

# COMSOL NEWS

声学特辑



# 声学设计进程中的“先知” ——计算声学

谈及声学,浮现在人们脑海中的画面可能是震撼澎湃的低音炮,或者是四壁安装有吸音板的音乐厅。然而事实上,我们每天都会在日常生活中接触到各种各样的声学应用。声学研究涉及多学科领域,因此要想制造出满足客户需求的各类声学产品,不仅需要工程师们发挥聪明才智,强大的数值建模工具同样必不可少。

《COMSOL News 声学特辑》收录了设计人员、工程师和研究人员在声学领域的成功仿真案例。在阅读这些精彩故事时,您会感受到他们对高精度多物理场仿真的热忱、对灵活性的追求,以及利用仿真App 与同事和客户分享研究成果时的愉悦。

这本声学特辑的内容涵盖了虚拟产品开发、噪声、振动和声振粗糙度(NVH)性能、声学隐形和减少声反馈等主题,同时展示了计算声学在实际问题处理和创新产品设计方面的广泛应用。希望您能从中汲取灵感。

祝您阅读愉快!

## 参与 COMSOL 社区互动



COMSOL-China



COMSOL 中国

**COMSOL 博客** [cn.comsol.com/blogs](http://cn.comsol.com/blogs)

**用户论坛** [cn.comsol.com/community/forums](http://cn.comsol.com/community/forums)

期待您对《COMSOL News》的意见和建议,欢迎通过 [info.cn@comsol.com](mailto:info.cn@comsol.com) 与我们联系。

# COMSOL NEWS

2017

声学特辑

© 2017 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server 和 LiveLink 为 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产,COMSOL AB 及其子公司和产品不与上述商标所有者相关联,亦不为其正式认可、赞助或支持。相关商标所有者的列表请参见 [cn.comsol.com/trademarks](http://cn.comsol.com/trademarks)。

微信图标版权所有:腾讯 Copyright © 2012-2017 Tencent. All Rights Reserved.  
微博图标版权所有:新浪 Copyright © 1996-2017 SINA. All Rights Reserved.

# 目录

## 声学仿真

4 | 为什么要使用声学建模  
与仿真App

## 虚拟产品开发

6 | 汽车音响系统的虚拟调制

## 高精度麦克风

9 | 精益求精:对完美测量的追求

## 燃烧不稳定性

12 | 借助多物理场软件模拟火箭  
系统中的平均流增强声场

## 噪声、振动与声振粗糙度

15 | 马恒达摩托车轰鸣声背后的  
仿真分析

## 变压器的轰鸣声

18 | 从电子表单到多物理场仿真 App:  
ABB 持续推动变压器行业的发展

## 声学隐形

22 | 操控声音:仿真助力声学超材料的  
前沿研究

## 次声波引起的振动

25 | 晃动、震颤和摇摆



## 封面图片

马恒达 Mojo 旅行  
探险摩托车。图片  
来源:马恒达摩托  
车公司(Mahindra  
Two Wheelers)。

# 专题文章

27 | 声反馈抑制  
站在助听器研究领域的前沿

30 | 声学无损检测技术  
多物理场分析助力地下给水管道的泄漏检测

33 | 高精度换能器  
演绎最动听的旋律：  
当新型换能器遇见静电耳机

36 | 声学超表面  
声学超表面仿真成就完美音质

39 | 边界元法  
向边界元法致敬

41 | 传感器系统  
纸币处理系统的智能大脑

44 | 科里奥利流量计  
顺应潮流，优化流量传感器

47 | 扬声器设计  
仿真赋予扬声器设计思想

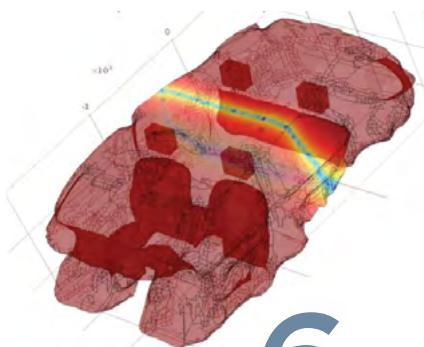
49 | 多体-声学相互作用  
变速箱的振动与噪声分析

51 | 多物理场建模  
以多物理场视角模拟真实世界

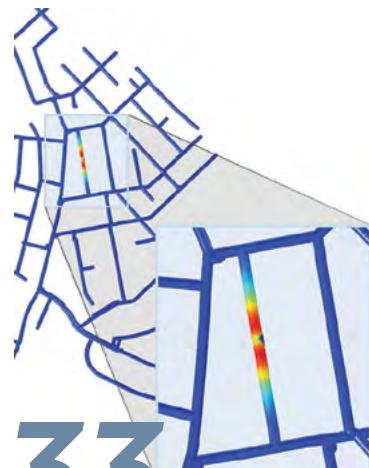
52 | 特约评论  
让计算声学受益于多物理场仿真



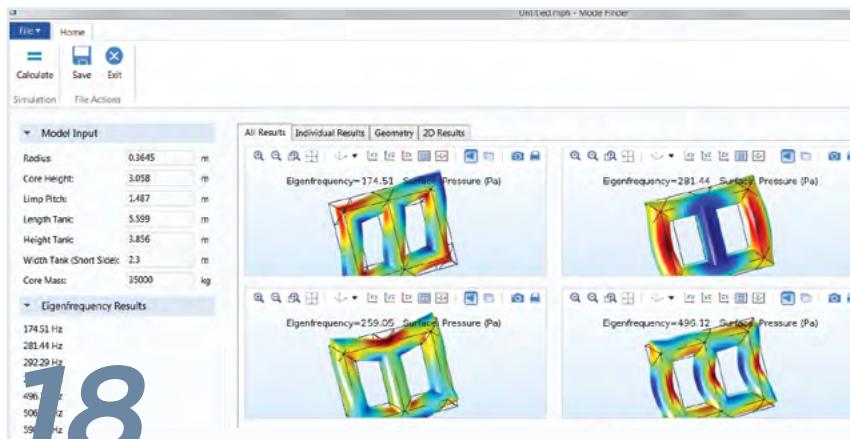
36



6



33

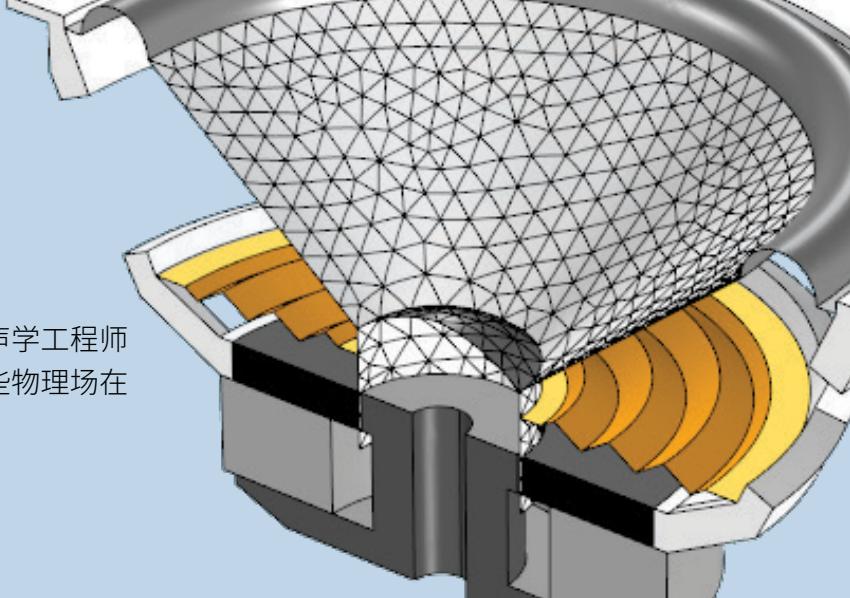


18

# 为什么要使用声学建模与仿真App

声学现象的本质是一种多物理场现象。因此,声学工程师在构建模型时,必须考虑多种物理场,以及这些物理场在不同尺度和频率下的相互作用。

作者 **MADS J. HERRING JENSEN**



声学系统的复杂程度与日俱增,为了能在规定的时限内顺利地完成任务,工程师将目光投向了数值仿真软件。通过使用各类计算工具,他们不仅大幅加快了设计进程,还减少了对造价昂贵的物理样机的需求。不仅如此,声学仿真还可以帮助工程师加深对设计的理解,从而在设计过程中做出更加明智的决策,开发出更优质的产品。

声学仿真工具中的哪些重要功能可以帮助工程师事半功倍呢?声学应用通常需要在不同条件下复制、传播和接收声信号。这些应用会涉及到声信号与结构、多孔材料和流体的相互作用,以及对产生和检测声信号所需的换能器进行模拟。声学工程师若要实现技术创新,提升新产品的研发效率,则必须考虑这些涉及多个物理场的问题。这对建模软件提出了很高的要求,需要软件能够耦合与整个系统相关的所有物理效应。

## → 声学领域面临的技术挑战

音质问题是许多行业关注的热门话题。例如,汽车行业关注的是车厢内的声音重现(图1),以及排气和消声系统的声音输出。其他案例包括耳机、扬声器,或者移动设备音响系统的性能和优化。针对上述情况,需要深入了解系统中

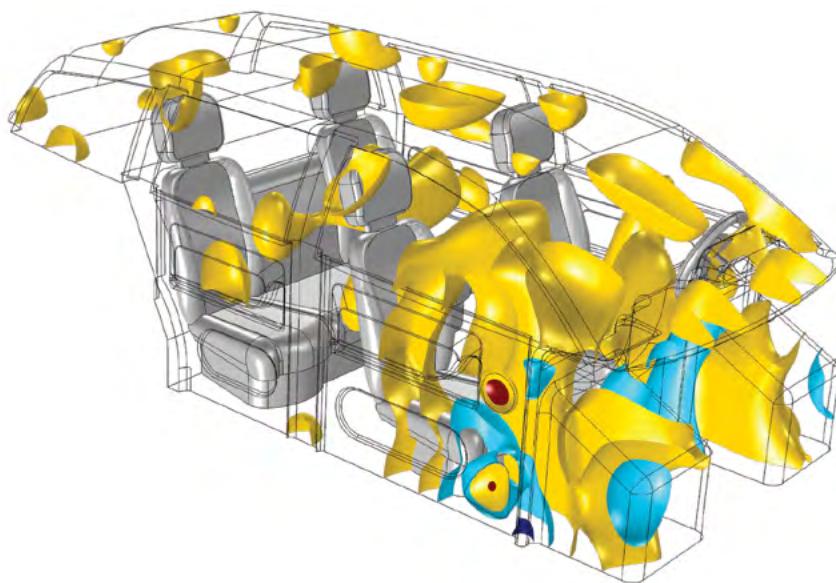


图1 汽车内部的声学仿真,其中声源位于扬声器的常见安装位置。仿真结果显示了车厢内的总声压场。

的声音传播和换能器特性,才能对系统进行优化。要让系统运转良好并具有完美的音质,仅依靠智能数字信号处理是远远不够的。例如,为了提升采用自适应反馈消除功能的助听器的性能,需要将微型扬声器声振模型与声学 and 固体力学有限元模型进行耦合分析,才能得到准确的仿真结果。

在扬声器行业,研究人员通常会通过简单的试错测试来改进标准驱动器的设计,但这种优化方式已经很难得到进

一步的提升。微型扬声器系统在高声压级下实现驱动时会引入由非线性导致的失真和衰减,类似的非线性行为也同样出现在应用于航空领域的隔音衬垫设计中。改进此类问题需要对所研究系统进行详尽的数值分析(图2)。

另一个涉及多物理场耦合的例子是电容式麦克风,其建模过程包含静电、结构振膜和热黏性声学。这些物理场紧密耦合,都是准确预测麦克风灵敏度的重要因素。



图2 仿真结果显示了扬声器驱动器壳体的声压分布。

## ⇒ COMSOL Multiphysics® 中的声学模块

“声学模块”是 COMSOL Multiphysics® 软件的附加产品，用于模拟频率范围广泛（从次声波到超声波）的声学现象，以及涉及热黏性损耗机制或

气动声学等方面问题的多尺度声学特性。这些声学仿真功能包含易用的多物理场耦合，可以在同一个建模环境中无缝地耦合各种不同的物理场。值得一提的是，“声学模块”还针对声学仿真的控制方程增加了许多专用公式。

### ⇒ 声学仿真 App

为了帮助不具备仿真软件使用经验的用户应对其行业内的各类声学建模挑战，仿真专业人员可以使用 COMSOL Multiphysics 中的“App 开发器”创建仿真 App，并根据用户需求内置预定义的输入，使他们能自如地运行这些仿真 App，得到预期输出结果。仿真 App 是封装在定制化用户界面中的多物理场模型。借助这一工具，专业人员可以将复杂的模型封装成简单易用的仿真 App，方便用户根据行业标准和客户需求，自行修改设计参数并得到分析结果(图 3)。

仿真专业人员只需在组织内部安装 COMSOL Server™，即可在整个组织中

非常方便地对仿真 App 进行部署，并将其分享给全球的同事和客户。随后，用户就可以通过 COMSOL Client 或主流的网页浏览器来访问这些仿真 App。在声学设备的建模工作中，专业人员不仅体验到了前所未有的便捷和准确性，还让同事也受益于自己的仿真成果。❖

### “声学模块”中的物理场接口

**压力声学:**通过环境静压基础上的声音变化来描述声场，其中包含多孔纤维材料、狭长结构和体吸收特性建模。接口中的完美匹配层 (Perfectly Matched Layer, 简称 PML) 可用于截断无限大的求解域。

**声-结构相互作用:**用于模拟流体压力引起固体域产生载荷，以及结构加速度对跨越流-固边界的流体域产生影响的现象。此接口包含压电材料、弹性波与多孔弹性波，以及管道声学。

**气动声学:**用于求解背景流体流动与声场的单向交互。

**热黏性声学:**用于精确模拟小尺寸几何结构的声学，其中近壁黏滞和热边界层的作用非常重要。

**超声波:**用于求解稳态背景流场中包含许多波长的大型瞬态线性声学问题。

**几何声学:**用于模拟波长远小于几何特征的高频极限下的声学行为。

### 更多资源

- COMSOL 博客
- COMSOL 视频中心
- COMSOL 案例下载

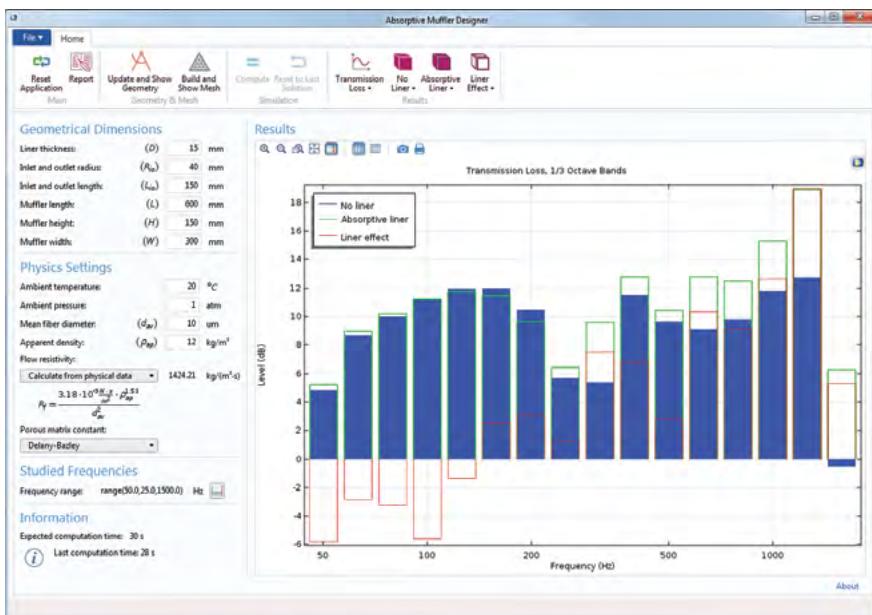


图3 基于 COMSOL Multiphysics® 的“吸收式消声器”模型开发的示例 App。用户可以修改消声器的几何设计、环境温度和压力，以及材料属性，从而评估产生的声学特性。

# 汽车音响系统的虚拟调制

哈曼 (HARMAN) 公司的专业人员正致力于将物理实验与建模仿真结合使用, 以期改进最新车载信息娱乐技术的开发流程。

作者 JENNIFER HAND



图 1 放置于车内的扬声器, 用于测量车厢内的声压波。

如今, 汽车上的智能手机连接、交互式显示屏和车载电视屏幕, 能够为使用者提供各类电子娱乐设施。哈曼公司 (HARMAN) 是“智联汽车”解决方案的市场领导者, 他们为全世界数量超过 80% 的豪华型轿车配备了高级音响系统。

车载音响的理想安装位置、扬声器的朝向和封装、驾驶室 (例如车门) 的几何结构等细节都会对音响的音质产生影响, 所以每一款车型都需要有独特的配置。哈曼的声学 and 仿真专业团队在设计过程中必须综合考虑上述各个方面, 以确保不同车型与车载音响系统的完美契合。

在制作实体样机之前, 哈曼的研发团队会结合仿真分析进行虚拟测试, 通过虚拟“调制”整个系统来加速产品研发进程。这套方案使用虚拟测试取代原位测听, 大幅节省了物理测试时间, 从而使该团队的成员能够在汽车最终的设计确定前即开始着手设计车载音响产品。

“当一款汽车处于研发初期, 其设计者尚未确定需要怎样的车载音响系统时, 我们就已经可以参与其中了。”哈曼公司虚拟产品开发 (Virtual Product Development and Tools, 简称 VPD) 部门的高级经理 Michael Strauss 解释道, “换句话说, 我们只需要得到车厢的尺寸和体积这一类基本的设计参数就可以开始设计了。然而很多时候, 我们需要在短短几天内针对用户的需求提供一套完整的设计方案, 这对我们来说

是一个很大的挑战。”

## ⇒ 仿真和实验的协作提高客户满意度

为了准确而快速地响应客户的各类需求, 哈曼公司的工程师们开始借助 COMSOL Multiphysics® 软件的数学建模功能。“我们需要在同一个环境中综合实现力学、声学及电气学等多个物理场仿真的功能, 以及一个在创建和更新自己的工具时, 能够帮助我们节省大量时间和精力”哈曼公司的资深声学工程师 François Malbos 说。

“我们需要在同一个环境中综合实现力学、声学及电气学等多个物理场仿真的功能, 以及一个在创建和更新自己的工具时, 帮助我们节省大量时间和精力”的平台。”

“多物理场仿真是虚拟产品研发过程中最为重要的环节之一,” 哈曼公司 VPD 部门负责人 Michał Bogdanski 表示, “这让我们能够研究扬声器与车辆结构的任意部件之间相互作用而产生的声学行为 (如车门刚度), 并据此为我

们的客户提供设计指导。”

在曾经的一个项目中, 他们对梅赛德斯-奔驰的一款 ML 级汽车车厢内的扬声器 (图 1) 产生的声压级进行了测量和模拟, 目的是验证数值模型, 并随后将模型用于优化音响设备的设计。“运行车厢仿真是最具挑战性的工作之一, 因为这其中涉及很多不同的物理领域。”Strauss 解释说。幸运的是, COMSOL® 软件提供的强大功能可以让研究人员将整个系统中的声学、力学和电场效应耦合到一起。

为支持全公司的工程项目, Michael Strauss 的团队构建了一个由经过验证的模型和已知有效的解决方案整合而成的数据库, 通过这个库可以对各种类型的扬声器配置进行性能预测。“从宏

观趋势分析到检测辅助系统性能的细节设计, 我们能够满足客户的各种需求。”他继续补充道。

## ⇒ 车辆扬声器的性能分析

在一项研究中, 哈曼公司的工程师们使用 COMSOL

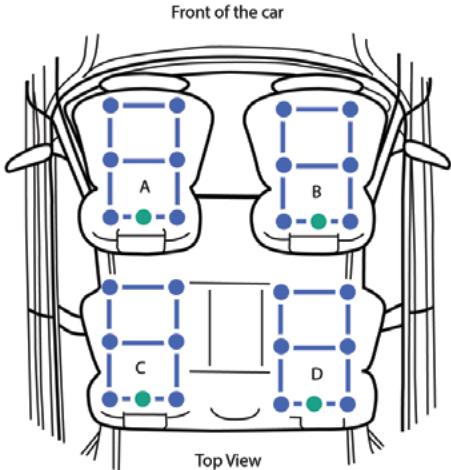


图2 放置于车内四个不同位置的麦克风阵列的俯视图。  
图注:Front of the car - 车前部; Top view - 俯视图



图3 哈曼公司提供的车厢三维扫描图。

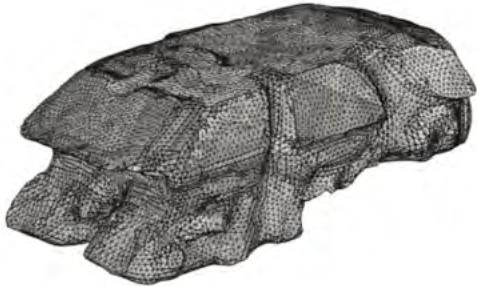


图4 车厢表面网格图。

软件对车厢内的音响系统进行了仿真,目的是针对低频声波优化扬声器的音效。随后他们设计了一系列测试方案来验证这个模型。一旦模型通过验证,哈曼公司的研究团队即能基于这一模型针对特定车型提出最佳的扬声器设置方案。

在验证测试中,扬声器安装在汽车驾驶员座椅旁边的刚性外壳上。整个车厢内使用了四组麦克风阵列来测量每个位置的平均声压级(图2)。

当频率低于 1 kHz 时,扬声器可以表示为固定在简化的集总参数模型上的刚性平面活塞,模型考虑了音圈终端电压以及悬挂系统和扬声器音膜表面的刚度。研究人员通过手动三维扫描生成了车厢的几何结构图(图3)。通过使用 MATLAB® 软件中的预处理算法及 COMSOL® 软件中的“LiveLink™ for MATLAB® 模块”(用来在这两个程序之间建立双向链接),该团队可以将扫描得到的点云转换成车厢表面的网格(图4),将网格优化后即可对声压波进行研究。

车内的挡风玻璃、地板、座椅、头枕、方向盘以及其他部位(例如车顶、车门和仪表盘等)的材料都具有不同的吸收特性,仿真分析了扬声器产生的声波与上述不同材料

之间的相互作用。

⇒ 声学模型的优化

除了考虑到多种不同材料的吸收特性问题,该团队还根据外壳体积,通过 LiveLink™ for MATLAB® 定义了扬声器音膜的运动和加速度,并开发出特定的 MATLAB® 软件脚本,用于简化预处理和后处理操作。

“我们对每一个步骤都进行了全面的优化和自动化处理,这样就不必计算每个案例的加速度,因为当一个仿真结束时,下一个便会自动启动。”Bogdanski 解释道,“如此一来,就能确保整个流程简单无误,而我们只需要运行脚本就可以了。”

不仅如此,该团队还优化了与频率相关的吸收系数,这些

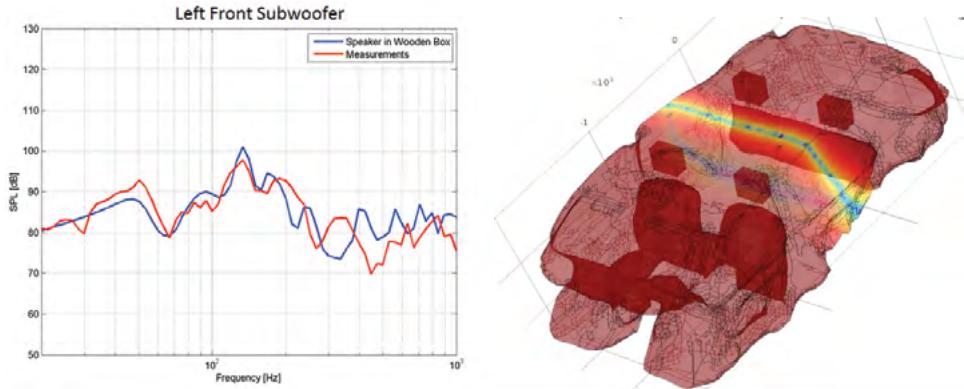


图5 其中一组麦克风阵列的声压级测试结果(左)和整个车厢的声压级分布(右)。

数据是在声压级的测量结果与仿真结果之间建立强相关性的必要因素。分析结果还显示了每组麦克风阵列测定的声压级(图5)。

### ⇒ 驾驶员座位的音响效果评估

借助经过验证的仿真模型,哈曼公司在车辆设计阶段便能着手开发音响系统。由模型得到的准确预测的声压场,让设计人员可以对车厢内音响系统的性能进行优化。此外,均衡器和心理声学效应也被加入到调制算法中。通过仿真分析,设计人员在修改设计方案时摆脱了对

“借助仿真,即使一套处于设计阶段的音响系统尚无实体原型,我们也能够优化、预测以及主观评估它的系统性能。”

