

捷联惯导用挠性陀螺静态漂移误差建模

朱家海, 李程

(空军工程大学工程学院, 陕西西安 710038)

摘要: 运用极轴翻滚试验, 研究了捷联惯导系统使用的动力调谐式挠性陀螺的静态漂移误差的建模方法。仿真分析和试验验证表明, 本方法具有建模准确、估计参数较多, 对试验数据异常值不敏感等优点, 具有较强的实用性。

关键词: 陀螺漂移; 极轴翻滚试验; 建模

中图分类号: V241.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2006)03-0004-03

陀螺漂移误差是造成惯导系统误差的主要因素。陀螺漂移误差一般由三部分构成^[1]: 一是由线运动或比力引起的静态误差; 二是由角运动引起的动态误差; 三是由随机干扰因素引起的随机误差。由于载体必然存在线加速运动, 故建立精确的陀螺静态漂移误差模型对惯导系统的误差补偿就显得尤为重要^[2]。

1 陀螺静态误差漂移模型的选择

陀螺静态漂移误差模型是指在线运动条件下, 陀螺漂移误差与加速度(比力)的数学表达式。动力调谐式挠性陀螺静态误差方程已有描述^[1], 由于工程实践中, 设计较完善的动力调谐式挠性陀螺的误差模型系数 $D_{YY}(X)$ 、 $D_{ZZ}(X)$ 、 $D_{XX}(Y)$ 、 $D_{ZZ}(Y)$ 趋于零, 建模时可以忽略^[3], 因此, 本文所要建立的模型简化为

$$\begin{aligned} \omega_{dX} &= \omega_{IE}(X) + D_F(X) + D_X(X)g_X + D_Y(X)g_Y + D_Z(X)g_Z + D_{XY}(X)g_Xg_Y + D_{YZ}(X)g_Yg_Z + D_{ZX}(X)g_Zg_X + D_{XX}(X)g_X^2 \\ \omega_{dY} &= \omega_{IE}(Y) + D_F(Y) + D_X(Y)g_X + D_Y(Y)g_Y + D_Z(Y)g_Z + D_{XY}(Y)g_Xg_Y + D_{YZ}(Y)g_Yg_Z + D_{ZX}(Y)g_Zg_X + D_{YY}(Y)g_Y^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ω_{dX} 、 ω_{dY} 分别为 X 轴、Y 轴的漂移总量; $\omega_{IE}(X)$ 、 $\omega_{IE}(Y)$ 分别为地球自转角速度在陀螺 X 轴、Y 轴的投影分量; g_X 、 g_Y 、 g_Z 分别为加速度在 X、Y、Z 轴上的投影分量; $D_F(X)$ 、 $D_F(Y)$ 分别为与加速度无关的漂移系数; $D_X(X)$ 、 $D_Y(X)$ 、 $D_Z(X)$ 、 $D_X(Y)$ 、 $D_Y(Y)$ 、 $D_Z(Y)$ 分别为与加速度一次方有关的漂移系数; $D_{XY}(X)$ 、 $D_{YZ}(X)$ 、 $D_{ZX}(X)$ 、 $D_{XX}(X)$ 、 $D_{XY}(Y)$ 、 $D_{YZ}(Y)$ 、 $D_{ZX}(Y)$ 、 $D_{YY}(Y)$ 分别为与加速度二次方有关的漂移系数。

2 陀螺静态误差漂移模型的确定

本文主要分析陀螺自转轴与地球极轴平行时的翻滚试验, 试验方法采用力反馈测试法^[1]。

2.1 试验方位的选择

图 1 给出了这种翻滚试验的轴向关系, φ 表示实验室当地纬度。陀螺和转台一起相对基座的转角 θ 以陀螺自转轴 Z 与地理西向 W 之间的夹角来确定, 从自转轴 Z 顶端看去, 顺时针方向为正。试验时, 比力就是当地重力矢量 g , 沿陀螺各轴的比力分量相应为 g_X 、 g_Y 、 g_Z , 方向向上为正, 并使陀螺自转轴分别指向地球极轴的正(北)和负(南)方向, 采集每次试验的电流值。

