

文章编号: 1001-0920(2011)03-0346-05

基于双轴转位机构的光纤陀螺标定方法

孙枫, 孙伟

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对调制型捷联系统中光纤陀螺误差系数随时间变化的问题, 提出一种利用双轴转位机构实现陀螺六位置静态标定方法. 根据光纤陀螺仪误差模型, 利用转位机构设计六位置标定路径, 激励出陀螺仪标度因数、安装误差和零位, 标定新方案避免了陀螺仪误差系数的耦合. 分析了转位机构的转位误差对标定精度的影响, 并利用调制型捷联系统导航实验对六位置标定方案进行原理性验证. 结果表明, 六位置标定方法所引起的系统定位精度优于传统标定方法.

关键词: 捷联惯导系统; 双轴转位; 光纤陀螺

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research on calibration of IFOG based on two-axis indexing

SUN Feng, SUN Wei

(Automation College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: SUN Wei, E-mail: sunwei-3775235@163.com)

Abstract: Aiming at the problem that the error coefficients of interferometric fiber optic gyroscope(IFOG) are not stable and vary with time slowly in rotary strapdown inertial navigation system, a calibration method based on the six-position is proposed in this paper. According to the error model of IFOG, the error parameters of IFOG, such as scale factor, installation error and zero drift, can be calculated through the six-position calibration path which is proposed by two-axis indexing. Coupling errors between the scale factor and the misalignment can be avoided by using this method. The calibration precision which is caused by the indexing error is analyzed, and the principle of the proposed calibration is validated by the rotary strapdown inertial navigation system(SINS) navigation experiment. The experiment results show that the position accuracy using the proposed method is higher than the traditional one.

Key words: strapdown inertial navigation system; two-axis indexing; interferometric fiber optic gyroscope; calibration

1 引言

光纤陀螺具有精度高、启动快、动态范围大、抗振动冲击及成本低等优点, 是惯性仪表领域的发展趋势^[1-3]. 然而, 光纤陀螺仪的确定性误差是捷联惯导系统最主要的误差源. 因此, 捷联惯导在使用前必须通过标定试验确定出陀螺仪的各项误差系数, 并在捷联惯导系统中进行补偿^[4-5].

陀螺仪标定技术本质上是一种误差补偿技术^[6-8], 通过建立陀螺仪的误差数学模型, 利用一定的试验来确定模型系数, 进而通过软件算法消除误差. 传统标定方法主要依靠速率试验和位置试验确定3个光纤陀螺的标度因数、安装误差角和零位误差^[9-12]. 随着光纤陀螺捷联惯导系统的发展, 捷联惯

导系统对光纤陀螺标定的要求越来越高, 传统的标定方法引进了较大的转台速率误差和标定参数耦合误差, 已不能满足高精度光纤陀螺组件标定的要求. Titterton等人^[13]对传统的分立式陀螺仪标定方案进行了详尽描述, 但该方案涉及的实验步骤及方法繁多. 尚捷等人^[14]提出了基于虚拟噪声的捷联惯导现场最优标定方法, 但该方法并没有涉及具有旋转机构的调制型捷联惯导系统, 而且在调制型捷联系统中的适用性还有待研究. 本文以双轴旋转调制型捷联系统的转位方案为背景, 利用双轴转位机构定位精度高的特点, 设计六位置静态标定方案, 激励出光纤陀螺组件误差模型的12个误差系数. 新标定方法可独立求解出陀螺的各项误差系数, 避免误差参数之间的耦合影响.

收稿日期: 2009-12-02; 修回日期: 2010-04-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60834005, 60775001).

作者简介: 孙枫(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 从事捷联惯性导航系统等研究; 孙伟(1984—), 男, 博士生, 从事捷联惯性导航系统的研究.

