

NB

中华人民共和国行业标准

NB/T XXXXX—XXXX

承压设备无损检测系统性能测试与评价 第1部分：衍射时差法超声检测

Performance Test and Evaluation of Non-destructive Testing Systems for
Pressure Equipments — Part 1: Ultrasonic time of flight diffraction
technique

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家能源局 发布

目 次

目 次	I
前 言	II
承压设备无损检测仪器性能测试与评价	1
第 1 部分：衍射时差法超声检测	1
1. 范围	1
2. 规范性引用文件	1
3. 术语和定义	1
4. 符号和含义	3
5. 通用要求	4
6. TOFD 检测系统性能要求	6
7. 仪器性能要求	7
8. 探头性能要求	17
9. 仪器-探头组合性能要求	22
10. 技术要求	25
附 录 A 稳定性测试配置	28
附 录 B 发射部分测试配置	29
附 录 C 接收部分测试连接图	30
附 录 D 探头电气性能测试连接图	33
附 录 E 组合性能标准试块	34

前 言

NB/T XXXX《承压设备无损检测系统性能测试与评价》分为以下2个部分：

——第1部分：衍射时差法超声检测；

——第2部分：相控阵超声检测。

本部分为NB/T XXXX的第1部分：衍射时差法超声检测。

本部分按GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本部分由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）提出并归口。

本标准起草单位：/

本标准主要起草人：/

承压设备无损检测系统性能测试与评价

第 1 部分：衍射时差法超声检测

1. 范围

本标准规定了衍射时差法检测仪（简称为TOFD仪器）、衍射时差法超声探头（简称TOFD探头）和仪器-探头组合性能的检验方法和验收标准。

本标准适用于工作在0.1MHz~30 MHz频率范围内TOFD仪器，不适用于连续波工作的TOFD仪器。

本标准适用于中心频率为0.5MHz~10MHz的TOFD探头。

本标准中规定的与材料有关的超声数值，是基于超声速度为 5920 ± 50 m/s（钢中纵波）和 3255 ± 30 m/s（钢中横波）的钢。

2. 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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。

GB/T 12604.1	无损检测 术语 超声检测
NB/T47013.10	承压设备无损检测 第10部分：衍射时差法超声检测
GB/T 27664.1	无损检测 超声检测设备的性能与检验 第1部分：仪器
GB/T 27664.2	无损检测 超声检测设备的性能与检验 第2部分：探头
JB/T 8428	无损检测 超声检测用试块
JB/T 9214	无损检测 A型脉冲反射式超声检测系统工作性能测试方法
JB/T 10062	超声探伤用探头性能测试方法
GB/T 4793.1	测量、控制和试验室用电气设备的安全要求 第1部分：通用要求
GB/T 18268.1	测量、控制和实验室用的电设备 电磁兼容性要求 第1部分：通用要求
GB/T 6587	电子测量仪器通用规范
GB/T 191	包装储运图示标志
GB 4208	外壳防护等级(IP代码)

3. 术语和定义

GB/T 12604.1、GB/T 27664.1、GB/T 27664.2和NB/T 47013.10界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

TOFD time of flight diffraction

衍射时差法超声检测，是采用一发一收探头对工作模式，主要利用缺陷端点的衍射波信号探测和测定缺陷位置及尺寸的一种超声检测方法。

3.2

放大器频率响应 amplifier frequency response

放大器增益随着输入信号频率变化的关系。

3.3

放大器频带 amplifier frequency band

高低截止频率之间的频谱宽度。仪器采用的截止频率是增益比峰值增益低 3dB 的频点。

3.4

串扰 crosstalk damping during transmission

TOFD 仪器置于一发一收工作方式，在发射脉冲过程中，从发射器输出端传输至接收器输入端的通道间隔离度。

3.5

外部标准衰减器 calibrated dB-switch

用于 TOFD 仪器的可溯源的经过校准的标准衰减器。

3.6

中间增益值 middle gain

TOFD 仪器增益设置为最大与最小增益之间一半。如 TOFD 仪器最大增益为 100dB，最小为 0dB，则中间增益值为 50dB。

3.7

短脉冲 short pulse

在脉冲幅度超过其最大峰值一半时的时间间隔内，周期数少于 1.5 的未检波脉冲。

3.8

探头工作频率 operating frequency**探头中心频率 center frequency**

探头回波频谱中按最大幅度 -6dB 测出的高截止频率 f_u 和低截止频率 f_l ，工作频率为低截止频率至高截止频率范围，并按下式定义中心频率 f_0 ：

$$f_0 = \sqrt{f_u \times f_l}$$

3.9

探头相对带宽 relative bandwidth

探头的高低截止频率 f_u 和 f_l 差值与中心频率 f_0 的比率的百分数。

$$\Delta f_{rel} = \left[\frac{(f_u - f_l)}{f_0} \right] \times 100\%$$

4. 符号和含义

符号和含义如表 1 所示。

表1 符号和代号表示

符号	单位	意义
f_0	Hz	中心频率
f_u	Hz	仪器：-3dB时的上限频率；探头：-6dB时的上限频率
f_l	Hz	仪器：-3dB时的下限频率；探头：-6dB时的下限频率
Δf_{rel}	/	探头相对带宽
Z_0	Ω	有效输出阻抗
V_{50}	V	带有50欧姆负载的发射器，其发射脉冲的电压幅值
V_{75}	V	带有75欧姆负载的发射器，其发射脉冲的电压幅值
D_s	/	串扰
V_E	V	串扰测试过程中，带有50欧姆负载的接收器，其接收端的电压幅值
V_{max}	V	接收器输入最大电压幅值
V_{min}	V	接收器输入最小电压幅值
V_{ein}	V	接收器输入等效噪声电压幅值
V_{in}	V	等效输入噪声测试过程中，外部输入电压幅值
R_{max}	Ω	最大增益时接收器的输入阻抗实数部分
R_{min}	Ω	最小增益时接收器的输入阻抗实数部分
ΔR	/	接收器的输入阻抗实数部分最大变化
C_{max}	pF	最大增益时接收器的并联电容
C_{min}	pF	最小增益时接收器的并联电容

ΔC	/	接收器并联电容部分最大变化
S	dB	衰减器设定值
S_{rel}	/	相对脉冲回波灵敏度
V_e	V	规定反射体的放大前回波峰-峰值电压
V_a	V	施加到探头上的峰-峰值电压
e	mm	偏移值
δ	度	偏向角
Δd	/	垂直线性误差
S_{rel}	dB	灵敏度余量
ΔL	/	水平线性
f_e	Hz	组合频率

5. 通用要求

5.1 TOFD 仪器

5.1.1 一般要求

TOFD 检测仪应具有超声波发射、接收、放大、数据自动采集、记录、显示和分析功能，至少应包括下述各项内容：

- 1) 外形尺寸；
- 2) 设备重量；
- 3) 设备通道数（若有常规超声通道、相控阵通道，应明确接口型式及数量）
- 4) 使用电源类型；
- 5) 探头插头型号；
- 6) 电池工作时间（新电池在最大功耗情况下）；
- 7) 工作温度和电压（电源和/或电池的）范围（应在给定的技术指标范围内进行工作），如需预热，应说明预热时间；
- 8) 低电压（仪器不能正常工作时）的指示方式；
- 9) 电池正常放电和充电过程中、在电池电压范围内，标准恒定信号的幅度和水平基线位置的变化百分数；
- 10) 可输出不检波（RF）和/或检波信号；
- 11) 闸门信号输出方式；
- 12) 运输过程中特殊存放和保护条件。

- 13) 提供闸门信号输出方式（如有可能, 提供输出响应时间、线性, 比例输出的最大电流驱动能力和稳定性。闸门的阈值迟滞和精度以及开关输出的保持时间）。

5.1.2 发射器

发射器在该标准规定的测试条件及要求下, 至少应包括下述各项内容:

- 1) 脉冲重复频率;
- 2) 发射脉冲波形;
- 3) 发射脉冲电压;
- 4) 发射脉冲宽度（采用方波脉冲作为发射脉冲的）;
- 5) 脉冲上升时间（采用方波脉冲作为发射脉冲的）;
- 6) 脉冲回响幅度;
- 7) 有效输出阻抗。

5.1.3 接收器

接收器在该标准规定的测试条件及要求下, 至少应包括下述各项内容:

- 1) 中心频率及带宽;
- 2) 发射脉冲后盲区;
- 3) 等效输入噪声;
- 4) 动态范围;
- 5) 衰减器精度;
- 6) 等效输入阻抗;
- 7) 串扰;
- 8) 幅度线性;
- 9) 时基线性;
- 10) 实测净增益。

5.1.4 显示功能

仪器显示功能至少应满足下述各项内容:

- 1) 仪器每个通道检测显示应至少包括 A 扫描信号和 TOFD 图像, 且 A 扫描信号使用射频波形式;
- 2) 仪器每个通道所显示和记录的 A 扫描信号不应有明显畸变或变形;
- 3) 能以 256 级灰度或色度显示 TOFD 图像;
- 4) 具有同步显示 TOFD 图像和对应的 A 扫描信号、拟合曲线光标、移除直通波、局部位置信号放大等必要的分析功能;
- 5) 应包括 TOFD 显示的深度或时基线性化算法, 以测量目标体深度和高度;
- 6) 对于未采集到的数据, 仪器软件不应使用数据处理方式对缺失部分进行补充, 以保持数据的真实性。

5.2 TOFD 探头

TOFD 探头至少应包括下述各项内容：

1) TOFD 探头性能指标至少包括：

- a) 中心频率；
- b) 相对脉冲回波灵敏度；
- c) 电阻抗或静电容；
- d) 直通波持续时间；
- e) 频带相对宽度。

2) 其他内容：

- a) 应标识探头序号、中心频率等必要信息；
- b) 探头的工作温度范围、运输过程中特殊存放和防护条件；
- c) 对于高温条件下使用的探头，应提供其允许的最大工作温度，以及温度对灵敏度和声束的影响。

5.3 TOFD 检测仪-探头系统

TOFD检测仪-探头系统至少应满足下述各项内容：

- 1) 数据采集应和扫查装置的移动同步，扫查步进值应可调，其最小值应不大于 0.5mm；
- 2) 应能存储和分辨各 A 扫描信号之间相对位置的信息，如编码位置；
- 3) 应具有滤波、取波幅阈值等数字信号处理功能，但系统应能记录未经处理之前的原始检测数据；
- 4) 应能够以不可更改的方式将所有的 A 扫描信号和 TOFD 图像存储于磁、光等永久介质，并能输出其硬拷贝；
- 5) 应能够选择合适的 A 扫描时间窗口，以检测到需要的信号；闸门起点相对于发射脉冲至少应在 0 μ s-200 μ s 间可调节，窗口宽度至少在 5 μ s-100 μ s 间可调节；
- 6) 宜具有信号平均、滤波、拟合曲线光标、去直通波、图像局部缩放、信号数字增益及合成孔径计算等数字信号处理等功能。

6. TOFD 检测系统性能要求

为满足本部分的性能要求，应采用下述三组对TOFD检测系统进行检验：

第1组 仪器：对于TOFD仪器的检验，由制造商（或其代理商）从所生产的TOFD仪器中随机抽取样品，对表2的中所有项目进行检验。

第2组 探头：对于TOFD探头的检验，由制造商（或其代理商）从所生产的TOFD探头中随机抽取样品，对表2中的所有项目进行检验。

第3组 仪器探头组合性能：对于TOFD仪器和探头组成的组合性能的检验，在使用期限内，按规定的校准或核查周期进行检验。

维修后，对可能影响到TOFD仪器的所有参数，应选用第1组 仪器中的合适的检验项目进行检验。校准或核查至少包含第3组的检验项目。

表2 TOFD检测系统的检测项目

测试项目	第1组：仪器	第2组：探头	第3组：组合性能

	子条款	子条款	子条款
物理状态与外观条件	7.2	8.2	/
稳定性部分			
预热后的稳定性	7.3.1	/	/
显示抖动性	7.3.2	/	/
相对于电压变化稳定性	7.3.3	/	/
相对温度变化的稳定性	7.3.4	/	/
发射脉冲部分			
发射脉冲重复频率	7.4.1	/	/
发射脉冲电压、上升时间、反冲及宽度	7.4.2	/	/
有效输出阻抗	7.4.3	/	/
接收器部分			/
串扰	7.5.1	/	/
发射脉冲后的盲区	7.5.2	/	/
动态范围	7.5.3	/	/
放大器的频率响应	7.5.4	/	/
等效输入噪声	7.5.5	/	/
接收器的输入阻抗	7.5.6	/	/
衰减器精度	7.5.7	/	/
幅度线性	7.5.8	/	/
时基线性	7.5.9	/	/
净增益	7.5.10	/	/
探头性能部分			
相对脉冲回波灵敏度	/	8.3.1	/
中心频率和带宽	/	8.3.2	/
电阻抗或静电容	/	8.3.3	/
声束扩散角	/	8.3.4	/
偏向角和偏移	/	8.3.5	/
仪器-探头组合性能部分			
垂直线性	/	/	9.2
水平线性	/	/	9.3
灵敏度余量	/	/	9.4
组合频率	/	/	9.5
-12dB扩散角	/	/	9.6

