

doi: 10.7690/bgzd.2016.08.016

# 基于两步方差分析的弹道精度影响因素分析方法

向谦楠

(中船重工第七一〇研究所仿真技术研究中心, 湖北 宜昌 443003)

**摘要:** 为提高弹道精度影响因素的分析效率, 提出一种两步方差分析方法。基于弹道精度指标判定标准, 首先采用单因素方差分析方法, 找出对弹道精度有重要影响的参数, 再考虑因素间的相互作用, 采用基于正交试验的方差分析方法, 最终确定出影响弹道精度的最主要参数。结果表明: 在保证试验结果可靠性的前提下, 该方法可高效地筛选出对试验结果有显著影响的误差参数, 依据显著性因子的水平和效应确定最佳水平搭配, 可有针对性地进行试验筹划, 大大提高了仿真试验的效率, 降低了仿真验证的工作量, 同时也对试验参数的优化具有一定指导意义。

**关键词:** 方差分析; 弹道精度; 误差参数; 正交试验

**中图分类号:** TJ012 **文献标志码:** A

## Method of Influence Factors Analysis for Trajectory Accuracy Based on Two-steps Variance Analysis

Xiang Qiannan

(Simulation Technology Research Center, No. 710 Research Institute of CSIC, Yichang 443003, China)

**Abstract:** For improving the efficiency of trajectory accuracy's influencing factors analysis, the method of two-steps variance analysis was presented. Based on the judging criterion of trajectory accuracy, firstly, the important influencing factors of trajectory accuracy were found by the method of one-way ANOVA. Then, considering the interaction between each factor, the variance analysis method based on orthogonal test was used to confirm the main error parameter of trajectory accuracy. The result shows that the method could select the significant influencing factors of trajectory accuracy efficiently under the assumption of ensuring the result's dependability. According to the significant influencing factors, the optimal level collocation of factors could be confirmed in order to plan the test more efficiently. The method could also decrease the frequency of simulation test and have some guiding significance for the parameter optimization.

**Keywords:** analysis of variance; trajectory accuracy; error parameter; orthogonal test

### 0 引言

传统的弹道精度评估方法主要是对实航试验的弹道轨迹及落点进行统计评估, 需要进行大量的实航试验; 但由于实航试验的成本高, 又受到试验现场各种条件的制约, 实航试验次数极其有限, 很难满足精度评估的需求。目前主要采用仿真试验与实航试验相结合的方法, 对弹道精度进行评估。

仿真试验方法操作简单易行, 其结果的精度可以预测和控制, 特别适用于一些复杂而且用解析法难以解决或根本无法解决的问题。但由于仿真试验的参数量太大, 要逐一对每一参数的影响情况进行分析, 仍然要耗费大量的时间。

方差分析是一种实用、有效的统计检验方法<sup>[1]</sup>, 能够检验出有关因素对试验结果影响的显著性, 已广泛应用于工业技术的各个领域。笔者提出一种两步方差分析方法, 可以通过少量的仿真试验, 快速找出对试验结果有不同影响程度的参数, 大大提高弹道评估仿真工作的效率, 优化仿真试验参数。

### 1 弹道精度指标判定标准

首先建立弹道仿真模型如下:

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt} = P_x - \Delta G \cos \theta \cos \psi + R_x \\ (m + \lambda_{22}) \frac{dv_y}{dt} + (m x_c + \lambda_{26}) \frac{d\omega_z}{dt} + m v_x \omega_z = \\ P_y - \Delta G (\sin \psi \sin \phi - \sin \theta \cos \psi \cos \phi) + R_y + \Delta R_{yf} + \Delta R_{yw} ; \\ (m + \lambda_{33}) \frac{dv_z}{dt} - (m x_c - \lambda_{35}) \frac{d\omega_y}{dt} - m v_x \omega_y = \\ P_z - \Delta G (\sin \psi \cos \phi + \sin \theta \cos \psi \sin \phi) + R_z + \Delta R_{zf} + \Delta R_{zw} \\ (J_x + \lambda_{44}) \frac{d\omega_x}{dt} - m v_x (y_c \omega_y + z_c \omega_z) = Q_x + G_x + M_x + \Delta M_{xf} \\ (J_y + \lambda_{55}) \frac{d\omega_y}{dt} - (m x_c - \lambda_{35}) \frac{dv_z}{dt} + m x_c v_x \omega_z = \\ Q_y + G_y + M_y + \Delta M_{yf} + \Delta M_{yw} ; \\ (J_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega_z}{dt} + (m x_c + \lambda_{26}) \frac{dv_y}{dt} + m x_c v_x \omega_z = \\ Q_z + G_z + M_z + \Delta M_{zf} + \Delta M_{zw} \end{cases}$$

