

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.01.10

# 不同海况等级下传递对准杆臂效应的影响研究

陈永展<sup>1</sup>, 袁涛<sup>1</sup>, 曲建岭<sup>1</sup>, 魏喜坤<sup>2</sup>

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 阿米检测技术有限公司, 江苏 无锡 214000)

**摘要:** 复杂海况下传递对准受杆臂效应影响较大, 主要体现在失准角发散程度和对准时间长短。为研究不同等级海况对杆臂效应的影响程度, 本文基于分离建模的思想建立船舶六自由度模型, 进而建立等效杆臂效应模型。仿真中在等效杆臂效应模型中采用速度匹配传递对准, 对比分析中采用卡尔曼滤波、巴特沃斯低通滤波器补偿和计算补偿法三种方法, 仿真结果表明: 五级海况为进行传递对准的最高等级海况。仿真结果为实际演训、作战、执行任务等提供一定理论依据, 也能为船舶安全及舰载机起降训练安全提供指导意义。

**关键词:** 船舶运动; 六自由度模型; 传递对准; 杆臂效应

**中图分类号:** TB93

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2022)01-0063-09

## Study on the influence of transfer alignment lever arm effect under different sea conditions

CHEN Yongzhan<sup>1</sup>, YUAN Tao<sup>1</sup>, QU Jianling<sup>1</sup>, WEI Xikun<sup>2</sup>

(1. Qingdao Campus of Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, China;

2. A Mi Testing Technology Co., LTD, Wuxi 214000, China)

**Abstract:** Transfer alignment is greatly affected by lever arm effect in complex sea conditions, which is mainly reflected in the divergence degree of misalignment angle and the length of alignment time. In order to research the influence of different sea conditions on the lever arm effect, a ship six-degree-of-freedom model is established based on the idea of separated modeling, and an equivalent lever arm effect model is built. In the simulation process, velocity matching transfer alignment is adopted in the equivalent lever arm effect model, and Kalman filter, Butterworth low-pass filter compensation and computational compensation methods are applied in comparative analysis. The simulation results show that the fifth grade sea state is the highest sea state grade for transfer alignment. The simulation results provide a theoretical basis for practical training, combat and mission execution, and also provide guidance for ship safety and the safety of carrier-based aircraft take-off and landing training.

**Key words:** ship motion; six-degree-of-freedom model; transfer alignment; lever arm effect

## 0 引言

舰载机和武器系统的定位跟踪依靠机载惯性导航系统, 通过母舰的主惯导对舰载机的子惯导进行传递对准。由于受到海洋环境的干扰较多,

其中, 对准时存在杆臂效应影响了对准精度和对准时间。

S. P. Dmitriyev 等人<sup>[1]</sup>提出一种采用巴特沃斯低通滤波器对杆臂效应在线补偿的方法。SEO 等人<sup>[2-3]</sup>提出力学补偿法的概念, 并用试验对杆臂效

收稿日期: 2021-11-19; 修回日期: 2022-02-10

引用格式: 陈永展, 袁涛, 曲建岭, 等. 不同海况等级下传递对准杆臂效应的影响研究[J]. 计测技术, 2022, 42(1): 63-71.

**Citation:** CHEN Y Z, YUAN T, QU J L, et al. Study on the influence of transfer alignment lever arm effect under different sea conditions[J]. Metrology & measurement technology, 2022, 42(1): 63-71.



应误差的力学补偿法进行了验证。李蓓<sup>[4]</sup>提出了速度误差观测量补偿和低通滤波器两种杆臂效应误差的补偿方法。这三种补偿方法能够对杆臂效应较好地补偿,但是缺少在某一具体装备下三种补偿方法效果的对比。西北工业大学提出了舰载直升机动基座对准技术的方案设计,后来主要就系泊情况和航行情况下的舰载机初始自对准技术进行了研究,国内西北工业大学、国防科技大学、海军航空大学等对舰载战斗机基座传递对准均取得一定理论研究成果,但在海洋环境中不同海况对传递对准的影响研究较少。

本文通过研究不同海况等级对传递对准中的等效杆臂效应,建立船舶六自由度模型,对舰载战斗机基座传递对准采用三种补偿方法进行仿真分析。

### 1 船舶六自由度模型建立

船舶在海面上受到的干扰力不规则,力的方向和大小变化不定,很难用简单的数学模型进行完全精准的描述。为了建立能够描述船舶在海面上的受力情况需要进行一些前提假设,通过系统分析简化海面的作用力,将一些影响较小的作用力进行忽略以建立六自由度模型。本文基于日本操纵性数学模型研讨组的分离型思想(MMG),将船舶在海面行驶时受到的总作用力单独考虑,分为裸船体、敞水桨、敞水舵和风浪流引起的水动力进行叠加,并且忽略海浪、海涌等外界环境对敞水桨、敞水舵的影响,用裸船体、敞水桨、敞水舵在静水中所受的干扰力代替动水中的干扰力。

