

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2019.06.009

# MEMS 惯测技术在管道测绘系统中的应用

杨继红<sup>1</sup>, 马涛<sup>2</sup>, 吴亮华<sup>2</sup>, 季阳<sup>2</sup>

(1. 海装驻北京地区某军事代表室, 北京 100074;  
2. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

**摘要:**针对小口径管道的测绘问题,提出了一种 MEMS 惯测装置在小管道测绘系统中应用的方法,直接利用地标点信息为 MEMS 惯测装置装订初始方位,采用因子图理论对惯性/里程计组合导航信息进行处理,通过后续处理对装订误差进行修正,解决了 MEMS 惯测装置无法完成初始对准的问题。给出了惯性/里程计组合导航的因子图以及和积算法递推公式,并通过牵引试验对所提方法进行了验证。试验结果表明,提出的应用方法能够有效解决小口径管道的测绘问题,在 100m 间隔的路标点条件下,单边定位精度能够达到 5cm。

**关键词:**MEMS 惯测装置;管道测绘;因子图;和积算法;牵引试验

中图分类号:TP273 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):  
文章编号:2095-8110(2019)06-0058-05



## Application of MEMS Inertial Technology for Pipe Measurement

YANG Ji-hong<sup>1</sup>, MA Tao<sup>2</sup>, WU Liang-hua<sup>2</sup>, JI Yang<sup>2</sup>

(1. A Representative Office of the Naval Equipment Department in Beijing Area, Beijing 100074, China;  
2. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Aiming at the mapping problem of small-diameter pipelines, a method of applying MEMS inertial measurement unit(IMU) in small pipeline mapping system is proposed. The initial orientation of the MEMS IMU is assigned by the landmark point information, and the inertial/odometer integration navigation information is processed in the factor graph theory. The binding error is corrected in the subsequent processing, bypassing the problem that the MEMS IMU cannot complete the initial alignment. The factor graph of the inertial/odometer integrated navigation and the recursive formula of the sum product algorithm is given, and the dragging test is carried out to verify the algorithm. The test results show that the proposed application method can effectively solve the mapping problem of small-diameter pipelines. Under the condition of 100m interval of landmarks, the single axis positioning accuracy can reach 5cm.

**Key words:** MEMS IMU; Pipe measurement; Factor graph; Sum-product algorithm; Dragging test

收稿日期:2018-07-26;修订日期:2018-11-07

作者简介:杨继红(1979-),女,硕士,工程师,主要从事惯性及组合导航方面的研究。E-mail: 13801160200@163.com

## 0 引言

管道作为石油、天然气最经济合理的运输方式,具有诸多优点,但油气管道长期服役后,会因外部干扰、腐蚀、管材和施工质量等原因造成安全隐患。因此,需要借助各种检测技术,有效地检测出管道存在的缺陷和变形,并精确定位存在缺陷和变形的位臵,为管道的完整性管理和安全评价提供依据,确保管道的安全运行。

随着惯性技术的不断发展,采用惯性技术进行测绘已经取得了许多成功的案例<sup>[1]</sup>,其中,采用惯性测量装置精确测绘出管道的地理坐标<sup>[2-6]</sup>,对管道缺陷进行准确定位,是一种十分有效的方法。并且,随着微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)技术的不断成熟,应用 MEMS 惯测技术可以对口径更小的管道进行测绘,扩大了惯性技术对管道测绘的覆盖范围。

惯性测量技术中利用载体加速度的二次积分获得载体位臵,因此,获得积分初始值也是惯性测量装置在工程应用中的重要环节。一般地,管道惯测装置的初始位臵由外部装订,初始速度为 0,而初始姿态值需要由惯测装置初始对准得到<sup>[7]</sup>。

由于 MEMS 惯性器件的测量精度通常较低, MEMS 陀螺敏感的地球角速度湮没在陀螺噪声中,无法进行自对准。因此, MEMS 惯测装置在使用中经常利用外部信息为其提供方位初始信息,如磁罗盘、双天线卫星接收机等。但由于管道测绘的具体应用条件,难以采用这些设备提供初始方位,造成 MEMS 惯测装置在管道测绘中使用不便。

本文利用地标点信息,直接为 MEMS 惯测装置装订方位信息,并利用里程计信息作为观测量,采用因子图原理和和积算法进行组合导航,利用到达路标点的信息修正初始方位。初始方位修正后,再次进行组合导航,并进行平滑计算,实现管道中心线的精确测量,测量现场无需使用其他配套设备,也无需额外操作,有利于 MEMS 惯测装置在管道测绘中的应用推广。

