

# 油气管道惯性测绘内检测及其应用

王富祥<sup>1</sup> 冯庆善<sup>1</sup> 杨建新<sup>2</sup> 周利剑<sup>1</sup> 陈健<sup>1</sup>

(1. 油气管道输送安全国家工程实验室·中国石油管道科技研究中心, 河北廊坊 065000;

2. 山东中油天然气有限公司, 山东济南 250000)

王富祥等.油气管道惯性测绘内检测及其应用.油气储运, 2012, 31 (5):

**摘要:**管道完整性管理是确保管道安全、经济运行的重要手段,管道位置参数是管道完整性管理的重要基础数据。油气管道惯性测绘内检测技术,以三维正交的陀螺仪与加速度计组成的惯性测量单元(IMU)为主要测量设备,以地面GPS参考点与里程计数据进行位置与速度修正,能够精确测绘管道中心线坐标,实现管道管理的数字化与可视化。利用获得的高精度中心线坐标参数,能够有效识别、评估由环境因素诱发的管道弯曲应变。将缺陷参数与管道中心线坐标相结合,可实现缺陷的精确定位,生成管道缺陷维修工程图。

**关键词:**内检测;惯性测绘;管道中心线;弯曲应变;特征定位

中图分类号:TE88

文献标识码:A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2012.05.013

管道在输送液体、气体、浆体等方面具有独特的优势,目前已成为石油、天然气的主要运输方式<sup>[1]</sup>。管道完整性管理是当前国际上各大管道公司确保管道安全、经济运行的重要手段,而管道位置参数是管道完整性管理的重要基础数据,结合GIS、GPS等技术可实现管道的数字化、可视化管理<sup>[2-3]</sup>。我国大部分老管道铺设时间超过30年,由于管道改造和人员流动,管道信息大量流失;近年新建的管道也未实施过精确的管道中心线测绘,管道管理人员只知其大概位置与走向,因此导致管道事故预防与维修维护的极大不便。

油气管道惯性测绘内检测技术,可以在管道正常运行状态下,使用惯性器件测绘管道的三维相对位置坐标,以地面高精度参考点(检测起点、沿途参考点、检测终点)GPS坐标加以修正,能够精确描绘管道中心线三维走向图<sup>[3]</sup>。通过高精度的中心线坐标参数,能够有效识别由于环境因素等诱发的管道变形和管道位移,评估管道的曲率以及与曲率变化相关的弯曲应变<sup>[4-5]</sup>。同时,将惯性测绘获得的位置参数与变形、漏磁、超声内检测数据结合起来,能够解算管道所有参考环焊缝的GPS坐标,并绘制成工程图,从而极大地方便管道维修方案的制定与开挖定位,提高维修效率,节省维修费用。

## 1 基本原理

管道惯性测绘内检测的基本原理是牛顿力学运动定律,与航空航天领域导航使用的惯性导航系统(INS)基本相同。INS分为平台式与捷联式两大类:平台式具有物理实体的导航平台,而捷联式不具有物理实体的导航平台,它直接将惯性器件安装在运动物体上,由计算机完成平台的功能。由于捷联式惯性导航系统结构简单、可靠性高、造价较低、易于维修,因此被多数惯性导航系统采用<sup>[6]</sup>。目前,管道测绘内检测也使用捷联式惯性导航系统,其核心部件是由三维正交的陀螺仪与加速度计组成的IMU。分别利用陀螺仪和加速度计测量物体3个方向的转动角速度(图1)和运动加速度(图2),将采集、记录的数据使用专门的计算软件进行积分等运算处理,便可以得到检测器任一时刻的速度、位置与姿态信息,获得管道的中心线坐标<sup>[7]</sup>。

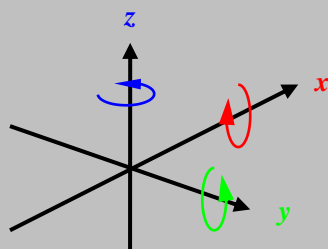


图1 陀螺仪测量转动角速度(单位:  $(^\circ)/s$ )

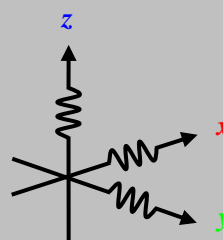


图2 加速度计测量线性加速度(单位:  $m/s^2$ )

## 2 系统组成与测绘实现

惯性测绘内检测是基于捷联惯性导航系统实现的自主式测绘，具有独立工作、全天候、不受外界环境干扰、无信号丢失等优点，非常适于在管道内长时间自动运行。但由于惯性器件存在漂移，误差随时间累积迅速增加，这需要采用其它导航方式，如 GPS、里程计等予以修正。因此，惯性测绘内检测系统除核心部件 IMU，还包括辅助定位的里程计和地面定标盒等。

