

# 操控声音：仿真助力声学超材料的前沿研究

从消费类电声产品到超声成像，声学隐形技术的应用十分广泛。对其使用的超材料结构进行研究，无疑是一次意义深远、激动人心的探索。通过对变换声学和高度各向异性结构的研究，科学家们正借助仿真分析设计声学超材料。

作者 **GEMMA CHURCH** 和 **VALERIO MARRA**

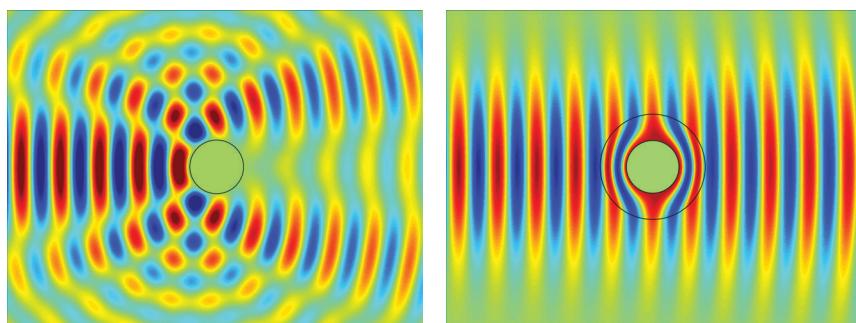


图 1. 控制由物体引起的声波散射。左图：声波由刚性物体左侧入射时，由于障碍物的影响，散射非常明显：声波呈现准镜面反射，物体背后阴影较深，一部分声波全向传播。右图：在同一物体周围施加以理想隐形外罩，我们可以看到，反射和阴影都不复存在，能量绕过超材料物体继续传播，这一过程看上去几乎没有任何损耗。

超材料是一种特制的人造材料，具有天然材料不具备的性能，例如折射率为零，甚至为负值。研究人员可以利用这种材料进行前沿设计和功能创新，例如超级透镜和吸音器等。近年来，研发人员已将研究重点转向利用超材料装置来随意操纵声波，其中包括让物体在声学上达到隐形。

这项研究已经获得成功。美国杜克大学的工程师们仅利用一些冲孔塑料板，经过了大量的数学建模和数值仿真工作，终于向世人展示了首件三维的声学隐形斗篷。这一装置能使物体周围的声波平滑地弯曲，填充到物体之后的阴影空间，从而造成声波始

终在周围空气中以直线传播的错觉。

声学隐形仅仅是变换声学这一广义概念中的一个方面，经过了精心设计的材料几乎可以任意地使声波产生变形并加以控制。从科幻小说到现实世界，这项技术的突破性进展在许多领域具有非常广泛的潜在应用。

## » 静音超材料的设计

杜克大学联合麻省理工学院、加州大学伯克利分校、罗格斯大学以及德克萨斯大学奥斯汀分校，在美国海军研究办公室的赞助下成立了一个隶属于“五年研究计划”的子项目，其目标是开发一种声学超材料的新概

念：即包含有效材料参数并可在真实世界被实际制造出来。杜克大学电子与计算机工程系的 Steve Cummer 教授表示：“数学模型是研究工作的起点。我们借助数值仿真对声学超材料的设计进行优化，然后再将它转化为现代制造技术并进行实验测试。”

该研究小组目前的工作重点之一是开发出可在水相环境（包括人体在内）中使用的声学超材料结构，以便能够任意变换并控制传入的声波。事实证明，声学隐形结构（见图 1）是一个非常有用的测试平台，它能形象地展示人们可以借助变换声学来随心所欲地控制声音。这些针对水相环境的设计昭示着超材料研究方向正在发生转变：从最初的电磁隐形和变换光学，发展为现在用于空气中的声学隐形和变换声学，同时应用范围也从二维结构发展为空间三维结构。

从最早的电磁隐形研究开始，COMSOL Multiphysics® 软件就在此类研究的各个阶段起着至关重要的作用。Cummer 介绍说：“我们的第一篇论文展示了使用真实的电磁材料参数来对电磁隐形进行仿真的过程，当时我们使用了 COMSOL® 软件来进行仿真，

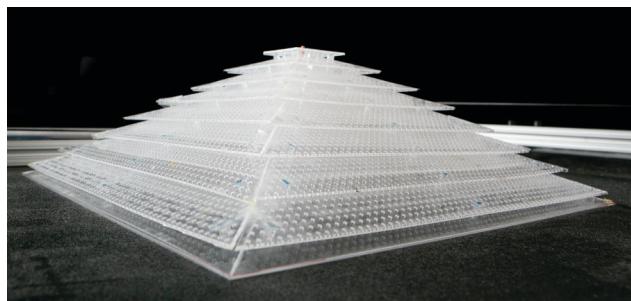
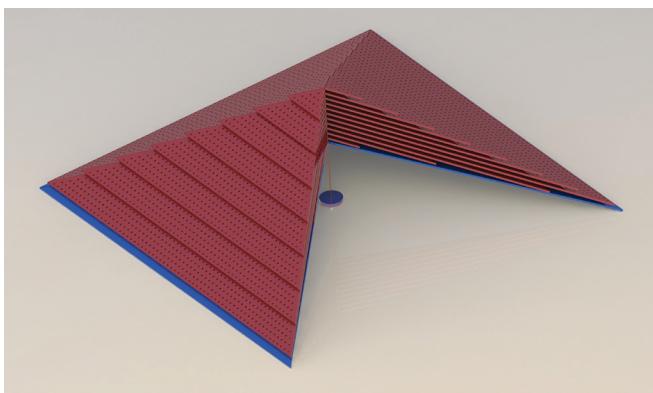


