

Research on the Error Correction Methods of the Pipeline's Geographic Coordinate Measuring *

YANG Yang^{1,2}, YANG Lijian^{1*}, SHEN Bo

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: The design used the low accuracy inertia components, equipped with the pipeline cleaner to measure the geographic coordinate. The inertia algorithm error was accumulated over and over, thus it can not fulfill the location requirements. To aim at the issue, we calibrated the instruments' speed through the odometers, and the instruments' attitude angle through the pendulums. Because the errors of the odometers and the pendulums can not be accumulated, the method can increase the location accuracy. We used the error compensation methods to form the error model of the attitudes, speed and positions, to make subtracting the inertial algorithm's results from the outputs of the odometer and pendulum as the observing values, and to deduce observation equations. As the errors' models were nonlinear equations, we used the unscented Kalman filtering methods, compensated the estimated errors from the filtering in the inertial navigation algorithm. The results showed that the methods can decrease the errors' influences, and achieve the pipeline's geographic coordinates under the condition that detecting in the pipeline. It has certain value in practice.

Key words: geographic coordinate measuring; pipeline inspect; off-line analysis; Inertial navigation; Kalman filter
EEACC: 7220 **doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.010.018**

管道地理坐标测量误差校正方法的研究 *

杨 洋^{1,2}, 杨理践^{1*}, 沈 博¹

(1. 沈阳工业大学信息科学与工程学院, 沈阳 110870; 2. 辽宁大学物理学院, 沈阳 110036)

摘 要: 设计采用轻便的低精度 MEMS 惯性器件搭载管道清管器的方法实现管道地理坐标的内检测, 由于器件精度较低, 惯导算法的误差不断累积, 不能满足定位要求。根据这一问题, 通过里程轮校准检测器的速度, 通过重锤校准检测器的姿态角, 里程轮和重锤的误差不会累积, 可以提高定位的精度; 采用误差补偿方法, 建立了姿态、速度和位置的误差模型, 将里程轮和重锤的输出与惯导计算的结果之差作为观测量, 建立观测方程; 误差模型利用倾角表示姿态角误差, 产生非线性问题, 为此, 采用无迹卡尔曼滤波方法, 在惯导算法中对滤波估计的误差进行补偿。结果表明, 利用该算法可以降低误差的影响, 实现内检测条件下管道地理坐标的测量, 具有一定的应用价值。

关键词: 管道地理坐标测量; 内检测; 离线分析; 捷联惯导; 卡尔曼滤波

中图分类号: TP274+.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)10-1416-06

石油、天然气等工业原料需要地下管道网络进行传输, 管道的安全检测对于工业发展, 环境保护具有重要作用。管道地理坐标测量技术可以为检出的缺陷和漏点提供具体的位置, 还可以提供地下、海底等隐蔽管线的地理位置信息, 是管道检测的关键技术。

目前国际管道行业通行的检测方法是管道内检

测, 该方法不用挖开整段管道, 在检测的同时可以保证管道的正常工作。文章中的检测系统采用该方法。国外只有 BJ 等管道公司可以提供相关技术, 如果直接引进需要耗费大量资金, 另外泄漏管线位置不利国家安全, 因此, 完善我国自己的管道地理坐标测量技术迫在眉睫。文献[1-2]针对内检测的特点, 不能采用外源定位的 GPS、地磁等导航定位手

段,因此采用捷联惯导和其他依据检测器运动进行定位检测的内源式导航定位手段,在使用高精度惯性器件条件下,对较长距离的定位检测精度达到 2.5 m 左右。由于设计需要搭载管道清管器,管道清管器利用管道内输送的介质在管道中运动,搭载轻便的 MEMS 惯性器件,针对器件的精度较低,定位误差较大,难以满足实际需要的问题,加入里程轮和重锤作为校正信息,针对误差方程的姿态角模型非线性问题,采用无迹卡尔曼滤波算法对误差模型的状态量进行估计。实验表明,通过上述方法可以有效降低管道定位的误差,使计算结果的误差值每隔 12 m 在 0.5 m 左右,提高了测量精度。

