帆(1972—), 男, 安徽人, 硕士, 高级工程师, 从事新型通信网络体制、炮兵射击指挥研究。E-mail: 970380198@qq.com。

条件下的精度检验进行研究。

## 2 基本概念

### 2.1 精度检验的基本步骤

弹道诸元解算软件精度检验的基本步骤包括：

- 1) 确定精度检验的标准值；
- 2) 制定试验方案；
- 3) 模拟射击条件；
- 4) 进行模拟试验；
- 5) 对试验结果进行统计、评估。

### 2.2 标准条件和弹道诸元

#### 2.2.1 标准条件

在编制射表时，为了规范影响弹道的因素，必须规定某种代表性的标准射击条件。我国炮兵标准射击条件包括标准气象条件、标准弹道条件和标准地球条件。当实际射击条件与标准射击条件不一致时，应对这些偏差造成的影响予以修正。

#### 2.2.2 弹道诸元

射表中的弹道诸元主要包括基本诸元和修正诸元 2 部分。基本诸元是在标准射击条件下给出，主要内容是射距离与射角、最大弹道高、落角、落速、飞行时间、偏流、公算偏差等的关系，以及射距离与高角变化、炮目高低角改变引起高角变化量的关系；修正诸元提供了射距离与横风、纵风、气温、气压、初速、药温和弹重等变化引起的射距离改变量及方向改变量的关系。

### 2.3 正交试验设计方法

正交试验设计，是利用正交表科学地安排与分析多因素试验的方法<sup>[9]</sup>。

#### 2.3.1 正交表

正交表是一种特殊表格，是正交试验设计中安排试验和分析试验结果的基本工具，分为等水平正交表和混合水平正交表。笔者以等水平正交表举例说明。

等水平正交表：各因素水平数相等的正交表，使试验点在试验范围内排列整齐、规律，也使试验点在试验范围内散布均匀。

记号： $L_n(r^m)$ ， $L$  为正交表代号； $n$  为正交表横行数（试验次数）； $r$  为因素水平数； $m$  为正交表纵列数（因数个数）。

#### 2.3.2 正交试验设计的基本步骤

- 1) 明确试验目的，确定评价指标；
- 2) 挑选因素，确定水平；
- 3) 选正交表，进行表头设计；
- 4) 明确试验方案、进行试验，得到结果；
- 5) 对试验结果进行统计评估；
- 6) 进行验证试验、作进一步分析。

#### 2.3.3 确定水平的方法

为避免人为因素导致的系统误差，各因素不要简单地按因素水平的数值，从小到大或从大到小的顺序排列，可以采用均匀分布或正态分布等方法来处理<sup>[10]</sup>。

$x$  在区间  $[a, b]$  内服从均匀分布，并记为  $x \sim U[a, b]$ 。

算法：设  $R$  是由计算机随机抽取  $[0, 1]$  区间符合均匀分布的随机数，则

$$x = R + (b - a) + a. \quad (1)$$

## 3 精度检验方法研究

在符合射表和单项修正量精度检验方法的基础上开展非标准射击条件精度检验方法研究。

### 3.1 符合射表精度检验

#### 3.1.1 射击条件

射击条件是对基本诸元的检验，以射表表定基本诸元数据作为精度检验的标准值。

模拟射击条件采用射表规定的标准条件，包括：

- 1) 阵地高程  $H_p$ ，按照射表使用高程取值；
- 2) 装药号  $N_y$ ，按照射表规定值取值；
- 3) 射角  $\theta$ ，按照射表规定的范围全数选值；
- 4) 采用标准气象条件，气象类型使用精密法；
- 5) 采用标准弹道条件。

#### 3.1.2 进行模拟试验

根据 3.1.1 节形成一组  $n$  个模拟射击条件。在相同的模拟射击条件下，分别使用编拟该弹种射表的弹道方程计算射击诸元和使用检验软件调用弹道诸元解算软件批量计算射击诸元，经过  $n$  次试验后可得：

$n$  个不同条件下计算的距离误差：

$$\Delta X = \Delta X_i - \Delta X_b, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

$n$  个不同条件下计算的方向误差：

$$\Delta Z = \Delta Z_i - \Delta Z_b, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

### 3.1.3 对试验结果进行统计、评估

在对试验结果进行初步分析和异常结果处理后,采用以下公式进行精度统计:

1) 距离中间误差。

距离误差与炮目距离之比为

$$\eta_i = \Delta X_i / \Delta D_i, \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

$$E_d = 0.674 5 * \sqrt{\sum_{i=1}^n \eta_i^2 / n}。 \quad (4)$$

2) 方向中间误差:

$$E_f = 0.674 5 * \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta Z_i^2 / n}。 \quad (5)$$

