

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210814

顾及洋流速度的激光罗经对准方法研究*

赵英伟^{1,2}, 吴宥霖^{1,2}, 谢梓菡³, 郑佳兴^{1,2}, 谭文锋^{1,2}

(1. 国防科技大学前沿交叉学科学院 长沙 410073; 2. 国防科技大学南湖之光实验室 长沙 410073;
3. 国防科技大学气象海洋学院 长沙 410073)

摘要: 在外阻尼系统中, 外速度误差会对罗经对准回路的对准精度产生直接影响。本文结合罗经对准回路的特点, 理论推导了不同形式洋流速度误差对对准精度的影响, 并进行了仿真研究。由于洋流速度在固定海域满足一定规律, 因此可通过提前测绘的方式对洋流速度进行建模并用于后续补偿。本文设计了通过 GNSS/INS 组合导航及测速仪联合测量当地海域洋流速度的方法, 并依据测量结果建立了洋流速度模型。在罗经对准过程中, 利用建立的洋流速度数学模型对测速仪中包含的洋流速度误差进行补偿。海上实验结果表明, 利用建立的洋流速度模型进行速度补偿后, 罗经对准系统的水平精度提升了 36", 航向精度提升了 25", 水平收敛速度提升了 25 min, 有效提升了罗经对准回路的姿态解算效果。

关键词: 罗经对准; 洋流速度; 测速仪; GNSS/INS 组合导航

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 413.10

Research on the laser gyrocompassing method considering sea current velocity

Zhao Yingwei^{1,2}, Wu Youlin^{1,2}, Xie Zihan³, Zheng Jiaying^{1,2}, Tan Wenfeng^{1,2}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
3. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the external damping system, the external velocity error has direct influence on the alignment result of the gyrocompassing loop. Based on the characteristics of the gyrocompassing loop, this manuscript deduces the effect of different kinds of sea current velocities to the alignment result in theory, which is further verified and analyzed through simulation. Since the sea current velocity satisfies some mathematical model in a specific sea area, it is possible to be measured and modeled before applied to the damping system for the compensation purpose. Therefore, a current velocity calculation method is introduced by directly comparing the velocity estimated in GNSS/INS integration to the velocimeter's output. The sea current velocity model is formulated, which is based on the calculation result. During the gyrocompassing process, the velocity model is further used to compensate the velocimeter's output in the specific area. The marine experimental results show the effectiveness of the proposed method on improving the attitude accuracy and convergence speed. The horizontal attitude accuracy is improved by 36", and the yaw angle is improved by 25". The horizontal convergence speed is improved by 25 minutes.

Keywords: gyrocompassing; current velocity; velocimeter; GNSS/INS integration

0 引 言

惯导及其组合导航系统是卫星拒止情况下的一种主

要导航定位及姿态解算手段^[1-3]。作为惯导及其组合导航系统的一种工作模式, 罗经对准基于经典控制理论, 通过在惯导系统中引入阻尼网络, 利用回路的反馈抑制惯导解算中产生的周期振荡误差, 将惯导系统从临界稳定状态向稳定状态转换, 从而实现数学平台坐标系对导航

收稿日期: 2022-12-02 Received Date: 2022-12-02

* 基金项目: 国防科技大学自主创新科研基金(23-ZZCX-JDZ-20)项目资助

坐标系的对准。由于成本低、操作简单,罗经对准多应用于小型军舰、水下潜航器等运动平台^[4]。

罗经对准分为内阻尼和外阻尼2种模式。内阻尼通常应用于载体运动加速度较小的情况,可有效抑制系统中的振荡性误差。但在加速、转弯等大机动条件下,会引入超调误差。李魁等^[5]设计了模糊控制器对载体运动状态进行判断,作为无阻尼和内阻尼状态切换的判据,从而提高惯导系统的长航时导航精度。覃方君等^[6]研究阻尼网络参数与阻尼比的关系,设计了随阻尼比变化的阻尼网络参数。何泓洋等^[7]在导航系统中同时运行无阻尼和阻尼模式,根据导航状态在导航过程中对两种模式进行切换,以实现抑制系统超调误差的目的。为了设计合理的阻尼状态切换阈值,杜亚玲等^[8]基于阻尼切换判据设计了模糊判别器对载体运动状态进行判断。奔粤阳等^[9]基于内阻尼网络设计了逆向解算和正向解算结合的循环算法,从而起到有效缩短误差收敛时间的效果。