1 工作原理和硬件结构

检测系统的工作原理:检测器在管道内部运动,在运动过程中,将检测器的惯性数据(加速度计和陀螺仪等的输出值)记录在硬盘上。检测器在管道内从入口到出口完整运动一次后,将记录的数据从硬盘取出,通过离线分析,得到管道的地理坐标。

由于检测器工作在管道内部,需要用金属外罩将外部的环境(高温高压和腐蚀性液体)隔离开,屏蔽 GPS 信号;工作同时进行漏磁检测(一种管道缺陷检测方法,需要将管道完全磁化),在强磁环境下,无法利用地磁信号。针对上述情况,设计采用捷联惯导(SINS)进行管道地理坐标检测,它无需与检测器外部进行数据交换,是一种自主导航方法。

借鉴传统 SINS 方法,将惯性器件(加速度计和陀螺仪)按一定方向组合为惯性测量单元(IMU),直接固定在作为载体的检测器上,在载体运动过程中通过记录的惯性数据,推算载体运动的轨迹信息。检测系统整体结构如图 1 所示。

检测器的外部结构如图 1(a)所示,皮碗起推进作用,外罩将检测器与外部隔离并抵抗冲击。另外还包括支撑架,电源,重锤和里程轮。核心电路部分如图 1(b)所示,惯性测量单元(IMU)提供载体三维方向运动的加速度和角速度数据,数据经滤波、AD 转换后,存储在硬盘上。IMU 惯性器件分布如图 1(c)图所示,包括 3 组低精度的加速度计和陀螺仪(都为 MEMS 结构),按载体坐标系(在载体坐标系下的观测值用右上角标符号 b 表示)方式安装,载体坐标系分布情况为: x 轴指向检测器运动的前进方向, y 轴垂直于 x 轴指向右, z 轴垂直于 y 轴与 x 轴组成的平面指向上。图 1(d)是重锤的安装示意图, B_1 和 B_2 为重锤,结构相同, B_1 在 xz 平面内摆动, B_2 在 yz 平面内摆动。

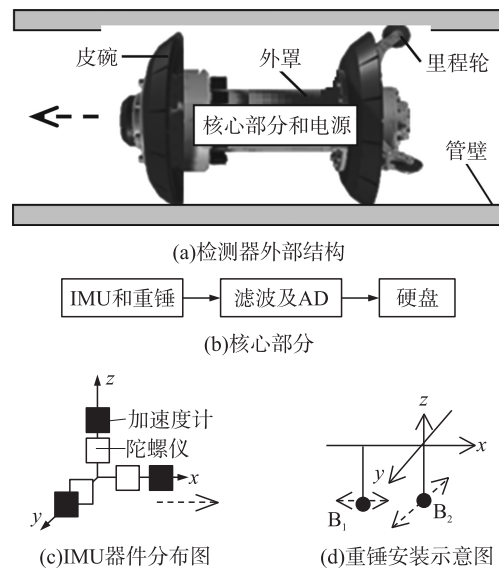


图 1 检测系统结构图

2 软件设计

SINS 算法将每一步计算的结果作为下一步的初始值,算法的误差(包括姿态,速度和位置)随计算过程不断累积,严重影响定位精度,需要加入校正环节,误差校正是定位算法的关键。

2.1 误差模型

校正之前先建立器件的误差模型。器件测量值的误差主要为零位漂移,由零位漂移引起的姿态、速度和位置误差是每步 SINS 计算的主要误差^[3],在 ψ 角误差模型中零位漂移被单独分离出来,这样可以分别对误差进行处理,所以采用 ψ 角误差模型作为姿态角的误差模型,将零位漂移看做是随机噪声,建立姿态误差微分方程:

$$\dot{\phi} = \delta\omega + \phi \times \omega^n - \varepsilon \quad (1)$$

右上角的符号 n 表示在导航坐标系下的观测值,公式中表示的参数都为三维列向量,分别表示导航坐标系的东、北和天三个方向的参数。 ω 表示载体的角速度, $\delta\omega$ 表示角速度误差, ϕ 表示姿态角误差的变化率, ε 表示陀螺仪测量值的零位漂移。根据导航方程,建立速度误差微分方程:

$$\dot{\delta v} = A \times \phi + \nabla - \delta\omega \times v^n - \omega \times \delta v \quad (2)$$

