

文章编号 1004-924X(2014)10-2740-07

管道内的三维地理坐标检测

杨 洋¹, 吴新杰^{1*}, 杨理践², 李 宾¹

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

摘要:研究了利用管道清管器(PIG)搭载惯性测量单元(IMU)实现管道三维地理坐标测量的方法。该方法以捷联惯导系统(SINS)定位为主,并辅以校正信息的Kalman滤波估计算法来解决SINS计算的发散问题。首先,将测量装置搭载在PIG上,PIG在管道中运动的同时记录惯性信号。然后,经离线计算得到管道的三维地理坐标,并利用IMU的姿态倾角和里程轮速度对SINS计算的误差进行校正。最后,建立了9维状态量Kalman滤波模型方程,并利用扩展Kalman滤波算法进行求解。实验结果显示,该系统对于30 m管道的测量精度为0.28 m;表明通过加入校正算法,可以实现内检测条件下对管道三维地理坐标的精确测量。

关键词:管道内检测;三维地理坐标;捷联惯导;里程轮;姿态倾角;Kalman滤波

中图分类号:TP23 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2740

Inspection of three-dimensional geographic coordinate in pipeline

YANG Yang¹, WU Xin-jie^{1*}, YANG Li-jian², Li Bin¹

(1. College of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036, China;

2. School of Information Science and Engineering, Shenyang

University of Technology, Shenyang 110870, China)

* Corresponding author, E-mail: wuxinjie@lnu.edu.cn

Abstract: A three dimensional geographic coordinate measuring method by using a Pipeline Inspection Gauge(PIG)carried with a Inertial Measurement Unit(IMU)is explored. The method uses a Strapdown Inertial Navigation System (SINS) to position and is accompanied by a Kalman filter estimation algorithm to correct information to solve the SINS divergence calculation problem. The measuring device is mounted in the PIG. The PIG records the inertial signals when the PIG moving in the pipeline. Then, three dimensional geographic coordinates are obtained by off-line calculation, and the attitude incline of the IMU and the speed of the odometer are used to correct the error of the SINS calculation. Finally, a nine dimensional Kalman filter model equation is established, and it is calculated by using the extended Kalman filter algorithm. The experiment for a 30 m pipeline shows that the measurement accuracy is 0.28 m, which indicates that the three dimensional geographic coordinate of the pipeline is able to be measured accurately in in-detecting conditions by the proposed correction algorithm.

Key words: in-detecting pipeline; three-dimensional geographic coordinate; strapdown inertial navigation; odometer; attitude incline; Kalman filter

收稿日期:2014-02-05;修订日期:2014-03-17.

基金项目:辽宁大学青年基金资助项目(No. 2013LDQN10)

1 引 言

管道输送是石油、天然气长距离输送的主要手段^[1],管道内检测是目前常用的管道检测方式,它可以实现对管道输送的在线检测,预报变形引起的应力集中、卡堵、管壁缺陷等各种管道异常情况^[2],对于管道的安全运行和管道铺设地区的环境保护具有重要作用。管道内检测利用管道清管器(PIG)进行检测,PIG 借助管道内传输的介质在管道中运动,可以定期对管道内聚积的砂、泥和石蜡进行清洗,防止管道卡堵^[3]。将测量装置搭载在 PIG 上,就可以在清管的同时对管道进行定期的检测^[4]。管道内检测时需要定位出缺陷的具体位置;通过对海底管道弯曲程度的定位检测,利用管道三维地理坐标找出管道上承受最大应力的危险区间^[5],这些都需要内检测能够提供管道三维地理坐标的精确信息,但是传统内检测法采用里程轮测量,只能得到 PIG 在管道中移动的距离^[6],所以需研究一种新的测量方法。

