

基于惯导原理地下管道三维测量系统软件设计

肖波^{1,2}, 汪华安^{1,2}, 李学山^{1,2}, 丁金伟^{1,2}

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 广东科诺勘测工程有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]旨在解决针对传统物探方法诸如管线仪、探地雷达、声波探测仪等受其技术的局限性无法精确测定已有非开挖管线诸如小管径、大埋深、非金属管线得到的空间位置的难点,避免在施工过程中因为无法精确测定管线空间位置导致的事故频发的现象。[方法]针对非开挖管线探测的难题,提出以惯导为原理的探测技术对小管径、大埋深、非金属进行探测,并对以惯导原理为基础的地下管道三维测量系统进行软件设计及试验。[结果]试验成果表明:基于惯导原理地下管道三维测量系统软件结构及功能设计合理,针对非开挖管线测量可实时解算管道实际空间三维轨迹;测量过程中可以现场实时显示管道的空间轨迹俯视图、剖视图及三维空间视图,测量成果数据可存储输出,输出数据格式可根据不同需求进行设置,满足数字化地理信息三维数据管理系统输入要求,测量结果可较好的进行直观展示。[结论]该系统可适用于超埋深、小管径、任何材质的管道探测中,且其探测精度高,为城市疑难管线探测提供了较好的参考依据。

关键词: 地下管线; 非开挖; 惯导; 软件设计

中图分类号: TH137; TU990

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0215-07

Software Design of 3D Measurement System for Underground Pipeline Based on Inertial Navigation Principle

Xiao Bo^{1,2}, WANG Huan^{1,2}, Li Xueshan^{1,2}, Ding Jinwei^{1,2}

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Guangdong Kenuo Surveying Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] This paper aims to solve the traditional geophysical methods such as pipeline instrument, ground penetrating radar, sonic detector, etc. by the limitations of its technology can not accurately determine the existing trenchless pipelines such as small diameter, large buried deep, non-metallic pipelines to obtain the space location of the difficulties, to avoid in the construction process because the pipeline can not accurately determine the location of the accident caused by the frequent occurrence of accidents. [Method] Aiming at the problem of trenchless pipeline detection, this paper put forward a detection technique based on inertial guidance to detect small diameter, large buried depth and nonmetal, designed and tested the three-dimensional measuring system of underground pipeline based on inertial navigation principle. [Result] The experimental results show that the software structure and function design of the three-dimensional measuring system of underground pipelines based on inertial navigation principle is reasonable, and the real space three-dimensional trajectory can be solved in real time for trenchless pipeline measurement. In the measurement process, the space trajectory of the pipeline can be displayed on the spot, the cross-sectional view and the three-dimensional views, the data can be stored and output, the output data format can be set according to different requirements, and the input requirements of the digitized geographic information three-dimensional data management system are satisfied. [Conclusion] The system can be applied to the detection of super buried depth, small diameter and any material, and its detection precision is high, which provides a good reference for the detection of urban difficult pipelines.

Key words: underground pipeline; excavated; inertial navigation; software design

收稿日期: 2018-01-08 修回日期: 2018-06-07

基金项目: 广东科诺勘测工程有限公司科技项目“可视化惯导三维测量系统研发”

地下管线属于隐蔽工程,是城市以及工矿企业的重要基础设施,担负着各种能源、物质的输送和调配、各种信息传递、废污的排放等任务,于此同

时,若不能准确掌握地下原有管线的空间分布情况,一旦原有管线遭到破坏,将导致能源、物质的输送和调配、各种信息传递、废污的排放中断,不仅造成巨大的经济损失,还好引起人员伤亡事故,而顶管段往往是事故高发区域。因此,地下已埋管道的位置探测对相关建筑施工意义重大,不可或缺。

目前市场上对地下管线位置探测的主流测量仪器包括电磁式管线探测仪、探地雷达等^[1-9]。前者是利用电磁感应原理对管线进行探测,后者则是通过发射电磁波信号对管线进行探测。该类方法受其技术的局限性无法精确得到已有非开挖管线的空间位置。

