

文章编号:1672-3031(2017)03-0208-05

基于分布式光纤监测的压力钢管模拟泄漏室内试验

商峰^{1,2}, 范哲^{1,2}, 朱新民^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 结构材料研究所, 北京 100038;

2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 实际运行的压力钢管可能存在腐蚀进而破裂、泄漏的隐患, 因此需要开展在役的压力钢管实时安全监测方法研究, 实现对泄漏的及时定位、报警。本文基于F-OTDR光纤干涉原理的振动监测方法, 开展了模拟压力钢管泄漏的室内试验, 系统研究不同泄流条件下的分布式光纤的检测结果。试验结果表明, 随着泄流孔径的增加和泄流量的增加, 泄漏引起的振动信号强度增加, 但是由于系统初始扰动能量的存在, 仅依据数据分析, 难以判断极小泄流量引起的振动信号。本实验中, 当泄流量大于1.00L/s时, 分布式光纤检测效果较好。

关键词: 压力钢管; 分布式光纤; 振动监测

中图分类号: TV698.1

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.iwhr.2017.03.007

1 研究背景

压力钢管广泛应用于水利水电、市政给排水、油气输运等行业。压力钢管在运行过程中一旦发生泄漏, 不仅会带来巨大的经济损失, 而且可能危及公共安全。2013年11月22日, 青岛发生输油管道泄漏爆炸重大事故, 造成62人死亡、136人受伤, 直接经济损失75 172万元^[1]。其直接原因是输油管道与排水暗渠交汇处管道腐蚀减薄、破裂, 原油泄漏后流入排水暗渠及反冲到路面。原油泄漏后, 现场处置人员采用液压破碎锤在暗渠盖板上打孔破碎, 产生撞击火花, 引发暗渠内油气爆炸。这一事故表明, 实际运行的压力钢管可能存在腐蚀进而破裂、泄漏的隐患。因此, 有必要开展在役压力输水(油气)钢管实时安全监测方法研究, 实现对泄漏进行及时定位、报警, 从而避免事故发生。

由于在役压力输水(油气)钢管分布距离较长, 管内流态比较复杂, 运用常规的流量、压力监测的方法仅能探测到较大的泄漏, 且定位精度较差, 误报率也较高。与之相比, 分布式光纤监测方法可以同时实现时间上和空间上的连续测量, 成为长输管线实时监测技术中最具有发展和应用前景的一个方向。理论分析表明^[2], 管道在发生破裂、泄漏时, 在管内压力作用下, 管内流体向外射出会引起管壁振动。因此, 通过监测管壁的异常振动, 有可能实现对泄漏的及时检测和定位。研究人员先后发展出多种分布式光纤振动监测方法, 如基于Mach-Zehnder光纤干涉仪原理的振动监测方法^[3]、基于Sagnac光纤干涉原理的振动监测方法^[4]、基于 ϕ -OTDR光纤干涉原理的振动监测方法^[5]等。与其它分布式光纤振动监测方法相比, 基于 ϕ -OTDR光纤干涉原理的振动监测方法具有传感距离长、不需要额外的传感设备、可以实现多点定位等优点, 因而成为结构健康监测领域的新近研究热点^[6]。

然而, 上述研究的主要目的都是光纤传感和解调设备的开发, 对于相关技术方法在实际工程中的可用性缺乏系统性研究。因此, 本文尝试采用基于 ϕ -OTDR光纤干涉原理的振动监测方法, 开展模拟压力钢管泄漏的室内试验, 系统研究不同泄流条件下的监测结果, 为今后开展实际工程应用积累经验。

收稿日期: 2016-03-14

基金项目: 国家973计划课题(2013CB036406); 国家自然科学基金项目(51209121, 51578544); 中国水利水电科学研究院调研专项(SS0145C1520150000); 中国水利水电科学研究院科研专项(1650)

作者简介: 商峰(1982-), 男, 安徽芜湖人, 高级工程师, 博士, 主要从事水工结构研究。E-mail: shangfeng@iwhr.com

通讯作者: 朱新民(1967-), 男, 江苏靖江人, 教授级高级工程师, 主要从事水工结构研究。E-mail: zhuxm8@iwhr.com

2 基于 ϕ -OTDR 光纤干涉原理的振动监测方法

OTDR 技术是光时域反射(Optical Time Domain Reflectometer)技术的简称,其通过检测光纤中产生的后向瑞利散射信号来判断光纤的故障点,主要应用于检测光缆的故障、光纤的长度、光纤的损耗以及光纤接头损耗等。在传统 OTDR 技术的基础上,研究者开发出了基于 ϕ -OTDR 原理的振动监测方法,通过输入超窄线宽的激光光源,增强光波的干涉效果,见图 1。

