

通过高效的产线终端测试最小化音频设备的成本

Wolfgang Klippel

KLIPPEL GmbH, Mendelssohnallee 30, 01277 Dresden, Germany

摘要： 组装过程中的部件差异和不确定性降低了所制造设备的性能和可靠性。如果在产线终端测试期间发现有缺陷的单元，则将增加制造成本；如果在市场上出现了未发现的故障品，则将增加售后成本。本文讨论了产线终端测试的作用，以减少上述两种类型的故障并最大化最终用户所看到的性能/成本比。可以在制造条件下进行灵敏且快速的测量选择是通过/失败（PASS/FAIL）分类的基础。本文显示，通过考虑明确的产品定义、特定设计的信息、制造过程的统计数据以及现场废品的可追溯性，可以在 EoL 测试中使用最佳生产极限来将总成本降至最低。本文介绍的一般概念通过汽车和其他应用的实际示例来进行说明。

关键字： 质量控制，测量，产品可靠性，风险和成本管理

1 引言

产生有缺陷的单元会带来经济影响。在产线终端检测到缺陷单元并因此不能发送给客户，则会增加制造成本。

由拒绝率引起的额外产线成本 C_{EOL} 在竞争激烈、利润率低的市场中至关重要。同时，终端用户报告的现场废品会在保修期内产生额外的售后成本 C_P 或技术支持、运输和更换成本。终端用户的不满意和品牌在市场中的声誉受损也需考虑到售后成本 \bar{C}_p 中。

通常，供应商、制造商和经销商之间就降低总成本 C_T 达成共识，以在市场上创造成功的产品并建立长期的业务关系。

但是，将 EoL 成本 C_{EOL} 与售后成本 C_P 进行权衡要复杂得多，因为所有业务合作伙伴对每个问题的重要性、缺陷的根本原因以及解决方法的看法都不相同。在定义产线终端测试中的 PASS/FAIL 限制时，这种冲突变得尤为明显，特别是对于必须要考虑再现声音质的音频产品。

本文在汽车音频的背景下描述了该问题的复杂性，目前的讨论[1-3]还需要进一步的论据来为所有业务合作伙伴找到共同的战略和令人满意的解决方案。

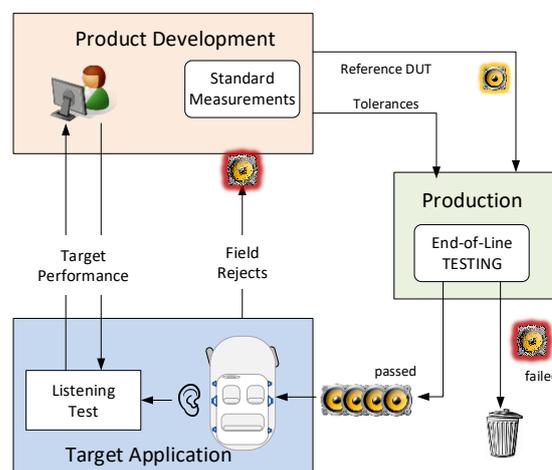


图 1: 汽车应用中低音扬声器的生命周期

2 音频产品的故障

如果被测设备在 EoL 测试中发生以下故障之一，则不应将其运送给终端用户：

- D1. 制造的 DUT 的性能受损，例如声音输出偏低、明显信号失真以及在典型终端用户目标应用中可以检测到的其他不良特性。
- D2. 制造的 DUT 的可靠性和鲁棒性受损，随着时间推移会降低性能，从而可能成为现场拒绝品。

第一组 D1 中与性能相关的故障被认为是静态的，并且已经在装配线终端显示出了所有缺陷。由于产品后续生命中不会有明显变化，因此 EoL 测试可以检查 DUT 的受损性能。

第二组 D2 中的缺陷必须被视为动态过程，使产品具有时变特性。虽然终端用户可以接受 EoL 测试期间 DUT 的性能，但是目标应用中的激励、老化、疲劳、气候和其他外部影响会进一步降低性能，引起破坏性过程。

D2 中的故障是由设计或制造引起的。在开发第一个原型和试生产期间，可以通过破坏性测试和其他形式的长时测试来发现由设计引起的故障。但系统测试既耗时又昂贵，并且只能应用于相对少量的样品[4]。在加速寿命测试中未发现故障的事实并不能保证产品在现场的可靠性。