2.2 误差模型漂移系数的计算

2.2.1 陀螺漂移的测量

收稿日期: 2006-01-19

基金项目: 军队科研基金资助

作者简介: 朱家海(1962-), 男, 安徽马鞍山人, 教授, 主要从事导航、制导与控制等方面的研究。

试验方位选择之后,应先对陀螺进行8位置试验,以此来确定陀螺力矩器的刻度因数 S_{TX} 、 S_{TY} 。当 S_{TX} 、 S_{TY} 为已知时,陀螺沿 X 和 Y 轴的漂移 ω_{dX} 、 ω_{dY} 就可用输入到陀螺力矩器中的反馈电流 I_Y 、 I_X 来表示,即 $\omega_{dX} = S_{TY}I_Y$ 和 $\omega_{dY} = S_{TX}I_X$ 。式中: I_Y 、 I_X 分别为输入到陀螺 X 和 Y 轴力矩器上的电流。

2.2.2 陀螺漂移的计算与分解

为确定陀螺误差模型的漂移系数,应先根据图1所示的方法,计算陀螺各轴上的重力分量,见表1。

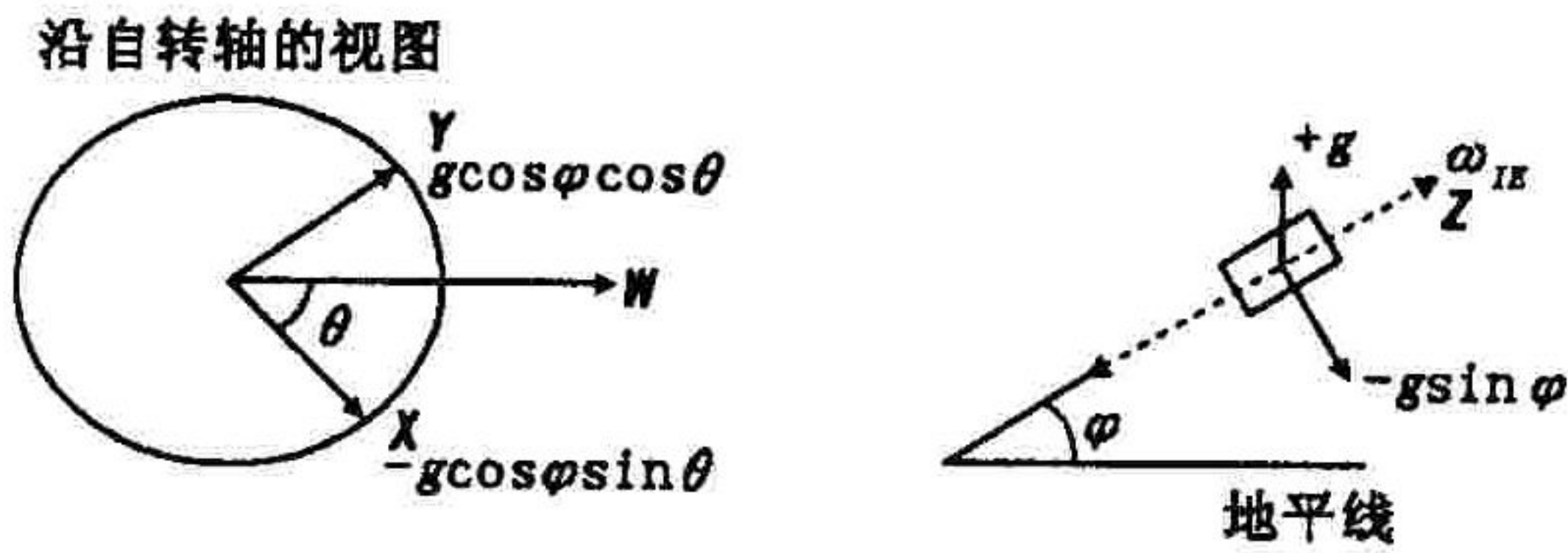


图1 陀螺自转轴Z沿极轴方向的翻滚试验

表1 陀螺各轴上的重力分量

分量	Z轴指北	Z轴指南
g_x	$-g\cos\varphi\sin\theta$	$g\cos\varphi\sin\theta$
g_y	$g\cos\varphi\cos\theta$	$-g\cos\varphi\cos\theta$
g_z	$g\sin\varphi$	$-g\sin\varphi$

