

# 站在助听器研究领域的前沿

美国楼氏电子公司的工程师与助听器行业展开合作, 期望借助多物理场仿真消除助听器的声反馈现象。

作者 **GARY DAGASTINE**

据报道, 美国总人口中有近 20% 在听力方面存在障碍, 并且实际比例可能会更高, 这是因为很多患者不愿意承认自己患有听力障碍。听障人士需要依靠微型助听器来改善自己的听力水平和生活质量。一款助听器产品从最初的设计阶段到最终面市, 离不开大量的研发工作。

工程师在助听器的设计过程中经常会遇到大量的技术难题, 声反馈 (Feedback, 又称啸声) 是其中最主要的一个。这种现象不仅会产生尖锐的啸叫声, 同时还会限制助听器的增益效果。Brenno Varanda 是位于美国伊利诺伊州艾塔斯卡 (Itasca, IL) 的楼氏 (Knowles) 电子公司的高级电声工程师。他解释说: “当本应向耳道内传递的声音或振动被助听器的麦克风接收后, 经放大器回传, 便会产生不必要的振荡, 这种现象就是声反馈。”

Varanda 接着解释道: “对楼氏电子的客户而言, 设计一款新型的助听器不仅费用高昂, 通常还要耗费 2~6 年的时间才能完成。” 准确的模拟可以帮助设计人员选定扬声器型号、改进隔振装置以及封装组件, 并能让麦克风尽可能少地接收到从扬声器发出的能量。因此助听器行业迫切需要能够加速研发的简单换能器模型, 来帮助他们为消费者提供更多的高质量产品。然而完整的扬声器和麦克风模型结构十分复杂, 而且还包含了许多与反馈控制无关的因素。Varanda 表示, “作为换能器的设计者, 我们必须清楚地了解产品涉及的电磁、力学和声学物理场, 但这些复杂的物理原理对于客户

来说却不是必要的。”

作为全球领先的助听器换能器、智能音频设备和专业声学元件供应商, 楼氏电子从多方面入手, 希望开发出易于应用并能与客户产品兼容的换能器声振模型。这些模型的作用是让助听器的设计者在不牺牲产品性能的前提下, 以更高效的方式将原型机转化为最终产品。

## ⇒ 助听器的设计和声反馈

在助听器的设计工作中有两个相互冲突、却又不得不同时考虑的需求: 助听器既要小巧隐蔽, 又要能够提供强劲的声音输出以弥补佩戴者的听力损失。用户更加喜欢佩戴轻巧、不易被发现的助听器, 然而这将进一步增加声反馈问题的解决难度。Varanda 补充道, “助听器设计中的一个常见难题是如何在确保声反馈可控的前提下, 将所有元件塞到尽量小的空间内。”

一个典型的小型耳背式助听器的元件包括可将环境声音转换为电信号的麦克风、用于处理电信号的数字信号处理器、用于放大电信号的放大器, 以及微型扬声器 (即受话器) (图 1)。受话器“接收”到经过放大的电信号后, 将其转换成声能或声音, 然后声音会经由管道或耳模 (一种在耳内用于传导声音的装置) 进入耳道。

受话器中有一个被称为簧片的电磁控制杆, 与振膜相连接, 而振膜通过振动就能产生声音。受话器内部的机电力会产生反作用力, 并通过助听器装置向外传递振动, 产生的声音会被麦克风捕获。随

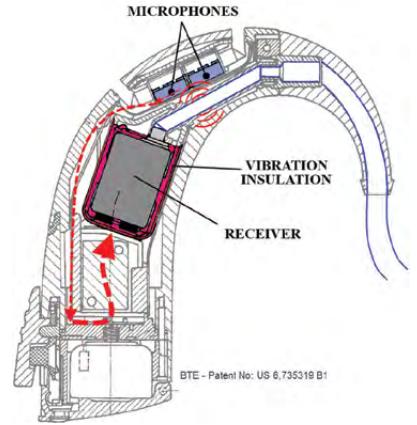


图 1. 标准的耳背式助听器由麦克风、隔振装置、受话器等元件组成。由于元件布局过于紧凑, 容易产生负面的声学 and 力学反馈。图片由楼氏电子公司提供。图注: MICROPHONES - 麦克风; VIBRATION INSULATION - 隔振装置; RECEIVER - 受话器