由于管道常埋在地下或浮于海底,管道壁又有屏蔽作用,常规的全球定位系统(GPS)、地磁等定位方法均无法使用^[7]。文献[8]采用极低频磁脉冲穿透金属管道对机器人进行了跟踪定位,由于接收信号能力受管壁厚度等因素影响,使得连续测量能力受到限制。文献[9]采用光流场方法与捷联惯导系统(SINS)组合进行定位,但光流场计算需要排空管道以采集图像信号,在内检测环境下,PIG 浸在管道输送介质中,无法进行图像检测。本文提出了采用 SINS 结合里程轮和倾角测量的组合定位方法,该方法适于内检测环境要求,可以实现连续测量。针对 SINS 航迹推算的累计误差造成测量结果迅速发散的问题,利用里程轮测量的距离信息对 SINS 计算的距离进行校正,降低了水平通道误差发散的影响^[10];利用惯性测量单元对重力加速度 g 的姿态倾角校正 SINS 的姿态矩阵,去除了高度通道误差的影响。最终建立包括速度误差,姿态角误差,位置误差的 9 维状态量 Kalman 滤波校正算法。进行了实验研究验证算法有效性,实验计算的轨迹结果相对误差为 0.93%。结果表明:在内检测条件下,通过本文设计算法可以保证对管道三维地理坐标的有效测量。

2 管道内检测三维地理坐标测量系统

2.1 测量系统的描述

PIG 由一个刚性骨架和前后两节皮碗构成,皮碗唇部对管道内径取 2%~5% 的过盈量,将清管器利用发球阀压入管道中,这样可以保证前进过程中 PIG 中线一直与管道中轴线重合,减少测量误差。利用管道内输送介质在前后皮碗的压力差作为动力,PIG 紧贴管壁向前运动,PIG 搭载着密闭的电源,惯性传感器及数据采集和记录装置,可以记录运动的惯性数据。当 PIG 从管道的起点运动到终点后,将数据取出进行离线计算。PIG 工作示意如图 1 所示。

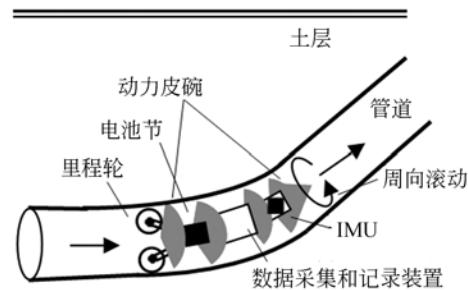


图 1 PIG 工作示意图

Fig. 1 PIG working diagram

惯性传感器采用功耗较低,抗干扰能力强,体积轻巧的 MEMS 型器件,选择 3 个加速度计和 3 个陀螺仪按三维坐标系方向固定为惯性测量单元(IMU),三维方向定义为: x 轴指向 PIG 前进方向的右侧, y 轴指向 PIG 前进方向, z 轴垂直于 PIG 指向上,将 3 个轴所表示的坐标系称为载体坐标系,用 b 表示^[11]。 y 轴方向与里程轮测量的速度方向相同, b 系坐标轴定义如图 2 所示^[12], a_x^b 、 a_y^b 和 a_z^b 表示加速度计测量的线加速度方向, ω_x^b 、 ω_y^b 和 ω_z^b 表示陀螺仪测量的角速度转向。

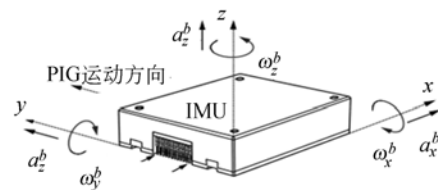


图 2 IMU 方向与 b 坐标系示意图

Fig. 2 Diagram for the directions of IMU with b coordinate system

2.2 SINS 定位原理

SINS 中的 strapdown 即“捆绑”的意思,表示将惯性测量器件(IMU)直接固定在载体上,利用航迹推算进行定位^[13];已知载体的初始位置和姿态,利用加速度对时间求二阶积分,得到采样时间内载体的位移量,利用位移量更新上一时刻的位置信息,得到载体所有时刻的位置信息。SINS 将 IMU 固定在载体上,测得的加速度矢量信号为 b 系下的观测值,需要将其转换到导航坐标系下进

