

RT60 混响时间

使用 NTi Audio 声级计



混响时间是一个房间最重要的声学特性之一。不管是日常起居室，演出场所还是办公室，知道其混响时间都有非常重要的意义。

虽然在 ISO 3382 和 ASTM E2235 等标准中对混响时间有详细说明，我们还是为你介绍从技术原理到实际测量的一些细节。

XL3 和 XL2 分析仪以倍频程和 1/3 倍频程分辨率测量混响时间。

XL3
声级计



目录

1. 什么是混响时间	2
2. 测量方法	4
3. 测量配置	8
4. 测量流程	11
5. 报告	15
6. 更多测量提示	16

1. 什么是混响时间

混响

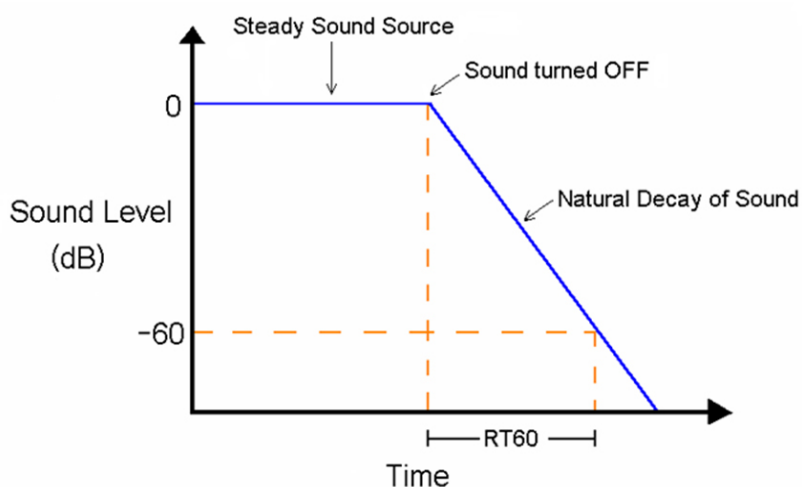
室内的声音会在各个表面,如地板、墙壁、天花板、窗户或桌子等不断反射,当这些反射声互相掺杂,就会出现人们熟悉的混响现象。混响是一系列反射声的集合。

混响时间和 RT60

混响时间是指在一个封闭的区域内,声源停止后声音“消逝”所需的时间。

RT60 是测量混响时间的客观方法,表示从声音突然停止到声压级降低 60 dB 所用的时间。T 或 RT60 也经常被用作混响时间的缩写。

下图解释了 RT60 测量的基本过程。



混响时间为何重要

混响是评价房间声学状态的核心参数之一。太多的混响对语言清晰度有不利影响。房间中的混响还会增强噪声,减弱房间的私密性。此外,在诸如建筑隔声和声功率等测量中,也需要知道混响时间才能计算吸声系数。

标准

RT60 混响时间测量通常由以下标准定义：

国标	国际标准	名称
GB/T 36075.1	ISO 3382-1	声学 室内声学参量测量 第 1 部分：观演空间
GB/T 36075.2	ISO 3382-2	声学 室内声学参量测量 第 2 部分：普通房间混响时间
GB/T 36075.3	ISO 3382-3	声学 室内声学参量测量 第 3 部分：开放式办公室
	ASTM E2235	隔声试验方法中衰减率测定的标准试验方法