收稿日期: 2016-03-20; 修回日期: 2016-05-03

基金项目: 装备预研基金项目(9140A04030115CB40001)

作者简介: 向谦楠(1986—), 女, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事试验评估方法与仿真建模研究。

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega_y \sin \varphi + \omega_z \cos \varphi \\ \frac{d\psi}{dt} = (\omega_y \cos \varphi - \omega_z \sin \varphi) / \cos \theta \quad ; \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega_x - \omega_y \operatorname{tg} \theta \cos \varphi + \omega_z \operatorname{tg} \theta \sin \varphi \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dx_0}{dt} = v_x \cos \theta \cos \psi + v_y (\sin \psi \sin \varphi - \sin \theta \cos \psi \cos \varphi) + \\ \quad v_z (\sin \psi \cos \varphi + \sin \theta \cos \psi \sin \varphi) \\ \frac{dy_0}{dt} = v_x \sin \theta + v_y \cos \theta \cos \varphi - v_z \cos \theta \sin \varphi \quad ; \\ \frac{dz_0}{dt} = -v_x \cos \theta \sin \psi + v_y (\cos \psi \sin \varphi + \sin \theta \sin \psi \cos \varphi) + \\ \quad v_z (\cos \psi \cos \varphi - \sin \theta \sin \psi \sin \varphi) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \alpha = -\operatorname{arc} \cot(v_y / v_x) \\ \beta = \operatorname{arc} \cot(v_z / \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2})^\circ \end{cases}$$

式中： $m$  为弹体质量； $\lambda_y$  为附加质量； $t$  为时间； $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$  为弹体角速度在  $Ox$ 、 $Oy$ 、 $Oz$  轴的分量； $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$  为流体动力在  $Ox$ 、 $Oy$ 、 $Oz$  轴的分量； $\Delta G = G - B$ ， $B$  为浮力； $J_x$ 、 $J_y$ 、 $J_z$  为转动惯量； $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  为流体动力矩在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的分量。

$$R_x = C_1 C_x v^2, \quad R_y = C_1 (C_y^\alpha \alpha + C_y^{\delta_e} \delta_e) v^2 + C_2 C_y^{\sigma_y} v \omega_z,$$

$$R_z = C_1 (C_z^\beta \beta + C_z^{\delta_r} \delta_r) v^2 + C_2 C_z^{\sigma_z} v \omega_x.$$

其中： $C_x$  为阻力系数； $C_y^\alpha$  为升力系数对攻角  $\alpha$  的导数； $C_y^{\delta_e}$  为升力系数对横舵位移  $\delta_e$  的导数； $C_z^\beta$  为侧力系数对侧滑角  $\beta$  的导数； $C_z^{\delta_r}$  为侧力系数对直舵位移  $\delta_r$  的导数； $C_y^{\sigma_y}$  为升力系数对无量纲俯仰角速度  $\overline{\omega_z}$  的导数； $\overline{\omega_z} = \omega_z L / v$ ， $C_z^{\sigma_z}$  为侧力系数对无量纲俯仰角速度  $\overline{\omega_x}$  的导数； $\overline{\omega_x} = \omega_x L / v$ ， $L$  为参考长度，取雷体长度； $C_1 = 0.5 \rho S$ ， $C_2 = 0.5 \rho S L$ ， $C_3 = 0.5 \rho S L^2$ 。

