

基于模方迭代算法的惯组参数辨识研究

李金钊¹ 莫莹² 李渤通¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 吉林省长春市 130000)

(2. 国家计算机网络应急技术处理协调中心吉林分中心 吉林省长春市 130000)

摘要: 本文研究了为减少在参数辨识技术中对转台的依赖,采用模方迭代法对惯组参数进行辨识。首先建立惯组系统的误差模型;然后,利用模方迭代辨识技术对惯组参数进行辨识,包括模方迭代算法原理的阐述以及标定过程的设计;最后,对传统标定方法和本文所采用的标定方法进行实验对比,证明模方迭代辨识法在工程中有广泛的应用前景。

关键词: 参数辨识; 惯组系统; 模方迭代算法

1 引言

作为重要的导航方式之一的惯性导航系统,在飞机、舰船等载体上与其他系统无信息的交互,具有高可靠性、高自主性以及全天候运行等特点。惯导系统被应用的领域是非常广泛的,其发展前景也是备受瞩目^[1]。

在惯导系统的外场应用中,装载在飞机、舰船等运载载体上的光纤捷联惯组系统,伴随着时间的推移与外部环境(温度、湿度)的变化,其内部结构也会随之发生变化,如陀螺光纤环光路的改变等原因,均会改变光纤陀螺误差模型的各项参数。同理,加速度计的误差模型参数也会发生改变。于

是,光纤捷联惯组系统在工作一段时间后,应该对其内部的陀螺以及加速度计误差参数重新标定^[2]。

针对以上不足,在国内方面,王岩探索了沿 X, Y, Z 轴依次对光纤陀螺进行正转、反转操作辨识误差参数的方法以及经惯组系统沿三个轴向转动 24 个位置辨识出加速度计的各误差参数的方法^[3]。赵桂玲、卿立等人用经惯组系统转动 6 个位置的方式计算出惯组系统的各误差参数^{[4][5]}。康航宇提出了经惯组系统转动 12 个位置的方式计算出惯组系统的各误差参数^[6],周章华提出了经惯组系统转动 10 个位置的方式计算出惯组系统的各误差参数^[7]。国外方面,Hung,J.C.等人探索了将惯组系统固定在十二个位置静态测试的实验,计

在进一步的研究中,可以在奖励函数中引入超调量、响应时间等确定性评价指标作为限制,对于不满足确定性指标评价的结果予以惩罚,加快 Q 学习算法的学习过程。

参考文献

- [1] 吴振阔,张亮,张波.PID 参数整定和优化 中国高新技术企业,2010(22).
- [2] 詹士昌,吴俊.基于蚁群算法的 PID 参数优化设计.
- [3] 詹士昌,徐婕,吴俊.蚁群算法中有关参数的最优组合选择[J].科技通报,2003,19(5):29-34.
- [4] 谭民,王硕,曹志强.多机器人系统[M].清华大学出版社有限公司,2005.
- [5] 王仁超,李宗蔚.基于 q 学习算法的土石方调配模型及应用[J].水力发电学报,2018 125.
- [6] 张汕璠.基于强化学习的路径规划研究[D].哈尔滨工业大学,2018,6.
- [7] R S Sutton & A G Barto. An introduction to reinforcement learning[M]. The MIT Press,1998
- [8] Watkins J C,Dayan P. Q-learning[J].Machine learning,1992(8):279-292
- [9] 余涛,王宇明,刘前进,互联网 CPS 调节指令动态最优分配 Q-学习算法[J].中国电机工程学报,2010,30(7).
- [10] Andrew Y. Ng, Daishi Harada, Stuart Russell, Policy

invariance under reward transformations: Theory and application to reward shaping, 2002. 4. 9.

- [11] 李静,刘学,赵健等.基于蚁群寻优的汽车牵引力 pid 控制参数整定[J].吉林大学学报(工学版),2008,38(4),769-722.
- [12] 郭大庆,李晓,赵永进.基于改进粒子群算法的 PID 参数自整定[J].计算机工程,2007,33(18).

作者简介

曹文凯(1990-),男,江苏省南京市人。江苏省新能源开发股份有限公司,博士、中级工程师。研究方向为新能源,能源管理。

洪杰(1987-),男,江苏省南京市人。江苏省新能源开发股份有限公司,研发部,硕士学位。研究方向为新能源发电,生物质发电领域相关技术。

袁也(1994-),男,江苏省南京市人。江苏省新能源开发股份有限公司,研发部,硕士学位。研究方向为新能源发电,生物质发电领域相关技术。

吴怀江(1994-)(通信作者),男,甘肃省庆阳市人。南京金宁汇科技有限公司,大学本科学历。研究方向为工业控制、区块链。

姜冲(1992-),男,江苏省淮安市人。硕士研究生。研究方向为信息安全、人工智能、智能预测。

算出加速度计各误差参数的方法^[8], Mark.J. 等人首先建立惯组系统的误差模型, 然后研究了参数辨识中转台误差的影响, 其着重记录了转台的稳定性数据以及指向性数据, 证明了转台精度越高, 惯组系统的误差参数计算精度越高^[9]。综上所述, 国内外专家探索的惯组误差参数标定方法均为惯组系统在一段时间后从载体上分离出来, 再利用转台等设备对其重新标定, 这种方法不但会使设备的维护成本增加, 而且会增加设备的损耗。为了完成惯组系统在实际工程中长时间使用的要求, 研究无需高精度转台辨识惯组误差参数的算法成为必然。

