

COMSOL
CONFERENCE

2015 北京

基于COMSOL的结构声振 特性分析与减振降噪设计

国防科技大学装备综合保障技术重点实验室

振动与噪声控制课题组

[http : //vag.nudt.edu.cn](http://vag.nudt.edu.cn)

2015.11

Excerpt from the Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Beijing

振动与噪声问题广泛存在于飞行器、舰船、车辆等工程领域。过度的振动与噪声可严重影响装备的可靠性、安全性、使用寿命及人员的健康安全。减振降噪需求十分迫切。



振动与噪声在结构中以弹性波的形式传播，因此，声振控制的核心是**结构中弹性波传播的调控**。

目前，结构减振降噪重点和难点在**低频段**，阻尼等传统被动控制手段在低频效果不明显，主动控制技术虽然主要针对低频，但存在成本高、控制系统复杂、可靠性不高等问题。

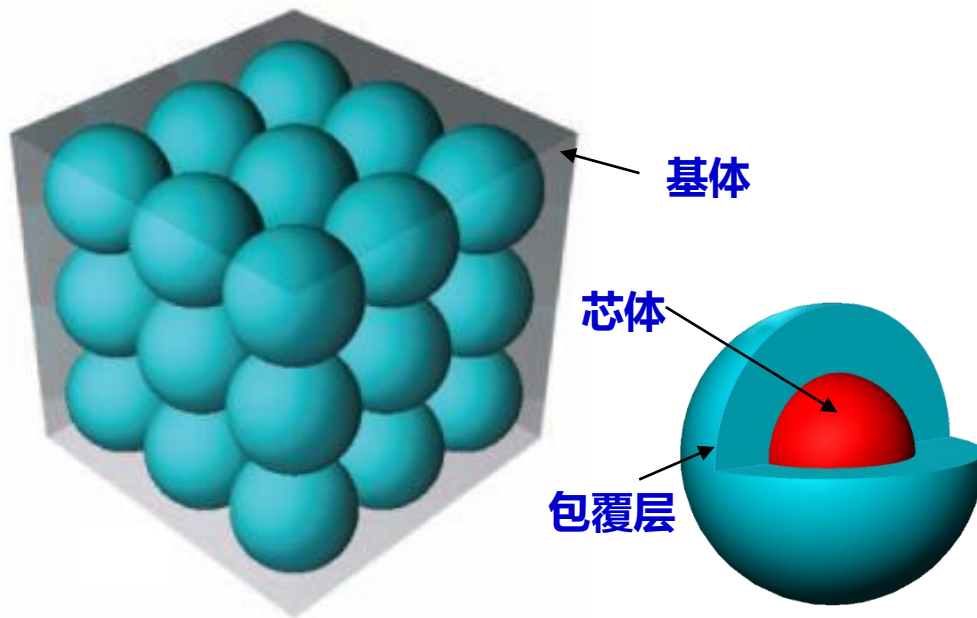
近年来，“**声学超材料**”概念的出现为结构减振降噪设计提供了新的途径和实现方式。

声学超材料（Acoustic Metamaterial）：通常是一种**周期性的人工设计**的材料/结构，可以具有一些天然材料所不具备的“**超常**”动力学行为。可以实现对弹性波传播的精确控制。

