

管道长距离超声导波结构健康监测仪器

姜明顺, 滕飞宇, 付红虎, 展春燕, 张宏

(山东大学 控制科学与工程学院, 山东济南 250014)

摘要: 管道运输系统广泛应用于国防工业、能源化工等领域, 是国民经济发展的“能源动脉”。但受恶劣环境和运输介质的影响, 管道容易产生腐蚀等损伤, 若不能及时检出可能导致管道泄漏, 引发重大安全事故。然而当前国内长距离管道监测系统研发较少, 制约管道健康监测技术应用转化。为了满足管道健康状态监测的重大需求, 自主研制和开发了管道长距离超声导波结构健康监测仪器及其应用系统。可以实现对管道的长期、在线、无人的健康状态监测与损伤分析。对于推动完善管道结构健康监测技术体系, 保障管网运营安全和优化运维方案具有重要意义。

关键词: 管道健康监测; 超声导波; 压电传感器; 损伤检测

Long-distance ultrasonic guided wave-based structural health monitoring instrument for pipelines

JIANG Mingshun, TENG Feiyu, FU Honghu, ZHAN Chunyan, ZHANG Hong

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250014, China)

Abstract: Pipeline transportation systems are widely used in the defence industry, energy and chemical sectors, serving as the "energy arteries" for national economic development. However, due to exposure to harsh environments and the transported media, pipelines are prone to corrosion and other damage. If not detected in a timely manner, this can lead to pipeline leaks and major safety accidents. Currently, there is limited research and development on long-distance pipeline monitoring systems, which restricts the application and commercialization of pipeline health monitoring technologies. In order to meet the significant demand for pipeline health status monitoring, we independently developed a long-distance ultrasonic guided wave-based structural health monitoring instrument and its application system for pipelines. This system enables long-term, online, and unmanned health status monitoring and damage analysis of pipelines. It is of great significance for promoting the improvement of pipeline structural health monitoring

technology systems, ensuring the operational safety of pipeline networks, and optimizing operation and maintenance schemes.

Keywords: pipeline structural health monitoring; ultrasonic guided wave; piezoelectric sensor; damage detection

1 引言

管道作为五大运输工具之一，在国民经济、国防工业、能源化工等方面都发挥着重要作用，是关乎国家经济和国民生活命脉的重要基础设施。然而，管道结构在长期服役的过程中受冲击载荷、恶劣环境及多物理场耦合因素的影响，极易产生疲劳裂纹、局部腐蚀、蠕变破坏等损伤，导致其抵抗自然灾害、正常荷载以及环境作用能力下降，影响管道运输的可持续性，引发管道泄漏事故并造成灾难性后果^[1]。因此，准确监测管道结构状态、识别结构中的潜在损伤具有重要意义。结构健康监测技术是将传感器以一定方式排布在结构中，与管道结构相耦合，采集结构信息（包括应变、温度等），并对采集到的信息进行分析，从而判断结构当前状态以及检测损伤情况。

管道超声导波技术由于其结构耦合性好、损伤敏感性高及覆盖范围广等优势，成为近年来最具发展前景的管道结构健康监测技术^[2]。基于压电传感器的管道超声导波技术主要通过压电传感元件与管道结构耦合，在线采集传感信号并实时监测结构状态。管道中使用压电传感器的超声导波检测方案中，主要有两种导波激励与接收形式：单发单收检测方案与脉冲回波检测方案。单发单收检测方案是在管道结构中需要重点监测的区域两侧布置对称的压电传感阵列，构建类似板状结构超声导波检测中的分布式传感网络，监测区域主要为两排传感器间的轴向管道区域。单发单收检测方案只能检测激励器与接收器之间的管道结构区域，检测效率低，在工程应用中具有一定的局限性。脉冲回波方案主要是通过激发特定的单一模态的导波（ $T(0,1)$ ， $L(0,2)$ 等）来实现管道长距离大范围的检测，只需要在管道的一处安装传感器阵列，结合方向控制算法即可实现上百米的管道双向长距离监测，效率较高，且对特殊服役环境的管道，可采用永久安装方式进行损伤监测，适用性强、应用广泛。因此，选择脉冲回波检测方法开展管道压电超声导波监测系统的研究。

目前，基于脉冲回波法的高性能的压电超声导波检测仪器在国外已经有了一定的研究。国外的 Guided Ultrasonics Ltd.、TWI、Eddify 等科研机构与公司已经成功将管道压电超声导波检测仪器商业化。英国帝国理工学院的无损检测小组（Non-Destructive Evaluation, NDE）