应用参考文献[7]中简化后的船舶六自由度模型为

$$\begin{cases} (m + m_x)(u' - vr + wq) = X_p + X_R + X_{wind} + X_{wave} \\ (m + m_y)(v' - wp + ur) = Y_p + Y_R + Y_{wind} + Y_{wave} \\ (m + m_z)(w' - uq + vp) = Z_{wind} + Z_{wave} \\ (I_{xx} + J_{xx})\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr = K_{wind} + K_{wave} \\ (I_{yy} + J_{yy})\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr = M_{wind} + M_{wave} \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq = N_p + N_R + N_{wind} + N_{wave} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m$ 为船舶质量,kg; $m_x, m_y, m_z$ 分别为船舶沿着 $X, Y, Z$ 轴的附加质量; $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$ 分别为船舶绕 $X, Y, Z$ 轴的转动惯量; $J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}$ 分别为船舶绕 $X, Y, Z$ 轴的附加转动惯量;下标 $P, R,$

$wind, wave$ 分别为敞水桨、敞水舵、风、海浪对船舶的力和力矩。

#### 1.1 附加质量

船舶平面运动附加质量估算公式为<sup>[8]</sup>

$$\frac{m_x}{m} = \frac{1}{100} \left[ 0.398 + 11.97C_b \left( 1 + 3.73 \frac{d}{B} \right) - 2.89C_b \frac{L}{B} \left( 1 + 1.13 \frac{d}{B} \right) + 0.175C_b \left( \frac{L}{B} \right)^2 \left( 1 + 0.541 \frac{d}{B} \right) - 1.107 \frac{L}{B} \frac{d}{B} \right] \quad (2)$$

$$\frac{m_y}{m} = 0.882 + 0.54C_b \left( 1 + 1.6 \frac{d}{B} \right) - 0.156C_b \frac{L}{B} \left( 1 - 0.673C_b \right) + 0.826C_b \frac{L}{B} \frac{d}{B} \left( 1 - 0.678 \frac{d}{B} \right) - 0.638 \frac{L}{B} \frac{d}{B} \left( 1 - 0.669 \frac{d}{B} \right) \quad (3)$$

$$m_z = 0.8H_0^* C_w m \quad (4)$$

式中: $L$ 为船长,  $m; B$ 为船宽,  $m; d$ 为吃水,  $m,$ 取标准排水量下的吃水 $8.96 m; C_b$ 为方形系数; $C_w$ 为水线面系数; $H_0^*$ 为船中宽吃水比。

#### 1.2 螺旋桨力和力矩计算模型

螺旋桨力和力矩表示为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} X_p = (1 - t_p) \rho n^2 D_p^4 k_i(J_p) \\ Y_p = 0 \\ N_p = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为流体密度,  $kg/m^3; n$ 为主机转速,  $r/min; k_i(J_p)$ 为桨的推力系数; $t_p$ 为推力减额分数; $D_p$ 为桨直径,取 $6.5 m$ 。

#### 1.3 舵力和力矩计算模型

舵力和力矩计算模型为<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} X_R = (1 - t_R) F_N \sin \delta \\ Y_R = (1 + a_H) F_N \cos \delta \\ N_R = (x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \\ K_R = z_R Y_R \end{cases} \quad (6)$$

式中: $F_N$ 为垂直于舵叶平面的正压力,  $N; t_R$ 为舵力减额系数; $\delta$ 为舵角,  $(^\circ); a_H$ 为操舵诱导船体横向力的修正因子; $x_H$ 为操舵诱导船体横向力的作用中心到船舶重心的距离,  $m; x_R$ 为舵中心到船舶重心的纵向距离,  $m; z_R$ 为舵正压力中心到船舶重心的垂向距离,  $m$ 。

#### 1.4 波浪力仿真数学模型

将船简化为箱体船,得六自由度力和力矩为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases}
 X_{\text{wave}} = 2\rho g a \frac{\sin[kB \sin(x)/2]}{kB \sin(x)/2} e^{-kd} B d \sin[kL \cos(x)/2] \sin(w_e t) \\
 Y_{\text{wave}} = -2\rho g a \frac{\sin[kB \cos(x)/2]}{kB \cos(x)/2} e^{-kd} L d \sin[kB \sin(x)/2] \sin(w_e t) \\
 Z_{\text{wave}} = \rho g a k \frac{\sin[kB \sin(x)/2]}{kB \sin(x)/2} e^{-kd} B d L \frac{\sin[kL \cos(x)/2]}{kL \cos(x)/2} \cos(w_e t) \\
 K_{\text{wave}} = \rho g a \sin(x) \frac{\sin[kB \sin(x)/2]}{kB \sin(x)/2} e^{-kd} d^2 \frac{\sin[kL \cos(x)/2]}{\cos(x)} \sin(w_e t) \\
 M_{\text{wave}} = \rho g a \frac{\sin[kB \sin(x)/2]}{kB \sin(x)/2} e^{-kd} d \frac{2\sin[kL \cos(x)/2] - kL \cos(x) \cos[kL \cos(x)/2]}{k^2 \cos^2(x)} \sin(w_e t) \\
 N_{\text{wave}} = \rho g a \sin(x) \frac{\sin[kB \sin(x)/2]}{kB \sin(x)/2} e^{-kd} d \frac{2\sin[kL \cos(x)/2] - kL \cos(x) \cos[kL \cos(x)/2]}{k^2 \cos^2(x)} \cos(w_e t)
 \end{cases} \quad (7)$$