混响时间实际测量的频率跨度为：

- 倍频程 63 Hz 至 8 kHz；
- 1/3 倍频程 50 Hz 至 10 kHz。

厅堂对每个频率的吸声效果不同，因此各个频率的 RT60 结果也不相同。房间内不同位置的 RT60 值各不相同。因此，最常见的是用各处测量的平均值作为结果。

2. 测量方法

根据激励声源和计算过程, 标准中主要描述了两种测量方法。

中断声源法

激励房间的宽带或窄带声源中断发声后, 直接记录声压级的衰变来获取衰变曲线并计算混响时间的方法。

实践中一般使用扬声器作为声源, 播放随机宽频信号, 如粉噪声信号, 声音以足够的声压级充满空间后随机中止。由此作为混响时间测量的声激励。

脉冲响应积分法

通过把脉冲响应的平方对时间反向积分来获取衰变曲线并计算混响时间的方法。

通常使用脉冲拍击器、发令枪、扫频信号等自身不产生混响且频谱宽度能够覆盖测量范围的信号作为激励。

根据实际测量的衰减大小, 混响时间测量方法又可以分为 T30、T20、T15 和 EDT (T10)。

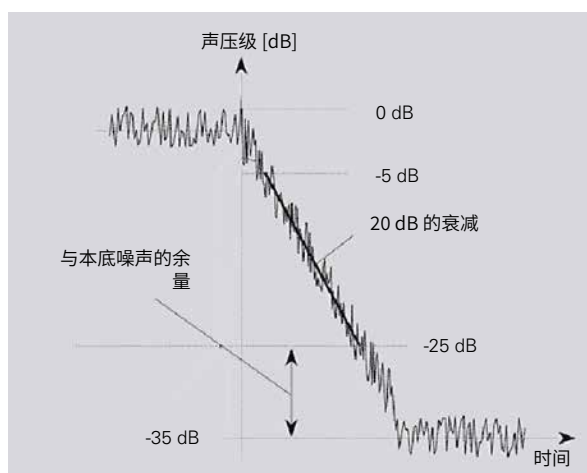
T20 和 T30 方法

现实中直接测量完整的 60 dB 衰减非常困难。

举例来说,假设房间的本底噪声是 45 dB。要测量 60dB 的线性衰减,还需要在本底之上留出 10 dB 余量(这样声音的线性衰减才不会受环境噪声的影响)。要检测声音衰减的起点,又需要留出额外 5 dB 余量。

考虑所有这些,测试信号需在整個频率范围达到 $45 + 60 + 10 + 5 = 120$ dB。这在很多时候是做不到的,尤其在低频部分。

因此在实践中,根据 ISO 3382 标准,我们通常只测反射声衰减 20 dB 或 30 dB 的时间。如果衰减是线性的,可以推算出 RT60。这就是人们熟悉的 T20 或 T30 测量法。



T20 方法测量 RT60

- T20
 - » 测量需要的动态范围相对较小 - 每个频带超出本底噪声 35 dB 即可。
 - » $RT60(T20) = 3 * (\text{声压衰减 } 20 \text{ dB 所需的时间})$
- T30
 - » 测量需每个频带超出本底噪声 45 dB。
 - » $RT60(T30) = 2 * (\text{声压衰减 } 30 \text{ dB 所需的时间})$

总的来说, T30 比 T20 更好,因为它不确定度更低。但是当本底噪声太大或者声源不足以发出 45 dB 的余量时, T20 是最好的选择。

数学上, RT60 通过测得衰减曲线的线性最小二乘回归法计算得到。

- 若室内混响时间 $RT60 < 0.3$ 秒, 则声学上称其是“沉寂”的。一间有厚地毯, 窗帘和软垫家具的房间可能具有这种声学特性。
- 而在混响时间 $RT60 > 2$ 秒时称其是“浑浊”的。一间只有光墙和光滑地砖的又大又空的房间可能具有这种声学特性。

EDT

早期衰变时间 EDT (Early Decay Time) 是室内和建筑声学中跟混响时间相关的重要参数, 它涉及混响时间的计算、评价和心理感知。

简单来说, EDT 一般指的是声音从停止到衰减 10 dB 所需要的时间, 记作 T10。将这个时间乘以 6, 就能得到混响时间 T60 的近似值。

EDT 通常用来描述房间的初期混响特性。人耳难以捕捉声音衰减的完整过程, 而是更关注衰减的早期阶段, 并以此主观感受混响时间。也就是说, 如果一个声音在早期衰减的速率更大, 那人们感受的混响时间会比实际的 T60 要小。

EDT 在室内声学设计和分析中有几个重要作用:

- 主观感受: EDT 与听觉上的“清晰度”和“亲近感”密切相关。较短的 EDT 通常给人一种更清晰、更直接的声音感受, 而较长的 EDT 则可能使声音显得更加模糊;
- 音乐和语言的适应性: 对于音乐厅和剧院, 适当的 EDT 可以增强音乐的丰满度和温暖感, 而对于会议室和教室, 较短的 EDT 有助于提高语言清晰度;
- 设计和优化: 在建筑声学设计中, EDT 可以作为一个关键指标, 用于优化房间的声学性能。通过调整房间的形状、材料和吸声装置, 可以控制和优化 EDT, 以满足特定用途的声学需求。
- 混响时间的补充: 相比之下, EDT 更关注声音初期的衰减过程, 因此提供了一个更早期、更细致的混响特性描述。

混响时间测量精度

ISO 3382 标准还明确了测量精度的三个等级(三种方法)。它们的主要区别在于声源选择和测量点数量。

	调查法(简易级)	工程法(工程级)	精密方法(精密级)
声源指向性	无要求	观演场所:全指向性声源 普通房间:无要求	全指向性声源
分辨率	无要求:>250 Hz – 2 kHz	1/1:>125 Hz – 4 kHz 1/3:>100 Hz – 5 kHz	1/1:>125 Hz – 4 kHz 1/3:>100 Hz – 5 kHz
激励信号	闸控粉噪声 脉冲信号/滑频信号	闸控粉噪声 滑频信号	闸控粉噪声 滑频信号
声源位置数	≥ 1	≥ 2	≥ 2
麦克风位置	≥ 2	≥ 2	≥ 3
每点测量数	≥ 1	≥ 2	≥ 3
精度	1/1:>10%	1/1:>5% 1/3:>10%	1/1:>2.5% 1/3:>5%

3. 测量配置

XL3 配置	XL2 配置
- XL3 声级计或 XL3-TA 声级计以满足法律上可追溯的测量 (=XL3 安装型式认证固件) - XL3 安装室内声学扩展选件 (支持测量 1/3 倍频程分辨率混响时间) - M2230 量测麦克风 - 声源 » DS3 十二面体声源扬声器和 PA3 功放 » 或 δ 脉冲拍击器 » 或 MR-PRO 信号发生器 - 附件 » 麦克风三脚架 » DS3 十二面体声源支架 - 室内声学报告软件	- XL2 声级计或 XL2-TA 声级计以满足法律上可追溯的测量 (=XL2 安装型式认证选件) - XL2 安装扩展声学包选件 (支持测量 1/3 倍频程分辨率混响时间) - M2230 量测麦克风 - 声源 » DS3 十二面体声源扬声器和 PA3 功放 » 或 δ 脉冲拍击器 » 或 MR-PRO 信号发生器 - 附件 » 麦克风三脚架 » DS3 十二面体声源支架 - 室内声学报告软件

仪器

XL3 和 XL2 分析仪均符合混响时间测量标准要求, 支持施罗德 (Schroeder) 反向积分法, 通过测得衰减曲线的线性最小二乘回归法计算得到 T30, T20, T15, EDT ...

- 倍频程: 63 Hz - 8 kHz
- T20, T30 测量
- 脉冲声源, 闸控粉噪声, 滑频
- 测量点位自动平均

选件:

- 1/3 倍频程: 50 Hz - 10 kHz
- 同时使用 T30, T20, T15, EDT
- 计算空间平均结果
- 音频记录



声源

RT60 测量需在扩散场中进行。也就是说,声音在各方向的能量必须一致。对于精确测量,声源必须使用粉噪声信号且具备全指向性。推荐使用 DS3 十二面体声源和 PA3 功放。调查法可以使用 MR-PRO 信号发生器,直接将信号输入现有扩声系统中。ISO 3382-1 标准还允许使用脉冲声源。ASTM E2235 标准则不允许使用脉冲声源。

