

文章编号 1004-924X(2005)02-0179-05

非开挖地下管线探测中的弯曲变形检测装置研究

钱晋武, 孙流川, 沈林勇, 章亚男

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:提出了一种新型的利用光纤光栅传感器进行管线弯曲变形检测的方法。将两根布拉格光纤光栅成 90° 粘贴在一种细径弹性基材上,形成直径5 mm的弯曲变形测量传感器。然后将传感器封装在特殊的定心机构里面,初步解决了传感器检测过程中的定心和卸载问题。通过标定,得到两根布拉格光纤光栅中心波长变化值与传感器弯曲曲率的比例系数分别为524.0733和485.7432。定心机构带动传感器沿被检测管线间歇式前进,在前进过程中,用光纤光栅解调仪每隔50 mm等间隔点上采样传感器的波长读数,经计算得到相应各点的应变和空间曲率信息。然后运用基于等距离离散点曲率信息的空间曲线重建方法重建出管道的空间位置形状。

关键词:管线探测;非开挖技术;光纤光栅传感器;曲线重建

中图分类号:TP212 **文献标识码:**A

On sensing apparatus for bending deformation in trenchless underground pipeline detection

QIAN Jin-wu, SUN Liu-chuan, SHEN Lin-yong, ZHANG Ya-nan

(*School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai, 200072, China*)

Abstract: A new method of using FBG sensor for detection of pipelines is proposed. First, two Fiber Bragg Gratings (FBGs) are mounted on a slim cylindrical substrate in 90° to make a strain detecting sensor with a diameter of 5 mm. Then the sensor is placed in a novel design centering clamping device to deal with the centering and longitudinal force unload problem. By the demarcate method, two coefficients between the two FBGs Bragg wavelength change and the curvature of sensor can be calculated, and the two coefficients are 524.0733 and 485.7432. While the centering clamping device drives the sensor to move along the pipeline step by step, the data of Bragg wavelength of the sensor is picked up by demodulator every 50 mm equidistance points. Space curvature information of each point can be calculated from these data. At last, the location and 3D shape of the pipeline is reconstructed by the use of the space curve fitting method, which is based on curvature information of discrete points.

收稿日期:2005-02-06;修订日期:2005-04-24.

基金项目:国家自然科学基金(No. 50475182);上海市重大科技攻关项目子项(No. 04dz12011)

Key words: pipelines detection; trenchless technology; FBG sensor; curve reconstruction

1 引言

非开挖技术 (Trenchless Technology), 即非开挖铺设地下管线的施工技术, 是上世纪 80 年代后期国外发展起来的一项管道施工新技术。它是指在不开挖地表的情况下, 利用地质工程的技术手段, 进行探测、检查、修复、更换和铺设各种地下公用设施(管道和电缆)的一种高科技实用环保新技术。可广泛应用于石油、天然气、给排水、煤气、热力、自来水、电讯、有线电视等诸多领域的地下管线施工, 并在提升环保、交通、市政施工等领域的技术进步, 以及改善城市居民生活质量等方面体现出了很大的技术优势。

我国采用现代非开挖技术进行地下管网施工兴起于 90 年代初, 但由于起步较晚, 较之于世界发达国家尚处于发展初始阶段。近年来, 随着我国经济建设的快速发展, 现代非开挖技术在我国得到日益广泛的应用, 它广泛应用于穿越公路、铁路、建筑物、河流、以及在闹市区、古迹保护区、农作物和植被保护区等不允许或不能开挖条件下进行煤气、电力、电讯、有线电视线路、天然气等管线的铺设。随着我国城市、交通、电信、油气管道等基础设施的大规模建设, 加上国家环保立法的完善与规范, 现代非开挖技术在我国的市场容量十分宽广, 应用前景倍加广阔^[1]。

在非开挖施工中, 应该对铺设的地下管线位置形状进行检测, 以确信新铺设的管线没有损坏原有的管线, 也防止新铺设的管线不被未来的铺设工程所破坏。同时根据检测数据绘制地下管线位置竣工图, 为建立城市地下管线管理信息系统提供准确的管线空间位置等资料。目前, 国内外