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} \cos \text{roll} \cos \text{yaw} + \sin \text{roll} \sin \text{yaw} \sin \text{pitch} & \sin \text{yaw} \cos \text{pitch} & \sin \text{roll} \cos \text{yaw} - \cos \text{roll} \sin \text{yaw} \sin \text{pitch} \\ -\cos \text{roll} \sin \text{yaw} + \sin \text{pitch} \cos \text{yaw} \sin \text{roll} & \cos \text{yaw} \cos \text{pitch} & -\sin \text{roll} \sin \text{yaw} - \cos \text{roll} \cos \text{yaw} \sin \text{pitch} \\ -\sin \text{roll} \cos \text{pitch} & \sin \text{pitch} & \cos \text{pitch} \cos \text{roll} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

通过姿态矩阵将 b 系观测向量映射到 n 系,如式(2),因此姿态矩阵的误差对定位的影响最大。

$$\mathbf{A}^n = \mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} a_x^b \\ a_y^b \\ a_z^b \end{bmatrix}. \quad (2)$$

最终在 n 系上得到载体运动的轨迹信息。严格的 SINS 计算所需加速度应是载体相对于绝对静止坐标系的观测值,而文中测得的 \mathbf{A}^b 除所需加速度外还包含由于地球自转造成的哥式加速度和重力加速度。由于选用的中等精度加速度计和陀螺仪,其传感器灵敏度远大于地球自转角速度值,因此可以将哥式加速度忽略不计;可以通过转换后的 n 系 z 轴加速度减去 g 值去除重力加速度分量:

$$\begin{bmatrix} a_x^n \\ a_y^n \\ a_z^n \end{bmatrix} = \mathbf{A}^n - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: a_x^n 、 a_y^n 和 a_z^n 表示 SINS 定位航迹推算所需的加速度值。SINS 因为采用航迹推算,误差不断累积,且加速度测量信号误差在位移计算上增长速度为时间的平方,所以位置计算结果在短时间内迅速发散,需要对误差进行研究及去除。

3 三维地理坐标定位算法

3.1 SINS 算法误差分析

根据误差对计算结果的影响,提出误差比较原则:如果为独立误差,依据各误差相对的大小来

行定位。导航坐标系用 n 表示,规定载体起始运动的前进方向为 n 系的 y 轴正向,前进方向右侧为 x 轴正向,重力加速度方向为 z 轴负向。 b 系 z 轴相对于 n 系的转角用 yaw 表示; b 系 y 轴相对于 n 系的转角用 roll 表示; b 系 x 轴相对于 n 系的转角用 pitch 表示。这 3 个角都依据右手定则:右手拇指指向坐标轴正向,其余四指握拳,四指指向为转动方向。陀螺仪的角速度信号对时间求一阶积分得到每个采样时间的转角,建立姿态矩阵:

处理,当误差小于另一误差的 10%,可以忽略不计;如误差具有相关性,将其分解为独立误差项,再省略相对小量。

分析 SINS 定位的各种误差源,首先为信号的测量误差,包括零点漂移误差,短时稳定度,尺度因数误差和温漂误差等,按误差比较原则,取主要误差为零点漂移和短时稳定度,将其看作测量信号的零偏值。然后计算误差,包括舍入误差,量化误差和耦合误差等,其中传递误差为主要误差项。信号零偏在状态量更新计算中产生传递误差,这些误差之间存在相关性,状态量包括姿态矩阵, n 系速度矢量和位移矢量。由式(2)可知,速度和位置误差都与姿态误差相关,因此姿态误差为主要误差项,陀螺仪零偏对计算误差的影响要大于加速度计。在每一步航迹推算前,应对各种计算误差进行估计,对计算结果进行误差补偿,以降低误差累计的影响。

