

## 基于迭代估计的三轴加速度计温度模型参数外场标定方法

杨 杰, 吴文启, 练军想, 刘 伟

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

**摘要:** 为补偿加速度计标度因数和零偏的热漂移误差, 设计了一种可估计内场恒温环境下参数变化量的加速度计温度参数模型, 并提出了基于迭代估计的温度模型参数外场标定方法。该方法不依赖精密的惯性测量设备和温箱, 仅在重力场内对加速度计进行连续多组位置观测, 充分利用加速度计冷启动过程产生的热漂移误差进行模型参数辨识, 解决了加速度计温度误差特性和启动温度点相关的问题。针对加速度计测量信号为高斯白噪声的特点, 建立了关于温度模型参数矢量和多组位置倾斜矢量的非线性准则函数, 提出了两步迭代估计方法实现两组参数矢量的分离估计。根据不同位置下三轴加速度计输出信号粗略提取倾斜矢量, 解决了迭代估计算法的初值问题。重力场内通过优化分析加速度计温度模型参数对重力值的灵敏度, 设计了 6 组位置观测编排。实验结果表明, 温度误差补偿前的重力值测量最大误差为  $3.62 \times 10^{-4}g$ , 而温度误差补偿后重力值测量误差小于  $1 \times 10^{-5}g$ ; 同时, 温度误差补偿前系统 3 h 纯惯性导航最大定位误差为 1186 m, 而温度误差补偿后最大定位误差小于 600 m, 从而表明提出的外场标定方法的有效性。

**关键词:** 加速度计; 外场标定; 温度补偿; 迭代估计; 非线性优化

**中图分类号:** U666.1

**文献标志码:** A

## Field calibration for thermal parameters of triaxial accelerometers based on iterative estimation method

YANG Jie, WU Wen-qi, LIAN Jun-xiang, LIU Wei

(College of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to reduce the thermal drift errors of scale factors and biases, the thermal model of triaxial accelerometers is established whereby the alteration of internal-field constant-temperature parameters is also compensated. An iterative estimation based field calibration method is proposed to solve the thermal parameters. First, no precise inertial test facilities and incubators are utilized in the calibration procedure. Second, the sequential multi-position gravitational observation is implemented on the accelerometers in the after-power-on procedure. Thus, the thermal parameters dependent on the startup temperature is estimated by the above thermal drift. Considering the Gaussian distribution of measurement noise, a nonlinear criterion function with respect to the thermal parameter vector and combined inclination vector is optimally resolved by a two-step iterative estimation method. The initial combined inclination vector is calculated by normalizing the raw outputs of triaxial accelerometers. An optimal six-position observation scheme is derived by maximizing the sensitivity functions of thermal parameters on the gravity. The test results illustrate that the maximum residual gravity error is  $3.62 \times 10^{-4}g$  before the thermal compensation but less than  $1.0 \times 10^{-5}g$  for the case where the thermal errors are considered. The maximum position error in the time span of almost three hours is about 1186 m before the thermal compensation but the position error is reduced to less than 600

**收稿日期:** 2013-02-08; **修回日期:** 2013-06-24

**基金项目:** 国家自然科学基金 (61174002)

**作者简介:** 杨杰 (1985—), 男, 博士研究生。研究方向为导航、制导与控制。E-mail: nudtyang@163.com

**联系人:** 吴文启 (1967—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: wenqiwu\_lit@hotmail.com

m after the thermal compensation. The comparison results prove the effectiveness of proposed field calibration method.

**Key words:** accelerometers; field calibration; temperature compensation; iterative calibration; nonlinear optimization

为克服加速度计的热漂移误差进而使惯导系统具有较大的工作温度范围, 建立加速度计的温度误差模型并进行标定补偿已称为目前主要的技术手段。内场环境下, 借助温箱在各个温度点下对加速度计进行多组静态位置标定<sup>[1-2]</sup>或者温度循环过程测量<sup>[3]</sup>, 进而可建立相应的温度参数模型。对于低精度低成本的加速度计, 该方法的温度补偿效果比较明显<sup>[4-6]</sup>。但是, 也存在标定时间过长, 标定设备成本过高的问题。由于温箱的温度过程和系统工作的环境温度存在差异, 且加速度温度误差特性和启动温度点相关<sup>[7-8]</sup>, 以及加速度计结构材料物理特性的长期变化, 这种标定方法难以适用高精度惯性导航应用<sup>[9-10]</sup>。为解决上述工程问题, 就需要在外场环境下对加速度计温度模型参数进行标定补偿。

本文提出了一种外场环境下三轴加速度计温度模型参数的迭代标定方法。考虑激光陀螺和加速度计敏感轴方向相对稳定, 以及两者之间相对稳定的姿态, 本文建立了标度因数和零偏的外场标定温度参数模型, 该模型可有效估计出内场恒温环境下标度因数和零偏的变化量以及相应的温度系数。为解决外场环境下无精密测试设备和温箱的难点, 本文提出了重力场内对三轴加速度计进行连续多次多组位置观测的标定方法。针对加速度计测量噪声服从高斯分布的特点, 建立温度模型参数矢量和组合倾斜矢量的非线性准则函数。

为实现两组矢量的有效分离, 本文提出了一种两步估计的参数迭代辨识算法。首先, 通过组合倾斜矢量为三轴加速度计提供比力输入基准值, 进而辨识出温度模型参数矢量; 其次, 借助估计出的温度模型参数矢量, 通过非线性约束优化方法求解不同观测位置的倾斜矢量。此外, 根据三轴加速度计输出信号提取初始组合倾斜矢量, 解决了迭代算法的初值问题。为实现温度模型参数的最优估计, 重力场内通过分析各项系数对重力值的灵敏度, 优化求解了6组位置观测编排。外场相同环境温度下, 利用系统冷启动过程对加速度计温度模型参数进行了4次标定, 并以重力值测量精度和系统纯惯性导航定位精度充分验证了各组参数的有效性。

## 1 三轴加速度计外场标定温度参数模型

内场恒温环境下, 系统充分预热后, 加速度计热平衡温度点为 $T_0$ , 通过三轴精密转台对惯导系统进行参数标定, 求解出加速度计的标度因数、安装误差、零偏, 以及加速度计组件和陀螺组件的相对姿态。考虑到激光陀螺敏感轴方向的相对稳定性, 建立以陀螺敏感轴方向为约束的体坐标系<sup>[8]</sup>, 则恒温环境下三轴加速度计的输出信号测量模型表示为:

$$\tilde{f}^a(T_0) = k_a(T_0)S_p^a(T_0)R_b^p(T_0)f^b(T_0) + b_a(T_0) \quad (1)$$

式中:  $b$  表示体坐标系,  $p$  表示三轴加速度计基准坐标系,  $a$  表示三轴加速度计敏感轴方向坐标系,  $f^b(T_0)$  表示温度 $T_0$ 下 $b$ 坐标系中的比力输入值,  $R_b^p(T_0)$  表示温度 $T_0$ 下 $b$ 坐标系至 $p$ 坐标系的正交变换矩阵,  $S_p^a(T_0)$  表示温度 $T_0$ 下从 $p$ 坐标系至 $a$ 坐标系的非正交变换矩阵,  $k_a(T_0) = \text{diag}\{[k_{a,x,0} \quad k_{a,y,0} \quad k_{a,z,0}]\}$  表示温度 $T_0$ 下三轴加速度计的标度因数矩阵,  $b_a(T_0) = [b_{a,x,0} \quad b_{a,y,0} \quad b_{a,z,0}]^T$  表示 $T_0$ 下三轴加速度计的零偏,  $\tilde{f}^a(T_0)$  表示温度 $T_0$ 下三轴加速度计的输出脉冲值。

