

DOI: 10.7652/xjtub201310019

采用倾角传感器实现空间旋转角度测量的 解析方法研究

曹建安, 张乐平, 吴昊, 王亮, 苗励文
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对旋转轴与水平面非垂直的情况,提出了一种采用双轴倾角传感器实现空间旋转角度测量的算法。当传感器被随机安装在旋转平面上时,存在 3 个未知的空间位置参数:旋转轴和水平面之间的夹角 β ;传感器所在平面和旋转轴之间的夹角 γ ;传感器测量轴在测量平面上的偏转角 α 。根据倾角传感器测量轴、旋转轴和水平面的空间关系,建立了基于双轴倾角传感器的空间旋转角度测量的数学模型,推导出了空间旋转角度检测的解析表达式。采用该模型算法可实现传感器安装位置参数 α 和 γ 的测量,或旋转轴水平夹角 β 的测量,还可以表现旋转轴非垂直于水平面情况下空间旋转角度的测量,并能达到一定的准确度。实验结果表明,当旋转轴和水平面夹角在小于 75° 的情况下,采用该方法在 $\pm 100^\circ$ 的测试范围内,检测准确度均能达到 0.2° ,说明该模型的重复性良好,并能达到一定精度。

关键词: 倾角传感器;空间旋转模型;空间位置参数;角度测量

中图分类号: O121.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 253-987X(2013)10-0109-06

Analytical Approach for Measurement of Spatial Angle with Inclination Sensor

CAO Jian'an, ZHANG Leping, WU Hao, WANG Liang, MIAO Liwen
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper presents an approach for measurement of spatial rotation-angle with dual-axis inclination sensor in the case of non-vertical rotation axis. When the sensor is randomly installed on the rotation plane, there are three unpredictable position parameters: β , the angle between the rotation axis and level; α , the swing angle on the measuring plane; and γ , the angle between the sensor plane and the rotation axis. A rotation-angle model is established according to the relationship among measuring axes, rotation axis and the level, and the corresponding analytical equations are derived. The three position parameters and rotation-angle can be calculated with certain accuracy as the rotation axis gets non-vertical to the level. Experimental results show that the measuring accuracy reaches 0.2° within the range of $\pm 100^\circ$ if the angle between the rotation axis and the level is less than 75° , which indicates the fine repeatability and accuracy of this model.

Keywords: inclination sensor; space rotation model; spatial position parameter; angle measurement

测量刚体围绕固定空间旋转轴的旋转角度,可采用陀螺仪、电子罗盘等传感器实现。陀螺仪是通过检测刚体的旋转角速率,然后再经过积分而获得其角度^[1-2]。但是,不管是光纤陀螺仪还是微机电系统(MEMS)工艺陀螺仪,在检测空间旋转角度时,由于存在游走误差和零偏稳定性问题^[1],其角度测量的准确度很难达到 0.2° 。电子罗盘是以地球的弱地磁为基准方向,在被测环境存在磁场干扰下,电子罗盘的角度测量也难实现 0.2° 准确度^[3]。

基于 MEMS 工艺的倾角传感器^[4-9],以水平面为基准,检测当前测量轴和水平面之间的夹角,非常适合静态角度的检测。如果用于空间旋转角度的检测,则要求其旋转轴必须平行于水平面^[10]。事实上, MEMS 工艺的倾角传感器作为电子部件,经过工艺安装以后,其自身测量轴不能保证和外壳的平面平行,不能保证安装后的外壳平面和旋转轴保持平行,也不能保证旋转轴平行于水平面。这样,倾角传感器的测量轴和旋转轴的位置关系表现为平行、相交或者异面,因此采用倾角传感器进行空间角度检测,必须考虑传感器的安装问题。

本文从倾角传感器模型出发,对传感器和旋转轴在空间的位置关系进行建模,求出基于双轴倾角传感器的空间旋转角度的解析解^[11],并通过三维几何软件的计算结果和本文的计算结果相一致,证明了本文求解算法的正确性。最后,通过实验和计量部门的检验,证明本文算法的工程应用性。

1 倾角传感器工作原理

本文采用基于 MEMS 工艺实现的静态加速度测量原理的双轴倾角传感器,其内部包含了一个硅敏感微电容感应装置和一个 ASIC 专用集成电路。如图 1 所示,当加速度传感器静止时(侧面和垂直方向没有加速度作用),作用在它上面的只有重力加速度。重力(垂直方向)和加速度传感器测量轴之间的夹角就是倾斜角,从而实现被测物体相对于水平面具有倾斜角时的测量。