物理样机的需求。

将虚拟计算声学信号输出为声音(也称为“可听化过程”)是顶级音响系统的重要设计环节。哈曼公司的工程师们利用高端耳机开发了一种回放系统,“让试听人员可以完全基于仿真结果和信号处理来试听、评估、比较各类音响系统中的超低音、中音和高音效果。”Malbos 解释道。

此外,哈曼公司的工程师们在预测双耳脉冲响应

(Binaural Room Impulse Responses, 简称 BRIR), 以及人耳接收外界声音的过程中, 考虑到了人体头部、躯干和耳道对声音效果的影响。为了捕捉 3D 立体音效, 研究人员计算了不同头部位置处方位角平面上的 BRIR。回放系统利用头部位置跟踪器, 逼真地重现了驾驶员和乘客在座位上的听觉体验。

图 6 是利用 COMSOL® 软件创建的网格, 其作用是预测 BRIR。图 7 展示了 BRIR 的预测数据与仿真结果的对比。

实现可听化的过程充满挑战。可听化的质量评价本质上是主观的, 必须参照现实世界的听觉体验。为此, 研发人员制定了评价可听化的质量评价标准, 保证系统拥有高品质的聆听体验。

完全基于仿真来评估音响系统的效果, 这一方式不仅提高了哈曼公司产品开发的速度和产品的质量, 同时还提高了客户的反馈效率, 降低了修改设计的成本。工程师本身在设计过程中也拥有了更大的发挥空间。

“仿真的魅力在于系统工程师只需在办公桌前头戴耳机, 就能对汽车的音响系统进行调制。借助仿真, 即使一套处于设计阶段的音响系统尚无实体原型, 我们也能够优化、预测以及主观评估它的系统性能。”Strauss 总结道。❖

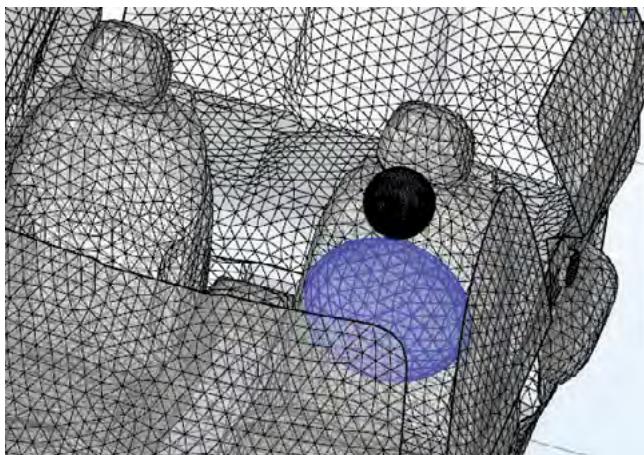


图 6 使用 COMSOL® 软件创建的网格, 可预测 BRIR 或耳朵接收声音的过程。

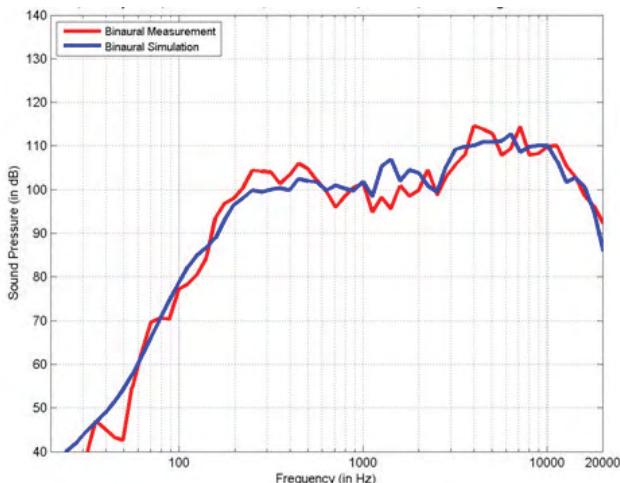


图 7 频域内 BRIR 的测量数据和仿真结果的对比。



哈曼公司 VPD 团队成员: Maruthi Srinivasarao Reddy, Michal Bogdanski, Michael Strauss, Ninranjan Ambati 和 François Malbos.

# 精益求精：对完美测量的追求

在仿真的帮助下，Brüel & Kjær 的研究人员正在为他们的工业级和测量级的麦克风和换能器打造一个全新的精度和准确度水平。

作者 **VALERIO MARRA**

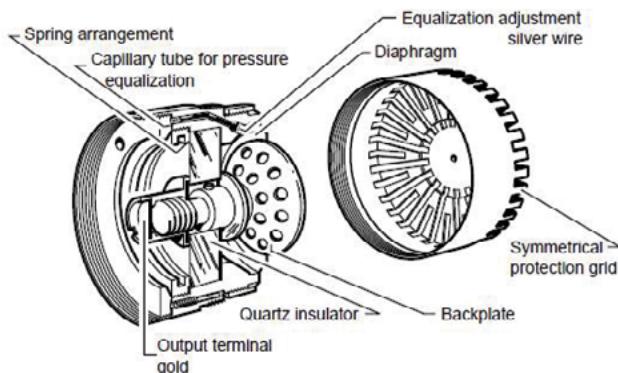


图 1 4134 型麦克风图片，包含振膜上方安装的保护格栅（左），典型麦克风音头的截面图（右），显示了其中的主要零件。图注：Spring arrangement - 弹簧装置；Capillary tube for pressure equalization - 用于均衡压力的毛细管；Equalization adjustment silver wire - 均衡调整银线；Diaphragm - 膜片；Output terminal gold - 金制输出端子；Quartz insulator - 石英绝缘子；Backplate - 背板；Symmetrical protection grid - 对称保护格栅

**完**美的测量或永不失效的仪器在现实中都不存在。虽然我们能够得到可信的测量结果，但所有的测量都不可能十全十美，因为仪器本身并没有定义它们将测量什么。相反，仪器会对周围环境作出反应，并会参照不完美的绝对标准来解读测量值。

所有仪器都有一定程度的可接受容差范围，也就是在不影响其可用性的前提下允许存在的测量差值。要在存在误差范围的情形下进行仪器设计，是一个始终困扰我们的难题，而且还将继续下去。

40 多年来，Brüel & Kjær 一直是声音与振动测量及分析行业的领导者。他们拥有众多的客户，例如空中客车、波音、法拉利、博世、霍尼韦尔、卡特彼勒、福特、丰田、沃尔沃、罗尔斯·罗伊斯、洛克

希德马丁和美国国家航空航天局等。

工业级声音及振动分析面临多种多样的挑战。从交通和机场噪声，到汽车发动机振动，再到风力涡轮机噪声，以及产品质量控制，Brüel & Kjær 必须能够设计出可满足一系列不同测量标准的麦克风和加速度计。为了能够满足这些要求，公司在研发流程中加入了仿真来作为一种验证其设备精度和准确度，以及测试新型创新设计的方法。

## ⇒ 设计和制造高精度麦克风

Brüel & Kjær 开发和制造各种电容式麦克风，其产品频段包含次声道超声频段，声压级涵盖从低于听力阈值的声压级一直到正常大气压条件下的最高声压级。其产品范围包括通用标准和实验室标准麦克风，以及针对特殊应用的专

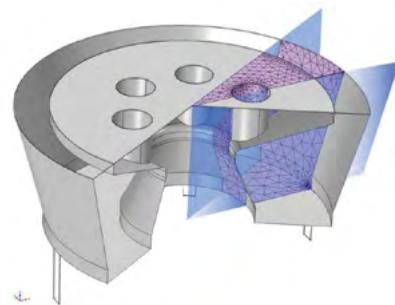


图 2 4134 型电容式麦克风的几何绘图。图片显示了代表整体几何 1/12 的简化扇形几何中所用的网格。

用麦克风。在 Brüel & Kjær 所有麦克风的开发中，一致性和可靠性都是非常关键的因素。

“我们利用仿真分析开发电容式麦克风，并确保产品能满足国际电工委员会 (ICE) 和国际标准化组织 (ISO) 的相

关标准。”Brüel & Kjør 麦克风研发部门的开发工程师 Erling Olsen 说道。“我们的研发流程中加入了仿真和其他一些工具,这使我们能够确保麦克风可以在各类条件下具有可靠的性能。例如,我们需要准确地了解静压、温度和湿度,以及其他因素给我们所有麦克风带来的影响,如果没有仿真,我们将很难测量这些参数。”

图 1 所示的 Brüel & Kjør 4134 型电容式麦克风是一款老式麦克风。自诞生以来,该麦克风经受过众多理论和实践方面的考验,因此 Brüel&Kjør在电容式麦克风多物理场模型的开发中使用了 4134 型麦克风作为原型机。为了分析麦克风的性能,Olsen 的仿真中模拟了膜片的移动、膜变形与电信号产生之间的机电相互作用、谐振频率,以及在麦克风内部空腔中发生的粘性和热损耗和黏性损耗。

### ⇒ 麦克风模拟

当声音进入麦克风时,声波会引发膜片变形,并作为电信号进行测量。这些电信号随后被转换为声音的分贝形式。“对麦克风的模拟涉及求解动网格和强耦合的力学、电气和声学问题,如果没有多物理场耦合仿真,我们将无法实现这一点。”Olsen 说,“模型应该具有丰富的细节,因为在大多数情况下,由于麦克风音头形状具有较大纵横比和较小的尺寸,它们带来的热损耗和黏性损耗会极大地影响麦克风的性能。”

模型还可以预测背板和膜片之间的相互作用,并与其他各方面一起影响麦克风的指向性。“我们使用仿真来分析膜片的弯曲模式。”Olsen 说道。在热应力和谐振频率仿真中,使用了模型的对称性来减少计算时间(图 2)。简化模型也被用于分析正入射到麦克风膜片上声

波的声压级(图 3)。但是,当声波沿非法线方向进入麦克风时,膜片将面临一个非对称的边界条件。这时则需要对整个几何进行仿真,以精确捕捉膜片的弯曲情况(图 4)。

仿真也被用于确定麦克风中的通气孔对低频声音测量的影响。“我们模拟了带通气孔的麦克风暴露于外部声场、隔离外部声场,以及不含通气孔的麦克风的情况。”Olsen 说道,“虽然后者在现实中无法实现,但却帮我们确定了不同低频行为下通气孔配置和输入电阻结果之间的相互作用。这即为仿真最重要的作用之一:在更改模型参数时,我们可以不受当前已制造设备的限制,而能够测试其他设计并找出具体设备的极限(图 5)。”

当仿真成为研发流程的一部分后,Olsen 和他的同事不仅能够对 Brüel & Kjør 的核心产品进行设计和测试,还可以基于客户的具体要求开发设备。

“利用仿真,我们可以基于客户需求指出具体的改进方法。虽然麦克风声

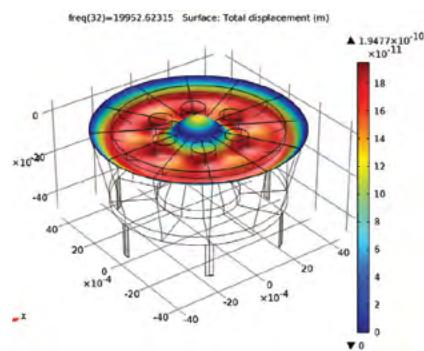


图 3 正入射到麦克风膜片上的声压级表征,使用扇形几何计算。仿真结果显示了 $f=20\text{kHz}$ 时计算得到的膜片变形。

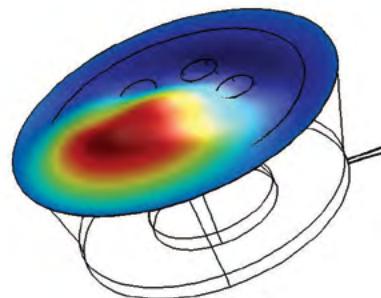


图 4 仿真结果显示了 25 kHz 下非法线方向入射时的膜片变形。由于变形不对称,需要使用完整三维模型计算。

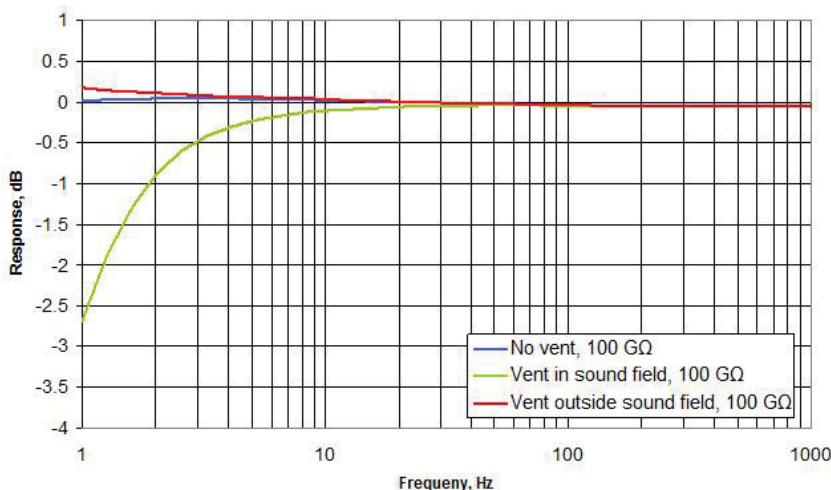


图 5 在无通气孔配置中,极低频率下麦克风内的声场为纯等温,灵敏度由此得到提升。当通气孔位于声场外时,曲线最初与无通气孔配置相同,但由于通气孔在膜片背后释放压力,灵敏度得到了进一步提升。

场难以只通过测试进行测量,但在利用针对具体配置的物理模型验证仿真之后,我们将能够使用仿真来逐个分析其他配置和环境。”Olsen 说道。

### ⇒ 振动换能器模拟

Brüel & Kjær 的开发工程师 Søren Andresen 也在使用仿真来设计和测试振动换能器。

“在设计用于振动分析的换能器时,我们面临的一个难题是这些设备需要能够承受各种严苛环境的考验。”Andresen 说道,“我们的目标是设计一种具有很高内电阻,却可以承受各种极端环境考验的设备。”

大部分机械系统的谐振频率都被限制在一个相对较窄的范围内,通常在 10 到 1000 Hz 之间。换能器设计中最重要的一点是,设备的谐振频率应当不同于待测振动的频率,因为这会干扰测量结果。图 6 显示了悬浮式压电振动换能器中的机械位移,以及该设备的谐振频率绘图。

“我们希望换能器能有一个平坦的响应,且谐振频率不在待测量的振动范围内。”Andresen 说道,“我们使用 COMSOL 对不同设计进行了测试,以确定特定设计的材料和几何组合能带来一条平坦曲线(无谐振)。这就是换能器可工作的频率区域。”

设计换能器时,可以使用低通滤波器或机械滤波器,来移除可能存在的因换能器谐振造成的多余信号。这些滤波器固定在换能器和安装表面之间,其中

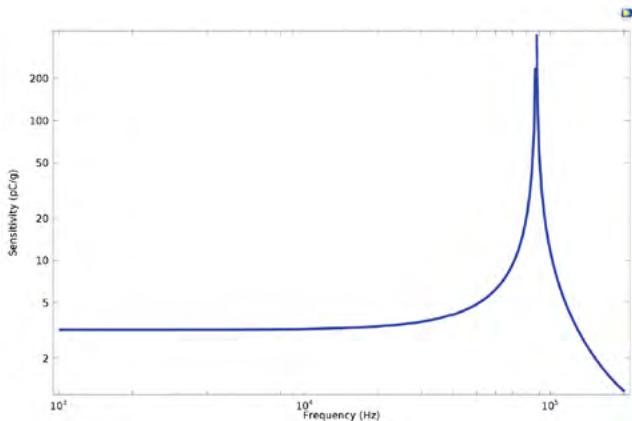
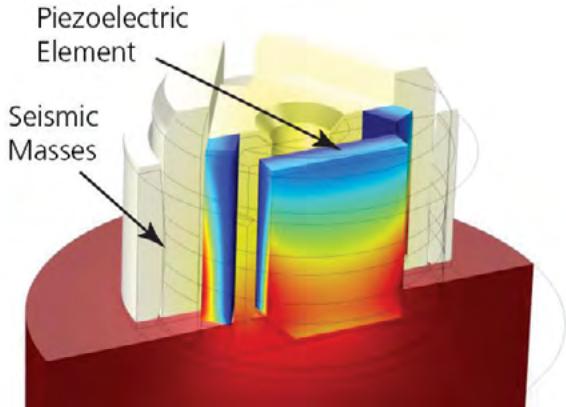


图 6 悬浮式压电振动换能器的仿真结果。压电敏感元件和振荡质量中的机械变形和电场(上)。频率响应绘图,显示了换能器在 90 kHz 附近的一阶谐振(下)。本设备只可用于测量频率远低于 90 kHz 的对象。图注: Piezoelectric Element - 压电元件; Seismic Masses - 振荡质量

包含一个粘合在两个安装盘之间的介质,该介质通常为橡胶材质。

“从经验法则来看,我们会将频率上限设定为换能器谐振频率的 1/3,因此,我们知道在频率上限中测量的振动分量误差将不会超过 10% 到 12%。”Andresen 说道。

### ⇒ 尽可能精准

虽然我们无法设计出一款完美的换能器,或进行绝对可靠的测量,但仿真使研究和设计团队比以往更接近完美,因为他们现在能够快速高效地针对不同工作场景测试新的设计解决方案。

“为了能够在竞争中保持领先,我们需要一些相当独特的知识。”Andresen 说道,“仿真帮我们实现了这一点,对于那些无法通过实验确定的地方,我们可以先作出调整然后进行虚拟测量,这使我们能够测试和优化各种新型创新设计。”❖

“利用仿真,我们可以基于客户需求提出具体的改进方法。”

——Erling Olsen, Brüel & Kjær 开发工程师

# 借助多物理场软件 模拟火箭系统中的平均流增强声场

固体火箭发动机和液体引擎内的燃烧不稳定问题一直困扰着火箭的设计人员和工程师们。为此,他们采用了拥有较高保真度的多物理场建模方法来加深理解,据此做出更好的预测。

作者 **SEAN R. FISCHBACH**

由于火箭系统内的燃烧过程与气体动力学之间的相互作用非常复杂,所以许多火箭系统都要经历压力、速度和温度的剧烈变化。在燃烧不稳定的极端情况下,波动幅值可能会达到甚至超过平均舱压。大幅度的振荡会使火箭喷嘴受损、性能降低、额定载荷受损,有时甚至会造成外壳破损或任务失败。

对于经历了燃烧不稳定的火箭系统,大部分要通过成本高昂的测试修复,还有些甚至只能完全报废整个系统,这也是模拟及预测燃烧不稳定性时要解决的一个历史难题。

“基于能量的全局评估法能够更全面地描述燃烧的不稳定振荡。”

在火箭推进技术的早期开发中,科学家和工程师对底层物理机理的认知通常是通过实验观测得到的,例如对振动中的试验台进行测量,观察排气尾流的波动,以及可以听到相当明显的不稳定的声音。这些观察工作使得早期研究燃烧不稳定的工作者将重点放在模拟燃烧舱内的声波上(图 1)。

这种侧重声学的研究策略十分符合逻辑,因为测量得到的振荡频率通常与燃烧舱的声学简正模式紧密相关。但这种狭隘的专注忽略了来自旋转波和热波这两种由声波直接造成或与其紧密耦合作用下的影响。我们可以通过基于能量的全局评估法来更全面地描述燃烧的不稳定振荡。

根据燃烧不稳定性能量建模法的最新进展,我们需要准确测定声音的频率与振型。其中需要特别关注的是声平均流与火箭喷管收缩区段的相互作用,在这个区域,压力、密度和速度梯度会变得很大。在大部分火箭系统内,火箭喷管的非稳态能量排放被视为声阻尼的主要来源。

最近,多名法国科学家<sup>2</sup>开始通过平均流效应来分析喷管阻尼。这一新方法拓展了源自 Sigman 和 Zinn<sup>3</sup> 的

研究,他们通过扰动欧拉方程组<sup>4</sup>求解了声速度势方程(Acoustics Velocity Potential Equation, 简称 AVPE)。

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho} \nabla p \right) + \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

相比于传统的波动方程:

$$\nabla^2 \psi - \left( \frac{\lambda}{c} \right)^2 \psi - M \cdot [M \cdot \nabla(\nabla \psi)] - 2 \left( \frac{\lambda M}{c} + M \cdot \nabla M \right) \cdot \nabla \psi - 2\lambda \psi \left[ M \cdot \nabla \left( \frac{1}{c} \right) \right] = 0$$

求解 AVPE 方程的特征值更加复杂:需要对舱内的流场和特征值进行数值近似,其中  $\psi$  是复数声势能,  $\lambda$  是复数特征值,  $c$  是声速,  $M$  是马赫矢量。

### ⇒ 模拟燃烧舱的气体动力学

高速流内振荡扰动的最新理论模型,需要精确定义腔体的声特征模式,但首先我们需要对燃烧舱的平均流属性进行模拟。

通过 COMSOL Multiphysics® 软

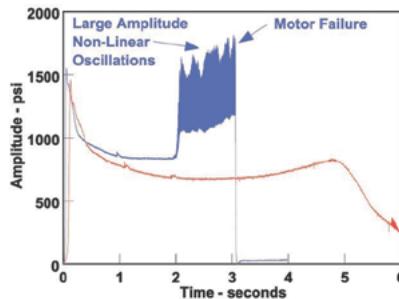


图 1 稳定(红色)与不稳定(蓝色)固体火箭发动机<sup>1</sup>中的压力曲线。

件提供的数值仿真平台,我们可以非常方便、准确地模拟燃烧舱的气体动力学和内部声学。这款有限元软件包含多个预定义物理场接口,以及一个广义数学接口。

当前研究在 COMSOL 的有限元

框架下使用了高马赫数层流物理场接口,来模拟通用液体引擎内的稳态流场参数,其中用到了理想气体的全压缩 Navier-Stokes 方程组,以及能量和质量守恒方程组。

喷射器面板建模使用了均匀的燃烧推进剂气体(图 2),用于分析由燃烧推进剂注入的高温气体;所有其他固体边界均采用滑动边界条件建模,出口截面利用混合外流条件模拟,也就是说,模型同时支持亚音速和超音速流动。

平均流的分析结果需要重新评估,以保证能得到一个有效的收敛解。如要模拟 AVPE,则需要压力、密度、速度和声速等平均流参数。平均流在喷管收缩区段(靠近声阻截面)的值很重要。马赫数等于 1 的声截面,会在流场中产生一个声障。为了创建一个用于声学分析的准确几何模型,我们从平均流分析中提取了声截面数据(图 3 中的绛红色部分)。

### ⇒ 模拟燃烧舱的声学

我们使用 COMSOL Multiphysics 的系数形式偏微分方程数学接口确定了 AVPE 的复特征值。从平均流分析的解中获取 AVPE 中的平均流项。燃烧舱内的气体动力学对定义声学分析中的边界条件至关重要。在火箭喷管的收缩和扩张区段内马赫数为 1 的声截面处,舱压、速度和密度的梯度在理论上会趋近于无穷。在声截面的下游,声扰动随平均流以超声速对流传递。

这种条件阻止了在声截面下游的扰动向上游回传。喷射器的分流区段在声学上是静默的,不会影响舱内的声场。喷管仿真域在声速线处被截断,此处自动满足零通量边界条件(图 4)。其他边界通

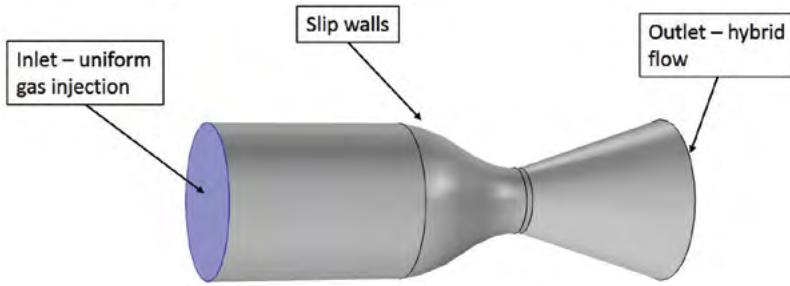


图2 带边界条件设定的液体发动机几何结构仿真。图注: Inlet-uniform gas injection - 入口 - 均匀气体流入; Slip walls - 滑移壁; Outlet - hybrid flow - 出口 - 混合流

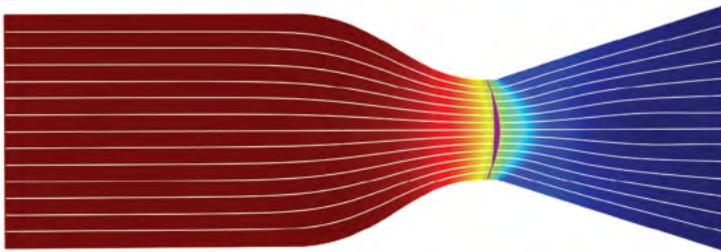


图3 舱压作用下的速度流线。绛红色为马赫数为1的表面。图注: Mach 1 surface - 马赫数为1的表面

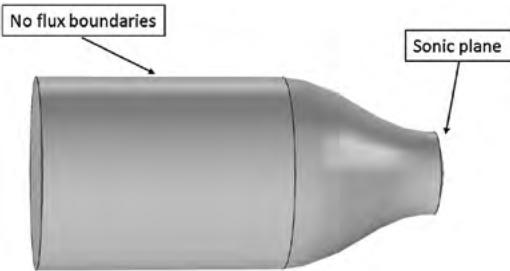


图4 声学分析几何结构及边界条件。图注: No flux boundaries - 无通量边界; Sonic plane - 音速平面

过零通量边界条件模拟, 假定所有面吸收的声能均为零。

运行特征值分析得到复数特征模式和特征值, 表征每个声学模式及其复数共轭。复数特征值的实部代表该声学模式的瞬时阻尼, 虚部定义了振荡频率。复数特征矢量代表声波的空间幅值和相位。

通过对比由经典齐次波动方程

(Helmholtz方程)和由AVPE推导出的声学模式形状, 我们可以看出保真度较高的模型能够正确地表征底层物理场(图5)。在AVPE中加入平均流项可以精确模拟由稳态气流造成的相移。相位调整很重要, 因为燃烧不稳定性模型用到了声特征矢量在时间和空间上的积分。

与以前的技术相比, 利用COMSOL模态火箭的气体动力学和声特征模式可以得到更准确的振型。对声场的更高保真的表征可以轻松地加入燃烧不稳定性模型, 使火箭设计人员和工程师具有更强的预测能力。现在, 带有折流板等阻尼设备的情况, 或者工作条件的变化, 均可于测试前得到更精确的

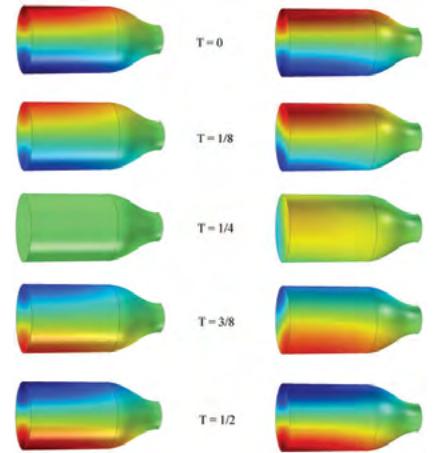


图5 在半个振荡周期(T)中通过经典齐次波动方程(左)和AVPE(右)计算得到的一阶切线特征模式的比较图。

模拟。

### ⇒后续研究

对燃烧不稳定性更完整的描述, 需要包含旋转振荡、热振荡以及燃烧舱声场。旋转振荡是声振荡的直接产物, 然而即使没有声波动, 也可能存在热波。后续使用COMSOL Multiphysics的工作将重点研究所有声振荡中都存在的黏性旋转波。❖

本文作者为马歇尔太空飞行中心(阿拉巴马州亨茨维尔市) Jacobs ESSSA集团的 Sean R. Fischbach

### 参考文献

1. F. S. Bloomshield, *Lessons Learned in Solid Rocket Combustion Instability*, 43<sup>rd</sup> AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA-2007-5803, Cincinnati, OH, July 2007.
2. J. C. French, *Nozzle Acoustic Dynamics and Stability Modeling*, Vol. 27, Journal of Propulsion and Power, 2011.
3. R. K. Sigman and B. T. Zinn, *A Finite Element Approach for Predicting Nozzle Admittances*, Vol. 88, Journal of Sound and Vibration, 1983, pp. 117-131.
4. L. M. B. C. Campos, *On 36 Forms of the Acoustic Wave Equation in Potential Flows and Inhomogeneous Media*, Vol. 60, Applied Mechanics Reviews, 2007, pp. 149-171.



