

doi: 10.7690/bgzdh.2021.07.013

## 舰艇平台升沉和形变影响舰炮诸元计算精度研究

孙 强<sup>1</sup>, 余家祥<sup>2</sup>, 王 玮<sup>2</sup>

(1. 海军大连舰艇学院学员五大队, 辽宁 大连 116018; 2. 海军大连舰艇学院导弹与舰炮系, 辽宁 大连 116018)

**摘要:** 为解决舰艇平台影响舰炮诸元计算精度的问题, 对舰艇升沉和形变进行研究。根据弹道刚性原理和舰艇形变的特点, 建立舰艇升沉和形变影响诸元计算模型, 运用仿真方法分析升沉和形变引起的诸元误差变化趋势, 提出对射击诸元修正的条件。仿真结果表明: 诸元的计算误差随舰艇升沉幅度和形变角的增大而增大、随射击距离的减小而增大, 方向瞄准角随射击距离增大而增大, 高低瞄准角与射击距离无关。该研究具有一定的理论和实用价值。

**关键词:** 舰艇平台; 舰艇升沉; 舰艇形变; 诸元计算精度

**中图分类号:** TJ83 **文献标志码:** A

## Research on Calculation Accuracy of Naval Gun Elements Affected by the Heave and Deformation of Warship Platform

Sun Qiang<sup>1</sup>, Yu Jiexiang<sup>2</sup>, Wang Wei<sup>2</sup>

(1. No. 5 Student Group, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. Dept. of Missile &amp; Shipboard Gunnery, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the warship platform affects the calculation accuracy of the naval gun elements, the heave and deformation of the ship are studied. According to the principle of ballistic rigidity and the characteristics of ship deformation, a calculation model of the various elements of the ship's heave and deformation is established. The simulation method is used to analyze the change trend of various errors caused by heave and deformation, and the conditions for the correction of the shooting elements are proposed. The simulation results show that the calculation errors of the various elements increase with the increase of the ship's heave and deformation angle, and with the decrease of the shooting distance, the direction aiming angle increases with the increase of the shooting distance, and the high and low aiming angles has nothing to do with shooting distance. The research has certain theoretical and practical value.

**Keywords:** warship platform; warship heave; warship deformation; calculation accuracy of elements

## 0 引言

舰艇在海上航行和射击过程中, 会受到风浪、洋流等因素长时间的冲击和扰动作用而产生 6 个自由度的摇荡运动<sup>[1]</sup>, 在高海况下, 升沉运动对舰艇的危害和影响最大<sup>[2]</sup>。此外, 由于舰艇平台上载荷位置的限制、温度等自然环境的侵蚀, 舰艇会产生 3 个坐标轴方向的形变角<sup>[3-4]</sup>, 无法保证舰艇平台所搭载的设备在姿态上的统一<sup>[5]</sup>, 严重影响了舰炮武器系统的打击精度<sup>[6]</sup>和作战效能的发挥<sup>[7]</sup>。为此, 新型舰炮火控系统配备了捷联垂直参考基准, 用来实时提供舰艇平台姿态信息, 以提高舰炮诸元计算精度。

在装备实际使用中, 有时会出现仪器故障无法正常工作的情况, 需要指挥员根据海况等级和形变程度确定是否修正舰艇升沉和形变带来的影响; 因此, 分析舰艇升沉和形变对舰炮诸元计算精度的影响, 对提高舰炮作战效能具有重要意义, 为指挥舰

炮诸元修正提供了理论参考依据。

## 1 舰艇升沉影响诸元计算模型

对舰载雷达等观测器材得到的球坐标进行坐标转换、平滑滤波、观炮间隔修正和旋转变换<sup>[8-9]</sup>后, 得到发射瞬间目标现在坐标, 修正敌我相对运动和气象条件的影响, 可以得到目标弹道点坐标 $(d, f, h)$ , 若不考虑舰艇的升沉运动,  $h$  为零, 则射角的表达式为

$$\theta = \alpha(d). \quad (1)$$

式中  $\alpha(d)$  为弹道点水平距离  $d$  对应的距离角。

如图 1 所示, 实际舰炮对目标射击时, 在不同海况下, 舰艇会随着风浪进行不同幅度的升沉运动。

根据弹道刚性原理<sup>[10-12]</sup>, 当发射舰  $P_0$  上升幅度  $h_1$  后位于  $P_1$ , 实际射角为

$$\theta_1 = \alpha(D_1) - \varepsilon_1. \quad (2)$$

当发射舰  $P_0$  下沉幅度  $h_2$  后位于  $P_2$ , 实际的射

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-04-20

基金项目: 国家社会科学基金军事学项目 (14GJ003-157)

