

# 快速灵敏的产线终端测试

Wolfgang Klippel

KLIPPEL GmbH, Mendelssohnallee 30, 01277 Dresden, Germany

**摘要：**测量时间是决定产线终端质控的总成本和可行性的关键因素。本文讨论了最小化换能器和音频系统测试时间的新策略，同时确保缺陷检测的高灵敏度，提取全面的诊断信息并以最佳方式利用可用资源。现代化的生产线是全自动的，并极大地受益于高速测试。最佳测试激励信号以及与多通道测试设计相结合的复杂处理过程是智能测试的关键因素。本文讨论并建议了合适的声学、机械和电学传感器。此外，并行或交替测试方案可减少总测试时间。最后，通过测量结果可以解决并说明高速测试时的典型问题和误区。

**关键字：**质量控制，声学 and 电气测量，信号分析，统计。

## 1 引言

产线终端 (EoL) 测试的主要目标是可靠地区分好与坏的可测设备 (DUT)，并最大程度地减少误判或漏判的测试结果。但是，某些缺陷只会产生一些轻微的症状，未经训练的耳朵是听不到这些症状的，但在产品使用寿命期间会变得更糟，因此不应将此类产品寄送给客户。人工操作人员基于倾听的判断对潜在缺陷的指标非常敏感，使用正弦波发生器可以有效地缩短测试时间。而自动测试系统可以取代繁重的人力工作，提高测试结果的再现性、可重复性和可比性，并在 PASS/FAIL 分类中提供卓越的灵敏度和可靠性，同时显著减少测试时间。

考虑到制造条件，本文研究了限制自动测试的灵敏度和速度的物理约束，并寻求可以以最小代价实现的最佳解决方案。

## 2 EoL 测试的特殊性

在产品开发过程中进行的典型测量通常不受时间限制，并且仅应用于选定的样品。通过平均监测信号（噪声抑制）并使用标准化测试设置（例如放置在安静消声且气候恒定环境中的 IEC 障板上），可以实现高信噪比 (SNR)。在制造过程终端进行测试

需要以下折衷方案来使所有 DUT 的测试（100% 测试）可行：

- 低 SNR（测试时间短，无需平均）
- 非稳态激励条件
- DUT 的特性可能会随时间而变化（胶水未完全干燥、干燥过程中温度升高、磨合效应等）
- 在较大幅度下测量小信号特性（传递函数、电阻抗、T/S 参数）
- 所有 EoL 测试处的测试条件（测试箱、麦克风位置）都不相同

必须努力抑制不确定的条件和限制结果再现性的影响，例如：

- DUT 和传感器的夹持和位置
- 人工操作
- 声负载变化（箱体泄漏）
- 连接问题
- 外部声学或机械干扰导致的判定不准问题
- 显著的温湿度变化

测试结果的再现性和可重复性应使用标准化方法（例如常规 R&R 测试）进行检查[1]。可重复性定义为在相同的测量条件下用同一台仪器重新测试 DUT

而得到的结果的一致性。可再现性则研究不同操作人员执行测量时结果的一致性。

现代测量设备使用足够好的传感器，其所引起的变化要比被测设备由于时变特性（例如悬挂系统的粘弹性、自热）和缺陷的随机特性（例如松散的颗粒）引起的变化要小得多。对于 EoL 测试，可再现性比研发过程中与标准测量的可比性更为重要。

### 3 最佳激励

测试激励信号的选择对于设计时间高效的 EoL 测试至关重要。频率变化的单音激励信号是制造过程中最受欢迎的激励信号。使用正弦测试信号的主要原因是将激励能量施加到一个窄频带上。因此，可以很好地激励：

- a) 在设计阶段可接受的常规谐振和非线性
- b) 生产过程中由机械和声学缺陷引起的不规则非线性动态

单音正弦激励还简化了谐波分量和噪声分量的分离。诸如双音或多音、粉红噪声、甚至语音和音乐之类的更复杂的测试激励信号对于评估产品开发过程中再现声的质量至关重要。而至少需要双音才能激活某些非线性（多普勒、电感  $L(x)$ ）并产生互调失真[2]。