由制造引起的故障等级 D2 必须在产线终端进行检测。不幸的是，D2 类中的大多数故障都处于破坏性过程的早期状态，可能不容易产生可闻的失真或其他明显的线索。因此，在进行灵敏的测量之前，可让经过培训的操作员进行手动 EoL 测试，因为他们比一般的终端用户在听不规则失真方面更为敏感。

3 产线终端测试

在组装线终端对每个 DUT 进行自动测试可有效地降低总成本 \bar{C}_T ，包括 EoL 成本 C_{EoL} 和售后成本 C_p 。

3.1 测量特性

但是，产线终端测试应根据制造中的实际要求来实行[5]。测量时间应为生产周期的一小部分，通常为几秒钟。在测试设置中更换 DUT 需要额外的时间。EoL 测试比组装过程中的周期时间快，它的优点是当单个声学测试被偶然的环境噪声影响破坏时，可以重复测试来避免因为噪声而增加的拒绝率。选择最佳测试激励信号（例如正弦 chirp 信号[6]）对于 EoL 测试至关重要，因为在机械和声学系统中模态共振的激发会限制测量速度[7]。通常没有足够的时间在 EoL 测试中使用普通的音频信号（例如音乐）作为激励，并通过相关技术和自适应滤波来评估线性和非线性传输行为。

EoL 测试需要在特殊的测量条件下执行：

- DUT 的位置在测量设置中已定义好（手动或通过机器人）

- 将麦克风放置在 DUT 的近场中，以提高测试 Rub&Buzz 和其他 D2 类别中缺陷的 SNR
- 没有半空间或全空间消声测量条件
- 接受声学负载的同时使用测试箱来充分屏蔽环境噪声

因此，产线终端测试产生的测量结果与在国际标准[11]中定义的标准测量条件下进行的 R&D 测量结果并不一致。

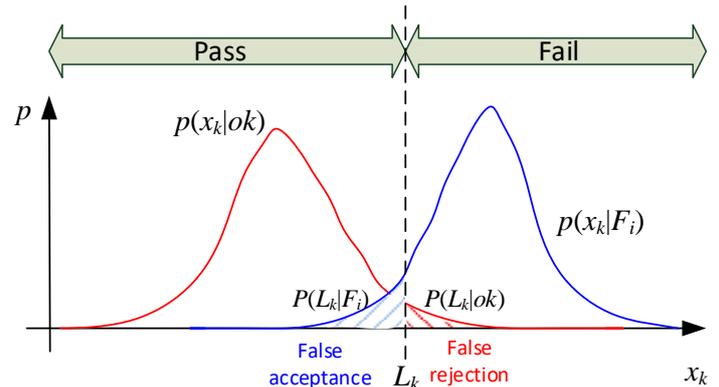


图 2: 基于单个特征 x_k 的 PASS/FAIL 分类，其中无故障和有故障 DUT 的类别分别具有重叠的概率分布 $p(x_k|ok)$ 和 $p(x_k|F_i)$ 。

3.2 Pass/Fail 分类

在 EoL 测试中，最关键的步骤是将故障单元与发给客户的无故障产品分开。该分类在图 2 中进行了说明，此时仅考虑了一个故障 F_i 的单个特征 x_k 。该虚拟示例分别显示了 F_i 类缺陷中所有无故障 DUT 和所有有故障 DUT 的条件概率密度函数 $p(x_k|ok)$ 和 $p(x_k|F_i)$ 。在特征 x_k 中，这两个分布通常不会完全分开。在重叠区域中，其特定特征 x_k 不允许正确分离无故障和有故障的产品，使得故障 DUT 通过测试，或者无故障的 DUT 被拒绝。根据 PASS/FAIL 限定值 L_k ，可能将一个错误（错误拒绝率 $P(L|ok)$ ）换为另一个错误（错误接受率 $P(L|F_i)$ ），从而增加 EoL 成本 C_{EoL} 或售后费用 C_p 。

为了增加 $p(x_k|ok)$ 和 $p(x_k|F_i)$ 之间的区别，应通过以下方式仔细选择 \mathbf{x} 中收集的特征：

- 利用有关缺陷根本原因和产生症状的物理知识，
- 测量包含缺陷的独特症状的信号，
- 最小化测量噪声或其他随机变量的影响，这些影响会增加被测黄金参考样数据的方差。

表 I 用于检测性能和可靠性缺陷的物理特性的重要性
(*低, **中, ***高)

