

引用格式:胡华峰,刘明,李旦,等.一种用于旋转式惯导自对准的内杆臂标定方法[J].电光与控制,2020,27(2):60-63,102. HU H F, LIU M, LI D, et al. An inner lever-arm calibration method for self-alignment of rotating IMU[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(2):60-63, 102.

一种用于旋转式惯导自对准的内杆臂标定方法

胡华峰, 刘明, 李旦, 施丽娟
(湖北航天技术研究院总体设计所, 武汉 430040)

摘要: 旋转式惯导敏感点与载体坐标系原点不重合, 自对准过程中存在角运动, 从而引入杆臂效应误差。根据杆臂效应误差模型分析了旋转式惯导内杆臂对自对准的影响, 针对这一问题提出了一种结合自对准流程的杆臂标定方法。该方案无需额外的标定流程, 能方便地进行工程应用。测试试验结果表明, 该方案能准确地标定出旋转式惯导的内杆臂, 标定精度为 1.1 mm; 杆臂补偿后能明显提升自对准精度, 方位对准精度提高了 35%。

关键词: 惯性导航系统; 旋转式惯导; 自对准; 杆臂效应; 标定

中图分类号: V249.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.02.013

An Inner Lever-Arm Calibration Method for Self-Alignment of Rotating IMU

HU Huafeng, LIU Ming, LI Dan, SHI Lijuan
(Overall Designing Institute of Hubei Space Technology Academy, Wuhan 430040, China)

Abstract: The sensitive point of the rotating IMU does not coincide with the origin of the aircraft body coordinate system, there is angular motion in the process of the self-alignment, thus the lever-arm effect error is introduced. In this paper, analysis is made to the influence of rotating inertial navigation inner arm on the self-alignment according to the lever-arm effect error model. In order to solve the problem, a method of arm calibration combined with self-alignment process is proposed. The method does not need additional calibration process, and can be easily implemented in engineering applications. The test results show that: 1) The method can accurately calibrate the inner arm of rotating IMU, with the calibration accuracy of 1.1 mm; and 2) After the compensation of the arm, the self-alignment accuracy can be significantly improved, and the azimuth alignment accuracy is improved by 35%.

Key words: INS; rotating IMU; self-alignment; lever-arm effect; calibration

0 引言

由于惯性导航系统(INS)具有高度的自主性、隐蔽性以及信息完备性等特点,所以随着国民经济建设与国防建设的发展,惯性导航系统在陆海空天各个领域获得了大量应用。捷联惯性导航系统以其体积小、质量轻、成本低、结构简单、可靠性高等特点,已成为惯性导航系统发展的主流,但是捷联惯性导航系统的缺点同样明显,其误差随时间积累,且需要定期进行标定维护^[1]。

近年来,旋转式惯导成为一个研究热点^[2-3],该类

型惯导在传统捷联惯导的基础上引入转位机构,通过控制转位机构使惯性测量单元(IMU)连续地、周期地、有规律地旋转,使惯性器件误差在短周期内的均值尽量接近于零,以此来减小系统长时间的积累误差,达到提高系统精度的目的,旋转式惯导通常具有“自标定”、“自对准”和“自检测”的功能,使用维护方便,因此得到了较为广泛的应用^[4-5]。

影响旋转惯导导航对准精度的因素有很多,其中包括杆臂效应误差^[6-7],在实际应用中受本身体积和安装位置的限制,IMU的测量敏感点不可能与载体系原点重合,而是有一定的距离,称为杆臂。在进行自对准转动过程中,不同杆臂处的加速度值是不同的,进行旋转调制自对准将带来附加的加速度,从而影响导航解算,最终影响自对准结果,称为杆臂效应误差。因此必须对杆臂效应进行处理,以削弱或消除其所带来的

收稿日期:2019-03-06

修回日期:2019-03-28

基金项目:武器装备“十三五”预研项目(30401020402)