作者简介: 孙 强 (1995—), 男, 辽宁人, 硕士, 从事舰载武器装备运用工程研究。E-mail: sunqiang\_sjtu@163.com。

角为

$$\theta_2 = \alpha(D_2) + \varepsilon_2 \quad (3)$$

式中： $\alpha(D_1)$ 、 $\alpha(D_2)$ 分别为斜距离  $D_1$ 、 $D_2$  对应的距离角； $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  为高低角。

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= \sqrt{d^2 + h_1^2}, \quad D_2 = \sqrt{d^2 + h_2^2} \\ \varepsilon_1 &= \tan^{-1}(h_1/d), \quad \varepsilon_2 = \tan^{-1}(h_2/d) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

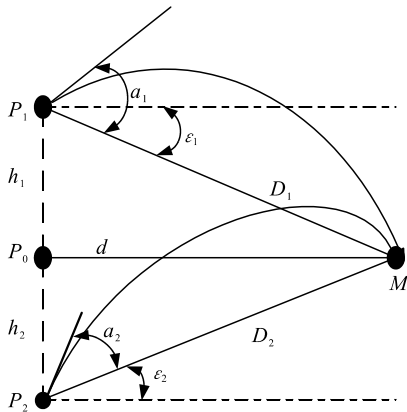


图 1 考虑舰艇升沉时射角计算原理

## 2 舰艇形变影响诸元计算模型

当舰炮安装处发生形变时，炮口的指向会发生变化，将导致舰炮不能命中目标，通常采用横挠角、纵挠角、扭转角<sup>[13]</sup>表示舰炮安装处 3 个坐标轴方向的形变角，但一般情况下扭转角非常小<sup>[1]</sup>；因此，笔者对扭转角不作考虑。如图 2 所示， $ox_1y_1h_1$  为舰

炮安装处未发生形变时的稳定坐标系； $ox_2y_2h_2$  为发生形变后的不稳定坐标系； $\eta$ 、 $\phi$  分别为横挠形变角（右舷向下为正）和纵挠形变角（舰艏向下为正）。

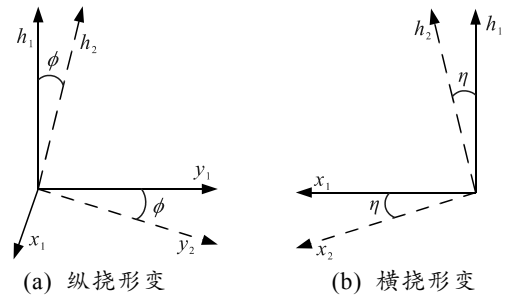


图 2 横挠、纵挠形变

由于形变角对观炮坐标转换的旋转矩阵只与单级的旋转矩阵有关<sup>[8]</sup>，所以稳定坐标系变换为不稳定坐标系的关系式为：

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ h_2 \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ h_1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos \eta & -\sin \phi \cdot \sin \eta & -\cos \phi \cdot \sin \eta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \eta & \sin \phi \cdot \cos \eta & \cos \phi \cdot \cos \eta \end{bmatrix} \quad (6)$$

若舰炮火控系统通过计算得到稳定方向瞄准角  $\beta$  和稳定高低瞄准角  $\phi$ ，其转换至不稳定方向瞄准角  $\beta'$  和不稳定高低瞄准角  $\phi'$  的具体模型如下：

$$\left. \begin{aligned} \beta' &= \tan^{-1} \left( \frac{(\cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \eta - \sin \phi \cdot \cos \phi \cdot \sin \eta - \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \sin \phi \cdot \sin \eta)}{(\cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \phi - \sin \phi \cdot \sin \phi)} \right) \\ \phi' &= \tan^{-1} \left( \frac{\sin \phi \cdot \cos \phi \cdot \cos \eta + \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \sin \phi \cdot \cos \eta + \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \sin \eta}{\sqrt{1 - (\sin \phi \cdot \cos \phi \cdot \cos \eta + \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \sin \phi \cdot \cos \eta + \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \sin \eta)^2}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