特性	性能 (缺陷等级 D1)	可靠性 (缺陷等级 D2)
频率响应 (SPL)	**	**
平均声压级	***	-
极性	**	-
总谐波失真 (THD)	**	*
二阶谐波	*	*
高次谐波 (HOHD)	**	**
脉冲失真 ID	***	***
调制噪声	**	**
电阻抗	*	*
电学 TS 参数 ($R_E, f_s, Q_{TS}, Q_{MS}, Q_{ES}$)	*	*
刚性不对称	**	**
音圈偏移	**	***

3.3 测量和特征提取

对 DUT 上监测的物理信号进行信号分析, 以提取唯一特征 $\mathbf{x}=\{x_1, \dots, x_k, \dots\}$, 这是 PASS/FAIL 决定的基础。例如, 表 I 列出了从声学 and 电学测量中选择的普遍特征, 以及它们对于检测 D1 和 D2 类故障的重要性, 这些故障分别产生成本 C_{EoL} 和 C_p 。

3.3.1 声学特性

声压信号 $p(t)$ 是检查音频设备性能并检测 D1 和 D2 类缺陷的最重要信号。图 3 示出了再现 chirp 信号激励的幅值分布 (声谱图) 与频率和时间的关系。该 chirp 信号包含一个频率连续变化的单音, 扫频速度在 1kHz (对应于 800ms) 以上翻倍。chirp 信号可以提供 DUT 的稀疏激励, 并产生基波分量, 可以很容易地将其与声谱中的非线性失真分开。

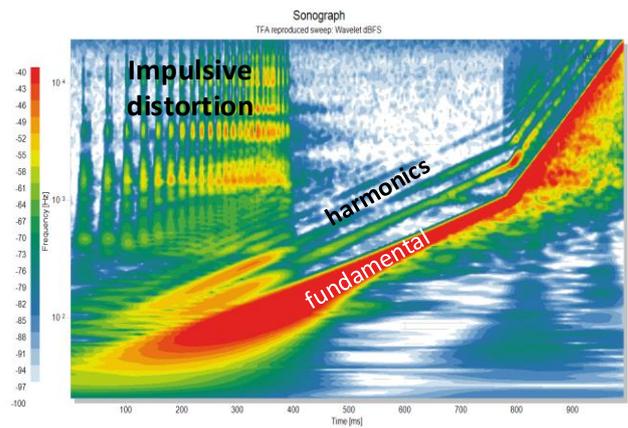


图 3: 基于小波变换的声谱图显示了使用 Chirp 信号激励 DUT 的声压响应幅度 (颜色) 与频率和时间的关系。

声谱图显示了表 I 中列出的声学测量的重要特征: 二阶、三阶和更高阶谐波出现在与基波分量平行的不同谱线上。在低激励频率下, 特定 DUT 中的机械缺陷会产生脉冲失真。与出现在基频倍数处的高次谐波相反, 脉冲失真具有密集的瞬时频谱, 该频谱在特定时间激发所有频率, 从而在幅度分布中产生垂直模式。

但是, 时域中的原始声压波形提供了声谱图中未出现的更多信息。例如, 由缺陷音频设备产生的脉冲失真可能具有与测量噪声相似的幅度谱, 但在时域中具有更高的波峰因数。这个与波形精细结构相关的信息隐藏在相位频谱中 [10], 通过幅度很难解释, 不适合用作 PASS/FAIL 判决的特性。因此, IEC 标准 [11] 建议在时域中测量高通滤波信号的峰值, 这样可以利用幅度和相位信息。

同样也需要时域分析来检测扬声器箱体泄漏, 该空气湍流产生的噪声的幅度谱与麦克风、电子设备或环境源产生的噪声相似。漏气噪声被音圈位移进行了调制, 从而在箱体中产生压力, 利用此事实可以用来识别该缺陷。因此, 一种解调技术 [8] 可用于识别空气泄漏, 即使调制噪声被环境噪声掩盖并且对于人工测试人员来说不可闻。

