

中华人民共和国国家标准

GB/T 45578—2025/ISO 24543:2022

无损检测 声发射检测 压电声发射传感器 接收灵敏度谱的验证

Non-destructive testing—Acoustic emission testing—Verification of the
receiving sensitivity spectra of piezoelectric acoustic emission sensors

(ISO 24543:2022, IDT)

2025-03-28 发布

2025-03-28 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

订单号: 0205250711853332 防伪编号: 2025-0711-0322-5961-1920 购买单位: 清诚声发射研究(广州)有限公司

清诚声发射研究(广州)有限公司 专用

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩略语	3
5 概述	4
6 硬件的通用要求	6
7 接收灵敏度谱的测定	10
8 发射灵敏度谱的测定	19
附录 A (资料性) 模版示例	25
附录 B (资料性) 仪器示例	27
附录 C (资料性) 压电声发射传感器的验证方法	28
附录 D (资料性) 关于接收灵敏度测定的附加信息	32
附录 E (资料性) 关于发射灵敏度测定的附加信息	42
附录 F (资料性) 使 R_V/R_D 适应所用材料的声阻抗	47
参考文献	48

清诚声发射研究 (广州) 有限公司

订单号: 0205250711853332 防伪编号: 2025-0711-0322-5961-1920 采购单位: 清诚声发射研究 (广州) 有限公司

订单号: 0205250711853332 防伪编号: 2025-0711-0322-5961-1920 购买单位: 清诚声发射研究(广州)有限公司

清诚声发射研究(广州)有限公司 专用

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件等同采用 ISO 24543:2022《无损检测 声发射检测 压电声发射传感器接收灵敏度谱的验证》。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出并归口。

本文件起草单位：中国特种设备检测研究院、上海材料研究所有限公司、清诚声发射研究(广州)有限公司、中国计量科学研究院、爱德森(厦门)电子有限公司、北京科海恒生科技有限公司、河南启兴格电子科技有限公司、安徽华工智能科技研究院有限公司、山东科捷工程检测有限公司、河北省特种设备监督检验研究院保定分院、天津市特种设备监督检验技术研究院。

本文件主要起草人：张君娇、沈永娜、苑一琳、沈功田、丁杰、吴占稳、谢杰辉、何龙标、胡斌、陈谋财、沈克兴、王珂、刘时风、林泽森、付检平、万强、刘亚萍、李寰、梁玉梅、杨飒。

清诚声发射研究(广州)有限公司 专用

引言

本文件提出的测定压电声发射传感器接收灵敏度谱的方法基于一种安装方式,即将待测传感器的表面通过一层薄耦合剂直接耦合到压电发射换能器的主动面。发射换能器通常选用超声传感器,通过超声传感器表面法线方向上的质点位移脉冲激励待测传感器,位移脉冲由激光测振仪在发射换能器有效区域的多个位置进行测量,这就测定了绝对单位为纳米每伏特(nm/V)的发射换能器的发射灵敏度以及绝对单位为伏特每纳米(V/nm)的待测传感器的接收灵敏度。

本文件的目的是建立声发射测试的一致性,为数据相关性奠定基础,并为不同声发射测试机构在不同时间获得的结果的统一解释提供依据。压电声发射传感器验证方法的更多信息,见附录 C。

无损检测 声发射检测 压电声发射传感器 接收灵敏度谱的验证

1 范围

本文件描述了测定压电声发射传感器的接收灵敏度谱的方法。该方法将声发射传感器直接耦合到压电发射换能器表面,通过垂直传感器表面方向的脉冲激励,得到单位质点运动输入下对应的电压输出,作为其绝对灵敏度,该质点运动可以是质点位移(如单位为纳米)或质点速度(如单位为毫米每秒),覆盖声发射检测频率范围(20 kHz~1.5 MHz)。

本文件也描述了测定压电换能器发射灵敏度谱绝对量值(单位电压输入下的位移输出,如纳米每伏特)的方法,该值可通过测量发射换能器主动面上的质点位移脉冲和发射换能器的输入电压频谱得到,质点位移可使用扫描激光测振仪测得。

本文件不包括当入射角不同于法线(90°)或穿过传感器感应面的弹性波波长小于感应面尺寸的10倍时对传感器响应产生的“抵消效应”。

本文件不描述测量不同材料对传感器灵敏度影响的方法,但该影响的说明见附录F。

注:本文件中描述的方法可考虑用于压电传感器以外的其他类型用于检测平面构件上的运动且在相同频率范围内工作的传感器。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

ISO 12716 无损检测 声发射检测 词汇(Non-destructive testing—Acoustic emission inspection—Vocabulary)

注:GB/T 12604.4—2005 无损检测 术语 声发射检测(ISO 12716:2001,IDT)

3 术语和定义

ISO 12716 界定的以及下列的术语和定义适用于本文件。

3.1

发射换能器 transmitter

TM

将电信号转换成质点运动或压力的压电器件。

注:可在TM后增加一个单字母标识符(TM-序列号 A~Z)以识别特定的发射换能器。

3.2

待测传感器 sensor under test

SUT

待验证其接收灵敏度谱(3.8、3.9)的压电声发射传感器。

注:可在SUT后增加两位数标识符(SUT-序列号 00~99)以识别待测传感器的类型。

3.3

函数信号发生器 function generator

FG

对发射换能器(3.1)产生激励脉冲的电子装置。

3.4

瞬态记录仪 transient recorder

TRA

具有触发输入、预触发功能和计算机接口,且包含两个或两个以上信号输入通道捕捉波形的电子装置。

3.5

扫描激光测振仪 scanning laser vibrometer

LVM

用于非接触式测量物体表面多个位置法向质点运动[测量结果以纳米(nm)为绝对单位]的仪器。

3.6

面对面装置 face-to-face setup

发射换能器(3.1)的主动面直接耦合到待测传感器(3.2)的感应面,以通过电脉冲进行可重复激励的装置。

3.7

激光测振仪装置 laser vibrometer setup

LVM setup

使用扫描激光测振仪(3.5)测量发射换能器(3.1)自由主动面多个位置的质点位移脉冲的装置。

3.8

接收位移灵敏度谱 receiving displacement sensitivity

R_D

传感器的输出电压频谱[单位为分贝(dB)]减去其输入质点位移频谱[单位为分贝(dB)]。

注1:在本文件中,0 dB的质点位移灵敏度(R_D)定义为1 V/nm。

注2:当术语“灵敏度”与待测传感器(3.2)明显相关时,“接收”一词可以省略。

3.9

接收速度灵敏度谱 receiving velocity sensitivity

R_V

传感器的输出电压频谱[单位为分贝(dB)]减去其输入质点速度频谱[单位为分贝(dB)]。

注1:在本文件中,0 dB的质点速度灵敏度(R_V)定义为1 V·s/mm。

注2:当术语“灵敏度”与待测传感器(3.2)明显相关时,“接收”一词可省略。

3.10

发射位移灵敏度谱 transmitting displacement sensitivity

T_D

发射换能器(3.1)的输出位移频谱[单位为分贝(dB)]减去其输入电压频谱[单位为分贝(dB)]。

注1:本文件中,0 dB的质点位移灵敏度(T_D)定义为1 nm/V。

注2:当术语“灵敏度”与发射换能器明显相关时,“发射”一词可省略。

3.11

发射速度灵敏度谱 transmitting velocity sensitivity T_V

发射换能器(3.1)的输出速度频谱[单位为分贝(dB)]减去其输入电压频谱[单位为分贝(dB)]。

注1:本文件中,0 dB的质点速度灵敏度(T_V)定义为1 mm/(V·s)。

注2:当术语“灵敏度”与发射换能器明显相关时,“发射”一词可省略。

3.12

窗函数 han2SQ

用于声发射传感器或激光测振仪对位移脉冲响应的快速傅里叶变换输入的特定时间窗函数。

注:见附录D中D.2.3。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件:

D :由激光测振仪测量位移信号并转换为频谱,以0 dB代表峰值1 pm;“ D ”可由TM-序列号(A~Z)、环-序列号(1~5)和窗口-序列号附加表示,见W7;

FFT:快速傅里叶变换,一种将时间序列信号转换成频谱的方法;

MS/s:每秒百万个采样点;“1 MS”表示“100万个采样点”,如果内存数量以“MS”表示,“1 MS”通常表示“ 2^{20} ”(1 048 576)个采样点;

N_R :测量位置的环数,范围为1~5,见8.2;

N_{RL} :覆盖待测传感器感应面测量位置(见图6)的最大环数 N_R ,用于正确选择 T_D ,记录在附录A中表A.2中;

r_R :环数 N_R 的半径,单位为毫米(mm),见8.2;

R_{SS} :信号对激励比的频谱,单位为分贝(dB),见公式(4);特定 R_{SS} 数据文件的推荐命名以“S”开头,后跟SUT-序列号(00~99),TM-序列号(a~Z)和窗口-序列号,见下面的W7;

R_{VDD1} :漂移探测传感器1的漂移探测灵敏度谱,关于发射灵敏度漂移的验证,见8.7列项c)的1);

R_{VDD2} :漂移探测传感器2的漂移探测灵敏度谱,关于发射灵敏度漂移的验证,见8.7列项c)的1);

R_{VDR1} :漂移探测传感器1的漂移参考灵敏度谱,根据8.7列项a)通过发射换能器的灵敏度测定来确定;

R_{VDR2} :漂移探测传感器2的漂移参考灵敏度谱,根据8.7列项a)通过发射换能器的灵敏度测定来确定;

$R_{V\Delta 1}$:漂移探测传感器1的频谱差 R_{VDD1} 减去 R_{VDR1} ,见8.7列项c)的2);

$R_{V\Delta 2}$:漂移探测传感器2的频谱差 R_{VDD2} 减去 R_{VDR2} ,见8.7列项c)的2);

U_F :面对面装置中的发射换能器电压,由函数信号发生器激励以及由瞬态记录仪在时域中测量,然后转换为频谱 $F(U_F)$,单位为分贝(dB),其中0 dB定义为峰值1 mV的正弦波;

U_L :LVM装置中的发射换能器电压,由函数信号发生器激励以及由LVM在时域中测量,然后转换为频谱 $F(U_L)$,单位为分贝(dB),其中0 dB定义为峰值1 mV的正弦波;

U_S :传感器的输出电压,也称为“传感器响应”,由瞬态记录仪在时域中测量,然后转换为频谱 $F(U_S)$,单位为分贝(dB),其中0 dB定义为峰值1 mV的正弦波;

$U_{SAV\%}$:一个SUT在4个或6个发射换能器激励下产生的4个或6个响应 U_S 的平均值,以其最大峰—峰值电压的百分比表示,见图7;

$U_{S\Delta\%}$: 响应 U_S 与 $U_{SAV\%}$ 的偏差, U_S 为其最大峰—峰值电压的百分比, 见图 7;

$F(D)$: 时间信号 D 的 FFT;

$F(U_F)$: 时间信号 U_F 的 FFT;

$F(U_L)$: 时间信号 U_L 的 FFT;

$F(U_S)$: 时间信号 U_S 的 FFT;

W5: 4 μs 主脉冲时间窗的标识符;

W7: 50 μs 主脉冲时间窗的标识符;

W8: 100 μs 主脉冲时间窗的标识符;

W9: 200 μs 主脉冲时间窗的标识符。

5 概述

5.1 面对面装置框图

面对面装置的框图见图 1 a)。数字标引符号代表方块, 字母标引符号代表接口, 图 1 的标引符号在括号中被引用。

函数信号发生器(1)在信号输出(A)处以恒定的重复速率发送激励脉冲 U_F 。

信号 U_F (A) 连接到发射换能器(2)的输入(D), 并连接到瞬态记录仪(4)的输入通道 B(J)。电脉冲在发射换能器的主动面(E)处激励脉冲。该面通过一薄层耦合剂(F)与待测传感器(3)的感应面(G)进行声耦合。待测传感器的信号输出(H)将传感器响应 U_S 传递到瞬态记录仪(4)的输入通道 A(I)。由函数信号发生器(1)产生的触发输出信号“Sync”(B)在(K)处触发瞬态记录仪获取信号。瞬态记录仪(4)通过接口(L)和接口(M)由个人计算机(5)控制。

每次触发获取的数据由个人计算机(5)通过(L)和(M)读出, 并以激励脉冲的时间间隔(通常为 200 ms)显示在 PC 显示器上。

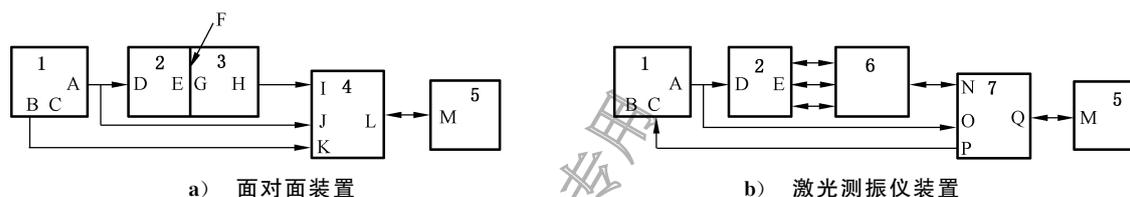
激励脉冲 U_F (A) 见图 D.1。

三种类型传感器的传感器响应 U_S (H) 示例见图 D.6~图 D.8。

图 1 中没有显示的是待测传感器和发射换能器对准中心所需的夹具, 以及在接口(E-F-G)上施加的力。力的大小取决于耦合剂的性质和其他可能施加的力(例如来自电缆的力), 宜为 10 N。

测试人员可通过操纵夹具来观察耦合状况是否稳定或能否改进。

如果信号的可重复性良好, 测试人员停止重复测试并将最新捕捉的信号存储到正确命名的文件中。



标引说明：

- 1 —— 函数信号发生器(FG),包含信号输出接口 A、同步输出接口 B 和触发输入接口 C；
 2 —— 发射换能器(TM),包含脉冲输入接口 D 和在其主动面位移输出的接口 E；
 3 —— 待测传感器(SUT),包含位移感应输入接口 G 和响应电压输出接口 H；
 4 —— 瞬态记录仪(TRA),包含通道 A 输入接口 I、通道 B 输入接口 J、触发器输入接口 K 和 PC 连接接口 L；
 5 —— 个人计算机(PC),包含接口 M；
 6 —— 为了测试发射换能器主动面 E 的 21 个位置的激光扫描定位单元；
 7 —— 扫描激光测振仪(LVM),包含光输入接口 N、参考电压输入接口 O 和触发输出接口 P；
 A —— 面对面装置中为 FG 输出激励脉冲信号 U_F , LVM 装置中为 U_L ；
 B —— FG 触发输出“Sync”到接口 K,在 LVM 装置中为开路；
 C —— 来自接口 P 的 FG 触发输入,面对面装置为开路；
 D —— 来自接口 A 的发射换能器输入信号 U_F ；
 E —— 发射换能器主动面上的输出运动,连接至面对面装置中的 G 或 LVM 装置中的 6；
 F —— TM 到 SUT 界面上的耦合介质,也称为耦合剂,见 ISO 12716:2001 的 2.15；
 G —— SUT 在其感应面的输入运动,来自面对面装置的 E；
 H —— SUT 输出信号 U_s 到面对面装置的接口 I；
 I —— TRA 输入通道 A,从接口 H 测量 U_s ；
 J —— TRA 输入通道 B,从接口 A 测量 U_F ；
 K —— TRA 触发器,从接口 B 输入；
 L —— TRA 到 PC 的接口,TRA 端；
 M —— PC 输入/输出,从/到面对面装置的接口 L 或 LVM 装置的接口 Q；
 N —— LVM 激光束通过 6 依次定位到 TM 面接口 E 的 22 个位置之一；
 O —— LVM 基准电压输入信号 U_L ,来自接口 A；
 P —— LVM 触发器,输出到 FG 的接口 C；
 Q —— LVM 到 PC 接口,LVM 端。

图 1 面对面装置和激光测振仪装置的示意框图

图 1 所示的面对面装置能用于带或不带内置前置放大器的传感器的测试,见 6.6.3。

5.2 激光测振仪装置框图

激光测振仪宜应用于确定面对面装置中使用的发射换能器的发射灵敏度。

发生以下情况时,应进行激光测振:

- 购买发射换能器后；
- 当发射换能器暴露在异常条件下时,例如机械冲击或热冲击；
- 每年进行 1 次。

类似于图 1 a),激光测振仪装置框图见图 1 b)。激光测振仪(7)代替待测传感器(3),测量发射换能器主动面上的脉冲,激光束按(6)顺序定位到 22 个测量位置之一(位置 22 与位置 1 相同),见图 6。

脉冲信号 U_L 由函数信号发生器(1)在信号输出(A)处产生,以响应由激光测振仪(7)接口(P)输出到函数信号发生器的触发输入(C)。发射换能器的输入 U_L 通常与面对面装置中的 U_F 相同。

如果使用后置放大器驱动发射换能器,为了获得更好信噪比的位移结果,应在后置放大器输出处测

量电压(O)。

激光测振仪由个人计算机(5)控制,通过(Q)和(M)读取采集的数据。

为了提高信噪比,激光测振仪测量应在每个测量位置重复测量 10 000 次并取平均值,然后进行三阶萨维茨基-戈雷(Savitzky-Golay)滤波器去噪,取 41 个采样点。

可从噪声中分离出约 2 pm 的位移,是函数信号发生器幅度设置为最大值(峰—峰值 10 V)时,峰—峰值为 1 nm 的最大位移的 0.2%。

6 硬件的通用要求

6.1 总则

本条规定了与面对面装置有关的硬件项目的通用要求,以实现待测传感器(SUT)接收灵敏度谱的最佳测定结果。有关激光测振仪装置的硬件要求,见 8.2。设备示例见附录 B。

6.2 函数信号发生器(FG)

以下要求根据商用函数信号发生器的特性进行了调整,示例见 B.1。

可选择与函数信号发生器功能和技术规格相当的函数信号发生器 PC 板,例如,仅由软件控制的 PC 板。

函数信号发生器满足以下要求。

- a) 函数信号发生器应通过标准接口(例如 USB 或 LAN)由软件进行控制。
- b) 输出阻抗应为 50 Ω ,最大幅度设置应为 10 V 峰—峰值或更高。幅度设置应适用于 50 Ω 终端。如果输出开路,输出电压应为电压设置的两倍。
- c) 函数信号发生器应支持单周期突发模式产生起始相位为 90°的正弦波,每次触发输出从 +10 V 移动到 -10 V 再回到 +10 V。
- d) 应响应用户定义的时间间隔内的内部触发器(面对面装置中)、外部触发器(激光测振仪装置中)和软件命令产生突发脉冲。
- e) 函数信号发生器应在内部触发时提供触发输出(“同步”)。
- f) 频率为 1 MHz、峰—峰值为 10 V 时的谐波失真不应低于 -45 dB。
- g) 在频率 1 kHz 时幅度设置 ± 1 mV,输出信号的误差不应超过 $\pm 1\%$ 。
- h) 相对于频率 1 kHz,在频率 1 MHz 的幅度平坦度不应高于 0.15 dB。
- i) 输出采样率不应低于 40 MS/s。
- j) 为了避免测量链中的接地回路噪声,函数信号发生器的内部接地连接到输出和同步连接器的屏蔽,应与保护接地保持至少 ± 5 V 的隔离。内部接地端子应用于可选的外部保护接地连接。
- k) 宜定期校准函数信号发生器,因为信号输出是由瞬态记录仪测量的,瞬态记录仪应定期校准。

6.3 发射换能器

以下与发射换能器有关的要求 a) 和 b) 描述了一个理想的示例。

本文件宜使用市场在售的超声传感器,见 B.2。

面对面装置结果的准确性和再现性受到所使用发射换能器性能变化的限制,特别是在激励脉冲之后的混响阶段。

本文件的目标是开发一种接近理想类型的发射换能器。

发射换能器满足以下要求:

- a) 发射换能器采用的压电元件的背衬阻尼应具有良好的吸声特性,以实现质点运动的无反射吸收;

