

采用多传感器融合的空间全方位 旋转角度测量方法

曹建安^{1,2}, 肖智中¹, 赵敏杰¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学高能高功率脉冲电源全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对现有基于三轴倾角传感器的空间旋转角度测量方法在旋转轴接近竖直工况下存在测量局限、难以实现全方位高精度测量的问题,提出了一种融合三轴倾角传感器与三轴磁北传感器的空间全方位旋转角度测量方法。在传统三轴倾角传感器的空间旋转模型基础上,引入磁北传感器旋转模型,建立传感器安装模型,定义位置参数 α 、 β 、 γ 和 φ ,构建传感器输出与空间位置参数及旋转角度之间的关系,推导位置参数拟合方程、旋转角度解算公式及其合成误差表达式,并系统分析各位置参数对合成误差的影响规律。理论分析与实验结果表明: α 对合成误差无影响,为非敏感参数; γ 影响不同解算公式的适用范围,是公式选择的敏感参数; β 决定不同传感器的适用范围,是传感器选择的关键参数。基于最小合成误差准则,可实现传感器及解算公式的自适应选择。所提方法有效克服了单一倾角传感器在竖直旋转轴工况下无法测量的局限,实现了旋转轴方向任意、旋转范围达 360° 的空间全方位角度测量,测量准确度优于 0.2° ,为空间旋转角度测量方法的研究提供了新思路。

关键词: 角度测量;全方位旋转角;空间旋转模型;多传感器

中图分类号: TM938.81 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202609001 **文章编号:** 0253-987X(2026)09-0001-08

Omnidirectional Spatial Rotation Angle Measurement Method Based on Multi-Sensor Fusion

CAO Jian'an^{1,2}, XIAO Zhizhong¹, ZHAO Minjie¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. National Key Laboratory for High Energy Pulsed Power, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the limitations of existing spatial rotation angle measurement methods based on triaxial tilt sensors when the rotation axis is close to the vertical direction, which make omnidirectional high-precision measurement difficult, an omnidirectional spatial rotation angle measurement method integrating a triaxial tilt sensor and a triaxial geomagnetic sensor is proposed. Based on the conventional spatial rotation model of a triaxial tilt sensor, a rotation model for the geomagnetic sensor is introduced. A sensor installation model is established, and the position parameters α , β , γ , and φ are defined. The relationships among sensor outputs, spatial position parameters, and rotation angle are established, and the fitting equations for the position parameters, the rotation angle calculation formulas, and the composite error expressions are derived. In addition, the

收稿日期: 2026-02-03。

作者简介: 曹建安(1971—),男,教授,博士生导师。

基金项目: 国家重点研发计划资助

项目(2024YFF0726900)。

网络出版时间: 2026-06-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260612.1133.002>

effects of the position parameters on the composite error are systematically analyzed. It is shown by theoretical analysis and experimental results that α has no effect on the composite error and is therefore a non-sensitive parameter; γ affects the applicable ranges of different calculation formulas and is a sensitive parameter for formula selection; and β determines the applicable ranges of different sensors and is a key parameter for sensor selection. Based on the minimum composite error criterion, adaptive selection of sensors and calculation formulas can be achieved. The limitation that rotation angles cannot be measured by a single tilt sensor when the rotation axis is vertical is effectively overcome by the proposed method, and omnidirectional spatial rotation angle measurement with an arbitrary rotation-axis direction and a full 360° rotation range is achieved. A measurement accuracy better than 0.2° is achieved, providing a new idea for the study of spatial rotation angle measurement methods.

Keywords: angle measurement; omnidirectional rotation angle; spatial rotation model; multisensor

空间旋转角度测量在工业、航空、航天等多个领域中具有广泛的应用,尤其在飞机、无人机等高速飞行器的测试中占据着至关重要的地位^[1-4]。随着智能制造、自动化技术以及高精度定位系统的发展,这类测量任务面临的挑战也愈加复杂:旋转轴的空间方位常常未知,测量范围较宽,且精度要求极高。此外,设备需要具备小巧、轻便的特点,以便于在不同的测试环境中灵活安装和应用。为应对这些挑战,近年来,学者们提出了多种旋转角度测量方法,其中最为常见的包括双目视觉测量、惯性测量单元(IMU)测量和倾角传感器测量等方法^[5-9]。

双目视觉测量方法通过非接触方式进行测量,避免了因物理干扰或机械磨损引起的误差,且不需要特定的安装装置,具有较强的适应性^[10-11]。这使得双目视觉在航空航天领域中成为一种重要的角度测量工具,尤其是在飞机舵面偏角测量中^[12]。然而,这一方法对光照变化和运动模糊较为敏感,要求较高的系统维护与预处理步骤。为了提高测量精度并减少误差,研究者们提出了改进的图像预处理算法及特征提取方法。此外,双目视觉系统的标定过程较为复杂,任何标定误差都可能导致测量结果的不准确。在实际应用中,三维重建和角度计算过程中的高计算量也是其应用中的一大挑战^[13-14]。因此,如何提高双目视觉系统的标定精度和计算效率,仍然是当前研究中的关键问题。