$\dot{\delta v}$ 表示速度误差的变化率, A 表示载体的加速度, ∇ 表示加速度计测量值的零位漂移。将地球子午面、卯酉圈曲面半径都近似为 R ,建立位置误差微分方程,首先给出变化率的方程:

$$\dot{L} = \frac{v_N^n}{R+h} \quad (3)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{v_E^n}{R+h} \sec(L) \quad (4)$$

$$\dot{h} = v_U^n \quad (5)$$

\dot{L} 为地理纬度变化率, $\dot{\lambda}$ 为经度变化率, \dot{h} 为高度变化率, v_N^n, v_E^n, v_U^n 表示速度在导航坐标系下东 N、北 E、天 U 三个方向的射影值。对等式取微分得到位置误差微分方程:

$$\delta \dot{L} = \frac{\delta v_N^n}{R+h} - \frac{v_N^n}{(R+h)^2} \delta h \quad (6)$$

$$\delta \dot{\lambda} = \frac{\sec(L)}{R+h} \delta v_E^n + \frac{v_E^n \tan(L) \sec(L)}{R+h} \delta L - \frac{v_E^n \sec(L)}{(R+h)^2} \delta h \quad (7)$$

$$\delta \dot{h} = \delta v_U^n \quad (8)$$

误差值与期望值之间的关系为:期望值=测得值-误差值,期望值的精度取决于误差值估计的精度,利用 Kalman 滤波算法对误差值进行估计,根据误差模型建立状态方程和观测方程。

2.2 建立状态方程和观测方程

为了方便滤波计算,需要将微分方程转换为离散系统模型(具体算法在 § 2.3 滤波算法中讨论):

$$\mathbf{X}(k+1) = \Phi(k+1, k) \mathbf{X}(k) + \mathbf{T}(k+1, k) \mathbf{W}(k) \quad (9)$$

其中, k 表示时刻, $\Phi(k+1, k)$ 是从 k 时刻到 $k+1$ 时刻的状态转移矩阵, $\mathbf{w}(k)$ 是状态噪声向量, $\mathbf{T}(k+1, k)$ 是噪声系数矩阵, $\mathbf{x}(k)$ 是系统的 15 维状态向量:

$$\mathbf{X}(k) = [\phi_{1 \times 3}, \delta v_{1 \times 3}, \delta \mathbf{P}_{1 \times 3}, \boldsymbol{\varepsilon}_{1 \times 3}, \nabla_{1 \times 3}]^T \quad (10)$$

其中, $\phi_{1 \times 3} = [\phi_x, \phi_y, \phi_z]^T$ 是姿态角误差, 设姿态矩阵的真值是 C_n^b , 计算值是 C_c^b (右下角符号 c 表示计算得到的导航系, 通过左乘姿态矩阵, 可以将右下角坐标系中的观测值转换到左上角坐标系中), 则它们的关系为^[4]:

$$C_n^b = C_c^b C_n^c = C_c^b \begin{bmatrix} 1 & \phi_z & -\phi_y \\ -\phi_z & 1 & \phi_x \\ \phi_y & -\phi_x & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$\delta v_{1 \times 3} = [\delta v_E, \delta v_N, \delta v_U]$ 为速度误差, $\delta \mathbf{P}_{1 \times 3} = [\delta L, \delta \lambda, \delta h]^T$ 为位置误差, $\boldsymbol{\varepsilon}_{1 \times 3}$ 为陀螺仪零位漂移, $\nabla_{1 \times 3}$ 为角速度计零位漂移。在内检测条件下, 利用里程轮和重锤观测值^[5]建立观测方程:

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k) \mathbf{X}(k) + \mathbf{V}(k) \quad (12)$$

