

DOI: 10.7652/xjtuxb201610001

一种改进的空间全方位旋转角度测量方法

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

摘要: 针对采用双轴倾角传感器实现空间旋转角度测量的解析方法难以测量全方位旋转角度的问题,提出了一种改进的空间全方位旋转角度测量方法(IODSRA)。该方法在倾角传感器测量轴绕刚体旋转轴旋转的空间模型基础上,增加了一个沿原传感器法向量方向的单轴倾角传感器,以提高角度测量的灵敏度,改进了求解传感器空间位置参数的方法,获得空间位置参数;然后通过多个旋转方程的优化,得出最佳的空间全方位旋转角度。仿真和实验结果均表明,与其他实现空间旋转角度测量方法相比,IODSRA 方法可实现在 $\pm 180^\circ$ 范围内测量,其检测准确度达到 0.2° 的测量要求。

关键词: 角度测量;全方位旋转角;倾角传感器;空间旋转模型;空间位置参数

中图分类号: TM938.81 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)10-0001-07

An Improved Method for Measurement of Omni-Directional Spatial Rotation Angles

CAO Jian'an, ZHU Xin, WU Hao, ZHANG Leping
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An improved method (IODSRA) to measure omni-directional spatial rotation angles is proposed to focus on the problem, that the analytical approach for measurement of spatial angle with dual-axis inclination sensor can't measure the omni-directional rotation angle. It is based on the space model that measurement axis of inclination sensor rotates around measurement axis of rigid body, and the method improves the sensitivity of measuring angles and obtains spatial position parameters by applying a single axis inclinometer in the direction of normal vector of existed sensor. The optimal rotational angle measurement is acquired by taking full advantage of several rotation equations. Experimental results show that the IODSRA method achieves the measurement of the omni-directional spatial rotation angle while other algorithms are unable, and that detection accuracy can be controlled under 0.2° and meets requirements.

Keywords: angle measurement; omni-directional rotation angle; inclinometer; space rotation model; spatial position parameter

为了保证飞行器,如无人机或 F22 战斗机等,在高速飞行时的机动性、灵活性及稳定性,其斜垂尾的偏转角度要求得到精确控制。因而,该类飞行器在进行地面测试时,需要对其斜垂尾的旋转角度进

行精确测试,而斜垂尾的旋转角度测试问题相当于空间中刚体围绕和水平面有倾角的固定轴旋转角度的测量问题。

这类问题的解决,可以使用陀螺仪、电子罗盘等

传感器实现,其中陀螺仪是对旋转角速率进行时间积分,即可获得旋转角度,适合对空间旋转角度的动态测量。然而,陀螺仪本身易受温度变化、不稳定力矩等因素干扰,存在零偏漂移、角随机游走等问题^[1-3],长时间使用容易产生累积误差,不适合对旋转角度的静态连续测量。电子罗盘是以磁北为参考基准进行旋转角度测量的,但该基准容易受地域和环境磁场的影响,其测量误差较大,而且其安装误差也会导致产生罗差^[4-6],以致其不能实现空间旋转角度的高精度测量。

基于 MEMS 工艺的倾角传感器,其原理是对重力在其内部加速度计方向分量的测量,可以获得测量轴相对水平面的倾角。当传感器处于静态时,其角度输出比较稳定,可获得高精度的水平角度,但当倾角传感器处于动态时,将引入旋转半径方向的角加速度,导致倾角测量不准确。因此,倾角传感器适用于对角度的静态连续测量,有体积小、成本低及稳定性高等优点^[7-9]。

文献[10-11]采用双轴倾角传感器,建立了传感器测量轴绕刚体旋转轴旋转的空间旋转模型,提出了一种空间旋转角度(spatial rotation angle, SRA)测量方法,实现了 $[-100^\circ, 100^\circ]$ 范围内的旋转角度测量,但无法测量空间全方位旋转角度。文献[12]在空间旋转模型的基础上引入了虚拟的辅助轴 z 轴,推导了求解旋转角度的直接求解法,然而由于该方法中存在辅助轴难以求解、测量轴与水平面夹角较大时传感器灵敏度下降的问题,导致该方法只能实现旋转角度为 $[-70^\circ, 70^\circ]$ 范围内的测量要求,同样无法测量空间全方位旋转角度。

为了解决全方位旋转角度的测量问题,本文提出了一种改进的全方位空间旋转角度(improved omnidirectional spatial rotation angle, IODSRA)测量方法。在双轴倾角传感器空间旋转模型的基础上,分析了求解空间位置参数方法中存在的问题,在辅助轴方向增加一个单轴倾角传感器,研究了测量轴在大角度时提高灵敏度的方法,利用多个旋转方程的优化求解出最佳的空间旋转角度。通过实验和计量部门的检验,证明了本文方法在求解空间全方位旋转角度这一工程问题上的有效性。

