

加表斜坡零偏对惯导初对准的影响及补偿研究

蒋飞宇, 阳洪, 王瑜, 夏茜

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要:研究发现当捷联惯导系统(SINS)进行卡尔曼滤波精对准或动基座对准时, 惯性器件的斜坡性误差对其初始对准的精度有影响, 特别是对于采用石英挠性加速度计的惯导系统在预热不充分期间进行初始对准很可能会出现较大误差。该文分析了惯性器件斜坡性误差对 SINS 初始对准的具体影响, 指出要获得较高的方位初始对准精度除要求等效东向陀螺漂移小外, 在对准期间还要保证等效北向加速度计零偏也足够稳定。通过试验对加速度计斜坡零偏进行了建模、补偿, 试验结果表明补偿后方位对准精度有明显提高。

关键词:捷联惯导系统; 初始对准; 石英加速度计; 斜坡性零偏; 冷启动

中图分类号: TP273

文献标识码: A

The Influence and Compensation of Slope Bias of Accelerometer on Initial Alignment of Strapdown Inertial Navigation System

JIANG Feiyu, YANG Hong, WANG Yu, XIA Qian

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The study found that the slope bias of accelerometer would decrease the accuracy of Kalman filtering precision alignment or in-movement alignment of SINS. Especially for the SINS using quartz flexible accelerometer, the initial alignment would have a big error when the SINS was not preheated enough. This paper analyzes the concrete influence of inertial device's slope error on the initial alignment of SINS, and proposed that to obtain high heading alignment accuracy, in addition to small equivalent east gyro drift, the equivalent north accelerometer zero bias must be stable enough during alignment. The slope bias of accelerometer was modeled and compensated through test, and the results showed that the heading alignment accuracy was improved obviously.

Key words: strapdown inertial navigation system(SINS); initial alignment; quartz flexible accelerometer; slope bias; cold start

0 引言

初始对准是捷联惯导系统(SINS)进行导航的前提, 直接影响到系统的导航精度。初始对准的一项主要任务就是求出载体坐标系与导航坐标系的初始变换矩阵^[1], 从而算出初始姿态和方位角。初始对准的方法有静态直接计算姿态角法、卡尔曼滤波对准法、动基座对准法、SINS/GPS 组合对准法和传递对准法等^[2], 其对准的精度主要取决于惯性测量器件陀螺仪和加速度计的性能^[3]。

作者在使用由光纤陀螺仪和石英挠性加速度计组成的 SINS 进行卡尔曼滤波精对准或动基座对准时发现, 当惯导系统每次进行冷启动时, 方位对准精

度总会有所降低^[4]。分析数据后, 作者以为在陀螺仪漂移很小的情况下, 导致惯导初始对准精度降低的原因是石英加速度计存在斜坡性零偏。本文分析了惯性器件斜坡性误差对 SINS 初始对准的影响, 并对加速度计斜坡零偏进行了建模、补偿和验证。

1 惯性器件斜坡性误差对初始对准的影响分析

例如在静基座 SINS 初始对准时, 经过粗对准后误差角 $\varphi = [\varphi_E \quad \varphi_N \quad \varphi_U]$ 均为小角度, 以静态导航速度误差 δv^n 作为观测量进行卡尔曼滤波估计时, 姿态和速度误差方程^[5]分别为

$$\dot{\varphi} = -\omega_m^n \times \varphi - \delta \omega_m^n \quad (1)$$

$$\delta \dot{v}^n = f_{sf}^n \times \boldsymbol{\varphi} + \delta f_{sf}^n \quad (2)$$

式中： ω_{in}^n 为导航坐标系 n 系角速率，静基座下即为地球转速 $\boldsymbol{\omega}_e^n = [\omega_E \ \omega_N \ \omega_U]$ ； $\delta \omega_{ib}^n$ 为 n 系下的等效陀螺测量误差； δf_{sf}^n 为 n 系下的等效加速度计测量误差。陀螺测量误差是常值漂移误差 ϵ^n 和斜坡漂移误差 ϵ'^n 之和，形式上记为 $\delta \omega_{ib}^n = \epsilon^n + \epsilon'^n$ ；加速度计测量误差是常值零偏 ∇^n 和斜坡零偏 ∇'^n 之和，记为 $\delta f_{sf}^n = \nabla^n + \nabla'^n$ 。

