

文章编号:1671-1637(2013)02-0099-07

水平阻尼状态下惯导系统两点校正弱航态算法

夏卫星¹, 杨晓东², 施闻明², 王 旺²

(1. 海军潜艇学院 学员三队, 山东 青岛 266042; 2. 海军潜艇学院 导航系统教研室, 山东 青岛 266042)

摘要:为满足高精度导航要求,提高综合校正精度,应用扩张状态观测器设计了水平阻尼状态下惯导系统两点校正弱航态算法。简要分析了传统两点校正原理、航态约束及算法的不足,利用扩张状态观测器实时估计惯导系统平台水平失调角,并引入传统两点校正过程,得出两点校正的弱航态算法,并对算法进行了仿真与数值检验。验证结果表明:当载体不满足航态约束条件时,传统两点校正估计结果大幅降低甚至发散,而弱航态算法具有更强的适用性,降低了载体的航态要求,提高了综合校正精度,试验1中东向、北向以及方位陀螺漂移校正误差分别由33.5%、51.2%、17.9%降至8.0%、1.8%、3.1%,试验2中校正误差分别由83.7%、39.7%、77.5%降至2.3%、0.3%、1.0%。

关键词:弱航态算法;航态约束;两点校正;扩张状态观测器;平台失调角;水平阻尼状态

中图分类号:U666.1

文献标志码:A

Loose navigation state algorithm of INS two-point calibration in horizontal damping state

XIA Wei-xing¹, YANG Xiao-dong², SHI Wen-ming², WANG Wang²

(1. No. 3 Brigade of Graduate, Navy Submarine Academy, Qingdao 266042, Shandong, China; 2. Department of Navigational Instrument, Navy Submarine Academy, Qingdao 266042, Shandong, China)

Abstract: In order to satisfy high-accuracy navigation and improve comprehensive calibration accuracy, a INS two-point calibration loose navigation state algorithm in horizontal damping state was designed by using extended state observer (ESO). The principle of traditional two-point calibration, navigation state constraint and its shortage were analyzed. The platform horizontal misalignment angles of inertial navigation system were real-timely estimated by using ESO, and traditional two-point calibration was introduced. The algorithm was simulated and numerically verified. Verification result indicates that the estimation result of traditional two-point calibration considerably reduces and even diverges when navigation state constraint can not be satisfied, nevertheless, loose navigation state algorithm has a stronger applicability not only to reduce restrictive navigation state, but also to improve comprehensive calibration accuracy. Gyro drifts for east, north and position in experiment 1 reduce from 33.5%, 51.2%, 17.9% to 8.0%, 1.8%, 3.1% respectively, and in experiment 2, the drifts reduce from 83.7%, 39.7%, 77.5% to 2.3%, 0.3%, 1.0% respectively. 2 tabs, 9 figs, 18 refs.

Key words: loose navigation state algorithm; navigation state constraint; two-point calibration; extended state observer; platform misalignment angle; horizontal damping state

Author resumes: XIA Wei-xing(1985-), male, doctoral student, +86-532-51858653, 596978805@qq.

收稿日期:2012-12-15

基金项目:军队科研项目(513240202)

作者简介:夏卫星(1985-),男,江苏扬州人,海军潜艇学院工学博士研究生,从事潜艇航行安全技术研究。

导师简介:杨晓东(1963-),男,山东青岛人,海军潜艇学院教授,工学博士。

com; YANG Xiao-dong(1963-), male, professor, PhD, +86-532-51858653, yangxd@163.com.

0 引 言

惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)能够自主提供载体的位置、速度、姿态等信息,不仅是舰船安全航行的保障,也是舰载武器系统的基准信息源。由于陀螺漂移等其他惯性器件误差的存在,系统误差随时间不断积累,为满足导航精度要求,必须对其进行综合校正。综合校正方法通常分为两点校、三点校和点点校等^[1]。Hartman 等分析表明,进行综合校正时,惯导系统必须处于水平阻尼状态,且载体保持匀速直航向航行,否则系统无法满足舒拉振荡条件,引入动态的平台水平失调角误差,校正精度无法保证,甚至会发散^[2];于堃等针对载体运动影响,提出了无阻尼状态下的综合校正算法^[3],该算法需惯导系统进行状态切换,保证载体机动时惯导系统工作于无阻尼状态,削弱机动导致的影响;关劲等指出频繁的状态切换会引起惯导系统超调,参数的突变导致导航系统平衡状态遭到破坏,引入导航误差,必须采用外部信息补偿的办法予以削弱^[4]。