7. 仪器性能要求

7.1 测试设备要求

仪器检验用器具主要如下：

a) 数字示波器：带宽不小于100 MHz；通道数不低于2个；最大采样率 $\geq 1\text{GS/s}$ ；至少配有衰减20dB和10dB高阻抗测试笔。

b) 信号发生器，以下任选一种：

1) 一台任意波形发生器：带宽不低于100MHz；通道数不低于2个；最大采样率 $\geq 1\text{GS/s}$ 。

2) 两台脉冲信号发生器。带宽不低于100MHz；通道数不低于2个；能够外同步产生、调制连续周期性可调占空比的方波脉冲或正弦脉冲信号，输出信号幅度能独立连续调节，调节范围应达到20 dB。

注：如果使用两台脉冲信号发生器，要采用合适的匹配电路，使这两台信号发生器的输出合并为一检测信号。

a) 标准衰减器：总衰减量 $\geq 100\text{ dB}$ ；最小步进 $\leq 1\text{ dB}$ ；输出阻抗 $50\ \Omega$ ；当信号频率在15 MHz以内时，任意10 dB范围的累积误差应在 $\pm 0.3\text{ dB}$ 以内；

阻抗分析仪：至少包括0.1MHz~30MHz频率范围和 $25\text{m}\ \Omega \sim 40\text{M}\ \Omega$ 阻抗范围；基本阻抗精度 $\leq 0.1\%$ ；具备串联和并联阻抗、容抗、电感等基本参数。

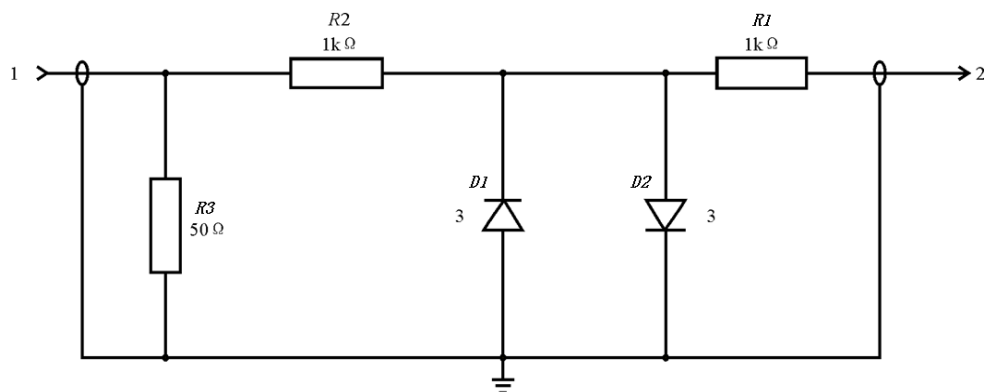
数字计时器，能够在1000个（可调）触发脉冲后产生一个溢出脉冲，同时，能够测量两个相邻溢出脉冲的间隔时间，准确到 $\pm 0.01\%$ ；

环境试验箱：至少包括 $-40^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 温度范围；

$50\ \Omega$ 和 $75\ \Omega$ 无感电阻，最大允许相对误差为 $\pm 1\%$ ；

保护电路，以下任选一种：

1) 保护电路，其示例如图1所示；



说明：

1——信号输入端；

2——信号输出端；

D1——硅开关二极管；

D2——硅开关二极管。

图1 防止发射脉冲损坏检测设备的保护电路

注：在将示波器和（或）信号发生器连接到TOFD仪器的发射器之前，应考虑是否接入保护电路（见图1）以防止测试仪器被高发射电压击坏。

2) 固定衰减器：功率能承受激励的脉冲功率。

高精度连接电缆：长度一般小于或等于0.5m，串联容抗一般小于或等于30pF。

7.2 物理状态与外观

目测TOFD仪器外观，检查是否存在影响正常工作及外部损伤。

7.3 稳定性能

以下稳定性检验过程中，应采取必要的措施以保证不受外界信号干扰，信号保持稳定不变。如果配有延时控制器，则延时应设定为零。实验室环境温度应保持在仪器制造者技术规范规定的 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围以内。保证电源或电池的电压在制造者技术规范规定的范围以内。

7.3.1 预热后的稳定性

使用信号发生器产生一个中心频率为 2MHz 至 6MHz 范围内（信号幅值约 100mV）的正弦波信号，连接 TOFD 仪器并使该仪器屏幕产生一个正弦波信号，测试连接配置见附录 A 中图 A.1。调整仪器增益设置，将信号的幅度调至满屏幕高度的 80%，调节时基线，使该回波水平刻度在为屏幕宽度的 30%~70%之间。

在设备开机预热后 30min 内，每隔 10min 观察回波的幅度和其在时基线上位置的变化。

7.3.2 显示抖动性

使用信号发生器产生一个中心频率为 0.5MHz 至 10MHz 范围内（信号幅值约 100mV）的正弦波信号，连接 TOFD 仪器并使该仪器屏幕产生一个正弦波信号，测试连接与 7.3.1 相同。调整仪器增益设置，将信号的幅度调至满屏幕高度的 80%，调节时基线，使该回波水平刻度在为屏幕宽度的 30%~70%之间。

任意信号发生器频率选择在 0.5MHz 至 10MHz 范围内，TOFD 仪器增益设置范围内（至少包含 0dB~80dB 范围），测试过程中可分别选取其中三挡（最大值、最小值、中间值）进行测试，观察频率改变约 1Hz 的回波幅度和其在时基上位置的变化。

测试过程中避免高增益设置，以免放大器的噪声妨碍测量。

7.3.3 相对电压变化的稳定性

使用标准稳压电源给 TOFD 仪器供电，将稳压电源的电压调到 TOFD 仪器规定的工作电压范围的中间值。按照 7.3.2 描述的方法产生一个回波参考信号。

在制造商技术规范规定的电压范围内，对应下列各项，观察回波参考信号的幅度和其在时基线上位置的变化。

- 1) 改变交流电源电压（通过电源变压器调节）；或
- 2) 改变电池电压（采用电压可变的直流电源代替标准电池组）。

对于带有低电压自动关机系统或报警装置的 TOFD 仪器，应降低交流电源和（或）直流电源的电压，并记录自动关机系统或报警装置起作用时的回波幅度和时基线性的变化。

7.3.4 相对温度变化的稳定性

设置信号发生器频率为仪器频带的中心频率，调节信号发生器产生单周期正弦延时脉冲。调节信号发生器脉冲延时，使仪器显示脉冲位于时基显示中间位置，调节信号发生器输出信号幅度，使超声仪器显示脉冲幅度为 80%FSH。

将仪器放入恒温恒湿试验箱，连接任意信号发生器，采用任意信号发生器输出电压，测试连接与 7.3.1 相同。温度试验所覆盖的温度范围至少包含 $-10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，每隔 10°C 进行测试，且每个温度到达至少保持 2 小时后读取和记录仪器屏幕上的信号幅值和时基位置。

幅度变化取相邻两个温度测量的信号幅度差值中的最大绝对值。

时基线性变化取相邻两个温度测量的延时差值中的最大绝对值。

7.4 发射脉冲部分参数

7.4.1 发射脉冲重复频率

TOFD 仪器置于一发一收工作状态，关闭多次平均和/或多次相关功能，测试电路配置见附录 B 中图 B.1。将数字示波器测试探头连接 TOFD 仪器的发射端，外接 50 欧姆无感电阻（注意：检查示波器的输入，以防被高发射电压损坏）。

采用数字示波器测量发射脉冲的重复频率。应依次设置 TOFD 仪器每个不同脉冲重复频率的档位进行测试；当超声检测仪脉冲重复频率连续可调时，测量脉冲重复频率的最大值、最小值以及中间任意两处，共四处，计算发射脉冲重复频率实测值与标称值的偏差。

多个设置档位或设定值的测试结果中取最大误差绝对值作为重复频率偏差。

7.4.2 发射脉冲电压、上升时间、反冲和宽度

将 TOFD 仪器置于一发一收工作方式，连接示波器至 TOFD 仪器的发射端，发射输出端连接一个 $50\ \Omega$ 无感电阻。测试电路配置见附录 B 中图 B.1。用示波器测量发射脉冲电压 V_{50} 、脉冲上升时间、脉冲宽度和反冲的幅度，取各档测量偏差最大的绝对值。如图 2 所示。

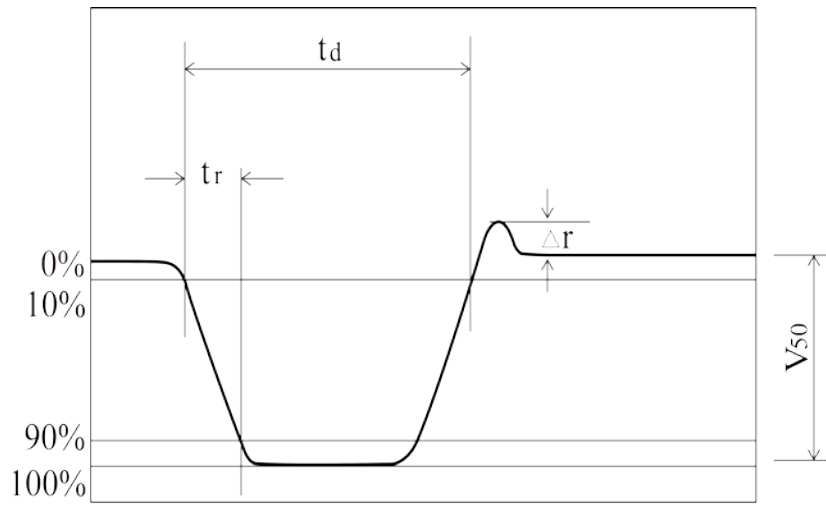
（注：连接示波器前，应检查示波器的输入情况，以免被高发射电压损坏）

发射脉冲电压 V_{50} ：在仪器出厂文件中提供的最佳阻尼设定值条件下，调节发射脉冲宽度和发射脉冲重复频率，测试 TOFD 仪器每一档脉冲电压或连续电压的最高值和最低值。用示波器通道 1 测试笔测量超声检测仪发射端，在示波器上分别测量并记录各档实测发射脉冲电压 V_{50} ，计算发射脉冲电压的偏差。

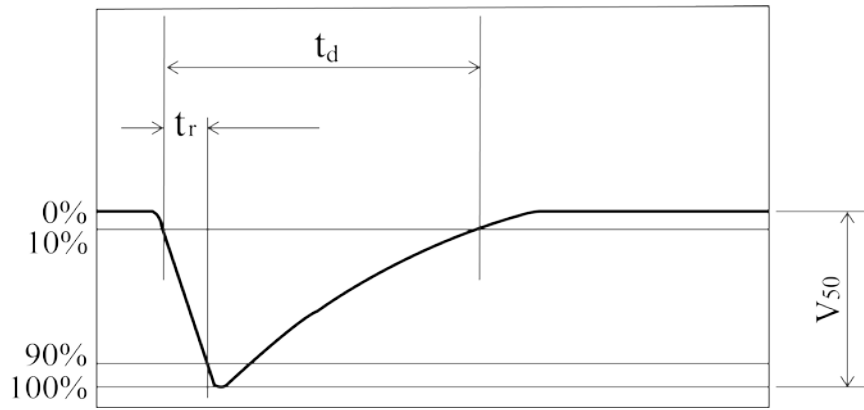
发射脉冲反冲 Δr ：在每档发射脉冲电压、发射脉冲宽度（取中间值）以及仪器出厂文件中提供的最佳发射脉冲重复频率和阻尼设定值条件下，测量 TOFD 仪器发射脉冲反冲与发射脉冲电压峰-峰值之比。