考虑到三轴加速度计基准坐标系 $p$ 和体坐标系 $b$ 之间为正交矩阵转换关系, 记温度 $T_0$ 下三轴加速度计基准坐标系中的比力值输入为 $f^p(T_0)$ , 则式(1)可以变换如下:

$$\tilde{f}^a(T_0) = k_a(T_0)S_p^a(T_0)f^p(T_0) + b_a(T_0) \quad (2)$$

式中,  $f^p(T_0) = R_b^p(T_0)f^b(T_0)$ 。

由于加速度计敏感轴方向和陀螺敏感轴方向之间相对稳定的姿态, 则根据式(2)可得温度 $T$ 下三轴加速度计的输出信号测量模型表示为:

$$\tilde{f}^a(T) = k_a(T)S_p^a(T_0)f^p(T) + b_a(T) \quad (3)$$

式中, 与温度相关的标度因数矩阵和零偏分别表示为:

$$k_a(T) = \text{diag}\{[k_{a,x}(T_x) \quad k_{a,y}(T_y) \quad k_{a,z}(T_z)]\},$$

$$b_a(T) = [b_{a,x}(T_x) \quad b_{a,y}(T_y) \quad b_{a,z}(T_z)]^T。$$

外场环境温度 $T$ 下, 建立三轴加速度计标度因数和零偏的二阶多项式温度参数模型, 分别表示如下:

$$k_{a,i}(T_i) = k_{a,i,0} + \Delta k_{a,i,0} + k_{a,i,1}(T_i - T_{i,0}) + k_{a,i,2}(T_i - T_{i,0})^2, (i = x, y, z) \quad (4)$$

$$b_{a,i}(T_i) = b_{a,i,0} + \Delta b_{a,i,0} + b_{a,i,1}(T_i - T_{i,0}) + b_{a,i,2}(T_i - T_{i,0})^2, (i = x, y, z) \quad (5)$$

式中,  $\Delta k_{a,i,0}$  表示内场恒温环境下标度因数变化量,  $\Delta b_{a,i,0}$  表示内场恒温环境下零偏变化量,  $k_{a,i,1}$  和  $k_{a,i,2}$  表示标度因数的温度系数,  $b_{a,i,1}$  和  $b_{a,i,2}$  表示零偏的温度系数。因此, 根据式(4)(5)可在外场环境下标度补偿三轴加速度计标度因数和零偏的热漂移误差以及内场恒温环境下的参数变化量。

## 2 三轴加速度计温度模型参数外场标定

静态环境下, 重力场内三轴加速度计测量的比力矢量等于重力矢量的负值。定义如下当地水平坐标系  $n$ , 其中,  $x_n$  指向北,  $y_n$  指向天,  $z_n$  指向东。那么,  $n$  坐标系中的重力矢量可以表示为  $\mathbf{g}^n = [0 \quad -g \quad 0]^T$ 。而  $p$  坐标系和  $n$  坐标系之间的相对姿态可以通过方向余弦矩阵  $\mathbf{C}_n^p$  表示。定义从  $n$  坐标系至  $p$  坐标系的欧拉角转动顺序, 首先绕着  $y$  轴转动角度  $\psi$ , 再绕着  $z$  轴转动角度  $\theta$ , 最后绕着  $x$  轴转动角度  $\phi$ , 进而得到如下姿态矩阵的表示:

$$\mathbf{C}_n^p = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & \sin\theta \\ -\cos\psi \sin\theta \cos\phi + \sin\psi \sin\phi & \cos\theta \cos\phi \\ \cos\psi \sin\theta \sin\phi + \sin\psi \cos\phi & -\cos\theta \sin\phi \\ -\sin\psi \cos\theta & \sin\psi \sin\theta \cos\phi + \cos\psi \sin\phi \\ \sin\psi \sin\theta \sin\phi + \cos\psi \cos\phi & -\sin\psi \sin\theta \sin\phi + \cos\psi \cos\phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

外场静态情况下, 三轴加速度计进行多组位置的观测, 则温度  $T$  下比力输入值可表示为:

$$\mathbf{f}^p(T) = \mathbf{C}_n^p(T) \mathbf{f}^n = -\mathbf{C}_n^p(T) \mathbf{g}^n = \begin{bmatrix} g \sin\theta \\ g \cos\theta \cos\phi \\ -g \cos\theta \sin\phi \end{bmatrix}_T = g \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}_T \quad (7)$$

式中,  $c_i (i=1,2,3)$  表示和温度相关的三轴加速度计基准坐标系  $p$  的倾斜矢量。

将式(4)(5)及(7)代入式(3)可得:

$$\begin{bmatrix} \tilde{f}_{x,k}^a(T_x) \\ \tilde{f}_{y,k}^a(T_y) \\ \tilde{f}_{z,k}^a(T_z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{a,x,0} + \Delta b_{a,x,0} + b_{a,x,1}\Delta T_x + b_{a,x,2}(\Delta T_x)^2 \\ b_{a,y,0} + \Delta b_{a,y,0} + b_{a,y,1}\Delta T_y + b_{a,y,2}(\Delta T_y)^2 \\ b_{a,z,0} + \Delta b_{a,z,0} + b_{a,z,1}\Delta T_z + b_{a,z,2}(\Delta T_z)^2 \end{bmatrix} +$$

$$\text{diag} \left\{ \begin{bmatrix} k_{a,x,0} + \Delta k_{a,x,0} + k_{a,x,1}\Delta T_x + k_{a,x,2}(\Delta T_x)^2 \\ k_{a,y,0} + \Delta k_{a,y,0} + k_{a,y,1}\Delta T_y + k_{a,y,2}(\Delta T_y)^2 \\ k_{a,z,0} + \Delta k_{a,z,0} + k_{a,z,1}\Delta T_z + k_{a,z,2}(\Delta T_z)^2 \end{bmatrix} \right\} \mathbf{f}^a(T) \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{f}^a(T) = \mathbf{S}_p^a(T_0) \mathbf{f}^p(T)$  表示温度  $T$  下三轴加速度计敏感轴方向坐标系  $a$  中的比力测量值,  $\Delta T_i = T_i - T_{i,0}, (i = x, y, z)$  表示温度差值。

