

# 面向高端装备承力结构的超声导波检测系统\*

魏钧涛, 韩泽, 陈佩祥, 姜明顺

(山东大学控制科学与工程学院 济南, 250061)

**摘要** 针对高端装备承力结构的健康监测问题,研制了集成128个传感器通道的超声导波检测系统,包括集成化的压电传感智能层、系统主机和具有损伤实时定位功能的上位机软件3部分。首先,通过优化智能层外观与叠层设计、提高主机输出功率、自适应放大响应信号、增加串扰抑制电路等措施,保证系统能够在复杂环境中可靠运行;其次,搭建不同的测试环境,分别对系统的串扰抑制效果、定位准确性和变温变振动条件下信号的稳定性进行验证。结果表明:系统实现了对不同强度串扰信号的剥离;损伤定位误差为毫米级;温度和振动干扰引起的损伤指数较模拟损伤小1个数量级。该超声导波检测系统稳定性高、环境适应性强,可作为在线监测仪器用于高端装备承力结构的健康监测。

**关键词** 超声导波;串扰抑制;智能层;结构健康监测

**中图分类号** TH878.2;TP274.53

## 引言

高端装备的承力结构是装备正常工作的关键,在服役过程中承力结构难免会产生裂纹、腐蚀等损伤,若损伤未能被及时发现,可能对结构造成灾难性破坏<sup>[1-2]</sup>。超声导波检测技术利用压电传感器激发导波(多为Lamb波),并接收导波与结构耦合后的响应信号,通过提取信号特征参数,评估结构状态信息。超声导波检测技术具有对损伤敏感度高、损伤识别速度快等优点,已成为结构健康监测领域的研究热点,为高端设备的安全服役提供重要的技术支撑<sup>[1-3]</sup>。

集成化的检测系统是实现超声导波检测技术在线应用的前提。其中,压电传感器的集成、宽频功率放大和弱信号提取等功能是研究的热点和难点<sup>[4-5]</sup>。近年来,国内外研究团队致力于超声导波检测仪器研制与损伤检测算法的研究工作。美国Acellent公司开发了ScanGenie系列超声导波检测系统,Lamb波激励信号幅值达 $\pm 60$  V,采样率可调,有32,64,128等不同数量的传感器通道,系统主机与集成式压电传感智能层之间使用多芯线缆连接,在列车摇枕、飞机机翼等结构上实现应用<sup>[6]</sup>。文献[1]研发了基于美国国家仪器公司板卡的超声导波检测系统,实现了对京沪高铁CRH380型和谐号动车组转向架的状态监测。文献[7-8]研制了机箱式、便携式超声

导波监测系统,使用屏蔽线或双绞线连接主机与压电传感智能层以降低系统串扰,集成时间反转聚焦成像算法,并在飞机金属耳片等结构上进行了功能实验。文献[2,9-10]等也陆续开展超声导波检测系统的研制工作。面对复杂环境下承力结构状态的监测需求,超声导波检测技术在以下方面仍有较大的研究潜力:①响应信号中幅值过高的串扰信号影响系统正常工作;②系统对不同材料、不同形状承力结构损伤定位的自适应性问题;③负载环境下系统的稳定性问题。

笔者研制了一套性能稳定、高集成度的超声导波检测系统,通过优化传感智能层设计,研发宽频高压功率放大、短路防护、串扰抑制电路等措施,完善系统功能、保证系统稳定、解决系统串扰问题,使系统能够在复杂环境中稳定运行。进行高密度的系统定位实验以及高温、低温、机械振动等环境下的系统稳定性实验,验证系统性能,实现对结构状态的实时在线监测。

## 1 系统总体设计与研制

### 1.1 总体设计

笔者研制的超声导波结构健康检测系统由传感智能层、系统主机和上位机软件构成。传感智能层

\* 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3709605);国家自然科学基金资助项目(62073193,62373219,62273206);山东省重点研发计划资助项目(2021CXGC010204)

收稿日期:2021-12-27;修回日期:2022-04-26

集成压电陶瓷传感器 (piezoelectric ceramic sensor, 简称 PZT)、温度传感器的柔性材料, 通过一个接口将所有信号线引出, 使用非屏蔽多芯线缆与系统主机连接。系统主机实现超声导波的激励与接收等功

能。上位机软件实现传感网络配置、损伤自动成像等功能。超声导波检测系统组成如图 1 所示。根据工程应用中结构的检测范围需求、导波传播特性等因素确定如表 1 所示的系统参数。