在非开挖施工中, 主要使用管线定位器和探地雷达等作为检测手段。但是对于电磁环境复杂和埋设较深、以及管径比较小的管线, 通常测量效果较差^[2-4]。

本文提出一种管线形状探测的新方法, 即使用光纤光栅传感器, 沿被检测管道内部等距离推进, 逐点获取被检测管道离散点空间弯曲曲率信息, 然后根据这些信息曲率重建管道的空间三维形状, 从而确定其空间位置的方法。所研制的基于光纤光栅传感器的非开挖地下管线检测系统概念图如图 1 所示。本文着重研究管线弯曲曲率的检测传感装置。

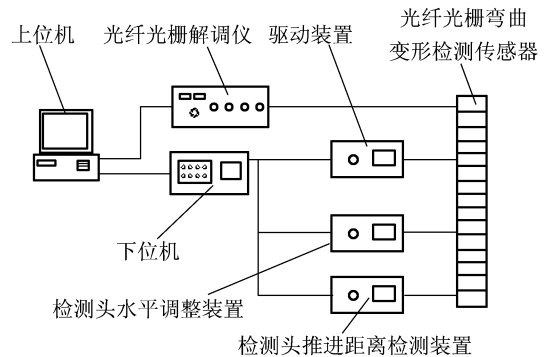


图 1 系统概念图

Fig. 1 Conception of the system

2 光纤光栅工作的原理^[5]

光纤 Bragg 光栅是通过改变光纤芯区折射率, 使其产生小的周期性调制而形成。由于周期性折射率的扰动仅会对很窄的一小段光谱产生影响(典型光谱宽度约 0.05~0.3 nm), 因此, 当宽带光波在光栅中传输时, 入射光波将在相应的频率上被反射回来, 其余的透射光波则几乎不受影响。这样, 光纤光栅实际上就起到了光波选择反射镜的作用。根据模式耦合理论, 其反

射中心波长 λ_B 可由下式确定:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta, \quad (1)$$

其中 n_{eff} 是光纤芯区的有效折射率, Δ 为光栅的栅距周期。

由式(1)可知, FBG 的波长取决于光栅周期 Δ 和反向耦合模的有效折射率 n_{eff} , 任何引起 2 个量改变的物理过程都将引起 λ_B 的变化, 在外界信号如温度、应力场的作用下, 光纤将产生轴向应变(Δ 弹性形变)和折射率变化(光弹效应):

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon + \lambda_B(\alpha_\Delta + \alpha_n)\Delta T, \quad (2)$$

其中 $P_e = n_{\text{eff}}[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]/2$ 为光纤的有效弹光系数, P_{11} 和 P_{12} 为弹光系数, ν 为光纤纤芯材料的泊松比, ϵ 为光纤光栅所受的轴向应变, ΔT 为温度的变化量, α_Δ 和 α_n 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。式(2)也可以写作:

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon\epsilon + K_T\Delta T, \quad (3)$$

光纤光栅中心波长受外界信号调制产生偏移, 解调出波长变化 $\Delta\lambda_B$ 便可得到被测量。

3 管线位置检测的实现

3.1 传感器的设计

光纤光栅本身有尺寸细小、柔软、易断等缺点, 不能直接做成传感器应用。为了精确反映管道的弯曲信息, 选择了回复能力极好直径为 0.8 mm 的弹性记忆合金丝作为基材, 把光纤光栅粘贴在基材的表面。同时被检测的管道曲线是一条空间曲线, 将两根上面各有一个光栅点的光纤成 90° 粘贴在基材的表面, 构成只有一个传感点的传感器, 如图 2 所示。

3.2 传感器的夹持定心

要精确检测出管道形状, 必需使管道弯曲变形精确传递到光纤光栅传感器上。在检测过程中, 光纤光栅传感器必须始终沿着管道中心线推进, 在每一个采样点都位于被检测管道中心, 并且要保证光纤光

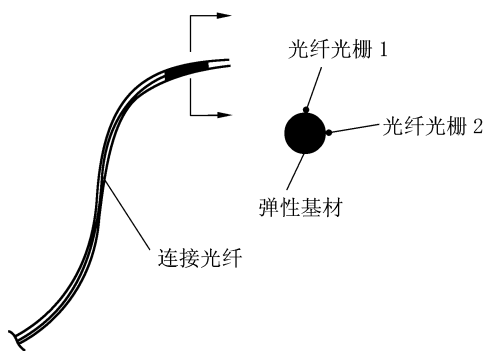


图 2 光纤光栅的粘贴示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mounted FBGs

栅传感器与管道弯曲变形保持一致。同时随着光纤光栅传感器在管道内的逐点推进, 连接光纤、电缆等的长度逐渐增加, 与管道内壁的摩擦力也逐渐增加, 为了克服摩擦力, 驱动机构提供的牵引力也会逐渐增加。如果采用直接拖拽光纤光栅传感器的推进方式, 光纤光栅传感器将会产生由牵引力引起的逐渐增大的应变, 由式(2)可以知道, 此时光纤光栅的中心波长将会产生偏移, 影响检测结果。这就要求在采样过程中要对传感器进行定心和牵引力的卸载。