## 马恒达摩托车 轰鸣声背后的仿真分析

借助多物理场仿真, 印度马恒达摩托车公司对高端豪华摩托车的发动机进行了改进, 在符合噪声限值的同时, 最大限度地维持了客户满意度。

作者 **VALERIO MARRA**

近年来, 马恒达摩托车公司 (Mahindra Two Wheelers) 在印度市场推出了多款摩托车和轻便摩托车。他们在产品开发初期便引入了数值仿真工具, 对摩托车发动机, 进气和排气系统的噪声、振动与声振粗糙度 (Noise, Vibration, Harshness, 简称 NVH) 性能进行了研究和优化, 使驾驶员和乘客即使行驶在印度颠簸的道路上, 也可以享受卓越的车辆性能带来的舒适驾驶体验。

马恒达的工程师使用数值仿真获取了所需的数据和知识, 并基于分析结果对摩托车发动机的结构设计进行改良, 以使噪声降至期望水平。公司的研发副经理 Niket Bhatia 表示: “COMSOL® 软件帮助我们大幅减少了设计迭代次数, 为我们节省了宝贵的时间。”

### ⇒ 使噪声达到最优水平

发动机中存在许多噪声源, 进气和燃烧过程、活塞、齿轮、配气机构和排气系统均可能发出噪声。燃烧噪声是由气缸内急剧上升的压力引起的结构振动造成的。这些振动通过轴承从传

动系统传送到发动机外壳, 进而向周围环境中辐射噪声。

若只依靠物理测试进行声学分析, 不仅实验费用过高, 耗时也会过长。考虑到这一点, 马恒达的研发团队决定采用声学仿真作为物理测试的必要补充, 希望能够更为全面地对发动机结构的噪声辐射来源进行分析。研究的目的是找到发动机中最大的噪声源, 并提出结构改进方案, 从而有效降低噪声。

马恒达的研究人员利用 COMSOL Multiphysics® 软件, 对燃烧负荷作用下的单缸内燃发动机执行了声辐射分析。工程师将整个发动机包裹在计算域中, 并在计算域外部添加了完美匹配层 (Perfectly Matched Layer, 简称 PML)。PML 的作用是通过衰减向外辐

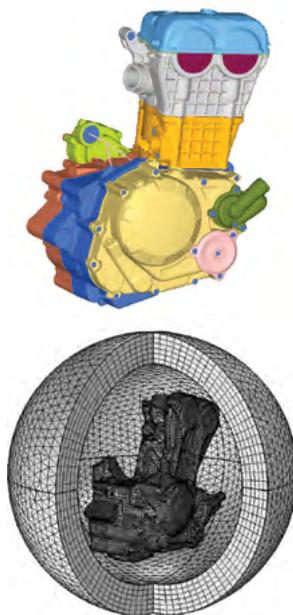


图 1 发动机的 CAD 几何模型 (上); 网格划分后的三维模型被 PML 包围 (下)。

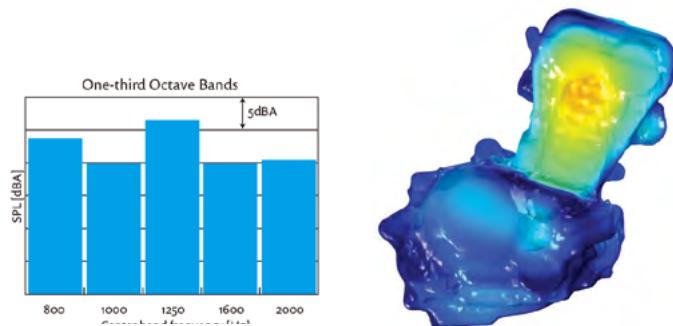


图2 三分之一倍频图(左); SPL 仿真结果的三维表面图(右)。

射声波,使得在计算域边界处的反射极小或完全没有反射(图1)。这种做法能够在保证结果准确的前提下,有效地减少计算域的大小。

研究团队决定将分析的频率范围限定在 800~2000 Hz。这一限定是因为,实验表明在上述声音频率范围,燃烧负荷下的发动机噪声辐射是摩托车噪声的主要来源。选定一段频率范围有利于研究团队节省计算资源,更加明确地找出哪些区域会向外辐射最多的噪声。

基于上述分析,团队人员对声压级(Sound Pressure Level, SPL)展开了深入研究,并调整了缸体和缸盖的相关参数(图2),例如增加肋高和壁厚以及加固安装位置。通过调整这些参数,研究人员成功降低了目标频率范围内的 SPL。

### 进气结构降噪处理

进气噪声和排气噪声是产生通过噪声(pass-by noise,即车辆整体通过时引起的噪声)的主要因素。而进气噪声主要源于空气过滤器(通常由塑料制成)结构辐射的噪声。对此,研究人员分析了由塑料制成的空气过滤器壁上的声学传递函数(Acoustic Transfer Function,简称 ATF)。为了改进 ATF,他们添加了肋片以加强空气过滤器的结构强度(图3),这有助于降低其结构噪声(图4)。

### 传输损耗分析

有趣的一点是,相关法规对摩托车的噪声水平提出了限制,然而消费者却希望摩托车能发出更响亮的轰鸣声,因为他们认为这种轰鸣声是发动机拥有强劲动力的标志。法规与消费者需求的冲突给马恒达的工程师带来了挑战。工程师们需要在保持通过噪声符合规定的前提下,加大从消声器中发出的低频轰鸣声,同时降低较高频率下的 SPL。

除了需要分析消声器对发动机排气噪声的消减外,与消声器相关的许多其他因素也需要考虑,例如提供低回压的能力,

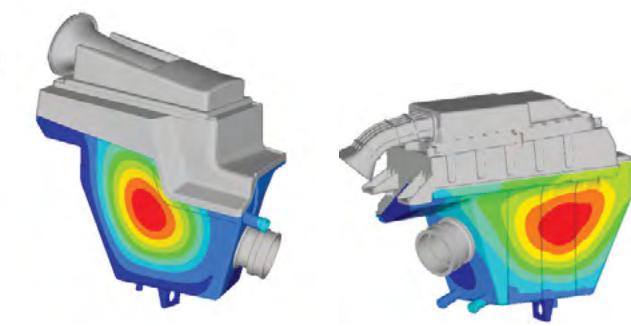


图3 空气过滤器结构图。初始设计(左);改进后的设计(右)。模型中添加了肋片用于改进 ATF。

以及如何满足通过噪声的相关规定。汽车排气系统中消声器的性能可量化为以下三个参数:传输损耗、插入损耗和辐射噪声级。其中,传输损耗被认为是最重要的参数,它只与消声器的设计有关,而与压力源无关。马恒达研发团队的任务正是通过预测摩托车消声器的传输损耗,从而将一定频率范围内的损耗优化至期望水平。

为此,研究人员选择了单缸摩托车发动机的消声器作为分析对象,并使用了 COMSOL Multiphysics 对消声器的传输损耗进行了

分析。通过软件中的“声学模块”,他们在适当的位置施加了连续性和硬声场壁等边界条件。

借助软件内置的转移阻抗模型,研究团队利用孔隙率等参数对管道中的穿孔区域进行了定义。需要输入的参数包括面积孔隙率、挡板和管道厚度以及孔径。至于玻璃棉等多孔材料,可使用软件中的多孔声学模型对流阻率进行定义。研究人员在模型的入口处施加单位压力作为输入,同时将平面波辐射条件应用于入口和出口。

基于分析结果,设计人员

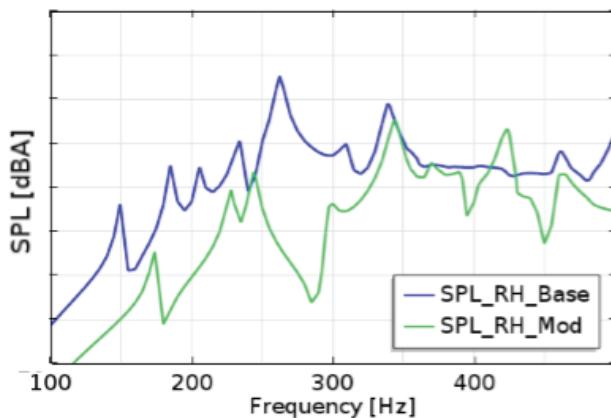


图4 仿真结果显示,改进后的空气过滤器设计有效地降低了结构噪声。

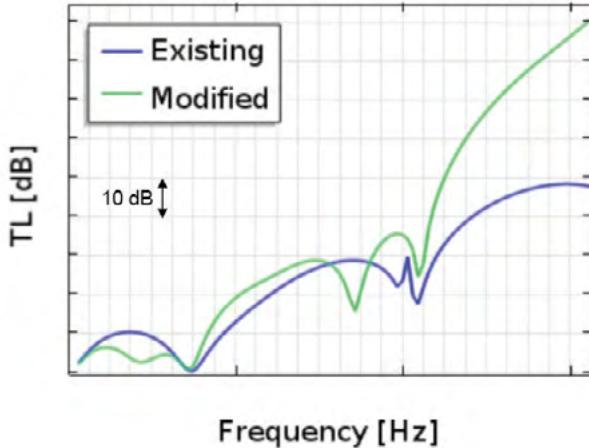


图5 不同设计的传输损耗 TL 对比图。设计的改进主要体现在:降低在低频的 TL,并提高在高频的 TL。修改后的设计不仅符合规定,还保留了用户喜爱的“轰鸣声”。

**“我们使用‘App 开发者’创建了一个仿真 App,从而可以非常方便地对比仿真分析的输出文件,并绘制 SPL 数据。”**

——ULHAS MOHITE, 马恒达公司研发经理



图6 借助“App 开发者”,马恒达的工程师开发了一个操作简便的仿真 App,可用于对比分析文件以及绘制 SPL 数据。

加长了消声器内部的管道长度。改进后的消声器大幅降低了低频下的传输损耗(Transmission Loss, 简称 TL)(图 5),因此能够增加低频下的噪声水平,即保留了用户喜爱的轰鸣声。

### ⇒ 在设计初期引入优化流程

“我个人非常欣赏 COMSOL 软件的灵活性以及像 COMSOL API 这样的内置工具。”马恒达公司研发经理 Ulhas Mohite 评论道,“在软件中,我们可以通过使用 Java 代码自动执行仿真任务,例如在处理声学分析时,我们能够针对不同的频率步长采用不同的网格,从而在仿真精度和计算时间之间找到最佳的平衡点。除此之外,软件还能在仿真运行时自动输出例如表面 SPL 绘图和远场 SPL 数据等信息。由于无需再对数据进行手动的后处理和数据导出,这为我们节省了大量的时间。”

此外, Mohite 还认为 COMSOL 软件内置的“App 开发者”具有非常实用的价值。他补充道:“我们使用‘App 开发者’

创建了一个仿真 App(图 6),从而可以非常方便地对比仿真分析的输出文件,并绘制 SPL 数据。”

对比结果表明,仿真分析的结果与物理实验数据高度匹配。通过仿真分析,马恒达的工程师能够在设计阶段的初期基于分析结果调整结构设计,并采取正确的措施,从而减少了产品开发所需的时间和成本。Bhatia 总结道:“通过实验的验证,仿真分析为我们提供了清晰的产品优化思路,帮助我们有效地解决了摩托车的噪声问题。”❖

### 参考文献

1. U.Mohite, N.Bhatia, and P.Bhavsar, *An Approach for Prediction of Motorcycle Engine Noise under Combustion Load*, SAE Technical Paper 2015-01-2244, 2015, doi:10.4271/2015-01-2244.
2. *Reducing Motorcycle Engine Noise with Acoustics Modeling*, COMSOL Blog



## 从电子表单到多物理场仿真 App： ABB 持续推动变压器行业的发展

许多公司在开发新型变压器或改进现有型号时，需要制作各种样机并借助测试来降低变压器工作时发出的鸣扰，这会产生高额的费用成本。在 ABB，一个工程师团队正通过开发多物理场仿真与定制 App 来加深他们对变压器设计的理解。

作者 **LEXI CARVER**

不论是烧饭做菜还是给手机充电，我们每天的生活都离不开由电网为住宅、公司及学校等各类建筑提供的能源。这个复杂网络包含发电站、长距离电力传输高压线、为每户家庭及社区供电的配电线路，以及用于过电保护及控制相关的硬件。

这些硬件包括用于增加及降低交流

电输电线路中电压等级的电力变压器（图 1）。电压越高，功率传输时的损耗越低，所以高电压更适合长距离功率输送。但高压等级会给输电线的两端带来潜在的安全威胁，因此需要通过变压器来增加电源馈入点的电压，降低街区及建筑物周围的电压。

然而，变压器会发出噪声，人们在它

附近会听到微弱的嗡鸣声。根据相关法规，设备的噪声级必须维持在安全范围内。虽然我们无法制造出完全静音的设备，但可以通过优秀的产品设计来尽量降低这类噪声的影响。

总部位于瑞士苏黎世的 ABB 集团是全球最大的变压器制造商之一，该公司正通过数值分析和计算 App 来预测



图 1 高压输电中使用的变压器。

和最小化变压器中的噪声等级。他们借助 COMSOL Multiphysics® 仿真软件和内置的“App 开发器”来运行虚拟设计检查、测试各种配置，并通过基于模型开发的定制用户界面来部署仿真结果。

#### ⇒降低来自多个源头的噪声

变压器的噪声通常有多个源头，例如变压器铁芯或冷却系统内辅助风扇和泵的振动。为了更好地降低噪声，每个噪声源都需要进行不同方式的单独处理。

ABB 变压器中包含一个金属铁芯、缠绕于金属铁芯各段的线圈绕组、用于保护这些元件的外壳或箱子，以及外壳

内的绝缘油（图 2 上）。当交流电通过其中一个线圈绕组时，会产生磁通量，并在相邻线圈中产生感应电流。电压的调节可以通过改变线圈匝数来实现。

制造铁芯的钢是一种磁致伸缩材料，这些方向交变的磁通量会造成机械应变，致使金属的快速膨胀与收缩产生振动。当这些振动通过绝缘油和用于固定内部铁芯的装夹点传递到外壳壁时，会发出一种能被人耳捕捉到的嗡嗡声，即铁芯噪声（图 2 下）。

除铁芯噪声外，线圈中的交流电还会在各个绕组内产生洛仑兹力，造成振动，即载荷噪声，并以机械能的形式传递到外壳。

由于存在多个噪声源，同时还涉及

相互关联的电磁、声学 and 力学等因素，瑞典韦斯特罗斯市（Västerås, Sweden）的 ABB 集团研发中心（ABB Corporate Research Center, 简称 ABB CRC）的工程师们只有充分理解了变压器的内部工作原理，才能优化变压器的设计，将鸣扰降至最低。

#### ⇒声学、力学和电磁效应的全耦合

“我们使用 COMSOL Multiphysics 进行研究，是因为它能够轻松地将多个物理场轻松地耦合在一起。”ABB 集团研发中心的科学家 Mustafa Kavasoglu 说，“因为项目需要模拟电磁学、声学 and 力学，而 COMSOL® 支持在单一环境下求解这三个物理场，所以它是我们的最佳选择。”

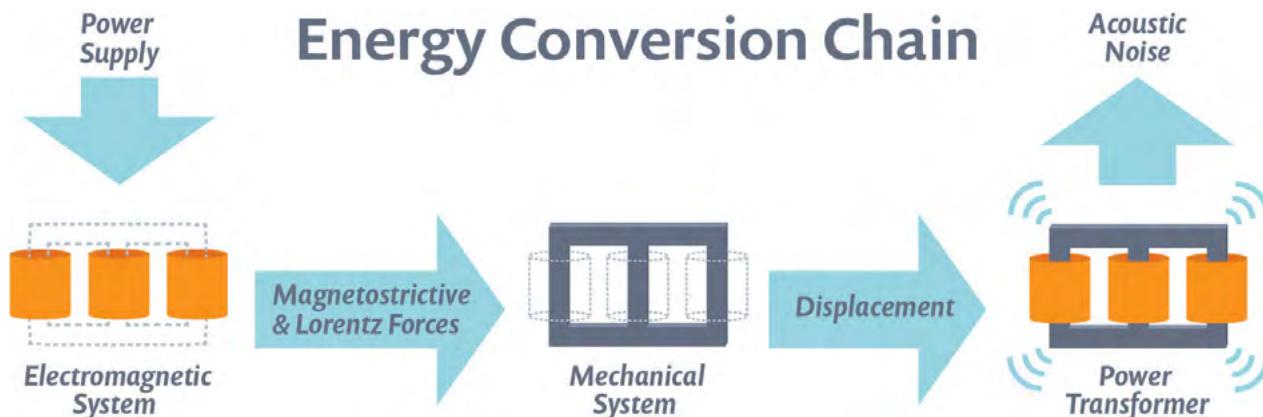
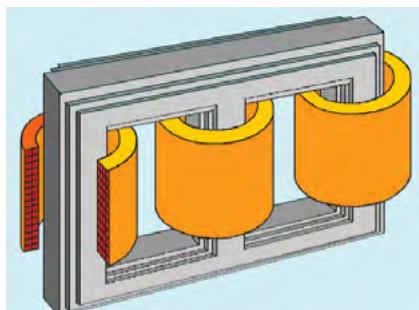


图 2 三相变压器中器身装配的 CAD 模型，绕组环绕铁芯安装（左上）。在装有绝缘油的外壳中安装电力变压器的器身装配（右上）。发出铁芯噪声及载荷噪声的能量转换链（铁芯的磁致伸缩和绕组中的洛伦兹力）（下）。图注：Energy Conversion Chain - 能量转换链；Power Supply - 功率输入；Electromagnetic System - 电磁系统；Magnetostrictive & Lorentz Force - 磁致伸缩与洛伦兹力；Mechanical System - 机械系统；Displacement - 位移；Acoustic Noise - 噪声；Power Transformer - 电力变压器

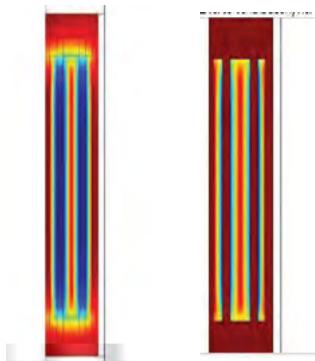


图3 仿真结果显示了变压器线圈绕组中的磁通密度(左)和洛伦兹力(右)。

由ABB集团研发中心的Kavasoglu、首席科学家 Anders Daneryd 博士和首席工程师 Romain Haettel 博士组成的团队正在研究变压器声学。他们的目标是通过开发一系列的仿真与计算 App 来计算变压器铁芯和绕组(图3左)中产生的磁通量、绕组中的洛伦兹力(图3右)、磁致伸缩应变引起的机械位移,以及声波传播通过外壳时产生的声压级。

他们与 ABB 变压器业务部进行了密切合作。为了满足业务需求与相关要求,项目时常需要借助知名电力变压器专家 Christoph Ploetner 博士的经验与专长。

在其中一个仿真项目中,他们模拟了铁芯在磁致伸缩影响下发出的噪声。团队首先通过电磁模型预测了由交流电感应出的磁场,然后分析了钢中的磁致伸缩应变。

“我们还通过 COMSOL Server™ 许可证将用于测试的 App 发给其他办公室,轻松实现共享。这种全球许可证非常实用;作为一家全球化公司,我们希望位于世界各地的用户都能从这些 App 中获益。”

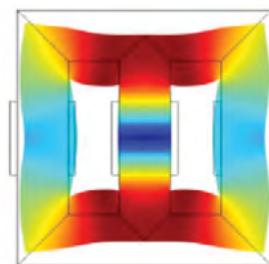
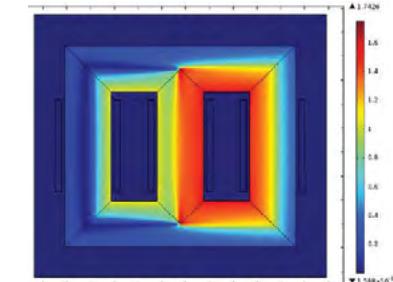


图4 COMSOL® 软件结果显示了钢制铁芯中的磁通密度大小(左)。铁芯的共振结果;为清晰起见,放大了变形部分(右)。

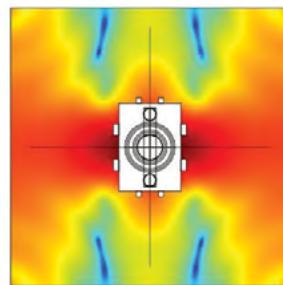
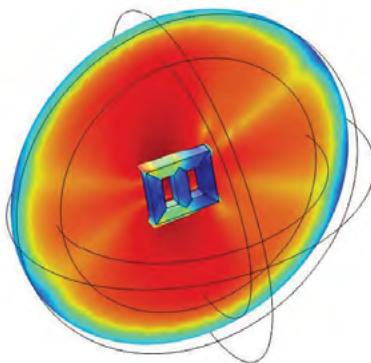


图5 铁芯(左)和变压器(右)周围声压场的声学分析结果。

他们的几何设定中包含钢制铁芯、绕组以及用于表征外壳的外部域。“我们从磁致伸缩的应变结果得到了位移,然后通过模态分析计算了不同频率下的谐振(图4)。”Kavasoglu 说,“磁致伸缩应变很容易激励出谐振,并会放大这些频率下的振动。”