IMU 测量方法因其优异的动态响应速度和强大的适应性,在飞行器、无人机等高精度控制系统中得到了广泛应用。IMU 系统能够实时响应舵面动作,且不易受到光照、灰尘等外部环境因素的干扰,表现出较高的稳定性,因此在复杂环境中具有显著优势^[15-16]。然而,IMU 测量方法对安装位置有严格要求,且在高振动环境中,IMU 的加速度计和陀螺

仪容易受到噪声干扰,这些干扰可能导致误差积累和测量结果的不稳定。为解决这些问题,许多研究提出了通过优化算法和传感器设计来提高 IMU 在动态环境下的鲁棒性和准确性^[17-18]。

倾角传感器测量方法主要是测量传感器与水平面的夹角,具有结构简单、成本低、稳定性高等优点,尤其适用于静态测量。在静态环境下,倾角传感器能够提供较高的测量精度,并且不易受到温度变化或外部干扰的影响。然而,倾角传感器的测量范围有限,不能有效测量旋转轴在竖直方向的偏角,且随着倾斜角度的增加,传感器的灵敏度会下降^[19-25]。

为了解决倾角传感器测量局限性的问题,本文提出了一种采用多传感器融合的空间全方位旋转角度测量方法,融合了倾角传感器和磁北传感器。该方法能够有效解决倾角传感器在静态工况下的盲区问题,并通过融合磁北传感器的优势,弥补倾角传感器在测量中的性能限制,从而显著提升测量的准确度和稳定性。得益于多传感器融合技术,该方法在不同静态工况下仍能保持良好的测量性能,确保了系统的可靠性和适用性。

1 空间全方位旋转角度模型

1.1 三轴传感器安装模型

三轴传感器的 x 、 y 、 z 轴排列顺序遵循右手定则,将传感器安装在测量平面上时,默认 x 、 y 轴位于测量平面内, z 轴垂直于测量平面,其安装模型示意图如图 1 所示,其中 B_T 表示地磁矢量在水平面的投影。其中: α 的定义为 y 轴与旋转轴在测量平面上的投影线所形成的夹角; β 的定义为水平面与旋转轴所形成的夹角; γ 的定义为测量平面与旋转轴所形成的夹角; φ 的定义为旋转轴在水平面的投影与地磁矢量在水平面的投影的夹角。

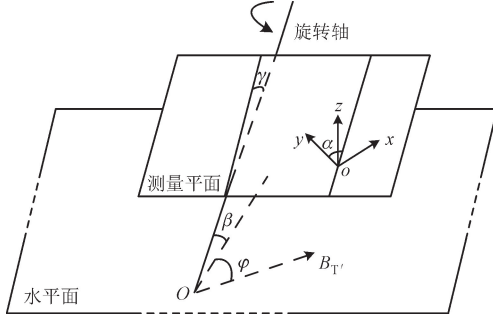


图1 三轴传感器安装模型

Fig. 1 Three-axis sensor installation model

1.2 三轴传感器空间旋转模型

基于传感器安装模型,构建三轴传感器绕轴旋转的空间几何模型,如图2所示,其中 B_T 表示地磁矢量, $B_{T'}$ 表示其在水平面的投影, ψ 为地磁倾角。设水平面为 P , 旋转轴为 L , 取 L 与 P 的交点 O 为原点, 并以 L 在 P 上的投影方向为 Y 轴, 建立参考坐标系 $O-XYZ$, 同时建立旋转坐标系 $O-UVW$ 和传感器坐标系 $o-xyz$ 。

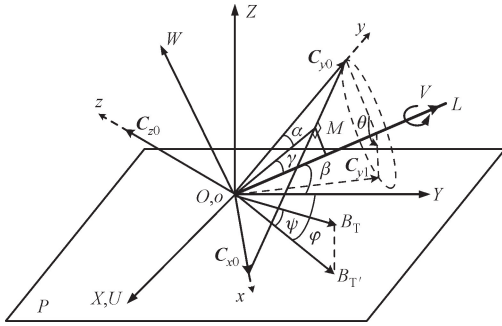


图2 三轴传感器空间旋转模型

Fig. 2 Three-axis sensor spatial rotation model

为便于旋转角度的计算,本文规定:当传感器 z 轴处于 YOZ 面内时,将其定义为初始零位。此时,各测量轴对应的方向向量分别记为 C_{x0} 、 C_{y0} 和 C_{z0} 。当传感器绕旋转轴 L 逆时针旋转 θ 后,其测量轴的方向向量变为 C_{x1} 、 C_{y1} 和 C_{z1} 。

1.3 旋转方程

图2所示的旋转模型,适用于三轴倾角传感器及三轴磁北传感器,基于该模型,三轴倾角传感器的输出 I_x 、 I_y 和 I_z 满足如下关系

$$\begin{cases} I_x = \sin \alpha \cos \gamma \sin \beta - \cos \alpha \cos \beta \sin \theta + \sin \alpha \sin \gamma \cos \beta \cos \theta \\ I_y = \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \sin \theta + \cos \alpha \sin \gamma \cos \beta \cos \theta \\ I_z = -\sin \gamma \sin \beta + \cos \gamma \cos \beta \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_x 、 I_y 和 I_z 为测量轴方向向量 C_x 、 C_y 和 C_z 与水平面夹角的正弦值。