## 3 仿真

### 3.1 舰艇升沉的影响

如表 1 所示，为分析舰艇升沉对舰炮诸元计算精度的影响，笔者选取舰艇升沉幅度为不同海况下的最大浪高。在不同升沉幅度、不同射击距离的条件下，舰炮诸元误差、弹着偏差量计算结

果如表 2 所示。

表 1 不同海况下浪高范围 m

海况等级	浪高范围	最大升沉幅度
1	0~0.10	0.10
2	0.10~0.50	0.50
3	0.50~1.25	1.25
4	1.25~2.50	2.50
5	2.50~4.00	4.00

表 2 舰艇升沉影响舰炮诸元计算精度分析

射击距离/m	距离概率	升沉±0.1 m		升沉±0.5 m		升沉±1.25 m		升沉±2.5 m		升沉±4 m	
		诸元误差/mil	弹着偏差/m	诸元误差/mil	弹着偏差/m	诸元误差/mil	弹着偏差/m	诸元误差/mil	弹着偏差/m	诸元误差/mil	弹着偏差/m
1 000	40.26	0.095	12.78	0.478	64.32	1.196	160.94	2.392	321.89	3.827	514.99
2 000	38.43	0.047	5.94	0.239	30.21	0.598	75.58	1.196	151.17	1.913	241.80
3 000	38.43	0.031	3.60	0.159	18.56	0.398	46.32	0.797	92.77	1.275	148.41
4 000	36.60	0.023	2.44	0.119	12.72	0.299	31.81	0.598	63.62	0.956	101.71
5 000	36.60	0.019	1.79	0.095	8.98	0.239	22.60	0.478	45.20	0.765	72.34
6 000	36.60	0.015	1.24	0.079	6.53	0.199	16.46	0.398	32.93	0.637	52.70
7 000	39.80	0.013	0.94	0.068	4.94	0.170	12.36	0.341	24.80	0.546	39.71
8 000	40.78	0.011	0.69	0.059	3.70	0.149	9.34	0.299	18.75	0.478	29.98

根据射击理论，当弹着偏差量大于距离概率误差时，必须对射击诸元进行修正。

由表 2 可以看出：1) 诸元的计算误差随舰艇下沉幅度的增大而增大，随射击距离的减小而增大。2) 当满足以下条件时，需修正舰艇下沉对舰炮诸元计算的影响：① 2 级海况、射击距离小于 1 000 m；② 3 级海况、射击距离小于 3 000 m；③ 4 级海况、射击距离小于 5 000 m；④ 5 级海况、射击距离小

于 7 000 m。

### 3.2 舰艇形变的影响

为分析舰艇形变对舰炮诸元计算精度的影响，形变角(即横挠和纵挠角)各取了 8 个值进行分析：分别为 1~4 mrad、1~4°，目标分别位于发射舰 -90°、-45°、0°、45°和 90°(右舷为正)。按照上述假设条件，形变角瞄准角的影响如表 3—4、图 3—6 所示。

表 3 形变角对方向瞄准角的影响

形变角/(°)	射击距离 3 000 m					射击距离 5 000 m					
	-90°	-45°	0°	45°	90°	-90°	-45°	0°	45°	90°	
	mil										
横挠角	1	-0.003	-0.184	-0.364	-0.331	-0.001	-0.008	-0.405	-0.678	-0.554	-0.001
	2	-0.002	-0.223	-0.728	-0.808	-0.001	-0.012	-0.665	-1.356	-1.254	-0.003
	3	0.003	-0.116	-1.092	-1.431	-0.002	-0.011	-0.780	-2.032	-2.102	-0.006
	4	0.014	0.135	-1.455	-2.202	-0.003	-0.006	-0.748	-2.708	-3.097	-0.009
纵挠角	1	-0.367	-0.331	-0.001	0.330	0.367	-0.680	-0.554	-0.001	0.552	0.681
	2	-0.738	-0.808	-0.001	0.807	0.739	-1.366	-1.254	-0.003	1.250	1.368
	3	-1.114	-1.431	-0.002	1.430	1.117	-2.055	-2.102	-0.006	2.096	2.060
	4	-1.495	-2.202	-0.003	2.200	1.500	-2.748	-3.097	-0.009	3.089	2.757