1 空间旋转模型简介^[10]

1.1 双轴倾角传感器空间旋转模型

双轴倾角传感器的输出信号为其相互垂直测量轴 x 、 y 轴与水平面夹角的正弦值。传感器安装在

测量平面上时,测量轴 y 轴与旋转轴在测量平面投影直线的夹角为 α ,旋转轴和水平面的夹角为 β ,旋转轴和测量平面的夹角为 γ ,如图 1 所示。

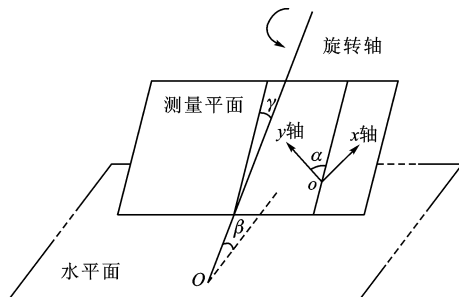


图 1 双轴倾角传感器安装示意图

在图 1 安装示意图的基础上,建立传感器绕轴旋转的空间模型。以旋转轴和水平面的交点 O 为原点,旋转轴在水平面上的投影为 Y 轴,水平面上与过 O 点与 Y 轴垂直方向为 X 轴,过 O 点竖直方向为 Z 轴,建立右手笛卡尔坐标系 $O-XYZ$ 。平移传感器测量轴,使两测量轴交点 o 与原点 O 重合,以两测量轴方向分别为 x 、 y 轴,建立平面坐标系 $oxoy$ 。令 P 代表水平面, L 为旋转轴,旋转轴与水平面的夹角为 β ,如图 2 所示。

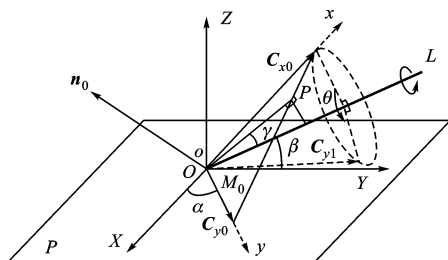


图 2 双轴倾角传感器和旋转轴的空间模型

图 2 中双轴倾角传感器相互垂直的测量轴向量形成一个测量平面,其绕轴 L 旋转。设定测量平面绕 L 轴旋转至其法向量位于 YOZ 平面时的位置 M_0 为初始零位,测量平面的法向量为 n_0 ,此时两测量轴的位置分别为 C_{x0} 、 C_{y0} ,测量平面 M_0 与测量轴 L 的夹角为 γ ,测量轴 C_{x0} 和 X 轴夹角为 α 。测量轴向量分别绕 L 轴逆时针旋转 θ 角形成向量 C_{x1} 、 C_{y1} 。由空间位置参数 α 、 β 和 γ 可以唯一地确定双轴倾角传感器的旋转模型。

当测量轴 C_{x0} 、 C_{y0} 同时绕旋转轴 L 逆时针旋转角度 θ 后,可以得到如下方程

$$\left. \begin{aligned} S_x &= \sin\alpha \cos\gamma \sin\beta - \cos\alpha \sin\theta \cos\beta + \\ &\quad \sin\alpha \sin\gamma \cos\theta \cos\beta \\ S_y &= \cos\alpha \cos\gamma \sin\beta + \sin\alpha \sin\theta \cos\beta + \\ &\quad \cos\alpha \sin\gamma \cos\theta \cos\beta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: S_x 、 S_y 为向量 C_x 、 C_y 在水平面 P 上的倾角正弦值,即双轴倾角传感器两轴的输出信号。

由此建立了双轴传感器的输出信号 S_x 、 S_y 与旋转角 θ 的关系方程。

1.2 旋转方程的性质

传感器输出量 (S_x , S_y) 的轨迹为斜椭圆,其几何参数为:椭圆的几何中心 (c_x , c_y) 为 ($\sin\alpha \cos\gamma \sin\beta$, $\cos\alpha \cos\gamma \sin\beta$),长轴倾角 $\theta = -\alpha$,半长轴 $a = |\cos\beta|$,半短轴 $b = |\cos\beta \sin\gamma|$,离心率 $e = |\cos\gamma|$,传感器输出量的轨迹如图 3 所示。