与内阻尼相比,外阻尼技术引入了参考速度、位置等来抑制系统中振荡性误差^[10],并可以有效抑制载体机动产生的失准角误差。刘为任等^[11]根据导航输出与外速度差值设计了自适应阻尼网络,该网络可以实时校正阻尼系数,使舰船机动造成的系统误差最小。李魁等^[12]提出一种适用于长航时惯导系统的全阻尼综合校正算法,利用不定期获取的外部参考位置计算导致导航误差发散的陀螺漂移并进行修正,从而更好保证惯导系统的工作自主性。严恭敏等^[13]分析了仅能提供外定位参考条件下的外阻尼网络设计,避免了定位信号差分求取速度造成的噪声放大负面效应。赵琳等^[14]利用双滤波器串行方法,一套导航解算正常运行,另一套导航解算延时半个振荡周期进行,最后进行数据融合达到缩短误差收敛时间的效果。Gao等^[15]设计了前向及后向处理方法,并将其用于罗经对准过程来降低固定惯性传感器误差对罗经回路的影响,可以兼顾对准结果的收敛速度及精度,实现二者的有机统一。Ben等^[16]将后向回路中的高阶项转换为一阶微分方程来提高罗经对准的解算效率,通过这些改进可有效提升系统的对准速度,实现快速对准。针对舰船、潜艇等长航时慢速运动平台在极区的导航定位及对准问题,Ben等^[17]基于Kalman滤波技术提出了一种相对速度辅助的三阶网格阻尼方法。

舰载罗经系统采用多普勒测速仪(Doppler velocity log, DVL)、电磁计程仪等测速设备的输出作为外速输入信息对惯导回路进行阻尼。受限于DVL的作用距离,在深度较深的海域DVL输出声波无法打到海底^[18]。而电磁计程仪输出则直接受洋流速度影响,系统的输出即为包含洋流速度误差的输出,需要进行补偿^[19-20]。

本文从外阻尼回路入手,分析了几种形式的速度误差对罗经对准结果的影响。根据测速仪的速度输出特

点,提出基于全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)/惯性导航系统(inertial navigation system, INS)组合导航和测速仪相结合的洋流速度估计方法,通过对特定海域的洋流速度进行建模,并以此模型对洋流速度进行补偿。海上动态试验结果验证了该方法的有效性及可行性。与不进行洋流速度补偿的罗经对准系统相比,该方法可有效提升姿态的收敛速度及精度,可应用卫导拒止环境下的对准及姿态解算问题。

1 测速误差对罗经对准的影响

1.1 罗经对准原理

由于罗经对准中东向和北向阻尼网络具有相似性,本文以东向阻尼网络为例,分析洋流速度对对准结果的影响。设测速设备输出的速度为 v_r ,测速误差为 δv_r ,则测速设备的输出可以表示为:

$$v_r = v' + \delta v_r \quad (1)$$

引入外速度补偿后,根据梅森增益公式,东向回路的传递函数可以表示为:

$$\phi_x(s) = -\frac{[1 - H_y(s)]}{R[s^2 + H_y(s)\omega_s^2]} \delta \dot{v}_{rN}(s) - \frac{[1 - H_y(s)]s}{R[s^2 + H_y(s)\omega_s^2]} \delta v_{rN}(0) \quad (2)$$

式中: R 为地球半径($R=6.378 \times 10^6$ m), $H_y(s)$ 为设计的阻尼补偿网络, $\delta v_{rN}(0)$ 为外速度初始误差, $\delta \dot{v}_{rN}$ 为外速度误差变化率。

式(2)表明加入外速度补偿后,系统水平失准角主要与外速度误差变化率和外速度初始误差有关,与载体的加速度无关。与内阻尼相比,由于 δv_r 一般比 v_N 要小,当外速度传感器精度较高时,采用外阻尼的方式可以有效抑制载体机动产生的失准角误差。载体不同速度和加速度引起的外阻尼系统失准角误差可忽略。

1.2 测速误差对外阻尼网络的影响分析

舰船用多普勒计程仪工作在水跟踪模式时,DVL的主要测速误差即是洋流速度。而电磁计程仪的测速信息直接包含洋流速度。在极端条件下,渤海的表层水流速度可达3.47 m/s,黄海的表层水流速度可达2.88 m/s,东海的表层水流速度可达3.26 m/s^[20]。因此,需要对洋流速度对阻尼网络的影响进行分析。

洋流受到温度、气候、潮汐等因素的影响,测速误差的形式主要有常值性速度误差、斜坡误差、周期振荡误差等^[21]。由于测速仪存在刻度系数误差,舰船匀速直航时测速误差可近似为常值速度误差。舰船做加速转弯运动时,测速误差可以近似为斜坡性速度误差。由于小型舰船加速转弯时间较短,该误差的效果与常值速度误差类

似。当海况很差船体发生摇摆时,测速仪会出现频率较高的振荡形式误差,误差频率和幅值与风浪大小和舰船航行速度有关。因此,测速误差主要考虑:常值性速度误差和周期性振荡误差。

忽略惯性器件误差的耦合,并且设置零初始条件。本文重点分析外速度误差对俯仰角以及航向角误差的影响。根据梅森增益公式,俯仰角误差 ϕ_x 与外速度误差之间的传递函数为:

$$\frac{\phi_x(s)}{\delta v_r} = \frac{[1 - H(s)]s}{R[s^2 + H(s)\omega_s^2]} \quad (3)$$

式中: $H(s)$ 为设计的水平阻尼网络。

航向角误差 ϕ_z 与外速度误差之间的传递函数为:

$$\frac{\phi_z(s)}{\delta v_r} = \frac{-\omega_{ie}[1 - H(s)][1 - Y(s)]\cos Ls^2}{R\{s^4 + [H(s)\omega_s^2 + \omega_{ie}^2\cos^2 L]s^2 + \cos^2 LY(s)\omega_{ie}^2 H(s)\omega_s^2\}} \quad (4)$$

