

演绎最动听的旋律： 当新型换能器 遇见静电耳机

一家音频技术领域的创业公司研发出了一款用于高端静电耳机的新型换能器，可大幅提升耳机的性能表现。

作者 **JENNIFER HAND**



静电耳机以其极致的音质表现，吸引了众多 Hi-Fi 发烧友的关注。相比于其他类型的耳机，静电耳机的清晰度高、总谐波失真小、频率范围大，因此在输出高解析度音源时，声音更加纯净自然，轻盈饱满。

大多数静电扬声器的工作原理是：在两块导电板之间的弹性薄膜上积累电荷，当输入电信号时，带电薄膜便会随之振动并产生声波。声波进入耳朵后，最终经过大脑的复杂处理变成了能为我们带来欢笑和泪水的动人音乐。

尽管静电扬声器的音质和还原度均无可挑剔，但其缺点在于售价过高，且容易损坏。由于此类扬声器对机械加工精度的要求极为严苛，因此直到最近其生产仍然依靠纯手工制作。为了满足市场对价格适中、制造难度较低的高品质耳机的需求，英国华威大学 (Warwick University) 的附属公司华威音频技术有限公司 (Warwick Audio Technologies Limited, 以下简称 WAT) 设计了一款高精度静电层压材料 (High-Precision Electrostatic Laminate, 简称 HPEL) 换能器。此项专利技术的创新性在于换能器是由一张极薄的振膜和一块 (而非一对) 导电板构成的。目前，WAT 已研发出了厚度仅为 0.7 mm 的层压薄膜，可与静电耳机完美契合。

新型 HPEL 的轻量薄膜结构由连续轧制工艺制备而成。“我们开发的这项技

术堪称独一无二，” WAT 的 CEO Martin Roberts 解释道，“HPEL 换能器的组成部分包括由金属化聚丙烯薄膜、带六边形单元的聚合物衬垫，以及导电网。” (图 1)

在传统的扬声器中，直流电 (DC) 被施加于弹性膜上，交流电 (AC) 被施加于膜两侧的导电板上。与之不同的是，在 WAT 的单面扬声器中，直流电虽然依旧被施加于弹性膜上，而交流电信号则被施加在了紧贴振膜的单层金属网上。

得益于上述加工方案，WAT 的换能器制造成本远低于传统静电扬声器中的换能器。这一突破性的进展意味着静电扬声器有望被应用于高品质的音频设备中，这也是静电学首次展现出其潜在的商业价值。

⇒ 模拟声音回放

为了在不影响音质的前提下，大幅降低加工难度和成本，WAT 的研发团队在确定最终设计方案之前，全面考察了会对整体方案产生影响的多个设计元素。“我们虽然开发出了许多能达到设计预期的物

理样机，然而最大的问题在于，我们无法确定在改变某种材料和多个设计参数后，会给换能器的性能带来怎样的影响。” Roberts 回忆道。

HPEL 的动力学性能受制于各设计参数间极为复杂的相互作用，这些参数

“过去，我们每周都不得不亲手制作多个产品样机；而现在我们只需在软件中进行简单的调试，便能获得令人满意的设计成果。此外，我们还能够方便地根据客户的个性化需求对换能器进行定制。”

— MARTIN ROBERTS, 华威音频技术公司 CEO

包括振膜张力、交流信号电平、扬声器的几何结构、材料的弹性和介电属性、热粘性声损耗，以及靠近振膜开口侧由空气引起的辐射声质量。设计人员希望通过减少低频滚降、降低失真，并最大限度地提升在给定信号输入下的声压级，从而改进设备的低音表现力。然而，他们无奈地发现，任何组件的细微变化都会对声音的输出造成不可忽视的影响。

尽管 WAT 拥有不少机械、电子和声学领域的专家，但由于公司自身不具备仿真分析能力，因而难以深入了解各因素间的相互作用。为了对 HPEL 换能器的设计进行仿真优化，WAT 向 Xi 工程咨询公司寻求了帮助。Xi 工程咨询公司是 COMSOL 的认证咨询机构，专门从事计算建模、设计咨询、解决机械的噪音和振动问题，以



图 1. 从上至下依次为:WAT 研发的 HPEL 换能器, HPEL 换能器成品的层压材料、装配图, 以及分解图。所有层压材料均为英国制造。

及其他技术服务。

Xi 工程咨询公司的技术总监 Brett Marmo 博士领导的研究团队使用 COMSOL Multiphysics® 软件开发了仿真模型, 并基于模型对 HPEL 的性能表现进行了分析。在对 HPEL 的不对称设计进行修正时, 会引起多种非线性效应。借助