由此,他们能够预测声音在绝缘油中的传波,并计算它在外壳中引发的振动,从而计算传到周围环境中的声辐射(图5)。

他们还模拟了造成载荷噪声的线圈绕组的位移,并确定了由此产生的声场在外壳壁造成的表面压力(图6)。

他们还通过参数化研究分析了设计参数(比如外壳厚度和材料属性)与产生的变压器鸣扰之间的复杂关系,据此调整了几何、铁芯、绕组和外壳的设定,希望能尽量降低噪声。

### ⇒在全公司推广仿真

集团研发中心的研究团队持续使用 COMSOL 软件帮助加深理解并改进模型,还希望将自己的知识带给 ABB 集团的其他设计人员以及整个业务部门。他们利用 COMSOL Multiphysics 中的“App 开发器”将多物理场模型转化为仿真 App,并根据各部门的需求轻松地进行定制。

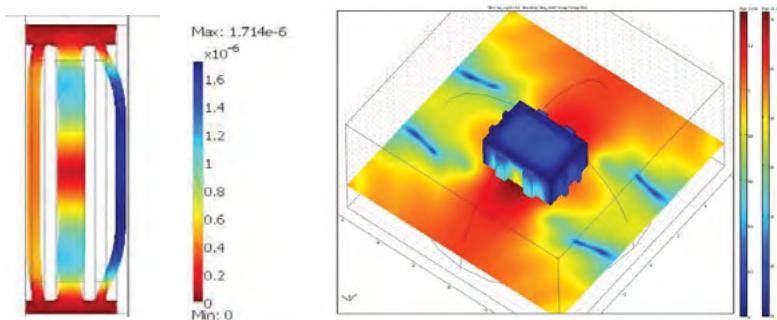


图 6 仿真结果显示了绕组的位移。为清晰起见，放大了变形部分(左)；外壳外部的声压级及外壳壁的位移(右)。

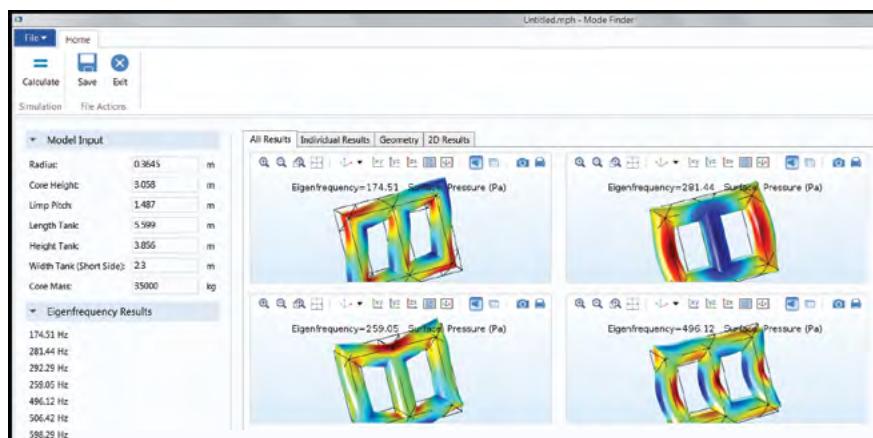


图 7 用于计算变压器铁芯特征频率的首个仿真 App。左侧的选项卡栏为模型输入项；右侧将显示特征频率的计算结果。为清晰起见，放大了变形部分。

这些仿真 App 简化了设计人员和研发工程师的测试与验证工作。“一直以来，设计人员们使用的设计工具都是基于统计数据 and 验证模型。我们通过部署仿真 App 弥补了这一不足。借助我们在“App 开发器”中制作的界面，他们无需学习有限元理论也能独立运行有限元分析。” Haettel 解释说。

图 7 中的 App 用于计算变压器铁芯的特征频率，如果在可听阈内则意味着会造成噪声问题。其中包含了在 COMSOL® 软件中开发的物理场模型，以及在“App 开发器”中使用 Java® 代码编写的定制方法。

“我们的设计人员可以通过标准电

子表单处理日常开发工作。但是在引入新设计或其他几何尺寸时，这一方法就会遇到问题，例如错误的输出结果表明噪声级数据还不够准确。如果还需要结合其他方法来降低变压器的整体噪声，那成本将变得很高。” Haettel 继续说。

“除了成本因素，还有时间方面的考虑。新的 App 工具集成了有限元代码的精度优势，从而使设计人员的工作更加简单高效。”

用户可以很方便地在定制 App 中查看由于特定几何、材料属性和其他设计参数组合造成的变压器鸣扰。“我们慎重地选出了允许用户访问的参数，主要

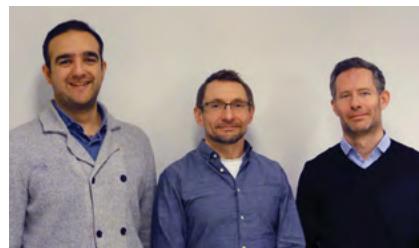
是一些最重要的参数。” Kavasoglu 补充道。

鉴于 ABB 需要为多个工业应用领域设计变压器，这种灵活性将给他们的设计与虚拟测试带来极大的便利。“ABB 需要针对各行业的需求生产变压器。我们当前主要研究电力公司中常用的、负责为整个城市输送和分配电力的大型交流电力变压器。”他解释说。

“不过，我们的工作可以适用于任何类型的变压器，而且我们还可以根据收到的请求来修改 App，满足客户的具体需求。这也使我们能够轻松地其他研发工作。‘App 开发器’简化了知识与技能的传递。”

“我们还通过 COMSOL Server™ 许可证将用于测试的 App 分发给其他办公室，轻松实现共享。这种全球许可证非常实用；作为一家全球化公司，我们希望世界各地的用户都能从这些 App 中获益。”仿真专业人员可以通过在本地安装的 COMSOL Server 管理并部署他们的 App，用户则能通过客户端或网页浏览器进行访问。

该团队目前正努力开发另一个用来计算载荷噪声的 App。在业务部门中，该 App 将进一步简化繁琐的计算工作；与此同时，设计人员和销售工程师无需设置底层的精细模型就可以进行虚拟测试。这使得 ABB 能更快、更轻松地制造出全世界最好的变压器。❖



从左到右依次为 ABB CRC 的 Mustafa Kavasoglu, Romain Daneryd 和 Anders Haettel。

# 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 and 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

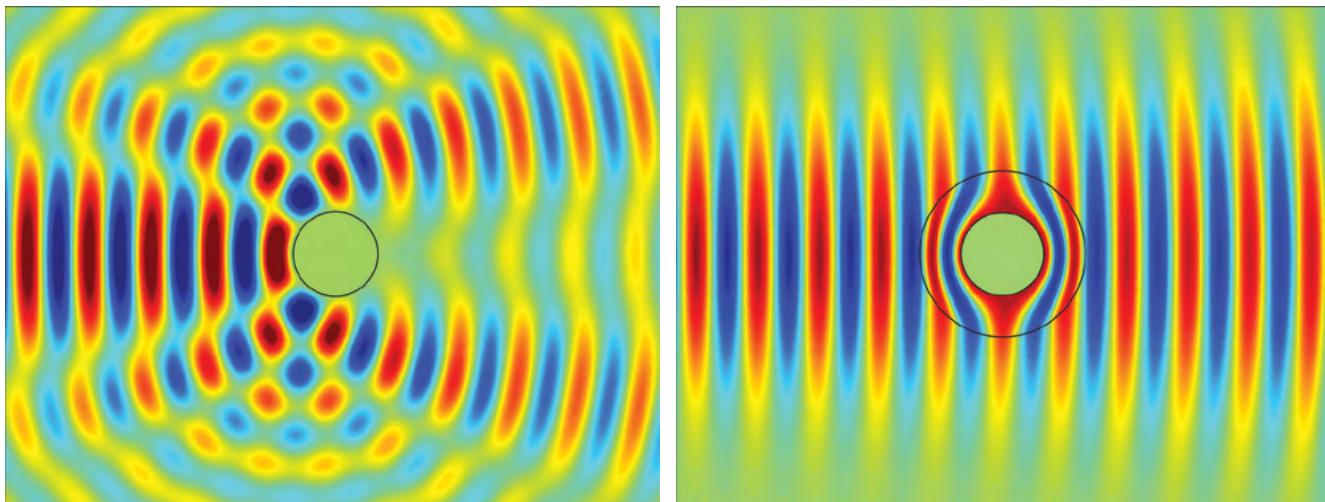


图 1 控制由物体引起的声波散射。声波由刚性物体左侧入射时，由于障碍物的影响，散射非常明显：声波呈现准镜面反射，物体背后阴影较深，一部分声波全向传播（左）；在同一物体周围施加理想隐形外罩，我们可以看到，反射和阴影都不复存在，能量绕过超材料物体继续传播，这一过程看上去几乎没有任何损耗（右）。

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，例如超级透镜和消声器等。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

“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

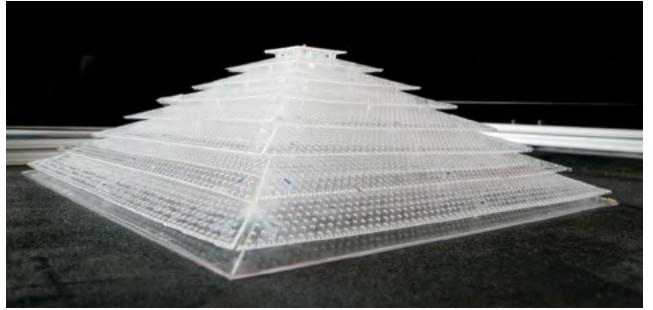
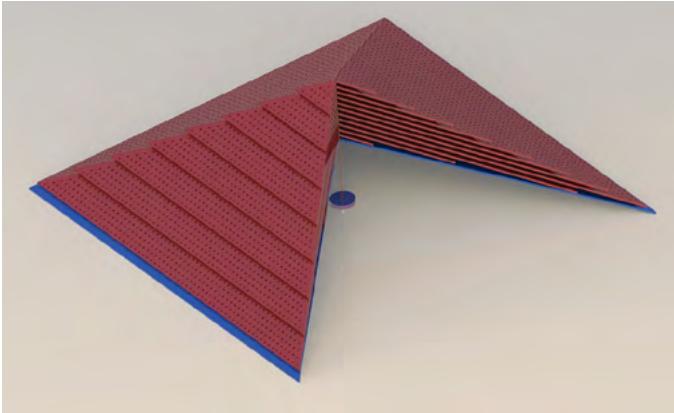


图2 金字塔形三维声学隐形外罩的设计图(左)和构造图(右)。

变换并控制传入的声波。事实证明，声学隐形结构(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，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，这意味着材料属性在不同方向的表现不同。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，并开始模拟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对声学超材料产生的完整声场进行测量，并将测量数据与仿真结果进行对比。”他补充道。

在研究中即使不可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，

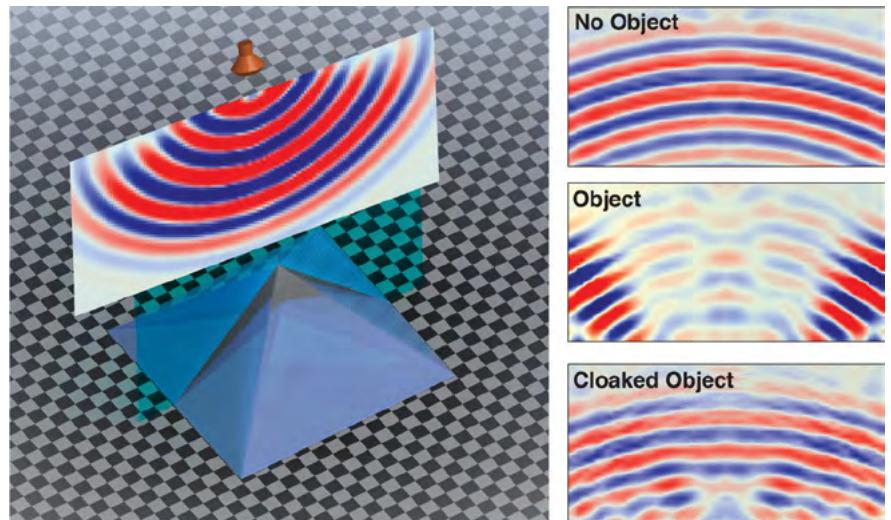


图3 为了测试超材料外罩，研究人员以三种不同的方式发射声波脉冲，并使用扫描麦克风测量反射的声波脉冲(左)。被测物体反射的声波脉冲与未放置物体时反射的声波脉冲截然不同。将物体置于隐形外罩下方时，反射的脉冲与未放置物体时反射的脉冲几乎相同，由此可见隐形外罩的声学隐形作用(右)。图注：No object - 无物体；Object - 有物体；Cloaked Object - 物体被隐形

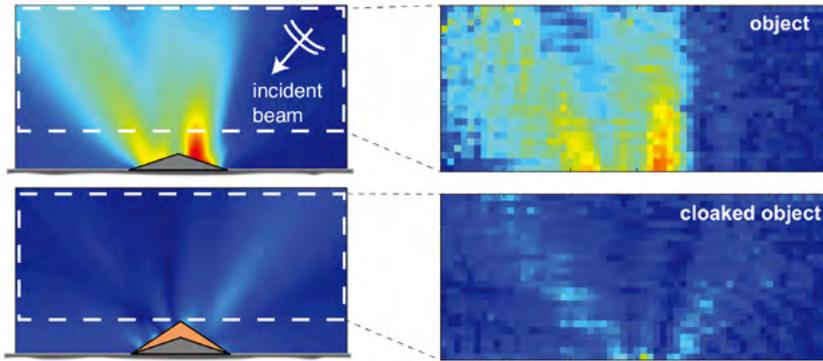


图4 散射声场的仿真结果(左)与测量结果(右)完全吻合,这不仅显示了物体的声学隐形程度,还证实了 COMSOL Multiphysics® 能够精确地预测出制造装置的性能。图注: incident beam - 入射波束; Object - 有物体; Cloaked Object - 物体被隐形

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(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(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声。Cummer 说道:“隐形材料不是仅仅靠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(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帮助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。在此过程中,研究人员首先构建出预先设计的结构,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,从而使我们所需的特性得以保持。”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地加工出来。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了现实条件下切实可行的方案。”❖

# 晃动、震颤 和摇摆

挪威研究人员正在追踪低频声波在建筑内的传播, 希望能据此给出调整设计的建议, 减少各种令人烦躁的振动。

作者 JENNIFER HAND

 在机场旁留宿的人一定能体会这种感受: 早班飞机使你从睡梦中惊醒, 除了引擎噪声, 似乎身边所有的东西都在晃动。另外, 住在风力发电机、军事基地和设有直升机起降场的酒店旁的住户也经常抱怨, 当有外部噪声时, 窗户会震颤, 各种日常物品都会发出嗡嗡声。更让人费解的是, 即使没听到任何声音, 也还是能感受到这类恼人的振动。

如果声波的振动不超过 20 次每秒 (20 Hz), 这种频率的声波被称为次声波, 人耳无法听到这种声波。然而, 我们还是能轻易察觉到它的影响。当声波遇到窗户、传到地板上, 并影响内墙时, 会引起明显的室内振动。由于低频声波会带来各种令人烦躁的干扰, 所以一直饱受诟病。

## ⇒ 建筑内的低频声波

噪声是现代生活的一部分, 在正式标准中一般通过声压级来测量高频噪声的敏感度、干扰水平以及对人体的危害。根据挪威岩土工程研究院 (Norwegian Geotechnical Institute, 简称 NGI) Finn Løvholt 的说法, 人们目前尚未深入研究建筑在次声波影响下产生的振动。因此, 多年来, 作为一家国际性的地球科学研究及咨询中心, NGI 一直在为挪威国防资产管理局 (Norwegian Defence Estate Agency) 进行各种调查项目。

“与高频的声音相比, 低频声音在空气中传播时被吸收得更少, 因此传得更远。从建筑物外传到建筑内的声音量要更多。我们希望了解在听力阈值内将发生什么。”Løvholt 解释说, “我们希望了解来自外部声源的声音如何与建筑发生相互作用, 并产

生能被人体捕捉到的振动。之后我们将能提出各种对策来阻止振动, 也许还能对这些‘恼人’的因素给出一些标准的指标。”

## ⇒ 模拟声波的传播

Løvholt 和他的同事决定开发一个计算模型, 找出低频声波撞击及穿透建筑的原理。他们使用 COMSOL Multiphysics® 软件模拟了一个木制结构, 内部的两个房间由墙壁隔开 (图 1 上), 模型精确模拟了实验室内的实验装置。他们在模型中的一个房间内安装了扬声器, 在另一个房间安装了麦克风, 并在结构周围安装了各种探头, 以便监控声压级和振动。他们模拟了该结构中的每个构件, 包括钢架、墙内的气腔和立柱、窗户、胶合

“我们之前从未达到与实际测试如此高度的契合, 这一切都得益于我们能够在 COMSOL Multiphysics 中模拟不同的结构单元。”

—— FINN LØVHOLT,  
挪威岩土工程研究院

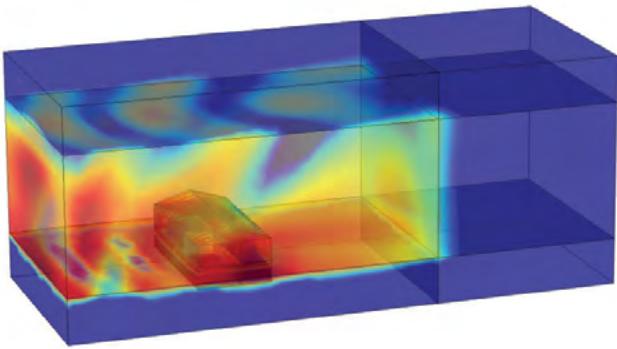
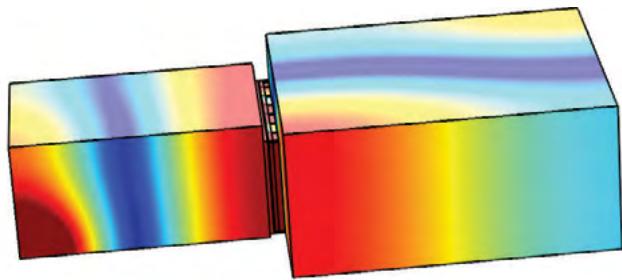


图1 在模拟实验室内被墙隔开的两个房间中的声压。在左侧房间中安装一个扬声器；仿真显示每个房间内的声共振都将影响声绝缘(上)。模拟来自建筑外部、周围及内部的低频声音。二者都通过用颜色来区分室内及墙体空腔中的声压变化(下)。

板以及石膏板。“每个部分的共振都依赖于声波的波长和压力分布。例如，扬声器房间的压力较高，麦克风房间的压力较低，墙体的共振与它的长度、厚度和刚度有关。”Løvholt 解释说。

团队还必须考虑当两个构件结合在一起时产生的复合共振，比如拧在一起的两块木料。“COMSOL Multiphysics 的优势在于我们能够输入需要监控的所有参数，而它支持耦合多个物理场

这一特点尤为重要。因此，我们能查看例如空气域内外声音与室内结构动力学的相互作用。这是一个双向耦合过程，所以我们可以找出反馈。在我们的分析中，耦合非常重要，因为声波会在一个很大的范围内产生多种共振。模型帮助我们真正实现了此类分析。”

NGI 的团队随后在实验室中对穿过木屋(含两个房间)的低频声音进行了测试，用来验证仿真结果。Løvholt

解释说，他们的主要测量参数是墙体的运动和声压级。所得结果与 COMSOL Multiphysics 模型具有高度的相关性(图 2)。“真实墙壁的响应非常清晰，而模型几乎完美地复现了真实的响应，这也是令人感到惊叹的地方。”

模拟结果显示，声音在建筑内的传播会受低频声波与以下因素间相互作用的影响：建筑构件的基模、房间尺寸、空气在建筑围护结构中的泄漏的方式等。天花板和墙壁的振动似乎是室内低频声音的主要来源，而地板的振动则是由室内声压驱动的。

### ⇒ 比物理测试更快捷、更经济

“这个工具使我们能够预测低频声音和振动。”Løvholt 说，“我们可以用它设计和测试各种应对措施，例如使用多层窗户、加硬墙壁等，因为，如果墙壁或窗户的移动变小了，传播的声音也会减弱。此外，模型还向我们说明了小细节对系统的影响；例如，立柱与石膏板间的螺纹连接会如何减弱某个应对措施的效果，因为它们其实会降低结构的整体刚度。”

下一步，团队计划对挪威境内一座正受飞机噪声困扰的真实房屋进行全尺度现场测试。同时，团队将继续使用并进一步开发该模型。“我们之前从未达到与实际测试如此高度的契合，这一切都得益于我们能够 COMSOL Multiphysics 中模拟不同的结构单元。”Løvholt 总结道，“我们可以依据模型做出决策，并能据此采取应对措施。与物理测试相比，它的成本更低，耗时更短。之后，我们将进一步拓展模型，用于模拟整栋建筑中的声传播与振动。”(图 1 下)。❖

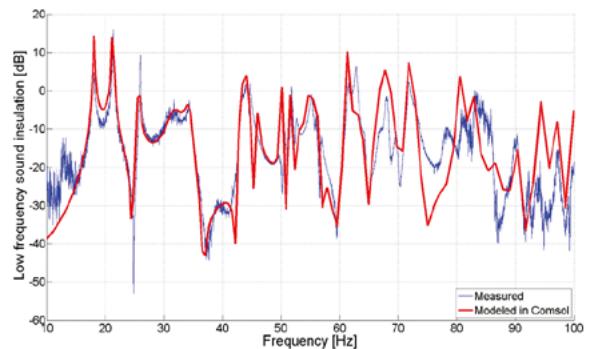


图2 模型精确计算了共振位置以及声压级(精度在几分贝内)。随着频率增加，将激励越来越小结构中的更多模式，导致测量值与模拟结果之间差异的扩大。

# 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的客户正在展开合作, 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, 约 20% 美国人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听力水平和生活质量。一款助听器产品从最初的设计到最终面市, 均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高质量的产品。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提高佩戴者的听力水平。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, 将所有的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。

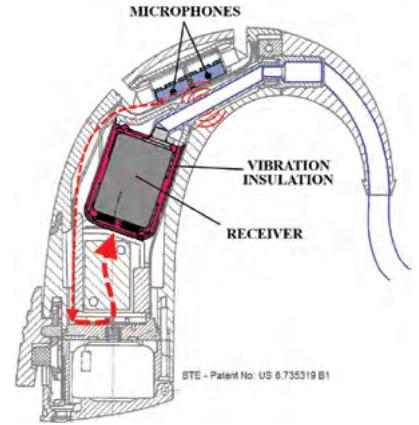


图 1 标准的耳背式助听器由麦克风、隔振装置、受话器等元件组成。由于元件布局过于紧凑, 容易产生负面的声学 and 力学反馈。楼氏电子公司供图。图注: MICROPHONES - 麦克风; VIBRATION INSULATION - 隔振装置; RECEIVER - 受话器

随后, 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 上所示。

## ⇒ “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 20 世纪 60 年代起, 楼氏电子的工程

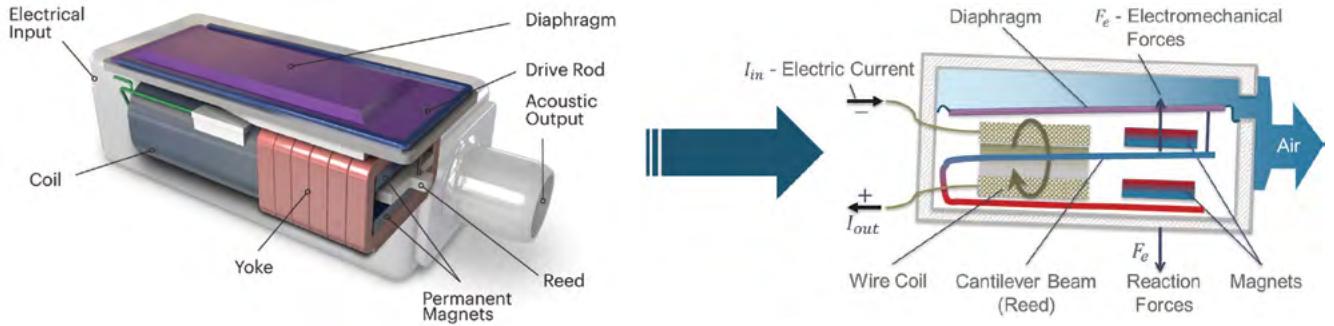


图2 受话器是助听器中的关键元件，它包含一个微型扬声器，扬声器中的电磁控制振膜可以产生声音。受话器内部的电磁力会引起结构振动，进而产生声学反馈。图注：Electrical input - 电输入；Coil - 线圈；Yoke - 磁轭；Permanent magnets - 永磁体；Reed - 簧片；Acoustic output - 声能输出；Drive rod - 驱动杆；Diaphragm - 振膜；Electric Current - 电流；Wire Coil - 线圈；Cantilever Beam (Reed) - 悬臂梁；Reaction Forces - 反作用力；Magnets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