DS3 十二面体声源扬声器套件

PA3 功放内置了粉噪声信号发生器。该测试信号通过 DS3 十二面体扬声器在待测房间播放。可通过遥控器控制信号开关。测试信号应播放足够长的时间,确保声能充满整个房间,声音只有播放足够长的时间才能到达房间的每个反射面。粉噪声信号的持续时间应该至少等于或大于每个频带实际混响时间的一半。

房间永远不会因为声音太多而“饱和”,因此为了确保测量精度,可以按预估的 RT60 结果播放测试信号。一旦信号停止,XL3 或 XL2 能自动判别并开始测量衰减时间,从而计算混响时间。

DS3 十二面体扬声器是一个强大的无指向性声源。12 支同型号的扬声器分布在十二个面上。经优化的频谱可以传输均衡的高品质声音信号,用于混响时间的精确测量。其发出的声功率在整个测量甚至连续数小时的工作期间稳定可靠。



脉冲声源

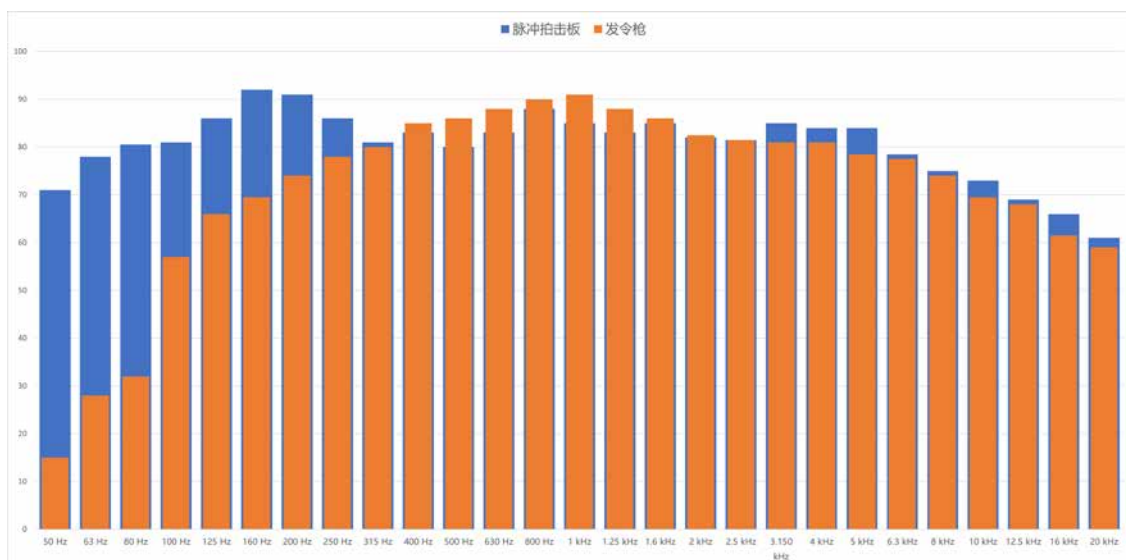
δ 脉冲拍击器是用于混响时间测量的脉冲声源。经特殊优化的设计能产生广阔的宽频,发出干脆利落且易于再现的脉冲声。

拍击器集成空气制动器和精心调谐的谐振器。整个结构完全免维护,能发出极高声压级(峰值高达 128dB)。



典型的脉冲声源还有发令枪或气球等。这些声源也可以在演艺场所进行调查法测量。XL3 或 XL2 可以自动测量衰减时间并计算混响时间。

但发令枪等在很多场合不方便携带或使用,且难以在低频产生足够的能量。将 δ 脉冲拍击器和 HW37 9 毫米口径发令枪的典型频谱对比可以直观体现这个问题:



另外,拍手也常常可以用来预估混响时间。你可以到我们的官方网站或公众号观看相关视频。

<https://www.ntiaudio.cn>

MR-PRO 音频信号发生器

MR-PRO 是适合调查法测量混响时间的信号发生器。它发出的音频信号可以通过现有扩声系统播放。MR-PRO 能以很低的波峰因数播放闸控粉噪声。将其与功放连接即可。此外,MR-PRO 中的滑频信号时长可设置,小于 1.5 秒时也能用于 XL3 和 XL2 分析仪的混响时间测试。