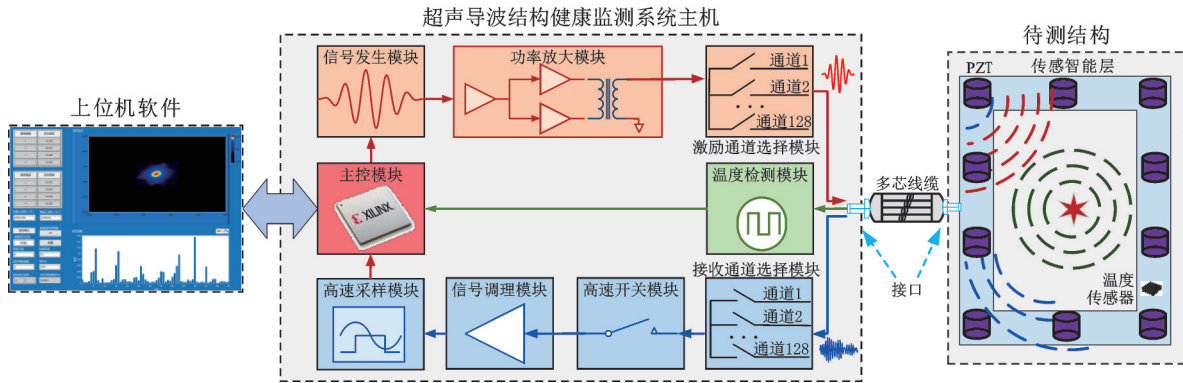


图1 超声导波检测系统组成

Fig.1 Composition of ultrasonic guided wave detection system

表 1 系统参数

Tab.1 System parameter

参数	数值	参数	数值
压电传感器通道数	128	激励频率/kHz	60~1 000
温度传感器通道数	4	激励幅值/V	>±80
每秒采样数	$2 \times 10^7$	采样位数/bits	12

### 1.2 传感智能层设计

传感智能层较多个单片式传感器而言, 减少了线缆数量, 提高了传感器布置效率和精度, 可针对不同结构定制化设计, 满足不同形状结构的监测需求<sup>[11]</sup>。

传感智能层叠层结构如图 2 所示。压电传感器使用焊锡与底层铜箔连接, 温度传感器和接口与顶层铜箔连接。

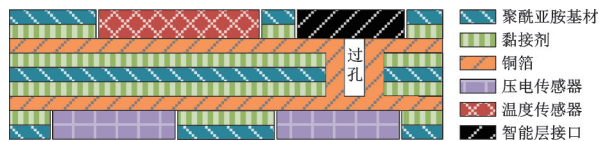


图2 传感智能层叠层结构

Fig.2 Laminated structure of intelligent layer

针对平板结构的圆形待测区域, 传感智能层设计如图 3 所示。压电传感器伸出智能层的走线部位形成“触角”, 减少智能层对导波信号传播的影响; 增加信号线间距以降低串扰影响; 使用完整的地平面增加抗电磁干扰能力; 智能层外部使用黑色聚酰亚胺进行补强, 增加智能层强度、提高绝缘等级、降低

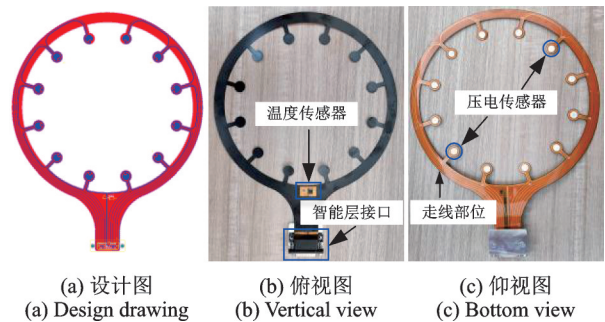


图3 传感智能层设计

Fig.3 Design drawing and physical drawing of intelligent layer

损坏的可能性, 提高智能层的可靠性。

### 1.3 系统主机设计

系统主机由主控、信号发生、功率放大、通道选择、信号调理、高速采样等模块组成, 实现压电传感器激励、压电传感器响应信号采集等功能, 并将处理后的数据发送给上位机软件。通过优化设计, 实现单传感器自发自收等应用需求, 保证激励和响应信号的稳定, 解决响应信号中的串扰问题。

#### 1.3.1 信号发生模块设计

信号发生模块产生宽频 Lamb 波信号, 信号发生模块原理如图 4 所示。

波形生成功能由现场可编程逻辑门阵列 (field

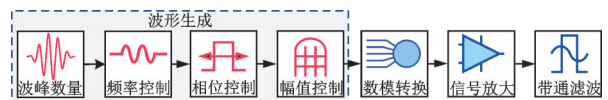


图4 信号发生模块原理

Fig.4 Principle of signal generation module

programmable gate array, 简称 FPGA) 编程实现, Lamb 波的波峰数量、幅值、频率和相位等参数通过上位机设置。数模转换电路将 FPGA 输出的数字信号转换成模拟 Lamb 波, 信号放大和带通滤波电路对 Lamb 波进行相应处理。模块可输出频率范围为 60 kHz~1 MHz、幅值范围为 0~±2 V、相位任意可调的 Lamb 波。使用泰克 MDO4034 示波器测量模块输出频率为 60 kHz 和 1 MHz、不同幅值的五峰 Lamb 波, 并利用快速傅里叶变换分析其频谱。图 5 为模块输出 Lamb 波形及频谱。

标准五峰 Lamb 波信号由 3 个单频信号(中心频率  $f$ 、左频  $0.8f$ 、右频  $1.2f$ ) 叠加而成, 左频和右频信号幅值为中心频率幅值的一半<sup>[8]</sup>。根据图 5 可知, 模块生成的 Lamb 波信号的频谱与标准信号一致。