式中： $a$ 为波幅，m； $k$ 为波数； $w_e$ 为遭遇频率； $x$ 为遭遇浪向角； $\rho$ 为流体密度，取 $1.025 \text{ kg/m}^3$ ； $g$ 为重力加速度，取 $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

不同海况等级下遭遇频率 $w_e$ 取值见表1，为计算波浪力仿真数学模型提供数值参考。

表1 遭遇频率值( $V=18$ 节)

Tab.1 Values of encounter frequency

海况等级	遭遇频率 $w_e/\text{Hz}$			
	15°	30°	45°	60°
一级	0.249	0.297	0.373	0.473
二级	0.258	0.275	0.301	0.335
三级	0.196	0.202	0.212	0.225
四级	0.154	0.157	0.162	0.169
五级	0.124	0.126	0.129	0.133
六级	0.103	0.104	0.106	0.109
七级	0.087	0.088	0.089	0.091
八级	0.074	0.075	0.076	0.077
九级	0.056	0.056	0.057	0.057

### 1.5 风力和力矩计算模型

忽略风力对船舶垂荡和纵摇的干扰，风力和力矩为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases}
 X_{\text{wind}} = 0.5\rho_a A_f U_R^2 C_{wx} a_R \\
 Y_{\text{wind}} = 0.5\rho_a A_s U_R^2 C_{wy} a_R \\
 K_{\text{wind}} = Y_{\text{wind}} \cdot h \\
 M_{\text{wind}} = X_{\text{wind}} \cdot H \\
 N_{\text{wind}} = 0.5\rho_a A_s U_R^2 C_{wn} a_R
 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $C_{wx}, C_{wy}, C_{wn}$ 为风压力和力矩系数； $a_R$ 为风舷角，rad； $h$ 为船舶横向受风作用点的高度到取矩点

的高度，m； $H$ 为船舶纵向受风作用点的高度到取矩点的高度，m； $A_f$ 为船体水线上正投影面积， $\text{m}^2$ ； $A_s$ 为船体水线上侧投影面积， $\text{m}^2$ ； $\rho$ 为空气密度，取 $0.001293 \text{ g/cm}^3$ 。

## 2 速度匹配传递对准卡尔曼滤波方程

### 2.1 卡尔曼滤波方程

卡尔曼滤波离散方程为<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases}
 X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k,k-1} W_{k-1} \\
 Z_k = H_k X_k + V_k
 \end{cases} \quad (9)$$

式中： $X_k$ 为系统的 $n$ 维状态变量； $Z_k$ 为系统的 $m$ 维观测序列； $\Gamma_{k,k-1}$ 为 $n \cdot p$ 维噪声输入矩阵； $\Phi_{k,k-1}$ 为 $n \cdot n$ 维 $k-1$ 时刻到 $k$ 时刻状态转移矩阵； $W_k$ 为 $p$ 维系统激励噪声序列； $H_k$ 为 $m \cdot n$ 维观测矩阵； $V_k$ 为 $m$ 维量测噪声序列。

过程噪声和量测噪声满足

$$\begin{cases}
 E[W_k] = 0, E[W_k W_j^T] = Q_k \delta_{kj} \\
 E[V_k] = 0, E[V_k V_j^T] = R_k \delta_{kj} \\
 E[W_k V_j^T] = 0
 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $Q_k$ 为系统过程噪声 $W_k$ 的 $p \cdot p$ 维对称非负定方差矩阵； $R_k$ 为系统观测噪声 $V_k$ 的 $m \cdot m$ 维对称正定方差矩阵； $\delta_{kj}$ 为克罗内克函数。

线性离散卡尔曼滤波状态一步预测方程为

$$\hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (11)$$

状态估计为

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k [Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}] \quad (12)$$

滤波增益矩阵为

$$K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \quad (13)$$

一步预测误差方差矩阵为

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k,k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k,k-1}^T \quad (14)$$

估计误差方差矩阵为

$$P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1} [I - K_k H_k]^T + K_k R_k K_k^T \quad (15)$$

观察分析卡尔曼滤波方程，任何系统给定初值  $\hat{X}_0$  和  $P_0$ ，结合  $k$  时刻的观测值  $Z_k$ ，就可以递推算法计算得到  $k$  时刻的状态估计  $\hat{X}_k$ 。

### 2.2 卡尔曼滤波状态方程与量测方程

海洋环境仿真中，由于垂直通道影响小且垂直通道和水平通道之间的耦合小，故忽略垂直通道。

取状态变量  $X$  为

$$X = [\delta V_x \quad \delta V_y \quad \varphi_x \quad \varphi_y \quad \varphi_z \quad \nabla_{s_x}^s \quad \nabla_{s_y}^s \quad \varepsilon_{s_x}^s \quad \varepsilon_{s_y}^s \quad \varepsilon_{s_z}^s]^T$$