后, 声音信号再次被麦克风中的放大器放大, 并传递回受话器中, 从而引起声反馈。该路径如图 1 所示。

## ⇒ “黑盒子”模型

受话器只有一个作用: 把麦克风放大的电压信号转换为声音。虽然它的结构看似很简单, 但实际转换过程却相当复杂 (图 2)。电信号在被转换为声信号之前, 首先会依次转换为磁信号和机械信号。每一个转换步骤均有各自的频率相关特性。了解所有内部组件的综合效应, 对受话器的设计工作来说至关重要。自

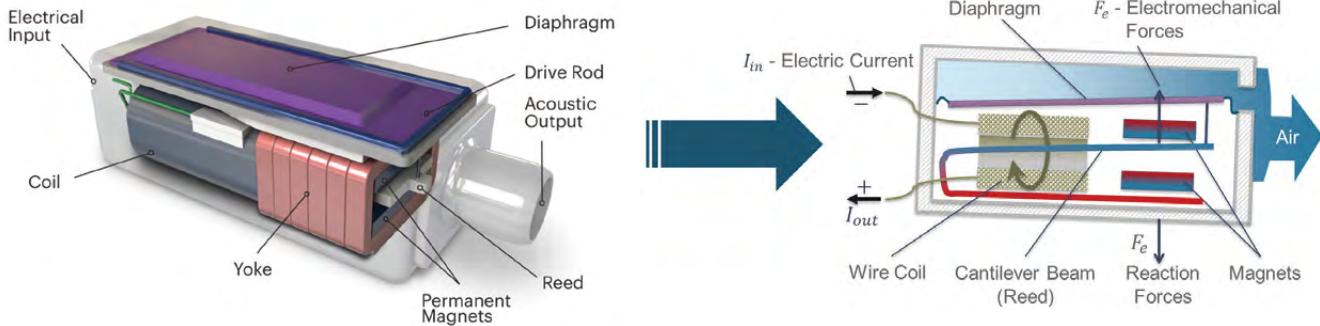


图 2. 受话器是助听器中的关键元件，它包含一个微型扬声器，扬声器中的电磁控制振膜可以产生声音。受话器内部的电磁力会引起结构振动，进而产生力学反馈。图注：Electrical input - 电输入；Coil - 线圈；Yoke - 磁轭；Permanent magnets - 永磁体；Reed - 簧片；Acoustic output - 声能输出；Drive rod - 驱动杆；Diaphragm - 振膜；Electric Current - 电流；Wire Coil - 线圈；Cantilever Beam - 悬臂梁；Reaction Forces - 反作用力；Magnets - 磁铁；Electromechanical Forces - 机电力

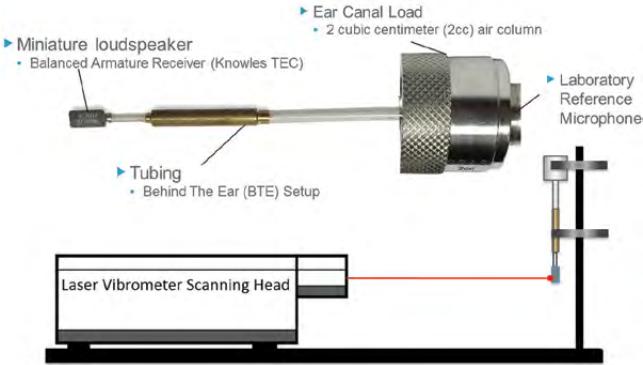


图 3. 实验装置的硬件和原理图。图注：Miniature loudspeaker - 小型扬声器；Balanced Armature Receiver - 平衡电枢受话器；Tubing - 导音管；Behind The Ear (BTE) Setup - 耳背式 (BTE) 助听器装置；Laboratory Reference Microphone - 实验室标准麦克风；Ear Canal Load - 耳道负载；2 cubic centimeter air column - 2 立方厘米的空气容积；Laser Vibrometer Scanning Head - 激光测振仪扫描头