发射脉冲宽度 t_d ：在每档发射脉冲电压和仪器出厂文件中提供的最佳发射脉冲重复频率和阻尼设定值条件下，测量发射脉冲宽度的最大值、中间值和最小值，共 3 处。

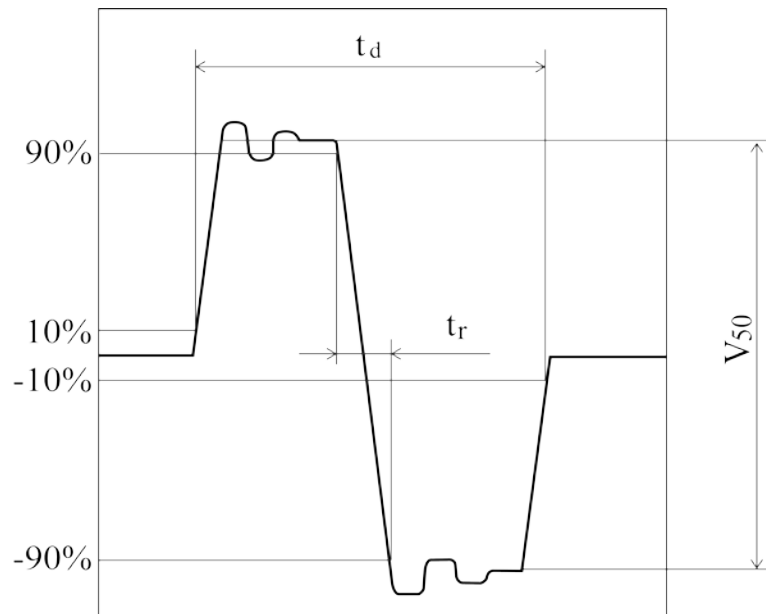
发射脉冲上升时间 t_r ：在每档发射脉冲电压和仪器出厂文件中提供的最佳发射脉冲重复频率和阻尼设定值条件下，调节发射脉冲宽度，测量发射脉冲上升时间。



a 方波脉冲



b 尖脉冲



c 双极性方波

图2 测量的发射脉冲参数

7.4.3 有效输出阻抗

将 TOFD 仪器置于一发一收工作方式，连接示波器至 TOFD 仪器的发射端，测试电路配置见附录 B 中图 B.1。

采用 7.4.2 的检测方法，在 TOFD 仪器的发射端连接一个 $50\ \Omega$ 的无感电阻，用示波器测量发射脉冲电压 V_{50} 。然后用 $75\ \Omega$ 的电阻替换 $50\ \Omega$ 的电阻，测量发射脉冲电压 V_{75} 。在每档发射脉冲电压、发射脉冲宽度（取中间值）以及仪器出厂文件中提供的最佳发射脉冲重复频率和阻尼设定值条件下，测量 TOFD 仪器的有效输出阻抗。

每种发射脉冲条件设置下，用公式（1）计算有效输出阻抗 Z_0 ：

$$Z_0 = 50 \times 75 \frac{(V_{75} - V_{50})}{(75 \times V_{50} - 50 \times V_{75})} \quad (1)$$

注：电压 V_{50} 和 V_{75} 分别为相应的发射脉冲电压的稳态值。

7.5 接收器部分参数

7.5.1 串扰

将 TOFD 仪器置于一发一收工作方式，在发射器输出端和接收器输入端接 $50\ \Omega$ 的电阻。用示波器测量发射器输出端的峰-峰值电压 V_{50} 和接收器输入端的峰-峰值电压 V_E ，测试电路配置见附录 C 中图 C.1。在每档发射脉冲电压、发射脉冲宽度（取中间值）以及仪器出厂文件中提供的最佳发射脉冲重复频率和阻尼设定值条件下，测量 TOFD 仪器发射端和接收端之间的串扰 D_s （单位为分贝），按公式（2）计算。

$$D_s = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{50}}{V_E} \right) \quad (2)$$

7.5.2 发射脉冲后盲区

将 TOFD 仪器显示屏时基线的全屏刻度为 $0\ \mu\text{s}$ 至 $25\ \mu\text{s}$ ，然后调节零点偏置，使发射脉冲前沿对准零刻度线，测试电路配置见附录 C 中图 C.2。

将 TOFD 仪器设置为“单”探头工作方式（组合的发射器和接收器）。依次选取 TOFD 仪器的频带设定值，调节输入信号的射频频率以便在显示屏上得到附录 C 中图 C.3 所示的近似最大电平的信号。调整输入信号幅度，使显示屏末端的信号幅度为全屏幅度的 50%。在此过程中，改变输入信号电平，并检查 TOFD 仪器放大器处于未饱和状态。

盲区用自发射脉冲前沿到时基线上信号幅度为全屏幅度 45%（即在显示屏末端的信号幅度为 50%）所对应的时间表示，单位为 μs 。

7.5.3 动态范围

按照附录 C 中图 C.4 所示的检测仪器装置，按照 7.5.4 所测得的每个频带的中心频率 f_0 处测试仪器的动态范围。用这些检测仪器应产生 10 个周期的测试信号，如附录 C 中图 C.5 所示。将 TOFD 仪器的衰减器/增益控制器（校准和未校准）调至最小增益。提高输入信号幅度直至信号出现饱和

或显示的幅度达到全屏幅度的 100%。测量输入信号的电压 V_{\max} （测量时要适当考虑外部标准衰减器的设置）。

将 TOFD 仪器的增益控制器（校准和未校准）设置到最大增益。如果噪声电平大于全屏幅度的 5%，降低增益，直至噪声电平为全屏幅度的 5%。调节输入信号幅度使 TOFD 仪器显示的信号幅度达到全屏幅度的 10%，测量输入信号的电压 V_{\min} （测量时要适当考虑外部标准衰减器的设置）。

注：如果门控信号发生器不能提供足够低的电压，应将 TOFD 仪器重新设置到大于最小增益 20dB 的电平并对测结果进行修正。

可用的动态范围由（3）式计算，单位为 dB：

$$20\log_{10}\left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}}\right) \quad (3)$$

若式中 V_{\min} 低于输入等效噪声 V_{ein} 时，动态范围应由（4）式计算，单位为 dB：

$$20\log_{10}\left(\frac{V_{\max}}{V_{\text{ein}}}\right) \quad (4)$$

7.5.4 放大器的频率响应

将 TOFD 仪器设置为一发一收工作方式，将扫描范围中间值。

使用附录 C 中图 C.4 所示的仪器配置方式，连接输入信号到 TOFD 仪器接收端。调节 TOFD 仪器的输入信号为 $\pm 1V$ 峰-峰电压，调节衰减器（增益控制器），以产生一个全屏幅度 80% 的信号，记录接收器的增益设定值。

依次选取频带设定值，在 0.1MHz 至 25MHz 范围内，改变输入信号的频率，记录每个频带在 TOFD 仪器显示最大信号幅度时所对应的频率 f_{\max} 以及这个电平的幅度。在此过程中，保证放大器不饱和，且在示波屏上显示的输入信号幅度保持恒定。将经过校准的外部衰减器降低 3dB，从而提高所显示的信号幅度。

以小于标称频带带宽 5% 的增量，依次从 f_{\max} 提高和降低频率，并记录 TOFD 仪器显示的信号恢复到原先全屏幅度 80% 时所对应的上限频率值 f_u 和下限频率值 f_l （-3dB 点）。返回到初始值，再次确认经过校准的外部衰减器的输入信号是恒定的。

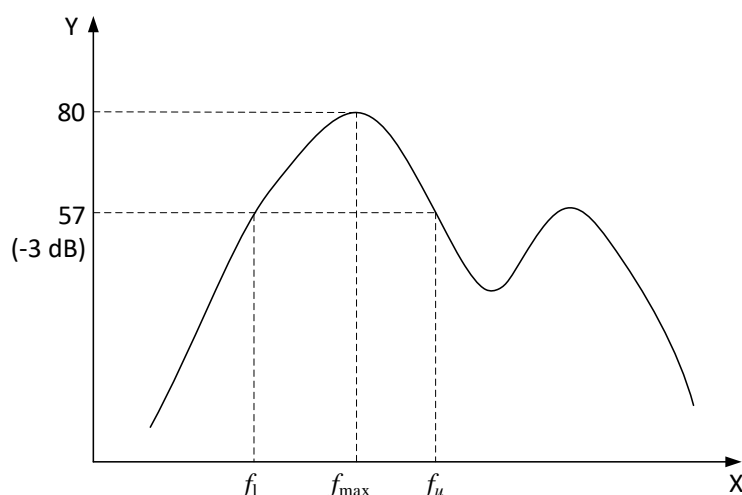


图3 放大器频带响应特征

计算频带的中心频率：

$$f_0 = \frac{f_u - f_l}{2} \quad (5)$$

计算相对带宽：

$$\Delta f = f_u - f_l \quad (6)$$

7.5.5 等效输入噪声

TOFD仪器置一发一收工作状态，采用附录C中图C.4所示的仪器配置方式，采用任意波形发生器依次选择每个频带的中心频率，测量等效输入噪声。

将TOFD仪器的所有增益控制器（包括可变增益控制器）调至最大增益，断开输入信号，记录TOFD仪器显示屏上的噪声电平。

把增益降低40dB，重新连接输入信号。调节经过校准的外部衰减器和（或）输入信号电平直至漂移的射频信号电平与上述噪声电平幅度相同。用示波器测量输入信号的峰-峰电压 V_{in} 和经过校准的外部衰减器的衰减量S，单位为分贝（dB）。按公式（7）计算等效输入噪声 V_{ein} ，单位为伏：

$$V_{ein} = \frac{V_{in}}{10^{\frac{S+40}{20}}} \quad (7)$$

按公式（8）计算每平方根带宽的噪声：

$$n_{in} = \frac{V_{ein}}{\sqrt{f_u - f_l}} \quad (8)$$

式中， f_u 和 f_l 为按7.5.4测出的-3dB点的上限和下限频率。

7.5.6 接收器输入阻抗

将TOFD仪器分别置一发一收工作方式和单收发工作方式，用阻抗分析仪测定接收器输入阻抗的实数部和虚数部。在“单”探头工作方式测量接收器输入阻抗时，应停止发射脉冲。应在信号频率为4MHz，将TOFD仪器的增益控制器分别设置在最小（ R_{\min} ， C_{\min} ）和最大（ R_{\max} ， C_{\max} ）增益下进行测量。TOFD仪器如果装有阻尼控制器，在测试过程中宜将其设置在最小值的档位。

通常，接收器的输入阻抗能由一个输入电阻和一个并联电容确定。

对应的最大增益和最小增益时，计算输入阻抗的实数部变化：

$$\Delta R = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max}} \quad (9)$$

对应的最大增益和最小增益时，计算输入阻抗电容部分变化：

$$\Delta C = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max}} \quad (10)$$

7.5.7 衰减器精度

使用下述的一个参考信号，将TOFD仪器的衰减器与匹配的经过校准的外部标准衰减器进行比较。使用附录C中图C.4所示的测试设备，在按7.5.4测出的对应每个频带的中心频率 f_0 上进行比较。

将TOFD仪器的衰减器调至中间值，并在经过校准的外部衰减器设定值比TOFD仪器的增益设定值高10dB的情况下，调整信号发生器的输入参考信号使显示的信号为全屏幅度的80%。以适当的增量降低TOFD仪器的衰减量，并调整经过校准的外部标准衰减器使其保持信号为一个恒定幅度来检查TOFD仪器衰减器的准确度。