3.3.2 电学和机械特性

输入电流和端电压的电学测量提供了表 I 中其他有价值的特性, 这些特性不受生产环境中的环境噪声影响: 通过使用 chirp 激励信号来分析测量的电

流信号中的脉冲失真，可以可靠地揭示出任何松动接触、不当焊接或音圈擦圈产生的短暂短路。

将集总参数模型拟合到电信号可以揭示以下与激励信号无关的参数：

- 直流音圈电阻，是开路连接的一个明显指标；
- 基波响应的相对参数（谐振频率 f_s 及品质因数 Q_{ms} 和 Q_{es} ）；
- 附加谐振的相对参数（开口系统或者无源辐射器的谐振 f_p 及品质因数 Q_p ）；
- 根据 IEC 标准[13]规定的音圈静止位置的偏移 x_{off} ，以及
- 标准[13]中规定的刚性非线性 $K_{ms}(x)$ 的不对称。

取决于特定的激励信号，线性和非线性参数允许计算以下特性：

- 正负峰值位移，
- DC 位移

需要这些信息来检查电机和悬挂系统[14]能够提供的最大声输出，而不会产生过度的失真或使产品缩短寿命的机械过载。

弹波、折环、振膜和其他柔软部件是换能器单元中最关键的组件，因为它们在几何结构和材料特性上的变化要比线圈和磁体系统大[16 - 23]。悬挂系统不仅决定了非线性刚性特性 $K_{ms}(x)$ ，而且还决定了音圈的静止位置，这可能会在非线性的力因数曲线 $Bl(x+x_{off})$ 中产生不希望的偏移 x_{off} ，如图 4 所示。偏移会增加二次谐波和更高次谐波、互调失真，并可能产生其他不良行为，例如动态直流位移。声压中二次谐波失真的测量只能揭示多个非线性之间复杂的相互作用，并不能揭示问题的根本原因。可以在以下示例中进行说明：

图 4 显示了随着线圈偏移 x_{off} 的增加，二阶谐波失真减小。 $x_{off}=-3\text{mm}$ 时，音圈偏移会在力因数 $Bl(x)$ 中产生如粗实线所示的明显不对称性，并补偿由刚性特性 $K_{ms}(x)$ 的不对称性所产生的症状。尽管偏离最佳音圈静止位置可能会减少谐波失真，但力因数 $Bl(x)$ 和电感非线性 $L(x)$ 会增加较高频率下的互调失真。此外，由于到上边界或下边界的距离更近，无

限制的最大正负峰值位移会减小。因此，二阶谐波失真并不能作为独特特征来检测音圈静止位置偏移、刚性不对称以及与组装后悬挂系统相关的其他故障。

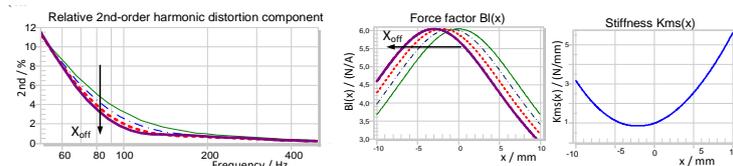


图 4：在刚性非线性 $K_{ms}(x)$ 与不同音圈静止位置 $x_{off}=0, -1, -2, -3 \text{ mm}$ 偏移下的 $Bl(x)$ 曲线之间相互作用所产生的声压输出中测得的二阶谐波失真曲线

3.4 感知和认知指标

将物理特征转换为感知指标和认知指标 (MOV_s) 可以移除与评估终端用户所用音频设备性能无关的信息。显然，这些指标对于定义市场营销中的新产品以及在开发过程中优化性能/成本比非常有用。但是，出于以下原因，感知和认知指标不太适用于 EoL 测试：

- 感知和认知过程的建模是一个复杂的问题，它给数据提供了有限的准确性。
- 可用的指标未考虑典型终端用户的构成情况（年龄、文化背景、期望等）。
- 指标取决于目标应用中的假定条件。
- chirp 和其他人工测试信号是针对换能器 EoL 测试的首选信号，但是它们并不代表典型的音频信号。
- 在产线终端进行单独测试的换能器最终会安装在箱体里，作为多路系统的一部分。
- DUT 的声学环境（例如测试箱）与目标应用（例如汽车）不同。
- 目标应用中的聆听距离可能大于生产中使用的近场测量。
- 目标应用的听音声压级不同。
- QC 工程师和操作员通常对特定的目标应用不熟悉。
- 感知建模可能会移除用于检测 D2 类中与鲁健性和可靠性有关的时变缺陷的指标。