$M_x, M_y, M_z$  按下式计算：

$$M_x = C_2 (m_x^\beta \beta + m_x^{\delta_b} \delta_b) v^2 + C_3 m_x^{\sigma_x} v \omega_x;$$

$$M_y = C_2 (m_y^\beta \beta + m_y^{\delta_r} \delta_r) v^2 + C_3 m_y^{\sigma_y} v \omega_y;$$

$$M_z = C_2 (m_z^\alpha \alpha + m_z^{\delta_e} \delta_e) v^2 + C_3 m_z^{\sigma_z} v \omega_z.$$

式中： $m_x^\beta$  为横滚力矩系数对侧滑角  $\beta$  的导数； $m_x^{\delta_b}$  为横滚力矩系数对差动舵位移  $\delta_b$  的导数； $m_y^\beta$  为偏航力矩系数对侧滑角  $\beta$  的导数； $m_y^{\delta_r}$  为偏航力矩系数对直舵位移  $\delta_r$  的导数； $m_z^\alpha$  为俯仰力矩系数对攻角  $\alpha$  的导数； $m_z^{\delta_e}$  为俯仰力矩系数对横舵位移  $\delta_e$  的导数； $m_x^{\sigma_x}$  为横滚力矩系数对无量纲横滚角速度  $\overline{\omega_x}$  的导数， $\overline{\omega_x} = \omega_x L / v$ ； $m_y^{\sigma_y}$  为偏航力矩系数对无量纲偏航角速

度  $\overline{\omega_y}$  的导数， $\overline{\omega_y} = \omega_y L / v$ ； $m_z^{\sigma_z}$  为俯仰力矩系数对无量纲俯仰角速度  $\overline{\omega_z}$  的导数， $\overline{\omega_z} = \omega_z L / v$ 。

利用以上的仿真试验方法进行弹道精度影响的因子分析，要选定一个判断备选方案优劣的评价标准。通常采用弹道轨迹落点的圆概率误差 (CEP) 指标作为标准。

CEP 是指弹道落点落入以目标点 (0,0,0) 为圆心的圆域的概率为 50% 时的圆半径<sup>[2]</sup>，即

$$p\left\{(x, y, z) \in \{(x, y, z) | x^2 + y^2 + z^2 \leq \text{CEP}^2\}\right\} = 50\%.$$

$x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为弹道在 3 个方向上的轨迹数据。

根据独立正态分布假设，CEP 可由下式给出：

$$\iint_{x^2+y^2+z^2 \leq \text{CEP}^2} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right] dx dy dz = 50\%.$$

式中： $\mu_x$ 、 $\mu_y$ 、 $\mu_z$  分别为弹道在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向偏差的均值； $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  分别为弹道在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向偏差的标准差。

接下来，采用两步方差分析方法，确定哪些参数对弹道精度具有一般性影响，哪些参数具有显著性影响。

## 2 单因素方差分析

在进弹道仿真试验过程中，首先找到弹道仿真试验中的所有误差参数 (不考虑由于对称性而相等的参数)，根据历史经验及具体试验结果确定各参数的误差水平，如表 1。接下来，笔者将对这些误差参数进行两步方差分析，从而确定对弹道精度 CEP 指标有显著影响的参数。

表 1 弹道精度的误差源 %

误差参数	误差水平
质量 $m$	± 5、± 10
附加质量 $\lambda$ 包括 ( $\lambda_{11}$ 、 $\lambda_{22}$ 、 $\lambda_{26}$ 、 $\lambda_{44}$ 、 $\lambda_{55}$ )	± 5、± 10
阻力系数 $C_x$	± 10、± 20
升力系数对攻角 $\alpha$ 的导数 $C_y^\alpha$	± 10、± 20
升力系数对俯仰角速度 $\overline{\omega_z}$ 的导数 $C_y^{\sigma_z}$	± 10、± 20
俯仰力矩系数对俯仰角速度 $\overline{\omega_z}$ 的导数 $m_z^{\sigma_z}$	± 10、± 20
俯仰力矩系数对攻角 $\alpha$ 的导数 $m_z^\alpha$	± 10、± 20
侧力系数对侧滑角 $\beta$ 的导数 $C_z^\beta$	± 10、± 20
偏航力矩系数对侧滑角 $\beta$ 的导数 $m_y^\beta$	± 10、± 20
横滚力矩系数对横滚角速度 $\overline{\omega_x}$ 的导数 $m_x^{\sigma_x}$	± 10、± 20
转动惯量 $J_x$	± 10、± 20
转动惯量 $J_y$	± 10、± 20

