

基于正交设计和多元回归的装备作战效能分析预测

杜占龙

(中国人民解放军 32200 部队, 辽宁 锦州 121000)

摘要: 为了利用较少的试验次数摸清装备作战效能, 提出了一种融合正交设计、方差分析和多元回归的分析预测方法; 采用正交设计方法筛选与作战效能相关的战场条件因子组合, 通过方差分析方法推导影响因子的显著性计算公式, 基于多元回归构建带置信区间的作战效能预测模型; 以某型无人机侦察任务完成率为例, 说明了计算分析过程, 结果表明, 将原来遍历需要 32 次的试验压缩至仅需 8 次试验, 即可以准确识别主要战场条件因子, 任务完成率的预测误差均值仅为 0.025 9, 区间预测准确率 91.67%, 满足了小样本情况下分析评估装备作战效能的需求。

关键词: 试验设计, 因子筛选, 分析评估, 作战试验, 效能底数

Analysis and Prediction of Equipment Operational Effectiveness Based on Orthogonal Design and Multivariate Regression

DU Zhanlong

(Unit 32200 of PLA, Jinzhou 121000, China)

Abstract: To evaluate the operational effectiveness of equipment by using a few tests, combined with orthogonal design, variance analysis and multivariate regression, an analysis and prediction method is proposed, which employs an orthogonal design to select the combination of battlefield condition factors associated with operational effectiveness, using a variance analysis to derive the significance formula of factors. An operational effectiveness prediction model with confidence interval based on multivariate regression is proposed. Taking the completion rate of a certain UAV reconnaissance task as an example, it is possible to present the calculation and analysis process. The results show that, the original 32 tests only require 8 tests, accurately identifying main battlefield condition factors, the predicted error of task completion rate is only 0.025 9, with the prediction interval accuracy of 91.67%, meeting the analysis and evaluation requirements of operational effectiveness for small samples.

Keywords: test design; factor selection; analytical evaluation; operational test; effectiveness thresholds

0 引言

作战试验作为装备全寿命试验周期的关键环节, 主要检验装备在近似实战环境条件下的作战效能^[1-6]。影响装备作战效能的战场条件多样, 受试验周期、试验资源、试验安全等限制, 难以遍历所有战场条件来获取装备作战效能。通常需要运用数理统计方法^[7-8], 控制条件变化数量, 用尽可能少的试验次数实现全面的作战效能分析评估。文献 [9] 采用均匀设计筛选影响某型加榴炮弹药消耗试验的因子水平, 压缩试验样本数量。文献 [10] 使用正交设计选取影响指标的因素水平组合,

用于在役考核定性指标和定量指标验证。文献 [11] 采用正交设计选取对作战效能影响明显的因素, 进行试验场景设计, 并对某型雷达对抗装备进行试验验证。文献 [12] 对均匀设计和正交设计进行了对比分析, 结果表明, 均匀设计可以压缩更多的试验次数^[13-15], 但正交设计的整齐可比特点, 使得正交设计在数据分析上占有一定优势。

现有研究较多关注如何使用正交设计等方法精简试验条件, 较少关注在降低试验次数的同时, 如何实现与遍历战场条件相同的试验目的, 即在全部战场条

收稿日期:2025-07-29; 修回日期:2025-09-08。

作者简介:杜占龙(1986-),男,博士,副研究员。

引用格式:杜占龙. 基于正交设计和多元回归的装备作战效能分析预测[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(7):140-146.

件因子及水平组合范围内，分析影响作战效能的主要因子，并且可以预测未试验的战场条件对应的作战效能。为此，区别于现有文献研究内容，本文重点开展以下研究：①在作战试验次数受限情况下，提出基于有限试验样本全面分析装备作战效能的方法，利用典型试验数据外推主要影响因子、预测作战效能；②梳理基于方差分析的条件因子影响程度的定量计算方法，明确因子显著性水平的判决门限；③针对已知试验样本少的特点，建立基于多元回归的效能预测模型，提出定性战场条件因子的虚拟变量表示方法，以及包含置信区间的效能预测方法，相较于点估计，区间预测使得预测结果更具参考性。

1 总体思路

不同战场条件会影响装备作战效能评估结果，假设战场条件因子数量为 c 个，每个因子包含 b 个水平，则全部的水平组合为 $N=b^c$ 。显然，如果采用遍历的方法，试验次数随着战场条件因子及对应水平数量增多而急剧增长，对于实装试验获取数据的情况，受试验周期、试验资源等限制，难以满足遍历方法对试验次数的需求。