系统状态方程为

$$\dot{X} = AX + BW \quad (16)$$

选主子惯导间的速度差为观测量，则观测方程为

$$Z = HX + v \quad (17)$$

式中： $v$  为满足  $E(vv^T) = R$  的零均值系统白噪声； $H$  为系统的量测矩阵。

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

卡尔曼滤波初始值为

$$X_0 = [0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$P_0 = \text{diag} \left\{ (0.1 \text{ m/s})^2, (0.1 \text{ m/s})^2, (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, (1.5^\circ)^2, (10\mu\text{g})^2, (10\mu\text{g})^2, (0.01^\circ/\text{h})^2, (0.01^\circ/\text{h})^2, (0.01^\circ/\text{h})^2 \right\}$$

$$Q_0 = \text{diag} \left\{ (10\mu\text{g})^2, (10\mu\text{g})^2, (0.005^\circ/\text{h})^2, (0.005^\circ/\text{h})^2, (0.005^\circ/\text{h})^2 \right\}$$

$$R_0 = \text{diag} \left\{ (0.1 \text{ m/s})^2, (0.1 \text{ m/s})^2 \right\}$$

## 3 不同海况等级传递对准仿真

### 3.1 仿真条件

海浪摇摆产生的三轴运动属于正弦函数，其数学模型为

$$\begin{cases} \phi = \phi_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_\phi} t + \varphi_\phi\right) \\ \theta = \theta_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_\theta} t + \varphi_\theta\right) \\ \varphi = \varphi_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_\varphi} t + \varphi_\varphi\right) + k \end{cases} \quad (18)$$

某舰六自由度模型由龙格-库塔法解出微分方程，以不同海况进行分级，其仿真条件见表2，不同海况下横摇、纵摇、艏摇角度幅值见表3。

表2 仿真条件

Tab.2 Simulation conditions

仿真条件	仿真参数
舰船初始经度	$\lambda = 126.67^\circ$
初始纬度	$\phi = 45.78^\circ$
重力加速度	$g = 9.78049 \text{ m/s}^2$
地球自转角速度	$w_{ie} = 7.27220417 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$
地球半径	$Re = 6378393.0 \text{ m}$
初始航向	$k = 30^\circ$
初始失准角	$(1^\circ \quad 1^\circ \quad 1^\circ)^T$
机载惯导加速度计常值偏置	$10^{-4} \text{ g}$
机载惯导加速度计随机漂移	$10^{-5} \text{ g}$
机载惯导加速度计刻度因数误差	$10^{-4}$
机载惯导陀螺仪常值偏置	$0.01^\circ/\text{h}$
机载惯导陀螺仪随机漂移	$0.001^\circ/\text{h}$
机载惯导陀螺仪刻度因数误差	$10^{-4}$
仿真时间	$300 \text{ s}$

表3 不同海况等级下的横摇纵摇艏摇角度幅值

Tab.3 Amplitude of roll pitch and yaw angle at different sea state grades (°)

海况等级	横摇 $\phi_m$	纵摇 $\theta_m$	艏摇 $\varphi_m$
三级	1.25	1.01	1.03
四级	2.71	1.71	1.92
五级	5.62	2.91	3.36
六级	7.47	3.15	4.15
七级	9.84	5.27	6.11

### 3.2 杆臂效应对传递对准的影响

考虑杆臂效应对传递对准的影响，设杆臂长度为  $(1 \quad 1 \quad 1)^T$ ，图1为五级海况时加速度计输出。

从图1中可以发现加速度计输出曲线波动幅值较大，将天向加速度数值进行提取，天向加速度数值分级统计见表4。

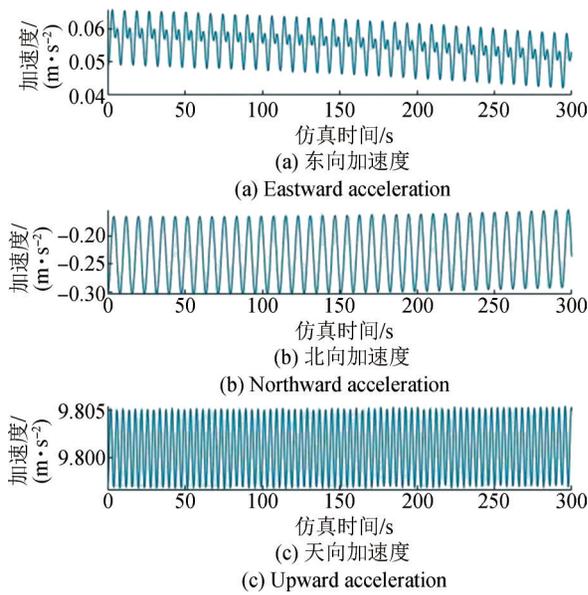


图1 五级海况时加速度计输出  
Fig.1 Accelerometer output at grade five sea state

表4 不同海况等级下天向加速度范围  
Tab.4 Ranges of upward acceleration at different sea state grades

海况等级	天向加速度/(m·s <sup>-2</sup> )
一级	9.790~9.819
二级	9.763~9.844
三级	9.763~9.848
四级	9.745~9.854
五级	9.718~9.854
六级	9.713~9.860
七级	9.706~9.865
八级	9.699~9.873
九级	9.697~9.882