结果分析:当中间误差  $E_d \leq E_{db}$  且  $E_f \leq E_{fb}$  ( $E_{db}$ ,  $E_{fb}$  为该弹种诸元解算软件精度指标)时,可认为在标准射击条件下该弹种弹道诸元解算软件的计算精度满足要求;当中间误差  $E_d > E_{db}$  或  $E_f > E_{fb}$  时,其计算精度不满足要求。

## 3.2 单项修正量精度检验

### 3.2.1 射击条件

射击条件是对修正诸元的检验,以按照射表规定修正量数据作为精度检验的标准值。模拟射击条件假定只有一项射击条件改变,其他各项均设为标准值的方法,采用3.1.1节的条件。

### 3.2.2 进行模拟试验

根据3.2.1节形成一组  $n$  个模拟射击条件,使用检验软件调用弹道诸元解算软件用精密法批量计算射击诸元,再用标准气象及标准弹道条件计算射击诸元,两者之差即为变化的射击条件引起的修正量。将该修正量与表定修正量进行比较,经过  $n$  次试验后得:

$n$  个不同条件下计算的距离误差:

$$\Delta X = \Delta X_i - \Delta X_b, \quad i = 1, 2, \dots, n。 \quad (6)$$

$n$  个不同条件下计算的方向误差:

$$\Delta Z = \Delta Z_i - \Delta Z_b, \quad i = 1, 2, \dots, n。 \quad (7)$$

### 3.2.3 对试验结果进行统计、评估

采用与3.1.3节相同的方法对试验结果进行处理,结果分析如下:

当中间误差  $E_d \leq E_{db}$  且  $E_f \leq E_{fb}$  ( $E_{db}$ ,  $E_{fb}$  为该弹种诸元解算软件精度指标)时,可认为在某单项射击条件改变下该弹种弹道诸元解算软件的计算精度满足要求;当中间误差  $E_d > E_{db}$  或  $E_f > E_{fb}$  时,其计算精度不满足要求。

## 3.3 非标准射击条件精度检验

传统意义上,某一弹种弹道诸元解算软件经过符合射表精度检验和单项修正量精度检验后,如果检验结果满足指标要求,经审查,该弹种弹道诸元解算软件就完成研制并可交付部队使用。由于在实际射击条件下影响弹道诸元的因素非常多,相互关联,并且弹道诸元解算软件编制时受实际运行环境影响,为保证处理速度,对步长、边界及数据精度的取舍等处理可能与编拟射表的弹道方程不完全一致,以及程序编写过程的不完善,都可能导致在相同的非标准射击条件下弹道诸元解算软件计算结果与编制射表的弹道方程计算结果不一致。

为了检验非标准射击条件下弹道诸元解算软件的计算精度,在检验方法上采用与符合射表和单项修正量相同的原理,但在对实际射击条件的模拟上除了在各单项射击条件的布点上结合我国地形、气象、武器装备的性能特点和实际使用情况进行合理处理外,各单项射击条件之间采用多因素、多水平的试验方案。

虽然因素全面的全面试验可以综合研究实际射击条件各因素简单效应、主效应和因素间的交互效应,但从试验次数的计算公式  $n = q^m$  可以发现:随着因素和水平的增加,试验的次数将急剧增加,会给研究和实践带来大量工作并浪费大量时间<sup>[11]</sup>。正交试验是一种科学地安排与分析多因素试验的方法,能通过对具有代表性的部分试验结果分析,了解全面试验的情况<sup>[12]</sup>。均匀设计试验可以进一步减少试验次数,其效果接近全面试验<sup>[13]</sup>。综合考虑试验次数、试验水平布点难度和试验用计算机软件仿真技术,笔者采用正交试验设计作为优化的模拟实际射击条件试验方案。

## 4 精度检验方法

在某新型研究项目中,对基于正交试验设计的非标准射击条件弹道诸元解算精度检验方法进行了研究。

### 4.1 试验目的和精度检验标准值

试验目的是检验弹道诸元解算软件在非标准射击条件下的计算精度是否符合指标。以编拟射表的弹道方程在相同的非标准射击条件下的计算结果作为精度检验的标准值。试验求取在相同的非标准射击条件下,编拟该弹种射表的弹道方程计算和弹道诸元解算软件计算的射击诸元之间的差值。