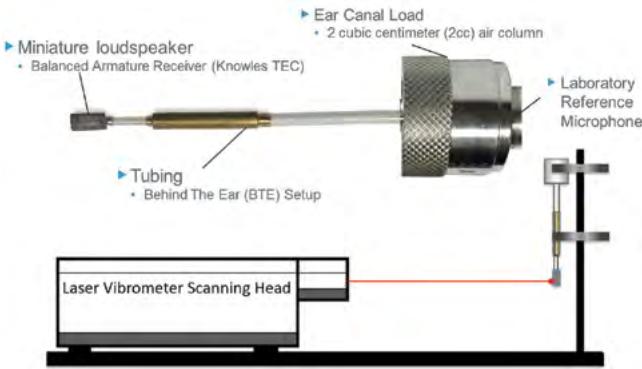


图3 实验装置的硬件和原理图。图注：Miniature loudspeaker-小型扬声器；Balanced Armature Receiver - 平衡电枢受话器；Tubing - 导音管；Behind The Ear (BTE) Setup - 耳背式 (BTE) 助听器装置；Laboratory Reference Microphone - 实验室标准麦克风；Ear Canal Load - 耳道负载；2 cubic centimeter air column - 2 立方厘米的空气容积；Laser Vibrometer Scanning Head - 激光测振仪扫描头

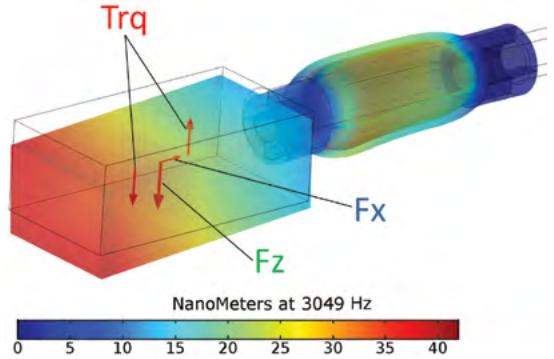


图4 受话器和硅胶导管配件在 3 kHz 频率下，力和位移的仿真结果。单位为纳米。

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与助听器行业的许多客户展开了合作，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 cm<sup>3</sup> 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听器。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受听器的结构运动。他们还通过观察受听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。仿真耦合了受听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黏性损耗、腔体和管道内的声压

载荷,以及“黑盒子”受听器模型内部的电磁-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 3 kHz 时的位移仿真结果,以及受听器上承受的作用力。

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’受听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。

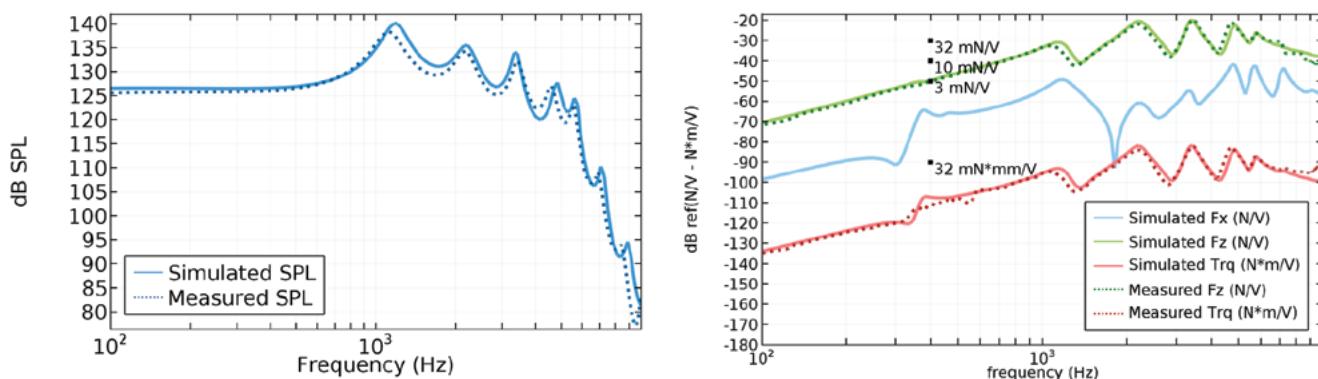


图 5 体积为 2 cm<sup>3</sup>的耦合器内的声压级测量数据(虚线)和仿真结果(实线,左);作用在受听器上的力和扭矩的测量数据(虚线)与仿真结果(实线,右)。

# 多物理场分析 助力地下给水管道的泄漏检测

地下给水管中声速的估算对于准确定位泄漏点来说十分重要。Echologics 工程公司创建了一个有限元仿真框架, 用于模拟管道中的声学行为, 以及计算声速的变化。

作者 **VALERIO MARRA**

新鲜、洁净的水源是十分宝贵的资源, 地下输水管道一旦发生泄漏, 就会造成巨大的损失, 因此对管道进行泄漏检测十分重要。然而, 随着管道基础设施的逐渐老化, 对管道泄漏点的定位将变得极其困难。

为了解决这一问题, 位于加拿大多伦多的 Echologics 工程公司 (隶属于 Mueller 加拿大有限公司) 利用其独一无二的声学检测技术, 研发出了一种无需开挖, 便可对深埋地下的管道进行泄漏检测的方法。“泄漏会产生噪声,” Echologics 公司声学领域的研发科学家 Sebastien Perrier 解释道, “管道是会说话的, 如果你仔细听, 他就会告诉你哪里发生了泄漏。” Perrier 是一名机械工程师, 专长于声学 and 振动、结构耦合, 以及信号处理等领域。

借助相关函数和安装在管道或消防栓上的声学传感器, Echologics 公司对声波的传播时间进行了测量。如果管道泄漏点位于某两个传感器之间, 传感器就会检测到由泄漏所发出的噪声, 然后便可根据相关函数的计算结果来确定同一泄漏噪声传播到两个传感器所产生的时间差。当确定了管道中的声速后, 就能轻而易举地测算出泄漏点的具体位置 (图 1)。

作为水利基础设施声学检测系统的创新领导者, Echologics 利用上述相关函数研发出了可准确定位管道泄漏点并对管道泄漏进行长期监测的技术。Echologics 公司的主要产品包括 LeakFinderST™ 泄漏噪声相关仪 (图 2) 和 EchoShore®-DX 管道监测系统 (图 3)。在 Echologics 相关仪的

帮助下, 现场检测人员可利用发射器、传感器和笔记本电脑上的操作界面对各类型管道的泄漏情况进行检查。更为重要的是, 利用这种声学技术, 工作人员在管道泄漏初期便能检测出极其微小的泄漏点, 从而及时地防止管道的进一步损坏, 这将大幅减少维修费用的支出。

Echologics 产品的正常工作依赖于对不同类型管道内声速的精确测算。声速主要取决于材料类型, 与管道刚度成正比, 并受管道几何结构的影响。“此项技术的核心在于研发出灵敏度高的 PVC 管泄漏点检测方法。” Perrier 解释道。这是因为与金属相比, 塑料具有高衰减、高阻尼的特性。更棘手的是, 原先的供水系统由铸铁管制成, 然而现在却要在部分区段用塑料来进行修补。

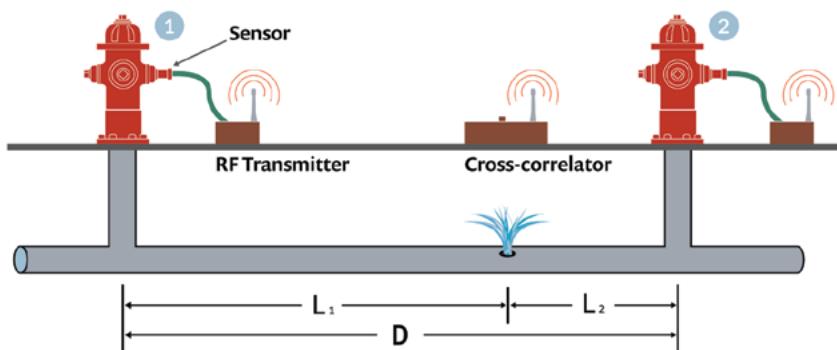


图 1 检测中的泄漏管道 (左); 泄漏检测设置示意图 (右)。泄漏点位于间距为  $D$  的两个传感器之间。泄漏噪声沿两个方向传播, 相关仪测量了声音到达每个传感器所需的时间。根据管道中的声速, 即可推算出确切的泄漏位置。图注: Sensor - 传感器; RF Transmitter - 射频发射器; Cross-correlator - 互相关仪



图 2 LeakFinderST™ 相关仪是一款简单易用、体积小巧的泄漏噪声相关仪。



图 3 EchoShore®-DX 系统将路边常见的消防栓变成了智能泄漏检测装置。

Perrier 的职责之一是保证复杂的声学相关性算法的准确并持续对其更新。他必须深入理解基础层面的物理原理，才能针对地下管道设施进行优化以及开发新一代的泄漏解决方案。为了加快设计进程，并与其他部门的同事分享研究成果，Perrier 创建了计算声学模型，并基于模型开发了仿真 App。

### ⇒ 在故障发生前找到泄漏点

数值仿真是如何帮助我们预测管道中的声波传播的呢？管网分析通常既复杂又耗时。研究人员有时需要了解单一管道内的声音传播和振动响应情况，有时则希望纵观整个管道系统的情况。因此在确保精度的前提下，模型的复杂程度和运行分析所需的时间，会因模型涉及的物理场细节的不同而存在巨大

差异。

在设计初期，Perrier 面临的核心问题是如何确保管道中每个区段的声音传播速度均准确无误。为了达到这一目的，他在后续的研究工作中采用了多物理场仿真。在管网分析中，需要对声学、流体和结构力学等多个物理场进行耦合分析，仿真分析帮助他快速获取了所需的数据。

仿真在 Perrier 的工作中用途广泛。比如他能够通过仿真了解微小的误差幅度，并据此对现有技术进行改进。他通过声学仿真深入探索了管网的材料和几何参数，获得了不同情景的预测结果。声学仿真显示，当传感器的距离发生变化时会出现信号噪声，仿真结果还表明，已经用塑料修补过的管道并未包含在实际测试中。此外，Perrier 的仿真

还能预测在声波传播到传感器的过程中管网内的压力，以及采用不同材料的区段中的机械阻尼，这就为上述问题提供了一种可视化的方法（图 4）。

### ⇒ 将仿真 App 纳入日常工作

Perrier 在计算模型的日常使用中看到了定制化仿真 App 的优势。他以 COMSOL Multiphysics® 分析为基础，利用软件内置的工具开发出了仿真 App。这个 App 包含声-结构相互作用、管道声学，以及瞬态和频域研究（图 5），并支持用户在运行中修改几何参数和材料属性，深入分析单段管道或整个管网。

用户可在 App 中通过输入管道区段的长度、段数和管道特性，对输水管网进行定义。从预定义列表中选择铸铁或塑料等材料，App 即可自动计算出相应材料中的声速。随后，使用者只需将基于实地测量得到的相关性分析结果输入仿真 App，便能预测泄漏发生的位置。

将多物理场模型转化为仿真 App，这种方式极大地方便了研究团队与企业内其他工作人员的合作交流。Perrier 表示：“通过开发仿真 App，我可以将复杂的模型分享给同事们，而且还能随时随地访问它们。”仿真 App 支持密

“通过开发仿真 App，我可以将复杂的模型分享给同事们，而且还能随时随地访问它们。”

— Sebastien Perrier, Echologics  
公司声学领域的研发人员

码保护，可通过本地安装的 COMSOL Server™ 产品进行部署，这一方式不仅可以即时地对 App 进行更新，同时还兼顾了保密性。由于 Perrier 的大部分工作内容都需要保密，因此保密性对他来说十分重要。此外，仿真 App 还使得现场

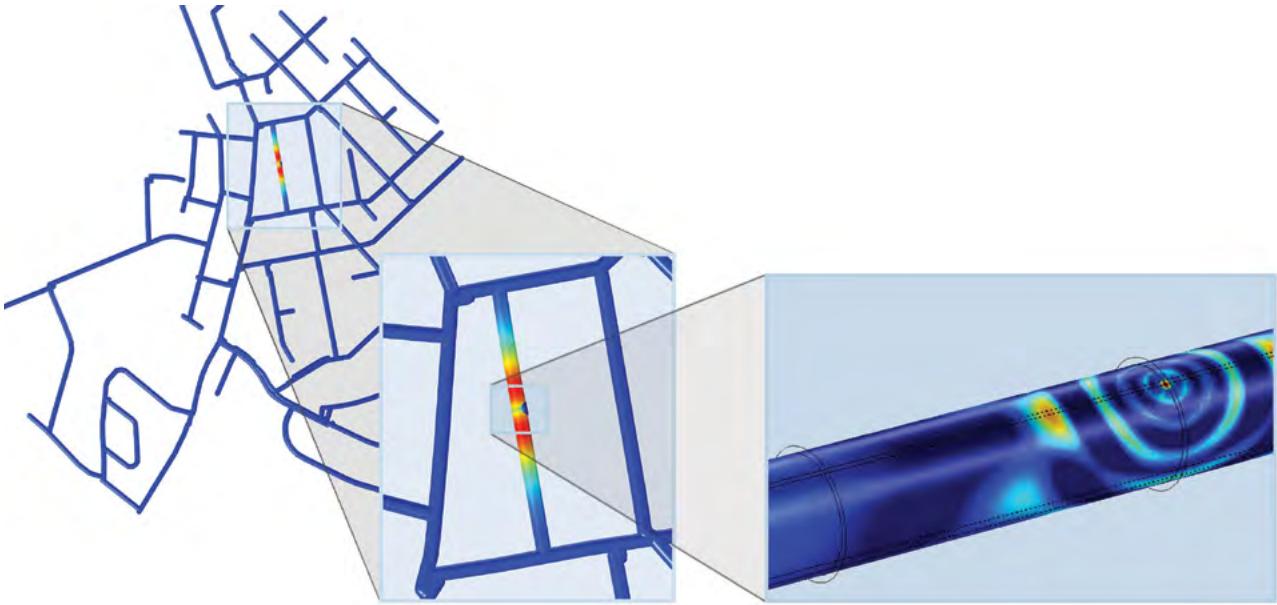


图 4 管网中泄漏噪声的声音传播分析。绘图显示了泄漏点周围区域的声压。

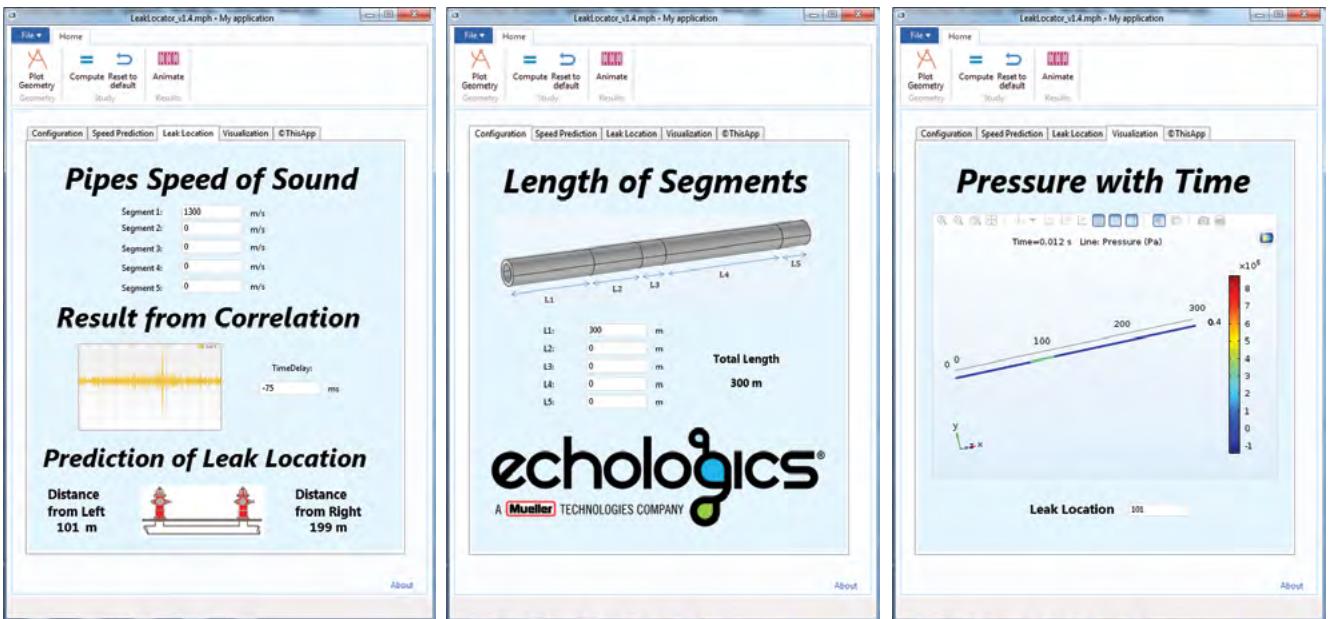


图 5 用户可通过简洁易用的操作界面对几何结构和管道特性进行定义，从而推测准确的泄漏位置。此仿真 App 可用于计算管道中的声速，还可以将泄漏位置的声音传播制作成动画，同时无需将声-结构相互作用和位置预测涉及的复杂计算呈现给用户。

的工程师可以实地运行测试分析。

Perrier 期望仿真 App 未来能在 Echologics 公司得到更加广泛的应用。对于 Echologics 的现场工程师而言，App 的关键优势在于，他们无需详细了解仿真背后的力学或数学知

识，就能够快速准确地发现泄漏点。在 Perrier 的眼里，这一强大的仿真工具可以直观呈现声音的传播过程，让使用者看到当几何结构和材料属性发生变化时，声速是在减小还是在增加。❖



Sebastien Perrier, Echologics 公司声学领域的研发科学家。

# 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能给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依靠纯手工制作。为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,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,直流偏压和交流驱动信号均施加在弹性膜上,而位于振膜反面的单层金属网(板)被用作了接地层。

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,  
华威音频技术有限公司 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、热黏性声损耗,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电信号输入下的声压级,来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





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。

噪声和振动问题, 以及其他技术服务。

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 COMSOL® 软件, Xi 工程咨询公司可以对这些非线性效应进行

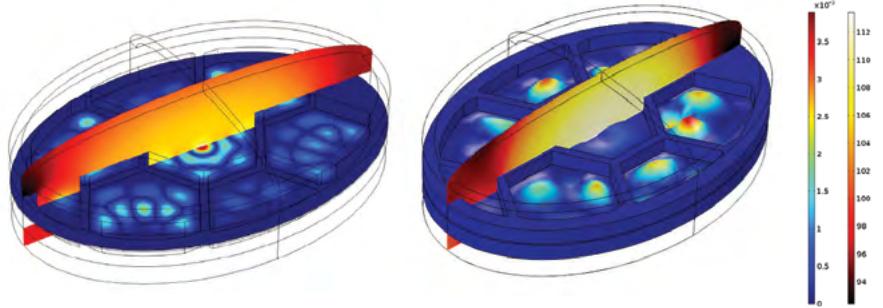


图2 如仿真结果图所示, 通过在频域内求解声学与 MEMS 的全耦合模型, 开发团队获得了声压级 (单位为 dB, 热度颜色表面图) 和振膜的位移 (单位为 mm, 彩虹颜色表面图)。频率为 5000 Hz 时的求解结果 (左); 频率为 5250 Hz 时的求解结果 (右)。

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 在描述初步测试时解释道, “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改变而发生变化, 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 对热黏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实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与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 开发者”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。”❖

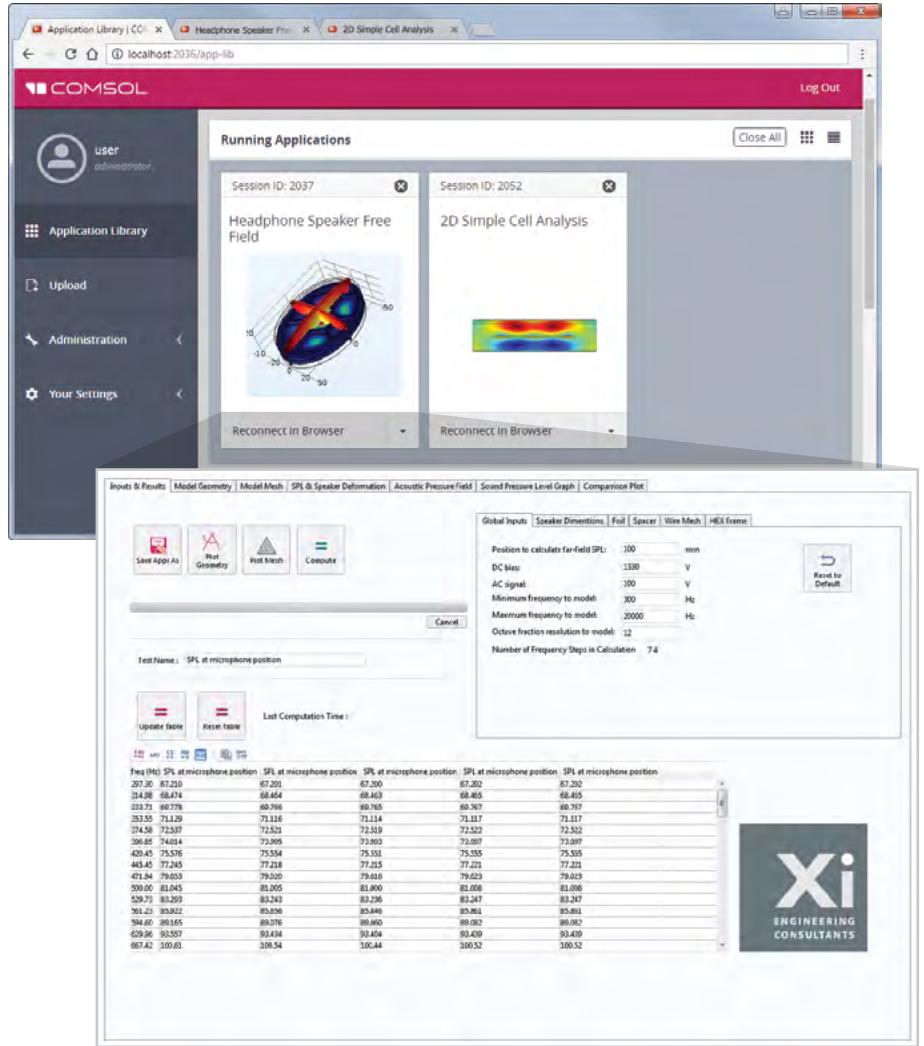


图 3 在 Xi 工程咨询公司开发的仿真 App 中，工程师可以修改一系列参数，其中包括频率、电输入、扬声器尺寸，以及振膜、衬垫和金属丝网的属性。数据结果显示了不同实验中的声压级、振膜位移、不同直流偏压的频率响应，并比较了仿真数据与实验结果(前)；通过 COMSOL Server™ 产品部署仿真 App，方便相关工作人员在网页浏览器中进行访问(后)。



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

# 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声。

作者 **GEMMA CHURCH**

传统声学处理装置具有一定的局限性,即装置的尺寸限制了其应用的频率范围(装置越薄,低频吸声性能越差);或仅能依靠共振来增强声学效果,因此其频带被限制在很窄的范围内。如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。通常采用在墙角放置薄膜吸声器(低频声陷)的方法吸收低频声音,但吸声器只对共振频率附近有限范围内的频率起作用。然而,这些恼人的低频声音频率跨度较大,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并不现实,因为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, EPFL) 声学研究组负责人 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,因此无法成为主流应用。我们的想法是开发一款兼具宽波段和主动性的设计。”根据该思路,他们提出主动式电声谐振器 (Active Electroacoustic Resonator, 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信号的方式进行调整(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,超表面具有各组成单元所不具备的超常声学特性。根据超表面的概念,这种微单元组合使波长远大于单元尺寸的声波受到影响,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形状,得到预期结果。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可独立编程的主动式声阻抗,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 的设计概念。AER 可以通过电声控制的方法进行调整或修改(图 2)。Lissek



图 1 AER原型。EPFL/Alain Herzog 供图。

解释说:“我们能够通过电信号来调整薄膜,借此改变超表面对声音分布的响应,还能使薄膜主动适配传入的声音。假设您试图掩盖飞机的发动机噪声,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(范围在几百到几千赫兹)变化进行主动调整。”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 AER 概念,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,超表面可以起到声透镜的作用,对噪声进行分解,从而使不同频率的声音指向不同的方向。从艺术角度讲,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境时,必须考虑许多复杂的现