#### 3.1 稳态测量

在感兴趣的频段内给定足够幅值（实现合理信噪比）的任意激励信号来测量 DUT 的线性行为。这可以通过稳态测量来实现：当瞬态阶段结束且所有状态变量（如声压、行程位移、电流）的幅值恒定时，开始采集。瞬态阶段时间取决于基波和其他高阶模态谐振（纸盆分割振动模式）的谐振频率  $f_n$  和品质因数  $Q_n$ 。该瞬态的包络以正比于  $e^{-t/\tau}$  的指数函数衰减，其时间常数如下[3]：

$$\tau = \frac{Q_n}{\pi f_n} \quad (1)$$

在 EoL 测试的背景下，在瞬态阶段测得的幅度与理想稳态值之间的小偏差被用于换取测量时间。

例如，4% 的所测振幅误差需要数据采集之前的预激励时间为：

$$t_{s,4\%} = Q_n / f_n \quad (2)$$

可以将预激励时间加倍可使误差降低至 0.2%。

例如，工作在密闭箱中的超低音喇叭，品质因数为  $Q_0=1$  且共振频率  $f_0 = 50 \text{ Hz}$ ，则需要 40ms 的激励才能使幅度精度达到 0.2%。在开口箱中，开口谐振为 50Hz 时，较高的品质因数  $Q_p=10$  将使预激励时间增加到 400ms。

#### 3.2 步进正弦激励

步进式正弦激励包括  $i$  个步骤 ( $i \geq 1$ )，其中每个步骤的持续时间为

$$t_i = P_i T_i = \frac{P_i}{f_i} \quad i \in Z \mid i \geq 1 \quad (3)$$

由完整正弦振荡的周期长度  $T_i$  的整数倍  $P_i$  和激励频率决定

$$f_i \approx f_{i-1} 2^D \quad i \in Z \mid i \geq 1 \quad (4)$$

该激励频率在对数频率标度上以恒定间隔  $D$  选择。指数  $D$  与每个倍频程的激励频率数量成反比（步数= $1/D$ ）。

当定义一个最大品质因数  $Q_{\max}$ （大于在 DUT 的规则和不规则模态谐振中预期的任何品质因数  $Q_n$ ）时，可以将频率之间的相对间隔  $D$  确定为

$$D = \log_2(1 + 1/Q_{\max}) \quad (5)$$

以确保在临界谐振的 3dB 衰减带宽内至少有一个测量点。

最大品质因数  $Q_{\max}$  也可用于确定应用于所有步骤的最佳周期数  $P_{\text{opt}}$

$$P_i = P_{\text{opt}} = 1 + \left\lceil \frac{Q_{\max}}{8} \right\rceil \quad i \in Z \mid i \geq 1 \quad (6)$$

以确保在瞬态激励期间谐振能存储稳态状态一半的能量。

理论上讲，如果频率之间的间隔  $D$  远小于被测设备中模态谐振的带宽，并且多个步骤激励达到同一个谐振，则所有步骤中只需要单个周期  $P_i=1$  就足够了。实际上，最小周期数被设置为较大的值 ( $1 < P_i < 5$ )，这样可以简化对测量状态信号的分析。由等式 (5) 中的间距  $D$  定义的一个倍频程中的最小激励频率数是 EoL 测试中通过步进正弦激励谐振的最关键要求。在 3.4 章节中的实际示例中将说明此问题。

可以计算出总激励信号的最佳长度，针对  $N/D$  可以近似为：

$$T_s = \sum_{i=1}^{N/D} \frac{P_{opt}}{f_l 2^{Di}} \approx \frac{P_{opt}}{f_l} \frac{1}{(1-2^{-D})} \quad (7)$$

其中  $N$  表示为最低频率  $f_l$  和最高频率  $f_h$  之间覆盖的倍频程数：

$$N = \log_2 \left( \frac{f_h}{f_l} \right) \quad (8)$$

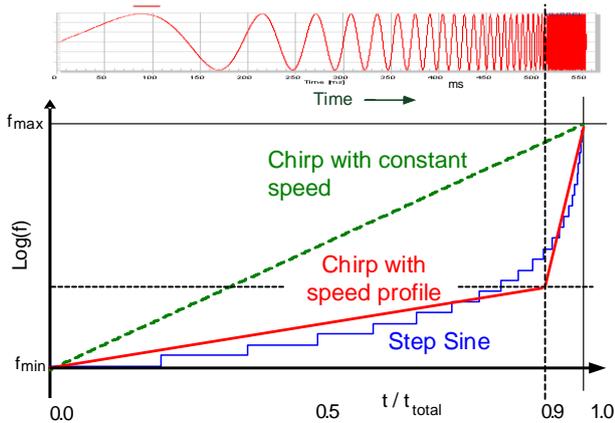


图 1: 三种信号的时频映射：步进正弦扫描信号、具有固定对数扫描速度的 chirp 信号和具有两种不同扫描速度的组合 chirp 信号

### 3.3 对数 Chirp 信号

连续正弦线性调频 (chirp) 信号定义为频率不断变化的基于正弦的信号

$$f(t) = f_l 2^{\beta t} \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (9)$$