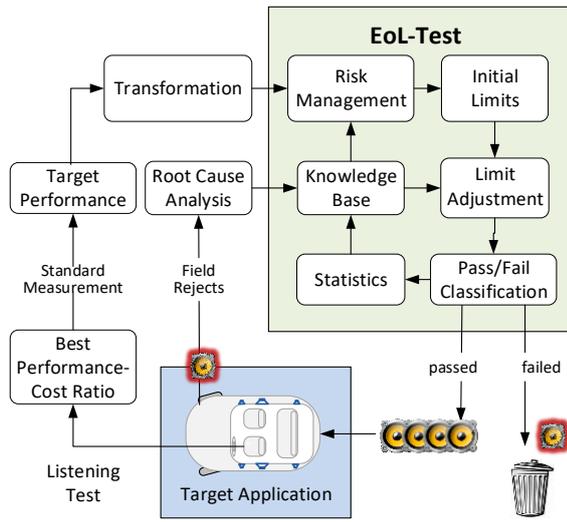


图 5: 生成初始 PASS/FAIL 限制的过程, 随后将通过根本原因分析生成的信息进行调整。

4 PASS/FAIL 生产限制

EoL 测试中, PASS/FAIL 限制的定义是一项艰巨的任务[15], 因为这些限制会影响产品的总成本 \bar{C}_T 。

4.1 最低成本标准

理论上, 通过最小化总成本可以找到 PASS/FAIL 极限的最佳值 L_k^* :

$$L_k^* = \arg \min_{L_k} \left(\begin{matrix} C_{EOL} P(L_k | ok) P(ok) \\ + C_p P(L_k | F_i) P(F_i) \end{matrix} \right) \quad (1)$$

其中 $P(L_k | F_i)$ 为错误接受的条件概率, $P(L_k | ok)$ 为错误拒绝的条件概率, 分别对应于图 2 中密度函数下方区域 PASS/FAIL 极限 L_k 的左侧和右侧。

可以通过假设一个高斯分布来估计错误拒绝的条件概率 $P(L_k | ok)$, 其平均值 μ 和方差 σ^2 可以对产量进行统计分析来获取[16-27]。根据 EoL 测试 (RR_{EoL}) 和现场 (RR_{field}) 中发现的典型拒绝率 (RR), 无故障 DUT 的先验概率 $P(ok)$ 应接近 1。但是, 由于以下原因, 很难估计缺陷的先验概率 $P(F_i)$ 和密度函数 $p(x|F_i)$:

- 可靠性等级 D2 中故障的先验概率 $P(F_i)$ 通常很小, 并且必须制造大量样本并在现场进行监测才能获得可靠的统计数据。
- 现场故障品不足以评估性能等级 D1 中的故障所产生的成本, 因为客户虽然不满意音频产品, 也可能不会提出有故障。

- 在一种特定产品上收集的统计信息不能用于另一种产品。

4.2 限制设定过程

生成新产品第一个 PASS/FAIL 限制时, 缺少有关故障的重要统计信息。这些初始限制对于最低成本标准而言并不是最佳的, 但在以后, 当拒绝的 DUT 的根本原因分析提供有关实际故障更准确信息时, 可以进行调整。该过程在图 5 中进行了说明, 这是有效使用人工、材料、机器、方法和金钱 (5Ms) 进行精益制造的结果。

4.2.1 最佳性能-成本比

通过仅考虑性能等级 D1 中的缺陷以确保最终用户看到的音频性能与总成本 C_T (影响产品价位) 之间的最佳折衷, 就可以在目标应用中开始生成初始 PASS/FAIL 限制 L_k 。

这种优化应通过市场营销和工程设计来进行, 并使用物理特性生成一个由平均值 T_k 和允许公差 ΔT_k 表示的目标性能的清晰定义。需要进行听音测试以调查设计选择、物理特性、信号失真的可闻性和烦恼程度以及客户对产品偏好之间的关系。失真可听化技术[25]通过衰减或增加再现声音的失真, 可以有系统地搜索最佳目标值 T_k 和 ΔT_k 。通过使用非线性扬声器模型或在目标应用中录制再现的声音, 可将可听化技术应用于任何音频激励。

允许公差 ΔT_k 还应考虑老化、疲劳和气候的影响, 他们会在产品使用寿命的后期改变其性能。例如, 应用于共振频率 f_s 和其他相关集总参数 Q_{TS} 、 Q_{ES} 和 Q_{MS} 的相对公差 $\Delta T_k / T_k$ 应该比通带上进行平均的平均声压级的相对公差大得多[1], 其随时间的变化较小。

