

空间稳定惯性导航系统中陀螺仪漂移模型系数的辨识

李 中, 庄良杰, 杨功流
(天津航海仪器研究所, 天津 300131)

摘 要: 陀螺仪的漂移误差是空间稳定惯性导航系统的主要误差源, 对漂移模型系数的准确辨识是保证系统实现长时间、高精度自主导航的关键。独立标定陀螺仪的数据无法全面反映陀螺仪在系统中的特性, 必须在系统中实现对陀螺仪漂移模型系数的辨识, 为此, 分析了系统稳定平台坐标系随动于陀螺坐标系运动过程, 推导出稳定平台的运动微分方程, 建立了以陀螺仪漂移模型系数为状态变量的系统方程; 以平台上加速度计的 outputs 为观测量, 采用扩展卡尔曼滤波器对陀螺仪漂移系数进行估计。仿真实验结果表明, 新的陀螺仪漂移系数辨识方法是有效的和准确的。

关键词: 空间稳定惯性导航; 陀螺仪; 漂移模型; 扩展卡尔曼滤波器

中图分类号: U666.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2006)增刊-0138-05

Determining Drift Model Coefficients for Gyroscope in the Space-Stable Inertial Navigation Systems

LI Zhong, ZHUANG Liang-jie, YANG Gong-liu
(Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

Abstract: The drift error of gyroscopes is the main error resource of the space-stable inertial navigation systems. Precisely determining the drift model coefficients is the key to successful long-time operation with the navigation systems. Because the off-line calibration results can not properly illustrate the characteristics of the on-line gyroscopes, identifying the drift error of gyroscopes when they are in the systems is necessary. In a space-stable system, the platform moves after the gyroscopes. And the movement can be described with some differential equations. Based on these differential equations, a set of system state equations are build, with the drift model coefficients of gyroscopes as the state variables. Using the outputs of the accelerometers on the platform as the measurement values, an extended Kalman filter can estimate the drift model coefficients of gyroscopes. The effectiveness of the new identification method is evaluated through simulation. It is accurate enough to support the navigation systems operating successfully.

Keywords: space-stable inertial navigation; gyroscope; drift model; extended Kalman filter

空间稳定惯性导航系统利用自由转子陀螺仪的定轴性, 使系统平台稳定在惯性空间; 通过对平台上的加速度的输出进行解算实现导航功能^[1]。在这类系统中陀螺仪起着提供惯性空间坐标基准的作用。陀螺仪的漂移误差是此类导航系统的主要误差源, 因此对系统中陀螺仪漂移模型系数的有效辨识, 是保证系统完成长时间、高精度自主导航的关键技术^[2]。目前主要采用的方法是在陀螺仪尚未安装在系统上之前, 对其进

行独立标定, 再用标定的漂移系数在系统中进行补偿^[2-5]。由于独立标定的结果无法全面反映陀螺仪在系统中的特性, 因此在空间稳定惯性导航系统中对陀螺仪的漂移模型系数进行辨识是非常必要的。

1 系统配置方案和陀螺仪漂移模型

在空间稳定惯性导航系统中陀螺仪和加速度计安

装在同一稳定平台上。2 只陀螺仪的惯性主轴互相垂直,在导航工作状态下一只陀螺仪的惯性主轴在地球极轴方向,称为极陀螺;另一只的惯性主轴在地球赤道平面内,称为赤道陀螺。极陀螺的 2 根输入轴在赤道平面内正交;赤道陀螺只利用一根输入轴,与地球极轴平行;另一根输入轴被锁定;两只陀螺仪的 3 根有效输入轴构成陀螺坐标系(x_g, y_g, z_g)。3 只加速度计输入轴的方向被摆放为与陀螺仪有效输入轴的方向一致,构成加速度坐标系(x_a, y_a, z_a)。由于稳定平台随动于陀螺仪的输入轴,在系统稳定工作时,可以认为平台坐标系(x_p, y_p, z_p)与(x_g, y_g, z_g)重合。