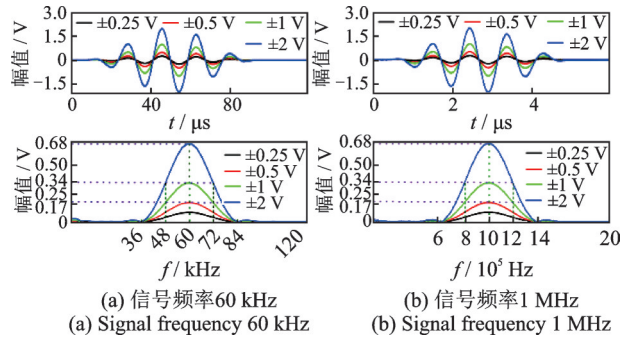


图 5 模块输出 Lamb 波形及频谱

Fig.5 Lamb waveform output by the module and its spectrum

### 1.3.2 功率放大模块设计

功率放大模块使用模拟功放实现对宽频 Lamb 波信号的高压功率放大, 相比于数字式功放, 输出信号高频分量低、信噪比高。功率放大模块原理如图 6 所示。单端转差分电路将单端 Lamb 波信号转换成差分信号, 信号幅值增加一倍, 提高电路抗共模干扰的能力; 同相并联性能一致的 AB 类功放, 提高输出功率; 优化运放反馈回路补偿设计, 避免容性负载引起系统不稳定; 利用变压器提高输出电压幅值, 其感量、通流能力、匝比等参数需要根据信号频率和系统输出需求进行设计; 使用电感、电容进行阻抗匹

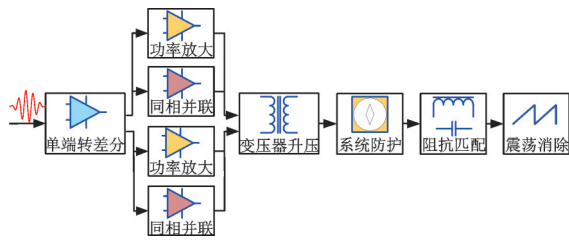


图 6 功率放大模块原理

Fig.6 Principle of power amplifier module

配, 以减少能量损耗, 根据负载情况和常用的激励信号频率选择合适的匹配元件值。

系统防护电路包含传感器短路、接口过压等功能。传感器短路防护电路如图 7 所示, 无需控制器参与便可实现负载  $RL_1$  短路时的双向限流输出。系统接收到报警信号后停止信号激励, 并用指示灯  $D_2$  和上位机提示。双向允许的最大电流由负载的最大阻抗和激励信号幅值决定, 通过电阻  $R_1$  和  $R_8$  修改。

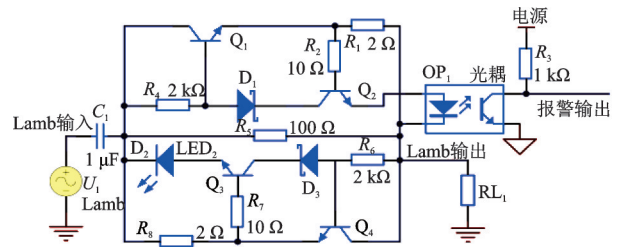


图 7 传感器短路防护电路

Fig.7 Protection circuit for sensor short-circuit

因主机与压电传感器之间信号反射以及传输线阻抗失配等原因, 会导致高频高压的激励信号产生震荡。设计如图 8 所示的震荡消除电路, 在激励信号结束瞬间, 若存在震荡信号, 双向晶闸管  $Q_5$  会导通, 利用电阻  $R_9$  与  $Q_5$  形成的通路释放震荡信号的能量。

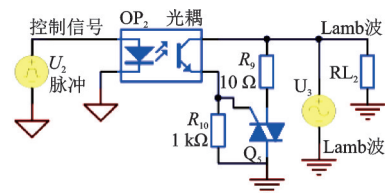


图 8 震荡消除电路

Fig.8 Oscillation elimination circuit

使用示波器测量 60 kHz 和 1 MHz 频率下, 模块输入和输出的 Lamb 波如图 9 所示。输出信号幅值达到 ±80 V, 负载压电片静态电容为 2.4 nF, 计算可得模块输出峰值功率超过 40 W。

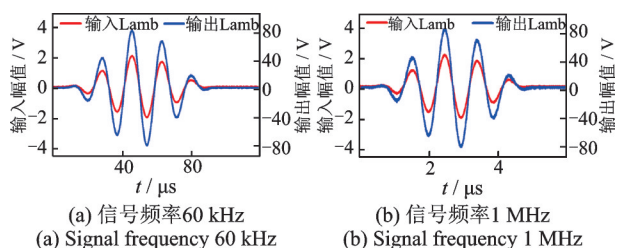


图 9 模块输入和输出的 Lamb 波

Fig.9 Module input and output Lamb wave



### 1.3.3 通道选择与高速开关模块设计

系统设计激励通道选择、接收通道选择和高速开关模块,满足128路压电传感器的接入需求,实现单传感器自发自收功能,同时可抑制串扰对系统的影响。通道选择及高速开关模块原理如图10所示。