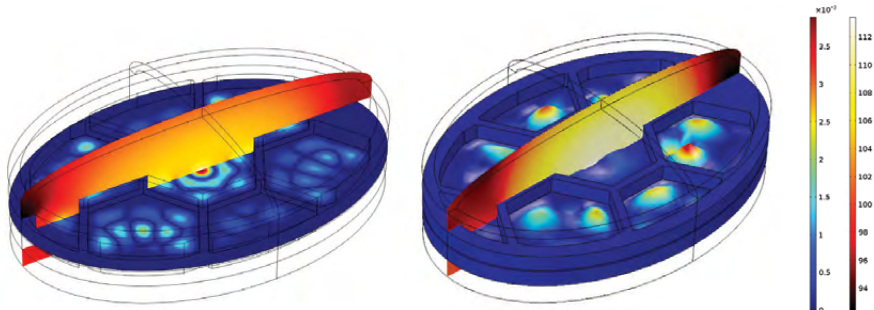


图 2. 如仿真结果图所示, 通过在频域内求解声学 & MEMS 的全耦合模型, 开发团队获得了声压级 (单位为 dB, 热度颜色表面图) 和振膜的位移 (单位为 mm, 彩虹颜色表面图)。左图: 频率为 5000 Hz 时的求解结果; 右图: 频率为 5250 Hz 时的求解结果。

COMSOL® 软件, Xi 工程咨询公司可以对这些非线性效应进行模拟。

“我们将初始模型设置得十分简单, 从而可以将更多的注意力放在那些会影响声音质量的特性上。举例来说, 为了研究 HPEL 在低频下的性能表现, 以及声-结构相互作用, 我们最大限度地降低了一阶谐波的频率。” Marmo 在描述初步试验时解释道, “我们的模型显示了外加电压对信号电平的影响, 这帮助我们理解了声音失真的初始状态。”

由于换能器只使用了一块导电板, 因此静电力会随着振膜位置的变化而发生变化, 即与振膜和网间距的平方成反比。只要 WAT 的工程师了解了由振膜位置变化引起的非线性失真, 并能预测其影响, 便可通过电信号消除与之相关的失真。

⇒ 完善 HPEL 换能器的设计

随后, Marmo 在更为全面的仿真模型中耦合了结构-MEMS-声学现象。他通过模型检验了不同参数带来的影响, 这些参数包括金属丝网中六边形单元的尺寸、金属网层的厚度、振膜张力、振膜与网层的距离以及各个元件的材料属性。此外, 由于直流偏压是低频失真的常见原因, Marmo 和同事们还研究了不同直流偏压造成的影响。他们分析了导电板的电导率, 用于辨别板上不同区域的电压是否相同。随后, Marmo 的团队使用 COMSOL 对热粘

性声损耗进行了研究, 并模拟了振膜在不同频率下的位移 (图 2)。

Marmo 评论道: “事实告诉我们, 只有这样的仿真分析才能真正准确地对平面静电换能器进行模拟。在这个项目中, 我们可以通过集总参数建模对耳机特定方面的性能进行分析, 例如低频幅值响应。一个在某些情况下十分合适的参数, 但有可能引起其他方面的严重失真。多物理场建模包含了影响人类对声音感知的所有维度, 包括时域响应和非线性失真。”

自从引入了多物理场仿真, WAT 的工程师便能实时调整设计参数, 进而优化组件的整体性能。他们成功地预测了引起频率响应中尖峰的原因, 并对信号进行平滑处理, 从而使装置具有更高的保真度。

“仿真分析帮助我们节省了大量的费用和时间,” Roberts 说道, “过去, 我们每周都不得不亲手制作多个产品样机; 而现在我们只需在软件中进行简单的调试, 便能获得令人满意的设计成果。此外, 我们还能够方便地根据客户的个性化需求对换能器进行定制。”

Marmo 的研究团队将 WAT 设计团队提供的物理测量值相应的仿真结果进行了比较。“仿真结果与物理测量结果惊人地一致。” WAT 公司的 CTO Dan Anagnos 评论道, “亲眼看见仿真模型变成现实, 并且

能精确地预测扬声器的性能表现，这大概是仿真分析工作最令人激动的地方。”

⇒ 仿真 App 赋予用户更大的自由度和灵活性

在验证仿真结果后，WAT 对设计成果十分满意。Xi 工程咨询公司的下一步计划是将后续的仿真分析工作移交给 WAT。借助 COMSOL 软件提供的“App 开发器”工具，Marmo 的团队可以基于仿真模型开发 App，并通过网络对其进行分享与管理。

用户只需在仿真 App 的操作界面中修改相应的输入值，便能对大量参数进行测试，其中包括直流偏压、交流信号电平、频率范围和解析度、材料属性、扬声器尺寸、金属丝网的形状和尺寸，以及衬垫位置等（图 3）。由于用户在使用仿真 App 时无需访问原始模型，因而即便没有学习过软件，也能自如地运行测试。