检查分三个步骤：第一步，如果可能的话，在1dB范围内，以最小的增量，检查微调衰减器准确度；第二步，在整个范围内以最小增量（但不小于1dB），检查细调衰减器的准确度；第三步，在整个范围内以每一种增量检查粗调衰减器的准确度。记录两个衰减器之间大于验收标准规定值的偏差，即为TOFD仪器衰减器的示值误差。

7.5.8 幅度线性

用经过校准的外部衰减器通过改变参考输入信号幅度并观测和记录TOFD仪器显示信号幅度的变化情况，来检测TOFD仪器显示屏的幅度线性。

在开始检测时，记录增益的初始设定值。以给定的间隔从全屏幅度的0dB至26dB检查线性。在按7.5.4测得的每个频带中心频率上重复进行测试。

采用附录C中图C.4所示的仪器配置方式，将经过校准的外部衰减器调至2dB，并调节TOFD仪器输入信号的幅度和增益，使该信号的幅度为全屏幅度的80%。在不改变TOFD仪器增益的情况下，将经过校准的外部衰减器设置到对应的设定值。对应每一个设定值，测量TOFD仪器显示屏的信号幅度。

表3 幅度线性

衰减器设定值 (dB)	信号幅度理论值 (%FSH)	信号幅度测量值 (%FSH)	幅度显示误差 (%FSH)
1	90		
2	80		
4	64		
6	50		
8	40		
12	25		
14	20		
20	10		
26	5		

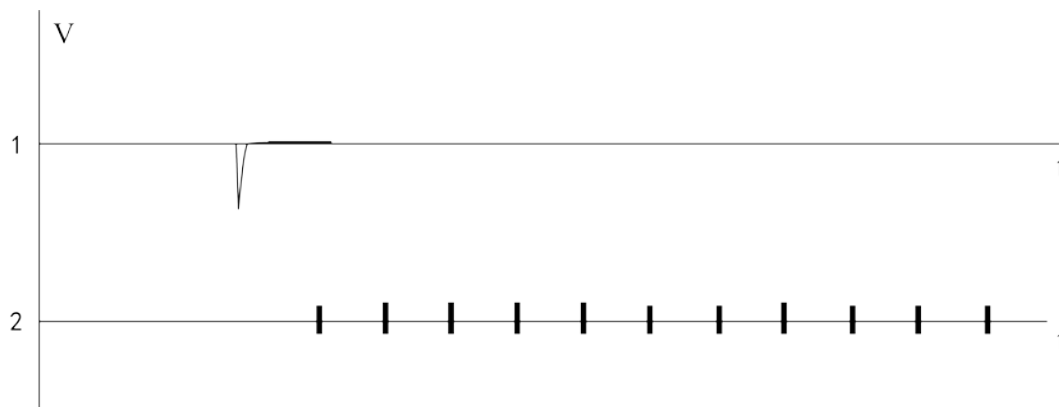
每次测量幅度线性误差性能值取所有误差值中绝对值最大值。

各个设定频带的多次测量幅度线性误差性能值取各次测量性能值的最大值。

7.5.9 时基线性

本项目测试超声检测仪的时基数字化采样和读数的线性误差。

将 TOFD 仪器通过信号发生器提供 11 个等间距的正弦波脉冲串与其在 TOFD 仪器时基线上所指示的各信号所在位置对应的刻度值相比较，来测量 TOFD 仪器的时基线性。采用附录 C 中图 C.4 所示的仪器配置方式，使其产生一个如图 4 所示的具有 11 个等间距的正弦波脉冲串检测信号。选择每个频带的实测的中心频率 f_0 ，将 TOFD 仪器的增益控制器设置在中间值并调整经过校准的外部衰减器和信号发生器输出的信号幅度，使 TOFD 仪器显示的测试信号幅度为全屏幅度的 80%。调整测试信号的延时，使第三个信号的前沿对准时基线全屏宽度的 20%，第 9 个信号的前沿对准时基线全屏宽度的 80%。



图中：1—发射脉冲；2—测试信号。

图4 用于检测时基线性的信号时序图

记录其余 9 个信号前沿超过验收标准规定允差的偏差值。使用连续校准控制器的中间位置，对分档的水平校准控制器的所有档位重复测量。并要使用分档校准控制器的中间档位，对连续水平校准控制器的两端位置也要重复进行测量。

7.5.10 净增益

采用附录C中图C.4所示的仪器配置方式,连接TOFD仪器,将信号发生器输出一个参考信号(参考信号电压为仪器制造厂给定的电平电压),调节TOFD仪器的增益,将TOFD仪器屏幕的参考信号调至满屏高度100%,然后将增益调至最大,测量TOFD仪器的净增益。

8. 探头性能要求

8.1 测试设备要求

仪器检验用器具主要如下:

- a) 数字示波器: 带宽 ≥ 100 MHz; 通道数不低于2个; 最大采样率 ≥ 1 GS/s; 10dB高阻抗测试笔。
- b) 频谱分析仪: 最小带宽 ≥ 100 MHz, 或能够进行离散型傅立叶变换(DFT)的示波器。
- c) 高压脉冲发生器: 脉冲电压范围: 50V~200V, 电压精度 $\leq 5\%$; 脉宽范围: 50ns~500ns, 脉宽精度 $\leq 10\%$ 。
- d) 阻抗分析仪: 频率范围: 0.1MHz~30MHz; 阻抗范围: 25m Ω ~40M Ω ; 基本阻抗精度 $\leq 0.1\%$; 具备串联和并联阻抗、容抗、电感等基本参数。
- e) 电磁声探头和接收器: 频带范围: 0.1MHz~10MHz。
- f) 从0.05mm开始的塞尺。
- g) 试块及其他设备

①钢块材质应符合GB/T 19799.2规定,技术要求应满足JB/T 8428的规定。

②推荐使用具有不同半径(R)的半圆柱形钢试块,半径范围12~200mm,步进为 $R\sqrt{2}$ 。每个试块的厚度应等于或大于其半径,最大厚度为100mm。

③具有平行面的钢试块,侧面钻制3mm直径的孔。试块的尺寸应满足下列要求:

- 长度l, 高度h, 宽度w, 试块的侧面应不会对超声波束造成干扰;
- 孔的深度d1、d2 ... 至少有三个孔应落在近场以外;
- 孔间距离s, 横跨过孔的振幅应表现为两个相邻孔之间的波幅下落至少26dB。

④具有半球孔的钢试块,可用于分别测量垂直与水平面上的波束扩散。

⑤聚苯乙烯或者有机玻璃试块,材质应和实际检测用楔块材质保持一致,建议聚苯乙烯声速 2337 ± 20 m/s,有机玻璃声速 2700 ± 50 m/s。用于测试探头的射频脉冲回波。

8.2 物理状态及外观

目测探头外观的标识和装配情况,探头外观损坏会影响检测的稳定性。应使用直尺和塞尺测量探头接触面的平整度,其接触面的间隙应不大于0.05mm。

8.3 探头性能测试方法

8.3.1 中心频率和带宽

TOFD探头采用附录D中图D.1所示的测量装置,将高压脉冲发生器产生一个50V~200V的激励电压,高压脉冲发生器的发射脉冲宽度调至与探头频率相适应的数值,将探头放置于半圆柱体试块的

表面，可采用探头压块进行稳定。半圆柱面的半径应大于探头近场长度的1.5倍或在聚焦探头的聚焦范围内。采用数字示波器检测来自半圆柱体的回波，调制数字示波器合适的位置，得到探头射频脉冲波形，如图5所示。测量一次回波的脉冲射频波形的峰-峰电压和脉冲持续时间。

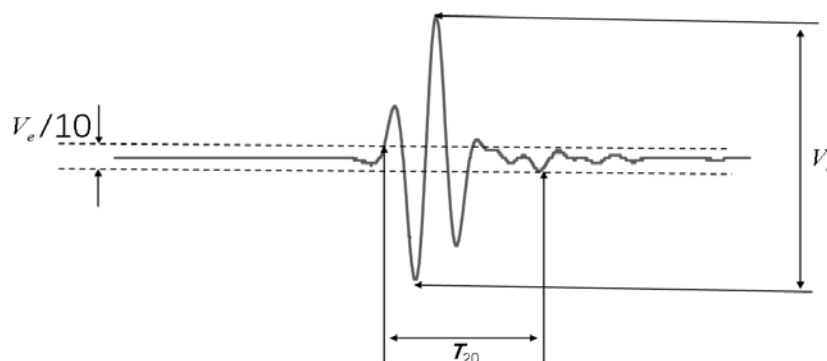


图5 探头射频脉冲波形

用频谱分析仪或者离散型傅里叶转换，对采集到的射频波形进行分析计算，频谱幅值最高点下降 6dB 对应的低端频率 f_l 和高端频率 f_u ，如图 6 所示。推荐绘制探头的频谱曲线并打印在探头证书里。

按如下公式计算-6dB中心频率 f_0 和-6dB相对带宽 Δf_{rel} ：

$$f_0 = \frac{f_u + f_l}{2} \quad (11)$$

$$\Delta f_{rel} = \left(\frac{f_u - f_l}{f_0} \right) \times 100\% \quad (12)$$

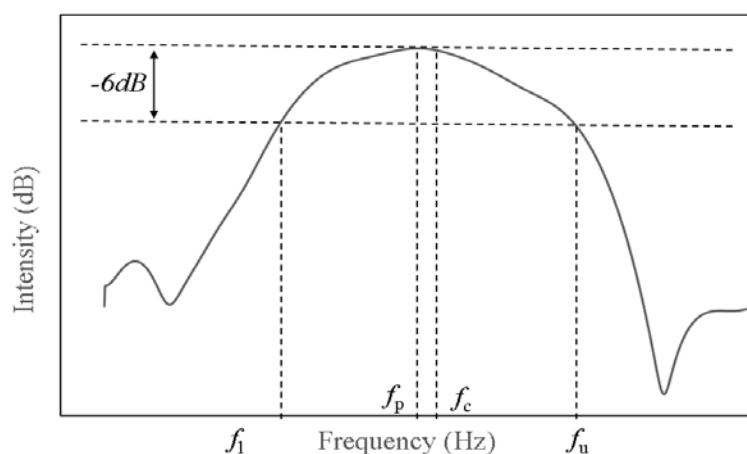


图6 探头频谱曲线、中心频率和带宽

8.3.2 相对脉冲回波灵敏度

使用与8.3.1相同的检测装置，使用高压脉冲发生器对探头进行激励，采用半圆柱体试块，半圆柱面的半径应大于探头近场长度的1.5倍或在聚焦探头的聚焦范围内。探头和试块（试块材料和实际检测楔块材料保持一致，根据探头的中心频率选取合适的试块厚度）耦合稳定，通过数字示波器采集试块底面的一次回波，即可得到探头射频脉冲波形，如图5示。

注：如波形显示失真，应配合相应的衰减器或者仪器自带接收器调整为合适的增益值，示波器屏幕显示的时间应大于两倍的脉冲持续时间，并使其回波最大值在屏幕内居中显示。

相对脉冲回波灵敏度按下式确定：

$$S_{rel} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_e}{V_a} \right) \quad (13)$$

式中 V_e 为上述试块底面一次回波的峰-峰电压，

V_a 为施加到探头上的峰-峰电压或者同样设置条件下50欧姆负载两端的输出电压。

注：不同测试条件下探头的相对脉冲回波灵敏度会有差异，因为探头灵敏度受耦合条件、超声波信号发生器设置、电缆、试块参数等的因素所影响。因此，这些参数必须在探头证书中予以规定。

8.3.3 电阻抗或静电容

探头阻抗使用阻抗分析仪测定。将探头用高精度的电缆线连接到阻抗分析仪上，如电缆线是可更换的，应采用不超过100mm的电缆连接。对于有匹配电路的探头，例如有与换能器并联或串联电感线圈的探头，没有恒定阻抗或相位的频率间隔，因此需要用完整的阻抗相位曲线来表征探头的特性。