### 4.2 基于正交试验设计的模拟射击条件

#### 4.2.1 试验因数的选取

选取影响诸元计算精度的各单项射击条件作为试验因素，包括装药号、地理纬度、射向、射角、海拔高、初速偏差、炮目高差、弹重符号和气象条件 9 项。

#### 4.2.2 试验水平的选取

试验水平按照均匀分布处理，水平数选取 9。

- 1) 装药号  $N_y$ ,  $N_y \in [N_{y_{min}}, N_{y_{max}}]$ ;
- 2) 地理纬度  $\lambda$ ,  $\lambda \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ ;
- 3) 射向  $\alpha$ ,  $\alpha \in [\alpha_{min}, \alpha_{max}]$ ;
- 4) 射角  $\theta$ ,  $\theta \in [\theta_{min}, \theta_{max}]$ ;
- 5) 海拔高  $H_p$ ,  $N_p \in [N_{p_{min}}, N_{p_{max}}]$ ;

- 6) 初速偏差  $\Delta v$ ,  $\Delta v \in [\Delta v_{min}, \Delta v_{max}]$ ;
- 7) 炮目高差  $\Delta H_{pm}$ ,  $\Delta H_{pm} \in [\Delta H_{pm_{min}}, \Delta H_{pm_{max}}]$ ;
- 8) 弹重符号  $N_{qp}$ ,  $N_{qp} \in [N_{qp_{min}}, N_{qp_{max}}]$ ;
- 9) 气象条件：取实际气象条件。

#### 4.2.3 正交表的选取和表头设计

试验共涉及 9 个因素，采用等水平正交表， $L_{81}(9^9)$ 。首列为试验号，其余每个因素占一列<sup>[14]</sup>，如表 1 所示。

表 1 表头设计

试验号	装药号	地理 纬度	射向	射角	海拔高	初速 偏差	炮目 高差	弹重 符号	气象
-----	-----	----------	----	----	-----	----------	----------	----------	----

### 4.3 模拟试验

试验方案见表 2 所示。

表 2 试验方案

试验号	装药号	地理纬度/(°)	射向/mil	射角/mil	海拔高/m	初速偏差	炮目高差/m	弹重符号	气象
1	1	1	3	2	9	3	8	4	2
2	2	1	8	6	8	8	1	5	9
3	3	1	4	8	7	2	5	7	3
4	4	1	9	7	2	4	9	6	1
5	5	1	5	1	4	7	7	5	8
6	6	1	6	4	3	5	3	8	5
7	7	1	2	5	6	9	4	2	4
8	8	1	1	3	5	6	6	1	6
9	9	1	7	9	1	1	2	3	7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
79	7	9	4	8	9	7	5	8	4
80	8	9	7	2	8	2	9	2	6
81	9	9	3	6	2	4	7	1	7

每次试验，取试验号对应的一组射击条件数据，在相同的模拟射击条件下，分别使用编

拟该弹种射表的弹道方程计算射击诸元和检验软件。试验结果及极差分析如表 3 所示。

表 3 试验结果及极差分析

试验号	装药号	地理纬度/(°)	射向/mil	射角/mil	海拔高/m	初速偏差	炮目高差/m	弹重符号	气象	诸元误差
1	1	1	3	2	9	3	8	4	2	$\Delta X_1, \Delta Z_1$
2	2	1	8	6	8	8	1	5	9	$\Delta X_2, \Delta Z_2$
3	3	1	4	8	7	2	5	7	3	$\Delta X_3, \Delta Z_3$
4	4	1	9	7	2	4	9	6	1	$\Delta X_4, \Delta Z_4$
5	5	1	5	1	4	7	7	5	8	$\Delta X_5, \Delta Z_5$
6	6	1	6	4	3	5	3	8	5	$\Delta X_6, \Delta Z_6$
7	7	1	2	5	6	9	4	2	4	$\Delta X_7, \Delta Z_7$
8	8	1	1	3	5	6	6	1	6	$\Delta X_8, \Delta Z_8$
9	9	1	7	9	1	1	2	3	7	$\Delta X_9, \Delta Z_9$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
79	7	9	4	8	9	7	5	8	4	$\Delta X_{79}, \Delta Z_{79}$
80	8	9	7	2	8	2	9	2	6	$\Delta X_{80}, \Delta Z_{80}$
81	9	9	3	6	2	4	7	1	7	$\Delta X_{81}, \Delta Z_{81}$
极差 R	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	

### 4.4 对试验结果进行统计、评估

在对试验结果进行初步分析和异常结果进行处理后，采用式(4)、式(5)进行精度统计，得到距离中间误差  $E_d$ ，方向中间误差  $E_r$ 。

当中间误差  $E_d \leq E_{db}$  且  $E_r \leq E_{rb}$  ( $E_{db}$ ,  $E_{rb}$  为该弹种诸元解算软件精度指标)时，可认为在非标

准射击条件下该弹种弹道诸元解算软件的计算精度满足要求。当中间误差  $E_d > E_{db}$  或  $E_r > E_{rb}$  时，其精度不满足要求，可通过极差进行直观分析或采用方差分析影响精度误差的主要因素，再查找原因。