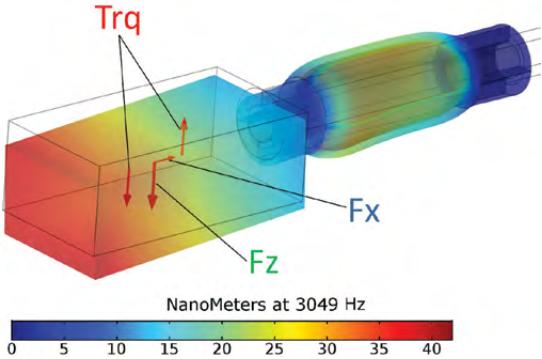


图 4. 受话器和硅胶导管配件在 3 kHz 频率下，力和位移的仿真结果。单位为纳米。

20 世纪 60 年代起，楼氏电子的工程师一直在使用复杂的等效电路方法对助听器内部的所有电磁-力学-声学效应进行模拟。

为了准确模拟受话器中复杂的物理现象，设计人员需要一个极为庞大、复杂的多物理场有限元模型，因此难以实现快速高效的助听器设计。Daniel Warren 博士是助听器行业的专家，主要从事受话器和麦克风的研究，他在 2013 年推出了“黑盒子”模型。这一模型采用了尽可能少的简单电路元件，并获取了平衡电枢

受话器中电压和输出声压级之间的基本电声传递函数。模型中剔除了那些与反馈控制无关的因素。

Warren 和 Varanda 向我们演示了简化模型的一个关键步骤：在几乎不增加复杂度的前提下，将简化的电声电路转换为强大的声振模型。Warren 解释道，“转换是通过探测部分‘黑盒子’电路来实现的，在这段电路中，电感器两端的电压与产生结构振动的内部机械力成正比。”

在“黑盒子”和声振模型被应用于产品设计前，设计人员需要参照实际受话器

的声学 and 机械装置对模型进行测试和验证。早在 2014 年，楼氏电子公司就开始在全球范围和许多助听器行业的客户展开了合作，希望借助 COMSOL Multiphysics® 软件和行业标准测试对这一模型进行验证。

⇒ 合力完成验证工作

为了验证模型，工程师需要同时测量声输出和振动力，而所使用的测试结构要能够方便地用有限元方法进行分析。与常规的助听器测试一样，该测试将受

话器连接到一小段导音管上，导音管的另一端连接到体积为2立方厘米的封闭空腔中（标准的人耳道声负载测试），如图3所示。空腔内声压的测量使用了实验室级的麦克风。为了验证模型的稳健性，研究人员采用了与耳背式助听器相似的复杂导音管装置来测量受话器。在此项设计中，导音管的直径可以发生变化，其长度足以支持多次声共振。在测量声能输出的同时，研究人员利用激光测振仪来捕获了受话器的结构运动。他们还通过观察受话器外壳表面多个点上的运动，对平移和旋转运动进行了测量。

Warren 和 Varanda 与楼氏电子的多家客户合作，顺利完成了上述测量任务。在 COMSOL Multiphysics 的帮助下，他们将简化的声振电路模型引入到了上述测试装置的仿真模型中。仿真耦合了受话