在测量时间  $T_s$  内，在起始频率和终止频率之间使用恒定的扫描速度  $\beta$ ：

$$\beta = \frac{N}{T_s} = \frac{1}{T_s} \log_2 \left( \frac{f_h}{f_l} \right) \quad (10)$$

图 1 中将虚线表示的具有恒定扫描速度  $\beta = \text{const}$  的 chirp 信号与阶梯线表示的具有相同总测量时间  $T_s$  的步进正弦波进行了比较。时频映射图中，低频时 chirp 信号的斜率大于步进正弦波的斜率，但在较高频率时却更小。因此，最佳扫描速度由最低频率  $f_l$  处的最大品质因数  $Q_{\max}$  限定：

$$\beta_{opt} = \log_2(1 + 1/Q_{\max}) f_l \quad (11)$$

高频处不需要这种缓慢的扫描速度，会不必要地增加了总测量时间  $T_s$ 。

实际上，如果谐振的 3dB 带宽内较短扫描持续时间被这些频率处较大的激励幅度所补偿（使用与频率有关的幅度整形），则可以使用较高的扫描速度  $\beta > \beta_{opt}$ 。

换能器活塞模式的基波共振  $f_0$  通常有较低的总品质因数  $Q_{Ts}$ ，并且稳态建立时间相对较短。两种摇摆模式  $n=1,2$  的固有频率 [4] 是至关重要的，它们通常高于基波谐振频率，但是具有很高的品质因数  $Q_{1/2} > 20$ 。在这里，将幅度增加 3 dB 可以补偿扫描速度  $\beta$  加倍的影响，从而将总测量时间减少 2 倍。

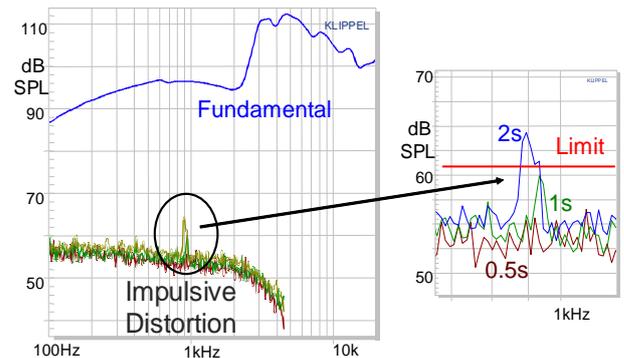


图 2: 使用不同长度 (0.5s、1s 和 2s) 的对数 chirp 信号测量的耳机中具有高  $Q$  因子的寄生谐振 (缺陷) 产生的脉冲型失真

扫频速度与谐振响应幅度之间的关系用图 2 所示的耳机中产生的缺陷进行了说明。松动部分会在 900Hz 处产生品质因数  $Q > 20$  的寄生振动。使用 100Hz 至 20kHz 长度为 2s 的对数 chirp 信号，可以

激发谐振的临界振动并可以在测得的声压信号中被检测为脉冲型失真。将扫描速度加倍并将激励缩短至 1s 会使症状减少约 4dB。如果使用 0.5s 的极短测量时间，症状将被测量噪声所掩盖。在此频带内增加激励幅度可以部分补偿由较快扫描速度所引起的能量的减少。

### 3.3.1 可变扫频速度

对于电声设备，理想的正弦激励是使用固有密集激励的 chirp 信号和图 1 中所示步进正弦激励时频映射的组合。因此，扫描速度  $\beta$  不应为常数，而应该在高频处上升。这样产生了每十个频点有恒定周期数的 chirp 信号，如图 1 所示。此 chirp 信号可以定义为基于正弦的频率不断变化的信号

$$f(t) = f_i 2^{\beta(t)t} \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (12)$$

