

文章编号: 1000-8241(2013)09-0979-03

# 基于惯性导航的管道中心线测量方法

李睿<sup>1</sup> 冯庆善<sup>1</sup> 张军政<sup>2</sup> 张海亮<sup>1</sup> 韩小明<sup>3</sup> 刘成海<sup>1</sup>

1. 中国石油管道公司, 河北廊坊 065000; 2. 中国石油西气东输管道公司, 河南郑州 450000;

3. 中国石油管道科技研究中心, 河北廊坊 065000

**摘要:** 由于大多数油气管道敷设于地下, 难以全面系统地检测管道中心线的位置、管道位移甚至变形。为了准确获得埋地管道的中心线坐标, 根据惯性导航系统的特性, 将高精度惯性导航单元搭载至载体上对管道进行检测, 在管道正常运行状态下, 利用惯性测量单元结合地面高精度参考点 GPS 坐标及里程轮数据对管道位置进行定位及修正, 精确描绘管道三维坐标与走向。试验结果表明: 该测试方法能够准确解算管道中心线坐标, 可以为预防管道事故和进行维护提供科学依据, 对保证管道安全运行具有重要作用。(图 6, 参 4)

**关键词:** 管道内检测; 惯性导航; 定位; 管道中心线

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2013.09.012

## Measurement method of pipeline central line based on inertial navigation

Li Rui<sup>1</sup>, Feng Qingshan<sup>1</sup>, Zhang Junzheng<sup>2</sup>, Zhang Hailiang<sup>1</sup>, Han Xiaoming<sup>3</sup>, Liu Chenghai<sup>1</sup>

1. PetroChina Pipeline Company, Langfang, Hebei, 065000; 2. PetroChina West East Gas Pipeline Company, Zhengzhou,

Henan, 450000; 3. PetroChina Pipeline R &amp; D Center, Langfang, Hebei, 065000

**Abstract:** Owing to the most of oil and gas pipelines laid underground, it is difficult to detect pipeline centerline position, pipeline displacement and even deformation thoroughly and systematically. In order to acquire accurate coordinates of underground pipeline centerline, high precision inertial navigation units are placed into carriers for pipeline inspection according to the characteristics of the inertial navigation system. The pipeline positions are determined and modified under normal pipeline running status using inertial measurement units integrated with GPS coordinates of surface high accuracy reference points, and 3D pipeline coordinates and trends are described precisely. The test results show that the testing method can calculate pipeline centerline coordinates exactly and provide scientific basis to the prevention of pipeline accidents and pipeline maintenance, and this method is playing an important role in ensuring pipeline safety running. (6 Figures, 4 References)

**Key words:** internal pipeline inspection, inertial navigation, positioning, pipeline central line

为了避免长输管道失效事故的发生, 需要对管道的具体位置进行定位测量<sup>[1-2]</sup>, 以确定管道当前的具体位置, 以及对比计算位移、变形, 根据测绘数据评价管道的结构完整性, 查找管道发生较大变形的高风险点, 从而提前采取有效的缓解措施。

## 1 管道中心线测绘装置

### 1.1 基本组成

管道中心线测绘装置主要由惯性导航系统<sup>[3]</sup>、里

程计、移动载体以及用于位置修正的路标点组成(图 1)。管道一般敷设于地下, 很难通过定位装置对其具体位置以及管道轨迹进行精确测量。而惯性导航系统是一种有效的测量设备, 具有全自主性等特点, 可不受外界影响, 完成管道内检测器姿态、里程、加速度等数据的采集。由于惯性导航装置的安装位置会引起系统的随机误差, 因此惯性导航装置必须安装在载体的中心位置。此外, 惯性导航装置内水平方向的加速度计、陀螺仪应与载体前进方向一致, 垂直方向的加速度计、陀螺仪应与载体垂直, 以减少导航精度的误差。

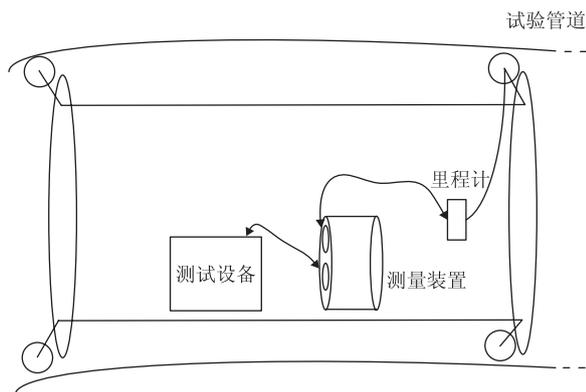


图1 管道中心线测绘系统原理示意图

## 1.2 管道惯性导航测量装置

管道惯性测量装置是测量管道中心线位置的核心部分(图2),由两个独立部分组成,其一是惯性测量装置硬件部分,其二是数据处理部分。硬件部分由3个加速度计、3个激光陀螺仪、数据采集电路、电源模块、数据存储电路、减振器以及底层软件等组成,主要完成惯性器件数据实时采集、误差补偿、记录等工作;数据处理部分主要完成数据下载、导航解算和组合导航等工作。