作者简介:胡华峰(1986—),男,湖北宜昌人,硕士,工程师,研究方向为惯性技术研究。

影响。

目前,处理杆臂效应的方法主要有动力学补偿法和低通滤波器法^[8]。低通滤波器法利用杆臂产生的干扰加速度(其频率取决于晃动干扰频率)与惯导解算中的舒拉周期(2×10^{-4} Hz)和地球自转周期(1×10^{-5} Hz)属于不同频段,杆臂效应产生的干扰加速度相对高频,采用低通滤波器滤除干扰加速度。该方法无需知道杆长度,使用方便,但为保证信号不丢失,通常需要采用较高的阶数,会产生较长时间的延时,且计算量大,需要较多的存储空间,因此,若能准确地获得杆臂长度,利用陀螺获得的载体角速度和角加速度信息便可以直接进行杆臂效应动力学补偿。

实际中,杆臂值的获取方法主要有3种:一种是利用结构模型测量,即通过结构设计模型测量各器件的杆臂,但这要求结构清晰或一体化设计且安装位置固定,否则很难测量;另一种是将杆臂长度扩充入状态向量用卡尔曼滤波实时求取,但这种方法会加大计算量,且要求杆臂长度相关的状态量具有较好的可观测性,否则很难准确估计;最后一种是利用一定的标定算法对杆臂值进行事先标定。

本文针对旋转式惯导内杆臂对自对准精度影响的问题,提出一种利用旋转调制自对准过程中转位机构匀速和加速原始数据进行杆臂参数标定的方法。

1 杆臂效应误差模型

在旋转式惯导系统中,加速度计与本体固连,并分布在本体坐标系 B 系内不同的空间位置上,其测量的比力均是各自位置上的值,当本体绕转位机构转动时,需要考虑它们相对本体系坐标原点的位置关系对导航参数的影响,设 P 点为某个加速度计的测量点,动坐标系为 B 系,定坐标系为 I 系,如图1所示,则 B 系原点 O_B 至 P 点的矢量 $r_{O_B P}$ 即为杆臂 r 。

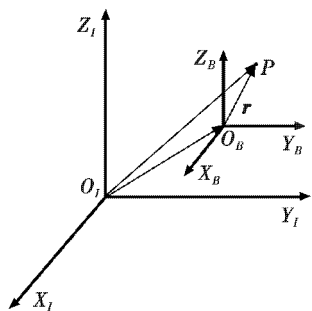


图1 杆臂效应示意图

Fig. 1 Diagram of lever-arm effect

测量点位置与 B 系原点位置的关系为

$$r_{O_I P} = r_{O_I O_B} + r_{O_B P} = r_{O_I O_B} + r \quad (1)$$

式中: $r_{O_I P}$ 表示质点 P 在定坐标系 I 中的位置矢量; $r_{O_I O_B}$

表示 B 系原点在 I 系中的位置矢量。

对式(1)等号两边相对 I 系求导,并利用科氏定理有

$$\frac{dr_{O_I P}}{dt} \Big|_I = \frac{dr_{O_I O_B}}{dt} \Big|_I + \frac{dr}{dt} \Big|_I = \frac{dr_{O_I O_B}}{dt} \Big|_I + \frac{dr}{dt} \Big|_B + \omega_{IB} \times r \quad (2)$$

式中: $\frac{dr}{dt} \Big|_I$ 表示矢量 r 在 I 系下观测的变化率; ω_{IB} 表示 B 系相对 I 系的旋转角速度矢量。

式(2)即为速度合成定理,对等号两边相对 I 坐标系再次求导得

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r_{O_I P}}{dt^2} \Big|_I &= \frac{d^2 r_{O_I O_B}}{dt^2} \Big|_I + \frac{d}{dt} \left(\frac{dr}{dt} \Big|_B \right) \Big|_I + \frac{d(\omega_{IB} \times r)}{dt} \Big|_I = \\ &= \frac{d^2 r_{O_I O_B}}{dt^2} \Big|_I + \frac{d^2 r}{dt^2} \Big|_B + 2\omega_{IB} \times \frac{dr}{dt} \Big|_B + \frac{d\omega_{IB}}{dt} \Big|_I \times r + \\ &\quad \omega_{IB} \times (\omega_{IB} \times r) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)即为加速度合成定理,可记为