声学超材料典型超常特性包括：

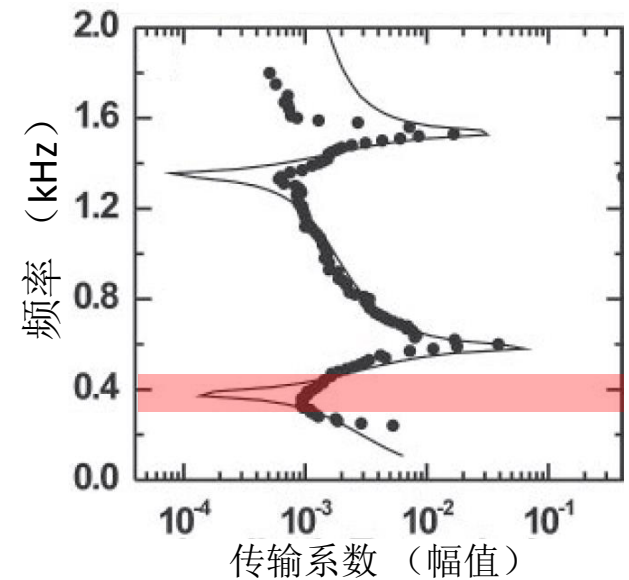
- 局域共振带隙特性
- 负折射特性
- 定向传播特性

局域共振带隙特性： 周期结构中局域共振单元与基体弹性波的相互耦合作用,能够抑制特定频率范围内（带隙内）的弹性波传播,这一频率范围可以称为带隙。



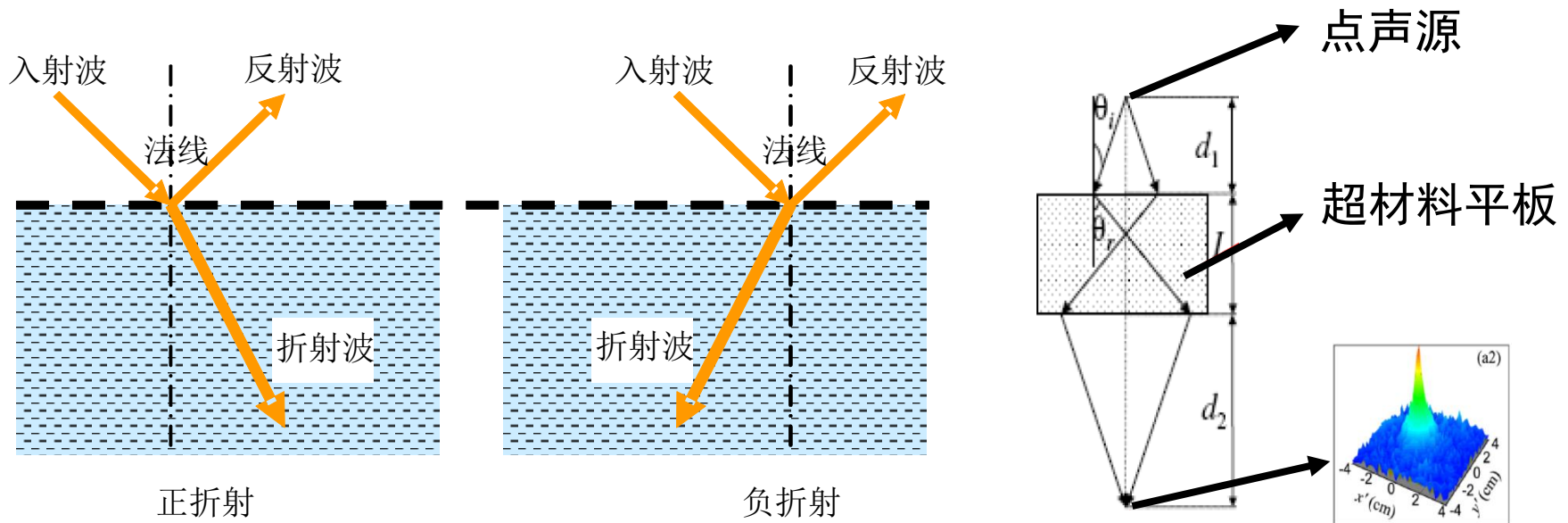
三维声学超材料结构
(晶格常数**1.55cm**)

局域共振单元



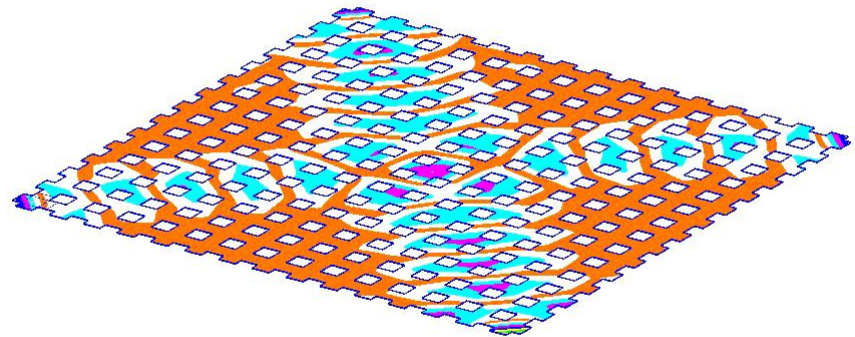
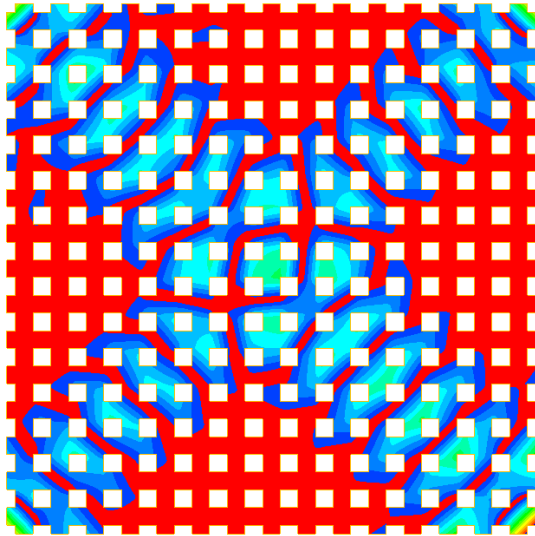
声波传输特性, 第一带隙**起始**
频率**400Hz**, 对应波长**295cm**