由图 1 可以看出,实际测量时,利用激光器向光纤内发射脉冲光,入射光在光纤介质内传播过程中发生后向瑞利散射。接收器通过计算接收到散射光的传播距离和光强可以了解光纤不同对应位置处的物理变化,从而实现空间上的连续监测。当局部受到扰动时,光纤对应位置的折射率将发生变化,进而导致该处光相位发生变化;由于干涉作用,相位的变化将引起散射光光强发生变化。通过计算不同时刻瑞利散射光强空间分布曲线之间的差值即可检测出外界的扰动,差值空间分布曲线中尖峰所对应的距离即为扰动对应的位置。

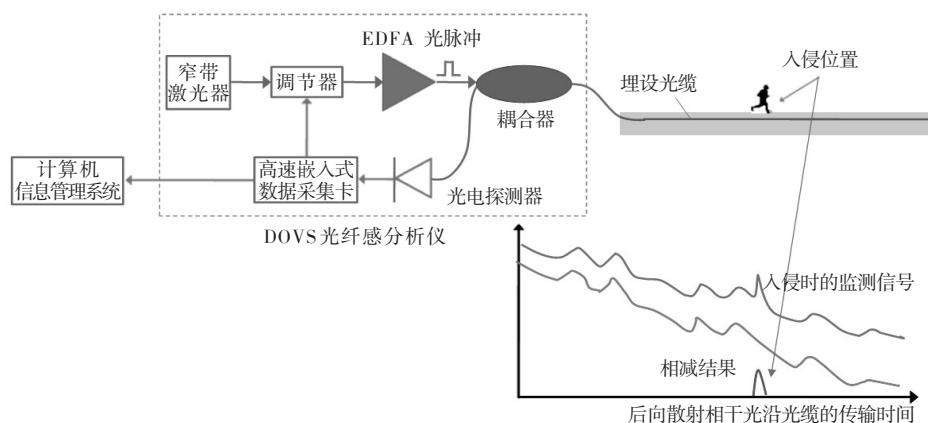


图 1 基于 ϕ -OTDR 光纤振动监测原理^[7]

目前, ϕ -OTDR 光纤振动监测技术主要应用于周界安防领域。应用于管道泄漏监测时,需要将光缆粘结于管壁上;泄漏引发的管壁振动传导到光纤上,就可以被系统检测到。

3 压力钢管模拟泄漏试验

3.1 试验装置与仪器布置 室内试验在五矿集团甬泰(山东)钢铁有限公司 3 000T 内水压力测试平台上进行。为了便于在管道上开孔进行模拟泄漏试验,以及控制试验过程的安全性,本研究采用螺旋焊制钢管作为管道模型。试验钢管长 12 m,直径 910 mm。试验前首先对钢管进行打压测试,保证钢管在 3.0 MPa 内压不发生破坏。然后,在钢管中段的底部开孔,焊接支管和安装阀门,用于模拟泄漏试验。在钢管上开有 4 个泄漏孔,直径分别是 2、4、8 和 14 mm。焊接支管的直径为 40 mm。

试验前,沿管道底部布设有一根分布式光纤,采用环氧树脂粘接于管道内壁。在管道两端制作出线孔,供光缆穿出,用环氧树脂封堵出线孔,待环氧树脂完全固化后再进行模拟泄漏试验。为增强分布式光纤的检测效果,光缆从两端出线孔穿出后,分别与管外壁沿管轴线粘接 10 m,此后再分别连接一段 500 m 左右的光缆盘。光纤布设完毕之后,给管道两端安装密封橡胶垫。将管道小心吊装至压力测试平台,以免折断光缆。搭建数据采集平台,做好试验准备。

试验采用上海拜安传感技术有限公司研发的 DOVS 分布式光纤振动连续监测系统对管壁振动的监测。振动传感光缆采用定制铁氟龙铠装光缆,其具有优良的变形传递能力和较好的防水性能,内含单模 G.652 光纤。试验中系统的空间分辨率为 20 m。