$$a_A = a_R + a_C + a_E \quad (4)$$

式中,

$$\begin{cases} a_A = \frac{d^2 r_{O_I P}}{dt^2} \Big|_I \\ a_R = \frac{d^2 r}{dt^2} \Big|_B \\ a_C = 2\omega_{IB} \times \frac{dr}{dt} \Big|_B \\ a_E = \frac{d\omega_{IB}}{dt} \Big|_I \times r + \omega_{IB} \times (\omega_{IB} \times r) + \frac{d^2 r_{O_I O_B}}{dt^2} \Big|_I \end{cases} \quad (5)$$

a_A 为绝对加速度矢量, a_R 为相对加速度矢量, a_C 为科氏加速度矢量(由牵连转动和相对运动相互影响所产生), a_E 为牵连加速度矢量。

此外,加速度计相对 B 系固连,在不考虑结构变形的情况下,杆臂 r 在 B 系中为常矢量,因此有

$$\frac{dr}{dt} \Big|_B = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d^2 r}{dt^2} \Big|_B = 0 \quad (7)$$

因此式(3)可以简化为

$$\frac{d^2 r_{O_I P}}{dt^2} \Big|_I = \frac{d^2 r_{O_I O_B}}{dt^2} \Big|_I + \frac{d\omega_{IB}}{dt} \Big|_I \times r + \omega_{IB} \times (\omega_{IB} \times r) \quad (8)$$

式(8)即加速度计测量点加速度矢量与 B 系原点加速度矢量之间的关系,进一步可以表示为

$$\frac{d^2 r}{dt^2} \Big|_I = \frac{d\omega_{IB}}{dt} \Big|_I \times r + \omega_{IB} \times (\omega_{IB} \times r) \quad (9)$$

式(9)即为杆臂效应的通用公式,其中等号右边第一项为切向加速度矢量,第二项为向心加速度矢量。

因此,在 B 系下因杆臂效应产生的加速度计误差为

$$\delta f^B = f_p^B - f_{o_s}^B = \left(\frac{d^2 r}{dt^2} \Big|_i \right)^B = \omega_{IB}^B \times (\omega_{IB}^B \times r^B) + \dot{\omega}_{IB}^B \times r^B \quad (10)$$

式中: f_p^B 表示测量点处的比力矢量; $f_{o_s}^B$ 表示 B 系原点的比力矢量; ω_{IB}^B 为惯性坐标系相对于本体坐标系的角速度矢量; $\dot{\omega}_{IB}^B$ 为角加速度矢量; r^B 为测量点相对于本体坐

标系的位置矢量; $\dot{\omega}_{IB}^B \times r^B$ 表示切向加速度误差; $\omega_{IB}^B \times (\omega_{IB}^B \times r^B)$ 表示法向加速度误差。

令 $\omega_{IB}^B = [\omega_{IBx}^B \ \omega_{IBy}^B \ \omega_{IBz}^B]^T$, 根据向量叉乘原理, 可以展开为