三轴磁北传感器的输出 M_x 、 M_y 和 M_z 满足如下关系

$$\begin{cases} M_x = \sin \alpha \cos \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi + \sin \alpha \cos \gamma \sin \beta \cdot \sin \psi + (\cos \alpha \cos \psi \sin \varphi - \sin \alpha \sin \gamma \sin \beta \cos \psi \cdot \cos \varphi + \sin \alpha \sin \gamma \cos \beta \sin \psi) \cos \theta + (\sin \alpha \sin \gamma \cos \psi \sin \varphi + \cos \alpha \sin \beta \cos \psi \cos \varphi - \cos \alpha \cos \beta \sin \psi) \sin \theta \\ M_y = \cos \alpha \cos \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi + \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta \cdot \sin \psi + (-\sin \alpha \cos \psi \sin \varphi - \cos \alpha \sin \gamma \sin \beta \cos \psi \cdot \cos \varphi + \cos \alpha \sin \gamma \cos \beta \sin \psi) \cos \theta + (\cos \alpha \sin \gamma \cos \psi \sin \varphi - \sin \alpha \sin \beta \cos \psi \cos \varphi + \sin \alpha \cos \beta \sin \psi) \sin \theta \\ M_z = -\sin \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi - \sin \gamma \sin \beta \sin \psi + (-\cos \psi \sin \beta \cos \psi \cos \varphi + \cos \gamma \cos \beta \sin \psi) \cdot \cos \theta + \cos \gamma \cos \psi \sin \varphi \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: M_x 、 M_y 和 M_z 为测量轴方向向量 C_x 、 C_y 和 C_z 与地磁矢量夹角的余弦值。

1.4 旋转方程的特点

当传感器绕旋转轴转动时,三轴倾角传感器与三轴磁北传感器任意两路输出信号在对应二维平面内均形成椭圆轨迹,且各轨迹之间存在确定的关联关系,如图3所示。

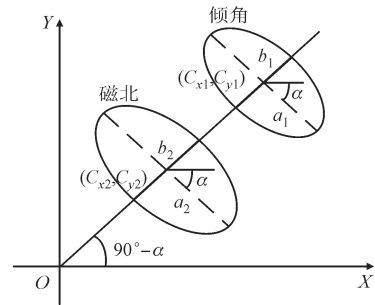


图3 输出轨迹示意图

Fig. 3 Output trajectory schematic

倾角传感器对应的椭圆几何参数:中心点 (C_{x1}, C_{y1}) 为 $(\sin \alpha \cos \gamma \sin \beta, \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta)$;长半轴为 $a_1 = |\cos \beta|$;短半轴为 $b_1 = |\cos \beta \sin \gamma|$;离心率为 $e_1 = |\cos \gamma|$;长轴倾角为 $\varphi_1 = -\alpha$ 。

磁北传感器对应的椭圆几何参数:中心点 (C_{x2}, C_{y2}) 为 $(\sin \alpha \cos \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi + \sin \alpha \sin \beta \sin \psi \cos \varphi, \cos \alpha \cos \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi + \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta \sin \psi)$;长半轴 $a_2 =$

$\sqrt{\cos^2 \psi \sin^2 \varphi + (\sin \beta \cos \psi \cos \varphi - \cos \beta \sin \psi)^2}$;
短半轴 $b_2 = |a_2 \sin \gamma|$;离心率为 $e_2 = |\cos \gamma|$;长轴
倾角为 $\varphi_2 = -\alpha$ 。

两个椭圆中心与原点连线共线,且具有相同的离心率和长轴倾角。其长半轴等于旋转轴与对应参考矢量夹角的正弦值,其中倾角传感器的参考矢量为重力矢量,磁北传感器的参考矢量为地磁场矢量。因此,旋转轴与参考矢量的夹角越大,对应椭圆越大;夹角越小,对应椭圆越小。

1.5 不同传感器的测量盲区

当 $\beta=90^\circ$ 时,倾角传感器的输出表达式为

$$\begin{cases} I_x = \sin \alpha \cos \gamma \\ I_y = \cos \alpha \cos \gamma \\ I_z = -\sin \gamma \end{cases} \quad (3)$$

分析式(3)可知,在该条件下,三轴倾角传感器的输出表达式均不含旋转角度 θ ,其取值仅由空间位置参数决定。因此,倾角传感器在此情况下无法感知旋转运动,对空间旋转角度 θ 存在测量盲区。

当 $\varphi=0^\circ$ 且 $\beta=\psi$ 时,磁北传感器的输出表达式为

$$\begin{cases} M_x = \sin \alpha \cos \gamma \\ M_y = \cos \alpha \cos \gamma \\ M_z = -\sin \gamma \end{cases} \quad (4)$$

