

反舰导弹命中精度预测与评估

韩波

(中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: **目的** 解决反舰导弹命中精度受试验航区及靶场试验环境等客观条件制约, 难以通过飞行试验得到客观全面评估的问题。**方法** 在对影响反舰导弹命中精度的主要因素进行分析的基础上, 利用实际环境条件下的飞行试验数据, 构建基于偏最小二乘回归的命中精度模型, 实现对反舰导弹各种使用环境条件命中精度的定量评估。**结果** 在构建基于偏最小二乘回归的命中精度模型后, 可以实现对 90° 发射扇面角、20 m/s 侧风以及 300 km 最大射程等实际试验无法考核的边界使用环境条件下反舰导弹的命中精度进行定量评估。**结论** 通过实例分析表明了方法的有效性和可行性, 可以实现有小样本条件下对反舰导弹命中精度的评估。

关键词: 反舰导弹; 命中精度; 预测; 评估

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.01.007

中图分类号: TJ761.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)01-0031-03

Hit Accuracy Forecast and Evaluation of Anti-ship Missile

HAN Bo

(Troop 92941, PLA, Huludao 125001, China)

ABSTRACT: Objective The paper aims to solve issues such as limitations of objective conditions of range test environment which constrains the hit accuracy of anti-ship missile and difficulty in obtaining an objective and comprehensive evaluation by flight test. **Methods** Based on analysis of main factors that influence the hit accuracy of anti-ship missile, hit accuracy model was built based on partial least-squares regression to quantitatively evaluate the hit accuracy under various environmental conditions of using anti-ship missile. **Results** This model could be used to quantitatively evaluate the hit accuracy of anti-ship missile under boundary conditions of 90 degrees emission sector angle, 20 m/s crosswind and 300 km maximum range when the boundary using condition was unable to be evaluated practically. **Conclusion** Examples show that this method is effective and feasible to evaluate the hit accuracy of anti-ship missile in the case of small sample.

KEY WORDS: anti-ship missile; hit accuracy; forecast; evaluation

命中精度作为反舰导弹武器系统的重要战技指标之一, 是试验鉴定考核的重点。受试验航区及试验环境条件制约, 通常情况下靶场试验难以覆盖研制总要求提出的导弹武器系统边界使用环境, 如何立足有限试验样本对反舰导弹精度进行客观全面的评估, 是靶场试验鉴定人员面临的一个亟待解决的问题。偏最小二乘回归作为一种集多种数据分析于一体的多元统计分析方法, 可以有效地解决变量之间的多重相关

性和样本量少的问题^[1]。

文中引入偏最小二乘回归分析方法, 通过对影响反舰导弹命中精度的关键因素进行分析, 利用实际飞行试验数据, 构建了反舰导弹命中精度评估模型, 可以实现边界使用环境条件下反舰导弹命中精度的预测评估。

1 试验

反舰导弹命中精度 Y 与导弹发射扇面角 x_1 、载舰纵摇角 x_2 、载舰横摇角 x_3 、目标指示误差 x_4 、纵

向风速 x_5 、侧向风速 x_6 及导弹自控飞行距离 x_7 等因素相关^[2]。某型反舰导弹飞行试验中, 获取的导弹脱靶量及相关试验条件见表 1。

表 1 试验条件及结果

次数	扇面角/(°)	纵摇/(°)	横摇/(°)	目指误差/km	纵风/(m·s ⁻¹)	侧风/(m·s ⁻¹)	飞行距离/km	脱靶量/m
1	60	-6	-5	20	5	4	180	5.7
2	45	0	0	10	-7	8	80	4.3
3	30	6	5	20	8	-10	160	5.2
4	15	-6	0	10	-7	4	80	3.1
5	0	0	5	0	-3	5	20	1.8

2 试验结果分析

该次试验受航区和试验环境制约, 导弹发射扇面角、风速、自控飞行距离等试验条件均未能覆盖研制总要求规定, 依靠现有试验子样难以评估该型反舰导弹在极限使用环境条件下命中精度是否合格。下面结合试验数据, 采用单因变量偏最小二乘回归方法对该型反舰导弹命中精度进行建模和预测分析。

2.1 单因变量的偏最小二乘算法推导^[3-5]