- b) 压电元件的有效面直径应足够大,足以通过质点运动(通常是位移脉冲,从中心均匀分布到边缘)激励待测传感器(SUT)直径可达到 25 mm 的感应面;
- c) 使用峰值为 20 V 的单极余弦脉冲应产生约 1 nm 的位移脉冲,见图 E.2;
- d) 在频率 1 kHz 下测量的压电元件的电容值不应超过 2 nF;
- e) 对于所使用的每个发射单元,应按照第 8 章或其他等效精度的程序确定发射灵敏度,以便由激励脉冲的频谱和发射灵敏度的频谱能重建面对面装置的 SUT 输入处的位移频谱;
- f) 如果通过发射换能器激励区域的运动不是均匀分布的,并且随中心距离变化,则应确定不同类型 SUT 感应区域不同直径的不同发射灵敏度;
- g) 每个发射换能器单元的详细信息应保存在发射换能器清单中,清单模版见 A.1;
- h) 一些压电发射换能器制造商不宜在发射换能器上施加永久性直流电压。在这种情况下,宜在电缆和发射换能器的端子之间接入一个直流阻滞器(10 μ F/50 V 的屏蔽无极化电容),见图 1a) 和 b) 中的标引符号 D。

6.4 发射换能器与待测传感器间的耦合剂

耦合剂应满足以下要求:

- a) 在涂抹后 15 s 内提供最佳耦合质量(某些类型的润滑脂耦合延迟可能会持续数小时);
- b) 提供在以下验证工作的预期持续时间内保持恒定的耦合质量,通常为几分钟;
- c) 具有高流动性(低黏度),以满足列项 a);
- d) 不损害皮肤,避免戴防护手套;
- e) 不损害眼睛或其他器官;
- f) 不损伤传感器、发射换能器和夹具;
- g) 易于从任何表面清除。

6.5 待测传感器至发射换能器的固定工具

6.5.1 总则

图 2 为传感器和发射换能器中心对齐的解决方案示例。

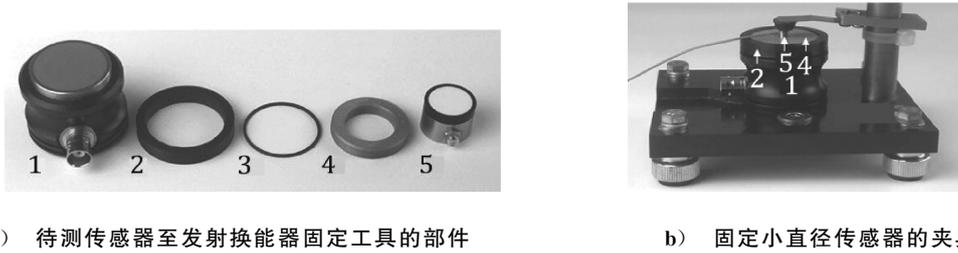
图 2 a) 显示直径约 20 mm (标引序号 5) 的传感器固定工具所需的部件;图 2 b) 显示了一个完整的夹具,其中一个直径约 6 mm 的传感器安装在发射换能器的顶部,由直径匹配的传感器固定环对齐,并由钢板弹簧压下。

定距环[图 2a) 中的标引序号 3]是为了将传感器固定环(标引序号 4)与发射换能器分离,以避免传感器响应频谱受到干扰。

6.5.2 要求

待测传感器至发射换能器的固定工具应满足以下要求。

- a) 将传感器的中心对准发射换能器的中心,并在传感器和发射换能器之间的耦合剂上施加至少 10 N 的压力。
- b) 允许传感器和发射换能器之间的微小移动,以便测试人员在 PC 显示器上看到耦合质量良好且稳定的信号。
- c) 提供传感器和发射换能器之间明确的角度关系,例如两个侧面接线端之间为零度。
- d) 不影响或阻碍从发射换能器到传感器的运动传递,例如,通过固定工具的设计或材料特性。



标引序号说明:

- 1——有效面朝上的发射换能器;
- 2——放在发射换能器表面上的环,以使其他环居中;
- 3——定距环,确保发射换能器和传感器固定环之间的距离为 1 mm;
- 4——传感器固定环(每种直径的传感器都需要有对应的传感器固定环);
- 5——待测传感器。

图 2 待测传感器至发射换能器固定工具示例

图 2 中标引序号 2~标引序号 4 的推荐尺寸如下。

- e) 标引序号 2 的内径宜等于标引序号 1 主动面周围可见的圆柱形部分的直径加上(0.05 mm~0.15 mm);这也宜等于标引序号 3 和标引序号 4 的外径。
- f) 标引序号 2 的外径宜等于内径加上(9 mm~20 mm);厚度宜等于标引序号 1 圆柱形部分高度的两倍减去 0.1 mm,以允许与标引序号 1 相同几何形状的 SUT 直接接触。
- g) 标引序号 3 的内径宜等于其外径减去(2 mm~4 mm)。
- h) 标引序号 4 的内径宜等于 SUT 的直径加上(0.05 mm~1.5 mm)。
- i) 标引序号 4 的厚度宜等于 5 mm 减去(0 mm~0.5 mm)。
- j) 上述在 TM 上 SUT 的标引序号 2 的外径和标引序号 4 的内径公差允许微小移动。
- k) 标引序号 3 可通过直径为 1 mm 的线绳和标引序号 1 内径减 2 mm 的 O 形环来实现。它的目的是阻止 TM 与标引序号 4 的运动带来耦合变化,从而干扰小直径 SUT 在高频下的灵敏度结果。

图 2a)所示的环的原型的所有部分都是由 3D 打印机制作的。

6.6 待测传感器(SUT)

6.6.1 总则

常用的声发射传感器是单端结构,并采用同轴电缆连接器。差动结构的传感器通常配有一根整体电缆,电缆末端是两极加屏蔽连接器,可能需要适配器用于将差分传感器连接到瞬态记录仪的单端输入。

6.6.2 热电效应

压电传感器受热电效应影响,温度变像压力变化一样会产生电荷。如果传感器未使用 10 MΩ~100 MΩ 的放电电阻,则温度变化会导致压电元件电容中存储高电压。当传感器连接到瞬态记录仪时,放电电流可能会损坏传感器。

如果放电电阻是否存在未知,则能够通过测量传感器电阻来确定。如果不存在放电电阻,在将传感器连接到仪器之前,将标准 50 Ω 终端短暂连接到传感器以释放存储的能量。带有内置前置放大器的传感器通常通过内部保护免受热电效应损坏。

6.6.3 内置前置放大器

对带内置前置放大器的传感器,宜使用该传感器的正常供电电源。

如果电源电压通过信号输出端输入,可使用 BNC-T 接头将电缆连接到瞬态记录仪。

激励脉冲的幅度应设置为满量程前置放大器输出的 50%~90%。

测量激励脉冲的幅度并将其考虑在灵敏度计算公式中,见公式(4)。

仅对带有内置前置放大器的传感器的验证,可以使用经过验证的声发射系统(独立仪器或 PC 板)代替瞬态记录仪(见 6.9)。

6.6.4 前置放大器输入阻抗的影响

如果传感器与输入阻抗小于 1 M Ω 的外部前置放大器一起使用,因额外负载,传感器和前置放大器组合灵敏度低于正常面对面装置测定的灵敏度。在输入阻抗为 10 k Ω 时,灵敏度降低已确定为 100 kHz 时 0.5 dB,50 kHz 时 1.7 dB,25 kHz 时 3.8 dB,20 kHz 时 6 dB。

传感器与前置放大器组合的灵敏度谱也可能受到前置放大器增益频谱的影响。

6.6.5 待测传感器清单要求

每种待测传感器的类型都应在 SUT 列表中列出,并包含面对面装置中使用的所有信息,以及根据感应面大小选择合适的传输灵敏度所需的所有信息。SUT 列表模板见 A.2。

6.7 传感器至瞬态记录仪的信号电缆

6.7.1 总则

传感器电缆通常是带有同轴连接器的同轴电缆。传感器电缆在传感器侧可能是可拆卸或不可拆卸的。差动式传感器通常使用整体屏蔽的两极电缆,带有一个两极加屏蔽连接器。由于传感器电缆的电容会降低电压效应产生的电压,因此传感器电缆的长度会影响传感器的灵敏度。

6.7.2 要求

如果传感器电缆是可拆卸的,应使用长度 20 cm~30 cm 的电缆测量,以获得可比的灵敏度谱。

如果对灵敏度结果的影响小于 1 dB,则可使用大于 30 cm 的电缆。

6.8 函数信号发生器至发射换能器和至瞬态记录仪的信号电缆

因电压源的阻抗与压电元件相比较低,且用于灵敏度测定的发射换能器的电压(U_F)为实际测量,因此函数信号发生器至发射换能器和至瞬态记录仪的同轴电缆长度对测试没有影响。

但函数信号发生器的电压脉冲产生约峰—峰值 200 mA 的电流,电缆长度为 75 cm 时,相对于函数信号发生器的输出端,发射换能器处电压峰—峰值下降约 18 mV。

根据 SUT 的屏蔽串扰,该脉冲的串扰可能会到达传感器输出并干扰结果。串扰测试见 7.4.6。

6.9 测量 U_s 和 U_F 的瞬态记录仪

6.9.1 总则

为了减少耦合质量的不确定性,宜使用带有 PC 显示器和足够存储容量的瞬态记录仪,可随时在 PC 屏幕上显示捕捉的波形。测试人员可调节传感器到发射换能器的耦合,并选择最佳耦合的数据永久存储。

6.9.2~6.9.6 给出的要求与市售示波器前端提供的技术数据相匹配,见 B.3。

可使用经过验证的声发射系统(独立仪器或 PC 板)和经过验证的宽带前置放大器代替瞬态记录仪。

需注意在激励脉冲时,前置放大器会产生短的高压电流脉冲,对信号输出造成电压降低的干扰。

因此,本文件不宜使用声发射前置放大器进行无源传感器的灵敏度验证。见 6.6.3。

6.9.2 输入阻抗

6.7 提及的传感器电缆,与传感器压电元件并联的电容以及电阻都可能影响获得的灵敏度。因此,输入阻抗应接近 $1\text{ M}\Omega$ 并联 13 pF 。

6.9.3 范围、分辨率、精度、采样率和缓冲长度

瞬态记录仪应满足以下要求。

- a) 输入电压量程范围应为 $\pm 10\text{ mV}\sim\pm 20\text{ V}$ 。
- b) 过压保护不对低于 $\pm 50\text{ V}$ 的信号输入施加负载。
- c) 应选择 15 位垂直分辨率和两个有效输入通道的测量模式。
- d) 在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下,测量范围为 50 mV 或以上时,直流误差应规定接近满量程的 $\pm 1\%$ 。两个通道都宜选择交流模式。
- e) 40 MS/s 的采样率和 8 KS 的数据缓冲区使激励脉冲在 $1\text{ }\mu\text{s}$ 内足以获得 40 个采样点,并能够获得约 $200\text{ }\mu\text{s}$ 的信号数据。
- f) 对于推荐的模型,采样率取决于所选的通道数、数字化仪分辨率和缓冲区长度的组合;对于推荐采样率为 125 Ms/s (8 ns 间隔),宜选择 2 个有效通道,数字化仪分辨率 15 位,缓冲长度 $500\text{ }\mu\text{s}$ 和采样点数 64 K 。
- g) 对极低电压的测量,垂直轴缩放比例应由附加系数决定(例如 10 或 20),以便信号放大到选定的全量程范围,例如 $\pm 10\text{ mV}$,见 7.4.6。

6.9.4 带宽

为减小噪声,宜选择截止频率在 $4\text{ MHz}\sim 8\text{ MHz}$ 的低通滤波器。

6.9.5 触发设置

触发应设置为重复模式、外同步(来自函数信号发生器的同步输出)、 100 mV 触发电平、上升沿、 1% 预触发。预触发数据用于直流偏移确定和补偿。

6.9.6 验证和校准

瞬态记录仪应定期校准,或应根据制造商的说明验证其准确性。

7 接收灵敏度谱的测定

7.1 总则

来自函数信号发生器(FG)的激励信号 U_F 输入发射换能器,产生一个具有足够幅度和频率含量的质点位移脉冲 D 。

宜使用频率为 1 MHz 、起始相位为 90° 的单周期正弦波脉冲,即负向的余弦脉冲。关于激励信号的

详细信息见附录 D。

待测传感器(SUT)经耦合剂直接耦合至发射换能器(TM),实现质点位移脉冲转换为输出信号 U_s 。瞬态记录仪将 U_F 和 U_s 两种信号数字化并存储到硬盘里,然后对其进行直流偏移补偿,详细信息见 D.1.2。

由于瞬态记录仪的采样间隔是 8 ns,数字化数据采样间隔被降到 25 ns,并通过快速傅里叶变换(FFT)转换至频域,具体过程见 D.1.3 和 D.2 宽带传感器、150 kHz 窄带传感器及低频传感器的响应示例,见 D.3。

7.2 接收灵敏度谱 R_D 和 R_V 的测定公式

传感器的接收位移灵敏度谱(R_D)定义为输出电压频谱(dB)和输入位移频谱(dB)之间的差值。

在本文件中,0 dB 的接收位移灵敏度谱(R_D)定义为 1 V/nm,等于 1 mV/pm。

根据上述可知,灵敏度谱 R_D [单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1 mV/pm]等于传感器输出 U_s 的频谱[单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1 mV]减去输入位移 D 的频谱[单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1 pm],见公式(1)。

$$R_D = F(U_s) - F(D) \quad \dots\dots\dots(1)$$

位移 D 的频谱由公式(2)确定,位移频谱 $F(D)$ [单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1 pm]等于激励脉冲的频谱 $F(U_F)$ [单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1 mV]加上发射位移灵敏度谱 T_D [单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1 pm/mV]。发射换能器的发射位移灵敏度谱按第 8 章测定。

$$F(D) = F(U_F) + T_D \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$R_D = F(U_s) - F(U_F) - T_D \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$R_{SS} = F(U_s) - F(U_F) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$R_D = R_{SS} - T_D \quad \dots\dots\dots(5)$$

将公式(1)中的 $F(D)$ 替换为公式(2)右侧得到公式(3)。

公式(3)中的频谱差 $F(U_s) - F(U_F)$ 称为“信号激励比”(R_{SS}),见公式(4),进而可得公式(5)。

信号激励比 R_{SS} 由面对面装置获得,发射位移灵敏度谱 T_D 由激光测振仪装置获得,见 8.1 的公式(9)。

为确定接收速度灵敏度谱 R_V ,将公式(5)转换为公式(6),其中 R_D 和 T_D 分别用 R_V 和 T_V 代替。发射速度灵敏度谱 T_V 为 T_D 的微分,由公式(7)得到,见参考文献[5]的 7.5.5。

$$R_V = R_{SS} - T_V \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$T_V = T_D + [20 \times \lg(2\pi f) - 120] \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$R_V = R_D - [20 \times \lg(2\pi f) - 120] \quad \dots\dots\dots(8)$$

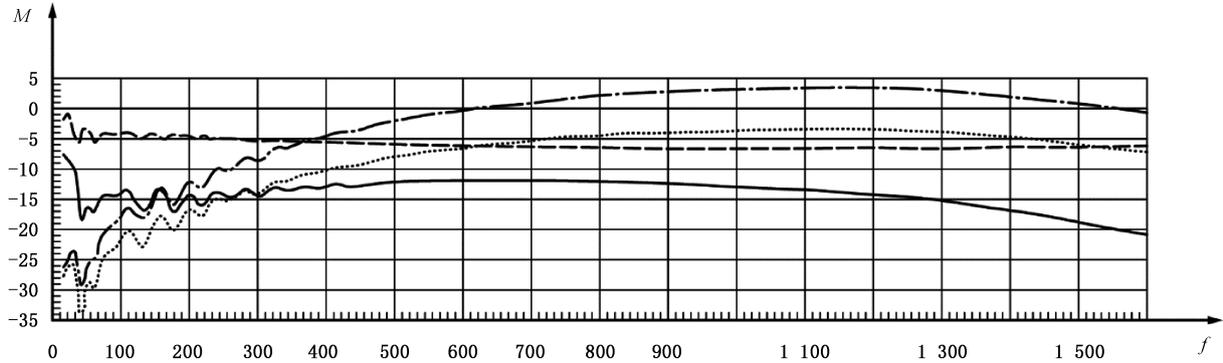
式中:

f ——频率,单位为千赫兹(kHz)。

将公式(7)应用于公式(6)可得公式(8),得到接收速度灵敏度谱 R_V ,单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1 V·s/mm。公式(7)中减去 120 dB 是为了使 T_V 单位由“纳米”变为“毫米”,0 dB 定义为 1 mm/(s·V)。

清诚声学发射研究(广州)有限公司 购买单位:清诚声学发射研究(广州)有限公司 2025-0711-0322-5961-1920 防伪编号:2025-0711-0322-5961-1920 订单号:0205250711853332

7.3 用于传感器灵敏度验证的相关频谱



标引说明：

- M —— FFT 的幅度,单位为分贝(dB);
- f —— 频率,单位为千赫兹(kHz);
- 接收位移灵敏度谱 R_D ,单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1 V/nm;
- 接收速度灵敏度谱 R_V ,单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1 V · s/mm;
- ——信号激励比 R_{SS} ,单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1,曲线上移 20 dB;
- 发射位移灵敏度谱 T_D ,单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1 nm/V,曲线上移 20 dB。

图 3 宽带传感器灵敏度测定的相关频谱

图 3 显示了在以下条件下,从 20 kHz~1 600 kHz 传感器灵敏度验证的相关频谱:

- 发射换能器:TMA;
- 待测传感器:SUT01;
- 发射灵敏度谱 T_D 从位置 1~13(0 环~3 环,见图 6);
- LVM 数据滤波器:在混响阶段使用三阶萨维茨基—戈雷滤波器,41 个采样点;
- R_{SS} 和 T_D 的 FFT 窗口:W7 (Han2SQ, 长度 50 μ s,见 D.2.3)。

在图 3 中:

- 点划线表示接收位移灵敏度谱 R_D ,由公式(5)定义;
- 实线表示接收速度灵敏度谱 R_V ,由公式(8)定义;
- 虚线表示发射灵敏度谱 T_D ,由 8.1 中公式(9)定义,向上移动 20 dB;
- 点线表示由公式(4)定义的信号激励比 R_{SS} ,在为 R_D 和 R_V 优化的垂直尺度上也移动了 20 dB;
- 点划线 R_D 对应点线减去虚线。

接收灵敏度谱受传感器材料的声阻抗和传感器安装对象材料的声阻抗差异的影响,见附录 F。

7.4 传感器灵敏度谱验证程序

7.4.1 准备

准备工作应执行以下步骤。

- a) 发射换能器的要求见 6.3。
 - 1) 在进行第一次灵敏度验证之前,应至少提供 1 个经过扫描激光测振仪验证的发射换能器。
 - 2) 基于发射换能器感应面的非均匀运动分布,发射换能器的发射灵敏度谱应根据第 8 章对

其感应面的 5 个直径进行测定。

3) 所用发射灵敏度谱的命名见表 1,并在 8.2 中进行说明。

b) 表 1 最后 1 列的第 3 个字符指代发射换能器(TMA)。

发射灵敏度谱的测定程序见 8.3。

c) 用于固定发射换能器和待测传感器的工具(见 6.5)。

该固定工具的作用是对准待测传感器和发射换能器表面中心点,并施加恒定压力。

TM 至 SUT 界面保持水平,以防止低黏度耦合剂(例如轻油)流失。

d) 耦合剂选择。

轻油或护手霜等可在数秒内实现稳定耦合。

高黏度耦合剂(例如硅脂)的耦合稳定可能需要数小时。

e) 根据第 6 章的要求,准备图 1 中标引序号 1、3、4 和 5 的所有物品。

f) 如果待测传感器包含前置放大器,按 6.6.3 执行。

g) 宜建立待测(或已测)传感器类型的清单,记录每种传感器的检测标识符(00~99)、序列号、制造商及感应面直径,示例见 A.2。

h) 宜建立发射换能器清单,包括其标识符(A~Z)、类型、序列号,以及激光测振仪装置中位移测量时的温度,通常为 24 °C~26 °C,示例见 A.1。

i) 由于发射灵敏度谱有温度依赖性,将发射换能器和待测传感器的测试温度设置为激光测振仪进行位移测量前后的平均温度,以获得最佳再现性,如发射换能器列表记录所示。

j) 应根据公式(5)编写软件,将 U_F (激励脉冲)和 U_S (传感器响应)转换为 $F(U_F)$ 、 $F(U_S)$ 和 R_{SS} (信号激励比)。

k) 对于多数待测传感器,窗口长度宜为 50 μ s;对于低频传感器,窗口长度宜为 100 μ s。

关于时域信号处理的详细信息见 D.1,FFT 的相关效应见 D.2,有关不同类型待测传感器的结果频谱示例见 D.3。

7.4.2 面对面装置的电缆连接

按图 1 连接电缆,包括以下内容:

a) 用 2 根同轴电缆,将函数信号发生器的信号输出端(A)经过 T 形接头,分别连接至发射换能器(D)及瞬态记录仪的输入通道 B(J);

b) 如果待测传感器配备电缆连接器而非整体电缆,使用长度为 20 cm~30 cm 的同轴电缆及适配连接器,将传感器输出(H)与瞬态记录仪的输入通道 A(I)相连。

