

基于偏最小二乘回归的鱼雷管峰压估计

董玉才 林 敏 宫 雷 李慧珍

(装甲兵工程学院非线性研究所,北京 100072)

摘 要 采用偏最小二乘回归方法,经交叉有效性检验建立了鱼雷管峰压的回归方程。通过实验数据比较,该模型拟合精度较强,说明偏最小二乘回归是估算舰艇鱼雷发射内弹道特征参数的一种有效方法。

关键词 鱼雷管峰压 偏最小二乘 预测 误差

中图法分类号 TP391.9;O241.5

文献标志码 A

在轻型舰载鱼雷发射的过程控制和参数分析中,动力学模型往往比较复杂,如何利用有限的实验数据,进行鱼雷发射过程中一些主要参数的分析及快速预报是十分有意义的。在潜艇鱼雷发射装置管内运动参数设计中,首先要弄清鱼雷管峰压的影响因素及其函数关系。文献[1]利用基于最小二乘法的回归分析方法,建立了发射管内峰压 P_m 的一元线性回归方程,并进行了显著性检验。

偏最小二乘回归是一种新的多元数据分析方法,集多元线性回归、典型相关分析和主成分分析的基本功能为一体,将建模预测类型的数据分析方法与非模型式的数据认识方法有机地结合起来,使得模型精度、稳健性、实用性得到提高^[2-4],已广泛应用于各领域的研究中^[5-10]。本文应用偏最小二乘回归方法,进一步探索鱼雷水面发射时影响鱼雷管峰压 P_m 的主要因素,建立回归方程并进行误差分析。

1 偏最小二乘回归模型

1.1 建模原理

设有 p 个自变量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ 和 q 个因变

量 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_q\}$,观测 n 个样本点,分别在 X 与 Y 中提取出成分 t_1 和 u_1 (即 t_1 是 $x_1, \dots, x_p$ 的线性组合, u_1 是 $y_1, \dots, y_q$ 的线性组合),要求 t_1 和 u_1 应尽可能大地携带他们各自数据表中的变异信息,同时 t_1 与 u_1 的相关程度能够达到最大使得 t_1 和 u_1 应尽可能好的代表数据表 X 和 Y ,同时自变量的成分 t_1 对因变量的成分 u_1 又有最强的解释能力。

在第一个成分 t_1 和 u_1 被提取后,分别实施 X 对 t_1 的回归以及 Y 对 u_1 的回归。如果回归方程已经达到满意的精度,则算法终止;否则,将利用 X 被 t_1 解释后的残余信息以及 Y 被 t_1 解释后的残余信息进行第二轮的成分提取。如此往复,直到能达到一个较满意的精度为止。若最终对 X 共提取了 m 个成分 $t_1, \dots, t_m$,偏最小二乘回归将通过实施 y_k 对 $t_1, \dots, t_m$ 的回归,然后再表达成 y_k 关于原变量 $x_1, \dots, x_m$ 的回归方程($k = 1, 2, \dots, q$)。

1.2 交叉有效性检验

将所有 n 个样本点分成两部分:第一部分除去某个样本点 i 的所有样本点集合(共含 $n-1$ 个样本点),用这部分样本点并使用 h 个成分拟合一个回归方程;第二部分是把刚才被排除的样本点 i 代入前面拟合的回归方程,得到 y_j 在样本点 i 上的拟合值 $\hat{y}_{hj(-i)}$ 。对于每一个 $i = 1, 2, \dots, n$,重复上述测试,定义 Y 的预测误差平方和为 $PRESS_h$,有 $PRESS_h =$

$$\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \hat{y}_{hj(-i)})^2$$
,显然,如果回归方程的稳健性

2010年4月7日收到

装甲兵工程学院战略投资项目

(2009ZL05)资助

第一作者简介:董玉才(1973—),男,博士,副教授,研究方向:数据处理及计算方法。

不好,误差就很大,它对样本点的变动就会十分敏感,这种扰动误差的作用,就会加大 $PRESS_h$ 的值。

1.3 精度分析

在偏最小二乘回归计算过程中,所提取的自变量成分 t_h 一方面可以尽可能多地代表 X 的变异信息,另一方面又尽可能与 Y 相关联,解释 Y 中的信息,用 $r(x_i, x_j)$ 表示两个变量之间的相关关系,定义 $t_1, t_2, \cdots, t_h$ 对各变量的解释能力。

对自变量 X_j 的累计解释能力:

$$Rd(X_j; t_1, \cdots, t_h) = \sum_h r^2(X_j; t_h)。$$

对自变量 X 的累计解释能力:

$$Rd(X; t_1, \cdots, t_h) = \sum_h \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p Rd(X_j; t_h)。$$

对自变量 Y 的累计解释能力:

$$Rd(Y; t_1, \cdots, t_h) = \sum_h r^2(Y; t_h)。$$

定义 $VIP_j = \sqrt{\frac{k}{Rd(Y; t_1, \cdots, t_m)} \sum_{h=1}^m Rd(Y; t_h) w_{hj}^2}$

