

声学模块

简介

声学模块简介

© 1998–2017 COMSOL 版权所有

受 cn.comsol.com/patents 中列出的美国专利和美国专利 7,519,518、7,596,474、7,623,991、8,457,932、8,954,302、9,098,106、9,146,652、9,323,503、9,372,673 及 9,454,625 的保护。专利申请中。

本文档和本文所述的程序根据 COMSOL 软件许可协议 (cn.comsol.com/comsol-license-agreement) 提供，且仅能按照许可协议的条款进行使用和复制。

COMSOL、COMSOL 徽标、COMSOL Multiphysics、Capture the Concept、COMSOL Desktop、LiveLink 和 COMSOL Server 为 COMSOL AB 公司的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产，COMSOL AB 公司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。

版本：COMSOL 5.3

联系信息

请访问“联系 COMSOL”页面 cn.comsol.com/contact，以提交一般查询、联系技术支持或搜索我们的联系地址及号码。您还可以访问全球销售办事处页面 cn.comsol.com/contact/offices，以获取地址和联系信息。

如需联系技术支持，可访问 COMSOL Access 页面并填写在线申请表，位于：cn.comsol.com/support/case 页面。其他有用的链接还包括：

- 技术支持中心：cn.comsol.com/support
- 产品下载：cn.comsol.com/product-download
- 产品更新：cn.comsol.com/support/updates
- COMSOL 博客：cn.comsol.com/blogs
- 用户论坛：cn.comsol.com/community
- 活动：cn.comsol.com/events
- COMSOL 视频中心：cn.comsol.com/video
- 技术支持知识库：cn.comsol.com/support/knowledgebase

文档编号：CM020204

目录

简介.....	5
声学模块物理场接口.....	8
根据空间维度和研究类型排列的物理场接口.....	13
案例库窗口	18
声学基础	19
控制方程.....	19
数值方法.....	20
长度和时间尺度	21
边界条件.....	22
弹性波	22
损耗模型.....	22
几何声学.....	23
示例：吸收式消声器	24
模型定义.....	24
域方程	24
边界条件.....	25
结果和讨论.....	26
案例库中的其他示例	55
高斯爆炸波.....	55
消声器的特征模式	56
压电声学换能器	57
倒相孔音响中的扬声器驱动单元.....	58
Brüel & Kjør 4134 电容式麦克风	59

简介

声学模块由一系列物理场接口组成，用于模拟流体和固体中的声音传播。在声学模块中，可用的物理场接口包括压力声学接口，声 - 固相互作用接口，气动声学接口，热粘性声学接口、超声波接口和几何声学接口。

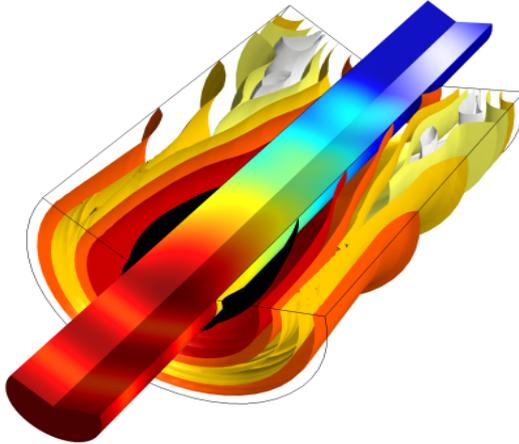


图 1: 一个消声器系统 COMSOL 模型中的声压级分布。

使用声学模块可以很轻松地求解一些经典的声学问题，例如，声散射场、声衍射、声激发、声辐射，以及声传输，等等。这些问题关系到消声器设计、扬声器结构、吸声器和扩音器的隔声问题，声音方向性评价，例如指向性，噪声辐射问题，等等。声固多物理场耦合可以模拟包含固体和流体产生的声固耦合作用问题。例如，声固相互作用可以应用于精确的消声器设计、超声压电换能器、声呐技术、汽车制造行业的噪音和机械振动分析。利用 COMSOL Multiphysics 的强大功能，可以精确分析和设计诸如扬声器、传感器、麦克风和助听器接收器等电声换能器。

在声学模块中，可以通过求解线性化势流方程，线性化欧拉方程或线性 Navier-Stokes 方程来实现气动声学的分析和模拟。这些接口都是用来模拟外部流动和声场的单向耦合问题。主要应用领域包括喷气式引擎的噪音分析、流量传感器，以及包含流动的消声器等。

热粘性声学接口可以精确地建模很多具有微小几何尺度结构的系统，其中热和粘滞损耗非常重要。这对手机和助听器行业，以及换能器设计行业具有很大的实用意义。

超声波分支包含**对流波动方程**，**时域显式**接口，用于计算线性超声波在较长距离（相对于波长）的瞬态传播。超声波分支下的接口不仅限于高频传播，通常可应用于任何较大的声学问题。

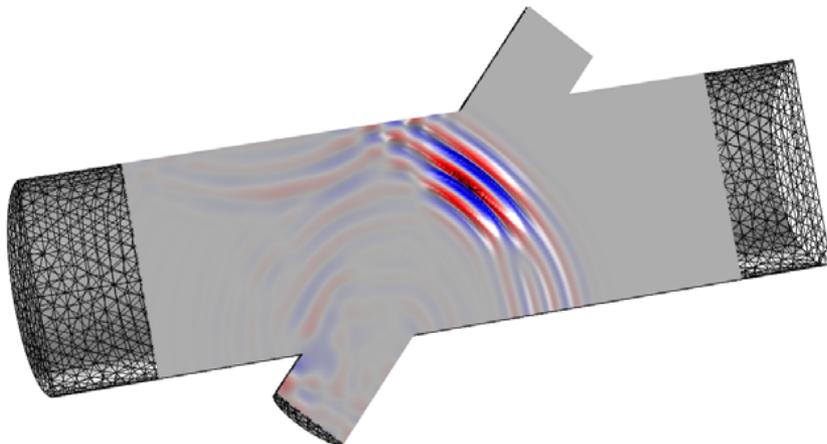


图 2: 使用“对流波动方程”接口建模的超声波流量计的 COMSOL 模型。该模型包含的接口带有稳态背景流。

几何声学包括射线声学接口和声学扩散方程接口。这些物理场在声波波长远小于特性几何特征的高频极限中有效。这两个接口都适用于对房间和音乐厅的音响效果进行建模。射线声学接口还可以用于室外场景。

声学模块对于工程师非常便利。借助三维仿真，现有产品可以得到最优化的设计，新产品可以实现更快的研发。而且仿真可以让设计者、科研人员及工程师

更深入地了解一些通过实验难以处理的问题。在实际实验和投入生产以前通过仿真进行虚拟测试分析，可以为企业节省大量时间和金钱。

- ▲))) 声学
 - ▲))) 压力声学
 -))) 压力声学, 频域 (acpr)
 -))) 压力声学, 瞬态 (actd)
 -))) 压力声学, 边界模式 (acbm)
 - ▲))) 声-结构相互作用
 -))) 声-固相互作用, 频域
 -))) 声-固相互作用, 瞬态
 -))) 声-壳相互作用, 频域
 -))) 声-壳相互作用, 瞬态
 -))) 声-压电相互作用, 频域
 -))) 声-压电相互作用, 瞬态
 -))) 弹性波 (elw)
 -))) 声波-弹性波相互作用
 -))) 多孔弹性波 (pelw)
 -))) 声波-多孔弹性波相互作用
 -))) 管道声学, 频域 (pafd)
 -))) 管道声学, 瞬态 (patd)
 - ▲))) 气动声学
 -))) 线性 Euler, 频域 (lef)
 -))) 线性 Euler, 瞬态 (let)
 -))) 线性 Navier-Stokes, 频域 (lnsf)
 -))) 线性 Navier-Stokes, 瞬态 (lnst)
 -))) 线性势流, 频域 (ae)
 -))) 线性势流, 瞬态 (aetd)
 -))) 线性势流, 边界模式 (aebm)
 -))) 可压缩势流 (cpf)
 - ▲))) 热粘性声学
 -))) 热粘性声学, 频域 (ta)
 -))) 热粘性声学, 边界模式 (tabm)
 -))) 声-热粘性声学相互作用, 频域
 -))) 热粘性声-固相互作用, 频域
 -))) 热粘性声-壳相互作用, 频域
 - ▲))) 超声波
 -))) 对流波动方程, 时间显式 (cwe)
 - ▲))) 几何声学
 -))) 射线声学 (rac)
 -))) 声学扩散方程 (ade)

图 3: 声学模块物理场接口。一些物理场接口需要其他模块许可证, 例如, 声-壳相互作用接口和热粘性声学-壳相互作用接口就需要结构力学模块。管道声学接口需要管道流模块。

此模块提供的许多物理场接口在图 3 中显示，它们位于**模型向导**的**声学**分支下。下一节**声学模块物理场接口**提供了各个接口功能的概述。

这些接口可以应用于很多领域——从简单的空气中声音的传播，到复杂的弹性波和多孔介质材料中的压力波相互作用等。关于声学基本概念和原理，可以查看**声学基础**。

声学模块的案例库有许多关于对隔声衬底、扬声器、麦克风和消声器等进行建模的应用案例。它们展示了在不同物质中如何模拟声损耗，其中既有针对纤维材料的均匀性经验流体模型，也有包括精确计算热和粘滞损耗的热粘性声学接口。

“喷气发动机喷管”模型利用**线性化势流**接口模拟展示了喷气式引擎中流动对于平均背景流声场的影响。预设的耦合模式可以用于模拟压电材料中的声、结构和电场之间的相互作用（更多信息参见**案例库窗口**）。您也可以根据**示例：吸收式消声器**来一步步创建自己的模型。

声学模块物理场接口

声学模块有 5 个主要分支——压力声学，声 - 结构相互作用，气动声学，热粘性声学，和几何声学。在**根据空间维度和研究类型排列的物理场接口**章节列举了所有声学模块的物理场接口，之后会对每个接口进行简单的介绍。

压力声学

压力声学分支 (🔊) 提供的接口中，声场通过压力 p 进行描述和求解。其中压力 p 表示在环境压力上的声音变化，环境压力表示无流体流动时的压力。

这个物理场接口既可以用**压力声学，频域**接口 (🔊) 求解 Helmholtz 方程，也可以用**压力声学，瞬态**接口 (🔊) 求解瞬态波动方程。**边界模式声学**接口 (🔊) 用来求解波导和管道中的传输模式（给定频率时仅限有限波模式，且该模式能传输较长距离）。

有多种类型的边界条件可供您选择，包括硬声场边界（墙）和用于设定声源的条件。还有很多用于对开放边界进行建模的辐射、对称，以及周期性条件。模型中阻抗条件用于仿真真人耳不同部位，皮肤，简单的 RCL 电路等。这些物理场接口也包含多种流体模型，以均匀化的方法来模拟声音在各种复杂介质中的传播过程。包括多孔介质和纤维材料中的声传播（多孔声学域特征），有固定截面的狭窄结构中的声传播（狭窄区域声学域特征），以及定义体吸收行为的流

体模型。也可以应用到单极子、双极子和四级点源。所谓的完美匹配层 (PML) 也可用于截断求解域。此外，远场特征可以用来确定计算域外任意一点的压力大小。专门提供的结果和分析功能可用于可视化远场的二维极坐标、二维和三维绘图。

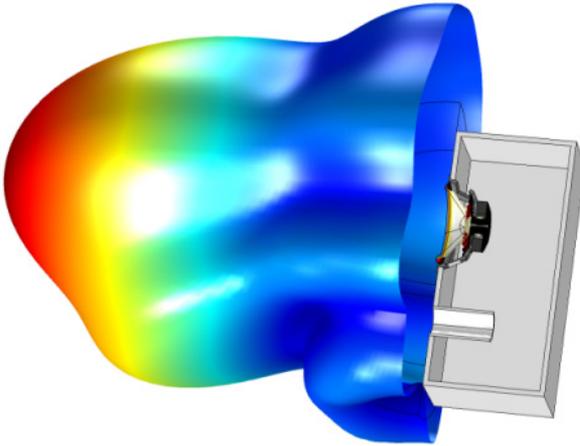


图 4: 3000Hz 下扬声器敏感性分析的三维远场极坐标图。本图来自于案例库的倒相孔音箱模型。

声 - 结构相互作用

声 - 结构相互作用分支 () 提供的接口适用于流体压力以载荷形式加载在固体体的现象，以及结构的振动以流固边界上的法向加速度的形式影响流体的现象。

这个分支下的物理场接口包括：

- 声 - 固相互作用，频域 () 和声 - 固相互作用，瞬态 () 多物理场接口。
- 声 - 壳相互作用，频域 () 和声 - 壳相互作用，瞬态 () 多物理场接口。
- 声 - 压电相互作用，频域 () 和声 - 压电相互作用，瞬态 () 多物理场接口，支持对压电材料中的电场进行求解和建模。压电相互作用可以使用应力 - 电荷或应变 - 电荷形式。