目标性能 T_k 和允许公差 ΔT_k 可以通过确定条件 (如消声室) 下的标准测量[11]进行定义, 这样可以简化设计、与客户的沟通以及竞争性产品的基准定义。

不幸的是, 由于 EoL 测量条件不符合标准条件, 并非所有目标值 T_k 和允许公差 ΔT_k 都可以直接转换为生产限制 L_k 。

一种较好的实践做法是通过在标准和 EoL 条件下测量认可的原型或黄金参考单位，将标准目标值 T_k 转换为 EoL 平均值 μ_k [5]。使用相对公差 $\Delta T_k/T_k$ 和平均值 μ_k ，可以将极限值计算为：

$$L_k = \mu_k \left(1 + \frac{\Delta T_k}{T_k} \right) \quad (2)$$

4.2.2 风险管理

D2 类中损坏鲁棒性和可靠性的未知缺陷需要使用不同的方法来确定限制值 L_k ，该方法需要使用可用的统计信息。无故障 DUT 的概率密度函数 $p(x|ok)$ ，可以使用类似音频产品的统计分析来估计，也可以通过组装少量 DUT 的预生产运行轻松确定。

已知生成输出的平均值 μ_k 和标准偏差 σ_k ，根据方程假设一个高斯分布，可得出限制值：

$$L_k = \mu_k \left(1 + z_k \frac{\sigma_k}{\mu_k} \right) < \mu_k \left(1 + \frac{\Delta T_k}{T_k} \right), \quad (3)$$

该值小于根据等式 (2) 中最佳性能-成本标准得出的限制。

通过分位数函数 $z_k = \Phi^{-1}(P(L_k|ok))$ ，实际值 z_k 与错误拒绝的概率 $P(L_k|ok)$ 直接相关，如下某些值所示：

z_k	1.64	2.575	3.29	3.89
$P(L_k ok)$	0.1	0.01	0.001	0.0001

分位数 z_k 的较大实际值会减少错误拒绝的概率 $P(L_k|ok)$ ，但会增加错误接受的风险。分位数 z_k 的最佳值取决于特定的应用，应通过评估平均 EoL 成本的增长来确定：

$$\bar{C}_{EOL} = C_{EOL} P(L_k|ok) P(ok) \approx C_{EOL} P(L_k|ok) \quad (4)$$

相对较小的分位数 z_k 将用于高级音频产品，使 EoL 成本适度增加，而现场拒绝风险却显著降低。在标准消费产品中，将使用较高的分位数 z_k 来降低产品成本。

这种方法的优势在于，可以估计出平均 EoL 成本 \bar{C}_{EOL} 并将其用于产品的价格计算中。

4.2.3 从现场故障品中学习

如果现场拒绝的数量高于上一章节“风险管理”中假设的数量，需要根据解决问题的八准则 (8Ds [18]) 对 EoL 测试采取行动。

重要的一步是通过物理测量、听音和目视检查来验证现场废品的故障。如果可以确认故障，工程师将尝试了解破坏性过程中的不同步骤并找出根本原因。在产线终端测试期间对同一 DUT 测量到的物理特性的可追溯性表明了该特性随时间的变化，并且可能揭示出 DUT 的特殊性，而其他通过测试的 DUT 均未发现这种特殊性。如果这些特殊性也出现在其他现场废品中，那么这种巧合就可能给出了充分的理由来调整正在生产的 PASS/FAIL 限定值。如果对根本原因的物理解释和对破坏过程的解释是合理的，则相同的补救措施也适用于类似的产品。

下面通过一个实例来说明产生可接受的假设的过程：

现场拒绝的低音扬声器不产生任何输出。目视检查拆卸后的音圈，发现音圈损坏。如果记录到的应用于同一 DUT 的 EoL 测试数据还显示音圈偏移和刚性不对称性的显著增加，而其他单元未出现这种情况，则下图中所示的事故可以解释该故障：

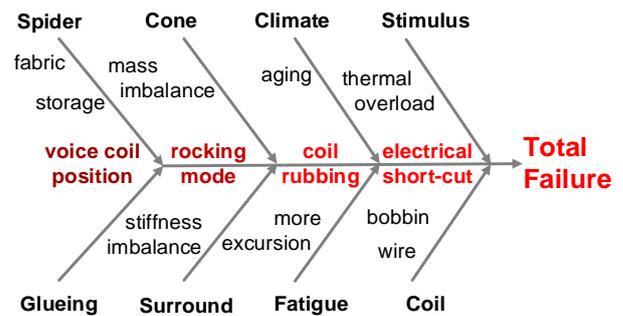


图 6：目标应用中扬声器整体故障根本原因分析(鱼骨)