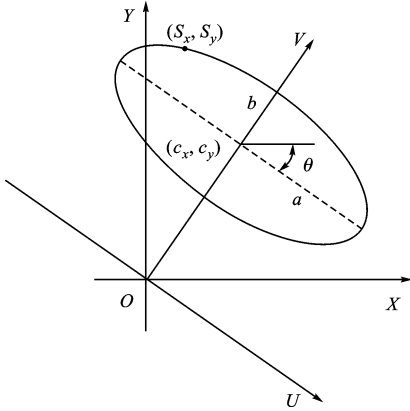


图 3 传感器输出量 (S_x , S_y) 的轨迹

将 XOY 坐标系顺时针旋转角度 α 得到 UOV 坐标系,由平面直角坐标系的二维旋转矩阵

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (2)$$

对输出量坐标进行旋转变换,得到旋转后的坐标

$$\begin{cases} S_U = S_x \cos\alpha - S_y \sin\alpha \\ S_V = S_x \sin\alpha + S_y \cos\alpha \end{cases} \quad (3)$$

结合式(1)可得

$$\begin{cases} S_U = -\cos\beta \sin\theta \\ S_V = \cos\gamma \sin\beta + \sin\gamma \cos\beta \cos\theta \end{cases} \quad (4)$$

2 空间全方位旋转角度求解方法

为了获得空间全方位旋转角 θ ,必须先求解空间位置参数 α 、 β 和 γ ,然后利用旋转方程求解空间全方位旋转角度 θ 。

2.1 直接求解法

传感器测量轴向量 C_x 和 C_y 叉积,即将传感器平面的法向量 n 作为辅助轴 z 轴,则 z 轴倾角的正弦值为

$$S_z = -\sin\gamma \sin\beta + \cos\gamma \cos\beta \cos\theta \quad (5)$$

S_x 、 S_y 、 S_z 满足如下方程

$$S_x^2 + S_y^2 + S_z^2 = 1 \quad (6)$$

由倾角传感器输出 (S_x , S_y) 并结合式(6)可求得 S_z 值,获得相应的一组测量点 (S_x , S_y , S_z)。

由式(3)~(5)变换后的旋转方程为

$$S_x \cos\alpha - S_y \sin\alpha = -\cos\beta \sin\theta \quad (7)$$

$$S_x \sin\alpha + S_y \cos\alpha = \cos\gamma \sin\beta + \sin\gamma \cos\beta \cos\theta \quad (8)$$

$$S_z = -\sin\gamma \sin\beta + \cos\gamma \cos\beta \cos\theta \quad (9)$$

由式(8)、(9)可以得到如下方程

$$(S_x \sin\alpha + S_y \cos\alpha) \cos\gamma - S_z \sin\gamma = \sin\beta \quad (10)$$

至少需要 3 个测量点才能求解出空间位置参数,设 3 个测量点分别为 (S_{xi} , S_{yi} , S_{zi}), $i=1,2,3$,令

$$\begin{cases} S'_{xi} = S_{x(i+1)} - S_{xi} \\ S'_{yi} = S_{y(i+1)} - S_{yi} \\ S'_{zi} = S_{z(i+1)} - S_{zi} \end{cases} \quad (11)$$

利用式(10)对 3 点两两差分得到

$$\tan\gamma = \frac{S'_{x1} \sin\alpha + S'_{y1} \cos\alpha}{S'_{z1}} = \frac{S'_{x2} \sin\alpha + S'_{y2} \cos\alpha}{S'_{z2}} \quad (12)$$

从上式求解出

$$\alpha = \arctan \frac{S'_{y1} S'_{z2} - S'_{y2} S'_{z1}}{-S'_{x1} S'_{z2} + S'_{x2} S'_{z1}} \quad (13)$$

将 α 代回至式(12)和式(10),可以求解出 γ 和 β 的值。因此,直接求解法只需 3 个测量点,就可以求解出倾角传感器的空间位置参数 α 、 β 和 γ ,但由于测量点受传感器输出噪声的影响存在一定的误差,只用 3 个测量点求解出的空间位置参数误差很大,所以在工程应用时可以通过增加测量点的个数减小求解空间位置参数的误差。

直接求解法存在以下 3 个方面的问题。

(1)辅助轴输出 S_z 值符号难以确定。使用直接求解法求解 α 、 β 和 γ 时,辅助轴 z 的输出值由测量点 (S_x , S_y) 通过式(6)求出,实际上得到的是 S_z^2 的值,因此存在 S_z 开方后判断符号的问题,而在测量过程中仅凭借已知测量点 (S_x , S_y) 无法判断 S_z 的符号。

一种解决求解辅助轴符号判定问题的方法是:直接假定 S_z 为非负值,因为由式(5)可知,当 $\cos\theta < \tan\gamma \tan\beta$ 时, S_z 的符号变为负值。当 γ 和 β 较小时,旋转角 θ 在一定范围内 S_z 为非负值,如 β 与 γ 在 $[0^\circ, 22.5^\circ]$ 范围内,旋转角 θ 在 $\pm 80^\circ$ 内仍能保证 S_z 的值为正值。但是,采用这种方法限制了该方法的使用范围,不能对安装位置无限制的情况下求解全方位旋转角。