2 光纤陀螺简化误差模型

光纤陀螺与机械陀螺不同, 通过光的传输来敏感角速度的变化, 不需要任何转动部件, 是一种真正的全固态陀螺, 其性能从理论上不受加速度的影响. 因此, 光纤陀螺的主要误差源包括标度因数误差、安装误差和零位误差, 其误差模型为^[15-16]

$$\begin{bmatrix} N_{gx} \\ N_{gy} \\ N_{gz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: $\omega_i (i = x, y, z)$ 分别为陀螺仪3个敏感轴的输入角速率, $N_{gi} (i = x, y, z)$ 为光纤陀螺组件的输出, $k_i (i = x, y, z)$ 为陀螺的标度因数, $k_{ij} (i, j = x, y, z$ 且 $i \neq j)$ 为陀螺的安装误差, $D_i (i = x, y, z)$ 为光纤陀螺仪的零位. 标定要解决的问题是将式(1)中除了根据已知的输入 ω_i 和输出 $N_{gi} (i = x, y, z)$ 设计合理的实验外, 激励出模型中的12个未知误差参数.

3 双轴转位的六位置静态标定方案

3.1 六位置转位方案设计

测试设备采用双轴调制型捷联系统中的转位机构, 其所在的地理位置精确已知. 双轴转位机构可分别绕方位轴进行 $\pm 90^\circ, \pm 180^\circ$ 转位; 绕北向轴进行 $\pm 180^\circ$ 转位, 如图1所示.

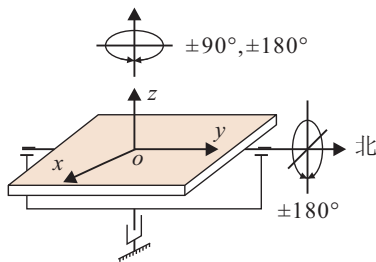


图1 标定用双轴转位机构示意图

地球自转角速度在确定位置是定值, 双轴转位机构的定位精度高, 将二者相结合来设计一组利用转位机构精确定位, 可得到确定输入的六位置静态标定方案. 传统的标定方案是在标度因数和安装误差足够可信的基础上求得零位, 而实际计算中由于各种误差的存在势必导致计算值与真实值不同, 标定精度越高, 对零位的耦合误差越不可忽略. 新的标定方案考虑到标定参数之间耦合误差的影响, 设计的六个位置不但能激励出12个误差参数, 而且各个参数的计算互相独立, 避免了耦合误差的干扰.

利用方位轴 (z 轴) 和北向轴 (y 轴) 转位运动, 可得到如图2所示的六位置标定路径. 具体转位过程如下: 位置1绕 z 轴正向转位 90° 得到位置2; 位置2绕 z 轴正向转位 90° 得到位置3; 位置3绕 z 轴正向转位 90° 得到位置4; 位置1绕 y 轴正向转位 180° 得到位置5; 位置5绕 z 轴正向转位 90° 得到位置6.

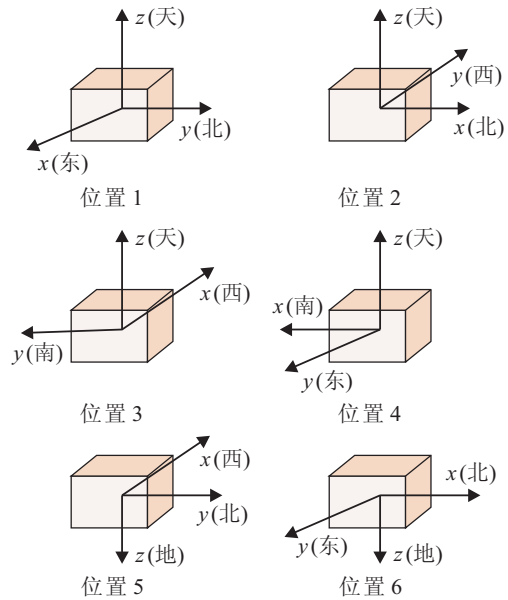


图2 六位置标定路径

3.2 光纤陀螺仪误差参数计算

陀螺在位置1中的理想输入是 $(0 \ \omega_N \ \omega_U)^T$, 输出是 $(N_{gx1} \ N_{gy1} \ N_{gz1})^T$; 在位置3中的输入是 $(0 \ -\omega_N \ \omega_U)^T$, 输出是 $(N_{gx3} \ N_{gy3} \ N_{gz3})^T$. 其中: $\omega_N = \omega_{ie} \cos L, \omega_U = \omega_{ie} \sin L, \omega_{ie}$ 为地球自转角速率, L 表示当地纬度. 根据式(1), 可得到位置1和位置3的陀螺输入输出关系为