当陀螺仪工作在平台环境下时,与比力平方成正比比例的漂移比较小且稳定^[6-7]。只需对常值项和比力的一次项漂移系数重新辨识。沿陀螺坐标系(x_g, y_g, z_g)3 根有效输入轴的漂移模型为

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{dx} = D(X)_0 + D(X)_x A_x + D(X)_y A_y + D(X)_z A_z + \varepsilon_x \\ \dot{\omega}_{dy} = D(Y)_0 + D(Y)_x A_x + D(Y)_y A_y + D(Y)_z A_z + \varepsilon_y \\ \dot{\omega}_{dz} = D(Z)_0 + D(Z)_x A_x + D(Z)_y A_y + D(Z)_z A_z + \varepsilon_z \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{\omega}_{dx}, \dot{\omega}_{dy}, \dot{\omega}_{dz}$ 陀螺仪在 x_g, y_g, z_g 轴的总漂移速度; A_x, A_y, A_z 是沿陀螺坐标系 x_g, y_g, z_g 轴的比力输入值; $D(X)_0, D(Y)_0, D(Z)_0$ 是沿 x_g, y_g, z_g 轴的常值漂移分量; $D(X)_x, D(Y)_y, D(Z)_z$ 是沿 x_g, y_g, z_g 轴与比力 A_x 成正比的漂移系数; $D(X)_x, D(Y)_y, D(Z)_z$ 是沿 x_g, y_g, z_g 轴与比力 A_z 成正比的漂移系数; $D(X)_x, D(Y)_x, D(Z)_x$ 沿 x_g, y_g, z_g 轴与比力 A_x 成正比的漂移系数; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 是沿 x_g, y_g, z_g 轴的随机漂移。

2 漂移模型系数的辨识方法

在空间稳定惯性导航系统中对陀螺仪漂移模型系数的辨识需要在静基座条件下完成,此时载体没用加速度。由于平台坐标系跟踪陀螺坐标系,稳定平台的角运动速度就是陀螺仪相对惯性空间的漂移角速度与稳定平台基座牵连运动角速度(即地球自转角速度)的合成。因此,能够通过对平台坐标系运动的研究,正确

评估陀螺仪的漂移系数。由于对平台框架轴转角的测量误差是影响辨识效果的主要因素,在系统辨识时采用加速度计的输出作为测量值。

首先使系统中的陀螺仪处于非启动状态,设置稳定平台的初始位置,建立初始坐标系(x_0, y_0, z_0),初始坐标系相对地心坐标系静止;然后启动陀螺仪并使其达到稳定工作状态,此时陀螺坐标系与初始坐标系重合。

系统稳定工作时,由于地球牵连角速度和陀螺仪漂移的共同作用,陀螺坐标系开始偏离初始坐标系,平台随动系统驱动平台坐标系跟踪陀螺坐标系,使平台产生相对于初始坐标系的转动。假定随动系统是精确的(随动误差合并于加速度计观测误差),平台动坐标系与陀螺坐标系保持一致,平台上 3 只加速度计的输入轴敏感重力加速度是平台动坐标系三轴方向的投影分量。记录加速度计的输出随时间的变化,采用卡尔曼滤波方法对陀螺仪的漂移模型系数进行估计。

3 空间稳定惯性导航系统的平台运动方程

空间稳定惯性导航系统的稳定平台在地球坐标系中的运动如图 1 所示。图中, $Ox_0y_0z_0$ 为稳定平台的初始坐标系(相对地心坐标系静止), $Ox_p y_p z_p$ 为平台动坐标系(相对初始坐标系运动), $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 为两个坐标系之间的欧拉角。两个坐标系之间存在下列转换关系

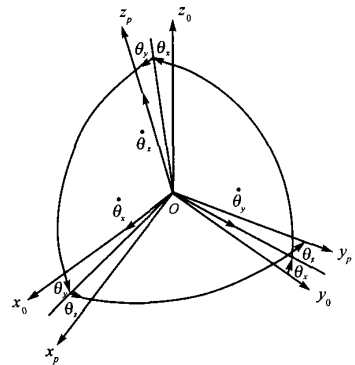


图 1 惯性平台在地球坐标系中的运动示意

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_y \cos \theta_z & \cos \theta_x \sin \theta_z + \sin \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z & \sin \theta_x \sin \theta_z - \cos \theta_x \sin \theta_y \cos \theta_z \\ -\cos \theta_y \sin \theta_z & \cos \theta_x \cos \theta_z - \sin \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z & \sin \theta_x \cos \theta_z + \cos \theta_x \sin \theta_y \sin \theta_z \\ \sin \theta_y & -\sin \theta_x \cos \theta_y & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = C_0^p \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 C_0^P 为平台坐标系相对其初始坐标系的转移矩阵.