表 4 形变角对高低瞄准角的影响

形变角/mrad	射击距离 3 000 m					射击距离 5 000 m					
	-90°	-45°	0°	45°	90°	-90°	-45°	0°	45°	90°	
	mil										
横挠角	1	-0.956	-0.677	-0.001	0.675	0.956	-0.956	-0.677	-0.001	0.675	0.956
	2	-1.913	-1.354	-0.002	1.351	1.913	-1.913	-1.355	-0.003	1.350	1.913
	3	-2.870	-2.031	-0.003	2.027	2.870	-2.870	-2.033	-0.005	2.025	2.871
	4	-3.826	-2.709	-0.004	2.703	3.827	-3.826	-2.711	-0.007	2.701	3.827
纵挠角	1	0.015	0.675	0.956	0.677	0.017	0.014	0.675	0.956	0.677	0.018
	2	0.031	1.351	1.913	1.354	0.035	0.029	1.350	1.913	1.355	0.037
	3	0.047	2.027	2.870	2.031	0.052	0.044	2.025	2.870	2.033	0.055
	4	0.062	2.703	3.827	2.708	0.070	0.059	2.701	3.827	2.711	0.073

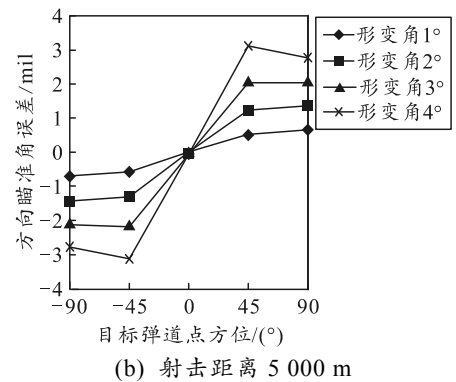
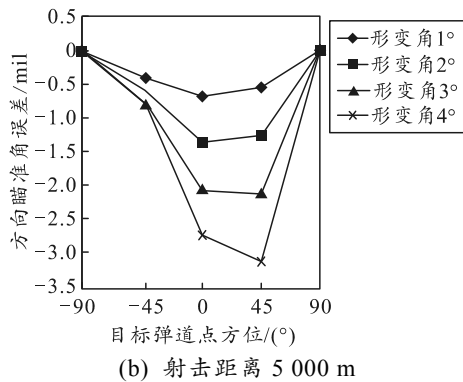
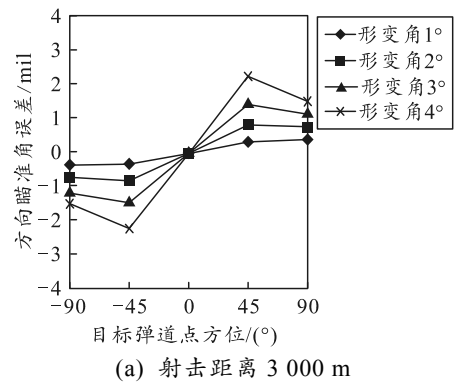
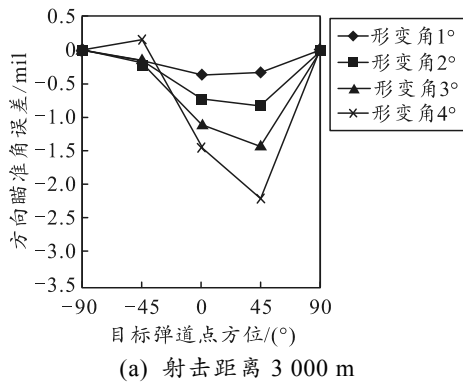
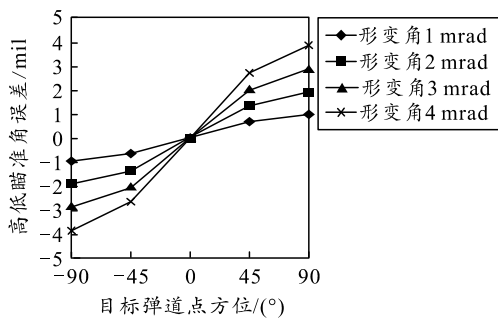
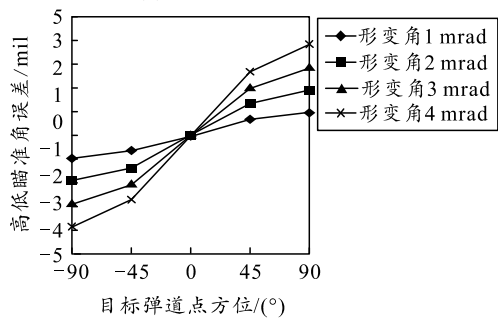