探索在外场快速辨识惯组误差参数的方法已经成为当今热点问题之一。本文所探索的模方迭代参数辨识法不同于以上利用高精度转台在实验室标定辨识参数的方法。其是基于在光纤捷联惯组在静态条件下, 光纤捷联惯组的理想输入值依次为地球的自转角速度和重力加速度, 并以陀螺和加速度计输入输出的模方相等为约束条件, 来完成对于捷联惯组的判定, 利用上述数据以及惯组器件的误差模型计算出各参数项、进而分析各参数精度指标。本方法对三轴转台的精度基本无要求, 甚至可以在飞机、舰船载体上直接标定, 这样就隔离了转台的误差对误差模型各参数的影响, 这样就可以实现外场惯组误差参数的标定, 具有较高的发展潜力。

2 参数辨识的误差模型

2.1 光纤陀螺误差模型的简化

因为光纤陀螺的线性度好的原因, 所以在解算其误差参数时, 选择以下 4 个参数作为误差模型的参量:

$$\left. \begin{aligned} N_{gx} &= A_{g0} + A_{g1}\omega_x + A_{g2}\omega_y + A_{g3}\omega_z \\ N_{gy} &= B_{g0} + B_{g1}\omega_x + B_{g2}\omega_y + B_{g3}\omega_z \\ N_{gz} &= C_{g0} + C_{g1}\omega_x + C_{g2}\omega_y + C_{g3}\omega_z \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

其中, N_{gx} 、 N_{gy} 、 N_{gz} 依次是惯组系统中 x、y、z 轴陀螺的输出值; A_{g0} 、 B_{g0} 、 C_{g0} 依次是惯组系统中三轴陀螺的零偏; A_{g1} 、 B_{g1} 、 C_{g1} 依次为三轴陀螺的刻度因数; A_{g2} 、 A_{g3} 、 B_{g2} 、 B_{g3} 、 C_{g2} 、 C_{g3} 依次是三轴陀螺的安装误差和刻度因数的乘积, 即 $A_{g2}=K_{gx}E_{gxz}$ 。

因为模仿迭代法主要应用与外场惯组器件的标定实验, 所以需要对其误差模型进行简化处理。

光纤陀螺作为惯组系统的主要元件有很多的优点, 如其有反馈控制元件, 当旋转角度变化的时候, 由于干涉光波的作用, 总可以保证相位不变, 这就可以使其有好的线性值。上述优点, 即简化了误差参数的辨识实验, 又可以兼顾解算过程。因此, 选取包含 2 个误差参数的数学模型, 其形式简化如下:

$$\left. \begin{aligned} N_{gx} &= A_{g0} + A_{g1}\omega_x \\ N_{gy} &= B_{g0} + B_{g1}\omega_x \\ N_{gz} &= C_{g0} + C_{g1}\omega_x \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

把式 (2-2) 写成矩阵形式为:

$$N_g = K_g \Omega \quad (2-3)$$

其中:

$$N_g = \begin{bmatrix} N_{gx} \\ N_{gy} \\ N_{gz} \end{bmatrix}, \quad K_g = \begin{bmatrix} A_{g0} & A_{g1} \\ B_{g0} & B_{g1} \\ C_{g0} & C_{g1} \end{bmatrix}, \quad \Omega = \begin{bmatrix} 1 \\ \omega_x \end{bmatrix}$$

利用式 (2-3) 所表示的误差模型, 即可以方便的表达出每个误差参数和光纤陀螺输入输出的关系, 也可以在迭代求取误差参数的过程中减少计算量, 使误差参数辨识的效率得到提高。

2.2 加速度计误差模型的简化

由理论推导可以发现, 含有参数项多、阶次高可以使误差模型精确度更高, 有利于对于误差的补偿, 所以选择 5 个误差项。但在误差项增多后解算的工作量会很大, 不利于效率的提高。因此, 在实际工程应用中, 会将二次耦合项去掉, 得出加速度计的误差模型如下所示:

$$\left. \begin{aligned} N_{ax} &= A_{a0} + A_{a1}A_x + A_{a2}A_y + A_{a3}A_z + A_{a4}A_x^2 \\ N_{ay} &= B_{a0} + B_{a1}A_x + B_{a2}A_y + B_{a3}A_z + B_{a4}A_y^2 \\ N_{az} &= C_{a0} + C_{a1}A_x + C_{a2}A_y + A_{a3}A_z + A_{a4}A_z^2 \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