式中: ω_s^2 表示舒拉角频率的平方($\omega_s^2 = 1.5376 \times 10^{-6}$ rad/s), ω_{ie} 表示地球自转角速率($\omega_{ie} = 7.2921 \times 10^{-5}$ rad/s), L 和 λ 分别代表当地的纬度和经度信息, $Y(s)$ 为设计的方位阻尼网络。

代入相关参数后,设计的水平阻尼网络 $H(s)$,如式(5)所示。

$$H_y(s) = \frac{2.8167s + 1.69 \times 10^{-3}}{s + 1.69 \times 10^{-3}} \quad (5)$$

设计的方位阻尼网络 $Y(s)$,如式(6)所示。

$$Y(s) = \frac{1.669(s^2 + 7.173 \times 10^{-5}s + 2.153 \times 10^{-9})}{s^2 + 1.2 \times 10^{-4}s + 3.6 \times 10^{-9}} \quad (6)$$

1) 常值性速度误差

当外速度误差为常值误差时,设 $\delta v_r = a$ 。假设输入信号为阶跃函数,则对 δv_r 取拉普拉斯变换得:

$$\delta v_r(s) = \frac{a}{s} \quad (7)$$

将式(7)分别带入式(3)、(4)中得到俯仰角和航向角误差的表达式为:

$$\phi_x(s) = \frac{[1 - H(s)]a}{R[s^2 + H(s)\omega_s^2]} \quad (8)$$

$$\phi_z(s) = \frac{-\omega_{ie}[1 - H(s)][1 - Y(s)]\cos Ls^2 a}{Rs\{s^4 + [H(s)\omega_s^2 + \omega_{ie}^2\cos^2 L]s^2 + \cos^2 LY(s)\omega_{ie}^2 H(s)\omega_s^2\}} \quad (9)$$

常值误差幅值分别取 0.1、0.5、1 m/s。图 1、2 为这 3 种不同常值外速度误差信号对俯仰角误差和航向角误差的影响。

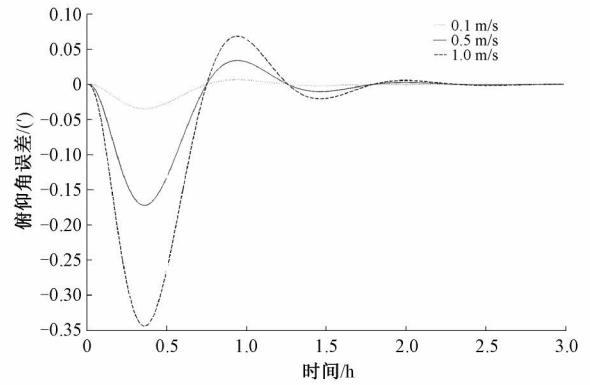


图 1 外速度常值误差对俯仰角的影响

Fig. 1 Effect of constant velocity error to pitch estimation

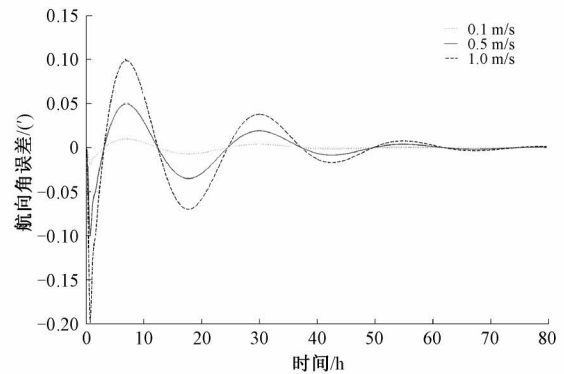


图 2 外速度常值误差对航向角的影响

Fig. 2 Effect of constant velocity error to yaw estimation

从图 1、2 中可以看出:常值外速度误差不会对水平角与航向角的稳态误差造成影响,但外速度误差幅值越大,误差收敛时间越长。外速度误差还会给系统带来很大的超调误差,超调误差的最大峰值和常值性外速度误差大小成正相关。

2) 周期性振荡误差

舰船长时间航行在洋流周期性变化的海域时,经常会遇到全日潮(变化周期 24 h)和半日潮(变化周期 12 h),洋流速度表现为周期性变化^[21]。当外速度误差为周期性振荡误差时,设 $\delta v_r = c \cdot \sin(kt)$, k 为振荡频率, c 为振荡幅值。对 δv_r 进行拉普拉斯变换得:

$$\delta v_r(s) = \frac{ck}{s^2 + k^2} \quad (10)$$

将式(10)分别代入式(3)和(4)中,得到:

$$\phi_x(s) = \frac{kc[1 - H(s)]s}{R[s^2 + H(s)\omega_s^2](s^2 + k^2)} \quad (11)$$

$$\phi_z(s) = \frac{-kc\omega_{ie}[1 - H(s)](1 - Y)\cos Ls^2}{R(s^2 + k^2)\{s^4 + [H(s)\omega_s^2 + \omega_{ie}^2\cos^2 L]s^2 + \cos^2 LY\omega_{ie}^2 H(s)\omega_s^2\}} \quad (12)$$