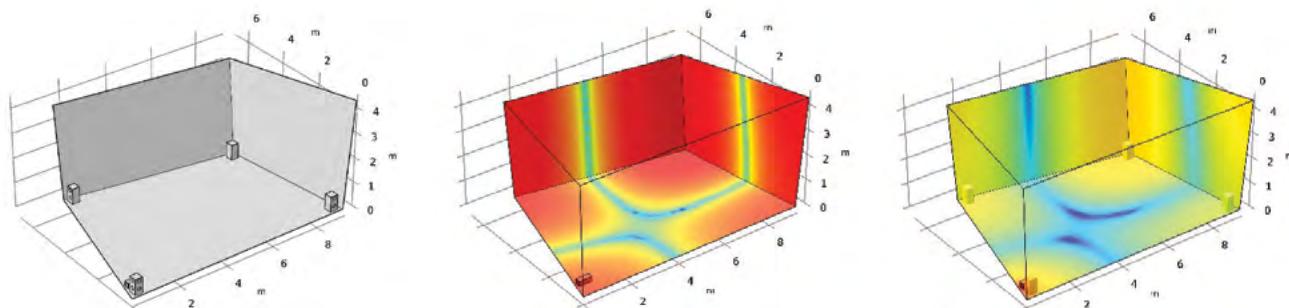


图2 混响室几何模型,其4个角落分别放置了一台AER原型(左)。35.3 Hz、110模式激励的情况下,未放置(中)与放置(右)吸声器时室内的声压级分布。

象。Lissek 表示:“在产品设计中,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。”

以上述录音室案例为基础,继续进行研究。在房间的四个角落各放置了一个小型AER(图3),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的两种情况进行分析,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,室内声音消散的模态衰减时间。”

“在软件的帮助下,我们可以在十秒内就完成所有工作。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。

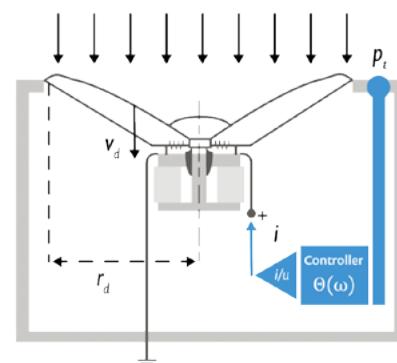


图3 AER概念示意图。图注:Controller - 控制器

**“在产品设计中,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

### ⇒ 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。

首先,团队设置了单个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,直接使用商用现成的电动扬声器作为AER基本单元,并在其上应用已确定的控制规律,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,即对超表面进行建模,并执行全波段仿真。“每一个单元的振动类

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 $-45^\circ$ 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定为 $60^\circ$ 和 $0^\circ$ ,突破了由斯涅尔-笛卡尔(Snell-Descartes)反射定律可得到的最大角度。图5和图6表示当 $f = 350 \text{ Hz}$ 时, $60^\circ$ 和 $0^\circ$ 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,最终得到的声波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

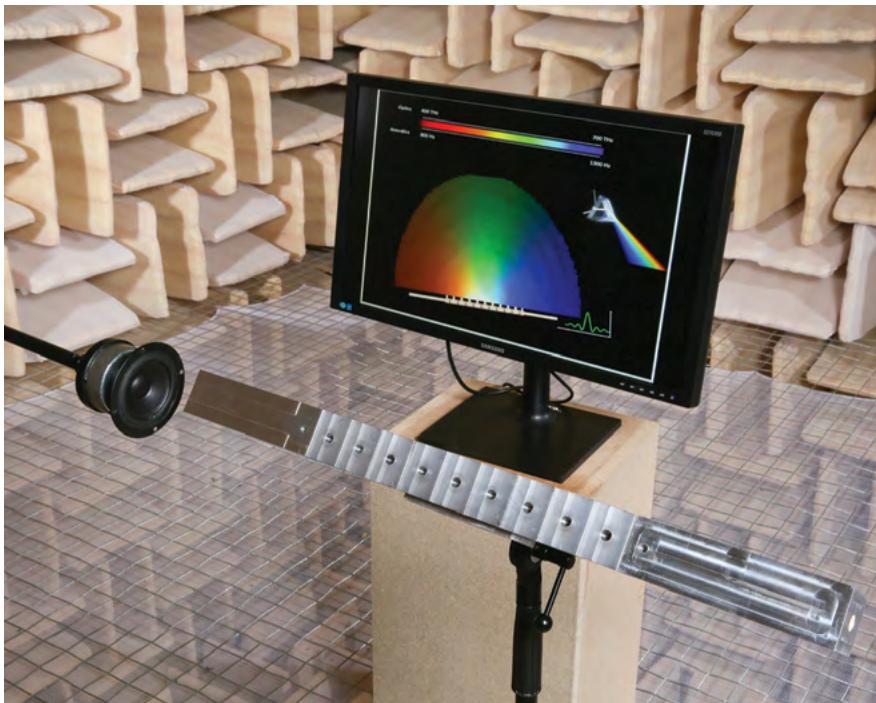


图4 声散射棱镜原型。EPFL/Alain Herzog 供图。

个倍频程) 范围内, AER 可有效实现相干转向。在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, 以期深入理解声学域和主动控制系统的电信号(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, 例如将所有 AER 都实现电互连。为了将工作成果转化为实际应用, 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。❖

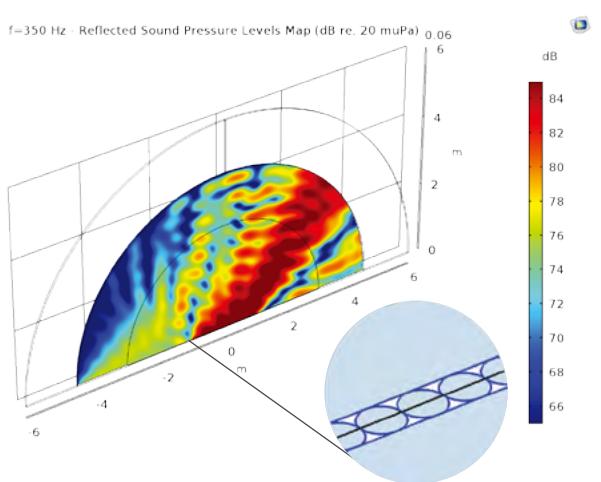


图5 频率为 350 Hz、指定反射角为  $60^\circ$  时,  $32 \times 32$  超表面基本单元阵列的反射声压级。

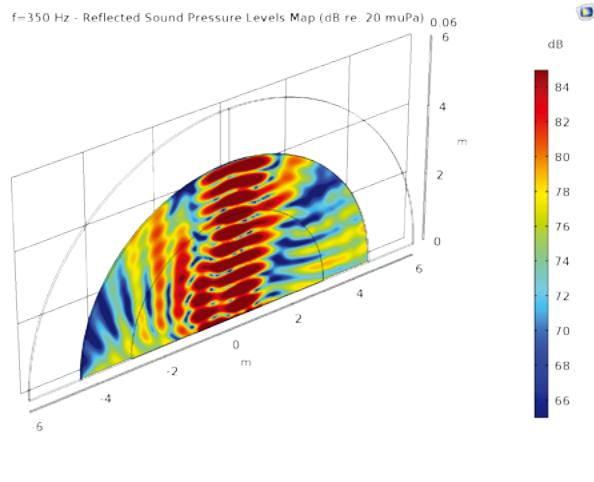


图6 频率为 350 Hz、指定反射角为  $0^\circ$  时,  $32 \times 32$  超表面基本单元阵列的反射声压级。

# 向边界元法致敬

丹麦瑞声达公司的工程师采用声学边界元法创建了头部和躯干模拟器的仿真模型。这款模型成为了对耳机、免提通话装置及助听器或与人体相互作用的声学装置进行性能评估的关键工具。

作者 **ZACK CONRAD**

表征人体对通过空气传播的声音信号的影响，是一项较难的工作。为了准确评估受人体影响的声学装置的性能，我们必须直面这项挑战。原位电声测试是一种标准的评估方法，然而由于躯干、头部、耳廓和耳道形状不规则，并且因人而异，因此常常给声学工程师带来极大的困扰。

为确保采集的声学数据尽可能准确，声音与振动测量设备制造商 Brüel & Kjær 开发出了头部和躯干模拟器 (Head and Torso Simulator, HATS)。该模拟器可以准确地再现普通成人头部和躯干的几何结构与声学性能 (图 1)。该装置配有耳口模拟器，是对耳机、免提通话装置、助听器、头盔和听力保护器进行电声测试的理想选择。耳模拟器通常是一个与前置放大器相连的半英寸 (1.27 厘米) 麦克风，而口模拟器是一台高顺性扬声器，它通过声压分布来模拟普通成人讲话。

多年以来，丹麦瑞声达 (GN Resound) 公司一直使用 HATS 作为测量装置，用于研究耳朵几何结构对耳膜感知声音的影响，并测定由耳朵和头部几何结构而产生的声散射的方向性特征。近期，他们使用 COMSOL Multiphysics® 软件构建了 HATS 的计算模型。高级工程师 René Christensen 利用软件中的边界元法 (Boundary Element Method,

BEM) 功能完成了建模。该仿真模型可以替代人体模型，供公司大多数同事进行研究工作。

## ⇒ 为何选择边界元法？

躯干、头部、耳廓和耳道对空气传播声音信号以及头部周围声场的综合影响，被称为头部相关传输函数。“在远离头部空间中任意指定一点，均可以描述该点发出的声音到耳膜的传输过程。”Christensen 解释道。该确定性模拟方法可以对麦克风摆放在不同位置时收到的声音 (图 2) 进行可视化研究，并协助工程师制订工程决策，探索头部和躯体对总声压的影响 (图 3)。在米量级下进行声学模拟的挑战在于：常用的有限元法 (Finite Element Method, FEM) 的计算量较大并且占用大量内存。

对于在笔记本电脑上执行大部分

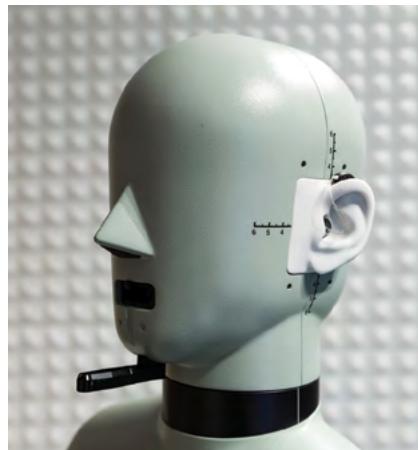


图 1 使用 HATS (头和躯干模拟器) 测试集成式头盔系统。

模拟工作的 Christensen 而言，计算量与内存需求是一个严重的桎梏，但是 COMSOL Multiphysics® 软件能使他随意选择适合的方法。针对上述案例，他可以充分利用软件中的声学边界元法，实现更为高效的模拟。尽管边界元法在每个自由度上的计算量超过了有限元法，但边界元法在大体积范围内实现相同精度的结果时，所需的自由度远少于有限元法。利用边界元法，可以在域内的任一点提取声压值，且仅需对表面进行网格划分和计算；而有限元法需要对整个个体进行网格划分，更加适用于近场

**“这款软件对于像我这样试图通过非现有的数学方法来描述物理现象的人来说非常有用。我经常自问：‘你可以给出描述此问题的方程吗？’如果答案是肯定的，那就能够在 COMSOL 中建立并求解这个问题。”**

—— RENÉ CHRISTENSEN, 瑞声达高级工程师

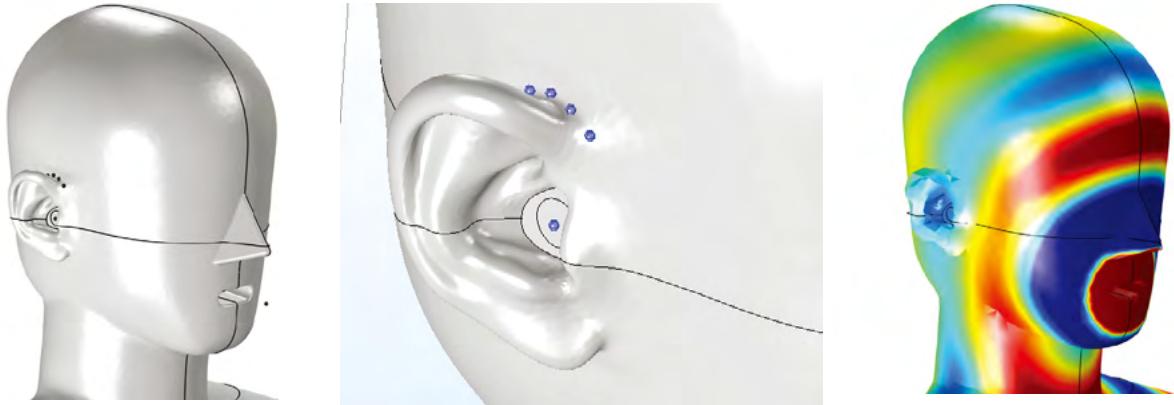


图2 “近耳”点,在这些位置计算了口对点的近耳传输函数,这是一种更具体的关于头部的传输函数(左、中)。3200 Hz 频率下的声压分布(右)。红色表示高正压,蓝色表示高负压。

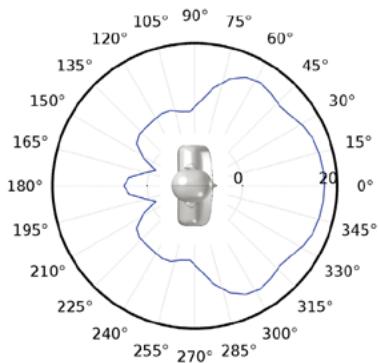


图3 3200 Hz 频率、1 m 半径的总声压极坐标图。

分析。相比之下,边界元法具有实质性的计算优势。通过使用边界元法,工程师可减少模拟的计算量,笔记本电脑的计算资源也足以应付此类仿真运算。“边界元法简单多了。”Christensen评价道,“如果你拥有高质量的几何结构模型,那就只需要创建表面网格,这种方法简直是一种享受。通常人们会使用体网格,他们不仅需要离散空气域,还得应用辐射条件来限制反射,但这些特征都已经包含在边界元法当中。”

### ⇒ 讲话与倾听

HATS 的优点在于,它可以模拟包

含多声源的环境。如当有人在说话,同时还存在其他(背景)声,就像一个头戴耳机的职员在忙碌的办公环境中讲话。而助听器中配置有麦克风和扬声器,其复杂的结构可能会引起声反馈。

“助听器中装有两个麦克风,而且它们均可感知声音和振动,这让问题更加复杂。”Christensen解释道,“助听器产生的声反馈现象有时会造成令人难以忍受的噪声。”

由于边界元法需要极少的物理场设置,因此建模相对简单。在上述案例中,研究人员对嘴部使用了加速度边界条件以模拟扬声器。假设 HATS 自身表现为刚性,并且 BEM 可自动添加辐射条件,声波不会反射。基于上述条件,计算头部和躯干周围的声压场,运行仿真后可以通过后处理对多个麦克风位置进行研究。如果模型中包含了助听器的几何结构,则机械设计师可以指出所有可行的位置,并且根据仿真结果预测最佳位置。“借助边界元法,我们确实不需要考虑过多的物理场设置。”Christensen说道,“因为我们感兴趣的是口到耳的传输关系,所以仅在口的位置施加了一个加速度条件,并在口的前方,或耳朵内

部和表面上提取声压。我们需要关心的唯一的物理场就是声场。”

### ⇒ 未来的应用

Christensen 建立的 HATS 仿真模型对于他和同事来说具有极高的价值,因为该模型一旦完成求解,就可以通过各种后处理工具提取海量的有用信息。他们可以对不同的配置(如有助于助听器紧密贴合的拱形结构,以及连接内耳和外耳的端口)进行分析研究,针对各种位置推导出新的传输函数,也可以与其他软件搭配使用。

Christensen 还表示,他将继续使用 COMSOL Multiphysics® 改进他的声学模型。不仅仅是 HATS,他还将使用该软件研究各种振动声学问题。“我喜欢这款软件,因为它具有易于使用且直观的界面,还支持根据自己的需求添加或修改方程,我经常使用这项功能。”他评价道,“这款软件对于试图通过非现有的数学方法来描述物理现象的人来说非常有用。我经常自问:‘你可以给出描述此问题的方程吗?’如果答案是肯定的,那就能够在 COMSOL 中建立模型并求解这个问题。”❖

# 纸币处理系统的智能大脑

为了帮助全世界的现金中心安全地清分与处理纸币，德国捷德货币技术公司的工程师与物理学家使用多物理场仿真开发了磁性、光学与超声传感器，对采用模块化设计的高性能纸币处理系统进行了优化。

作者 **ZACK CONRAD**

“现金为王”这句话会引起大多数人的共鸣，每天都要经手和处理数百万张纸币的专业现金中心对此应更有感触。当今的现金流通量超过了以往任何历史时期。纸币数量的激增，日益多样化的防伪标志以及复杂的票面设计，大大地提高了对现金自动处理系统的要求。世界各地的印刷厂都必须保证每张新钞的最高质量。除此之外，中央银行和商业银行以及现金押运公司需要根据钞票面额、货币类型、纸币方向、真伪和整洁度，对纸币进行极其精准又快速的分拣。德国捷德货币技术公司 (Giesecke+Devrient Currency Technology, 简称捷德货币) 的物理学家 Jan Domke 和 Klaus Thierauf 受专业现金中心的委托，为高性能的模块化纸币处理系统 (Banknote Processing Systems, BPS) 开发了专用传感器 (图 1)。

为了降低运作成本，确保处理后的纸币被安全送出，捷德货币的处理系统采用了大批传感器阵列，以保证结果的可重复性和持久的耐用性。纸币被送入机器后，圆皮带传输系统 (图 2 左) 将对每张纸币的两面进行全面测量。分拣操作依赖于嵌入传输带中的大量传感器，其中假币被精准剔除，破损纸币由于质量欠佳而被检出甚至撕碎。通过检查的纸币随后被包装成捆，进入现金流通或银行金库。捷德货币制造的典型机器能够

在单次检测中，从四个方面检测出多种不同的货币类型，这个高效率的系统每小时可处理超过 15 万张纸币。Domke 解释说：“我们的部门负责开发传感器系统及其评估机制，它们是机器的眼睛和大脑，承担着辨别纸币真伪、区分完整或破损纸币的重要任务。”

## ⇒ 探测与分拣

纸币在通过处理系统时将经历三个主传感器检测系统：磁性、光学和超声波传感器。系统利用不同的传感特性，无缝、高效地对纸币进行检查与分拣。磁性传感器负责检测特殊的磁性防伪印记；光学传感器在紫外光、近红外光和可见光范

围内根据钞票面额和货币类型实现分类；超声波传感器则检验纸币的残损状态（撕裂、孔洞、胶带等）。为了提高传感器的性能，加快开发工作，Domke 和 Thierauf 使用多物理场仿真来深入洞察这些复杂现象背后的物理原理。作为开发过程的重要一环，仿真能够协助团队验证核心概念，开发团队还能够基于仿真结果与算法团队进行后续讨论。“COMSOL® 软件让整个团队能够步调一致地观察与理解相关的物理效应，是传感器开发过程中不可或缺的重要工具。” Domke 评价道。

## ⇒ 检测防伪标记

纸币的关键防伪标记是印在票面上的磁性墨水，它相当于磁性探针，当纸币穿过传输系统时，这些探针将与传感器中永磁体的磁场相互作用。团队可以实时分析场线所受的影响，以此作为指示信号，并根据特定算法生成所需的信息。为确保算法的



图 1 BPS X9 是世界上最快的纸币处理系统，每秒可处理 44 张纸币，每小时的有效吞吐量超过 15 万张。中央模块的尺寸为 1.9 米 x 5.7 米 (高 x 宽)。

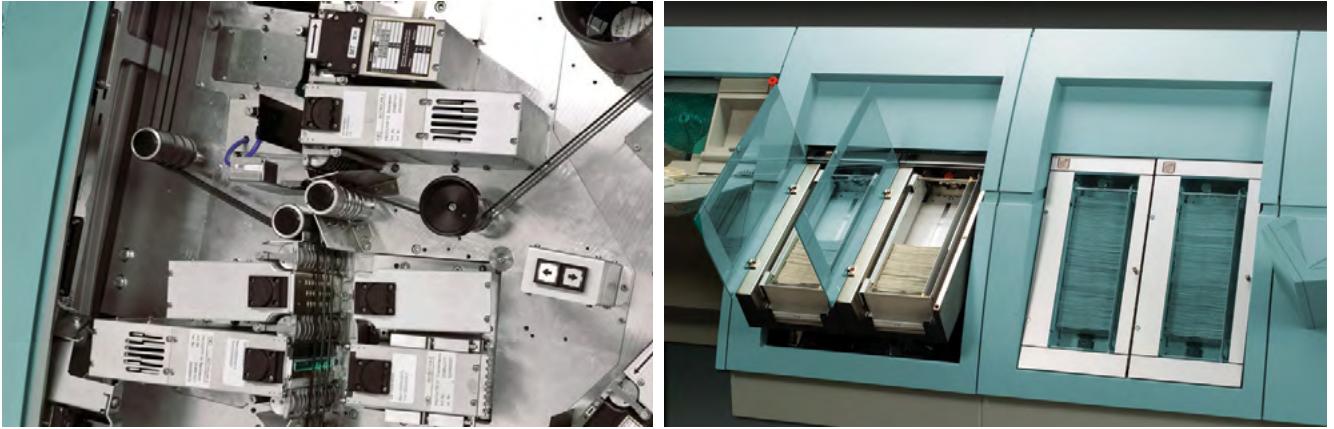


图2 传感器模块的一部分,其中圆皮带传输系统负责将纸币运送过处理系统(左)。分拣到大型交付模块的纸币是自动提款机中的散装纸币的来源之一(右)。

准确性,团队需预先对磁场的变化进行模拟。为此, Thierauf 求助于数值仿真,其团队在软件中创建了磁性传感器组件,预定义其磁化强度,然后利用动网格技术模拟软磁探针穿过传感器的情况。他们可以参照模型中获取的磁场读数调整参数,从而得到满足检测需要的磁场形状(图3)。

当探针经过传感器时,与磁场发生相互作用。磁性传感器

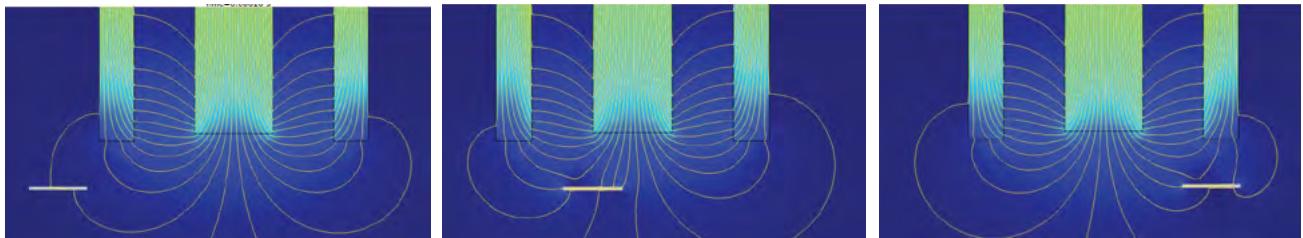
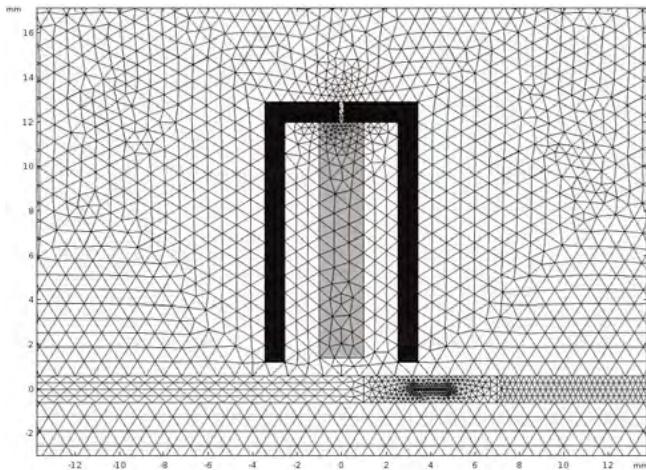


图3 通过磁性传感器的磁探针仿真。永磁体(灰色)和铁芯(黑色)引导传感器的磁场(上);动网格用于模拟穿过虚拟传送通道的探针,经过传感器并导致磁场变形的探针的时序(下)。

探测到磁场变化,将产生电响应信号。信号强度取决于探针与磁铁的距离,而仿真对于理解这种依赖性至关重要。Thierauf 解释说:“磁场形成后,你就能计算出信号强度与距离之间的关系。基于这项数据,我们就可以根据客户的要求对传感器进行优化,然后在更专业的模型中改进设计。”

#### ⇒ 检测纸币的整洁度

在分拣纸币时,除了防伪标记外,还需要考虑纸币的整洁程度。进入处理系统的纸币可能已经破损、带有缺角或折角、污渍、涂鸦或胶带,

或者与其他纸币粘在一起。为了准确检测出粘在一起或粘有胶带的纸币, Domke 的团队使用了超声波阵列传感器。当纸币到达传感器的位置时,传感器发射的脉冲超声信号穿过纸币到达另一侧的接收器。此时存在的一个主要问题,即实际上只有 1% 或更少的信号透过纸币到达了接收器; 99% 的声能都被反射回来。为此,系统采用了 24 对发射器以提高接收器的分辨率(图4)。然而大量发射器造成的信号串扰问题,又使管理信号时序、阻尼元件和几何构造成为一个复杂而棘手的难题。