式中: N_{ax} 、 N_{ay} 、 N_{az} 依次为惯组 x、y、z 三轴加速度计的输出值; A_{a0} 、 B_{a0} 、 C_{a0} 依次为三轴加速度计零偏; A_{a1} 、 B_{a1} 、 C_{a1} 分别为三轴加速度计的刻度因数; A_{a2} 、 A_{a3} 、 B_{a2} 、 B_{a3} 、 C_{a2} 、 C_{a3} 分别为三轴加速度计的安装误差与刻度因数的乘积, 即, 以此类推 A_a 、 B_a 、 C_a 是二次非线性误差。

将式 (2-4) 转化为式 (2-5) 的形式, 便于矩阵运算。

$$N_a = K_a g A + K_2 g A^{(2)} \quad (2-5)$$

其中:

$$N_a = \begin{bmatrix} N_{ax} \\ N_{ay} \\ N_{az} \end{bmatrix}, \quad K_a = \begin{bmatrix} A_{a0} & A_{a1} & A_{a2} & A_{a3} \\ B_{a0} & B_{a1} & B_{a2} & B_{a3} \\ C_{a0} & C_{a1} & C_{a2} & C_{a3} \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 \\ a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}, \quad K_2 = \begin{bmatrix} A_{a4} & 0 & 0 \\ 0 & B_{a4} & 0 \\ 0 & 0 & C_{a4} \end{bmatrix}, \quad A^{(2)} = \begin{bmatrix} a_x^2 \\ a_y^2 \\ a_z^2 \end{bmatrix}$$

因为石英挠性加速度计具有的特性以及外场标定的实际状态, 对上述加速度计的误差模型可以做更简洁的处理, 如 (2-5) 式的加速度计静态误差模型去掉其它两轴以及耦合含有的误差项。这样, 模方法辨识参数时的误差模型就构建出来了, 如下所示。

$$\left. \begin{aligned} N_{ax} &= B_{ax} + K_{ax}a_x \\ N_{ay} &= B_{ay} + K_{ay}a_x \\ N_{az} &= B_{az} + K_{az}a_x \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

把式 (2-6) 写成参数辨识中使计算变得简洁的形式为:

$$N_a = K_a g \quad (2-7)$$

其中:

$$N_g = \begin{bmatrix} N_{ax} \\ N_{ay} \\ N_{az} \end{bmatrix}, \quad K_g = \begin{bmatrix} B_{ax} & K_{ax} \\ B_{ay} & K_{ay} \\ B_{az} & K_{az} \end{bmatrix}, \quad \Omega = \begin{bmatrix} 1 \\ a_x \end{bmatrix}$$

3 模方迭代法参数辨识

3.1 加速度计误差模型的简化

光纤捷联惯组系统的模方迭代参数辨识法，其具体判定方法是依据于当光纤捷联惯组在静态条件下，光纤捷联惯组的理想输入值依次为地球的自转角速度和重力加速度，并以陀螺和加速度计输入输出的模方相等为约束条件，来完成对于捷联惯组的判定。此方法为评估惯组标定精度的准确性提供了重要依据^[9]。

在静止状态下，惯性器件的输出向量满足以下方程：

$$C_b^n f^b = -g_t^n, \quad C_b^n \omega_{ib}^b = \omega_{ie}^n \quad (3-1)$$

在式中， C_b^n 为载体坐标系到导航坐标系的方向余弦矩阵， g_t^n 是重力加速度， ω_{ie}^n 则是地球自转角速度。

根据式(3-1)，对陀螺仪以及加表的实际测量输出值进行依次取模处理，得：

$$|f^b| = |C_b^n f^b| = |-g_t^n| = g \quad (3-2)$$

$$|\omega_{ib}^b| = |C_b^n \omega_{ib}^b| = |\omega_{ie}^n| = \Omega \quad (3-3)$$

公式(3-2)和(3-3)表明，静止状态时，由于陀螺仪的输入激励为地球自转角速度而加表的输入激励为重力加速度由此可以看出其激励是确定的，与惯性测量单元的姿态无关，所以可以将陀螺和加表输出量的模作为判定量，可以计算出加速度计和陀螺误差模型的参数。

由(3-2)和(3-3)式以及惯性测量单元的输入输出模方相等的判据，在理想状态下，三轴陀螺以及加速度计的输出一一定符合下式：

$$\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2 = \Omega^2 \quad (3-4)$$

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = g^2 \quad (3-5)$$

其中， $\omega_i (i=x,y,z)$ 为*i*轴陀螺在无实验误差时的输出值， Ω 表示地球自转角速度， $a_i (i=x,y,z)$ 为*i*轴加表在理想状态下的输出值， g 表示测量地点的重力加速度的大小。