- **固体力学 (弹性波)** () 用来模拟固体中的弹性波, **多孔弹性波** () 用于精确模拟多孔介质中的声音传播。后者考虑固体基质变形与渗透流体中压力波之间的双向耦合, 对频域下的 Biot 方程进行求解。其中包含两个有关损耗机制的公式: Biot (粘滞损耗) 用于模拟岩土, Biot-Allard (热损耗和粘滞损耗) 用于模拟空气中的声吸收材料。
- **声-固-多孔弹性波相互作用**()和**声-多孔弹性波相互作用**()多物理场接口。
- **管道声学, 瞬态** () 和**管道声学, 频域** () 接口需要额外的管道流模块, 这两个接口用来模拟一维管道系统中的声音传播。求解方程可以考虑管壁的声顺影响, 也可以考虑有稳定背景流场时的情况。

多物理场接口包含两个或两个以上的单物理场, 例如, 压力声学, 稳态和固体力学合为多物理场耦合, 其中声-结构边界耦合, 支持更多的耦合, 包括耦合压力声学接口和膜或多体动力学接口。

气动声学

气动声学分支 () 的物理场接口用于对背景流场和声场的单向耦合 (所谓的流体传播噪音或发声) 进行建模。流体力学和声学的耦合基于求解一系列线性化控制方程, 以稳态背景流场为基础求解声学变量的变化。不同的物理场接口用了不同的物理近似方法。

线性势流, 频域 () 和**线性势流, 瞬态** () 接口模拟稳定背景流场和声场之间的相互作用。这两个接口只适用于无粘度、无旋度和无涡流的流动。背景流通常使用**可压缩势流**接口 () 进行求解。

线性势流, 边界模式接口 () 用来研究有背景流场的声学边界接口问题。一般用来定义导管入口的声源。

线性 Euler, 频域接口 () 和**线性 Euler, 瞬态**接口 () 求解线性欧拉方程, 这两个接口用来求解当存在稳定平均流动时声场随密度, 速度和压力改变时的变化。

线性 Navier-Stokes, 频域 () 和**线性 Navier-Stokes, 瞬态** () 接口用于气动声学的仿真, 这类问题能够用线性 Navier-Stokes 方程描述, 求解与压力, 速度和温度相关的声学变量。

热粘性声学

热粘性声学分支 () 的物理场接口用于精确模拟小尺度几何结构中的声学问题。当壁的附近存在一个粘性的热边界层 (渗透深度) 时, 由剪切力和热传导产生的粘性损耗梯度很大, 因而变得非常重要。因此控制方程中需要显式包含热传导效应和粘性损耗。**热粘性声学**用于对小传感器的响应进行建模, 例如助听器 and 接收器。其他应用包括助听器和移动设备的反馈或 MEMS 结构阻尼振动研究。

因为建模热粘性声学需要详细描述各种信息, 所以这个接口同时求解声压 p 、粒子速度 u , 以及声温变化 T 。

在**热粘性声学, 频域**接口 () 中, 控制方程为时谐形式并在频域下求解, 以散射场公式给出。边界包括机械边界和传热边界。**热粘性声学, 瞬态**接口 () 以时域公式给出。**热粘性声学, 边界模式**接口 () 用于计算和辨别波导和管道中的传播和非传播模式, 对小尺寸波导或管道的边界、入口或横截面执行边界模式分析。有关热粘性声学的几个多物理场接口如下:

- **声 - 热粘性声相互作用, 频域**多物理场接口 () 包括**压力声学, 频域**和**声 - 热粘性声边界耦合**特征。使用预设的多物理场条件, 直接耦合热粘性声学域到压力声学域。
- **热粘性声 - 固相互作用, 频域**多物理场接口 () 用来求解振动 - 声学耦合问题。例如可以用来模拟微型电声转换器或者 MEMS 器件的阻尼损耗。包括固体力学和预定义的热粘性声学多物理场耦合。

- **热粘性声 - 壳相互作用**, 频域多物理场接口 () 用来模拟小尺度下的声音和壳体相互作用。比如可用来分析助听器中壳体的阻尼振动并防止回音。

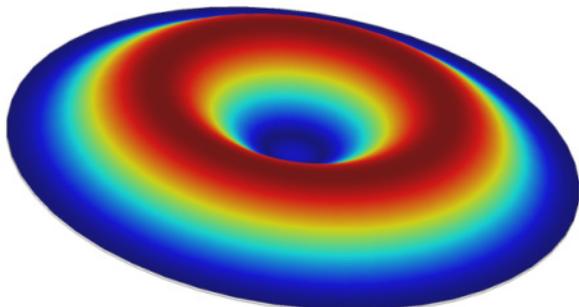


图 5: 12 kHz 下轴对称电容式麦克风的隔音膜变形, 来自案例库。

超声波

超声波分支下的一个物理场接口 (), 即**对流波动方程, 时域显式** () 接口, 用于求解稳态背景流中包含许多波长的较大瞬态线性声学问题。通常, 该接口适用于建模声信号在较长距离 (相对于波长) 的传播, 例如, 线性超声波问题。该接口包含吸收层, 用于设置有效的无反射边界条件。它以间断 Galerkin 方法为依据并使用时域显式求解器, 这一方法非常节省内存。应用领域包括超声波流量计和其他超声波传感器, 其中飞行时间是非常重要的参数。其应用领域不仅限于超声波, 还包括室内声学或汽车车厢内音频脉冲的瞬态传播等。

几何声学

几何声学分支下包括两个物理场接口: **声学扩散方程**接口和**射线声学**接口。当声波波长远远小于几何特征尺寸时, 两个接口都可以用于模拟高频极限的声学。

声学扩散方程接口求解声波能量密度分布的扩散方程, 模拟建筑和音乐厅的室内声学问题。也可以认为是能量有限元。

射线声学物理场接口用于计算声学射线的轨迹, 相位和强度。本接口可以用于模拟房间, 音乐厅的声学问题, 也可以研究许多室外或水下环境的声学问题。

根据空间维度和研究类型排列的物理场接口

下表列举了当您具有声学模块和 COMSOL Multiphysics 基本模块许可证时，您能使用的接口。

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的预设研究类型
))) 声学				
))) 压力声学				
压力声学，频域 ¹		acpr	所有维度	特征频率； 频域； 频域模态； 模态分析（仅支持二维和一维轴对称）
压力声学，瞬态		actd	所有维度	特征频率；频域； 频域模态；瞬态； 瞬态模态； 模态约化阶次模型； 模态分析（仅支持二维和一维轴对称）
压力声学，边界模式		acbm	三维； 二维； 二维轴对称	模态分析
))) 声 - 结构相互作用				
声 - 固相互作用，频域 ⁴		—	三维； 二维； 二维轴对称	特征频率； 频域； 频域模态
声 - 固相互作用，瞬态 ⁴		—	三维； 二维； 二维轴对称	特征频率；频域； 频域模态；瞬态； 瞬态模态； 模态约化阶次模型
声 - 壳相互作用，频域 ^{2,4}		—	三维	特征频率； 频域； 频域模态

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的预设研究类型
声 - 壳相互作用, 瞬态 ^{2, 4}		—	三维	特征频率; 频域; 频域模态; 瞬态; 瞬态模态; 模态约化阶次模型
声 - 压电相互作用, 频域 ⁴		—	三维; 二维; 二维轴对称	特征频率; 频域; 频域模态
声 - 压电相互作用, 瞬态 ⁴		—	三维; 二维; 二维轴对称	特征频率; 频域; 频域模态; 瞬态; 瞬态模态; 模态约化阶次模型
固体力学 (弹性波) ¹		solid	三维; 二维; 二维轴对称	固体力学的类型, 参见下面的描述
多孔弹性波		pelw	三维; 二维; 二维轴对称	特征频率; 频域; 频域模态
声 - 弹性波相互作用 ⁴		—	三维; 二维; 二维轴对称	特征频率; 频域; 频域模态
声 - 多孔弹性波相互作用 ⁴		—	三维; 二维; 二维轴对称	特征频率; 频域; 频域模态
管道声学, 频域 ³		pafd	三维; 二维	特征频率; 频域
管道声学, 瞬态 ³		patd	三维; 二维	瞬态

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的预设研究类型
 气动声学				
线性 Euler, 频域		lef	三维; 二维; 一维; 二维轴对称	频域; 特征频率
线性 Euler, 瞬态		let	三维; 二维; 一维; 二维轴对称	瞬态
线性势流, 频域		ae	所有维度	频域; 模态分析 (仅限于二维和一维轴对称)
线性势流, 瞬态		aetd	所有维度	频域; 瞬态模态分析 (仅限于二维和一维轴对称)
线性势流, 边界模式		aebm	三维; 二维; 二维轴对称	模态分析
可压缩势流		cpf	所有维度	稳态; 瞬态
线性 Navier-Stokes, 频域		lnsf	三维; 二维; 一维; 二维轴对称	频域; 特征频率
线性 Navier-Stokes, 瞬态		lnst	三维; 二维; 一维; 二维轴对称	瞬态
 热粘性声学				
热粘性声学, 频域		ta	所有维度	特征频率; 频域; 频域模态; 模态分析 (仅限于二维和一维轴对称)

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的预设研究类型
热粘性声学, 瞬态		tatd	所有维度	时域
热粘性声学, 边界模式		tabm	三维; 二维; 轴对称	模态分析
声 - 热粘性声学相互作用, 频域 ⁴		—	三维; 二维; 二维轴对称	特征频率; 频域; 频域模态
热粘性声 - 固相互作用, 频域 ⁴		—	三维; 二维; 二维轴对称	特征频率; 频域; 频域模态
热粘性声 - 壳相互作用, 频域 ^{2,4}		—	三维	特征频率; 频域; 频域模态
 超声波				
对流波动方程, 时域显式		cwe	三维; 二维	瞬态
 几何声学				
射线声学		rac	三维; 二维	射线追踪; 瞬态
声学扩散方程		ade	三维; 二维	特征值; 稳态; 瞬态
 结构力学				
固体力学 ¹		solid	三维; 二维; 二维轴对称	稳态; 特征频率; 预应力分析, 特征频率; 瞬态; 瞬态模态; 频域; 频域模态; 预应力分析, 频域; 模态约化阶次模型

物理场接口	图标	标记	空间维度	可用的预设研究类型
压电设备 ⁴		—	三维； 二维； 二维轴对称	稳态；特征频率； 瞬态；频域； 小信号分析，频域； 预应力分析，特征频率； 预应力分析，频域
磁致伸缩		—	三维； 二维； 二维轴对称	稳态；特征频率； 瞬态；频域； 小信号分析，频域； 预应力分析，特征频率； 预应力分析，频域
<p>¹ 此物理场接口包含在核心 COMSOL 包中，但添加了特定于此模块的功能。</p> <p>² 需要结构力学模块和声学模块。</p> <p>³ 需要管道流模块和声学模块。</p> <p>⁴ 此物理场接口是预定义的多物理场耦合，自动添加了所有所需的物理场接口与耦合特征。</p>				

案例库窗口

要打开**声学模块**案例库中的模型，可在**新建**屏幕中单击**空模型**。在**主屏幕**或**主工具栏**上单击**案例库** 。案例库界面打开后，展开声学模块文件夹，浏览或搜索内容。

单击**打开模型** ，在 COMSOL Multiphysics 中打开模型，或单击**打开 PDF 文件**  以查阅包括分步指南在内的背景信息来进行构建。COMSOL 案例库中的 MPH 文件有两种 — 完整 MPH 文件和紧凑型 MPH 文件。