地球自转角速度矢量 ω_e 在平台初始坐标系 $Ox_0y_0z_0$ 中的分量为 $[\omega_{ex} \ \omega_{ey} \ \omega_{ez}]^T$, 陀螺坐标系 (平台动坐标系) $Ox_py_pz_p$ 的漂移速度为相对惯性空间

$$\begin{bmatrix} \omega_{dx} \\ \omega_{dy} \\ \omega_{dz} \end{bmatrix} = C_0^P \begin{bmatrix} \omega_{ex} \\ \omega_{ey} \\ \omega_{ez} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_y \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$C_0^P \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_y \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\cos \theta_y \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

整理后可得非线性微分方程组

$$\begin{cases} \dot{\theta}_x = f_1(\theta_x, \theta_y, \theta_z, \omega_{dx}, \omega_{dy}, \omega_{dz}) \\ \dot{\theta}_y = f_2(\theta_x, \theta_y, \theta_z, \omega_{dx}, \omega_{dy}, \omega_{dz}) \\ \dot{\theta}_z = f_3(\theta_x, \theta_y, \theta_z, \omega_{dx}, \omega_{dy}, \omega_{dz}) \end{cases} \quad (4)$$

4 扩展卡尔曼滤波器

由平台运动的几何关系 (图 1), 可得重力加速度矢量 g 在平台动坐标系 $Ox_py_pz_p$ 中的投影分量为

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = C_0^P \begin{bmatrix} g_{x0} \\ g_{y0} \\ g_{z0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $[g_{x0} \ g_{y0} \ g_{z0}]^T$ 为沿平台初始坐标系的重力分量. 由于在辨识过程中, 沿平台坐标系各轴的比力输入 $[A_x \ A_y \ A_z]^T = [G_x \ G_y \ G_z]^T$, 将式 (5) 的结果带入陀螺仪漂移模型 (1), 并忽略陀螺随机漂移 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 和 ε_z 的影响, 可以得到漂移速度 $\omega_{dx}, \omega_{dy}, \omega_{dz}$ 关于 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 的函数; 再将 $\omega_{dx}, \omega_{dy}, \omega_{dz}$ 带入式 (4), 经整理可得到

$$\begin{cases} \dot{\theta}_x = f_1[\theta_x, \theta_y, \theta_z, D(X)_0, D(X)_x, D(X)_y, \\ D(X)_z, D(Y)_0, D(Y)_x, D(Y)_y, D(Y)_z, \\ D(Z)_0, D(Z)_x, D(Z)_y, D(Z)_z] \\ \dot{\theta}_y = f_2[\theta_x, \theta_y, \theta_z, D(X)_0, D(X)_x, D(X)_y, \\ D(X)_z, D(Y)_0, D(Y)_x, D(Y)_y, D(Y)_z, \\ D(Z)_0, D(Z)_x, D(Z)_y, D(Z)_z] \\ \dot{\theta}_z = f_3[\theta_x, \theta_y, \theta_z, D(X)_0, D(X)_x, D(X)_y, \\ D(X)_z, D(Y)_0, D(Y)_x, D(Y)_y, D(Y)_z, \\ D(Z)_0, D(Z)_x, D(Z)_y, D(Z)_z] \end{cases} \quad (6)$$