可视化惯导三维测量系统克服了现有的管线探测仪对测量管线材质、测量深度、测量环境以及测量操作复杂等不足,提供一种基于惯性测量技术的管道三维姿态测量仪。该技术对地下管道的三维姿态位置进行测量并利用管道起点和终点的地理位置信息,进而使用软件数据处理可以得到管道的水平方向及高低方向的准确位置信息,既得到管道各处相应位置精确空间绝对坐标。

1 基于惯导原理地下管道三维测量系统基本原理

基于惯导原理地下管道三维测量系统基本原理是根据牛顿第一运动定律(惯性定律)推导而来。若物体不受外力作用(或合力为零时),则静者恒静,动者恒作等速运动。随着物理学的发展,较晚期的学者依据等速度移动的物体亦提出了动量守恒定律,本次管道定位应用的设备是基于角动量守恒定律原理。基于惯导的三维陀螺仪和三维加速度计分别测量立体空间的3个相互垂直的转角速度和3个相互垂直的线加速度分量,通过结合起始、终点端绝对坐标锁定进而进行坐标变换,将加速度信息转化为沿运行方向坐标系的加速度。从而运算出三维测量系统所在的位置、速度、运行方向和水平姿态^[10-13],如图1所示。

如:将北向加速度计和东向加速度计测得的运动加速度 a_N 、 a_E 进行一次积分,与北、东向初始速度 V_{N0} 、 V_{E0} 得到定位仪的速度分量,如:

$$V_N = \int a_N dt + V_{N0} \quad (1)$$

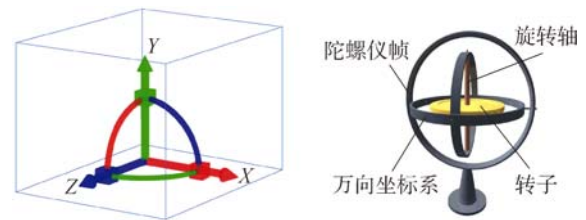


图1 惯性导航陀螺仪三维系统

Fig. 1 Inertial Navigation gyroscope 3D system

$$V_E = \int a_E dt + V_{E0} \quad (2)$$

将速度 V_N 和 V_E 进行变换并再次积分得到定位仪的位置变化量,与初始经纬坐标相加,即得到定位仪的地理位置经纬坐标。

$$\varphi = \frac{1}{R_E} \int_0^t V_N dt + \varphi_0 \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{1}{R_E} \int_0^t V_E \sec \varphi dt + \lambda_0 \quad (4)$$

其系统组成结构图如图2所示。

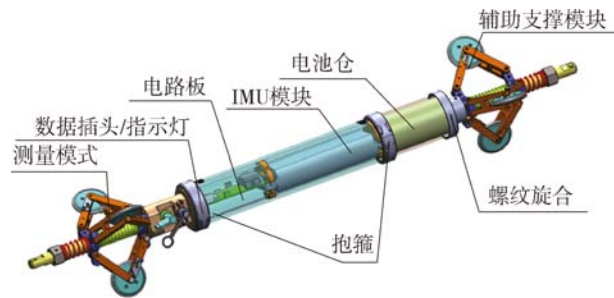


图2 系统组成结构图

Fig. 2 System composition diagram

其基本工作过程为:由电路板 IMU 模块下的三轴 MEMS 加速度计、三轴 MEMS 陀螺、三轴磁强计和里程测量模块在同步时钟的控制下测量数据,同时对干扰信号进行滤波;然后将数据存储在存储器内;测绘完毕后再将存储的测绘数据通过数据插头将采集到并储存的测量数据发送到地面数据处理器中;而后有地面计算机对数据进行处理从而得出管道三维轨迹,结合起始、终点坐标转换成绝对坐标锁定,最后对解算完毕的数据进行保存,其中电池仓用于电源充电管理及电量测量。

2 测量单元软件设计

IMU 模块及电路板内部微处理器软件开发基于模块化设计原则,主要由 A/D 采样模块、FPGA 同

步模块、数据存储和数据通信模块组成。

2.1 A/D 采样模块

微控制器通过 I2C 总线与 6 路 24 位 A/D 转换器接口连接, 该模块主要用来实现对三轴 MEMS 陀螺和三轴 MEMS 加速度计进行同步采样, 采样频率为 100 Hz。在系统初始时完成 A/D 转换芯片信噪比、增益、采样间隔时间等设置; 工作状态中实现微控制器对 A/D 转换芯片转换数据的有效接收并存入缓冲区。