静基座下 $f_{sf}^n = [0 \ 0 \ -g]$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)，展开式(1)、(2)，仅考虑速度误差水平分量^[6]，可得

$$\dot{\phi}_E = \omega_U \phi_N - \omega_N \phi_U - \epsilon_E^n - \int \epsilon'_E{}^n \quad (3)$$

$$\dot{\phi}_N = -\omega_U \phi_E - \epsilon_N^n - \int \epsilon'_N{}^n \quad (4)$$

$$\dot{\phi}_U = \omega_N \phi_E - \epsilon_U^n - \int \epsilon'_U{}^n \quad (5)$$

$$\delta \dot{v}_E^n = -g \phi_N + \nabla_E^n + \int \nabla'_E{}^n \quad (6)$$

$$\delta \dot{v}_N^n = -g \phi_E + \nabla_N^n + \int \nabla'_N{}^n \quad (7)$$

将式(6)、(7)移项整理得

$$\phi_N = \frac{-\delta \dot{v}_E^n + (\nabla_E^n + \int \nabla'_E{}^n)}{g} \quad (8)$$

$$\phi_E = \frac{\delta \dot{v}_N^n - (\nabla_N^n + \int \nabla'_N{}^n)}{g} \quad (9)$$

将式(9)两边再一次微分得

$$\dot{\phi}_E = \frac{\delta \ddot{v}_N^n - \nabla'_N{}^n}{g} \quad (10)$$

将式(8)、(10)代入式(3)中，整理得

$$\begin{aligned} \phi_U &= \frac{\omega_U \phi_N - \epsilon_U^n - \int \epsilon'_U{}^n - \dot{\phi}_E}{\omega_N} = \\ &= \frac{\omega_U (-\delta \dot{v}_E^n + \nabla_E^n + \int \nabla'_E{}^n)/g}{\omega_N} - \\ &= \frac{\epsilon_U^n + \int \epsilon'_U{}^n + (\delta \dot{v}_N^n - \nabla'_N{}^n)/g}{\omega_N} = \\ &= -\frac{\delta \dot{v}_E^n}{g} \tan L - \frac{\delta \ddot{v}_N^n}{g \omega_N} + \frac{\nabla_E^n + \int \nabla'_E{}^n}{g} \tan L - \\ &= \frac{\epsilon_U^n + \int \epsilon'_U{}^n}{\omega_N} - \frac{\nabla'_N{}^n/g}{\omega_N} \quad (11) \end{aligned}$$

由式(3)~(11)可看出，以速度误差为观测量时，可认为速度误差及其各阶导数都是已知的，所

以，从式(8)、(9)中可得到3个失准角的极限对准精度分别为

$$\phi_{E,Err} = -\frac{\nabla_N^n + \int \nabla'_N{}^n}{g} \quad (12)$$

$$\phi_{N,Err} = -\frac{\nabla_E^n + \int \nabla'_E{}^n}{g} \quad (13)$$

$$\phi_{U,Err} = \frac{\nabla_E^n + \int \nabla'_E{}^n}{g} \tan L - \frac{\epsilon_U^n + \int \epsilon'_U{}^n}{\omega_N} - \frac{\nabla'_N{}^n/g}{\omega_N} \quad (14)$$

由式(12)可得，对于 $\phi_{E,Err}$ 和 $\phi_{N,Err}$ 而言，误差主要来自加速度计的常值零偏和斜坡性零偏^[7]，但捷联惯组中加速度计的相对测量精度较高，故两者引

起的误差较小。对于 $\phi_{U,Err}$ 而言， $\frac{\nabla_E^n + \int \nabla'_E{}^n}{g} \tan L$

引起的误差较小，可忽略， $\phi_{U,Err}$ 的主要误差项

$\frac{\epsilon_U^n + \int \epsilon'_U{}^n}{\omega_N}$ 来自等效东向陀螺仪的漂移^[8]，在捷联惯

导预热不充分时，由等效北向加速度计斜坡性零偏引起的误差项 $\frac{\nabla'_N{}^n/g}{\omega_N}$ 不能忽视。从数量上看，

1 mg/h 的北向加速度计零偏变化率和 0.057 (°)/h 的东向陀螺常值漂移是等效的^[9]，如 $\nabla'_N{}^n$ 为

10^{-4} g/5 min ，则其引起的误差 $\phi_{U,Err} = 0.26^\circ \times \sec L$ ，由此可见 $\nabla'_N{}^n$ 的斜坡性变化对捷联惯导的方位对准精度影响较大。

除了采用传统解析式法外，其他初始对准方法都存在此误差。因此，要获得高的方位初始对准精度除要求等效东向陀螺漂移小外，在对准期间还要保证等效北向加速度计零偏也足够稳定，为此要对加速度计的输出进行一定的补偿。

2 加速度计零偏温度补偿
石英挠性加速度计的零偏对温度十分敏感，目前减小温度对加速度计影响的方法主要有两种：

2 加速度计零偏温度补偿

石英挠性加速度计的零偏对温度十分敏感，目前减小温度对加速度计影响的方法主要有两种：

1) 为加速度计添加恒温装置，使其处于恒温状态，从而消除温度的影响。

2) 研究加速度计零偏的温度变化特性，通过软件来对加速度计零偏进行补偿。恒温方法效果好，但增加了系统成本，增大了设备体积，实际中不适用。温补法通过软件来实现，简单易行，故通常采用