图 3 横挠角对方向瞄准角的影响

图 4 纵挠角对方向瞄准角的影响

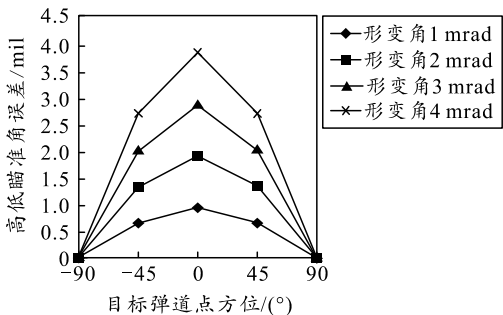


(a) 射击距离 3 000 m

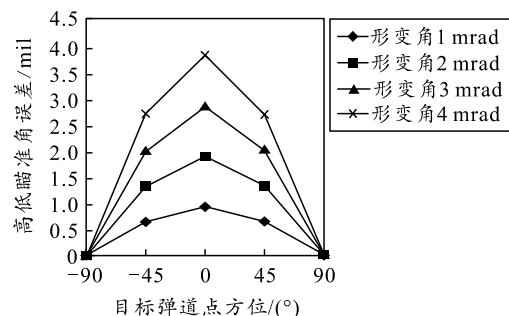


(b) 射击距离 5 000 m

图 5 横挠角对高低瞄准角的影响



(a) 射击距离 3 000 m



(b) 射击距离 5 000 m

图 6 纵挠角对高低瞄准角的影响

综合分析上述仿真结果并参考表 2 可以得到以下结论：

1) 方向瞄准角计算误差随形变角的增大而增大，随射击距离的增大而增大；高低瞄准角计算误差随形变角的增大而增大，但与射击距离无关；

2) 当横挠角达到 1°、目标位于发射舰左舷

45°~右舷 45°；或纵挠角达到 1°、目标位于发射舰左舷 45°~左舷 90°、右舷 45°~右舷 90°时，则需要修正舰艇形变对舰炮方向瞄准角的影响；

3) 当横挠角达到 1°、目标位于发射舰左舷 45°~左舷 90°、右舷 45°~右舷 90°；或纵挠角达到 1°、目标位于发射舰左舷 45°~右舷 45°，则需要修正舰艇形变对舰炮高低瞄准角的影响。

#### 4 结束语

根据弹道刚性原理和舰艇形变的特点，建立舰艇升沉和形变影响诸元计算模型，运用仿真方法分析舰艇升沉和形变对诸元计算精度的影响。仿真结果表明：该研究解决了捷联垂直参考基准故障无法正常工作时，是否需要修正舰艇升沉、形变对舰炮射击精度影响的问题，可为装备实际应用提供参考。

#### 参考文献：

- [1] 王允峰. 船舶纵横摇和升沉运动预报方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2010.
- [2] 孙伟, 孙枫. 基于惯导解算的舰船升沉测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2012(1): 169-174.
- [3] 鲍海阁. 舰船船体变形及其测量方法[J]. 船舶工程, 2013(5): 72-74.
- [4] 周金亮, 赵岩峰. 舰船变形研究[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(5): 198-200.
- [5] 王昱槐, 吴涛涛, 何佳洲. 角速度匹配法测量船体形变模型优化方法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(1): 61-71, 79.
- [6] 杨云涛, 王省书, 黄宗升, 等. 船体变形测量中激光陀螺零偏误差的补偿[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2755-2761.
- [7] 李晓勇, 张忠华, 何晶. 船体变形对航天测量船外弹道测量的影响[J]. 飞行器测控学报, 2006, 25(3): 7-12.
- [8] 贾琦. 基于光纤捷联惯性系统的船体变形测量方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2013.
- [9] 黄义, 汪德虎, 王健明, 等. 舰载跟踪雷达测量弹道修正弹坐标转换模型[J]. 兵工自动化, 2012, 31(8): 3-5.
- [10] 潘红华, 余家祥, 胡家升, 等. 舰炮对岸射击稳定诸元计算方法[J]. 火力与指挥控制, 2001(4): 51-52, 58.
- [11] 胡江, 钱佳. 编队舰炮对岸射击多发同时弹着研究[J]. 兵工自动化, 2020, 39(2): 5-7.
- [12] 高旻. 基于光学自准直和摄像测量法的舰船三维形变测量技术研究[D]. 长沙：国防科技大学, 2010.
- [13] 姜广文. 像机链位姿传递摄像测量方法及船体变形测量研究[D]. 长沙：国防科技大学, 2010.