分析式(4)可知,在该条件下,三轴磁北传感器的输出表达式中同样不含旋转角度 θ ,其取值由空间位置参数决定。因此,磁北传感器在此情况下对空间旋转角度 θ 亦存在测量盲区。

一般情况下,倾角传感器与磁北传感器的测量盲区并不重合,因此二者在空间旋转角度测量中具有明显的互补特性。

2 多传感器融合的旋转角度测量方法

2.1 空间旋转角度解算方程

对于倾角传感器,由式(1)通过变换后可以获得如下线性方程

$$m_1 I_x + n_1 I_y + p_1 = I_z \quad (5)$$

式中: $m_1 = \sin \alpha / \tan \gamma$; $n_1 = \cos \alpha / \tan \gamma$; $p_1 = -\sin \beta / \sin \gamma$ 。

将不同位置 i 下测得的三轴倾角传感器输出 I_{xi} 、 I_{yi} 和 I_{zi} 代入式(5)进行线性拟合,求得空间位置参数 α 、 β 、 γ 的拟合值。在此基础上,由式(1)进一步推导出倾角传感器旋转角度的解算公式,从而实现各位置 i 旋转角度 θ_i 的计算式为

$$\sin \theta_i = \frac{I_{yi} \sin \alpha - I_{xi} \cos \alpha}{\cos \beta} \quad (6)$$

$$\cos \theta_i = \frac{I_{xi} \sin \alpha + I_{yi} \cos \alpha - \cos \gamma \sin \beta}{\sin \gamma \cos \beta} \quad (7)$$

$$\cos \theta_i = \frac{I_{zi} + \sin \gamma \sin \beta}{\cos \gamma \cos \beta} \quad (8)$$

类似地,对于磁北传感器,由式(2)通过变换后可以获得如下线性方程

$$m_2 M_x + n_2 M_y + p_2 = M_z \quad (9)$$

式中: $m_2 = \sin \alpha / \tan \gamma$; $n_2 = \cos \alpha / \tan \gamma$; $p_2 = -(\sin \beta \sin \psi + \cos \beta \cos \psi \cos \varphi) / \sin \gamma$ 。

对式(9)进行线性拟合,可求得空间位置参数 α 、 β 、 γ 、 φ 的拟合值。在此基础上,可由下列磁北传感器解算公式计算各位置的旋转角度 θ_i

$$M_{xi} \cos \alpha - M_{yi} \sin \alpha = \cos \psi \sin \varphi \cos \theta + (\sin \beta \cos \psi \cos \varphi - \cos \beta \sin \psi) \sin \theta \quad (10)$$

$$M_{xi} \cos \alpha + M_{yi} \sin \alpha = \cos \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi + \cos \gamma \sin \beta \sin \psi + (-\sin \gamma \sin \beta \cos \psi \cos \varphi + \sin \gamma \cos \beta \sin \psi) \cos \theta + \sin \gamma \cos \psi \sin \varphi \sin \theta \quad (11)$$

$$M_{zi} = -\sin \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi - \sin \gamma \sin \beta \sin \psi + (-\cos \gamma \sin \beta \cos \psi \cos \varphi + \cos \gamma \cos \beta \sin \psi) \cos \theta + \cos \gamma \cos \psi \sin \varphi \sin \theta \quad (12)$$

位置参数拟合均采用最小二乘法,其基本思想是最小化残差平方和。在此基础上,可进一步求得拟合参数的协方差矩阵,并据此得到各参数估计值的标准差,以表征位置参数的估计精度。进一步对空间旋转角度解算公式进行偏导分析,可建立旋转角度求解的合成误差表达式,从而完成合成误差计算。

对倾角传感器角度解算式(6)~(8)求偏导,可得其合成误差公式如下

$$\delta_1 = \sqrt{k_{11}^2 \delta_\alpha^2 + k_{12}^2 \delta_\beta^2} \quad (13)$$

$$\delta_2 = \sqrt{k_{21}^2 \delta_\alpha^2 + k_{22}^2 \delta_\beta^2 + k_{23}^2 \delta_\gamma^2} \quad (14)$$

$$\delta_3 = \sqrt{k_{31}^2 \delta_\alpha^2 + k_{32}^2 \delta_\gamma^2} \quad (15)$$

对磁北传感器角度解算式(10)~(12)求偏导,可得其合成误差公式如下

$$\delta_4 = \sqrt{k_{41}^2 \delta_\alpha^2 + k_{42}^2 \delta_\beta^2 + k_{43}^2 \delta_\varphi^2} \quad (16)$$

$$\delta_5 = \sqrt{k_{51}^2 \delta_\alpha^2 + k_{52}^2 \delta_\beta^2 + k_{53}^2 \delta_\gamma^2 + k_{54}^2 \delta_\varphi^2} \quad (17)$$

$$\delta_6 = \sqrt{k_{61}^2 \delta_\beta^2 + k_{62}^2 \delta_\gamma^2 + k_{63}^2 \delta_\varphi^2} \quad (18)$$