2.2 FPGA 同步模块

微控制器通过同步时钟及并口与 FPGA 接口连接, 该模块主要实现对三轴磁强计和里程计的同步采样, 采样频率为 100 Hz。在系统初始时完成 FPGA 芯片工作模式、同步时钟信号、采样间隔时间等设置; 工作状态中实现微控制器对 FPGA 芯片转换数据的有效接收并存入缓冲区。

2.3 数据存储模块

微控制器通过高速并口将采集到得陀螺数据、加速度计数据、磁强计数据和里程计数据存储到高速数据存储中, 该模块主要实现各个存储器芯片的地址管理、空间分配和数据压缩解压。

2.4 数据通信模块

微控制器通过数据通信模块将采样的各种传感器数据发送到 CAN 总线上。该模块主要实现数据通信的打包, 发送与上位机的控制命令接收。流程图如图 3 ~ 图 5 所示。

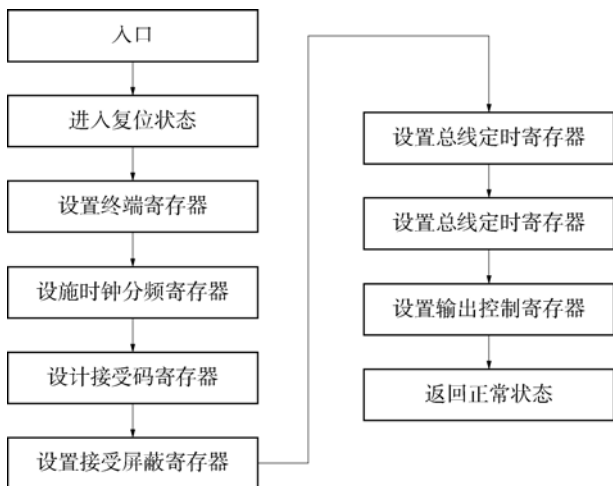


图 3 初始化子流程图

Fig. 3 Initializes the child flow chart

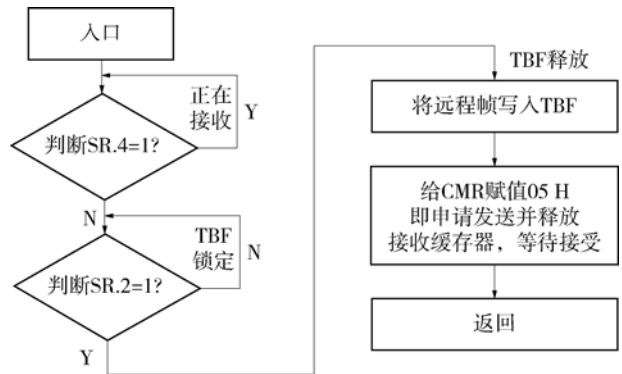


图 4 发送子流程图

Fig. 4 Transmission sub-flow chart