近年来,惯导系统的初始对准技术得到了长足的发展:张卫明等将无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)引入初始对准过程,将非线性系统近似为线性系统^[5-6],平台水平失调角的对准精度与稳定性均优于普遍使用的广义 Kalman 滤波,而对准时间并未得到有效缩短;宋金来等为缩短对准时间,提出将自抗扰控制技术应用于平台式惯导系统静基座初始对准,采用合适的反馈控制率,设计了快速初始对准回路^[7-11],其稳定回路跟踪能力与抗干扰能力得到了较大改善,该方法大大缩短了对准过程时间,具有超调低、算法简单及稳态精度较高等特点,是一种应用在实际惯导系统中理想的初始对准方案。

以上分析表明,现行综合校正对载体提出了过于苛刻的航态约束要求,面对现代复杂的海战场,传统综合校正精度和适用性无法保证。尽管相关专家针对传统综合校正提出了改进措施,但在水下惯导方面适用性不强,且收效甚微。基于自抗扰控制技术的快速对准方案为平台水平失调角的快速估计奠定了理论基础,为平台水平失调角的估计与补偿提供了技术保障。

针对水下平台惯导,为降低航态约束对综合校

正精度的影响,以传统两点校正为例,本文提出了水平阻尼状态下两点校正的弱航态算法,对平台动态失调角予以实时、快速补偿,同时该方法无需状态切换,避免了状态切换导致的系统超调,保证了导航精度,提高了系统鲁棒性。

1 传统的两点校正原理与不足

两点校就是间隔一定时间,连续两次从外部获得准确的位置与航向信息进行重调,并且估计出陀螺常值漂移。通常,位置信息由 GPS 或 GLONASS 给出,航向信息由天文导航方法获得^[12-13]。

载体在空间运动,矢量 Φ 为平台坐标系相对地理坐标系(x, y, z)的误差角, Ψ 为平台坐标系相对计算机坐标系的误差角, Θ 为计算机坐标系相对地理坐标系的误差角^[1,2]

$$\begin{cases} \Phi = \Theta + \Psi \\ \Phi = (\alpha, \beta, \gamma)^T \\ \Theta = (\theta_x, \theta_y, \theta_z)^T = \\ \quad (-\varphi', \lambda' \cos(\varphi), \lambda' \sin(\varphi))^T \\ \Psi = (\psi_x, \psi_y, \psi_z)^T \end{cases} \quad (1)$$

式中: α, β 均为惯导平台水平失调角; γ 为方位失调角,即航向误差角; $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分别为计算机坐标系三轴与地理坐标系轴的夹角; ψ_x, ψ_y, ψ_z 分别为平台坐标系三轴与计算机坐标系轴的夹角; φ, λ 分别为纬度与经度; φ', λ' 分别为纬度误差与经度误差。

在地理坐标系(x, y, z)内的分量为

$$\begin{cases} \alpha = \theta_x + \psi_x \\ \beta = \theta_y + \psi_y \\ \gamma = \theta_z + \psi_z \end{cases} \quad (2)$$

惯导系统进行综合校正时,系统必须工作在水平阻尼状态。系统稳定后,即认为 α, β 均约为 0,则式(2)变为

$$\begin{cases} \theta_x = -\psi_x \\ \theta_y = -\psi_y \\ \theta_z = \gamma - \psi_z \end{cases} \quad (3)$$

以 GPS 获得位置信号与航向信号,确定系统位置误差 φ', λ' 与航向误差 C 。考虑 $C = \gamma$, 式(3)改写为

$$\begin{cases} \varphi' = \psi_x \\ \lambda' = -\psi_y \sec(\varphi) \\ C = -\psi_y \tan(\varphi) + \psi_z \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)写为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \varphi' \\ \lambda' \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sec(\varphi) & 0 \\ 0 & -\tan(\varphi) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用 Laplace 变换求解陀螺漂移的过程详见文献[2]。由式(2),惯导系统工作在水平阻尼状态,当且仅当载体匀速直航向航行时,平台满足舒拉振荡条件,式(3)成立。传统两点校正的不足之处在于匀速直航向状态只是理想的航态,无法满足载体实际航行需要。尤其当潜艇惯导进行重调校正时,在上浮至水面前必须进行机动旋回,消除艇尾声纳盲区,保证上浮的安全性,此时传统两点校正所要求的匀速直航向的航态约束被打破,不再满足舒拉振荡条件,引入了新的动态误差, α, β 均不能忽略,式(3)不成立。