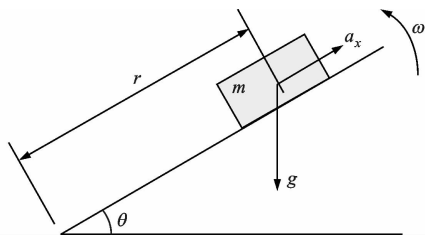


图 1 倾角传感器测量原理

图 1 中质量块 m 绕水平轴旋转,角速度为 ω ,旋转半径为 r ,此时传感器的输出加速度为

$$a_x = g \sin \theta - \omega^2 r$$

当角速度 ω 为 0 时,为倾角传感器的静态角度测量;当角速度 ω 不为 0 时,为倾角传感器的动态测试。动态测试时倾角传感器的输出会受到向心加速度的影响,无法准确地检测出倾角 θ 。为了消除向心加速度的影响,有效的方法是减小 r 值,即将传感器靠近旋转轴安装。

2 空间旋转角度测量原理及建模

采用倾角传感器实现空间旋转角度的静态测量,首先讨论单轴倾角传感器的建模及其测量角度存在的问题,然后再通过对双轴倾角传感器安装的建模,获得空间旋转角度的测量方法。

2.1 单轴倾角传感器空间旋转模型的建立

单轴倾角传感器和旋转轴的位置关系如图 2 所示。图中旋转轴和水平面有夹角,传感器的测量轴和旋转轴是空间异面关系。根据该安装示意图,建立其模型如图 3 所示。

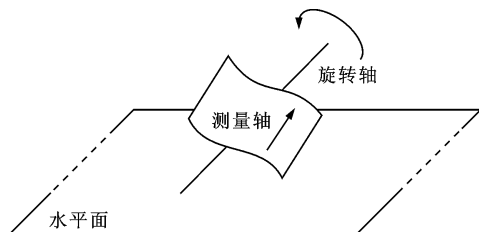


图 2 单轴传感器和旋转轴的空间示意图

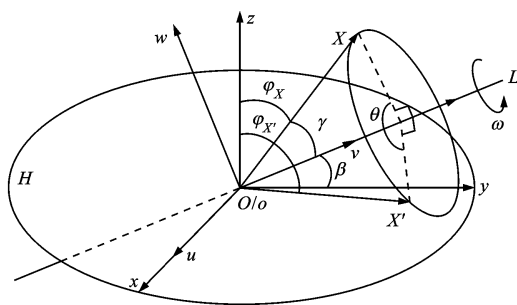


图 3 单轴倾角传感器和旋转轴的空间模型

图 3 中, H 为水平面, L 代表旋转轴, 其与水平面夹角为 β 。 L 在水平面的投影为 y 轴, 并和 y 轴的交点为原点 o , 在水平面上过 o 点和 y 轴垂直的方向为 x 轴, 过 o 点并垂直水平面建立 z 轴, 形成右手笛卡尔坐标系 xyz 。

在一般情况下, 倾角传感器的测量轴 OX 和 L 成空间角度关系, 但是通过平移 OX 并使之过原点

o , 对倾角传感器的角度输出不产生影响。不失一般性, 测量轴在该坐标系的位置为 OX' , OX' 围绕 L 以 ω 的角速度旋转。那么, 当 OX' 旋转到 yoz 平面内时, 记为 OX , OX 和 L 的夹角为 γ 。

建立新笛卡尔坐标系 $uvwo$, 其中 ou 和 ox 重合, ov 和旋转轴 L 重合, ow 垂直于 uov 。那么, $uvwo$ 坐标系是 $xyzo$ 坐标系以 ox 轴为中心逆时针旋转了 β 角度的结果, 其旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_x(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

在 $xyzo$ 坐标系中, 设 oz 的单位法向量 $\mathbf{Z} = [0, 0, 1]$, 该向量经过绕 ox 轴旋转以后, 得到向量 $\mathbf{Z}$ 在 $uvwo$ 坐标系表示为

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{R}_x(\beta) = [0, \sin\beta, \cos\beta] \quad (2)$$