为了估计式(8)中的温度模型参数, 这里首先定义温度模型参数矢量和倾斜矢量, 分别表示为:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta k_{a,x,0} & k_{a,x,1} & k_{a,x,2} & \Delta b_{a,x,0} & b_{a,x,1} \\ b_{a,x,2} & \Delta k_{a,y,0} & k_{a,y,1} & k_{a,y,2} & \Delta b_{a,y,0} \\ b_{a,y,1} & b_{a,y,2} & \Delta k_{a,z,0} & k_{a,z,1} & k_{a,z,2} \\ \Delta b_{a,z,0} & b_{a,z,1} & b_{a,z,2} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & c_{3,1} & c_{1,2} & c_{2,2} & c_{3,2} \\ \cdots & c_{1,m} & c_{2,m} & c_{3,m} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

式中,  $m$  表示观测位置的数量。

那么, 三轴加速度计在第  $k$  位置的输出信号测量模型可以表示为信号模型和测量噪声之和, 即

$$\tilde{\mathbf{f}}_k^a = \boldsymbol{\mu}_k(\mathbf{x}, \mathbf{y}_k) + \mathbf{v}_a \quad (11)$$

其中, 信号模型表示为:

$$\boldsymbol{\mu}_k(\mathbf{x}, \mathbf{y}_k, T) = \mathbf{k}_a(T) \mathbf{S}_p^a(T) \mathbf{f}^p(T) + \mathbf{b}_a(T) \triangleq \begin{bmatrix} \mu_{x,k} \\ \mu_{y,k} \\ \mu_{z,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g c_{1,k} \tau_{xx} k_{a,x}(T_x) + b_{a,x}(T_x) \\ g k_{a,y}(T_y) \tau_{yx} c_{1,k} + g k_{a,y}(T_y) \tau_{yy} c_{2,k} + b_{a,y}(T_y) \\ g k_{a,z}(T_z) \tau_{zx} c_{1,k} + g k_{a,z}(T_z) \tau_{zy} c_{2,k} + g k_{a,z}(T_z) \tau_{zz} c_{3,k} + b_{a,z}(T_z) \end{bmatrix} \quad (12)$$

对于  $m$  组观测位置, 可以得到如下联合输出矢量和信号矢量:

$$\tilde{\mathbf{f}}^a = \begin{bmatrix} (\tilde{\mathbf{f}}_1^a)^T & (\tilde{\mathbf{f}}_2^a)^T & \cdots & (\tilde{\mathbf{f}}_m^a)^T \end{bmatrix}^T, \quad \boldsymbol{\mu}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}_1) & \boldsymbol{\mu}_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}_2) \\ \cdots & \boldsymbol{\mu}_m(\mathbf{x}, \mathbf{y}_m) \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

对于零均值的高斯白噪声  $\mathbf{v}_a$ , 输出信号集合  $\tilde{\mathbf{f}}^a$  的概率密度函数服从高斯分布。那么, 根据极大似然

估计原理, 高斯白噪声情况下的参数估计问题等价于非线性最小二乘估计, 进而可得如下非线性最小二乘优化准则函数:

$$(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}) = \arg \min J(\tilde{\mathbf{f}}^a, \mathbf{x}, \mathbf{y}) = \arg \min \sum_{k=1}^m \|\tilde{\mathbf{f}}_k^a - \boldsymbol{\mu}_k(\mathbf{x}, \mathbf{y}_k)\|^2 \quad (14)$$

考虑到式(14)中准则函数的非线性特性, 可以根据参数两步分离估计的方法进行求解。

## 2.1 温度模型参数矢量的估计

给定倾斜矢量  $\hat{\mathbf{y}}$ , 温度模型参数矢量  $\mathbf{x}$  可以通过如下优化问题进行求解:

$$\hat{\mathbf{x}} = \operatorname{argmin} J(\mathbf{p}, \mathbf{x}, \hat{\mathbf{y}}) = \operatorname{argmin} \sum_{k=1}^m \|\tilde{\mathbf{f}}_k^a - \boldsymbol{\mu}_k(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{y}}_k)\|^2 \quad (15)$$

根据式(8)可以得到如下线性观测方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{f}_x^a, T_x) & \mathbf{0}_{1 \times 6} & \mathbf{0}_{1 \times 6} \\ \mathbf{0}_{1 \times 6} & \mathbf{F}(\mathbf{f}_y^a, T_y) & \mathbf{0}_{1 \times 6} \\ \mathbf{0}_{1 \times 6} & \mathbf{0}_{1 \times 6} & \mathbf{F}(\mathbf{f}_z^a, T_z) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \tilde{\mathbf{f}}_{x,k}^a(T_x) - k_{a,x,0} \mathbf{f}_{x,k}^a - b_{a,x,0} \\ \tilde{\mathbf{f}}_{y,k}^a(T_y) - k_{a,y,0} \mathbf{f}_{y,k}^a - b_{a,y,0} \\ \tilde{\mathbf{f}}_{z,k}^a(T_z) - k_{a,z,0} \mathbf{f}_{z,k}^a - b_{a,z,0} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中,

$$\mathbf{F}(\mathbf{f}_i^a, T_i) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{x,i}^a & \Delta T_i \mathbf{f}_{x,i}^a & (\Delta T_i)^2 \mathbf{f}_{x,i}^a & 1 \\ (\Delta T_i)^2 \mathbf{f}_{x,i}^a & (\Delta T_i)^2 \end{bmatrix}, (i = x, y, z)。$$

那么, 根据式(16)可通过  $m$  组观测位置的三轴加速度计脉冲输出值及比力输入值估计温度模型参数矢量。

## 2.2 组合倾斜矢量的估计

给定参数矢量  $\hat{\mathbf{x}}$ , 那么, 组合倾斜矢量  $\mathbf{y}$  可以通过求解如下优化问题进行估计:

$$\hat{\mathbf{y}} = \operatorname{argmin} J(\tilde{\mathbf{f}}^a, \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{y}) = \operatorname{argmin} \sum_{k=1}^m \|\tilde{\mathbf{f}}_k^a - \boldsymbol{\mu}_k(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{y}_k)\|^2 \quad (17)$$

由于不同观测位置的测量噪声是相互独立的, 那么组合倾斜矢量的解完全等同于求解每个位置的倾斜矢量。根据上步估计的温度模型参数矢量可得第  $k$  组

位置的观测方程, 表示为:

$$\begin{bmatrix} g\tau_{xx}k_{a,x}(T_x) & 0 & 0 \\ gk_{a,y}(T_y)\tau_{yx} & gk_{a,y}(T_y)\tau_{yy} & 0 \\ gk_{a,z}(T_z)\tau_{zx} & gk_{a,z}(T_z)\tau_{zy} & gk_{a,z}(T_z)\tau_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{1,k} \\ c_{2,k} \\ c_{3,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{f}}_{x,k}^a(T_x) - b_{a,x}(T_x) \\ \tilde{\mathbf{f}}_{y,k}^a(T_y) - b_{a,y}(T_y) \\ \tilde{\mathbf{f}}_{z,k}^a(T_z) - b_{a,z}(T_z) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$c_{1,k}^2 + c_{2,k}^2 + c_{3,k}^2 = 1 \quad (19)$$