在以探头的中心频率为对称的一个频段内，测量阻抗模和相位相对频率的关系曲线，读取中心频率对应的阻抗模即为电阻抗。

将探头用符合要求的电缆线直接连接到阻抗分析仪或者其他电容测试仪器上，测量1kHz时换能器的电容即为静电容。

8.3.4 声束扩散角

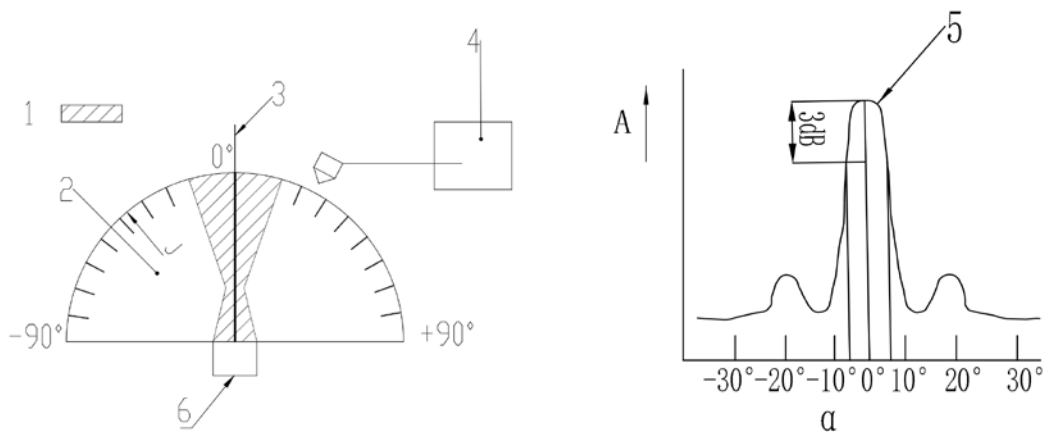
可采用不同的方法测量指向性：

a) 使用电磁声（EMA）接收器

如图7所示，将探头耦合在半圆试块上。用电磁声（EMA）接收器在半圆试块上扫描测量。绘制信号幅度与电磁声接收器扫描角度的关系图，绘制图应包括主瓣和相邻的副瓣。主瓣-3dB位置时的角度即为扩散角（图7）。

扩散角应在两个垂直平面上进行测试。

对于矩形换能器，这些平面应与换能器较大的边（a）和较小的边（b）平行。



1——声束；2——半圆试块；3——轴；4——EMA接收器；5——主瓣；6——超声探头；A——幅度（dB）。

图7 声束散扩角和声束角的测量

b) 使用带有横孔的试块

如图8所示，用平行侧面的不同深度上钻有3mm横孔的试块，测试两个相互垂直平面内的扩散角和副瓣。在最后绘制的图中标出每个孔取得最大的反射回波探头的位置和下降6dB时的前后位置和副瓣位置。

通过最大回波的直线与垂直于试块表面直线夹角得出声束角。沿声束边沿点拟合的直线与声束角得出该平面-6dB时的扩散角。

声束依次对每个孔进行扫描时，应注意探头移动时回波幅度的变化情况。

如从两个或多个孔的幅度横剖面中测出一个副瓣时，使副瓣最大化，绘制相对于主瓣的副瓣位置，并记录相对于主瓣的副瓣幅度。

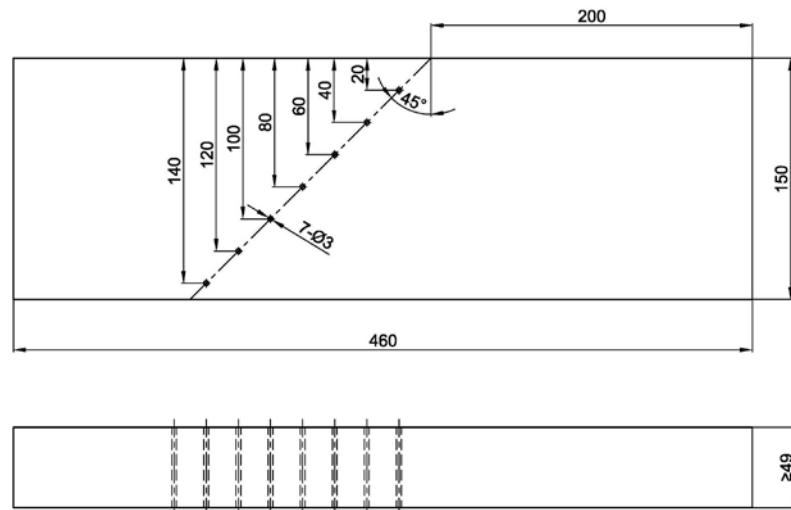


图8 3mm 直径横孔试块（尺寸单位：mm）

c) 使用带半球底孔的参考试块

如图9所示，在平行侧面不同深度处钻有直径为10mm的半球底孔的试块上测量两个垂直平面的扩散角。在最后绘制的图中，标出在每个孔接收到最大回波处的探头位置以及下降6dB时的前后位置。

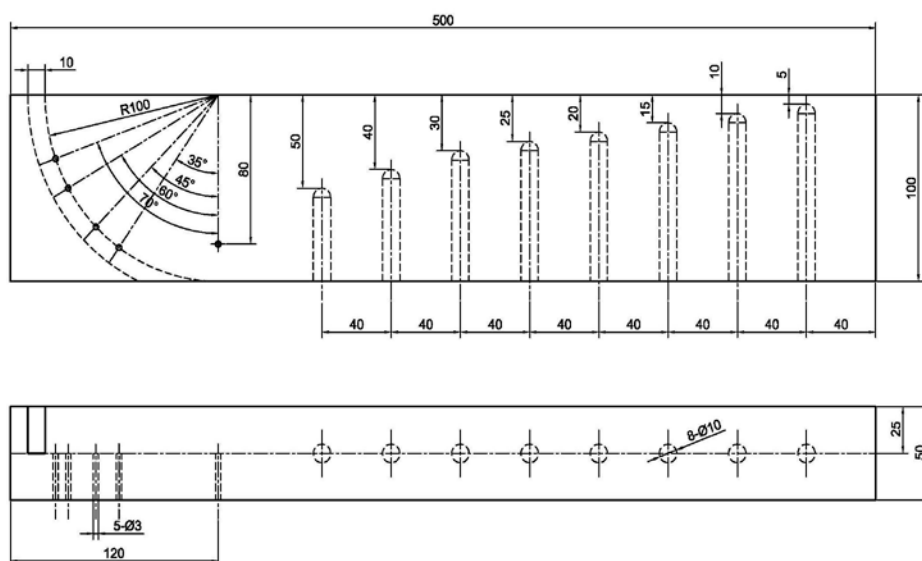


图9 横孔与半球孔的钢试块（尺寸单位：mm）

8.3.5 偏向角和偏移

直探头几何中心点与测量到的声中心点之间的距离称作偏移（图10）。

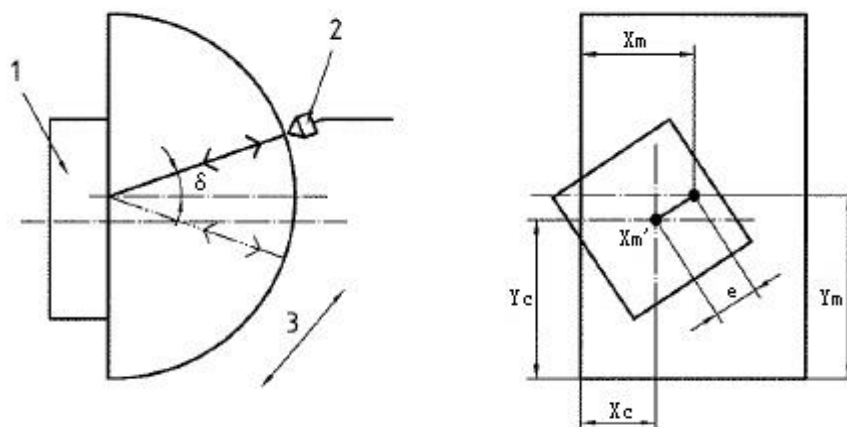
1- 超声探头；2- EMA接收器；3- 回波；e- 偏移； δ -倾斜角

图10 探头的倾斜角和偏移

a) 采用电磁-声（EMA）接收器

使用图10 的装置测量倾斜角与偏移。

首先把探头连接到设置为回波模式的超声仪器。在半圆柱试块上转动和移动探头使试块的多次回波序列的回波都是最大，此时意味着声束垂直投射到圆柱表面，则探头的声中心点在试块的中心线上。

把探头停止在此位置上，然后仅以探头作为发射器，使用EMA作为接收器。

在圆柱表面移动EMA接收器找到声束第一次投射到圆柱表面的最大信号位置，测量到的角度即为倾斜角 δ 。

根据探头几何中心点坐标 X_c 和 Y_c 与试块中心线坐标 Y_m 及EMA接收器坐标 X_m 得到偏移 e ：

$$e = \sqrt{(X_m - X_c)^2 + (Y_m - Y_c)^2} \quad (14)$$

b) 采用带有横孔的参考试块

从两个垂直方向测量位移 X_m 和 Y_m ，可以采用8.3.4中同样的声束轴线测量方法。

如果 X_c 和 Y_c 是探头几何中心点的坐标，则偏移 e 可以利用式 (14) 计算出来。

从两个垂直方向测量倾斜角 δ_x 和 δ_y 。计算得到的角度 δ 为：

$$\delta = \arctan^{-1} \left(\frac{\sin \delta_y}{\sin \delta_x} \right) \quad (15)$$

9. 仪器-探头组合性能要求

9.1 测试设备要求

仪器检验用器具主要如下：

- 数字示波器：带宽不小于 100 MHz；通道数不低于 2 个；最大采样率 $\geq 1\text{GS/s}$ ；10dB 高阻抗测试笔。
- 标准衰减器：总衰减量 $\geq 100\text{ dB}$ ；最小步进 $\leq 1\text{ dB}$ ；输出阻抗 $50\ \Omega$ ；当信号频率在 15 MHz 以内时，任意 10 dB 范围的累积误差应在 $\pm 0.3\text{ dB}$ 以内。
- 阻值为 $50\ \Omega$ ，最大允许相对误差为 $\pm 1\%$ 的无感电阻。
- CSK-IA、DB PZ20-2、声束扩散角测定试块，见附录 E。钢块材质应符合 GB/T 19799.2 规定，技术要求应满足 JB/T 8428 的规定。

9.2 垂直线性

本测试是为了检查TOFD检测系统增益线性和衰减器准确度两者的综合效果。测试时使用DB-P(Z20-2)试块，TOFD仪器的抑制置“0”或“断”，其他调整取适当值。

将探头压在DB PZ20-2标准试块上，中间加适当的耦合剂，以保持稳定的声耦合，并将平底孔的回波调至屏幕上时基线的适当位置。调节仪器的衰减器或探头位置，使荧光屏上显示的 $\Phi 2\text{mm}$ 平底孔回波幅度为100%满刻度，且衰减器至少有30dB的衰减余量。

调节外部标准衰减器，以每次2dB的增量调节衰减器，每次调节后用满刻度的百分值记录回波幅度，一直继续到衰减26dB，测量准确度为0.1%，测试结果记录表4。实测值与波高理论值之差为差值，从表4中取最大正偏差 $d(+)$ 与最大负偏差 $d(-)$ 之绝对值之和为垂直线性误差 Δd （以百分值计），由式 (16) 给出：

$$\Delta d = |d_{(+)}| + |d_{(-)}| \quad (16)$$

表4 垂直线性测试记录

衰减量 (dB)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
----------	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

波高理论值(%)	100	79.	63.	50.	39.	31.	25.	20.	15.	12.	10.	7.9	6.3	5.
测量值(%)														
偏差(%)														

9.3 水平线性

本测试是检查TOFD检测系统的时基线性，测试时使用CSK-IA或DB PZ20-2标准试块，试块的厚度原则上相当于探测声程的1/5。将TOFD仪器的抑制置“0”或“断”，其他调整取适当值。