而从式(3-4)和(3-5)可以获得光纤陀螺以及加速度计的各轴输入值为：

$$\hat{\omega}_i = \frac{N_{gi} - B_{gi}}{K_{gi}} (i=x,y,z)$$

$$\hat{\omega}_i = \frac{N_{ai} - B_{ai}}{K_{ai}} (i=x,y,z)$$

由于在实际量测时，会产生各种误差对系统造成影响，导致陀螺仪输入的实际计算值和地球自转角速率并不相等，因此列写如下的模方误差方程：

$$\begin{aligned} Error_g &= \hat{\omega}^2 - \Omega^2 \\ &= \sum_{i=x,y,z} \left(\frac{N_{gi} - B_{gi}}{K_{gi}} \right)^2 - \Omega^2 \end{aligned} \quad (3-6)$$

同理，列写加速度计的模方误差方程如下：

$$\begin{aligned} Error_a &= \hat{a}^2 - g^2 \\ &= \sum_{i=x,y,z} \left(\frac{N_{ai} - B_{ai}}{K_{ai}} \right)^2 - g^2 \end{aligned} \quad (3-7)$$



图 1: 惯组设备



图 2: SGT-3 型三轴转台

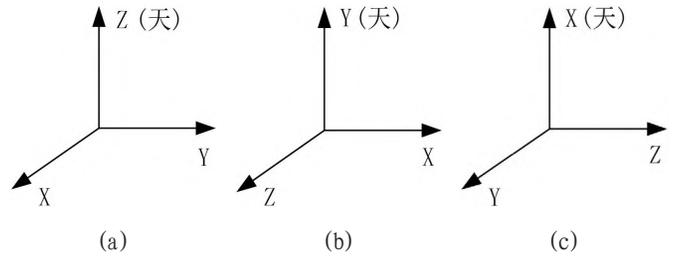


图 3: 光纤陀螺位置实验初始编排

当模方误差最小时，其中零偏与刻度因数的值就可以达到最优，所以在其中可以引入迭代逼近系数，用以校正惯性器件的零偏和刻度因数，使得逼近后的模方误差值逐渐趋于零。

可以用式(3-8)和(3-9)分别代表惯性测量单元刻度因数与零偏迭代逼近的过程：

$$K_{ji}^k = Gain_{ji}^{k-1} K_{ji}^{k-1}, (j=g,a), (i=x,y,z) \quad (3-8)$$

$$B_{ji}^k = Add_{ji}^{k-1} B_{ji}^{k-1}, (j=g,a), (i=x,y,z) \quad (3-9)$$

其中 $Gain_{ji}^{k-1}$ ， $(j=g,a)$ ， $(i=x,y,z)$ ，为第*k*次迭代逼近后刻度因数的逼近参数； Add_{ji}^{k-1} ， $(j=g,a)$ ， $(i=x,y,z)$ 是第*k*次迭代逼近后零偏的逼近参数。基于迭代逼近的原理，当逼近参数 $Gain_{ji}^k = 1$ ，则有 $K_{ji}^{k-1} = K_{ji}^k$ 成立，即迭代逼近的刻度因数为固定值，这时就可以认为刻度因数达到了迭代的最佳值。

同理，当满足条件 $Add_{ji}^k = 0$ 的要求时，迭代逼近的零偏也为固定值，即零偏经过多次迭代逼近后达到了最佳值。

3.2 加速度计误差模型的简化

模方迭代法实质上就是对于参数进行迭代逼近的过程，因此应该在首次迭代时给出刻度因数与零偏确定迭代逼近的初始值 K_i^0 和 B_i^0 。即刻度因数和零偏的迭代初始值。由于在迭代逼近时 $K_i^k = Gain_{gi}^{k-1} K_i^{k-1}$ 、 $B_i^k = Add_{gi}^{k-1} B_i^{k-1}$ ，因此，迭代初值选取对应为 K_i^0 为非零实数， B_i^0 为实数。

在进行次迭代逼近后，得到如下的形式：

$$\begin{aligned} N_{gi}^k &= K_{gi}^k \omega_i^k + B_{gi}^k \\ &= Gain_{gi}^{k-1} K_{gi}^{k-1} \omega_i^{k-1} + (Add_{gi}^{k-1} + B_{gi}^{k-1}) \end{aligned} \quad (3-10)$$

$$\begin{aligned} N_{ai}^k &= K_{ai}^k \omega_i^k + B_{ai}^k \\ &= Gain_{ai}^{k-1} K_{ai}^{k-1} \omega_i^{k-1} + (Add_{ai}^{k-1} + B_{ai}^{k-1}) \end{aligned} \quad (3-11)$$

