

声学超表面仿真成就完美音质

经过精心设计的声学超表面能够调控和引导声波, 产生负折射率等天然材料所不具备的声学特性。瑞士洛桑联邦理工学院 (EPFL) 的一支研究团队模拟了一种新型“主动式”声学超表面, 可用于提升音乐厅的音响效果, 改善住宅隔音效果, 还能够在飞机飞行过程中降低令人难以忍受的发动机噪音。

作者 **GEMMA CHURCH**

传统声学处理装置存在一个基本限制, 即装置尺寸限制了其应用频率范围(装置越薄, 低频吸声性能就越差); 或者只能依靠共振来增强声学效果, 因此被限制在很窄的频带范围内。举例来说, 在录音室录制音频的过程中, 会不断产生低频声音, 影响音频质量。通过在墙角放置薄膜吸声体(低频声陷)可以吸收低频声音, 美中不足的是, 吸声体只对共振频率附近的有限频率范围起作用。然而, 这些恼人的低频声音跨度较大, 通常为 20~200 Hz, 因此单一的声学处理方式无法在这一频率范围内达到较好的低频吸声效果。

⇒ 引导波前传播

设计一款完美的低频吸声产品是不切实际的, 可以想象, 这样的产品结构必然体积庞大, 而且难以优化。瑞士洛桑联邦理工学院 (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 简称 EPFL) 声学教研组负责人 Hervé Lissek 表示: “传统的薄膜谐振器只能在几赫兹范围内发挥作用, 这一限制使它无法成为主流应用。我们的想法是开发一款兼具宽波段和主动性的设计。” 沿着这个思路, 他们提出了主动式电声谐振器 (AER) 的概念, 设想将传统扬声器用作薄膜吸声体, 其声学特性可

以通过电气方式进行调整 (图 1)。

基于在 AER 研究中获取的宝贵信息, Lissek 和他的团队明确了声学超表面概念的含义。从根本上说, 声学超表面是由多个小型声学单元(膜、微穿孔、腔等)构成的表面, 表面整体具有各组成单元所不具备的超常声学特性。根据超表面概念, 这种微单元组合使得波长远大于单元尺寸的声波会受到影响, 因此这些基本单元具有“亚波长”特性。经过特殊设计的超表面具有吸声性能, 或者能够让波在超表面上以指定的角度进行反射。

⇒ 主动适配使声音更加优美

为了模拟声学超表面, 必须将该表面分解为亚波长的基本单元, 才能人为地改变声波波前, 得到期望的结果。Lissek 及其团队提出的主动式声学超表面是一个由亚波长扬声器振膜构成的表面阵列, 每个振膜都包含一个独立可编程的主动式声阻抗, 从而可以局部控制超表面的不同反射相位。

研究团队使用主动式控制框架来控制超表面的反射相位, 这一灵感源自 AER 设计概念。AER 可以通过电声控制的方法进行调谐或修改 (图 3)。Lissek 解释说: “我们能够通过电子系统来调整薄膜, 借



图 1. 主动式电声谐振器原型。图片来源: EPFL/Alain Herzog。

此改变超表面对声音分布的反应方式, 还能使薄膜主动适应传入的声音。举例来说, 假设您试图掩盖飞机的发动机噪音, 那么在不同的飞行阶段, 主动式声学超表面会根据发动机的频率主动调整超表面, 其范围在几百到几千赫兹不等。” 使用单个扬声器振膜作为声谐振器时, AER 控制器可以在较大的范围内调整振膜的声阻抗, 在此过程中, 振膜的谐振频率变化可能超过一个倍频程。

利用这一概念, 你甚至可以让声波以指定模式进行反射。Lissek 补充说: “宽带噪声(类似于光学中的白光)入射到声学超表面后, 超表面可以起到声学棱镜的作用, 对噪声进行分解, 从而使不同频率的声音指向不同的方向。从艺术角度而言, 对各频段声音的随意操控蕴含着无限的可能性, 然而, 目前最切合实际的应用主要还是隔音降噪。”

