

基于物联网和超声导波的管道检测系统研究

陈志奎¹, 贾少攀¹, 赵亮¹, 张清辰²

(1. 大连理工大学软件学院 辽宁 大连 116621 ; 2. 西南大学计算机与信息科学学院 重庆 400715)

摘要: 针对当前城市管道检测系统实际应用时复杂的人工操作问题和管道工作环境信息的分析预警功能缺失问题,设计开发一套基于物联网和超声导波的城市管道检测系统。该系统将物联网、超声导波检测、信号处理等技术相融合,通过无线网络将数据传到云端数据处理中心并由数据处理中心分析管道检测信息,实现管道缺陷检测、环境信息采集以及预警等功能。实验仿真表明,该系统的缺陷定位精度达到了(能够满足)城市管道检测的要求,在减少人工操作的同时,能有效提供预警功能。

关键词: 计算机应用;检测系统;超声导波;物联网

中图分类号:TP274+.5;TP391.45;TB559;TM930.12 文献标志码:A 文章编号:1674-5124(2013)02-0094-04

Detection system for urban pipeline based on IOT and UGW

CHEN Zhi-kui¹, JIA Shao-pan¹, ZHAO Liang¹, ZHANG Qing-chen²

(1. School of Software Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116621, China ;

2. School of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To reduce the complexity of manual handling operations of current detection systems for urban pipeline and meet the requirements of pipeline working environmental information analyzing and early warning function, a detection system for urban pipeline based on internet of things (IOT) and ultrasonic guided wave (UGW) was designed and developed. IOT technology, UGW testing and signal processing methods are integrated with this system. To implement the functions such as detection of pipeline, environmental information gathering and early warning, the system transmits data over wireless network to cloud data processing center which analyzes the pipeline detection data. Simulation results show that this system can meet the accuracy requirement of defect location, and reduce manual handling operations with early warning function.

Key words: computer application ; detection system ; ultrasonic guided wave ; internet of things

0 引言

城市管道泄漏和断裂等故障会造成严重的浪费并威胁着城市安全,管道检测能够有效检测管道故障,避免不必要的浪费,保障居民安全。现在城市管道的检测大多采用超声导波无损检测技术,然而超声导波管道检测系统在进行管道检测时,维修人员需要深入地下将检测设备安装到需要检测的管道上,这使得维修人员的工作量和工作难度

很大,并且现在的管道检测系统中并没有对管道工作环境信息进行分析预警的功能。所以,目前需要设计和开发一套完整的城市管道检测预警系统来解决以上的问题,物联网的出现提供了新的解决思路。物联网被描述为一个新兴的全球性的基于因特网的信息服务架构^[1]。物联网体系主要可以分为感知识别层、网络构建层、管理服务层和综合应用层^[2]。

本研究采用物联网、超声导波检测、数据处理、信号处理等技术,设计和开发了一套基于物联网和超声导波的城市管道检测系统,实现管道数据采集、缺陷定位、无线组网、异构网络数据传输和数据分

析、预警等功能。

收稿日期:2012-04-08;收到修改稿日期:2012-05-29

基金项目:大连理工大学创新创业训练计划项目(2011018);

大连市科学技术局科技计划项目(2011A17GX076)

作者简介:陈志奎(1968-),男,四川南充市人,教授,博士,研究方向为物联网、小波分析、云计算、数据挖掘等。

1 管道检测预警系统设计

1.1 系统框架

基于物联网和超声导波的城市管道检测系统分为 4 部分：(1) 管道信息智能无线传感器网络节点，该部分主要负责激励超声导波信号，接收管道回波信号，采集管道工作环境信息；(2) 异构网络架构，包括无线传感网、通信网、互联网以及智能网关，这一部分主要实现节点采集信息的传输；(3) 基于物联网和超声导波的城市管道检测系统云端数据处理中心平台，该部分主要功能是实现控制超声导波探头阵列激励信号、管道信息分析处理、缺陷定位、提供预警等，为相关部门提供解决方案；(4) 管理控制平台，主要响应管理人员的操作，根据管道检测结果通知管道维护人员进行维修。