图 2. 金字塔形三维声学隐形外罩的设计图 (左) 和构造图 (右)。

因为它是仅有的几款能够任意调节各向异性电磁材料参数的电磁分析软件工具之一。”

为了解决声学问题, 研究人员便开始着手推导所需的材料属性。Cummer 解释说: “为了使用变换声学来随意控制声音, 我们首先应用坐标变换来描述如何使声场在指定的装置中按期望发生弯曲、扭曲或变形。一旦定义好坐标变换, 就可以推导出使声场发生特定变形所需的有效材料参数。”

分析得到的这组材料参数几乎全部都呈各向异性, 这意味着在不同方向的材料属性都是不同的。为此, 研究人员必须有能力改变在仿真过程中用于表征物理场的方程。“借助 COMSOL 软件, 调节材料属性和底层的动力学方程都变得非常简单直观。这一点十分重要, 因为我们可以将一个额外的各向异性扭曲添加到模型中, 并开始仿真我们曾在变换声学探索过的一些设计。” Cummer 补充道。

据 Cummer 介绍, 他们的设计已大获成功, 最终得到的材料的实际性能与仿真结果“惊人地吻合”。“如果你想检测得到的某个结构是否契合你的设计并产生符合预期的物理效应, 超材料领域文献中的黄金标准会建议你由声学超材料产生的完整声场进

“ 借助 COMSOL 软件, 调节材料属性和底层的动力学方程都变得非常简单直观。

— STEVE CUMMER, 杜克大学电子与计算机工程系教授

行测量, 并将测量数据与仿真结果进行对比。”他补充道。

在研究中即使无法避免地出现了人为误差, COMSOL 软件还是能始终如一地给出正确的结果。在早期的一个项目中, 研究人员设计并构造了一个具有一连串细微孔状结构的二维声学隐形外罩, 但实验测试结果与仿真结果却并不相符。团队成员当时迷惑

不解, 无从发现导致此问题产生的实质原因。后来他们才突然意识到, 在构造隐形外罩过程中, 研究人员曾将不同的孔径参数搞混, 这才导致了结构中的微孔的尺寸错误。

Cummer 说: “COMSOL 软件带来的高效率对我们的工作至关重要, 使我们有充足的时间和精力可以对理想的参数和实际要构建的完整结构分别运行数值

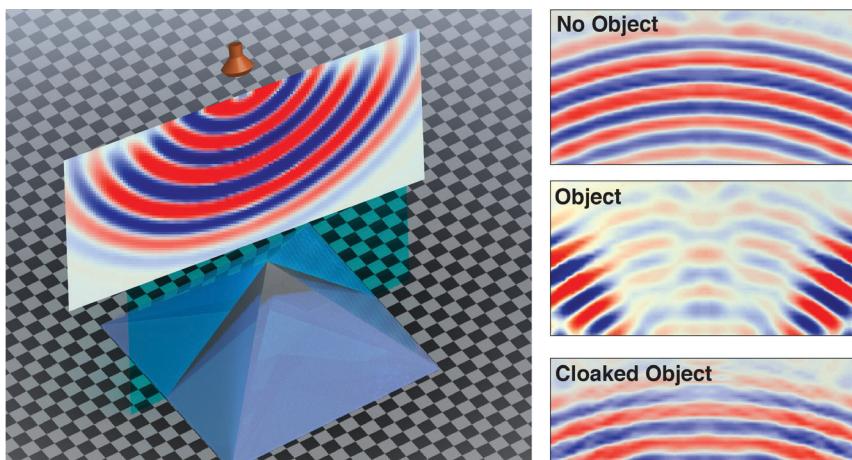


图 3. 左图: 为了测试超材料外罩, 研究人员以三种不同的方式发射声波脉冲, 并使用扫描麦克风测量反射的声波脉冲。右图: 被测物体反射的声波脉冲与未放置物体时反射的声波脉冲截然不同。当将物体置于隐形外罩下方时, 反射的脉冲与未放置物体时反射的脉冲几乎相同, 由此可见隐形外罩的声学隐形作用。图注: No object - 无物体; Object - 有物体; Cloaked Object - 物体被隐形