3.2 试验方法 试验首先给管内充水,并加压至预定值。内压稳定一段时间后,开阀泄流,记录光纤监

测信号。试验中分别对0.8、0.6、0.4和0.2 MPa 4个不同内压工况下各泄漏孔分别进行了开阀试验。一次试验只打开一个阀门，当一次试验结束后，需要重复充水、加压的过程。共计进行了26组试验。试验中采用体积法对2、4、8和14 mm孔的泄流量进行了监测，即测定累积泄漏量达到一定体积所需要的时间。

3.3 试验结果 由于振动信号具有瞬时特性，试验过程中DOVS系统显示的实时差值曲线是跳跃的，给直观判断带来了一定的困难。事实上，泄漏引发的振动信号在时空域内存在一定的分布特征。首先，信号在空间上集中分布于泄漏点附近的位置；其次，信号会在一定时间域内持续分布。因此，本文提出如下处理方法：将一段时间内各时刻测量得到的分布式光纤差值曲线都绘制在同一张坐标图上，这里称之为差值分布累积曲线。此时，泄漏点附近引起的持续振动信号将会叠加在一起，明显地与其它位置所产生的孤立的、或者强度较小的噪音信号区别开来。

试验得到的典型差值分布累积曲线如图2所示。对比不开阀静置和开阀模拟泄漏两种条件下的检测结果可以看到，分布式光纤可以检测出开阀模拟泄漏所产生的异常振动信号。由于光缆在钢管两端出线孔出线后又沿着钢管外壁各粘接10 m，而DOVS系统的空间分辨率与钢管长度处于同一个量级，因此，试验过程中在泄漏点附近位置检测到3组异常振动信号。