旋转轴 L 在 $uvwo$ 坐标系下的单位向量设为

$$\mathbf{L} = [0, 1, 0]$$

测量轴 OX 在 $uvwo$ 坐标系下的单位向量设为

$$\mathbf{X} = [0, \cos\gamma, \sin\gamma]$$

则测量轴 OX 在 $uvwo$ 坐标系下绕 ov 轴旋转角度 θ , 记作 OX' , 其旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_v(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

测量轴 OX' 的向量为

$$\mathbf{X}' = \mathbf{X} \cdot \mathbf{R}_v(\theta) = [\sin\gamma\sin\theta, \cos\gamma, \sin\gamma\cos\theta] \quad (4)$$

测量轴 OX' 和 oz 轴之间夹角 $\varphi_{X'}$ 记为 $\langle \mathbf{X}', \mathbf{Z}' \rangle$, 其余弦为

$$\cos\varphi_{X'} = \mathbf{Z}' \cdot \mathbf{X}' = \sin\beta\cos\gamma + \cos\beta\sin\gamma\cos\theta \quad (5)$$

测量轴 OX' 与水平面的夹角同 $\varphi_{X'}$ 互为余角, 设倾角传感器测量轴 OX 的输出信号为

$$U_X = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{X'}\right) = \sin\beta\cos\gamma + \cos\beta\sin\gamma\cos\theta \quad (6)$$

式(6)即为单轴倾角传感器测量空间旋转角的输出表达式。显然, 式(6)中还有不可知的空间位置参数 β, γ , 不能对旋转角度 θ 进行求解。

当式(6)中的 $\theta=0$, 且 β 和 γ 角在一个平面上时, 单轴倾角传感器的输出为

$$U_X = \sin\beta\cos\gamma + \cos\beta\sin\gamma = \sin(\beta + \gamma) \quad (7)$$

式(7)成立的条件是: 传感器测量轴和其在水平面上的投影构成的平面与测量轴和其在传感器安装平面的投影构成的平面相重合的时候, 传感器的输

出结果才是正确的, 否则输出结果是没有意义的。

2.2 双轴倾角传感器的空间旋转模型的建立

双轴倾角传感器的两个测量轴 OX 和 OY 是相互垂直的, 并构成一个测量平面 M , 其和旋转轴的位置关系如图 4 所示。同样, 在旋转轴和水平面有夹角的情况下, 任何一个测量轴和旋转轴之间成空间异面关系, 建立的模型如图 5 所示。

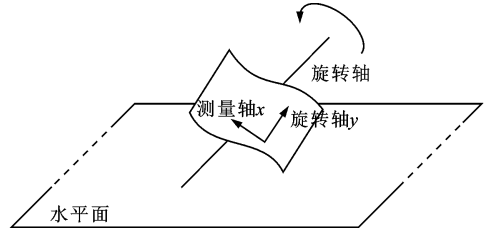


图 4 双轴传感器和旋转轴的空间示意图

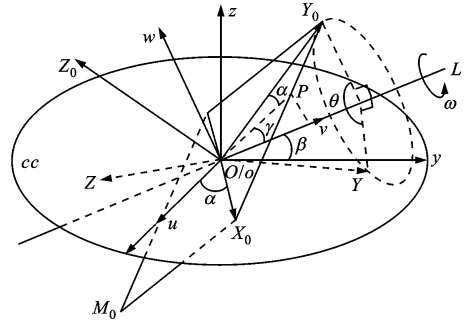


图 5 双轴倾角传感器和旋转轴的空间模型

图 5 中, 旋转轴 L 和水平面夹角仍为 β , 其投影为 y 轴, 采用单轴倾角传感器的建模方法, 实现右手两个笛卡尔坐标系 $xyzo$ 和 $uvwo$ 。两个测量轴 OX_0 和 OY_0 构成测量平面 M_0 , ov 轴(即 L 轴)在平面 M_0 上的投影为 OP , 设 OP 和 ov 之间夹角为 γ , OP 和 OY_0 夹角为 α 。 M_0 的法向量设为 OZ_0 , 并以该法向量在 yoz 平面内为初始零位。由于 OZ_0 是 M_0 平面的法向量, 且在 yoz 平面内, 即 OZ_0 垂直于 ox 轴, 那么 ox 在 M_0 平面内。由于测量轴 OX_0 和 OY_0 是垂直的, 所以 OX_0 和 ox 之间的夹角也是 α 。这样, 由 α, β 和 γ 可唯一确定双轴倾角传感器的旋转模型。