若 SUT 提供整体传感器电缆,则直接将其连接至瞬态记录仪;

注:若使用长度为 100 cm 的同轴电缆替代长度为 30 cm 的同轴电缆,需注意因电缆电容增加,将导致传感器在 100 kHz 时响应降低约 2 dB,在 1.5 MHz 时响应降低约 3 dB。

c) 用同轴电缆将函数信号发生器输出“Sync”(B)连接到瞬态记录仪的触发输入(K);

d) 连接瞬态记录仪(L)与 PC 机(M);

e) 将函数信号发生器、PC 机、瞬态记录仪的电源线连接到电源插座,并接通所有设备。

7.4.3 面对面装置中的函数信号发生器设置

以下参数为 B.1 给出的函数信号发生器参数设置:

a) 波形:正弦波;

b) 频率:1 MHz;

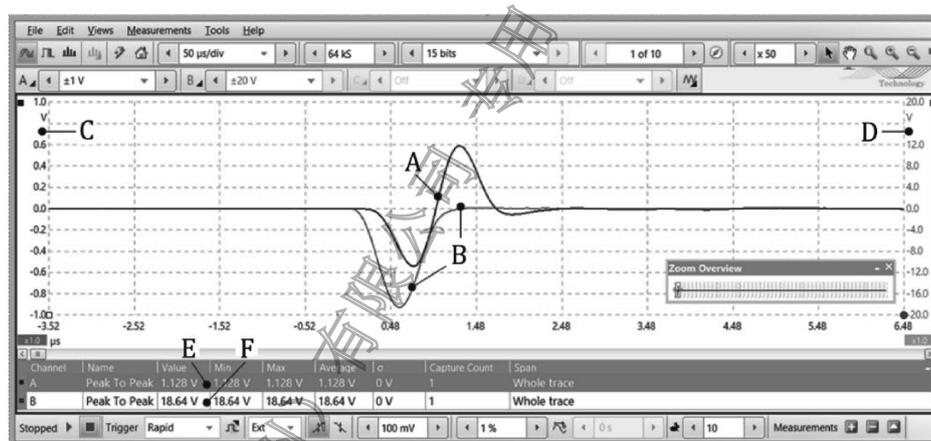
- c) 幅度:峰—峰值为 10 V;
- d) 扫描:关闭;
- e) 突发:开;
- f) 起始相位:90°;
- g) 触发器:内部,200 ms 间隔(用于 200 ms 的 PC 显示更新);
- h) 输出:开。

7.4.4 瞬态记录仪的设置

以下参数为 B.3 给出的瞬态记录仪参数设置:

- a) 操作模式:基于时间、持久性关闭、频谱关闭;
 - b) 缓冲时间:500 μ s、每个分区为 50 μ s;
 - c) 缓冲区大小(125 MS/s):64 kS;
 - d) 垂直分辨率:15 位;
 - e) 水平缩放: $\times 10$;
 - f) 触发器:重复;
 - g) 触发输入:外部上升;
 - h) 触发电平:100 mV;
 - i) 预触发:1%(缓冲区长度为 500 μ s 时为 5 μ s);
 - j) 延时:关;
 - k) 通道 A:打开;
 - l) 垂直缩放:自动;
 - m) 输入方式:交流;
 - n) 探头: $\times 1$;
 - o) 低通滤波器:8 MHz;
 - p) 带宽限制:20 MHz;
 - q) 轴缩放: $\times 1$;
 - r) 轴偏移:0.0;
 - s) 通道 B:与通道 A 的 l)~r)相同;
 - t) 通道 C:关闭;
 - u) 通道 D:关闭;
- 测量显示 1:
- v) 通道:A;
 - w) 测量类型:峰—峰值;
 - x) 图形部分:整个轨迹;
- 测量显示 2:
- y) 通道:B;
 - z) 测量类型:峰—峰值;
 - aa) 图形部分:整个轨迹。

7.4.5 试用测试



标引符号说明：

- A —— 瞬态记录仪输入 A, 待测传感器输出 U_S ;
- B —— 瞬态记录仪输入 B, 发射换能器输入激励脉冲 U_F ;
- C —— 通道 A 曲线纵轴对应刻度;
- D —— 通道 B 曲线纵轴对应刻度;
- E —— 通道 A 峰—峰值(U_S)数值显示;
- F —— 通道 B 峰—峰值(U_F)数值显示。

图 4 试用测试 PC 显示屏幕截图

以下为试用测试说明：

- a) 宜将发射换能器使用耦合剂面对面耦合到宽带传感器进行试用测试, 以完成准备阶段;
- b) 应根据 7.4.2 完成所有连接;
- c) 应根据 7.4.3 和 7.4.4 进行函数信号发生器和瞬态记录仪的设置;
- d) 函数信号发生器激励电压(U_F)的测量曲线, 应与图 4 中 B 相似;
- e) 当使用宽频带待测传感器时, 传感器输出(U_S)的信号应与图 4 中 A 相似。

根据函数信号发生器突发时间间隔(约 200 ms)的设置, 宜更新图 4 的显示。

图 4 的水平刻度以毫秒(ms)为单位显示时间, $0 \mu\text{s}$ 对应的是触发时刻, 为提升分辨率, 图 4 的时间轴已放大 50 倍。

7.4.6 初始串扰测试

为了确保布线合适, 从发射换能器外壳到传感器输出的串扰不干扰结果, 应按以下测试步骤进行串扰测试。

- a) 当函数信号发生器周期性地向发射换能器发送激励脉冲时(如图 4 的 B 线), 将待测传感器从发射换能器处移开, 此时线 A 的电压为 0 V。
- b) 将瞬态记录仪输入通道 A 范围设置为 $\pm 10 \text{ mV}$, 并将“通道 A 轴缩放”设置为 10 倍, 即缩放后每格为 0.2 mV。
- c) 将发射换能器和待测传感器连接器的屏蔽层压在一起, 保持良好的电接触, 避免任何声耦合。在此条件下, 受噪声影响的峰值小于 0.2 mV 的负脉冲(与图 4 的 A 线所示不同)是正常的。若峰值大于 1.2 mV, 则表明存在串扰问题。为减少通过电缆屏蔽的电压降, 应缩短从函数信

号发生器到发射换能器的电缆长度,或使用第二根同轴电缆并联。

- d) 将通道 A 测量到的最大脉冲电压作为串扰结果进行记录,示例见表 2 的第 11 项内容。

7.4.7 获取待测传感器的数据——激励脉冲 U_F , 传感器响应 U_S

完成 7.4.1~7.4.6 后,继续按以下步骤操作。

- 使用耦合剂将待测传感器安装到发射换能器上,并用固定工具紧固。发射换能器和待测传感器的侧面接线端之间的角度应始终相同,两个接线端朝向相同方向。
- 按 7.4.5 规定的试用测试,由函数发生器启动触发脉冲信号。
- 让被测的发射换能器和待测传感器保持在发射换能器清单中给出的温度,随后测量发射换能器的实际温度,并记录在报告中。
- 如果测量内置或外置放大器的输出,应将函数信号发生器的幅值(U_F)设定为能够产生前置放大器饱和点 50%~90%传感器响应(U_S)的水平。由于 U_F 为实际测量值,不必在报告中说明 U_F 的设置情况。
- 宜使用瞬态记录仪数值显示 U_S 和 U_F 的峰—峰值电压,见图 5,分别用 E 和 F 表示。这有助于找到待测传感器响应最高值的耦合状态。
- 通过移动或转动待测传感器以轻微改善耦合质量,并观察传感器响应是否有所提升。如果响应下降,重新添加发射换能器和待测传感器之间的耦合剂。
- 当温度稳定,耦合达到最佳状态并稳定后,停止数据获取,并将最新获取的数据存储到一个适当命名的文件中,例如:“01A-646161.csv”,其中“01”代表待测传感器类型(根据 SUT 列表分配);“A”将 TMA 标识为使用过的发射换能器、传感器(使用过的发射换能器编号应记录在发射换能器清单中,见附录 A);“-646161”可以表示为一个标识字符串,例如标识 SUT 的序列号和/或特殊设置条件;“.csv”则表示以逗号分隔的文件格式,方便导入电子表格。
- 取下发射换能器和固定工具上的待测传感器,清洁待测传感器、发射换能器和固定工具上的耦合剂。
- 如果还有其他待测传感器需要验证,则从步骤 a) 开始重复执行整个验证过程。

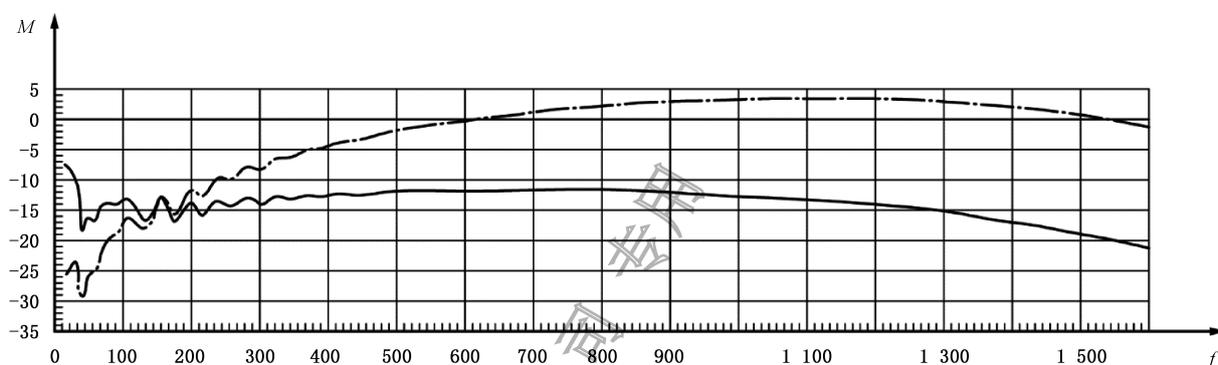
7.4.8 计算和获得接收灵敏度谱

按以下步骤,计算和获取灵敏度谱:

- 根据 7.4.7g),从文件中获取的待测传感器数据,包含激励信号 U_F 和传感器响应 U_S ,应通过 FFT 转换为频谱 $F(U_S)$ 和 $F(U_F)$,并根据公式(4)计算频谱 R_{SS} ;
- 在计算灵敏度谱时,考虑待测传感器感应面直径和时间窗长度,应根据表 1 选择合适的发射灵敏度谱,发射灵敏度谱的获取见第 8 章和附录 E;
- 根据公式(5),从所用待测传感器的信号激励比频谱 R_{SS} 减去所用发射换能器的发射灵敏度谱 (T_D),即获得接收位移灵敏度谱;
- 图 5 为 SUT01 和 TMA 组合的接收灵敏度谱示例。选择的发射灵敏度谱考虑 0 环~3 环(位置 1~13,见图 6),使用窗口长度为 50 μ s 的 Han2SQ 窗 W7(见 D.2.3),即所选发射灵敏度谱的名称为“TdA3W7”。

表 1 根据 SUT 的感应面直径来选择发射灵敏度谱(T_D)

SUT 感应面直径/mm	考虑 LVM 测量位置的环 (见图 6)	第 4 章规定的 W7 时间窗的 T_D (A 为 TMA)	第 4 章规定的 W8 时间窗的 T_D (A 为 TMA)
< 5.1	0~1	TdA1W7	TdA1W8
5.2~10.1	0~2	TdA2W7	TdA2W8
10.2~15.2	0~3	TdA3W7	TdA3W8
15.3~20.3	0~4	TdA4W7	TdA4W8
20.4~25.4	0~5	TdA5W7	TdA5W8



标引序号说明:

M ——接收位移灵敏度谱(R_D)和接收速度灵敏度谱(R_v)的 FFT 的幅度,单位为分贝(dB);

f ——频率,单位为千赫兹(kHz);

——接收位移灵敏度谱 R_D ,单位为分贝(dB), 0 dB 定义为 1 V/nm;

——接收速度灵敏度谱 R_v ,单位为分贝(dB), 0 dB 定义为 1 V · s/mm。

注:条件:SUT:SUT01-64;Td 代号:TdA3W7 用于发射换能器 TMA;环:0~3;窗口:W7(50 μ s, Han2SQ)。

图 5 SUT 接收灵敏度谱的推荐表示方法

7.4.9 传感器验证报告

除了图 5 以外,验证报告还应包括表 2 所示的项目。

表 2 验证报告应包括的项目

序号	项目	报告(示例)	可接受范围
1	使用的标准	ISO_24543	
2	待测传感器 1_类型-序列号,2_类型,3_制造商,4_序列号,5_环号,覆盖感应面最大环(1~5),6_内部放电电阻(M Ω)	1_01,2_V103,3_MMMa,4_646161,5_3 环,6_无	

表 2 验证报告应包括的项目 (续)

序号	项目	报告(示例)	可接受范围
3	使用的前置放大器 1_内置/外置/无,2_类型,3_制造商,4_序列号,5_直流源类型,6_频率范围,7_在FG80%的输出范围的幅值设置	1_外置, 2_AEP4, 3_MMMa, 4_12345, 5_声发射系统, 6_(100—1000) kHz, 7_峰值 0.2 V	
4	使用的发射换能器 1_序列号,2_类型,3_制造商,4_序列号,5_最近一次验证时间(由 LVM),6_测量前 TM 表面温度℃,7_位移测量后 TM 表面温度℃,8_DC 阻滞器(Y/N)见 6.3h)和表 A.1 的 d	1_A,2_V104,3_MMM ^a , 4_SN1110155,5_2020-01-10, 6_25.1℃, 7_25.5℃,8_N	
5	备用		
6	函数信号发生器 1_类型,2_制造商,3_序列号,4_最近一次校准日期	1_33500, 2_MMMa, 3_10089, 4_2020-01-10	
7	瞬态记录仪 1_类型,2_制造商,3_序列号,4_最近一次校准日期	1_5242A, 2_MMMa, 3_10183, 4_2020-02-15	
8	耦合剂 1_类型,2_制造商	1_hand milk 2_MMMa	
9	待测传感器电缆 1_SUT 连接器类型,2_如为一体化:长度(cm),3_如可拆卸:长度(cm)	1_Microdot, 2_80(如 80 cm 的一体式 SUT 电缆), 3_30(如 30 cm 的可拆型 SUT 电缆)	2: 20~120 3: 20~30
10	从 FG 到 TM 和 TRA 的信号电缆 1_两条电缆的长度总和(cm)	1_120	1: 100~150
11	串扰 1_根据 7.4.6 初始测试	峰值 0.2 mV	峰值<1.2 mV
12	备用		
13	用于数据分析的软件 1_名称,2_版本发布,3_供应商	1_VST,2_R202207/02, 3_MMM ^a	
14	初始数据文件 1_R _{SS} , 2_T _D	1_S01A-646161(第 4 章的 R _{SS}) 2_TdA3W7(见表 1 的第 3 和第 4 列)	
^a 将“MMM”替换为制造商的名称。			

清诚声发射研究(广州)有限公司 购买单位: 清诚声发射研究(广州)有限公司 防伪编号: 2025-0711-0322-5961-1920 订单号: 0205250711853332

7.5 灵敏度谱的可重复性

7.5.1 待测传感器至发射换能器的耦合

待测传感器与发射换能器之间良好稳定的耦合质量是获得可重复性灵敏度谱的重要要求,耦合剂相关要求见 6.5。宜采用面对面装置,在 PC 屏幕上实时更新传感器响应图谱,显示待测传感器响应 (U_s) 的即时变化(例如,当测试人员引起力或力的方向变化,以及待测传感器和发射换能器之间的微小运动),以查看耦合质量是否稳定,有助于实现可重复性灵敏度谱。

7.5.2 温度影响

发射换能器的发射灵敏度谱和待测传感器的接收灵敏度谱都与温度有关。宜测量面对面装置中的发射换能器温度,并注意使其接近扫描激光测振仪位移测量开始和结束时的平均温度,如表 2 所述,见 7.4.1i) 和 8.3.1c)。

7.5.3 发射换能器的更换

如果出现所选型号发射换能器对同一个待测传感器获得的灵敏度谱有过大的数据分散,这种发射换能器不应用于测试。对筛选不合适的发射换能器的评价条款见 8.5。

8 发射灵敏度谱的测定

8.1 发射位移灵敏度谱的测定公式

发射换能器的发射位移灵敏度谱 (T_D) 定义为输出位移频谱和输入电压频谱之差,两者均以 dB 表示。

本文件中发射位移灵敏度谱 (T_D) 的 0 dB 定义为 1 nm/V,也等于 1 pm/mV。

公式(9)定义了发射位移灵敏度谱:

$$T_D = F(D) - F(U_L) \dots\dots\dots(9)$$

式中:

T_D ——为分贝(dB)形式表示的发射位移灵敏度谱,0 dB 定义为 1 nm/V,也等于 1 pm/mV;

$F(D)$ ——为分贝(dB)形式表示的发射换能器输出处的位移脉冲频谱,0 dB 定义为 1 pm;

$F(U_L)$ ——为分贝(dB)形式表示的发射换能器输入处的激励脉冲频谱,0 dB 定义为 1 mV。

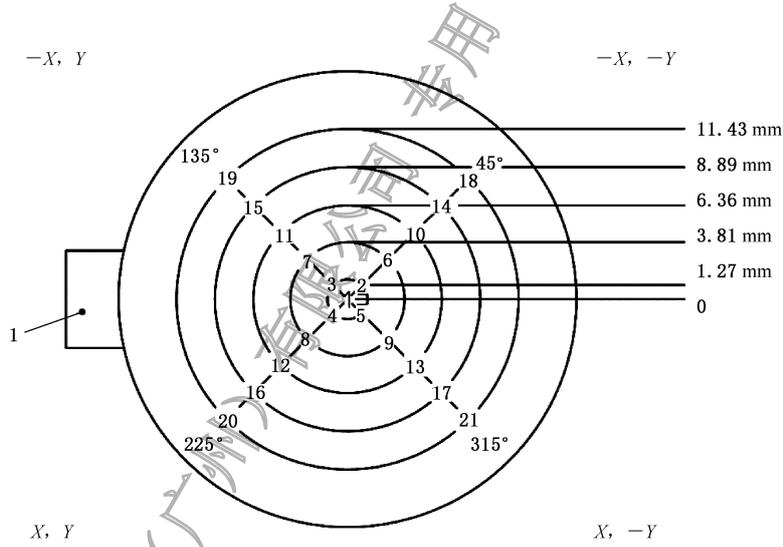
位移输出 D 和发射灵敏度谱 T_D 由与环绕发射换能器主动面中心测量位置的五个同心环有关的五个变量决定。这使得测试人员可以考虑不同直径 SUT 的感应面受到不同位移分布模式的激励。

在 21 个位置进行位移测量,见图 6。

使用的激光测振仪装置见图 1 b)。

清诚声发射研究(广州)有限公司 购买单位:清诚声发射研究(广州)有限公司 防伪编号:2025-0711-0322-5961-1920 订单号:0205250711853332