将表1计算的重力分量带入式(1),并取实验室条件下的 $|g| = 1$,同时考虑到地球自转角速度 ω_{IE} 在陀螺 X 、 Y 轴上的分量为零,即有 $\omega_{IE}(X) = 0$ 、 $\omega_{IE}(Y) = 0$,这样可得陀螺 Z 轴沿地球极轴正、反指向时,各自对应的两个测量轴的误差漂移方程。

以陀螺 X 轴误差漂移方程为例。当 Z 轴指北时,有式(2);当 Z 轴指南时,有式(3)。

$$\omega_{dX} = D_F(X) + D_Z(X)\sin\varphi + [D_{XX}(X)\cos^2\varphi]/2 - D_X(X)\cos\varphi\sin\theta - [D_{ZX}(X)\sin2\varphi\sin\theta]/2 + D_Y(X)\cos\varphi\cos\theta + [D_{YZ}(X)\sin2\varphi\cos\theta]/2 - [D_{XY}(X)\cos^2\varphi\sin2\theta]/2 - [D_{XY}(X)\cos^2\varphi\cos2\theta]/2 \quad (2)$$

$$\omega_{dX} = D_F(X) + D_Z(X)\sin\varphi + [D_{XX}(X)\cos^2\varphi]/2 - D_X(X)\cos\varphi\sin\theta + [D_{ZX}(X)\sin2\varphi\sin\theta]/2 - D_Y(X)\cos\varphi\cos\theta + [D_{YZ}(X)\sin2\varphi\cos\theta]/2 + [D_{XY}(X)\cos^2\varphi\sin2\theta]/2 - [D_{XX}(X)\cos^2\varphi\cos2\theta]/2 \quad (3)$$

式(2)、(3)表明,陀螺测试时的漂移角速率是转台转角 θ 的周期函数。除常量值外,还包括 θ 和 2θ 的正余弦函数,相当于包含二次谐波有限项的傅里叶展开式,因此测试条件下的陀螺漂移可表示为

$$\omega_{dX} = A_0(X)_N + B_1(X)_N\sin\theta + A_1(X)_N\cos\theta + B_2(X)_N\sin2\theta + A_2(X)_N\cos2\theta \quad (4)$$

将式(4)与(2)对应,可得 X 轴傅里叶系数表达式见表2

表2 X轴傅里叶系数表达式

系数	Z轴指北时	系数	Z轴指南时
平均值:	$A_0(X)_N = D_F(X) + D_Z(X)\sin\varphi + [D_{XX}(X)\cos^2\varphi]/2$	平均值:	$A_0(X)_S = D_F(X) - D_Z(X)\sin\varphi + [D_{XX}(X)\cos^2\varphi]/2$
$\sin\theta$ 系数	$B_1(X)_N = -D_X(X)\cos\varphi - [D_{ZX}(X)\sin2\varphi]/2$	$\sin\theta$ 系数	$B_1(X)_S = -D_X(X)\cos\varphi + [D_{ZX}(X)\sin2\varphi]/2$
$\cos\theta$ 系数	$A_1(X)_N = D_Y(X)\cos\varphi + [D_{YZ}(X)\sin2\varphi]/2$	$\cos\theta$ 系数	$A_1(X)_S = -D_Y(X)\cos\varphi + [D_{YZ}(X)\sin2\varphi]/2$
$\sin2\theta$ 系数	$B_2(X)_N = -[D_{XY}(X)\cos^2\varphi]/2$	$\sin2\theta$ 系数	$B_2(X)_S = [D_{XY}(X)\cos^2\varphi]/2$
$\cos2\theta$ 系数	$A_2(X)_N = -[D_{XX}(X)\cos^2\varphi]/2$	$\cos2\theta$ 系数	$A_2(X)_S = -[D_{XX}(X)\cos^2\varphi]/2$