从表4可以得出，一级海况时波动幅值为0.029，每一级海况的波动幅值都在增大，到达九级海况时波动幅值达到0.185，从一级海况到九级海况，天向加速度输出显著变化。

由此可见，加速度计的输出受海况影响而不稳定，产生的等效杆臂效应对传递对准的影响较大，使系统整体加速度计输出波动变化明显，呈发散状态不利于对准，因此在实际对准中需要对杆臂效应进行补偿。

### 3.3 杆臂效应补偿方法

#### 3.3.1 巴特沃斯低通滤波法

卡尔曼滤波用k-1时刻的最优估计预测k时刻的状态变量，新的最优估计是根据上一最优估计

预测得到的，并加上已知外部控制量的修正，因而新的不确定性由上一不确定性预测得到，并加上外部环境的干扰，

可以考虑采取更优化的杆臂效应补偿方法。

巴特沃斯滤波器的特点是通频带内的频率响应曲线最大限度平坦，在阻频带则逐渐下降为零，且频率特性曲线无论在通带内还是阻带内都是频率的单调函数。当通带的边界处满足指标要求时，通带内留有裕量。因此可用较低阶数的系统将精确度均匀的分布在通带或阻带内。

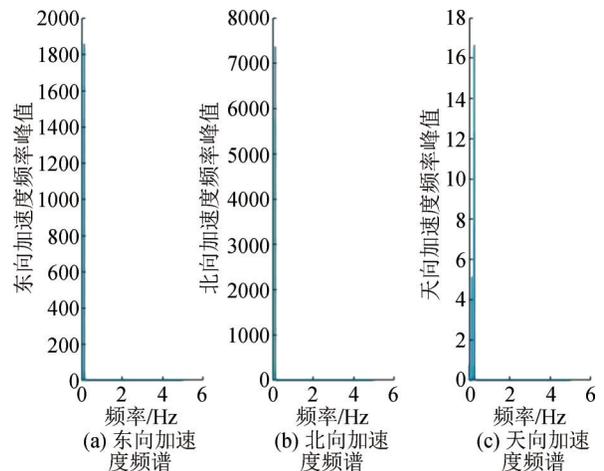


图2 杆臂效应加速度频谱分析  
Fig.2 Spectral analysis of acceleration of lever arm effect

杆臂效应加速度频谱分析如图2所示，由频谱分析可选取通带截止频率0.02 Hz，阻带截止频率0.5 Hz，通带衰减不得高于3 db，阻带衰减不得低于40 db。

采用二阶巴特沃斯低通滤波器进行滤波<sup>[10]</sup>

$$G(Z) = \frac{0.2453 \times 10^{-3} + 0.4906 \times 10^{-3} Z^{-1} + 0.2453 Z^{-2}}{1 - 1.9551 Z^{-1} + 0.9562 Z^{-2}} \quad (19)$$

滤波器方程为

$$\begin{bmatrix} x_1(n+1) \\ x_2(n+1) \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \end{bmatrix} + bu(n) \quad (20)$$

输出方程为

$$y(n) = c \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \end{bmatrix} + du(n) \quad (21)$$

其中， $a = \begin{bmatrix} 0.9557 & -0.0310 \\ 0.0310 & 0.9995 \end{bmatrix}$ ， $b = \begin{bmatrix} 0.0438 \\ 0.0007 \end{bmatrix}$ ， $c = [0.0110 \quad 0.7069]$ ， $d = 2.4531 \times 10^{-4}$ 。

滤波后五级海况加速度计输出如图3所示。

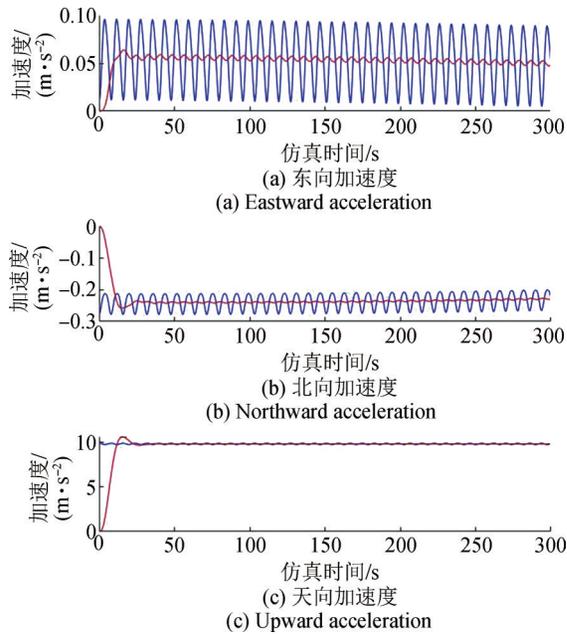


图3 巴特沃斯低通滤波前后五级海况加速度计输出  
Fig.3 Accelerometer output at grade five sea state before and after Butterworth low-pass filtering

通过对比不同海况等级下的仿真图，可以发现三轴失准角均呈现收敛状态，滤波前后加速度计输出范围明显缩小，取  $t=250\text{ s}$  时三轴失准角进行分析如图4，仿真数据见表5。