测量平面 M_0 绕旋转轴 L 旋转了角度 θ , 法向量 OZ_0 旋转到 OZ , OY_0 旋转到 OY , OX_0 旋转到 OX (图中省略)。各个向量在 $uvwo$ 坐标系内的初始值为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_0 &= [\cos\alpha, \sin\alpha\cos\gamma, \sin\alpha\sin\gamma] \\ \mathbf{Y}_0 &= [\sin\alpha, \cos\alpha\cos\gamma, \cos\alpha\sin\gamma] \end{aligned} \quad (8)$$

经过绕 L 轴旋转角度 θ 后的两个测量轴单位向量分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{X}_0 \cdot \mathbf{R}_v(\theta) = [\cos\alpha\cos\theta - \sin\alpha\sin\gamma\sin\theta, \\ &\quad \sin\alpha\cos\gamma, \cos\alpha\sin\theta + \sin\alpha\sin\gamma\cos\theta] \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{Y}_0 \cdot \mathbf{R}_v(\theta) = [\sin\alpha\cos\theta - \cos\alpha\sin\gamma\sin\theta, \\ &\quad \cos\alpha\cos\gamma, \sin\alpha\sin\theta + \cos\alpha\sin\gamma\cos\theta] \quad (9) \end{aligned}$$

此时,向量 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Z}$ 的夹角 $\langle \mathbf{X}, \mathbf{Z} \rangle$ 就是倾角传感器测量轴 OX 和水平夹角的余角,即为该轴的输出信号

$$\begin{aligned} U_X &= \sin\left(\frac{\pi}{2} - \langle \mathbf{X}, \mathbf{Z} \rangle\right) = \cos\langle \mathbf{X}, \mathbf{Z} \rangle = \\ &\sin\alpha\cos\gamma\sin\beta - \cos\alpha\sin\theta\cos\beta + \sin\alpha\sin\gamma\cos\theta\cos\beta \quad (10a) \end{aligned}$$

同理,倾角传感器测量轴 OY 的输出信号为

$$\begin{aligned} U_Y &= \sin\left(\frac{\pi}{2} - \langle \mathbf{Y}, \mathbf{Z} \rangle\right) = \cos\langle \mathbf{Y}, \mathbf{Z} \rangle = \\ &\cos\alpha\cos\gamma\sin\beta + \sin\alpha\sin\theta\cos\beta + \cos\alpha\sin\gamma\cos\theta\cos\beta \quad (10b) \end{aligned}$$

由此,建立了双轴倾角传感器的输出信号 U_X 、 U_Y 和旋转角度 θ 之间的数学模型,其中 α 、 β 和 γ 就是倾角传感器空间安装的位置参数。

2.3 旋转角度测量方程的特征

观察式(10a)、式(10b),用二维旋转矩阵

$$\mathbf{R}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

对其进行旋转变换,可得

$$U'_X = -\cos\beta\sin\theta$$

$$U'_Y = \cos\gamma\sin\beta + \sin\gamma\cos\beta\cos\theta$$

当 $\sin\gamma\cos\beta \neq 0$ 时,进一步写成

$$\left(\frac{U'_X}{\cos\beta}\right)^2 + \left(\frac{U'_Y - \cos\gamma\sin\beta}{\sin\gamma\cos\beta}\right)^2 = 1 \quad (11)$$

式(11)为一标准椭圆方程,如图 6 所示。其半长轴 $a = |\cos\beta|$,半短轴 $b = |\cos\beta\sin\gamma|$,在 $U_X U_Y$ 坐标系下的几何中心 U_C 为 $(\sin\alpha\cos\gamma\sin\beta, \cos\alpha\cos\gamma\sin\beta)$,长轴的倾斜角为 $-\alpha$ 。