- 完整 MPH 文件包含所有网格和解。在**案例库**窗口中，它们带  图标显示；对于可运行的 App，则带有  图标。如果 MPH 文件大小超过 25MB，当鼠标悬停在该模型节点时会显示**大文件**字样并给出文件大小信息。
- 紧凑型 MPH 文件删除了网格和解的数据信息，但包括其他所有设定以节省 COMSOL 安装 DVD 空间（少数 MPH 文件由于其他原因包含解）您可以打开这些模型，设定网格并重新求解模型。您也可以通过更新**案例库**来下载包含网格和解数据的完整模型版本。这些模型在案例库窗口以  标识显示；对于可运行的 App，以  标识显示。当把鼠标悬停在紧凑模型上时，会显示**不包含解信息**字样。如果有完整 MPH 文件可供下载，则相应节点的上下文菜单会包含**下载含解的文件** () 选项。

要检查所有可能的**案例库**更新，可以单击**文件 > 帮助**菜单下（Windows 用户）或**帮助**菜单下（Mac 和 Linux 用户）的**更新 COMSOL 案例库**按钮 ()。

我们从**示例：吸收式消声器**开始。最后章节**案例库**中的**其他示例**给出了**声学模块**案例库中其他模型的概述。

声学基础

声学是研究声音的物理学。声音来自于耳朵感知细微声压 p 在静压 p_0 上的逾量变化。静压一般指大气压（约 100,000 Pa）。

人耳能够检测到的小压力幅值变化范围大致为 $2 \cdot 10^{-5}$ Pa，对喷气式发动机噪音的听力阈值为 20 Pa。正常语音水平的幅值大概为 0.02 Pa。此处描述的幅值通常以对数分贝标度给定，相对于 $2 \cdot 10^{-5}$ Pa 的听力阈值，单位为 dB SPL。

声压变化一般描述为压力波在空间中随时间的传播，波峰表示压力最大值，波谷表示压力最小值。

从更一般的意义上来说，声音的产生来自于声源对空气产生的扰动。例如声音系统中的喇叭锥体等振动结构。当贝司喇叭锥体在低频下发声时，甚至能看到它的运动。当锥体向前运动时，其前方空气被挤压，导致空气压力增大。当它越过平衡位置向后移动时，会造成空气压力减小。该过程不断重复，交替以声速向外辐射高压和低压波动。

频率 f (SI 单位: Hz = 1/s) 是每秒感知到的振动次数（声压峰值），波长 λ (SI 单位: m) 是相邻两个波峰之间的距离。声速 c (SI 单位: m/s) 可以由频率和波长求得, $c = \lambda f$ 。有时定义波的角频率 ω (SI 单位: rad/s) 会更方便，即 $\omega = 2\pi f$ ，相关频率为一个完整的 360° 相移。波数 k (SI 单位: rad/m) 定义为 $k = 2\pi/\lambda$ ，表示一定距离内的波数量，也常被定义为一个矢量 \mathbf{k} ，包含波传播的方向信息， $|\mathbf{k}| = k$ 。一般情况下，角频率 ω 和波数 k 之间的关系被称为色散关系，对于简单流体它们之间的关系是 $\omega/k = c$ 。

控制方程

描述流体中声音传播的方程源自流体流动的控制方程，也就是用连续性方程描述的质量守恒方程，常被引用为 Navier-Stokes 方程的动量守恒方程及能量守恒方程；还有模型本构方程；以及描述热力学变量的状态方程。在经典压力声学案例中，对于绝大部分声学现象都能精确描述。在这些经典案例中，假设流体无损耗且绝热，忽略粘性效应，并使用线性等熵状态方程。

基于上述假设，声场以一个声压变量 p (SI 单位: Pa) 描述，并以波动方程求解得到。

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) = 0$$

方程中 t 表示时间 (SI 单位: s)， ρ_0 为流体密度 (SI 单位: kg/m³)， c 是 (绝热的) 声速 (SI 单位: m/s)。

声学问题经常包括简单的简谐波，比如正弦波。更常见的情况是任何信号都可以由傅里叶变换转换为一系列谐波成分。波动方程可以在频域上一次求解一个频率。谐波解一般形式如下：

$$p(\mathbf{x}, t) = p(\mathbf{x}) \sin(\omega t)$$

其中空间项 $p(\mathbf{x})$ 和时间项 $\sin(\omega t)$ 是分离的。压力可以更广义地写成复数变量

$$p(\mathbf{x}, t) = p(\mathbf{x}) e^{i\omega t} \quad (1)$$

实际声压的 (瞬时) 物理值是 [方程 1](#) 的实数部分。对声压做上述假设后，瞬态的波动方程就变成了 Helmholtz 方程：

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 c^2} p = 0 \quad (2)$$

在均匀介质中，Helmholtz 方程 ([方程 2](#)) 的一个简单解就是平面波：

$$p = P_0 e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x})} \quad (3)$$

这里 P_0 表示波的振幅，波沿着矢量 \mathbf{k} 方向以角频率 ω 和波数 $k = |\mathbf{k}|$ 行进。

在大多数实际情况下，[方程 2](#) 不存在精确解析解。求解此方程需要使用仿真的数值方法。

数值方法

如上所述，以解析的方法求解声学问题的控制方程，例如 Helmholtz 方程 ([方程 2](#))，只在少数简单情况下可以实现。要解决现实生活中的工业问题，即很可能是涉及几个耦合物理场的多物理场问题，就需要数值方法。这就是 COMSOL Multiphysics 为您呈现的功能。在 **声学模块** 中，大多数物理场接口都

基于有限元法 (FEM), 但也有例外: **对流波动方程**接口使用间断 Galerkin (DG-FEM) 方法, **射线声学**接口使用射线追踪方法。

使用 FEM 求解模型需要计算网格。通过形函数 (局部基函数或插值函数) 得出的解在每个网格单元 (有限元) 上都是近似的。设置该网格单元系统和局部形函数会得到一个需要求解的矩阵问题。通过适当方法求解矩阵问题后, 可以重建原始问题的解决方案。在用数字方法解决波问题时, 应注意问题涉及的时间和长度尺度, 下文将会讨论。

长度和时间尺度

当求解声学问题时, 考虑不同的基本长度和时间尺度非常重要。一些尺度由问题的物理场所决定, 另一些由数值求解方法所决定。这些尺度设定关系到解的精确度, 也关系到模拟问题的物理场接口选择。

当在频域下分析声学问题, 求解 Helmholtz 方程时, 只有一个时间尺度 T 周期, 并且由频率决定, $T = 1/f$ 。长度尺寸有多个: 波长 $\lambda = c/f$, 最小几何尺寸 L_{\min} , 网格尺寸 h , 以及声学边界层厚度 δ (后者在**损耗模型**中讨论)。为了得到精确结果, 网格必须足够精细以解析几何特征和波长。基本原则是最大网格尺寸小于等于 λ/N , 其中 N 可取 5 到 10。

注意当模型的波长比特征长度尺寸更小时, 可以使用几何声学的两个接口。与 Helmholtz 方程相比, 求解方程不需要同样的网格约束条件, 可以用于模拟更大的系统 (取决于波长)。

对于瞬态问题, 同样要考虑这点。另外, 瞬态下还需要考虑时间尺度。一般我们知道信号的频率成分, 为了解析最大频率, 取: $T = 1/f_{\max}$ 。对数值求解器需要设定时间步长 Δt 。被称作 CFL 数的参数和时间步长以及最小网格尺寸 h_{\min} 需满足一定条件, CFL 数被定义为:

$$\text{CFL} = \frac{c\Delta t}{h_{\min}} \quad (4)$$

其中， c 是系统中的声速。一般设定 CFL 数为 0.2（当使用二阶单元时）。更多信息参见[高斯爆炸波教学模型](#)。

为了精确得到声学仿真结果，这些物理上的和数值计算上的尺度都需要慎重考虑，并了解他们对收敛性和数值解正确性的影响。较好的做法是：比较所有案例中网格的更改和瞬态问题中的数值时间步长，来测试解的鲁棒性。如果在给定的精度范围内，解的测度在网格细化时发生改变，则该网格很可能不够好。

边界条件

边界条件定义了求解域上的边界性质。一些边界定义了真实的物理障碍，例如，硬声场边界和移动界面。另一些边界被称作人造边界条件，用来截短求解域，例如，用来模拟没有声音反射的开放边界。还有一些类似多孔板这些模拟作用面的边界。

弹性波

固体中的声音传播表现为固体形状和结构的小幅度震荡。这些弹性波传递到周围流体中就表现为一般的声波。通过声 - 结构相互耦合作用，相当于流体压强给固体域施加了一个载荷，结构的振动以流固交界面上的法向加速度形式影响流体域。

在[声学模块](#)中，还提供了[多孔弹性波](#)接口来模拟多孔介质材料中的多孔弹性波传播。这里的波源来自于渗透流体中的声压和多孔基质变形之间产生的很复杂的相互作用。

损耗模型

为了精确模拟小尺度几何上的声学问题，很有必要在控制方程中考虑传热效应和粘性损耗。靠近壁面处，粘滞和热传导变得非常重要，因为声场在这些区域形成了引起很大损耗的粘度和温度边界层。模拟这些现象需要做详细描述，以专门的[热粘性声学](#)，[频域](#)接口同时求解线性 Navier-Stokes、连续性方程，以及能量方程。因此，接口求解声压 p 、质点速度 \mathbf{u} 、声温变化 T 。这些都是平均背景压强上的声音变化。

需要热粘性声学描述的长度尺寸由粘性 (v) 和热 (th) 边界层厚度决定：

$$\delta_v = \sqrt{\frac{\mu}{\pi f \rho}} \quad \delta_{th} = \sqrt{\frac{k}{\pi f \rho C_p}}$$

其中 μ 表示动力粘度， k 是热传导系数， C_p 是常压下的比热容。这两个长度尺寸用来定义需要计算网格解析的声学边界层。

在控制方程中引入损耗的另一种方法是在压力声学接口中引入等效流体模型，这是给流体域引入均匀的衰减属性来模拟各种损耗机制。而热粘性声学接口是显式地在边界层处等损耗发生的位置计算损耗。流体模型的损耗形式，既有体上的热传导和粘性（大多数**声压域**特征），有模拟多孔材料的损耗（**多孔声学域**特征），有模拟特定纤维材料的多孔经验模型，还有模拟长窄管道边界吸收损耗的边界层吸收（**窄管区域声学**特征）。应用等效流体模型的计算量会小得多，比如求解多孔弹性波模型等。

几何声学

当波长远小于几何特征尺寸时，对于高频问题使用压力声学求解声学问题是不切实际的。我们可以使用其他方法，例如射线方法或能量扩散类推法。这些方法可以认为是几何声学方法，用于模拟室内声学，音乐厅声学和户外远距离的声音传播。**几何声学**分支包含**射线声学**接口和**声学扩散方程**接口。

声音传播。**几何声学**分支包含**射线声学**接口和**声学扩散方程**接口。

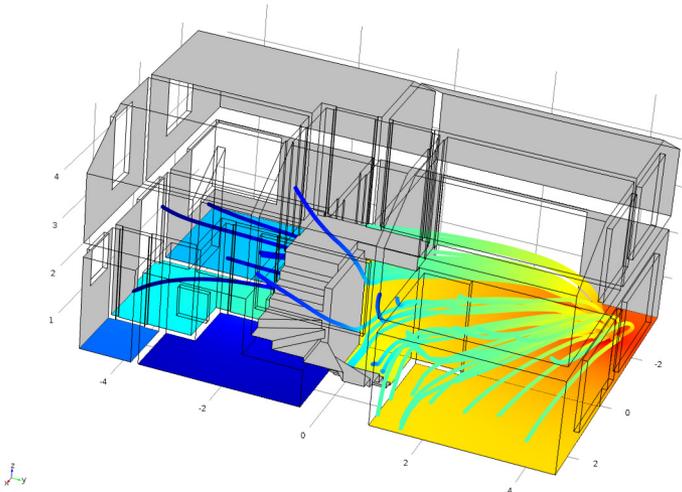


图 6：使用声学扩散方程物理场接口模拟的双层住宅中的声压级和能流。图片来自 COMSOL 网站案例库中的**独户住宅的声学模型**。

示例：吸收式消声器

该案例描述内燃机消声器中的压力波传播。该方法普遍适用于分析声波的传输衰减或确定给定系统的传递属性。

模型定义

消声器如下图所示，由一个 24 公升的共振腔和两端两个放在中心的排气管构成。模型第一次计算时假定消声器腔体中空；第二次计算时，有 15 mm 厚的吸收玻璃丝衬里。