管道惯性测绘系统通常搭载于几何、漏磁等其它内检测器中（图 3），通过主时钟与所搭载的其它管道内检测器进行时钟同步，整个系统在油或气的推动下前进。管道内检测器在管道中行进时，IMU 以一定的频率采集三路陀螺仪、三路加速度计以及里程计数据并保存在系统磁盘中。惯性管道测绘系统经过地面 GPS 参考点时，与地面定标盒进行通信，记录其经过地面定标点的时刻。完成整条管道的检测后，系统将所有数据下载到地面计算机中，结合地面高精度参考点的 GPS 位置信息，利用组合导航软件进行数据处理，得到整条管道的位置数据和管道中心线轨迹图形。因此，以 INS 为基本测量手段，结合 GPS 和里程仪进行修正（每 1~2 km 利用 GPS 信号进行一次位置修正，利用里程仪数据进行实时速度修正），可以充分发挥各自优点，实现高精度位置测绘<sup>[8]</sup>。

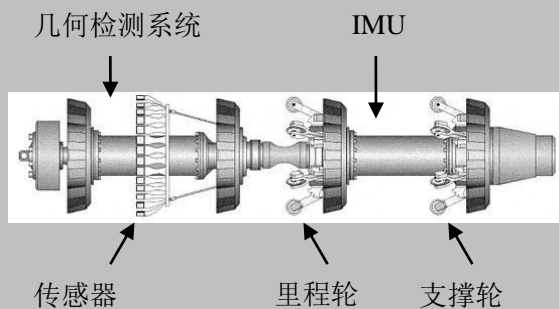


图 3 惯性测绘系统与所搭载的几何检测器

### 3 实例应用

管道位置参数是开展管道完整性管理的重要基础数据，惯性测绘在高后果区识别、风险评价、完整性评价以及维修维护中均有广泛应用。利用惯性测绘系统对某原油管道进行惯性测绘，获得了精确的管道中心线坐标数据，结合遥感影像数据，实现了管道管理的数字化与可视化。利用获得的高精度中心线坐标参数，有效识别出由环境因素诱发的管道变形，并评估整个管道的曲率以及与曲率变化相关的弯曲应变。将完整性评价结果中需要修复的点与管道中心线坐标相结合，实现了缺陷的精确定位，并与遥感影像数据结合起来，生成了管道缺陷维修工程图。

#### 3.1 高精度数字管道的建设

将 IMU 得到的某原油管道相对位置参数通过地面 GPS 修正后，获得精确的中心线三维坐标参数，据此，绘制其位置走向图和高程剖面图（图 4）。与遥感影像数据相结合，能够实现整条管道的可视化管理，辅助实施管道高后果区的识别，为风险评价提供数据支持，同时，可以精确识别定位与河流、公路、铁路、村镇交叉的穿跨越点位置，加强对高风险区段的重点管理。

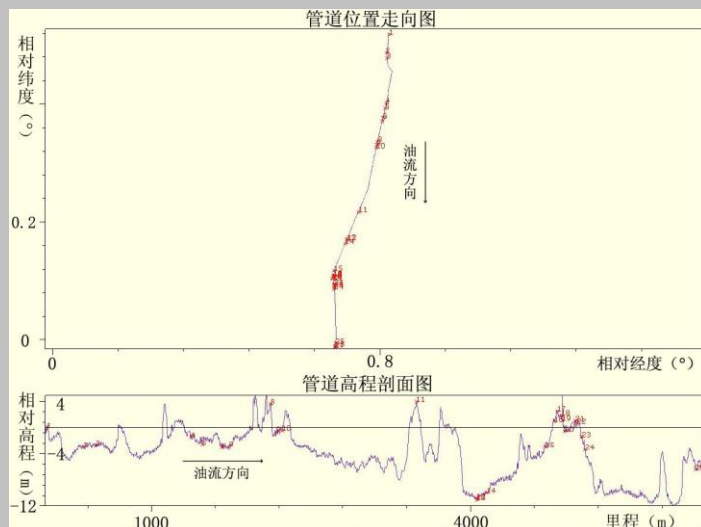


图4 管道位置走向图与高程剖面图

### 3.2 管道弯曲应变的测量

在役管道可能由于滑坡、沉降、冻胀等环境因素产生移动，导致管道产生弯曲应变并产生较大的弯曲应力，弯曲应变的存在严重影响管道的结构完整性与运行安全。利用惯性测绘内检测获得的管道中心线曲率变化数据，能够识别环境因素造成的变形区域，并评价相应区域管道的完整性。

在弹性变形范围内，管道的弯曲应变和弯曲应力与管道的曲率变化成正比。弯曲应变可以由两次内检测得到的曲率改变量求得。首次曲率检测一般是为了得到管道的曲率基线，以便将来比较。然而，如果假设管道在建设时是直的（通过其它内检测数据与已有资料排除弯头、穿跨越等位置），则可以进行初步的应变研究，评价地质非稳定性对管道的影响。目前，IMU 已实现首次检测可以识别大于  $400 D$  ( $D$  为管道直径，下同) 的曲率改变（对应的弯曲应变为  $0.125\%$ ），重复检测可以识别大于  $2\ 500 D$  的曲率改变（对应的弯曲应变为  $0.02\%$ ）。在某长度为  $115\text{ km}$  的原油管道惯性测绘内检测中，共识别出  $70$  处大于  $400 D$  的弯曲变形，这些应变包括水平弯曲应变、垂直弯曲应变以及水平与垂直复合弯曲应变（图 5，识别出的  $0.28\%$  的复合弯曲应变，其水平和垂直弯曲应变均为  $0.2\%$ ）。

