第 39 卷增刊
2015 年 12 月

物 探 与 化 探
GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION

Vol.39, Supp.
Dec., 2015

doi: 10.11720/wtyht.2015.S1.06
李中.基于几何稳定工作状态的陀螺仪标定方法[J].物探与化探,2015,39(S1):28-32.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.S1.06
Li Z.The method of calibrating gyroscope drift in the geometrical stability state of inertial stabilized platform[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2015,39(S1):28-32.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.S1.06

# 基于几何稳定工作状态的陀螺仪标定方法

李 中
(天津航海仪器研究所, 天津 300131)

**摘 要**: 陀螺漂移是影响重力测量惯性稳定平台精度的主要误差源。为了保证稳定平台的性能,需要对陀螺漂移进行标定,并用标定结果对稳定平台进行补偿。笔者提出了一种利用惯性稳定平台的几何稳定状态标定陀螺漂移的方法,建立了稳定平台几何稳定状态的运动微分方程,推导出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输出为观测量,采用扩展卡尔曼滤波器对陀螺仪漂移系数进行估计。仿真实验的结果表明,新的陀螺漂移标定方法是有效和准确的,常值漂移估计误差不超过 0.7%,与加速度成比例漂移估计误差不超过 1%,与加速度平方成比例的漂移估计误差不超过 2%。

**关键词**: 惯性稳定平台;陀螺漂移;几何稳定状态;扩展卡尔曼滤波器
**中图分类号**: P631 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2015)S1-0028-05

在动基座开展重力信息测量需要惯性稳定平台的支持。惯性稳定平台由装有陀螺仪和加速度计的台体及框架系统组成,陀螺仪作为角度或角速度传感器敏感载体的角运动;框架系统提供台体相对载体的转动自由度。陀螺仪、伺服放大线路、框架轴力矩电机及框架本身组成稳定回路,隔离载体角运动等干扰因素对台体的影响,使台体姿态相对惯性空间保持不变,此时稳定平台处于几何稳定工作状态。在此基础上,通过稳定平台的修正回路施加修正指令(力矩),使台体按照特定规律相对惯性空间转动,例如跟踪地理坐标系,此时稳定平台处于空间积分工作状态[1]。

陀螺漂移是影响稳定平台跟踪惯性坐标系或地理坐标系的主要因素。为了克服陀螺漂移对稳定平台的影响,必须在平台控制中对陀螺漂移进行补偿。目前广泛采用的方案是在陀螺仪尚未安装在稳定平台之前,对其进行独立标定,获得陀螺漂移系数,再通过修正回路补偿陀螺漂移[2]。由于稳定平台的实际工作环境与实验室的标定环境存在差异,同时陀螺仪存在逐次启动漂移误差,独立标定的漂移数据无法全面反映陀螺仪在平台中的特性。因此在惯性稳定平台中对陀螺仪的漂移系数进行标定是非常必要的。笔者以安装单自由度积分陀螺的三轴惯性稳定平台为例,提出一种利用稳定平台几何稳定工作状态标定陀螺仪漂移的方法,该方法可以推广应用于其他类型惯性稳定平台[3]。

## 1 稳定平台中陀螺仪的误差模型

三轴惯性稳定平台通过外框轴、内框轴和台体轴提供的三个转动自由度保证台体与载体角运动隔离。平台坐标系 $Oxyz$ 与台体固连,$Ox$、$Oy$ 位于台体平面内且正交,$Oz$ 垂直于台面。台体上安装 3 只单自由度陀螺仪 $G_x$、$G_y$ 和 $G_z$,其输入轴分别平行于 $oX$ 轴、$Oy$ 轴和 $Oz$ 轴,构成陀螺坐标系 $Ox_gy_gz_g$。台体上还安装有 3 只加速度计 $A_X,A_Y,A_Z$,其敏感轴也与平台坐标系的三轴平行,构成加速度计坐标系 $Ox_ay_az_a$。通常单自由度陀螺仪的漂移模型可简化描述为:

$$\omega_d = D_f + D_iA_i + D_{ii}A_i^2, \tag{1}$$

式中:$\omega_d$ 为陀螺仪的总漂移速率;$A_i$ 为沿陀螺仪输入轴的加速度;$D_f$ 为与加速度无关的陀螺仪漂移系数;$D_i$ 为与沿输入轴加速度成比例的陀螺漂移系数;$D_{ii}$为与沿输入轴加速度平方成比例的陀螺漂移系数。在三轴惯性稳定平台中,三只陀螺仪 $G_x$、$G_y$、$G_z$ 的漂移模型可描述为

**收稿日期**: 2015-12-04
**基金项目**: 国家高技术研究发展计划("863"计划)项目(2011AA060501)

$$\begin{cases}\omega_{dx}=D(x)_f+D(x)_i a_x+D(x)_{ii}a_x^2+\varepsilon_x\\ \omega_{dy}=D(y)_f+D(y)_i a_y+D(y)_{ii}a_y^2+\varepsilon_y,\\ \omega_{dz}=D(z)_f+D(z)_i a_z+D(z)_{ii}a_z^2+\varepsilon_z\end{cases} \quad (2)$$

其中,$\omega_{dx}$、$\omega_{dy}$、$\omega_{dz}$分别为 $G_x$、$G_y$、$G_z$ 的漂移速度;$A_x$、$A_y$、$A_z$ 分别为 $G_x$、$G_y$、$G_z$ 输入轴的加速度;$D(x)_f$、$D(y)_f$、$D(z)_f$ 分别为 $G_x$、$G_y$、$G_z$ 的常值漂移分量;$D(x)_i$、$D(y)_i$、$D(z)_i$ 分别为 $G_x$、$G_y$、$G_z$ 与输入轴加速度成比例的漂移系数;$D(x)_{ii}$、$D(y)_{ii}$、$D(z)_{ii}$分别为 $G_x$、$G_y$、$G_z$ 与输入轴加速度平方成比例的漂移系数;$\varepsilon_x$、$\varepsilon_y$、$\varepsilon_z$ 分别为 $G_x$、$G_y$、$G_z$ 的随机漂移误差。

## 2　漂移误差辨识的基本方法

在惯性稳定平台上进行陀螺仪漂移标定要求静基座条件,标定时对陀螺不施加控制力矩,令稳定平台工作在几何稳定工作状态。平台的稳定回路保证平台坐标系 $Oxyz$ 跟踪陀螺坐标系 $Ox_gy_gz_g$,忽略安装误差,可以认为两个坐标系重合。此时,稳定平台相对惯性空间的运动完全由陀螺漂移引起,陀螺漂移等效为稳定平台的漂移。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。由于地球自转角速度为已知量,因此从原理上来说只要平台稳定、回路工作精确且能够准确测量出平台坐标系各轴的旋转角度,就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误差[4-7]。对于单轴和双轴惯性稳定平台而言,平台坐标系的角运动可以直接通过测量平台框架轴角度传感器的输出来获得。对于三轴平台,由于框架轴指向不能保持与平台坐标系重合,因此采用平台上的加速度计的输出作为平台坐标系角运动的间接测量值。

在进行漂移标定之前,首先通过对陀螺施加控制力矩将稳定平台调整到开始漂移标定的初始姿态,建立稳定平台的初始坐标系 $Ox_0y_0z_0$,此坐标系相对地心坐标系静止,在此时刻陀螺坐标系 $Ox_gy_gz_g$ 与 $Ox_0y_0z_0$ 重合。开始漂移标定后,停止对陀螺施矩,稳定平台开始工作在几何稳定状态,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,平台稳定回路驱动平台坐标系 $Oxyz$ 跟踪陀螺坐标系 $Ox_gy_gz_g$,使平台产生相对于初始坐标系的转动。由于平台动坐标系与陀螺坐标系保持一致,平台坐标系三轴分别对应三只陀螺仪的输入轴的方向,平台上三只加速度计的输入轴敏感重力加速度在平台坐标系三轴方向的投影分量。