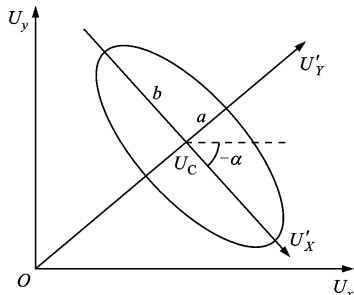


图 6 模型方程特征示意图

由此可见,在一般情况下,双轴倾角传感器的两个测量轴输出信号轨迹为一椭圆。

在 $\beta=12^\circ$ 、 $\gamma=28^\circ$ 条件下,分别取 $\alpha=10^\circ$ 和 $\alpha=$

40° ,倾角传感器绕旋转轴 L 旋转一周,其输出信号 U_X 和 U_Y 的图像如图 7 所示。

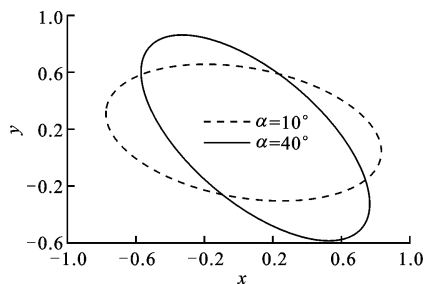


图 7 倾角传感器输出信号图像

当 $\gamma=\pi/2$,该方程表示在原点的圆,其物理意义是测量轴和旋转轴垂直, α 可为任意初始值;当 $\gamma=0$,其轨迹变为斜率等于 $-\tan\alpha$ 的一条线段;当 $\beta=0^\circ$ 和 $\gamma=0^\circ$ 时,倾角传感器处于水平安装。由式(10a)、式(10b)可得 $\tan\alpha = -(U_Y/U_X)$,进而可得出旋转角度 $\sin\theta = U_Y/\sin\alpha$ 。

同时注意到,当旋转轴的水平角度 $\beta=90^\circ$,式(11)没有意义。这说明,该模型无法测量旋转轴和水平面垂直的旋转角度,这和倾角传感器的检测原理相一致。

3 测量旋转角度方程的计算验证

采用三维几何模型软件 Cabri 3D,建立双轴倾角传感器空间安装位置模型,并进行角度测量,从而验证公式的正确性。通过该软件建立的双轴倾角传感器空间位置模型如图 8 所示。

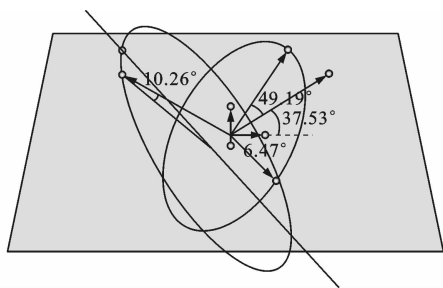


图 8 通过 Cabri 3D 建立的计算模型

设定 α 、 β 和 γ 为不同的值,将式(10)计算得出的旋转角度值和从 Cabri 3D 软件中获得的测量值进行对比,如表 1 和表 2 所示。

由于 Cabri 3D 软件测量和显示的结果只保留了 2 位小数,造成方程的 3 个位置参数产生了一定的误差,进而导致仿真值和理论计算值有微小误差,但两者数据基本一致,从而证明了倾角传感器测量角度方程的正确性。

表 1 当 $\alpha=22.82^{\circ}$ 、 $\beta=37.53^{\circ}$ 、 $\gamma=10.28^{\circ}$ 时的理论结果和仿真结果对比 ($^{\circ}$)

θ	理论结果		Cabri 3D 测量结果	
	X 轴角度	Y 轴角度	X 轴角度	Y 轴角度
-180	10.22	24.97	10.22	24.97
-144	38.14	15.45	38.15	15.45
-108	65.59	12.71	65.59	12.71
-72	70.82	17.49	70.84	17.47
-36	44.94	28.52	44.94	28.52
0	16.69	43.08	16.69	43.08
36	-8.80	57.01	-8.80	57.01
72	-26.49	62.27	-26.50	62.27
108	-28.68	53.56	-28.68	53.56
144	-13.99	38.88	-13.99	38.89

表 2 当 $\alpha=102.41^{\circ}$ 、 $\beta=26.63^{\circ}$ 、 $\gamma=15.52^{\circ}$ 时的理论结果和仿真结果对比 ($^{\circ}$)

θ	理论结果		Cabri 3D 测量结果	
	X 轴角度	Y 轴角度	X 轴角度	Y 轴角度
-180	10.84	-2.39	10.84	-2.38
-144	6.85	-34.37	6.85	-34.37
-108	9.54	-61.15	9.54	-61.15
-72	18.07	-69.95	18.07	-69.95
-36	29.81	-40.40	29.80	-40.40
0	40.94	-8.34	40.94	-8.33
36	46.40	22.20	46.41	22.20
72	42.65	46.12	42.65	46.12
108	32.22	48.83	32.22	48.83
144	20.26	27.48	20.27	27.47