最早开发了基于干耦合压电换能器的管道超声导波检测设备，并在此研发基础上孵化了 Guided Ultrasonics Ltd.，随后迭代研发并推出了 Wavemaker-G4 管道超声导波检测仪器^[3]。法国 Eddyfi 公司研制的 Sonyks 管道导波检测仪器^[4]，并配备机载屏幕和现场验证的 Eddyfi 平台可快速分析现场数据。日本 Olympus 公司研制的 UltraWave LRT 管道超声导波检测仪，系统主机具有 16 个传感器通道，配合不同标准的探头组装圈实现低频导波激励，采用频率扫描选择最佳激励频率，并利用主动聚焦与合成聚焦技术扫查管道壁厚变化^[5]。

国内基于的管道压电超声导波检测仪器研制的起步与发展较为滞后，国内自主研发的商用管道压电超声导波检测设备尚为空白，多为上述国外仪器代理，部分高校在系统仪器的研究取得一定的成果与突破。北京工业大学的洪华星等^[6]设计了超声导波聚焦检测系统，该系统采用双传感器阵列结合相控方法分别激励并根据波的叠加原理实现导波的单向传播，并对比双方向不同结果验证激励方向控制方法的效果。江苏大学的张垒等^[7]设计了 4 通道超声导波管道缺陷检测系统，系统采用“一激发、一接收”传感器阵列设计，对 22m 长管道制造缺口对损伤前后响应信号对比进行缺口定位。然而通道数少，对不同管径的管道适应性差。上海交通大学的冯菲等^[8]研发了基于 FPGA 的超声导波诊断仪，系统采用双环激励、单环接收的传感器环设计方案，并使用 20m 长钢管进行现场测试进行缺陷与端面识别，但是传感器阵列功能单一，管道结构检测成本高。天津科技大学的聂高乾^[9]等研发了基于系统级芯片的管道健康监测系统，采用多个压电陶瓷嵌入传感器框架中激励 T(0,1)模态，对 2m 与 3m 长管道开展阵列测试与缺陷定位实验。大连理工大学的马书义等^[10]设计了管道超声导波集成诊断系统与压电晶片换能器单元模块，采用 8 通道自发自收方案，针对不同材料与管径的管道开展实验。

管道压电超声导波检测系统的核心在于将信号发生、功率放大、信号采集、通道切换开关等功能集成，但现阶段国内学者大多使用独立仪器搭建的管道压电超声导波检测系统，存在集成度低、难以实际应用与实际工程的问题。而引入国外成熟的仪器设备，通常无法进行改造或二次开发，不能满足对特定的研究对象或检测方法深入研究的需求，这都限制了国内管道压电超声导波检测技术的发展与应用。因此，近年来国内管道压电超声导波检测系统研究取得了一定研究成果，但仍存在以下问题：① 系统传感器通道数少，仅适用于单一管径的管道结构，传感器适用性差；② 传感器阵列功能单一，仅支持固定发送或固定接收；③ 系统激励幅值较低，激发的导波传播距离受限；④ 系统无法进行多通道同步采集，系统监测效率低；⑤ 系统通讯方式多为 USB 连接，通讯速度慢且距离短。

为解决以上存在的问题，以管道结构为研究对象，研制了基于压电超声导波的长距离管道监测系统。系统主要包括压电传感器环、管道压电超声导波监测仪器与管道监测软件系统。管道压电超声导波监测仪器实现 T 模态超声导波激发、响应回波接收、数据同步采集、千兆以太网通讯等功能，并支持自发自收功能。管道监测软件系统提供直观易用的用户交互界面，实现了人机交互及下位机底层控制、采样数据的分析存储、波形显示功能。当前系统解决了系统传感器通道少、适应性差，激励幅值低、监测距离受限，逐一切换激励与采集且通讯速率慢、检测效率低的问题，该系统可以有效的完成管道结构损伤的识别与定位。

2 仪器的设计与研制

鉴于现有检测设备的研究与应用限制，设计一套检测距离长、监测效率高、设备实用性高的基于压电超声导波的管道监测系统，是实现管道结构损伤检测技术应用和发展的关键。

2.1 功能需求与性能指标

基于管道超声导波监测技术的工作模式，设计了监测仪器的功能需求：①实现自主选择激励通道及管道超声导波激励；②实现多通道响应信号的最佳调理效果及同步采集存储；③实现系统间的控制命令与波形数据的交互，协调激励与采集工作；④实现系统监测数据可视化和损伤定位检测结果，提高人机交互效率。并基于长距离监测和高精度定位损伤的要求，提出了监测仪器的性能指标参数如表 1 所示。

表 1 监测仪器性能指标

系统功能	系统参数	指标
信号激励	激励频率	20k-100kHz
	激励波形	汉宁窗调制的N周期正弦波(N为任意整数)
	驱动电压	峰峰值 200Vpp
	电压分辨率	12.5mV
	激励通道数	16 通道
	激励模式	单通道轮询激励/最高 16 通道同时激励
数据采集	采样通道数	16 通道
	最高采样率	3Msps
	采样分辨率	12bit
	模拟滤波带宽范围	20k-100kHz (0.1dB)
	采样增益	0-40dB (可调)
	采样长度	200ms/通道
	采样方式	同步采样
通讯接口	通信方式	千兆以太网/USB2.0
电源	供电方式	18V 直流供电