4. 测量流程

测量准备

环境条件

- 尽量小的背景噪声
- 评估基于 T20、T30 等测试的激励声压级

激励声源

- 能量必须足够充满整个厅堂空间
- 在非常大的空间内, 需同时使用几个全指向性声源
- 需布置在空间内不同位置/高度
- 相对于粉红噪声信号, 脉冲信号所需的声压级较低

量测

- 麦克风必须至于扩散场
- 必须在不同位置测量混响时间
- 粉红噪声信号测试时必须重复测量并平均测量结果



声源位置

DS3 十二面体无指向性声源需要放在房间的适当位置, 如教室中应放在教师讲课位置。在演艺场所, 至少需在两个扬声器位置进行测量, 扬声器距地面高度约 1.5 米。

对于较小或难以找到合适位置的场所, 可以在角落位置放置扬声器。



声源位置 1



声源位置 2

麦克风扬声器安全距离

测量不应受到扬声器直达声的明显影响。以下公式定义了麦克风和十二面体扬声器的最小安全距离：

$$D = 2 \cdot \sqrt{V / (c \cdot T)}$$

其中 V = 空间容积 [m^3]

c = 声速 [m/s] (根据温度)

T = 混响时间 [s]

比如, 一间 10 米见方, 高 5 米的厅堂, 预估混响时间 RT60 为 3 秒, 则麦克风距声源至少 1.4 米。

$$D = 2 \cdot \sqrt{((10 \cdot 10 \cdot 5) / (342 \cdot 3))} = 1.4 \text{ m}$$

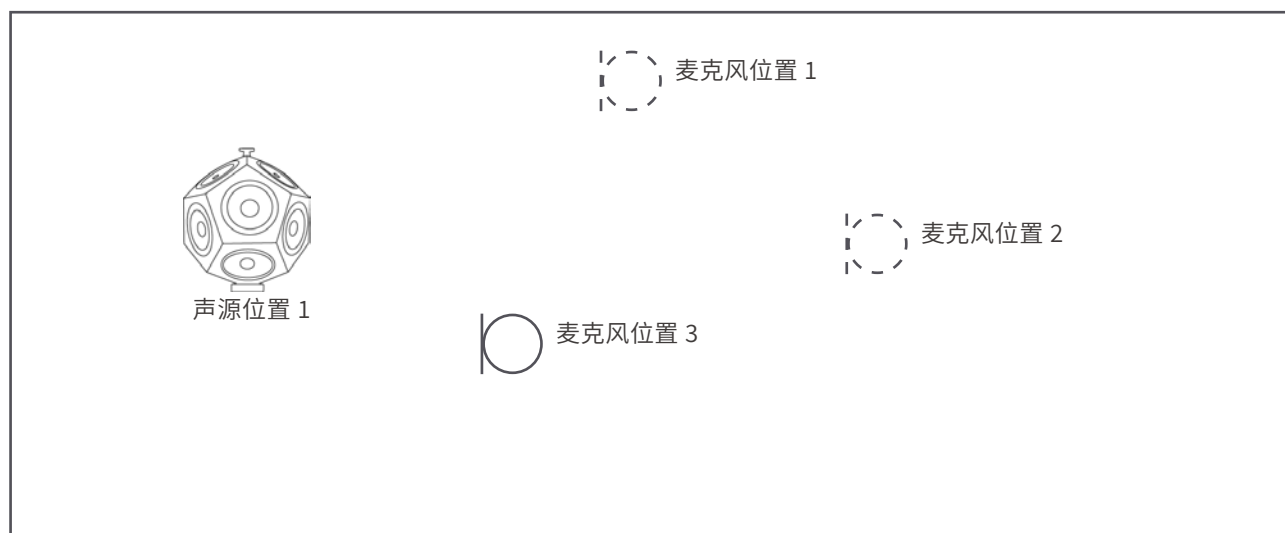
麦克风位置

在演艺场所, 麦克风应放置在观众的典型高度, 一般是坐席区距地 1.2 米。所选位置应具有代表性。避免在对称位置测量。

距离最近反射面, 如地板, 墙壁或天花板等, 的距离至少为所测最低频率的声音波长的四分之一, 比如测量低至 100 Hz 的混响, 距离至少为 1 米。低至 50 Hz 的混响, 麦克风距离反射面最少应为 2 米。