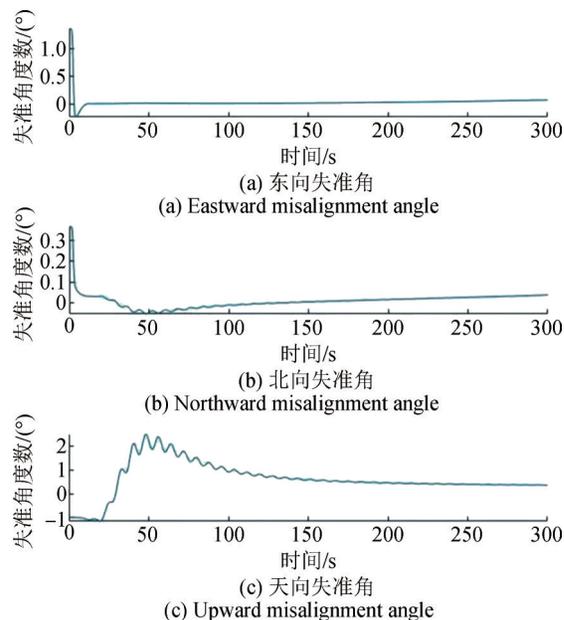


图4 巴特沃斯低通滤波后五级海况三轴失准角变化曲线  
Fig.4 Changing cure of three-axis misalignment angle at grade five sea state after Butterworth low-pass filtering

表5 不同海况等级下三轴失准角大小

Tab.5 Values of triaxial misalignment angle

at different sea state grades (°)

海况等级	水平失准角 $\varphi_e$	北向失准角 $\varphi_n$	方位失准角 $\varphi_u$
1级	0.0053	0.0181	0.1863
2级	0.0174	0.0191	0.2342
3级	0.0208	0.0203	0.2517
4级	0.0299	0.0242	0.2764
5级	0.0385	0.0332	0.3041
6级	0.0459	0.0362	0.3420
7级	0.0484	0.0417	0.3854
8级	0.0508	0.0590	0.4575
9级	0.0585	0.0742	0.5939

由图3图4和表5结合可知，四级海况时水平失准角  $\varphi_e$  在9.8 s后逐渐趋于稳定， $\varphi_n$  在78 s后逐渐趋于稳定，稳定前波动幅值在  $-0.009 \sim 0.0262$  之间变化，幅值变化较未滤波曲线明显减弱，方位失准角  $\varphi_u$  在0 s到150 s内振动剧烈，后在250 s处仍存在  $0.2764^\circ$  失准角。

五级海况时水平失准角  $\varphi_e$  在11.6 s逐渐趋于稳定， $\varphi_n$  在109 s后逐渐趋于稳定，稳定前波动幅值在  $-0.0169 \sim 0.0321$  之间变化，幅值变化较未滤波曲线明显减弱，方位失准角  $\varphi_u$  在0 s到200 s内振动剧烈，后在250 s处仍存在  $0.3041^\circ$  失准角。

六级海况时水平失准角  $\varphi_e$  在13 s逐渐趋于稳定， $\varphi_n$  在122 s后逐渐趋于稳定，稳定前波动幅值在  $-0.027 \sim 0.03$  之间变化，幅值变化较未滤波曲线明显减弱，方位失准角  $\varphi_u$  在0 s到200 s内振动剧烈，后在250 s处仍存在  $0.3420^\circ$  失准角。

七级海况时水平失准角  $\varphi_e$  在13.8 s逐渐趋于稳定， $\varphi_n$  在142 s后逐渐趋于稳定，稳定前波动幅值在  $-0.0385 \sim 0.039$  之间变化，幅值变化较未滤波曲线明显减弱，方位失准角  $\varphi_u$  在0 s到220 s内振动剧烈，后在250 s处仍存在  $0.3854^\circ$  失准角。

八级海况时水平失准角  $\varphi_e$  在15.9 s逐渐趋于稳定， $\varphi_n$  在180 s后逐渐趋于稳定，稳定前波动幅值在  $-0.068 \sim 0.065$  之间变化，幅值变化较未滤波曲线明显减弱，方位失准角  $\varphi_u$  在0 s到250 s内振动剧烈，后在250 s处仍存在  $0.4575^\circ$  失准角。

随着海况等级的提高，三轴失准角呈现逐渐增大的趋势，以五级海况为例，东向失准角的估计误差为  $0.0385^\circ$ ，北向失准角的估计误差为

0.0332°, 方位失准角的估计误差为0.3041°, 属于估计误差范围内, 可认为五级海况位进行速度匹配传递对准的最高等级海况。二阶巴特沃斯低通滤波器能够滤去等效杆臂效应引起的加速度分量, 但是无法完全滤去引起的有害加速度, 可以采用计算补偿法对等效杆臂效应进行补偿, 计算补偿后精度相比卡尔曼滤波、巴特沃斯低通滤波更高且收敛时间更短<sup>[12-14]</sup>。

### 3.3.2 计算补偿法

卡尔曼滤波中观测方程选取主子惯导的速度差, 但未补偿速度差观察量中杆臂效应速度项, 使得杆臂效应速度一直存在影响系统精度。计算补偿法通过在速度差观测量中采取补偿杆臂效应速度来提高系统精度。