悬挂系统的折环部分存放在错误的条件下，导致波纹滚筒暂时变形。组装扬声器、干燥粘合剂并向换能器施加较大的激励之后，弹波的变形最终将消失，并导致音圈静止位置发生偏移，总刚性曲线 $K_{ms}(x)$ 的不对称性也会增加。在现场，音圈偏移和折环的不对称限制将产生较大的恢复力，由于圆周上

的刚性分布不平衡而激发摇摆模式[26][27]。摇摆模式会导致线圈在极板顶部处摩擦，从而损坏导线绝缘层。短路的线圈导线会降低电阻，而电流会导致热过载，从而使导线与音圈架分离。磁隙中松散的电线很快就会损坏，从而断开了与电源的连接。

在验证了其他现场故障品的那些假设之后，制造商可以收集有关 D2 类缺陷的物理原因以及在 EoL 测试中提供明显早期症状的有用物理特性，以得到宝贵的知识。

5 结论

产线终端测试不仅仅是将生产故障品分开。它从运送给客户的所有设备中收集有价值的信息。该信息可用于找到最佳生产极限，从而将生产和现场废品产生的过多成本降至最低。

为了使 PASS/FAIL 判决中的错误最小化，选择灵敏的物理特征以生成好坏单元的明显分布非常重要。长久控制生产过程并应对噪声和其他随机影响（例如气候），可以减少合格单元的标准偏差以及 PASS/FAIL 判决中的错误。如何改善 EoL 测试的可重复性、可比性和灵敏度，以及如何应对刚制造出的设备的时变特性，比如胶水尚未完全干燥，悬挂系统经历第一次显著的形变（磨合效应），关于这些仍存在许多悬而未决的问题。

检测 D1 类缺陷所需的所有特性的 PASS/FAIL 限制应最大化目标环境中终端用户所看到的性能/成本比。听音测试、可听化技术和感知建模在产品开发初期定义目标性能非常重要。在标准条件下测量的物理特性简化了与外部客户的沟通，并且是明确规格和验证的基础。制造商可以将物理目标值和公差转换到生产环境中，并得出有意义的初始 PASS / FAIL 限制。

D2 类中随时间变化的缺陷需要一种主动和自适应的 EoL 测试策略，因为这些症状一开始可能听不到也不会令人厌烦，但随着时间的推移在目标应用中变得不可接受。加速寿命和破坏性测试可以对破坏性设计和破坏过程有更深入的了解。EoL 测试可以

监测表明产品稳健性和可靠性不足的内部状态（例如音圈位移）和参数变化（例如音圈偏移）。

如今，数字信号处理可以减少目标应用中的 D2 类故障。例如，可以主动保护无源换能器免受机械和热过载[28]。非线性控制[29]可以消除输出中的信号失真，并稳定音圈位置，最小化悬挂疲劳的同时最大化输出。因此，如果通过监测输入电流来测量换能器的机械性能并通过预处理输入信号进行补偿，由软部件（折环、弹波和纸盆）引起的生产差异对于产品可靠性而言就变得不再那么重要了。这种自适应控制延迟了 D2 类中的时变故障，并允许在发生完全故障之前更换缺陷单元。目标应用中收集的诊断信息对于换能器制造商优化设计、寻找更好的材料并降低制造成本非常有价值。