8.2 扫描激光测振仪的相关要求



标引序号说明：

1——侧面接线端的位置。

注：见 8.2e)。

图 6 激光测振仪的测量位置

扫描激光测振仪应满足以下要求。

a) 应使用扫描激光测振仪测量驱动发射换能器的电压脉冲[单位为伏特(V)]和发射换能器输出运动[质点位移,单位为纳米(nm)]。

本要求根据市售测振仪产品的特性进行了调整,见 B.5。

b) 光学解码器应至少覆盖 DC 到 2.5 MHz (-3 dB) 的频率范围,用于位移测量。

c) 参考通道的频率范围内的幅度误差在 250 kHz 以下时应小于 0.2 dB,250 kHz~2 MHz 时应小于 1 dB, 2 MHz~2.5 MHz 时应小于 3 dB。

d) 2 MHz 频率范围内的噪声在 10 000 次测量平均后峰值不应大于 20 pm。

采用以下设置：

e) 图 6 所示的测量位置用小字体数字 1 到 21 表示,一个在中心点,外加 5 个同心环上每个环上的四个点,再加上中心点的第二次测量,即为 22 个测量位置序列。5 个环的半径显示在图 6 的右侧。按公式(10)计算,单位为毫米(mm)。

$$r_R = N_R \times 2.54 - 1.27 \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中：

r_R ——环数 N_R 的半径,单位为毫米(mm)；

N_R ——环的编号,编号为 1~5。

f) 每次触发的记录时间应至少为 200 μ s(2 000 个采样点)与预触发时间之和。

g) 每个测量位置平均 10 000 条记录(每个记录约 2 048 个采样点)。

h) 预触发:至少 5 μ s 用于直流偏移量测定。

i) 对于一个完整的信号衰减,触发之间的时间间隔应至少为 800 μ s。

j) 触发与位移信号开始之间的抖动应小于 50 ns。

有关激光测振仪校准的信息,见 8.6。

8.3 发射灵敏度 T_D 的测定程序

8.3.1 准备

测试应执行以下步骤:

- 确定使用激光测振仪的类型,有的只提供质点速度测量。有的还提供质点位移测量。本文件规定激光测振仪具有质点位移测量功能。
- 确定扫描激光测振仪服务提供商。
- 对发射换能器做好系列测量前后的温度测量和记录的准备。
- 为图 6 所示的位移测量位置准备定位装置(图 1 b),标引符号 6)。
- 如果后置放大器驱动发射换能器,发射换能器电压(U_L)应在后置放大器输出处测量,而不是在后置放大器输入处。配置高阻抗分压器,以避免激光测振仪参考输入的饱和。
- 为实现激光测振仪测量时的均匀反射率,发射换能器的主动面应覆盖镜面箔。镜面箔和发射换能器表面之间不应存在气泡。

镜面箔的示例,见 B.4。

镜面箔对发射换能器表面影响的信息,见 E.3。

8.3.2 激光测振仪装置的电缆连接

按图 1 b)连接线缆,按以下步骤连接电缆:

- 用两根同轴电缆和一个 T 型接头将函数信号发生器信号输出(A)连接到激光测振仪参考电压输入(O)和待验证发射换能器(D);
- 如果需要直流阻滞器[见 6.3 h)和表 A.1(d)],将其插入电缆端和发射换能器输入之间;
- 用两根同轴电缆和一个 T 型接头将激光测振仪触发输出(P)与函数信号发生器触发输入(C)连接;
- 将激光测振仪(Q)与控制 PC (M)连接。

8.3.3 用于激光测振仪装置的函数信号发生器设置

应进行以下设置:

- 波形:正弦波;
- 频率:1 MHz;
- 幅度:峰—峰值 10 V,如未使用后置放大器;
- 扫描:关;
- 脉冲模式:开;
- 起始相位:90°;
- 触发:如果通过激光测振仪提供的触发进行测量,则设置为外部触发,否则设置为内部触发;
- 触发间隔:至少 800 μ s,以确保在下一次触发前信号得到了适当的衰减;
- 极性:根据激光测振仪控制器的需要。

8.3.4 采集激光测振仪数据

考虑了 8.2~8.3.3 中定义的设置和布线说明后,按以下步骤进行:

- a) 当使用最大输出幅度为 10 V(峰—峰值)、输出阻抗为 50 Ω 的标准函数信号发生器和符合 B.5 要求的激光测振仪时,应对每个测量位置取 10 000 次测量的平均值,以获得可接受的信噪比;
- b) 在预定位置利用激光测振仪进行测量,并将每个位置计算得到的平均位移时间序列信号存储在一个文件名中,文件名中包含发射换能器序列号和测量位置标号;
- c) 测量每个发射换能器在进行所有测量之前和之后的温度,并在发射换能器列表中记录为 T1 和 T2;
- d) 应商定交付的测量数据格式。

8.3.5 计算位移结果

计算位移结果通常使用软件工具,应按以下步骤执行。

- a) 根据预触发数据的平均值测量直流偏移量,并将其从所有采样中减去进行偏移校正。
- b) 将第一个主脉冲前的所有采样点归零以消除预触发噪声。
- c) 对各测量位置主脉冲后的信号数据进行萨维茨基—戈雷滤波降噪,推荐参数为三阶、41 个采样点。关于位移测量的更多说明见 E.2。

结果产生了 22 个时域位移信号。

- d) 对于 1 环~5 环,对每个环的四个位置的测量数据取平均值。
- e) 计算 $0 \sim N_R$ 环数据的加权平均, $N_R = 1 \sim 5$,考虑到中心距离越大的位置代表的面积越大,相应的权重也应越大。这就产生了 5 个位移信号,每个信号长度为 200 μs 。位移信号的示例见图 E.2。
- f) 应用适当的时间窗口长度和窗函数。本文件推荐长度为 50 μs 和 100 μs 的 Han2SQ 窗,见 D.2.3。
- g) 对每个加窗位移信号,通过 8 K 采样的输入缓冲区进行快速傅里叶变换,频率分辨率为 12 207 kHz,每个时间窗产生 5 个位移频谱。
- h) 为了获得发射灵敏度谱,每个位移频谱 $F(D)$ 减去发射换能器的电压频谱 $F(U_L)$,从而得到每个时间窗的 5 个直径的感应面的 5 个发射灵敏度谱。

图 E.5 显示了 1 个发射换能器的 1 组发射灵敏度谱。

8.4 测量完成后

应将镜面箔从发射换能器上完全取下,任何残留都会干扰面对面装置的测量结果。

8.5 不合适的发射换能器的筛选标准

宜在使用激光测振仪装置进行发射灵敏度测试之前,先使用面对面装置检查新的发射换能器用于宽带传感器测试时是否在混响阶段几乎无尖峰响应。

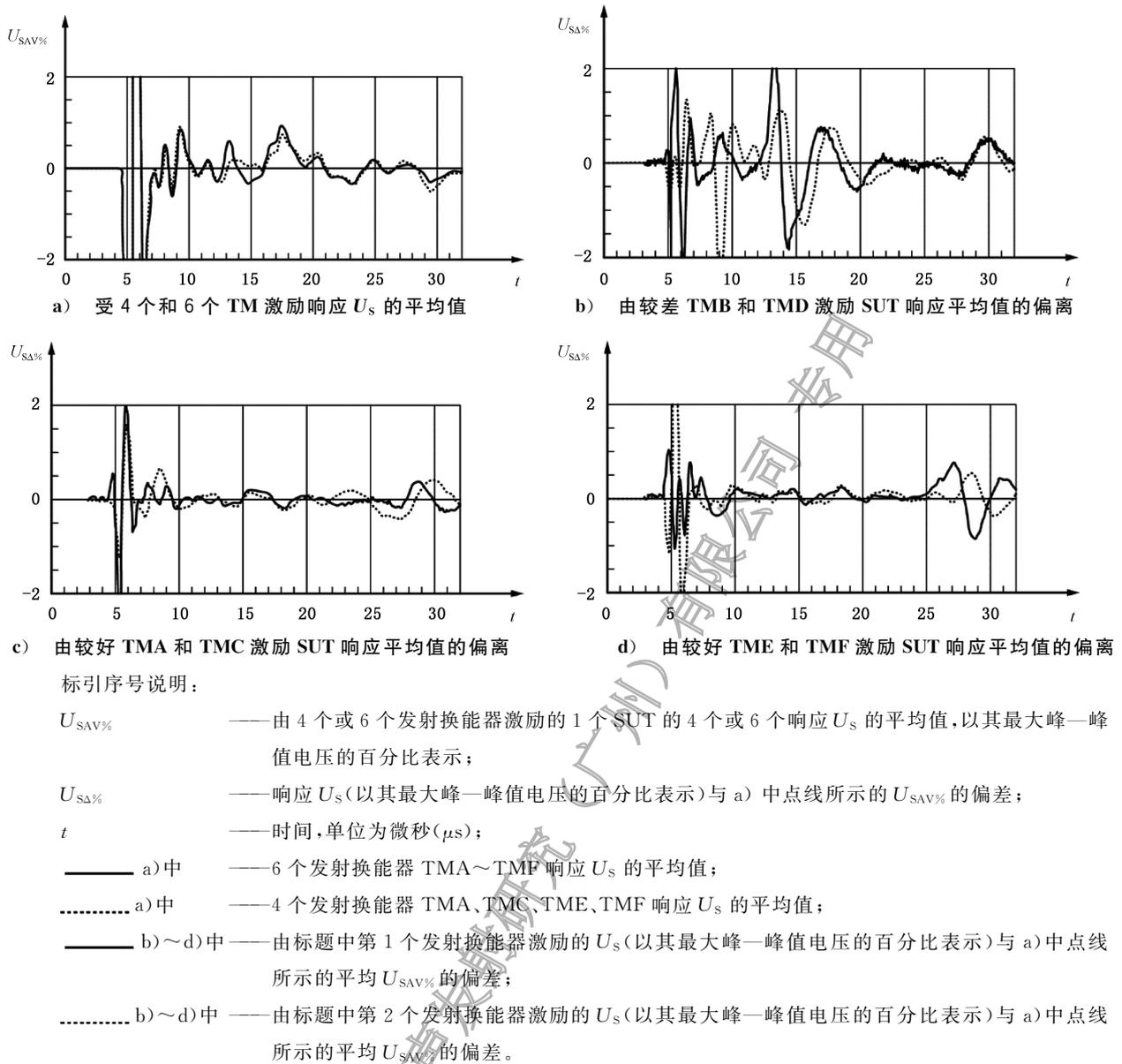


图 7 不同 TM 激励下 SUT01 响应平均值的偏差

图 7a) 的实线显示宽带传感器 (SUT01) 在 6 个发射换能器 TMA~TMF 激励下的 6 个响应的平均值。设置纵轴比例以指示发射换能器在混响阶段的不同特性，响应按其最大峰—峰值电压的百分比进行缩放。图 7a) 中 $8 \mu s \sim 17 \mu s$ 混响时间内的平均响应峰值电压约为主脉冲响应的 0.7% ，并在 $32 \mu s$ 时衰减到小于 0.1% 。

图 7 a) 中的点线显示宽带传感器由 4 个较好的发射换能器 TMA、TMC、TME 和 TMF 激励的 4 个响应 U_s 的平均值。图 7 b) 显示由较差的发射换能器 TMB (实线) 和 TMD (点线) 激励 SUT 的响应 U_s 与图 7 a) 中点线所示 SUT 的 4 个响应平均值的偏差。与图 7 b) 相似，图 7 c) 显示由较好的发射换能器 TMA (实线) 和 TMC (点线) 激励的情况，图 7 d) 为发射换能器 TME (实线) 和 TMF (点线) 激励的情况。图中 $7 \mu s$ 之后的数据才有意义。

图 7 b) 显示在 $7 \mu s \sim 15 \mu s$ 的峰值远超过 1% ，在 c) 和 d) 中不存在该现象。这些峰值使发射换能器 TMB 和 TMD 不适用于面对面装置，因其作为激励的结果频谱会被波纹覆盖，与其他较好的发射换

能器激励的结果频谱相差几个 dB。购买的 6 个 TM 中,2 个较差,4 个较好。

如果在激励脉冲后 $50\ \mu\text{s}\sim 100\ \mu\text{s}$ 内未见干扰,则发射换能器视为良好。

即使是较好的发射换能器,从 $24\ \mu\text{s}$ 开始也会出现高达 1% 的平均值偏差,这导致从相同 SUT 获得的频谱出现一些散射。当一个优化的发射换能器产品可用时,散射可能减少。

8.6 激光测振仪的校准

激光测振仪可在 $0.4\ \text{kHz}\sim 50\ \text{kHz}$ 的频率范围内按照 ISO 16063-41 进行校准。

根据参考文献 [7],此频率限制是由于缺乏频率足够高的激振器。

本文件不规定根据未涵盖用于声发射传感器验证的频率范围的标准进行校准。

当使用激光测振仪模型(见 B.5)或类似结构时,覆盖感兴趣的频率范围和优于所需精度由制造商保证,见 B.5 的说明。

8.7 发射灵敏度的漂移测试

根据 7.4 测定的传感器灵敏度谱的真实度取决于所用发射换能器发射灵敏度的真实度。本节旨在帮助用户验证发射灵敏度是否偏离根据 8.3 测定的灵敏度。

宜用 2 个宽带传感器作为检测漂移的传感器,2 个宽带传感器宜存放在安全的环境中,不用于其他目的。使用 1 个漂移检测传感器能发现漂移,但不区分它是由发射换能器还是待测传感器引起的。使用 2 个漂移检测传感器时,发射灵敏度的漂移将导致 2 个传感器均出现漂移;如果只有 1 个传感器检测到漂移,那么漂移是由该传感器引起的,不是由发射换能器引起的。

- a) 每次按 8.3 测定发射换能器的发射灵敏度时,2 个漂移检测传感器的速度灵敏度均宜按 7.4 测定,并指定“漂移参考”灵敏度 R_{VDR1} 和 R_{VDR2} 。
- b) 宜验证 R_{VDR1} 和 R_{VDR2} 两条曲线是否接近。
- c) 在一定时间内,如每 6 个月,或当对 TMA 发射灵敏度的有效性产生怀疑时,应按以下方法验证发射灵敏度的漂移。
 - 1) 宜根据 7.4 测定两个漂移检测传感器的速度灵敏度,并指定“漂移检测”灵敏度 R_{VDD1} 和 R_{VDD2} 。
 - 2) 宜计算差异频谱($R_{\text{VDD1}} - R_{\text{VDR1}}$)和($R_{\text{VDD2}} - R_{\text{VDR2}}$),分别指定为 $R_{\text{V}\Delta 1}$ 和 $R_{\text{V}\Delta 2}$ 。
 - 3) 在最佳情况下, $R_{\text{V}\Delta 1}$ 和 $R_{\text{V}\Delta 2}$ 都接近零;这表明自测定 R_{VDR1} 和 R_{VDR2} 以来没有发生漂移。
 - 4) 如果 $R_{\text{V}\Delta 1}$ 和 $R_{\text{V}\Delta 2}$ 都显示与零的偏差超过 0.5 dB,表明发生了超过 0.5 dB 的发射灵敏度漂移。
 - 5) 由用户决定是否根据 8.3 对发射灵敏度进行验证。

附录 A
(资料性)
模版示例

A.1 发射换能器清单模板

发射换能器清单的目的是通过列出以下信息来维护库存的每个发射换能器的资料：

- a) 唯一发射换能器标识符(A~Z)以及类型、制造商和序列号；
- b) 使用激光测振仪装置最近一次验证的日期；
- c) 测量并记录位移测量前后发射换能器表面环的温度；
- d) 任何相关注释,以便根据 7.4.9 将这些信息记录到验证报告中。

表 A.1 给出了发射换能器列表模板的示例。

表 A.1 发射换能器列表示例

序列号	类型	生产商	序列号	最近 1 次 验证日期	T_1 ℃	T_2 ℃	SP	d	备注
A	V104	MMM	1110155	2019-11-13	无	24.0	SA	否	21 和 69 个位置
B	V104	MMM	1113009	2020-01-08	24.5	25.0	SA	否	21 个位置,未使用
C	V104	MMM	1165649	2019-11-13	26.8	25.9	SA	否	21 和 69 个位置
D	V104	MMM	1162602	2020-01-08	24.0	24.5	SA	否	21 个位置,未使用
E	V104	MMM	1230433	2020-01-08	24.6	25.6	SA	否	21 个位置
F	V104	MMM	1230436	2020-01-08	25.9	25.0	SA	否	21 个位置
G									
H									
I									
J									
K									
标引符号说明： MMM —— 用生产商的名称替代； T_1 —— 第一次位移测量前发射换能器表面环的温度； T_2 —— 最近一次位移测量后发射换能器表面环的温度； SP —— 识别激光测振仪服务提供商的代码； d —— 是否需要直流阻断器：是或否，见 6.3h)。									

注：由于使用了主动防振台，表 A.1 中 A~F 行的 T_1 、 T_2 温度均高于室温。事实证明，使用防振台对此应用毫无益处。以后的测量在常温下进行，无需使用防振台。这避免了面对面装置中需要加热工具。

A.2 传感器类型列表模板

传感器类型列表的目的是通过列出以下信息来维护需要验证的每种类型传感器的资料：

- a) 唯一的 SUT 标识符(00~99),以及类型、制造商,可选的序列号(如果列表被用作 SUT 列表而不是 SUT 列表的类型);
 - b) 覆盖感应面的最大测量位置环(N_{RL})个数,见图 6;
 - c) 传感器内部放电电阻,见 6.6.2;
 - d) 任何相关注释,以便根据 7.4.9 将这些信息记录到验证报告中。
- 表 A.2 给出了传感器类型列表模板的示例。

表 A.2 传感器类型列表示例

序列号	类型	生产商	序列号(可选)	N_{RL}	R_{di} MΩ	备注
00	V104	MMM	—	5	无	
01	V103	MMM	—	3	无	
02	VS900	MMM	—	3	100	多谐振荡
03	VS150	MMM	—	3	100	150 kHz 谐振
04	VS30	MMM	—	3	100	低频
05	VS45	MMM	—	3	100	低频
06	VS600	MMM	—	2	无	小型
07						
08						
09						
10						

标引符号说明:

MMM ——用生产商名称替代;

N_{RL} ——覆盖感应面测量位置的最大环数(见图 6),用于选择正确的 T_D ;

R_{di} ——传感器内部放电电阻的电阻值,单位为兆欧(MΩ)。

注:“序列号”也能用来定义装置的某些条件。

附录 B

(资料性)

仪器示例

B.1 函数信号发生器示例

函数信号发生器型号 33220 或 33500, 制造商 Keysight¹⁾, 满足 6.2 的要求。

B.2 发射换能器示例

制造商 Olypums¹⁾生产的 V104 型号发射换能器, 原则上满足 6.3 的要求, 但某些样品运动分布的均匀性可能导致 SUT 的灵敏度谱与该 SUT 的参考频谱相比出现不可接受的偏差。通过选择该发射换能器产品的合适样品, 可部分解决该问题, 见 8.5。

为了更好地再现来自不同发射换能器样品的结果, 宜开发并提供一种专用的发射换能器样品。

B.3 瞬态记录仪示例

Picoscope USB 示波器型号可选 5242A¹⁾~5442B¹⁾。

B.4 镜面箱示例

来自 Velken Folientechnik 的“镀铬和镜面箱产品编号: 673010¹⁾”, 满足 6.3f) 的要求。

B.5 扫描激光测振仪示例

SmarAct Picoscale 测振计¹⁾, 配备 F03 传感器头, 包含迈克尔逊干涉仪¹⁾和 0.15 NA(数值孔径)物镜, 在 10 mm 工作距离的焦点处光斑半径为 7 μm 。

该产品使用波长为 1550 nm 的分布式反馈(DFB)激光器(红外, 用于在 MEMS 应用中穿透硅的能力), 其经过调制以获得 1 个正交信号来检测位移。两个正交分量都以 16 位和 40 MS/s 的速率数字化, 并通过运行在现场可编程门阵列上的先进算法进一步处理, 以 1pm 分辨率和 10 MS/s 速率输出目标位移。

DFB 激光器配备热电冷却器(TEC), 反馈回路控制激光芯片温度, 使波长持续保持在集成在仪器中的气体参考池的吸收线上。

由于激光源的频率稳定, 干涉测量的线性误差小于被测位移的 10^{-6} 。

与任何正交检测系统一样, 微小的调整公差可能会导致所谓的周期性误差。

对于本文件中描述的应用, 通过每个测量位置平均 10 000 条记录来消除周期性误差, 见 8.2g)。

1) 本信息是为了方便使用本文件的用户而提供的, 并不构成 ISO 对所述产品的认可。如果能证明产生相同结果则可使用相似的产品。

附录 C

(资料性)

压电声发射传感器的验证方法

C.1 总则

本文件提出的测定压电声发射传感器接收灵敏度谱的方法基于一种安装方式,即将待测传感器的表面通过一层薄耦合剂直接耦合到压电发射换能器的主动面。发射换能器通常选用超声传感器,通过超声传感器表面法线方向上的质点位移脉冲激励待测传感器。