其扫描速度本身取决于共振的瞬时频率和预期的最大品质因数  $Q_{\max}$ ：

$$\beta(t) = \log_2(1 + 1/Q_{\max}) f(t) \quad (13)$$

然而，如 Farina 所建议的那样这种激励不允许在时域中简单分离谐波[5]。使用 chirp 信号来近似步进正弦信号的时频映射将更有用，该 chirp 信号可含有多个不同但扫描速度一样的部分。

$$\beta(t) = \beta_i \approx \log_2(1 + 1/Q_{\max}) f(t_i) \quad (14)$$

with  $t_i \leq t < t_{i+1}$

实际上，只需要两个部分就可以得到足够的近似值，如图 1 中的粗实线所示。对于一个完整的音频带（20Hz 至 20kHz）chirp 信号，1kHz 以上的扫描速度是低频的五倍。此时，总扫描时间降至传统的具有恒定扫描速度 chirp 信号的 53%。

### 3.4 Chirp 信号对比于步进正弦信号

最佳激励的选择和对特定 DUT 的适当调整应通过易于激发摇摆模式的低音扬声器来说明，该低音扬声器会因音圈摩擦而在高振幅下产生脉冲型失真。摇摆模式分析揭示出 200Hz 附近的两个模态共振，且品质因数  $Q \approx 25$ 。

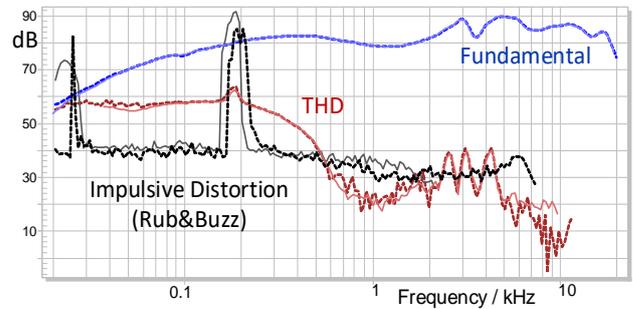


图 3：以实线表示的  $T_s=0.6$  s 的连续对数 chirp 信号和以虚线表示的  $T_s=4.4$  s 的步进正弦扫描信号测得的 SPL 基波、THD 和脉冲型失真 ID 的频率响应

每倍频程有 20 个频点的步进正弦激励信号，满足在窄 3dB 带宽中至少存在一个频点并且具有最佳周期数  $P_{\text{opt}}=3$  的要求，需要激励长度达到  $T_s=4.4$  s 来覆盖 20Hz - 20kHz 的音频带。而一个使用了扫频速度设置的 chirp 信号也用来激励相同的 DUT，该信号只需更短的持续时间  $T_s=0.6$  s。

图 3 揭示出两种激励信号都提供了相似的 SPL 基波、总谐波失真（THD）以及对音圈擦圈等缺陷敏感的脉冲型失真（ID）频率响应[6]。

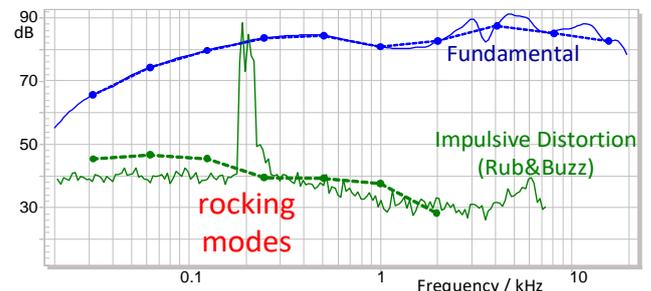


图 4：使用两种信号测量的 SPL 基波和脉冲型失真 ID(f) 的频响：一个信号是以虚线表示的步进正弦激励，另一个为实线表示的使用了速度设置的连续对数 chirp 信号，两个的总激励时长都为  $T_s=200$  ms。

图 4 显示了修改后的测量结果，其中步进正弦和 chirp 激励信号有相同的总时长  $T_s=200$  ms。Chirp 信号激发了所有频率并在脉冲失真 ID 曲线中以高分辨力提供了音圈摩擦的症状[7]，步进正弦激励信号 ( $P_{\text{opt}}=3$ ) 只能在间隔一个倍频程的频点处进行激励，并不能充分激发摇摆模式以产生明显的缺陷症状。此外，在曲线中以点表示的激励频点数量少，也严重限制了频率响应的分辨率。