式中: k_{ij} 为相应角度解算公式中各位置参数相应的误差传播系数,其详细说明见附录 A; δ_α 、 δ_β 、 δ_γ 、 δ_φ 分别为各位置参数估计值的标准差。

式(13)~(18)表明,空间旋转角度的合成误差由各位置参数的取值及其标准差共同决定。

2.2 各位置参数对合成误差的影响因素

为揭示各位置参数对旋转角度测量精度的影响规律,基于合成误差式(13)~(18),分别讨论 α 、 γ 、 β 在合成误差中的作用及其变化特征,为后续解算传感器及公式的选择提供理论依据。 φ 为磁北传感器特有参数,且与 β 存在紧密耦合关系,故本文不再单独讨论其影响。为表征各解算公式的合成误差分布规律,依据合成误差公式分别绘制倾角传感器与磁北传感器在全角度范围内的理论合成误差曲线,如图4、图5所示。

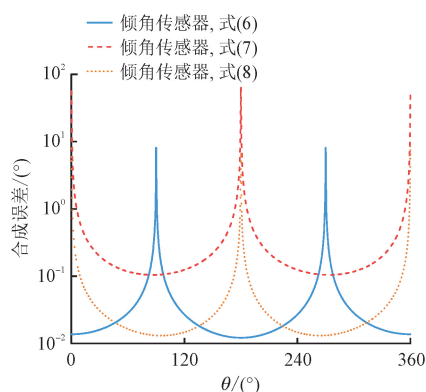


图4 倾角传感器公式合成误差

Fig. 4 Composite error curves for tilt sensor formulas

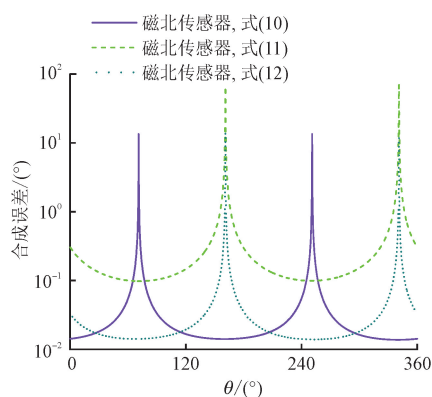


图5 磁北传感器公式合成误差

Fig. 5 Composite error curves for geomagnetic field sensor formulas

由图4和图5可知,同一传感器的不同解算公式在各角度区间内的合成误差特征存在明显差异,其奇异位置与优势区间具有互补性;同时,不同传感器的适用范围也不相同。因此,应根据测量需求合理选择传感器,并按角度区间匹配最优解算公式,以提高全空间角度测量的精度与稳定性。

首先分析 α 对合成误差的影响。由合成误差式

(13)~(18)可知,两类传感器合成误差表达式中均不含 α ,因此 α 的变化不影响旋转角度计算的理论合成误差,说明 α 为非敏感参数。

其次分析 γ 对合成误差的影响。对于倾角传感器,合成误差式(14)中含有 $1/\sin \gamma$ 项,导致当 γ 接近 0° 时,合成误差显著增大;式(15)中含有 $\tan \gamma$ 项,导致当 γ 接近 90° 时,合成误差明显增大。对于磁北传感器,式(17)中同样含有 $1/\sin \gamma$ 项,式(18)中同样含有 $\tan \gamma$ 项,因此也表现出相同的误差变化规律。因此, γ 会显著影响不同解算公式的适用范围,是公式选择的敏感参数。综合工程应用需求,当 $\gamma \leq 45^\circ$ 时,倾角传感器舍去角度解算式(7),采用式(6)和式(8)进行互补解算;磁北传感器采用式(10)和式(12)进行互补解算。当 $\gamma > 45^\circ$ 时,倾角传感器采用式(6)和式(7),磁北传感器采用式(10)和式(11)。

最后分析 β 对合成误差的影响。对于倾角传感器,合成误差式(13)~(15)中均含有 $\tan \beta$ 项,因此随着 β 增大,合成误差呈明显上升趋势。当 β 接近 0° 时,合成误差较小,而接近 90° 时误差增长尤为显著。相比之下,磁北传感器合成误差式(16)~(18)中 β 的作用关系相对复杂,但在 β 接近 90° 时并未表现出与倾角传感器相同的误差放大特征。因此, β 是传感器选择的关键参数:当 β 较小时,应选择倾角传感器及其公式进行解算;当 β 较大时,应选择磁北传感器及其公式进行解算。

2.3 最小合成误差法

旋转角度 θ 的解算可按以下步骤进行。

(1)位置参数拟合。将获取的倾角传感器数据与磁北传感器数据分别代入式(5)与式(9),采用最小二乘法进行拟合,求得各位置参数 α 、 β 、 γ 、 φ 的拟合值及其对应的标准差 δ_α 、 δ_β 、 δ_γ 、 δ_φ 。