(2)辅助轴倾角较小时求解辅助轴误差大。使用式(6)求解辅助轴的合成误差为

$$\delta_z = \left(\frac{S_x^2 \delta_x^2 + S_y^2 \delta_y^2}{S_z^2} \right)^{1/2} \quad (14)$$

取 $\delta_{\min}$ 为 δ_x 和 δ_y 中较小的值, $\delta_{\max}$ 为 δ_x 和 δ_y 中较大的值, 则有

$$\delta_{\min} \left(\frac{1}{S_z^2} - 1 \right)^{1/2} \leq \delta_z \leq \delta_{\max} \left(\frac{1}{S_z^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (15)$$

因此, 在 S_z 值接近 0 时, 由倾角传感器输出误差影响, 使用式(6)求解 S_z 的误差会显著增大。

(3) 传感器测量轴灵敏度随倾角增大而降低。倾角传感器原理决定了传感器在测量轴倾角增大时灵敏度逐渐降低, 直到 $\pm 90^\circ$ 时无法测量倾角, 而传感器输出误差会随灵敏度降低而增大, 继而会影响求解旋转角 θ 的准确度。

2.2 改进措施

针对直接求解法中存在的问题, 采用以下方法进行改进。

(1) 辅助轴方向增加一单轴倾角传感器。在原双轴倾角传感器的法向量方向增加一单轴倾角传感器, 其输出为传感器测量轴 z 轴的正弦值, 与直接求解法中虚拟辅助轴 z 轴的输出值意义相同, 其表达式同式(5)。

采用改进方法可以直接获得单轴倾角传感器的输出值 S_z , 不需要依靠式(6)求解, 从而解决了辅助轴输出值符号无法确定的问题; 同时, 由于 z 轴与水平面间的倾角变小时, z 方向的单轴倾角传感器灵敏度高, 测量误差很小, 从而解决了在倾角较小时使用式(6)求解 S_z 值的误差过大的问题。

(2) 测量轴在大角度时的灵敏度分析。测量轴与水平面夹角较小时传感器灵敏度较高, 测量误差较小。由于 x 、 y 、 z 三轴传感器的输出值满足式(6), 易知 x 、 y 和 z 方向传感器输出值的绝对值至多有一个值大于 $\sin 45^\circ$, 即传感器在一个空间位置上三轴至多有一轴的倾角大于 45° 。具体分为以下 2 种情况: ① 当 S_x 、 S_y 、 S_z 均小于等于 $\sin 45^\circ$ 时, 测试点 (S_x, S_y, S_z) 不修正; ② 当 S_x 、 S_y 、 S_z 其中一个值大于 $\sin 45^\circ$ 时, 采用式(6)求解大于 $\sin 45^\circ$ 相应轴的值代替该轴原始输出值, 其符号与原始值相同。测试点修正后, 当传感器三个测量轴均与水平面夹角小于等于 45° 时, 传感器输出误差 δ_x 、 δ_y 、 δ_z 均比较小; 若其中一个测量轴与水平面夹角大于 45° 时, 以 z 轴为例, 此时 δ_x 、 δ_y 较小, δ_z 较大, S_z 值用式(6)求解, 由式(15)可知, 其求解的合成误差 $\delta \leq \delta_{\max}$, 即求解出 z 的误差同样较小。

由以上分析可知, 使用直接求解法时需要使用

传感器 $\pm 90^\circ$ 全范围的输出值, 而改进方法只需要使用传感器 $\pm 45^\circ$ 高灵敏度范围的输出值, 以此降低了对传感器的要求, 只需要保证传感器在 $\pm 45^\circ$ 范围内的输出值达到一定的准确度。

2.3 利用旋转方程求解全方位旋转角度

在双轴倾角传感器的基础上, 增加辅助测量轴, 实现了三轴倾角传感器。其在旋转过程中, 可测量并获得多组输出值 (S_{xi}, S_{yi}, S_{zi}) , 其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。使用改进的直接求解法, 可求解出位置参数 α 、 β 、 γ ; 然后在测量旋转角度时, 获得传感器相应位置的输出值 (S_x, S_y, S_z) ; 将参数 α 、 β 、 γ 和输出值 S_x 、 S_y 、 S_z 带入旋转方程(7)、(8)或(9)即可求解出空间旋转角 θ 。