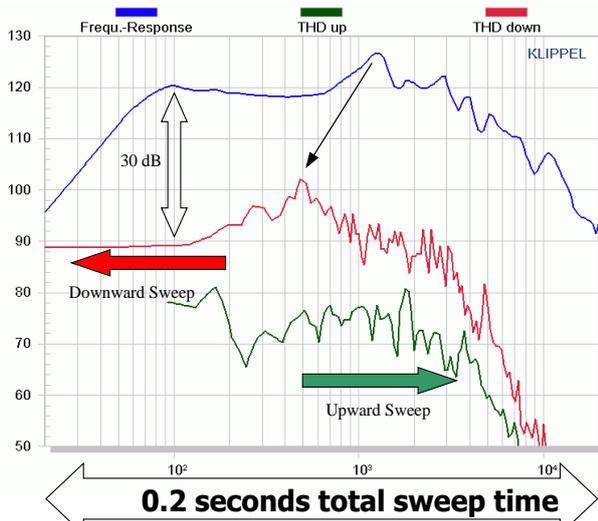


图 5: 使用 chirp 信号在 200ms 内向下扫描产生的模态谐振会导致 DUT 的谐波失真产生误差

### 3.5 扫描方向

正弦波扫描的方向在快速 EoL 测试中至关重要，因为模态共振的振铃效应会在谐波失真测量中产生伪值。例如，图 5 显示，扫描时长为 200ms 时，向下扫描在 500Hz 处产生的失真要比向上扫描大 12dB。向上扫描可以得到正确的 THD 值，该值与稳态下使用慢扫描速度的 chirp 信号测量的结果相对应。向下扫描时，被测设备、箱体或房间中的模态谐振被激活，而高品质因数产生的振铃将被解读为二阶、三阶和更高阶失真。1kHz 处的模态谐振对应于 500Hz 处的 THD 最大值，因为基波分量的振铃贡献了二次谐波。频率增长的 chirp 信号会在激励频率到达那些模态共振频率之前产生谐波分量，从而在开始振铃之前就完成了谐波失真的准确测量。

向上扫描的另一个好处是，初始低频有助于生产后首次使用的换能器进行磨合。也可以使用额外的低频或高位移信号，不仅可以磨合换能器还可以减少起始低频的建立时间。

### 3.6 多音复信号

具有频率相关的幅度整形和扫描速度设置的正弦 chirp 信号是 EoL 测试的强有力的激励，但是这种激励不能在多个频谱分量之间产生非线性相互作用[8]。多音复信号代表了典型音频信号频谱，能产生确定性的互调失真和随机分量，这些分量很容易

在稀疏激励频谱中的非激励频带上进行分离。扬声器固有的规则非线性需要互调失真来确定[9]。一些不规则的扬声器缺陷（例如音圈摩擦）需要宽带激励以同时产生高行程位移和加速度值，以产生可通过测量仪器听到或至少检测到的症状。

## 4 换能器状态测量

现代测试系统是多通道系统，可以并行获取声压、电压、电流和位移。

通常，单个麦克风测量 DUT 近场中的声压，以提供换能器近场中基波 SPL 和其他失真分量。但是也可能需要多个麦克风来定位条形音箱、智能音箱或车载低音组件中的缺陷[10]。

电学传感器可测量端电压和输入电流，以确保激励信号和功率放大器正常工作，并识别线性 T/S 参数和非线性参数，例如刚性不对称和音圈静止位置。

## 5 PASS/FAIL 分类

生成“通过/失败”判决所需的信号处理方式也会影响总的测量时间。如果多个测量任务使用不同的测试激励信号，有用的策略是从产生最大处理负荷的任务开始，这样可以使下一个任务的采集时间来完成第一个任务的计算。使用步进正弦或 chirp 信号，可以在采集完成之前对监测的信号进行一些处理。

## 6 生产噪音

研发测试是在明确的条件下进行的，没有明显的外部干扰；但在 EoL 测试中并非如此。由于生产环境而引起的声学 and 结构传播的干扰是无法预测的，并且与检测到的缺陷症状的幅度相同[12]。