3.2 里程计算和倾角计算

里程轮信号可测得 PIG 在管道中移动的位移增量,利用位移增量除以位移时间可得 PIG 在 n 系的平均速度矢量:

$$\begin{bmatrix} v_x^n \\ v_y^n \\ v_z^n \end{bmatrix}_t = \mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} 0 \\ v_y^b \\ 0 \end{bmatrix}_t = \mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_t + \mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{M \cdot l}{t_s} \\ 0 \end{bmatrix}_t, \quad (4)$$

式中: n 为采样时间内里程轮实际计数值, l 为每单位计数 PIG 移动的位移, t_s 为采样时间, M 为计数误差。同样,SINS 计算通过式(5)可得 PIG 在 n 系的速度矢量:

$$\begin{bmatrix} v_x^n \\ v_y^n \\ v_z^n \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} v_x^n \\ v_y^n \\ v_z^n \end{bmatrix}_{t-1} + t_s \cdot \mathbf{C}_b^n \begin{bmatrix} a_x^b \\ a_y^b \\ a_z^b \end{bmatrix}_t - t_s \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}_t. \quad (5)$$

每一时刻里程轮计算的误差都是时间独立的,而 SINS 的误差与前一时刻相关,所以利用两种方法的互补性对速度矢量进行组合测量。

管道定位为近地表面导航,可将 g 看成定值,在 PIG 静止情况下, g 在 b 系的映射值只与 pitch 和 roll 有关,可以利用式(6)进行倾角计算(省略 roll 的计算,以 pitch 为例)。

$$\text{pitch} = \arctan\left(\frac{a_x^b}{\sqrt{(a_y^b)^2 + (a_z^b)^2}}\right). \quad (6)$$

但是在 PIG 运动过程中还受到前进方向的加速度,可以在 b 系中减去这一分量,再按式(6)进行计算。前进方向加速度可利用里程轮与 SINS 组合测量的速度矢量求得。SINS 可根据(1)式得到 pitch 和 roll:

$$\text{pitch} = \arcsin \mathbf{C}_b^n(3, 2). \quad (7)$$

与里程轮一样,倾角计算的误差也认为时间独立,而 SINS 的姿态角误差是时间相关,可以利用两者的互补性进行组合测量。

3.3 Kalman 滤波校正算法

将 SINS 计算的误差作为 Kalman 滤波估计的状态量,如式(8)。

$$\mathbf{X} = [\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z, \delta v_x^n, \delta v_y^n, \delta v_z^n, \delta d_x^n, \delta d_y^n, \delta d_z^n], \quad (8)$$

式中: φ_x 、 φ_y 和 φ_z 为姿态角误差, δv_x^n 、 δv_y^n 和 δv_z^n 为 n 系速度误差, δd_x^n 、 δd_y^n 和 δd_z^n 为 n 系位移误差,将里程轮和倾角计算的结果与 SINS 计算的结果相减:

$$\mathbf{Z} = (D_{\text{truth_value}} + \Delta_{\text{SINS}}) - (D_{\text{truth_value}} + \Delta_{\text{assist}}) = \Delta_{\text{SINS}} - \Delta_{\text{assist}}, \quad (9)$$

式中: Δ 表示误差, $D_{\text{truth_value}} + \Delta_{\text{SINS}}$ 为 SINS 计算值, $(D_{\text{truth_value}} + \Delta_{\text{assist}})$ 为里程轮和倾角计算值,可以看出,计算结果等于两种不同性质误差的差值。将 \mathbf{Z} 看成是观测向量,在 SINS 计算一段时间后,按照误差比较原则,相对于时间相关误差 Δ_{SINS} ,可将 Δ_{assist} 忽略不计,因此可以建立 9 维 Kalman 滤波估计算法对 Δ_{SINS} 进行估计和补偿。

根据式(8)定义的状态量建立 Kalman 滤波状态方程:

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k-1} \cdot \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{L} \cdot \mathbf{w}_k, \quad (10)$$