$\mathbf{Z}(k) = [v_x^b - v_o, v_y^b, v_z^b, B_1 - \text{Pitch}, B_2 - \text{Roll}]^T$ 为系统的观测向量, v_o 为里程轮速度, 在理想情况下, v_o 应该与载体坐标系下 x 方向速度相等, 两者的误差值可以作为速度误差的观测值; 在管道中, 载体系下 y 向和 z 向的速度 v_y^b, v_z^b 应该为 0, 将它们也作为速度误差的观测值。 B_1, B_2 分别为重锤在载体系下 zx 和 zy 平面内与重力方向的偏转角度, 测量范围: $+180^\circ \sim -180^\circ$ (如前面图 1(d) 所示), Roll, Pitch 为横滚

角和仰俯角, 可以通过姿态矩阵中的元素得到, 设

$$C_n^b = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

则: Pitch = arcsin(C_{32}), Roll = arctan($-C_{13}/C_{33}$)。

$\mathbf{H}(k) = [C_n^b : \begin{matrix} I_{2 \times 2} \\ 0_{3 \times 4} \end{matrix} : 0_{1 \times 2}]$ 为观测向量的系数矩阵,

由于管道内壁附着的介质使摩擦力变小, 里程轮产生滑动现象, 这时测量速度小于等于实际速度; 重锤偏转角度越大, 回摆的幅度越大, 将这些看做随机误差, 用噪声矩阵 $\mathbf{V}(k)$ 表示。

2.3 滤波算法

由于理想 Kalman 滤波要求系统的状态和观测方程为线性, 状态噪声与观测噪声在迭代中保持下列特性: (1) 高斯分布, 零均值白噪声, (2) 它们与状态量两两互不相关。但由 § 2.2 可知, 估计误差的状态方程为非线性, 如果用理想 Kalman 滤波方法, 不能保证噪声特性, 估计误差严重偏大。目前常用的非线性滤波算法有扩展 Kalman 滤波(EKF)^[6] 和无迹 Kalman 滤波(UKF), EKF 对非线性方程求泰勒展开式, 通过取一阶近似转化为线性方程, 因为省略了二阶及以上项, 所以估计误差较大; Julier 等提出了 UKF, 该方法先对状态量进行 U 变换, 再进行滤波估计, 因为没有对非线性方程进行近似处理, 所以精度高于扩展 Kalman 滤波, 滤波时间与 EKF 大致相当^[7-9]。设计采用 UKF 算法。与 EKF 不同, UKF 通过计算 Sigma 点代替对方程的一阶线性近似, 计算步骤为:

(1) 初始化:

$$\hat{\mathbf{X}}_0^a = E[\mathbf{X}_0^T]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_0^a = E[(\mathbf{X}_0^a - \hat{\mathbf{X}}_0^a)(\mathbf{X}_0^a - \hat{\mathbf{X}}_0^a)^T] = \begin{bmatrix} P_{X_0} & 0 & 0 \\ 0 & R_w & 0 \\ 0 & 0 & R_v \end{bmatrix} \quad (15)$$

$\hat{\mathbf{X}}_0^a$ 为系统的增广状态变量的初始估计, \mathbf{P}_0^a 是增广状态的初始方差, R_w 是过程噪声方差, R_v 是观测噪声方差。

(2) 根据初始值利用 Sigma 点计算每步的状态预测值:

① 计算 Sigma 点 $\chi_{k-1}^i (i=1, 2, \dots, 2n)$, 即

$$\begin{cases} \chi_{k-1}^0 = \hat{\mathbf{X}}_{k-1}^a \\ \chi_{k-1}^i = \hat{\mathbf{X}}_{k-1}^a + (\sqrt{(n+\lambda) P_{k-1}^a})_i, i=1, 2, \dots, n \\ \chi_{k-1}^i = \hat{\mathbf{X}}_{k-1}^a - (\sqrt{(n+\lambda) P_{k-1}^a})_i, i=n+1, n+2, \dots, 2n \end{cases} \quad (16)$$