2.2 总体设计

针对系统功能需求及性能指标,将监测仪器的总体方案设计分为系统硬件设计和系统软件设计两部分,如图 1 所示。

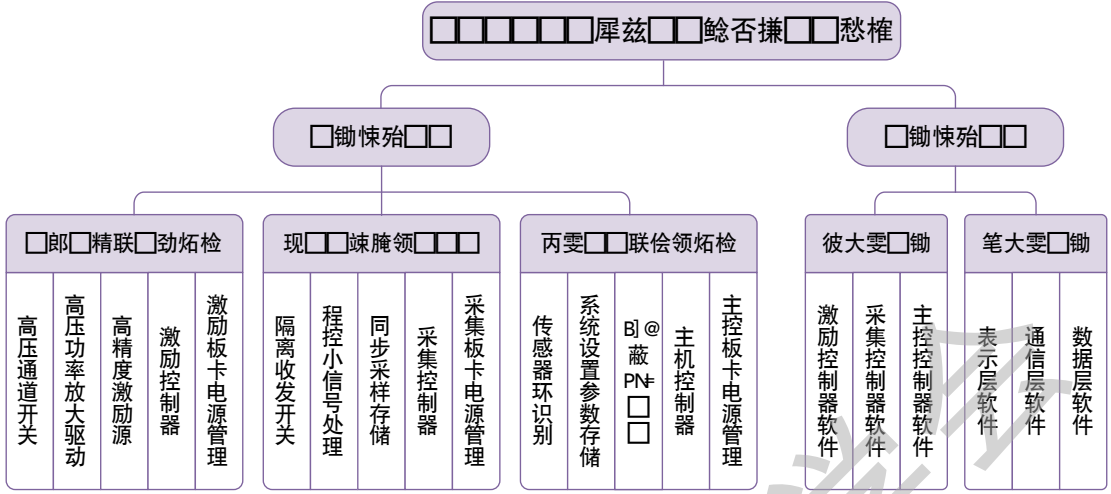


图 1 总体设计方案框图

(1) 硬件总体设计

硬件设计采用激励-采集-主控分离设计的思路,分为高压激励及驱动控制系统、多通道数据同步采集系统及主机通讯及协同控制系统。各硬件系统之间建立稳定的通讯机制,确保各系统协同工作、精准调度且高效稳定运行,完成管道超声导波激励-采集-通讯一体化任务。这样既有利于验证设计方案的可行性,又能降低设计的复杂度,同时可以增强后期的可维护性和拓展性。

(2) 软件总体设计

软件设计采用模块化、多层次的设计思路,分为下位机软件和上位机软件。上位机软件与下位机软件之间在可靠的通信协议和数据传输机制的基础上协同工作,并且凭借错误重传与应答机制,提高系统整体性能与可靠性,实现管道损伤监测及定位功能。软件设计时对软件系统进行合理架构,并将功能相似的软件模块进行封装,这样不仅提高设计效率,又提高了软件系统的稳定性、可维护性、拓展性和易用性。

2.3 硬件系统设计

(1) 硬件系统框架

长距离管道监测系统的硬件设计采用激励-采集-通讯分离设计的思路,分为高压激励及驱动控制系统、多通道数据同步采集系统、主机通讯及协同控制系统。硬件系统框架如图 2 所示。

(2) 高压激励及驱动控制系统

高压激励及驱动控制系统包括高精度激励源电路、功率放大驱动电路、高压通道开关电路、激励控制器电路及激励板卡电源管理。该系统主要负责利用同步并行接口接收来自主机通讯及协同控制系统的激励波形数据,并通过全双工串行接口执行控制命令和响应指令的交互。除板间通讯之外,还负责激励由汉宁窗调制的 N 个周期正弦波信号,并对该信号进行功率放大,利用激励通道开关选择传感器通道,驱动目标压电传感器组实现 T 模态导波激励。

(3) 多通道数据同步采集系统

多通道数据同步采集系统包括隔离收发开关电路、程控小信号处理电路、同步采样存储电路、采集控制器电路及采集板卡电源管理。该系统硬件主要负责利用同步并行接口向主机通讯及协同控制系统发送采集响应数据,并利用全双工串行接口执行命令与响应的交互。除了通讯之外,还负责对系统导波响应信号应用隔离保护、精准调整增益、增强幅值及噪声滤波等信号处理技术以达到最佳调理效果,并实现 16 通道同步采集与数据存储。