麦克风间距

最低测试频率 100 Hz 时的麦克风间距至少为 2 米; 最低测试频率 50 Hz 时的间距则至少需要 4 米。这个数据根据所测最低频率的声音波长的 1/2 计算。



扬声器/麦克风位置数

取决于精度要求, 使用中断声源法测量时, 在一个方形房间所需的最少扬声器和麦克风位置数如下:

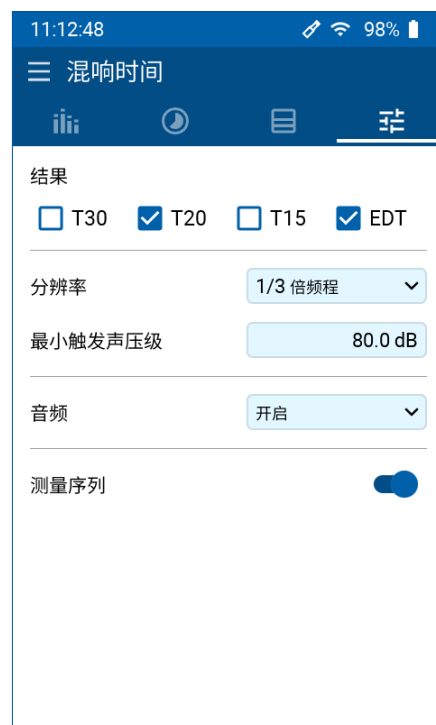
	调查法 (简易级)	工程法 (工程级)	精密方法 () 精密级
声源位置数	≥ 1	≥ 2	≥ 2
麦克风位置	≥ 2	≥ 2	≥ 3
每点测量数	≥ 1	≥ 2	≥ 3
测量总数	≥ 2	≥ 6	≥ 12

房间形状越复杂, 测量位置就越多。在 XL3/XL2 上按开始/停止键即可完成测量。推荐在每个测量点测量至少 3 次。这样可以减少测量的不确定度。

开始测量

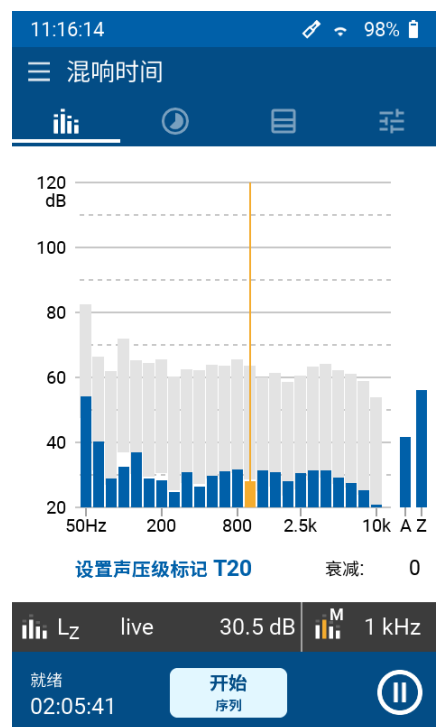
在 XL3 中选择混响时间测量功能, 并来到设置页面

- 选择计算 RT60 的衰减方法, 如 T30、T20、T15 和 EDT
- 选择分辨率, 如倍频程或 1/3 倍频程
- 选择触发测量的最小声压级, 如 80.0 dB
- 选择是否需要录制音频和开启测量序列



设置声压级标记

- 来到混响时间测量页面
- 保持背景噪声安静, 点击设置声压级标记 Txx (Txx 根据所选方法变化)
- 屏幕显示灰色条状带, 测量声压级超出灰色带才能获得对应频带的混响时间结果