为此，需要从 N 个水平组合中选取具有代表性的试验点，在降低试验次数的前提下，实现遍历因子水平情况下的分析评估，主要通过 3 个环节解决该问题：①基于正交设计筛选因子水平组合。正交设计选择的因子水平组合具有均匀分散、整齐可比特点^[15]，使用正交表安排试验，试验点均衡、试验次数较少；保证覆盖主要因子的不同水平组合；且每个因子水平重复次数相同，可消除部分试验误差的干扰；因试验点具有正交性，易于后续分析各因子的主效应。②基于方差分析计算不同因子水平影响程度。正交设计获取的试验结果可开展方差分析，定量计算试验因子水平的显著性，找出影响程度大的因子水平；③基于多元回归预测未试验的因子水平对应的作战效能。多元回归分析作为一种常用的统计方法^[16,17]，利用部分因子水平组合和对应的已获取的作战效能，建立预测模型，然后将其他因子水平代入预测模型，实现作战效能预测。设计实施流程如图 1 所示。

- 1) 确定战场条件因子及对应水平。根据需要获取的作战效能，分析可能影响作战效能的战场条件因子，选取影响因子种类和数量、各因子对应的水平数量和取值；
- 2) 正交设计因子水平组合。精简各因子水平后，形成试验因子水平表，采用正交设计方法，根据因子数量、水平数量选择合适的正交设计表，排列各因子及对应水平的组合方式；

- 3) 分析因子水平影响程度。按照设计的试验因子水平组合方式，通过试验获取对应的作战效能，采用方差分析方法，计算各因子水平的显著性，分析不同因子对作战效能的影响程度，找出主要影响因子。
- 4) 预测各因子水平对应的作战效能。采用多元回归分析，将各因子水平作为自变量，作战效能作为因变量，结合试验获取的数据，经过模型参数估计、参数假设检验等，建立预测模型。将未试验的因子水平代入预测模型，推断任意因子、任意水平搭配条件下的作战效能。

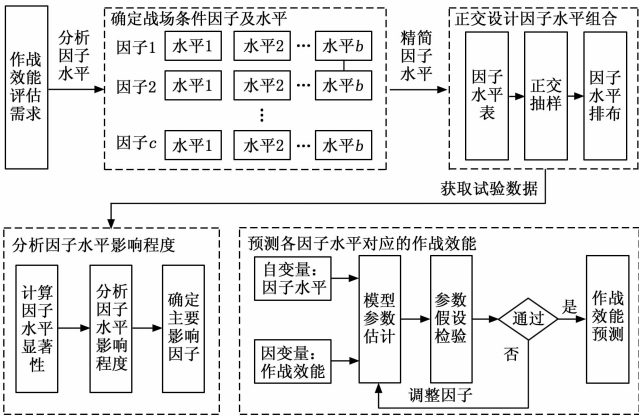


图 1 战场条件因子选取及作战效能分析预测流程

2 分析预测方法

2.1 基于正交设计的试验条件筛选

正交设计基于概率论和数理统计构造不同的正交表，根据因子和水平选择合适的正交表，继而安排不同的因子水平组合。基本思想是选择具有均匀分散和整齐可比特性的典型样本组合，以较少的试验次数达到全面试验的效果。均匀分散性是因为正交表中任意两列对应的不同水平组合次数相等，这使得每个因子的搭配水平均等，保证了试验样本能够很好地代表整个样本空间，减少样本偏差对试验结果的影响。整齐可比性是因为正交表中任意两列对应的每个水平组合次数相等，以及每列不同水平的次数相等，这使得每个因子对应的不同水平数量是一致的，保证对特定因子进行分析时，可以抵消其他因子的影响。由于正交设计选择的各因子水平组合能反映全面试验情况，使用这些因子水平获取的实际试验结果建立的多元回归分析模型，可以保证作战效能分析评估的准确性。

为排列各因子及对应水平的组合方式，采用正交设计确定战场条件因子及水平^[18]，具体步骤如下。

- 1) 确定因子及对应水平：

为获取作战效能，假设对其有影响的战场条件因子数量为 c ，每个因子包含的水平数量为 b ，列出因素水平表，如表 1 所示。

表 1 因子水平表示例

水平	战场条件因子			
	因子 1	因子 2	...	因子 c
水平 1	高	强	...	10
水平 2	中	中	...	20
...	...	...	...	...
水平 b	低	弱	...	30

2) 选择正交表:

正交设计表用代号 $L_n(q^s)$ 表示, L 为正交设计标志符号, n 表示试验次数, q 表示每个因子包含的水平数量, s 是最多可安排的因子数量, 如 $L_8(2^7)$ 表示需要安排 8 次试验, 最多可以安排 7 个因子, 每个因子安排 2 个水平。选用的正交表应能容得下所有试验因子及水平, 即 $b \leq q, c \leq s$, 且保证选择的正交表中试验次数 n 最小。

3) 确定试验方案:

将各因子及水平代入选定的正交表中, 得到试验方案, 如表 2 所示。

表 2 试验方案及结果示例

试验号	因子				作战效能 结果
	因子 1	因子 2	...	因子 c	
1	1(高)	1(强)	...	1(10)	y_1
2	1(高)	2(中)	...	2(20)	
...	...	...	...	...	...
n	3(低)	3(弱)	...	1(10)	y_n

2.2 基于方差分析的因子影响评估

为分析不同因子对作战效能的影响程度, 对于选用正交表 $L_n(q^s)$ 得到的试验结果, 如表 2 所示, 使用方差分析计算影响程度, 具体步骤如下。

2.2.1 计算偏差平方和

1) 各因子偏差平方和 S_A :

$$S_A = S_{j=d_A} \tag{1}$$

$$S_j = \frac{n}{q} \sum_{k=1}^q (\bar{y}_{jk} - \bar{y})^2 = \frac{q}{n} \sum_{k=1}^q y_{jk}^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2 \tag{2}$$

且有:

$$S_T = \sum_{j=1}^c S_j = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2 \tag{3}$$

式中, 假设因子 A 对应正交表第 d_A 列, 则 $j = d_A$, 代入式 (2) 计算因子 A 的偏差平方和 S_A 。 S_j 为正交表第 j 列因子的偏差平方和, y_{jk} 为正交表第 j 列因子上水平为 k 时, 对应的试验结果之和, $\bar{y}_{jk} = y_{jk}/m$, m 为正交表第 j 列各水平出现的次数。 y_i 表示第 i 次试验对应的结果, n 为试验次数, $\bar{y}$ 为 y_i 的平均值。 q 为水平数量, c 为实际的因子数量, 即正交表中因子占用的列数。

2) 试验误差的偏差平方和 S_e :

$$S_e = \sum_{j=d_{g1}, d_{g2}, \dots} S_j \tag{4}$$

对于正交表中未被因子选中的所有空列, 第 i 个空列 d_{gi} 的偏差平方和按式 (2) 计算, S_e 为所有空列的偏差平方和的总和。

2.2.2 计算自由度

总平方和的自由度 df_T 为试验总次数 n 减去 1, 即:

$$df_T = n - 1 \tag{5}$$

任一系列 j 的偏差平方和的自由度 df_j 为因子水平数 q 减去 1, 即:

$$df_j = q - 1 \tag{6}$$

且有:

$$df_T = \sum_{j=1}^n df_j \tag{7}$$

$$df_A = df_{j=d_A} \tag{8}$$

$$df_e = \sum_{j=d_{g1}, d_{g2}, \dots} df_j \tag{9}$$

式中, df_A 为 A 因子自由度, d_A 为 A 因子对应的正交表列号, df_e 为误差的自由度, d_{gi} 为正交表第 i 个空列对应的列号。

2.2.3 显著性检验

采用 F 检验法检验各因子的显著性。

1) 各因子 F 值:

$$F_A = \frac{MS_A}{MS_e} = \frac{S_A/df_A}{S_e/df_e} \tag{10}$$

式中, S_A 和 S_e 分别按式 (1) 和 (4) 计算, df_A 和 df_e 分别按式 (8) 和 (9) 计算。需要注意的是, 若因子 A 的 MS_A 小于等于误差的 MS_e , 则应将其归入误差, 构成新的误差, 重新计算其他因子 F 值。

2) 查找临界值 F_α :

从 F 分布表中, 查出临界值 $F_\alpha(df_A, df_e)$, α 为显著性水平。

3) 判断显著性:

若 $F_A > F_\alpha(df_A, df_e)$, 则因子 A 对试验结果在 α 水平上有显著影响, 若 $F_A \leq F_\alpha(df_A, df_e)$, 则因子 A 对试验结果在 α 水平上无显著影响。通常情况下, 若 $F_A > F_{0.01}$, 说明因子 A 影响高度显著; 若 $F_{0.01} \geq F_A > F_{0.05}$, 说明因子 A 影响显著; 若 $F_{0.05} \geq F_A > F_{0.1}$, 说明因子 A 有影响; 若 $F_{0.1} \geq F_A > F_{0.2}$, 说明因子 A 有一定影响; 若 $F_{0.2} \geq F_A$, 说明因子 A 无影响。

2.2.4 各因子影响程度排序

第 (3) 步判断各因子影响的显著性后, 将各因子 A 、 B 、 C ... 的 F 值 F_A 、 F_B 、 F_C ... 进行降序排列, 排列顺序为各因子对作战效能的影响程度排序, F 值越大, 影响程度越大。