$$\begin{bmatrix} N_{gx1} \\ N_{gy1} \\ N_{gz1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_N \\ \omega_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} N_{gx3} \\ N_{gy3} \\ N_{gz3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_N \\ \omega_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式(2)减(3), 可得到部分陀螺误差表达式如下:

$$\begin{cases} \Delta N_{gx13} = N_{gx1} - N_{gx3} = 2k_{xy}\omega_N, \\ \Delta N_{gy13} = N_{gy1} - N_{gy3} = 2k_y\omega_N, \\ \Delta N_{gz13} = N_{gz1} - N_{gz3} = 2k_{zy}\omega_N. \end{cases} \quad (4)$$

同理, 陀螺在位置5中的理想输入是 $(0 \ \omega_N \ -\omega_U)^T$, 输出是 $(N_{gx5} \ N_{gy5} \ N_{gz5})^T$. 陀螺在位置5的输入输出关系为

$$\begin{bmatrix} N_{gx5} \\ N_{gy5} \\ N_{gz5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_N \\ -\omega_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix}. \quad (5)$$

将位置1的输出与位置5的输出相减, 得

$$\begin{cases} \Delta N_{gx15} = N_{gx1} - N_{gx5} = 2k_{xz}\omega_U, \\ \Delta N_{gy15} = N_{gy1} - N_{gy5} = 2k_{yz}\omega_U, \\ \Delta N_{gz15} = N_{gz1} - N_{gz5} = 2k_z\omega_U. \end{cases} \quad (6)$$

陀螺在位置 2 中的理想输入是 $(\omega_N \ 0 \ \omega_U)^T$, 输出是 $(N_{gx2} \ N_{gy2} \ N_{gz2})^T$, 在位置 4 中的理想输入是 $(-\omega_N \ 0 \ \omega_U)^T$, 输出是 $(N_{gx4} \ N_{gy4} \ N_{gz4})^T$. 因此, 可得到位置 2 和位置 4 的陀螺输入输出关系为

$$\begin{bmatrix} N_{gx2} \\ N_{gy2} \\ N_{gz2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_N \\ 0 \\ \omega_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} N_{gx4} \\ N_{gy4} \\ N_{gz4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_y & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\omega_N \\ 0 \\ \omega_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式(7)减(8), 得

$$\begin{cases} \Delta N_{gx24} = N_{gx2} - N_{gx4} = 2k_x\omega_N, \\ \Delta N_{gy24} = N_{gy2} - N_{gy4} = 2k_{yx}\omega_N, \\ \Delta N_{gz24} = N_{gz2} - N_{gz4} = 2k_{zx}\omega_N. \end{cases} \quad (9)$$

根据式(4), (6)和(9), 可求出光纤陀螺仪的标度因数 $k_i (i = x, y, z)$ 和安装误差 $k_{ij} (i, j = x, y, z \text{ 且 } i \neq j)$. 利用上述固定位置对陀螺仪的零位误差进行求取, 首先将位置 3 的输出与位置 5 的输出相加, 这里只考虑 y, z 轴的输出, 根据式(1), 得

$$\begin{cases} N_{gy3} + N_{gy5} = 2D_y, \\ N_{gz3} + N_{gz5} = 2D_z. \end{cases} \quad (10)$$

同理, 将位置 4 的输出与位置 6 的输出相加, 这里只考虑 x 轴的输出, 根据式(1), 得

$$N_{gy4} + N_{gy6} = 2D_x. \quad (11)$$

根据式(10)和(11), 可得到 x 轴的陀螺零位 D_x, D_y, D_z . 至此, 光纤陀螺的 12 个误差系数全部经计算求出, 标定工作全部完成.