可根据上式推导出陀螺以及加速度计的迭代误差方程如下：

$$Error_g = \left[1 - \frac{1}{(Gain_{gi}^{k-1})^2} \right] (\omega_i^{k-1})^2 + \frac{2Add_{gi}^{k-1}}{(Gain_{gi}^{k-1})^2 K_{gi}^{k-1}} \omega_i^{k-1} - \left(\frac{Add_{gi}^{k-1}}{Gain_{gi}^{k-1} K_{gi}^{k-1}} \right)^2 \quad (3-12)$$

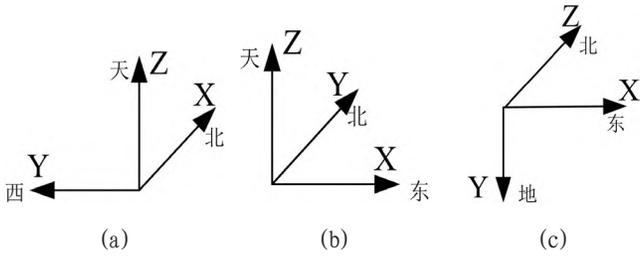


图 4: 位置实验惯组初始位置

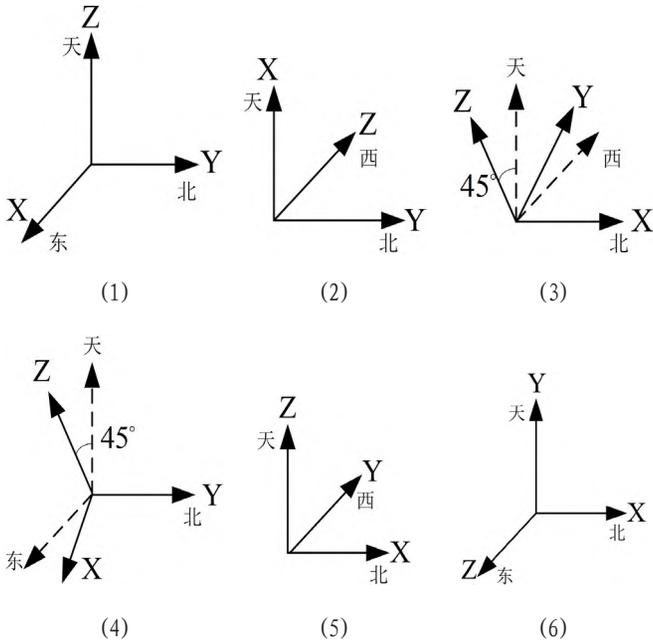


图 5: 位置编排

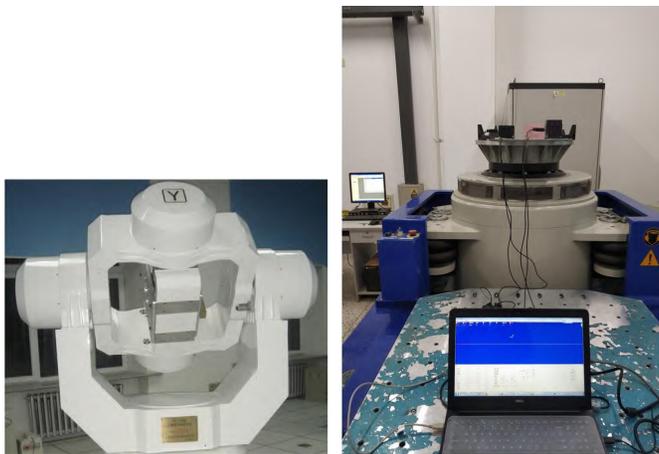


图 6: 实验设备和上位机界面

$$Error_a = \left[1 - \frac{1}{(Gain_{ai}^{k-1})^2} \right] (a_i^{k-1})^2 + \frac{2Add_{ai}^{k-1}}{(Gain_{ai}^{k-1})^2 K_{ai}^{k-1}} a_i^{k-1} - \left(\frac{Add_{ai}^{k-1}}{Gain_{ai}^{k-1} K_{ai}^{k-1}} \right)^2 \quad (3-13)$$

其中 $i = x, y, z$ 。

随着参数迭代次数的不断增加, Add_{ji}^k 的值逐渐逼近于 0, $Gain_{ji}^k$ 的值逐渐逼近于 1。于是, 式 (3-14) 和 (3-15) 成立。

表 1: 陀螺参数辨识结果

	零偏 (Λ°/h)	刻度因数 ($\Lambda/m/s^2$)
X 轴	87.96006012	-652.03979492
Y 轴	8.97042561	-651.92169189
Z 轴	43.89432907	640.88696289

表 2: 加速度计参数辨识结果

	零偏 (Λ°/h)	刻度因数 ($\Lambda/m/s^2$)
X 轴	-81.61205292	-1869.28808
Y 轴	9.62585163	-1922.35266
Z 轴	-42.87931824	-1984.80529