1.2 智能无线传感器网络终端节点设计

智能无线传感器网络终端节点分为环境信息采集节点和超声导波信号激励采集节点两种。智能无线传感器网络终端节点结构如图 1 所示。

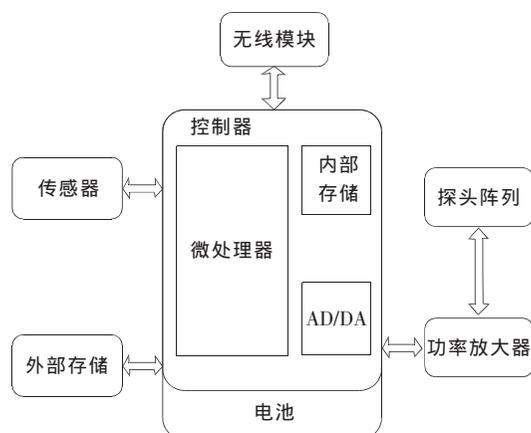


图1 智能无线传感器网络终端节点结构图

1.2.1 环境信息采集节点

环境信息采集节点主要负责采集管道工作环境的信息(空气温湿度、酸性程度等)，用来作为判断管道是否腐蚀的辅助依据。这些节点通过无线方式将数据传送到网关，交由云端数据处理中心处理。

1.2.2 超声导波信号激励采集节点

超声导波在一个位置固定脉冲回波阵列就可做管道的双向无损检测，通过回波信号识别管道的腐蚀、焊缝等缺陷^[3]。根据脉冲回波法原理，采用同端激励、同端接收的方式进行管道检测，所以超声导波信号激励采集节点既负责激励导波信号也负责采集回波信号。该节点由高性能的嵌入式处理器和装配到管道上的超声导波探头阵列^[4-5]组成。嵌入式处理器

设定激励信号参数，产生超声导波激励信号，由超声导波探头阵列在管道表面激发，接收回波信号。回波信号经过一定处理后传输到云端数据处理中心进行进一步分析。

管道中的导波分为轴对称纵向模态、轴对称扭转模态和非轴对称弯曲模态。对于轴对称纵向模态中的 $L(0, 2)$ 模态而言，它主要有以下特点：在相当宽频率范围内，该模态几乎非频散，传播速度最快，任何不希望出现的模态信号都在其后到达，易于在时域内识别；内外表面的径向位移相对较小，波在传播过程中能量泄漏较少，传播距离相对较远^[6]。

所以，在管道检测时超声导波信号激励采集节点激发 $L(0, 2)$ 模态的超声导波信号。超声导波信号是一个经海宁窗调制的 5~10 周期的单音频脉冲信号^[7]，经海宁窗函数调制的单音频叠加信号定义为

$$x(t) = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{n} \right) \right] \times \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

式中 n ——选用的单音频数目；

f_c ——信号的中心频率；

t ——时间。

1.3 云端数据处理中心设计

云端数据处理中心主要分为管道数据分析处理和预警平台两部分，其结构框架如图 2 所示。

1.3.1 管道数据分析处理平台设计

管道数据分析处理平台可以设定超声导波激励信号参数，控制底层节点触发超声导波激励信号。底层节点采集到管道回波信号后，将数据发送到该平台进行分析处理，经过希尔伯特变换处理^[8]之后，得到容易观察的回波波形。