负折射特性：在特定的频率范围，入射人工周期结构的弹性波与折射波位于法线的同侧，表现出与常规波传播规律相反的负折射。用于声学成像可突破传统透镜成像的衍射极限，有望极大提高声学成像的分辨率。



声学超材料负折射效应及平板声聚焦

定向传播特性：超材料可以实现对弹性波在结构中传播方向的操控，称为定向传播特性。

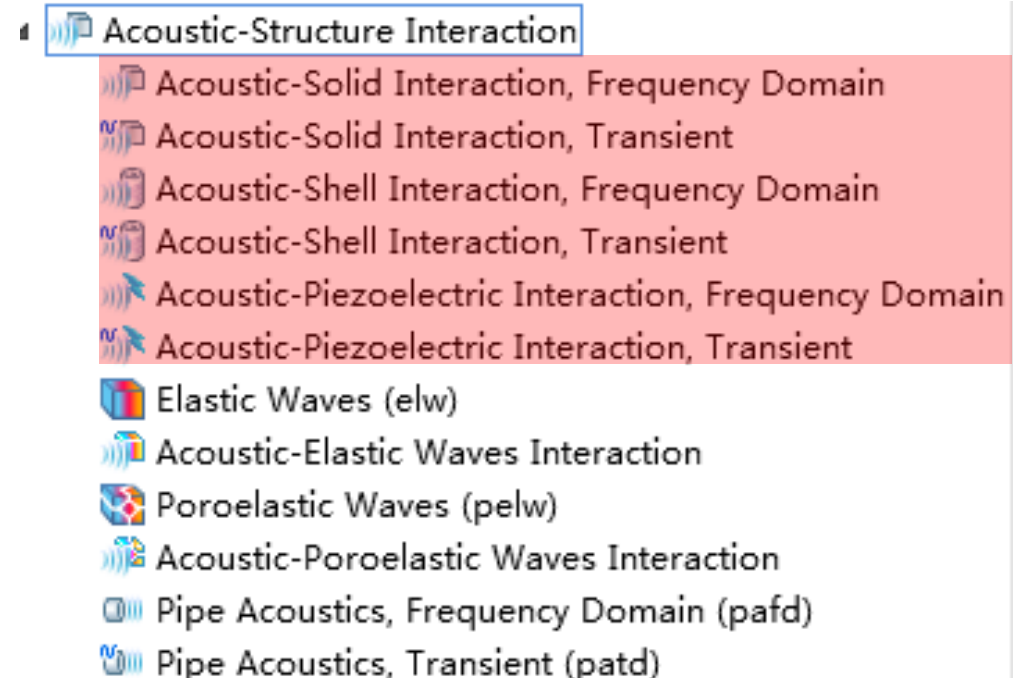
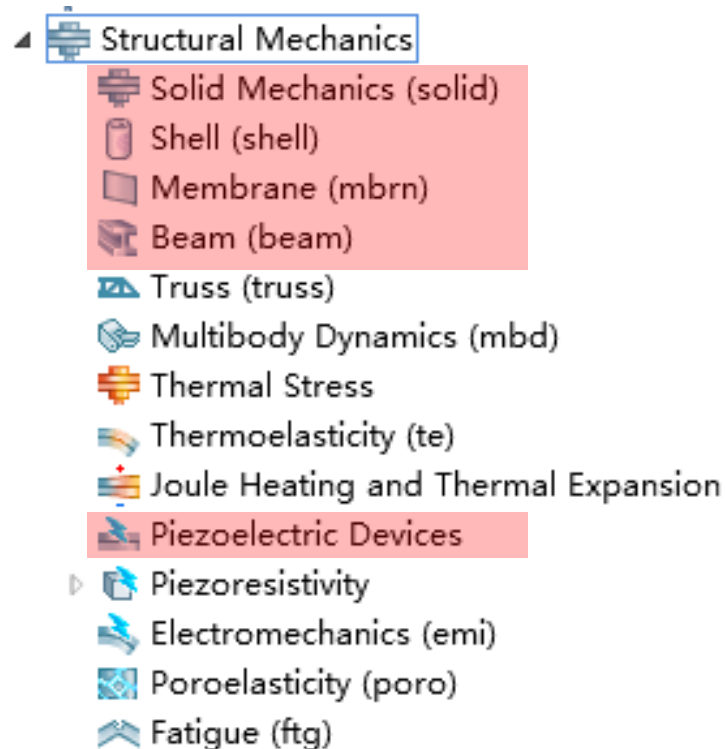