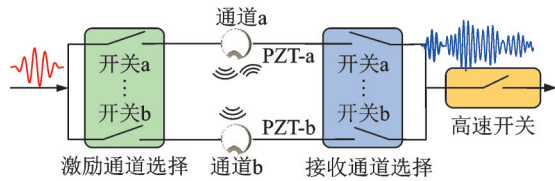


图10 通道选择及高速开关模块原理

Fig.10 Principle of channel selection and switch module

系统在单发单收工作模式时,激励通道选择模块中的开关a和接收通道选择模块中的开关b在Lamb波激励之前闭合;高速开关默认与其同时闭合,若存在影响定位的强串扰信号,高速开关延迟至Lamb波激励结束时刻闭合。系统在自发自收工作模式时,激励通道选择模块和接收通道选择模块中的开关a均在Lamb波激励之前闭合,高速开关在Lamb波激励结束时刻闭合。

### 1.3.4 信号调理与采样模块设计

信号调理模块分为高压激励信号调理和响应弱信号调理2部分,信号调理与采样模块原理如图11所示。

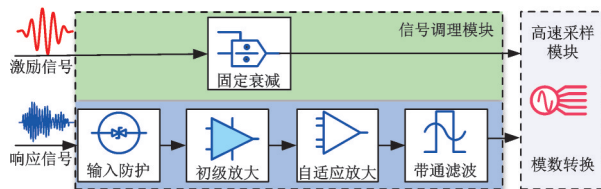


图11 信号调理与采样模块原理

Fig.11 Principle of signal conditioning and sampling module

激励信号调理部分使用电阻衰减电路,降低Lamb波激励信号幅值的同时不改变其频率和相位。主控模块根据衰减信号反演实际激励信号,根据与理想信号的误差适时调整激励信号,形成激励信号通路的负反馈,以降低环境温度等因素对电路的影响,保证激励信号的稳定。

响应信号调理部分实现对信号的去噪以便更准确地还原信号,从而保证损伤定位的准确性。输入防护电路避免可能存在的高压信号对后级放大电路造成损坏。电荷放大器对响应弱信号进行初步放大,并将压电传感器的高输出阻抗转换成低输出阻抗。自适应放大器由多级增益可调放大器组成,实

现增益的可控调节。带通滤波器滤除因电磁干扰、系统振动等因素带来的复杂噪声,其通带由激励信号频率决定,强干扰环境下可配合软件超外差接收技术提取响应信号中的单频信息<sup>[5]</sup>。

高速采样模块使用多通道14位模数转换芯片实现对激励信号和响应信号的同步采样,将模拟信号转换成数字信号,每秒采样数最高可达 $2 \times 10^7$ 。模块采集的响应信号如图12所示。信号调理模块对不同频率的响应信号进行了自适应放大,输出幅值 $\geq \pm 0.3$  V。采样模块的采样分辨率为0.12 mV,能够有效检测微弱信号。

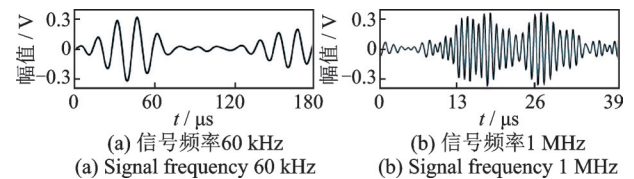


图12 模块采集的响应信号

Fig.12 Response signals collected by the module

### 1.3.5 系统串扰分析

串扰是由信号线间的互容、互感等寄生参数引起的干扰现象。超声导波检测系统因传感器通道数量多、集成化程度高等原因,在激励高频高压Lamb波时,响应信号中不可避免会出现串扰信号。若不对幅值过高的串扰信号进行抑制,会影响调理电路对响应信号的放大和损伤定位效果<sup>[10]</sup>。

集成多传感器的智能层、连接智能层与主机的多芯线缆、主机和智能层的接口连接器、通道选择模块等信号线密集位置均能引起传感器通道间的串扰,系统从2个方面减小系统的串扰。

1) 优化印制电路板(printed circuit board, 简称PCB)布局走线。PCB中的信号线是引起串扰的重要原因,使用Advanced Design System软件仿真Lamb波引起的串扰,为降低串扰提供理论依据,以优化PCB设计<sup>[12]</sup>。激励源输出Lamb波,经FR4板材的微带耦合线驱动 $200 \Omega$ 负载电阻,响应信号调理电路输入阻抗为 $100 \text{ k}\Omega$ 。Lamb波幅值默认为 $\pm 80 \text{ V}$ ,耦合线走线宽度默认为 $0.5 \text{ mm}$ 、线间距默认为 $0.5 \text{ mm}$ 、耦合长度默认为 $254 \text{ mm}$ 。

图13为Lamb波串扰的仿真结果。可见,串扰信号也是五峰Lamb波,降低激励信号幅值、减小走线宽度、增大信号线间距、缩短耦合长度等措施均能够有效降低响应信号中串扰。