由于陀螺漂移速度通常是较小量,为了充分激励漂移模型的系数,整个标定过程将连续进行数天,在平台相对初始坐标系运动的过程中,同步记录加速度计的输出值。标定完成后采用卡尔曼滤波方法对陀螺仪的漂移误差系数进行估计。

## 3　稳定平台的运动方程

三轴稳定平台的运动如图 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),$Oxyz$ 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。从初始坐标系到平台坐标系的变换矩阵为 $\boldsymbol{C}_p^0$

$$\boldsymbol{C}_p^0=\begin{bmatrix}\cos\theta_z & \sin\theta_z & 0\\ -\sin\theta_z & \cos\theta_z & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta_y & 0 & -\sin\theta_y\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta_x & \sin\theta_x\\ 0 & -\sin\theta_x & \cos\theta_x\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}\cos\theta_y\cos\theta_z & \cos\theta_x\sin\theta_z+\sin\theta_x\sin\theta_y\cos\theta_z & \sin\theta_x\sin\theta_z-\cos\theta_x\sin\theta_y\cos\theta_z\\ -\cos\theta_y\sin\theta_z & \cos\theta_x\cos\theta_z-\sin\theta_x\sin\theta_y\cos\theta_z & \sin\theta_x\cos\theta_z+\cos\theta_x\sin\theta_y\sin\theta_z\\ \sin\theta_y & -\sin\theta_x\cos\theta_y & \cos\theta_x\cos\theta_y\end{bmatrix}。\quad (3)$$

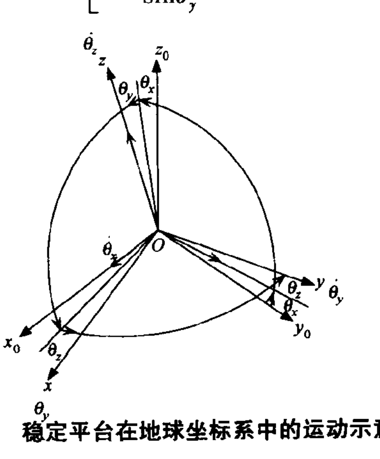

图 1　稳定平台在地球坐标系中的运动示意

地球自转角速度 $\boldsymbol{\omega}_e$ 在平台初始坐标系 $Ox_0y_0z_0$ 中的分量为 $\boldsymbol{\omega}_{eo}=[\omega_{ex}\ \omega_{ey}\ \omega_{ez}]^T$,由于陀螺漂移引起的平台动坐标系,$Oxyz$ 的相对惯性空间的运动角速度为 $\boldsymbol{\omega}_d=[\omega_{dx}\ \omega_{dy}\ \omega_{dz}]^T$,平台坐标系 $Oxyz$ 相对初始坐标系 $Ox_0y_0z_0$ 运动的角速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ 为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}=\begin{bmatrix}0\\0\\\dot{\theta}_z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\cos\theta_z & \sin\theta_z & 0\\ -\sin\theta_z & \cos\theta_z & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\\dot{\theta}_y\\0\end{bmatrix}+$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_z & \sin\theta_z & 0 \\ -\sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & -\sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}。\quad (4)$$

根据运动学原理，平台相对惯性空间的角速度 $\boldsymbol{\omega}_d$ 等于平台基座的牵连运动角速度 $\boldsymbol{\omega}_e$ 变换到平台坐标系 $Oxyz$ 后，再加上平台坐标系的相对角速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$。平台的运动微分方程可表示为

$$\boldsymbol{\omega}_d = \boldsymbol{C}_0^p \boldsymbol{\omega}_{eo} + \dot{\boldsymbol{\theta}}, \quad (5)$$