显然, 上式为非线性约束问题, 可以通过序列二次规划方法 (SQP) 进行有效的求解<sup>[11]</sup>。

首先, 根据式(18)(19)得到如下标准的约束优化问题:

$$\begin{aligned} \min f(c_k) = & \left( gk_{a,x}(T_x)\tau_{xx}c_{1,k} + b_{a,x}(T_x) - \tilde{\mathbf{f}}_{x,k}^a(T_x) \right)^2 + \\ & \left( gk_{a,y}(T_y)(\tau_{yx}c_{1,k} + \tau_{yy}c_{2,k}) + b_{a,y}(T_y) - \tilde{\mathbf{f}}_{y,k}^a(T_y) \right)^2 + \\ & \left( gk_{a,z}(T_z)(\tau_{zx}c_{1,k} + \tau_{zy}c_{2,k} + \tau_{zz}c_{3,k}) + b_{a,z}(T_z) - \tilde{\mathbf{f}}_{z,k}^a(T_z) \right)^2 \\ s.t. \quad h(c_k) = & c_{1,k}^2 + c_{2,k}^2 + c_{3,k}^2 - 1 = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

选取拉格朗日乘子  $u_k$ , 根据式(20)可构建如下拉格朗日函数:

$$L(c_k, u_k) = f(c_k) + u_k h(c_k) \quad (21)$$

这样, KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件方程可以表示如下:

$$\nabla f(c_k) + u_k \nabla h(c_k) = 0,$$

$$h(c_k) = c_{1,k}^2 + c_{2,k}^2 + c_{3,k}^2 - 1 = 0 \quad (22)$$

式(22)中第 1 个 KKT 方程意味着  $\nabla L(c_k, u_k) = 0$ , 其可通过牛顿迭代方法进行求解, 表示为:

$$c_{k,n+1} = c_{k,n} + \delta c_k, \quad u_{k,n+1} = u_{k,n} + \delta u_k \quad (23)$$

式中, 参数校正项  $\delta c_k$  和  $\delta u_k$  为如下线性方程的解:

$$-\begin{pmatrix} \nabla_c^2 L(c_k, u_k) & \nabla h(c_k) \\ (\nabla h(c_k))^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta c_k \\ \delta u_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \nabla L(c_k, u_k) \\ (h(c_k))^T \end{pmatrix} \quad (24)$$

式中, 相应的参数项表示如下:

$$\nabla h(c_k) = 2[c_{1,k} \quad c_{2,k} \quad c_{3,k}]^T \quad (25)$$

$$\nabla L(c_k, u_k) = [l_x \quad l_y \quad l_z]^T \quad (26.a)$$

$$l_x = 2g(\mu_{1,k} - \tilde{f}_{x,k}^a)k_{a,x}\tau_{xx} + 2g(\mu_{2,k} - \tilde{f}_{y,k}^a)k_{a,y}\tau_{yx} + 2g(\mu_{3,k} - \tilde{f}_{z,k}^a)k_{a,z}\tau_{zx} + 2u_k c_{1,k} \quad (26.b)$$

$$l_y = 2g(\mu_{2,k} - \tilde{f}_{y,k}^a)k_{a,y}\tau_{yy} + 2g(\mu_{3,k} - \tilde{f}_{z,k}^a)k_{a,z}\tau_{zy} + 2u_k c_{2,k} \quad (26.c)$$

$$l_z = 2g(\mu_{3,k} - \tilde{f}_{z,k}^a)k_{a,z}\tau_{zz} + 2u_k c_{3,k} \quad (26.d)$$

$$\nabla_{c_k}^2 L(c_k, u_k) = \begin{bmatrix} l_{xx} & l_{xy} & l_{xz} \\ l_{xy} & l_{yy} & l_{yz} \\ l_{xz} & l_{yz} & l_{zz} \end{bmatrix} \quad (27.a)$$

$$l_{xx} = 2g^2 k_{a,x}^2 \tau_{xx}^2 + 2g^2 k_{a,y}^2 \tau_{yx}^2 + 2g^2 k_{a,z}^2 \tau_{zx}^2 + 2u_k \quad (27.b)$$

$$l_{xy} = 2g^2 k_{a,y}^2 \tau_{yx} \tau_{yy} + 2g^2 k_{a,z}^2 \tau_{zx} \tau_{zy} \quad (27.c)$$

$$l_{xz} = 2g^2 k_{a,z}^2 \tau_{zx} \tau_{zz} \quad (27.d)$$

$$l_{yy} = 2g^2 k_{a,y}^2 \tau_{yy}^2 + 2g^2 k_{a,z}^2 \tau_{zy}^2 + 2u_k \quad (27.e)$$

$$l_{yz} = 2g^2 k_{a,z}^2 \tau_{zy} \tau_{zz} \quad (27.f)$$

$$l_{zz} = 2g^2 k_{a,z}^2 \tau_{zz}^2 + 2u_k \quad (27.g)$$

需要注意的是, 初始参数  $c_{k,0}$  可取为温度模型参数矢量估计中的倾斜矢量,  $u_{k,0}$  取为较大的正整数。

### 2.3 迭代计算组合倾斜矢量初值选取

上两步中, 参数矢量和组合倾斜矢量迭代估计算法的关键在于初始组合倾斜矢量  $y$  的选取, 这里给出一种可行的选择方案。

通过三轴加速度计敏感轴方向坐标系  $a$  和基准坐标系  $p$  之间的非正交转换矩阵  $S_p^a(T_0)$ , 将三轴加速度计的脉冲输出信号转换至基准坐标系  $p$  中, 有如下转换关系:

$$\tilde{f}^p(T) = (S_p^a(T_0))^{-1} \tilde{f}^a(T) \quad (28)$$

那么, 基准坐标系  $p$  中的脉冲输出信号  $\tilde{f}^p(T)$  中包含粗略的倾斜矢量信息, 比如, 当  $x$  加速度计敏感轴方向向上时具有正的最大输出值, 而其余两个加速度计由于敏感轴方向近似水平而具有接近于零的输出值; 这个输出信息是和基准坐标系  $p$  中的比力输入值  $f^p(T)$  是近似一致的。此外, 重力场内三轴加速度计脉冲输出信号的矢量模值是有界的, 因此, 可以根据