利用希尔伯特变换，对于原回波波形信号 $x(t)$ ，构造出希尔伯特变换信号 $\hat{x}(t)$ ，然后获得其瞬时包络，瞬时包络 $\alpha(t)$ 定义为

$$\hat{x}(t) = x(t) \cdot \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2)$$

$$\alpha(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \quad (3)$$

当导波通过管道缺陷时，由于传播介质的不连续性，导波遇到缺陷处将发生反射、透射等现象，被分解成反射波与透射波。其中反射波形将会向超声导波信号激励采集节点方向传播，然后节点采集回波波形。反射系数 F 和缺陷截面积与管道截面积比值 β 之间关系为

$$F = \beta / (2 - \beta) \quad (4)$$

由式(4)可知，缺陷越大，则反射系数越大，反射波形也会变大。回波波形的与缺陷位置无关，故建立管道缺陷位置检测模型为

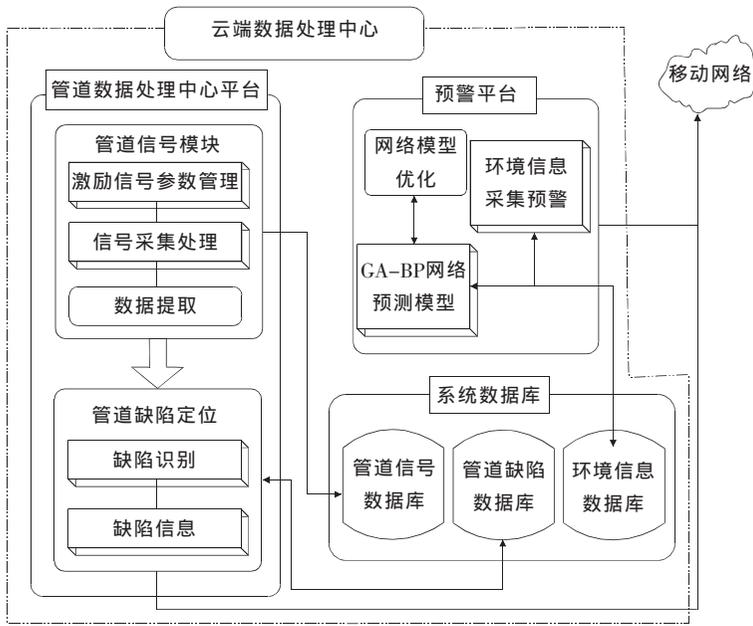


图2 云端数据处理中心结构框架图

$$X_p = \frac{1}{2} ct \quad (5)$$

式中： X_p ——距管道接收信号缺陷位置；
 t ——激发到接收缺陷回波信号的时间间隔；
 c ——波速。

t 可根据脉冲回波时间测定。波速取杨氏速度：
 $c = \sqrt{E/[\rho(1-\nu^2)]}$ (6)

式中： E ——介质弹性模量；
 ρ ——介质密度；
 ν ——泊松比。

故可以计算 X_p 的值，确定缺陷在管道的轴向位置信息，管道数据分析处理平台将回波波形和缺陷信息交给控制平台，通过手机移动网络发送到维修人员的手机上，通知维修人员进行管道维修。

1.3.2 预警平台设计

对各种常见的恶管道工作环境信息进行采集后，建立 GA-BP 网络预测模型^[9]。首先建立基于 BP 网络的预测模型，在分析 BP 网络预测模型对管道工作环境信息预测的基础上，针对该模型的不足，采用遗传算法进一步优化网络初始模型。通过使用 GA-BP 网络预测模型对管道周围环境的分析，预测管道是否处于恶劣的工作环境。

2 实验仿真

2.1 实验仿真环境

在实验环境中，空气温湿度采集节点、酸性程度采集节点和超声导波信号激励采集节点硬件配置相同。表 1 和表 2 分别描述了环境信息采集节点(空气

温湿度采集节点、酸性程度采集节点)和超声导波信号激励采集节点的硬件配置。云端数据处理中心平台采用了一个普通的服务器。表 3 描述了该服务器的 CPU、内存和硬盘大小信息。