设误差振荡幅值为 $c = 1 \text{ m/s}$, 振荡频率 k 分别取 0.0005 、 0.00124 、 0.005 和 0.05 rad/s , 即振荡周期分别为 3.45 h 、 84.4 min 、 20.9 min 和 2.1 min 。周期振荡外速度误差对俯仰角误差和航向角误差的影响, 如图 3、4 所示。

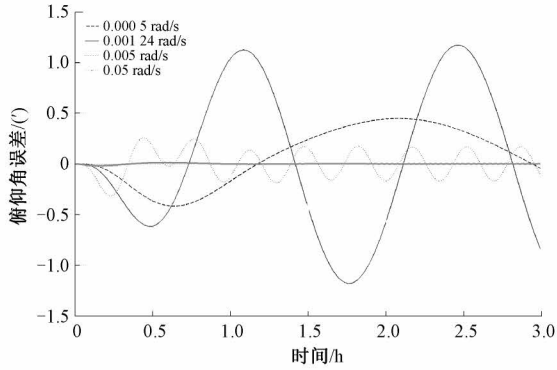


图 3 外速度周期误差对俯仰角的影响

Fig. 3 Effect of periodic velocity error to pitch estimation

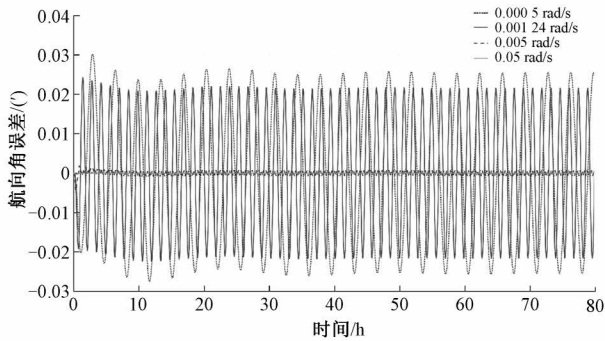


图 4 外速度周期误差对航向角的影响

Fig. 4 Effect of periodic velocity error to yaw estimation

从图 3、4 中可以看出, 外速度误差的振荡会引起俯仰角、航向角误差振荡, 振荡的幅值与外速度误差振荡频率直接相关。高频振荡误差产生的失准角误差较小。当周期振荡频率为 0.0005 rad/s 时航向误差角振荡幅值最大, 0.000124 rad/s 次之。这是由于这两个频率值与地球自转周期 (24 h) 和舒拉周期 (84.4 min) 接近, 系统此时发生了共振。通过对比几组试验结果可以看出: 0.0005 rad/s 频率对航向角误差的影响最大, 其次是 0.000124 rad/s ; 0.000124 rad/s 频率对俯仰角误差的影响最大, 其次是 0.0005 rad/s 。

从理论及仿真分析可以看出, 洋流速度误差对罗经对准误差有直接影响, 需要进行补偿才能满足高精度罗经对准的要求。

2 基于 GNSS/INS 组合导航和测速仪的洋流速度估计

2.1 洋流速度模型

设洋流的速度值为 v_s , 洋流方向与地理坐标系北向夹角为 θ , 则洋流速度在地理坐标系东向、北向上的投影 v_s^E, v_s^N 为:

$$\begin{cases} v_s^E = v_s \sin \theta \\ v_s^N = v_s \cos \theta \end{cases} \quad (13)$$

当船以偏航角 ψ 航行时, 在水跟踪模式下, 测速仪输出误差主要为洋流误差, 即:

$$\delta v_r = v_s \cos(\psi - \theta) = v_s^N \cos \psi + v_s^E \sin \psi \quad (14)$$

测速仪的安装误差、刻度因子误差等可以在试验前进行精确标定^[22], 则水跟踪模式下测速仪速度输出可以表示为:

$$v_r = v_{true}^b + \delta v_r = v_{true}^b + v_s^E \sin \psi + v_s^N \cos \psi \quad (15)$$

2.2 洋流速度估计方法

虽然洋流速度会随时间发生改变, 但是在一定海域、一定时间范围内, 洋流速度的大小与方向可近似认为满足一定模型^[23]。本文采用 GNSS/INS 组合导航系统的速度输出与测速仪的速度输出直接作差的方法来估算当前海域洋流速度并进行建模。如图 5 所示, GNSS/INS 组合导航系统输出的姿态先将测速仪的速度投影至导航坐标系, 再与组合导航系统输出的速度直接做差, 即可得到当前时刻洋流北向、东向的速度大小。通过对一定时间范围的洋流速度进行建模, 模型估计值即可作为后续外阻尼罗经对准中的速度修正信息, 从而对速度误差进行补偿。

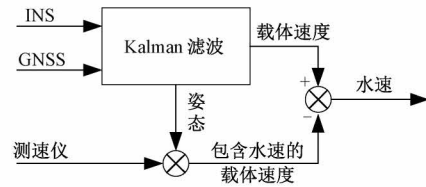


图 5 洋流速度估计方法

Fig. 5 Sea current velocity estimation method

其中, GNSS/INS 组合导航的状态量为 12 维误差状态量:

$$\mathbf{X} = [\phi_x \ \phi_y \ \phi_z \ \delta v_e \ \delta v_n \ \delta L \ \delta \lambda \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \nabla_x \ \nabla_y]^T \quad (16)$$