(4) 主机通讯及协同控制系统

主机通讯及协同控制系统是下位机系统的主控核心,包括 GbE 及 USB 通讯电路、系统设置参数存储电路、编号识别及温度采集电路、主机控制器电路及主控板卡电源管理。该系统不仅负责与上位机基于以太网协议进行控制命令与波形数据的通信交互,还负责分别与高压激励及驱动控制系统、多通道数据同步采集系统建立稳定高效的板间通信机制:系统根据协议命令将上位机传入的系统工作参数存储在存储器中,协同控制高压激励及驱动控制系统与多通道数据同步采集系统的执行激励与采集任务。除了通讯之外,系统还负责读取传感器环的编号数据与环境温度,用于系统确定导波激发方向与环境温度补偿。

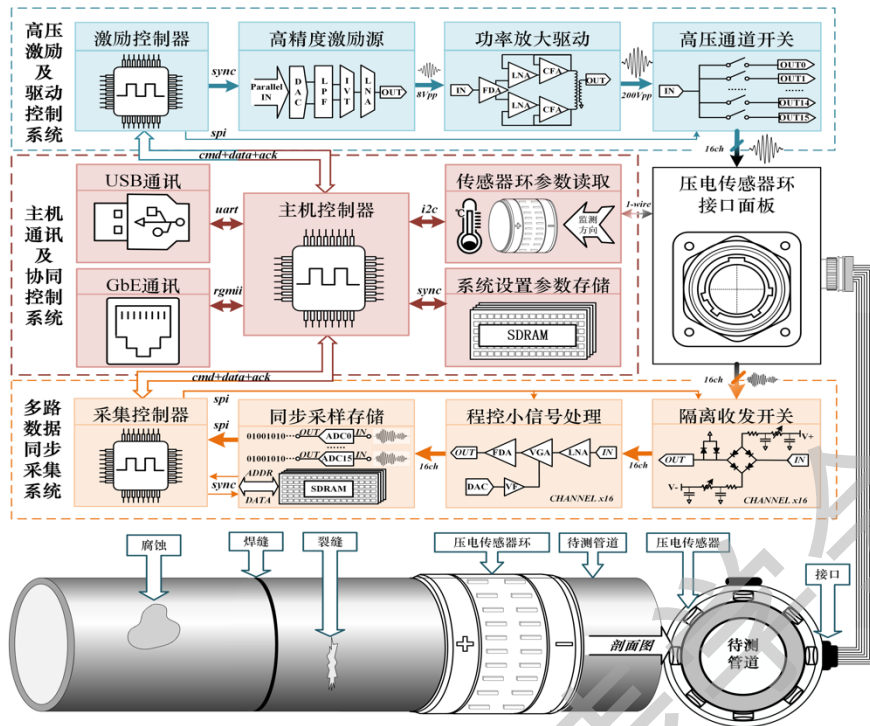


图 2 硬件系统框架

2.4 软件系统设计

(1) 软件系统框架

长距离管道监测系统的软件兼顾硬件系统环境，采用模块化、多层次的设计思路，将功能相似的软件模块进行封装，能够提高软件设计效率、稳定性、可维护性、拓展性和易用性。软件系统框架如图 3 所示。

(2) 下位机软件系统

下位机系软件是嵌入在硬件控制器的软件。下位机系统软件与下位机硬件设备紧密配合，因此下位机软件分类与下位机硬件分类相对应，分为激励控制器软件、采集控制器软件及主控控制器软件。下位机的硬件控制器均为 FPGA，下位机软件采用 Verilog HDL 硬件描述语言编写，其设计与优化对于提升系统性能和稳定性起重要作用。下位机系统软件主要功能是实现完成与上位机系统执行协议命令与波形数据的交互，根据控制命令精准控制硬件设备来完成激励与采集工作，将系统导波响应数据按照既定通信协议发送至上位机系统，并通过上位机软件对数据进行数据处理与信息提取，实现管道损伤定位与成像功能。

(3) 上位机软件系统

上位机软件基于 Qt Creator 平台和 C++语言开发编程开发。上位机软件设计按照层次化设计思路，分为表示层软件、通信层软件及数据层软件。上位机系统软件是用户在计算机或

服务器等终端设备上执行人机交互的应用软件,其主要功能是为用户提供直观易用的操作界面,简化用户操作流程,并基于千兆以太网通信与下位机建立连接,与底层硬件系统进行稳定高效的指令数据交互,提高数据处理效率,为用户获取波形数据与损伤定位结果。

