

doi: 10.7690/bgzdh.2020.07.014

# 潜射导弹出筒速度影响因素相关性分析

刘丙杰, 罗珩娟, 李 飞

(海军潜艇学院战略导弹与水中兵器系, 山东 青岛 266199)

**摘要:** 针对潜射导弹出筒速度影响因素的问题, 建立精确的潜射导弹出筒速度解析模型。利用简单相关法、偏相关分析法, 根据实测数据, 对发射深度、潜艇对流航速、海流对地速度、海流流向和海情(有效波高)等因素进行相关性分析, 找到与出筒速度显著相关的因素。该研究结果对潜射导弹的可靠发射具有指导作用。

**关键词:** 海基导弹; 出筒速度; 相关性分析; 发射深度

**中图分类号:** TJ762.4 **文献标志码:** A

## Correlation Analysis on the Ejecting Velocity of Submarine-launched Missile

Liu Bingjie, Luo Hengjuan, Li Fei

(Department of Strategic Missile & Underwater Weapon, Submarine Academy of PLA Navy, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Aiming at the influence factors of the ejecting velocity of submarine-launched missile, the accurate ejecting velocity model of submarine-launched missile is established. Using simple correlation analysis and partial correlation analysis, according to the actual measured data, factors including the depth of launch, convective navigational speed of submarine, ocean current velocity over the ground, ocean current direction, sea condition (valid wave height) were made correlation analysis and the notable relevant factors of ejecting velocity were found out. This research result played instructional role on reliable ejection of submarine-launched missile.

**Keywords:** sea-based missile; ejecting velocity; correlation analysis; depth of launch

### 0 引言

潜射导弹出筒速度是影响导弹飞行的关键因素。出筒速度的影响因素包括发射深度、潜艇对流航速、海流对地速度、海流流向和海情(有效波高)等。有效控制和利用影响因素, 对提高导弹发射的成功率、探索导弹发射条件具有重要意义。导弹出筒速度的影响因素较为复杂, 难以建立精确的解析模型。目前, 关于潜射导弹水下发射的研究主要有: 出水过程横向响应载荷研究<sup>[1]</sup>、出筒载荷响应分析<sup>[2]</sup>、出水载荷与空泡溃灭机理分析<sup>[3]</sup>、出筒过程肩空泡形态和水阻动力特性研究<sup>[4]</sup>、横向振动特性影响分析<sup>[5]</sup>等, 对潜射导弹出筒速度的研究尚未见到公开报道。

笔者根据潜射导弹实验数据, 利用简单相关、偏相关分析方法, 对导弹出筒速度的影响因素进行研究, 为潜射导弹的发射提供依据。

### 1 简单相关分析

简单相关分析是研究变量之间关联程度的统计方法, 主要通过计算变量间的相关系数来反映变量间的关联强度, 一般有皮尔逊(Pearson)相关系数和

斯皮尔曼(Spearman)相关系数等。皮尔逊相关系数计算公式<sup>[6]</sup>为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

相关系数的含义如表 1 所示。

表 1 相关系数含义

相关系数值	$ r =0$	$0 <  r  \leq 0.3$	$0.3 <  r  \leq 0.5$
直线相关程度	完全不相关	微弱相关	低度相关
相关系数值	$0.5 <  r  \leq 0.8$	$0.8 <  r  \leq 1$	
直线相关程度	显著相关	高度相关	

### 2 偏相关分析

偏相关分析在控制其他变量的线性影响下分析两变量间的线性相关性。偏相关分析可以有效分析变量间的真实关系, 识别干扰变量并寻找隐含的相关性。

在控制变量  $x_2$  不变的情况下,  $x_1$  与  $y$  的偏相关系数<sup>[6]</sup>为:

$$r_{x_1 y \cdot x_2} = \frac{(r_{x_1 y} - r_{x_1 x_2} r_{y x_2})}{(\sqrt{1 - r_{x_1 x_2}^2} \sqrt{1 - r_{y x_2}^2})}; \quad (2)$$

$$r_{x_1 x_2} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_1 - \bar{X}_1)(X_2 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_1 - \bar{X}_1)^2 \sum_{i=1}^n (X_2 - \bar{X}_2)^2}} \quad (3)$$

收稿日期: 2020-03-04; 修回日期: 2020-04-18

作者简介: 刘丙杰(1979—), 男, 山西人, 博士, 副教授, 从事导弹测控, 武器装备安全性研究。E-mail: Liubingjie\_nsa@163.com。

可用于推断样本对应的 2 个总体是否存在显著的净相关。在推断过程中，假设 2 个总体的偏相关系数与零无显著差异。以  $t$  统计量作为检验统计量，其数学定义为

$$t = r\sqrt{(n-q-2)/(1-r^2)} \quad (4)$$

式中： $r$  为偏相关系数； $n$  为样本量； $q$  为阶数。计算其观测值和对应的  $P$  值，若检验统计量的概率  $P$  小于给定的显著性水平，则应拒绝原假设；反之，接受原假设。