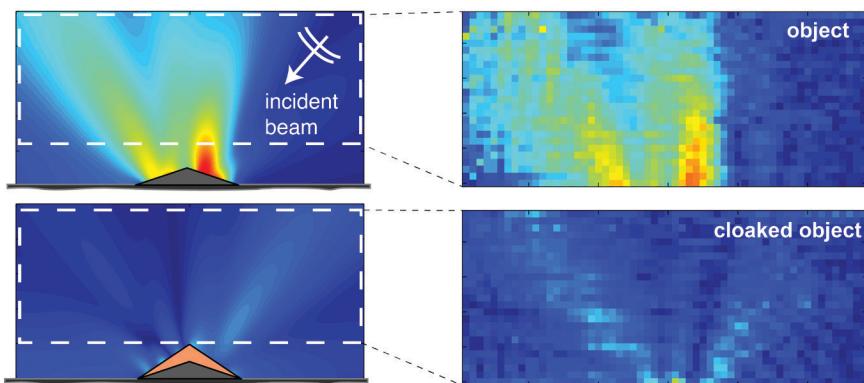


图4.散射声场的仿真结果(左图)与测量结果(右图)完全吻合,这不仅显示了物体的声学隐形程度,还证实了 COMSOL Multiphysics®能够精确地预测出制造装置的性能。图注: incident beam - 入射波束; Object - 有物体; Cloaked Object - 物体被隐形

仿真,进而验证其结果的一致性。”

## » 声学超材料的制造与测试

三维声学隐形外罩的设计采用了与二维外罩相同的多孔板作为基本结构,整体结构呈金字塔形(见图2)。放置在这个结构外罩下的物体能够躲避声波。这一结构乍看起来是一个十分简单的设计,但实际上需要平衡包括孔径、板间距以及板材夹角在内的诸多因素才能达到理想的声学变换。只有当所有参数结合起来才能构成恰到好处的声学各向异性,从而使这一结构达到预期的性能。这个金字塔结构是世界上第一件三维声学隐形装置,经实验室测量确认,它能够重新设定声波路径,从而制造出此装置及其下方的物体都不存在的错觉(见图3)。无论声音来自哪个方向、观察者身在何处,该装置都可以在整个三维尺度上发挥作用。这项研究可以用于例如声呐回避和建筑声学等领域,在未来的应用前景十分广阔、潜力无限。

如果声学超材料外罩的厚度设置合理,声学隐形装置在建筑声学领域的应用就会得到进一步的发展,例如,这些装置可以用来提升音乐厅的音响效

果,或者减少餐厅等公共场所中的噪音。Cummer 说道:“隐形材料不是涂抹在物体上就能起作用的神奇涂料。总的来说,这类材料不太可能以这种方式被运用在实际的应用中。”

除了设计阶段,建模和仿真还可用于定量地预测这种超材料外罩的性能,其中包括详细分析二维隐形外罩运行过程中的声波散射情况(见图4)。COMSOL 软件不仅能显示这种外罩对散射场的衰减量,还能通过对散射场衰减的精确预测来优化声学超材料的加工。

## » 从空气到水: 不同介质,全新挑战

现今,研究人员已经将注意力转向了如何在水相环境(例如水下或人体内)中使用声学超材料。多物理场建模在该研究中已经成为主要的设计工具。在设计过程中,研究人员首先构建出之前设计的结构,然后运行仿真来测试超材料在水中的表现。将超材料的应用从空气转向水,这听起来简单,做起来却绝非易事。

问题的关键在于空气和水的力学

属性完全不同。Cummer 解释道:“在空气中控制声场流动时,固体实质上可以被看作是完美的刚性结构,因此超材料的成分其实是无关紧要的。这就是为什么我们能够在空气中使用塑料或是其他合适的固体物质来构造声学超材料的原因。”

但在密度和抗压刚度方面,水和固体材料却相差不大。“当声波冲击水中的固体结构时,固体物质的力学性质就变得非常重要了。我们需要在设计阶段进行技术创新,才能控制声波能量与固体结构相互作用的方式,从而使那些我们需要的特性得以保持。”他补充道。

“在研究中将声学 and 结构力学巧妙结合的能力是不可或缺的,这尤其体现在处理水中的结构问题时。因为当我们在水中使用固体材料来构造超材料时,材料的力学响应是不能忽略的。在空气声学中,我们可以将固体看作是近似刚性的材料,这不仅能使问题变得简单,还能提高计算效率;但对于在水中使用的材料,则必须考虑流体与结构的相互作用,这个问题可以轻松地在 COMSOL 软件中解决。”

要将声学超材料结构的研究成果商业化远非易事,这要求设计出的结构能够被重复可靠的加工出来。Cummer 总结道:“声学超材料制造面临的下一个问题是如何能达到具体的量化指标。这意味着我们的设计流程将变得更加复杂,然而这恰好是 COMSOL 软件拥有的最大优势。它支持更多的设计迭代次数,并具备智能的优化功能,让我们可以在设计过程中确定自由度,进而达到具体的数值目标。COMSOL 软件的这些优势正是推动我们的研究前行的关键。它将我们的想法从概念验证演示转化成为了现实条件下切实可行的方案。”