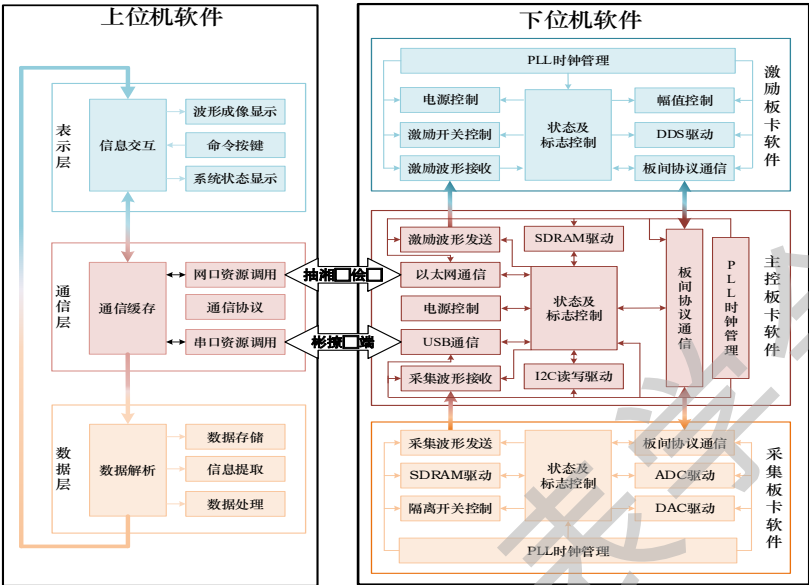


图3 软件系统框架

2.5 仪器实物研制与测试

完成系统及电路设计、PCB 设计制造、SMT 贴片后,搭建测试平台对子系统进行系统测试和功能验证。

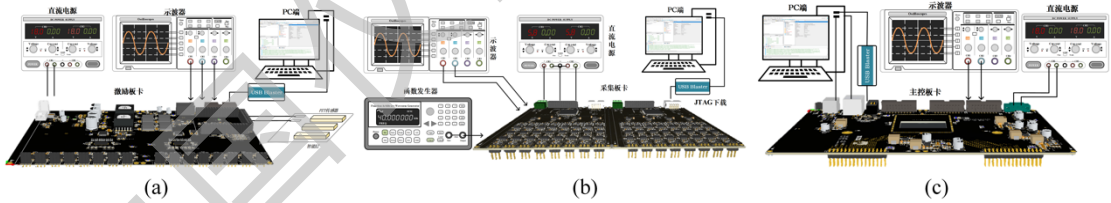


图4 子系统测试平台示意图。(a) 高压激励及驱动控制系统。(b) 多通道数据采集系统。(c) 主机通讯及协同控制系统。

(1) 高压激励及驱动控制系统

电源质量测试: 为了减少电磁辐射引入及噪声耦合,在进行电源质量测试时使用接地弹簧以减少地环路面积。使用示波器的 DC 档和 AC 档,使用 20MHz 带宽限制测量各电源的直流电平、纹波、SW 开关波形与开关频率。在测试中设计与实现的激励电源均能在提供负载电流的同时保持输出电压稳定。其中模拟电源的工作电源纹波均小于 0.1%,能够减少电源噪声到输出信号的耦合;数字电源的工作电源纹波均小于 20mVpp,有利于数字信号通信。

激励信号测试：使用激励控制器控制激励源电路生成激励源信号，使用示波器的通道 1 进行触发测试；激励源信号通过高压功率放大电路得到高压激励信号，使用示波器的通道 2 进行触发测试；使用激励控制器产生数字时序控制高压通道开关电路对激励通道进行选择，使用示波器的通道 3 进行信号测试。分别变换频率、幅值、波峰数进行对照测试，并使用 Matlab 对三个波形进行 FFT 变换查看频谱，测试结果如图 5 所示。

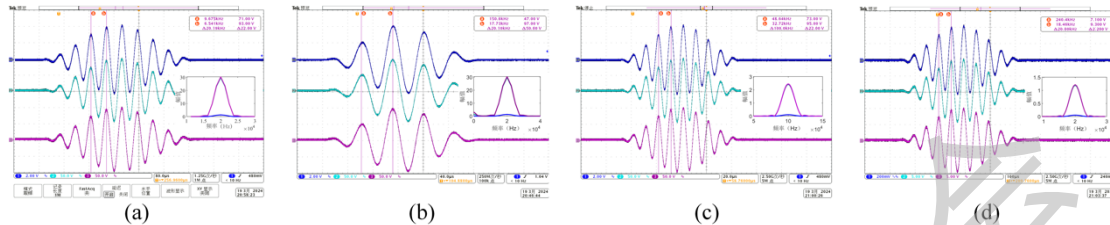


图 5 激励信号测试。(a) 20kHz, 200Vpp, 十峰波。(b) 20kHz, 200Vpp, 五峰波。(c) 100kHz, 200Vpp, 十峰波。(d) 20kHz, 20Vpp, 十峰波。