第  $k$  位置基准坐标系  $p$  中的脉冲输出信号近似提取倾斜矢量, 表示为:

$$y_k = \begin{bmatrix} c_{1,k} \\ c_{2,k} \\ c_{3,k} \end{bmatrix} \approx \frac{\begin{bmatrix} \tilde{f}_{x,k}^p(T_x) & \tilde{f}_{y,k}^p(T_y) & \tilde{f}_{z,k}^p(T_z) \end{bmatrix}^T}{\left\| \begin{bmatrix} \tilde{f}_{x,k}^p(T_x) & \tilde{f}_{y,k}^p(T_y) & \tilde{f}_{z,k}^p(T_z) \end{bmatrix}^T \right\|} \quad (29)$$

因此, 通过式(29)可有效计算出倾斜矢量的初始值, 进而确保迭代算法的收敛性。

结合上述分析, 得到如下温度模型参数矢量和组合倾斜矢量的迭代估计流程:

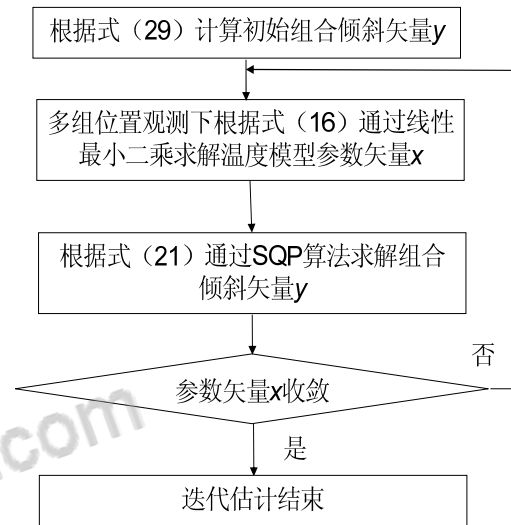


图 1 参数矢量和组合倾斜矢量的迭代估计流程

Fig.1 Iterative estimation flowchart of parameter vector and combined inclination vector

### 3 重力场内温度模型参数矢量灵敏度分析

重力场内, 三轴加速度计温度模型参数矢量的灵敏度分析, 表现为不同观测位置编排方式下, 各项参数对重力矢量模值的敏感程度, 并通过优化分析最大灵敏度实现温度系数的充分观测。外场标定环境中, 三轴加速度计温度模型参数矢量的最优观测问题等价于求解输入参数对重力值最大敏感度函数条件下的倾斜矢量。

根据式(7)可得不同观测位置下, 重力矢量在三轴加速度计基准坐标系  $p$  中表示为:

$$\begin{bmatrix} f_x^p \\ f_y^p \\ f_z^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \sin \theta \\ g \cos \theta \cos \phi \\ -g \cos \theta \sin \phi \end{bmatrix}, \quad \theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right], \quad \phi \in [-\pi, \pi] \quad (30)$$

式中,  $\theta$  表示俯仰角,  $\phi$  表示滚转角。

静态环境下, 不考虑测量噪声, 三轴加速度计的

理想输出值等于重力值的平方, 有如下观测方程:

$$L = g^2 = L_x^2 + L_y^2 + L_z^2 \quad (31.a)$$

$$L_x = \frac{\tilde{f}_{x,k}^a - b_{a,x}(T_x) - \left( \frac{\Delta k_{a,x,0} + k_{a,x,1} \Delta T_x + k_{a,x,2} (\Delta T_x)^2}{k_{a,x,0} \tau_{xx}} \right) f_x^a}{k_{a,x,0} \tau_{xx}} \quad (31.b)$$

$$L_y = \frac{\left( \frac{\tilde{f}_{y,k}^a - b_{a,y}(T_y) - \left( \frac{\Delta k_{a,y,0} + k_{a,y,1} \Delta T_y + k_{a,y,2} (\Delta T_y)^2}{k_{a,y,0} \tau_{yy}} \right) f_y^a}{k_{a,y,0} \tau_{yy}} \right)}{k_{a,y,0} \tau_{yy}} \quad (31.c)$$

$$L_z = \frac{\tilde{f}_{z,k}^a - b_{a,z}(T_z) - \left( \frac{\Delta k_{a,z,0} + k_{a,z,1} \Delta T_z + k_{a,z,2} (\Delta T_z)^2}{k_{a,z,0} \tau_{zz}} \right) f_z^a - k_{a,z,0} \left( \frac{\tau_{zx} f_x^p + \tau_{zy} f_y^p}{\tau_{zy} f_y^p + \tau_{zz} f_z^p} \right)}{k_{a,z,0} \tau_{zz}} \quad (31.d)$$

式中, 对  $L$  关于温度模型参数矢量中各项系数求偏导, 并结合式(30), 可得敏感度函数分别表示如下:

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta k_{a,x,0}} = -2 f_x^p f_x^a = -2 \tau_{xx} g^2 \sin^2 \theta \quad (32)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta b_{a,x,0}} = -2 f_x^p - 2 \tau_{xx} g \sin \theta \quad (33)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta k_{a,y,0}} = -2 f_y^p f_y^a = -2 f_y^p (\tau_{yx} f_x^p + \tau_{yy} f_y^p) \approx -2 \tau_{yy} g^2 \cos^2 \theta \cos^2 \phi \quad (34)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta b_{a,y,0}} = -2 f_y^p = -2 g \cos \theta \cos \phi \quad (35)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta k_{a,z,0}} = -2 f_z^p f_z^a = -2 f_z^p (\tau_{zx} f_x^p + \tau_{zy} f_y^p + \tau_{zz} f_z^p) \approx -2 \tau_{zz} g^2 \cos^2 \theta \sin^2 \phi \quad (36)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \Delta b_{a,z,0}} = -2 f_z^p = 2 g \cos \theta \sin \phi \quad (37)$$

$$\frac{\partial L}{\partial k_{a,x,i}} = -2 \tau_{xx} (\Delta T_x)^i (f_x^p)^2 = -2 g^2 \tau_{xx} (\Delta T_x)^i (\sin \theta)^2, (i=1,2) \quad (38)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b_{a,x,i}} = -2 (\Delta T_x)^i f_x^p = -2 g (\Delta T_x)^i \sin \theta, (i=1,2) \quad (39)$$

$$\frac{\partial L}{\partial k_{a,y,i}} = -2 (\Delta T_y)^i (\tau_{yx} f_x^p f_y^p + \tau_{yy} (f_y^p)^2) \approx -2 g^2 \tau_{yy} (\Delta T_y)^i \cos^2 \theta \cos^2 \phi, (i=1,2) \quad (40)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b_{a,y,i}} = -2 (\Delta T_y)^i f_y^p = -2 g (\Delta T_y)^i \cos \theta \cos \phi, (i=1,2) \quad (41)$$

$$\frac{\partial L}{\partial k_{a,z,i}} = -2 (\Delta T_z)^i f_z^p \left( \frac{\tau_{zx} f_x^p + \tau_{zy} f_y^p}{\tau_{zy} f_y^p + \tau_{zz} f_z^p} \right) \approx -2 g^2 \tau_{zz} (\Delta T_z)^i \cos^2 \theta \sin^2 \phi, (i=1,2) \quad (42)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b_{a,z,i}} = -2 (\Delta T_z)^i f_z^p = 2 g (\Delta T_z)^i \cos \theta \sin \phi, (i=1,2) \quad (43)$$