偏最小二乘(Partial Least-Squares, PLS)回归是一种先进的多元回归方法。这一方法是伍德(S. Wold)和阿巴诺(C. Albano)等人于 1983 年首次提出的, 用于解决样本分析中存在的变量多重相关、变量多于样本点等实际问题。

设试验因素为 $X=x_{ik}$, ($i=1,2,\dots,n, k=1,2,\dots,p$), 命中精度为 $Y=y_i$ ($i=1,2,\dots,n$)。首先按照式(1)、(2)将数据进行标准化处理, 试验因素 X 经标准化处理后记为 E_0 , 命中精度 Y 经标准化处理后记为 F_0 。

$$E_0 = \begin{bmatrix} e_{011} & \dots & e_{01p} \\ \vdots & & \vdots \\ e_{0n1} & \dots & e_{0np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$F_0 = [f_{01} \quad f_{01} \quad \dots \quad f_{0n}]' \quad (2)$$

式中:

$$e_{0ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (i=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,p),$$

$$f_{0i} = \frac{y_i - \bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (i=1,2,\dots,n).$$

1) 提取第 1 个成分 t_1 。首先, 求取矩阵 $E_0'F_0F_0'E_0$ 的最大特征值单位向量 w_1 , 从 E_0 中抽取一个成分 t_1 : $t_1 = E_0w_1$ 。然后, 分别建立 E_0 和 F_0 对 t_1 的回归方程:

$$E_0 = t_1p_1' + E_1 \quad F_0 = t_1r_1' + F_1$$

式中: E_1, F_1 分别是两个回归方程的残差矩阵; p_1, r_1 是回归系数:

$$p_1 = \frac{E_0't_1}{\|t_1\|^2} \quad r_1 = \frac{F_0't_1}{\|t_1\|^2}$$

2) 提取第 m 个成分 t_m 。同理, 提取第 m 个成分 t_m 时, 用提取第 $m-1$ 个成分时的残差矩阵 E_{m-1}, F_{m-1} 所构成的矩阵 $E_{m-1}'F_{m-1}F_{m-1}'E_{m-1}$ 的最大特征值单位向量 w_m , 则:

$$t_m = E_{m-1}w_m \quad (3)$$

E_{m-1}, F_{m-1} 对 t_m 的回归可以表示为:

$$E_{m-1} = t_m p_m' + E_m \quad (4)$$

$$F_{m-1} = t_m r_m' + F_m \quad (5)$$

回归系数为:

$$p_m = \frac{E_{m-1}'t_m}{\|t_m\|^2} \quad (6)$$

$$r_m = \frac{F_{m-1}'t_m}{\|t_m\|^2} \quad (7)$$

2.2 回归方程的建立

假设提取了 m 个成分 t_1, t_2, \dots, t_m , 则 F_0 在 t_1, t_2, \dots, t_m 上的线性回归方程可表示为:

$$\hat{F}_0 = r_1t_1 + r_2t_2 + \dots + r_mt_m + F_m \quad (8)$$

根据式(6), $t_m = E_{m-1}w_m = E_0 \prod_{j=1}^{m-1} (I - w_j p_j') w_m$,

记:

$$w_m^* = \prod_{j=1}^{m-1} (I - w_j p_j') w_m \quad (9)$$

F_0 的回归模型可表示为:

$$\hat{F}_0 = r_1 E_0 w_1^* + \dots + r_m E_0 w_m^* + F_m = E_0 (r_1 w_1^* + \dots + r_m w_m^*) + F_m \quad (10)$$

记: $x_j^* = E_0 w_j, y_j^* = F_0 w_j, \alpha_j = \sum_{h=1}^m r_h w_{hj}^*$ 。其中, w_{hj}^* 是 w_h^* 的第 j 个分量, 有:

$$\hat{y}^* = \alpha_1 x_1^* + \alpha_2 x_2^* + \dots + \alpha_p x_p^* \quad (11)$$