2 基于 ESO 的平台水平失调角估计

惯导系统动基座无阻尼误差方程^[14]为

$$\begin{aligned} \dot{V}_x' &= \frac{V_y}{R} \tan(\varphi) V_x' + \left[2\Omega \sin(\varphi) + \frac{V_x}{R} \tan(\varphi) \right] V_y' + \\ &\quad \left[2\Omega \cos(\varphi) + \frac{V_x}{R} \sec^2(\varphi) \right] V_y \varphi' + \\ &\quad \left[\frac{V_x^2 + V_y^2}{R} + 2\Omega V_x \cos(\varphi) - g \right] \beta + \Delta A_x \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_y' &= -2 \left[\Omega \sin(\varphi) + \frac{V_x}{R} \tan(\varphi) \right] V_x' - \\ &\quad \left[2\Omega \cos(\varphi) + \frac{V_x}{R} \sec^2(\varphi) \right] V_x \varphi' + \\ &\quad \left[\frac{V_x^2 + V_y^2}{R} - 2\Omega V_x \cos(\varphi) + g \right] \alpha + \Delta A_y \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{\varphi}' = \frac{V_y'}{R} \quad (8)$$

$$\dot{\lambda}' = \frac{V_x'}{R \cos(\varphi)} + \frac{V_x}{R} \sec(\varphi) \tan(\varphi) \varphi' \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= -\frac{V_y}{R} - \gamma \left[\Omega \cos(\varphi) + \frac{V_x}{R} \right] + \\ &\quad \beta \left[\Omega \sin(\varphi) + \frac{V_x}{R} \tan(\varphi) \right] + \epsilon_x \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= \frac{V_x'}{R} - \Omega \sin(\varphi) \varphi' - \alpha \left[\Omega \sin(\varphi) + \frac{V_x}{R} \tan(\varphi) \right] - \\ &\quad \gamma \frac{V_y}{R} + \epsilon_y \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= \frac{V_x'}{R} \tan(\varphi) + \left[\Omega \cos(\varphi) + \frac{V_x}{R} \sec^2(\varphi) \right] \varphi' + \\ &\quad \alpha \left[\Omega \cos(\varphi) + \frac{V_x}{R} \right] + \beta \frac{V_y}{R} + \epsilon_z \end{aligned} \quad (12)$$

式中: R 为地球半径; g 为重力加速度; Ω 为地球自

转角速度; V_x, V_y 分别为东向、北向速度; V_x', V_y' 分别为东向、北向速度误差; $\Delta A_x, \Delta A_y$ 分别为东向、北向加速度计零位偏置。

假设载体速度由多普勒计程仪获得,且精度较高,载体位置信号由 GPS 给出。令速度误差作为观测量,则系统量测方程为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X} + \mathbf{v} \quad (13)$$

$$\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2)^T = (V_x', V_y')^T \quad (14)$$

$$\mathbf{X} = (V_x', V_y', \varphi', \lambda', \alpha, \beta, \gamma)^T \quad (15)$$

$$\mathbf{v} = (v_1, v_2)^T \quad (16)$$

式中: \mathbf{Y} 为量测向量; \mathbf{X} 为系统状态向量; \mathbf{v} 为量测白噪声向量; Y_1, Y_2 均为速度误差量测值; v_1, v_2 均为速度误差的量测噪声。

水平阻尼状态下速度误差方程同无阻尼,以东向速度误差 V_x' 为研究对象,为获得平台水平失调角 β 的估计值,取式(6)、(13)构成一阶系统。设定状态变量 Z_1, Z_2 , 其中 Z_1 跟踪东向速度误差, Z_2 跟踪东向速度误差的微分,即 $Z_1 = V_x', Z_2 = \dot{V}_x'$, 设计如下扩张状态观测器^[14-18]

$$\begin{cases} e = Z_1 - Y_1 \\ Z_1 = Z_1 + h(Z_2 - B_1 e) \\ Z_2 = Z_2 + h(-B_2 f_1) \\ f_1 = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{a-1}} & |e| \leq \delta \\ |e|^a \text{sign}(e) & |e| > \delta \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

式中: e 为状态误差; h, a, δ, B_1, B_2 均为扩张状态观测器参数。

令 $\hat{\beta}$ 为平台水平失调角 β 的估计值,由式(17)得

$$\begin{aligned} \hat{\beta} &= \left\{ Z_2 - \frac{V_y}{R} \tan(\varphi) V_x' + \left[2\Omega \sin(\varphi) + \frac{V_x}{R} \tan(\varphi) \right] V_y' + \right. \\ &\quad \left. \left[2\Omega \cos(\varphi) + \frac{V_x}{R} \sec^2(\varphi) \right] V_y \varphi' \right\} / \\ &\quad \left[\frac{V_x^2 + V_y^2}{R} + 2\Omega V_x \cos(\varphi) - g \right] \end{aligned} \quad (18)$$