(2) 多通道数据同步采集系统

电源质量测试：采集板卡电源质量测试方法与激励板卡电源测试方法相同，测量各电源的直流电平、纹波、SW 开关波形与开关频率。在测试中设计与实现的采集板卡的电源中，所有电源均能保持稳定的输出电压，模拟电源的工作电源纹波均小于 6mVpp，数字电源的工作电源纹波均小于 10mVpp。高质量的模拟电源质量有效减少电源噪声到输出信号的耦合，实现响应弱信号的最佳调理。

程控放大信号测试：使用函数发生器产生原始模拟信号，使用通道 1 进行测试；原始信号经过程控小信号处理电路中的 LNA 与 VGA 的后获得放大信号，使用通道 2 进行测试；放大信号经过 FDA 单端转差分得到差分信号，使用通道 3 与通道 4 进行测试；使用示波器的双波形数学计算功能选择通道 3 与通道 4 作减法运算，得到 M 通道波形结果。分别对 20kHz 与 100kHz、20dB 与 40dB 进行放大对照测试，测试结果如图 6 所示。设计与实现的采集板卡具备 20k-100kHz 频率范围内 0-40dB 程控小信号放大功能，并且放大波形光滑无失真。

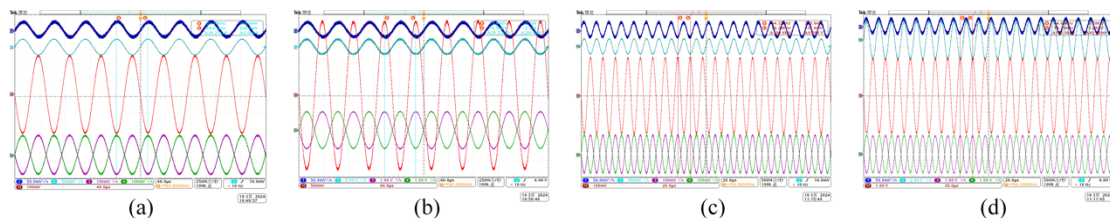


图 5 程控放大电路测试。(a) 20kHz, 20dB。(b) 20kHz, 40dB。(c) 100kHz, 20dB。(d) 100kHz, 40dB。

(3) 主机通讯及协同控制系统

电源质量测试：采集板卡电源质量测试方法与激励板卡电源测试方法相同，测量各电源的直流电平、纹波、SW 开关波形与开关频率。主控板卡对外输出的 $\pm 5V$ 的工作纹波均小于6mVpp，可保证采集板卡输入的电源质量。主控板卡数字电源的工作电源纹波均小于10mVpp，为高速数字信号准确通信的提供保障。

以太网通信测试：以太网通信测试需要配合主机控制器软件测试各功能任务。

2.6 仪器实物装配

完成系统及电路设计、PCB 设计制造、SMT 贴片及系统性能测试后，对板卡进行装配成仪器设备。本系统共有四块板卡，每个板卡的设计尺寸为200mm×130mm，板卡装配拼图如图6(a)所示，板卡装配顺序自上而下依次是：主控板卡、采集板卡、激励板卡、接口面板。板卡装配工作完成后，将其安装到仪器外壳之内，构成长距离管道监测系统仪器，其仪器外观如图6(b)所示。长距离管道监测系统仪器的安装尺寸为290mm×240mm×178mm，前面板有用于利用同轴屏蔽线缆与压电传感器环连接的航空插头，进行激励与采集工作。后面板主要包括LAN 千兆以太网接口，USB 接口、PWR 电源接口、仪器设备电源开关。



图6 仪器设备装配图。(a) 板卡装配。(b) 仪器外观。

3 仪器的应用

3.1 仪器验证

实验室仪器测试平台以一根9.2m 碳钢管道为测试对象，其尺寸规格为NPS6，Schedule40，其他设备包括示波器、直流电源、PC 机、管道压电超声导波监测仪、同轴屏蔽线缆和压电传感器环。