(2)传感器与解算公式选择。依据 γ 的大小,在预设公式组(式(6)、式(8)、式(10)、式(12),或式(6)、式(7)、式(10)、式(11))中选取候选公式。将位置参数拟合值及其标准差代入相应的合成误差公式,通过比较各候选公式对应的合成误差,并以最小合成误差为准则,确定解算传感器及解算公式。

(3)旋转角度的解算。根据步骤(2)确定的解算传感器及公式,将传感器数据代入相应公式,完成旋转角度 θ 的解算,从而获得最终的高精度测量结果。

3 实验验证与误差分析

为了验证所提方法的正确性及测量性能,设计了多传感器融合的空间旋转角度测量模块,并采用

高精度 HV-6 旋转分度盘(精度为 0.02°)搭建实验平台进行测试,如图 6 所示。



图 6 旋转实验平台

Fig. 6 Rotary experiment platform

采用控制变量法对位置参数 α 、 β 、 γ 分别进行测试,以验证各参数对合成误差的影响规律及解算策略的有效性。

3.1 参数 α 的实验测试

在保持 β 、 γ 不变的条件下,取 α 为 0° 、 150° 和 300° 进行旋转实验。实验过程中,每 12° 记录一次数据,共计 31 个点,直至完成 360° 旋转,将数据代入解算方法,计算各点的测量误差,误差结果(最大误差绝对值和均方根误差)如表 1 所示。

表 1 参数 α 对旋转角度误差的影响

Table 1 Influence of parameter α on rotation angle error

$\alpha/(^\circ)$	倾角传感器		磁北传感器	
	最大 误差/ $(^\circ)$	均方根 误差/ $(^\circ)$	最大 误差/ $(^\circ)$	均方根 误差/ $(^\circ)$
0	0.05	0.02	0.08	0.04
150	0.05	0.02	0.08	0.04
300	0.05	0.02	0.08	0.04

实验结果表明, α 的变化对测量结果影响不显著,与理论分析中 α 不影响合成误差的结论一致。

3.2 参数 γ 的实验测试

在保持 α 、 β 不变的条件下,取 γ 为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 和 75° 进行旋转测试。获得实验数据后,采用倾角传感器角度解算式(7)和式(8),以及磁北传感器角度解算式(11)和式(12)进行解算,误差处理结果如图 7 所示。

实验结果表明,随着参数 γ 增大,式(7)和式(11)的测量误差呈减小趋势,而式(8)和式(12)的测量误差呈增大趋势。当 $\gamma < 45^\circ$ 时,倾角传感器采用式(8)的测量误差更小,磁北传感器采用式(12)的测量误差更小;当 $\gamma = 45^\circ$ 时,式(7)与式(8)的测量误

差相等,式(11)与式(12)的测量误差也相等;当 $\gamma > 45^\circ$ 时,倾角传感器采用式(7)的测量误差更小,磁北传感器采用式(11)的测量误差更小。两类传感器的实验结果均与理论分析一致,验证了参数 γ 分段选式策略的有效性。

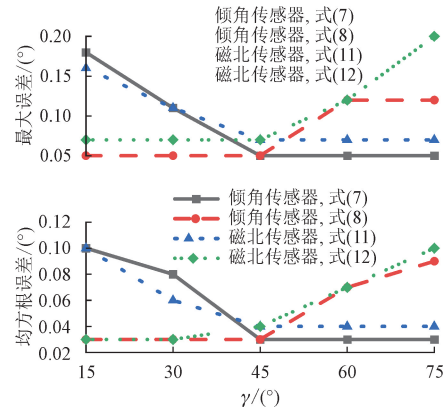


图 7 参数 γ 对公式选择的影响

Fig. 7 Influence of parameter γ on formula selection

3.3 参数 β 的实验测试

在保持 α 、 γ 不变的条件下,取 β 为 0° 、 30° 、 60° 、 64° 、 70° 、 80° 和 90° 进行旋转测试。将实验数据分别代入倾角传感器与磁北传感器对应的解算公式,测量误差结果如图 8 所示。

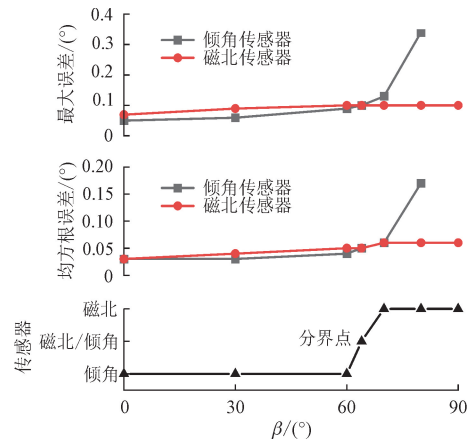


图 8 参数 β 对传感器误差及选择的影响

Fig. 8 Influence of parameter β on sensor errors and selection

实验结果表明,随着 β 增大,倾角传感器测量误差显著增大,而磁北传感器测量误差变化较为平缓,系统最优解算传感器由倾角传感器切换为磁北传感器,与理论分析结果一致。这证明 β 是影响传感器选择的关键参数。基于最小合成误差准则进行传感器自适应选择,可在不同 β 条件下选取最优数据源及解算公式,从而有效降低测量误差、提高测量精度。