此时 $\hat{\beta}$ 的稳态误差为

$$\hat{\beta}' = -\frac{\Delta A_x}{(V_x^2 + V_y^2)/R + 2\Omega V_x \cos(\varphi) - g} \quad (19)$$

平台水平失调角 α 的估计过程同 β , 以北向速度误差 V_y' 为研究对象,取式(7)、(14)构成一阶系统。同理,设定状态变量 Z_3, Z_4 , 其中 Z_3 跟踪北向速度误差, Z_4 跟踪北向速度误差的微分,即 $Z_3 = V_y', Z_4 = \dot{V}_y'$, 估计过程不再详述。令 $\hat{\alpha}$ 为平台水平失调角 α 的估计值,只给出估计结果

$$\hat{\alpha} = \left\{ Z_4 + 2 \left[\Omega \sin(\varphi) + \frac{V_x}{R} \tan(\varphi) \right] V'_x + \left[2\Omega \cos(\varphi) + \frac{V_x}{R} \sec^2(\varphi) \right] V_x \varphi' \right\} / \left[\frac{V_x^2 + V_y^2}{R} - 2\Omega V_x \cos(\varphi) + g \right] \quad (20)$$

同理, $\hat{\alpha}$ 的稳态误差为

$$\hat{\alpha}' = - \frac{\Delta A_y}{(V_x^2 + V_y^2)/R - 2\Omega V_x \cos(\varphi) + g} \quad (21)$$

以上分析表明只需获得精确的速度误差信号, 即可实现平台水平失调角的精确估计, 且估计结果与载体航态无关。

3 两点校正的弱航态改进设计

由以上分析可知, 传统两点校正要求惯导系统必须工作于水平阻尼状态, 这就严格限制了载体的航态, 即载体必须作匀速直航向航行, 否则会引入新的动态误差, 导致式(3)不成立, 影响校正精度, 甚至造成惯导系统输出结果发散。当载体无法满足航态要求时, 如能对平台失调角进行实时估计并加以补偿, 即可实现惯导系统的弱航态两点校正, 保证校正的精度要求。

将 ESO 估计结果 $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{\beta}$ 代入式(2), 对传统两点校正作如下改进

$$\begin{cases} \hat{\alpha} = \theta_x + \psi_x \\ \hat{\beta} = \theta_y + \psi_y \\ \gamma = \theta_z + \psi_z \end{cases} \quad (22)$$

由式(22)得

$$\begin{cases} \theta_x - \hat{\alpha} = -\psi_x \\ \theta_y - \hat{\beta} = -\psi_y \\ \theta_z = \gamma - \psi_z \end{cases} \quad (23)$$

将式(23)代入式(5), 得

$$\begin{bmatrix} \varphi' + \hat{\alpha} \\ \lambda' - \frac{\hat{\beta}}{\cos(\varphi)} \\ C - \hat{\beta} \tan(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sec(\varphi) & 0 \\ 0 & -\tan(\varphi) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_x \\ \psi_y \\ \psi_z \end{bmatrix} \quad (24)$$

由式(24)可知, 当惯导系统重调校正时刻, 对由于载体不满足航态要求所引入的动态平台水平失调角进行实时估计并补偿, 补偿结果与航态无关, 即实现了弱航态两点校正算法。利用 Laplace 变换求解陀螺漂移的过程同传统两点校正。

4 仿真验证

潜艇运动参数设定为: 航行速度为 10 kn; 初始

航向为 90° ; 初始位置为北纬 30° , 东经 100° ; 机动旋回半径为 463 m。惯导系统参数设定为: 平台初始误差 α 、 β 均为 $3'$, γ 为 $5'$; 加速度计零位偏置 ΔA_x 、 ΔA_y 均为 $10^{-5} g$; 陀螺常值漂移 ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 均为 $0.01 (^\circ) \cdot h^{-1}$ 。采样时间间隔 T 为 4 s。扩张状态观测器参数设定中 h 、 T 均为 4 s, a 为 0.5, δ 为 $5h$, B_1 为 0.25, B_2 为 0.08。