式中: ϕ_x, ϕ_y 和 ϕ_z 分别为地理坐标系东北天 3 个方向的姿态误差角, δv_e 和 δv_n 为速度误差, δL 和 $\delta \lambda$ 为纬度和经度误差, $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 和 ε_z 分别为 3 个方向的陀螺漂移, ∇_x 和 ∇_y 为水平方向上的 2 个加速度计零偏。系统误差状态方程为:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W} \quad (17)$$

状态矩阵 F 可以表示为:

$$F = \begin{bmatrix} \mathbf{AA} & \mathbf{AV} & \mathbf{AP} & -\mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \mathbf{VA} & \mathbf{VV} & \mathbf{VP} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{PV} & \mathbf{PP} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中:

$$\mathbf{AA} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin L + \frac{v_e \tan L}{R_N} & -\omega_{ie} \cos L - \frac{v_e}{R_N} \\ -\omega_{ie} \sin L - \frac{v_e \tan L}{R_N} & 0 & -\frac{v_n}{R_M} \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{v_e}{R_N} & \frac{v_n}{R_M} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{AV} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_M} \\ \frac{1}{R_N} & 0 \\ \frac{\tan L}{R_N} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{AP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\omega_{ie} \sin L & 0 \\ \frac{v_e \sec^2 L}{R_N} + \omega_{ie} \cos L & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{VV} = \begin{bmatrix} \frac{v_n \tan L}{R_N} & \frac{2\omega_{ie} \sin L + v_e \tan L}{R_N} \\ -2\left(\omega_{ie} \sin L + \frac{v_e \tan L}{R_N}\right) & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{VP} = \begin{bmatrix} 2\omega_{ie} v_n \cos L + \frac{v_e v_n \sec^2(L)}{R_N} & 0 \\ -\frac{v_e^2 \sec^2 L}{R_N} + 2\omega_{ie} \cos L & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{VA} = \begin{bmatrix} 0 & -f_u & f_n \\ f_u & 0 & f_e \end{bmatrix}, \mathbf{PV} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_M} \\ \frac{1}{R_M \cos L} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{PP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{v_e \sec L \tan L}{R_N} & 0 \end{bmatrix}$$

W 是系统噪声,为零均值高斯白噪声,可以表示为如下形式:

$$W = [\omega_{gx} \ \omega_{gy} \ \omega_{gz} \ \omega_{ax} \ \omega_{ay} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (19)$$

式中: ω_{gx} 、 ω_{gy} 和 ω_{gz} 分别为 3 个方向上的陀螺噪声, ω_{ax} 和 ω_{ay} 为水平方向上的加速度计噪声。

GNSS 速度与惯导系统解算的速度做差,作为 Kalman 滤波观测量,则量测方程可表示为:

$$Z = \begin{bmatrix} v_e - v_{ge} \\ v_n - v_{gn} \end{bmatrix} = \mathbf{HX} + \mathbf{V} \quad (20)$$

式中: H 为观测矩阵, V 为测量噪声矢量,由 GNSS 测速精度决定。

利用 Kalman 滤波输出的校正后的导航速度与相同时刻测速仪投影在导航坐标系下的速度作差,得到洋流的速度如式(21)所示,其中测速仪速度在导航坐标系下的投影为:

$$\begin{cases} v_s^E = v_e - v_{re}^n = v_s \sin \theta + \delta v_{se} \\ v_s^N = v_n - v_{rn}^n = v_s \cos \theta + \delta v_{sn} \end{cases} \quad (21)$$

式中: δv_{se} 和 δv_{sn} 为估算洋流速度与真实洋流速度的误差值,包含了测速仪与组合导航系统解算的速度误差。文献[23]将洋流速度建模为随机模型。本文采用直接拟合的方法建立洋流速度模型,以避免随机误差模型引入的额外噪声,从而对罗经对准回路造成影响。

3 试验结果

采用某次海上试验实测数据进行离线解算来评估顾及洋流速度的罗经系统对准精度。海上试验地点为我国南海某海域,舰船上安装有某型号激光陀螺捷联惯导系统、GNSS 接收机、卫导天线以及电磁计程仪。所用设备的指标参数如表 1 所示。

