



# 基于压电主动传感法的钢管螺纹接头松动监测

李宗源<sup>1</sup>, 冯 谦<sup>1,2</sup>, 梁亚斌<sup>1,2</sup>, 罗登贵<sup>1,2</sup>, 刘铁军<sup>3</sup>

(1. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉地震工程研究院有限公司, 湖北 武汉 430071;  
3. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

**摘 要:** 针对管道工程中缺乏对接头部位松动监测的相关研究, 该文利用压电陶瓷传感技术对城市地下管网中广泛应用的钢管螺纹连接松动进行监测实验。在钢管管道和外接螺纹接头处分别粘贴压电陶瓷传感器, 松动发生时, 管道和外接头间的相对接触面积减小、相对距离发生变化, 最终影响应力波在传感器之间的传播和衰减。基于此, 该文从理论上推导螺纹松动程度与应力波信号衰减之间的对应关系, 并通过室内实验, 验证所提方法的有效性, 即压电主动传感法可以较好地实现对管道螺纹接头部位松动病害的监测和分析。此外, 5次重复性实验进一步验证所提方法监测效果的一致性和鲁棒性, 可为管道工程监测领域提供参考。

**关键词:** 钢管连接; 压电陶瓷片; 主动传感; 健康监测

**文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-5124(2018)06-0028-05

## Looseness monitoring for the screwed connection of steel pipeline using piezoceramic-based active sensing approach

LI Zongyuan<sup>1</sup>, FENG Qian<sup>1,2</sup>, LIANG Yabin<sup>1,2</sup>, LUO Denggui<sup>1,2</sup>, LIU Tiejun<sup>3</sup>

(1. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China; 2. Wuhan Institute of Earthquake Engineering Co., Ltd., Wuhan 430071, China; 3. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of research on the looseness monitoring at pipeline connections in pipeline engineering, the paper conducts monitoring test on the looseness at screwed connections of steel pipes widely used in underground urban pipe network with piezoceramic-based active sensing approach. As piezoceramic sensors are used at steel pipeline and external screwed connectors, if looseness occurs, the relative contact area between the pipeline and the external connector will decrease and their relative distance will change, finally affecting the transmission and attenuation of stress waves between sensors. Based on this, the paper deduces a theoretical relationship between the degree of looseness and the attenuation of stress wave signals and verifies the effectiveness of the proposed method through indoor test. Results show that the piezoceramic-based active sensing approach can better monitor and analyze the looseness at screwed connectors of pipeline. Five repeated tests also verify the stability and robustness of the proposed method, thus it can tentatively apply for looseness

收稿日期: 2018-01-15; 收到修改稿日期: 2018-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608493)

作者简介: 李宗源(1991-), 男, 河南洛阳市人, 硕士研究生, 专业方向为防灾减灾工程及防护工程。

通信作者: 冯 谦(1982-), 男, 湖北武汉市人, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事结构健康监测与振动控制等领域研究。

monitoring in pipeline engineering.

**Keywords:** steel pipeline connection; piezoceramic; active sensing; health monitoring

## 0 引言

钢管在管道工程中应用广泛,连接方式多种多样,焊接、螺纹连接、卡箍连接、法兰连接等连接方式是钢管管道连接的主要方式。螺纹连接因其可拆卸、制作方便、连接前后不发生弯曲而被广泛使用,但其同样容易产生松动泄露、接头腐蚀等问题。钢管管道连接部位是管道工程中的薄弱环节,对管道连接部位的研究相对缺失,因此,对连接部位进行松动监测等相关研究具有重要意义。

压电材料是新型智能材料,其基本原理来自压电效应。由于压电效应的存在,利用压电材料产生的超声导波、 $\lambda$ 波、高频机械震荡等监测、检测方法应运而生。各种检测方法在土木工程领域中逐渐被广泛应用<sup>[1]</sup>,并发明出新型构件<sup>[2-3]</sup>监测混凝土、螺栓<sup>[4]</sup>、钢结构<sup>[5]</sup>、管道<sup>[6]</sup>等方方面面的工程对象。张宇<sup>[7]</sup>利用压电阻抗法识别管道运营条件下的管道裂纹,得到有效的损伤识别指标,验证了实验可行性;Feng<sup>[8]</sup>用压电主动法监测混凝土管道裂缝不同走向以及局部渗水对压电信号的改变程度;Du<sup>[9]</sup>通过人工制造缺陷来模拟管道腐蚀情况,之后利用时间反演法对钢管管道的腐蚀缺陷进行实验验证;Yan<sup>[10]</sup>用超声导波监测管道两个裂缝,并通过损伤敏感程度来判断压电材料能否监测双裂缝工况。虽然在管道病害方面利用压电材料监测的方式方法很多,但实验室所用方法能够用于实际检测的并不多,压电主动法是能够实际应用的方法之一。