由于环境信息采集节点采集的信息和其他物联网设备中采集的信息基本一致，处理简单，所以下部分只介绍超声导波信号激励采集节点的部分实验仿真数据和结果。

在实验中，分别对直径 203.2 mm、长 3 000 mm 钢管(Pipeline1)和直径 304.8 mm、长 4 000 mm 钢管(Pipeline2)两种不同规格的管道进行了测试。Pipeline1 实验是对管道的同一位置不同缺陷的测试，Pipeline2 是对管道不同位置不同缺陷的测试。实验中管道缺陷是用砂轮机对管道切割所造成的损失。对 Pipeline1 管道和 Pipeline2 管道缺陷设置分别如表 4 和表 5 所示。

表 1 环境信息采集节点硬件配置表

编号	微控制器	外部存储	无线模块	传感器
1	ARM11;S3C6410	128M NAND Flash	Zigbee;CC2430	SHT75
2	ARM11;S3C6410	128M NAND Flash	Zigbee;CC2430	ATS4-K-007

表 2 超声导波信号激励采集节点硬件配置表

编号	微控制器	外部存储	无线模块	功率放大器	探头
1	ARM11;S3C6410	128M NAND Flash	Zigbee;CC2430	AD812	压电陶瓷换能器

表 3 云端服务器硬件配置表

编号	Model	Core	CPU/MHz	硬盘/Giga	内存/Giga	
1	酷睿 i7	CPU 860@2.80 GHz	4	2 800	500	4

表 4 Pipeline1 管道缺陷设置¹⁾

编号	缺陷大小/%	缺陷位置/mm
1	2.71	1 500
2	4.10	1 500
3	5.47	1 500
4	6.83	1 500
5	9.56	1 500

注：1) 缺陷大小是缺陷横截面积与管道横截面积的比值，缺陷位置是距管道左端的距离。

表 5 Pipeline2 管道缺陷设置

编号	缺陷大小/%	缺陷位置/mm
a	6.41	1 670
b	4.72	2 370
c	4.72	2 750
d	5.00	3 050

2.2 实验仿真结果

在实验时,只需要将智能无线传感器网络终端节点安装在管道上,就可以在控制平台上控制超声导波激励采集节点检测管道。节点安装后,不再拆卸,用于以后的管道检测,减少了每次检测的人工安装过程。

实验时,探头阵列均布置在距管道左端 250mm 处。图 3 是 Pipeline1 管道上 7.21% 缺陷的回波波形。Pipeline1 管道上不同缺陷经过希尔伯特变换后的回波波形如图 4 所示。图 4 中的 0.00% 曲线表示 Pipeline1 管道无缺陷的回波波形。Pipeline2 管道上不同缺陷经过希尔伯特变换后的回波波形如图 5 所示。