4 结 论

本文针对三轴倾角传感器在空间旋转角度测量中存在的局限性,提出了一种融合三轴倾角传感器与三轴磁北传感器的空间旋转角度解算方法。在三轴倾角传感器空间旋转模型的基础上,进一步构建了三轴磁北传感器空间旋转模型,推导了其输出与旋转角度之间的解析关系。在此基础上,提出最小合成误差准则,可根据位置参数的实际取值自适应选择最优解算传感器及对应解算公式,从而综合利用不同传感器在不同工况下的性能优势,提高系统整体测量精度。本文得到的主要结论如下。

(1)通过建立三轴磁北传感器的空间旋转角度测量模型,推导了其输出与旋转角度的解析关系,从而有效解决了倾角传感器在旋转轴垂直方向上的测量盲区问题。

(2)提出了基于最小合成误差准则的自适应融合策略,明确了位置参数 β 、 γ 对传感器选择和解算公式选择的影响规律,实现了解算传感器及解算公式的自适应最优匹配。

(3)实验结果验证了所提方法的正确性与有效性。在本文实验条件下,所构建的融合测量系统可实现旋转轴任意取向、旋转范围 360° 的空间旋转角度测量,测量误差控制在 0.2° 以内,表明该方法能够为全方位空间旋转角度测量提供一种有效途径。

参考文献:

- [1] Yang Quanfa, Ye Guirong, Li Changyou. Research on measurement method of rotational angle of plane rudder based on ADXL345 sensor [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556-562: 3124-3128.
- [2] 高涛, 刘建, 杨钰. 飞机襟翼收放角度检查系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(7): 959-961.
Gao Tao, Liu Jian, Yang Yu. Design of test system the moved angle of flight flap [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(7): 959-961.
- [3] 柴东波, 郭晓冬, 杨东涛. 飞机强度试验舵面偏角测量方法的研究 [J]. 工程与试验, 2021, 61(1): 17-18.
Chai Dongbo, Guo Xiaodong, Yang Dongtao. Research on measuring method for deflection angle of flight control surface in aircraft strength test [J]. Engineering & Test, 2021, 61(1): 17-18.
- [4] Zhou Xuyang, Chen Long, Sun Changhao, et al. Highly accurate attitude estimation of unmanned aerial vehicle payloads using low-cost MEMS [J]. Micromachines, 2025, 16(6): 632.
- [5] 吴金坤, 李忠国, 席茜, 等. 基于单目视觉的角度测量方法 [J]. 计算机与数字工程, 2025, 53(6): 1697-1703.
Wu Jinkun, Li Zhongguo, Xi Qian, et al. Angle measurement method based on monocular vision [J]. Computer & Digital Engineering, 2025, 53(6): 1697-1703.
- [6] 吴常铨, 杨德华, 曹青青, 等. 基于视觉和最大长度序列的旋转角度测量系统 [J]. 中国测试, 2022, 48(1): 122-128.
Wu Changcheng, Yang Dehua, Cao Qingqing, et al. Rotation angle measurement system based on visual and maximum length sequence [J]. China Measurement & Test, 2022, 48(1): 122-128.
- [7] 牛浩然. 基于惯性测量单元的飞机舵面偏角外部测量方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [8] 王海, 张舵, 何月洲. 非水平定轴活动翼面偏角测量方法研究 [J]. 工程与试验, 2019, 59(3): 85-86.
Wang Hai, Zhang Tuo, He Yuezhou. Research on measuring method of deflection angle of moving wing with non-horizontal fixed axis [J]. Engineering & Test, 2019, 59(3): 85-86.
- [9] 朱鑫. 空间全方位旋转角度测量方法的研究及工程实现 [D]. 西安: 西安交通大学, 2017.
- [10] 单丹丹. 基于双目视觉的飞机舵面偏角测量技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [11] 牟成铭, 叶丁绮, 罗川. 基于双目视觉的飞机舵面偏角测量研究 [J]. 测控技术, 2020, 39(8): 123-128.
Mou Chengming, Ye Dingqi, Luo Chuan. Deflection angle measurement of aircraft rudder based on binocular vision [J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(8): 123-128.
- [12] 张展. 基于双目视觉的三维重建关键技术研究 [D]. 沈阳: 中国科学院沈阳计算技术研究所, 2019.
- [13] 罗桂娥. 双目立体视觉深度感知与三维重建若干问题研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [14] 何森, 王志斌. 一种单目视觉标定飞机方向舵角位移的新方法 [J]. 兵工学报, 2011, 32(11): 1384-1388.
He Sen, Wang Zhibin. A new method for calibration of rudder angular displacement sensor based on monocular vision [J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(11): 1384-1388.
- [15] El-Diasty M, El-Rabbany A, Pagiatakis S. Temperature variation effects on stochastic characteristics for low-cost MEMS-based inertial sensor error [J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(11): 3321-3328.
- [16] 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.
- [17] Wang Yanzhe, Yang Feng, Shan Dandan, et al. Robust vision-based method for wing deflection angle measurement with defocus images [J]. Measurement, 2022, 189: 110501.
- [18] 陈艺豪, 刘洁瑜, 汪立新, 等. 微机电系统惯性测量单元阵列技术研究进展 [J]. 压电与声光, 2025, 47(3): 422-430.
- Chen Yihao, Liu Jieyu, Wang Lixin, et al. Progress in inertial measurement unit arrays in microelectromechanical systems [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2025, 47(3): 422-430.
- [19] 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.
- [20] 曹建安, 朱鑫, 吴昊, 等. 一种改进的空间全方位旋转变角测量方法 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(10): 1-7.
- Cao Jian'an, Zhu Xin, Wu Hao, et al. An improved method for measurement of omni-directional spatial rotation angles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(10): 1-7.
- [21] Cao Jian'an, Zhu Xin, Wu Hao, et al. A novel method of measuring spatial rotation angle using MEMS tilt sensors [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(10): 105907.
- [22] 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: CN201210279400. 1 [P]. 2012-12-05.
- [23] 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.
- [24] 程凌频. 基于倾角传感器的舵面偏转角度测量方法 [J]. 信息与电脑, 2015(13): 25-26.
- Cheng Lingpin. Deflection angle measurement method of control surface based on tilt sensor [J]. China Computer & Communication, 2015(13): 25-26.
- [25] 张乐平. 全方位空间旋转角度测量技术研究及其应用 [D]. 西安: 西安交通大学, 2014.