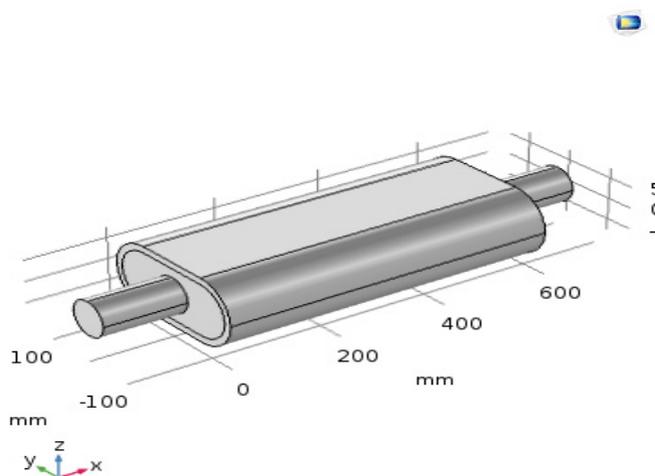


图 7：有衬里的消声器几何模型，衬里是消声器主体的外层。尾气从左边管道进入，从右边管道流出。

域方程

本模型使用声压，频域接口在频域内求解问题。相对于声压 p 的 Helmholtz 方程，模型方程做了微小的修正：

$$\nabla \cdot \left(-\frac{\nabla p}{\rho_c} \right) - \frac{\omega^2 p}{c_c^2 \rho_c} = 0$$

其中， ρ_c 是密度， c_c 为声速， ω 表示角频率。下标 c 表示这些值可以是复数。

在吸收玻璃丝中，作为**多孔声学**域建模，阻尼通过复数声速 $c_c = \omega/k_c$ 和复数密度 $\rho_c = k_c Z_c/\omega$ 输入方程。其中 k_c 是复数波数， Z_c 为复数阻抗。这种被称为多孔域的等效流体模型，以均匀性的方式模拟损耗。

对于有硬质骨架的多孔性较强的材料，著名的 Delany and Bazley 模型以频率和流阻率的函数估计这些阻抗参数。使用 Delany and Bazley (参考文献 1) 的基本系数，表达式是：

$$k_c = k_a \cdot \left(1 + 0.098 \cdot \left(\frac{\rho_a f}{R_f}\right)^{-0.7} - i \cdot 0.189 \cdot \left(\frac{\rho_a f}{R_f}\right)^{-0.595}\right)$$

$$Z_c = Z_a \cdot \left(1 + 0.057 \cdot \left(\frac{\rho_a f}{R_f}\right)^{0.734} - i \cdot 0.087 \cdot \left(\frac{\rho_a f}{R_f}\right)^{-0.732}\right)$$

其中 R_f 是流体阻抗，并且 $k_a = \omega/c_a$ 和 $Z_a = \rho_a c_a$ 分别表示自由空间波数和空气阻抗。该模型是多孔域特征下 Delany-Bazley-Miki 模型的预设选择。流阻率可以通过查表获得，例如参考参考文献 4 或测量获得。对于玻璃丝类型的材料，Bies 和 Hansen (参考文献 2) 给出了经验公式：

$$R_f = \frac{3.18 \cdot 10^{-9} \cdot \rho_{ap}^{1.53}}{d_{av}^2}$$

其中 ρ_{ap} 是材料的视密度， d_{av} 是纤维平均直径。这个模型使用了较轻的玻璃丝， $\rho_{ap} = 12 \text{ kg/m}^3$ ， $d_{av} = 10 \text{ }\mu\text{m}$ 。

注：Delany-Bazley 模型有效的值范围是 $(\rho_a f)/R_f$ 不超过 1 时，所以计算频率上限设为 1500 Hz 能保证全频段多孔模型有效。

边界条件

模型中运用了三种边界条件

- 在实体边界，也就是共振腔和管道的外壁，模型使用了硬声场边界条件。该边界条件假设边界上的法向速度为 0。
- 入口的边界条件是入射平面波和辐射平面波的叠加（参考参考文献 3 获得详细信息）。只要频率低于管道二阶传输模式的截止频率，该边界条件就一直有效的。高于该频率时只有平面行波被模拟。
- 在出口边界，模型指定一个外向辐射平面波。

结果和讨论

图 8 显示了总声压场的等值面图，压力表示消声器中的声压。图中清晰地显示了在该频率下纵向驻波和横向模式同时存在。

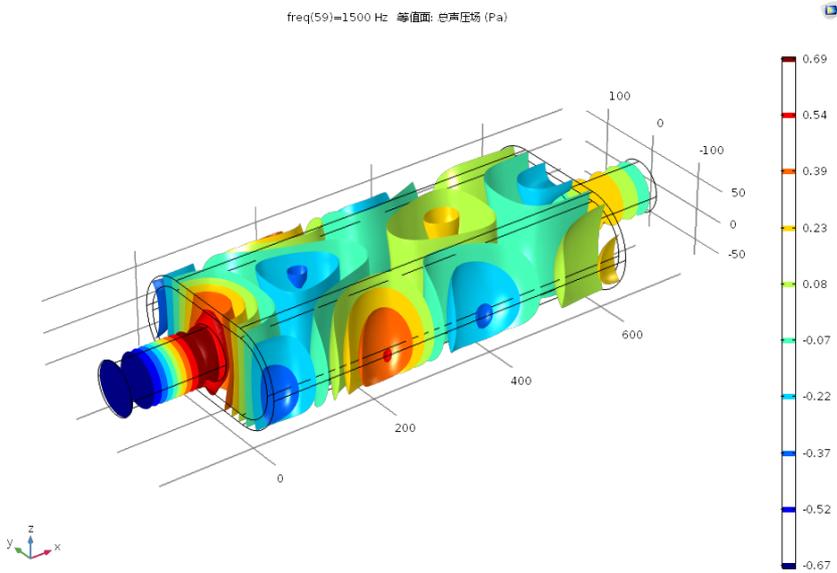


图 8: 当 $f = 1500 \text{ Hz}$ 时无衬底的吸波消声器中的压力分布显示。

消声器的一个重要参数是传输损耗或衰减，该参数定义为入射和出射声能的比值。声能衰减或传递损耗 d_w (dB 形式) 公式为：

$$d_w = 10 \log \left(\frac{w_{\text{in}}}{w_{\text{out}}} \right)$$

其中 w_{in} 和 w_{out} 分别表示入口的入射功率和出口的输出功率，你可以在入口和出口的相应边界上积分计算出这些量。假设平面波的传输表达式为：

$$w_{\text{out}} = \int_{\partial\Omega} \frac{|p|^2}{2\rho c} dA \quad w_{\text{in}} = \int_{\partial\Omega} \frac{p_0^2}{2\rho c} dA$$

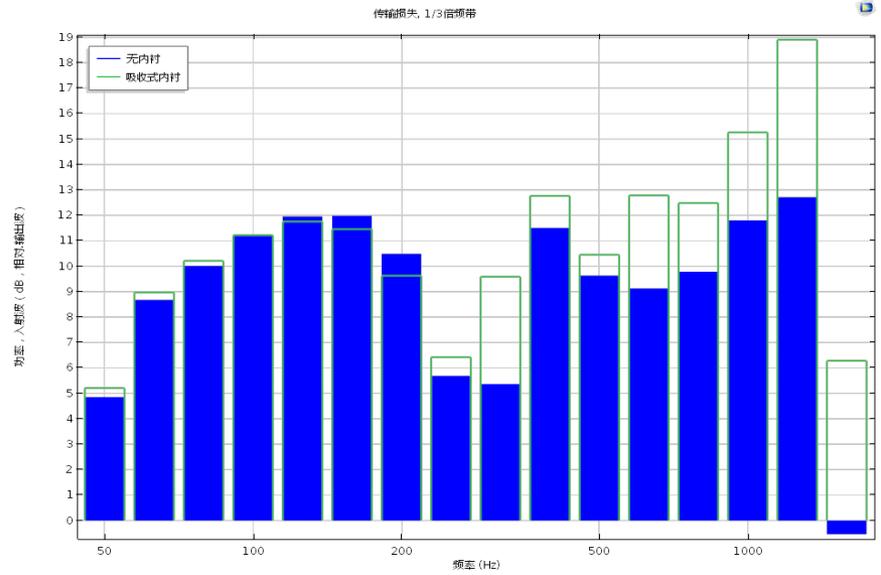
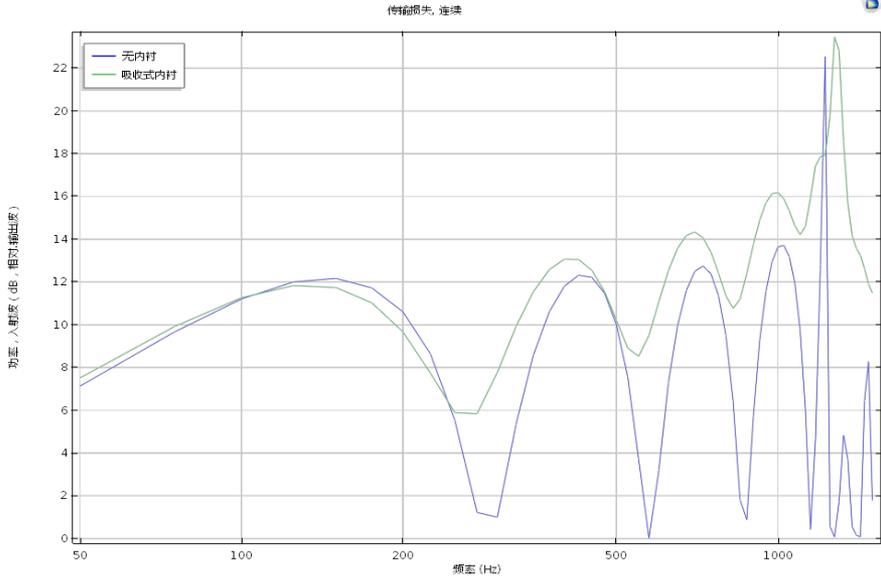


图 9: 空腔消声器和有吸收衬底消声器的传递函数随频率变化对比。(上图)以连续曲线描述传递损耗。当有衬底存在时仍存在一些衰减骤降,但总体来说频率越高衰减越大。(下图)以 1/3 倍频带图显示的传递损耗。

图 9（上图和下图）显示参数化扫频结果。两条曲线分别表示消声器为无衬底空腔（蓝线）和腔壁有玻璃棉内衬（绿线）的情况。上图中传递损耗以连续曲线显示（纯音扫描），下图则以 1/3 倍频带图显示。两幅图都是用声学模块下的倍频带图创建的。

无衰减的消声器曲线表明，对于大多数低频而言，减幅非常明显。1250 Hz 以后，图像情况比较复杂，衰减明显减弱。这是因为对于这些频率，除纵向共振外还有截面传输模式。在略高于该频率时，由于包含了各种传输模式和纵向模式，使得损耗属性很难预测。要分析这些模式，可参考相关的消声器特征模式案例。玻璃棉衬底提高了在共振频率和 1250 Hz 以上高频处的衰减。

图 10 显示了 1500 Hz 下无衬底消声器中的能流。图形以声强的流线表示能流。强度场定义为能流（瞬时声强）的时间平均值，所以能代表系统中的平均能流。在不同频率下，从入口到出口的结果都会有所变化，这能形象的显示声吸收属性。

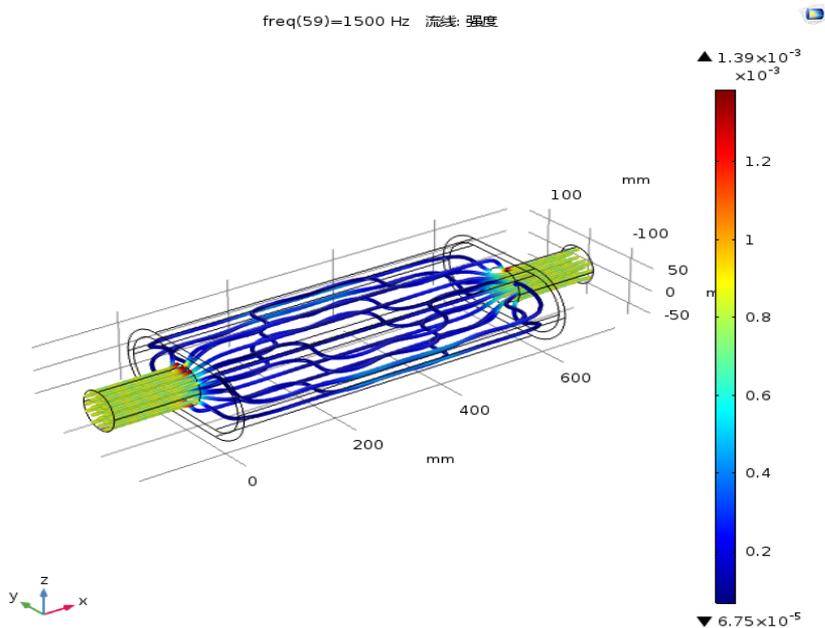


图 10: 1500 Hz 下无衬底消声器中的声强流线。

参考文献

1. M. A. Delany and E. N. Bazley, “Acoustic Properties of Fibrous Absorbent Materials,” *Appl. Acoust.*, vol. 3, pp. 105–116, 1970.
2. D. A. Bies and C. H. Hansen, “Flow Resistance Information for Acoustical Design,” *Appl. Acoust.*, vol. 13, pp. 357–391, 1980.
3. D. Givoli and B. Neta, “High-order Non-reflecting Boundary Scheme for Time-dependent Waves,” *J. Comp. Phys.*, vol. 186, pp. 24–46, 2003.
4. T. J. Cox and P. D’ Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers*, Second Edition, Taylor and Francis, 2009.