由采集到的 Pipeline1 管道缺陷数据分析, Pipeline1 管道缺陷位于图 4 每条曲线的波包处;由

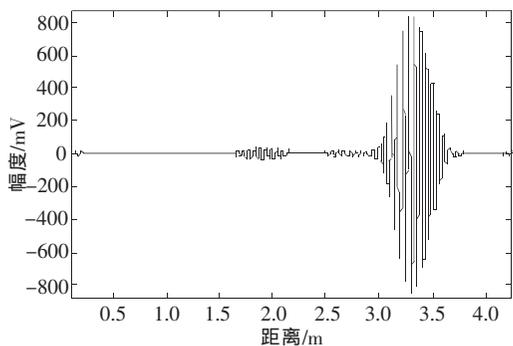


图3 Pipeline1管道7.21%缺陷回波波形

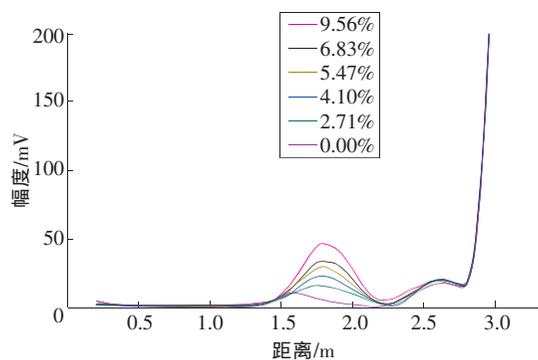


图4 Pipeline1不同缺陷希尔伯特变换后回波波形

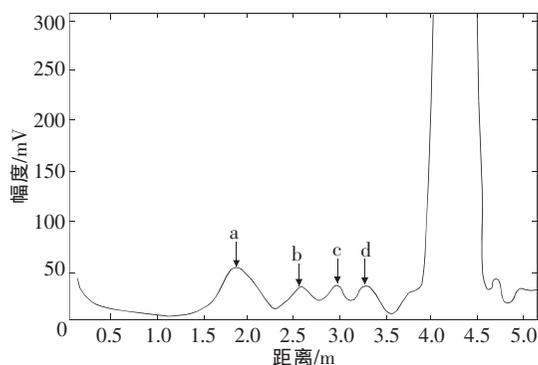


图5 Pipeline2不同缺陷希尔伯特变换后回波波形

采集到的 Pipeline2 管道缺陷数据分析, Pipeline2 管道缺陷依次位于图 5 中的 a、b、c、d 4 个波包处。

由于探头阵列布置在距管道左端 250mm 处,得到的波形整体向后偏移 250mm,所以在计算检测位置时应减去偏移量。Pipeline1 和 Pipeline2 缺陷位置检测结果分别如表 6 和表 7 所示,可知管道缺陷检测位置相对误差在 5% 以内。

表 6 Pipeline1 管道缺陷检测结果

缺陷编号	实际位置/mm	检测位置/mm	检测误差/mm	相对误差/%
1	1500	1474	26	1.733
2	1500	1503	3	0.200
3	1500	1522	22	1.467
4	1500	1569	69	4.600
5	1500	1560	60	4.000

表 7 Pipeline2 管道缺陷检测结果

缺陷编号	实际位置/mm	检测位置/mm	检测误差/mm	相对误差/%
a	1670	1626	44	2.635
b	2370	2320	50	2.110
c	2750	2727	23	0.836
d	3050	3053	3	0.098

3 结束语

本文设计并实现了一套基于物联网和超声导波城市管道检测系统。该系统采用物联网、超声导波检测、数据处理、信号处理等技术,实现城市管道数据采集、缺陷定位、无线组网、异构网络数据传输和数据分析、预警等功能。该系统将城市管道的超声导波无损检测技术与物联网结合,减少管道检测中的人工操作,缺陷定位误差在 5% 以内,提供了管道工作环境信息分析预警功能。

参考文献

- [1] Weber R H. Internet of things—need for a new legal environment[J]. Computer Law & Security Review 2009(25) : 522–527.
- [2] 刘云浩. 物联网导论[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 6–9.
- [3] Rose J L, MU J, CHO Y. Recent advances on guide waves in pipeline inspection[C] // 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008: 25–28.
- [4] 何存富, 黄焱, 刘增华. 小型超声导波管道检测系统的研究和开发[J]. 测控技术, 2008, 27(1): 33–35.
- [5] 王军阵, 王建斌, 张轩硕. 基于 ARM 和 Linux 的超声导波管道检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2011(4): 51–52, 65.
- [6] 董为荣, 帅建. 管道超声导波检测技术[J]. 管道技术与设备, 2006(6): 21–23.
- [7] 吴斌, 王智, 金山, 等. 用于激励超声导波的任意波形发生器[J]. 北京工业大学学报, 2002, 28(4): 389–393.
- [8] 吴斌, 邓菲, 何存富. 超声导波无损检测中的信号处理研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(4): 342–348.
- [9] 柳益君, 吴访升, 蒋红芬, 等. 基于 GA-BP 神经网络的环境质量评估方法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(7): 121–124.