该方法。

加速度计的输出和温度的关系可采用三阶多项式模型:

$$A = k_0 + k_1 T + k_2 T^2 + k_3 T^3 \tag{15}$$

将惯导放入温箱中,温箱温度变化设置为:常温→60℃→-40℃→60℃。采集惯导加速度计的输出,得到加速度计输出(单位 mV)随时间变化结果如图 1~3 所示。试验中所使用的惯导其精度为 0.05°,陀螺仪常值漂移均为 0.01(°)/h,加速度计常值零偏为 20 μg,对准时间为 5 min。

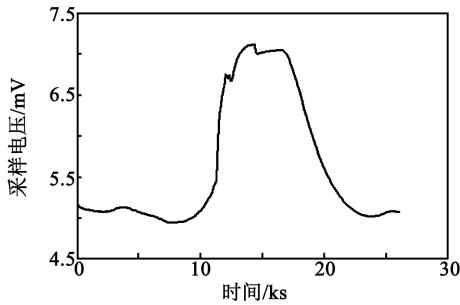


图 1 x 轴加速度计输出曲线

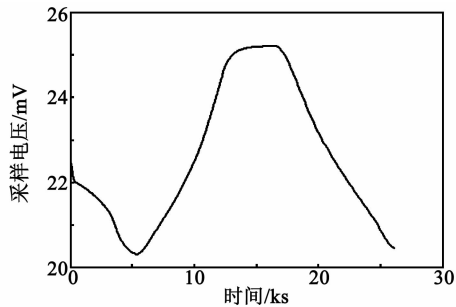


图 2 y 轴加速度计输出曲线

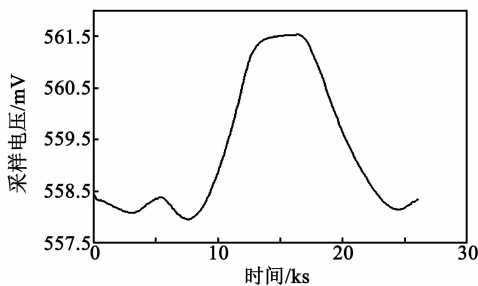


图 3 z 轴加速度计输出曲线

由图 1~3 可看出,当未进行温度补偿时,x 轴加速度计输出全温变化 2.15 mV(约为 3.7 mg),y 轴加速度计输出全温变化 4.9 mV(约为 8.5 mg),z 轴加速度计输出全温变化 3.6 mV(约为 6.5 mg),所以没有温度补偿时,加速度计零偏在全温范围内

变化较大。通过将加速度计输出和采样温度进行三阶曲线拟合并补偿,再对惯导进行标定后,加速度计在全温范围内随时间的输出如图 4~6 所示。

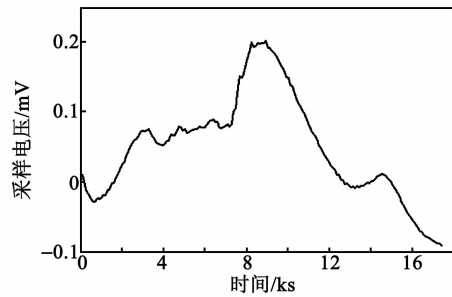


图 4 x 轴加速度计温补后输出曲线

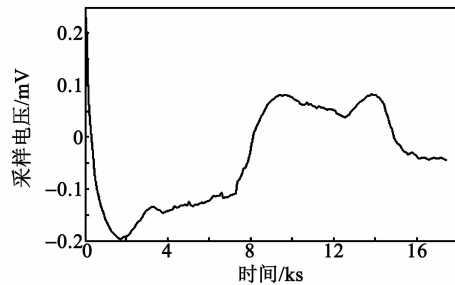


图 5 y 轴加速度计温补后输出曲线

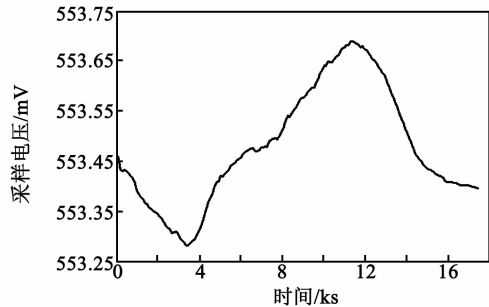


图 6 z 轴加速度计温补后输出曲线

由图 4~6 可看出,经温补后加速度计的全温输出偏差大幅缩小,约为 0.5 mg,因此,温补的效果明显。

3 加速度计斜坡性零偏及其补偿

经过温度补偿后,加表的零偏变化幅度变小,但是,0.5 mg 的偏差对于惯导初始对准有影响,加速度计上电后还存在斜坡性零偏,因此需要对其进行补偿。

将惯导放在水平转上 0°位置,分别进行 6 次冷启动和热启动初始对准,发现两者对准的姿态角接近,但方位角有所差异,结果如表 1 所示。

表 1 冷启动与热启动对准方位角对比

序号	冷启动方位角/(°)	热启动方位角/(°)
1	359.76	0.02
2	359.77	0.01
3	359.75	359.98
4	359.78	359.97
5	359.74	0.02
6	359.75	0.01