C.2 早期参考

早在 1982 年,Roger Hill 就在参考文献[8]“3.3 面对面校准”中描述了面对面校准的主要原理。使用不同频率的正弦波激励发射换能器和传感器对,并在灵敏度图上引入了 $1 \text{ V}/\mu\text{bar}^2$ 作为 0 dB 灵敏度的参考值。

多数传感器制造商在产品最终测试中都采用了这一原则,并将其内部参考灵敏度谱调整为与竞争者相似。对于某些类型的传感器,多数制造商都提供类似的灵敏度图。

C.3 向用户提供面对面装置

2000 年年初,一些传感器制造商在其声发射系统中实现了用户通过面对面方法获得传感器灵敏度谱的可能性,这只需对发射换能器、函数信号发生器和软件进行少量投资。通过这种方法,用户能容易地确定传感器的响应好坏。

由于不同发射换能器在灵敏度曲线上会产生几个 dB 的散射,用户宜使用自己的发射换能器获得每个新传感器的灵敏度谱,以便以后对老化影响产生怀疑时进行比较。

结果证明,只要使用相同的发射换能器,并且没有老化影响改变发射换能器的特性,面对面方法将产生好的可重复性结果。

C.4 使用激光干涉仪将面对面结果参考到绝对运动单元

2016 年,K. Ono 在参考文献[9]中提出了通过面对面方法获得的灵敏度结果,参考了绝对单位 V/nm ,该结果基于激光干涉仪在不同发射换能器中心点的测量。此外,Ono 教授还发表了系列论文 [10]-[13],为面对面方法的发展做出了贡献。

在 WCAE 2017 世界声发射大会上,H. Vallen 介绍了一种装置,见参考文献[14],该装置采用正弦波扫描激励,并利用扫描激光测振仪在发射换能器主动面的矩形网格上 213 个点进行测量。结果表明,同一模型的不同发射换能器的运动分布模式不同,这是不同发射换能器获得的灵敏度谱存在分散的主要原因。

在欧洲声发射工作组 EWGAE 2018 会议上,H. Vallen 展示了参考文献[15]中的研究,采用特别设计的阶跃函数上升驱动高斯型电流脉冲激励发射换能器。这对于在阶跃函数上升期间测量质点速度是最优的,但指数衰减的测振仪响应被噪声掩盖,质点速度到质点位移的转换不够准确。

本文件所述面对面装置采用单周期余弦波作为激励脉冲,并配备激光测振仪,支持在发射换能器表

2) $1 \mu\text{bar}=0.1 \text{ Pa}$ 。

面 21 个位置直接测量质点位移。

C.5 有关灵敏度谱测定的现有 ISO 文件

目前有 3 个 ISO 标准涉及声发射传感器接收灵敏度谱的测定：

——ISO 12713:1998(传感器的初级校准),其内容与 ASTM E1106-86 基本一致。需注意的是,ASTM E1106 在 2012 年修订,2017 年确认,然后在 2021 年更新,但 ISO 12713:1998 自发布后从未修订;

——ISO 12714:1999(传感器二次校准),其内容与 ASTM E1781-98 基本一致。E1781 在 2013 年修订,但 ISO 12714:1999 发布后从未修订;

ISO 12714 和 ASTM E1781 都要求使用依据 ISO 12713 或 ASTM E1106 校准的标准传感器。美国国家标准与技术研究所(NIST, USA)作为唯一的校准服务的中立供应商,拥有 ASTM E1106 标准的原型,自从该研究所停止向外部客户提供声发射校准服务,就无法向其他有兴趣为传感器提供校准服务的组织提供此类标准传感器。因此,ISO 12714 的修订工作虽于 2016 年启动,但在 2017 年就被取消。

——ISO /TR 13115:2011(传感器的绝对互异校准)是一份信息量丰富的技术报告。若要成为一个规范性文件,应被转化为 ISO/TS。然而 ISO/TR 13115 存在争议,具体讨论见参考文献 [10]。

上述 3 个文件都需要使用 1 个重量大、移动困难的试块,这对大多数声发射系统的用户来说不易实现,需要 1 个简单而实用的替代方案。

许多声发射测试标准都规定了所使用声发射传感器的灵敏度要求,声发射传感器制造商和声发射服务提供商应确保所销售和使用的传感器满足这些要求。

这迫切需要制定一个既切实可行又广受认可的传感器验证标准。该标准基于易于使用、适合从业人员、具有成本效益的装置,并能在任何地方、由任何人操作时均能提供足够准确且可重复的结果。

本文件旨在解决上述问题,这对声发射测试系统的所有用户有益,可以让用户方便快速地验证声发射传感器清单中任何传感器的灵敏度。

C.6 初级传感器校准的 4 个基本问题

注:问题 1~3 在参考文献[19]的第 2 章的第 4 部分“传感器校准”中有更详细的描述。

C.6.1 问题 1

试块表面上一点的位移是 1 个三维矢量,而换能器的输出是 1 个标量。

据参考文献[19]在第 2 章第 4 部分“换能器校准”中所述:“…通常假定换能器只对法向位移敏感。当然,如果换能器对切向位移敏感,就会引入误差。”

由于瑞利波在传感器表面传播,如果传感器对切向位移敏感,则切向运动分量会出现在传感器表面导致误差产生。

相反,在采用脉冲刺激的面对面装置中,会产生 $1 \mu\text{s}$ 的主导平面波脉冲,随后产生幅度减小约 40 dB 的径向运动,两者都具有良好的可重复性。

C.6.2 问题 2

传感器的存在会改变测试对象的位移。

根据参考文献[19]第 2 章第 4 节“传感器校准”所述:“…源阻抗和负载阻抗之间的相互作用决定了

传感器表面的位移,但这两个阻抗可能是频率的复函数,没有技术可以测量。为了校准,通常这个问题的解决方案是将传感器的输入定义为未连接传感器的试块的空载(自由)位移”。

此外,参考文献[5]的 5.4 指出:“由于声发射传感器用于监测结构自由表面的运动,传感器与结构之间的相互作用通常忽略不计,故自由表面运动是适当的输入变量。因此,校准单位宜采用每单位自由运动的电压,例如, V/m”。

试块上的自由位移是用非接触式传感器测量的。因传感器负载导致的位移变化量尚无法确定,故仅当使用几何形状、声源及待测传感器位置相同,且声阻抗一致的试块时,校准结果才具有可重复性。

C.6.3 问题 3

根据参考文献[19]第 55 页所述:“换能器的表面覆盖了试块表面的一个区域,致使位移不仅是时间的函数,也是该区域内位置的函数。”这描述了孔径效应的影响,它取决于感应面的大小,也取决于试块中的波长。

C.6.4 问题 4

使用声传播试块时,从瑞利波通过直达波路径到达反射波到达的时间窗非常有限。

参考文献[5]的 8.3.1 规定:“由于数据在有限的时间间隔(102.4 μs)内获取,在此间隔后来自传感器的任何信号都被忽略,这将引入预期误差。对于振荡时间较短的发射换能器,这个误差可以忽略不计;但在一定程度上,在间隔结束时有任何正在进行的振荡,就会引起显著的误差。”

参考文献[5]的图 9 和图 10 显示,从第一次到达后的 25 μs ~102.4 μs 期间,只有 77 μs 的时间段可用于频谱计算。

C.7 面对面装置的优势

面对面装置的主要优势在于其经济性,不仅使用了低成本的仪器和避免了沉重的试块,而且验证过程更为简便快捷。一种更简单的面对面方法已被传感器制造商使用多年,验证了大量声发射传感器。

关于 C.6.1~C.6.4 中提到的问题,部分也是面对面装置的问题。

问题 1(见 C.6.1,横向/切向运动灵敏度的误差)在面对面装置中影响较小,因为在主脉冲期间,发射换能器产生沿其表面法线方向的质点位移脉冲运动,但在主脉冲运动之后,会出现一个延迟、低频且幅度比主脉冲低约 40 dB 的径向运动,可能导致误差。

问题 2(见 C.6.2,由于传感器负载而引起的位移变化)以类似的方式涉及面对面装置。最近关于发射换能器负载效应的研究(见参考文献[20],第 34 页)得出结论,“阻尼宽带超声换能器基本上不受负载效应的影响”,这个问题不会发生在面对面的装置中。

问题 3(见 C.6.3,孔径效应)在面对面装置中不存在,因为除幅度比主脉冲幅度低约 40 dB 的可重复径向运动外,并无波通过传感器表面。

问题 4(见 C.6.4,时间窗口限制)由于没有使用试块,在面对面装置中不重要。然而,当使用不同的发射换能器对同一待测传感器进行激励时,将主脉冲后的最大 FFT 窗口宜设定为 100 μs ,以减少灵敏度谱的散射。

面对面装置使用均匀的脉冲运动分布穿过待测传感器的感应面,其覆盖范围自中心延伸至约 12 mm 的中心距离。除了声阻抗对灵敏度谱的影响外,试块的几何形状对灵敏度谱没有影响。

关于声阻抗影响的更多信息见附录 F。

即使在对待测传感器和发射换能器进行拆卸和重新安装后,由激励脉冲运动所得的面对面测试结果仍具有良好的可重复性。

对于广大声发射检测人员而言,测试结果易于理解,也便于与不同制造商的产品进行比较。

C.8 面对面装置的劣势

由于面对面装置结果不受抵消效应的影响,例如,当频率高于孔径效应开始的频率时,纵波从 90° 以外的方向到达,或当波通过传感器表面时,面对面装置和试块装置的灵敏度谱不同。这种差异随着传感直径与波长之比的增大而增大,直到达到最大值,然后再次减小。

此外,在脉冲之后的混响阶段,商用发射换能器单元的不同特性仍未得到满意的解决。

根据目前的发射换能器制造技术,宜选择性能良好的发射换能器单元,见 8.5。

清诚声发射研究(广州)有限公司 专用

附录 D

(资料性)

关于接收灵敏度测定的附加信息

D.1 时域信号处理

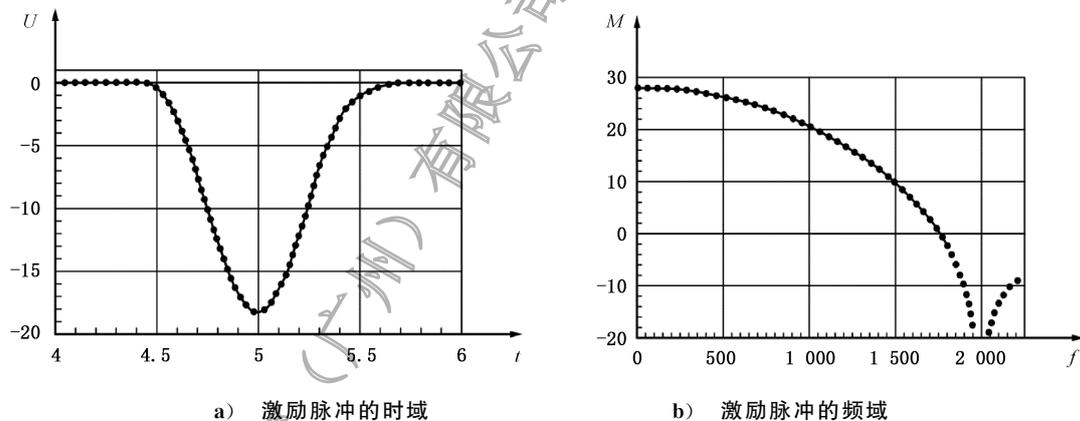
D.1.1 激励脉冲

连接到发射换能器的函数信号发生器的激励信号在发射换能器的感应面上产生质点运动,激励信号可以是变化频率的连续正弦波(扫描或步进),也可以是脉冲。当使用包含超过 2 MHz 的能量密集的矩形脉冲时,特别是当测量系统中包含有限带宽的前置放大器时,就会遇到伪信号现象。

推荐使用 1 MHz 的单周期正弦波,起始相位为 90° 。在静止状态下,函数信号发生器输出 +10 V。触发器激活后,将产生一个从 90° (正峰值)经 270° (负峰值)至 450° (次正峰值)的 360° 正弦波周期。通过这种方式,相比正弦波周期从 0° 开始,函数信号发生器能驱动两倍的发射换能器电流(对应于两倍的位移)。

脉冲随时间的变化见图 D.1a)。当脉冲反转为正向时,该波形亦被称作“余弦波”或“余弦钟”。

在图 D.1 中 a) 由于直流偏移补偿,负向脉冲从 0 V 开始。



标引符号说明:

U —— 在发射换能器 TMA 处的信号电压,单位为伏特(V);

t —— 时间,单位为微秒(μs);

M —— a) 中信号 FFT 的幅度,单位为分贝(dB),其中 0 dB 定义为峰值 1 mV 的连续正弦波;

f —— 频率,单位为千赫兹(kHz);

— · — · — 采样间隔为 8 ns 的信号采集;

● ● ● ● ● 降采样间隔为 25 ns 的信号采集。

图 D.1 面对面装置激励脉冲的时频域

点线和实线的含义见 D.1.3。

D.1.2 直流偏移补偿

使用瞬态记录仪时,即使在交流输入模式下,也能遇到相对较高的直流偏移量,最高达测量范围的

1%。为解决此问题,采用直流偏移补偿,对前 $4.8\ \mu\text{s}$ (600 个采样点 $\times 8\ \text{ns}$) 的预触发数据取平均值,并从获取数据的所有采样点中减去此偏移量。

D.1.3 8 ns 时间序列数据降采样至采样间隔 25 ns

所获得的灵敏度谱的频率分辨率与在 $819.2\ \mu\text{s}$ 时间段内以 $5\ \text{MS/s}$ 、 $10\ \text{MS/s}$ 、 $20\ \text{MS/s}$ 或 $40\ \text{MS/s}$ 的速率采样的数据的 FFT 所获得的频率分辨率相同。

由于所选的瞬态记录仪模型(见 6.9)仅支持 $1\ \text{GHz}/2\text{N}$ 的采样率,因此使用 $125\ \text{MHz}$ 的采样速率 ($8\ \text{ns}$ 采样间隔),然后进行降采样过程,该过程提供 $25\ \text{ns}$ 间隔的数据流,对应于 $40\ \text{MHz}$ 的采样速率。降采样过程首先利用线性插值法将原始 $8\ \text{ns}$ 间隔细分为连续的 $1\ \text{ns}$ 间隔,然后对每 25 个连续的 $1\ \text{ns}$ 间隔进行平均,以得到 $25\ \text{ns}$ 间隔的数据点。

图 D.1a)为脉冲时域图,图 D.1b)为脉冲频域图。实线表示被测信号,粗点表示降采样信号。图 D.1 表明,降采样过程没有增加任何显著的偏差。

D.2 快速傅里叶变换相关的影响

D.2.1 面对面装置和激光测振仪装置的 FFT 参数选择

在本文件中,传感器响应的采样率为 $40\ \text{MS/s}$,位移信号的采样率为 $10\ \text{MS/s}$ 。为了获得足够高的频率分辨率,对 $40\ \text{MS/s}$ 采样的数据选择了 $32\ 768$ 个采样点长的零扩展 FFT 缓冲区,其时间长度为 $819.2\ \mu\text{s}$ 。频率分辨率是缓冲时间的倒数值,即 $12\ 207\ \text{kHz}$ 。对于 $10\ \text{MS/s}$ 采样速率下,FFT 缓冲区长度设定为 $8\ 192$ 个采样点,同样对应 $819.2\ \mu\text{s}$ 的时间长度,确保了相同的 $12\ 207\ \text{kHz}$ 的频率分辨率。

D.2.2 FFT 结果的缩放

D.2.2 为图 D.1 中主脉冲和图 D.2 中连续正弦波的 FFT 幅值和时域幅度之间的关系,D.2.3 为模拟正弦波突发信号的情况。

FFT 将时域信号转换为具有特定频率分辨率的频域信号。FFT 结果的“幅度”反映了输入信号随频率的功率分布。

图 D.1b)显示了图 D.1a)信号的 FFT 结果。如果脉冲填满整个 FFT 输入缓冲区,脉冲信号峰值达到 $18\ \text{V}$,其对应的 FFT 幅度为 $85\ \text{dB}$ ($0\ \text{dB}$ 定义为 $1\ \text{mV}$)。由于该脉冲在总长为 $819.2\ \mu\text{s}$ 的 FFT 输入缓冲区中仅占了约 $1.15\ \mu\text{s}$,因此显示的 FFT 最大幅度仅为 $28\ \text{dB}$,见图 D.1b)。该幅度在 $1\ \text{MHz}$ 时衰减 $8\ \text{dB}$,在 $1.6\ \text{MHz}$ 时衰减 $20\ \text{dB}$,在 $1.8\ \text{MHz}$ 时衰减 $32\ \text{dB}$,在 $2\ \text{MHz}$ 时衰减约 $80\ \text{dB}$ (不可见)。基于此衰减特性,本文件仅关注 $1.8\ \text{MHz}$ 以下的频谱,且认为 $1.6\ \text{MHz}$ 以下的频谱宜被认为是“准确的”。

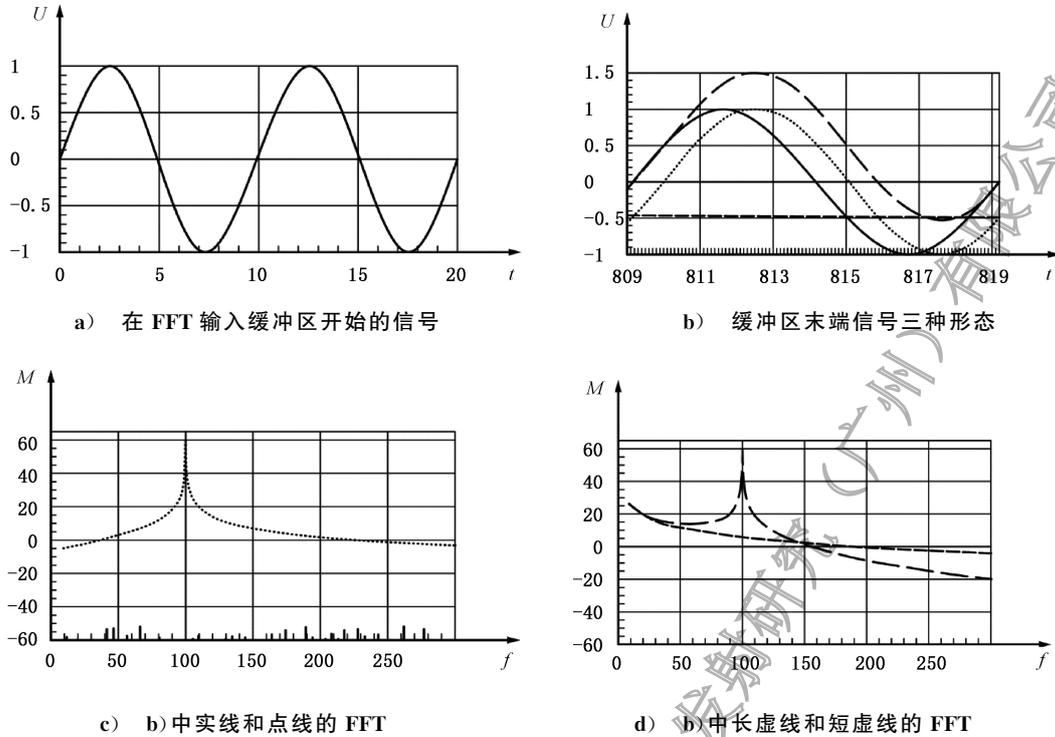
图 D.2a)显示了 $8\ 192$ 个采样点长的 FFT 输入缓冲区中连续正弦波的前 200 个采样点,以 $0.1\ \mu\text{s}$ 的间隔进行采样。图 D.2b)显示了 FFT 输入缓冲区末端信号的三种形态。信号峰值幅度为 $1\ \text{V}$,图 D.2b) 中实线的频率为 $100.1\ \text{kHz}$,点线和长虚线的频率为 $100.0\ \text{kHz}$ 。实线和长虚线在 $819.2\ \mu\text{s}$ 时归零,即 FFT 输入缓冲区中最后一个采样点后的一个采样点。FFT 算法假设输入缓冲区代表一个无限重复的信号,时间范围从 $0\ \mu\text{s}\sim 819.1\ \mu\text{s}$,其中最后一个采样点在 $819.1\ \mu\text{s}$ 处,后面是第一个采样点在 $0\ \mu\text{s}$ 。对于 FFT,图 D.2a)和 b)中的实线是 $100.1\ \text{kHz}$ 的连续无阶跃正弦波。相反,点线显示从在 $819.1\ \mu\text{s}$ 时的 $-0.6\ \text{V}$ 到 $0\ \mu\text{s}$ 时的 $0\ \text{V}$ 的阶跃变化。

