

文章编号: 2095-2163(2019)01-0219-06

中图分类号: TB22

文献标志码: A

基于惯性导航的地下管线轨迹测量系统

王文东, 陈 强, 赵华山

(上海工程技术大学, 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 针对地下管网轨迹测量中惯性导航元件普遍存在的噪声严重、精度不高的问题, 提出了一种新型仪器结构设计, 使用互补滤波进一步降低误差。通过引入偏心旋转机构组成半平台——半捷联式结构设计, 以 STM32F103 单片机作为数据采集单元, LabView 和 Matlab 开发上位机完成数据读取与坐标解算的工作。陀螺仪和加速度计的输出数据进行互补滤波来消除噪声、抑制姿态角漂移, 同时分析了动态变化对测量的影响。试验证明, 新型仪器设计与滤波算法的引入能够有效提高解算精度, 在地下管网非开挖工程领域具有一定实用性。

关键词: 捷联惯导; 多传感器融合; 地下管网; 互补滤波; 姿态解算

Application of strapdown inertial navigation system in underground pipe network trajectory measurement

WANG Wendong, CHEN Qiang, ZHAO Huashan

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] Aiming at the serious noise and low accuracy of inertial measurement unit in underground pipeline trail measurement, a new instrument structure design is proposed. Then complementary filtering is used to further reduce errors. By introducing an eccentricity rotating mechanism to form a half platform-half strapdown structure design, the STM32 MCU is used as a data acquisition unit, and LabView and Matlab develops the upper computer system to complete the work of data reading and coordinate calculation. Finally, the output of gyroscope and accelerometer could be complementarily filtered to eliminate noise and restrain attitude angle drift. The influence of axial-line velocity on measurement is also taken into account. The experiment proves that the introduction of new instrument design and filtering algorithm can effectively improve the accuracy of calculation, and has certain practicality in the field of underground pipe network trenchless engineering.

[Key words] SINS; multi-sensor fusion; underground pipeline network; complementary filtering; attitude calculation

0 引言

随着城市建设的迅速发展, 相比于传统的开挖——填埋式施工, 非开挖技术因其施工周期短、环境影响小、综合成本低等独特优势, 正逐渐成为市政工程施工的主要方式, 尤其在穿越公路、居民区、古迹等无法进行开挖作业的地下管道施工中被广泛应用^[1]。在旧管线的修复更换与新管道的铺设施工中, 为保证安全顺利钻进, 必须先获得现有地下管线的分布情况, 才能制定正确的工艺技术, 精确规划钻孔轨迹。并在项目完成后, 根据管线实际精确走向更新地下管网信息系统^[4]。然而, 现有地下管线的三维轨迹数据的缺失与误差, 导致施工时只能通过水平或垂直方向上尽可能增大与现有管线的偏差距离, 从而保证安全系数。这在城市地下空间资源

日益紧张的环境下十分不可取^[2]。

本文提出了一种捷联式与平台式相结合的惯性测量系统, 在平台前进轴向及垂直方向上采用捷联式, 在横滚方向上设置一个偏心自重稳定平台, 避免了垂直方向上陀螺仪的翻转, 从而将传统惯导测量系统中 3 轴陀螺仪的数学解算得以简化, 该结构结合了平台式及捷联式惯性测量系统的优点, 没有复杂的稳定平台, 将对传感器的综合要求通过接触测量得以优化^[3]。

在数据分析及轨迹解算上, 首先将陀螺仪输出的角速度依据旋转关系建立姿态角微分方程, 利用互补滤波将加速度计得到的姿态数据与陀螺仪的数据进行融合, 从而降低陀螺仪漂移误差及加速度计的高频噪声, 然后分析姿态角的动态变化情况并予以修正, 最后通过实测验证了方案的有效性。

作者简介: 王文东(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 惯性导航、误差分析、嵌入式开发; 陈 强(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 传感与电子信息、软件工程、地球探测与信息技术; 赵华山(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式软件及应用、地球物理探测、非开挖工程设计。