2.3 基于多元回归的作战效能预测

为了利用正交设计获取的少量因子及对应水平的效能底数, 外推其他因子及对应水平的效能底数, 可以采

用多元回归模型来进行预测。假设正交设计后，获取 n 组试验数据 $\chi_k = (x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{ck}; y_k)$, $k=1, 2, \dots, n$, x_{ik} 为第 k 组试验中第 i 个因子设置的水平值, y_k 为第 k 组试验获取的作战效能值, 且作战效能 y 与战场条件因子 $x_1, x_2, \dots, x_c$ 的关系可表示为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_c x_c \tag{11}$$

当战场条件因子 A 为定量值时，直接将其设置为 x_A 代入式 (11)。当战场条件因子 A 为定性水平值，如对抗强度“大”“小”等，如果因子 A 有 q 个水平值，在进行多元回归分析时，可以设置 $q-1$ 个虚拟变量。如因子 A 有 3 个水平 $A_1、A_2、A_3$ ，则设置 2 个虚拟变量 x_{A1} 和 x_{A2} ，则 $y = \beta_0 + \beta_{A1} x_{A1} + \beta_{A2} x_{A2}$ ，当 $A=A_1$ 时， $x_{A1}=1, x_{A2}=0$ ；当 $A=A_2$ 时， $x_{A1}=0, x_{A2}=1$ ；当 $A=A_3$ 时， $x_{A1}=0, x_{A2}=0$ 。预测模型建立的具体步骤如下。

2.3.1 求预测模型参数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_c$

为利用 n 组试验数据 χ_k 估计参数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_c$ ，可以采用最小二乘法，使得偏差平方和最小，即使得：

$$Q(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_c) = \sum_{k=1}^n (y_k - y)^2 = \sum_{k=1}^n [y_k - (\beta_0 + \beta_1 x_{1k} + \beta_2 x_{2k} + \dots + \beta_c x_{ck})]^2 \tag{12}$$

最小。
令：

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_i} = 0, i = 0, 1, \dots, c \tag{13}$$

则可得如下矩阵形式的正规方程：

$$\begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1c} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2c} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{c1} & l_{c2} & \dots & l_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{1y} \\ l_{2y} \\ \dots \\ l_{cy} \end{bmatrix} \tag{14}$$

式中，

$$l_{ij} = l_{ji} = \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j) = \sum_{k=1}^n x_{ik} x_{jk} - \frac{1}{n} (\sum_{k=1}^n x_{ik}) (\sum_{k=1}^n x_{jk}) \tag{15}$$

$$l_{iy} = \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(y_k - \bar{y}) = \sum_{k=1}^n x_{ik} y_k - \frac{1}{n} (\sum_{k=1}^n x_{ik}) (\sum_{k=1}^n y_k) \tag{16}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k \tag{17}$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik} \tag{18}$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x}_1 - \beta_2 \bar{x}_2 - \dots - \beta_c \bar{x}_c \tag{19}$$

求解式 (14)，可得使 $Q(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_c)$ 达到最小的参数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_c$, β_0 为常数项，其余为回归系数。

2.3.2 显著性检验

利用 F 检验，检验 y 与 c 个自变量 $x_1, x_2, \dots, x_c$ 的整体线性关系是否显著；利用 t 检验，检验单个自变量 x_i 对 y 的影响是否显著。

1) F 检验：

$$F = \frac{MS_R}{MS_e} = \frac{SS_R/c}{SS_e/(n-c-1)} \tag{20}$$

式中，

$$SS_R = \sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - \bar{y})^2 = \beta_1 l_{1y} + \beta_2 l_{2y} + \dots + \beta_c l_{cy} \tag{21}$$

$$SS_e = \sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2 = \sum_{k=1}^n y_k^2 - n\bar{y}^2 - SS_R \tag{22}$$

n 为试验组数， c 为自变量个数。

对于给定的显著性水平 α ，查 F 分布表，如果 $F > F_\alpha(c, n-c-1)$ ，则说明 $x_1, x_2, \dots, x_c$ 与 y 线性关系显著，否则不显著，通常若 $F < F_{0.1}(c, n-c-1)$ ，则线性关系不显著。

2) t 检验：

第 i 个自变量的 t 值按下式计算：

$$|t_i| = \frac{|\beta_i|}{\sqrt{MS_e/l_{ii}}} = \frac{|\beta_i|}{\sqrt{SS_e/l_{ii}(n-c-1)}} \tag{23}$$

对于给定的显著性水平 α ，查单侧 t 分布表，如果 $|t_i| > t_{\alpha/2}(n-c-1)$ ，则说明 x_i 对 y 影响显著，否则影响不显著。

2.3.3 计算预测置信区间

假设作战效能 y 的预测值为 $\hat{y}$ ，则 $\hat{y}$ 置信度为 $(1-\alpha) \times 100\%$ 的置信区间为：

$$\hat{y} \pm t_{\alpha/2}(n-c-1) = \sqrt{\frac{SS_e}{n-c-1}} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c c_{ij}(x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)} \tag{24}$$