4.1 平台水平失调角的估计

利用 ESO 估计平台水平失调角, 包括机动旋回以及直航向航行, 并观察其效果, 其中机动旋回时间为 352 s。图 1、2 分别为潜艇机动导致的惯导平台水平失调角及其 ESO 对平台失调角的跟踪估计结果。由图 1、2 中平台水平失调角仿真值可知, 当潜艇进行机动旋回时, 平台水平失调角均产生了较大的动态误差, 即使旋回后直航向航行, 系统也会以舒拉周期作振荡运动。图 2 中 β 角最大为 $4'$, 故平台水平失调角不可忽略。图 1、2 中 ESO 估计结果表明, 无论潜艇处于何种航态, ESO 也能快速(估计稳定时间小于 40 s)跟踪速度信号, 实时给出平台水平误差角的精确估计值, 且估计结果不发散。当且仅当潜艇航态发生变化时, 出现小超调现象, 40 s 后该

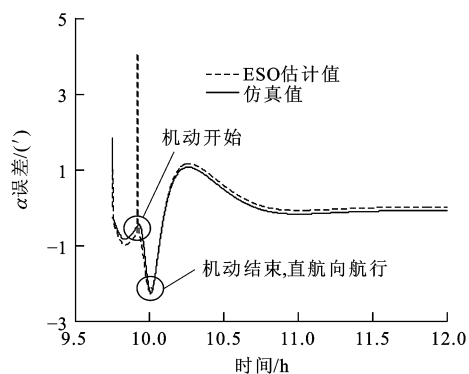


图 1 α 的 ESO 估计

Fig. 1 ESO estimation of α

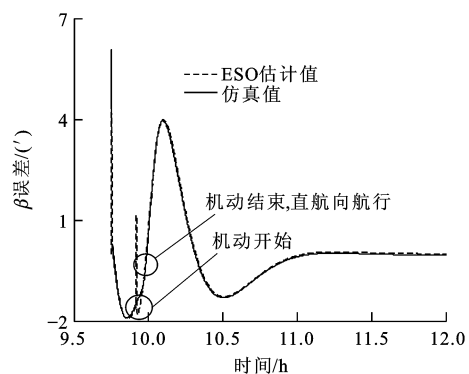


图 2 β 的 ESO 估计

Fig. 2 ESO estimation of β

超调现象即可消失,实现稳定跟踪估计。

4.2 弱航态算法验证

对弱航态算法进行仿真验证,在某一时刻潜艇上浮至水面时进行第 1 次海上重调,然后水下航行,6 h 后,上浮至水面进行第 2 次重调并实施两点校正,惯导系统校正前后均处于水平阻尼状态,并伴随潜艇机动。试验 1 仿真条件为:潜艇作机动旋回,经历转向后,上浮至水面直航向航行,采集数据并进行两点校正。试验 2 仿真条件为:潜艇作机动旋回,在旋回过程中进行数据采集与两点校正。

由表 1、2 的陀螺漂移估计结果可知,当潜艇机动旋回过程中以及旋回后直航向航行时,由于平台不满足舒拉振荡条件,引入了动态误差,导致平台水平失调角不能近似为 0,此时传统两点校正无法正常使用,估计结果较差。采用 ESO 对平台水平失调角进行实时估计并补偿后,陀螺漂移估计精度较高,平台失调角对估计结果影响大大降低。

表 1 试验 1 结果比较

Tab. 1 Results comparison of experiment 1 ($^{\circ}$) \cdot h $^{-1}$

陀螺漂移	设定值	未补偿	补偿后
ϵ_x	0.01	0.006 655	0.010 800
ϵ_y		0.015 116	0.010 180
ϵ_z		0.011 790	0.009 690

表 2 试验 2 结果比较

Tab. 2 Results comparison of experiment 2 ($^{\circ}$) \cdot h $^{-1}$

陀螺漂移	设定值	未补偿	补偿后
ϵ_x	0.01	0.001 630	0.010 230
ϵ_y		0.006 030	0.010 030
ϵ_z		0.017 750	0.010 100