本文利用压电主动传感法,对钢管管道螺纹接头部位的松动病害进行实验,以探求松动监测可行性。

## 1 实验原理

### 1.1 螺纹接头松动对应力波能量的影响

应力波在管道和接头之间的接触界面发生透射,透射能量大小与接触面积相关。当接头部位松紧程度改变时,螺纹啮合接触面积随之改变,由此通过监测接收应力波信号的能量改变,来间接表征接头部位接触面积的改变,最终达到监测松紧程度的目的。因压电陶瓷片实现了电能与机械能的相互转变,压电陶瓷片可以作为传感器,接收应力波,或者作为激发器,直接产生应力波。利用此效应来发射并接收应力波,能够作为监测手段达到实验目的。

应力波在传播的过程中,受介质的影响较大。当构筑物随着自身状态的改变,相应的应力波的表现形式也发生改变。压电陶瓷产生的应力波,对于接触面积、界面、介质自身改变等方面的变化有明显的识别作用。在该实验中,信号通过连接界面传递能量,转动过程中,紧固力通过界面的摩擦力表现在接头部位的扭力上,界面的摩擦力同压强,受力面积相关。在金属制品表面接触中,经典赫兹接触理论和正弦波表面模型能够很好解释压强、接触面积,扭力之间的关系<sup>[11]</sup>,为了突出影响信号能量的主要因素,该实验在原理分析里面的主要变量有两个,分别是界面接触面积  $S$  和两个压电片距离  $L$ 。

#### 1) 接触面积变化与转动角度变量之间的关系

在接触面积中,需要分析两种情况下的接触情况转动前后过程中,管道与接头存在接触的面积  $S_0$ ,与在转动过程中从接触中分离的面积  $\Delta S$ 。

充分考虑所有接触时,接触面积的改变对信号能量的变化产生重要影响。因此,针对松动过程,重点考察接触面中的面积改变。假设接头转动角度  $2\pi$ ,螺纹面从管道中分离面积为  $S_0$ ,分离面积  $\Delta S$  与转动角度  $\theta$  呈正比例关系:

$$\Delta S = \frac{\theta}{2\pi} S_0 \quad (1)$$

#### 2) 相对距离变化与转动角度变量之间的关系

同时,转动过程中,需要分析两个压电陶瓷片间的相对距离  $L$  与管道转动角度  $\theta$  之间的关系。

假设初始位置两个压电片处于同一直线,两者相对距离为  $a$ ,管道半径为  $R$ 。此时,假设外接头转动一周  $2\pi$ ,向外移动距离为  $b$ ,则当管道转动角度  $\theta$  时 ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ),压电片距离与角度之间的关系如图1所示,表达式为

$$L = \sqrt{\left(a + \frac{\theta}{2\pi} b\right)^2 + (\theta R)^2} \quad (2)$$

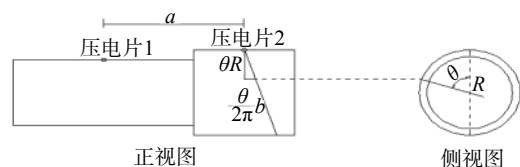


图1 管道外观与压电陶瓷片初始粘贴位置

距离的改变量  $\Delta L$  表示如下:

$$\Delta L = L - a \quad (3)$$

即:

$$\Delta L = \sqrt{\left(a + \frac{\theta}{2\pi}b\right)^2 + (\theta R)^2} - a \quad (4)$$