若直接对以上 16 个误差参数的各个取值水平进行试验, 利用穷举法进行组合, 至少要进行  $2^{16}=65\ 536$  组方案的试验, 假设每组方案仿真时间为 20 s, 在不考虑每组试验间更改参数的时间的情况下, 完成所有方案的试验总共需要耗时 1 310 720 s, 约为 364 h, 这个时间显然是比较难以接受的; 因此, 需要对各误差参数进行重要性分析, 以减少误差参数分析数量, 提高仿真试验效率。

### 2.1 方差分析法原理<sup>[3]</sup>

方差分析法基本假设如下:

- 1) 同一试验条件下 (给定不同因子水平的搭配组合) 的试验结果是来自正态分布的样本;
- 2) 不同试验条件下的试验结果是相互独立的;
- 3) 不同条件下试验结果的期望值可能不同, 但方差相同。

在上述假设条件下, 所得的  $N$  个试验结果  $y_1, y_2, \dots, y_N$  是  $N$  个相互独立的正态变量, 设因素  $X$  有  $P$  个不同水平:  $X_1, X_2, \dots, X_p$ , 对每个水平  $X_j (j=1, 2, \dots, p)$  均作  $r$  次重复试验, 同一水平下  $r$  次重复试验的可能结果是同一总体的一个样本。在  $X_j$  水平下所对应的样本为:  $Y_{1j}, Y_{2j}, \dots, Y_{rj}$ , 这样共有  $p$  个容量为  $r$  的样本, 且  $p$  个样本相互独立。

设在每个水平  $X_j$  条件下, 总体  $Y_j \sim N(y_j, \sigma^2) (j=1, 2, \dots, p)$ 。其中:  $y_j$  为在因素  $X$  第  $j$  个试验水平下组内数据的理论均值;  $\sigma^2$  为整体正态分布的方差。

以上假设可用以下线性模型表示出来:

$$\begin{cases} Y_{ji} = x_j + e_{ij} \\ e_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, r; j=1, 2, \dots, p。$$

其中  $x_j$  为在各不同水平  $X_j$  下的总体均值,  $x_j$  与  $\sigma^2$  均为常数, 且各  $e_{ij}$  相互独立。这些  $e_{ij}$  是由于制造和试验中各种无法控制的变异所引起的, 通常称之为随机误差, 是一个随机变量。

当水平  $X_j$  改变并不影响总体分布时, 各不同水平  $X_1, X_2, \dots, X_p$  的总体均值  $x_1, x_2, \dots, x_p$  应该相等; 若水平  $X_j$  改变要影响总体分布时, 则  $x_1, x_2, \dots, x_p$  就不会全相等。因此, 要检验因素对试验指标有无显著影响, 就等价于假设

$$H_0: x_1 = x_2 = \dots = x_p, \quad H_1: x_1, x_2, \dots, x_p \text{ 不全相等。}$$

如果拒绝, 则  $A$  对试验指标影响显著; 否则  $A$

对试验指标影响不显著。

多因素方差分析具体步骤如下:

- 1) 计算各列的离差平方和及其自由度, 如第  $i$  列的离差平方和  $S_i^2$  及其自由度分别为:

$$S_i^2 = \sum_{j=1}^p r(\bar{T}_j - \hat{\mu})^2, \quad f_i = p-1。$$

其中:  $r$  为各水平的重复试验次数;  $i$  为正交表列号,  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $\hat{\mu}$  为总体均值的估计;  $\bar{T}_i$  为第  $i$  个因子在水平  $j (j=1, 2, \dots, p)$  的试验结果的平均;  $f_i$  为相应列的自由度。

- 2) 假设共有  $k$  个影响因子,  $N=k \cdot p$ , 计算总平方和为

$$S_T^2 = \sum_{h=1}^N r(y_h - \hat{\mu})^2。$$

式中  $y_h$  为各因子在各水平下的试验结果均值。

- 3) 确定误差平方和。误差平方和由诸空白列的平方和与若干相对小的列平方和组成, 记为  $S_{e_i}^2$ , 其自由度为相应列的自由度之和, 记为  $f_{e_i}$ 。