设定稳定平台的初始坐标系 $Ox_0y_0z_0$ 与当地地理坐标系重合，构成东北天坐标系，当地纬度值为 $\varphi$。将式(5)展开为标量形式

$$\begin{bmatrix} \omega_{dx} \\ \omega_{dy} \\ \omega_{dz} \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_0^p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_e \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_y\cos\theta_z & \sin\theta_z & 0 \\ -\cos\theta_y\sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ \sin\theta_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix}, \quad (6)$$

整理后可得到描述平台坐标系运动的非线性微分方程组

$$\begin{cases} \dot{\theta}_x = f_1(\theta_x,\theta_y,\theta_z,\omega_{dx},\omega_{dy},\omega_{dz}) \\ \dot{\theta}_y = f_2(\theta_x,\theta_y,\theta_z,\omega_{dx},\omega_{dy},\omega_{dz}) \\ \dot{\theta}_z = f_3(\theta_x,\theta_y,\theta_z,\omega_{dx},\omega_{dy},\omega_{dz}) \end{cases}。\quad (7)$$

## 4　建立扩展卡尔曼滤波器估计陀螺漂移系数

由图1所示的平台运动几何关系，可得重力加速度矢量 $\boldsymbol{g}$ 在平台坐标系 $Oxyz$ 中的投影分量为

$$\boldsymbol{g} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_0^p \begin{bmatrix} g_{x0} \\ g_{y0} \\ g_{z0} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中$[g_{x0}\ g_{y0}\ g_{z0}]^T$ 为沿平台初始坐标系的重力分量。由于在漂移系数标定过程中，沿平台坐标系各轴的加速度$[A_x\ A_y\ A_z]^T=[G_x\ G_y\ G_z]^T$，将式(8)的结果带入陀螺仪漂移模型式(2)，并忽略陀螺随机漂移 $\varepsilon_x$、$\varepsilon_y$ 和 $\varepsilon_z$ 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(7)，经整理可得到

$$\begin{cases} \dot{\theta}_x = f_1(\theta_x,\theta_y,\theta_z,D(x)_f,D(x)_i,D(x)_{ii},D(y)_f,D(y)_i,D(y)_{ii},D(z)_f,D(z)_i,D(z)_{ii}) \\ \dot{\theta}_y = f_2(\theta_x,\theta_y,\theta_z,D(x)_f,D(x)_i,D(x)_{ii},D(y)_f,D(y)_i,D(y)_{ii},D(z)_f,D(z)_i,D(z)_{ii}) \\ \dot{\theta}_z = f_3(\theta_x,\theta_y,\theta_z,D(x)_f,D(x)_i,D(x)_{ii},D(y)_f,D(y)_i,D(y)_{ii},D(z)_f,D(z)_i,D(z)_{ii}) \end{cases}, \quad (9)$$

式中$f_1$、$f_2$ 和$f_3$ 的展开表达式较为繁琐，笔者不再详细列出。

令卡尔曼滤波器的12维状态向量为

$$\boldsymbol{X} = [\theta_x,\theta_y,\theta_z,D(x)_f,D(x)_i,D(x)_{ii},D(y)_f, D(y)_i,D(y)_{ii},D(z)_f,D(z)_i,D(z)_{ii}], \quad (10)$$

状态向量的前3个元素为平台坐标系相对初始坐标系的角位移，后9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

$$\dot{\boldsymbol{X}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X}(t)) + \boldsymbol{G}\boldsymbol{W}(t), \quad \boldsymbol{W}(t) \sim N(0,\boldsymbol{Q}(t)), \quad (11)$$

式中$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{X})$为12维向量函数$[f_1\ f_2\ f_3\ 0\ \cdots\ 0]^T$；$\boldsymbol{G}$为单位矩阵；$\boldsymbol{W}(t)$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 $\boldsymbol{Q}(t)$。

滤波器的观测向量为三个加速度计的输出 $Z=[E_x\ E_y\ E_z]^T$，由于此时加速度输入为式(8)描述的重力加速度分量，因此$[E_x\ E_y\ E_z]^T=[G_x\ G_y\ G_z]^T$，经整理可得三个非线性方程

$$\begin{cases} E_x = h_1(\theta_x,\theta_y,\theta_z) \\ E_y = h_2(\theta_x,\theta_y,\theta_z) \\ E_z = h_3(\theta_x,\theta_y,\theta_z) \end{cases}, \quad (12)$$