收稿日期: 2018-10-09

哈尔滨工业大学主办 ◆ 科技创见与应用

1 捷联惯导系统概述

1.1 捷联惯导系统原理

惯性导航系统就是利用惯性元件测量物体的加速度和角速度,通过运算获得载体位置、速度及姿态信息的导航系统。在平台式惯性导航系统中,使用陀螺仪来跟踪载体相对惯性空间的旋转运动,通过电机驱动框架来隔离振动,工作条件较好,平台能够直接建立稳定的参考坐标系,计算量小,但结构复杂,尺度不好控制^[5]。捷联式惯性导航系统是通过将陀螺仪和加速度直接固连在运载载体上,分别测量其角运动信息和线运动信息,最后计算机解算出载体的速度位置信息。捷联惯导系统移除了复杂的机电平台,简化结构、降低成本,提高了可靠性^[6]。

$$C_n^b = \begin{pmatrix} \cos(\theta)\cos(\psi) & \sin(\psi)\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\varphi) - \sin(\psi)\cos(\varphi) & \sin(\psi)\sin(\theta)\sin(\varphi) + \cos(\psi)\cos(\varphi) & \sin(\varphi)\cos(\theta) \\ \sin(\theta)\cos(\psi)\cos(\varphi) + \sin(\varphi)\sin(\psi) & \sin(\psi)\sin(\theta)\cos(\varphi) - \cos(\psi)\sin(\varphi) & \cos(\theta)\cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (1)$$

2 多传感器融合测量方案

2.1 对捷联惯导系统的改进

传统的惯性测量系统利用3轴陀螺仪及多个加速度计,从而获得3个轴向上的线加速度及角速度。在已竣工铺管轨迹的测量中,最终目的是获得现有管线上各点的三维坐标,从而绘制出其轨迹图形。仪器在测量过程中与管道直接发生接触,从而可以忽略某些无法通过接触测量获得的物理量^[9]。

测量系统需要测量的物理量至少有 x 轴方向上的线速度 v_x ,绕 x 轴转动的横滚角 φ 、绕 y 轴转动的俯仰角 θ 以及绕 z 轴转动的角速度即方位角速度 ω_z 。

(1) 线运动的测量

与传统惯性测量系统不同的是,对已竣工管道进行轨迹测量时,测量仪器与管道内壁能够直接接触,由此将大为简化整个测量系统,并使得测量结果相对传统开放式惯性测量系统更为精密准确。

在实际测量中,仪器只能沿已竣工铺管轴线方向上移动,无法在管道轴线的垂直方向上进行活动。换言之,在管道横截面的2个轴线方向上对仪器活动的自由度已做了限制,因此需要测量的只是在管道轴线方向上的线速度及位置。

(2) 角运动的测量

传统的惯性测量可选参考物理量主要有地磁强度、重力分布以及管口位置坐标。其中,管口位置坐

1.2 参考坐标系的选择

捷联惯导系统的姿态解算重点之一就是不同坐标系之间进行测量和坐标量的转换。载体坐标系(以下简称 b 系),原点固定为运载体的重心, x 轴指向仪器行进方向, y 轴为运动方向的正右方, z 轴垂直 $x-y$ 平面向下。导航坐标系,也即数据解算的坐标系,通常选择地理坐标系(以下简称 n 系),即指定北、东、地方向作为三维坐标轴^[7]。载体坐标系和导航坐标系之间的夹角就是载体姿态角,分别为绕 z 轴转动的方位角 ψ ,绕 y 轴转动的俯仰角 θ 以及绕 x 轴转动的横滚角 φ 。横滚角 φ 、俯仰角 θ 、方位角 ψ 的正负选择符合右手定则。导航坐标系变换到载体坐标系的旋转矩阵如式(1)所示^[8]。

标即载体系统初始坐标,可由全站仪获得。针对其余参考量的测量,常用测量单元有陀螺仪、加速度计和电子罗盘。但陀螺仪存在温漂,姿态误差会随时间累积,采用高精度陀螺仪会提高系统成本,而加速度计受震动及平动加速度影响较大,短时间内精度较低;电子罗盘易受磁性物体干扰影响;故均无法独立使用^[10]。