$$\delta f^B = \begin{bmatrix} -((\omega_{IBy}^B)^2 + (\omega_{IBz}^B)^2) & \omega_{IBx}^B \omega_{IBy}^B - \dot{\omega}_{IBz}^B & \omega_{IBx}^B \omega_{IBz}^B + \dot{\omega}_{IBy}^B \\ \omega_{IBx}^B \omega_{IBy}^B + \dot{\omega}_{IBz}^B & -((\omega_{IBx}^B)^2 + (\omega_{IBz}^B)^2) & \omega_{IBy}^B \omega_{IBz}^B - \dot{\omega}_{IBx}^B \\ \omega_{IBx}^B \omega_{IBz}^B - \dot{\omega}_{IBy}^B & \omega_{IBy}^B \omega_{IBz}^B + \dot{\omega}_{IBx}^B & -((\omega_{IBx}^B)^2 + (\omega_{IBy}^B)^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x^B \\ r_y^B \\ r_z^B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\omega_{IBy}^B)^2 + (\omega_{IBx}^B)^2 \\ (\omega_{IBx}^B)^2 + (\omega_{IBz}^B)^2 \\ (\omega_{IBy}^B)^2 + (\omega_{IBz}^B)^2 \end{bmatrix} r_{zz}^B \quad (11)$$

2 旋转式惯导自对准用内杆臂标定方法

在旋转式惯导系统中, 正交安装了 3 个加速度计, 如图 2 所示。

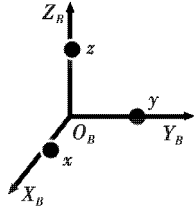


图2 加速度计安装位置示意图

Fig. 2 Fixed locations of the accelerometer

旋转式惯导的杆臂参数定义为 3 个加速度计测量点相对 B 系原点的位置矢量, 在 B 系下的投影为

$$r_x^B = [r_{xx}^B \ r_{xy}^B \ r_{xz}^B]^T \quad (12)$$

$$r_y^B = [r_{yx}^B \ r_{yy}^B \ r_{yz}^B]^T \quad (13)$$

$$r_z^B = [r_{zx}^B \ r_{zy}^B \ r_{zz}^B]^T \quad (14)$$

式中, r_x^B 表示 x 加速度计杆臂在 B 系中的投影。

从式(11)可以看出, δf_x^B 除了受 x 加速度计杆臂影响外, 还存在因加速度计非正交安装引入的误差分量, 考虑设计时均采用正交安装方式, 非正交安装的误差角控制在 $20'$ 以内, x 加速度计敏感轴单位矢量

在载体坐标系中的投影为 $u_x^B = \begin{bmatrix} \cos(20') \cos(20') \\ \sin(20') \cos(20') \\ \sin(20') \end{bmatrix}$

$\begin{bmatrix} 0.999966 \\ 0.0058 \\ 0.0058 \end{bmatrix}$ 。因此, 可以忽略由于非正交安装引入的

杆臂误差。将式(12)代入式(11)并展开有

$$\delta f_x^B = -((\omega_{IBy}^B)^2 + (\omega_{IBz}^B)^2) r_{xx}^B - (\dot{\omega}_{IBz}^B - \omega_{IBx}^B \omega_{IBy}^B) r_{xy}^B + (\dot{\omega}_{IBy}^B + \omega_{IBx}^B \omega_{IBz}^B) r_{xz}^B \quad (15)$$

同样可以获得

$$\delta f_y^B = (\dot{\omega}_{IBz}^B + \omega_{IBx}^B \omega_{IBy}^B) r_{yx}^B - ((\omega_{IBx}^B)^2 + (\omega_{IBz}^B)^2) r_{yy}^B - (\dot{\omega}_{IBx}^B - \omega_{IBy}^B \omega_{IBz}^B) r_{yz}^B \quad (16)$$

$$\delta f_z^B = -(\dot{\omega}_{IBy}^B - \omega_{IBx}^B \omega_{IBz}^B) r_{zx}^B + (\dot{\omega}_{IBx}^B + \omega_{IBz}^B \omega_{IBy}^B) r_{zy}^B -$$