图4 由24个发射器组成的阵列可以发射通过纸币的超声信号。插图  
为20欧元的纸币。

Domke 及其团队利用多物理场仿真来应对这些挑战。当纸币经过传感器时会反射超声信号，由于声波的衍射现象，部分声波将绕过纸币被接收器提取（图5）。由于这种衍射信号会干扰穿过纸币的微弱信号，因此接收器的检测操作需要在衍射信号到达之前完成。借助多物理场仿真，Domke 还模拟了声学通道以引导脉冲信号。通过模拟近场及远场特性、最大信号幅度和声场衰减，Domke 能够减少发射信号的失真。Domke 解释说：“仿真是分析此类情况的关键工具，因为实验测量根本无法在如此微小的尺度下进行。如果我们能够从设计之初就通过仿真调整几何结构与时序，就能获得清晰且不受干扰的传输信息。”

### ⇒ 未来的改进

Domke 和 Thierauf 还将多物理场仿真引入到传感器开发流程的其他方面，并致力于扩展仿真的应用范围。首先，他们采用多物理场耦合分析方法模拟超声换能器，并对印刷电

**“仿真是分析此类情况的关键工具，  
因为实验测量根本无法在如此微小  
的尺度下进行。”**

—— JAN DOMKE, 捷德货币技术公司物理学家

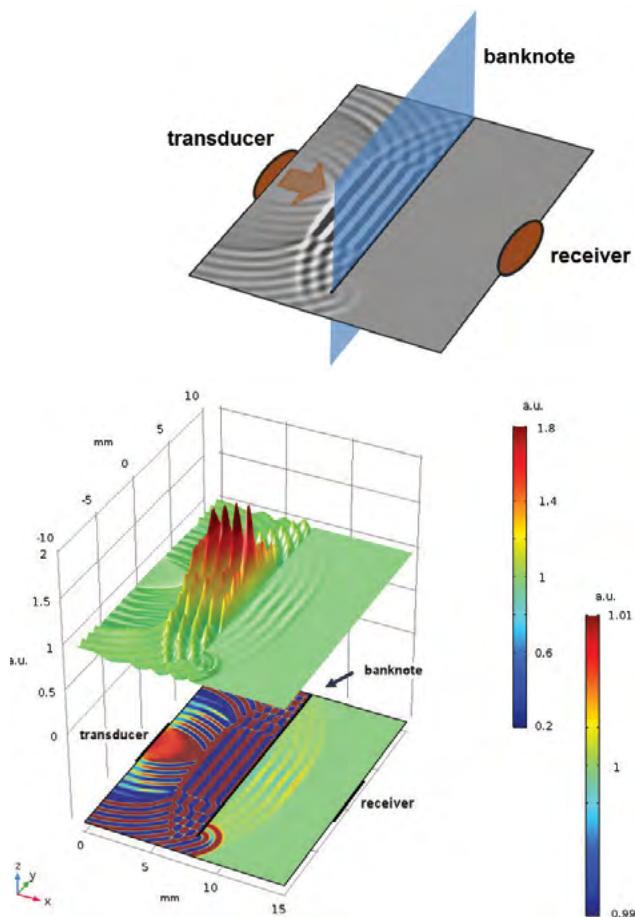


图5 换能器发射的声子波传播经过纸币边缘，最终到达接收器。模拟装置的草图（上）。子波向纸币传播过程的两种表征方式（下）。在此图中，一半子波撞击到纸币上，但只有一小部分子波穿过纸币，而大部分子波在纸币边缘被衍射出去。图注：transducer - 换能器；banknote - 纸币；receiver - 接收器

路板的热管理系统进行传热分析；然后再将仿真结果与实验数据进行比较，高度吻合的结果是模型准确性的最有力证明。未来，他们希望持

续的仿真分析让团队的研发工作更加灵活，以帮助他们更好地贴合客户需求，优化伪钞的分拣效果，尽可能让钞票整洁地呈现在人们面前。❖



德国捷德货币技术公司的物理学家 Klaus Thierauf 和 Jan Domke。

# 顺应潮流, 优化流量传感器

瑞士恩德斯豪(Endress+Hauser)公司的产品开发人员正着力提高流体传感器的灵敏度, 以期在水、食品、制药和石油天然气行业提供精密的设备, 用于测量流体密度、黏度、质量流量和温度。

作者 **VALERIO MARRA**

汽油、饮用水, 或饮用果汁等常见液体, 均是经过层层提取、处理和质量评估后才进入人们的日常生活。这些人类赖以生存的各种液体背后均伴随着众多不为人知的先进技术, 而这些技术大多离不开精确的测量和监控。如加工药品时, 如何判断液体是否符合高质量要求? 加工原油时, 如何确定原油提取量? 在水的输送过程中, 又如何确定流量和体积分布?

这些问题与水、制药、食品和石油天然气公司的利益息息相关。为解决这些问题, 制造商提出了一个有效的解决方法: 在管道或其他设备内部安装流量计。在瑞士恩德斯豪(Endress+Hauser)公司, 工程师们正在努力推进各类流量传感器的开发和维护工作, 不断提高传感器的精度, 并针对不同物质使用不同的测量方法。

## ⇒ 基于科里奥利力的测量

为了确定管道内流体的特性, 恩德斯豪公司设计了一款由一根或多根振动测量管组成的传感器, 通过测量管道内部装置中的科里奥利力, 实现流量的精确测量(图1)。

在流体流入装置之前, 测量管已经处于激活状态。当装置充满静止的液体后, 测量管开始匀速振动。当液体流经振动管时, 会对管壁施加作用力, 测量管的振动可以看作是流体粒子绕轴进行旋转。由于流体粒子在运动的参考坐标系中流动, 因此会受到一个垂直于其运动方向和旋转轴的惯性力, 即科里奥利力。与此同时, 由于振动管的入口段和出口段的流体会产生反向的旋转运动, 而由此产生的力以不对称的方式使管发生偏移, 导致沿管的振动产生相位差或时间差。

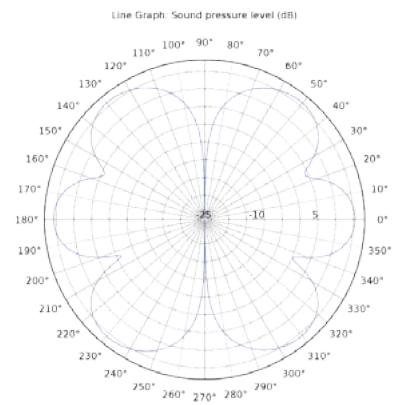
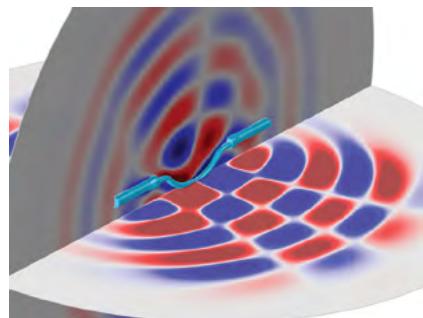


图2 仿真结果显示振动管内部(上)和周围(中)的声场分布, 以及以dB为单位的声压级图(下)。



图1 恩德斯豪公司设计的科里奥利流量计。

管道运动的扭曲分量使得测量管的各个管段以一定的时间差或相位差开始振动。相位差和新的管振动频率分别为管内质量流率和流体密度的函数。因此, 通过解读流量计输出的信号, 即可测得质量流量或体积流量, 从而保证输送的流量符合预期。

此外, 流体黏度增大会导致振动阻尼增加, 通过振动频率就可以直接测得流体密度。如与具有高密度、低黏度的水

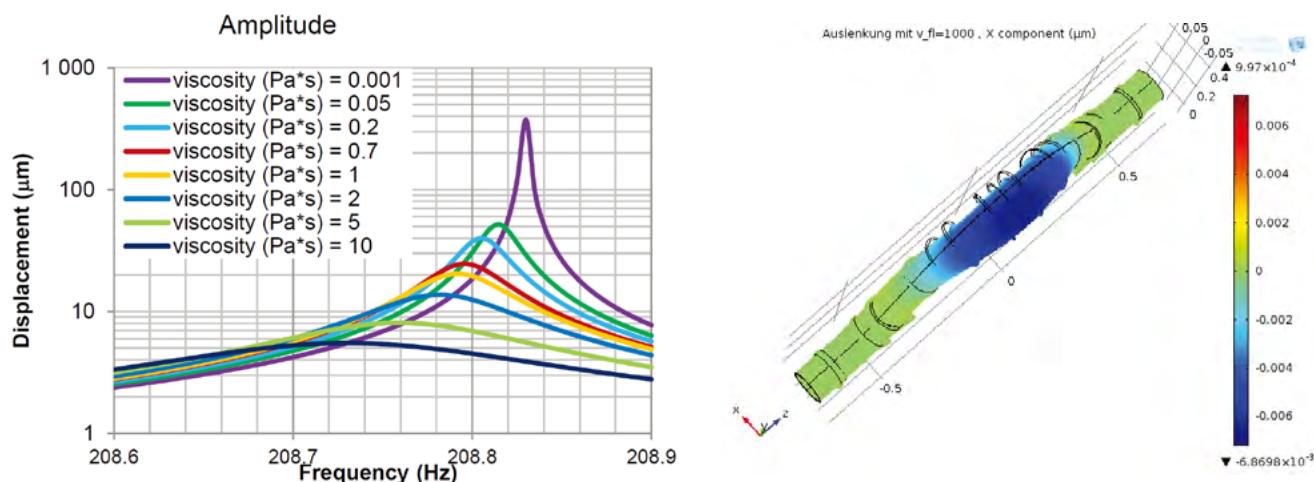


图3 仿真结果显示了不同流体黏度下测量管振动频率的变化情况及其对应的机械位移。右侧的仿真结果图显示了振动引起的管变形。

相比，油类等低密度、高黏度物质在管中流动时，管的振动更快，但阻尼更大。由此可见，通过测量振动频率和阻尼，即可确定流体的密度和黏度，从而对流体流动过程的质量进行监测控制。这些物理效应也同样适用于悬臂等在流体中振动的物体。

#### ⇒ 黏性声学分析案例

恩德斯豪斯集团是全球领先的流量计制造商，Vivek Kumar 是其瑞士总部的资深数值仿真专业人员，致力于提高传感器的性能。他的建模工作帮助整个团队加深了对流量计中的声学、力学和流体流动等各种物理效应的理解。在深入理解流-固耦合及振动声学对传感器性能的影响后，团队通过调整各种设计参数，确定了最佳设计方案，使流量计的性能和质量得到大幅提升。

Vivek Kumar 团队利用黏性声学模型进行数值分析，目的是了解流体通过振动管时产生的滞阻尼。他们在频域内模拟了流-固耦合，研究结构变形和声波传播的耦合特性，以预测流量计对不同流体的响应。图 2 为湍流产生的声波

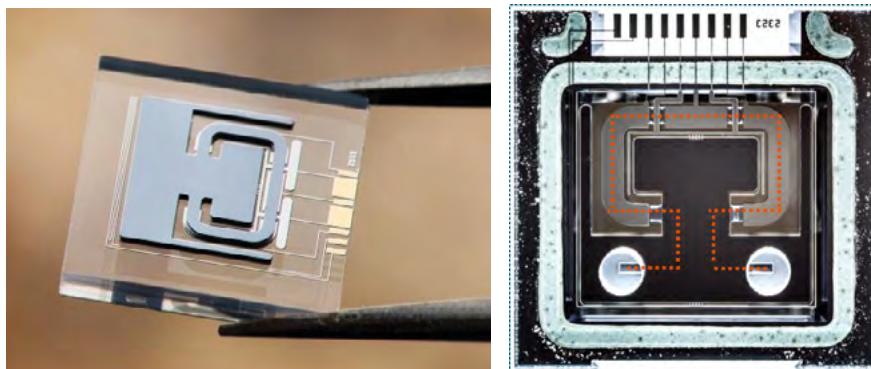


图4 用于测量密度和黏度的 MEMS 科里奥利芯片。用镊子夹住的完整传感器(左)。器件内部的芯片版图(右)。

在流量计中的传播情况。“我们尝试使用 COMSOL Multiphysics® 来评估由流体引起的噪声对周围环境和流量计的影响。”团队解释说。

工程师分析了流体的黏性对测量管振动频率的影响(图 3)。仿真结果可用于预测不同黏性的流体通过管道时，管道的振动频率和位移。借助仿真软件模拟引起流量计频率输出偏移的物理效应后，团队有了更深入的认识。他们可以合理利用这些效应来改进流量计的性能(包括消除其中的不良效应)。在本例

中，测量管的阻尼变化被用于补偿因黏性造成的密度测量误差。

“我们需要清楚地了解不同流体对传感器性能产生的影响。”他们评价道，“我们依靠仿真技术详细分析了各种流体工况，最终顺利完成了设备的设计优化，可帮助客户准确表征他们正在使用或提取的流体的材料属性。”

#### ⇒ 微系统分析案例

恩德斯豪斯集团的子公司 Truedyne Sensors AG 在开发 MEMS

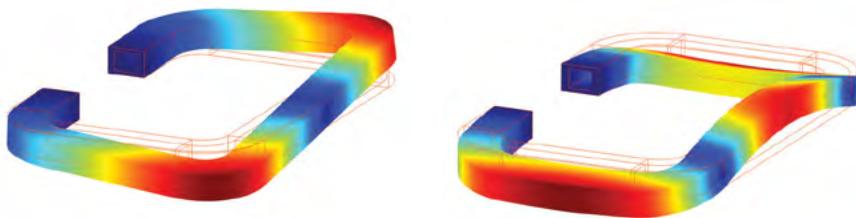


图5 振动微通道的两个特征模态,不同颜色表示通道各个区域的相对位移水平。

器件产品时,也是基于类似的理念。他们研发设计并测试各种振动传感器,以在众多不同的应用领域测量流体的热物理性质。该团队根据客户具体需求,为其提供定制的传感器解决方案。因此,明确哪一种类型的振荡器能够在特定工况下表现出最佳的灵敏度是关键。

图4所示的MEMS科里奥利芯片采用了独立的振动微通道,其工作原理与体积较大的科里奥利流量传感器相同。与科里奥利流量计仿真相似,通过微流道执行振动分析,确定流道两端的基本特征模态和振动速率(图5)。这种特殊传感器的作用是计算惰性气体、液化石油气、碳氢燃料或冷却润滑剂等流体的密度和黏度。由于其体积小,非常适用于测量极少量的流体。然而,该小型设备面临的一个难题是:一旦发生电气故障,施加在传感器上的用于驱动激励的高压可能导致器件的温度升高。

为消除潜在风险,团队对器件进行了热分析(图6)以确定芯片的发热位置,并判断流体是否因为器件的温度升高而过热。结果表明,流道周围的真空室可以最大限度地降低电极和流体之间的传热,从而确保温度不会超过限值。

### ⇒ 满足企业和客户的需求

恩德斯豪斯集团的两支研发团队一致认为,COMSOL多物理场仿真软件

强大的灵活性在研发工作中起到了至关重要的作用。设计者可以在软件中调整流量计的各类参数以提升产品性能,全面满足客户需求。借助多物理场分析,他们能够理解各种现象背后的原理,减少了测试和制作样机所需的时间和精力,为专注生产高质量的传感器奠定基础。

恩德斯豪斯的Christof Huber博士看到自己的建模成果对设备的设计优化起到了积极的促进作用,并因此改善了客

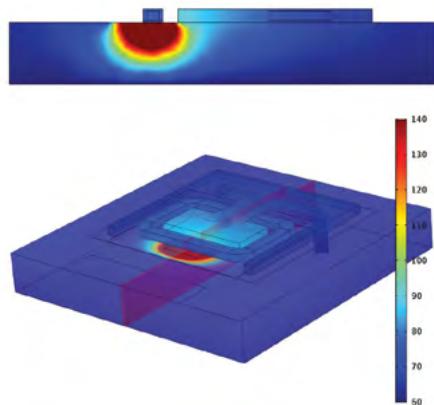
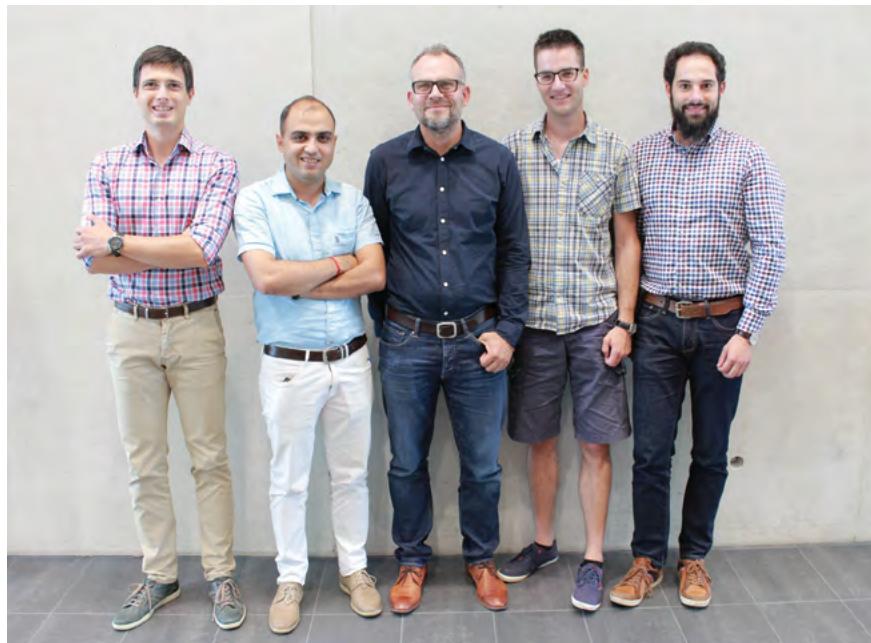


图6 热分析结果显示了MEMS科里奥利芯片内部的温度分布。

户体验时,他深受鼓舞:“这些工具的作用是为客户解决问题。我们在现场看到自己的创新成果转化为现实,这种成就感是我们前行的动力。” ❖



从左到右依次为:Anastasios Badarlis、Vivek Kumar 博士、Christof Huber 博士、Benjamin Schwenter 和 Patrick Reith。

E+H Flowtec AG 公司隶属于 Endress+Hauser 集团,总部位于瑞士赖纳赫。Truedyne Sensor AG 是 E+H Flowtec AG 的子公司。

Endress+Hauser   
People for Process Automation  
truedyne 

# 仿真赋予扬声器 设计思想

浙江中科电声研发中心的研究人员利用多物理场仿真分析方法, 帮助电声工程师在扬声器样品制作出来之前就能预测其主要特性, 从而更高效、更经济地设计出高性能、高品质的扬声器。

作者 **QIQI ZHANG**

当我们在驾车旅行中享受车载音乐带来的美好时光时, 当我们通过手机与家人朋友愉快地聊天时, 也许我们不会意识到, 电声行业已经和我们的生活息息相关, 并带给了我们极大的便利和无尽的享受。扬声器、音箱、传声器、耳机等电声器件具有对声音的接收、转换、传输、重放和测量等功能, 可使人们通过声音的方式传递信息和传播文化艺术。

电声器件自发明以来, 已经走过了百年的历程。人们对产品的质量, 尤其是声音品质的要求在不断提升, 对电声器件的要求也愈来愈高。作为世界第一的电声器件生产国和出口国, 中国电声器件的研发设计主要还是依靠人工经验、采用反复试样和不断调整产品性能的方法。这种传统的研发设计方法不但消耗人力和物力, 而且即使花费很长的开发周期, 也时常难以设计制作出理想的高品质产品。

浙江中科电声研发中心(简称“中科电声”)是一家致力于电声器件创新设计的研发机构, 在电声产品数值仿真分析及辅助设计领域扮演着重要的角色, 承担着技术研究、应用、咨询和培训等多项工作, 帮助工程师和研发人员更加深入地理解电声器件。

## ⇒ 典型的多物理场问题

扬声器的结构看似简单(图1), 其工作原理却涉及力学、电磁学、振动、声学及传热学等多个紧密结合的物理领域以及复杂的物理问题。例如, 在电磁场分析中, 由于扬声器磁路包含硬磁和软磁等导体材料, 因而需要考虑显著的电涡流问题, 以及在高功率输入时的线圈移动问题; 在振动系统分析中, 需要考虑扬声器的几何非线性和黏弹性等问题。图2显示了扬声器涉及的多物理场间的相互关系。

由于扬声器非线性特性的强弱与扬声器发出的声音是否“好听”直接相关, 因此仿真分析和改进扬声器非线性特性是电声企业在高品质扬声器设计制造中特别重视和需要解决的难题。在扬声器工作过程中, 从磁路到振动系统, 再到声场, 各个环节都存在着非线性现象, 外在体现的扬声器非线性失真



图1 动圈式扬声器图片(左); 典型扬声器的2维轴对称图, 显示了其中的主要零件(右)。

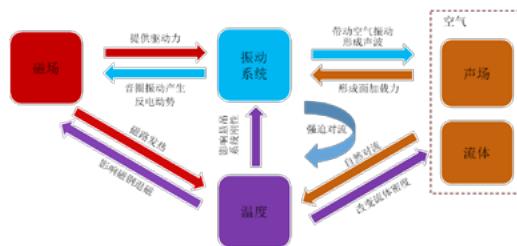


图2 完整和准确地模拟扬声器涉及准静磁场、结构力学、压力声学、黏热声学、流体、温度等多物理场, 它们之间又是相互耦合的, 且在大功率工作时还存在较强的非线性现象。这是一个复杂的多物理场耦合分析问题。

特性不应仅看这些非线性现象的叠加, 而应归结为是它们相互之间耦合作用的结果。因此, 扬声器非线性失真特性的仿真计算是扬声器仿真领域的关键性难题。

中科电声的研发团队利用多物理场仿真软件在扬声器的非线性仿真领域取得了突破性进展。“扬声器非线性特性的仿真分析是一个典型的多物理场耦合分析问题, 因为多环节中的较强非线性特性, 所以需要采用实时移动网格技术, 并在必要时重划网格, 而且在时域分析时又涉及到频域分析, 对于这样复杂的问题, COMSOL Multiphysics®是我们的最佳选择。”中科电声主任温周斌博士如是说道。温博士和他的团队综合运用 COMSOL Multiphysics 的“AC/DC”、“结构力学”、“声学”等模块, 建立了包含扬声器的各种非线性特性在内的完整有限元模型, 在移动网格和重划网格等功能支持下, 利用瞬态分析方法分析得到了扬声器工作中的一系列非线性特性。

## ⇒ 提升仿真分析精度

影响扬声器特性仿真分析精度的因素有很多, 除了仿真分析模型和方法之外, 输入准确的扬声器振动部件的几何模型(图纸)和获得正确的扬声器材料参数也非常重要。与此同时, 扬声器的设计图纸与实际产品往往会存在较大差异, 扬声器制造商及其部件供应商的生产制作工艺和流程对扬声器产品的质量和一致性都会有很大影响。无论是微型扬声器的振

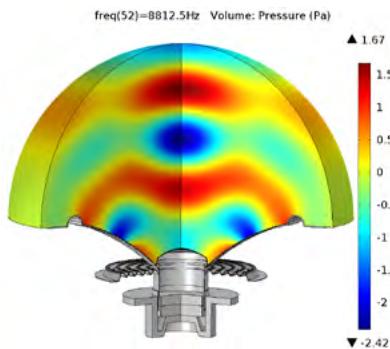


图3 通过仿真计算可直观地看到扬声器工作时所产生的声场,图中显示的是某个时刻的声压分布。

膜,还是汽车扬声器的纸盆和定芯支片,采用的材料不同,加工制作流程不同,做出来的部件都会有所不同;即使是同一批产品,由于扬声器制造商的生产设备、工艺流程以及所采用的部件等的差异,产品的特性也会有所差别。过去对扬声器产品及其部件的质量管理主要依靠工程师的经验及感官来判断,因此难以量化。这种方式既无法获得扬声器部件几何模型的准确尺寸,也无法得知材料的物理特性参数,更无法将材料的性质与扬声器成品的特性建立定量的关联关系。

温周斌博士带领他的团队,从多个方向入手,研究确实有效的扬声器仿真分析方法。一方面,基于COMSOL Multiphysics,充分发挥该软件平台的强大功能;另一方面,从电声企业的研发设计到生产制造的各个环节查找问题,寻找解决方案。他们用扫描仪精确测量扬声器部件的几何模型,并对设计模型进行修正,获得了很好的仿真效果。图3为使用COMSOL软件计算所得的扬声器在某频率下的声压分布。“纸盆等部件的材料特性很难用现有仪器设备来测量,但我们可以通过仿真模拟的方式来反推材料参数。”温博士说道,“仿真不是简单地使用软件工具。在工程实践中不能完全基于理想条件,必须要与电声企业的生产工艺相结合。”现在,中科电声采用仿真分析方法,可以准确预测扬声器工作过程中的各个主要物理量。图4为利用COMSOL多物理场仿真软件对声压级和总谐波失真的仿真结果。温周斌博士发现