式中: \mathbf{X}_k 表示当前状态向量, \mathbf{X}_{k-1} 表示上一时刻状态向量, Φ_{k-1} 表示状态转移矩阵, \mathbf{W}_k 为状态噪声向量,将测量误差的零偏看作状态噪声向量, \mathbf{L} 为噪声转移矩阵。根据式(9)建立 Kalman 滤波测量方程:

$$z_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k - v_k, \quad (11)$$

式中: \mathbf{H}_k 为测量转移矩阵, v_k 为测量噪声,将里程轮与倾角计算的误差作为 v_k 。因为 \mathbf{X}_k 、 \mathbf{W}_k 和 v_k 两两独立,并且都为正态分布,所以符合计算 Kalman 滤波模型要求,将 \mathbf{W}_k 和 v_k 看作均值为 0,方差为常数值的白噪声,利用扩展 Kalman 滤波算法对滤波模型进行解算。定位算法整体框图如图 3 所示。

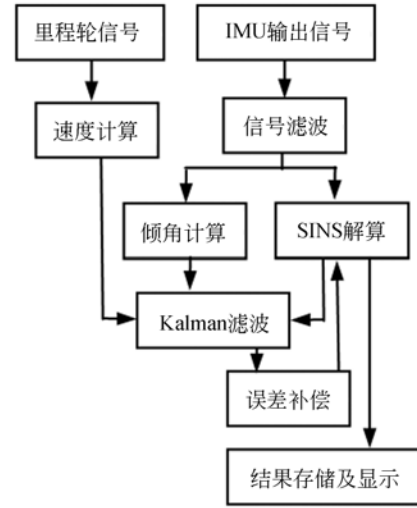


图 3 定位算法框图

Fig. 3 Block diagram of positioning algorithm

4 实验及结果分析

模拟管道内检测环境搭建简易实验平台来验证算法有效性,为实验方便,将管道与 PIG 成比例缩小,但实验与实际的检测条件一致,管道内径为 10 cm,长度为 30 m,埋在地下,实验的管道和 PIG 实物如图 4 所示。

利用拖曳装置牵引 PIG 在管道中通过,在拖曳装置上设置里程计数器,通过绳的牵引长度测量 PIG 在管道中的位移,计一次数对应移动 1 mm 距离。将 IMU 封闭在 PIG 中,IMU 选择 AD 公司的 ADIS16375,这是一款中等精度



图 4 实验管道与 PIG 实物图

Fig. 4 Experimental pipeline and PIG diagram

IMU,使用三轴数字式陀螺仪与加速度计,其广泛应用于精密仪器、机器人和井下仪器等领域,主要参数及性能如表 1 所示。

采样时间为 1.5 ms,采用如图 3 的计算方法进行轨迹计算。软件计算采用 matlab7.14,计算机 CPU 为 Intel Core i5,主频 1.8 GHz,内存 4 GB,计算总平均用时为 6.2 s。计算的 n 系速度矢量如图 5 所示,姿态角如图 6 所示, n 系位置矢量如图 7 所示。实际轨迹与计算轨迹如图 8 所示。

表 1 主要参数及性能

Tab. 1 Main parameters and performance

器件性能	性能指标	器件	参数类型	参数值
电源	3.3 V	陀	零点漂移	$\pm 1(^{\circ})/s$
抗冲击	2 000g	螺	短时稳定度	$0.003 3(^{\circ})/s$
		仪	测量范围	$\pm 300(^{\circ})/s$
工作温度	-40 $^{\circ}C$ 至	加	零点漂移	$\pm 16mg$
	+105 $^{\circ}C$		速度计	短时稳定度
带宽	330 Hz		测量范围	$\pm 18g$