最后，按照标准化的逆过程还原得出 Y 对 X 的回归方程：

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_p x_p \quad (12)$$

2.3 交叉有效性判断

记 y_i 为原始试验数据， t_1, t_2, \dots, t_m 为回归过程中提取的成分。 \hat{y}_{hi} 是使全部样本结合第 h 个提取成分回归建模后，第 i 个样本点的拟合值； $\hat{y}_{m(-i)}$ 是在建模时删掉样本点 i ，取第 h 个成分回归建模后，对第 i 个样本点的拟合值。令 $PRESS_h$ 为 y 的误差平方和， SS_h 为 y 的预测误差平方和，则：

$$E_0 = \begin{bmatrix} 0.0365 & -0.7811 & -0.5437 & -0.1847 & 0.1669 & 0.4781 & 0.007 \\ 0.0396 & 0.9286 & 0.5941 & 0.0582 & 0.0516 & -0.3849 & -0.0489 \\ 0.0110 & 0.8122 & 0.5345 & 0.0969 & -0.0261 & -0.3889 & -0.0312 \\ -0.1994 & -0.9573 & -0.5126 & 0.2481 & -0.5304 & 0.0465 & 0.1279 \\ 0.1122 & -0.0024 & -0.0723 & -0.2185 & 0.3381 & 0.2492 & -0.0548 \end{bmatrix}$$

$$F_0 = [1.0589 \quad 0.1765 \quad 0.7438 \quad -0.5799 \quad -1.3993]$$

共提取得到两个成分，分别求取矩阵 $E_0' F_0 F_0' E_0$ 和 $E_1' F_1 F_1' E_1$ 的最大特征值单位向量 w_1, w_2 ，按照式

$$PRESS_h = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{h(-i)})^2$$

$$SS_h = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{hi})^2$$

对因变量 Y ，成分 t_h 的交叉有效性 Q_h^2 可表示为：

$$Q_h^2 = 1 - \frac{PRESS_h}{SS_{h-1}}$$

当 $Q_m^2 \geq 0.0975$ 时，成分 t_m 是有益的，反之，认为 t_m 对预测误差无明显改善作用。

2.4 计算分析

根据式(1)、(2)，对表 1 数据进行标准化处理，得：

(9) 分别可以求出 w_1^*, w_2^* ，见表 2。

表 2 w, w^* 取值表

因素	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
w_1	0.4804	0.0424	-0.2744	0.5124	0.3523	-0.2120	0.5104
w_2	0.5874	0.2965	-0.1723	0.017	-0.5681	0.4501	-0.1082
w_1^*	0.4804	0.0424	-0.2744	0.5124	0.3523	-0.2120	0.5104
w_2^*	0.6277	0.3001	-0.1954	0.0600	-0.5385	0.4323	-0.0654

按照式(7)分别可以求出回归系数 $r_1=0.5092$ ， $r_2=0.1657$ ，代入式(8)可以得到 F_0 在 t_1, t_2 上的回归方程为：

$$\hat{F}_0 = 0.5092t_1 + 0.1657t_2 + F_2 \quad (13)$$

式中： $F_2=[0.2777 \quad -0.2610 \quad -0.2480 \quad 0.1370 \quad 0.0943]'$ 。

变换成 Y 对 X 的回归方程为：

$$\hat{y} = 2.2027 + 0.0233x_1 + 0.0225x_2 - 0.0653x_3 + 0.0514x_4 + 0.0206x_5 - 0.0082x_6 + 0.006x_7 \quad (14)$$

根据式(14)回归方程，在发射扇面角为 90° 、载舰纵摇 6° 、横摇 5° 、目指误差 20 km、纵风 0 m/s、侧向风速 20 m/s、飞行距离 300 km 的使用条件下，该型反舰导弹脱靶量约为 6.8 m，符合其指标要求。

3 结论

文中将偏最小二乘回归分析方法引入到反舰导弹命中精度预测评估中，并通过具体算例分析证明了该方法的有效性和正确性。由于影响反舰导弹命中精

度的因素较为复杂，该方法还需在实践中进行不断验证和完善。

参考文献：

- [1] 徐哲, 刘荣. 偏最小二乘回归法在武器装备研制费用估算中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2005, 35(3): 152-158.
- [2] 曲宝忠, 孙晓峰. 海军战术导弹试验与鉴定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 16-21.
- [3] 王慧文, 吴载斌, 孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 111-117.
- [4] 李海军, 刘霄, 孙伟玮, 等. 反舰导弹维修费用偏最小二乘估算方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(1): 27-31.
- [5] 钱筱丹, 黎放, 卞金露. 偏最小二乘回归在舰船维修费用预测中的应用[J]. 舰船科学与技术, 2007, 29(4): 98-100.