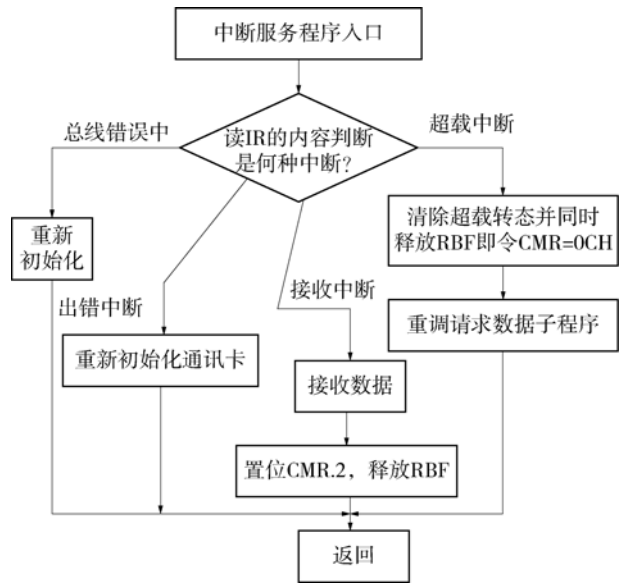


图 5 中断子流程图

Fig. 5 Interrupt sub-flow chart

模块之间通过公用的缓冲区实现信息的交换, 过程如图 6 所示。

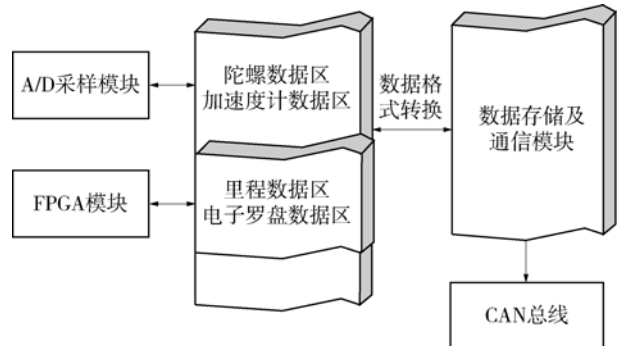


图 6 模块间信息交换示意图

Fig. 6 Schematic diagram of information exchange between modules

2.5 数据通信模块

测量单元内部微处理器软件流程图如图 7 所示。

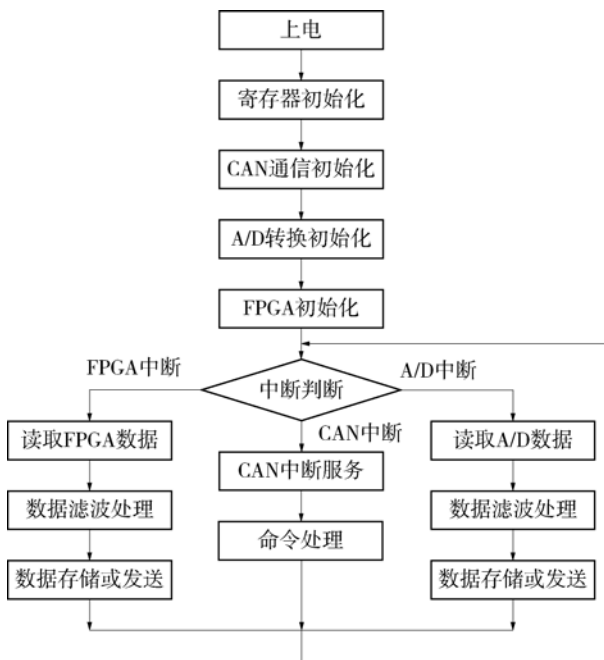


图 7 软件流程图

Fig. 7 Software flow pattern

3 数据处理软件功能设计

数据处理软件主要实现对测量数据信息的存储、处理及显示等功能。结合硬件设备可实现三维测量系统的全部功能。

3.1 数据处理软件结构设计

该软件采用结构化、模块化、通用化进行设计，其功能主要包含六大模块：姿态位置解算模块、数据回放模块、信息显示模块、数据存储模块、系统自检模块、数据驱动模块。各模块可按需求功能进行细分从而实现单一子功能并能在主程序界面上进行显示。其软件结构如图 8 所示。