4 实验结果及误差分析

根据上述分析,设计如图 9 所示的空间旋转角度测试智能传感器模块,其测试结果如表 3 所示,并对其空间安装位置参数进行了计算。

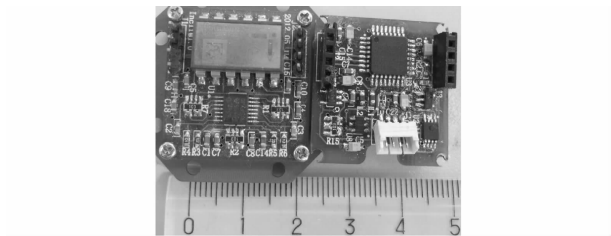


图 9 研制的倾角传感器模块

表 3 中 U_X 和 U_Y 输出的是正弦值,给出了 3 组数据,每组数据采集 3 次传感器输出值,由此计算出

α 、 β 和 γ ,但是由于 γ 的角度接近 90° ,其余弦值变化非常小,导致计算出来的 α 值波动比较大。

表 3 位置参数计算

数据组	测量次序	U_X/V	U_Y/V	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	$\gamma/(^{\circ})$
第 1 组	第 1 次	0.10	0.59	25.16	49.41	86.76
	第 2 次	0.18	0.57			
	第 3 次	0.26	0.54			
第 2 组	第 1 次	0.13	0.59	24.86	49.43	86.80
	第 2 次	0.21	0.56			
	第 3 次	0.28	0.53			
第 3 组	第 1 次	0.04	0.60	24.35	49.21	86.58
	第 2 次	0.15	0.58			
	第 3 次	0.23	0.56			

在国防科技工业 6114 二级计量站,采用型号为 SJJF-1 的光学分度头(证书编号 JD12YQ2145,其准确度达到 $1''$)对该模块进行空间旋转角度测量准确度的检验。模块安装的空间位置 α 和 γ 为任意安装,在 β 分别为 55° 和 65° 的情况下,进行角度测量检定,测试结果及其误差如表 4、表 5 所示。

表 4 转动轴倾角 $\beta=65^{\circ}$ 时的测试结果及误差 ($^{\circ}$)

标准角度	测试结果	误差	标准角度	测试结果	误差
0.0	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
10.0	10.00	0.00	-10.0	-10.01	-0.01
20.0	20.01	0.01	-20.0	-20.00	0.00
30.0	30.05	0.05	-30.0	-29.95	0.05
40.0	40.02	0.02	-40.0	-39.99	0.01
50.0	49.95	-0.05	-50.0	-50.05	-0.05
60.0	59.99	-0.01	-60.0	-59.99	0.01
70.0	70.13	0.13	-70.0	-70.02	-0.02
80.0	80.11	0.11	-80.0	-80.01	-0.01
90.0	90.15	0.15	-90.0	-89.95	0.05
100.0	100.19	0.19	-100.0	-99.82	0.18
110.0	110.34	0.34	-110.0	-109.64	0.36
120.0	120.45	0.40	-120.0	-119.44	0.56

图 9 是已经实现了智能化旋转角度检测的传感器模块,其输出就是表 4 和表 5 中的测试结果, α 和 γ 值是不输出的,这里给定 β 值是一个估计值,模块内部有其求解的准确值。

从图 10 可以看出,在 $\pm 100^{\circ}$ 的测试范围内,检测准确度均能达到 0.2° ,说明该模型的重复性良好,并能达到一定精度。当超过 $\pm 100^{\circ}$ 后,误差逐渐增大,这是因为测量过程存在一定误差,导致 3 个空间参数 α 、 β 和 γ 的计算出现偏差,使得拟合的旋转椭圆出现偏差,随着旋转角增大误差也增大。

表 5 转动轴倾角 $\beta=55^\circ$ 时的测试结果及误差 ($^\circ$)