- 4) 方差分析。计算  $F$  比, 在给定的检验水平  $\alpha$  下, 确定拒绝域。其中  $F$  比和拒绝域分别为:

$$F_i = \frac{S_i^2/f_i}{S_{e_i}^2/f_{e_i}}, \quad \text{表示第 } i \text{ 个因子的 } F \text{ 比。}$$

$$W = \{F_i > F_{1-\alpha}(f_i, f_{e_i})\}, \quad F_{1-\alpha}(f_i, f_{e_i}) \text{ 为 } F \text{ 分布 } F(f_i, f_{e_i}) \text{ 的 } 1-\alpha \text{ 分位数。}$$

上述拒绝域说明, 若  $F_i \in W$ , 则表明因子  $i$  不同水平的变化对试验结果 (指标值) 有显著影响; 否则表明因子  $i$  的变化对指标值无显著影响。并且  $F_i$  越大, 说明该因子的显著性越强。

### 2.2 实例分析

在不考虑各参数相互影响的情况下, 运用以上方差分析原理, 对表 1 所列误差参数进行第 1 步的单因素方差分析, 依次分析各参数对弹道精度试验结果的影响水平, 得到的方差分析结果见表 2。

由于  $F$  的临界值为 5.3177, 则由以上单因素方差分析结果可知, 对弹道精度有显著影响的参数共有 6 个, 分别为  $m_{z_2}^{\sigma^2}$ 、 $m$ 、 $C_x$ 、 $C_y^{\sigma^2}$ 、 $m_x^{\sigma^2}$ 、 $\lambda_{55}$ , 以下分别简记为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ 。

经过第 1 步的单因素方差分析, 将弹道精度影响参数由 16 个减少到 6 个, 说明在既定显著性水平下, 这 6 个参数是对试验结果有影响的。单因素方差分析的前提是这些参数都是相互独立的, 并且没

有考虑参数之间的交互影响作用。但实际上，很多参数之间都是存在交互作用的；因此，接下来采用正交试验方案，考虑这 6 个参数之间的 5 个交互作用，进行第 2 步方差分析。

表 2 单因素方差分析结果

参数	组差异类别	组差异	F	P
m	组间	22.500	10.008 9	0.013 30
	组内	17.984		
C <sub>x</sub>	组间	10.816	6.747 3	0.031 70
	组内	12.824		
C <sub>y</sub> <sup>α</sup>	组间	3.844	4.850 5	0.058 80
	组内	6.340		
C <sub>y</sub> <sup>σ<sub>z</sub></sup>	组间	17.161	34.494 5	0.000 37
	组内	3.980		
m <sub>z</sub> <sup>σ<sub>z</sub></sup>	组间	33.489	45.133 4	0.000 15
	组内	5.936		
m <sub>z</sub> <sup>α</sup>	组间	0.729	0.368 7	0.560 60
	组内	15.820		
C <sub>z</sub> <sup>β</sup>	组间	4.624	4.601 0	0.064 30
	组内	8.040		
m <sub>y</sub> <sup>β</sup>	组间	0.529	0.485 3	0.505 80
	组内	8.720		
m <sub>x</sub> <sup>σ<sub>x</sub></sup>	组间	3.600	11.501 6	0.009 50
	组内	2.504		
J <sub>x</sub>	组间	1.089	0.657 2	0.441 00
	组内	13.256		
J <sub>y</sub>	组间	1.296	1.990 8	0.195 90
	组内	5.208		
λ <sub>11</sub>	组间	2.809	1.964 3	0.198 60
	组内	11.440		
λ <sub>22</sub>	组间	0.814	0.230 3	0.644 10
	组内	29.208		
λ <sub>26</sub>	组间	2.809	4.341 6	0.070 70
	组内	5.176		
λ <sub>44</sub>	组间	9.409	4.716 3	0.061 70
	组内	15.960		
λ <sub>55</sub>	组间	32.761	30.675 0	0.000 55
	组内	8.544		