2) 使用增益可调放大器和高速开关电路。与主机PCB和智能层引进的串扰不同,多芯线缆和接

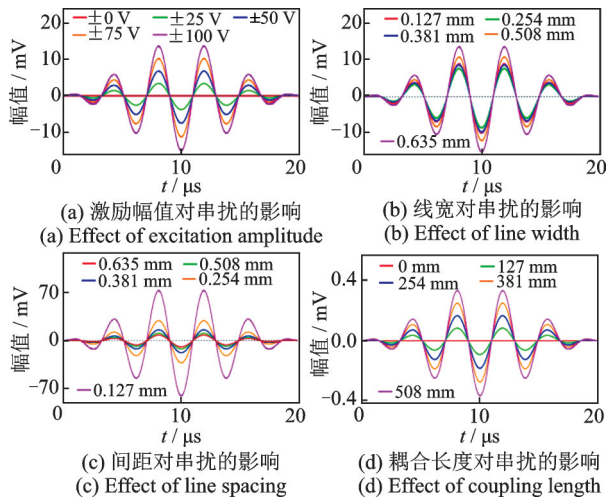


图 13 Lamb波串扰的仿真结果

Fig.13 Simulation results of Lamb wave crosstalk

口连接器带来的串扰很难通过电路设计降低其幅值。使用增益可调放大器和高速开关电路 2 种手段抑制串扰信号。

响应信号中的串扰信号相对于有效信号较小时,利用自适应放大电路中增益可调的放大器,调小串扰部分的增益,正常放大有效信号。该方法保留串扰部分的有效波形,可根据增益大小恢复原始波形。

受限于放大器的增益调节能力,在串扰幅值过高时,需要使用高速开关电路抑制串扰。在激励信号结束前,开关处于断开状态,结束时刻立即闭合,从而完全截掉响应信号中的串扰部分。若两传感器距离较近,响应信号会与串扰信号叠加,使用高速开关抑制串扰会丢失部分导波信号,但对损伤定位结果影响较小。

#### 1.4 上位机软件设计

上位机软件使用实验室虚拟仪器工程平台编写,主要包含硬件管理、传感器网络配置、信号预处理、损伤定位分析和数据管理等模块,具有传感网络自动搭建、采样信号数字处理、响应波形实时显示和损伤自动定位成像等功能。

系统使用基于概率密度的损伤重构算法对损伤进行定位<sup>[13]</sup>,算法实现过程如下:

- 1) 获取待测结构健康状态和待测状态下,所有  $N$  条传感路径的健康信号和响应信号;
- 2) 利用相关函数计算第  $i$  条路径健康信号和响应信号的相关系数  $\text{Corr}_i$ ;
- 3) 定义第  $i$  条传感路径的损伤指数  $D_i = 1 - \text{Corr}_i$ ;
- 4) 待测区域内位置点  $(x, y)$  的损伤概率

$p(x, y)$  为

$$p(x, y) = \sum_{i=1}^N D_i W_i [R_i(x, y)] \quad (1)$$

$W_i [R_i]$  为定义的加权函数,表示为

$$W_i [R_i] = \begin{cases} \frac{\beta - R_i}{\beta} & (R_i < \beta) \\ 0 & (R_i \geq \beta) \end{cases} \quad (2)$$

$$R_i(x, y) = \frac{|D_{ai}| + |D_{is}|}{|D_i|} - 1 \quad (3)$$

其中:  $\beta$  为损伤影响区域的尺度参数,代表传播路径的探测范围,可根据路径密度、可能的损伤尺度等因素进行调整,数值多在 0~0.2 之间;  $D_i$  为第  $i$  条传感路径中,激励传感器  $A_i$  到接收传感器  $S_i$  的距离;  $D_{ai}$  为点  $(x, y)$  到传感器  $A_i$  的距离;  $D_{is}$  为点  $(x, y)$  到传感器  $S_i$  的距离。

图 14 为概率成像算法示意图。该算法计算速度快,无需计算波速、信号飞行时间等特征参数,对待测结构的材料和形状无特殊要求,使系统可满足不同结构的在线监测需求。

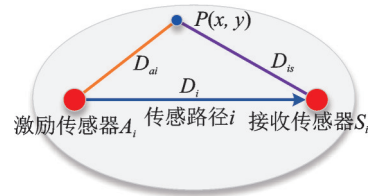


图 14 概率成像算法示意图

Fig.14 Diagram of probabilistic imaging

## 2 系统性能验证

### 2.1 测试系统搭建

图 15 为测试系统,由传感智能层、系统主机和上位机软件等部分构成。智能层与主机使用 24 芯、横截面为  $0.3 \text{ mm}^2$  的拖链软电缆连接。智能层集成 12 个压电传感器,共  $66(\sum_{i=1}^{11} i)$  条传感路径,粘贴在厚度为 3 mm 的碳纤维复合材料板表面,传感器围成直径为 160 mm 的圆形待测区域。传感智能层及传感器坐标如图 16 所示。

利用不同长度的线缆、东菱科技 ET-2-150 振动台、ESPEC 公司 SET-A-020U 高低温试验箱,对系统在不同振动、温度环境下主机工作的稳定性进行验证。默认的激励信号是幅值为  $\pm 60 \text{ V}$ 、频率为 120 kHz 的 Lamb 波。