由表 1 可看出,冷启动初始对准的方位角比热启动对准差了约 0.27°。为了分析造成该误差的原因,我们将对准期间的陀螺仪和加速度计原始数据发送给计算机进行分析,陀螺仪的数据在对准器件保持平稳,而冷启动时加速度计的零偏呈现的变化如图 7~9 所示。

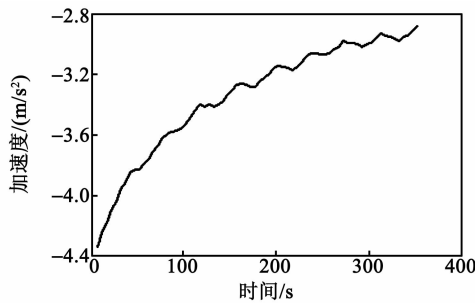


图 7 x 轴加速度计零偏变化

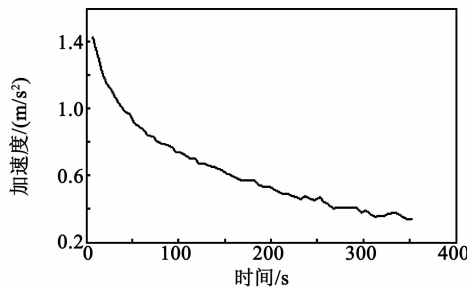


图 8 y 轴加速度计零偏变化

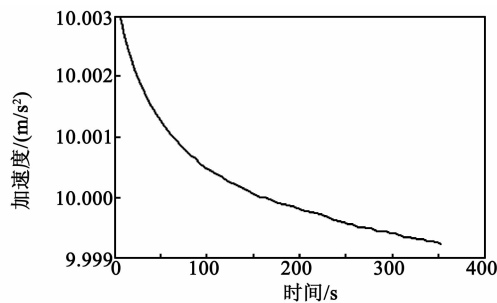


图 9 z 轴加速度计零偏变化

由图 7~9 可看出,在惯导冷启动初始对准的 5 min 内,x 轴加速度计零偏斜坡性变化 0.000 13 g,y 轴加速度计零偏斜坡性变化 0.000 1 g,z 轴加速

度计零偏斜坡性变化 0.000 2 g。由式(12)~(14)可知,东向加速度计的斜坡性零偏对方位对准的影响可忽略,天向加速度计的斜坡性零偏对方位对准无影响,而试验中惯导北向加速度计斜坡零偏等于 y 轴加速度计的斜坡零偏,即北向加速度计若存在 10⁻⁴ g/5 min 的斜坡零偏时,其所引起的方位对准误差约为 $\varphi_{U,Err} = 0.26^\circ \times \sec L$,这与试验中冷启动对准和热启动对准的对比误差基本吻合。因此,当惯导系统预热不够充分而进行冷启动初始对准时,如果北向加速度计存在斜坡性零偏变化,惯导的对准精度将受到影响。

为了提高冷启动时惯导初始对准的精度,需要对加速度计的斜坡零偏进行补偿。经过不同温度下多次重复试验后发现,3 个轴的加速度计的斜坡性零偏变化趋势基本一致,所以采取三阶曲线拟合方法进行补偿,模型如下:

$$B = k_0 + k_1 T + k_2 T^2 + k_3 T^3 \quad (16)$$

经过补偿后,加表的输出基本成直线趋势,变化约为 0.000 01 g;再把惯导放在 3 轴转台上,进行冷启动与热启动的定点及圆周对比测试,结果如表 2、3 所示。

表 2 补偿后冷启动与热启动定点对比测试

转台 90°	冷启动方位角 / (°)	热启动方位角 / (°)
1	90.04	90.05
2	89.94	90.03
3	89.98	89.98
4	90.05	90.04
5	90.02	89.95
6	90.06	89.96
精度	0.046	0.043

表 3 补偿后冷启动与热启动圆周对比测试

转台 90°	冷启动方位角 / (°)	热启动方位角 / (°)
0°	359.96	0.01
60°	60.02	60.03
120°	120.03	119.98
180°	180.05	180.01
240°	240.02	239.97
300°	299.98	300.03
精度	0.033	0.025

(下转第 955 页)