## 1 系统模型

### 1.1 坐标系定义

$n$ : 导航坐标系  $ox_ny_nz_n$ , 东北天地理坐标系,  $x_n$  轴指向东,  $y_n$  轴指向北,  $z_n$  轴指向天;

$b$ : 惯测装置载体坐标系  $ox_by_bz_b$ , 右前上坐标

系,  $x_b$  轴指向惯测装置的右侧,  $y_b$  轴指向惯测装置的前向,  $z_b$  轴指向惯测装置的上方;

$m$ : 里程计载体坐标系  $ox_my_mz_m$ , 右前上坐标系,  $y_m$  轴指向里程计测量轴的前向,  $x_m$  轴与  $y_m$  轴垂直指向右侧,  $z_m$  轴与  $ox_my_m$  面垂直指向上;

$i$ : 惯性坐标系  $ox_iy_iz_i$ , 与  $b$  系初始时刻指向相同;

$e$ : 地球坐标系  $ox_e y_e z_e$ ,  $ox_e y_e$  平行于赤道平面,  $x_e$  轴指本初子午线方向,  $z_e$  轴指向北极,  $y_e$  轴与其他两轴组成右手系。

### 1.2 惯性导航误差模型

本文直接给出惯性导航误差模型如下<sup>[8-11]</sup>

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\varphi}} = \boldsymbol{\varphi} \times \boldsymbol{\omega}_{in}^n + \delta\boldsymbol{\omega}_{in}^n - \mathbf{C}_b^n \delta\boldsymbol{\omega}_{ib}^b \\ \delta\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{f}^n \times \boldsymbol{\varphi} + \mathbf{V}^n \times (2\delta\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \delta\boldsymbol{\omega}_{en}^n) - (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \delta\mathbf{V}^n - \mathbf{C}_b^n \mathbf{V}^b \\ \delta\dot{\mathbf{L}} = \frac{\delta\mathbf{V}_n}{R_M + h} - \delta h \frac{\mathbf{V}_n}{(R_M + h)^2} \\ \delta\dot{\boldsymbol{\lambda}} = \frac{\delta\mathbf{V}_e}{R_N + h} \sin L + \delta L \frac{\mathbf{V}_e}{(R_N + h)^2} \tan L \sec L - \delta h \frac{\mathbf{V}_e \sec L}{(R_N + h)^2} \\ \delta\dot{\mathbf{h}} = \delta\mathbf{V}_u \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\boldsymbol{\varphi}$  为姿态失准角;  $\boldsymbol{\omega}_{in}^n$  为导航坐标系相对于惯性坐标系的转动角速度在导航坐标系上的投影;  $\mathbf{f}^n$  为加速度测量值在导航坐标系上的投影;  $\mathbf{V}^n$  为运动速度, 其中下角标分别代表速度在导航坐标系上的分量;  $L, \lambda, h$  分别为纬度、经度及高度;  $R_M$  和  $R_N$  分别为子午圈曲率半径及卯酉圈曲率半径;  $\mathbf{C}_b^n$  为捷联姿态矩阵;  $\delta\boldsymbol{\omega}_{ib}^b$  为陀螺测量误差;  $\mathbf{V}^b$  为加速度计测量误差。

### 1.3 系统状态模型

选取系统的状态变量为

$$\mathbf{X} = [\varphi_e \quad \varphi_n \quad \varphi_u \quad \delta V_e \quad \delta V_n \quad \delta V_u \quad \delta \lambda \quad \delta L \quad \delta h \quad \epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z \quad \beta_x \quad \beta_y \quad \delta K]^T$$

其中,  $\beta_x$  和  $\beta_y$  分别为里程计对应轴向的安装误差,  $\delta K$  为里程计标度因数误差。

假设惯性器件误差为零偏误差与白噪声之和, 零偏误差为随机常值; 假设里程计安装误差残差及标度因数误差在系统运行中基本保持不变, 则

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_i = 0 (i = x, y, z) \\ \dot{\nabla}_i = 0 (i = x, y, z) \\ \dot{\beta}_i = 0 (i = x, y) \\ \delta\dot{K} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)、式(2)可得系统的状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{W} \quad (3)$$