式中， SS_e 按式 (22) 计算， Z 为式 (13) 左侧矩阵的逆矩阵， z_{ij} 为矩阵 Z 的元素：

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1c} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2c} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{c1} & z_{c2} & \dots & z_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1c} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2c} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{c1} & l_{c2} & \dots & l_{cc} \end{bmatrix}^{-1} \tag{25}$$

3 应用算例

以获取不同战场条件下某型无人机侦察任务完成率为例，利用仿真系统生成试验数据，说明战场条件因子选取和作战效能分析预测过程。

3.1 因子水平筛选结果

考虑不同对抗条件下无人机执行侦察任务，需要在保证己方生存前提下尽可能发现蓝方目标。影响我方无

人机生存的因素主要包括蓝方防空威胁,影响侦察效果的因素主要包括昼夜、蓝方是否有伪装、侦察时间和侦察距离。对于因子水平数量,随着数值增大,正交设计试验总次数增加较为明显,考虑实装试验资源消耗等限制因素,通常因子水平数量选择较小数值。同时昼夜情况、蓝方威胁、蓝方防空均为“是”“否”两个水平,所以因子水平数量确定为 2 个。因此,设置影响无人机完成侦察任务的战场条件因子包括昼夜情况 x_A 、蓝方伪装 x_B 、蓝方防空 x_C 、侦察时间 x_D 、侦察距离 x_E 等 5 个,每个因子采用 2 个水平进行描述,各因子水平如表 3 所示,可以看出, x_A 、 x_B 和 x_C 为定性水平值, x_D 和 x_E 为定量水平值。为满足 5 因子 2 水平正交设计需求,选择试验次数最少的正交表 $L_8(2^7)$,如表 4 所示。选择正交表中的前 5 列,分别安排 5 个因子及对应的水平,得到试验方案。

表 3 因子水平表

水平	战场条件因子				
	昼夜情况	蓝方伪装	蓝方防空	侦察时间/min	侦察距离/km
1	夜	有	有	30	30
2	昼	无	无	60	10

表 4 $L_8(2^7)$ 正交表设计

试验号	列号						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

表 5 试验结果及方差分析

试验号	战场条件因子							任务完成率 y_i
	昼夜情况 A	蓝方伪装 B	蓝方防空 C	侦察时间 D	侦察距离 E	无因子 F	无因子 G	
1	1(夜)	1(有)	1(有)	1(30 min)	1(30 km)	1	1	0.077 7
2	1(夜)	1(有)	1(有)	2(60 min)	2(10 km)	2	2	0.069 3
3	1(夜)	2(无)	2(无)	1(30 min)	1(30 km)	2	2	0.358 1
4	1(夜)	2(无)	2(无)	2(60 min)	2(10 km)	1	1	0.320 1
5	2(昼)	1(有)	2(无)	1(30 min)	2(10 km)	1	2	0.346 3
6	2(昼)	1(有)	2(无)	2(60 min)	1(30 km)	2	1	0.250 8
7	2(昼)	2(无)	1(有)	1(30 min)	2(10 km)	2	1	0.153 5
8	2(昼)	2(无)	1(有)	2(60 min)	1(30 km)	1	2	0.111 9
$\bar{y}_{j1}$	0.206 3	0.186 0	0.103 1	0.233 9	0.199 6	0.214 0	0.200 5	$F_{0.01}(1,3)=34.12$; $F_{0.05}(1,3)=10.13$; $F_{0.1}(1,3)=5.54$; $F_{0.2}(1,3)=2.7$
$\bar{y}_{j2}$	0.215 6	0.235 9	0.318 8	0.188 0	0.222 3	0.207 9	0.221 4	
S_j	0.000 2	0.005 0	0.093 1	0.004 2	0.001 0	0.000 1	0.000 9	
df_j	1	1	1	1	1	1	1	
F_j	—	13.334 9	249.473 1	11.281 7	2.756 2	—	—	