表 1 试验设备精度指标

Table 1 Specification of experimental device

试验测试设备	精度
陀螺/($^{\circ} \cdot h^{-1}$)	0.015
加速度计/mgal	200
电磁计程仪/Kn	± 0.3

GNSS/INS 组合导航系统输出的姿态作为罗经对准的姿态参考真值。实测数据总时长为 9.5 h,载体的运动轨迹和运动速度如图 6、7 所示。

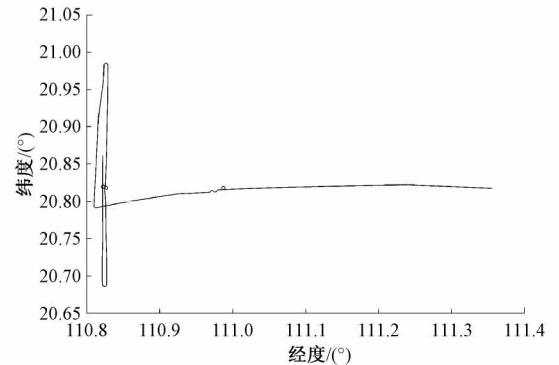


图 6 试验轨迹

Fig. 6 Trajectory of the experiment

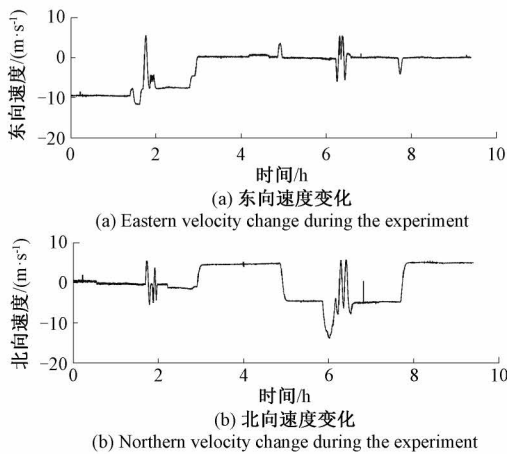


图 7 试验过程中速度曲线
Fig. 7 Velocity change during the experiment

从图 6 和 7 中可以看出,试验过程中舰船的运动方式包含有加速、匀速运动、转弯等运动状态。该轨迹基本包含了舰船在海上航行的所有运动方式,能够有效检验算法的对准效果。

3.1 洋流速度估计实验

船上电磁计程仪输出的速度为对水速度。从图 7 可以看出海试数据的前一个小时,舰船进行匀速直航运动,利用这一小时的数据对洋流速度进行估算。洋流速度解算结果如图 8 所示。

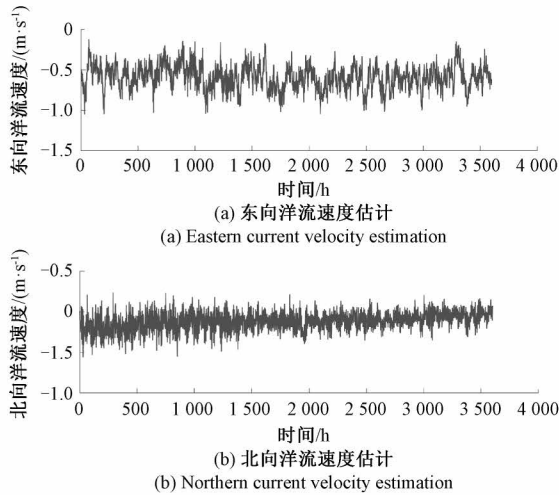


图 8 洋流速度估计
Fig. 8 Estimated current velocity

基于时间对图 8 的速度估计值进行拟合,可得到洋流速度模型函数,如式 (22) 所示。从式 (22) 可以看出,该海域洋流速度表现出一定的斜坡特性。由于电磁计程仪速度误差较大,估计出来的洋流速度值会引入测速仪本身的误差。因此,本文不再对洋流速度中的随机分量进行建模。

$$\begin{cases} v_s^E = -1.727 \times 10^{-5}t - 0.5633 \\ v_s^N = 3.967 \times 10^{-5}t - 0.1866 \end{cases} \quad (22)$$

3.2 洋流速度辅助的罗经对准实验

罗经对准试验中分别进行了无阻尼导航解算、未作洋流补偿的外阻尼导航解算以及利用估算的洋流速度进行洋流补偿后的外阻尼导航解算 3 种试验。实验结果如图 9~11 所示。罗经对准精度以及收敛速度对比如表 2 和 3 所示。