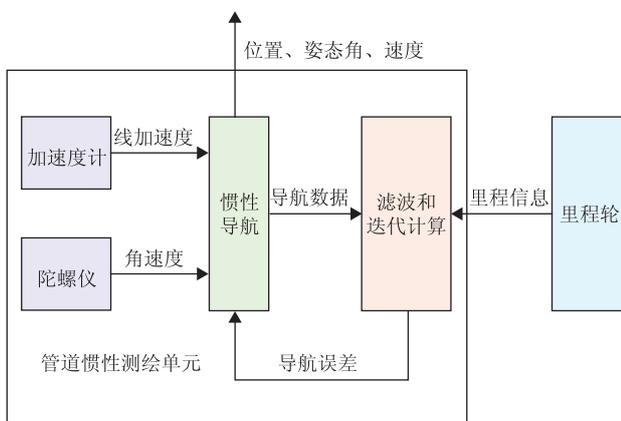


图2 管道惯性测量装置工作原理图

## 2 测量方法与误差处理

通过使用管道惯性测量系统,最终解算出管道中心线数据。管道中心线数据是指获取载体的姿态矩阵和速度向量,结合里程轮数据,采用航位推算算法,计算出载体的位置向量,即载体在管道内的位置变化量。如利用变化量加上初始坐标可得到载体在管道内的瞬时位置;将所有载体的瞬时位置连接起来,则可获得管道中心线数据。

为获取管道中心线数据,首先对检测设备设置参

数,结合GPS系统完成初始坐标设置,并完成里程轮的归零及设备自检;其后将惯性导航单元搭载在管道内检测器或其他载体上,通过驱动结构依靠管道内液体或气体的压力,推动检测器或载体在管道内进行速度较稳定的运动。定位内检测器或载体在管道中长时间行走,检测过程中,由导航计算机实时采集惯性测量单元内加速度计、陀螺仪以及外置里程轮的数据,进行惯性导航姿态、速度等参数采集,通过滤波和迭代估计出导航误差并修正,初步得到高精度的位置、姿态角和速度信息。由于惯性导航系统依靠推算方法确定载体位置,而误差随时间累积,因此需要通过GPS系统对其进行校正。首先,采用差分GPS获取高精度的标定坐标,将一台GPS接收机放置在已知点,一台放置在待测点,同时接受来自GPS卫星星座的信号,由于两台接收机具有相同的星历误差、电离层延迟误差和对流层延迟误差等,经过差分解算消除测量点误差,获取高精度的GPS位置;然后,将惯性导航所采集的姿态数据、里程计数据、GPS坐标相结合,采用优化滤波(卡尔曼滤波)算法<sup>[4]</sup>进行数据融合以获取惯性导航装置的姿态矩阵、里程计等误差的估计值,并通过航位解算,消除数据中所存在的误差;最后,反转数据,采用后向数据解算方法,模拟测量装置在管道内反方向运行,经过同样的处理过程解算出载体在管道内的位置,将正向计算结果和反向计算结果合并,经优化滤波平滑算法,获取载体在管道内任一位置的最优估计值,完成标定计算,以进一步提高定位精度,从而完成对管道轨迹的精确测量。

## 3 验证试验

使用该测量方法对某管道进行了多次测量。第一次测试使管道保持统一水平高度进行测量(图3)。在正式检测之前,首先对管道起点中心位置进行定位,经度为116.731 304、纬度为39.489 336、高度为25 m,设定载体速度为1 m/s,由于检测器或载体以旋转方式在管道中前进,因此对载体车轮侧偏 $3^\circ$ 。待系统自检完毕后,开始进行测试。根据管道测绘曲线及检测数据可以得到,检测器在管道中旋转约2.5圈,前进距离为96.594 6 m,且得到整条管道中心线的坐标。检测完毕后对管道长度进行测量,实际长度为96.6 m,与检测器测试结果基本一致。

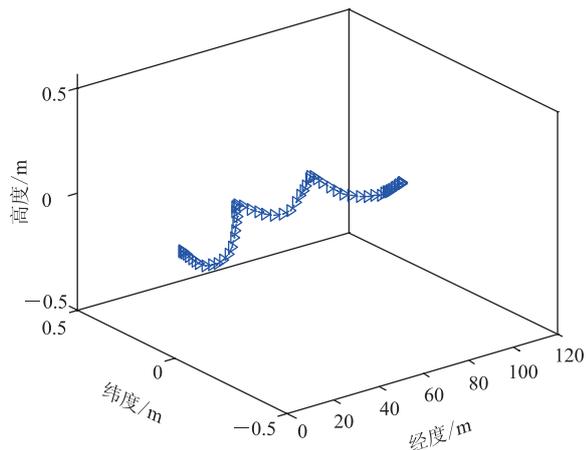


图3 第1次检测器运动轨迹(管道测绘曲线)