4 转位误差对标定精度的影响

由于转位机构自身存在转位误差, 这将引起由于定位精度不准确而产生光纤陀螺仪标定误差. 首先分析惯性测量单元位于位置 1 和位置 3 条件下, 转位误差对六位置静态标定结果的影响. 假设转位机构在位置 1 时的 3 个定位误差角分别为 $\delta\theta_{x1}, \delta\theta_{y1}, \delta\theta_{z1}$, 在位置 3 时的 3 个定位误差角分别为 $\delta\theta_{x3}, \delta\theta_{y3}, \delta\theta_{z3}$. 由于定位误差角是小角度, 转位误差矩阵可表述成如下形式:

$$\delta\theta_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\delta\theta_{z1} & \delta\theta_{y1} \\ \delta\theta_{z1} & 1 & -\delta\theta_{x1} \\ -\delta\theta_{y1} & \delta\theta_{x1} & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\delta\theta_3 = \begin{bmatrix} 1 & -\delta\theta_{z3} & \delta\theta_{y3} \\ \delta\theta_{z3} & 1 & -\delta\theta_{x3} \\ -\delta\theta_{y3} & \delta\theta_{x3} & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

转位机构误差角的存在导致光纤陀螺在位置 1 和位

置 3 的真实输入为

$$\begin{bmatrix} \bar{\omega}_{x1} \\ \bar{\omega}_{y1} \\ \bar{\omega}_{z1} \end{bmatrix} = \delta\theta_1 \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_N \\ \omega_U \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \bar{\omega}_{x3} \\ \bar{\omega}_{y3} \\ \bar{\omega}_{z3} \end{bmatrix} = \delta\theta_3 \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_N \\ \omega_U \end{bmatrix}. \quad (14)$$

将陀螺在位置 1 和位置 3 的真实输入角速度分别带入式(1), 并对不同位置的陀螺仪输出角速度作差, 即

$$\begin{cases} \Delta N_{gx13} = \\ -k_x\omega_N(\delta\theta_{z1} + \delta\theta_{z3}) + k_x\omega_U(\delta\theta_{y1} - \delta\theta_{y3}) + \\ 2k_{xy}\omega_N - k_{xy}\omega_U(\delta\theta_{x1} - \delta\theta_{x3}) + \\ k_{xz}\omega_N(\delta\theta_{x1} + \delta\theta_{x3}), \\ \Delta N_{gy13} = \\ -k_{yx}\omega_N(\delta\theta_{z1} + \delta\theta_{z3}) + k_{yx}\omega_U(\delta\theta_{y1} - \delta\theta_{y3}) + \\ 2k_y\omega_N - k_y\omega_U(\delta\theta_{x1} - \delta\theta_{x3}) + \\ k_{yz}\omega_N(\delta\theta_{x1} + \delta\theta_{x3}), \\ \Delta N_{gz13} = \\ -k_{zx}\omega_N(\delta\theta_{z1} + \delta\theta_{z3}) + k_{zx}\omega_U(\delta\theta_{y1} - \delta\theta_{y3}) + \\ 2k_{zy}\omega_N - k_{zy}\omega_U(\delta\theta_{x1} - \delta\theta_{x3}) + \\ k_z\omega_N(\delta\theta_{x1} + \delta\theta_{x3}). \end{cases} \quad (15)$$

根据实验室自行研制的光纤陀螺性能指标(标度因数在 10^2 左右, 安装误差在 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ 之间), 忽略误差量, 对式(15)进行简化, 得

$$\begin{cases} \Delta N_{gx13} = 2k_{xy}\omega_N - k_x\omega_N(\delta\theta_{z1} + \delta\theta_{z3}) + \\ k_x\omega_U(\delta\theta_{y1} - \delta\theta_{y3}), \\ \Delta N_{gy13} = 2k_y\omega_N - k_y\omega_U(\delta\theta_{x1} - \delta\theta_{x3}), \\ \Delta N_{gz13} = 2k_{zy}\omega_N + k_z\omega_N(\delta\theta_{x1} + \delta\theta_{x3}). \end{cases} \quad (16)$$