假定求解位置参数的误差为 δ_α 、 δ_β 、 δ_γ , 传感器的测量误差为 δ_x 、 δ_y 、 δ_z 。下面分析使用旋转方程(7)~(9)求解空间旋转角 θ 的合成角误差 δ_1 、 δ_2 和 δ_3

$$\delta_1 = (k_{11}^2 \delta_\alpha^2 + k_{12}^2 \delta_\beta^2 + k_{14}^2 \delta_x^2 + k_{15}^2 \delta_y^2)^{1/2} \quad (16)$$

$$\delta_2 = (k_{21}^2 \delta_\alpha^2 + k_{22}^2 \delta_\beta^2 + k_{23}^2 \delta_\gamma^2 + k_{24}^2 \delta_x^2 + k_{25}^2 \delta_y^2)^{1/2} \quad (17)$$

$$\delta_3 = (k_{32}^2 \delta_\beta^2 + k_{33}^2 \delta_\gamma^2 + k_{36}^2 \delta_z^2)^{1/2} \quad (18)$$

式中: $k_{11} = \frac{\cos \gamma \tan \beta}{\cos \theta} + \sin \gamma$; $k_{12} = \tan \beta \tan \theta$; $k_{14} = -\frac{\cos \alpha}{\cos \theta \cos \beta}$; $k_{15} = \frac{\sin \alpha}{\cos \theta \cos \beta}$; $k_{21} = \frac{1}{\sin \gamma}$; $k_{22} = \frac{\cot \gamma}{\sin \theta} - \tan \beta \cot \theta$; $k_{23} = -\frac{\tan \beta}{\sin \theta} + \cot \gamma \cot \theta$; $k_{24} = \frac{\sin \alpha}{\sin \theta \sin \gamma \cos \beta}$; $k_{25} = \frac{\cos \alpha}{\sin \theta \sin \gamma \cos \beta}$; $k_{32} = -\frac{\tan \gamma}{\sin \theta} - \tan \beta \cot \theta$; $k_{33} = -\frac{\tan \beta}{\sin \theta} - \tan \gamma \cot \theta$; $k_{36} = \frac{1}{\sin \theta \cos \gamma \cos \beta}$ 。

取空间位置参数 $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, 传感器输出量误差 $\delta_x = \delta_y = \delta_z = 0.0005$, 空间位置参数误差 $\delta_\alpha = \delta_\beta = \delta_\gamma = 0.1^\circ$, 标准旋转角 θ 的合成角误差情况如图 4 所示。

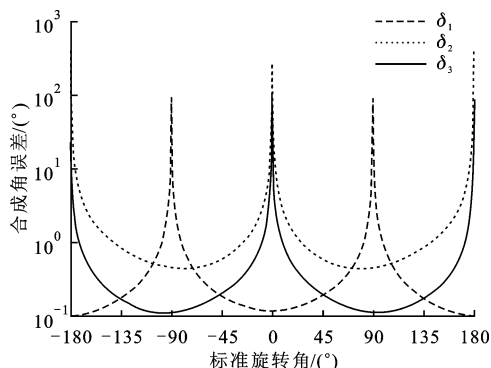


图 4 旋转角合成角误差半对数坐标曲线

由式(16)和图 4 可知,由于存在 $1/\cos\theta$ 和 $\tan\theta$ 项,合成角误差在旋转角为 0° 时 δ_1 达到极小值,在旋转角为 $\pm 90^\circ$ 时 δ_1 达到最大值,在旋转角为 $\pm 180^\circ$ 时达到最小值。

由式(17)、(18)和图 4 可知,由于 $1/\sin\theta$ 和 $\cot\theta$ 项的存在,合成角误差 δ_2 、 δ_3 在 0° 和 $\pm 180^\circ$ 时达到最大值,在 $\pm 90^\circ$ 时达到最小值。由于 δ_2 存在 $1/\sin\gamma$ 和 $\cot\gamma$ 项,而位置参数 γ 一般很小,导致误差 δ_2 比 δ_3 大的多。

综上所述,为了获得最佳的旋转角,应采取旋转方程(7)、(9)相结合的方法计算旋转角,当旋转角在 $\pm 90^\circ$ 附近时取方程(9)求解的结果,在其他范围时可以通过方程(7)来求解旋转角。

3 仿真分析

仿真条件:取位置参数 $\alpha = -23^\circ$, $\beta = 75^\circ$, $\gamma = 3.2^\circ$,均匀分布的 18 个样本点,加入服从均值 $\mu = 0$ 、标准差 $\sigma = 0.025\%$ 正态分布的噪声。

图 5 为以上条件下直接求解法及 IODSRA 方法中 S_z 值的误差情况,从图中可以看出, z 轴倾角接近 0° 时,直接求解法中 S_z 值的误差急剧增大,而 IODSRA 方法中 S_z 值的误差为其加入的随机噪声。仿真验证了采用 IODSRA 方法可解决直接求