器和与之相连的硅胶导管之间的力学相互作用、导音管各段横截面内的热粘性损耗、腔体和管道内的声压载荷，以及“黑盒子”受话器模型内部的电磁-声学效应。

COMSOL 模型计算出了输出声压级、机械力与外加电压、频率和材料属性之间的依存关系。图4显示了3kHz时的位移仿真结果，以及受话器上承受的作用力。

Varanda 将仿真结果与实际测量数据进行了比较，二者完美契合（图5）。结果表明，施加在振膜和簧片上的力取决于输出声压，然而，作用在振膜上的力与结构受到的反作用力之间被证明是成比例的，这与研究人员的预期相符。

#### ⇒ 传播知识，共享智慧

楼氏电子将模型分享给了其他助听器公司的工程师，帮助他们解决各自系统的声反馈问题。通过对硬件内部的声学、力学和电磁行为进行全面的表征，设计人员可以自由地对产品进行虚拟优化。

Varanda 表示：“COMSOL 是为数不多的能将‘黑盒子’受话器的集总电路与声学和固体力学相耦合的建模仿真工具之一。与其说对助听器设计的验证和优化是科学研究，倒不如说是一种艺术创作。我们非常希望这些模型能够助力新型助听器的研发。”

助听器行业的所有从业人员都能受益于这种跨企业的协作方式。“助听器设计人员不想把精力浪费在复杂的换能器模型和耗时的仿真中。他们只想专注于手中的设计工作，通过更换不同型号的换能器来探究这些元件是如何协同工作的。” Varanda 补充道，“COMSOL 模型让设计人员的愿望变成了现实，他们可以轻而易举地在一款助听器装置中对比上百种换能器的性能。”

借助多物理场仿真，助听器的设计者现在能够以一种更好、更快、更经济的方式减少声反馈，并改善助听器的整体性能，进而为听障人士提供更多贴合需求的选择。❖



Brenno Varanda, 楼氏电子公司的高级电声工程师。

借助多物理场仿真，助听器的设计者现在能够以一种更好、更快、更经济的方式减少声反馈，并改善助听器的整体性能，进而为听障人士提供更多贴合需求的选择。

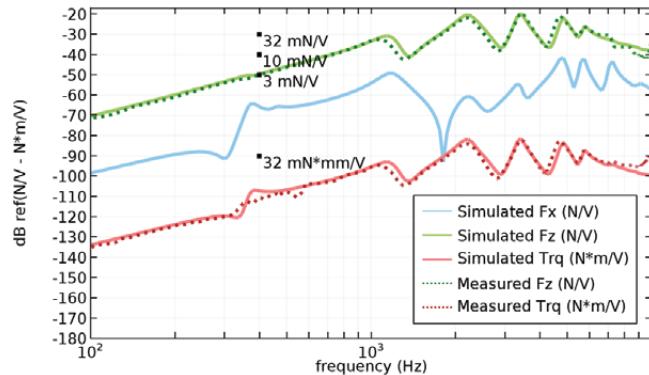
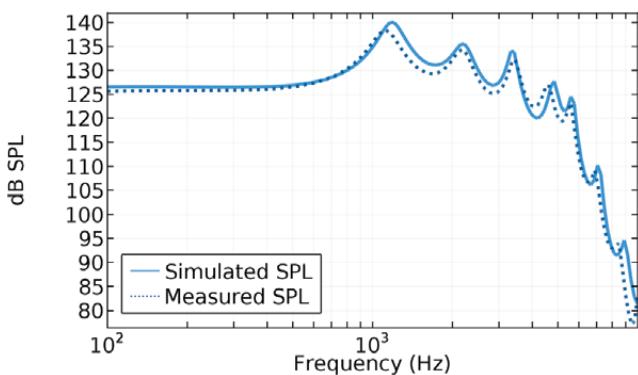


图5. 左图：体积为2立方厘米的耦合器内的声压级测量数据（虚线）和仿真结果（实线）。右图：在受话器上的力和扭矩的测量数据（虚线）与仿真结果（实线）。