图15 测试系统  
Fig.15 Test system

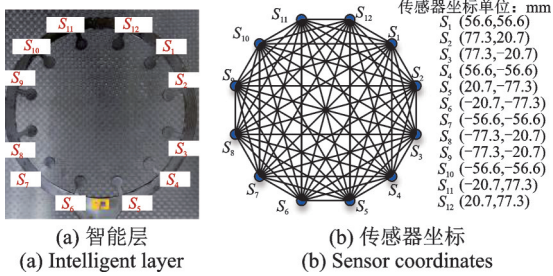


图16 传感智能层及传感器坐标

Fig.16 Intelligent layer and sensor coordinates

2.2 串扰抑制实验

为测试不同线缆长度、不同激励信号频率对响应信号中串扰的影响,分别使用1,7和30 m的非屏蔽线缆连接压电智能层与系统主机,使用频率为120 kHz和300 kHz、幅值为±60 V的Lamb波激励传感器 $S_1$ ,使用泰克MDO4034B示波器捕获传感器 $S_5$ 的响应信号。图17为不同线缆长度下的响应信号。实验结果表明:线缆越长、激励信号频率越高,串扰信号的幅值越大;120 kHz下有效信号幅值更低,导致对120 kHz的串扰进行抑制更加困难。

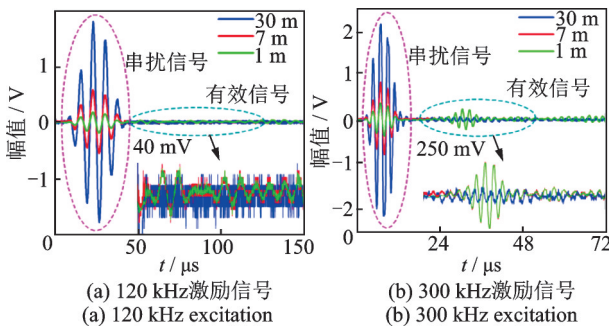


图17 不同线缆长度下的响应信号

Fig.17 Response signals under different cable lengths

使用120 kHz, ±60 V的Lamb信号作为激励,利用1 m线缆验证增益可调放大器对小串扰抑制效果( $S_2$ 激励,  $S_5$ 接收),利用30 m线缆验证高速开关电路对大串扰的抑制效果( $S_3$ 激励,  $S_8$ 接收)。图18为系统对串扰信号的抑制效果。如图18(a)所示,在 $T_0$ 时刻,即激励信号结束瞬间,提高放大器的增益,可

实现对串扰信号和有效信号不同增益的放大。如图18(b)所示,在 $T_0$ 时刻,闭合高速开关,实现对串扰信号直接去除。对比原始响应信号发现,2种方式都能有效解决串扰存在时的有效信号提取。

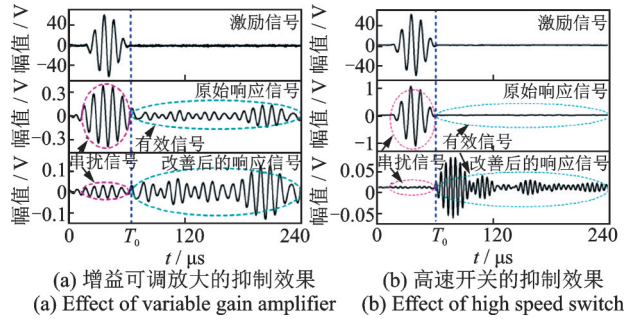


图18 系统对串扰信号的抑制效果

Fig.18 Suppression effect of the system on crosstalk signal

2.3 系统定位实验

为了测试系统的定位误差,在待测区域不同位置放置直径为12 mm、质量为20 g的砝码模拟损伤。综合考虑压电片谐振频率、响应信号稳定性、导波频散特性等因素,选取120 kHz, ±60 V的Lamb波信号作为激励。在无砝码状态下,获取66条路径的响应信号作为健康信号。点(0 mm, 0 mm)位置损伤定位过程如图19所示。在点(0 mm, 0 mm)放置砝码,获取所有路径的响应信号,求出每条路径的损伤指数,计算待测区域每个位置点的损伤概率,得到待测区域的概率密度图(根据路径密度以及对不同 $\beta$

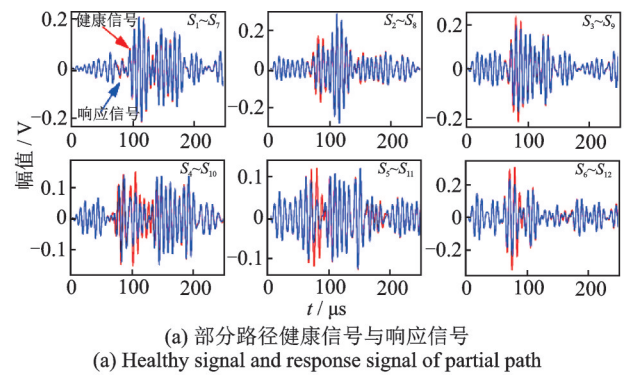


图19 点(0 mm, 0 mm)位置损伤定位过程

Fig.19 Damage location process at position (0 mm, 0 mm)