⇒ 数值仿真赋予声学设计以生命

在模拟声学超表面及其周围的声学环

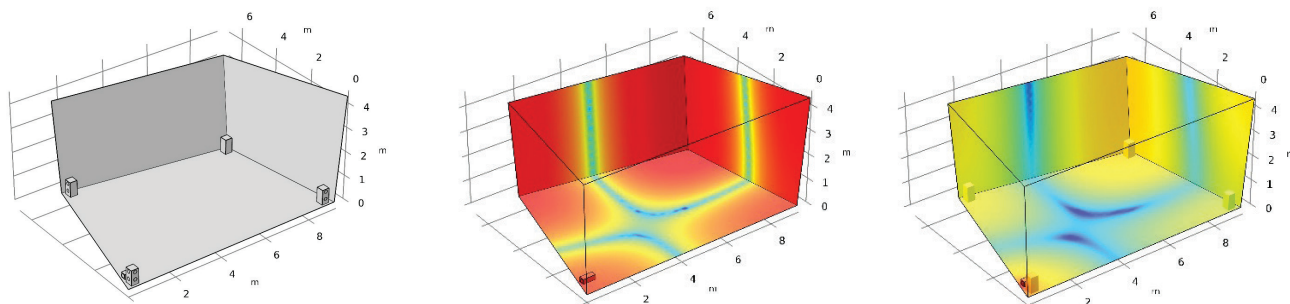


图 2. 左:混响室几何模型,其 4 个角落分别放置了一台 AER 原型。另外两个绘图依次表示频率为 35.3 Hz、110 模式激励的情况下,未放置与放置吸声器时室内的声压级分布。

境时,必须考虑许多复杂的现象。Lissek 表示:“在产品 设计过程中,借助 COMSOL Multiphysics,我们不仅能够评估设备的声学性能,还能精确分析设备中无法进行实验评估的物理量。”

接下来,我们在前面的录音室案例的基础上,继续进行研究。现在,房间的四个角落各放置了一个小型主动式吸声器(图 2),用于吸收低频声音。为了模拟这些设备的吸声方式及其对室内声场的影响,我们需要了解室内不同位置的声压分布。Lissek 解释说:“利用多物理场仿真,我

们可以对是否放置主动式吸声器这两种情况进行分析,即时地获取室内的频率分布。通过对室内声场分布进行模拟,我们可以得到一些重要的参数,例如在共振频率下,室内声音消散的模式衰减时间。”

“在软件的帮助下,我们可以在十秒内就完成所有工作。我们无需在空间的每一点都进行声学测量;只需使用软件在模型内随意移动吸声器,就能轻松绘制房间的声压分布图,并推断吸声器位置的改变对声压分布的影响。”Lissek 补充道。

⇒ 确定正确的方向,优化超表面设计

Lissek 和他的团队提出了许多不同类型的声学超表面设计,包括螺旋式声学单元、亥姆霍兹共振器和主动式声学超表面,并利用数值仿真进行了分析。

团队首先设置了单个 AER 单元的反射特性,用于确定这些基本单元的控制规律。接着,根据商用的标准电动扬声器,将确定的控制规律应用到 AER 基本单元,目标是通过实验评估沿超表面 32 个单元的目标反射相位的可行性(图 4)。当目标反射系数通过验证后,他们就对超表面进行建模,并执行了全波段仿真。“每一个单元的

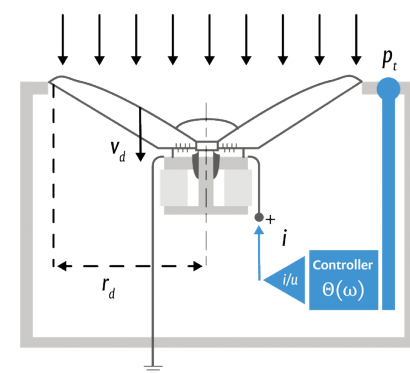


图 3. 主动式电声谐振器 (AER) 概念示意图。图注: Controller - 控制器

振动类似活塞运动,因此我们可以直接指定单个振膜的声阻抗。”Lissek 解释道。

团队采用入射角为 -45° 的平面波背景压力对两种工况进行了模拟。超表面上反射波的预定角度分别设为 60° 和 0° ,打破了由斯涅尔-笛卡尔(Snell-Descartes)反射定律得到的最大角度。图 5 和图 6 表示当 $f = 350 \text{ Hz}$ 时,这两个研究角度在 xz 平面上的反射声压级仿真结果。可以看出,在超表面基本单元上的声阻抗作用下,波前可以偏转指定的角度。

图 5 和图 6 表明,声波的最终方向与目标反射角基本一致,这证实了在相对较宽的频带(接近 350 Hz 的一个倍频程)范围

“在产品 设计过程中,借助 COMSOL Multiphysics,我们不仅能够评估设备的声学性能,还能精确分析设备中无法进行实验评估的物理量。”