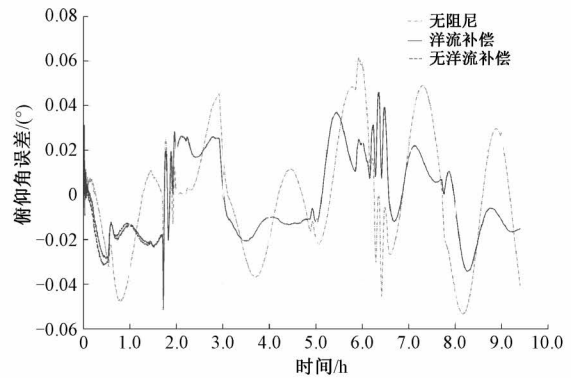


图 9 试验过程中俯仰角误差
Fig. 9 Pitch error comparison in the experiment

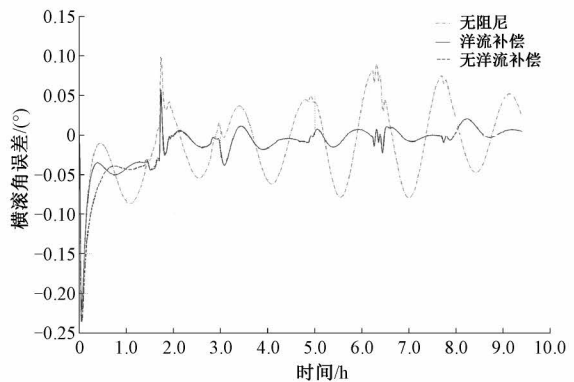


图 10 试验过程中横滚角误差
Fig. 10 Roll error comparison in the experiment

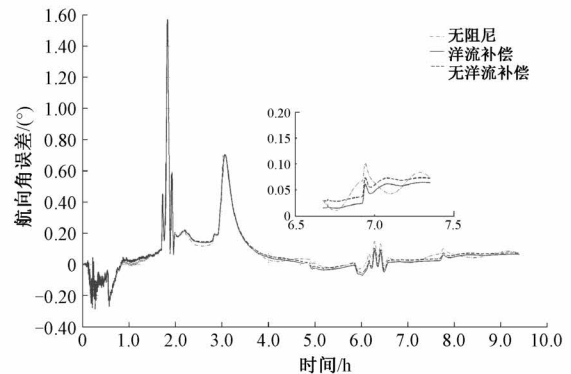


图 11 试验过程中航向角误差
Fig. 11 Yaw error comparison in the experiment

表2 罗经对准精度对比

Table 2 Accuracy comparison of different methods in gyrocompassing experiment (°)

对准方法	俯仰角	横滚角	航向角(6 h之后)
无阻尼	0.027	0.050	0.058
无洋流速度补偿	0.019	0.038	0.050
洋流速度补偿	0.018	0.028	0.043

表3 罗经对准精度收敛速度对比

Table 3 Convergence comparison of marine gyrocompassing experiment

水平姿态角	收敛速度提升/min
俯仰角	6
横滚角	24

从图9~11中可以看出,设计的阻尼网络能有效抑制罗经系统中的周期性振荡误差,加阻尼解算的姿态误差比无阻尼解算的误差振荡幅度要小。

对比进行洋流速度补偿和未进行洋流速度补偿的结果可以看出:引入洋流速度补偿后,罗经系统的姿态解算精度有一定的提升。在俯仰角及横滚角解算的初始阶段,引入洋流速度补偿后,角度的收敛速度加快,表现出来的特性与常值速度误差情况类似,其中横滚角的收敛速度提升了24 min。而对于航向角误差,引入洋流速度补偿后,航向角的稳态波动有了减小,且航向角更接近真值,航向精度提升了25"。

此外,从图11可以看出,在1.8 h附近,船进行了大转弯,姿态角因此产生了一个较大的超调误差,俯仰角产生了峰值为0.052°的超调误差,横滚角产生了峰值为0.056°的超调误差,航向角产生了峰值为1.57°的超调误差,载体进行大机动运动时的姿态对准效果不佳,可引入自适应判据,作为阻尼切换的判断标准,从而提高罗经对准精度。

4 结 论

本文针对罗经系统中洋流速度误差的影响及补偿方法进行了研究,首先建立罗经对准回路中外速度误差与姿态之间的关系,仿真分析了不同类型洋流速度误差对罗经对准结果的影响。本文提出了基于直接作差法计算固定海域的洋流速度,并根据解算得到的速度值建立该海域的洋流速度模型。试验结果表明,本文设计的洋流

速度估计方法可有效改善罗经对准精度,提高了姿态收敛速度,验证了该方法的有效性。但需要指出的是,洋流速度模型会随航行海域的变化而发生改变,模型精度以及对当前海域的适用性会直接影响罗经对准的结果。在后续的研究中可以考虑建立多模态洋流速度模型,通过判别当前海域的特点进行洋流速度模型切换,从而降低模型精度对姿态解算的影响。

参考文献

- [1] 沈阳,王鹏江,吉晓东,等. 二维里程辅助的掘进机自主导航方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11):96-105.
SHEN Y, WANG P J, JI X D, et al. Research on autonomous navigation method of roadheader aided by two-dimensional mileage [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11):96-105.
- [2] 李小毛,王文涛,柯俊,等. α - β 滤波在无人测量艇航向导航中的研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7):1747-1755.
LI X M, WANG W T, KE J, et al. Research on α - β filter in the course angle navigation of unmanned surface vehicle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7):1747-1755.
- [3] 崔冰波,吉峰,孙宇,等. 高斯过程改进的鲁棒容积卡尔曼滤波及其组合导航应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(9):34-40.
CUI B B, JI F, SUN Y, et al. Gaussian process enhanced robust cubature Kalman filter and application in integrated navigation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(9):34-40.
- [4] 徐博. 舰船高精度光纤捷联惯性导航系统技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2016.
XU B. High precision fiber gyroscope inertial navigation system technique for warship [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [5] 李魁,张京娟,刘芳. 长航时惯导系统的模糊控制内阻尼算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(4):485-488.
LI K, ZHANG J J, LIU F. A fuzzy control internal damping algorithm in a long-endurance inertial navigation [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(4):485-488.