2.2 多传感器融合方案

由上述分析可知,可靠的测量方案需要多种传感器配合,进而对多种传感器的测量数据融合解算确定姿态角度。这里选用单轴陀螺仪与两个加速度计来构成测量机构。仪器在管道行进过程中,陀螺仪的敏感轴会由于管道走势偏离垂直方向,可以通过俯仰角 θ 及滚动角 φ 进行修正。因此根据 x 轴线速度 v_x 、俯仰角 θ 以及方位角速度 ω_z 就能够确定仪器在管道中的姿态及位置。在测量中,俯仰角的变化取决于管道的高低走势,在管道铺设时已经决定了其变化范围,可直接测量。横滚角的变化由仪器在行进过程中绕管道轴线转动决定,通过转动平台的引进,其变化范围被限制在一定范围之内^[11]。整个测量系统原理框图如图1所示。

2.3 姿态角的求取

俯仰角 θ 和横滚角 φ 的测量基准为重力加速度 $b = (0, 0, -g)^T$,方位角角速度 ω 的测量基准为测量系统自身角运动惯性。当运动导致载体姿态角度

变化时, x 轴及 y 轴上测得的重力加速度分量可等效为向量 b 依次绕 y 轴、 x 轴转动 θ 角和 φ 角。因为

$$\begin{pmatrix} a_{xb} \\ a_{yb} \\ a_{zb} \end{pmatrix} = C_n^b \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g \sin(\theta) \\ -g \cos(\theta) \sin(\psi) \\ -g \cos(\theta) \cos(\psi) \end{pmatrix} \quad (2)$$

所以, 俯仰角:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a_{xb}}{\sqrt{a_{yb}^2 + a_{zb}^2}} \right) \quad (3)$$

横滚角:

$$\psi = \tan^{-1} (-a_{yb} \cdot a_{zb}) \quad (4)$$

方位角需要根据陀螺仪重力平台相对水平面的倾斜角来修正。

$$\omega_z = \frac{\omega_m}{\cos(a_i)} = \frac{\omega_m}{\cos(\theta) \cdot \cos(\varphi)} = \frac{\omega_m}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta) - \sin^2(\varphi)}} \quad (5)$$

其中, ω_m 为陀螺仪输出角度, a_i 为旋转平台的倾斜角度。

载体坐标系中方位角的角速度 ω_m 与绕导航坐标系 Z 轴的方位角速度 ω_z 的关系为:

$$\omega_m = \begin{bmatrix} \omega_{m,x} \\ \omega_{m,y} \\ \omega_{m,z} \end{bmatrix} = C_0^m \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_z \cdot \sin(\theta) \\ \omega_z \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) \\ \omega_z \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (6)$$

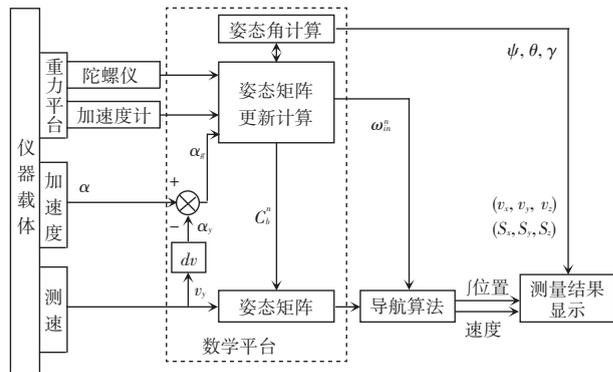


图 1 地下管线轨迹惯性测量系统原理框图
Fig. 1 Schematic diagram of inertial measurement system for underground pipeline trajectory

3 多传感器数据融合及轨迹求取

在姿态角求解中, 因为陀螺仪短时精度较高, 但长期运行后会产生漂移, 在后续积分运算中出现累积误差, 而加速度计动态响应较慢, 因此正好可以在频域上相互补充, 对其进行融合解算得到最佳姿态角^[14]。