4.3 数值检验

试验 1 中,未补偿时相对设定值的校正误差为

$$\epsilon'_x = \left| \frac{0.006\ 655 - 0.01}{0.01} \right| = 33.5\%$$

$$\epsilon'_y = \left| \frac{0.015\ 116 - 0.01}{0.01} \right| = 51.2\%$$

$$\epsilon'_z = \left| \frac{0.011\ 790 - 0.01}{0.01} \right| = 17.9\%$$

补偿后相对设定值的校正误差为

$$\epsilon'_x = \left| \frac{0.010\ 800 - 0.01}{0.01} \right| = 8.0\%$$

$$\epsilon'_y = \left| \frac{0.010\ 180 - 0.01}{0.01} \right| = 1.8\%$$

$$\epsilon'_z = \left| \frac{0.009\ 690 - 0.01}{0.01} \right| = 3.1\%$$

试验 2 中,未补偿时相对设定值的校正误差为

$$\epsilon'_x = \left| \frac{0.001\ 630 - 0.01}{0.01} \right| = 83.7\%$$

$$\epsilon'_y = \left| \frac{0.006\ 030 - 0.01}{0.01} \right| = 39.7\%$$

$$\epsilon'_z = \left| \frac{0.017\ 750 - 0.01}{0.01} \right| = 77.5\%$$

补偿后相对设定值的校正误差为

$$\epsilon'_x = \left| \frac{0.010\ 230 - 0.01}{0.01} \right| = 2.3\%$$

$$\epsilon'_y = \left| \frac{0.010\ 030 - 0.01}{0.01} \right| = 0.3\%$$

$$\epsilon'_z = \left| \frac{0.010\ 100 - 0.01}{0.01} \right| = 1.0\%$$

由数值检验结果可见,补偿后陀螺漂移校正误差有了较大幅度的降低,表明本文两点校弱航态算法有效。该算法不仅保证了两点校正的适应性,降低了航态约束要求,同时保证了两点校正的精度,鲁棒性得到增强。

图 3~9 为弱航态两点校正后惯导系统的误差发散,可以看出,经弱航态校正后,惯导系统导航精度得到大幅改善,各状态误差显著降低,仿真结论验证了本文弱航态校正算法的有效性。

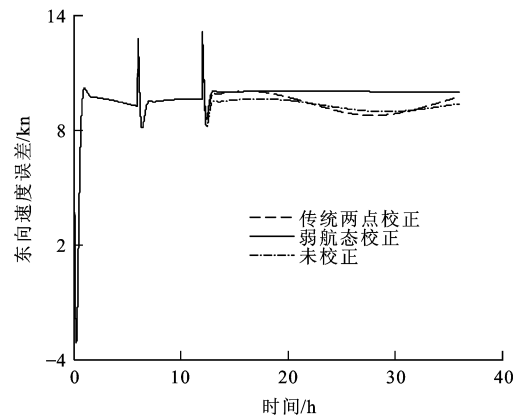


图 3 东向速度误差

Fig. 3 East velocity errors

5 结 语

严格的航态约束限制了传统两点校正算法的使用,一旦载体不满足航态要求,传统两点校正的精度即大为降低,陀螺漂移估计结果的可靠性无法保证。基于此,论文提出了对平台水平失调角实时补偿的两点校正弱航态算法,即基于 ESO 的估计与补偿。仿真及数值检验结果表明,本文提出的两点校正弱航态算法有效,陀螺漂移估计精度相比传统两点校正得到较大提高,不受载体航态约束影响,保证了算法的精度及其鲁棒性,为下一步提高惯导系统惯性