经泰勒展开可知:

$$\Delta L \propto \theta \quad (5)$$

则实验过程中信号能量的改变影响因素,用下式表示。由于  $\Delta S \propto \theta$ 、 $\Delta L \propto \theta$ , 所以:

$$\Delta E = \Delta E_s + \Delta E_l \quad (6)$$

$$\Delta E \propto \theta \quad (7)$$

能量的改变量同角度直接相关。

## 1.2 基于小波包能量法的松动指数

在能量传播的过程中,波的能量主要体现在幅值大小上面,本文利用小波变换的方法,识别特征信号,对信号进行处理。

本文中,接收到的信号被  $n$  阶变换从而变成数量为  $2^n$  的信号集,记为  $\{X_1, X_2, \dots, X_{2^n}\}$ , 变换之后的信号在频率域中被划分为  $j$ , 实际信号的频率范围由采样频率决定,数字  $m$  代表采样频率<sup>[12]</sup>, 变换后的小波信号为

$$X_j = \{x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm}\}, (j = 1, 2, \dots, 2^n) \quad (8)$$

信号能量大小定义为

$$E_i = x_{i1}^2 + x_{i2}^2 + \dots + x_{im}^2, (i = 1, 2, \dots, 2^n) \quad (9)$$

分解后的信号能量为

$$E = \{E_1, E_2, \dots, E_{2^n}\} \quad (10)$$

松动后的信号就可以用如下的指标表示:

$$E = \sum_{i=1}^{2^n} E_i^2 \quad (11)$$

## 2 实验装置及步骤

实验采用长 550 mm、外径 48 mm 钢管作为实验对象,内径 42 mm,壁厚约 3 mm。外接头内径 44 mm。直接购买制作好的钢管,螺纹接头形制规整,螺纹线平整,接头部位无明显损伤,外接头均匀紧固。图 2 所示为粘贴压电陶瓷片后的钢管螺纹接头部位,压电陶瓷片粘贴位置是实验初始工况下的位置。另附压电陶瓷片的规格如表 1 所示。

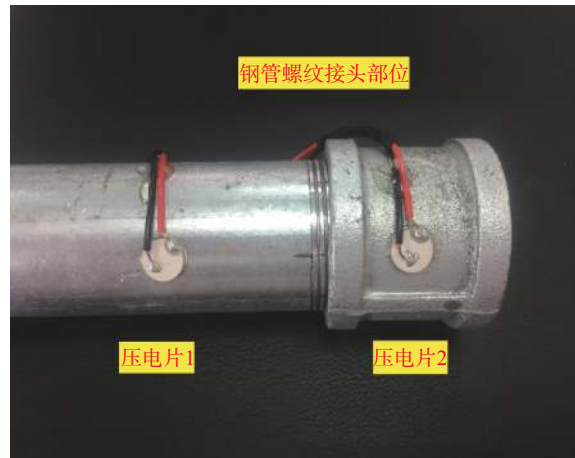


图 2 管道外观与压电陶瓷片初始粘贴位置

表 1 压电片物理参数

密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	杨氏模量/GPa	泊松比	压电应变系数/(10 <sup>-10</sup> m·V <sup>-1</sup> )	介电常数/(10 <sup>-8</sup> F·m <sup>-1</sup> )
7800	46	0.3	-2.10/5.00/5.80	1.75/2.12

实验准备过程中,用皮尺测量管道周长,均分两半后,对半周长 5 等份,做标记于管道壁上。之后,用环氧树脂粘贴压电片于图 3 中的标示位置,压电片 1 粘贴在钢管上,被夹具固定,压电片 2 粘贴在外接头上,随外接头转动,图中起始位置作为实验基准工况条件。实验过程中,每次转动以刻度线为准,转动 5 次后压电片所处位置和开始位置正好位于管道两侧。实验过程中以弧长转动为准,半径相同,则每次转动角度相同,设置工况如表 2 所示。

图 4 是实验所用设备,数据采集卡为美国国家仪器有限公司所产的型号为 USB-6363 型采集卡,实验监测所用软件为 LabVIEW,实验采用扫频信号

作为激发信号,对于激发信号的频率范围,首先采用 1 Hz~1 MHz 的频率范围进行测试,对于 6 种工况条件下,松动导致信号相对频率的改变未知,采用何种频率信号进行测试是实验测试频率选择的主要考量,因此进行测试,对于频率范围,由测试结果可以作为频率选择的依据,附测试结果如图 5 所示。

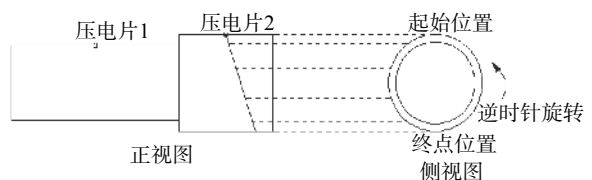


图 3 实验过程图

表 2 实验工况

工况条件	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
转动角度	0	$\frac{\pi}{5}$	$\frac{2\pi}{5}$	$\frac{3\pi}{5}$	$\frac{4\pi}{5}$	$\pi$