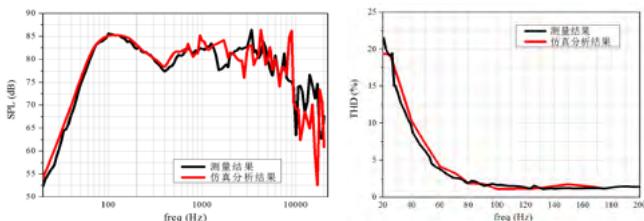


图4 声压级的仿真分析结果和测量结果(左);总谐波失真(THD)的仿真分析结果和测量结果(右)。通过仿真可准确预测扬声器的各种重要特性和主要问题,并从中发现产生这些问题的关键因素,从而改进和优化设计。

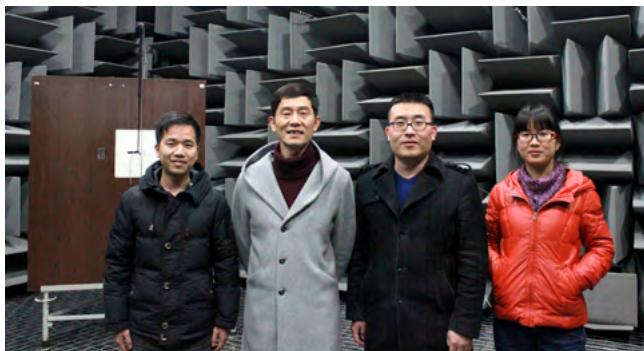
声压级和总谐波失真的仿真结果与测量结果都能够很好地吻合。工程师通过将仿真设计与自身经验相结合,使电声企业的研发及生产方式逐渐发生改变,这样不仅能缩短设计周期,还能大幅提升产品质量。

### ⇒ 电声企业从仿真中受益

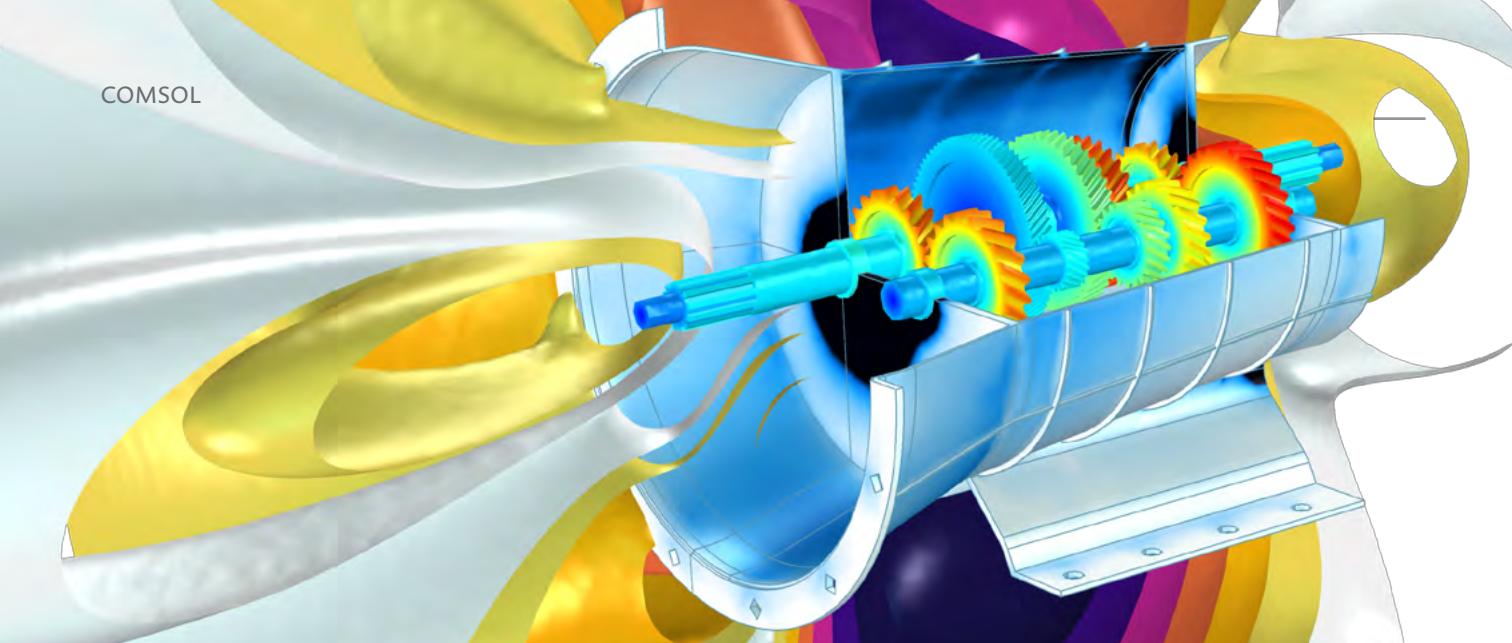
中科电声为电声行业多家领先企业提供技术服务。苏州上声电子有限公司(简称“苏州上声”)是中科电声的重要客户和合作伙伴之一,主要从事中高端汽车扬声器的设计和制造,并为德国大众、美国福特和日本丰田等国际知名汽车企业提供车用扬声器。在与中科电声合作的几年间,苏州上声从仿真设计中受益匪浅。借助仿真的预判与验证功能,通过预案分析和评审环节,不仅提升了公司自身产品的设计水平,而且通过建立对供应商的管理流程,对供应商提供的产品部件质量进行了严格控制。

“与中科电声合作开展仿真设计三年来,整个团队对扬声器的理解不断加深,”苏州上声副总经理柴国强说道,“仿真让扬声器的设计有了思想。”从基础知识、物理概念、有限元方法的学习,到操作流程的确立,再到具体产品的仿真和测量验证,苏州上声快速、系统、全面地掌握了仿真设计新技术,提高了应用技术研发能力。

随着仿真分析方法的系统化、流程化,以及分析精度的进一步提升,中科电声的仿真设计团队也在不断完善整个仿真流程,提高仿真技能,以满足不同客户的需求。“我们了解客户的产品,根据产品再不断调整模型。”温周斌博士说道。通过不断修正和验证仿真分析方法,中科电声的研究人员不断总结经验,已经逐步建立起针对整个扬声器系统特性的仿真分析方法,并将其应用于不同规格、不同结构、不同材质的扬声器仿真分析和辅助设计工程项目中。目前,中科电声的研发成果已经应用于十多家电声企业,数家扬声器制造企业都受益于它的研究成果。❖



温周斌博士及中科电声的核心仿真设计团队在他们的全消声实验室中。高规格的全消声实验室及测量设备是团队开展仿真设计及其他电声技术研究的重要基础。从左到右依次为:岳磊、温周斌博士、徐楚林博士和陆晓。



## 变速器的振动与噪声分析

通过预测动力系统（例如变速器）的噪声辐射，设计人员在研发阶段的初期即可透彻地了解所要设计的系统。

作者 PAWAN SOAMI

变速器的作用是将发动机的动力传递给车轮，此过程中向外辐射的噪声来自两个方面：一是齿轮在不同的轴之间传递动力时，会在轴承和外壳上施加多余的横向力和轴向力；二是变速器的各种部件（包括轴承和外壳）自身具有一定的柔性，因此会产生振动。

在变速器中，变化的齿轮啮合刚度会引起持续振动，接着振动会传递至外壳，而外壳在振动时又会将能量传递给周围的流体（例如变速器油），最终引起声波辐射。为了对这种耦合现象进行准确的建模和仿真，我们需要对变速器执行接触分析、多体动力学分析和声学分析。

在本文的分析案例中，变速器的传动轴与中间轴及五对斜齿轮连在一起（图 1），这些齿轮具有不同的尺寸，但都由结构钢制成。

### ⇒ 齿轮啮合的接触分析

齿轮啮合产生持续振动的根源，是因为其具有弹性。因此，必须计算不同位

置的齿轮刚度。由于齿轮在转动过程中会发生变形，所以需要执行稳态参数化分析来确定刚度在一个齿轮啮合周期内的变化情况。我们采用了罚接触方法，并定义约束，对产生接触力的齿轮扭转进行了分析。

通过仿真分析我们得到了齿轮副中的 von Mises 应力分布，从结果中可以看出，接触点和齿根部位的应力值相对较大（图 2）。图 2 显示了齿轮啮合刚度随轴的旋转所发生的变化。

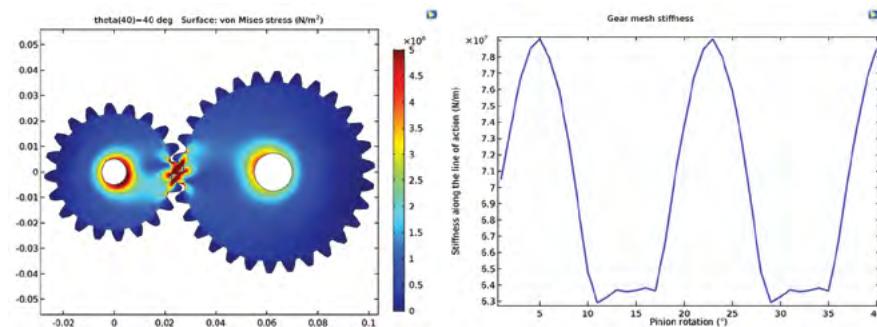


图 2 齿轮副的 von Mises 应力分布图（左）；齿轮啮合刚度随轴旋转而发生的变化（右）。

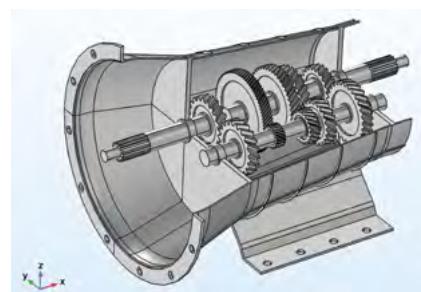


图 1 手动档汽车的 5 速同步啮合变速器的模型几何结构。绘图仅呈现了多体分析中涉及的变速器零件。

### ⇒ 轴、齿轮和外壳的多体动力学分析

利用由接触分析预测得出的齿轮啮合刚度，可以在时域中对传动轴旋转一周的情况进行多体动力学分析。分析的目的是为了计算齿轮的动力学以及由此

引起的外壳振动。此案例分析中所采用的发动机转速为 5000 r/min，输出扭矩为 2000 N·m，并沿用了由之前的接触分析得到的齿轮啮合刚度，同时假设轴和齿轮均为刚性。外壳由钢制成，并假设为弹性。

传动轴和中间轴传递的力在外壳上产生了 von Mises 应力，图 3 中的左图显示了具体的应力分布情况，右图显示了外壳振动时的法向加速度，后者是引起噪声辐射的主要原因。

图 4 显示了壳体顶部法向加速度的时间历史记录和频谱，外壳振动的主频在 1500 ~ 2000 Hz 之间。图 5 显示了外壳的变形情况。

### ⇒ 外壳噪声辐射的声学分析

我们利用多体分析预测了外壳承受的法向加速度，并在声学分析中将其作为噪声源使用。通过频域仿真，我们预测出了变速箱外部的声压级 (Sound Pressure Level, SPL)，由于法向加速度值是在时域中得到的，因此需要使用正向快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 将其转换到频域。我们将变速箱封闭在一个空气域中，并计算了其中的声压 (图 6)。为了减小计算域的大小，同时保证结果的准确性，我们在空气域的外部边界施加了球面波辐射条件，从而使出射声波离开建模域时将反射减到最小。

图 7 显示了外壳表面和近场的声压级。SPL 也可以在远场中进行绘制。图 8 显示了距离为 1 时不同平面的远场图直观地显示了特定频率下噪声辐射的主要方向。

### ⇒ 结语

在模拟动力系统产生的振动与噪声时，可以采用多体-声学建模方法。在变速箱设计阶段的初期引入该技术，能最

(下转第 51 页)

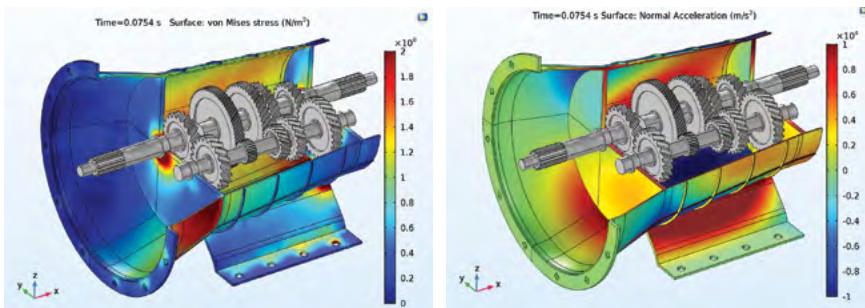


图 3 外壳的 von Mises 应力分布图 (左); 外壳的法向加速度 (右)。

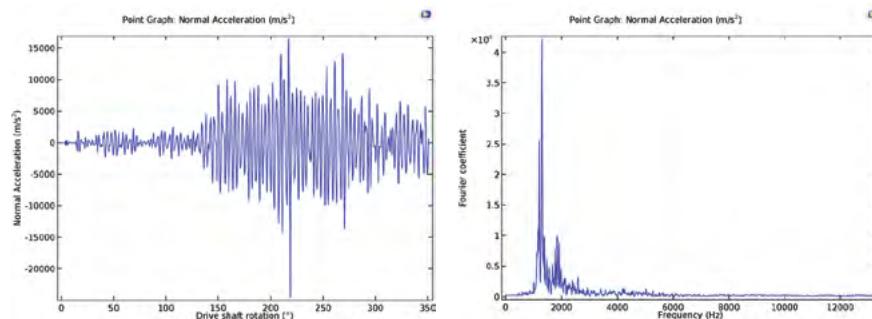


图 4 变速箱外壳顶部的法向加速度。时间历史记录 (左); 频谱 (右)。

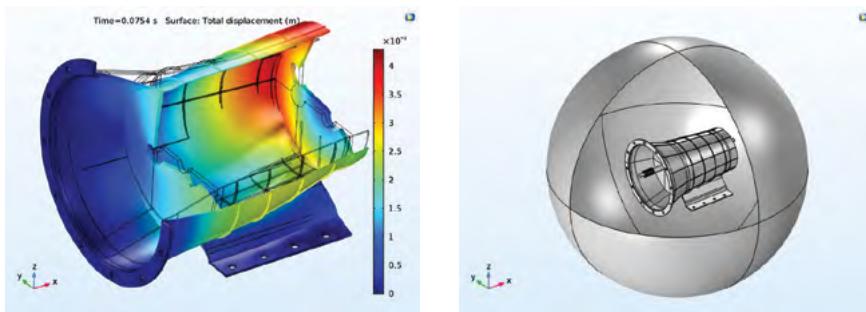


图 5 放大 200 倍的齿轮外壳变形图。

图 6 声学分析中使用的空气域，变速箱封闭在其中。

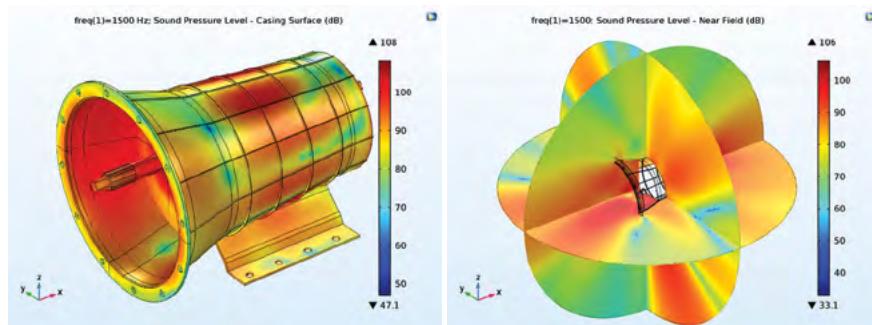


图 7 频率为 1500 Hz 时的声压级。变速箱外壳表面 (左); 近场区域 (右)。

# 以多物理场视角模拟真实世界

真实世界的本质即为多物理场现象,应作如是观。

作者 **ED FONTES**

COMSOL® 软件的独特之处在于,它可以基于用户的输入,生成由微分方程构成的数学模型,并以此来描述各类物理现象。如今的 CAE 软件大多由预定义的数值模型构成,而这些模型则大多基于微分方程的近似解建立。由于大多数情况下,难以获得微分方程的解析解,也就是无法求得确切的解,因此在求解方程时需要采用近似解。为了获取微分方程的近似解,工程师使用了有限差分、有限体积和有限元方法等多种不同的离散化方法。如果在建立微分方程开始时没有考虑物理变量和多物理场耦合,之后就很难再向数值模型中添加这些内容。相比于其他软件,COMSOL 的不同之处在于:当用户单击“求解”按钮后,软件会在创建离散化之前,基于用户的输入即时生成完整的数学模型。这种核心技术让用户能够结合变量名和坐标在用户界面中直接输入数学表达式,并以此创建自己的表达式和多物理场耦合关系。相比之下,传统软件中使用的非内置描述,需要在离散化后的数值层面上以用户定义的子程序的方式完成,这样

的处理方法可能不够准确或难以生成。

COMSOL 软件具有直观、简洁的操作界面,用户可以输入描述材料属性、载荷、源、汇和多物理耦合的任意数学表达式。这看似是一个悖论,通常人们会认为数学很难,但是 COMSOL 软件却能够快速创建复杂的数学模型。COMSOL 的数学建模功能不仅直观、易用,而且能够高度契合用户的特定需求。

研究人员虽然对其各自专业领域的物理过程或现象有着深刻的理解和洞察力,但是其中大多数人并非数学建模方面的专家。在构建模型和运行仿真时,这种理解和洞察力对于获得更准确的模型和更优秀的设计至关重要。为此,COMSOL 推出了“App 开发器”工具,旨在针对特定目标创建具有定制化用户界面的仿真 App。无论用户是否具有专业的数值建模知识,都能借助仿真 App 来验证模型,从而在优化、开发新流程和设计的过程中受益。

马恒达摩托车公司的仿真实例非常具有代表性(第 15 页)。他们使用

COMSOL 软件对摩托车发动机、进气和排气系统的噪声和振动进行了仿真研究。马恒达的研发经理 Ulhas Mohite 告诉我们,“工程师使用 COMSOL Multiphysics® 中的‘App 开发器’创建了一个仿真 App,并利用它对分析结果的输出文件进行对比,绘制出声压级数据,大幅节省了研发所需的时间。”在此案例中,他们不仅解决了声学问题,还使用仿真 App 对仿真数据进行了对比和分析。

我们惊喜地看到,很多用户设计的仿真 App 不仅创新新颖,而且具有十分广泛的用途。分析用户的作品以及他们的反馈对于我们来说至关重要,可以帮助我们推出许多新的软件功能。我们对软件进行的所有开发工作,以及未来的研发方向,都是为了让高度准确的数值仿真能够在研发初期便被研发人员采用,以帮助他们更加透彻地理解各种物理现象,进而更快、更好地对设计进行优化。COMSOL 软件的核心设计理念便是通过多物理场模型和仿真的视角,高度准确地还原真实世界。❖

(上接第 50 页)

大限度地减少在不同工况下的噪声辐射,从而有效地改进系统设计。❖

## 更多资源

- Using Software For Gearbox Noise Prediction, Auto Tech Review, 2017 年 6 月
- 如何在 COMSOL Multiphysics® 中模拟变速箱的振动与噪声, COMSOL 博客
- 变速箱中的振动与噪声建模, COMSOL 案例下载

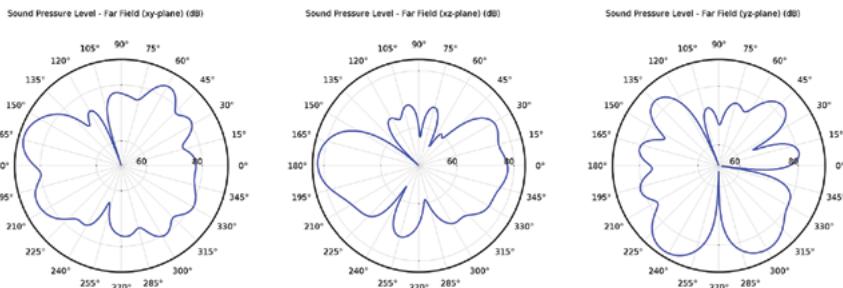


图 8 当频率为 1500 Hz、距离为 1 m 时, x-y、x-z 和 y-z 平面的远场声压级 (dB)。

# 让计算声学受益于多物理场仿真

作者 **NAGI ELABBASI, VERYST ENGINEERING**

声学领域的研究范围十分宽广,因此离不开声学计算工具的帮助。在汽车噪声控制、室内声学、扬声器、微型扬声器、乐器、声学传感器和执行器,以及无损检测中,都能看到声学仿真的身影。声学仿真让工程师能够及时获取宝贵的设计灵感,帮助他们优化产品,并对新的设计理念进行评估。在 Veryst 工程公司,研究人员对声学仿真展现出了非常浓厚的兴趣——特别是针对医疗器械和 MEMS 传感器等领域的应用。

根据应用领域的不同,适用于计算声学的公式展现出了很大的差异。在许多情况下,声学问题不能独立于其他物理场单独求解,这些物理场主要包括结构、流体、电气、传热和多孔介质。所需要模拟的器件越小,声学现象和其他物理场之间的耦合越重要。

令人欣喜的是,近年来我们看到了非常多的声学仿真应用,尤其在医疗器材和可穿戴技术这两个颇具影响力的领域。

最近,我们在研究医疗器械行业内的一个多物理场声学仿真问题:运用声泳技术实现流体聚焦的芯片实验室装置。这种方法涉及由振荡声场引起的粒子运动,适用于包含流体清洗、流体分离和声悬浮的应用。为了模拟这一装置,我们在模型中

"令人欣喜的是,近年来我们看到了非常多的声学仿真应用,尤其体现在医疗设备和可穿戴技术这两个颇具影响力的领域。"

引入了压力声学、固体力学、电场、流体流动和粒子追踪。示例模型使用的几何结构和粒子属性均来源于现有文献。图 1 显示了通道内的粒子分布情况,仿真结果表明有效粒子会向通道中心聚集。该计算模型可以帮助设计人员轻松地确定装置的尺寸、材料、工作频率和流动速率等参数。

与针对其他物理场的仿真相似,进行声学仿真时我们经常会遇到两个难题:获取准确的材料属性和模型的验证。经验告诉我,阻尼是声学问题中最难准确获取的属性之一。通常,如果声学执行器的工作频率接近谐振频率,那么阻尼将显著影响仿真结果;如果装置内还有聚合物材质的部件,阻尼则极有可能随频率发生变化。制造商提供的 Q 因子或损耗因子这类单个阻尼测量值,对于准确的分析而言是远远不够的。这时,人们常

常需要进行更多材料测试和设备级别的测试。

为了克服这些困难,我们正在着手为客户开发更多的仿真 App。借助 COMSOL Multiphysics® 软件提供的“App 开发者”,我们能够基于每位客户的需求构建完全定制化的仿真 App,并赋予它们直观的用户界面。我们期望能够让不具备专业建模知识的用户也能通过简单易用的仿真 App 受益于计算声学带来的优势。客户可以通过仿真 App 基于各自的专业技能,对各类参数进行试验或者提出新的设计。得益于多物理场仿真的强大力量,声学领域正在飞速发展。我们期待在不远的将来,仿真 App 的开发能够推动声学领域取得进一步发展。

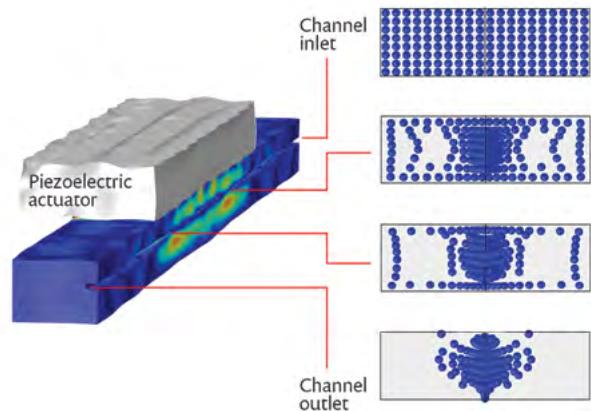


图 1 使用 COMSOL Multiphysics® 软件模拟声泳粒子在微通道中的聚集过程。仿真结果显示了装置的变形和 von Mises 应力分布。图注: Piezoelectric actuator - 压电驱动器; Channel inlet - 通道入口; Channel outlet - 通道出口



## 作者简介

Nagi Elabbasi 博士是 Veryst 工程公司的首席工程师,主要从事多物理场系统的建模工作,在结构力学、CFD、传热、声学和耦合系统仿真,以及有限元软件开发方面拥有丰富的经验。他在加拿大多伦多大学 (University of Toronto) 获得了机械工程博士学位。如希望详细了解 Veryst 工程公司提供的咨询、测试和培训服务,请访问: [veryst.com/mechanical-engineering-services](http://veryst.com/mechanical-engineering-services)。