### 3 基于正交试验的方差分析

正交试验设计<sup>[4]</sup>是试验设计中最重要的方法之一，能用少量的试验提取出丰富的信息。正交试验设计是利用“正交表”进行科学地安排与分析多因素试验的方法，是一种高效、快速、灵活的多因素、单效应变量试验方法。其主要优点是能在很多试验方案中挑选出代表性强的少数几个试验方案，并且通过这些少数试验方案的试验结果分析，推断出最优方案，同时还可以作进一步分析，得到比试验结果本身给出的还要多的有关各因素的信息。同常规方法相比，可大大减少试验次数和设计分析的繁杂，所获取的因素水平组合亦能达到较佳水平；因此，已被广泛应用。

由于弹道精度评估中的误差参数之间很多都存在一些相互关联的因素，他们之间并不是完全独立的，通常都有交互作用的存在，接下来第 2 步，利用有交互作用的正交试验方案，考虑这 6 个因素之

间的 5 个交互作用，对这 6 个影响因素作第 2 步方差分析，以确定最具有显著性的影响因子及因子的交互作用组合。

六因素 5 个交互作用的试验方案<sup>[5]</sup>如表 3 所示。

表 3 六因素 5 个交互作用试验方案

因子	试验号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A	1	1	1	1	1	1	1	1
B	1	1	1	1	2	2	2	2
C	1	1	2	2	1	1	2	2
BC	1	1	1	1	2	2	2	2
	1	1	2	2	1	1	2	2
D	1	1	2	2	2	2	1	1
	1	1	2	2	2	2	1	1
E	1	2	1	2	1	2	1	2
CE	1	2	1	2	1	2	1	2
BE	1	2	1	2	2	1	2	1
	1	2	1	2	2	1	2	1
F	1	2	2	1	1	2	2	1
AF	1	2	2	1	2	1	1	2
DF	1	2	2	1	2	1	1	2

  

因子	试验号							
	9	10	11	12	13	14	15	16
A	2	2	2	2	2	2	2	2
B	1	1	1	1	2	2	2	2
C	1	1	2	2	1	1	2	2
BC	2	2	2	2	1	1	1	1
	2	2	1	1	2	2	1	1
D	1	1	2	2	2	2	1	1
	2	2	1	1	1	1	2	2
E	1	2	1	2	1	2	1	2
CE	2	1	2	1	2	1	2	1
BE	1	2	1	2	2	1	2	1
	2	1	2	1	1	2	1	2
F	1	2	2	1	1	2	2	1
	2	1	1	2	2	1	1	2
AF	1	2	2	1	2	1	1	2
DF	2	1	1	2	1	2	2	1

按照表 3 的试验方案依次进行 16 组试验，为了确保试验结果的准确性，每组试验均进行 100 次仿真并取平均值，得到试验结果见表 4。

表 4 正交试验结果

试验号	试验结果	试验号	试验结果
1	19.9	9	24.9
2	22.1	10	31.8
3	31.2	11	22.8
4	26.8	12	23.2
5	20.5	13	27.4
6	21.7	14	25.9
7	33.3	15	23.0
8	34.7	16	25.5

基于 2.1 节所列的方差分析法，可得到基于正交试验的方差分析结果见表 5。

对于显著性水平  $\alpha=0.05$ ，F 临界值为 5.317 7，可见因子 C、D 对于试验结果的影响是显著的，而因子 A、B、E、F 及各交互作用对于试验结果的影响是不显著的。

根据上述仿真结果，采用两步方差分析方法对影响弹道精度的误差因素进行取舍后，从 16 个误差参数中筛选出 6 个次主要影响因素，同时进一步考

考虑误差因素的相互作用，最终确定出 2 个影响弹道精度的最主要参数，有利于指导仿真试验参数的优化，节省参数分析的工作量，提高仿真试验的工作效率<sup>[6]</sup>。笔者提出的将方差分析结合精度分配方法，可以应用于工程实践中，尤其对误差源较多的精度评估有着更加重要的价值。