比较式(16)和(3), 可得到旋转机构转位误差产生的标定误差如下:

$$\begin{cases} \Delta k_{xy} \approx k_x[\omega_N(\delta\theta_{z1} + \delta\theta_{z3}) - \\ \omega_U(\delta\theta_{y1} - \delta\theta_{y3})]/(2\omega_N), \\ \Delta k_y \approx \omega_U(\delta\theta_{x1} - \delta\theta_{x3})/(2\omega_N), \\ \Delta k_{zy} \approx -k_z(\delta\theta_{x1} + \delta\theta_{x3})/2. \end{cases} \quad (17)$$

按式(17)的分析方法, 同理可得

$$\begin{cases} \Delta k_{xz} \approx k_x[\omega_N(\delta\theta_{z1} - \delta\theta_{z5}) - \\ \omega_U(\delta\theta_{y1} + \delta\theta_{y5})]/(2\omega_U), \\ \Delta k_{yz} \approx k_y(\delta\theta_{x1} + \delta\theta_{x5})/2, \\ \Delta k_z \approx k_z(\delta\theta_{x1} - \delta\theta_{x5})/(2\omega_U); \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \Delta k_x \approx \omega_U(-\delta\theta_{y2} + \delta\theta_{y4})/(2\omega_N), \\ \Delta k_{yx} \approx k_y[-\omega_N(\delta\theta_{z2} + \delta\theta_{z4}) + \\ \omega_U(\delta\theta_{x2} - \delta\theta_{x4})]/(2\omega_N), \\ \Delta k_{zx} \approx k_z(\delta\theta_{y2} + \delta\theta_{y4})/2. \end{cases} \quad (19)$$

式(17)~(19)分别表示由转位误差所产生的陀螺仪标度因数误差和安装误差.

下面根据上述方法对转位误差引起的光纤陀螺

仪零位误差进行分析. 假设陀螺在位置4时转位机构的3个定位误差角分别为 $\delta\theta_{x4}, \delta\theta_{y4}, \delta\theta_{z4}$, 在位置6时的3个定位误差角分别为 $\delta\theta_{x6}, \delta\theta_{y6}, \delta\theta_{z6}$. 将其带入陀螺误差模型, 则 x 轴陀螺在位置4和位置6的输出之和为

$$\begin{aligned} N_{gx4} + N_{gx6} = & k_x\omega_U(\delta\theta_{y4} - \delta\theta_{y6}) - k_{xy}\omega_N(\delta\theta_{z4} - \delta\theta_{z6}) + \\ & k_{xy}\omega_U(\delta\theta_{x4} - \delta\theta_{x6}) + k_{xz}\omega_N(\delta\theta_{y4} - \delta\theta_{y6}) + 2D_x. \end{aligned} \quad (20)$$

约去二阶量, 将式(20)简化, 得

$$N_{gx4} + N_{gx6} = k_x\omega_U(\delta\theta_{y4} - \delta\theta_{y6}) + 2D_x. \quad (21)$$

通过对式(21)与(11)的比较, 得

$$\Delta D_x = k_x\omega_U(\delta\theta_{y4} - \delta\theta_{y6})/2. \quad (22)$$

同理, 可得到由于转位误差引起的 y 轴上光纤陀螺仪的零位误差 ΔD_y 和 ΔD_z , 即

$$\begin{cases} \Delta D_y = k_y\omega_U(\delta\theta_{x3} - \delta\theta_{x5})/2, \\ \Delta D_z = k_z\omega_N(\delta\theta_{x3} - \delta\theta_{x5})/2. \end{cases} \quad (23)$$

5 实验分析

本实验的目的是为了验证本文提出的利用双轴转位机构可以实现光纤陀螺组件误差参数的标定, 因而采用实验室的SGT-3型惯导测试转台作为转位机构, 其性能指标如表1所示.