②计算时间更新方程。通过状态方程的传播计算 Sigma 点 $\chi_k^i (i=1, 2, \dots, 2n)$, 去除了近似误差:

$$\chi_k^i = f(\chi_{k-1}^i), i=0, 1, \dots, 2n \quad (17)$$

$$\chi_{k,k-1}^a = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^m \chi_k^i \quad (18)$$

$$P_{k,k-1}^a = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^c (\chi_k^i - \hat{X}_{k,k-1}^a) (\chi_k^i - \hat{X}_{k,k-1}^a)^T + P_{k-1}^a \quad (19)$$

③计算观测更新方程

$$\theta_{k,k-1} = h(\chi_{k,k-1}^a) \quad (20)$$

$$\hat{Z}_{k,k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^m \theta_{i,(k,k-1)} \quad (21)$$

$$P_{Z_k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^c (\theta_{i,(k,k-1)} - \hat{Z}_{k,k-1}) (\theta_{i,(k,k-1)} - \hat{Z}_{k,k-1})^T \quad (23)$$

$$P_{X_k Z_k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^c (\chi_{i,(k,k-1)} - \hat{X}_{k,k-1}^a) (\theta_{i,(k,k-1)} - \hat{Z}_{k,k-1})^T \quad (24)$$

④滤波更新

$$K_k = P_{X_k Z_k} P_{Z_k}^{-1} \quad (25)$$

$$\hat{X}_k^a = \hat{X}_{k,k-1}^a + K_k (Z_k - \hat{Z}_{k,k-1}) \quad (26)$$

$$P_k^a = P_{k,k-1}^a - K_k P_{Z_k} K_k^T \quad (27)$$

(3) 参数计算

$$\omega_0^m = \frac{\lambda}{n+\lambda} \quad (28)$$

$$\omega_0^c = \omega_0^m + (1-\alpha^2 + \beta) \quad (29)$$

$$\omega_i^c = \omega_i^m = \frac{1}{2(n+\lambda)}, i=1, \dots, 2n \quad (30)$$

$$\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n \quad (31)$$

式中,增广矩阵维数 $n=21$,系数 $\alpha=0.01, \beta=2, \kappa=0, \omega_i^m$ 为求一阶统计特性的权系数, ω_i^c 为求二阶统计特性的权系数, λ 为复合刻度系数, $f(\cdot)$ 为状态函数(即 3.1 的误差模型方程), $h(\cdot)$ 为观测函数(观测方程)。步骤(2)为迭代过程^[10]。

UKF 的滤波周期应小于 SINS 计算周期,系统的软件计算框图如图 2 所示, v, P, ϕ 表示 SINS 每步计算的速度,位置和姿态的初值^[11,12,13]。