主子惯导杆臂速度为

$$\bar{v}_r = \bar{\omega} \times r_p \quad (22)$$

主子惯导杆臂速度在导航坐标系中的投影为

$$\bar{v}_r^n = \bar{\omega}^n \times \bar{r}_p^n = C_b^n(\bar{\omega}^b \times \bar{r}_p^b) \quad (23)$$

又

$$\bar{\omega}^b \times \bar{r}_p^b = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_y r_z - \omega_z r_y \\ \omega_z r_x - \omega_x r_z \\ \omega_x r_y - \omega_y r_x \end{bmatrix} \quad (24)$$

因此

$$\bar{v}_r^n = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_y r_z - \omega_z r_y \\ \omega_z r_x - \omega_x r_z \\ \omega_x r_y - \omega_y r_x \end{bmatrix} \quad (25)$$

补偿掉杆臂效应速度项后, 速度误差观察量为

$$\delta \bar{v}^n = \bar{v}_s^n - \bar{v}_m^n - \bar{v}_r^n \quad (26)$$

以五级海况为例, 对比分析三种滤波方法下不同方向的加速度计输出波形如图5所示。(蓝线为卡尔曼滤波, 红线为巴特沃斯低通滤波, 黑线为计算补偿法后的卡尔曼滤波。

从输出波形可以看出, 计算补偿法补偿精度和收敛速度相较于卡尔曼滤波和巴特沃斯低通滤波器效果更好, 收敛时间更短, 整个滤波更为稳定。究其原因, 计算补偿法要求事先测得杆臂长度, 理想条件下计算补偿效果更好, 如果测量杆臂长度存在较大偏差则结果可能不理想, 因此存在局限性。

计算补偿法通过严格的数学计算在速度差观测量中采取补偿杆臂效应速度, 但不能完全补偿杆臂效应。

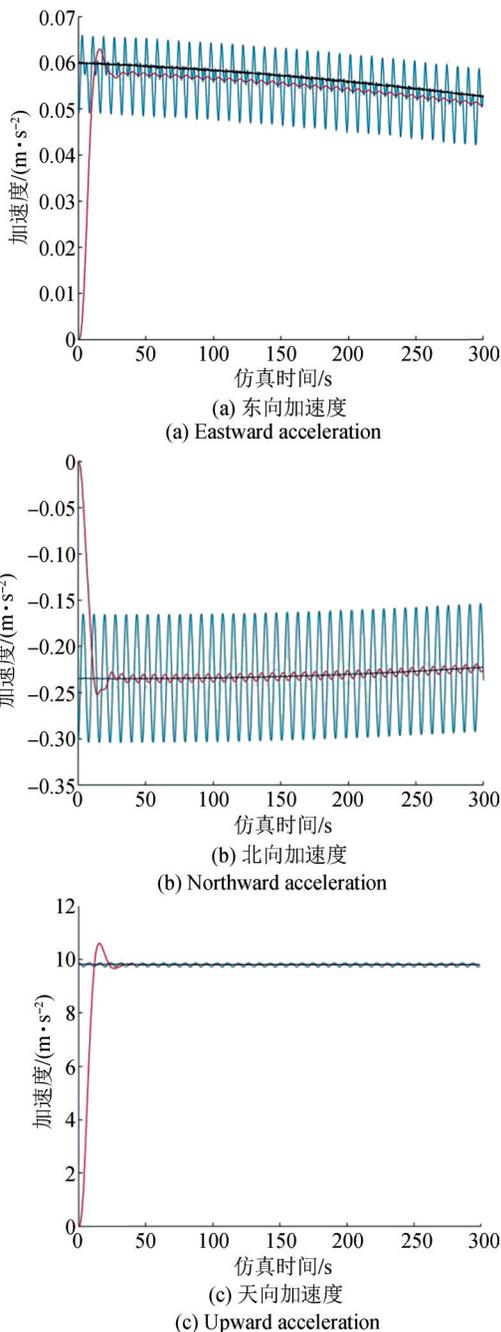


图5 三种滤波方法下,不同方向的加速度计输出波形  
Fig.5 Output waveforms of accelerometers in different directions with three filtering methods

## 4 结论

针对不同海况等级对传递对准杆臂效应影响效果的问题, 本文基于分离建模的思想建立船舶六自由度模型, 进而建立等效杆臂效应模型, 采用三种滤波方法补偿杆臂效应, 补偿结果表明:

- 1) 不同海况等级对传递对准产生的杆臂效应

不同,海况等级越高,杆臂效应越明显,越不容易补偿,对准精度和对准时间均超过快速对准要求。

2) 对比分析三种补偿方法:速度匹配传递对准采用卡尔曼滤波方法进行滤波不能完全滤去等效杆臂效应误差,需要进行进一步的补偿;采用二阶巴特沃斯低通滤波器能使杆臂效应得到收敛,但是失准角仍有进一步的收敛空间,可采用计算补偿法对杆臂效应进行补偿;计算补偿法直接补偿主子惯导的速度差,不能完全补偿杆臂效应,但其补偿精度和收敛速度更好,在具体应用中固定主子惯导空间位置,测量出实际杆臂长度,可以得到更为精确的补偿。