为了解决上面提到的定心和卸载的问题, 设计了一种新型的夹持定心装置, 如图 3 所示。其结构原理是: 将一系列的与被检测管道内径相同的圆形弹簧片用弹性钢丝连为一个整体, 构成夹持定心装置。传感头封装完成后, 再在传感头外层套封装保护材料, 制成直径为 5 mm 的传感柔性杆, 然后将传感柔性杆固定嵌入弹簧片中心的圆孔内, 光纤光栅 1 和 2 分别测量管道相互垂直方向上的曲率。

我们的检测对象是新铺设的信息管道。由于在导向非开挖施工中, 钻掘的铺设管道的孔径比管道外径略大, 并且在施工过程中, 会在铺管孔周边喷撒特殊的粘土液, 稳固孔壁。所以新铺管完成后一段时间内, 土层的压力对管道的变形还没

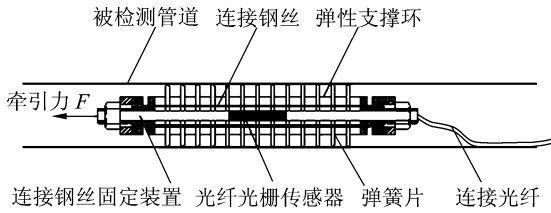


图 3 夹持定心装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of centering clamping device

有很大的影响。管道的变形主要来源于制造过程中的管壁厚度公差以及由于局部弯曲不均匀而产生的变形,这些变形是比较小的。为了解决可能出现的这种管道变形情况,设计的夹持定心装置具有一定的变径能力,传感器必须始终沿着管道中心线推进并与管道形状保持一致。其定心原理图如图 4 所示。

其中的弹簧片的外径与管道公称内径一致,夹持定心装置中每一片弹簧片四周都与管道内壁紧密接触,受到管壁的均布压力 F 的作用。当管道内径正常时,这个作用力比较小,可以忽略,此时弹簧片不发生变形,传感器位于管道中心;当管道内径比公称内径小时,压力 F 比较大,这时候弹簧片受压而产生变形,由于弹簧片结构是对称的,而受到的压力 F 也是均布的,弹簧片的中心孔还是位于管道中心线上,使传感器也保持在管道中心线位置。这就是定心装置的定心原理,如图 4 所示。这样在整个推进过程中,传感器始终位于管道中心,并且可以将管道弯曲变形精确传递到中心的光纤光栅传感器上。

驱动机构通过牵引夹持定心装置带动传感器在管道内移动,这样牵引力通过连接弹性薄片的钢丝直接传递给后面的连接光纤和电缆,而不作用在传感器上,使传感器不受牵引力作用,对牵引力进行了卸载。

夹持定心装置是实施检测的关键装置

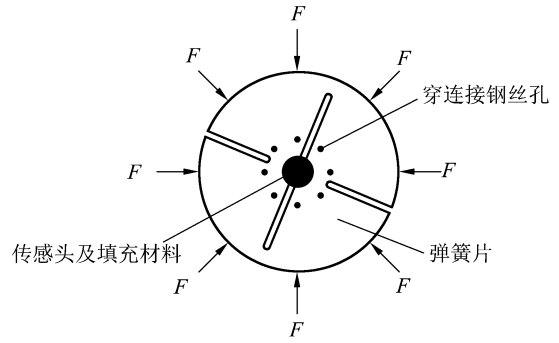


图 4 传感器的定心示意图

Fig. 4 Schematic diagram of centering sensor

之一。可以对传感器起到定心作用,同时可以夹持传感器在管道内移动,对牵引力进行了卸载。

3.3 管线弯曲曲率的检测

在纯弯曲条件下,对于圆截面弹性梁,应变、曲率之间存在以下关系^[6]:

$$\varepsilon = \frac{r}{\rho} = r \times C, \quad (4)$$

式中: ε 为传感器感测位置承受应变值; ρ 为传感器感测位置的曲率半径; C 为对应的曲率; r 为传感器安装位置到中性面的距离,如图 5 所示。

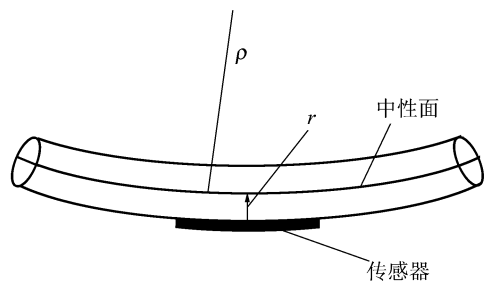


图 5 圆截面弹性梁纯弯曲示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bended girder with orbicular section

在 r 一定时, ε 与 C 成正比关系。在给定 r 、 C 的情况下,光栅的应变能够求出。在不考虑温度影响的条件下,应变与光纤光栅的中心波长偏摆成正比。所以曲率 C 与 $\Delta\lambda_B$ 成正比。由公式(2)(4)可得到 $\Delta\lambda_B$ 与

曲率之间的关系:

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon r C = KC, \quad (5)$$

图 2 中的封装后光纤光栅 1 和 2 的 $\Delta\lambda_{B_1}$ 、 $\Delta\lambda_{B_2}$ 可以通过光纤光栅解调仪测得的波长值减去没有应变状态下的波长值得到,系数 K_1 、 K_2 可以通过标定的方法得到。驱动机构通过牵引夹持定心装置带动传感器在管道内移动,在等距离点上分别采样 2 个光纤光栅的波长读数。由式(5),我们就可以计算得到被检测管道等距离点处的互成 90° 方向上的两组曲率数据。

3.4 管线形状位置的重建

利用传感器检测得到的仅仅是管道等距离离散点上的互成 90° 方向上的两组曲率数据,为了得到整条管线的形状位置,还要通过基于离散点曲率的空间曲线重建的办法^[7]重建出整个管线的空间位置形状,然后再求出所需点的坐标。

4 管道形状重建试验

封装完成后的传感器外形如图 6 所示,传感器长度大约为 260 mm,外径约为 33 mm。

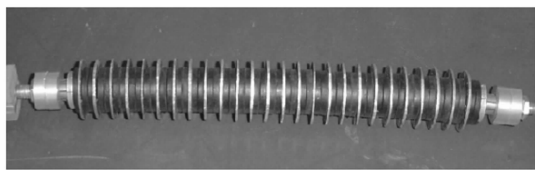


图 6 传感器实物图
Fig. 6 Picture of sensor

用光纤光栅解调仪测得封装后第 1 根光纤光栅中心波长 $\lambda_{B_1} = 1\,543.776\text{ nm}$,第 2 根光纤光栅中心波长为 $\lambda_{B_2} = 1\,548.705\text{ nm}$ 。经过标定得到系数 $K_1 = 524.073\,3$, $K_2 = 485.743\,2$ (曲率半径单位 mm)。为了验证以上的设计和方法,选择了一段管道进行验证。被检测管道外径 40 mm,内径 33 mm,长度为 600 mm,如图

7 所示。在采样时,各个采样点之间的距离为 50 mm,重建出的管道形状如图 8 所示。



图 7 被检测管道
Fig. 7 Shape of pipe

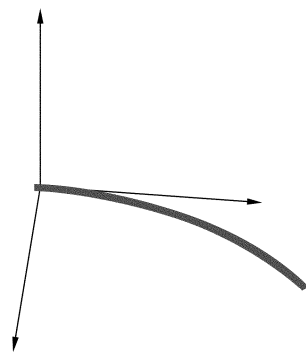


图 8 重建出的管道形状
Fig. 8 Reconstructed shape of pipe

5 结 论

本文提出了一种基于光纤光栅的在管道内测量管道弯曲变形的装置。以它为基础构成的系统可以进一步测量出地下管线的形状。由于光纤光栅信号是波长解调型的,不受电磁干扰影响;这种检测方法从原理上不受管线埋设深度的影响,对地下管线位置精确探测和城市地下管线信息管理的建设将具有实际意义。

6 致 谢

汤慧雅同志参与了此课题的前期预研究,吴家麒同志参加过课题有关的讨论,在此一并致谢。