图 4 实验所用设备及器材

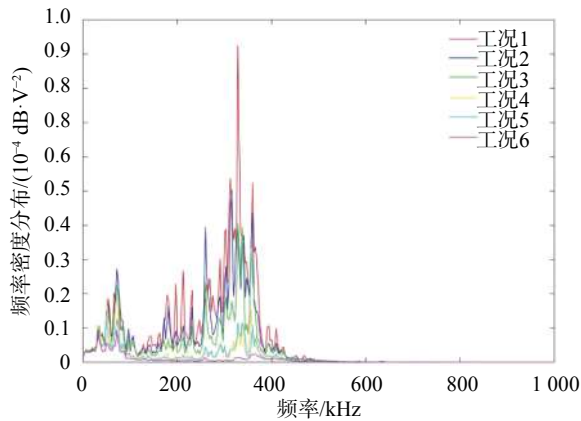


图 5 采集信号频率域测试

图中所示的结果为测试后频谱图, 之后对实验数据进行频谱分析。结果表明, 频率在 400 kHz 以下能够明显识别松动的变化, 因此, 选择 100 Hz~400 kHz 为实验采样频率段进行扫频激励。表 3 为监测终端中使用的实验参数。

表 3 实验参数

参数	数值
扫频频率	100 Hz ~ 400 kHz
采样频率	2 MHz
扫频信号时长	0.5 s
电压幅值	10 V

### 3 实验结果及分析

实验中: 首先测试无松动情况下的信号, 随后

转动外接头, 使外接头每次转动角度相同, 转动到相应工况即停止转动, 然后测量数据, 结果如图 6 所示, 从上到下依次为工况 1~工况 6 实验数据。

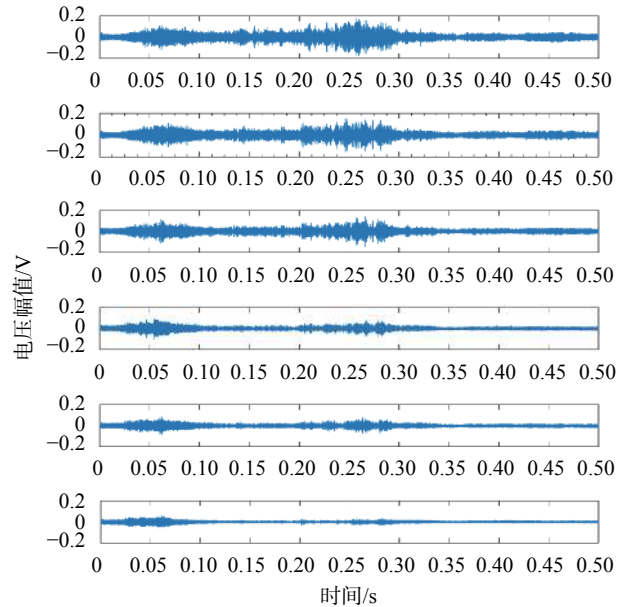


图 6 数据信号时程

由图可明显看出, 随着松动的进行, 信号幅值逐渐降低。在最后一工况下, 信号能量同初始时的能量相比, 发生了巨大变化, 运用小波包能量分析法对所有工况条件的信号进行处理, 结果如图 7 所示。

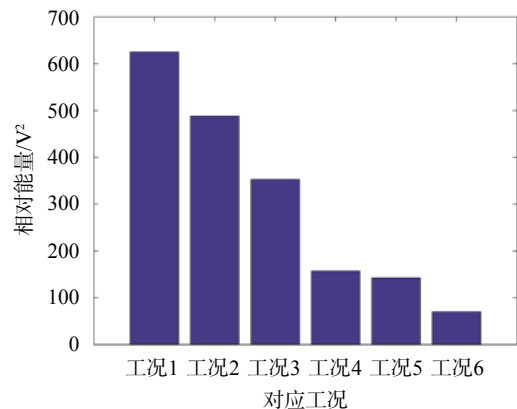


图 7 信号处理后能量图

信号的衰减呈现明显的递减关系, 并且递减速度较均匀, 同推论所提到的能量衰减同转动角度之间的关系, 对应良好。同时, 管道在转动过程中, 转动扭力会有轻微的变化, 为排除实验过程中无关干扰因素带来的影响, 对实验进行了 5 次重复性实验, 测试结果如图 8 所示。