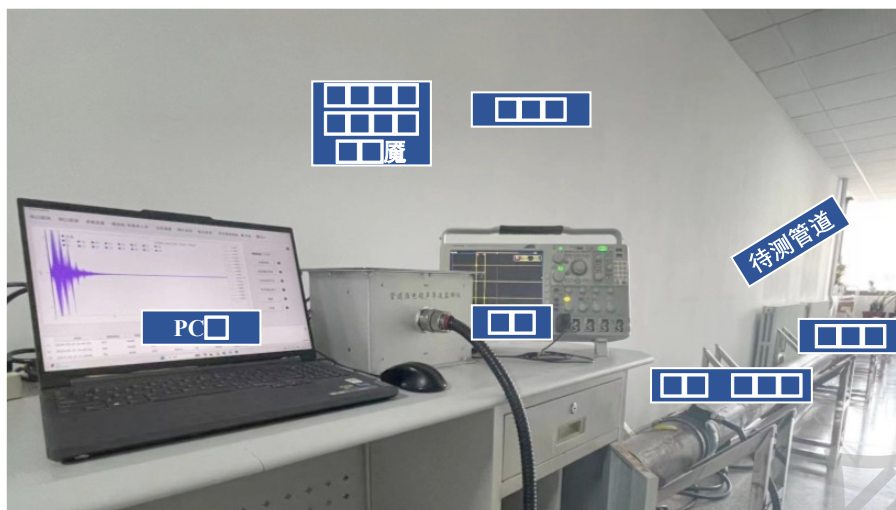


图 1 实验室仪器测试平台实际连接图

压电传感器环通过胶粘的方式安装在待测管道上，传感器环中心距离左端面 500mm。以传感器位置为坐标原点，以右为正方向，在 500mm、4200mm、7400mm 处存在两条焊缝，焊缝宽度均为 12mm。

PC 机通过网线与设备进行连接，使用上位机软件进行 IP 地址与端口号的连接，通过 UDP 协议控制检测设备进行超声导波信号的激励与采集。激励信号选择汉宁窗调制的 8 周期正弦信号，激励幅值为 120Vpp，系统激励频率选择 40kHz，采集增益为 30dB，每个通道激励 30 次，将信号在时间序列上平均以消除不相干噪声。图 2 为以 N1 激励信号为例，所有传感器接收到的信号示意图。图 3 为管道损伤检测结果曲线图及成像图，管道中焊缝、端面特征等特征都能在信号图和成像图中准确显示。