表 3: 实验参数设置

序号数	惯组方位	重力投影	自转投影
1	东北天	(0, 0, -g)	(0, a, b)
2	天北西	(-g, 0, 0)	(b, a, 0)
3	——	(0, -g sin α , -g cos α)	ω_1
4	——	(-g sin θ , 0, -g cos θ)	ω_2
5	北西天	(0, 0, g)	(b, 0, a)
6	北天东	(0, -g, 0)	(b, a, 0)

表 4: 模方法参数辨识结果

		刻度因数	零偏
陀螺 (Λ°/h)	x	-652.7533075	88.6750017
	y	-651.8372901	10.71041
	Z	640.5900394	46.2971102
加表 ($\Lambda/m/s^2$)	x	-1869.4733028	-83.1982172
	y	-1922.7862191	10.6710193
	Z	-1984.7860041	-45.6715191

$$-\left(\frac{Add_{gi}^{k-1}}{Gain_{gi}^{k-1} K_{gi}^{k-1}} \right)^2 = 0 (i = x, y, z) \quad (3-14)$$

$$-\left(\frac{Add_{ai}^{k-1}}{Gain_{ai}^{k-1} K_{ai}^{k-1}} \right)^2 = 0 (i = x, y, z) \quad (3-15)$$

将式 (3-14) 和 (3-1) 分别代入式迭代误差方程中, 可得:
 $Error_g = [(\omega_i^{k-1})^2 \ \omega_i^{k-1}]$

$$= \left[1 - \frac{1}{(Gain_{gi}^{k-1})^2} \quad \frac{2Add_{gi}^{k-1}}{(Gain_{gi}^{k-1})^2 K_{gi}^{k-1}} \right] \quad (3-16)$$

$$Error_a = [(\omega_i^{k-1})^2 \ a_i^{k-1}] = \left[1 - \frac{1}{(Gain_{ai}^{k-1})^2} \quad \frac{2Add_{ai}^{k-1}}{(Gain_{ai}^{k-1})^2 K_{ai}^{k-1}} \right] \quad (3-17)$$

其中以陀螺为例, 为方便计算, 若以 RES 表示最终求得的迭代参数矩阵, 把式 (3-16) 扩充为形如 $[Error_g]_{6 \times 1} = [\omega]_{6 \times 6} [Res_g]_{6 \times 1}$ 的矩阵方程组, 在 K_{gi}^k 和 B_{gi}^k 迭代逼近后可利用公式 (3-13) 计算出 $[Error_g]_{6 \times 1}$, 由 (3-16) 得到 $[\omega]_{6 \times 6}$ 。 $[RES_g]_{6 \times 1}$ 即为欲求的包含未确定量的矩阵, 在 $[Error_g]_{6 \times 1}$ 和 $[\omega]_{6 \times 6}$ 确定时, 利用最小二乘法即可求出未知量计算出 $[RES_g]_{6 \times 1}$ 后, 可求得光纤陀螺的方程如下。