值定位效果的比较,确定 $\beta$ 取0.01),将概率密度最高的点作为损伤定位的中心位置。

图20为模拟损伤位置与定位结果。在图20(a)中标识的27个位置依次放置砝码,进行损伤定位实验,定位结果如图20(b)所示。

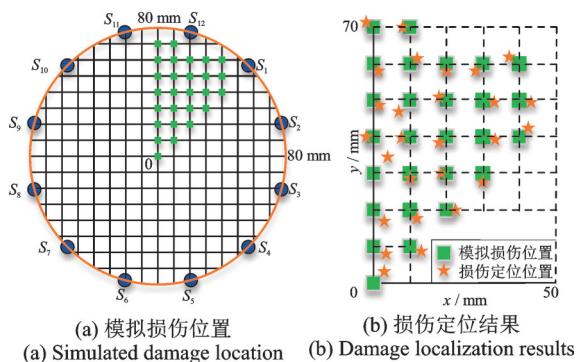


图20 模拟损伤位置与定位结果

Fig.20 Simulated damage location and location results

损伤定位误差如表2所示,最大误差为5.6 mm。图21为定位结果误差统计。可见,68%的定位误差在4 mm以下,97%的定位误差在5 mm以下。

表2 损伤定位误差

Tab.2 Damage location error mm

损伤位置	定位位置	误差	损伤位置	定位位置	误差	损伤位置	定位位置	误差
(0,0)	(3,3)	4.2	(10,20)	(11,18)	2.2	(20,50)	(18,51)	2.2
(0,10)	(4,9)	4.1	(10,30)	(10,29)	1.0	(20,60)	(20,58)	2.0
(0,20)	(3,18)	3.6	(10,40)	(8,40)	2.0	(30,30)	(30,28)	2.0
(0,30)	(4,34)	5.6	(10,50)	(7,47)	4.2	(30,40)	(34,39)	4.1
(0,40)	(-2,40)	2.0	(10,60)	(12,62)	2.8	(30,50)	(34,49)	4.1
(0,50)	(1,48)	2.2	(10,70)	(8,70)	2.0	(30,60)	(28,58)	2.8
(0,60)	(1,58)	2.2	(20,20)	(22,20)	2.0	(40,40)	(43,43)	4.2
(0,70)	(-2,72)	2.8	(20,30)	(19,30)	1.0	(40,50)	(44,49)	4.1
(10,10)	(13,9)	3.2	(20,40)	(19,39)	1.4	(40,60)	(37,61)	3.2

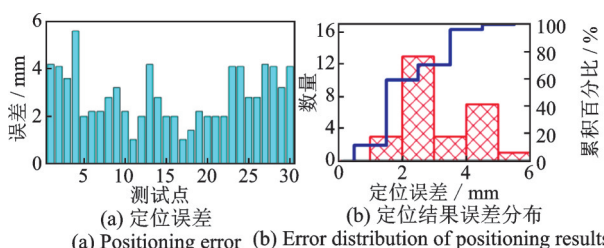


图21 定位结果误差统计

Fig.21 Error statistics of positioning results

### 2.4 振动稳定性实验

将主机固定在振动台上,复合材料板放置在稳定的平台。在振动台开启之前采集一组所有路径的

健康信号。开启振动台,设置垂直方向正弦振动加速度为5 g,调整振动台的振动等级,在20,100,300和500 Hz振动频率下,各采集5组所有路径的响应信号,并分别与健康信号做相关分析,得到20组实验数据的损伤指数。不同振动条件下的损伤指数如图22所示。

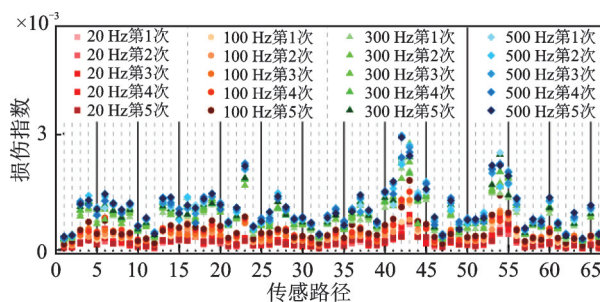


图22 不同振动条件下的损伤指数

Fig.22 Damage index under different vibration conditions

可见,随着振动频率的提高,损伤指数呈不断增加的趋势,但最大值不超过0.003,这与图19(b)中损伤情况下的损伤指数相比,低了一个数量级,由此证明系统具有良好的振动稳定性。

### 2.5 温度稳定性实验

将主机放入高低温试验箱中,复合材料板放置在室内。调整温箱温度,在-10℃温度点采集一组所有路径的健康信号,在-10,10,30和50℃这4个温度点各采集5组所有路径的响应信号,并分别与健康信号进行相关分析,得到20组实验数据的损伤指数。不同温度条件下的损伤指数如图23所示。可见,主机工作环境温度变化60℃,所有路径每次实验的损伤指数均不超过0.002,这与模拟损伤造成的损伤指数相比低了一个数量级,由此证明系统具有良好的温度稳定性。