3) 根据仿真结果分析,五级海况为进行速度匹配传递对准的最高等级海况,实际对准低一个海况等级下作为参考,建议实际对准中将四级海况定为传递对准最高等级海况。

传递对准精度受惯性器件误差、数据传输时延误差、舰船的挠曲变形和杆臂效应影响,本文考虑杆臂效应影响,后续研究可以综合考虑误差情况。

### 参考文献

- [ 1 ] DMITRIYEV S P, SFIPMAOV O A, SHEPEL S V. Nonlinear filtering methods application in INS alignment [C]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1997, 33(1): 260-272.
- [ 2 ] ROGERS R. Velocity-plus-rate matching for improved tactical weapon rapid transfer alignment [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 1991: 1580-1588.
- [ 3 ] SEO J, LEE J G, Chan G P. Leverarm compensation for integrated navigation system of land vehicles [C]. Conference on Control Applications, Proceedings of 2005 IEEE Conference, 2005: 523-528.
- [ 4 ] 李蓓. 传递对准中杆臂效应误差的补偿研究[J]. 火箭与制导学报, 2008.
- LI B. Compensation of effect error of beam arm in transfer alignment [J]. Journal of projectiles, rockets, missiles and guidance, 2008. (in Chinese)
- [ 5 ] 秦永元,朱新颖,赵长山,等. 舰载机捷联惯导自对准方案设计仿真[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(1): 28-33. (in Chinese)
- QIN Y Y, ZHU X Y, ZHAO C S, et al. Design and simulation on SINS self-alignment for carrier born aircraft [J]. Journal of inertial technology, 2008, 16(1): 28-33. (in Chinese)
- [ 6 ] 王勇军,徐景硕,李路苹. 一种新的舰载机惯导初始自对准方法[J]. 测控技术, 2013, 32(11): 147-150.
- WANG Y J, XU J S, LI L P. New method of initial self-alignment for SINS of carrier plane [J]. Measurement control technology, 2013, 32(11): 147-150. (in Chinese)
- [ 7 ] 陈万紫,张培珍,黄健儿,等. 动态海面上方船舶六自由度运动仿真[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(1): 40-45.
- CHEN W Z, ZHANG P Z, HUANG J E, et al. Study on the simulation of six degrees of freedom motion of ships on the sea surface [J]. Journal of ocean technology, 2019, 38(1): 40-45. (in Chinese)
- [ 8 ] 周昭明,盛子寅,冯悟时. 多用途货船的操纵性预报计算[J]. 船舶工程, 1983(6): 4, 27-35, 42.
- ZHOU Z M, SHENG Z Y, FENG W S. Maneuverability prediction calculation for multi-purpose cargo ship [J]. Marine engineering, 1983. (in Chinese)
- [ 9 ] 徐静. 船舶在波浪中的六自由度操纵运动模型研究[D]. 上海交通大学, 2014.
- XU J. Research on 6-dof numerical model of ship maneuvering motion in waves [D]. Shanghai Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [ 10 ] 张秀凤,尹勇,金一丞. 规则波中船舶运动六自由度数学模型[J]. 交通运输工程学报, 2007(3): 40-43.
- ZHANG X F, YIN Y, JIN Y C. Ship motion mathematical model with six degrees of freedom in regular wave [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2007(3): 40-43. (in Chinese)
- [ 11 ] 甘帅. 速度匹配传递对准的杆臂效应补偿研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- GAN S. Research on arm effect compensation of speed matching transfer alignment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [ 12 ] 师超. 风浪中船舶操纵运动仿真数学模型研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2011.
- SHI C. Research on simulation mathematical model of ship handling movement in wind and waves [D]. Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [ 13 ] 李良君,隋波,高伟,等. 惯导传递对准中的两种滤波算法对比分析[J]. 火箭与制导学报, 2008, 6: 14-17.
- LI L J, SUI B, GAO W, et al. Comparison of two filter-

- ing algorithms for ins rapidly ittransfer alignment [J]. Journal of missiles, arrows and guidance, 2008, 6: 14-17. (in Chinese)
- [14] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004: 286-310. QIN Y Y, ZHANG H Y, WANG S H. Kalman filter and integrated navigation principle [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004: 86-310. (in Chinese)
- [15] 党雅娟, 鲁浩, 庞秀枝. 空空导弹捷联惯导系统空中标定技术研究 [J]. 计测技术, 2010, 30(4): 23-26, 52. DANG Y J, LU H, PANG X Z. Research on in-flight calibration method of sins on air-to-air missile [J]. Metrology and measurement technology, 2010, 30(4): 23-26, 52. (in Chinese)
- [16] 赵雪米, 张蕾, 李四海. 分立标定中捷联惯导标定参数间的关联性影响 [J]. 计测技术, 2019, 39(3): 34-40. ZHAO X M, ZHANG L, LI S H. Coupling effects of sins calibration parameters in discrete calibration [J]. Metrology and measurement technology, 2019, 39(3): 34-40. (in Chinese)

(本文编辑:朱俊真)



**第一作者:**陈永展(1999—),男,汉族,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向为飞行器故障检测。