式中 $h_1$、$h_2$ 和 $h_3$ 的展开表达式较为繁琐，笔者不再详细列出。滤波器观测方程的一般表达式为

$$\boldsymbol{Z}_k(t) = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{X}_k) + \boldsymbol{V}_k \quad \boldsymbol{V}_k \sim N(0,\boldsymbol{R}_k), \quad (13)$$

式中 $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{X})$为3维向量函数$[h_1\ h_2\ h_3]^T$；$\boldsymbol{V}_k$ 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 $\boldsymbol{R}_k$。

上述状态方程式(11)和观测方程式(13)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对稳定平台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12个状态，滤波器为12阶。在给定噪声协方差 $\boldsymbol{Q}(t)$、$\boldsymbol{R}_k$、初始状态估计 $\hat{\boldsymbol{X}}(0)$及其协方差矩阵 $\boldsymbol{P}(0)$的条件下，便可以设计出扩展卡尔曼滤波器。根据测量数据 $\boldsymbol{Z}_k(t)$便可递推地计算出状态估计 $\hat{\boldsymbol{X}}$，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

$$\hat{X}_{k,k-1} = \hat{X}_{k-1,k-1} + f(\hat{X}_{k-1,k-1}) \cdot \Delta t; \qquad (14)$$

一步状态转移矩阵为

$$\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} = \boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_{k,k-1} \cdot \Delta t; \qquad (15)$$

状态向量的误差协方差矩阵的预测值为

$$\boldsymbol{P}_{k,k-1} = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} \cdot \boldsymbol{P}_{k-1,k-1} \cdot \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}_{k,k-1} + \boldsymbol{Q} \cdot \Delta t; \qquad (16)$$

增益矩阵为

$$\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_{k,k-1} \cdot \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}_k \cdot (\boldsymbol{H}_k \cdot \boldsymbol{P}_{k,k-1} \cdot \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}_k + \boldsymbol{R}_k)^{-1}; \qquad (17)$$

状态向量的估计值为

$$\hat{X}_{k,k} = \hat{X}_{k,k-1} + \boldsymbol{K}_k \cdot (\boldsymbol{Z}_k - \boldsymbol{h}(\hat{X}_{k,k-1})); \qquad (18)$$

状态向量的误差协方差矩阵的估计值为

$$\boldsymbol{P}_{k,k} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k \times \boldsymbol{H}_k) \cdot \boldsymbol{P}_{k,k-1} \cdot (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k \cdot \boldsymbol{H}_k)^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{K}_k \cdot \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}_k; \qquad (19)$$

其中

$$\boldsymbol{F}_{k,k-1} = \frac{\partial \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X})}{\partial \boldsymbol{X}} \bigg|_{X=\hat{X}_{k-1,k-1}}, \qquad (20)$$

$$\boldsymbol{H}_k = \frac{\partial \boldsymbol{h}(\boldsymbol{X})}{\partial \boldsymbol{X}} \bigg|_{X=\hat{X}_{k,k-1}}, \qquad (21)$$

滤波器的初始条件为

$$\hat{X}(0) = E[\boldsymbol{X}(0),] \qquad (22)$$

$$\boldsymbol{P}(0) = \mathrm{Var}[\boldsymbol{X}(0)] = E\{(\boldsymbol{X}(0) - \hat{X}(0))(\boldsymbol{X}(0) - \hat{X}(0))^{\mathrm{T}}\}。 \qquad (23)$$

## 5　仿真实验与分析

为了验证上述陀螺仪漂移标定方法的有效性,进行仿真实验。首先根据给定的陀螺仪漂移系数,由平台的运动方程式(7)产生平台坐标系转角$\theta_x \theta_y$、$\theta_z$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;再将$\theta_x$、$\theta_y$、$\theta_z$带入加速度计的输出模型式(12),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。