模型向导

下面介绍两种模型情况，第一种是只有硬壁面的空腔，另一种是腔体中有玻璃丝衬里。

注：这些介绍适用于 Windows 用户，如果在 Linux 和 Mac 下使用，只需要做极小的微调。

- 1 双击桌面上的 COMSOL 图标打开软件。当软件打开后我们可以选择使用**模型向导**创建新的 COMSOL 模型或使用**空模型**手动创建。对于本例，单击**模型向导**按钮。

如果 COMSOL 已打开，可以从**文件**菜单下选择**新建** ，然后单击**模型向导** .

模型向导会引导我们进入设定模型的基本步骤。下一个窗口让我们选择模型的空间维度。

- 2 在**空间维度**窗口单击**三维** .
- 3 在**选择物理场**树下，选择**声学 > 声压 > 压力声学，频域 (acpr)** 。单击物理接口，单击**添加**按钮，或右键单击并选择**添加物理场** .
- 4 单击**研究** .
- 5 在**选择研究**窗口的**预设研究**下，单击**频域** .
- 6 单击**完成** .

全局定义

注：模型中用到的数据文件路径取决于 COMSOL 安装路径。比如，如果安装在硬盘上，文件路径类似于 C:\Program Files\COMSOL53\applications\。

参数

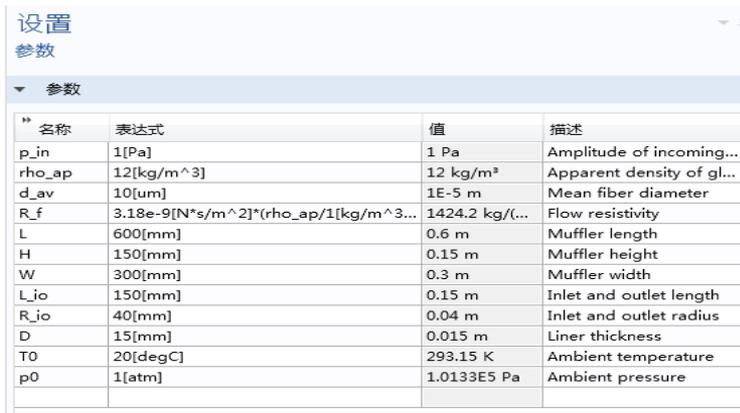
1 在主屏幕工具栏，单击参数 P_i 。

注：在 Linux 和 Mac 下，主屏幕工具栏是指 Desktop 顶部附近的一组特定控件。

2 在参数设置窗口的参数栏下方单击从文件加载 。

3 浏览找到该模型的案例库文件夹 (Acoustics_Module\Automotive)，双击文件 absorptive_muffler_parameters.txt。

这些参数定义了系统的物理数值和几何尺寸。这样几何就能被参数化定义，在参数表里改变数值大小就能很方便地改变几何。



The screenshot shows the '设置' (Settings) dialog box with the '参数' (Parameters) tab selected. It displays a table of parameters for a muffler model. The table has four columns: '名称' (Name), '表达式' (Expression), '值' (Value), and '描述' (Description).

名称	表达式	值	描述
p_in	1[Pa]	1 Pa	Amplitude of incoming...
rho_ap	12[kg/m^3]	12 kg/m³	Apparent density of gl...
d_av	10[um]	1E-5 m	Mean fiber diameter
R_f	3.18e-9[N*s/m^2]*(rho_ap/1[kg/m^3]...	1424.2 kg/(...	Flow resistivity
L	600[mm]	0.6 m	Muffler length
H	150[mm]	0.15 m	Muffler height
W	300[mm]	0.3 m	Muffler width
L_io	150[mm]	0.15 m	Inlet and outlet length
R_io	40[mm]	0.04 m	Inlet and outlet radius
D	15[mm]	0.015 m	Liner thickness
T0	20[degC]	293.15 K	Ambient temperature
p0	1[atm]	1.0133E5 Pa	Ambient pressure

几何 1

1 在模型开发器的组件 1 下，单击几何 1 .

- 2 在几何设置窗口的单位栏，从长度单位选择菜单中选择 mm。



工作平面 1

- 1 在几何工具栏，单击工作平面 。
- 2 在工作平面设置窗口下的面下拉菜单中选择 yz- 平面。

矩形 1

- 1 右键单击面几何 ，添加一个矩形 。



- 2 转至矩形的设置窗口，在尺寸栏：

- 在宽度文本框，输入 W。
- 在高度文本框，输入 H。

- 3 找到位置栏，在基准列表选择中。



圆角 1

- 1 在工作平面 1 工具栏，单击圆角 。

- 2 在目标 r1 上，仅选择 1、2、3、4 四个点。

注：选择几何实体有多种实现方式。当我们知道需要添加的点，例如这次练习，我们可以单击粘贴选择按钮 ，在选择文本框中输入相关信息。在本例圆角 1 节点中，可以在粘贴选择窗口中输入 1,2,3,4。更多关于图形窗口中选择几何实体的信息请参见 *COMSOL Multiphysics Reference Manual*。

3 前往**圆角**设置窗口，在**半径**栏下的**半径**文本框输入 $H/2$ 。



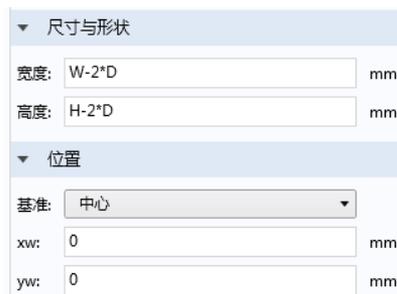
矩形 2

1 R 右键单击**面几何** ，选择**矩形** 。

2 转至**矩形**的**设置**窗口，在**尺寸与形状**栏：

- 在**宽度**文本框，输入 $W-2*D$ 。
- 在**高度**文本框，输入 $H-2*D$ 。

3 找到**位置**栏，在**基准**列表选择中。



圆角 2

1 在**工作平面 1** 工具栏，单击**圆角** 。

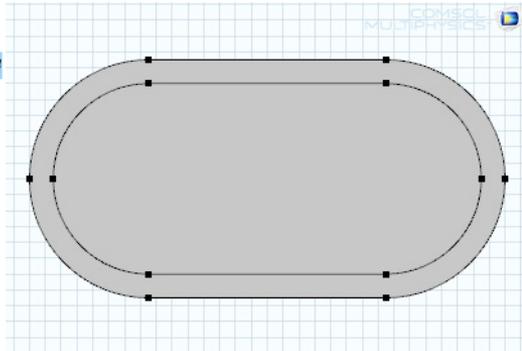
2 在对象 r2 上，仅选择 1、2、3、4 四个点。

3 前往**圆角**的**设置**窗口，在**半径**栏下的**半径**文本框输入 $(H-2*D)/2$ 。

4 在**设置**窗口或**主屏幕**工具栏上单击**全部构建** 。

此时，图形窗口的几何和工作平面 1 下的节点序列应如下图一致：

- 几何: Geometry 1 (*geom1*)
 - 工作平面: Work Plane 1 (*wp1*) (*wp1*)
 - 平面几何: Plane Geometry (*sequence2D*)
 - 矩形: Rectangle 1 (*r1*) (*r1*)
 - 圆角: Fillet 1 (*fil1*) (*fil1*)
 - 矩形: Rectangle 2 (*r2*) (*r2*)
 - 圆角: Fillet 2 (*fil2*) (*fil2*)



拉伸 1

- 1 在工作平面工具栏，单击关闭 。
- 2 在几何工具栏，单击拉伸 。
- 3 前往拉伸的设置窗口，找到到面的距离栏，在距离 (mm) 的表单中输入 L (替代默认值)。



圆柱体 1

- 1 在几何工具栏，单击圆柱体 。

2 转至圆柱体的设置窗口。在尺寸与形状栏：

- 在半径文本框，输入 R_{io} 。
- 在高度文本框，输入 L_{io} 。

3 在位置栏的 x 文本框，输入 $-L_{io}$ 。

4 在轴下：

- 从轴类型列表选择笛卡尔坐标。
- 在 x 文本框，输入 1。
- 在 z 文本框，输入 0。



圆柱体 2

1 在几何工具栏，单击圆柱体 。

2 在圆柱体的设置窗口的尺寸与形状栏：

- 在半径文本框，输入 R_{io} 。
- 在高度文本框，输入 L_{io} 。

3 在位置栏的 x 文本框，输入 L。

4 在轴下：

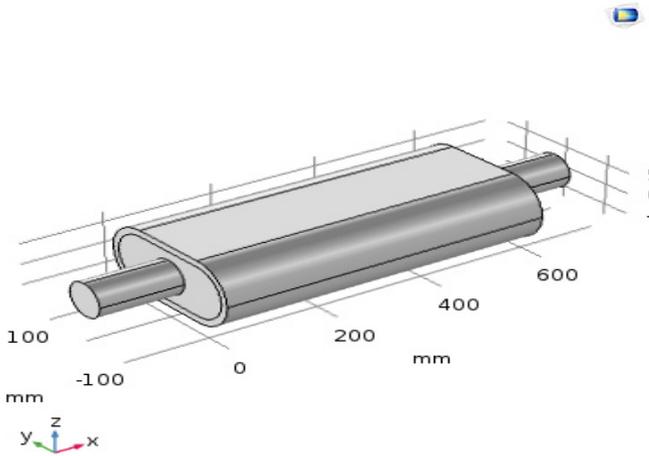
- 从轴类型列表选择笛卡尔坐标。
- 在 x 文本框，输入 1。
- 在 z 文本框，输入 0。

5 在主屏幕工具栏上单击全部构建按钮 。单击图形工具栏上的缩放到窗口大小按钮 。

模型开发器中的节点序列应与下图一致。



最终生成的几何如下图所示，图中坐标轴单位为 mm，坐标系已标出。



定义

显式 1

- 1 在定义工具栏单击显式 。
- 2 前往显式的设置窗口，在标签文本框输入 Inlet（替代默认值）。
- 3 在输入实体的几何实体层列表中选择边界。
- 4 仅选择边界 1。

显式 2

- 1 在定义工具栏，单击显式 。
- 2 前往显式的设置窗口，在标签文本框输入 outlet（替代默认值）。
- 3 在输入实体的几何实体层列表中选择边界。

4 仅选择边界 28。



积分 1

- 1 在定义工具栏，单击组件耦合 ，选择积分 $\int du$ 。
- 2 在积分设置窗口的源选择的几何实体层列表中选择边界。
- 3 在选择列表中选择 Inlet。



积分 2

- 1 在定义工具栏，单击组件耦合 ，选择积分 $\int du$ 。
- 根节点: absorptive_muffler.mph
 - 全局定义
 - 组件: Component 1 (comp1)
 - 定义
 - a= 变量: Variables 1 (var1)
 - $\int du$ 积分: Integration 1 (intop1)
 - $\int du$ 积分: Integration 2 (intop2)
 - 显式: Inlet (sel1)
 - 显式: Outlet (sel2)
 - 边界坐标系: Boundary System 1 (sys1)

- 2 在积分设置窗口的源选择的几何实体层列表中选择边界。
- 3 在选择列表中选择 Outlet。

现在我们分别在入口和出口定义了积分耦合算子 `intop1` 和 `intop2`，分别用于积分入口和出口。通过这些操作定义输入和输出的功率，参见[结果和讨论](#)章节。