将探头压在标准试块上，中间加适当的耦合剂，以保持稳定的声耦合。调节仪器的增益和扫描控制器，使屏幕上显示出第6次底波。

当底波 B_1 和 B_6 的幅度分别为50%满刻度，将它们的前沿分别对准刻度0和100（设水平刻度为100格）。 B_1 和 B_6 的前沿位置在调整中如相互影响，则反复进行调整。

再依次分别将底波 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 调到 50% 满刻度，并分别读出取底波 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 的前沿与刻度 20、40、60、80 的偏差 α_2 、 α_3 、 α_4 、 α_5 ，然后取其中最大的偏差值 α_{\max} 。图 11 中的 $B_1 \sim B_6$ 是分别调到同一幅度，而不是同时达到此幅度。水平线性误差 ΔL 由式（17）给出：

$$\Delta L = |\alpha_{\max}| \% \quad (17)$$

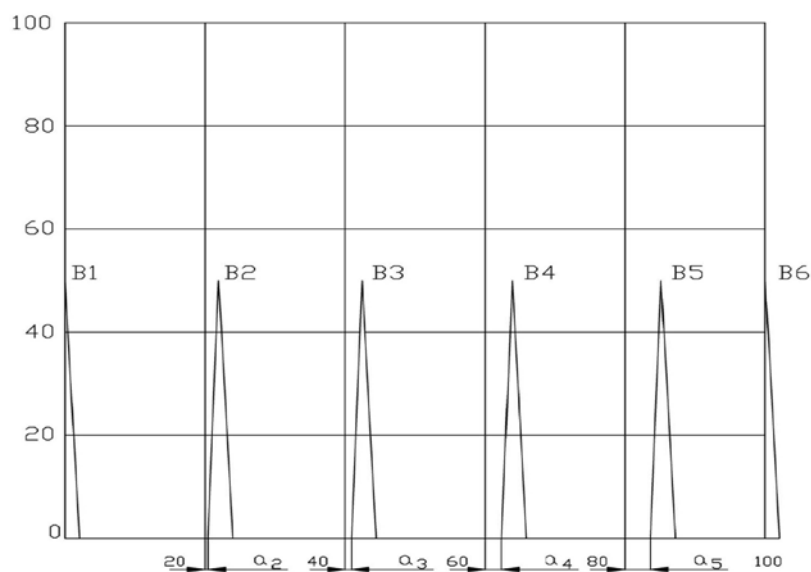


图11 水平线性测试的底波显示

9.4 灵敏度余量

本测试是检查 TOFD 检测系统灵敏度的变化情况。测试时使用 DB-P (Z20-2) 试块，检测仪的抑制置“0”或“断”，其他调整取适当值。

将 TOFD 仪器的增益调至最大，然后调节衰减器或增益，使电噪声电平降至 10% 满刻度，并记下此时衰减器的读数 S_0 ，将探头压在试块上，中间加适当的耦合剂，以保持稳定的声耦合，移动探头，使平底孔回波最大，调节衰减器，使平底孔回波高度降至 50% 满刻度。记下此时衰减器的读数 S_i ，则探伤灵敏度余量按式（18）计算：

$$S_{rel} = S_i - S_0 \quad (18)$$

9.5 组合频率

本测试是检查 TOFD 仪器连接探头的组合频率特性。采用附录 D 图 D.1 探头电气性能测试配置方式，测试时将探头对准 DB PZ20-2 标准试块侧面（80mm 或 40mm）或 CSK-1A 试块，使第一次试块的底波幅度达到 60%~80% 满屏刻度之间，用示波器观察底波的扩展波形，如图 12 所示。采用回波第 2 个波峰值点和第 5 个波峰值点的时间差即三个周期的时间 T_3 。

计算回波频率：

$$f_e = \frac{3}{T_3} \quad (19)$$

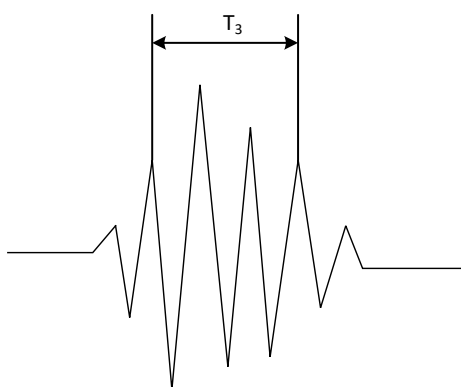


图12 组合频率测试示意图

9.6 -12dB 扩散角

本测试是检查 TOFD 仪器连接探头-12dB 扩散角特性。采用图 13 所示的声束角度测定试块进行测量，测量方法如下：

- 调节仪器到自发自收状态，将需要测量的探头放置在 1 位置，前后调节探头的位置和方向，找到最大反射波幅，此时保持探头不动；
- 调节仪器到一发一收状态，将另一接收探头放在 2 位置沿弧面移动，找到最大波幅，将最大波幅调至仪器满屏的 80%，此时探头 2 位置对应的角度刻度值 α_0 即为测试探头的发射角；
- 保持位置 1 的测试探头不动，向下移动 2 位置探头，当反射波幅降低至 20% 满屏高度时，记下探头 2 的位置角度值 α_1 ，此角为下扩散角；
- 保持位置 1 的测试探头不动，向上移动 2 位置探头，反射波幅会逐渐升高至 80%，继续向上移动，波幅会降低，当反射波幅降低至 20% 满屏高度时，记下探头 2 的位置角度值 α_2 ，此角为上扩散角。

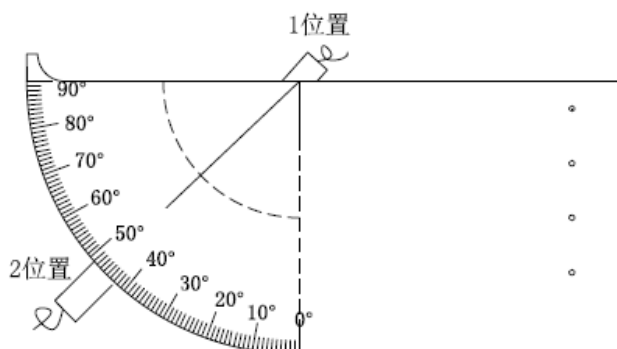


图13 声束扩散角测量

10. 技术要求

10.1 TOFD 仪器技术要求

表5 TOFD仪器性能评价要求

序号	性能		指标要求
1	稳定性要求	(1)预热后的稳定性	①参考回波信号幅值的变化 \leq 满屏高度的 3% ②参考回波信号时基线位置的变化 \leq 满屏宽度的 1%
		(2)显示抖动性	①参考信号幅值的变化 \leq 满屏高度的 3% ②参考信号时基线位置的变化 \leq 满屏宽度的 1%
		(3)相对电压变化的稳定性	①参考信号幅值的变化 \leq 满屏高度的 3% ②参考信号时基线位置的变化 \leq 满屏宽度的 1%
		(4)相对温度变化的稳定性	①温度每隔 10°C 变化, 参考信号幅值的变化 \leq 满屏高度的 3% ②温度每隔 10°C 变化, 参考信号时基线位置的变化 \leq 满屏宽度的 1%
2	发射性能指标要求	(5)发射脉冲重复频率	发射脉冲重复频率最大值应不低于 500Hz; 实测值与设定值之间的偏差 \leq 设定值的 10%
		(6)发射脉冲电压	发射脉冲电压应大于或等于 200V; 实测值与设定值 (带负载, 即 V_{50}) 之间的偏差 \leq 设定值的 20%
		(7)发射脉冲反冲	发射脉冲反冲实测值 $<$ 发射脉冲电压峰-峰值的 8%
		(8)发射脉冲宽度	发射脉冲宽度可调范围至少包括 50ns~500ns; 调节步长应不大于 10ns; 方波脉冲: 实测值与设定值之间的偏差 \leq 设定值的 10%
		(9)发射脉冲上升时间	实测发射脉冲上升时间的最大值 \leq 15ns
		(10)有效输出阻抗	有效输出阻抗 \leq 50 Ω

3	接收性能指标要求	(1)串扰	串扰值 $>50\text{dB}$
		(2)发射脉冲后盲区	发射脉冲后盲区 $<1.0\mu\text{s}$
		(3)动态范围	可用的动态范围 $>90\text{dB}$
		(4)放大器频率响应	①中心频率相对标称值偏差应 $\pm 5\%$ 以内，带宽相对标称值偏差应在 $\pm 10\%$ 以内 ②接收部分频带范围按 -3dB 测量应包括： $0.5\text{MHz}\sim 15\text{MHz}$
		(5)等效输入噪声	对每个频带的每平方根宽带噪声都应满足： $N_{in}<80\times 10^{-9}$ 伏每平方根赫兹
		(6)接收器输入阻抗	①仪器调至最大增益时，输入阻抗的实数部 R_{max} 应满足： $50\Omega\leq R_{max}\leq 1\text{K}\Omega$ ，虚数部分应满足： $C_{max}\leq 150\text{pF}$ ； ②对应的最大增益和最小增益时，输入阻抗实数部分应满足： $(R_{max}-R_{min})/R_{max}<0.1$ ，输入阻抗电容部分应满足： $(C_{max}-C_{min})/C_{max}<0.15$
		(7)衰减器精度	①在任意连续 20dB 范围内，衰减器累积误差的 $\leq 1.7\text{dB}$ ； ②在任意连续 60dB 范围内，衰减器累积误差 $\leq 3\text{dB}$
		(8)幅度线性	幅度线性的最大偏差 $\leq \pm 2\%$
		(9)时基线性	参考信号刻度值与理想位置值的偏差 $\leq \pm 1\%$
		(20)净增益	实测净增益 $\geq 60\text{dB}$

10.2 TOFD 探头技术要求

表6 超声检测用探头性能指标要求

序号	性能	指标要求	
1	基本性能要求	(1)中心频率	实测的中心频率与标称频率的偏差 \leq 标称频率的 10%
		(2)带宽	实测的 -6dB 带宽与标称值的偏差 \leq 标称值的 15% ；窄脉冲探头宽带：实测的 -6dB 频带相对宽度 $\geq 60\%$
		(3)电阻抗或静电容	实测的阻抗模或静电容与标称值的偏差 \leq 标称值的 20%
		(4)相对脉冲回波灵敏度	实测的相对脉冲回波灵敏度与标称值的偏差 $\leq 3\text{dB}$
		(5)脉冲宽度	实测的脉冲宽度与标称值得偏差 \leq 标称值的 25% ，其中宽带窄脉冲探头直通波按峰值下降 20dB 测量的脉冲持续时间应不超过两个周期
2	单晶直探头声	(1)束扩散角	实测的声束扩散角与标称值的偏差 \leq 标称值的 10% 或 2° （取偏差大者）

	束性能	(2) 偏向角和偏移	偏向角 $\leq 2^\circ$ ，距探头中心点偏移 $\leq 1\text{mm}$
--	-----	------------	--

10.3 组合性能技术要求

表7 超声检测用探头性能指标要求

序号	性能	指标要求
1	垂直线性	垂直线性偏差 $\leq 5\%$
2	水平线性	水平线性偏差 $\leq 1\%$
3	组合频率	仪器和探头的组合频率与探头标称频率的偏差 $\leq \pm 10\%$
4	灵敏度余量	灵敏度余量 $\geq 42\text{dB}$