旋转式惯导在进行自对准过程中, 主要绕天向轴 (B 系 z 轴) 转动^[9]。

在这个转动过程中, 忽略地球自转角速度的影响 (对 1 m 的杆臂地球自转角速度引起的杆臂效应误差仅 $0.05 \times 10^{-6} g$), 则有

$$\begin{cases} \omega_{IBx}^B \approx 0 & \dot{\omega}_{IBx}^B \approx 0 \\ \omega_{IBy}^B \approx 0 & \dot{\omega}_{IBy}^B \approx 0 \\ \omega_{IBz}^B = \omega & \dot{\omega}_{IBz}^B = \dot{\omega} \end{cases} \quad (18)$$

因此, 式(15)和式(16)可以简化为

$$\delta f_x^B = -(\omega_{IBz}^B)^2 r_{xx}^B - \dot{\omega}_{IBz}^B r_{xy}^B \quad (19)$$

$$\delta f_y^B = \dot{\omega}_{IBz}^B r_{yx}^B - (\omega_{IBz}^B)^2 r_{yy}^B$$

可以看出, 在旋转式惯导进行自对准过程中, 对加速度计影响较大的杆臂仅有 $r_{xx}^B, r_{xy}^B, r_{yx}^B$ 和 r_{yy}^B , 因此对于自对准而言仅需要对这 4 项参数进行标定。从式(19)可以看出, r_{xx}^B 仅与 ω_{IBz}^B 相关, 而 r_{xy}^B 仅与 $\dot{\omega}_{IBz}^B$ 相关, 由此可以利用自对准转动过程中的加速及匀速段对杆臂参数进行标定, 具体为: 先利用匀速段数据 ($\dot{\omega}_{IBz}^B = 0$) 标定 r_{xx}^B 和 r_{yy}^B , 然后利用加速和减速段标定 r_{xy}^B 和 r_{yx}^B 。由式(19)得杆臂标定算式为

$$\begin{cases} r_{xx}^B = -\frac{\delta f_x^B}{(\omega_{IBz}^B)^2} \\ r_{yy}^B = -\frac{\delta f_y^B}{(\omega_{IBz}^B)^2} \\ r_{xy}^B = -\frac{(\omega_{IBz}^B)^2 r_{xx}^B + \delta f_x^B}{\dot{\omega}_{IBz}^B} \\ r_{yx}^B = \frac{(\omega_{IBz}^B)^2 r_{yy}^B + \delta f_y^B}{\dot{\omega}_{IBz}^B} \end{cases} \quad (20)$$

式中, δf_x^B 和 δf_y^B 为加速计敏感的因杆臂效应产生的误差, 其矢量定义为

$$\delta f = \hat{f}^B - f^B \quad (21)$$

式中: \hat{f}^B 表示加速度计实际测量值; f^B 表示加速度计理想输出值, 其算式为

$$f^B = (C_B^L)^T f^L \quad (22)$$

式中, C_B^L 表示由 IMU 本体坐标系 (B 系) 到北东地地理坐标系 (L 系) 的姿态转换矩阵, 自对准过程可以保持较高的姿态精度。此外, 静态条件下有

$$f^L = -g^L \quad (23)$$

式中, $g^L = [0 \ 0 \ g]^T$, g 表示当地重力加速度。

3 试验结果与验证分析

为了验证该方案的实际应用效果, 对某成熟旋转式惯导和某型原理方案试验惯导的杆臂进行标定。对成熟旋转式惯导进行测试验证时, 将惯组 Z 轴朝上放置在试验室大理石平台上, 利用旋转式惯导的转位机构控制本体转动进行自对准测试, 自对准控制流程方案采用绕天向轴 (Z 轴) 转动 180° 的方案, 参考文献 [9] 中对准方案, 共进行 20 次自对准, 采集每次自对准过程中陀螺和加速计的输出, 利用卡尔曼滤波方法计算出杆臂标定所需要的 C_B^L 矩阵, 然后, 利用本文所述方法计算每次自对准过程估计出的杆臂值, 统计标定结果的稳定性 (3 倍标准差), 以此判断标定结果的稳定性, 结果如表 1 所示。