参考文献

- [1] E. Esposito, et. al. , “Don’ t Throw the Loudspeaker Out with the Bathwater ! Two Case Studies Regarding End-of-Line Tests in the Automotive Loudspeaker Industry,” presented at the 144th convention of the Audio Eng. Soc. (May 23-26, 2018), preprint 9926.
- [2] S. Temme, V. Dobos, “Evaluation of Audio Test Methods and Measurements for End-of-the-Line Automotive Loudspeaker Quality Control,” presented at the 142nd convention of the Audio Eng. Soc. May 11, 2017, preprint 9715.
- [3] G. Schmidle, “Objective Testing of High-End Audio Systems,” presented at the 6th International Symposium on ElectroAcoustic Technologies. in Shenzhen Symposium Dates: 4-5, Nov. 2017.
- [4] W. Klippel, “Evaluation of Audio Performance Over Product Life,” presented at the 142nd Convention of the Audio Eng. Soc., Berlin (2017), preprint 9737.
- [5] W. Klippel, End-Of-Line Testing, Assembly Line - Theory and Practice, Prof. Waldemar Grzechca (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/21037. (2011). Available from: <https://www.intechopen.com/books/assembly-line-theory-and-practice/end-of-line-testing>
- [6] 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
- [7] S. Irrgang, et. al. “Fast and Sensitive End-of-Line Testing,” presented at the 144th convention of the Audio Eng. Soc. (May 23–26, 2018), preprint 9927.
- [8] 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.
- [9] P. Brunet, S. Temme, “Loose Particle Detection in Loudspeakers” AES 115th Convention, October 2003.
- [10] W. Klippel, “Measurement of Impulsive Distortion, Rub and Buzz and other Disturbances,” presented at the 114th convention of the Audio Eng. Soc. (2003), preprint 5734.
- [11] IEC CD 60268-21 Sound System Equipment – Part Acoustical (Output Based) Measurements, IEC: 2017
- [12] IEC CD 60268-22 Sound System Equipment – Electrical and Mechanical Measurements on Transducers, IEC:2017
- [13] IEC 62458:2010 Sound System Equipment – Electro-acoustical Transducers – Measurement of Large Signal Parameters
- [14] 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
- [15] G. Schmidle, “A Systematic Approach to Measurement Limit Definitions in Loudspeaker Production,” presented at the 131th Convention of the Audio Eng. Soc. (2011), preprint 8472.
- [16] D. S. Schroeder, E. M. Long, “Reliability in Production Testing of Loudspeaker Components and Systems”, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 18, p. 133–139 (April 1970).
- [17] S. Hutt, L. Fincham, “Loudspeaker Production Variance”, presented at the 125th Convention of the Audio Eng. Soc., San Francisco, (2008). preprint 7530.
- [18] Grace L. Duffy’s, “Modular Kaizen: Continuous and Breakthrough Improvement,” ASQ Quality Press, 2014, pages 119–120
- [19] M.C. Bellini, A. Farina, “Loudspeaker Performance Variance due to Components and Assembly Process,” presented at the 142nd convention of the Audio Eng. Soc. May 2017, preprint 8714.
- [20] M.C. Bellini, A. Farina, “Loudspeaker Performance Variance due to Components and Assembly Process – Field Assessment,” presented at the Int. Conference on Automotive Audio, 2017.
- [21] W. Klippel, “Mechanical Fatigue and Load-Induced Aging of Loudspeaker Suspension,” presented at the 131st Convention of Audio Eng. Soc. 2011, Oct. 20–23, NY, USA
- [22] P.J. Chapman, “Quantifying Acoustic Measurement Tolerances and Their Importance in the Loudspeaker Supply Chain”, presented at the 136th Convention of the Audio Eng. Soc. 2014, preprint 9056.
- [23] S. Hutt, “Ambient Temperature Influences on OEM Automotive Loudspeakers”, presented at the 112th convention of the Audio Eng. Soc., Munich 2012 (Germany), preprint 5507.
- [24] A. Goldberg, “Quantifying Consistency in Loudspeaker System Production”, presented at the 142th convention of the Audio Eng. Soc preprint 9713.
- [25] W. Klippel, “Auralization of Signal Distortion in Audio Systems, Part 1: Generic Modeling”, presented on 51st International Conference of the Audio Eng. Soc.: Loudspeakers and Headphones (August 2013), paper 2–1.
- [26] W. Cardenas and W. Klippel, “Root Cause Analysis of Rocking Modes, presented at the 140th Convention of the Audio Eng. Soc. 2016, Paris, France, preprint 9496.
- [27] A. Schwock, et.al., “Root Cause Analysis of Rocking Modes in the Nonlinear Domain,” presented at the 142nd Convention of the Audio Eng. Soc. 2017, Berlin, Germany, preprint 9696.
- [28] W. Klippel, “Mechanical Overload Protection of Loudspeaker Systems,” *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 64, No. 10, October 2016, pp. 771 – 783.
- [29] W. Klippel, “Adaptive Stabilization of Electro-dynamic Transducers”, *J. Audio Eng. Soc.* Vol. 63, No. 3 pp. 154–160; March 2015.