为变量投影重要性指标用来描述自变量对因变量的解释能力,其中 w_{hj} 表示轴 w_h 的第 j 个分量, VIP_j 的意义:由于 x_j 对 Y 的解释是通过 t_h 来传递的,如果 t_h 对 Y 的解释能力很强,而 x_j 在构造 t_h 时,又起到了非常重要的作用,则可以认为 x_j 对 Y 具有相当大的解释能力。

2 鱼雷管峰压预测

2.1 建立模型

发射鱼雷时,鱼雷从静止开始,可以通过不同的运动规律,进行舰艇鱼雷发射装置管内运动参数的设计。分别记发射气瓶的容积记为 x_1 , 发射气瓶的初始压力为 x_2 , 发射阀喉部的通径为 x_3 , 文献[1]分析了内弹道试验实测数据表 1。

建立了鱼雷管峰压的线性回归模型为

$$P_m = -0.078\ 3x_1 + 0.035x_2 + 0.048\ 9x_3。$$

表 1 内弹道试验实测数据表

序号	气瓶的容积 /dm ³	气瓶压力 /(kgf·cm ⁻¹)	发射阀通径 /m	管峰压 /(kgf·cm ⁻²)
1	17.2	100	28	3.54
2	17.2	85	28	3.08
3	17.2	97.5	26.5	3.20
4	17.2	100	26.5	3.54
5	17.2	85	26.5	2.91
6	17.2	120	30	4.77
7	17.2	140	30	5.22
8	15.4	100	28	3.37
9	15.4	70	30	2.77
10	15.4	120	30	4.39
11	15.4	100	26.5	3.20
12	15.4	85	30	3.42
13	15.4	120	30	4.32

本文利用偏最小二乘法建立模型。首先进行交叉有效性检验,可得 $PRESS_h = [0.5136\ 0.2133\ 0.2062]$, 当 $h = 3$ 时, $PRESS_h$ 达到最小,模型的预测能力最好,因此取 3 个主成分 t_1, t_2, t_3 建立模型,得到鱼雷管峰压的偏最小二乘回归标准化变量模型:

$$P_m = 0.153\ 7x_1 + 0.795\ 9x_2 + 0.367\ 6x_3 \quad (1)$$

转化为原始变量回归方程为:

$$P_m = -6.610\ 6 + 0.124\ 9x_1 + 0.031\ 8x_2 + 0.175\ 9x_3 \quad (2)$$

2.2 模型评价

2.2.1 累计解释能力分析

计算 t_1, t_2, t_3 的累计解释能力数值见表 2。可以看出,当取 3 个主成分时, t_1, t_2, t_3 对 x_1, x_2 和 x_3 的累计解释能力达到 100%, 对全部自变量 x 的累计解释能力达到 100%, 对因变量 y 的累计解释能力均超过 98%, 均达到了很高的解释水平,说明用偏最小二乘法拟合出的回归模型能概括原始数据所携带大部分的信息。

表 2 累计解释能力表

成分	R_d				
	x_1	x_2	x_3	x	y
t_1	0.000 2	0.840 1	0.469 7	0.436 7	0.968 0
t_2	0.803 4	0.914 9	0.855 5	0.857 9	0.984 2
t_3	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.984 7

2.2.2 变量投影重要性指标

经计算,得变量投影重要性指标 $VIP = [0.183 4 \quad 1.463 1 \quad 0.908 8]'$,对鱼雷管峰压的影响程度依次为发射气瓶的初始压力、发射阀喉部的通径

和发射气瓶的容积。
2.2.3 相关关系分析

图 1 给出了三个主成分与 u_1 的平面图。从图中可以看出, t_1 与 u_1 存在明显的线性关系,说明发射气瓶的容积、发射气瓶的初始压力、发射阀喉部的通径与鱼雷管峰压有显著的相关关系,采用偏最小二乘回归方法建立的线性模型(1)、(2)是合理的, t_2 、 t_3 与 u_1 也存在着一定的线性关系,但已经很弱了。

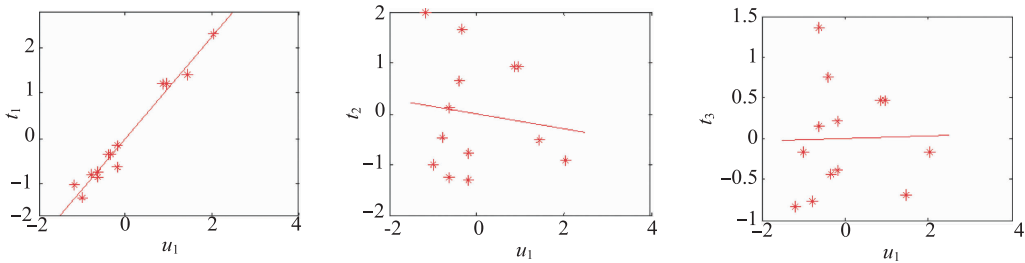


图 1 t_1 、 t_2 、 t_3 与 u_1 的相关关系平面图

2.2.4 鱼雷管峰压拟合结果

鱼雷管峰压的实测值与拟合值的对比情况如表 3 所示。从中可以看出,偏最小二乘回归拟合值好于文献[1]的回归值,相对误差较小,表明偏最小二乘回归模型能较好的反映鱼雷管峰压与气瓶压力、发射阀通径、气瓶容积的关系,预测效果较好。