标准角度	测试结果	误差	标准角度	测试结果	误差
0.0	0.00	0.00	0.0	0.00	0.03
10.0	9.97	-0.03	-10.0	-10.00	0.00
20.0	19.98	-0.02	-20.0	-19.99	0.01
30.0	29.97	-0.03	-30.0	-29.97	0.03
40.0	39.98	-0.02	-40.0	-39.95	0.05
50.0	49.98	-0.02	-50.0	-49.99	0.01
60.0	60.04	0.04	-60.0	-60.00	0.00
70.0	70.07	0.07	-70.0	-69.97	0.03
80.0	80.14	0.14	-80.0	-79.96	0.04
90.0	90.20	0.20	-90.0	-89.87	0.13
100.0	100.28	0.28	-100.0	-99.80	0.20
110.0	110.33	0.33	-110.0	-109.65	0.35
120.0	120.39	0.39	-120.0	-119.46	0.54

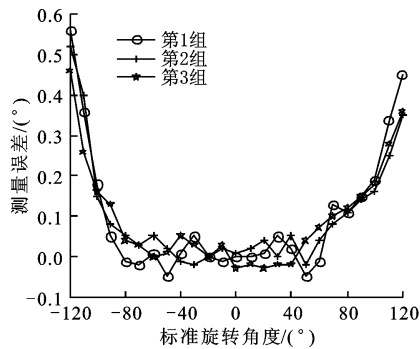


图 10 传感器误差曲线

5 结 论

本文针对旋转轴与水平面不垂直的情况,提出了一种基于双轴倾角传感器的空间旋转角度算法,根据倾角传感器测量轴、旋转轴和水平面的空间关系,建立了基于双轴倾角传感器的空间旋转角度测量的数学模型,推导出了关于双轴倾角传感器的输出和旋转角度 θ 的方程,该方程包含了 3 个未知的位置参数,并通过实验和仿真验证了模型的正确性。该模型主要特征如下。

- (1)采用该模型算法,可实现传感器安装位置参数 α 和 γ 的测量,或旋转轴水平夹角 β 的测量。
- (2)该模型可实现非垂直于水平面的旋转轴在空间旋转角度测量,并能达到一定的准确度。
- (3)当旋转轴垂直水平面时,该模型不能使用,这是由于倾角传感器本身的原理造成的,需要利用其他手段辅助测量。

参考文献:

[1] 张海鹏,房建成. MEMS 陀螺仪短时漂移特性实验研

究[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 100-104.
ZHANG Haipeng, FANG Jiancheng. Short-time drift characteristic of MEMS gyroscope [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(1): 100-104.
[2] Texas Instruments. Six degrees of freedom inertial sensor-ADIS16360 [EB/OL]. [2013-01-02]. <http://www.analog.com/en/mems-sensors/mems-inertial-sensors/adis16365/products/product.html>.
[3] 李希胜,王家鑫,汤程,等. 高精度磁电子罗盘的研制[J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2441-2444.
LI Xisheng, WANG Jiaxin, TANG Cheng, et al. Development of high accuracy magnetic electronic compass [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(6): 2441-2444.
[4] 张维胜. 倾角传感器原理与发展[J]. 传感器世界, 2002(8): 18-21.
[5] YURISH S Y. Low-cost, dual-axis smart inclinometer [C]//IEEE Sensors 2008 Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1488-1491.
[6] 马洪连,郑保重,王伟. 基于 MEMS 技术倾角传感器测量系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 185-187.
MA Honglian, ZHENG Baozhong, WANG Wei. Dip angle measuring system based on MEMS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 185-187.
[7] 刘武发,蒋蓁,龚振邦. 基于多个 MEMS 加速度计的双轴倾角计及其应用[J]. 传感器技术, 2005, 23(3): 86-88.
LIU Wufa, JIANG Zhen, GONG Zhenbang. Biaxial tiltmeter and application based on MEMS accelerometer [J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 23(3): 86-88.
[8] JUNG H, KIM C J, KONG S H. A MEMS-based electrolytic tilt sensor [C]//2006 IEEE Sensors Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1119-1120.
[9] GE Zongtao, TAKEDA M. High-resolution two-dimensional angle measurement technique based on fringe analysis [J]. Applied Optics, 2003, 42(34): 6859-6868.
[10] 薛琴. 双轴倾角传感器在钻孔测斜仪中测量算法的校正[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(6): 70-72.
XUE Qin. Measurement algorithmic adjustment of 2-axis inclinometer in borehole inclinometer [J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(6): 70-72.
[11] 曹建安,吴昊,王亮,等. 一种基于双轴倾角传感器的空间旋转角度测量方法: 中国, 201210279400.1 [P]. 2012-08-01.

(编辑 杜秀杰)