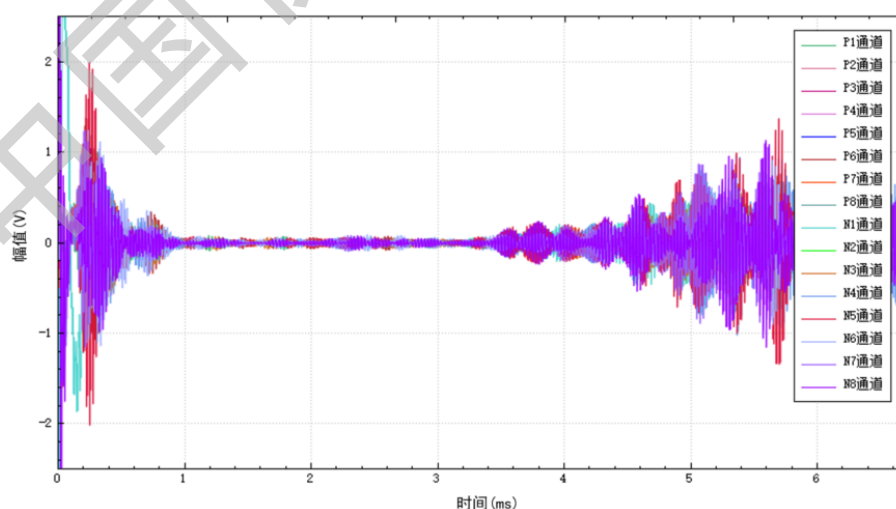


图 2 传感器接收到的信号

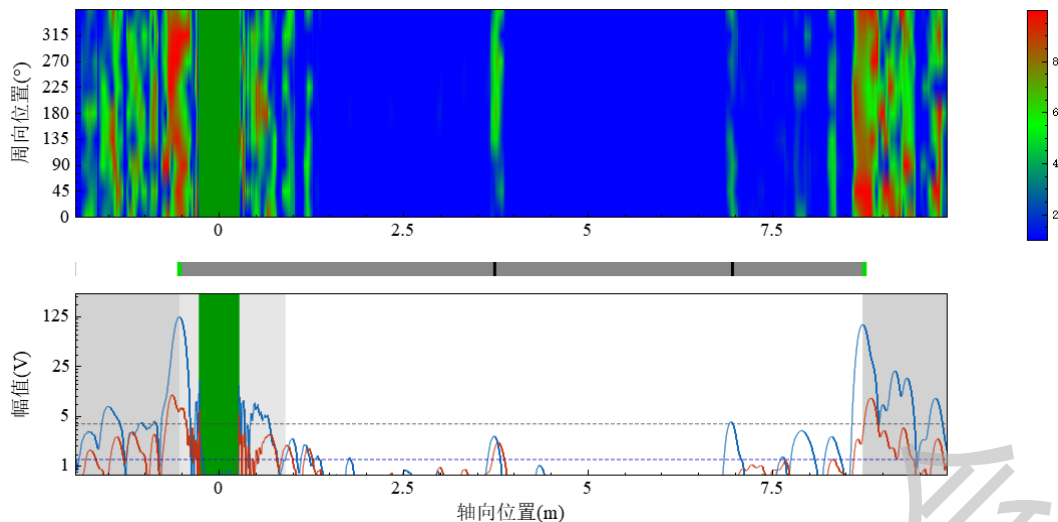


图3 管道损伤检测结果曲线图及成像图

3.2 工业管道应用

仪器应用于工业液氯输送管道。为了满足系统对液氯输送管道腐蚀实时监测的需要，在现场管道中段位置使用胶粘方式安装 1 只环形压电传感器，使用集束信号传输线缆连接传感器与仪器设备，实现数据传输。在现场安装压电式超声导波监测仪器 1 台，上位机电脑 1 台。上位机与设备的连接方式与实验室仪器平台相同，控制检测设备进行超声导波信号的激励与采集，内置的数据处理模块进行采集的信号分析并在现场显示器进行监测管道的腐蚀情况可视化展示。

在现场进行设备的实际安装时，对于预先确定的传感器安装管段，首先去除最外层的管道保冷覆盖层，暴露安装位置管道。在暴露管段中选择表面平整的区域规划传感器安装位置。使用胶枪将适量环氧树脂胶水点在传感器各传感单元位置，再将传感器贴于管道确定的安装位置上，拧紧螺栓固定。使用密封剂对传感器探头边沿和线缆接头盒处进行防潮防水的密封保护。利用不锈钢卡箍对传感器边沿和线缆接头进行压紧密封，固定在管道上。将防爆壳安装到工控房间中，在防爆壳内安装超声导波检测器。

现场的设备安装好后，将安装有监测系统软件的上位机主机放置于现场的主机柜中，连接设备引出的千兆网线，并安装显示器。传感器的监测信息在完成监测任务后会在显示器上显示。图 4 为管道损伤监测系统现场安装情况。



图 4 管道损伤监测系统现场安装情况。(a)传感器粘贴；(b)传感器及连接器固定；(c)防爆箱；(d)监测仪器安装；(e)上位机及系统调试。

4 结论

管道超声导波损伤检测和结构健康监测技术体系在管道运输系统运营维护和安全防护领域具有广泛的应用前景，但国内管道超声导波监测仪器设备起步与发展较为滞后，存在集成度低，应用转化难等问题，也影响了监测技术的进一步研究。研制的管道长距离超声导波结构健康监测仪器实现 T 模态超声导波激发、响应回波接收、数据同步采集、千兆以太网通讯等功能，并具有自发自收功能。仪器支持激励幅值可达 200Vpp，并在 20k-100kHz 低频段内的任意波形激励，提供单通道轮询激励或多通道同步激励等多种工作模式。实现采集通道隔离保护、0-40dB 范围增益可控、16 路同步信号采集，以及每通道至少 200ms 采样时长数据存储。上位机软件提供直观易用的用户界面，在以太网应用层采用应答与错误重传机制，保证了数据通信的准确性与稳定性，实现了简洁高效的人机交互。在系统测试中对管道特征和损伤进行了准确的识别与定位，通过重建算法实现了管道检测结果的二维可视化显示，实现了管道损伤的有效检测并在工业管道上进行了应用。该项目弥补了原有管道超声导波检测仪器的适应性差、监测距离受限、检测效率低等问题，同时也显著拓展了管道健康监测设备的应用前景。

参考文献:

- [1] Woldesellasse H, Tesfamariam S. Risk analysis of onshore oil and gas pipelines: Literature review and bibliometric analysis[J]. Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience, 2023, 2(4): 100052.
- [2] Fan H, Tariq S, Zayed T. Acoustic leak detection approaches for water pipelines[J]. Automation in Construction, 2022, 138: 104226.
- [3] Cawley P. Guided waves in long range nondestructive testing and structural health monitoring: Principles, history of applications and prospects[J]. NDT & E International, 2023: 103026.
- [4] EDDYFI T. FOCUS +. Guided Wave Pipeline Inspection [EB/OL] (2021-08-10) [2024-04-05] .<https://www.eddyfi.com/en/product/sonyks-guided-waves-pipeline-inspection>.
- [5] Birch S, Baker F. Long-range guided-wave ultrasonics: a new age in pipeline inspection[J]. AWS Inspection Trends, 2007, 10(4): 13-17.
- [6] 洪华星. 多通道导波聚焦检测系统研制及应用研究[D]. 北京工业大学, 2020.
- [7] 张垒. 超声导波管道缺陷检测系统设计与研究[D]. 江苏大学, 2018.
- [8] 冯菲. 超声导波管道诊断仪系统主机设计与实现[D]. 上海交通大学, 2015.
- [9] 聂高乾. 基于SOC的管道健康监测系统研究[D]. 天津科技大学, 2022.
- [10] 马书义. 管道超声导波损伤检测与特征识别[D]. 大连理工大学, 2015.