3.2 因子影响分析结果

根据指定试验方案进行试验,获取的任务完成率如表 5 所示,对于因子 A、B、C、D、E 和空列 F、G,分别计算水平 1 和水平 2 对应的任务完成率的平均值 $\bar{y}_{j1}$ 和 $\bar{y}_{j2}$ 。根据式 (2) 分别计算因子 A 至 E 列、无因子 F 和 G 列的偏差平方和 S_j ,如 $S_1=2/8 \times [(0.0777+0.0693+0.3581+0.3201)^2+(0.3463+0.2508+0.1535+0.1119)^2]-1/8 \times (0.0777+0.0693+0.3581+0.3201+0.3463+0.2508+0.1535+0.1119) \approx 0.0002$ 。同理,将 F 和 G 列的 S_j 代入式 (4),计算误差的偏差平方和 S_e ,根据式 (8) 和 (9) 分别计算因子 A 至 E 的自由度为 1、误差的自由度为 2,计算结果如表 7 所示。由表 7 可知,因子 A 的 $MS_A=S_A/df_A=0.0002$,误差的 $MS_e=(S_F+S_G)/(df_F+df_G)=0.0005$,因为 $MS_A<MS_e$,将 S_A 归入误差,重新计算误差的偏差平方和 $MS'_e=(S_A+S_F+S_G)/(df_A+df_F+df_G)=0.0004$,以及误差自由度 $df'_e=df_A+df_F+df_G=3$ 。因子 A 被视为误差项,不需计算 F 值,将 B 至 E 列的 S_j 和 df_j 代入式 (10),计算 F 检验值 F_j ,根据 F 值大小,各因子对任务完成率的影响排序为 C、B、D、E、A,且 $F_C>F_{0.01}(1,3)$,影响高度显著; $F_B>F_{0.05}(1,3)$, $F_D>F_{0.05}(1,3)$,影响显著; $F_E>F_{0.2}(1,3)$,有一定影响;因子 A 被视为误差项,无影响。

为检验方差分析结果是否准确,遍历因子 A 至 E 对应的 2 个水平,计算所有 32 组数据的方差, F 值排序为 $F_C(417.54)>F_B(46.61)>F_A(18.98)>F_D(17.95)>F_E(3.84)$,可以看出,仅利用正交设计选定的 8 组数据进行方差分析,可以准确识别最主要的影响因子 C,即蓝方有无防空对无人机能否完成任务影响最大,并准确识别蓝方有无伪装(因子 B)和我方侦察

时间长短（因子 D ）也对完成任务有影响，分析结果与实际情况相符。8 组数据和 32 组数据方差分析结果差别在于对因子 A 的排序上，这主要是因为两种方差分析结果依据的数据范围不同，结果表示的是在对应数据范围内各因子的影响程度，但从 32 组数据对应的 F_A 值较小可知，因子 A 不是影响效能底数的主要因子，重要程度不高，分析偏差可以接受。说明方差分析方法在寻找影响效能底数的主要因子上是有效的。

3.3 效能结果预测结果

定性因子 A 、 B 、 C 均对应 2 个水平值，分别设置虚拟变量 x_A 、 x_B 、 x_C ， $x_A=0$ 或 1，当 $x_A=1$ 时，表示因子 A “昼夜情况”取水平 1 “夜”， $x_A=0$ 时，表示取水平 2 “昼”，同理设置 x_B 和 x_C 。定量因子 D 、 E 设置变量 x_D 、 x_E ， $x_D=30\text{ min}$ 或 60 min ， $x_E=10\text{ km}$ 或 30 km 。则多元回归模型为：

$$y = \beta_0 + \beta_A x_A + \beta_B x_B + \beta_C x_C + \beta_D x_D + \beta_E x_E \quad (26)$$

根据式 (15) 计算矩阵 $L = \{l_{ij}\}$ ，根据式 (16) 计算 l_{iy} ， $i, j=1, 2, \dots, 5$ ，可得正规方程：

$$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1800 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 800 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_A \\ \beta_B \\ \beta_C \\ \beta_D \\ \beta_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0186 \\ -0.0998 \\ -0.4315 \\ 2.7517 \\ 0.9066 \end{bmatrix} \quad (27)$$

求解式 (27)，得回归模型：

$$y = 0.2570 - 0.0093x_A - 0.0499x_B - 0.2157x_C + 0.0015x_D + 0.0011x_E \quad (28)$$

为检验回归方程的线性关系是否显著，根据式 (20) 计算回归方程 F 检验值为 43.687 1，通过查表，得到 $F_{0.05}(5, 2) = 19.30$ ，如表 6 所示。经 F 检验，因 $F > F_{0.05}(5, 2)$ ，说明原假设不成立， y 与 x_A 、 x_B 、 x_C 、 x_D 、 x_E 的回归关系在 0.05 水平上显著，说明回归方程有效。根据式 (23) 计算各因子 t 检验值，如表 6 所示，5 个因子对 y 影响显著性排序为 x_C 、 x_B 、 x_D 、 x_E 、 x_A ，与方差分析结果一致。