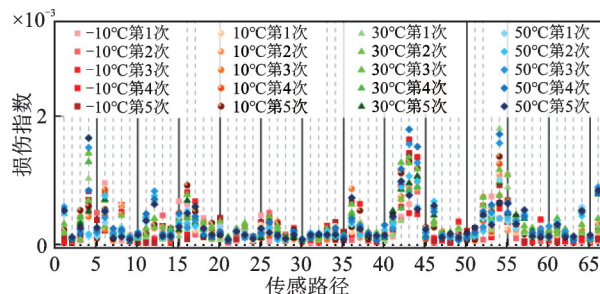


图23 不同温度条件下的损伤指数

Fig.23 Damage index under different temperature conditions

与振动实验结果不同的是,随着环境温度的升高,损伤指数并没有明显升高的趋势。原因是在实验过程中复合材料板所处的环境温度受温箱散热等因素影

响,发生小范围波动,影响了导波信号的传播特性。

### 3 结论

1) 传感智能层集成压电传感器与温度传感器,使用多芯线缆与系统主机连接;主机支持128路压电传感器、4路温度传感器接入,Lamb波激励信号频率范围为60 kHz~1 MHz,幅值最高±80 V,导波每秒信号采样数最高为 $2 \times 10^7$ ;上位机软件实现损伤自动定位等功能。

2) 通过优化PCB设计、利用增益可调放大器 and 高速开关电路等措施抑制串扰,实现了强串扰条件下有效信号的提取。实验结果表明:系统具有较高的损伤定位精度,误差在7 mm以下;在不同的温度和振动条件下,系统均有良好的工作稳定性。

3) 待测结构的温度和形变会影响导波传输<sup>[14]</sup>,进而影响定位准确性,故系统仍有进一步完善空间。

### 参 考 文 献

- [1] HONG M, WANG Q, SU Z Q, et al. In situ health monitoring for bogie systems of CRH380 train on Beijing-Shanghai high-speed railway[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 45(2): 378-395.
- [2] 卿新林,刘琦,张雨强,等.飞行器复合材料全寿命结构健康监测技术[J].厦门大学学报(自然科学版),2021,60(3):614-629.  
QING Xinlin, LIU Qijian, ZHANG Yuqiang, et al. Life-cycle health monitoring technology for aircraft composite structures[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, 60(3): 614-629. (in Chinese)
- [3] DAFYDD I, SHARIF KHODAEI Z. Analysis of barely visible impact damage severity with ultrasonic guided Lamb waves[J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(4): 1104-1122.
- [4] 金学健.微型压电致动器驱动电源研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.
- [5] 周正干,黄凤英,倪先胜.超外差接收相敏检波在电磁超声检测中的应用[J].北京航空航天大学学报,2011,37(3):253-258.  
ZHOU Zhenggan, HUANG Fengying, NI Xiansheng. Application of super-heterodyne phase-sensitive detector in electromagnetic acoustic testing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(3): 253-258. (in Chinese)
- [6] QING X P, BEARD S J, KUMAR A, et al. Advances in the development of built-in diagnostic system for filament wound composite structures[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(11/12): 1694-1702.
- [7] 丁睿,邱雷.小型化便携式压电导波结构健康监测系统设计[J].国外电子测量技术,2021,40(6):64-70.  
DING Rui, QIU Lei. Design of miniaturized and portable structural health monitoring system for piezoelectric guided wave[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(6): 64-70. (in Chinese)
- [8] 邱雷.基于压电阵列的飞机结构监测与管理研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
- [9] QING X L, LI W Z, WANG Y S, et al. Piezoelectric transducer-based structural health monitoring for aircraft applications[J]. Sensors, 2019, 19(3): 545.
- [10] GORGIN R, LUO Y, WU Z J. Environmental and operational conditions effects on Lamb wave based structural health monitoring systems: a review[J]. Ultrasonics, 2020, 105: 106114.
- [11] 郭师峰,李叶海,李振,等.柔性超声传感结构健康监测技术现状与展望[J].振动、测试与诊断,2020,40(3):427-436.  
GUO Shifeng, LI Yehai, LI Zhen, et al. The status and prospects of flexible transducers in ultrasonic wave-based structural health monitoring[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3): 427-436. (in Chinese)
- [12] 蒋修国.ADS信号完整性仿真与实战[M].北京:清华大学出版社,2019:139-160.
- [13] 郑跃滨,武湛君,雷振坤,等.基于超声导波的航空航天结构损伤诊断成像技术研究进展[J].航空制造技术,2020,63(18):24-43.  
ZHENG Yuebin, WU Zhanjun, LEI Zhenkun, et al. Research progress in damage diagnostic imaging of aerospace structures based on ultrasonic guided waves[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(18): 24-43. (in Chinese)
- [14] LU Y H, MICHAELS J E. A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations[J]. Ultrasonics, 2005, 43(9): 717-731.



**第一作者简介:**魏钧涛,男,1992年10月生,博士生。主要研究方向为超声导波无损检测技术。

E-mail: weijuntao1992@126.com

**通信作者简介:**姜明顺,男,1981年1月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为智能传感器、结构健康检测和故障诊断等。

E-mail: jiangmingshun@sdu.edu.cn