— HERVÉ LISSEK, EPFL 声学研究组负责人

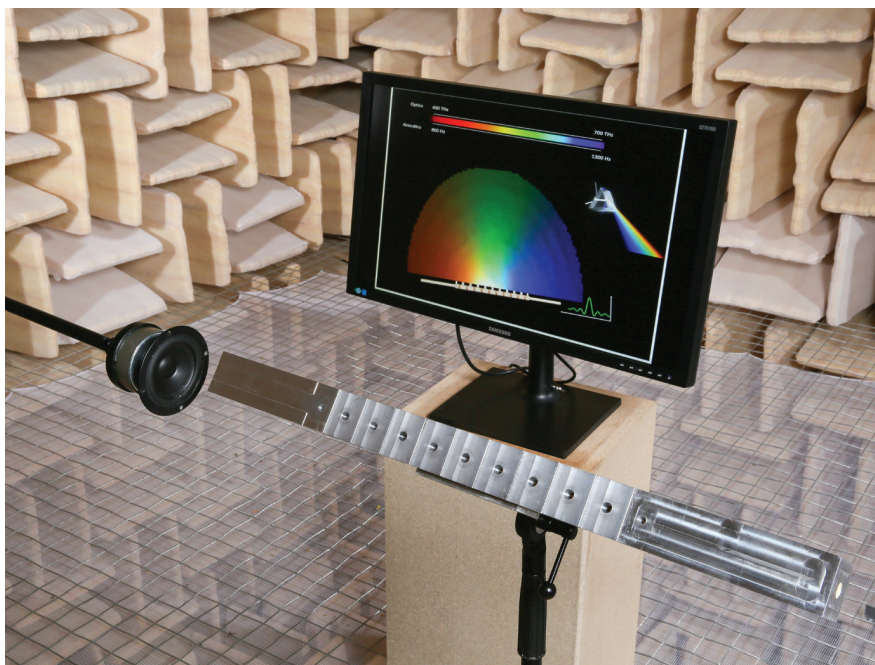


图 4. 声散射棱镜原型。图片来源:EPFL/Alain Herzog。

内, AER 对实现相干转向的有效性。见证了主动式声学超表面在更大频率范围内的显著效果后, 研究人员能够利用仿真继续专注于设计和实验研究。Lissek 补充道: “我并不认为自己是有限元建模方面的专家, 所以对我个人来说, COMSOL 多物理

场仿真的一大突出优势在于, 它通过简单直观的界面提供了许多功能强大的建模功能, 操作起来非常方便。”

⇒ 不懈地推进超表面研究

在下一阶段, 研究人员希望对声学超

表面进行全三维仿真。Lissek 解释说:

“在当前的初步研究中, 我们使用了简化的一维模型(假设超表面沿 y 轴无限延伸), 主要是为了加快计算速度。但是为了能够获取更多信息, 我们需要创建三维声学模型, 并在三维域中加入真实的二维超表面, 详细了解反射波的特性(例如, 在 x 轴和 y 轴截断超表面应该可以增强反射波的方向性)。”目前, 他们正在将集总电路建模集成到现有模型中, 以期深入了解声学域和主动控制系统的电学分量(比如流入各个 AER 的电流)之间的耦合作用。这种耦合分析还有助于他们开发先进的控制策略, 例如, 所有 AER 都实现电互连。

为了将工作成果转化为现实, Lissek 和团队成员正在探索如何将这种声学超表面与室内设计结合起来。“想象一下, 如果在剧院或音乐厅中布置声学超表面, 我们就能控制声反射的空间分布, 为观众创造和谐统一的音响效果。通过电控方式来操控室内声音传播, 这无疑是每个声学专业人员追求的梦想。” Lissek 总结道。❖

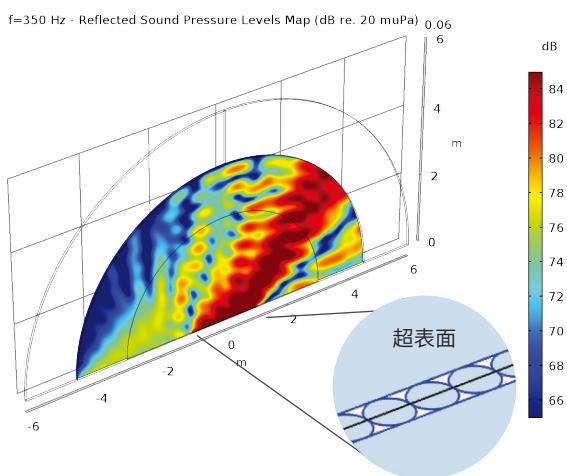


图 5. 频率为 350 Hz、指定反射角为 60° 时, 32×32 超表面基本单元阵列的反射声压级。

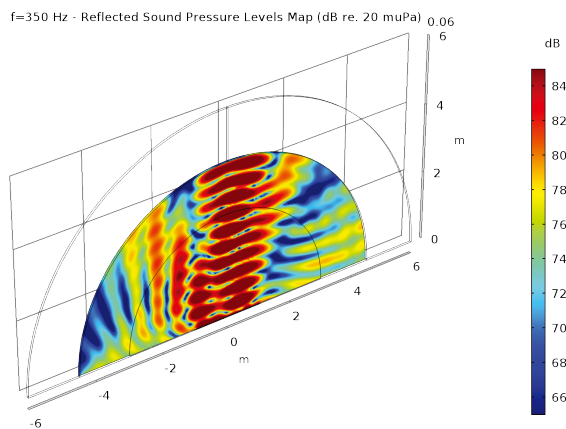


图 6. 频率为 350 Hz、指定反射角为 0° 时, 32×32 超表面基本单元阵列的反射声压级。