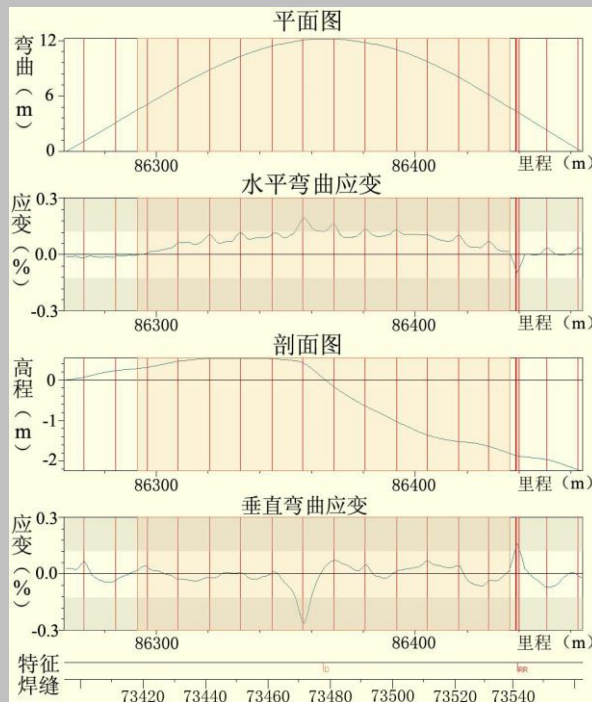


图5 管道复合弯曲应变示意图

### 3.3 管道特征的定位与展示

以惯性测绘内检测获得管道中心线为参考，整合并排比不同来源（管道运行、环境状况、内检测、地面测量维护等）的信息，实现这些信息沿管道线路的可视化排列，进而能够综合对比这些数据之间的相关关系，有助于制定管道的整体维护计划，为管道缺陷的维修提供额外的信息支持，极大地提高维修效率并节省维修费用。结合惯性测绘获得的某原油管道中心线数据，利用管道完整性工程图纸生成系统软件成功实现了完整性评价相关信息的整合、排比与工程图生成（图 6），极大方便了维修计划的制定以及缺陷的定位。



管道检测与评价技术方向的研究工作。

电话: 0316-2073876; Email: kjwfx@petrochina.com.cn

作者简介翻译: Wang Fuxiang, Engineer, born in 1980, Master degree at Tsinghua University in 2006, subject is material science and engineering, work at pipeline inspection and assessment.

导读: 利用惯性测绘内检测获得的高精度管道中心线数据, 有效识别、评估环境因素诱发的管道弯曲应变, 并实现缺陷的精确定位。

导读翻译: Pipeline bend strains induced by environmental causes were identified and assessed effectively, and the accurate location of defects was achieved, by using high accuracy pipeline centerline coordinates via inertial mapping.

创新点名称: 基于惯性测绘的管道弯曲应变识别及管道特征定位与展示

创新点内容: 利用惯性测绘内检测技术, 实现了管道中心线的三维精确测绘, 利用获得的高精度中心线数据, 有效识别、评估环境因素诱发的管道弯曲应变; 将管道中心线坐标与管道缺陷等参数相结合, 实现了管道的特征定位与展示。

### **In-line inertial mapping inspection and its application for oil and gas pipeline**

Wang Fuxiang<sup>1</sup>, Feng Qingshan<sup>1</sup>, Yang Jianxin<sup>2</sup>, Zhou Lijian<sup>1</sup>, Chen Jian<sup>1</sup>

(1. National Engineering Laboratory of Transportation Safety of Oil & Gas Pipeline, PetroChina Pipeline R&D Center, Langfang 065000, China; 2. PetroChina Shandong Natural Gas Co. Ltd, Jinan 250000, China)

**Abstract:** Pipeline integrity management is an important means to ensure pipeline safety and economic operation, and pipeline location parameters are important basis data for pipeline integrity management. In-line inertial mapping inspection for oil & gas pipeline, by using inertial measurement unit (IMU) consisting of three-dimensional orthogonal gyroscopes and accelerometers, and combining with ground GPS reference points and odometer for position and speed correction, can accurately map the coordinates of the pipeline centerline, so pipeline digital and visual management was achieved. Pipeline bend strains induced by environmental causes, were identified and assessed effectively by using high accuracy pipeline centerline coordinates. The accurate location of defects was achieved, and the repair engineering drawings of pipeline defects were generated by combining defect parameters with pipeline centerline coordinates.

**Key Words:** in-line inspection; inertial mapping; pipeline centerline; bend strain; feature locating