表1 SGT-3型惯导测试转台主要技术指标

参数项	参数值
负载要求/kg	50
台体回转精度/(")	± 2
台体转角范围	$0 \sim \infty$
测角精度/(")	± 3
测角重复性/(")	± 2
定位精度/(")	± 3
速率范围/(°/s)	$0.001 \sim 150$
速率精度/(°/s)(360°平均)	0.000 01

将实验室自研光纤陀螺组件紧固于台面, 并进行台面调平和侧面调平, 保证陀螺仪坐标系的 ox_s 轴、 oy_s 轴和 oz_s 轴分别与转台的 X 轴、 Y 轴和 Z 轴重合. 实验开始前, 调整转台使其平行于当地水平面(见图3). 首先将惯导系统开机预热数小时, 采用传统标定方法对光纤陀螺系统进行标定, 通过角速率试验标定出角速度通道的标度因数和安装误差角, 再通过位置试验标定出陀螺零位误差. 其次, 设定转台的转动程序, 使其只能围绕转台的 Y 轴和 Z 轴方向进行转位运动, 并依次实现东北天、北西天、西南天、南东天、西北地和北东地6个位置的固定. 其中每个固定位置停顿时间均为15 min, 设定惯导系统对6个方位之间的转动过程陀螺仪输出的数据不予处理, 仅保

存6个固定位置的陀螺仪输出值. 采用不同标定方法下的试验结果如表2所示.

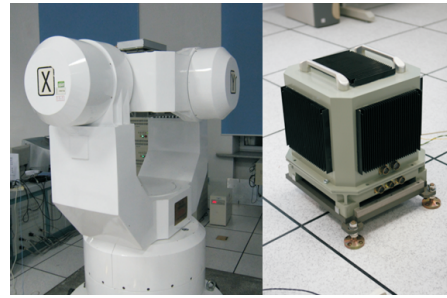


图3 SGT-3型惯导测试转台及光纤陀螺组件

表2 不同标定方法的标定结果对比

参数项	传统标定方法	六位置标定
k_x /(bits/(°/s))	-103.390 302 768	-103.342 459 044
k_y /(bits/(°/s))	-104.912 470 067	-104.869 561 320
k_z /(bits/(°/s))	-104.844 833 652	-104.809 927 987
k_{xy} /rad	0.000 832 143	0.001 206 788
k_{xz} /rad	-0.000 762 333	-0.001 843 915
k_{yx} /rad	0.046 496 160	0.018 002 517
k_{yz} /rad	-0.090 080 338	-0.083 795 604
k_{zx} /rad	0.045 016 360	0.002 671 956
k_{zy} /rad	0.023 397 975	0.012 607 943
D_x /(°/s)	-1.270 928 324	-1.199 393 437
D_y /(°/s)	-0.388 833 014	-0.436 073 496
D_z /(°/s)	2.141 468 139	2.626 223 224

由表2可以看出, 两种方法标定的结果相似. 为了进一步验证六位置静态分立式标定方法的有效性, 并直观反映出标定结果的准确性, 将两种不同标定方法得到的光纤陀螺仪误差系数分别代入基于IMU单轴四位置转停方案的调制型捷联惯性导航系统, 利用标定结果进行了3次长时间静态导航实验.

首先对系统进行10h预热准备, 准备过程中主要完成调制型捷联惯导系统的静止状态下的罗经对准, 数小时卡尔曼滤波估计并补偿陀螺常值漂移和加速度计零偏, 最后完成基于卡尔曼滤波的组合精对准. 选择25h的导航数据进行处理, 得到了采用不同标定方法所对应的惯导系统定位误差对比曲线, 如图4所示.

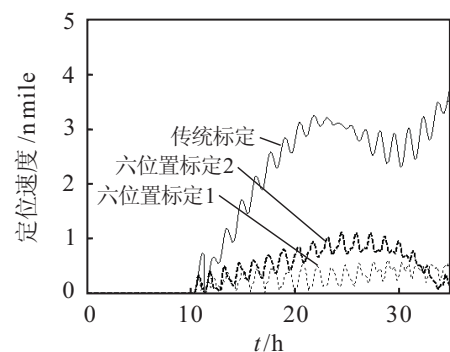


图4 不同标定方法引起系统定位精度对比曲线

通过对图4的分析可以看出,本文提出的六位置静态标定方法具有较好的重复性,验证了该标定方法的可行性.经过25h的导航过程,采用六位置标定结果的两次导航实验产生的最大定位误差为1.104 n mile,该定位精度较传统标定方法产生的位置误差提高了71%.