表 6 回归模型 F 检验和 t 检验结果

名称	F 检验	t 检验				
	F	$ t_A $	$ t_B $	$ t_C $	$ t_D $	$ t_E $
检验值	43.687 1	0.605 43	3.242 1	14.018	2.98	1.472 7
分布值	$F_{0.01}(5, 2) = 99.30$	$t_{0.01/2}(2) = 9.924\ 8$;				
	$F_{0.05}(5, 2) = 19.30$	$t_{0.05/2}(2) = 4.302\ 7$; $t_{0.1/2}(2) = 2.920\ 0$				
显著性	$\alpha = 0.05$ 水平 显著	不显著	$\alpha = 0.1$ 水平 显著	$\alpha = 0.01$ 水平 显著	$\alpha = 0.1$ 水平 显著	不显著

遍历 x_A 至 x_E 的 5 个因子的所有 32 种水平值，代入式 (28) 中，预测各因子水平对应的任务完成率，根据式 (24) 计算各样本的 95% 置信区间，带置信区间

的预测结果如图 2 所示。可以看出，序号 29 和 30 样本的预测值超出置信区间，预测误差分别为 $-0.086\ 9$ 和 $-0.112\ 8$ ，主要原因是此两种水平组合对应的任务完成率最高，而试验未进行此种情况下的试验，所以试验结果跟真值有所偏离，但此两种情况下预测值较高，说明预测趋势是准确的，其他所有预测值均在置信区间内，且 32 个样本的预测误差均值仅为 0.025 9。

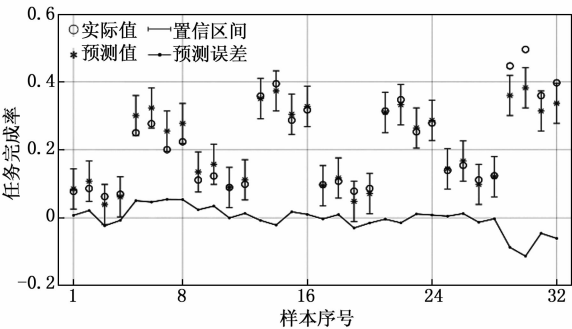


图 2 任务完成率预测结果

为了说明多元回归预测的有效性，采用支持向量机回归模型作为对比方法，本文提出预测方法和对比方法的预测结果和预测误差如图 3 和图 4 所示，两者预测误差均值分别为 0.025 9 和 0.082 4。可以看出，两个模型对于训练样本 1、4、13、16、22、23、26、27 的预测结果与实际值较为接近，两个模型均能较好进行拟合。但是对于其他样本，相较于本文提出方法，支持向量机回归模型预测精度较差，这是因为在训练样本较少时，支持向量机回归模型收敛速度较慢，模型训练效果较差，对于未训练的样本预测效果不好。相比之下，多元回归模型在训练样本数量较少情况下，以寻求预测值和实际值偏差平方和最小为目标函数，采用最小二乘法求解预测模型参数，可以得到泛化能力较好的预测模型。

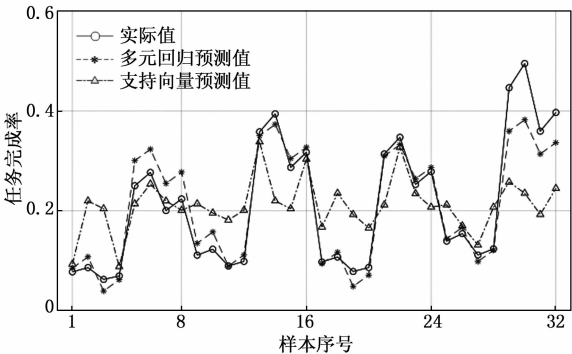


图 3 多元回归与支持向量预测结果对比

由试验结果可以看出，对于遍历需要 32 次试验的任务完成率评估任务，通过正交设计，仅需要设计 8 次试验，就能分析出 5 个因子对试验结果的不同影响程度，能够准确识别主要影响因子为蓝方有无防空。并能对未试验的 24 个因子水平组合，进行任务完成率预测，总体预测误差均值较小，结合置信区间，24 个样本中

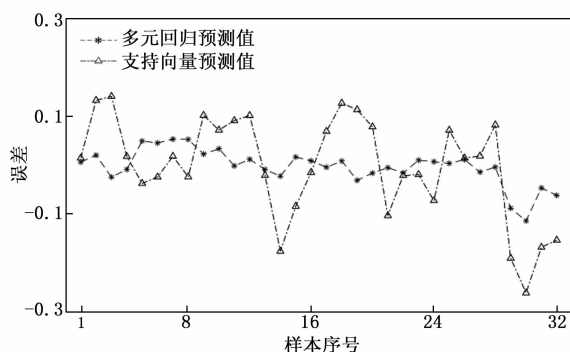


图 4 多元回归与支持向量预测误差对比

有 22 个样本预测结果落在置信区间, 区间预测准确率 91.67%, 说明大部分因子水平组合在未试验情况下, 均能进行准确预测。仅有 2 个样本预测结果超出置信区间, 但预测趋势与实际情况较为接近, 即预测结果表明此 2 种情况下, 任务完成率较高。