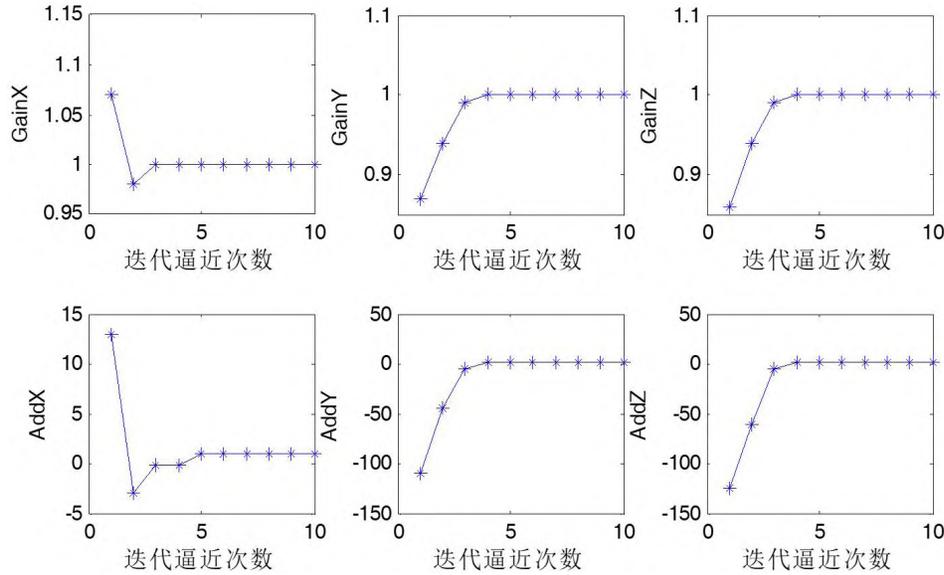


图 7: 陀螺仪迭代过程

$$\left. \begin{aligned}
 Gain_{gx}^{k-1} &= |1 - RES_g(1)|^{-0.5} \\
 Gain_{gy}^{k-1} &= |1 - RES_g(2)|^{-0.5} \\
 Gain_{gz}^{k-1} &= |1 - RES_g(3)|^{-0.5} \\
 Add_{gx}^{k-1} &= 0.5RES_g(4)K_{gx}^{k-1} / (1 - RES_g(1)) \\
 Add_{gy}^{k-1} &= 0.5RES_g(5)K_{gy}^{k-1} / (1 - RES_g(2)) \\
 Add_{gz}^{k-1} &= 0.5RES_g(6)K_{gz}^{k-1} / (1 - RES_g(3))
 \end{aligned} \right\} \quad (3-18)$$

同理，可以求出 RES 的 6 个元素与加速度计零偏与刻度因数的 6 个迭代参数之间的关系如式 (3-19) 所示。

$$\left. \begin{aligned}
 Gain_{ax}^{k-1} &= |1 - RES_a(1)|^{-0.5} \\
 Gain_{ay}^{k-1} &= |1 - RES_a(2)|^{-0.5} \\
 Gain_{az}^{k-1} &= |1 - RES_a(3)|^{-0.5} \\
 Add_{ax}^{k-1} &= 0.5RES_a(4)K_{ax}^{k-1} / (1 - RES_a(1)) \\
 Add_{ay}^{k-1} &= 0.5RES_a(5)K_{ay}^{k-1} / (1 - RES_a(2)) \\
 Add_{az}^{k-1} &= 0.5RES_a(6)K_{az}^{k-1} / (1 - RES_a(3))
 \end{aligned} \right\} \quad (3-19)$$

当迭代过程中迭代因子 $Gain_{jk}^k$ 和 Add_{jk}^k 变为常值时，就可以停止迭代逼近，即此时的标定结果就是理想值。

4 模方迭代法标定实验、仿真以及分析

4.1 速率/24位置法标定试验

本实验的参数辨识对象为如图 1 所示的惯组器件，测试转台为如图 2 所示的设备，其具有精度高、操作简便等特点。

利用图 2 所示的转台，利用 24 位置法与速率法依次对式 (2-2) 和式 (2-6) 中的误差参数进行辨识，对陀螺和加速度计的参数辨识实验方法如下所示。

以下为速率实验具体操作步骤：

(1) 将固定在转台上的惯组系统的 X 轴与转台的中框重合，Y 轴与转台的内框重合，Z 轴与转台的外框重合；

(2) 依据图 3 所示的陀螺位置，将陀螺的 z、y、x 轴依次指向天向。

(3) 以固定速度正向、逆向转动转台，记录转动 n 圈惯组系统的数据。(n 为整数)

以下为 24 位置法实验具体操作步骤：

(1) 将固定在转台上的惯组系统的 X 轴与转台的中框重合，Y 轴与转台的内框重合，Z 轴与转台的外框重合；

(2) 以图 4 所示为惯组的初始位置，控制转台，将其 X、Y、Z 轴分别指向天向；

(3) 将上述的每组实验中的惯组系统沿北向轴旋转 45°，转动 7 此后，形成 24 个位置，记录惯组的输出数据。

经速率实验以及 24 位置实验后，惯组系统的各项参数辨识结果如表 1、表 2 所示。

4.2 模仿迭代算法的仿真及实验验证

当利用模方迭代逼近法辨识所有的误差参数时，应获得惯性测量单元 6 个位置的输出数据，其位置设计如图 5 所示，以及陀螺对应 6 个参数如表 3，实验设备和控制上位机界面如图 6 所示。

其中： $a = \omega_{ie} \cos \varphi, b = \omega_{ie} \sin \varphi$

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} \omega_{ie} \cos \varphi \\ \omega_{ie} \sin \alpha \sin \varphi \\ \omega_{ie} \cos \alpha \sin \varphi \end{bmatrix}, \omega_2 = \begin{bmatrix} -\omega_{ie} \sin \theta \sin \varphi \\ \omega_{ie} \cos \varphi \\ \omega_{ie} \cos \theta \sin \varphi \end{bmatrix}$$

按照上述的陀螺与加速度计的简化模型和以传统标定方法的结果作为迭代初始值，陀螺与加速度计的三轴迭代过程如图中 7 和 8 所示。

从以上两图可看出，陀螺的各项参数在迭代逼近 7 次后达到理想值，加速度计的各项参数在迭代逼近 4 次后就达到了最优值，这表明使用模方迭代法时，加速度计的迭代效率要比陀螺的效率要高。