图 D.2c)中的实线显示了图 D.2b)中(无阶跃)实线的频谱。除了在 $100\ \text{kHz}$ 时的幅度为 $60\ \text{dB}$ (在时域上对应峰值为 $1\ \text{V}$)外,所有的幅度都低于 $-50\ \text{dB}$ 。

图 D.2c)中的点线是图 D.2b)中点线的 FFT 结果,显示了时域点线的阶跃对 FFT 结果的显著影

响,与图 D.2c)中的实线相比,点线显示了所示频率范围内所有频率的幅度均保持在 -20 dB 以上,这是时域的阶跃引起的。

图 D.2b)和图 D.2d)中短虚线的含义解释见 D.2.5。



标引序号说明:

- U —— 信号电压,单位为伏特(V);
- t —— 时间,单位为微秒(μs);
- M —— FFT 的幅度,单位为分贝(dB),0 dB 定义为峰值 1 mV 的连续正弦波;
- f —— 频率,单位为千赫兹(kHz);
- 100.098 kHz 正弦波的时域和 FFT,缓冲区末端为零($819.2 \mu\text{s}$);
- —— 100.0 kHz 正弦波的时域和 FFT,在缓冲区末端达到 -0.5 V,引起阶跃;
- 从 0 到缓冲区末端虚线电压的线性斜坡的时域和 FFT;
- 100 kHz 正弦波减去线性斜坡的时域和 FFT,在缓冲区末端达到 0 V。

图 D.2 连续正弦波的时频域

D.2.3 FFT 的时域用窗

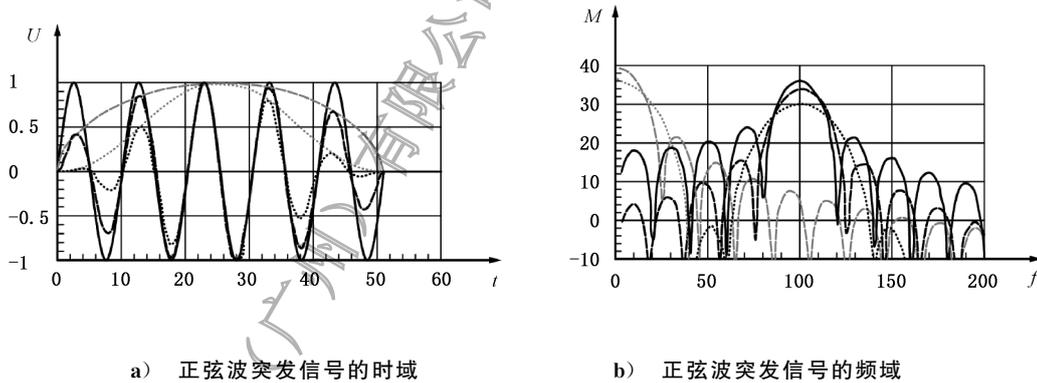
图 D.3a)中的实线表示在 $819.2 \mu\text{s}$ 长的零填充 FFT 输入缓冲区的开始处,一个由 5 个周期组成的正弦波突发信号,其峰值振幅为 1 V,频率为 100 kHz。图 D.3b)给出了图 D.3a)中相同线条下的 FFT 结果。与图 D.2c)相比,实线在 100 kHz 处的 FFT 幅值低于 60 dB,这是因为信号只占据了 $819.2 \mu\text{s}$ 长缓冲区中的 $50 \mu\text{s}$,即占总长度的 6.1%,相当于 -24.3 dB 的衰减,即原本 60 dB 幅度被降低至 35.7 dB,见图 D.3b)中的最大幅值。

由于 FFT 算法假设 $819.2 \mu\text{s}$ 的长输入缓冲区无限重复,其中只有 $0 \mu\text{s} \sim 50 \mu\text{s}$ 区间内信号非零,如图 D.3a)所示。图 D.3b)中实线显示了 100 kHz 以下和以上出现的强旁瓣,最大值和最小值相隔约 25 kHz,这些旁瓣源于正弦波在 $0 \mu\text{s}$ 处的突然开始和在 $50 \mu\text{s}$ 处的突然结束。为减弱旁瓣效应,可通

过将时间域信号乘以窗函数,以实现信号开始与结束的平滑过渡。图 D.3a)中的灰色点线根据公式(D.1)得到一个 50 μs 长的所谓汉宁窗函数。图 D.3a)中的黑色点线是实线与灰色虚线相乘得到的。

由于图 D.3a)中黑色点线的平均电压仅为实线的 50%,所以图 D.3b)中点线在 100 kHz 处的 FFT 幅值比实线低 6 dB。

图 D.3 b)中的黑色点线只存在两个-2 dB 的旁瓣峰值,分别位于 52 kHz 和 148 kHz 处,证明了在时域中应用窗函数能有效衰减旁瓣信号。



标引序号说明:

- U —— 信号电压,单位为伏特(V);
- t —— 时间,单位为微秒(μs);
- M —— FFT 的幅度,单位为分贝(dB),0 dB 定义为峰值 1 mV 的连续正弦波;
- f —— 频率,单位为千赫兹(kHz);
- 在时长为 819.2 μs 零填充 FFT 缓存区的突发信号,具有 5 个周期,频率 100 kHz,持续时间 50 μs;
- —— 使用汉宁窗函数;
- 使用 Han2SQ 窗函数;
- —— 汉宁窗函数;
- Han2SQ 窗函数。

图 D.3 正弦波突发信号的时频域

第二个窗函数,这里称为 Han2SQ,以类似于点线的黑色和灰色虚线表示。该窗口函数在 100 kHz 处信号衰减较小,但旁瓣衰减也较小。

本文件推荐将 Han2SQ 窗函数用于所有要变换到频域的时域信号的混响相位,见公式(D.1)和公式(D.2)。

汉宁窗函数的公式如公式(D.1)所示。

$$U_H[N] = 0.5 \times \left[1 + \cos\left(2 \times \pi \times \frac{N}{M-1}\right) \right] \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

- U_H —— 范围 0~1 的汉宁窗函数;
- N —— 采样数:从 $-M/2 \sim (M-1)/2$ 为信号加窗的开始和结束,见图 D.3;从 $0 \sim M-1$,用于只对信号的末端加窗,例如混响;
- M —— 采样的窗口长度,为偶数,例如,在 $N = (0 \sim 1\ 999)$ 的窗口长度为 2000。

Han2SQ 窗函数的公式如公式(D.2)所示。

$$U_{H2SQ}[N] = \text{sqrt}[\text{sqrt}(U_H[N])] \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

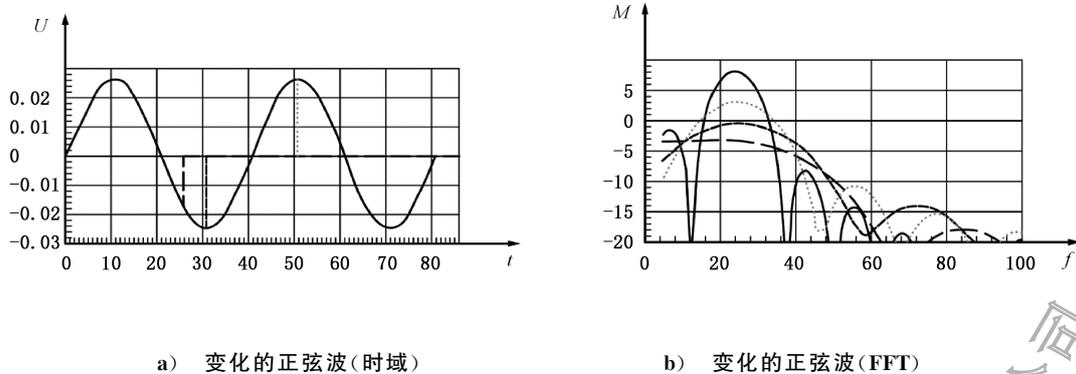
U_{H2SQ} ——范围 0~1 的 Han2SQ 窗函数；

$\text{sqr}(x)$ ——为 x 的方根, x 的范围是 0~1。

D.2.4 低频端的频率辨别能力

本节指出 FFT 结果中,幅值与频率信息的分辨精度随时域内频率持续时间而变化。以 FFT 结果频率轴上的点间距,即频率分辨率,由采样频率与采样点数的比值确定。

本文件中,SUT 信号(U_s)的采样频率为 40 MHz,缓冲区长度为 32 768,由此计算出的频率分辨率为 1.220 7 kHz。此频率分辨率不能反映区分某一频率与其他频率的能力。



标引序号说明：

U ——信号电压,单位为伏特(V)；

t ——时间,单位为微秒(μs)；

M ——FFT 的幅度,单位为分贝(dB),0 dB 定义为峰值 1 mV 的连续正弦波；

f ——频率,单位为千赫兹(kHz)；

——从 1 μs ~81 μs 的 25 kHz 正弦波；

.....从 1 μs ~51 μs 的 25 kHz 正弦波；

-----从 1 μs ~31 μs 的 25 kHz 正弦波；

- - - -从 1 μs ~26 μs 的 25 kHz 正弦波。

图 D.4 频率辨别能力与正弦波持续时间的关系

图 D.4a)显示了标引说明中列出的四种持续时间的 25 kHz 正弦波。图 D.4b)显示了这四种持续时间正弦波对应的 FFT 结果。当正弦波持续 80 μs 时,FFT 在 25kHz 处呈现出一个清晰可辨的最大幅度峰值(如实线所示)。

正弦波在时域的持续时间越短,FFT 幅值的最大值越低且越趋于平坦。当正弦波的持续时间为 25 μs 时[如图 D.4a)的长虚线所示,信号在 26 μs 处迅速返回至 0 V],FFT 中的长虚线只表明存在低频分量,但无法清晰辨识出幅值的最大值。

短虚线表示的正弦波持续时间为 30 μs (即 25 kHz 下 40 μs 周期的 75%),这是从频域幅值最大值中识别出该频率所需的最短时域持续时间。

对于获取 25 kHz 以下频率的可靠信息,宜使用至少 50 μs 长的时间窗口(相当于 1.25 个 25 kHz 周期)。

D.2.5 避免时域阶跃影响的考虑

当 FFT 输入缓冲区的首尾采样值不同时,会产生“杂散频率”现象。

早期的传感器校准标准(参考文献[5]的 7.5.2)根据参考文献[18]推荐了 1 种简便的解决方法:宜在时域内构造一个线性斜坡,该斜坡从首个采样时间与值延伸至 FFT 转换的最后 1 个采样时间与值。通过从待转换信号减去此斜坡,可消除阶跃现象,见图 D.2b)和 d)。

图 D.2b)中,长虚线表示的正弦波(终端电压为 0 V)是通过从点线表示的信号减去线性斜坡得到的,斜坡的终点以短虚线标示,与点线的最后 1 个采样值相等。

点线中从 $-0.5\text{ V}\sim 0\text{ V}$ 的阶跃在长虚线中由于减去斜坡而消除。图 D.2d)为时间 $0\text{ }\mu\text{s}\sim 819.2\text{ }\mu\text{s}$ 的长虚线和短虚线的 FFT 结果。即使时域中长虚线已消除阶跃,但频域中的长虚线并未贴近图 D.2c)中的实线。

在此示例中,斜坡的应用并未修正结果,而导致低频幅度偏差的增大,在 50 kHz 偏差超过 10 dB ,在 20 kHz 偏差超过 20 dB 。

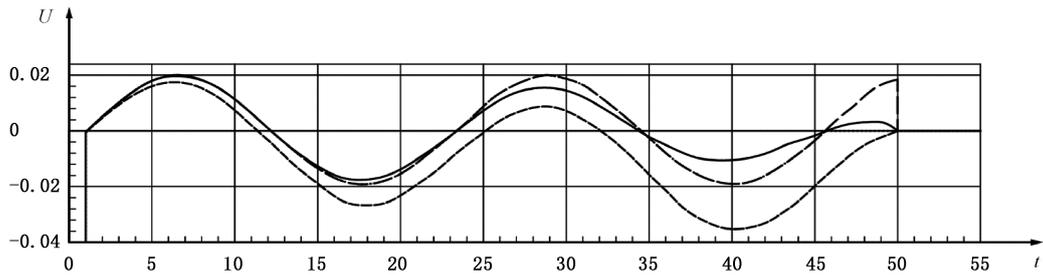
图 D.5 给出了更接近面对面装置中出现信号形状的示例。如图 D.5a)所示,所有信号均自 $0\text{ }\mu\text{s}$ 处以 0 V 起始,于 $0\text{ }\mu\text{s}\sim 1\text{ }\mu\text{s}$ 呈现为 1 MHz 的负向余弦波形(峰值达 -2 V),随后模拟混响过程,包含 $1\text{ }\mu\text{s}\sim 50\text{ }\mu\text{s}$ 频率为 44.4 kHz 的 2.2 个正弦波周期(以长虚线标示,并以 $50\text{ }\mu\text{s}$ 处的负向阶跃结束)。

接近面对面设置中的真实混响,模拟混响的幅度是初始脉冲幅度的 2%。图 D.5a)的纵轴经过缩放以直观显示模拟混响,从 2 V 峰值初始脉冲开始,可观察到在 $1\text{ }\mu\text{s}$ 内脉冲从起始点迅速降至 0 V 。图 D.5a)中的长虚线在 $50\text{ }\mu\text{s}$ 处以 $0.02\text{ V}\sim 0\text{ V}$ 的阶跃结束。点线与在 $0\text{ }\mu\text{s}\sim 46\text{ }\mu\text{s}$ 区间内与长虚线重合,然后保持在 0 V 。短虚线则与长虚线相对应,通过减去 1 条假想的(图中未显示)连接 $1\text{ }\mu\text{s}$ 处 0 V 与 $50\text{ }\mu\text{s}$ 处 0.02 V 的斜坡,从而消除 $50\text{ }\mu\text{s}$ 处长虚线所呈现的阶跃变化。实线显示对长虚线应用 $50\text{ }\mu\text{s}$ 长 Han2SQ 窗函数后的结果,该函数在 $0\text{ }\mu\text{s}$ 处的起始值为 1.0。

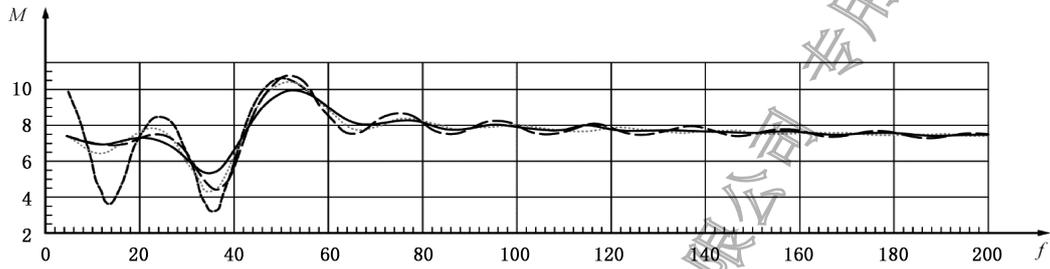
图 D.5b)显示了图 D.5a)中信号的 FFT 结果,包括初始脉冲,用相同的线条样式表示。图 D.5c)是对图 D.5b)的幅度进行放大。图 D.5a)中的虚线是最干净的频谱线,因其在 $46\text{ }\mu\text{s}$ 时于 0 V 处平滑结束,没有阶跃。然而,最干净的频谱在 40 kHz 以下和 60 kHz 以上由实线显示,这是使用 Han2SQ 窗的结果。

总体而言,对于面对面装置中随时间衰减的信号,采用 Han2SQ 窗函数处理相较于通过斜坡来修正阶跃更合适。

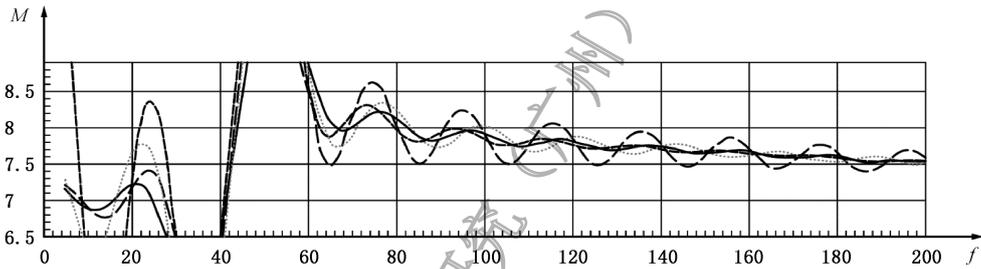
Han2SQ 窗不会引入可见的杂散频率,正如低频下的时域信号减去线性斜坡时一样。



a) 时域中主脉冲后的模拟混响



b) 频域中主脉冲后的模拟混响



c) b)幅度的放大

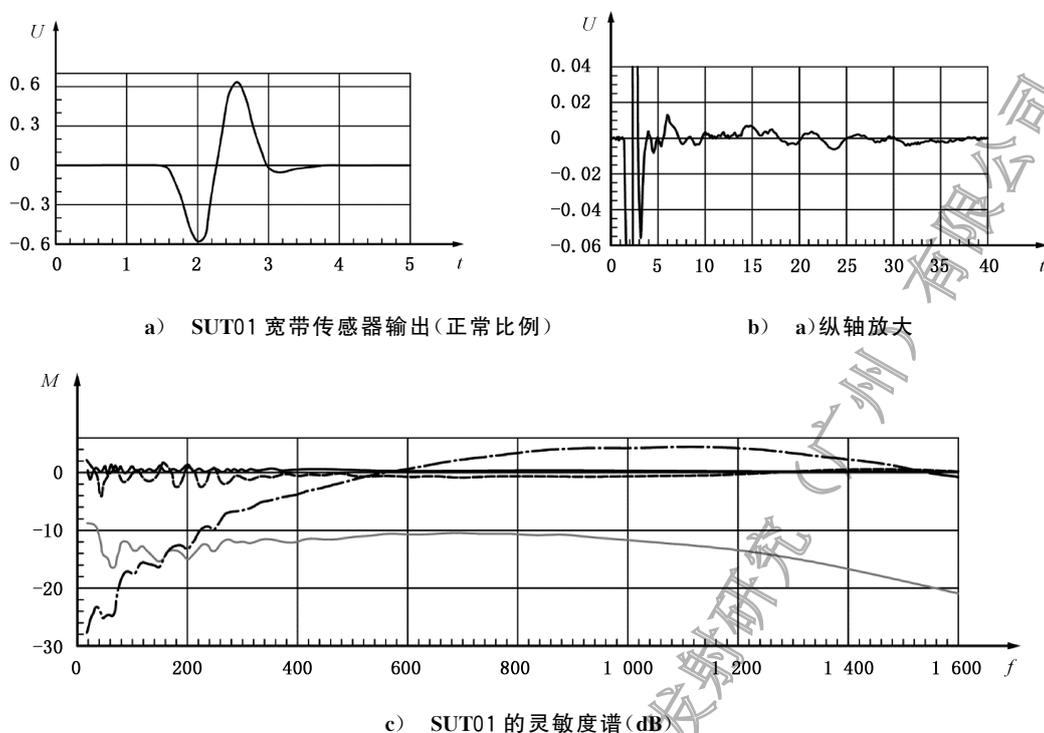
标引序号说明:

- U —— 信号电压,单位为伏特(V);
- t —— 时间,单位为微秒(μs);
- M —— FFT的幅度,单位为分贝(dB),0 dB定义为峰值1 mV的连续正弦波;
- f —— 频率,单位为千赫兹(kHz);
- 44.4 kHz正弦波,从 $1\ \mu\text{s} \sim 50\ \mu\text{s}$,结束于 $19\ \text{mV} \sim 0\ \text{mV}$ 的阶跃,见a);
- —— 44.4 kHz正弦波,从 $1\ \mu\text{s} \sim 46\ \mu\text{s}$,结束于两个整周期后的0 V,见a);
- 如长虚线所示,减去一个线性斜坡,以消除 $50\ \mu\text{s}$ 时的阶跃,见a);
- 如实线所示,使用Han2SQ窗函数消除 $50\ \mu\text{s}$ 时的阶跃,见a)。