令卡尔曼滤波器的 15 维状态向量为

的绝对运动角速度 $\omega_d = [\omega_{dx} \ \omega_{dy} \ \omega_{dz}]^T$. 利用绝对运动角速度 ω_d 等于牵连运动角速度 ω_e 与相对运动角速度 $[\dot{\theta}_x \ \dot{\theta}_y \ \dot{\theta}_z]^T$ 之和的原理, 平台的运动微分方程可表示为

$$\begin{aligned} X = & [\theta_x, \theta_y, \theta_z, D(X)_0, D(X)_x, D(X)_y, D(X)_z, \\ & D(Y)_0, D(Y)_x, D(Y)_y, D(Y)_z, D(Z)_0, \\ & D(Z)_x, D(Z)_y, D(Z)_z] \end{aligned} \quad (7)$$

状态向量的前 3 个元素为平台动坐标系相对初始坐标系的角位移, 后 12 个元素为需要辨识的陀螺漂移模型系数. 滤波器的状态方程的一般表达式为

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= f(X(t)) + GW(t) \\ W(t) &\sim N(0, Q(t)) \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $f(X)$ 为 15 维向量函数 $[f_1 \ f_2 \ f_3 \ 0 \ \dots \ 0]^T$; G 为单位矩阵; $W(t)$ 为由于陀螺随机漂移等因素引起的附加高斯白噪声, 表示模型的不定性误差, 其均值为零, 协方差矩阵为 $Q(t)$.

滤波器的观测向量为 3 个加速度计的输出 $Z = [E_x \ E_y \ E_z]^T$. 由于此时比力输入为式 (5) 描述的重力加速度分量, $[E_x \ E_y \ E_z]^T = [G_x \ G_y \ G_z]^T$, 经整理可得 3 个非线性方程

$$\begin{cases} E_x = h_1(\theta_x, \theta_y, \theta_z) \\ E_y = h_2(\theta_x, \theta_y, \theta_z) \\ E_z = h_3(\theta_x, \theta_y, \theta_z) \end{cases} \quad (9)$$

滤波器观测方程的一般表达式为

$$Z_k(t) = h(X_k) + V_k \quad V_k \sim N(0, R_k) \quad (10)$$

式中 $h(X)$ 为 3 维向量函数 $[h_1 \ h_2 \ h_3]^T$; V_k 为加速度计输出的测量误差, 假定为离散白噪声序列, 均值为零, 协方差矩阵为 R_k .

上述的状态方程 (8) 和观测方程 (10) 均为非线性的, 需要通过线性化和离散化建立扩展卡尔曼滤波器的对导航系统中陀螺仪漂移误差的系数进行估计^[8-9]. 相对于状态向量中的 15 个状态, 滤波器为 15

阶. 在给定噪声协方差 $Q(t), R_k$, 初始状态估计 $\hat{X}(0)$ 及其协方差矩阵 $P(0)$ 的条件下, 便可以设计出扩展卡

尔曼滤波器. 根据测量数据, 便可递推地计算出状态估计, 从而求得导航系统中陀螺仪漂移误差的系数. 扩展卡尔曼滤波方程如下.

状态向量的预测值为

$$\hat{X}_{k,k-1} = \hat{X}_{k-1,k-1} + f(\hat{X}_{k-1,k-1}) \cdot \Delta t \tag{11}$$

一步状态转移矩阵为

$$\Phi_{k,k-1} = I + F_{k,k-1} \cdot \Delta t \tag{12}$$

状态向量的误差协方差矩阵的预测值为

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \cdot P_{k-1,k-1} \cdot \Phi_{k,k-1}^T + Q \cdot \Delta t \tag{13}$$

增益矩阵为

$$K_k = P_{k,k-1} \cdot H_k^T \cdot (H_k \cdot P_{k,k-1} \cdot H_k^T + R_k)^{-1} \tag{14}$$

状态向量的估计值为

$$\hat{X}_{k,k} = \hat{X}_{k,k-1} + K_k \cdot [Z_k - h(\hat{X}_{k,k-1})] \tag{15}$$

状态向量的误差协方差矩阵的估计值为

$$P_{k,k} = (I - K_k \cdot H_k) \cdot P_{k,k-1} \cdot (I - K_k \cdot H_k)^T + K_k \cdot R \cdot K_k^T \tag{16}$$