得到的标定结果如表 4 所示。

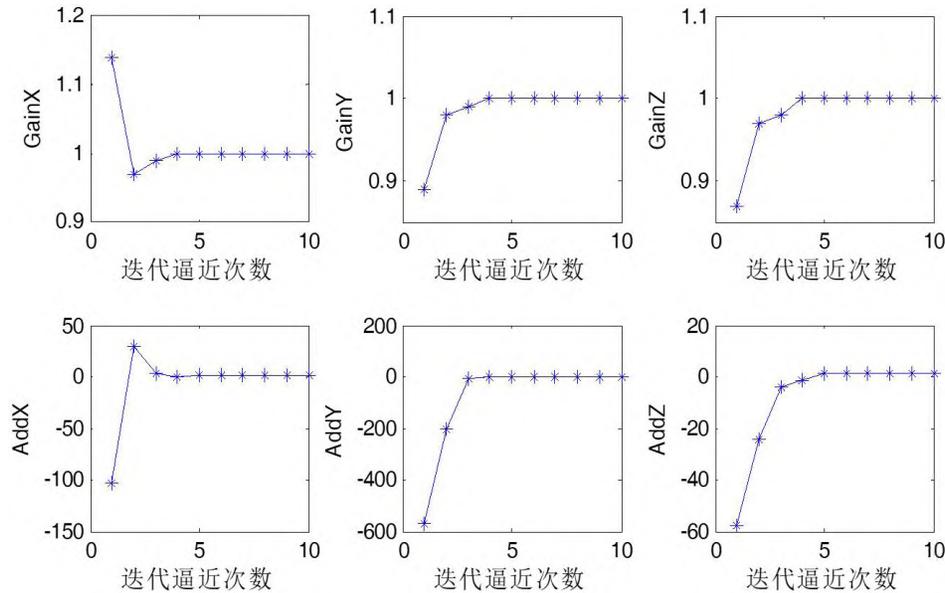


图 8: 加速度计迭代过程

由表 4 分析可知, 基于出场误差参数, 可利用模方迭代法快速辨识惯组系统的各误差参数。对比表 4 以及表 1、表 2 可知, 在参数辨识过程中, 模方迭代参数辨识法与传统标定方法精度大致相同。但模方迭代法可以脱离转台在实际工程现场通过翻转惯组的位置即可以实现标定。由实验可知, 本方法即可以保证精度, 又可以使标定时间、标定成本明显降低, 有更好的实际使用价值。

5 结论

由于工程现场惯组器件标定的重要性, 本文使用模方迭代算法对惯组器件的参数进行辨识, 首先建立惯组器件(陀螺、加速度计)误差的简化模型, 以便外场能更高效的辨识惯性系统的参数; 然后利用模方迭代算法的原理推导标定公式, 其本质上就是参数修正“迭代”的过程, 当参数为常值时, 此时的结果就是标定的最优解。最后, 利用逐次逼近迭代的方法对模方法进行验证, 说明这种方法在野外具有较高的应用价值。

参考文献

[1] 杨晓霞, 黄一. 外场标定下捷联惯导系统误差状态可观测性分析[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(06): 657-664.

[2] Daniel Duke, Julio Soria. An error analysis of the dynamic mode decomposition [J]. Exp Fluids 2012 52(13): 529-542.

[3] 王岩. 机抖激光陀螺捷联惯导系统的标定方法研究[D]. 湖南长沙: 国防科技大学研究生院, 2004.

[4] 赵桂玲. 高精度光纤陀螺组件标定方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(02): 209-214.

[5] 康宇航. 中高精度捷联惯导系统的无转台标定[J]. 战术导弹技术, 2014, 2(09): 85-90.

[6] 周章华, 吴亮华, 张伟. 捷联惯导系统在非转台条件下的全参数标定[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(05): 570-575.

[7] Hung J. C, Thacher J.R, White H. V. Calibration of Accelerometer Triad of an IMU with Drifting Z-Accelerometer Bias[C]. IEEE National Aerospace and Electronics Conference, Dayton, OH, USA, 2011.

[8] Moon-Sik Kim, Si-Bok Yu, Kwang-Soo Lee. Development of a High-Precision Calibration Method for Inertial Measurement Unit[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING, 2014, 15(3): 567-575.

[9] Qingzhong Cai et al. Analysis and calibration of the gyro bias caused by geomagnetic field in a dual-axis rotational inertial navigation system[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(10): 105-105.

[10] QINGZHONG CAI, NINGFANG SONG, et al. Accelerometer calibration with nonlinear scale factor based on multi-position observation[J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24(10): 108-109.

作者简介

李金钊(1994-), 男, 吉林省长春市人。硕士研究生。研究实习员。研究方向为惯性导航与伺服控制。

莫莹(1978-), 女, 吉林省长春市人。副高级工程师。研究方向为控制、通信。

李渤通(1994-), 男, 吉林省长春市人。硕士研究生。研究实习员。研究方向为伺服控制与嵌入式。