3.2 数据处理软件流程

数据处理计算机软件流程图 9 所示。

3.3 定位定向算法设计

系统定向定位算法是系统软件的核心，也是实现轨迹测绘的关键。其流程如图 10 所示，具有如下

一些基本子模块：

1) 数据预处理

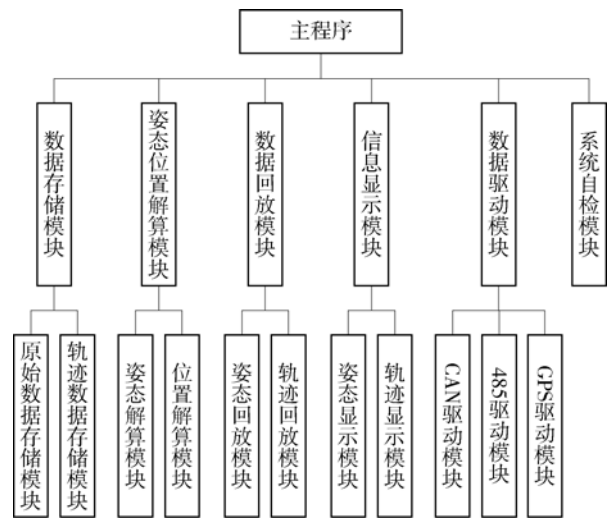


图 8 数据处理软件结构图

Fig. 8 Structure diagram of software for data processing

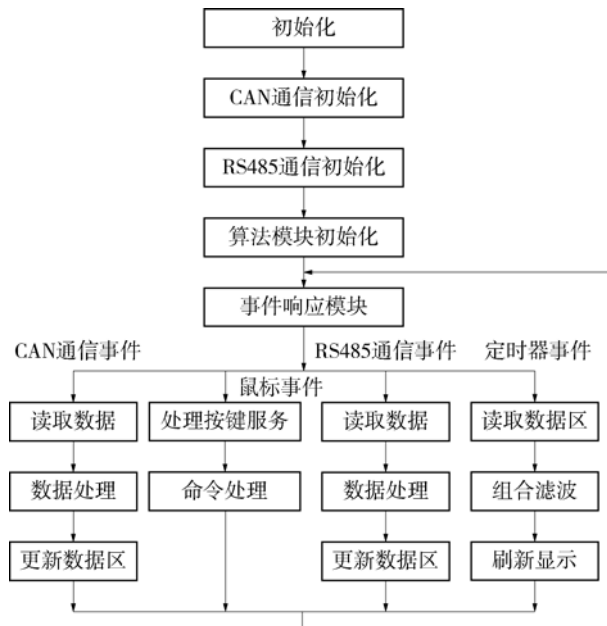


图 9 数据处理软件流程图

Fig. 9 Data processing software flow chart

对各传感器的原始信息进行预处理，包括采样率转换、单位变换、误差补偿、滤波等处理。

2) 初始化

利用三轴磁强计、惯性测量单元进行姿态初始化。

3) 惯性测量位置、速度、姿态更新

利用陀螺、加速度计的数据对位置、速度和姿态进行更新，数据更新频率为 50 Hz。

4) 数据融合模块

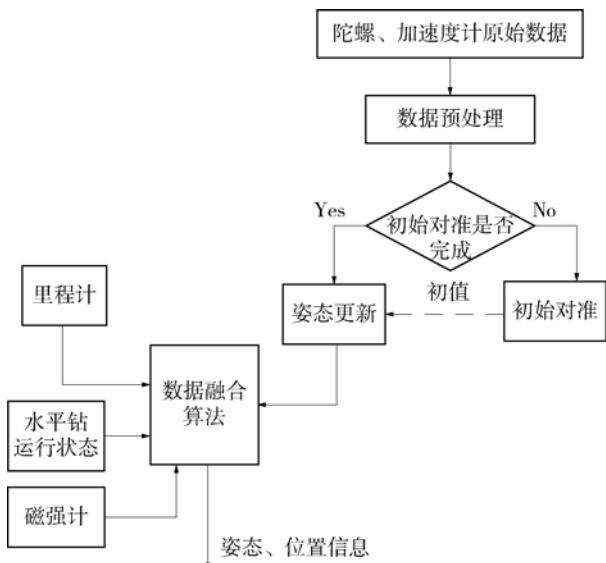


图 10 算法程序框图

Fig. 10 Algorithm block diagram

由于惯性测量精度随时间不断发散, 因此需要利用其它传感器信息对误差进行抑制, 该模块综合利用里程计、三轴磁强计等传感器的信息进行数据融合。数据融合拟采用 Kalman 滤波算法。

为提高测量精度, 利用差分 GPS 测量出管线的出、入口点之间的水平距离 L 及垂直斜度 θ , 将测量轨迹分别进行水平、垂直校正。其校正原理如图 11 所示。

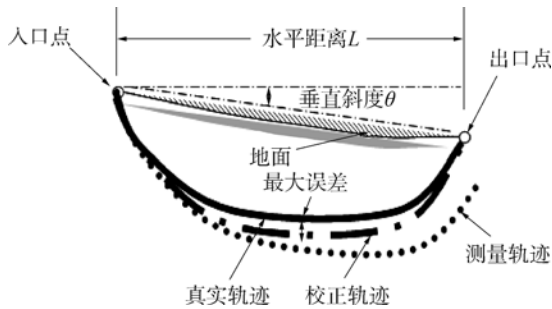


图 11 轨迹校正示意图

Fig. 11 Trajectory correction diagram

4 试验分析

试验方案: 试验过程按照以下步骤进行:

1) 试验采用内径为 0.15 m 的管线, 管线总长约为 120 m。为考察系统的测绘能力, 管线人为扭曲成“S”形。两端分别架设在高台上。

2) 在管线架空之前, 每隔 1 m 在管线用油漆画一标记线, 在完成管线架空后, 利用差分 GPS 设备

和全站仪, 在每个标志线位置测定管线地理坐标 (X, Y, Z) , 作为标定基准, 并根据测试数据绘制管线曲线(水平面、纵剖面、三维曲线)。

3) 利用地下管道三维测量系统测量管线位置曲线, 根据全站仪锁定的管线起点和终点坐标数据, 对测绘系统轨迹数据进行变换, 得到管线每隔一米的坐标数据。

4) 以 3) 得到的测量坐标数据与 2) 得到的标定基准数据进行比对, 确定系统测量误差。

实验场地如图 12 所示。



图 12 实验现场

Fig. 12 Experimental spot

实验测试的系统软件轨迹显示结果如图 13 所示, 将地下管道三维测量系统测量结果数据与全站仪的测量数据进行比对, 如图 14、图 15 所示。对比结果为: 地下管道三维测量系统测量数据相对全站仪测量数据高程中误差为 7.83 cm, 平面中误差为 8.62 cm, 球面中误差为 11.64 cm。试验结果表明: 地下管道三维测量系统测量数据与全站仪测量数据吻合度高, 基于惯导原理的地下管道三维测量系统设计合理, 其探测精度及可靠性高。

5 结论

针对传统物探方法诸如管线仪、探地雷达、声波探测仪等受其技术的局限性无法精确得到已有非开挖管线的空间位置的不足。本文提出以惯导为原理的探测技术对小管径、大埋深、非金属进行探测, 并对以惯导原理为基础的地下管道三维测量系统进行软件设计, 通过对该系统及软件进行试验,