4 结束语

提出的作战效能设计评估方法, 在试验设计阶段利用少量的试验次数, 获取典型因子水平组合下的装备作战效能; 在分析评估阶段利用试验获取的作战效能值, 在已试验和未试验的所有因子水平范围内, 找出主要影响因子, 提供带置信区间的作战效能预测值。无人机侦察任务示例分析结果表明, 在压缩试验次数的前提下, 可以准确识别影响作战效能的主要战场条件因子, 并能准确预测作战效能趋势, 保证大部分预测值落在预测区间, 证明提出的方法适用于有限作战试验情况, 可用于不同装备和战场条件下的作战效能分析评估。需要说明的是, 该方法应尽量控制因子及水平数量, 避免试验次数激增带来的试验资源过度消耗。后续还需要在战场条件因子有交互作用等情况下开展相关研究。

参考文献:

- [1] WANG J, JIANG P, QI J. A planning method for operational test of UAV swarm based on mission reliability [J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2024, 140 (8): 1889–1918.
- [2] JANG K, NATHAN LICHTLE, VINITSKY E. Reinforcement learning-based oscillation dampening: scaling up single-agent reinforcement learning algorithms to a 100-autonomous-vehicle highway field operational test [J]. IEEE Control Systems, 2025, 45 (1): 61–94.
- [3] 王靖宇, 蒋平, 谢丁星, 等. 基于任务可靠性的无人集群作战试验方案设计 [J]. 西北工业大学学报, 2025, 43 (2): 368–380.
- [4] 王涛, 袁则华. 空空导弹作战试验的条件设置与结果评估 [J]. 航空兵器, 2025, 32 (2): 113–120.
- [5] 郑强, 杨望灿. 驱护编队作战试验设计与评估 [J]. 舰船电子工程, 2024, 363 (9): 157–160.
- [6] 王学文, 范东方, 雷建栋, 等. 基于多源信息融合的装备作战试验评估 [J]. 火力与指挥控制, 2024, 49 (8): 192–198.
- [7] YANG B, HAN J. Optimization of key parameters of electromagnetic coil launching based on uniform design experimentation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (2): 440–445.
- [8] YANG Z, ZU Y, LIU Q. Design and optimization of cooling system for aerospace bearing temperature measurement device based on orthogonal design [J]. Measurement Science & Technology, 2025 (5): 36–37.
- [9] 郑世明, 张国宁, 朱江. 武器装备作战消耗实验方案稀疏化设计研究 [J]. 军事运筹与系统工程, 2021, 35 (1): 46–50.
- [10] 朱先民, 贾楠, 汪子盛, 刘垚. 车辆装备在役考核正交设计 [J]. 军事交通学报, 2022, 1 (10): 18–21.
- [11] 郭杰, 张龙, 刘立武, 白雪强, 王哲坤. 基于正交法的某型装备作战效能试验设计方法 [J]. 舰船电子工程, 2024, 366 (12): 149–152.
- [12] 石子焯. 面向优化设计的新型武器装备体系贡献度评估 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15 (10): 149–152.
- [13] TSAI C L, HSIEH C C, CHENG Y C. Improvement design for a double-layer honeycomb structure using uniform design for static and dynamic stress analysis [J]. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, Series C: Transactions of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2023, 44 (4): 413–423.
- [14] ZHAO Y, WU F, YANG Y. Constructing uniform design tables based on restart discrete dynamical evolutionary algorithm [J]. Soft Computing, 2024, 28 (19): 11515–11534.
- [15] 王志淦, 化斌斌, 万博, 唐秀媛. 武器装备作战试验设计方法 [J]. 装甲兵学报, 2022, 3 (1): 45–49.
- [16] NOUGHABI R A, MOHAMMADPOUR A. Multivariate regression with stable errors using order statistics [J]. Fluctuation and Noise Letters: FNL: An Interdisciplinary Scientific Journal on Random Processes in Physical, Biological and Technological Systems, 2022 (3): 21–22.
- [17] KIM I, VIKESLAND P J, KANG S. Nanostructured au-based surface-enhanced raman scattering substrates and multivariate regression for pH sensing [J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4 (6): 5768–5777.
- [18] 任露泉. 试验设计及其优化 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [19] DROZD J, LUDEK RAK, PAVEL ZAHRADNIEK. Effectiveness evaluation of aerial reconnaissance in battalion force protection operation using the constructive simulation [J]. Journal of Defense Modeling & Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2023, 20 (2): 16–18.
- [20] 张可为, 赵晓林, 李宗哲, 等. 多无人机侦察任务分配方法研究综述 [J]. 电光与控制, 2021, 28 (7): 68–72.