**表1　陀螺仪的原始给定漂移系数**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $G_x$ | $D(x)_f$ (°)/h | $D(x)_i$ (°)/(h·g) | $D(x)_{ii}$ (°)/(h·g$^2$) | Std($\varepsilon_x$) (°)/h |
| | 0.5 | −0.2 | −0.1 | 0.002 |
| $G_y$ | $D(y)_f$ (°)/h | $D(y)_i$ (°)/(h·g) | $D(y)_{ii}$ (°)/(h·g$^2$) | Std($\varepsilon_y$) (°)/h |
| | −0.5 | 0.2 | 0.1 | 0.002 |
| $G_z$ | $D(z)_f$ (°)/h | $D(z)_i$ (°)/(h·g) | $D(z)_{ii}$ (°)/(h·g$^2$) | Std($\varepsilon_z$) (°)/h |
| | 0.5 | 0.2 | −0.1 | 0.002 |

加速度计输出观测误差的标准差均为$1\times10^{-5}$ g。滤波器的滤波周期为60 s。滤波器估计陀螺仪漂移系数的曲线如图2~图4所示,从图中可以看出,扩展卡尔曼滤波器是稳定的,并能对陀螺漂移系数实现准确估计,估计结果如表2所示。

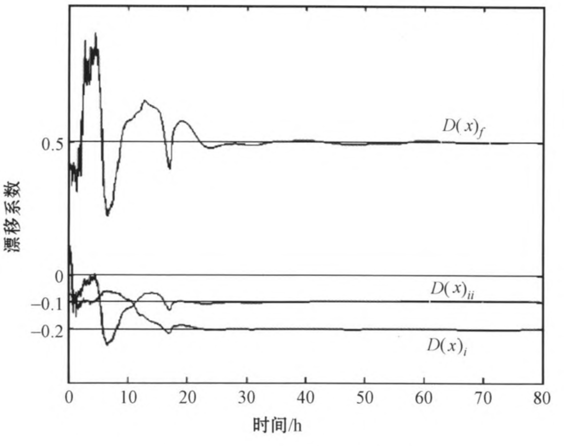


图2　$G_x$漂移系数估计值

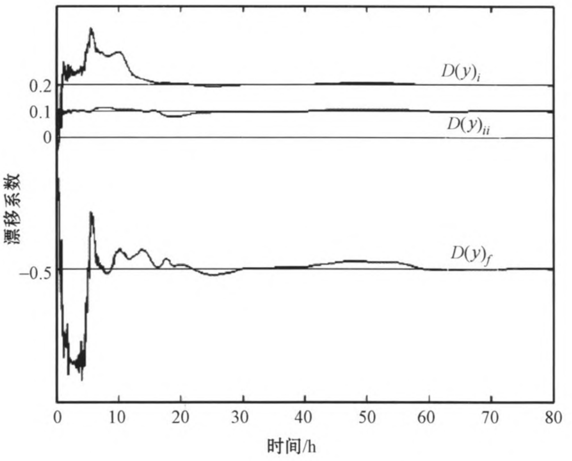


图3　$G_y$漂移系数估计值

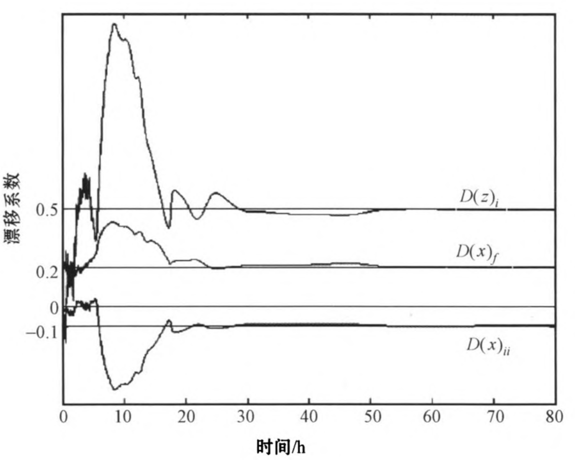


图4　$G_z$漂移系数估计值

表2　陀螺仪漂移系数估计值

| | | | |
|---|---|---|---|
| $G_x$ | $\frac{D(x)_f}{(°)/h}$ | $\frac{D(x)_i}{(°)/(h\cdot g)}$ | $\frac{D(x)_{ii}}{(°)/(h\cdot g^2)}$ |
| | 0.49681 | -0.20185 | -0.09824 |
| $G_y$ | $\frac{D(y)_f}{(°)/h}$ | $\frac{D(y)_i}{(°)/(h\cdot g)}$ | $\frac{D(y)_{ii}}{(°)/(h\cdot g^2)}$ |
| | -0.50340 | 0.19826 | 0.10176 |
| $G_z$ | $\frac{D(z)_f}{(°)/h}$ | $\frac{D(z)_i}{(°)/(h\cdot g)}$ | $\frac{D(z)_{ii}}{(°)/(h\cdot g^2)}$ |
| | 0.49712 | 0.20153 | -0.09835 |

滤波器对常值漂移估计误差不超过0.7%，与加速度成比例漂移估计误差不超过1%，与加速度平方成比例的漂移估计误差不超过2%。因此利用惯性稳定平台的几何稳定工作状态，采用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，满足平台稳定精度对陀螺仪漂移补偿的要求。

## 6　结语

研究了在惯性稳定平台中对陀螺漂移进行标定的方法。以三轴稳定平台为例，通过分析稳定平台在几何稳定工作状态下的运动微分方程，建立了以陀螺仪漂移系数为状态变量的系统状态方程，采集加速度计的输出为观测值，用扩展卡尔曼滤波器对陀螺仪的漂移系数进行估计。仿真实验结果证明了此标定方法的有效性和较高的精确度。

在描述的标定方法中，陀螺仪的漂移模型仅考虑了常数项和与陀螺输入轴加速度及加速度平方成比例的误差项，而没有考虑与其他方向加速度相关的漂移项；当需要标定更多的系数时，测量方程和状态方程将会复杂些，但标定的总体思路不会改变。

**参考文献：**


[1]　郭富强，于波，汪叔华. 陀螺稳定装置及其应用[M]. 西安：西北工业大学出版社，1995.

[2]　郭素云. 陀螺仪原理及应用[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1985.