那么, 通过求解式(32)(43)的极大值, 可得温度模型参数矢量对重力值最大灵敏度条件下的优化倾斜矢量, 有如下结论:

1) 当  $\theta$  取为  $\pm \pi/2$ ,  $\phi$  取任意值,  $\Delta T_x$  取最大值时,  $x$  加速度计标度因数和零偏的温度系数  $\{k_{a,x,1}, k_{a,x,2}, b_{a,x,1}, b_{a,x,2}\}$  以及参数长期变化量  $\{\Delta k_{a,x,0}, \Delta b_{a,x,0}\}$  实现最优估计;

2) 当  $\theta$  取为  $0$ ,  $\phi$  取  $\{0, \pi\}$ ,  $\Delta T_y$  取最大值时,  $y$  加速度计标度因数和零偏的温度系数  $\{k_{a,y,1}, k_{a,y,2}, b_{a,y,1}, b_{a,y,2}\}$  以及参数长期变化量  $\{\Delta k_{a,y,0}, \Delta b_{a,y,0}\}$  实现最优估计;

3) 当  $\theta$  取为  $0$ ,  $\phi$  取  $\pm \pi/2$ ,  $\Delta T_z$  取最大值时,  $z$  加速度计标度因数和零偏的温度系数  $\{k_{a,z,1}, k_{a,z,2}, b_{a,z,1}, b_{a,z,2}\}$  以及参数长期变化量  $\{\Delta k_{a,z,0}, \Delta b_{a,z,0}\}$  实现最优估计。

实际系统冷启动过程中, 加速度计温度变化量  $\Delta T_i$  的最大值是固定的, 因此, 可得三轴加速度计敏感轴方向分别向上和向下的 6 位置观测编排。同时, 通过重复 6 位置观测编排, 可遍历整个温度变化过程, 实现温度模型参数矢量的最优估计。

## 4 外场参数标定及实验验证

### 4.1 外场参数标定

某型激光陀螺捷联惯导系统中, 激光陀螺精度优于  $0.005\text{ }(^{\circ}\cdot\text{h}^{-1})/\sqrt{\text{Hz}}$  ( $1\sigma$ ), 石英挠性加速度计精度优于  $5\times 10^{-5}\text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$  ( $1\sigma$ ), 其中, 每个加速度内表面贴有高精度的铂电阻数字温度传感器。内场恒温约  $25^{\circ}\text{C}$  环境下, 系统充分预热后, 通过三轴精密转台标定激光陀螺和加速度计的参数以及两者之间的相对姿态。

内场标定后几天, 激光陀螺和加速度计敏感轴方向相对稳定, 而内场恒温环境下加速度计的标度因数由于结构材料物理特性变化而变化, 以及系统逐次启动温度点不同而使内场恒温环境下的零偏发生变化。

系统外场冷启动过程中, 环境温度约为  $20^{\circ}\text{C}$ , 激光陀螺输出相对稳定, 石英加速度计产生较大的输出热漂移。按照本文提出的外场标定方法, 将三轴加速度计进行连续 5 次近似 6 位置观测, 共计 30 组观测位置, 可辨识出温度参数模型中的各项系数以及内场恒温环境下的参数变化量。外场相同环境温度下, 将系统进行 4 次冷启动, 可得 4 组温度模型参数矢量 (见表 1)。

根据表 1 可知, 由于内场和外场标定时间间隔较短, 石英加速度计结构材料物理特性变化不大, 内场恒温环境下的标度因数最大变化量小于  $2\times 10^{-6}$ ; 由于内场标定和外场标定的启动温度点不同而引入的系统逐次启动误差, 内场恒温环境下的零偏变化相对明显, 最大约为  $0.014\text{ m/s}^2$ 。此外, 加速度计标度因数的一阶温度系数相对较大, 最大约为  $60\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , 而二阶温度系数相对较小;  $x$  加速度计零偏的温度系数相对于其余两个加速度计较大, 且零偏的二阶温度系数均不大。

以重力值为基准, 分别根据外场标定的 4 组温度模型参数, 比较温度误差补偿前后三轴加速度计测量的重力值误差, 结果见图 2 和图 3。

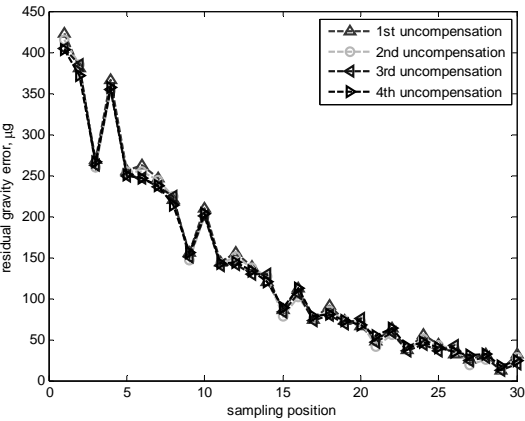


图 2 温度误差补偿前三轴加速度计重力值测量误差  
Fig.2 Residual gravity errors of triaxial accelerometers before thermal compensation

由图 2~3 可知, 根据内场恒温环境下加速度计的标定参数, 4 次冷启动过程的重力值测量误差均较大,

表 1 三轴加速度计温度模型参数的 4 次外场标定结果  
Tab.1 Four groups of field-calibrated thermal parameters of triaxial accelerometers