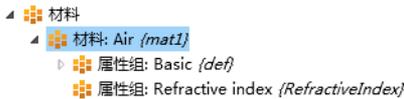
变量 I

- 1 在定义工具栏，单击局部变量 `a=`。
- 2 在变量设置窗口，如下图输入（或复制并粘贴）变量：

名称	表达式	描述
<code>w_in</code>	<code>intop1(p0^2/(2*acpr.rho*acpr.c))</code>	Power of the incoming wave
<code>w_out</code>	<code>intop2(abs(p)^2/(2*acpr.rho*acpr.c))</code>	Power of the outgoing wave

材料

- 1 在主屏幕工具栏，单击添加材料 。
- 2 前往添加材料窗口，在材料树选择内置材料 > Air 。
- 3 在添加材料窗口，单击添加到组件 。
- 4 在材料下单击 Air ，在设置窗口查看材料属性明细。



绿色复选标记表示模型要用到该参数。

材料属性明细					
属性	名称	值	单位	属性组	
<input checked="" type="checkbox"/>	密度	rho	rho(pA...	kg/m ³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	声速	c	cs(T[1/...	m/s	Basic
<input type="checkbox"/>	相对磁导率	mur	1	1	Basic
<input type="checkbox"/>	相对介电常数	epsil...	1	1	Basic
<input type="checkbox"/>	动力粘度	mu	eta(T[1...	Pa·s	Basic
<input type="checkbox"/>	比热率	gam...	1.4	1	Basic

注：默认第一种添加的材料会填充所有域，所以几何选择不需要修改。

前面提到过，第二种模型设计需要在域 2 上加入衬里材料。不过现在分析的情形是整个消声器是空的。

压力声学，频域

平面波辐射 1

1 在物理场工具栏，单击边界 ，选择平面波辐射 。



2 仅选择边界 1 和 28。

入射压力场 1

1 单击平面波辐射 1 ，在物理场工具栏的属性菜单，选择入射压力场 。也可以通过快捷菜单右键单击选择它。

模型开发器中会添加一个入射压力场节点。

- ▲  压力声学，频域: Pressure Acoustics, Frequency Domain {acpr}
 -  压力声学: Pressure Acoustics 1 {fpam1}
 -  硬声场边界 (壁): Sound Hard Boundary (Wall) 1 {shb1}
 -  初始值: Initial Values 1 {init1}
- ▲  平面波辐射: Plane Wave Radiation 1 {pwr1}
 -  入射压力场: Incident Pressure Field 1 {ipf1}

注：模型开发器中，左上角有 ‘D’ 的节点表示这是预设节点。

2 在入射压力场设置窗口的边界选择列表下选择 Inlet。

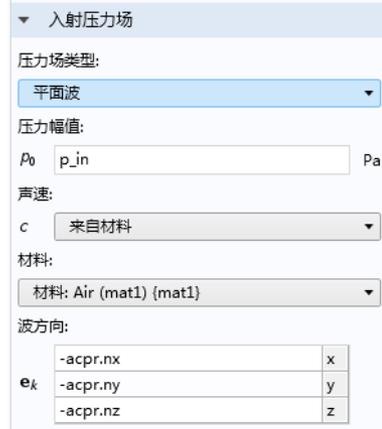
3 在入射压力场的 p_0 编辑框中输入 p_0 。

接着，将声速指定为空气的速度。

4 从 c 列表中选择来自材料，然后从材料列表中选择 Air (mat1)。

我们现在在入口和出口边界都指定了平面波辐射条件，但只在入口设定入射波。剩余的边界默认设置为硬声场边界条件。

现在，在有吸收衬里的区域中添加第二个声压模型，在我们配置第一个研究步时，可以先禁用它。



多孔声学

1 在物理场工具栏单击域 ，选择多孔声学 。

2 在多孔声学的设置窗口，仅选择域 2。

3 在多孔基体属性栏，从 R_f 列表中选择用户定义，在文本框中输入 R_f 。

网格 1

鉴于几何狭长且具有固定截面，可以使用扫掠网格。这样能在同样精度解析声场的情况下减少网格单元数目。

自由三角形网格 1

1 在网格工具栏单击边界，选择自由三角形网格 。也可以右键单击网格节点，在更多操作子菜单中选择。

2 为了更方便定位和选择边界，可以单击图形工具栏上的线框渲染按钮 。

- 3 在**自由三角形网格**设置窗口，仅选择边界 6、9 和 16。



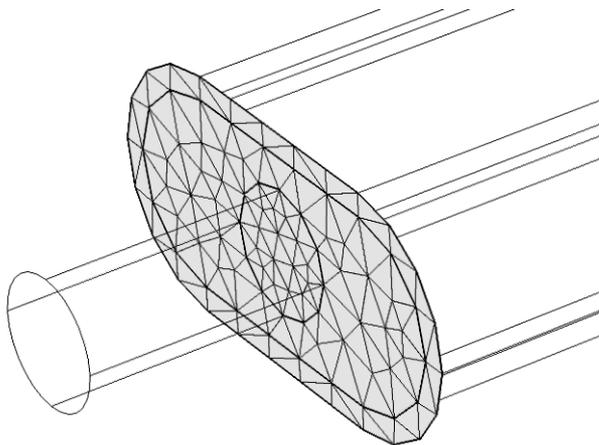
尺寸

- 1 在**网格 1** 单击尺寸 .
- 2 在尺寸设置窗口的**单元尺寸**处单击**用户定义**按钮。
- 3 在**单元尺寸**参数中的**最大单元尺寸**文本框输入 $343[\text{m/s}]/1500[\text{Hz}]/5$ 。

全局最大单元尺寸设定为等于最小波长的 $1/5$ ，即 $\lambda/5 = c_0/f_{\max}/5$ ，其中的 c_0 表示声速。

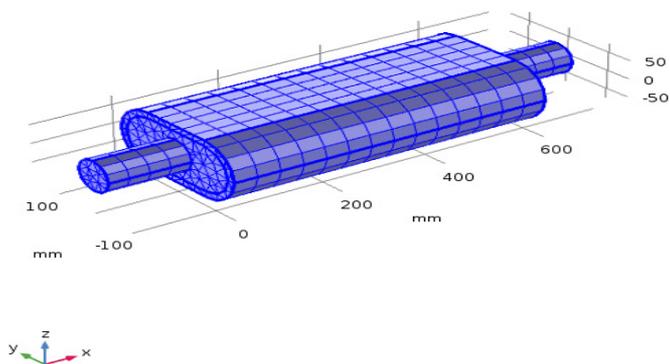


4 单击**全部构建**按钮 。



扫掠 1

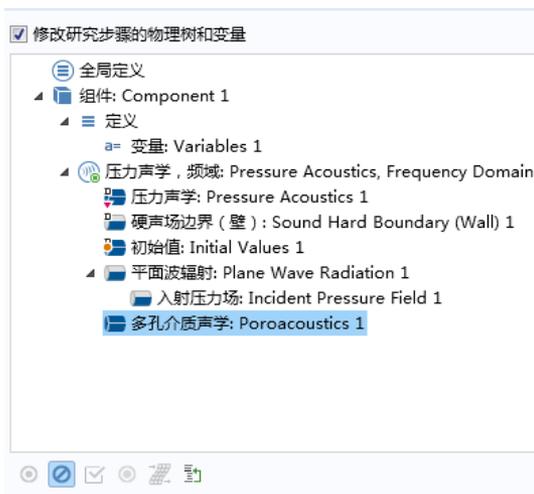
- 1 在**网格**工具栏，单击**扫掠** 。
- 2 在**网格**工具栏，单击**构建网格** ，即可自动匹配源面和目标面并生成扫掠网格。
- 3 单击**图形**工具栏上的**缩放到窗口大小**按钮 。



研究 1

步骤 1: 频域

- 1 在**模型开发器**中展开**研究 1**节点，之后单击**研究 1: 频域** 。
- 2 在**频域**设置窗口，在**研究设置**的**频率**文本框中输入 range (50, 25, 1500)。
- 3 在**研究设置**中找到**物理和变量选择**栏，选中**修改研究步骤的物理树和变量**复选框。
- 4 在树中**组件 1**>**压力声学**，**频域**下，单击**多孔声学 1**。
- 5 单击表单下的**禁用**按钮 。
- 6 在**设置**窗口或**主屏幕**工具栏，单击**计算** 。



结果

第一个预设绘图表示在最高频率 1500Hz 下，消声器壁面上的声压分布。为了更明显地看到驻波形状，我们可以绘制声压的模值，而不是声压的实部。

声压 (acpr)

1 在模型开发器中的结果下展开声压 (acpr) 节点，单击表面 1 。



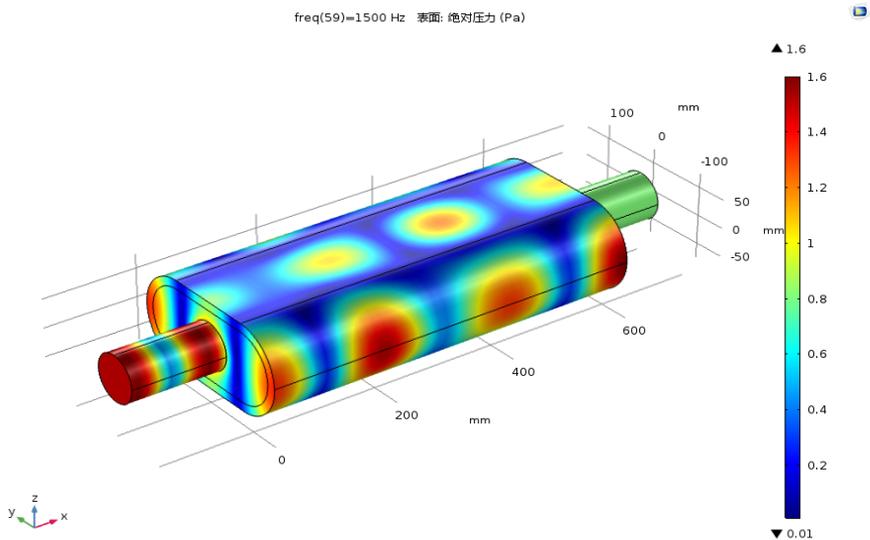
2 在表面设置窗口的表达式栏右上角，单击替换表达式按钮 。

3 在菜单中，搜索 acpr.absp，双击添加到表达式文本框（或在文本框输入 acpr.absp）。

acpr.absp



4 在表面工具栏的设置窗口单击绘制按钮 。

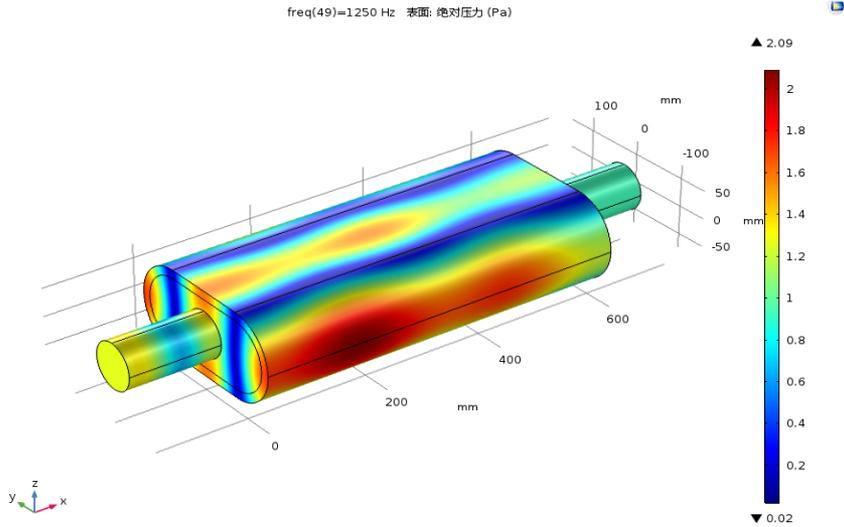


不同频率下的图形分布是不一样的，例如我们要看 1250Hz 的分布。

1 在模型开发器的结果下，单击声压 (acpr) 。

2 前往三维绘图组设置窗口，数据处找到参数值 (freq) 列表，选择 1250。

3 在三维绘图组工具栏，单击绘制按钮 。

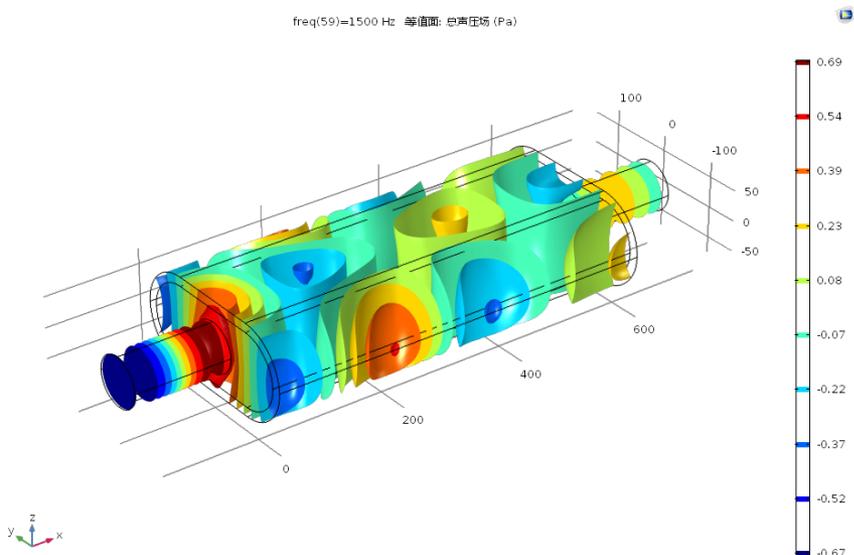


在 1250Hz，绝对压力沿着 x 轴方向变化不大。原因在于该频率恰好高于入射波激发的一阶对称传播模式的截止频率。关于腔体传播模式的分析，请参见[消声器的特征模式模型](#)。