### 3 仿真分析

某导弹进行了 10 次发射实验，实验数据如表 2 所示。

表 2 弹射实验和飞行实验数据

序号	出筒速度/ (m/s)	发射深度/ m	潜艇航速/ kn	海流速度/ kn	有效波高/ m
1	69.17	82.00	7.16	3.43	0.20~0.35
2	65.36	86.39	7.21	4.09	0.35~0.83
3	67.99	82.40	9.09	4.03	0.25~0.27
4	66.26	80.07	7.29	4.62	1.59~2.60
5	63.16	84.00	7.48	4.46	0.71
6	64.79	82.00	8.40	4.50	0.34
7	75.64	81.90	7.30	4.48	0.51
8	66.25	88.20	7.40	4.73	0.32
9	67.19	80.10	7.32	4.24	0.62~1.09
10	65.33	84.78	7.27	4.69	1.51

#### 3.1 简单相关分析

利用 SPSS 软件对出筒速度与发射深度、潜艇速度、海流对地速度、有效波高等影响因素进行简单相关分析，分析结果如表 3 所示。

表 3 简单相关性分析结果

控制变量	发射深度	潜艇航速	海流对地速度	有效波高
出筒 Pearson 相关性	-0.621	-0.248	0.298	-0.217
波高显著性 (双侧)	0.010	0.354	0.262	0.420

从表中可以看出：导弹出筒速度与发射深度的相关系数为-0.621，显著性水平为 0.01，即导弹出筒速度与发射深度的相关性为负相关，且相关性很强。海流对地速度与出筒速度的相关系数为 0.298，显著性水平位 0.262，即导弹出筒速度与海流对地速度相关性为正相关，且相关性较强。

#### 3.2 偏相关分析

1) 在控制潜艇对流航速、海流对地速度、海流流向、有效波高变量的情况下，出筒速度和发射深度间的相关性计算如表 4 所示。

表 4 出筒速度和发射深度的相关性

控制变量	出筒速度	发射深度
潜艇对流航速&海流对地速度&海流流向&有效波高	相关性 显著性(双侧)	1.000 -0.605
发射深度	相关性 显著性(双侧)	-0.605 0.037

从表中可以看出：出筒速度与发射深度相关度为-0.605，呈显著相关，显著性为 0.037。

2) 在控制发射深度、潜艇对流航速、海流对地速度、海流流向变量的情况下，出筒速度和有效波高间的相关性计算结果如表 5 所示。

表 5 出筒速度和有效波高的相关性

控制变量	出筒速度	有效波高
发射深度&潜艇对流航速&海流对地速度&海流流向	相关性 显著性(双侧)	1.000 -0.267
有效波高	相关性 显著性(双侧)	-0.267 0.402

从表中可以看出：控制变量发射深度、潜艇对流航速、海流对地速度、海流流向的情况下，出筒速度与有效波高相关度为-0.267，呈微弱相关，显著性为 0.402，微弱相关。

3) 在控制发射深度、海流对地速度、海流流向、有效波高变量的情况下，出筒速度和潜艇对流航速间的相关性计算结果如表 6 所示。

表 6 出筒速度和潜艇对流航速的相关性

控制变量	出筒速度	潜艇对流航速
发射深度&海流对地速度&海流流向&有效波高	相关性 显著性(双侧)	1.000 0.264
潜艇对流航速	相关性 显著性(双侧)	0.264 0.406

从表中可以看出：出筒速度与潜艇对流航速相关度为 0.264，呈微弱相关，显著性为 0.406。

从以上分析结果可以看出：出筒速度与发射深度呈显著负相关，在保证出筒速度的前提下，必须考虑发射深度的影响，即发射深度对导弹安全发射具有显著作用<sup>[7]</sup>。

## 4 结束语

笔者针对潜射导弹出筒速度影响因素的问题，基于实测潜射导弹作战训练数据，分析对比了导弹出筒速度与发射深度、潜艇对流航速、海流对地速度、海流流向、有效波高之间的相关性。结果表明：发射深度对导弹出筒速度的影响显著，可为指导潜射导弹安全发射提供依据。

从图中可以看出：CL-20 基含铝炸药的水下气泡能在铝氧比为 0.75 时达到最大，水下气泡能呈现先增加后减小的趋势。这主要是因为水下气泡能由铝粉二次反应提供的能量支持，随着铝氧比的增加，铝粉反应释放的能量越多，气泡能越大；但是，当铝氧比大于 0.75 后，配方及水中提供的氧不足，铝粉释放的能量减少，故气泡能会降低。