噪声的长期声压级远低于由撞击、警笛、无线电设备或吱吱声和嘎嘎声引起的脉冲或短期干扰，而瞬时噪声可能具有较高的瞬时电平（>100dB SPL）。

有多种策略来应对生产噪声。用于隔离干扰的典型被动解决方案是使用测试室或箱体。它们应有良好的阻尼以防止空气传播的噪声，并应与结构传播的噪声仔细分离。这些箱体可将干扰衰减最多 40 dB。虽然这对于幅度频率响应已经足够了（在大多数情况下对 THD 也足够），但对于因 Rub&Buzz 和其他缺陷而产生的脉冲型失真是不够的。

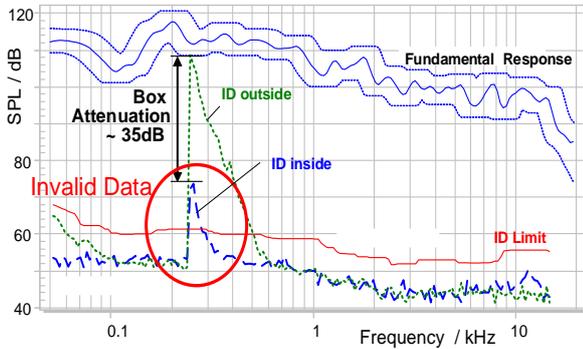


图 6: 使用设计良好的测试箱, 通过将测试麦克风处的脉冲失真 (内部 ID) 与箱体外部的环境噪声麦克风处的脉冲失真 (外部 ID) 进行比较, 来检测 Rub&Buzz 测量中的无效数据

图 6 显示了使用制作良好的测试箱 (其提供近 35dB 的衰减), 其外部的脉冲环境噪声 (例如脱落部件) 导致测试麦克风处的测量信号损坏。但是, 此干扰在测试麦克风上产生脉冲失真 (ID) 已超出允许的限制 15dB, 会导致错误的失败判定。

因此, 除了绝缘外, 还需要其他步骤: 简单的方法, 例如在测试失败的情况下自动重复进行测量, 会使测试时间增加两倍以上, 并且无法可靠地识别根本原因 (缺陷或生产噪音)。重复测量也可能会受到干扰, 因此无法可靠地防止错误判定。同样, 求平均值 (增加周期数或重复测试次数) 也不是一种有效的方法, 因为它会显著增加测试时间。

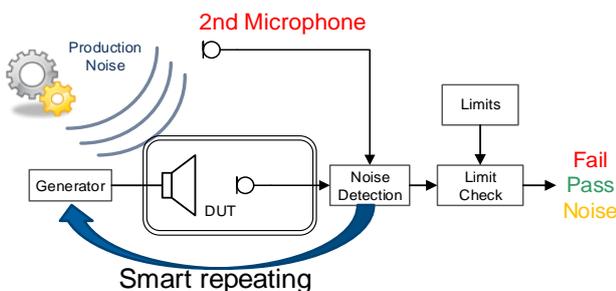


图 7: 使用第二个环境噪声麦克风的测试设置, 可完全抵抗外部生产噪声

如图 7 所示, 在 DUT 的近场中使用额外与测试麦克风并行使用的机械或声学传感器, 可监测环境噪声并将此信号转换为测试箱中的等效干扰, 并与测试信号和极限值进行比较来检测无效数据。如果环境噪声是随机的并且没有永久性地占据一个频带, 可以通过将每次重复的有效部分合并到一个完整的数据集中来最大程度地减少测试重复的次数[13]。

## 7 EoL 测试时序

EoL 测试的总测试周期包括:

1. 放置 DUT 到测试台上
2. 固定 DUT 并进行连接
3. 激励 DUT 和信号采集
4. 释放 DUT
5. 将 DUT 移出测试台, 继续执行步骤 1

在此讨论中忽略了初始设置和产品转换, 因为相对于大批量生产的总测试时间通常可以忽略不计。第三点中的实际测量定义为由测试触发 (条形码扫描、硬件或软件开关) 开始, 直到测试系统本身完成测量过程 (最后捕获的信号样本) 为止。而最终判定结果可能会在稍晚的时间提供, 但只要不延迟下一次测试开始, 就对周期时间没有影响。