- [6] 覃方君, 李安, 许江宁. 惯性导航系统内阻尼改进方法[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(2):147-154.
QIN F J, LI AN, XU J N. Improved internal damping method for inertial navigation system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(2):147-154.
- [7] 何泓洋, 许江宁, 覃方君. 一种捷联惯导阻尼超调误差抑制算法研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(11):39-41.
HE H Y, XU J N, QIN F J. Research for SINS damping overshoot error suppression algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(11):39-41.
- [8] 杜亚玲, 刘建业, 刘瑞华, 等. 捷联惯性航姿系统中的模糊内阻尼算法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(3):274-278.
DU Y L, LIU J Y, LIU R H, et al. Fuzzy damped algorithm in strapdown attitude heading reference system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(3):274-278.
- [9] 奔粤阳, 杨晓龙, 杜蘅, 等. 船用捷联惯导系统的快速阻尼导航算法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(2):343-347.
BEN Y Y, YANG X L, DU H, et al. Rapid damping navigation algorithm of marine strapdown inertial navigation system [J]. System Engineering and Electronics, 2014, 36(2):343-347.
- [10] 奔粤阳, 杨晓龙, 李倩, 等. 重力辅助阻尼捷联惯性导航系统[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7):1842-1848.
BEN Y Y, YANG X L, LI Q, et al. Damping strapdown inertial navigation system aided by gravity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7):1842-1848.
- [11] 刘为任, 庄良杰. 惯性导航系统水平阻尼网络的自适应混合智能控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(11):1586-1588.
LIU W R, ZHUANG L J. Adaptive hybrid intelligent control of an INS damp network[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(11):1586-1588.
- [12] 李魁, 王玮, 刘芳, 等. 长航时惯导系统全阻尼综合校正算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3):543-547.
LI K, WANG W, LIU F, et al. New comprehensive damping and correction algorithm for long-endurance inertial navigation system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3):543-547.
- [13] 严恭敏, 郭鹏, 翁浚, 等. 基于外定位阻尼的捷联惯导算法设计[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(2):127-130.
YAN G M, GUO K, WENG J, et al. Damping SINS algorithm based on outer position[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(2):127-130.
- [14] 赵琳, 李久顺, 程建华. 双滤波器捷联惯导外阻尼导航算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018(3):178-184.
ZHAO L, LI J SH, CHENG J H. Double-filters external damping strapdown inertial navigation algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018(3):178-184.
- [15] GAO W, LU B, YU C. Forward and backward processes for INS compass alignment [J]. Ocean Engineering, 2015, 98: 1-9.
- [16] BEN Y, HUANG L, YANG X. A rapid damping method for a marine strapdown INS [J]. Ocean Engineering, 2016, 114: 259-268.
- [17] BEN Y, CUI W, LI Q. An improved damping method for grid inertial navigation system in polar region [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-13.
- [18] 朱兵, 许江宁, 吴苗, 等. 水下动基座初始对准中的鲁棒自适应 UKF 方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2):73-80.
ZHU B, XU J N, WU M, et al. Robust adaptive UKF approach for underwater moving base initial alignment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2):73-80.
- [19] ØYVIND H, ODDVAR H. Model-Aided INS with sea current estimation for robust underwater navigation [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(2):316-337.
- [20] 郭玉胜, 付梦印, 邓志红, 等. 考虑洋流影响的 SINS/DVL 组合导航算法[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(6):738-742.
GUO Y SH, FU M Y, DENG ZH H, et al. SINS/DVL integrated navigation algorithm considering the impact of

ocean currents [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(6):738-742.

- [21] 李倩. 横坐标系捷联惯导系统极区导航及其误差抑制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2014.
LI Q. Research on transversal strapdown INS and error depression technology in polar region [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [22] YAO Y, XU X, HOU L, et al. A simple and precise correction method for DVL measurements under the dynamic environment [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10750-10758.
- [23] WANG D, XU X, YAO Y, et al. A hybrid approach based on improved AR model and MAA for INS/DVL integrated navigation systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 82794-82808.

作者简介



赵英伟, 2008 年于重庆大学获学士学位, 2011 年于国防科技大学获硕士学位, 2015 年于德国达姆施塔特工业大学获博士学位, 现为国防科技大学前沿交叉学科学院及南湖之光实验室副教授, 主要研究方向为光电仪器与测控技术。

E-mail: yingwei86@qq.com

Zhao Yingwei, received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2008, M. Sc. degree from National University of Defense Technology in 2011, and Ph. D. degree from Technical University of Darmstadt, Germany in 2015. Now, he is an associate professor of College of Advanced Interdisciplinary Studies and Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology. His main research interests include opto-electronic instrumentation & measure and control technology.



郑佳兴(通信作者), 分别在 2007 年和 2012 年于国防科技大学获得硕士学位和博士学位, 现为国防科技大学前沿交叉学科学院及南湖之光实验室副研究员, 主要研究方向为惯性仪器与应用等。

E-mail: zhengjiaxing@nudt.edu.cn

Zheng Jiaxing (Corresponding author) received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from National University of Defense Technology in 2007 and 2012, respectively. He is currently and associate researcher of College of Advanced Interdisciplinary Studies and Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology. His main research interests include inertial instruments and applications.