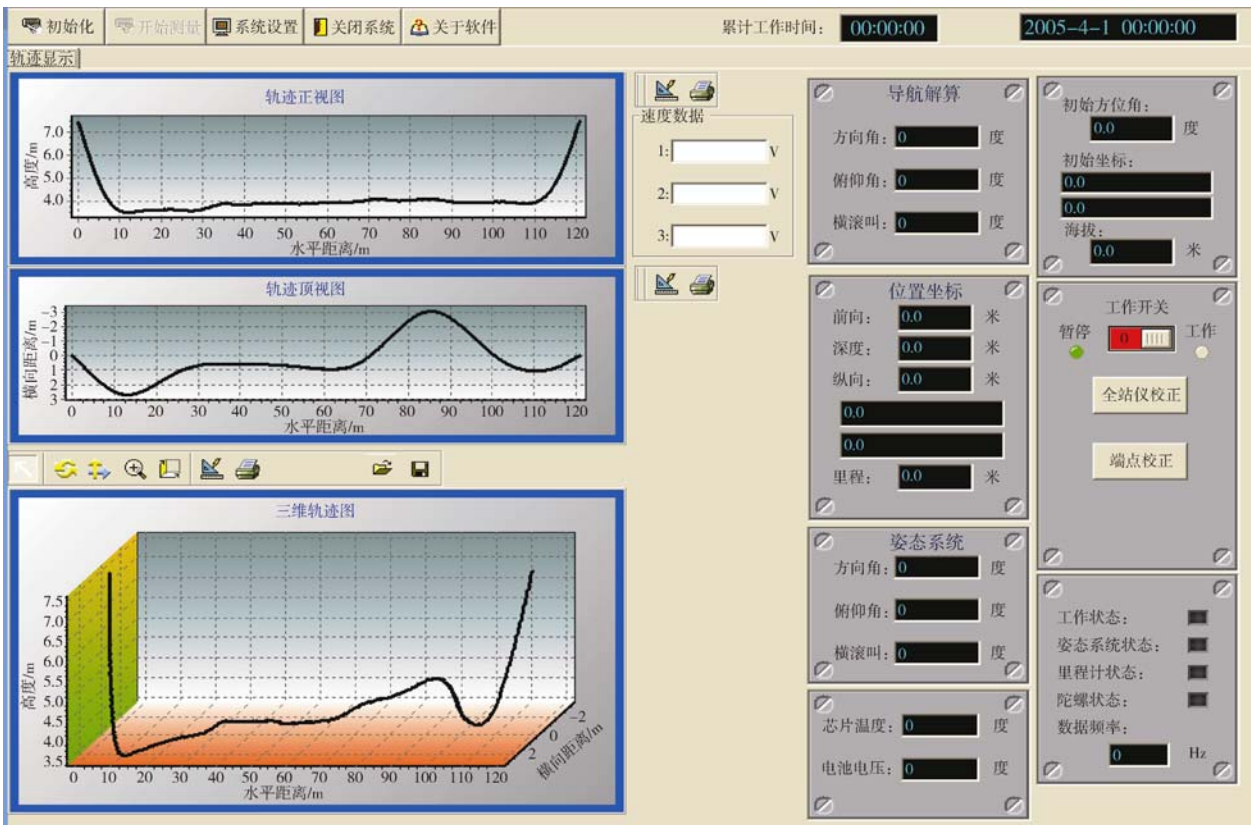


图 13 地下管道三维测量系统测量试验结果

Fig. 13 The experimental results of measurement using underground pipeline three-dimensional measurement system

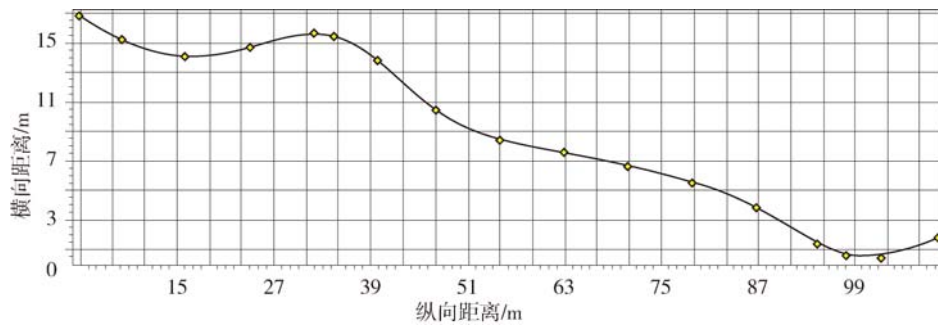


图 14 地下管道三维测量系统测量与 GPS 测量试验结果对比俯视图

Fig. 14 Comparison of vertical view of test results of 3D measurement system of underground pipeline and GPS measurement

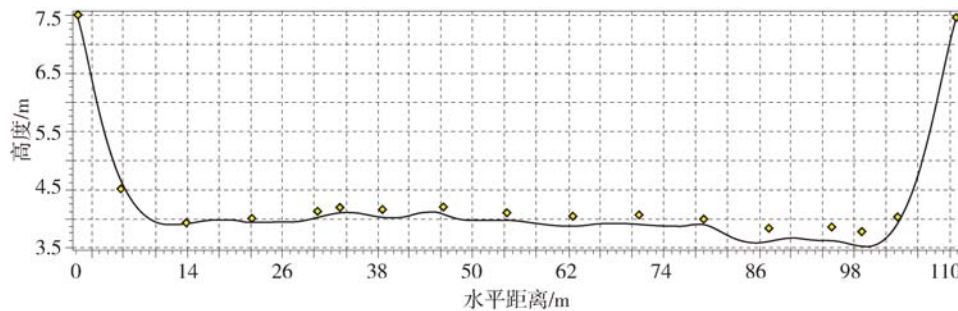


图 15 地下管道三维测量系统测量与 GPS 测量试验结果对比正视图

Fig. 15 Front view of 3D measurement system of underground pipeline and GPS measurement test results