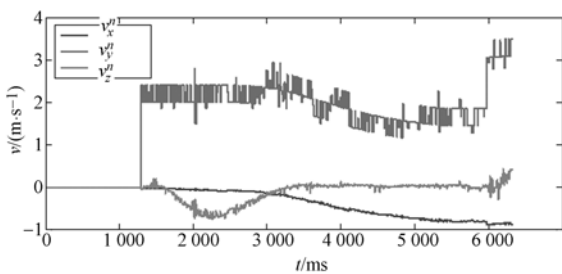


图 5 n 系速度矢量计算结果

Fig. 5 Speed vector calculation results in n coordinate

由图 8 结果可得,与实际轨迹相比,测量精度为 0.28 m,相对位置误差为 0.93%。如果未加本

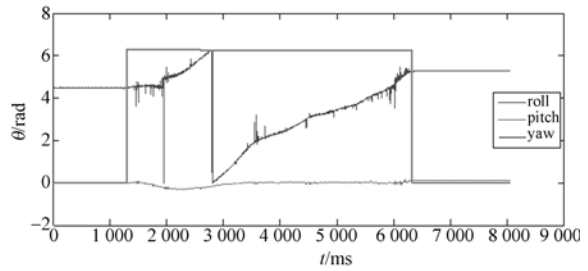


图 6 姿态角计算结果

Fig. 6 Attitude angle calculation results

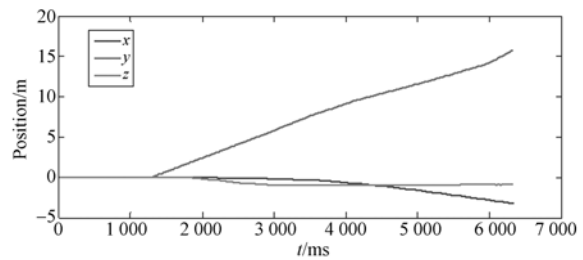


图 7 位置计算结果

Fig. 7 Position calculation results

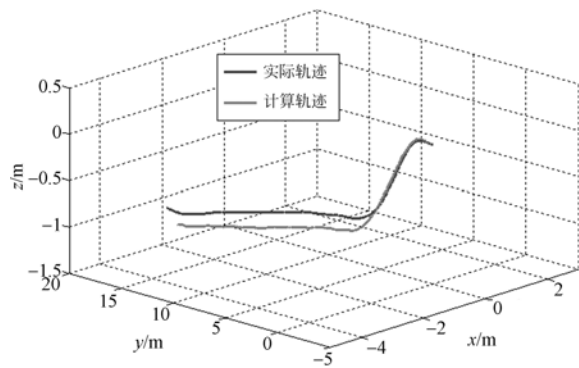


图 8 PIG 计算轨迹

Fig. 8 PIG calculation trajectory

文的 Kalman 滤波算法,则结果在开始计算时就迅速发散,通过本文设计的算法实现了内检测条件下管道三维地理坐标的精确测量。

5 结 论

针对管道内检测时受到的电磁屏蔽,高温高压等恶劣环境限制,研究利用 PIG 搭载 IMU 的方法实现管道三维地理坐标测量。实现该技术的关键是解决 SINS 计算在短时间内发散的问题,这一问题是由于 SINS 航迹推算造成的误差累计引起的。针对 SINS 定位的误差累计问题,提出

Kalman 滤波估计算法:利用 Kalman 滤波对 SINS 计算误差进行估计和补偿,利用扩展 Kalman 滤波算法对非线性滤波方程进行求解。模拟实际环境搭建了实验平台,在测量 30 m 管道情

况下,相对误差为 0.93%。实验结果表明:通过所设计的算法,可解决 SINS 定位的误差累计问题,使解算结果短时间内不再发散,实现了内检测条件下管道三维地理坐标的有效测量。

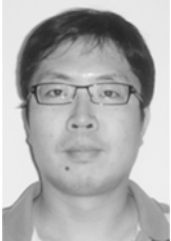
参考文献:

- [1] 任魁杰,鲁岑. 油气管道在线检测技术研究综述[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(1): 8-9.
REN K J, LU C. Review of researching on oil and gas pipeline online detection technology [J]. *China Petroleum and Chemical Industry Standards and Quality*, 2012, 32(1): 8-9. (in Chinese)
- [2] 龚文,何仁洋,赵宏林,等. 国外油气管道内检测技术的前沿应用[J]. 管道技术与设备, 2013, 8(4): 24-26.
GONG W, HE R Y, ZHAO H L, *et al.*. Cutting-edge applications of foreign in-line inspection technologies to oil and gas pipeline [J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2013, 8(4): 24-26. (in Chinese)
- [3] 曹建树,林立,李杨,等. 油气管道机器人技术研发进展[J]. 油气储运, 2013, 32(1): 1-6.
CAO J SH, LIN L, LI Y, *et al.*. Research and development progress in oil and gas pipeline robotics [J]. *Oil and Gas Storage and Transportation*, 2013, 32(1): 1-6. (in Chinese)
- [4] EUN H S, NASER E S. Navigation kalman filter design for pipeline pigging [J]. *The Journal of navigation*, 2005, 58(1): 283-295.
- [5] 李成钢,张敬安,郑辉,等. 海底管道悬跨维护技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 4(7): 112-115.
LI CH G, ZHANG J A, ZHENG H, *et al.*. Study on Submarine pipeline span maintenance technology [J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2013, 4(7): 112-115. (in Chinese)
- [6] 宋志东,新世久,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, 3(1): 12-13.
SONG ZH D, JIN SH J, LI Y B, *et al.*. Design and implementation of algorithms of selecting PIG odometer wheels signals [J]. *Pipeline Technique and Equipment*. 2006, 3(1): 12-13. (in Chinese)
- [7] 刘海芳,王瑞,钟诗胜. 机载激光对埋地管道的自主定位[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1723-1729.
LIU H F, WANG D, ZHONG SH SH. Helicopter borne laser autonomous positioning of buried pipeline [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1723-1729. (in Chinese)
- [8] 魏明生,童敏明,訾斌,等. 管道机器人无线电磁自适应定位技术[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 772-781.
TONG M SH, TONG M M, ZI B, *et al.*. Adaptive localization method based on wireless magnet sensors for pipeline robots [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 772-781. (in Chinese)
- [9] DONGJUN H, HYUN S Y. Dead-reckoning sensor system and tracking algorithm for 3-D pipeline mapping [J]. *Mechatronics*, 2010, 20(11): 213-223.
- [10] JAEJONG Y, JANG G, CHAN G P. An off-line navigation of a geometry PIG using a modified non-linear fixed-interval smoothing filter [J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(1): 1403-1411.
- [11] 杨理践,杨洋,高松巍,等. 管道地理坐标内检测的里程校正算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 26-31.
YANG L J, YANG Y, GAO S W, *et al.*. Odometer correction algorithm for geographic coordinate detection in pipeline [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(1): 26-31. (in Chinese)
- [12] XIAO Y K. INS algorithm using quaternion model for low cost IMU [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2004, 1(46): 221-246.
- [13] 张荣辉,贾宏光,陈涛,等. 基于四元数法的捷联式惯性导航系统的姿态解算[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1963-1970.
ZHANG R H, JIA H G, CHEN T, *et al.*. Atti-

tude solution for strapdown inertial navigation system based on quaternion algorithm [J]. *Opt. Pre-*

cision Eng., 2008, 16(10): 1963-1970. (in Chinese)

作者简介:



杨 洋(1978-),男,辽宁沈阳人,博士,讲师,2013年于沈阳工业大学获得博士学位,主要从事测控技术及仪器方面的研究。E-mail: yangyang_red@163.com



吴新杰(1964-),男,辽宁沈阳人,博士,教授,1986年、1989年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2001年于东北大学获得博士学位,主要从事层析成像技术、信号处理方法及其应用等方面的研究。E-mail: wuxinjie@lnu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)