表 1 杆臂标定稳定性统计表

Table 1 Lever-arm calibration statistics

序号	r_{xx}^B/mm	r_{yy}^B/mm	r_{yx}^B/mm	r_{xy}^B/mm
1	35.5	45.4	-30.5	32.3
2	35.3	45.0	-30.7	32.6
3	35.4	45.2	-30.4	32.8
4	35.0	45.5	-31.0	32.8
5	34.9	45.3	-30.9	33.1
6	34.4	45.2	-30.8	33.0
7	34.4	45.1	-30.7	33.3
8	34.2	45.2	-30.8	33.4
9	33.9	45.1	-31.0	33.4
10	33.7	46.0	-31.3	33.6
11	33.4	45.8	-31.3	33.7
12	33.3	45.8	-31.1	33.8
13	33.1	45.5	-30.9	34.0
14	33.0	44.9	-30.8	34.0
15	32.9	44.9	-30.6	34.1
16	32.9	45.2	-30.6	34.3
17	32.8	44.9	-30.9	34.4
18	32.5	45.0	-31.0	34.5
19	32.4	45.7	-31.3	34.6
20	32.1	44.3	-30.5	34.7
均值	33.8	45.3	-30.9	33.6
STD	1.1	0.4	0.3	0.7

同时, 利用结构模型进行杆臂测量作为杆臂标定的

参考值, 以此判断标定的绝对精度, 结果如表 2 所示。

表 2 杆臂标定值与测量值对比表

Table 2 Contrast of calibration and measurement

参数	r_{xx}^B/mm	r_{yy}^B/mm	r_{yx}^B/mm	r_{xy}^B/mm
计算均值	33.8	45.3	-30.9	33.6
模型测量值	33	46	-32	35
误差	0.8	-0.7	1.1	-1.4

从上述标定结果看, 20 次标定结果的稳定性较好, 统计值最大为 1.1 mm, 与结构模型测量值比较大偏差 1.4 mm。

某型原理方案试验惯导进行测试验证时, 将惯组 Z 轴朝上放置在单轴转台上模拟转位机构进行自对准测试, 测试过程及数据处理过程同前述成熟旋转式惯导, 只是带动惯组转动的机构由单轴转台代替, 统计标定结果的稳定性 (3 倍标准差), 以此判断标定结果的稳定性, 结果如表 3 所示。

表 3 杆臂标定结果

Table 3 Lever-arm calibration results

序号	r_{xx}^B/mm	r_{yy}^B/mm	r_{yx}^B/mm	r_{xy}^B/mm
1	52.0	44.3	-10.9	32.6
2	51.9	44.5	-11.1	32.8
3	51.7	44.3	-11.1	32.9
4	51.5	44.2	-11.1	32.9
5	51.5	44.2	-11.1	33.0
6	51.3	44.1	-10.8	33.2
7	51.3	44.2	-10.9	33.3
8	51.1	44.2	-11.1	33.4
9	51.1	44.2	-11.1	33.5
10	51.0	44.2	-11.1	33.5
11	50.9	44.2	-11.3	33.7
12	50.9	44.0	-11.1	33.8
13	50.8	44.2	-11.2	33.9
14	50.7	44.1	-11.1	33.9
15	50.7	44.0	-11.0	34.0
16	50.7	43.8	-11.2	34.1
17	50.5	44.2	-11.1	34.1
18	50.6	44.0	-11.0	34.2
19	50.5	44.0	-11.0	34.2
20	50.6	44.0	-11.1	34.3
均值	51.1	44.1	-11.1	33.6
STD	0.5	0.2	0.1	0.5

从上述标定结果看, 20 次标定结果的稳定性较好, 统计值最大为 0.5 mm。

同时, 为验证上述标定结果应用的有效性以及对自对准精度的影响程度, 对比分析了自对准过程中补偿杆臂与不补偿杆臂对自对准结果的影响。20 次自对准结果如表 4 所示。

(下转第 102 页)