第2次进行重复测量(图4),其目的是比较数据的可重复性。第3次测试将管道中部沉降0.25 m,通过该测试方法进行测量(图5),将第3次测试轨迹与前两次测试数据进行对比。根据3次测试检测器轨迹“经度-高度”曲线(图6),显见第3次测量与前两次测量的中部高度相差约0.23 m,这与实际管道下沉高度一致,证明了测试的准确性。

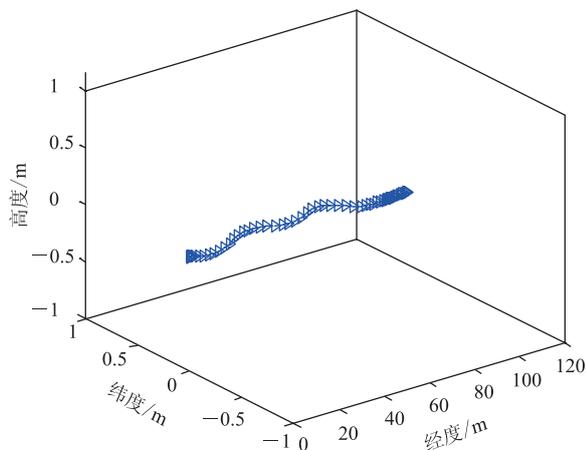


图4 第2次检测器运动轨迹(管道测绘曲线)

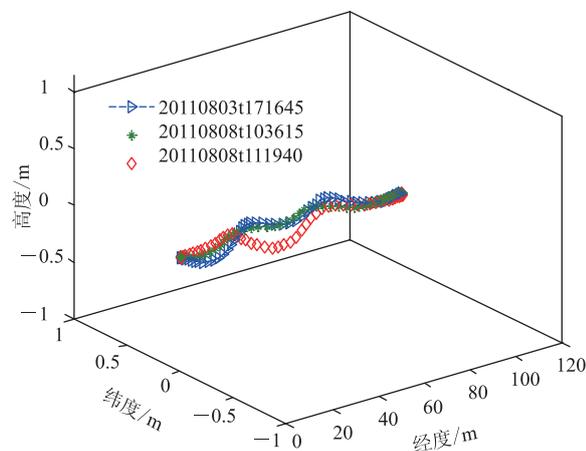


图5 3次测试检测器轨迹比较(管道测绘曲线)

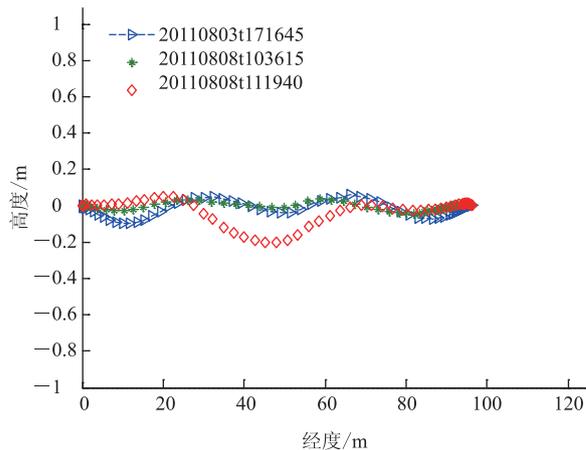


图6 3次测试检测器轨迹“经度-高度”曲线

综上所述,管道内检测采用惯性导航技术,能够获得检测器位置、姿态等参数,从而进一步解算出管道中心线位置坐标,描绘出管道轨迹及地理坐标变化等信息,为监测管道位移、弯曲应变分析等提供了技术手段。

参考文献:

[1] 戚爱华. 我国油气管道运输发展现状及问题分析[J]. 国际石油经济, 2009, 17(12): 57-60.  
 [2] 杨理践, 李瑞强. 管道内检测导航定位技术[J]. 沈阳工业大学学报, 2012(4): 20-23.  
 [3] 张炎华, 王立端. 惯性导航技术的新进展及发展趋势[J]. 中国造船, 2008, 49(10): 134-144.  
 [4] 刘保余, 綦耀光. 卡尔曼滤波在管道地理坐标定位系统中的应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2010, 32(5): 564-568.

(收稿日期: 2012-10-19; 编辑: 潘红丽)

**作者简介:** 李睿, 工程师, 1983年生, 2009年硕士毕业于吉林大学精密仪器及机械专业, 现主要从事长输油气管道的完整性管理工作。

电话: 15003162325; Email: kjlirui@petrochina.com.cn

Li Rui, MS.D, engineer, born in 1983, graduated from Jilin University, precise instrument and machinery, in 2009, engaged in the pipeline integrity management of long-distance oil and gas pipelines.

Tel: 15003162325, Email: kjlirui@petrochina.com.cn