	第 1 组	第 2 组
$\Delta k_{a,x,0}$ ( $10^{-6}$ )	1.6556	-1.6538
$\Delta k_{a,y,0}$ ( $10^{-6}$ )	-0.3993	0.9228
$\Delta k_{a,z,0}$ ( $10^{-6}$ )	0.6977	-1.2425
$\Delta b_{a,x,0}$ ( $\text{m/s}^2$ )	1.9607e-3	1.9686e-3
$\Delta b_{a,y,0}$ ( $\text{m/s}^2$ )	-1.3309e-2	-1.3372e-2
$\Delta b_{a,z,0}$ ( $\text{m/s}^2$ )	-6.3849e-3	-6.3491e-3
$k_{a,x,1}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	-42.1483	-41.3897
$k_{a,y,1}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	-59.4948	-59.7023
$k_{a,z,1}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	-40.5211	-41.0059
$k_{a,x,2}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}^2$ )	0.1165	0.1995
$k_{a,y,2}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}^2$ )	-0.2441	-0.1551
$k_{a,z,2}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}^2$ )	-0.1526	-0.2094
$b_{a,x,1}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}$ )	6.8163e-5	7.2769e-5
$b_{a,y,1}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}$ )	-1.4499e-5	-1.3191e-5
$b_{a,z,1}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}$ )	1.9379e-6	3.7848e-6
$b_{a,x,2}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}^2$ )	-1.3703e-6	-6.0956e-7
$b_{a,y,2}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}^2$ )	-3.1957e-6	-6.1351e-7
$b_{a,z,2}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}^2$ )	3.1618e-7	6.16323e-7
	第 3 组	第 4 组
$\Delta k_{a,x,0}$ ( $10^{-6}$ )	1.1017	1.4265
$\Delta k_{a,y,0}$ ( $10^{-6}$ )	0.9841	-1.4922
$\Delta k_{a,z,0}$ ( $10^{-6}$ )	-0.4708	0.5095
$\Delta b_{a,x,0}$ ( $\text{m/s}^2$ )	1.9723e-3	1.9796e-3
$\Delta b_{a,y,0}$ ( $\text{m/s}^2$ )	-1.3413e-2	-1.3347e-2
$\Delta b_{a,z,0}$ ( $\text{m/s}^2$ )	-6.3233e-3	-6.3187e-3
$k_{a,x,1}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	-41.4268	-41.6118
$k_{a,y,1}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	-59.2823	-59.8551
$k_{a,z,1}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	-41.2571	-40.8263
$k_{a,x,2}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}^2$ )	0.2295	0.2241
$k_{a,y,2}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}^2$ )	-0.0901	-0.1362
$k_{a,z,2}$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}^2$ )	-0.2468	-0.1921
$b_{a,x,1}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}$ )	7.0291e-5	7.2122e-5
$b_{a,y,1}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}$ )	-1.4493e-5	-1.1778e-5
$b_{a,z,1}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}$ )	4.3651e-6	7.8012e-7
$b_{a,x,2}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}^2$ )	-9.8625e-7	-9.6103e-7
$b_{a,y,2}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}^2$ )	-1.0667e-6	-9.0902e-7
$b_{a,z,2}$ ( $\text{m/s}^2/^{\circ}\text{C}^2$ )	4.7406e-7	-5.6821e-8

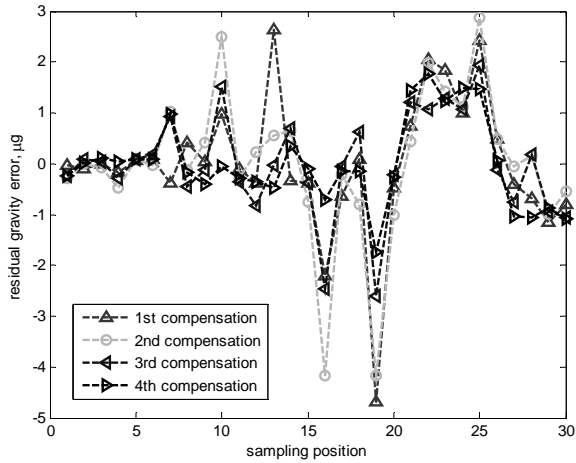


图3 温度误差补偿后三轴加速度计重力值测量误差  
Fig.3 Residual gravity errors of triaxial accelerometers after thermal compensation

最大误差为 422  $\mu\text{g}$ , 严重影响了系统的快速启动应用, 而经过 4 组温度模型参数补偿后, 重力值测量误差均在 10  $\mu\text{g}$  以内, 显著提升了三轴加速度计的重力值测量精度。

#### 4.2 标定参数验证

三轴加速度计温度模型参数外场标定后, 相同环境温度下, 系统进行约 3 h 的静态冷启动, 三轴加速度计脉冲输出信号随温度变化过程见图 4, 由此可知, y 加速度计的脉冲输出随温度变化产生明显的漂移。以重力值测量误差和系统纯惯性导航定位误差为标准, 分别验证 4 组温度模型参数, 结果表示见图 5~7。其中, 图 6 中的北向和东向位置误差, 以及图 7 中的位置误差, 计算过程分别表示如下:

$$\delta p_n = (L_{\text{ins}} - L_{\text{true}}) r_n,$$

$$\delta p_e = (\lambda_{\text{ins}} - \lambda_{\text{true}}) r_e \cos(L_{\text{true}}),$$

$$\delta p = \sqrt{(\delta p_n)^2 + (\delta p_e)^2} \quad (44)$$

式中,  $L_{\text{ins}}$  和  $L_{\text{true}}$  分别表示纬度的计算值和真实值,  $\lambda_{\text{ins}}$  和  $\lambda_{\text{true}}$  分别表示经度的计算值和真实值,  $r_n$  和  $r_e$  分别表示地球的子午圈和卯酉圈半径。

由图 5 可知, 根据内场恒温环境下加速度计的标定参数, 重力值最大测量误差为 362  $\mu\text{g}$ , 而经过 4 组温度模型参数补偿后, 重力值测量误差均在 10  $\mu\text{g}$  以内。由图 6~7 可知, 给定相同的激光陀螺参数, 根据内场恒温环境下加速度计的标定参数, 系统的纯惯性导航最大定位误差约为 1186 m, 而经过 4 组温度模型

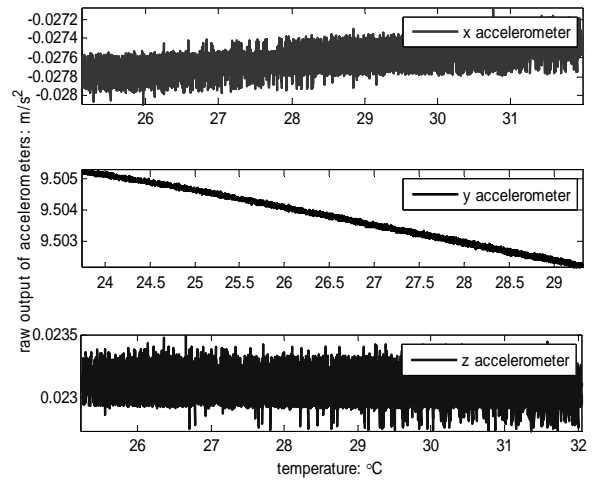


图4 系统静态冷启动过程中三轴加速度计脉冲输出值随温度变化过程

Fig.4 The raw outputs of triaxial accelerometers and the corresponding thermal alteration in after-power-on procedure