“仿真 App 为 WAT 省去了购买软件和聘请资深仿真专业人员的开销。” Marmo 说道，“仿真 App 让客户真正地掌控了设计进程，他们可以随心所欲地进行测试，再也不必因为某些细微的调整而反复联系我们。同时，这也让我们的设计团队有了更多的时间和精力去迎接新的挑战。” Xi 工程咨询公司期望在今后的客户咨询工作中更多地使用仿真 App，使其发挥更大的作用。

WAT 也将 App 分享给了自己的客户，方便他们找到与特定的耳机型号匹配的 HPEL 换能器设计。“Xi 工程咨询公司的团队十分出色。他们拥有丰富的专业背景和经验，帮助我们对产品中的复杂问题进行了有效的分析，并一一解决。” Roberts 补充道，“Xi 工程咨询公司团队开发的 App 直观简洁，绝对是一个意外惊喜。我们不用担心任何知识产权的泄露，放心地将产品设计 App 交到客户手中。这样他们可以自行对不同的设计进行测试，从而将这一技术融合在高端的耳机产品中。”

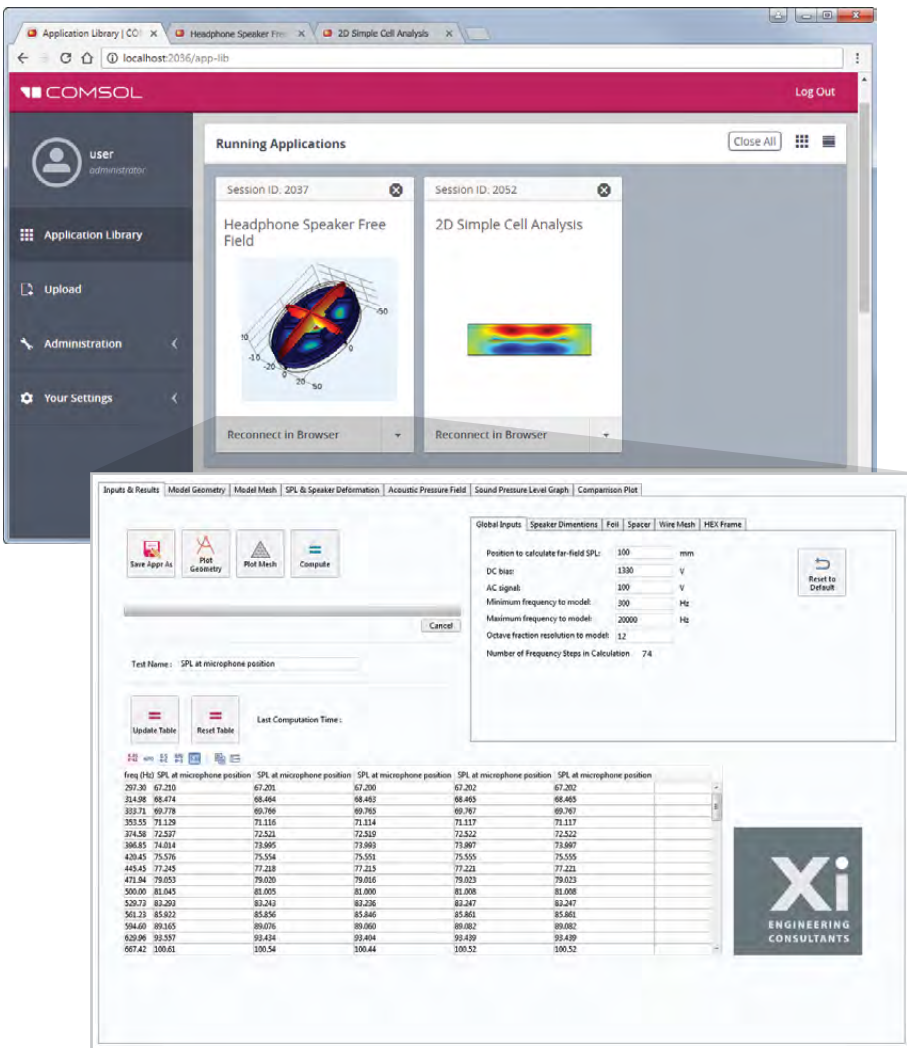


图 3. 前置图：在 Xi 工程咨询公司开发的仿真 App 中，工程师可以修改一系列参数，其中包括频率、电输入、扬声器尺寸，以及振膜、衬垫和金属丝网的属性。数据结果显示了不同实验中的声压级、振膜位移、不同直流偏压的频率响应，并比较了仿真数据与实验结果。后置图：通过 COMSOL Server™ 产品部署仿真 App，方便相关工作人员在网页浏览器中进行访问。



从左到右依次为：Brett Marmo, Xi 工程咨询公司技术总监；Martin Roberts, 华威音频技术公司 CEO；Dan Anagnos, 华威音频技术公司 CTO。