2.2.3 陀螺漂移系数的确定

纬度 φ 是已知的,故可通过计算对应傅里叶系数的和或差,得出陀螺沿 X 轴的漂移系数值: $D_X(X) = -[B_1(X)_N + B_1(X)_S]/2\cos\varphi$; $D_Y(X) = [A_1(X)_N - A_1(X)_S]/2\cos\varphi$; $D_Z(X) = [A_0(X)_N - A_0(X)_S]/2\sin\varphi$; $D_{XY}(X) = -[B_2(X)_N - B_2(X)_S]/\cos^2\varphi$; $D_{YZ}(X) = [A_1(X)_N + A_1(X)_S]/\sin2\varphi$; $D_{ZX}(X) = -[B_1(X)_N - B_1(X)_S]/\sin2\varphi$; $D_{XX}(X) = -[A_2(X)_N + A_2(X)_S]/\cos^2\varphi$; $D_F(X) = [A_0(X)_N + A_0(X)_S]/2 - [D_{XX}(X)\cos2\varphi]/2$ 。

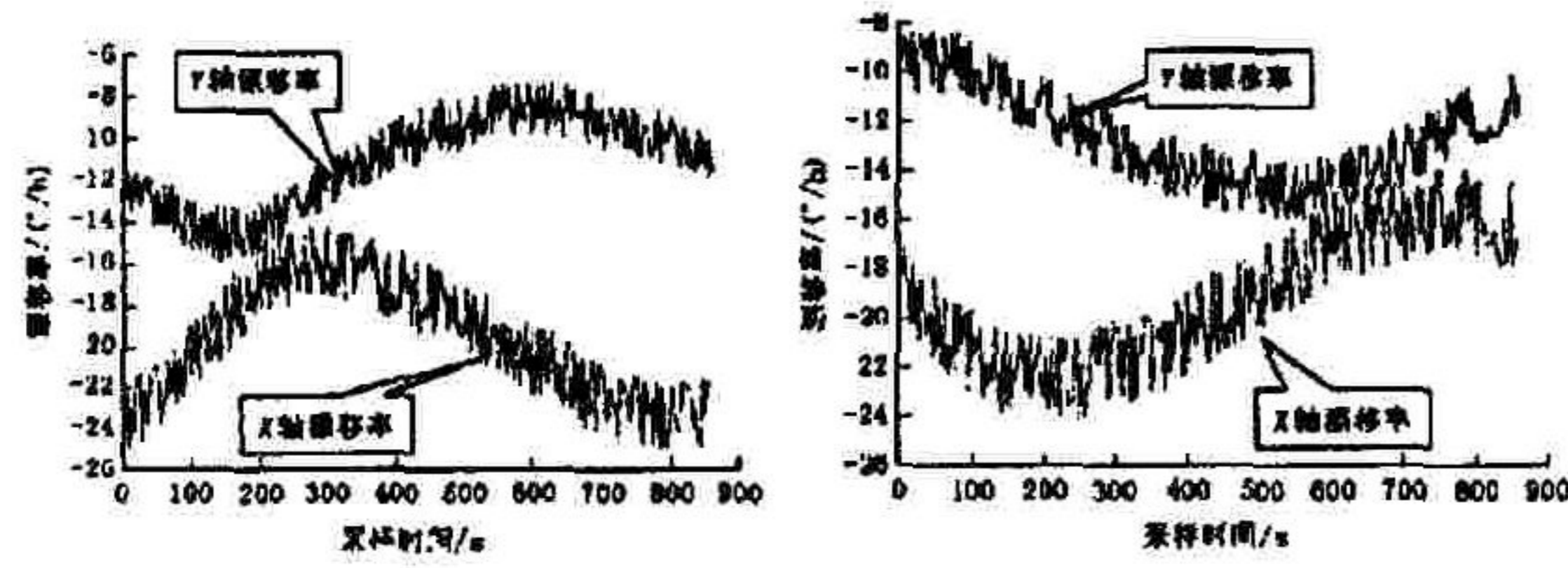
同理可得陀螺沿 Y 轴的各漂移系数值。以上表明,通过 Z 轴指向的变换(地球极轴的正、负两个方向)进行陀螺翻滚试验,可以确定出式(1)的全部陀螺静态漂移误差系数,不需再做其它附加位置试验。

确定陀螺漂移误差系数时,可从转台转过1周,力矩器电流随转台转角变化的曲线上,按均匀时间间隔去读取相应的电流数值;同时利用陀螺8位置试验提供的刻度因数 S_{TX} 和 S_{TY} 来计算陀螺沿 X 、 Y 轴的漂移率,再按照上述计算公式求取所需的漂移误差系数。