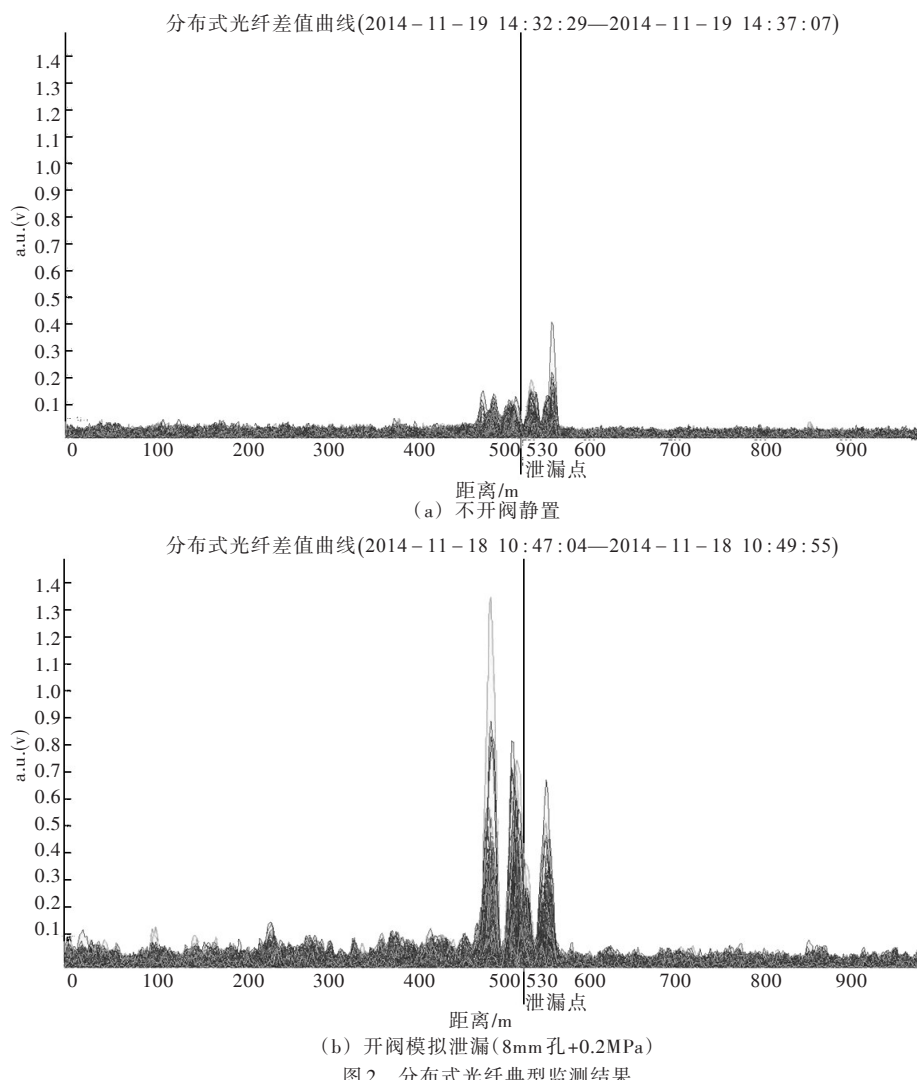


图2 分布式光纤典型监测结果

同时可以看到，试验环境中存在噪音信号；异常振动信号的强度只有高于环境振动信号，才能被系统检测出来。因此，定义分布式光纤检测到某位置 x_0 处随动差值的历时平均信号强度 EA_f 按下式计算：

$$EA_f = \frac{1}{\Delta t} \iint A_f dt dx = \frac{1}{N} \sum_{x_0 - \Delta L/2}^{x_0 + \Delta L/2} \sum_{t_0}^{t_0 + \Delta t} A_f \quad (1)$$

式中： A_f 为 Δt 时段内 x_0 附近随动差值信号； ΔL 为光纤分布长度，一般可以设为空间分辨率的整数倍，本文设 $\Delta L = 100$ m，以便统计试验中钢管周边所有振动信号； N 为 Δt 时段和 ΔL 分布长度内 A_f 的数据个数。

统计各试验工况下 EA_f 计算结果，并绘制出 EA_f 与泄流量的关系如图3所示。图3同时绘出了环境振动的 EA_f 计算结果。总体上看，随着泄流孔孔径的增加和泄流量的增加，泄漏引起的振动信号强度增加；泄漏引起的振动信号强度大多高于环境振动信号强度。当泄流量大于1.00L/s时，即对应8 mm孔和14 mm孔的情况，分布式光纤检测出的信号强度 EA_f 都在1.0以上，远高于环境振动信号强度，检测效果较好。对于2 mm孔和4 mm孔，泄流量较小，检测出的信号强度 EA_f 大多在0.5~1.0之间，与环境振动信号接近，检测效果难以保证。

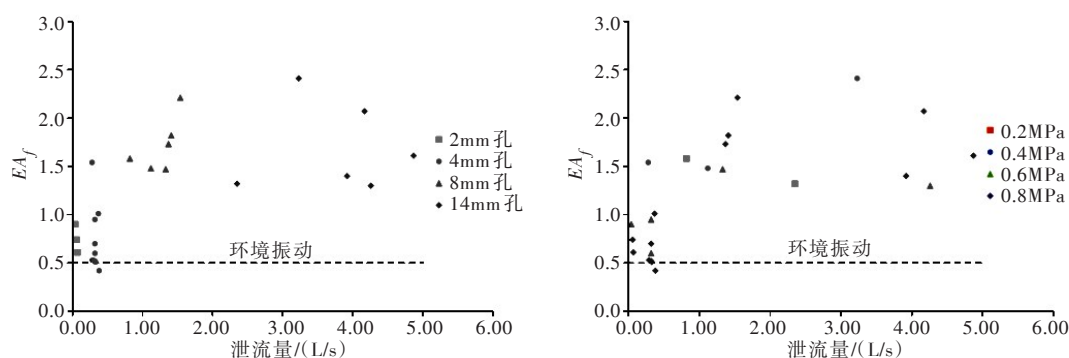


图3 EA_f 与泄流量之间的关系

由于分布式光纤与管壁粘接在一起，当管壁应力状态产生扰动时，光纤内部折射率发生改变，从而可以检测到异常信号。相同时间内管壁应力状态的改变越大，分布式光纤检测到的信号越强。开阀前，管内水体仍存在某些系统性的扰动，这与加载平台有关。开阀动作引起的局部水锤作用，会引起管壁应力状态产生波动。泄流量越大，局部水锤作用越强烈，因而分布式光纤检测到的平均信号强度越大。由于系统初始扰动能量的存在，实际长输管道系统中，仅依据数据分析，难以区分极小泄流量引起的振动信号。