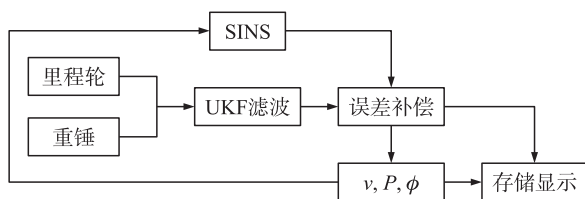


图 2 计算框图

3 实验分析

利用小车搭载检测器、电源和微型计算机组成

实验装置,模拟检测器在管道中的运动情况,在小车完整运动一次后将记录的数据取出,利用 Matlab 进行离线分析计算,实验装置如图 3 所示。

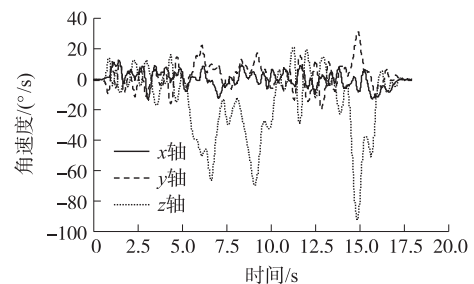


图 3 实验装置示意图

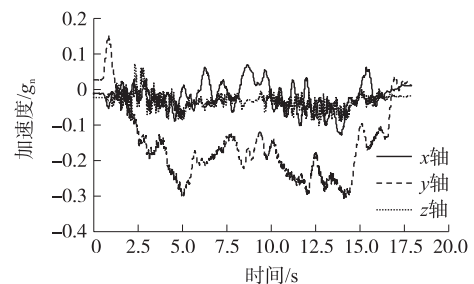
检测器内的 IMU 为模拟输出,电压范围为 +2.5 V 到 -2.5 V,陀螺仪零点漂移 $0.5 (^\circ)/s$,加速度计零点漂移 10 mg_n 。用 12 bit AD 采样,共 10 个通道,采样频率 200 Hz。运动结束后取出存储的数据。将运动过程中采集的动态信号 D_i 减去零点信号 D_0 得到计算所需的惯性数据 D_i :

$$D_i = k [D_i - E(D_0)] \quad (32)$$

k 为尺度因数。因为 IMU 的三组器件要求必须严格按坐标系方向正交,实际器件的安装误差(见图 1(c)IMU 安装分布图)也代入计算中,本文的研究集中于器件测量误差的滤波算法,安装误差忽略不计。整理后的 IMU 数据如图 4 所示。



(a)陀螺仪信号图



(b)加速度信号图

图 4 IMU 信号图

计算的起始经纬度为 $41.736^\circ, 123.244^\circ$, 起始

高度为 0 m, 滤波方程状态量的初始值为: $X_0 = [0.5_{1 \times 3}, 0.1_{1 \times 3}, 0.5_{1 \times 3}, 0.05_{1 \times 3}, 0.05_{1 \times 3}]$, 捷联惯导算法的更新时间为 0.5 s, UKF 滤波算法的更新时间为 0.01 s。估计的状态误差如图 5 所示(多次测量, 选取较好的一组数据), 由图 5(a)可以看出, 在管道弯曲位置, 航向角误差变大, 加入重锤校正后, 姿态角误差由 0.5°降低到 0.1°左右。由图 5(b)可得, 由于未加入位置误差的校正, 位置误差值偏离零点。由图 5(c)可以看出, 加入里程轮校正后, 速度误差降为约 0.2 m/s。