软件自动生成的另外两个绘图组分别显示壁面上的声压级分布和消声器内部的声压等值面。

声压，等值面 (acpr)

- 1 在模型开发器的声压，等值面下，单击等值面 (acpr) 节点 ，在图形界面显示绘图。



下面开始绘制消声器的传递损耗曲线。使用倍频带图绘制，其中以带图或连续曲线（扫描）的形式绘制任意传递函数。

一维绘图组 4

- 1 在主屏幕工具栏，单击添加绘图组并选择一维绘图组 。
- 2 在一维绘图组的设置窗口，在标签文本框中输入传输损耗，连续。

传输损耗，连续

- 1 在传输损耗，连续工具栏，单击倍频带图。
- 2 在倍频带图的设置窗口，找到选择栏。
- 3 在几何实体层列表中选择全局。
- 4 找到 y- 轴数据栏。在表达式文本框输入 w_{in}/w_{out} 。
- 5 在表达式类型列表中选择传递函数。

6 找到**绘制**栏，在**样式**列表中选择**连续**。



7 找到**图例**栏。选中**显示图例**复选框。

8 从**图例**列表中，选择**手动**。

9 在表中输入以下设置：

图例
No liner

10 在**传输损耗**，**连续**工具栏，单击**绘制** 。

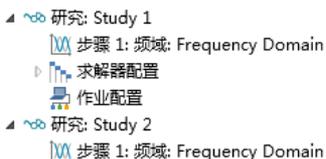
绘图应显示图 9 中的蓝色曲线。

模型向导

开始求解有吸收性玻璃棉衬底的消声器模型。我们从已完成的步骤往下做，并为了不覆盖原结果，可以新增一个研究。所以首要任务是添加一个新研究。

1 在**主屏幕**工具栏，单击**添加研究** 。

2 前往**添加研究**窗口，在**研究**下单击**频域** 。单击**添加研究** 。模型开发器中新增了一个**研究 2** 节点。

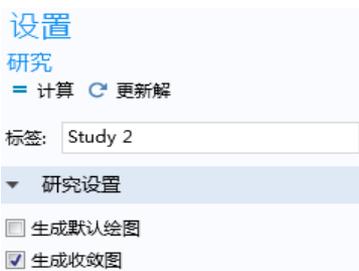


3 在**主屏幕**工具栏，单击**添加研究**，关闭**添加研究**窗口。

研究 2

1 在**模型开发器**中单击**研究 2** 。

2 在**研究的设置**窗口，从**研究设置**中清除**生成默认图**复选框。



步骤 1: 频域

1 在**研究 2** 下，单击**步骤 1: 频域** 。

2 在**频域**设置窗口，找到**研究设置**栏。

3 在**频域**文本框中输入 `range(50,25,1500)`。



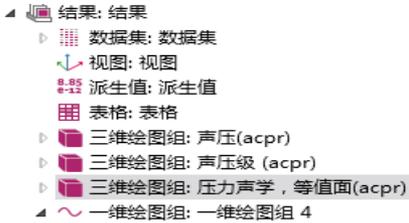
4 在**设置**窗口或**主屏幕**工具栏单击**计算** 。

结果

我们选择不生成新的默认图。当研究完成后我们可以利用已存在的一维绘图组，改变数据集就能得到有阻尼材料影响的结果。

声压，等值面 (acpr)

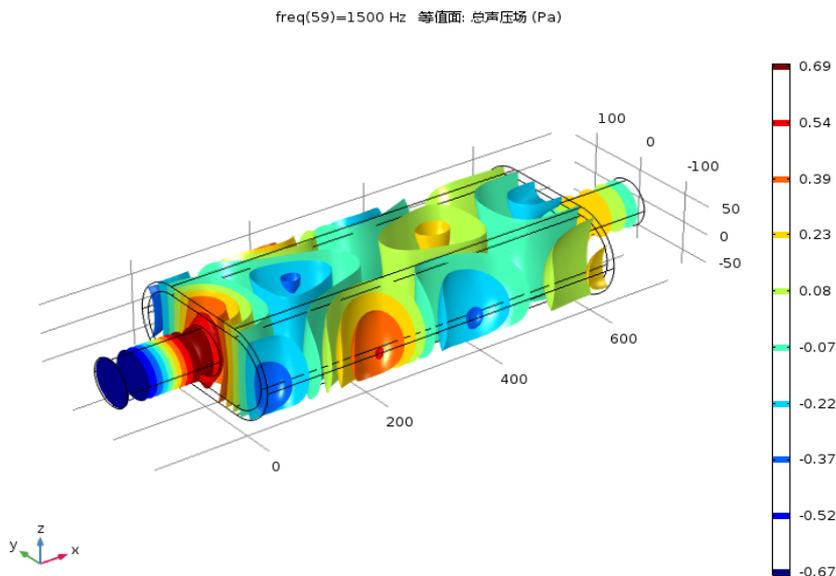
1 在**模型开发器**中的**结果**下单击**声压，等值面 (acpr)**  节点。



2 在**三维绘图组**设置窗口中的**数据**栏，从**数据集**列表中选择**研究 2/ 解 2**。



3 在设置窗口单击绘制按钮 。



在 1500Hz 下，腔体内的声压低很多。

现在开始研究添加衬底后传递曲线的变化。复制第一个绘图并应用新的数据集，不过先要来做一些格式调整。

传输损耗，连续

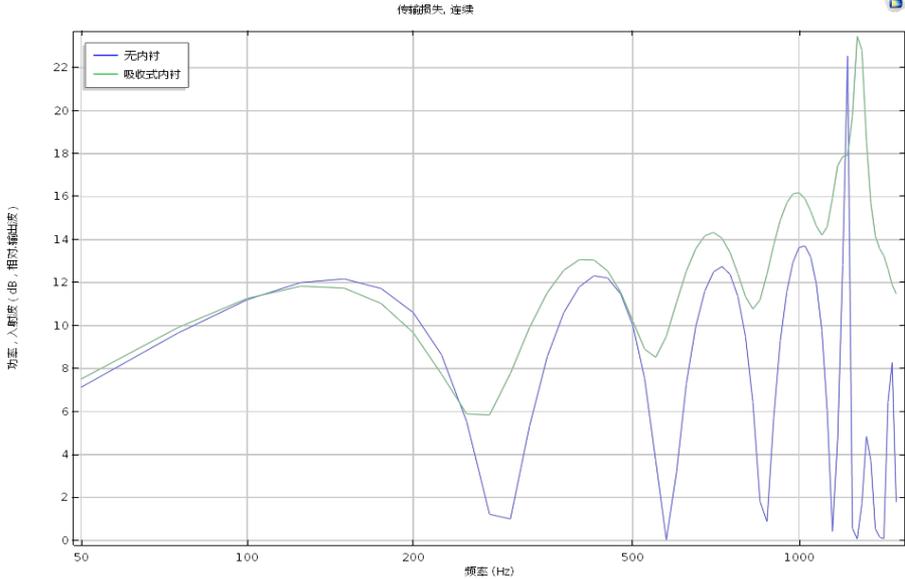
- 1 在模型开发器窗口中的结果下单击**传输损耗，连续**。
- 2 在一维绘图组的设置窗口，单击展开**标题栏**。
- 3 在**标题类型**列表中选择**手动**。
- 4 在标题的文本区域，输入**传输损耗，连续**。
- 5 找到绘图设置栏，选中 **y-轴标签**复选框。
- 6 在关联的文本框中，键入**功率，入射波 (dB, rel. 输出波)**。
- 7 单击展开图例栏。在位置列表中选择**左上角**。
- 8 在模型开发器窗口，在**结果 > 传输损耗，连续**上右键**倍频带图**并选择**生成副本**。
- 9 在倍频带图的设置窗口，找到**数据栏**。
- 10 从**数据集**列表中，选择**研究 2/ 解 2 (sol2)**。

11 单击展开图例栏。在表中输入以下设置：

图例

Absorptive liner

12 在**传输损耗，连续**工具栏，单击**绘制** 。



绘图应如图 9 的上图所示。

现在复制传递损耗绘图并转化为 1/3 倍频带格式。

传输损耗，连续 1

- 1 在**模型开发器**窗口中，右键单击**传输损耗，连续**并选择**生成副本**。
- 2 在**一维绘图组**的设置窗口，输入**传输损耗, 1/3 倍频带**。
- 3 找到**标题设置**栏，在标题文本区域，输入**传输损耗, 1/3 倍频带**。

传输损耗，1/3 倍频带

- 1 在**模型开发器**窗口，展开**结果 > 传输损耗，1/3 倍频带**节点，然后单击**倍频带图 1**。
- 2 在**倍频带图**的**设置**窗口，找到**绘制**栏。

3 在样式列表中选择 1/3 倍频带。



4 在模型开发器窗口，在结果 > 传输损耗，1/3 倍频带上单击倍频带图 2。

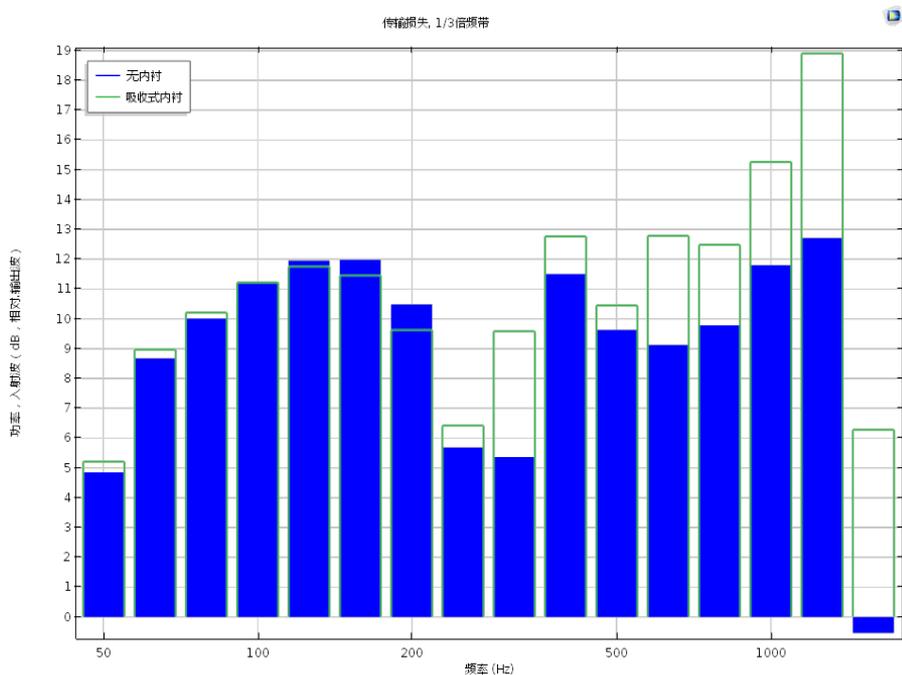
5 在倍频带图的设置窗口，找到绘制栏。

6 在样式列表中选择 1/3 倍频带。

7 单击展开颜色和样式栏。从类型列表中选择曲线。

8 在宽度文本框中输入 2。

9 在传输损耗，1/3 倍频带工具栏上，单击绘制  。



绘图结果应如图 9 的下图所示。

现在，创建一个绘图表示通过消声器的声强度通量，利用流线显示强度矢量（通过消声器的能流）。我们可以比较不同的解和频率以研究并显示消声器的声吸收属性。

三维绘图组 5

强度

- 1 在**结果**工具栏单击**三维绘图组** 。
- 2 在**三维绘图组 5**的**设置**窗口，在**标签**文本框输入**强度**。
- 3 在**强度**工具栏单击**流线** 。
- 4 在**流线**设置窗口单击**替换表达式**  按钮。
- 5 在菜单中，搜索 **Intensity (RMS)** 或 **acpr.Ix**, **acpr.Iy**, **acpr.Iz**。双击添加到**表达式**文本框（或在文本框输入 **acpr.Ix, acpr.Iy, acpr.Iz**）。