其中： $\mathbf{F}$ 为系统状态矩阵， $\mathbf{W}$ 为系统噪声，分别由陀螺测量噪声和加速度级测量噪声组成。

#### 1.4 系统观测模型

里程计输出信息为位移增量，可在一定时间内对其进行累积<sup>[12-15]</sup>，并且与同时间内的惯性导航位移做差，得到系统的观测变量，即

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \Delta\lambda \\ \Delta L \\ \Delta h \end{bmatrix} - \mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{S} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{V}}_x \\ \bar{\mathbf{V}}_y \\ \bar{\mathbf{V}}_z \end{bmatrix} - \mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{S} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式(4)得系统的观测方程为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (5)$$

其中： $\mathbf{H}$ 为观测矩阵， $\mathbf{V}$ 为观测噪声， $\Delta\mathbf{S}$ 为里程计输出累积的位移变化量。则观测矩阵为

$$\mathbf{H} = [\mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 9} \quad \Delta\mathbf{S} \cdot \mathbf{C}_b^n] \quad (6)$$

## 2 基于因子图的递推估计算法

因子图是一种用来描述如何将多变量的全局函数分解成多个局部函数乘积形式的双向图<sup>[16]</sup>，由变量节点、函数节点和边线组成。因子图的边线是指变量节点和函数节点的连线，当且仅当该变量是函数的自变量时，对应的变量节点才与对应的函数节点用边线连接。

将式(3)、式(5)表示的线性系统进行离散化，可得

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (7)$$

其中， $\mathbf{w}_k$ 和 $\mathbf{v}_k$ 分别为系统噪声和观测噪声，均为高斯白噪声，方差矩阵分别为 $\sigma_Q^2$ 和 $\sigma_R^2$ ，且不相干。

式(7)表示的系统为一阶马尔科夫系统，画出其因子图如图1所示，其中白色圆圈表示标量节点，黑色方框表示函数节点。

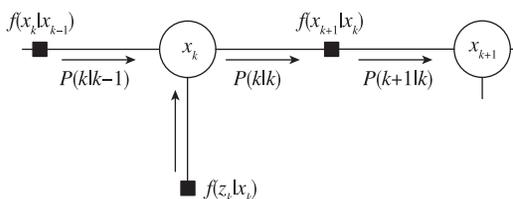


图1 组合导航系统的因子图

Fig. 1 The factor graph of integrated navigation system measurement

根据因子图的和积算法<sup>[17]</sup>，由变量节点传递给函数节点的消息表示为

$$\mu_{x \rightarrow f}(x) = \prod_{h \in n(x) \setminus \{f\}} \mu_{f \rightarrow h}(x) \quad (8)$$

由函数节点传递给变量节点的消息表示为

$$\mu_{f \rightarrow x}(x) = \sum_{\sim\{x\}} (f(X) \prod_{z \in n(f) \setminus \{x\}} \mu_{z \rightarrow f}(z)) \quad (9)$$

根据图1所示的系统因子图，将系统(7)写成条件概率密度函数的形式，可以表示为

$$f(x_1, \dots, x_k | z_1, \dots, z_k) = \prod_{j=1}^k f(x_j | x_{j-1}) f(y_j | x_j) \quad (10)$$

其中， $f(x_j | x_{j-1})$ 和 $f(y_j | x_j)$ 均服从高斯分布，且均值分别为 $\mathbf{F}_k \mathbf{x}_{k-1}$ 和 $\mathbf{H}_k \mathbf{x}_k$ ，方差分别为 $\sigma_Q^2$ 和 $\sigma_R^2$ 。

将变量节点传递给函数节点的消息表示为 $P(k|k)$ ，将函数节点传递给变量节点的消息表示为 $P(k+1|k)$ ，则根据图1和式(8)、式(9)可得

$$P(k|k) = f(x_k | z_1, \dots, z_k)$$

$$\begin{aligned} &= \int_{\sim\{x_k\}} f(x_1, \dots, x_k | z_1, \dots, z_k) d(\sim\{x_k\}) \\ &= P(k|k-1) f(z_k | x_k) \end{aligned} \quad (11)$$

$$P(k+1|k) = \int P(k|k) f(x_k | x_{k-1}) dx_k \quad (12)$$

根据式(11)和式(12)，即可实现对系统状态变量的递推估计。

## 3 试验结果

为了验证MEMS惯测技术在管道测绘系统中的应用效果，进行了管道牵引试验，试验设备连接如图2所示。试验管道长度约103.8m，牵引速度约为1m/s，共试验3次，第2次和第3次试验在管道中部约50.5m处，较第1次试验分别沉降20cm和41.5cm，共采集3个条次数据，管道中心线测绘结果如图3~图5所示。