解法中求解辅助轴时误差过大的问题。
在给定仿真条件下进行重复仿真,采用 2 种方法求解 3 个位置参数 α 、 β 、 γ 的平均绝对误差如表 1 所示。

表 1 位置参数平均绝对误差对比

方法	平均绝对误差/($^\circ$)		
	α	β	γ
直接求解法	0.009 3	0.005 9	0.005 4
IODSRA 方法	0.001 5	0.001 0	0.001 4

从表 1 可以得出,在给定的空间位置参数条件下采用 IODSRA 方法求解的 α 、 β 和 γ 的平均绝对误差分别降低了 84%、83% 和 74%,证明了采用 IODSRA 方法能够显著减小求解空间位置参数的误差。

根据 2.3 节分析,直接求解法和 IODSRA 方法在仿真条件下求解旋转角的极限误差估算如表 2 所示。

表 2 2 种方法求解旋转角度的误差

倾角传感器精度/($^\circ$)	旋转角误差/($^\circ$)	
	直接求解法	IODSRA 方法
0.02	0.20	0.12
0.04	0.35	0.23
0.08	0.65	0.45

从表 2 可以得出:使用的传感器精度越高,所获得的空间旋转角的准确度就越高;在相同精度传感器条件下,与直接求解法相比,使用 IODSRA 方法求解旋转角度减小了 30%~40% 的误差,所以空间旋转角度测量的准确度取决于倾角传感器和求解方法的精度。因此,采用 IODSRA 求解方法并使用高精度倾角传感器可以实现高准确度的全方位空间旋转角度测量。

4 计量与实验

根据上述分析,设计了测量空间旋转角度的三轴倾角传感器模块。

在国防工业 6114 二级计量站,采用型号为 SJJF-1 的光学分度头 (GFJGJL2049150502519,准确度为 $1''$),对倾角传感器三轴分别进行单轴计量,结果表明: X 、 Y 、 Z 三轴在 $\pm 45^\circ$ 范围内误差不超过 $\pm 0.04^\circ$;在 $\pm (45^\circ \sim 65^\circ)$ 范围内误差不超过 $\pm 0.2^\circ$;倾角大于 $\pm 65^\circ$ 时,误差将超过 $\pm 0.2^\circ$;限于倾角传感器原理,当在 $\pm 90^\circ$ 时,传感器倾角是不可测量的。

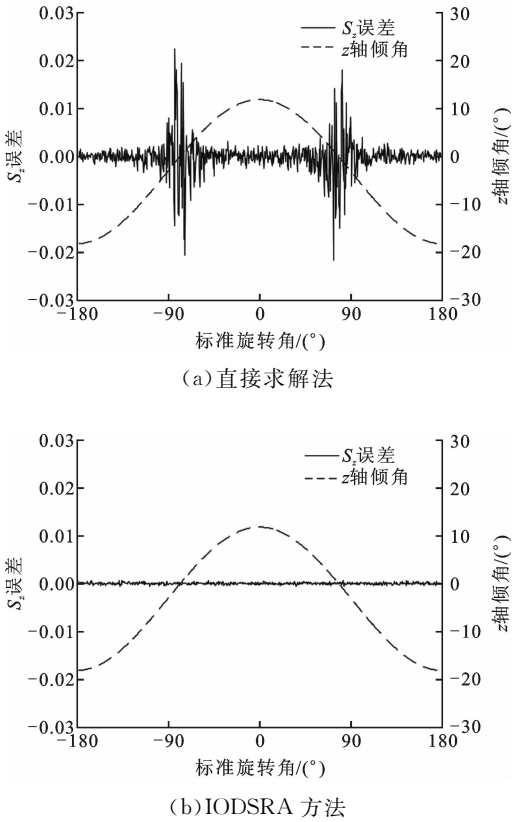


图 5 2 种方法求解 S_z 值的误差对比

同一空间安装位置下,采用 IODSRA 方法对传感器空间位置参数进行计算,结果如表 3 所示。不同组实验算出的参数 α 、 β 、 γ 差别很小,说明了 IODSRA 的方法求解空间位置参数的稳定性较好。

表 3 空间位置参数

数据组	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	$\gamma/(^{\circ})$
第 1 组	-22.54	74.92	3.28
第 2 组	-22.53	74.91	3.28
第 3 组	-22.53	74.99	3.22

对该模块传感器进行 $[-180^{\circ}, 180^{\circ}]$ 范围的空间全方位旋转角度测量。模块的空间角度位置 α 、 γ 为任意安装,在转动轴倾角 β 分别为 55° 和 75° 的情况下,进行角度测量检验,测试结果及误差情况如表 4、表 5 所示。