其中

$$F_{k,k-1} = \frac{\partial f(X)}{\partial X} \Big|_{X=\hat{X}_{k-1,k-1}} \tag{17}$$

$$H_k = \frac{\partial h(X)}{\partial X} \Big|_{X=\hat{X}_{k,k-1}} \tag{18}$$

滤波器的初始条件为

$$\hat{X}(0) = E[X(0)] \tag{19}$$

$$P(0) = \text{Var}[X(0)] = E\{[X(0) - \hat{X}(0)] \cdot [X(0) - \hat{X}(0)]^T\} \tag{20}$$

5 仿真实验与分析

为了验证上述扩展卡尔曼滤波器对陀螺仪漂移模型系数辨识的有效性, 文中进行了仿真实验. 首先根据给定的陀螺仪漂移系数, 由平台的运动方程(4)产生平台转角 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 随时间变化的序列, 并在解微分方程时加入陀螺仪随机漂移的影响; $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 再将带入加速度计的输出模型(9), 并加上相应的测量噪声, 产生加速度计输出的测量数据序列. 然后, 将测量数据序列输入扩展卡尔曼滤波方程, 求取状态向量的估计值, 从而辨识陀螺仪的漂移系数. 仿真使用的相关参数如表 1 所示.

加速度计输出观测误差的标准差均为 1×10^{-5} .

滤波器的滤波周期为 60 s, 陀螺仪漂移系数估计值的时间曲线如图 2 所示.

从图 2 ~ 图 4 可以看出, 所设计的扩展卡尔曼滤波方数据

表 1 陀螺仪的原始给定漂移系数给定值

系数	给定值	系数	给定值
$D(X)_0 / ((^\circ) \cdot h^{-1})$	0.5	$D(X)_x / ((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	-0.1
$D(X)_y / ((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	-0.05	$D(X)_z / ((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	-0.05
$\text{Var}(\varepsilon_x) / ((^\circ)^2 \cdot h^{-1})$	1×10^{-8}	$D(Y)_0 / ((^\circ) \cdot h^{-1})$	-0.5
$D(Y)_x / ((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	0.05	$D(Y)_y / ((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	0.1
$D(Y)_z / ((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	0.05	$\text{Var}(\varepsilon_y) / ((^\circ)^2 \cdot h^{-2})$	1×10^{-8}
$D(Z)_0 / ((^\circ) \cdot h^{-1})$	0.5	$D(Z)_x / ((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	-0.05
$D(Z)_y / ((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	0.05	$D(Z)_z / ((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	-0.1
$\text{Var}(\varepsilon_z) / ((^\circ)^2 \cdot h^{-2})$	1×10^{-8}		

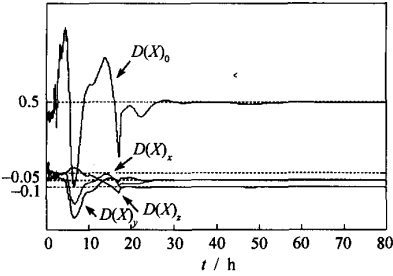


图 2 X_x 轴漂移系数估计值

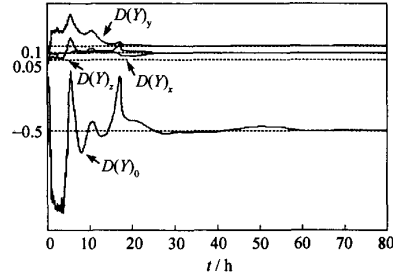


图 3 Y_y 轴漂移系数估计值

波器是稳定的, 大约经过 30 h, 漂移系数估计曲线即基本达到稳定状态, 以后的起伏变化很小, 但是, 估计的相对精度是随着时间不断提高的, 在 60 h 上漂移系数估计值如表 2 所示.