(编辑 杜秀杰)

附录 A

$$k_{11} = \cos \gamma \tan \beta / \cos \theta + \sin \gamma$$

$$k_{12} = \tan \beta \tan \theta$$

$$k_{21} = 1 / \sin \gamma$$

$$k_{22} = \cot \gamma / \sin \theta - \tan \beta \cot \theta$$

$$k_{23} = -\tan \beta / \sin \theta + \cot \gamma \cot \theta$$

$$k_{31} = -\tan \gamma / \sin \theta - \tan \beta \cot \theta$$

$$k_{32} = -\tan \beta / \sin \theta - \tan \gamma \cot \theta$$

$$k_{41} = -(\cos \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi + \cos \gamma \sin \beta \sin \psi) / d_4 + \sin \gamma$$

$$k_{42} = -(\cos \beta \cos \psi \cos \varphi + \sin \beta \sin \psi) \sin \theta / d_4$$

$$k_{43} = (\sin \beta \cos \psi \sin \varphi \sin \theta - \cos \psi \cos \varphi \cos \theta) / d_4$$

$$d_4 = (\sin \beta \cos \psi \cos \varphi - \cos \beta \sin \psi) \cos \theta - \cos \psi \sin \varphi \sin \theta$$

$$k_{51} = 1 / \sin \gamma$$

$$k_{52} = (\cos \gamma \sin \beta \cos \psi \cos \varphi - \cos \gamma \cos \beta \sin \psi + \sin \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi \cos \theta + \sin \gamma \sin \beta \sin \psi \cos \theta) / d_5$$

$$k_{53} = (\sin \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi + \sin \gamma \sin \beta \sin \psi + \cos \gamma \sin \beta \cos \psi \cos \varphi \cos \theta - \cos \gamma \cos \beta \sin \psi \cos \theta - \cos \gamma \cos \psi \sin \varphi \sin \theta) / d_5$$

$$k_{54} = (\cos \gamma \cos \beta \cos \psi \sin \varphi - \sin \gamma \sin \beta \cos \psi \sin \varphi \cos \theta - \sin \gamma \cos \psi \cos \varphi \sin \theta) / d_5$$

$$d_5 = \sin \gamma \cos \psi \sin \varphi \cos \theta + \sin \gamma \sin \beta \cos \psi \cos \varphi \sin \theta - \sin \gamma \cos \beta \sin \psi \sin \theta$$

$$k_{61} = (-\sin \gamma \sin \beta \cos \psi \cos \varphi + \sin \gamma \cos \beta \sin \psi + \cos \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi \cos \theta + \cos \gamma \sin \beta \sin \psi \cos \theta) / d_6$$

$$k_{62} = (\cos \gamma \cos \beta \cos \psi \cos \varphi + \cos \gamma \sin \beta \sin \psi - \sin \gamma \sin \beta \cos \psi \cos \varphi \cos \theta + \sin \gamma \cos \beta \sin \psi \cos \theta + \sin \gamma \cos \psi \sin \varphi \sin \theta) / d_6$$

$$k_{63} = (-\sin \gamma \cos \beta \cos \psi \sin \varphi - \cos \gamma \sin \beta \cos \psi \sin \varphi \cos \theta - \cos \gamma \cos \psi \cos \varphi \sin \theta) / d_6$$

$$d_6 = \cos \gamma \cos \psi \sin \varphi \cos \theta + \cos \gamma \sin \beta \cos \psi \cos \varphi \sin \theta - \cos \gamma \cos \beta \sin \psi \sin \theta$$