成果表明:基于惯导原理地下管道三维测量系统软件结构及功能设计合理,测量数据实时保存在系统内部的数据记录仪上,提高了系统安全性,针对非开挖管线测量可实时解算管道实际空间三维轨迹;测量过程中可以现场实时显示管道的空间轨迹俯视图、剖视图及三维空间视图,测量成果数据可存储输出,输出数据格式可根据不同需求进行设置,满足数字化地理信息三维数据管理系统输入要求,测量结果可较好的进行直观展示;该系统可适用于超埋深、小管径、任何材质的管道探测中,且其探测精度高,为城市疑难管线探测提供了较好的参考依据。

参考文献:

- [1] 徐匆匆, 马向英, 何江龙, 等. 城市地下管线安全发展的现状、问题及解决办法 [J]. 城市发展研究, 2013, 20(3): 108-112 +118.
XU C C, MA X Y, HE J L, et al. The organization and ensurance of general survey for urban underground pipeline [J]. Urban Studies, 2013, 20(3): 108-112 +118.
- [2] 李学军, 洪立波. 城市地下管线探测与管理技术的发展及应用 [J]. 城市勘测, 2010(4): 5-11.
LI X J, HONG L B. Development and applications of urban underground pipelines detection and survey and management technique [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(4): 5-11.
- [3] 黎海波, 陈明辉, 欧阳松南, 等. 东莞市地下管线普查暨管线信息化建设综述 [J]. 测绘通报, 2013(4): 88-92.
LI H B, CHEN M H, OUYANG S N, et al. Summary of underground pipe exploration and informatization construction in Dongguan city [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(4): 88-92.
- [4] 杜良法, 李先军. 复杂条件下城市地下管线探测技术的应用 [J]. 地质与勘探, 2007, 43(3): 116-120.
DU L F, LI X J. Application of detection techniques of underground pipelines under complicated conditions [J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(3): 116-120.
- [5] 赵欣, 王希良, 刘珍岩, 等. 复杂条件下的地下管线探测模拟 [J]. 物探与化探, 2014, 38(6): 1307-1312.
ZHAO X, WANG X L, LIU Z Y, et al. Simulation of underground pipelines under complicated condition [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2014, 38(6): 1307-1312.
- [6] 王强, 王志浩. 管线仪及地质雷达探测地下管线 [J]. 黑龙江水利科技, 2015, 43(8): 95-97.
WANG Q, WANG Z H. Radio-detection and GPR detection of underground pipelines [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2015, 43(8): 95-97.
- [7] 王勇, 陈伟. 近间距平行地下管线探测方法研究 [J]. 测绘通报, 2011(3): 22-25 +40.
WANG Y, CHEN W. Research on detection of parallel underground pipeline with small intervals [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(3): 22-25 +40.
- [8] 王彪. 谈地质雷达在探测地下管线中的应用 [J]. 工程建设和设计, 2011(9): 130-131 +134.
- [9] 杨剑, 李华, 焦彦杰. 探地雷达在城市地下管线探测中的应用 [J]. 物探化探计算技术, 2010, 32(6): 669-673 +570.
- [10] 冀海燕. 高精度惯性陀螺仪误差系数的快速自标定方法研究 [J]. 工程与试验, 2009, 49(4): 28-30.
- [11] 徐东升. 惯性导航中加速度计和陀螺仪性能研究 [J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2012, 30(3): 334-337.
- [12] 任广振, 罗进圣, 胡伟. 惯性陀螺仪定位三维测量技术在非开挖电力管线探测中的应用 [J]. 浙江电力, 2014, 33(7): 32-36.
- [13] 王彝, 袁涛, 谭涛. 基于 MEMS 陀螺仪的微惯性测量系统的实现 [J]. 微计算机信息, 2008(26): 152-153 +21.

作者简介:



XIAO B

肖波(通信作者)

1984-, 男, 湖南邵阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力勘察设计工作 (e-mail) xiaobo@gedi.com。

汪华安

1977-, 男, 安徽当涂人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事电力勘察设计工作 (e-mail) wanghuan@gedi.com。

李学山

1982-, 男, 河南新乡人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力勘察设计工作 (e-mail) lixueshan@gedi.com.cn。

丁金伟

1981-, 男, 山东青岛人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力勘察设计工作 (e-mail) dingjinwei@gedi.com。

(责任编辑 高春萌)