3.1 互补滤波在数据融合中的应用

在多种传感器组合而成的捷联惯导系统中, 需要通过分析对比选择最优的数据融合方法。常用的数据融合算法有: 互补滤波 CF (Complementary Filter)、扩展卡尔曼滤波 EKF (Extended Kalman Filter)、无迹卡尔曼滤波 UKF (Unscented Kalman Filter)、梯度下降法 GD (Gradient Descent) 等^[12]。其中 EKF 是一种应用广泛的高精度姿态解算算法, 其缺陷是:

- (1) 计算量较大, 其雅可比矩阵不易实现。
- (2) 当系统的非线性特性不明显时, 线性化误差和截断误差会增大, 使滤波稳定性变差。
- (3) 噪声要求较高。

UKF 相对于 EKF 提高了收敛速度和估算精度, 但进一步增大了计算量。应用 GD 在进行姿态解算时, 性能相对卡尔曼滤波进一步提高, 但收敛速度比共轭梯度法及牛顿法较慢^[13]。互补滤波运算快捷, 能有效滤除噪声和抑制漂移。互补滤波就是利用加速度计得到的数据对陀螺仪解算的姿态角度进行修正。其结构如图 2 所示。

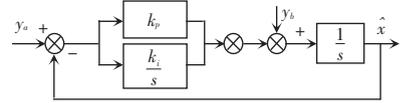


图 2 互补滤波器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of complementary filter structure

可取 $C(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$, 设 $G_H(s) = \frac{s}{s + C(s)}$, $G_L(s) = \frac{C(s)}{s + C(s)}$, 可得 $G_H(s) + G_L(s) = 1$ 。

其中, 高通滤波器 $G_H(s)$ 能够将陀螺仪的低频噪声过滤掉, 低通滤波器 $G_L(s)$ 能够过滤加速度计的高频噪声^[14]。根据前面解算的各方位角数据, 取

$$\begin{cases} \hat{\psi} = \psi + k(\psi_a - \psi) \\ \hat{\theta} = \theta + k(\theta_a - \theta) \\ \hat{\varphi} = \varphi + k(\varphi_a - \varphi) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $[\psi \ \theta \ \varphi]$ 为陀螺仪解算得到的姿态角, $[\psi_a \ \theta_a \ \varphi_a]$ 为加速度计解算得到的姿态角, $[\hat{\psi} \ \hat{\theta} \ \hat{\varphi}]$ 为融合后的姿态角。 k 的取值取决于加速度合力与重力加速度的比值, 这里取经验值 0.02^[15]。

3.2 姿态角的动态变化

在测量中注意到, 整个测量过程是一个不断变

化的过程,在姿态角的求取过程中,不能忽视动态过程对测量结果的影响。具体有:

(1) x 轴方向上的加速度 a_x 对俯仰角的影响。

(2) 绕 x 轴及 y 轴的角速度 ω_x 和 ω_y 对角速度 ω_z 的影响。

① 线性加速度 a_x 对俯仰角 θ 的影响

在测量过程中,因牵引动力和管道走向变化 x 轴向上存在非匀速线运动,所以 a_x 不为 0,将其叠加到俯仰角加速度计敏感轴上

$$A_x = -g \cdot \sin(\theta) + a_x \quad (8)$$

式中 a_x 通过线速度 v_x 求导获得:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可得:

$$\theta = \arcsin\left(-\frac{A_x - a_x}{g}\right) = \arcsin\left(-\frac{A_x - \frac{dv_x}{dt}}{g}\right) \quad (10)$$

② ω_x 和 ω_y 对 ω_z 的影响

仪器在管道中行进时,俯仰角 θ 和横滚角 φ 都是变化的,导致 ω_x 和 ω_y 不为 0。因此应考虑到另外 2 个轴向对角速度 ω_z 的影响。由 3 个轴上的角速度 $[\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]$, 式(6)可写成:

$$\omega_m = \begin{bmatrix} \omega_{m,x} \\ \omega_{m,y} \\ \omega_{m,z} \end{bmatrix} = C_0^m \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $\omega_{m,x}$ 和 $\omega_{m,y}$ 分别为 φ 和 θ 对时间的一阶导数,即

$$\begin{cases} \omega_{m,x} = \frac{d\varphi}{dt} \\ \omega_{m,y} = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (12)$$