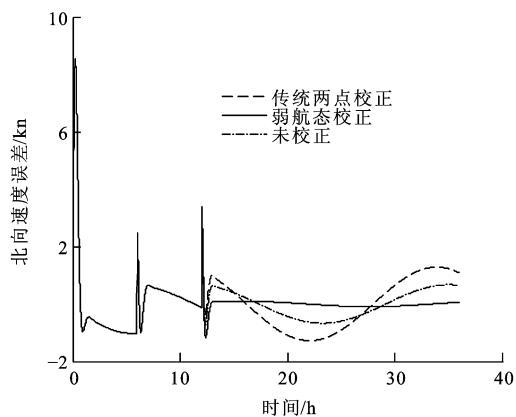


图 4 北向速度误差

Fig. 4 North velocity errors

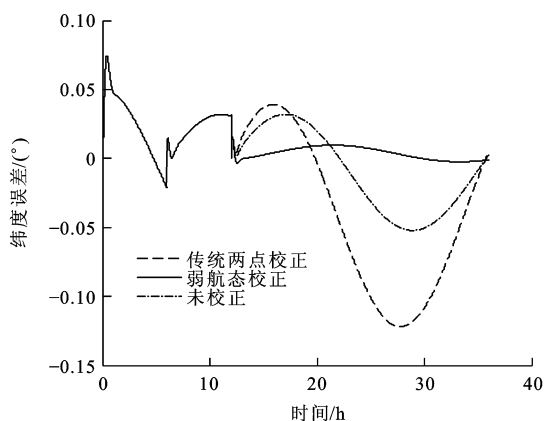


图 5 纬度误差

Fig. 5 Latitude errors

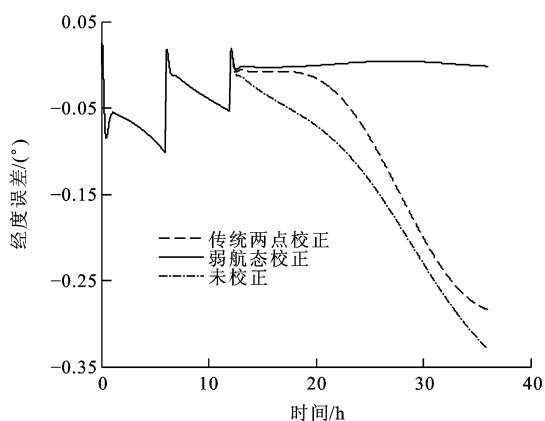


图 6 经度误差

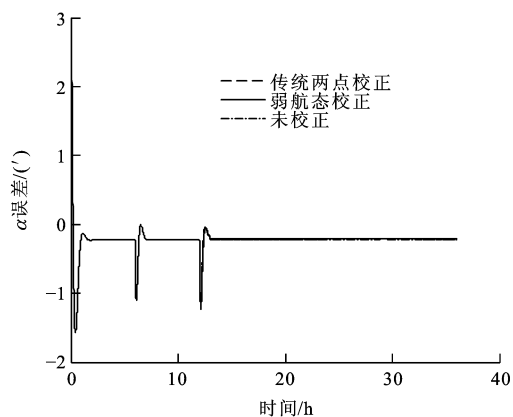
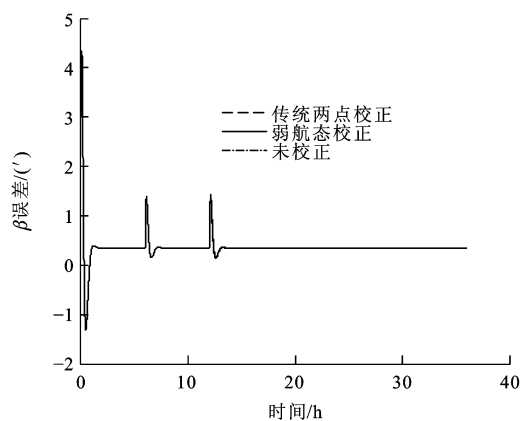
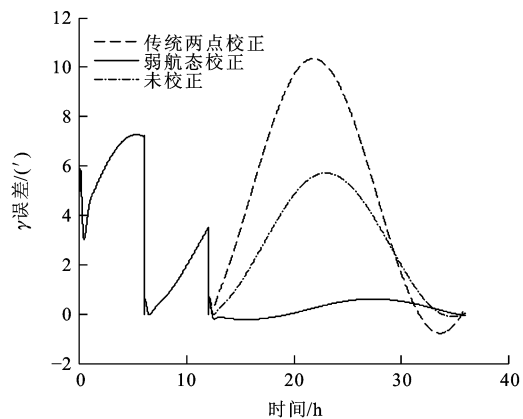
Fig. 6 Longitude errors

器件误差估计精度提供了一种方法。

参考文献：

References：

- [1] 杨晓东, 邓太光. 平台式惯导系统两点校的常值误差分析[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(3): 100-104.
YANG Xiao-dong, DENG Tai-guang. Constant error analysis of

图 7 α 误差Fig. 7 α errors图 8 β 误差Fig. 8 β errors图 9 γ 误差Fig. 9 γ errors

two-point comprehensive calibration in gimballed inertial navigation system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(3): 100-104. (in Chinese)

- [2] HARTMAN R, HAWKINSON W, SWEENEY K. Tactical underwater navigation system position[C]// IEEE. 2008 IEEE Position Location and Navigation Symposium. Monterey: IEEE, 2008: 898-911.
[3] 于 堃, 李 琳, 刘为任, 等. 舰船惯性导航系统海上无阻尼状