表 2 60 h 陀螺仪漂移系数估计值

系数	估计值	系数	估计值
$D(X)_0/$ $((^\circ) \cdot h^{-1})$	0.495 18	$D(X)_x/$ $((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	-0.100 13
$D(X)_y/$ $((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	-0.051 50	$D(X)_z/$ $((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	-0.048 74
$D(Y)_0/$ $((^\circ) \cdot h^{-1})$	-0.494 90	$D(Y)_x/$ $((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	0.050 96
$D(Y)_y/$ $((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	0.100 76	$D(Y)_z/$ $((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	0.048 62
$D(Z)_0/$ $((^\circ) \cdot h^{-1})$	0.495 31	$D(Z)_x/$ $((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	-0.051 50
$D(Z)_y/$ $((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	0.049 53	$D(Z)_z/$ $((^\circ) \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^2)$	-0.100 88

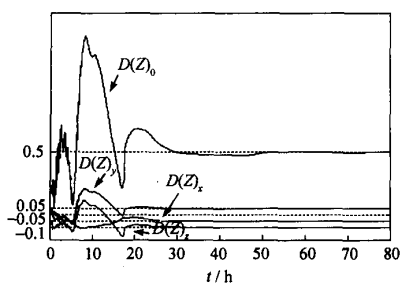


图 4 Z_z 轴漂移系数估计值

表 2 显示在滤波器工作 60 h 后,常值漂移估计值的残差不超过 1.02%,与比力相关漂移估计值的残差不超过 2.52%。因此在空间稳定导航系统的辨识中,利用加速度计的输出和扩展卡尔曼滤波器对陀螺仪的漂移模型系数进行分离和估计具有相当高的精度,满足导航参数解算精度对陀螺仪漂移补偿的要求。

6 结 语

本文所描述的陀螺仪的漂移模型系数的辨识方法中,漂移模型仅考虑了常数项和与比力成比例的误差项,没有考虑与比力的高次项相关的漂移项;当需要辨

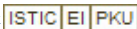
识更多的系数时,测量方程和状态方程将会复杂些,但辨识的总体思路不会改变。

参考文献:

- [1] 《惯性技术手册》编辑委员会. 惯性技术手册 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
Compilation Committee of Inertial Technology handbook. *Inertial Technology Handbook* [M]. Beijing: Astronautics Press, 1995 (in Chinese).
- [2] 高钟毓, 王永梁. 近似非线性滤波在陀螺漂移误差模型辨识中的应用 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1992, 32(2): 35—41.
Gao Zhongyu, Wang Yongliang. The application of an approximate nonlinear filtering in the identification of gyro drift error model [J]. *Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition*, 1992, 32(2): 35—41 (in Chinese).
- [3] McMurrin M W, Ling J A. Development and testing of precise marine electrostatic gyroscope [C] // *Presented at ION National Meeting*. West Point, N Y, 1972: 27—29.
- [4] Blanchard R L. High Accuracy calibration of electrostatic gyro strapdown navigation systems [C] // *AIAA Guidance and Control Conference*. Palo Alto, California, 1978: 7—9.
- [5] Gurevich S S, Gusinsky V Z, Zagorogny V I. Determining drift model coefficients for strapdown electrostatic gyro on bench test results [J]. *Gyroscope and Navigation*, 1999, 25(2): 11—16.
- [6] 高钟毓. 静电陀螺仪技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Gao Zhongyu. *Electrostatically Supported Gyroscope Technology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 (in Chinese).
- [7] 刘延柱. 静电陀螺仪动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
Liu Yanzhu. *Electrostatically Supported Gyroscope Dynamics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1979 (in Chinese).
- [8] Fagan J H. Kalman filter design considerations for space-stable inertial navigation systems [J]. *IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems*, 1973, 9(2): 306—319.
- [9] 关肇直. 线性控制系统理论在惯性导航系统中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
Guan Zhaozhi. *Application of Linear Control Theory in the INS* [M]. Beijing: Science Press, 1984 (in Chinese).

(责任编辑: 孙立华)

空间稳定惯性导航系统中陀螺仪漂移模型系数的辨识

作者: [李中](#), [庄良杰](#), [杨功流](#)
作者单位: [天津航海仪器研究所, 天津, 300131](#)
刊名: [天津大学学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF TIANJIN UNIVERSITY](#)
年, 卷(期): 2006, 39(z1)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_tianjdxxb2006z1027.aspx