综上所述,对 ω_z 修正后,其表达式应为:

$$\omega_z = \omega_{m,x} \cdot \sin(\theta) + \omega_{m,y} \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\theta) +$$

$$\omega_{m,z} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) = \sin(\theta) \cdot \frac{d\varphi}{dt} +$$

$$\cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \frac{d\theta}{dt} + \cos(\theta) \cdot$$

$$\cos(\varphi) \cdot \omega_{m,z}$$

3.3 管道轨迹计算

由于地下管道在铺设时已经限制了俯仰角 θ 变化范围,同时当俯仰角 θ 或横滚角 φ 接近 90° 时,传感器灵敏度会降低。由于加速度计输出与倾角的正弦值相关,其导数为余弦,为保证其灵敏度不能低于

水平状态的 0.3 倍,由 $\arccos(0.3) \approx 72.5^\circ$,故俯仰角 θ 和横滚角 φ 均应控制在 72.5° 以下。

把载体坐标系中 x 轴方向上线速度 v_x 变换到导航坐标系中:

$$C_m^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix},$$

$$C_1^o = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$C_m^o = C_1^o \cdot C_m^1 = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) & -\sin(\psi) & \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) \\ \sin(\psi) \cdot \cos(\theta) & \cos(\psi) & \sin(\psi) \cdot \cos(\theta) \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$v_0 = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = C_m^o \begin{bmatrix} v_{m,x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) \\ \sin(\psi) \cdot \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \cdot u_{m,x}$$

对 v_0 进行积分就能得到仪器在导航坐标系中的行进位移。

4 仪器试验及结果分析

4.1 机械结构设计

地下管道轨迹测量仪的机械结构如图 3 所示。

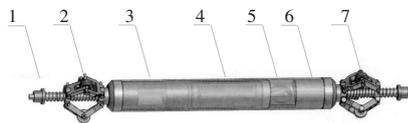


图 3 机械结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mechanical structure

分为拉环、前 3 爪行进轮、传感器仓、电路仓、操作面板、电池仓、后 3 爪行进轮 7 个部分。仪器外部以一个套筒包裹,实际测量时由人力或卷扬机完成绳索牵引,拖动仪器在管道内匀速前进。其中:

(1) 前拉环用于系绳拖拽牵引仪器在管道中行进。

(2) 前后 3 爪行进轮用于支撑仪器,上面留有旋转编码器的霍尔开关的安装孔。

(3) 单轴光纤陀螺仪以及 2 个垂直布设的加速

度计组成传感器仓,这是整个测量系统的核心机构,设计为一个偏心旋转稳定平台,下方加以配重块,能够保证不随仪器滚动翻转。

(4)操作面板上有电源开关、数据采集开关、指示灯以及和上位机连线的航空插头,外面用防水盖保证密封。

(5)电路仓及电池仓要求防水密封,中间通以穿线孔。3 爪行进轮的结构示意图如图 4 所示。

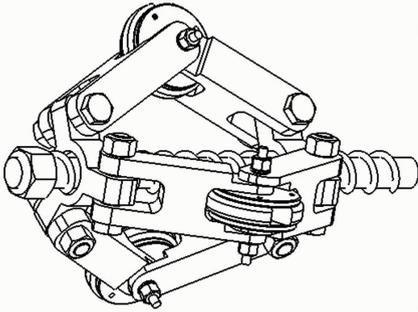


图 4 3 爪行进轮结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of three jaw traveling wheel structure

4.2 电路结构设计

由上述分析可知,2 个加速度计负责俯仰角 θ 和横滚角 ψ 的测量,光纤陀螺仪负责方位角速度 ω_z 的测量,霍尔编码器负责线速度 v_x 的测量。综合考虑加速度计精度、测量范围及成本要求,选用 MS9000-2D 型加速度计,以及俄罗斯 VG095M 型光纤陀螺仪,均以模拟电压形式输出。霍尔编码器由镶嵌在 3 爪行进轮上的磁铁和固定在支架上的霍尔开关组成。在滚动行进过程中,磁铁的磁性变化引起霍尔开关的脉冲输出变化。这样共有 3 路信号需要进行 A/D 转换,霍尔编码器直接以数字信号输出。选取 ADS8365 完成信号转换,以 STM32F405 单片机系统完成数据采样工作。测量电路整体原理如图 5 所示。