- 态的校准[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(6): 637-642.
- YU Kun, LI Lin, LIU Wei-ren, et al. Correction of SINS based on undamped navigation mode[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(6): 637-642. (in Chinese)
- [4] 关 劲, 程建华, 吴 磊, 等. 船用平台式惯导系统状态转换技术的应用[J]. 中国造船, 2008, 49(2): 75-80.
- GUAN Jin, CHENG Jian-hua, WU Lei, et al. The state switch technology of gimbaled INS[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(2): 75-80. (in Chinese)
- [5] 张卫明, 张继惟, 范子杰, 等. UKF 方法在惯性导航系统初始对准中的应用研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(4): 589-592.
- ZHANG Wei-ming, ZHANG Ji-wei, FAN Zi-jie, et al. Research on unscented Kalman filter in initial alignment of inertial navigation systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(4): 589-592. (in Chinese)
- [6] 卢 敏, 殷 勇. UPF 算法在惯导非线性初始对准中的应用[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(1): 44-47.
- LU Min, YIN Yong. Application of unscented particle filter in INS non-linear alignment[J]. Radar Science and Technology, 2008, 6(1): 44-47. (in Chinese)
- [7] 宋金来, 韩京清. 平台式惯导系统的快速初始对准方法的研究[J]. 中国惯性技术学报, 2002, 10(1): 25-29.
- SONG Jin-lai, HAN Jing-qing. Research on a fast initial alignment method for platform inertial navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2002, 10(1): 25-29. (in Chinese)
- [8] 王 超, 马林立. 扩张状态观测器在惯导系统初始对准中的应用研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(7): 85-88.
- WANG Chao, MA Lin-li. Application of the extend state observer on the initial alignment of the inertial navigation system[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(7): 85-88. (in Chinese)
- [9] 牛 立, 李 莉, 赵 慧, 等. 自抗扰控制技术在捷联惯导动基座初始对准中的应用研究[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(6): 27-33.
- NIU Li, LI Li, ZHAO Hui, et al. Application of active disturbance rejection control technique in initial alignment of SINS on moving base[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2003, 11(6): 27-33. (in Chinese)
- [10] 赵汪洋, 庄良杰, 杨功流. 自抗扰控制器在平台惯导系统动基座下初始对准应用[J]. 控制与决策, 2007, 22(2): 179-183.
- ZHAO Wang-yang, ZHUANG Liang-jie, YANG Gong-liu. Application of active disturbance rejection controller in initial alignment of INS on moving base[J]. Control and Decision, 2007, 22(2): 179-183. (in Chinese)
- [11] 宋金来, 杨 雨, 许可康, 等. 自抗扰控制在惯性导航系统初始对准中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2001, 9(4): 11-14, 27.
- SONG Jin-lai, YANG Yu, XU Ke-kang, et al. Application of active disturbance rejection technique in initial alignment of inertial navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2001, 9(4): 11-14, 27. (in Chinese)
- [12] 杨常松, 徐晓苏, 汪丽云, 等. 信息融合技术在 INS/GPS/DVL 组合导航中的应用研究[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(5): 39-43.
- YANG Chang-song, XU Xiao-su, WANG Li-yun, et al. Information fusion technology and its application in INS/GPS/DVL integrated navigation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(5): 39-43. (in Chinese)
- [13] 李家齐, 王红卫, 刘爱东, 等. 一种天文/惯性导航系统组合模式的研究[J]. 控制理论与应用, 2005, 24(4): 13-15.
- LI Jia-qi, WANG Hong-wei, LIU Ai-dong, et al. A CNS/INS combined navigation system[J]. Control Theory and Applications, 2005, 24(4): 13-15. (in Chinese)
- [14] FANG Jiang-cheng, WAN De-jun. A fast initial alignment method for strapdown inertial navigation system on stationary base[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(4): 1501-1505.
- [15] HUANG Yi, HAN Jing-qing. Disturbance rejection and tracking design via the SSR approach for second order uncertainty systems[J]. System Sciences and Mathematical Sciences, 1999, 12(3): 238-245.
- [16] 赵汪洋, 吴俊杰, 庄良杰, 等. 基于 ESO 技术的惯导系统初始对准[J]. 数据采集与处理, 2007, 22(1): 105-109.
- ZHAO Wang-yang, WU Jun-jie, ZHUANG Liang-jie, et al. Initial alignments of inertial navigation system on static base with ESO technique[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2007, 22(1): 105-109. (in Chinese)
- [17] HUANG Yi, HAN Jing-qing. Analysis and design for the second order nonlinear continuous extended state observer[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(21): 1938-1944.
- [18] 牛 立, 李 莉, 庄良杰. 惯性平台稳定回路的自抗扰控制[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(6): 48-51, 64.
- NIU Li, LI Li, ZHUANG Liang-jie. Active disturbance rejection control of stabilizing circuits for inertial platform[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2004, 12(6): 48-51, 64. (in Chinese)