4 结论

本文采用基于 ϕ -OTDR光纤干涉原理的振动监测方法，开展了模拟压力钢管泄漏的室内试验，系统研究不同泄流条件下的分布式光纤的检测结果。试验结果表明，随着泄流孔孔径的增加和泄流量的增加，泄漏引起的振动信号强度增加，但是由于系统初始扰动能量的存在，仅依据数据分析，难以判断极小泄流量引起的振动信号。当泄流量大于1.00 L/s时，分布式光纤检测效果较好。本次试验中，压力钢管处于两端简支状态，与实际工程地下埋管的边界条件仍有一定区别，因此，有必要深入开展不同边界条件下的泄漏检测试验，为开展工程应用奠定基础。

参 考 文 献：

- [1] 中华人民共和国中央人民政府网. 中石化东黄输油管道泄漏爆炸特别重大事故调查报告[R/OL]. http://www.gov.cn/gzdt/2014-01/11/content_2564671.htm.
- [2] 韩晓琳, 汪凤泉. 泄漏量的振动估计[J]. 振动、测试与诊断, 1991, 11(1): 28-31, 53.
- [3] 周琰, 靳世久, 张昀超, 等. 分布式光纤管道泄漏检测和定位技术[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 121-124.
- [4] 杭利军, 何存富, 吴斌, 等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 123-127.
- [5] 安阳, 靳世久, 冯欣, 等. 基于相干瑞利散射的管道安全光纤预警系统[J/OL]. 天津大学学报, 2013.

<http://www.cnki.net/kcms/detail/12.1127.N.20131104.1421.003.html> .

- [6] 刘建霞. ϕ -OTDR 分布式光纤传感监测技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 193-198 .
- [7] 上海拜安传感技术有限公司. 光纤传感器及信号解调设备选型手册[Z]. 2014 .

Distributed optical fiber monitoring in simulated leakage test on pressure steel pipe

SHANG Feng^{1, 2}, FAN Zhe^{1, 2}, ZHU Xinmin^{1, 2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract: The pressure steel pipe in service could be broken by corrosion and lead to dangerous leakage. Hence it is necessary to develop a real time monitoring method to locate the leaks in pipes and alarm in time. This study carried out a series of indoor experiments that simulated leakage in a pressure steel pipe, using the vibration monitoring method based on the ϕ -OTDR optical fiber interference principle and systematically studied its effectiveness under different leakage conditions. The experimental results imply that the detected vibration signal intensity become larger as the increase of the size of leak holes and discharge of flow. However, due to the initial vibration energy in system, the vibration signal by extreme small leakage can hardly be distinguished according to monitoring data. In this experiment, the distributed optical fiber can be effective when the leakage is larger than 1.00L/s.

Keywords: pressure steel pipe; distributed optical fiber; vibration monitoring

(责任编辑: 王成丽)

(上接第 207 页)

Visco-elastic boundary processing method for dynamic analysis of earth-rock fill dam on deep overburden layer

YANG Zhengquan^{1, 2, 3}, LIU Xiaosheng^{1, 2, 3}, WANG Xiaogang^{1, 2, 3},

ZHAO Jianming^{1, 2, 3}, WEN Yanfeng^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;

2. Dept. of Geotechnical Engineering, IWHR, Beijing 100048, China;

3. Engineering Research Center on Anti-Earthquake and Emergency Support Techniques of Hydropower Projects, Ministry of Water Resource, Beijing 100048, China)

Abstract: In the dynamic analysis of earth-rock fill dam on deep overburden layer, the foundation of dam is truncated usually when the depth of overburden layer is higher than the height of dam on it, and the analysis object is the system of dam and its near-field foundation. The problem that dam response becomes larger because of the boundary truncation can be solved effectively though the application of visco-elastic boundary condition in dynamic analysis of the dam-foundation system. Dynamic response analysis method of the earth-rock fill dam on deep overburden layer base on visco-elastic boundary condition is established in the paper. The problem of seismic motion input under visco-elastic boundary condition is solved by the method of applying equivalent seismic inertia force on structures. Dynamic nonlinear characteristics of soil is reflected using the equivalent linearization method. The results show that, the problem of seismic motion input under visco-elastic boundary condition can be solved effectively by the method of applying equivalent seismic inertia force on structures, and the dynamic response levels of dam in earthquake is increased when the cut-off boundary of dam is fixed, which makes the calculated results conservative.

Keywords: deep overburden layer; earth-rock fill dam; dynamic analysis; boundary processing method; visco-elastic boundary

(责任编辑: 杨 虹)