### 2.3 铝氧比对炸药水下能量输出结构的影响

不同配方 CL-20 基含铝炸药的水下能量输出如表 4 所示。图 4 为水下总能量随铝氧比的变化曲线。

表 4 水下能量输出结构实验结果

含铝炸药 配方	Al/O	冲击波能/ (MJ/kg)	气泡能/ (MJ/kg)	总能量/ (MJ/kg)
C-1	0.25	1.27	3.48	4.75
C-2	0.45	1.70	4.10	5.80
C-3	0.60	1.64	4.60	6.24
C-4	0.75	1.60	4.83	6.43
C-5	0.95	1.55	4.70	6.25
C-6	1.30	0.68	4.52	5.20

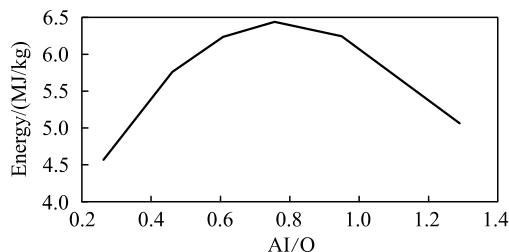


图 4 水下总能量随铝氧比的变化

从图中可以看出：当铝氧比为 0.75 左右时，CL-20 基含铝炸药水下爆炸的总能量有一个最大值，约为 6.43 MJ/kg。Al 的燃烧以及 Al 粉与爆轰产物的二次反应均为放热反应，可以大幅度提高含铝炸药的爆热值，但是当 Al/O 摩尔比大于 0.75 后，由于 Al 粉含量已经超过爆轰产物中可能与 Al 粉发生放热化学反应的物质的量，此后，Al 粉就会完全作为一种惰性吸热物质而存在，消耗大量热量而使总能量降低。故在保证总能量最大的情况下，通过

\*\*\*\*\*

(上接第 64 页)

### 参考文献：

[1] 尹云玉, 吕海波, 李宁, 等. 潜射火箭出水过程横向响应载荷研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2007(6): 12-16.  
 [2] 覃东升, 方勇. 水下垂直发射出筒载荷响应分析[J]. 计算机仿真, 2013, 30(2): 112-115.  
 [3] 王一伟, 黄晨光, 杜特专, 等. 航行体垂直出水载荷与空泡溃灭机理分析[J]. 力学学报, 2012, 44(1): 39-48.

调节铝氧比，可改变含铝炸药的能量输出结构。在一定的范围内，铝氧比增大，冲击波能减少，气泡能所占比重增加，对不同水下炸药配方设计具有参考价值。

### 3 结论

笔者测试了 CL-20 基含铝炸药不同铝氧比配方的水下冲击波能、水下气泡能、水下总能量，分析得出了 Al/O 对其水中能量的影响规律：

- 1) CL-20 基含铝炸药的水下冲击波能、水下气泡能、水下总能量均随铝氧比的上升先增加后减少；
- 2) CL-20 基含铝炸药的水下爆炸总能量在铝氧比为 0.75 时有一个最大值，约为 6.43 MJ/kg。

### 参考文献：

[1] 董海山. 高能量密度材料的发展及对策[J]. 含能材料, 2004, 12(增刊): 1-12.  
 [2] 陈朗, 龙新平, 冯长根, 等. 含铝炸药爆轰[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 6-7.  
 [3] 周俊祥, 徐更光, 王廷增. 铝化炸药水下爆炸冲击波特异性分析[J]. 爆破, 2005, 22(1): 41-51.  
 [4] 周霖, 许少辉. 炸药水下爆炸能量输出特性研究[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 235-238.  
 [5] STROMSOE E, ERIKSEN S W. Performance of high explosives in underwater application. Part II: Aluminized explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1990, 15: 52-53.  
 [6] KEICHER T, HAPP A, KRETSCHMER A, et al. Influence of Aluminium/Ammonium Perchlorate on the Performance of Underwater Explosives[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 1999, 24(3): 140-143.  
 [7] 项大林, 荣吉利, 李健, 等. 黑索今基含铝炸药的铝氧比对爆轰性能及其水下爆炸性能的影响[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 45-50.  
 [8] 冯晓军, 韦国平, 徐洪涛, 等. Al/AP 对 RDX 基复合炸药水中爆炸参数的影响[J]. 火炸药学报, 2012(4): 10-14.  
 [4] 刘海军, 王聪, 邹振祝, 等. 潜射导弹出筒过程肩空泡形态和水阻动力特性研究[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 313-319.  
 [5] 王英华. 轴向载荷对潜射导弹横向振动特性影响分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2002(6): 9-15.  
 [6] 王建丽, 张渭育. 统计学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 215-220.  
 [7] 李晓斌, 郭小威, 袁刚. 基于逻辑靶场技术的导弹内外场联合试验训练系统[J]. 兵工自动化, 2019, 38(6): 9-13.