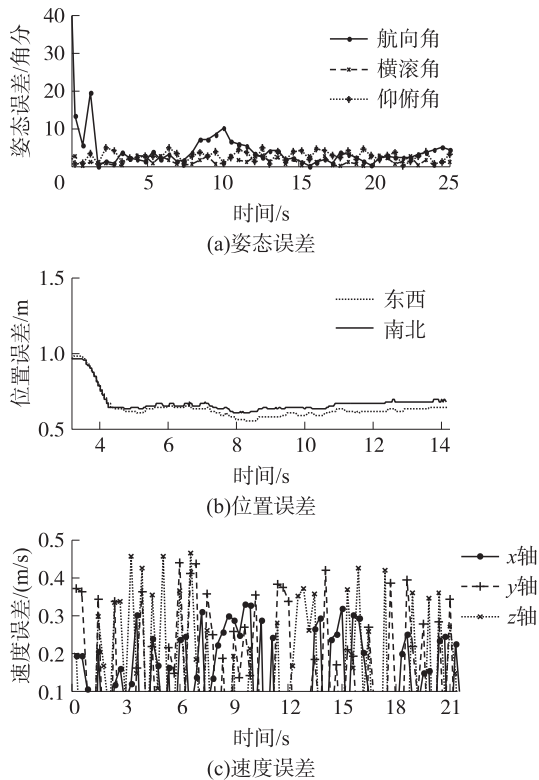


图 5 估计的误差值

计算的水平方向二维轨迹如图 6 所示, 小车绕操场跑道走一圈, 将起始点设为 0 值, 利用每步

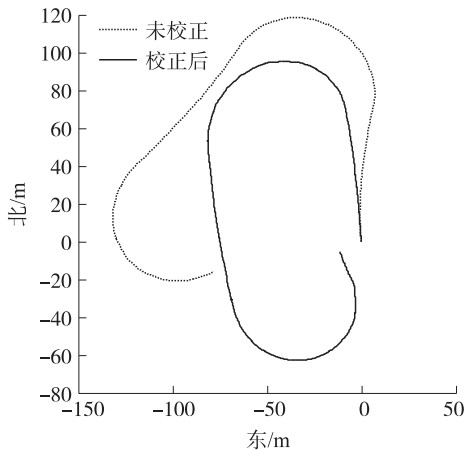


图 6 二维轨迹图

SINS 计算的位移得到检测器运动的轨迹, 已知起始点的具体位置, 通过检测器轨迹即可得到管道的地理位置信息, 图中虚线为未校正轨迹, 实线为校正后计算的轨迹, 每移动 12 m 距离轨迹偏差由 1 m 降低为 0.5 m。从正向和反向分别进行定位实验, 结果基本一致。检测器运动速度为 0.5 ~ 1 m/s。

3 结论

本文研究了一种管道地理坐标测量的校正方法, 该方法适于在封闭环境下工作。针对 SINS 误差累积的问题, 利用里程轮和重锤进行校准。建立以姿态, 速度和位置误差为状态量的状态方程和观测方程; 因为状态方程为非线性, 通过比较两种非线性滤波算法, 选择滤波效果较好的 UKF 进行滤波估计, 最后计算得到管道坐标二维轨迹图形, 实验表明, 该方法可以实现内检测环境下的管道地理坐标测量, 加入滤波算法后测量的精度可以满足实际的需要, 方法具有一定的应用价值。

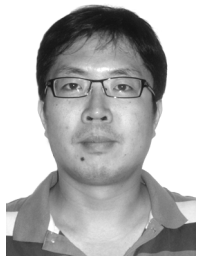
参考文献:

- [1] Jaejong Y, Jang G I, Chan G P. An Off-Line Navigation of a Geometry PIG Using a Modified Nonlinear Fixed-Interval Smoothing Filter[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(1): 1403-1411.
- [2] Eun H S, Naser E S. Navigation Kalman Filter Design for Pipeline Pigging[J]. The Journal of Navigation, 2005, 58(1): 283-289.
- [3] 陈旭光, 杨平, 陈意. MEMS 陀螺仪零位误差分析与处理[J]. 传感技术学报, 2012, 25(5): 628-632.
- [4] 杨理践, 李振, 高松巍. 管道检测中管道定位系统的研究[J]. 无损探伤, 2007, 31(3): 27-29.
- [5] 宋志东, 靳世久, 李一博, 等. 管道内检测器里程轮信号优选算法的设计与实现[J]. 管道技术与设备, 2006, 1(3): 12-13.
- [6] 刘国海, 施维, 李康吉. 插值改进 EKF 算法在组合导航中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(10): 1897-1901.
- [7] Eun H S, Naser E. An Unscented Kalman Filter for In-Motion Alignment of Low-Cost IMUs [J]. IEEE Explore, 2004, 1: 273-279.
- [8] 李杰, 张文栋, 刘俊. 基于时间序列分析的 Kalman 滤波方法在 MEMS 陀螺仪随机漂移误差补偿中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 2215-2219.
- [9] Dah-Jing J, Chun-Nan L. Unscented Kalman Filter with Nonlinear Dynamic Process Modeling for GPS Navigation [J]. GPS Solut, 2008(12): 249-260.
- [10] Stefano M, Aldo G. Unscented Kalman Filtering for Nonlinear Structural Dynamics[J]. Nonlinear Dyn, 2007(49): 131-150.
- [11] 聂浩翔, 关劲, 卞鸿巍. 模糊自适应 Kalman 滤波在 INS/GPS 组合导航系统中的应用[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(1): 67-70.
- [12] 翁海泉, 任春华, 张敬栋, 等. 基于最小分辨率的 MEMS 陀螺漂移抑制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2371

-2375.

[13] Paul G Savage. Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm

Design-Part 1: Attitude Algorithms [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1998, 21 (1) : 19-28.



杨 洋(1978-),男,讲师,研究方向为信号处理和传感器技术, yangyang_red@163.com;



杨理践(1957-),男,教授,博士生导师,研究方向为输送管道的在线检测技术。