10.4 安全要求

TOFD检测系统的安全性、环境适应性、电磁兼容性以及可靠性等试验，可参考以下技术标准。

表8 TOFD仪器安全性能要求

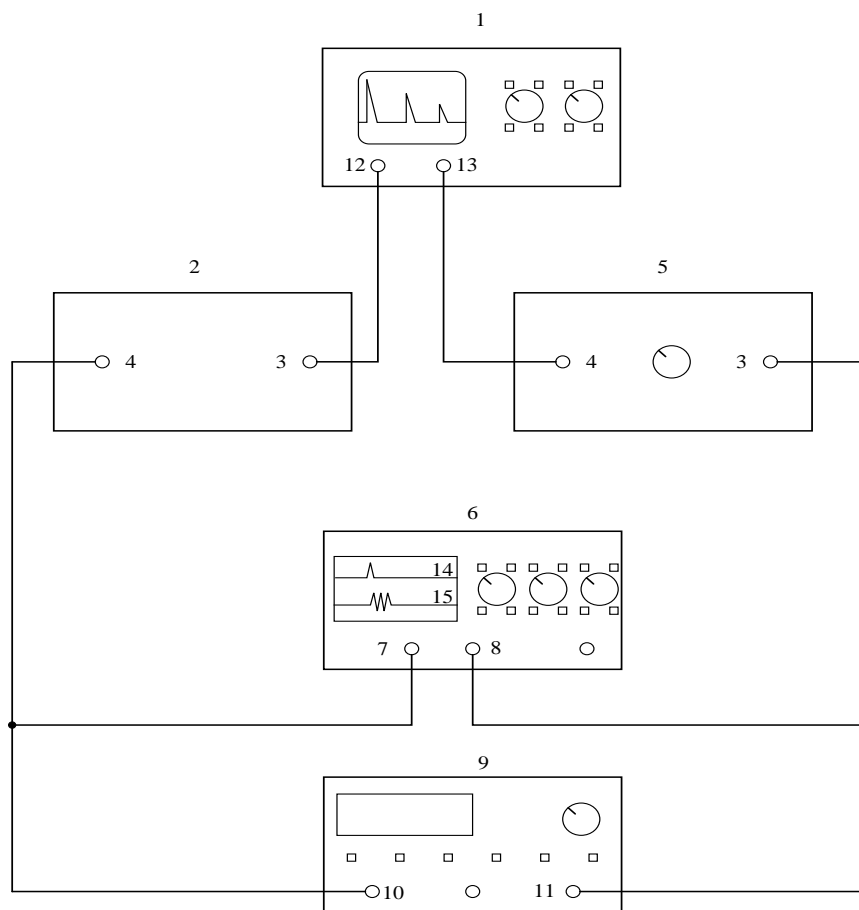
序号	性能	指标要求
1	安全性	GB/T 4793.1 技术要求
2	温度试验	GB/T 6587 第 5.9.1 条 II 组的要求
3	湿度试验	GB/T 6587 第 5.9.2 条 II 组的要求
4	振动试验	GB/T 6587 第 5.9.3 条 II 组的要求
5	冲击试验	GB/T 6587 第 5.9.4 条 II 组的要求
6	跌落试验	GB/T 6587 第 5.10 条 2 级的要求
7	电磁兼容试验	GB/T 18268.1 技术要求
8	包装运输试验	GB/T 6587 第 5.10 条的要求
9	外壳防护等级	GB 4208 技术要求

备注：有要求时，低气压、盐雾、液态水、爆炸性气体等特殊环境要求时，依据相关产品标准规定进行相关试验。

附录 A 稳定性测试配置

(规范性附录)

A.1 稳定性测试配置



说明:

1—TOFD 仪器；2—保护电路；3—输入端；4—输出端；5—标准衰减器

6—数字示波器；7—数字示波器通道1；8—数字示波器通道2

9—信号发生器；10—触发端；11—输出端

12—TOFD 仪器输出端；13—TOFD 仪器接收端

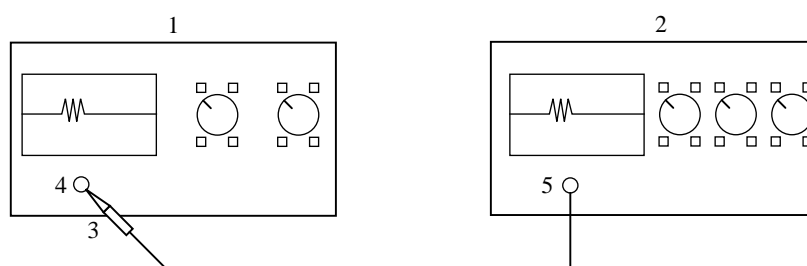
备注：温度变化稳定性测试时，将 TOFD 仪器放入恒温恒湿试验箱中，连接方式不变。当连接线缆长度过长而影响测试结果时，应考虑采用高精度防水电缆。

图A.1 测量稳定性的仪器配置方式

附录 B 发射部分测试配置

(资料性附录)

B.1 发射部分测试配置



说明：

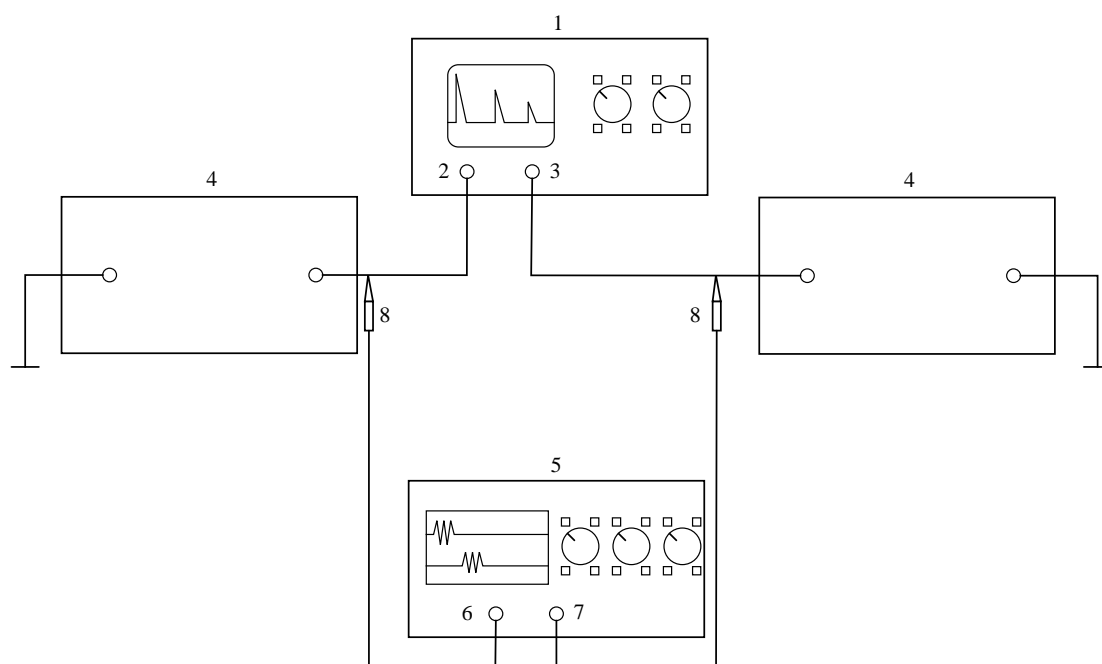
- 1— TOFD仪器
- 2— 数字示波器
- 3—10倍示波器探头
- 4— 50欧姆
- 5— 输入端

图B.1 测量发射性能测试的仪器配置方式

附录 C 接收部分测试连接图

(资料性附录)

C.1 串扰性能测试配置



备注：

1—TOFD仪器

2—发射端口

3—接收端口

4—50欧姆或75欧姆无感电阻

5—数字示波器

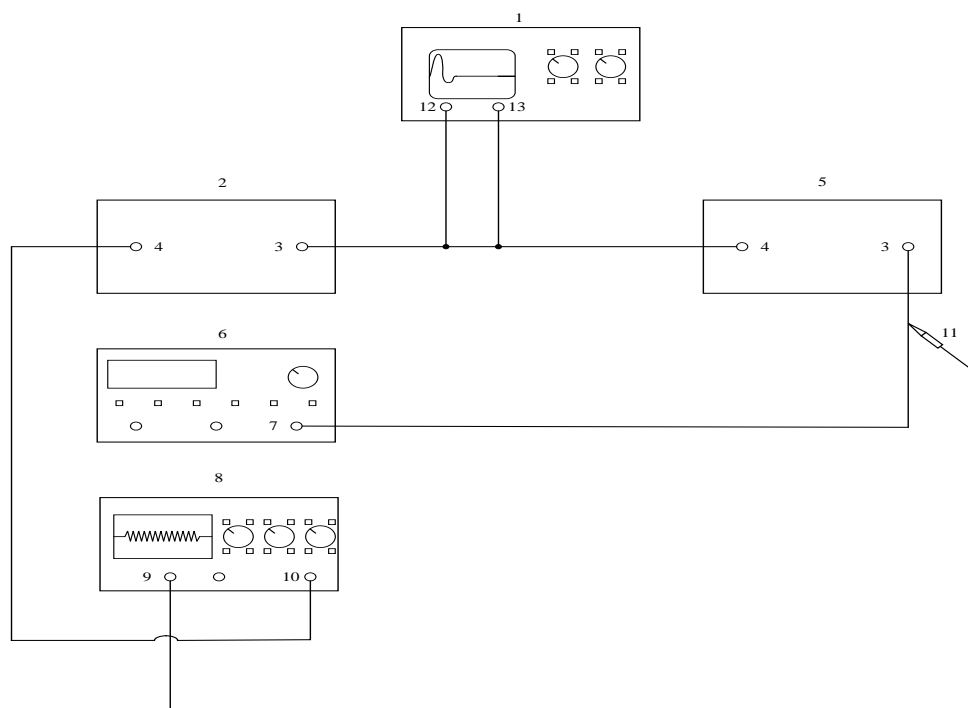
6—通道1

7—通道2

8—数字示波器测试探头

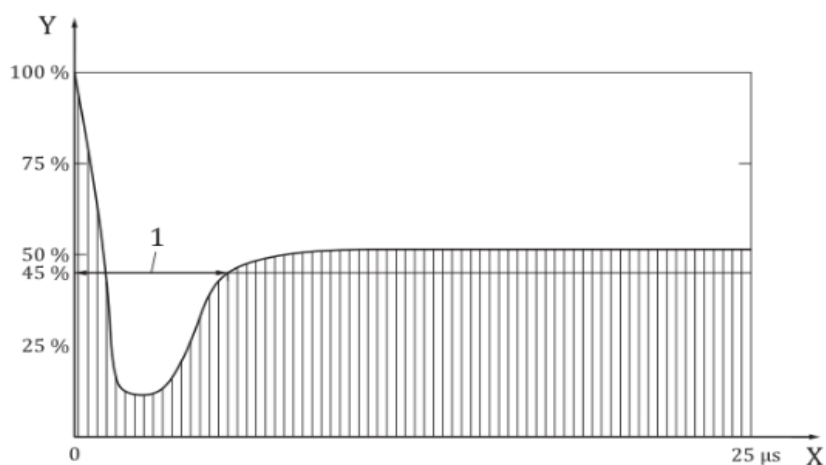
图C.1 测量串扰测试的仪器配置方式

C.2 发射脉冲后盲区测试配置



说明：1——TOFD检测；2——20dB固定衰减器；3——输入端；4——输出端；5——标准衰减器；6——信号发生器；7——输出端；8——数字示波器；9——示波器探头；10——示波器触发端；11——数字示波器探头；12——输出端；13——输入端。