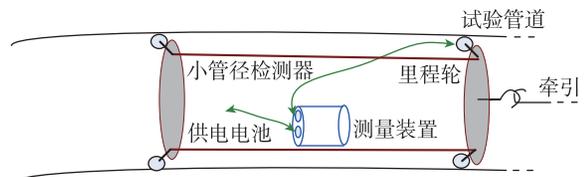


图2 牵引试验设备连接示意图

Fig. 2 Schematics of device linking in dragging tests

由于测试没有绝对基准，需要通过3次测量的重复性来说明测量结果精度，所以将3次试验的同项结果在同一曲线图中呈现。图3和图4分别为3

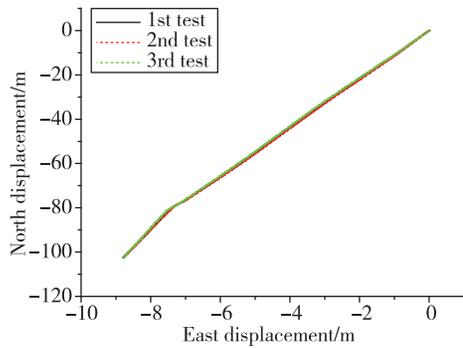


图 3 牵引测试水平位移结果

Fig. 3 Horizontal displacement in dragging tests

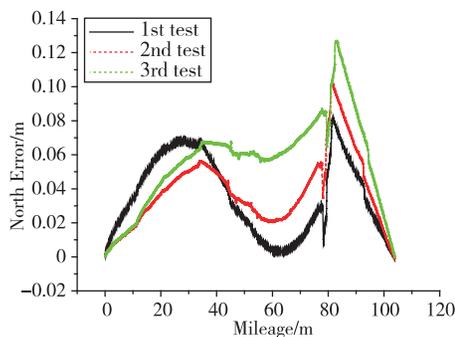


图 4 牵引测试北向误差结果

Fig. 4 North displacement error in dragging tests

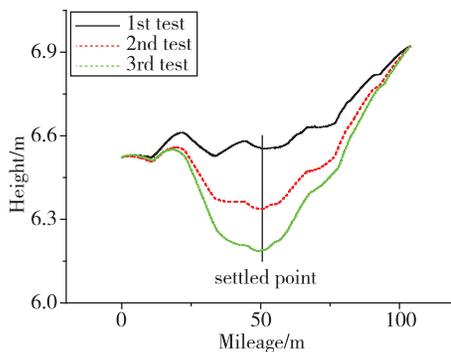


图 5 牵引测试高度结果

Fig. 5 Height in dragging tests

次试验的水平位置测量结果和高度测量结果,可以看出,3次测试的水平位移基本相同,但由于每次试验的时间长度略有不同,无法通过直接相减观察位移测量结果的重复性。因为实际管道在北向位移随里程基本呈线性变化,所以利用各次试验的北向位移结果直接与随里程线性的直线相减作为北向位移测量误差,结果见图4。可以看出,各次试验的北向位移基本相同,最大相差点在管道中部沉降点之后,为第1次试验和第3次试验的差值,约为

5cm。图5为高度测量结果,可以看出测量结果基本体现了试验中的沉降过程,在沉降点的测量结果分别为6.55m、6.33m和6.18m,最大偏差同样在5cm以内。

#### 4 结论

针对MEMS惯测技术在管道测绘系统中的应用,本文进行了如下研究:

1)建立了惯测装置在管道测绘应用中的系统模型,画出了模型的因子图,并在此基础上给出了和积算法应用与该模型的递推算法。

2)利用地标点信息,直接为MEMS惯测装置装订初始方位信息,在迭代计算的过程中,不断修正方位误差,利用到达路标点的信息修正初始方位。试验表明该方法有效,直接装订导致的初始方位误差不会影响最终测绘结果。

3)利用MEMS惯测装置进行了管道牵引试验,采用因子图及和积算法对试验数据进行了处理,处理结果显示在100m间隔的路标点条件下,单向定位精度能够达到5cm,证明了算法的适用性。

#### 参考文献

- [1] 王勇刚,周俊萍,李永江,等.基于惯性定位定向的高铁轨检仪分析研究[J].导航定位与授时,2018,5(2):70-74.  
Wang Yonggang, Zhou Junping, Li Yongjiang, et al. Analytical research of the inspecting instrument for high speed railway track based on the inertial position and azimuth determining technology[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(2): 70-74 (in Chinese).
- [2] Panev A A, Vailova N B. The navigation problem for a pipeline inspection system[J]. Moscow University Mechanics Bulletin, 2011, 66(1): 13-15.
- [3] 杨理践,李晖,靳鹏,等.管道地理位置测量系统的动态初始对准方法[J].沈阳工业大学学报,2015,37(6):656-661.  
Yang Lijian, Li Hui, Jin Peng, et al. Dynamic initial alignment method for geographic position measurement system of pipeline[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(6): 656-661 (in Chinese).
- [4] 李海军,裴玉锋,冯庆善,等.一种管道测绘系统螺旋误差精密补偿方法[J].导航定位与授时,2015,2(1):16-20.