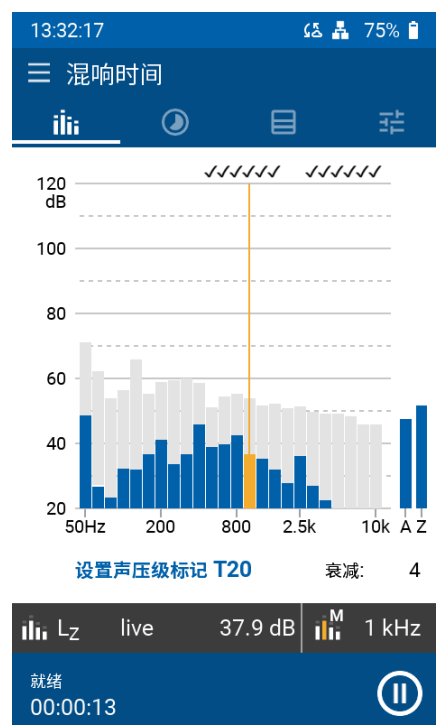


调整测试信号大小

- 在 PA3 功放 (或其它声源) 选择“EQ Pink”经均衡的粉噪声信号, 并调节电平, 让测量点声压级超出上一步标记的灰色标记 (注意听力保护)。

开始测量

- 按下 XL3 上的开始测量键 (START)
- 开关扬声器或拍击脉冲声源至少 3 次
- 正确测得结果的频带会出现对号 ✓ 标记
- 按下 XL3 停止测量建 (STOP)
- 保存数据、查看结果并生成报告



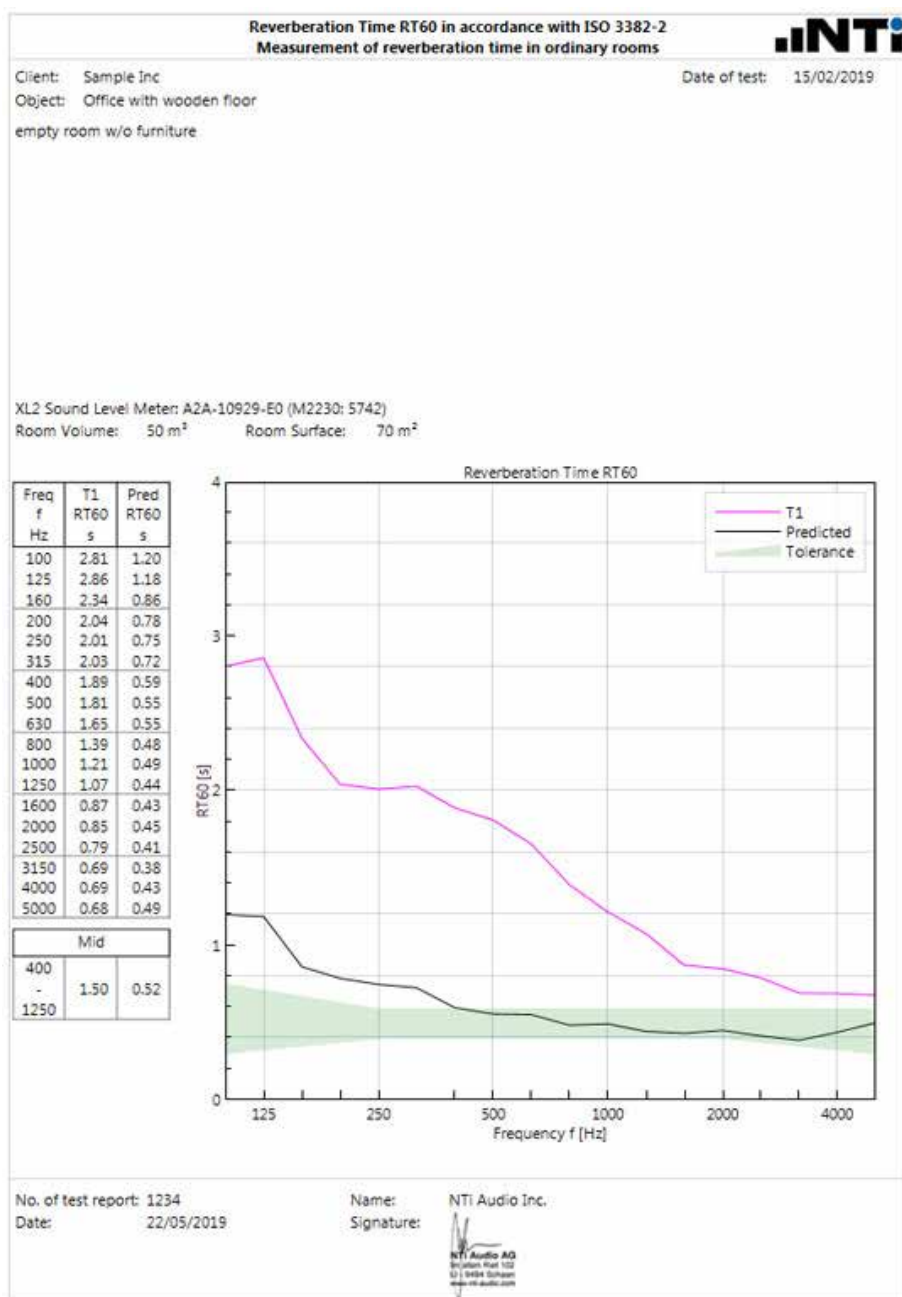
XL2 操作过程和 XL3 类似!