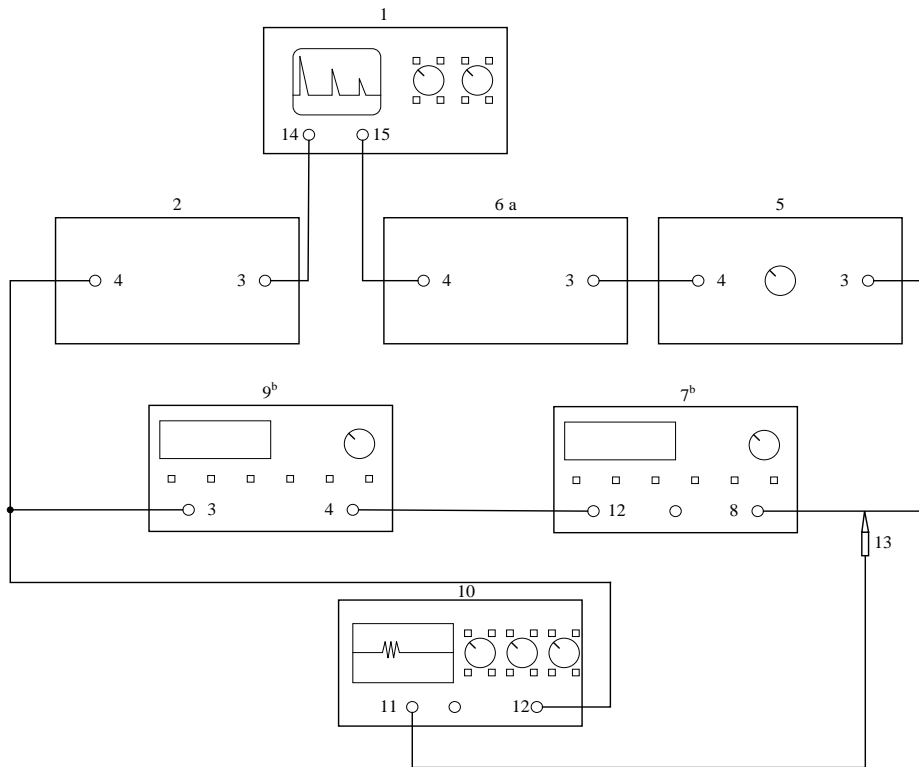
图C.2 测量发射脉冲后盲区的仪器配置方式



说明：1—盲区的时间；X—时间；3—全屏幅度。

图C.3 检测过程中在 TOFD 仪器显示屏上见到的用于测量发射脉冲后盲区的信号波形

C.3 测量接收器特性的通用配置。

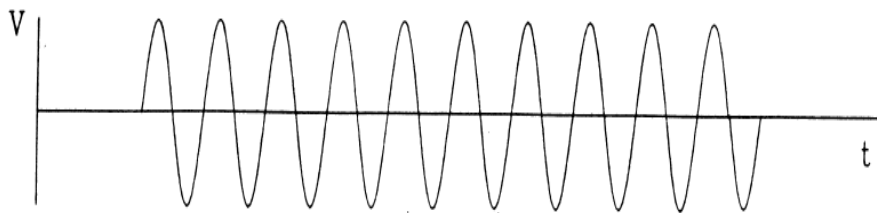


说明：1——TOFD仪器；2——固定衰减器；3——输出端；4——输入端；5——标准衰减器；6——50欧姆无感电阻；7——门控信号发生器；8——输出端；9——信号发生器；10——数字示波器；11——输出端；12——触发端；13——数字示波器探头；14——输出端；15——输入端）。

a——用于TOFD仪器的阻抗匹配。

b——门控信号发生器和信号发生器可根据采用的任意信号发生器特性进行选取。

图C.4 测量接收器性能的通用配置方式

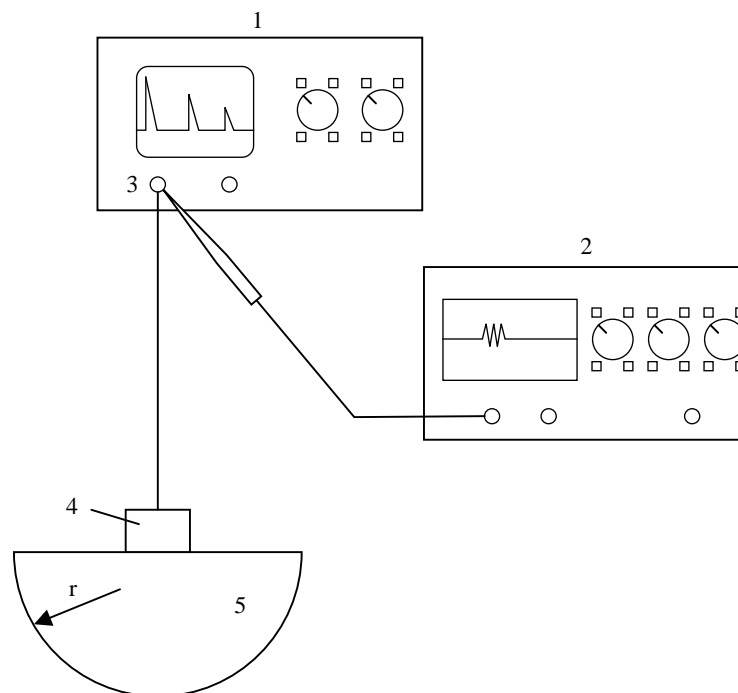


图C.5 采用通用的仪器配置方式产生的检测波形

附录 D 探头电气性能测试连接图

(资料性附录)

D.1 测量探头电气特性的通用配置



说明:

1—信号发生器或高压发射接收器；2—数字示波器；3—探头线；
4—被测探头；5—对比试块

备注：对于试块,可采用钢或聚苯乙烯或有机玻璃试块

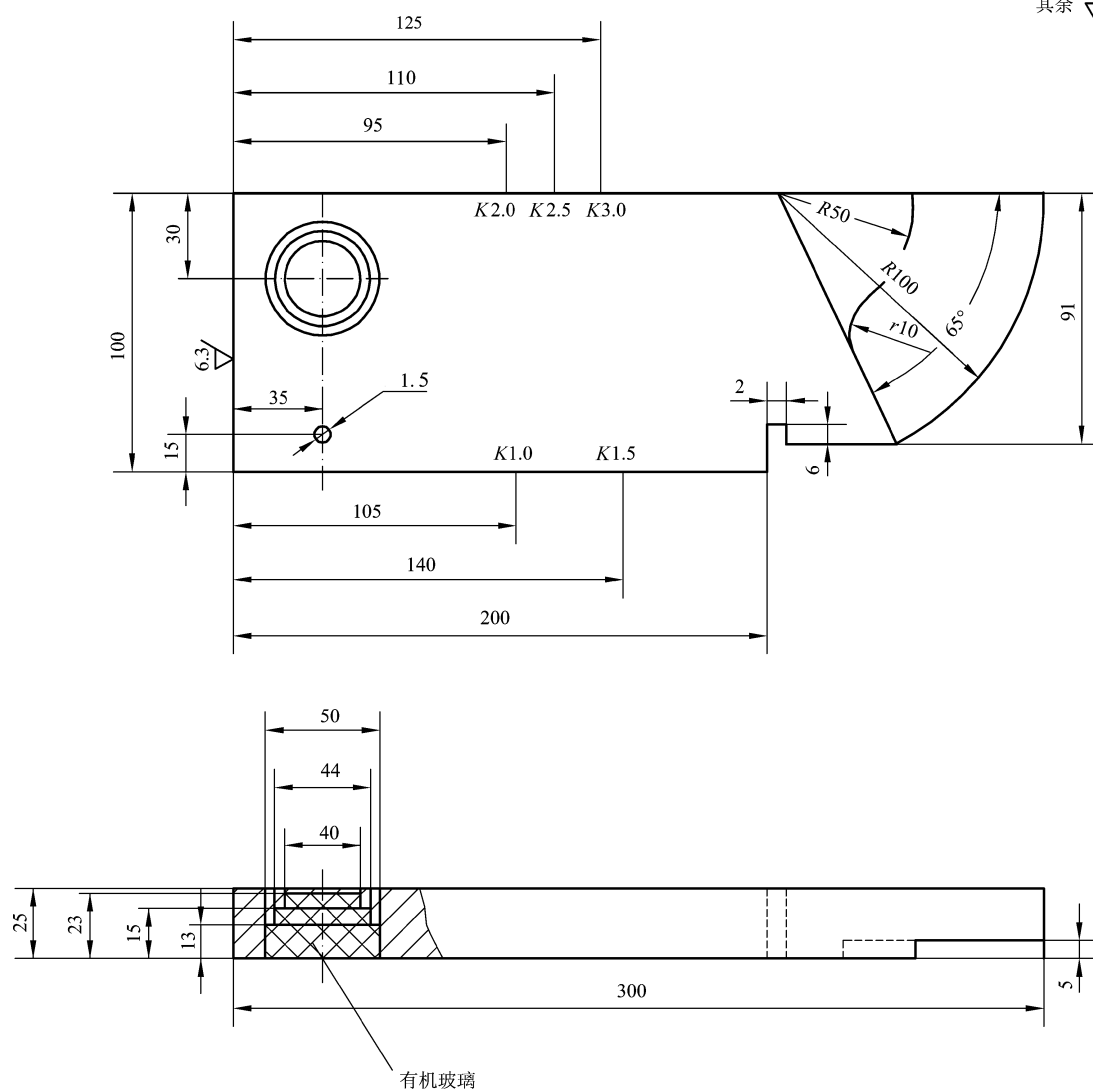
图D.1 测量探头电气性能的通用配置方式

附录 E 组合性能标准试块

(资料性附录)

E.1 CSK-IA 试块

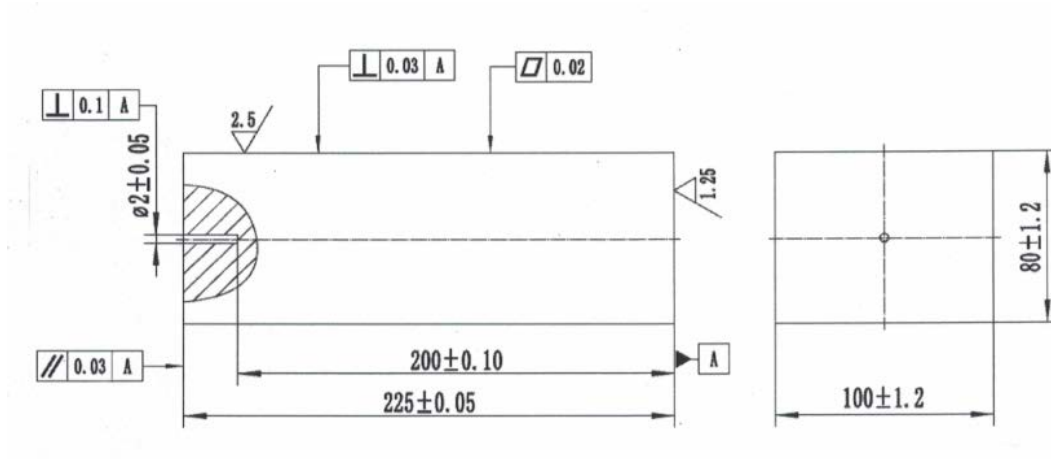
其余 $\frac{3.2}{\nabla}$



注：尺寸误差不大于 $\pm 0.05\text{mm}$ 。

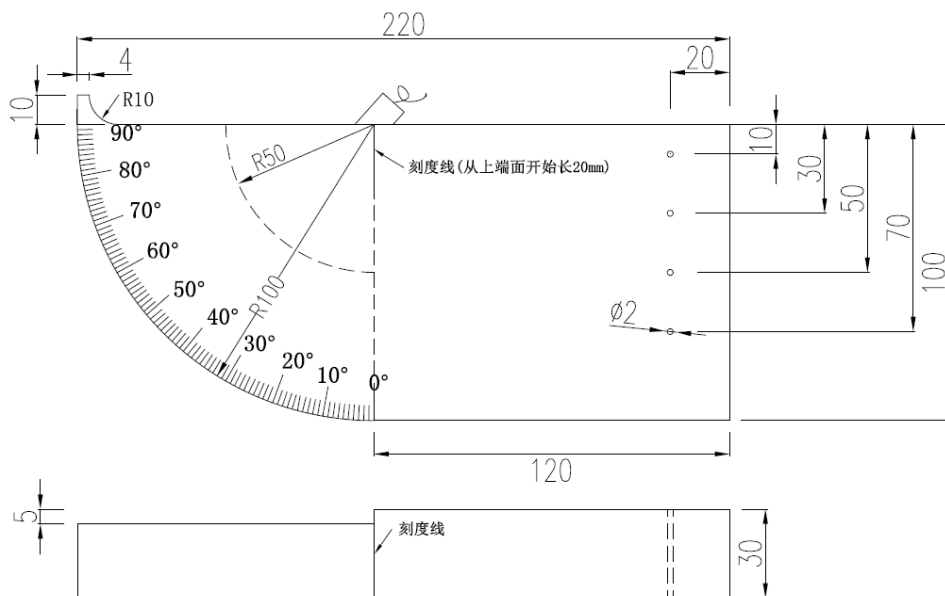
图E.1 CSK-IA 试块

E.2 DB PZ20-2 试块



图E.2 DB PZ20-2 试块

E.3 声束角度测定试块



图E.3 声束角度测定试块