图 D.5 主脉冲后的模拟低频低幅度混响

D.3 不同类型传感器的响应和灵敏度示例

D.3.1 SUT01 的响应和灵敏度(宽带)



标引说明:

U —— 信号电压,单位为伏特(V);

t —— 时间,单位为微秒(μs);

M —— FFT 的幅度,单位为分贝(dB);

f —— 频率,单位为千赫兹(kHz);

—— c)中 —— 位移灵敏度 R_D ,单位为分贝(dB),0 dB 定义为 1 V/nm ,应用窗口 W7($50 \mu\text{s}$);

..... c)中 —— 速度灵敏度 R_V ,单位为分贝(dB),0 dB 定义为 $1 \text{ V} \cdot \text{s/mm}$,应用窗口 W7($50 \mu\text{s}$);

—— c)中 —— SUT 被 TMA 而非 TMC 激励时 R_D 的差异,应用窗口 W7($50 \mu\text{s}$);

—— c)中 —— 应用 W8 窗口($100 \mu\text{s}$)而非 W7 窗口($50 \mu\text{s}$) R_D 的差异。

注:发射换能器为 TMC,宽带 SUT 为 SUT01-64。

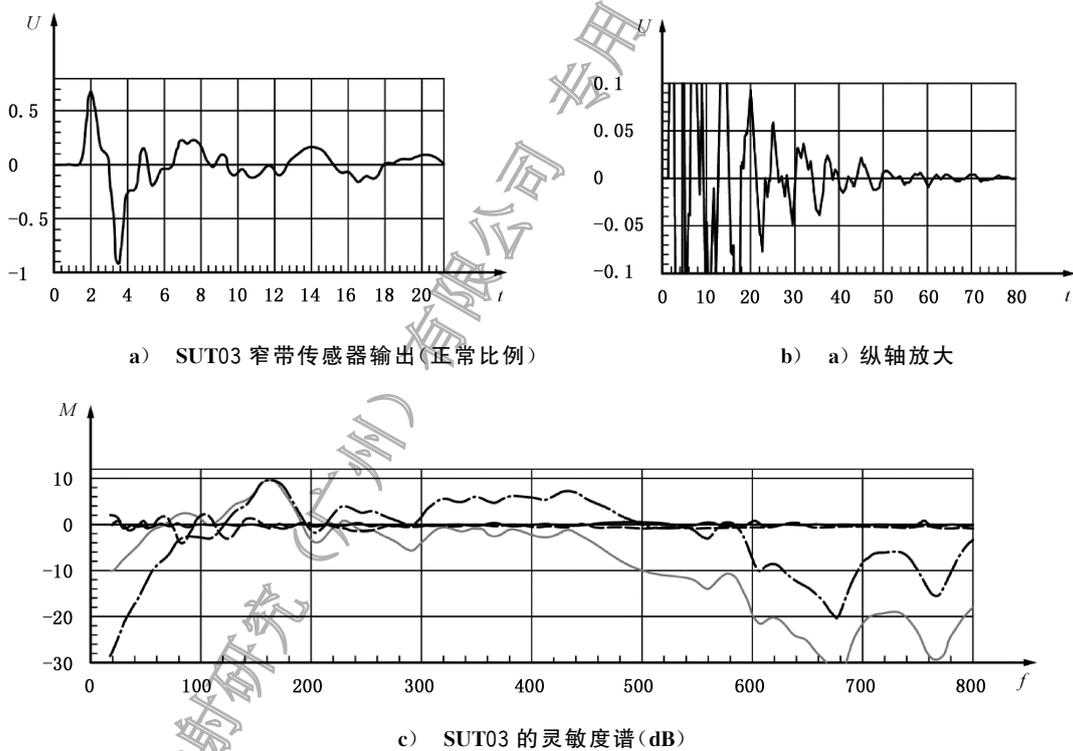
图 D.6 宽带传感器 SUT01 的响应和灵敏度谱

图 D.6 显示了宽带传感器在时域和频域中的响应特性。图 D.6a)中的响应平滑而短暂,最大幅度约为 1.2 V 峰—峰值。图 D.6b)以放大的幅度比例显示了约占主脉冲幅度 2% 的低幅度混响。尽管混响的幅度很低,但对灵敏度谱[图 D.6c)中 300 kHz 以下的波形]的影响是显著的。

测试使用的窗函数是 Han2SQ,见公式(D.2),长度为 $50 \mu\text{s}$ 。在图 D.6c)中,如果长度为 $50 \mu\text{s}$ 的窗口延长到 $100 \mu\text{s}$,接近 0 dB 的实线表示由此产生的灵敏度谱的差异。此结果表明,更长的时间窗并未增加有用的谱信息,反而引入更多噪声,并可能受发射换能器混响特性的影响。当受到不同发射换能器的激励时,混响特性可能导致待测传感器的灵敏度谱发生散射。

接近 0 dB 的虚线表示由发射换能器 TMA 而不是 TMC 激励 SUT 获得的灵敏度谱的差异。

D.3.2 SUT03 (150 kHz 窄带) 的响应和灵敏度



标引序号说明:

U —— 信号电压, 单位为伏特 (V);

t —— 时间, 单位为微秒 (μs);

M —— FFT 的幅度, 单位为分贝 (dB);

f —— 频率, 单位为千赫兹 (kHz);

—— c) 中 —— 位移灵敏度 R_D , 单位为分贝 (dB), 0 dB 定义为 1 V/nm , 应用窗口 $W7(50 \mu\text{s})$;

..... c) 中 —— 速度灵敏度 R_V , 单位为分贝 (dB), 0 dB 定义为 $1 \text{ V} \cdot \text{s/mm}$, 应用窗口 $W7(50 \mu\text{s})$;

—— c) 中 —— SUT 被 TMA 而非 TMC 激励时 R_D 的差异, 应用窗口 $W7(50 \mu\text{s})$;

—— c) 中 —— 应用 $W8$ 窗口 ($100 \mu\text{s}$) 而非 $W7$ 窗口 ($50 \mu\text{s}$) R_D 的差异。

注: 发射换能器为 TMC, SUT 为 150 kHz 窄带 SUT03-637。

图 D.7 窄带 (150 kHz) 传感器 SUT03 的响应和灵敏度谱

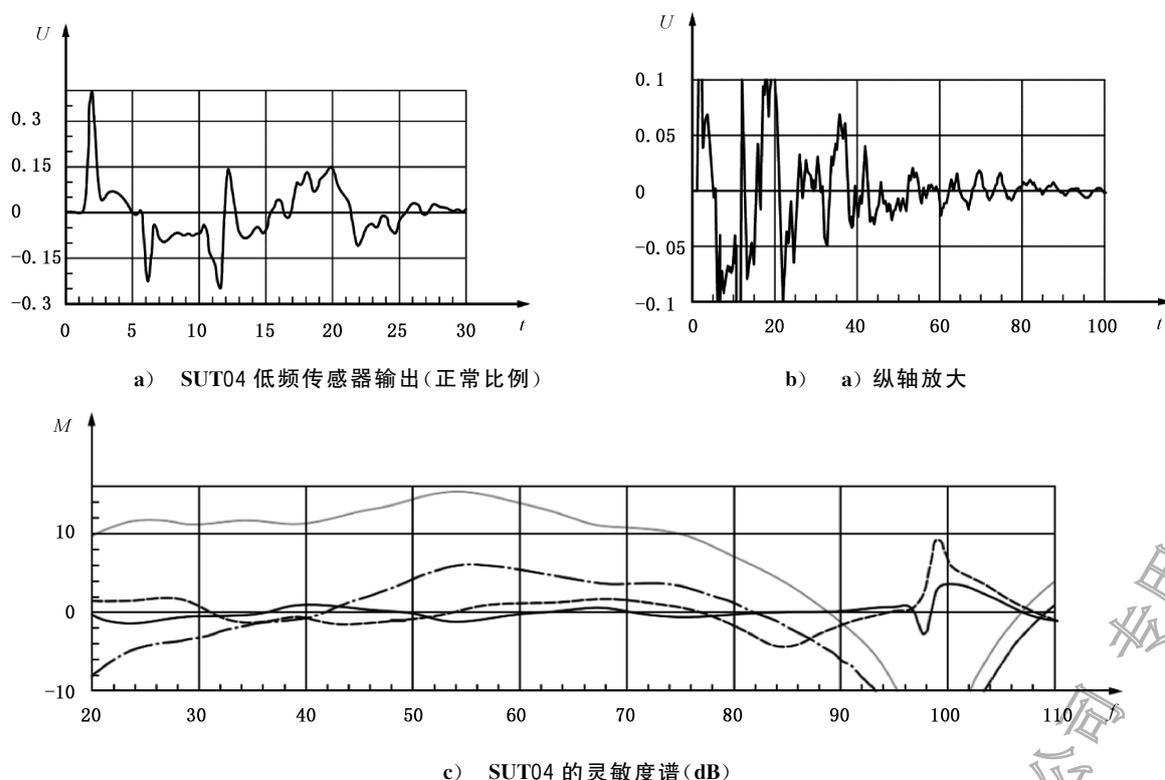
图 D.7 显示了窄带传感器在时域和频域的响应。

图 D.7a) 中的主要响应峰—峰值约为 1.6 V, 混响峰—峰值约为 0.2 V。在 $7 \mu\text{s}$ 、 $14 \mu\text{s}$ 和 $20 \mu\text{s}$ 处均能看见波峰, 表明混响频率约为 150 kHz。

图 D.7b) 将 a) 的纵轴放大, 响应衰减至主响应的 2% (即 0.032 V 峰—峰值) 所需时间约为 $50 \mu\text{s}$ 。

图 D.7c) 中 FFT 结果的线型与图 D.6c) 相对应。当窗口长度由 $50 \mu\text{s}$ 延长到 $100 \mu\text{s}$ 时, 接近 0 dB 的实线表示由此产生灵敏度谱的差异。接近 0 dB 的虚线表示由发射换能器 TMA 而不是 TMC 激励 SUT 获得的灵敏度谱的差异。

D.3.3 SUT04 (30 kHz 低频)的响应和灵敏度



标引序号说明:

U —— 信号电压,单位为伏特(V);

t —— 时间,单位为微秒(μs);

M —— FFT的幅度,单位为分贝(dB);

f —— 频率,单位为千赫兹(kHz);

—— c)中——位移灵敏度 R_D ,单位为分贝(dB),0 dB定义为1 V/nm,应用窗口 W8(100 μs);

..... c)中——速度灵敏度 R_V ,单位为分贝(dB),0 dB定义为1 V·s/mm,应用窗口 W8(100 μs);

----- c)中——SUT被TMA而非TMC激励时 R_D 的差异,应用窗口 W8(100 μs);

———— c)中——应用W7窗口(50 μs)而非W8窗口(100 μs) R_D 的差异。

注:发射换能器为TMC,SUT为低频传感器SUT04-3618。

图 D.8 低频传感器 SUT04 的响应和灵敏度谱

图 D.8 显示了低频传感器在时域和频域的响应。

图 D.8a)中的传感器响应显示的峰间隔约为 6 μs 。图 D.8b)将 a)的纵轴放大,主响应衰减至其峰—峰值的 2%所需时间约为 80 μs ,因此,测试选择长度为 100 μs 的 Han2SQ 窗。

FFT 结果见图 D.8c)。当窗口长度从 100 μs 缩短为 50 μs 时,接近 0 dB 的实线表示由此得到灵敏度谱的差异。接近 0 dB 的虚线表示由发射换能器 TMA 而不是 TMC 激励 SUT 获得的灵敏度谱的差异。

上述曲线在 85 kHz 时能看到明显的差异,灵敏度谱 R_V 和 R_D 在约 100 kHz 时均表现出显著的下陷趋势。

附录 E

(资料性)

关于发射灵敏度测定的附加信息

E.1 通过激光测振仪装置测量激励脉冲

激光测振仪装置中的激励脉冲(U_L)宜由激光测振仪以最小 10 MS/s 的采样速率进行测量。

激光测振仪服务提供商可执行该测量。

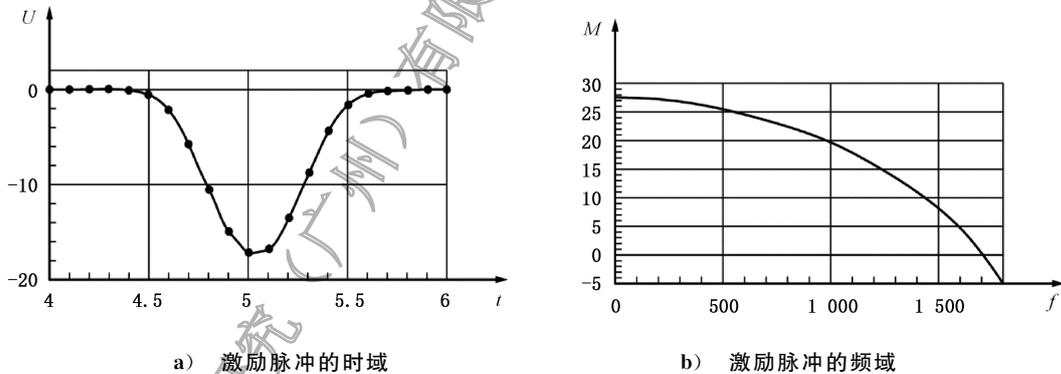
宜使用满足 6.2 中要求的函数信号发生器。激励脉冲 U_L 的测量独立于面对面装置中的激励脉冲 (U_F)。为了能够兼顾两种装置测得的频谱,其 FFT 结果的频率分辨率应相同。例如, U_F (40 MHz, 32K) 采样率和采样长度均为 U_L (10 MHz, 8K) 的四倍。

图 E.1a) 显示了激光测振仪参考输入获取的激励脉冲(U_L),用于与图 D.1a) 所示瞬态记录仪 TRA 的激励脉冲(U_F) 进行比较。

在图 E.1a) 中,每个采样点都以圆点表示,因此可以看出 10 MS/s 的采样率是最低要求。实线只是把这些点连起来了,真正的峰值并没有采集到,它位于 5.0 μ s 和 5.1 μ s 的采样点之间。

图 D.1b) 为 U_F 的 FFT 结果 $F(U_F)$ 。低频端幅值为 28 dB,在 1.8 MHz 时为 -3.3 dB。

在图 E.1b) 中,相同频率下的幅值分别为 27.4 dB 和 -5 dB。造成 1 800 kHz 时 1.7 dB 差异的原因可能是瞬态记录仪(8 MHz 低通设置)和激光测振仪(带宽指定为 2.5 MHz)的带宽不同。然而,通过从 $F(D)$ 中减去 $F(U_L)$ 来获得 T_D ,可以补偿该差值。



a) 激励脉冲的时域

b) 激励脉冲的频域

标引序号说明:

U ——发射换能器 TMA 的激励电压(U_L),单位为伏特(V);

t ——时间,单位为微秒(μ s);

M ——图 a) 的信号单位为伏特(V)时,其 FFT 的幅度 $F(U_L)$,并转换分贝(dB)形式,0 dB 定义为峰值为 1 mV 的连续正弦波;

f ——频率,单位为千赫兹(kHz)。

图 E.1 激光测振仪装置在时域和频域的激励脉冲

E.2 激光测振仪装置在时域测量质点位移脉冲

激光测振仪的硬件反复触发函数发生器产生激励脉冲,激光测振仪测量激发的位移脉冲。

测量如图 6 所示的发射换能器表面 21 个位置(1 号~21 号)的位移,在每个位置进行 10 000 次测

量并取平均值。

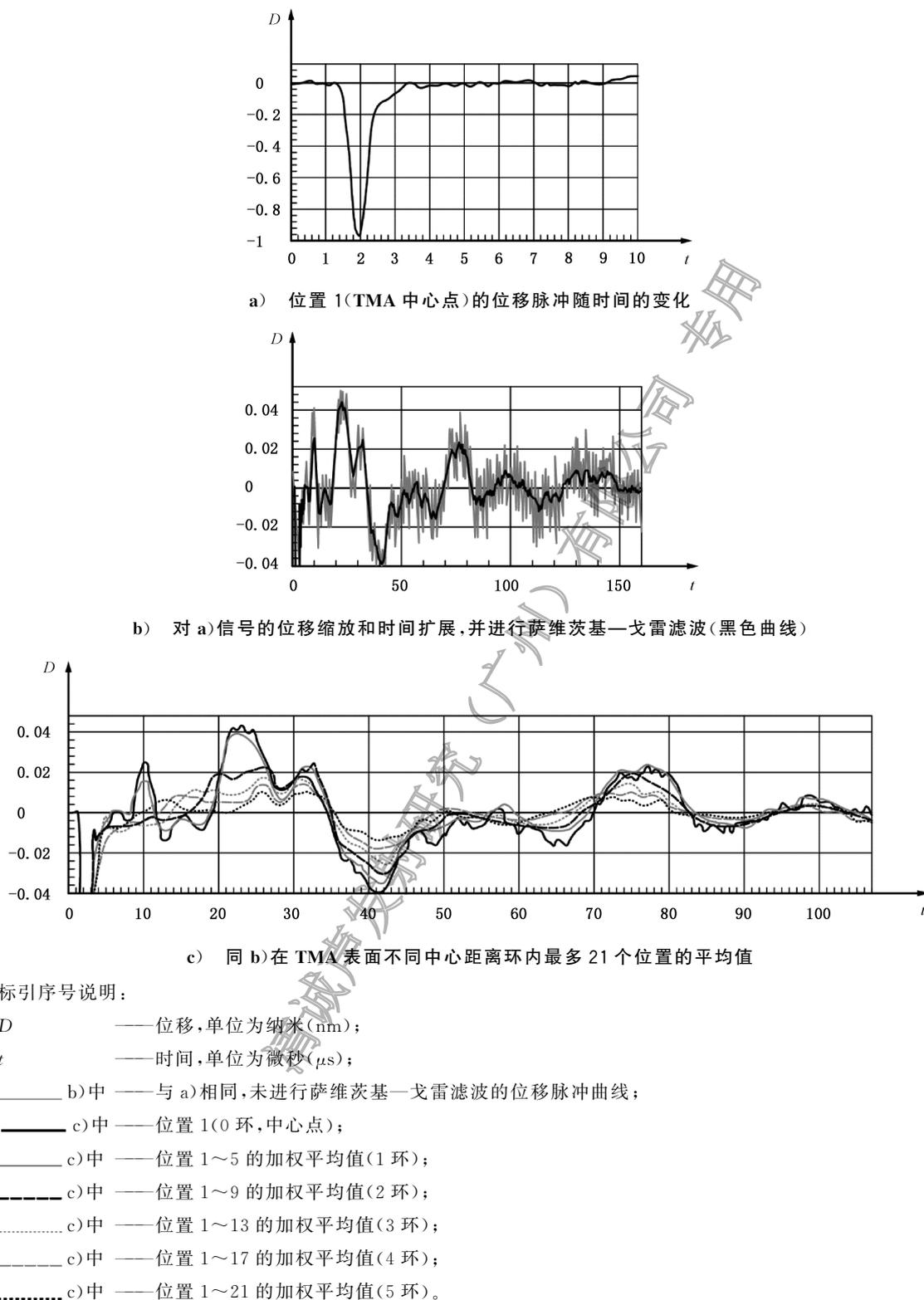


图 E.2 覆盖五个中心距离的平均位移信号

图 E.2a)显示了 10 000 次平均后,激光测振仪测得的发射换能器 TMA 中心点(图 6 中的位置 1)的位移信号随时间的变化,TMA 的激励信号为图 E.1a)所示的激励脉冲,位移以纳米(nm)为单位、时间

以毫秒(ms)为单位。

图 E.2b)用灰色曲线表示相同的信号,但放大了位移并延长了时间,以便看到主脉冲后的混响,该曲线显示出峰—峰值高达约 30 pm 的噪声。使用 41 个采样点的三阶萨维茨基—戈雷滤波器进行去噪,并以黑色曲线表示,滤波需绕过主脉冲。