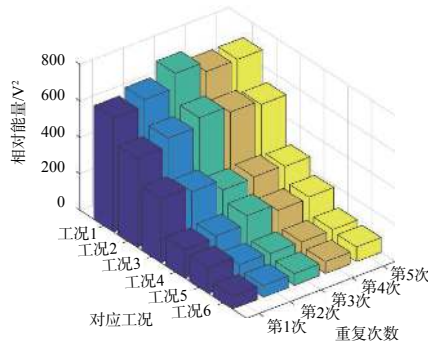


图8 空间关系图

参照实验过程与图中测试结果,该方法能够较好地反映接头松动过程。在实验的过程中,影响实验结果的主要变量为接头部位的有效接触面积改变量  $\Delta S$  和压电片之间的距离改变量  $\Delta L$ 。在实际转动角度方面,由于转动角度固定,每次转动  $\pi/5$ ,分离面积和距离逐渐增加,但是,由于基础面积和距离都是关于转动角度  $\theta$  的函数,整个信号的能量改变程度是关于角度  $\theta$  的函数。

最终研究结果表明,运用压电主动传感法能够有效监测接头部位的松动情况。对于钢管螺纹接头的松动,直接体现在接头和管道之间发生角度转动,由此带来的松动可以被主动传感法有效监测。实验下一步可以用压电阻抗法测试转动过程中机械阻抗的变化。

#### 4 结束语

本文通过实验室模拟松动过程的方法,利用扳手对钢管螺纹接头进行5次松动,利用压电主动传感法检测松动过程中信号幅值的改变,运用小波包能量法对提取的信号进行分析,结果表明能量大小随松动程度增加呈明显的递减关系。同时,为排除其他干扰因素,进行重复性实验。最终结果表明,基于压电主动传感法能够较好监测钢管螺纹连接的松动,验证了松动过程中松动程度同转动角度之间良好的对应关系,探求在实际工程中有效实现对钢管管道接头的监测,探索健康监测在管道工程中更广泛的应用途径。

#### 参考文献

- [1] SONG G, GU H, MO Y L. TOPICAL REVIEW: Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures—a tutorial and a review [J]. Smart Materials & Structures, 2008, 17(3): 033001.
- [2] HUO L, CHEN D, LIANG Y, et al. Impedance based bolt pre-load monitoring using piezoceramic smart washer [J]. Smart Materials & Structures, 2017, 26(5): 057004.
- [3] SONG G, GU H, MO Y L. Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures—a tutorial and a review [J]. Smart Materials & Structures, 2008, 17(3): 033001.
- [4] YANG J, CHANG F K. Detection of bolt loosening in C-C composite thermal protection panels: II. Experimental verification[J]. Smart Materials & Structures, 2006, 15(2): 591-599.
- [5] LIANG Y, LI D, PARVASI S M, et al. Load monitoring of pin-connected structures using piezoelectric impedance measurement [J]. Smart Materials & Structures, 2016, 25(10): 105011.
- [6] ZHANG L, WANG C, HUO L, et al. Health monitoring of cuplok scaffold joint connection using piezoceramic transducers and time reversal method [J]. Smart Materials & Structures, 2016, 25(3): 035010.
- [7] 张宇, 胡利琼, 罗辉, 等. 压电阻抗法识别管道裂纹试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2015(1): 48-52.
- [8] FENG Q, KONG Q, SONG G. Damage detection of concrete piles subject to typical damage types based on stress wave measurement using embedded smart aggregates transducers [J]. Measurement, 2016, 88: 345-352.
- [9] DU G, KONG Q, WU F, et al. An experimental feasibility study of pipeline corrosion pit detection using a piezoceramic time reversal mirror [J]. Smart Materials & Structures, 2016, 25(3): 037002.
- [10] YAN S, QI J, ZHAO N Z, et al. Multiple crack detection of pipes using PZT-based guided waves [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 448/453: 3702-3708.
- [11] 罗毅, 王涛, 刘绍鹏, 等. 基于压电主动传感方式的螺栓松动检测实验研究[J]. 传感技术学报, 2013, 3(8): 1059-1063.
- [12] DU G, KONG Q, LAI T, et al. Feasibility study on crack detection of pipelines using piezoceramic transducers[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013(3): 534-557.

(编辑:刘杨)