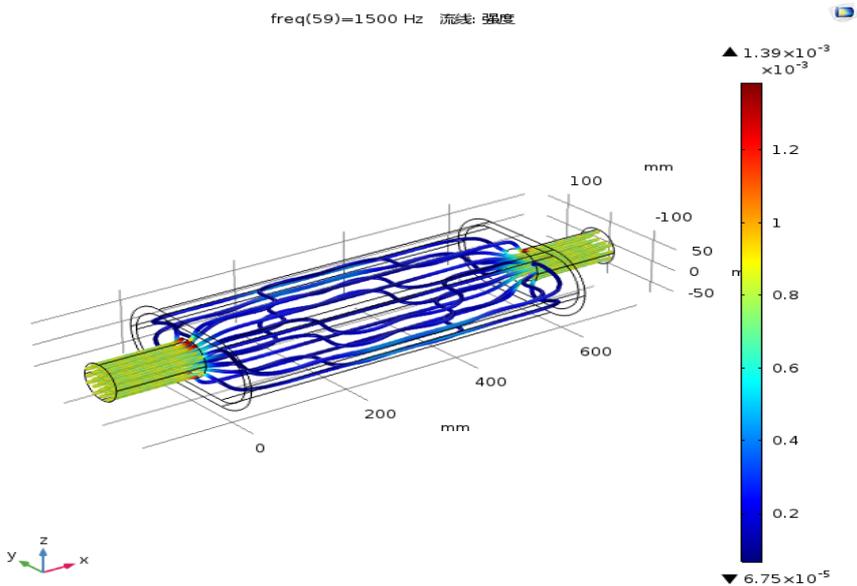
- 6 在**选择**栏选取边界 1。
- 7 在**颜色和样式**下：
 - 在**线类型**列表，选择**管**。
 - 在**管半径表达式**文本框中输入 2。



- 8 在**模型开发器**的**强度**下，右键单击**流线 1** ，并选择**颜色表达式** 。

9 在**颜色表达式**的设置窗口，在**表达式**文本框输入 `acpr.I_rms`（替换默认值）。

10 在**设置**窗口单击**绘制** 。



此操作可以重现图 10。

最后一步，选择一幅图作为模型预览图。

1 在**模型开发器**中的**结果**下单击**声压，等值面** 。

2 单击**根**目录（模型树的第一个节点），在**根**的**设置**窗口的**模型预览图**下，单击**设置模型预览图**。

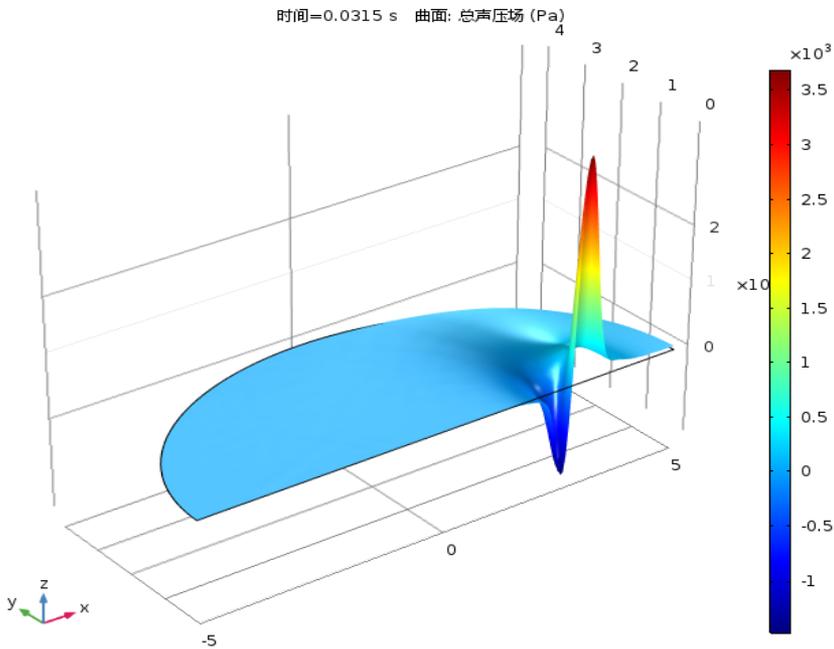
可以在**图形**窗口用工具条按钮校正图形直到满意为止。

案例库中的其他示例

声学模块案例库包含教学模型、工业模型及验证模型。以下是其中一些的介绍和示例，找到[案例库窗口](#)并了解如何从 COMSOL Multiphysics 中查看这些模型。

高斯爆炸波

本模型介绍了求解瞬态问题要注意的重要概念。详细来说，它决定了模型激励源中的频率成分、网格解析度，以及时间步长之间的关系。

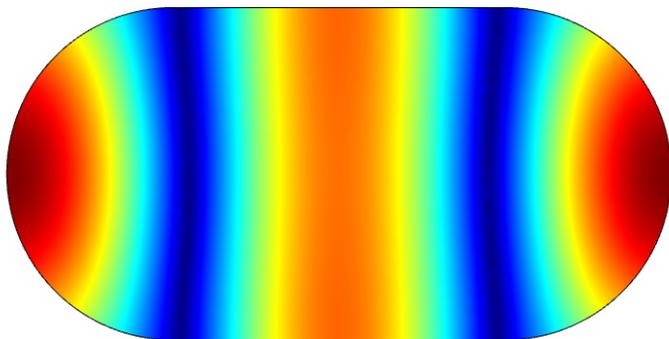


时间 $t=0.0315\text{s}$ 时的脉冲表示。

消声器的特征模式

本模型计算了一个汽车消声器腔体中的传输模式，几何是前面吸波消声器模型中的横截面。

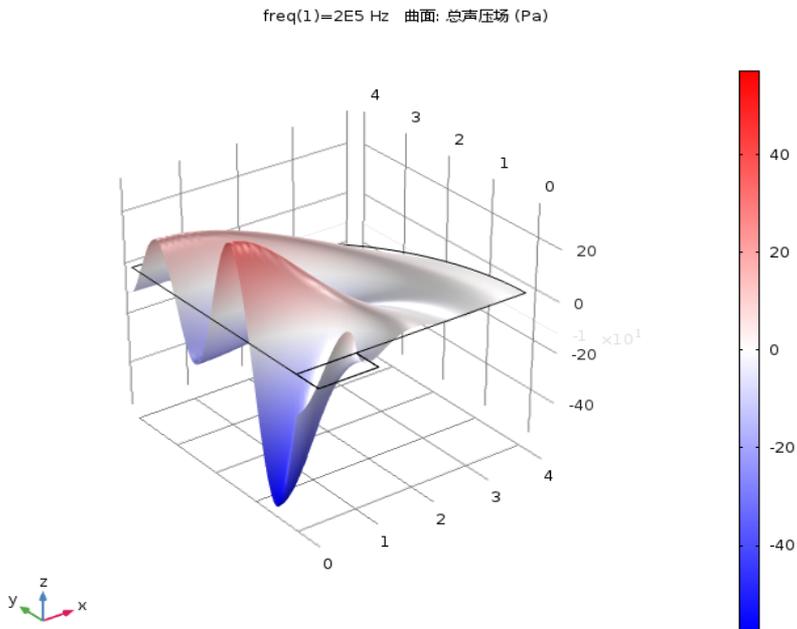
模型目的是求解传播模式形状，找到截止频率。就像在吸波消声器中所提到过的，在截止频率之上一些模式对消声器的阻尼有很大影响。模型求解了截止频率为 1500Hz 时的模式。



消声器腔体的一阶全对称传输模式（无吸收衬底），图中显示了绝对声压。

压电声学换能器

压电换能器既能把电流转换为声场，反过来又能由声场产生电流。这些设备广泛应用于空气和液体中的发声装置，比如可用于相控阵麦克风、超声设备、喷墨液滴执行器、药物发现、声呐换能器、医学成像以及超声治疗。

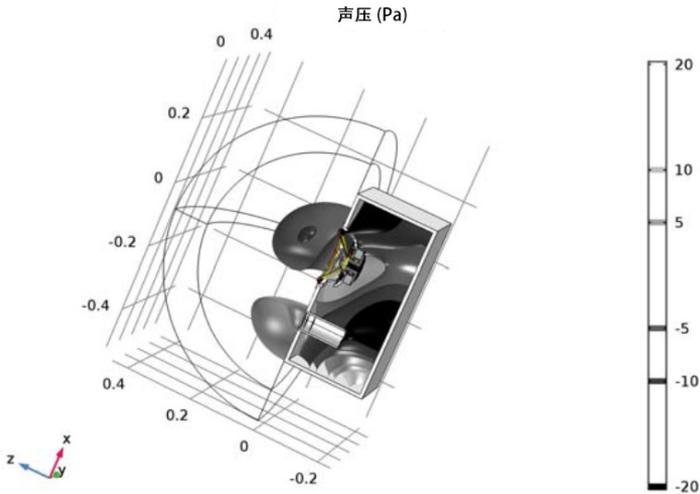


表面和高度图显示了 $f = 100\text{kHz}$ 压电执行器产生的压力分布。

倒相孔音响中的扬声器驱动单元

一类重要的声学模型是换能器，即电 - 机械 - 声学换能器。换能器是多物理场模型，经常在分析声学之外还必须分析结构力学以及电磁学。其中一种是扬声器（本模型），另一种是麦克风（下一个模型）。

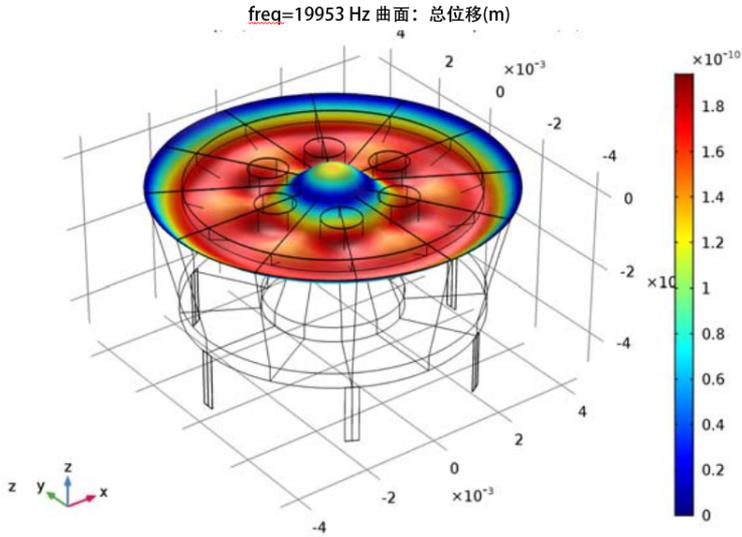
模型模拟箱体扬声器，给模型提供驱动电压，输出外部房间中的声压级随频率的函数。驱动器的电磁性质由扬声器驱动单元模型提供（需要 **AC/DC 模块**）。模型应用了 **声 - 壳相互作用接口**，因此需要 **结构力学模块**。



压力等值面（灰度标注）和扬声器锥体的变形（彩色标注）。

Brüel & Kjør 4134 电容式麦克风

另一类换能器是麦克风。这是 Brüel&Kjør 4134 电容式麦克风的模型，几何和材料都取自麦克风。模拟的灵敏度和实测结果做了对比，得到了很好的吻合。并计算了薄膜变形，压力，速度和电场。本模型需要声学模块，AC/DC 模块和结构力学模块。



20 kHz 下麦克风振膜的变形。几何由 Brüel & Kjør 提供。

声学模块的简介到此结束。