5. 报告

XL3 和 XL2 将所有数据存储在 SD 卡中以便直接传输到计算机。报告和日志文件都以纯文本格式保存,任何文本工具都可以打开(如记事本,写字板等)。数据以制表符分隔,直接将 txt 文件拖入到电子表格软件即可方便的查看和编辑。

此外,NTi Audio 也提供专业的报告工具。室内声学报告软件可以便捷地生成专业的混响时间报告。帮助声学专家和顾问可视化分析测量数据。

软件还能模拟添加不同吸声材料后对房间混响时间的影响。



报告按倍频程或 1/3 倍频程分辨率显示每个频带的混响时间结果。要简化结果，还可以通过计算以下频带的平均值得到单值混响时间结果：

- 倍频程：500 Hz 和 1000 Hz
- 1/3 倍频程：400 Hz - 1250 Hz

6. 更多测量提示

典型 RT60 值

	容积	推荐 RT60
录音棚	$< 50 \text{ m}^3$	0.3 s
教室	$< 200 \text{ m}^3$	0.4 - 0.6 s
办公室	$< 1000 \text{ m}^3$	0.4 - 1.1 s
报告厅	$< 5000 \text{ m}^3$	1.0 - 1.5 s
剧院	$< 20000 \text{ m}^3$	1.4 - 2.0 s
教堂		2 - 10 s

- 安装吸声材料或家具可以降低混响时间。另外，场内的人员也能降低混响时间，因此满场时的混响时间比空场时低。
- 测量期间最多只能有两人在现场，且距离麦克风不应小于 1 米；
- 在大型场馆，你可以使用多个十二面体扬声器同时发声。

粉噪声

使用粉噪声时，我们推荐激发房间的信号时长和预估的混响时间相当。这是一种简化的方法。在 ISO 3382-1 标准中明确说明，工程法和精确测量法的信号时长不应小于所测混响时间的一半。由于粉噪声的随机性，推荐在每个位置至少测量三次以获得较好的不确定度。XL3 和 XL2 可以自动平均结果。

脉冲声源

使用脉冲声源时，若声压级过大，XL2 将根据 ISO3382 标准丢弃 RT60 结果。有时你无法降低脉冲声的声压级，比如在小房间里使用发令枪。但测量仍需进行，你可以在 XL2 根目录下保存一个名为“RT60allowOVLDT.txt”的空白文本文件，强制完成测量。需要注意的是，声压级过大时测得的混响时间 RT60 可能不准确。