6 结 论

本文提出了一种利用双轴转位机构实现光纤陀螺仪的静态标定方案,利用六位置标定路径分别激励出陀螺仪的标度因数、安装误差和零位.分析了新方法的标定原理,并将传统的标定结果与六位置静态标定结果应用在基于单轴四位置的调制型捷联惯导系统导航实验中.结果表明,经过25h的导航实验,采用本文提出的标定方案其最大定位误差为1.104 n mile,优于传统标定方法产生的定位误差3.805 n mile.由于本文方法具有较强的实际工程意义,如何将其应用于具有双轴转位机构的调制型捷联惯导系统,实现系统的现场标定是下一步的工作重点.

参考文献(References)

- [1] Heckman D W, Baretela M. Interferometric fiber optic gyro technology[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2000, 15(2): 23-28.
- [2] Neil B, George S. Inertial sensor technology trends[J]. IEEE Sensors J, 2001, 1(4): 332-339.
- [3] 刘百奇, 房建成. 光纤陀螺IMU的六位置旋转现场标定新方法[J]. 光电工程, 2008, 35(1): 60-65.
(Liu B Q, Fang J C. Novel field calibration through rotation in six-position for FOG-IMU[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(1): 60-65.)
- [4] Pei-hwa L, Donald S, Herbert T C. Low cost fiber optic rate sensor inertial measurement unit[C]. IEEE Position Location and Navigation Symposium. Palm Springs: IEEE, 1998: 256-263.
- [5] Curey R K, Ash M E, Thielman L O, et al. Proposed IEEE inertial systems terminology standard and other inertial sensor standards[C]. IEEE Position Location and Navigation Symposium. CA: IEEE, 2004: 83-90.
- [6] 杜红松, 刘晓庆, 刘兴章. 基于小波分析法的光纤陀螺系统标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(6): 734-737.
(Du H S, Liu X Q, Liu X Z. Calibration method of FOG system based on wavelet theory[J]. J of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(6): 734-737.)
- [7] Shibata M. Error analysis strapdown inertial navigation using quaternion[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 1997, 7(3): 329-338.
- [8] Camberlein L, Mazzananti F. Calibration technology for laser gyro strapdown inertial navigation systems[C]. Symposium Gyro Technology. Stuttgart, 1985, 12: 0-20.
- [9] 范胜林, 孙永荣, 袁信. 捷联系统陀螺静态漂移参数标定[J]. 中国惯性技术学报, 2000, 8(1): 42-46.
(Fan S L, Sun Y R, Yuan X. Calibration of gyro static drift parameters of strapdown system[J]. J of Chinese Inertial Technology, 2000, 8(1): 42-46.)
- [10] Eduardo N, Hugh D W. Initial calibration and alignment of low-cost inertial navigation units for land vehicle applications[J]. J of Robotic Systems, 1999, 16(2): 81-92.
- [11] Liu Q, Liu L, Qi Z K. Error analysis and compensation of strapdown inertial navigation system[J]. J of Beijing Institute of Technology: English Edition, 2002, 11(2): 117-120.
- [12] Yun C S, Gook P C. A calibration technique for a redundant IMU containing low-grade inertial sensors[J]. Electronics and Telecommunications Research Institute J, 2005, 27(4): 418-425.
- [13] Titterton D H, Weston J L. Strapdown inertial navigation technology[M]. London: Peter Peregrinus Ltd, 1997: 219-259.
- [14] 尚捷, 顾启泰. 捷联惯导现场最优标定方法研究[J]. 中国惯性技术学报, 2005, 13(4): 18-21.
(Shang J, Gu Q T. Field optimal calibration for strapdown inertial navigation[J]. J of Chinese Inertial Technology, 2005, 13(4): 18-21.)
- [15] 太松月. 光纤陀螺捷联惯性导航系统标定测试技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2007.
(Tai S Y. Research on calibration and test technique of the FOG-strapdown inertial navigation system[D]. Harbin: College of Automation, Haibin Engineering University, 2007.)
- [16] 张志鑫, 夏金桥, 蔡春龙. 光纤陀螺标度因数分段标定的工程实现[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(1): 99-103.
(Zhang Z X, Xia J Q, Cai C L. Engineering realization of calibrating FOG's scale factor in segments[J]. J of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(1): 99-103.)