- Li Haijun, Pei Yufeng, Feng Qingshan, et al. A method for reducing Rotatory error in pipeline measurement[J]. Navigation Positioning and Timing, 2015, 2(1): 16-20(in Chinese).
- [5] Hyun D, Yang H S, Park H S, et al. Dead-reckoning sensor system and tracking algorithm for 3-D pipeline mapping [J]. Mechatronics, 2010, 20(11): 213-223.
- [6] Wang X H, Song H. The inertial technology based 3-dimensional information measurement system for underground pipeline[J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2012, 45(3): 604-614.
- [7] 李海军, 钟润伍, 刘冲, 等. 航海光纤陀螺捷联惯导系统快速对准技术研究[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(2): 17-22.
- Li Haijun, Zhong Runwu, Liu Chong, et al. Research on rapid alignment for marine FOG SINS[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(2): 17-22(in Chinese).
- [8] 李瑞涛, 刘刚, 石志兴, 等. 快速定位定向系统设计及车载实验研究[J]. 导航与控制, 2017, 16(2): 12-18, 68.
- Li Ruitao, Liu Gang, Shi Zhixing, et al. Design and field-test of vehicle position and azimuth fast determining system[J]. Navigation and Control, 2017, 16(2): 12-18, 68(in Chinese).
- [9] 何颖, 李岁芳, 郭强. 基于地标观测的导弹发射车定位定向算法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 751-756.
- He Ying, Li Suilao, Guo Qiang. Position and orientation for missile by observing landmarks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 751-756(in Chinese).
- [10] 许晓东, 黎建军, 孙卫红, 等. 基于捷联惯性导航的非开挖管道位置检测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(1): 51-54.
- Xu Xiaodong, Li Jianjun, Sun Weihong, et al. Trenchless pipeline positioning system based on strapdown inertial navigation[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(1): 51-54(in Chinese).
- [11] 耿丽媛, 张来斌, 董绍华, 等. 利用惯性导航系统对埋地管道测量的精度分析 [J]. 油气田地面工程, 2018, 37(1): 43-46.
- Geng Liyuan, Zhang Laibin, Dong Shaohua, et al. Accuracy analysis of buried pipelines measurement by inertial navigation system[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37(1): 43-46(in Chinese).
- [12] 蔡东健, 甄宗坤. 惯性定位仪在非开挖非封闭管线测绘中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(11): 84-89, 93.
- Cai Dongjian, Zhen Zongkun. Inertial device in the application of trenchless not closed pipeline surveying and mapping [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 39(11): 84-89, 93(in Chinese).
- [13] 王美玲, 冯国强, 李亚峰, 等. 一种车辆模型辅助的MEMS-SINS导航方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(2): 209-215.
- Wang Meiling, Feng Guoqiang, Li Yafeng, et al. MEMS-SINS navigation method aided by vehicle model[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(2): 209-215(in Chinese).
- [14] 王鼎杰, 王广才, 吴杰. 微惯性/卫星组合导航高精度事后基准确定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(1): 97-102.
- Wang Dingjie, Wang Guangcai, Wu Jie. Fixed-interval smoothing post-processing algorithm for low-cost MEMS-based integrated navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(1): 97-102(in Chinese).
- [15] Kang G, Zhou Q, Liu Y, et al. Satellite rotation modulation measurement system based on ultrasonic motor[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(1): 30-36.
- [16] 陈恩庆, 肖素珍, 高新利. 因子图在卫星姿态估计中的应用[J]. 计算机仿真, 2015, 32(6): 63-66.
- Chen Enqing, Xiao Suzhen, Gao Xinli. Estimation of satellite attitude angular velocity based on factor graph[J]. Computer Simulation, 2015, 32(6): 63-66(in Chinese).
- [17] Kschischang F R, Frey B J, Loeliger H A. Factor graphs and the sum-product algorithm [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 498-519.