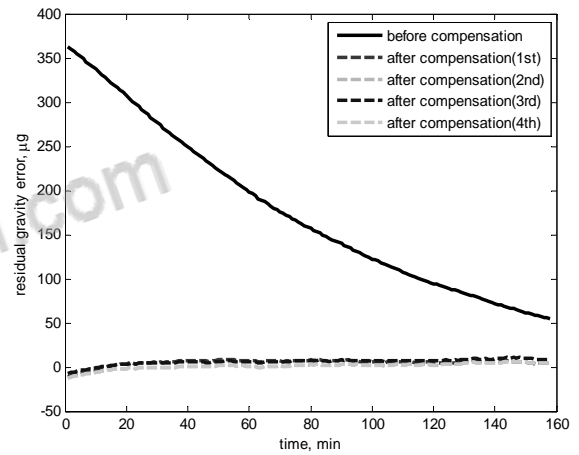


图5 温度误差补偿前后三轴加速度计重力值测量精度比较

Fig.5 Comparison of residual gravity measured by triaxial accelerometers

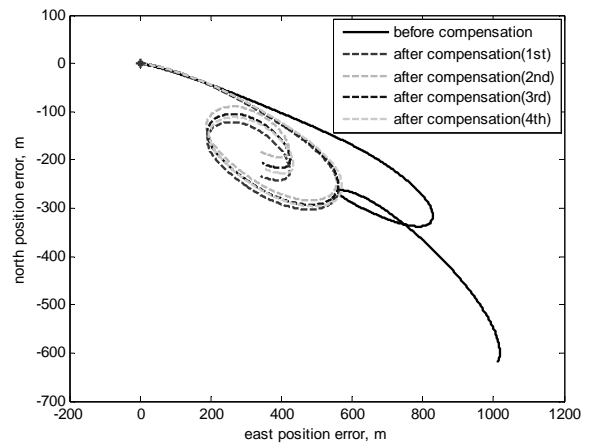


图6 温度误差补偿前后系统纯惯导定位误差轨迹比较  
Fig.6 Trajectory comparison of position error before and after thermal compensation



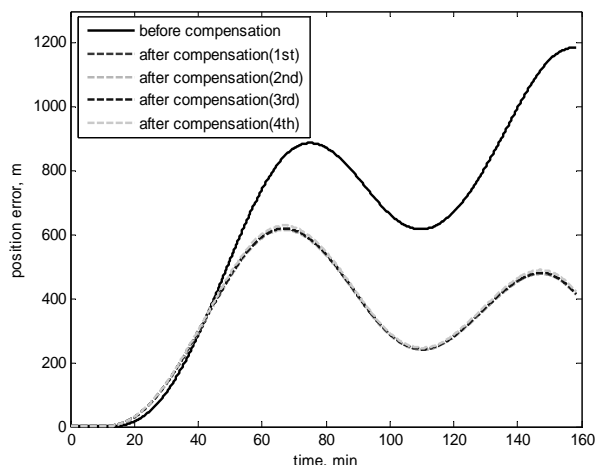


图 7 温度误差补偿前后系统纯惯导定位误差比较

Fig.7 Comparison of position errors before and after thermal compensation

参数补偿后, 系统纯惯性导航最大定位误差均小于 600 m, 且重复性较好, 从而显著提高了系统的纯惯性导航定位精度。

## 5 结 论

加速度计热漂移误差的标定补偿是实现高精度比力测量和惯性导航的重要基础。为解决加速度计温度误差特性和启动温度点相关的技术难题, 以及加速度计结构材料物理特性变化使得内场恒温环境下的标定参数产生漂移, 本文提出了一种外场环境下基于迭代估计的三轴加速度计温度模型参数标定方法, 补偿了参数的长期变化量, 并有效缩短了标定时间, 克服了高精度加速度计参数标定对精密惯性测试设备的依赖。针对不同环境启动温度点, 本文提出的外场快速标定方法也具有较好的适应性。实际系统的冷启动过程表明, 经过温度误差补偿后, 系统的重力值测量精度和纯惯性导航定位精度均有明显的改进, 从而对需要快速启动的高精度惯性导航应用具有重要的理论意义和工程价值。

### 参考文献 (References):

[1] 于湘涛, 张兰, 郭琳瑞, 等. 基于小波最小二乘支持向量机的加速度计温度建模和补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 95-98.  
YU Xiang-tao, ZHANG Lan, GUO Lin-rui, et al. Temperature modeling and compensation of accelerometer based on least squares wavelet support vector machine[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 95-98.

[2] HAN Xiao-ying, FANG Jian-cheng. Temperature compensation method of FOG-IMU on RBF neural network [C]//IEEE Internal Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering, 2012: 671-674.  
[3] 徐哲, 刘云峰, 董景新. MEMS 加速度计温漂预测补偿模型[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(5): 601-610.  
XU Zhe, LIU Yun-feng, DONG Jing-xin. Thermal drift prognosis and compensation model of MEMS accelerometer[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(5): 601-610.  
[4] 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.  
[5] El-Diasty M, Pagiatakis S. A rigorous temperature-dependent stochastic modeling and testing for MEMS-based inertial sensor errors[J]. Sensors, 2009, 9(11): 8437-8489.  
[6] Shiau Jaw-Kun, Huang Chen-Xuan, Chang Ming-Yu. Noise characteristics of MEMS gyro's null drift and temperature compensation[J]. Journal of Applied Science and Engineering, 2012, 15(3): 239-246.  
[7] 杨杰, 吴文启, 练军想. 加速度计组件冷启动温度模型参数的标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(4): 211-215.  
YANG Jie, WU Wen-qi, LIAN Jun-xiang. Calibration of temperature model parameters of accelerometer triad during after-power-on process[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(4): 211-215.  
[8] 代刚, 李枚, 杜连明, 等. 微加速度计启动漂移特性研究与实验[J]. 传感技术学报, 2011, 24(10): 1416-1421.  
DAI Gang, LI Mei, DU Lian-ming, et al. Characteristic research and experiment of micro accelerometer startup drift [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(10): 1416-1421.  
[9] Han K J, Sung C K, Yu M J. Improved calibration method for SDINS considering body-frame drift[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2011, 9(3): 497-505.  
[10] Yang J, Wu W Q, Wu Y X, Lian J X. Thermal calibration for the accelerometer triad based on the sequential multi-position observation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(2), 467-482.  
[11] Yang J, Wu W Q, Wu Y X, Lian J X. Improved iterative calibration for triaxial accelerometers based on the optimal observation[J]. Sensors, 2012, 12(6): 8157-8175.

论文发表、论文降重、论文润色请扫码



免费论文查重，传递门 >> <http://free.paperyy.com>

阅读此文的还阅读了：

- [1. 参数估计的统一模型:广义Gauss—Markov模型](#)
- [2. 基于迭代估计的三轴加速度计温度模型参数外场标定方法](#)
- [3. 基于最大似然估计法的加速度计误差参数标定方法](#)
- [4. 加速度计组件冷启动温度模型参数的标定方法](#)
- [5. LIS2DH／LIS2DM三轴加速度计芯片](#)
- [6. 河流硝化模型中的参数估计](#)
- [7. 产品汇总：传感器和变送器](#)
- [8. 广义矩方法及与模型的其它参数估计法的关系](#)
- [9. 内端固定三轴梳齿电容式加速度计](#)
- [10. 基于迭代计算的加速度计标定方法](#)
- [11. Weng旋回模型参数求解的一种简便方法及其应用效果评述](#)
- [12. ADXL377模拟高g值三轴MEMS加速度计](#)
- [13. 二级计分题组反应模型及其参数估计方法综述](#)
- [14. 滑动轮胎接地胎面温度的影响因素分析](#)
- [15. 体积更小更薄、功能更完善、性能更好——MEMS三轴加速度计竞争日趋激烈](#)