表 4、表 5 的测试结果表明,使用 IODSRA 方法测量空间全方位旋转角 θ 的误差不超过 0.2° 。使用三轴倾角传感器模块在同一安装情况下进行旋转角度测试,图 6 为采用文献[12]的直接求解法和本文 IODSRA 方法计算出的旋转角误差绝对值对比情况。由图 6 可见:文献[12]方法只能测量 $\pm 80^{\circ}$ 范围

表 4 $\beta=55^{\circ}$ 时对标准旋转角的测试结果及误差

标准角 / $(^{\circ})$	测量角 / $(^{\circ})$	测量角 误差/ $(^{\circ})$	标准角 / $(^{\circ})$	测量角 / $(^{\circ})$	测量角 误差/ $(^{\circ})$
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	9.99	-0.01	-10.00	-9.97	0.03
20.00	19.99	-0.01	-20.00	-19.97	0.03
30.00	29.94	-0.06	-30.00	-29.97	0.03
40.00	39.95	-0.05	-40.00	-40.00	0.00
50.00	49.94	-0.06	-50.00	-50.01	-0.01
60.00	60.06	0.06	-60.00	-60.02	-0.02
70.00	70.05	0.05	-70.00	-69.91	0.09
80.00	80.07	0.07	-80.00	-79.94	0.06
90.00	90.04	0.04	-90.00	-89.91	0.09
100.00	100.06	0.06	-100.00	-99.89	0.11
110.00	110.06	0.06	-110.00	-109.88	0.12
120.00	120.07	0.07	-120.00	-119.86	0.14
130.00	130.04	0.04	-130.00	-129.90	0.10
140.00	140.00	0.00	-140.00	-139.83	0.17
150.00	150.01	0.01	-150.00	-149.88	0.12
160.00	160.02	0.02	-160.00	-159.90	0.10
170.00	170.04	0.04	-170.00	-169.90	0.10
180.00	180.08	0.08	-180.00	-179.92	0.08

表 5 $\beta=75^{\circ}$ 时对标准旋转角的测试结果及误差

标准角 / $(^{\circ})$	测量角 / $(^{\circ})$	测量角 误差/ $(^{\circ})$	标准角 / $(^{\circ})$	测量角 / $(^{\circ})$	测量角 误差/ $(^{\circ})$
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	9.99	-0.01	-10.00	-9.97	0.03
20.00	19.99	-0.01	-20.00	-19.97	0.03
30.00	29.94	-0.06	-30.00	-29.97	0.03
40.00	39.95	-0.05	-40.00	-40.00	0.00
50.00	49.94	-0.06	-50.00	-50.01	-0.01
60.00	60.06	0.06	-60.00	-60.02	-0.02
70.00	70.05	0.05	-70.00	-69.91	0.09
80.00	80.07	0.07	-80.00	-79.94	0.06
90.00	90.04	0.04	-90.00	-89.91	0.09
100.00	100.06	0.06	-100.00	-99.89	0.11
110.00	110.06	0.06	-110.00	-109.88	0.12
120.00	120.07	0.07	-120.00	-119.86	0.14
130.00	130.04	0.04	-130.00	-129.90	0.10
140.00	140.00	0.00	-140.00	-139.83	0.17
150.00	150.01	0.01	-150.00	-149.88	0.12
160.00	160.02	0.02	-160.00	-159.90	0.10
170.00	170.04	0.04	-170.00	-169.90	0.10
180.00	180.08	0.08	-180.00	-179.92	0.08

的旋转角度,且最大误差接近 0.4° ;本文方法可以测量 $\pm 180^{\circ}$ 全范围旋转角度且误差不超过 0.2° 。相对于文献[12]方法,本文方法扩大了旋转角度检测范围,降低了测量误差,实现了空间全方位旋转角度的高精度测量。

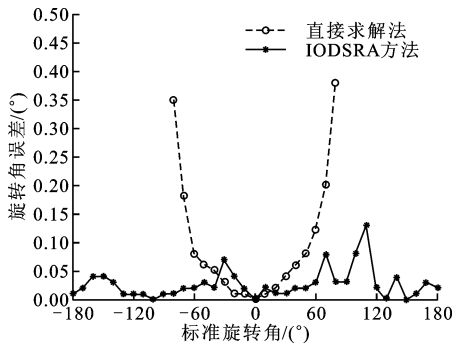


图 6 不同方法检测旋转角误差对比

5 结束语

本文在双轴倾角传感器空间旋转模型的基础上,通过增加一个沿原传感器法向量方向的单轴倾角传感器,提高角度测量的灵敏度,获得了一种改进的空间全方位旋转角度测量方法。仿真和实验结果

表明,该方法可实现 $[-180^{\circ}, 180^{\circ}]$ 全方位范围高准确度的空间旋转角度测量。

参考文献:

- [1] GULMAMMADOV F. Analysis, modeling and compensation of bias drift in MEMS inertial sensors [C]// Proceedings of 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies 2009. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 591-596.
- [2] 成宇翔, 张卫平, 陈文元, 等. MEMS 微陀螺仪研究进展 [J]. 微纳电子技术, 2011, 48(5): 277-285.
CHENG Yuxiang, ZHANG Weiping, CHEN Wen-yuan, et al. Research development of MEMS micro-gyroscopes [J]. Micronanoelectronic Technology, 2011, 48(5): 277-285.
- [3] 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.
- [4] 晁敏, 蒋东方, 文彩虹. 磁罗盘误差分析与校准 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(4): 525-532.
CHAO Min, JIANG Dongfang, WEN Caihong. Error analysis and calibration of magnetic compass [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(4): 525-532.
- [5] 蒋贤志. 数字电子罗盘误差分析及校正技术研究 [J]. 现代雷达, 2005, 27(6): 39-44.
JIANG Xianzhi. A study on the error analysis and calibration technique of digital compass [J]. Modern Radar, 2005, 27(6): 39-44.
- [6] 刘诗斌. 微型智能磁航向系统研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2001: 15-32.
- [7] LEAVITT J, SIDERRIS A, BOBROW J E. High bandwidth tilt measurement using low-cost sensors [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(3): 320-326.
- [8] BAI Yongqiang, HAN Junhui, QI Xianghua. Data processing algorithm of MEMS inclinometer based on improved Sage-Husa adaptive Kalman filter [C]// Proceedings of the 31st Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 3702-3707.
- [9] QIAN Jiye, FANG Bin, YANG Weibin, et al. Accurate tilt sensing with linear model [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(10): 2301-2309.
- [10] 曹建安, 张乐平, 吴昊, 等. 采用倾角传感器实现空间旋转角度测量的解析方法研究 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(10): 109-114.

CAO Jian'an, ZHANG Leping, WU Hao, et al. Analytical approach for measurement of spatial angle with inclination sensor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(10): 109-114.

- [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: 201210279400.1 [P]. 2012-08-01.
- [12] 吴昊. 基于倾角传感器的空间旋转角度测量方法及其工程应用 [D]. 西安: 西安交通大学, 2012.

[本刊相关文献链接]

- 何喆, 白春江, 王新波, 等. 一种采用交流激励的微弱非线性电流-电压关系测试方法. 2016, 50(6): 97-103. [doi: 10.7652/xjtuxb201606015]
- 徐田华, 杨连报, 胡红利, 等. 高速铁路信号系统异构数据融合和智能维护决策. 2015, 49(1): 72-78. [doi: 10.7652/xjtuxb201501012]
- 惠萌, 刘盼芝, 白磷, 等. 非自治铁磁谐振电路过电压脉冲时滞同步抑制方法研究. 2014, 48(6): 55-59. [doi: 10.7652/xjtuxb201406010]
- 韦兆碧, 杨银堂, 马志瀛, 等. 聚磁式光学电流互感器饱和特征的记忆效应补偿研究. 2013, 47(6): 97-102. [doi: 10.7652/xjtuxb201306017]
- 王小鑫, 闫洁冰, 胡红利, 等. 利用正交试验的电容传感器仿真及优化设计. 2013, 47(2): 81-86. [doi: 10.7652/xjtuxb201302014]
- 姚学玲, 杜志航, 杨志豪, 等. 气体放电管直流击穿电压测量技术的研究. 2012, 46(10): 1-7. [doi: 10.7652/xjtuxb201210001]
- 任双赞, 钟力生, 刘强, 等. 变压器油流动带电度的微静电测量方法及其影响因素. 2010, 44(8): 96-100. [doi: 10.7652/xjtuxb201008019]
- 齐静雅, 王昭, 黄军辉, 等. 机床导轨滚转角测量误差分析. 2016, 50(9): 31-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201609005]
- 王伟, 庄文浩, 陶文坚. 采用测量不确定度的复杂自由曲面表面质量测试与评价. 2016, 50(8): 20-25. [doi: 10.7652/xjtuxb201608004]
- 郝维娜, 令锋超, 刘志刚, 等. 轴承滚珠面型误差激光干涉测量系统的研究. 2016, 50(6): 83-89. [doi: 10.7652/xjtuxb201606013]
- 余宝, 王昭, 黄军辉, 等. 机床滚转角高精度测量中的频偏现象研究. 2016, 50(3): 101-105. [doi: 10.7652/xjtuxb201603016]
- 赵进全, 尹建华, 夏建生, 等. 一种非对称输电线路参数的在线测量方法. 2016, 50(02): 80-84. [doi: 10.7652/xjtuxb201602014]

(编辑 刘杨)