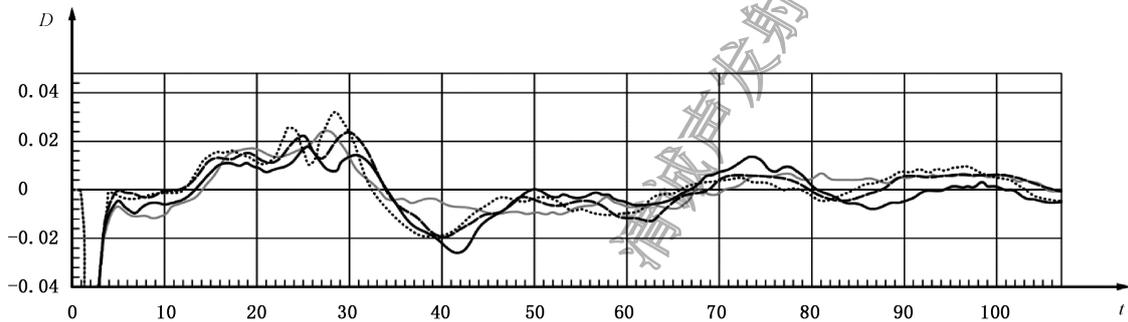
图 E.2c)显示了五个不同中心距离上位移信号的时域平均值(1 环~5 环,测量位置信息见图 6),不同测量位置数据的平均根据其到中心距离的平方进行加权,这考虑到内部位置代表的发射面面积比外部位置更小。

图 E.2c)中的黑色实线表示与图 E.2b)中的黑色实线相同的信号。图 E.2c)中的灰色实线表示 0 环~1 环上的平均位移,黑色虚线表示 0 环~2 环上的平均位移,灰色点线表示 0 环~3 环上的平均位移,灰色虚线表示 0 环~4 环上的平均位移,黑色点线表示 0 环~5 环上的平均位移。混响幅度在中点处最大,随中心距的增加而减小。黑色实线(中心点)在 10 μs (主脉冲峰值后 8 μs)处出现尖锐峰值,表明由激励脉冲沿径向发起的同心波在中心处汇聚,促成了图 E.2c)中 23 μs 、41 μs 及以后出现的混响峰值。

图 E.2c)证明了在混响阶段发射换能器表面的位移分布并不均匀。仅考虑发射换能器中心点的位移不能正确表示发射换能器表面的平均运动。采用不同几何形状的压电元件(例如有中心孔和无中心孔)的 SUT 对非均匀运动分布的响应不同。

遗憾的是,所选择的平均方法不能完全补偿这一点。

关于传感器行为的更多详细信息,见参考文献[20]。



标引序号说明:

- D —— 位移,单位为纳米(nm);
- t —— 时间,单位为微秒(μs);
- TMA 测量的第 3 环平均位移(指定 DA3W9);
- TMC 测量的第 3 环平均位移(指定 DC3W9);
- TME 测量的第 3 环平均位移(指定 DE3W9);
- TMF 测量的第 3 环平均位移(指定 DF3W9)。

图 E.3 发射换能器 TMA, TMC, TME, TMF 0 环~3 环的平均位移

图 E.3 显示了激光测振仪测量的四个发射换能器 TMA、TMC、TME 和 TMF,在 0 环~3 环上的位移信号的平均值,信号标识中的 W9 表示长度为 200 μs 的窗口。在位移混响中看到的分散点表明不同发射换能器之间运动分布的差异。当 SUT 受到不同发射换能器的激励时,会导致 SUT 的灵敏度谱的离散,如图 D.6~图 D.8 中的虚线所示。

本文件使用的发射换能器模型的目的是支撑超声检测,因此混响的非均匀运动分布不会影响测量结果。使用针对混响阶段进行均匀运动分布优化后的发射换能器,将减少从不同发射换能器获得的

SUT 灵敏度谱的离散情况。

E.3 镜面箔对发射换能器表面的影响

使用 B.5 所述型号的激光测振仪时,发现一些测量位置的位移结果很差,这是由发射换能器表面反射率变化引起的。

图 E.4a)为发射换能器 TMF 表面随机 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ 区域的反射率:

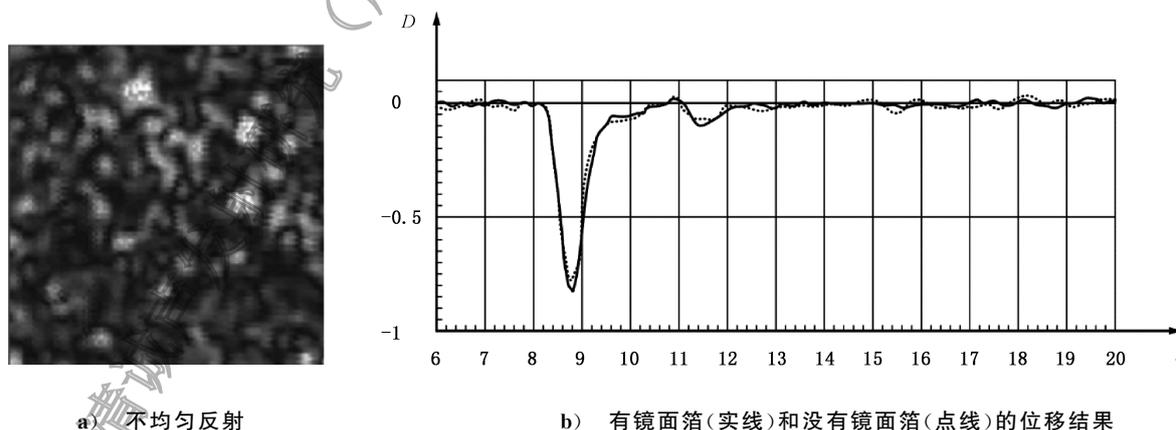
黑色:反射率=0%,白色:反射率=100%。

所使用激光测振仪的光斑半径为 $7\ \mu\text{m}\sim 8\ \mu\text{m}$ 。在某些位置,反射率可能不足以进行可靠的位移测量。

为了避免需要检查每个测量位置是否有足够的反射率,并在需要在寻找附近具有更好反射率的点,本文件决定使用镜面箔。

图 E.4b)显示了发射换能器 TMF 在位置 15 处的两个位移信号,实线为使用镜面箔的信号,点线为不使用镜面箔的信号。两个位移信号均是 10 000 次测量平均后的结果。

可以说,镜面箔解决了上述反射率变化的问题,并且位移结果没有明显变化。



a) 不均匀反射

b) 有镜面箔(实线)和没有镜面箔(点线)的位移结果

标引符号说明:

D —— 位移,单位为纳米(nm);

t —— 时间,单位为微秒(μs)。

图 E.4 使用或不使用镜面箔的位移信号

E.4 位移信号的 FFT 处理

对以 $10\ \text{MS/s}$ 采样的激光测振仪数据进行快速傅里叶变换,时间序列信号的约 2 000 个采样点(每次触发后 $200\ \mu\text{s}$ 的数据)被传输到 8 192 个采样点的零填充 FFT 缓冲区,得到 $1.2207\ \text{kHz}$ 的频率分辨率($10\ 000\ \text{kHz}$ 除以 8 192 个采样点),这等于瞬态记录仪获得的传感器响应的频率分辨率。

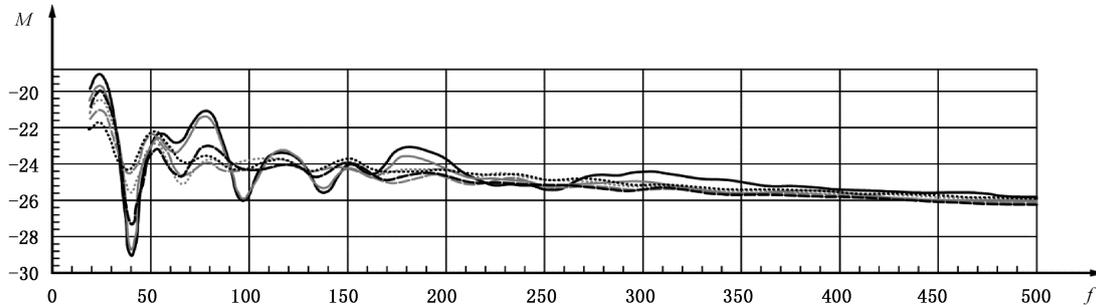
由激光测振仪测量的来自不同位置的位移信号 D 在时域的(1 环~5 环)5 个中心距离上进行平均,然后进行 FFT 变换。FFT 变换后,给出了以分贝(dB)为单位的位移频谱 $F(D)$,其中 0 dB 定义为峰值为 $1\ \text{pm}$ 的连续正弦波,见 D.2.2。

应定义应通过 FFT 转换的信号的时间范围(开始-停止)。如果时间窗太短,则不考虑来自混响的相关频率信息;如果时间窗太长,则 FFT 结果可能受到发射换能器特定的后期混响行为和/或噪声的严重影响。此外,如果应对时域的阶跃进行平滑,则应定义一个窗函数,而不是矩形窗。

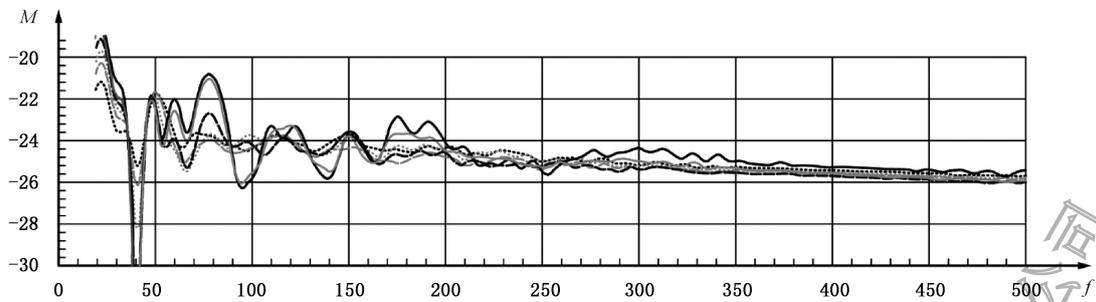
在大多数情况下,本文件推荐使用 Han2SQ 窗,见 D.2.3。

E.5 发射灵敏度示例

图 E.5 显示了图 E.2 中的每条位移曲线在相同的线型分配下,由 8.1 的公式(9)得到的相应发射灵敏度谱 T_D 。



a) 使用 50 μs 窗口 W7 时,不同中心距离的发射灵敏度



b) 使用 100 μs 窗口 W8 时,不同中心距离的发射灵敏度

标引说明:

- M —— TMA 的发射灵敏度的幅度,单位为分贝 (dB),0 dB 定义为 1 nm/V,a)使用 50 μs 的 Han2SQ 窗、b)使用 100 μs 的 Han2SQ 窗;
- f —— 频率,单位为千赫兹 (kHz);
- T_D 为位置 1(0 环),指定 TdA0W7 或 TdA0W8;
- T_D 从 0 环~1 环的位移平均值,指定 TdA1W7 或 W8,对直径 < 5.1 mm 的 SUT 面;
- T_D 从 0 环~2 环的位移平均值,指定 TdA2W7 或 W8,对直径 5.1 mm~10.1 mm 的 SUT 面;
- —— T_D 从 0 环~3 环的位移平均值,指定 TdA3W7 或 W8,对直径 10.2 mm~15.2 mm 的 SUT 面;
- T_D 从 0 环~4 环的位移平均值,指定 TdA4W7 或 W8,对直径 15.3 mm~20.3 mm 的 SUT 面;
- —— T_D 从 0 环~5 环的位移平均值,指定 TdA5W7 或 W8,对直径 20.4 mm~25.4 mm 的 SUT 面。

图 E.5 根据 SUT 感应面的不同直径选择 TMA 的发射灵敏度

该标引符号说明为每种线型定义了指定的环形位置范围(见图 6)、要选择的特定 T_D 的指示符以及应选择的 T_D 所对应的 SUT 感应面的直径范围。表 1 中也提供了这些信息。

示例:对于感应面直径为 12 mm 的 SUT 的验证,当使用发射换能器 TMA 时,根据表 1,要选择的具体 T_D 指定为“TdA3W7”。

窗口从 W7(50 μs)变为 W8(100 μs),或从 W8 变为 W7 对 3 种 SUT 的灵敏度的影响,见图 D.6~图 D.8 中 0 dB 附近的实线。

曲线上的离散是由本文件使用的发射换能器模型的混响相位的非均匀位移分布造成的。

正在努力研制运动分布更加均匀的装置。

附录 F

(资料性)

使 R_v/R_D 适应所用材料的声阻抗

使用面对面装置,特别是当发射换能器和 SUT 是同一型号时,发射换能器和 SUT 的声阻抗相等,从而使声压和质点运动从发射换能器最佳地传递到 SUT。

通常测试对象的声阻抗与 SUT 的声阻抗不同,可以计算压力传输系数,以估计质点运动从测试对象的材料到声发射传感器的传递。

应用以下公式,其中公式(F.1)来自文献[16]中的公式(4.29)。

$$T = \frac{P_2}{P_1} = 2 \times \frac{W_2}{W_1 + W_2} \quad \dots\dots\dots (F.1)$$

$$P = W \times \omega \times A \quad \dots\dots\dots (F.2)$$

式中:

T —— 材料 1 到材料 2 的压力传递系数;

W —— 声阻抗,材料 1(源) W_1 ,材料 2(SUT) W_2 ;

P —— 声压, P_1 是材料 1 中的声压, P_2 是材料 2 中的声压;

ω —— 角频率, $2\pi f$;

A —— 质点位移幅度,材料 1 的为 A_1 ,材料 2 的为 A_2 。

由于 $\omega_2 = \omega_1$,公式(F.2)的右侧定义了公式(F.3)的左侧,公式(F.1)的右侧定义了公式(F.3)的右侧:

$$\frac{W_2 \times A_2}{W_1 \times A_1} = 2 \times \frac{W_2}{W_1 + W_2} \quad \dots\dots\dots (F.3)$$

两边同时乘以 (W_1/W_2) ,得到公式(F.4)。

$$A_2 / A_1 = 2 \times \frac{W_1}{(W_1 + W_2)} \quad \dots\dots\dots (F.4)$$

公式(F.4)也由文献[16]中的公式(4.23)确认。有四种情况值得注意:

- a) $W_1 = W_2$ $A_2 = A_1$ 这是待测传感器与发射换能器耦合时的情况;
- b) $W_2 = 0$ (空气) $A_2 = 2 A_1$ 这是用激光测振仪测量自由运动的情况;
- c) 在钢铁上的待测传感器: $A_2/A_1 = 1.21$ 或 1.7 dB ($W_1 = 46, W_2 = 30$);
- d) 在铝上的待测传感器: $A_2/A_1 = 0.72$ 或 -2.8 dB ($W_1 = 17, W_2 = 30$)。

当待测传感器等由钢驱动($A_2/A_1 = 1.21$)时,传感器输出比发射换能器驱动高 1.7 dB,因此灵敏度宜校正 +1.7 dB。

当待测传感器由铝驱动时($A_2/A_1 = 0.72$),灵敏度宜校正 -2.8 dB。

钢和铝之间(体波激励)的灵敏度差异为 4.5 dB,与参考文献[17]在 1 MHz 时的图 10 (a)非常一致。但该图显示校正值是频率的函数。在 400 kHz 时,校正值为 2 dB。

公式(F.1)和公式(F.2)是针对远场条件下垂直入射平面波的特殊情况定义的。由于发射换能器和宽带传感器都有很大的阻尼,这些公式对于评价测试对象材料的声阻抗对通过面对面装置获得的宽带传感器的灵敏度的影响是有意义的。对于瑞利波和板波,应考虑孔径效应的影响。

其他关于发射换能器负载效应的研究(见参考文献[20],第 34 页)得出结论,“阻尼宽带超声换能器基本不受负载效应的影响”,“结果证实,界面传输受波传播理论控制,传感器接收灵敏度根据声阻抗差定义的位移比而降低”。

清诚声发射研究(广州)有限公司 购买单位: 清诚声发射研究(广州)有限公司 防伪编号: 2025-0711-0322-5961-1920 订单号: 0205250711853332

参 考 文 献

- [1] ISO 12713 Non-destructive testing—Acoustic emission inspection—Primary calibration of transducers
- [2] ISO 12714 Non-destructive testing—Acoustic emission inspection—Secondary calibration of acoustic emission sensors
- [3] ISO/TR 13115 Non-destructive testing—Methods for absolute calibration of acoustic emission transducers by the reciprocity technique
- [4] ISO 16063-4 Methods for the calibration of vibration and shock transducers—Part 41: Calibration of laser vibrometers
- [5] ASTM E1106 Standard Test Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors
- [6] ASTM E1781 Standard Practice for Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors
- [7] M. WINTER, ET AL, “The problem of calibrating Laser-Doppler Vibrometers at high frequencies”, June 2012, DOI: 10.1063/1.4730555
- [8] R. HILL, Reciprocity and Other Acoustic Emission Transducer Calibration Techniques, JAE 1-73 (1982)
- [9] ONO K. Calibration methods of acoustic emission sensors. Materials (Basel). 2016, 9 p. 508. <https://doi.org/10.3390/ma9070508>
- [10] ONO K. Critical examination of ultrasonic transducer characteristics and calibration methods, <https://www.researchgate.net/publication/320389956>
- [11] ONO K. Frequency Dependence of Receiving Sensitivity of Ultrasonic Transducers and Acoustic Emission Sensors, MDPI 2018, <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3861>
- [12] ONO K. Receiving Sensitivities of Acoustic Emission Sensors: A data compilation, http://www.aewg.org/jae/JAE-Vol_36-2019-4A.pdf, 1-8
- [13] ONO K. Progress in Sensitivity Verification of AE Sensors, http://www.aewg.org/jae/JAE-Vol_36-2019-4B.pdf, S37-S42
- [14] VALLEN H. Proposal for an absolute AE sensor calibration setup, Proceedings of the WCAE-2017, Oct 10-13, Xi'an, China, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12111-2>
- [15] VALLEN H. AE sensor sensitivity verification using a stimulated motion, verified by laser vibrometry, Proceedings of the EWGAE-33, Senlis, France, 12-14 September 2018, <https://www.ndt.net/article/ewgae2018/papers/21.pdf> (updated version)
- [16] ROSE J.L. Ultrasonic Waves in Solid Media, 2004, ISBN 0 521 54889 6
- [17] SAUSE M.G.R., HAMSTAD M.A. Numerical modeling of existing acoustic emission sensor absolute calibration approaches. Sens. Actuators A Phys. 2018, 269 pp. 294-307
- [18] WALDMEYER J. Fast Fourier Transform for step-like functions: the synthesis of three apparently different methods. IEEE Trans. Instrum. Meas. 1980, IM-29 (1) pp. 36-39
- [19] Nondestructive Testing Handbook, 3rd Edition: Volume 6, Acoustic Emission Testing (AE), American Society for Nondestructive testing, ISBN: 978-1-57117-284-6, pp. 1-77
- [20] ONO K., CHO H., VALLEN H., M'CLOSKEY R.T. Transmission sensitivities of contact ultrasonic transducers and their applications. Sensors 2021, 21, 4396. <https://doi.org/10.3390/s21134396>

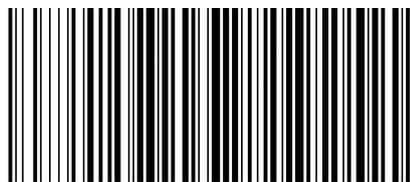
清诚声发射研究（广州）有限公司 专用

 **版权声明**

中国标准在线服务网(www.spc.org.cn)是中国标准出版社委托北京标科网络技术有限公司负责运营销售正版标准资源的网络服务平台,本网站所有标准资源均已获得国内外相关版权方的合法授权。未经授权,严禁任何单位、组织及个人对标准文本进行复制、发行、销售、传播和翻译出版等违法行为。版权所有,违者必究!

中国标准在线服务网
<http://www.spc.org.cn>

标准号: GB/T 45578-2025
购买者: 清诚声发射研究(广州)有限公司
订单号: 0205250711853332
防伪号: 2025-0711-0322-5961-1920
时 间: 2025-07-11
定 价: 86元



GB/T 45578-2025

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
无损检测 声发射检测 压电声发射传感器
接收灵敏度谱的验证

GB/T 45578—2025/ISO 24543:2022

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)

网址:www.spc.net.cn

服务热线:400-168-0010

2025年3月第1版

*

书号: 155066·1-78999

版权专有 侵权必究