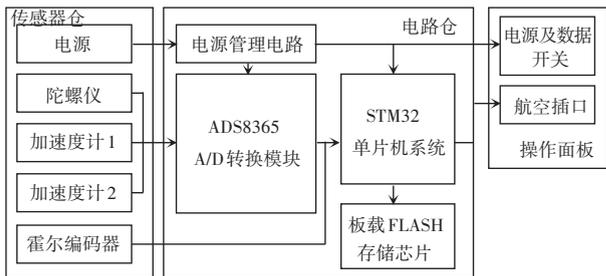


图 5 电路原理框图

Fig. 5 Circuit schematic diagram

4.3 试验验证及结果分析

在上海嘉定区某地下管网试验场模拟管道上进行测试,管道总长约 90 m,垂直起伏幅度约 2 m,共

测试了 6 组数据。将测量结果通过 Labview 串口数据采集工具传输到上位机,然后用 Matlab 解算获得的数据,制定起始坐标为两端管口坐标,得到轨迹探测仪在管道中的行进轨迹,结果对比显示。测量结果如图 6 所示。

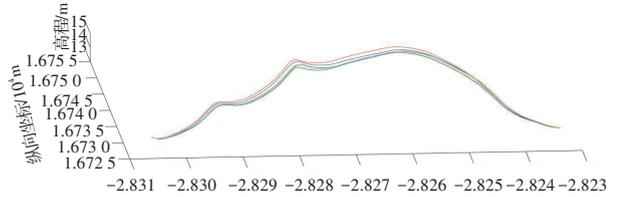


图 6 6 次测量结果对比

Fig. 6 Comparison of six measurement results

将测量得到的结果与全站仪坐标数据对比,得到地下管道轨迹测量仪的偏移状况,水平方向偏差最大 0.27 m,垂直偏差最大 0.24 m,完全符合工程要求。

5 结束语

本文结合地下管道测量要求,对传统捷联惯导测量方案进行了改进设计,使用“单轴光纤陀螺仪+加速度计+霍尔编码器”作为测量单元,引入偏重旋转机构组成半平台一半捷联式结构方案,对仪器硬件部分和解算算法进行了论证与设计,最后在试验管道中进行模拟试验,与全站仪标准结果比对。实验结果表明:改进结构设计与互补滤波算法的引入能够提高解算精度,具有较高的工程应用价值。

参考文献

- [1] 李均瑶,章亚男,沈林勇,等. 电子罗盘在非开挖地下管线三维探测中的应用[J]. 上海大学学报(自然科学版),2008,14(2): 136-141,147.
- [2] 沈林勇. 非开挖地下信息管线的三维曲线探测新技术研究[D]. 上海:上海大学,2011.
- [3] 张永权. 基于惯性测量的滑坡位移监测研究[D]. 武汉:中国地质大学,2016.
- [4] 肖蕾,刘克江,庄鑫财. 多传感器融合在地下管道测量中的应用研究[J]. 自动化仪表,2017,38(7):66-69.
- [5] 杜映,李天剑,王会香. 基于捷联惯导的管道轨迹检测算法[J]. 北京信息科技大学学报,2014,29(6):60-64,79.
- [6] 杜海龙,张荣辉,刘平,等. 捷联惯导系统姿态解算模块的实现[J]. 光学精密工程,2008,16(10):1956-1962.
- [7] 丁君. 基于微惯性传感器的姿态算法研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.
- [8] 张栋,焦嵩鸣,刘延泉. 互补滤波和卡尔曼滤波的融合姿态解算方法[J]. 传感器与微系统,2017,36(3):62-65,69.
- [9] HUANG M J, CHEN M Y, LEE S C. Integrating data mining with case-based reasoning for chronic diseases prognosis and diagnosis [J]. Expert Systems with Applications, 2007,32(2):856-867.

(下转第 228 页)