表 3 鱼雷管峰压的实测值与拟合值对比表

序号	测量值/ (kgf·cm ⁻²)	偏最小二乘		线性回归 拟合值/ (kgf·cm ⁻²)	相对误差 /%
		回归拟合值/ (kgf·cm ⁻²)	相对误差		
1	3.54	3.64	-2.82	3.52	0.56
2	3.08	3.16	-2.60	3.00	2.60
3	3.20	3.30	-3.12	3.36	-5.00
4	3.54	3.38	4.52	3.45	2.54

续表

5	2.91	2.90	0.34	2.92	-0.34
6	4.77	4.63	2.94	4.32	9.43
7	5.22	5.26	-0.77	5.02	3.83
8	3.37	3.41	-1.19	3.66	-8.61
9	2.77	2.81	-1.44	2.71	2.17
10	4.39	4.40	-0.23	4.46	-1.59
11	3.20	3.15	1.56	3.59	-12.19
12	3.42	3.29	3.80	3.24	5.26
13	4.32	4.40	-1.85	4.46	-3.24
平均相对误差/%				2.09	4.41

鱼雷管峰压实测值与拟合值对比图如图 2 所示。可以看出,所有的样本点均排列在图中对角线的附近,模型的拟合效果很好。

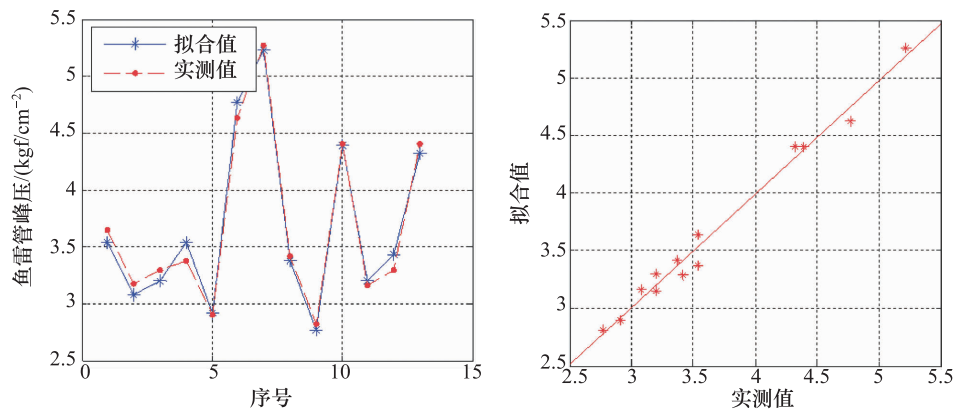


图2 鱼雷管峰压实测值与拟合值对比图

3 结论

本文采用偏最小二乘回归方法,经交叉有效性检验,建立了鱼雷管峰压与气瓶容积、气瓶压力和发射阀通径的关系模型。通过检验,该模型对自变量和因变量的解释能力较高,通过与实测值的对比,该模型拟合精度较高,具有较好的预测能力。

参 考 文 献

1 李志华,申志伟. 鱼雷内弹道特征参数估计的回归分析. 舰船电子工程,2009(12):188—191
2 乔汝椿. 潜艇鱼雷发射装置内弹道特性初步设计. 水中兵器, 2003;(2):51—55.
3 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用. 北京:国防工业出版社,1999

社,1999
4 罗 批,郭继昌,李 铨,等. 基于偏最小二乘回归建模的探讨. 天津大学学报,2002;35(6):783—786
5 贾子英,陈松辉,黄 华. 基于偏最小二乘的两栖突击车作战效能预测. 舰船电子工程,2009;(1):119—121
6 巴胜生. 基于偏最小二乘回归的军用飞机效能预测. 自动化技术与应用,2006;25(10):40—42
7 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. 舰船科学技术,2007;29(4):98—100
8 任 震,张静伟,张晋听. 基于偏最小二乘法的设备故障率计算. 电网技术,2005;29(5):12—16
9 王文圣,丁 晶,赵玉龙,等. 基于偏最小二乘回归的年用电量预测研究. 中国电机工程学报,2003;23(10):17—21
10 王松岭,袁雄俊,侯军虎,等. 基于偏最小二乘法的通风机性能仿真模型. 流体机械,2001;29(12):19—23

Application of the Partial Least Square in Forecasting the Pressure of the Torpedo Launch Tube

DONG Yu-cai, LIN Min, GONG Lei, LI Hui-zhen

(Institute of Nonlinear Science, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, P. R. China)

[Abstract] Through the crossing validity check, the partial least square regression method and establish the relation model about the pressure of the torpedo launch tube are adopted. Through the comparison of experiment data and model prediction, fitting accuracy of this relation model is stronger and the partial least square is a efficient method which can analyses the eigenparameter of torpedo interior trajectory.

[Key words] the pressure of the torpedo launch tube the partial least square prediction error