## 8 结论

激发被测设备的测试信号性能特性限制了测量速度和检测缺陷单元的灵敏度[14]。为了使 PASS/FAIL 判定的误差最小, 需要根据被测设备的瞬态行为调整激励信号。步进正弦激励提供了最佳的时频映射, 以激发 DUT 中的窄带谐振。但是, 在较高频率下扫描速度增加的 chirp 信号是加速 EoL 测试的最佳激励。节省时间为制造提供了有趣的机会: 如果测试站从等待队列中异步获取下一个 DUT, 则可以缓冲每个周期中的剩余时间, 并用于重复测试或执行其他测量。

重复部分或完整的测量是应对高可能性随机环境噪声的最佳方法, 该随机环境噪声无法通过屏蔽、吸收和其他被动手段适当地衰减。第二次测量也可

以用于验证接近极限的判定，尤其当脉冲失真指示了缺陷（松散颗粒）的随机性。这可以显著提高产品的可靠性。

进行额外的测量还可以为线上诊断提供有价值的数 据，从而控制制造过程。机器学习和缺陷分类揭示了故障单元的根本原因。如果将其自动分配给熟知的缺陷类别，则无需人工检查。以最佳方式表示缺陷类别的故障单元可以自动地选择为“黄金缺陷”参考样，并可以用于培训 EoL 操作员或由工程师进行更深入的分析。那些无法分配给已知缺陷类别的故障单元需要操作员在靠近组装线的诊断台进行研究。与 EoL 测试相反，诊断站有足够的时间进行额外的测试及聆听 DUT 的声音输出，还可以拆解设备以便找到未知根本原因的视觉线索。

因此，快速灵敏的 EoL 测量系统并结合机器学习、自动分类以及在诊断站对几个选定 DUT 进行的手动测试，可以生成制造和工程中的学习过程。这有利于最大程度地提高生产率，提高产品的可靠性，并设计出性价比更高、易于制造的未来产品。

## 参考文献

- [1] R. K. Burdick, et. al., Design and Analysis of Gauge R and R Studies, American Statistical Association and the Society for Industrial and Applied Mathematics. p. 2. ISBN 0898715881.
- [2] IEC 62458:2010 Sound System Equipment - Electro-acoustical Transducers - Measurement of Large Signal Parameters
- [3] Siebert, William McC. Circuits, Signals, and Systems. MIT Press.
- [4] W. Cardenas and W. Klippel, “Root Cause Analysis of Rocking Modes, presented at the 140th Convention of the Audio Eng. Soc. 2016, Paris, France
- [5] A. Farina, “Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a

Swept-Sine Technique,” presented at the 108th Convention of the Audio Eng. Soc. 2000, Paris, France

[6] IEC CD 60268-21 Sound System Equipment - Part Acoustical (Output Based) Measurements, IEC: 2017

[7] W. Klippel, “Measurement of Impulsive Distortion, Rub and Buzz and other Disturbances,” presented at the 114<sup>th</sup> convention of the Audio Eng. Soc. (march 1 2003), preprint 5734.

[8] W. Klippel, “Loudspeaker Nonlinearities - Causes Parameters, Symptoms,” J. Audio Eng. Soc. 54, no. 10, pp 907 - 939 (oct. 2006).

[9] W. Klippel, J. Schlechter, “Fast Measurement of Motor Suspension Nonlinearities in Loudspeaker Manufacturing,” Journal of Audio Eng. Soc., Vol. 58, No. 3, pp. 115-125, 2009 March

[10] W. Klippel, R. Werner, “Measurement of Turbulent Air Noise Distortion in Loudspeaker Systems,” J. Audio Eng. Soc., Volume 59, Issue 7/8 pp. 475-486; July 2011.

[11] W. Klippel, “Minimizing Costs in Audio Devices through Efficient End-of-line Testing,” presented at the 145<sup>th</sup> convention of the Audio Eng. Soc., 2018 October 17-20, New York.

[12] S. Temme, V. Dobos, “Evaluation of Audio Test Methods and Measurements for End-of-the-Line Automotive Loudspeaker Quality Control,” presented at the 142<sup>nd</sup> convention of the Audio Eng. Soc. May 11, 2017, preprint 9715.

[13] Wolfgang Klippel (2011). End-Of-Line Testing, Assembly Line - Theory and Practice, Prof. Waldemar Grzechca (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/21037. Available from: <https://www.intechopen.com/books/assembly-line-theory-and-practice/end-of-line-testing>

[14] AN45, Optimal QC setup for fixed measurement time, Klippel application note, [www.klippel.de](http://www.klippel.de)