[3]　MeMurran M W, Ling J A. Development and testing of precise marine electrostatic gyroscope [C]//Presented at ION National Meeting, West Point, N. Y. , 1972.

[4]　Blanchard R L. High accuracy calibration of electrostatic gyro strapdown navigation systems [C]//AIAA Guidance and Control Conference, Palo Alto, California, 1978, 8: 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]. Gyroscopy 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.

[7]　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.

[8]　关肇直. 线形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.

[9]　高钟毓. 惯性导航系统技术[M]. 北京：清华大学出版社，2012.


# The method of calibrating gyroscope drift in the geometrical stability state of inertial stabilized platform


LI Zhong

(*Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin　300131, China*)



**Abstract**: The gyroscope drift is the main error resource of the inertial stabilized platform. Calibrating and compensating the gyroscope drift is the key to improving the performance of the platform. Because the off-line test results cannot properly illustrate the characteristics of the on-line gyroscopes, calibrating the gyroscope drift in the platform system is necessary. In the geometrical stability state, only the drift affects the platform movement, and the movement can be described with the differential equations. Based on these differential equations, the authors built a set of system state equations, with the drift model coefficients as the state variables. By 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 and precision of the new test method was evaluated through the simulation.



**Key words**: inertial-stabilized platform; gyroscope drift; geometrical stability state; extended Kalman filter (EKF)



**作者简介**：李中（1972-），男，研究员，南开大学博士研究生毕业，现从事惯性导航和重力信息测量方向研究工作。