表 5 基于正交试验的方差分析结果

因子	结果		
	$S^2$	$f$	$F$ 比
A	2.030 6	1	0.456 1
B	5.405 6	1	1.214 3
C	43.230 6	1	9.711 4
BC	7.700 6	1	1.729 8
	205.205 0	1	46.097 8
D	15.405 6	1	3.460 7
	0.950 6	1	0.213 5
E	4.730 6	1	1.062 7
CE	3.900 6	1	0.876 2
BE	0.140 6	1	0.031 5
	7.700 6	1	1.729 8
F	4.950 6	1	1.112 1
	0.950 6	1	0.213 5
AF	18.705 6	1	4.202 0
DF	0.855 6	1	0.192 2

### 4 结束语

笔者提出运用两步方差分析法评估弹道精度影

\*\*\*\*\*

(上接第 49 页)

以毁伤目标价值最大与导弹消耗量的比值为效能指标时，最优解为

$$\begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2 & 6 & 0 \end{bmatrix}。$$

此时，对各目标的毁伤概率分别为： $p=[0.508 9, 0.511 1, 0.505 6]$ 。

毁伤期望数为 1.519 4，导弹消耗量为 23。

从对各目标的毁伤概率来看，对目标的毁伤价值或毁伤概率越小，单枚导弹的效费比越高；所以，以此指标为主目标函数时，为确保对目标的毁伤，应提高毁伤下限。

### 3 结论

多种型号反舰导弹突击异型舰艇编队火力分配多目标规划模型是一非线性整数规划模型，可解决多种约束条件下多目标函数的整数优化问题。从求解结果看，该模型能够解决火力分配涉及的各种约束、各种目标函数的优化问题，具有很好的灵活性与实用性。

针对非线性整数规划模型的特点，为避免陷入局部最优解，提高计算效率，在模型求解时，采用 Monte Carlo 随机初值、约束筛选和智能算法相结合

响因素，大大减少了仿真试验的工作量，使仿真试验方法应用于多误差因素、多误差水平的精度评估工作中成为可能。与传统方法相比，该方法大大提高了确定精度评估影响因素的效率，为试验参数的优化提供了一个指导方向。同时，还可以依据方差分析法，确定出显著性因子的水平和效应及最佳水平搭配，为下一阶段的试验验证及试验筹划提供可行方案。

### 参考文献:

- [1] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 39-60.
- [2] 刘新爱, 张磊, 王素平. 导弹命中精度仿真试验及评估方法研究[J]. 战术导弹技术, 2009(5): 79-83.
- [3] 李学远. 基于方差分析的故障测距算法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007: 25-30.
- [4] 蔡兵. 基于正交试验设计的快速换模研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010: 8-10.
- [5] 武小悦, 刘琦. 装备试验与评价[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 368-381.
- [6] 靳青梅, 张相炎, 崔二巍. 火炮新型动力后坐试验方法[J]. 兵工自动化, 2015, 34(5): 7-10.

的方法，基本保证了全局最优解的可靠性，且具有较好的计算效率。但由于算例规模较小，还不足以充分说明算法的优越性。

### 参考文献:

- [1] 王庆业, 王平, 林茜, 等. 舰艇编队 CEC 系统对抗策略研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(1): 40-42.
- [2] 邢昌凤, 李敏勇, 吴玲. 舰载武器系统效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 239-269.
- [3] 谭安胜. 水面舰艇编队作战运筹分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 174-182.
- [4] 胡正东, 丁洪波, 张士峰. 反舰导弹武器系统的火力分配方法研究[J]. 战术导弹技术, 2008, 29(4): 1-3.
- [5] 刘晓, 刘忠, 侯文妹, 等. 火力分配多目标规划模型的改进 MOPSO 算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(2): 326-329.
- [6] 杨娟, 池建军, 闵华侨. 基于多目标规划的导弹作战火力分配模型[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(11): 107-109.
- [7] 陈建虎, 吕志明. 武器-目标分配的模糊多目标规划[J]. 兵工自动化, 2007, 26(6): 3-4.
- [8] 刘晓雷, 孟婷婷, 裴文俊. 某型反坦克导弹多目标火力分配优化模型[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(增刊): 74-76.
- [9] 李平, 李长文. 武器目标协同火力分配建模及算法[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(2): 36-40.
- [10] 王玮, 董天忠, 张玉芝. CEC 条件下舰艇编队目标武器分配研究[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(10): 51-55.