3 实验验证

根据上述方法,对某型动力调谐式挠性陀螺作极轴翻滚试验。转台转速为100倍的地球自转角速度,采样周期为3s,结果见图2(Z 指向地球自转轴的北、南方向时,所测得的陀螺 X 轴、 Y 轴的反馈电流值乘以各

自的刻度因数后的漂移率)。根据测得的陀螺漂移率,计算出的傅里叶变换的有限项系数见表3。



(a) Z轴指北时 (b) Z轴指南时

图2 Z轴指北和指南时所测得的X轴与Y轴的漂移率

表3 解出的各项傅里叶系数值

傅里叶 系数	Z轴指北时		Z轴指南时	
	X轴	Y轴	X轴	Y轴
A_0	-19.651 0	-11.116 4	-19.226 8	-12.716 7
B_1	2.242 3	-2.652 5	-2.995 7	1.368 7
A_1	-2.641 3	-0.903 3	1.112 7	1.942 7
B_2	-0.238 6	-0.421 6	-0.772 1	0.302 0
A_2	-0.461 3	0.342 6	0.236 5	0.340 1

根据表3并利用式(3),即可确定陀螺沿X、Y轴的漂移系数,见表4。进而得到其静态误差漂移模型。

表4 陀螺沿X轴、Y轴的漂移系数

坐标轴	D_F	D_X	D_Y	D_Z	D_{XY}	D_{YZ}	D_{ZX}	D_{XX} 或 D_{YY}
X	-19.097 5	0.455 5	-2.269 9	-0.377 2	-0.780 1	-1.643 7	-0.632 3	0.328 8
Y	-11.627 0	0.776 3	-1.720 9	1.422 9	1.058 3	1.117 7	0.323 9	-0.098 4

4 结论

本文所研究的利用极轴翻滚试验建立挠性陀螺静态误差漂移模型的方法,是对原有的极轴翻滚试验方法的改进和完善。与原有的试验方法相比,优点有:

一是在数据采集方面,原有的试验弊端在于重复人工转动转台,步骤较为繁琐,且对转台精度要求较高,当转动间隔角较小时,就更显得试验步骤繁琐,间隔角较大时,又不能完全反映陀螺仪的频率特性。本方法是采用速率转台连续转动转台,并以固定频率采集反馈电流,操作简单且不损失试验信息,又由于本方法在试验中无需记录转角 θ 的具体数值,从而更加便于试验的进行。

二是在模型选取方面,原有的做法是利用8位置试验提供的常值漂移系数 $D_F(X)$ 和 $D_F(Y)$ 的数值确定其它漂移系数,需对陀螺进行了两次独立试验,从而产生逐次启动误差。而本方法提出了省略 $D_{YY}(X)$ 和 $D_{XX}(Y)$ 这两个对模型精度影响较小的误差系数,从而不再需要八位置试验来提供常值漂移系数来解算模型参数,测试过程中仅需启动一次陀螺,避免了陀螺逐次漂移误差,保证了模型的建立精度。

参考文献:

- [1] 梅硕基. 惯性仪器测试与数据分析[M]. 西安:西北工业大学出版社,1991.
- [2] 魏晓红,张春熹,朱奎宝. 光纤陀螺捷联系统标定测试软件的设计与开发[J]. 中国惯性技术学报,2004,12(16):18-22.
- [3] 付振亮,裴昕国,吕伯儒,等. 惯导平台漂移误差参数辨识的实验研究[J]. 中国惯性技术学报,1999,7(4):12-15.
- [4] 王沫然. MATLAB6.0与科学计算[M]. 北京:电子工业出版社,2001.
- [5] 陈熙源,万德钧,程向红. 捷联陀螺漂移误差模型辨识及其应用[J]. 东南大学学报,1997,27(6):19-22.

(编辑:姚树峰)

The Research of Building Flexible Gyro's Static Error Model of SINS

ZHU Jia-hai, LI Cheng

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: This paper improves the polar axis rolling method, and then builds the static drift error model of dynamically turned flexible gyro used in SINS based on it. Simulation and experiment results show that the improved test method can be used to calculate more parameters, and is more insensitive to abnormal sample data, more accurate and practical than the traditional one.

Key words: gyro drift; polar axis rolling method; modeling