周期格栅超材料板中的弹性波定向传播

- 声学超材料的局域共振带隙特性、负折射特性、定向传播特性为结构减振降噪提供了新的实现途径。
- 基于超材料思想进行结构减振降噪设计，对减振效果进行仿真分析，其建模主要需要解决以下几个主要问题：
 - 复杂介质的定义与描述
 - 声、振、电等多物理场耦合
 - 多尺度结构建模与高效求解

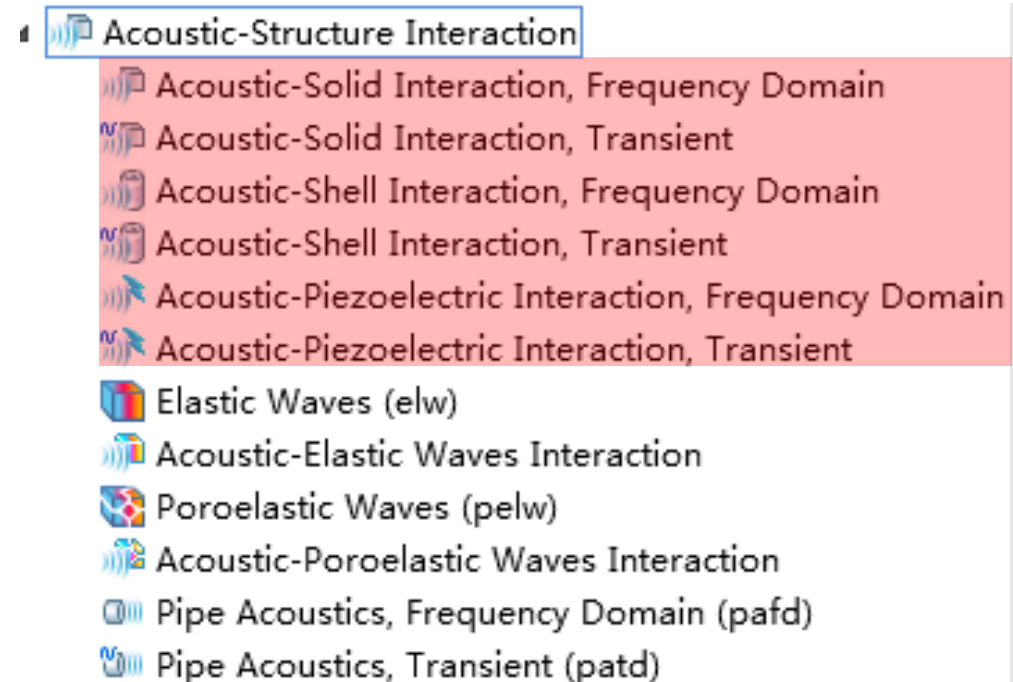
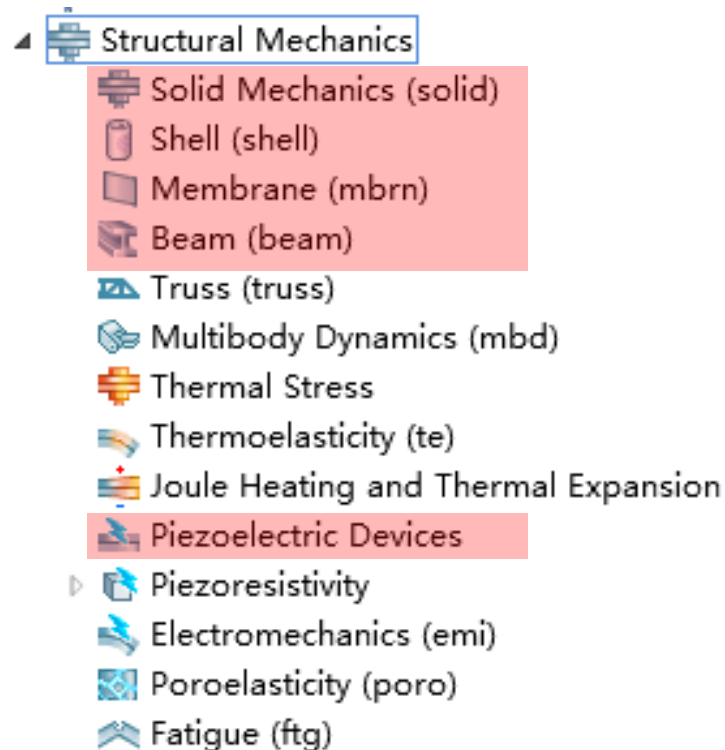
- COMSOL Multiphysics为解决这些问题提供了方便快捷准确的工具。

多物理场耦合

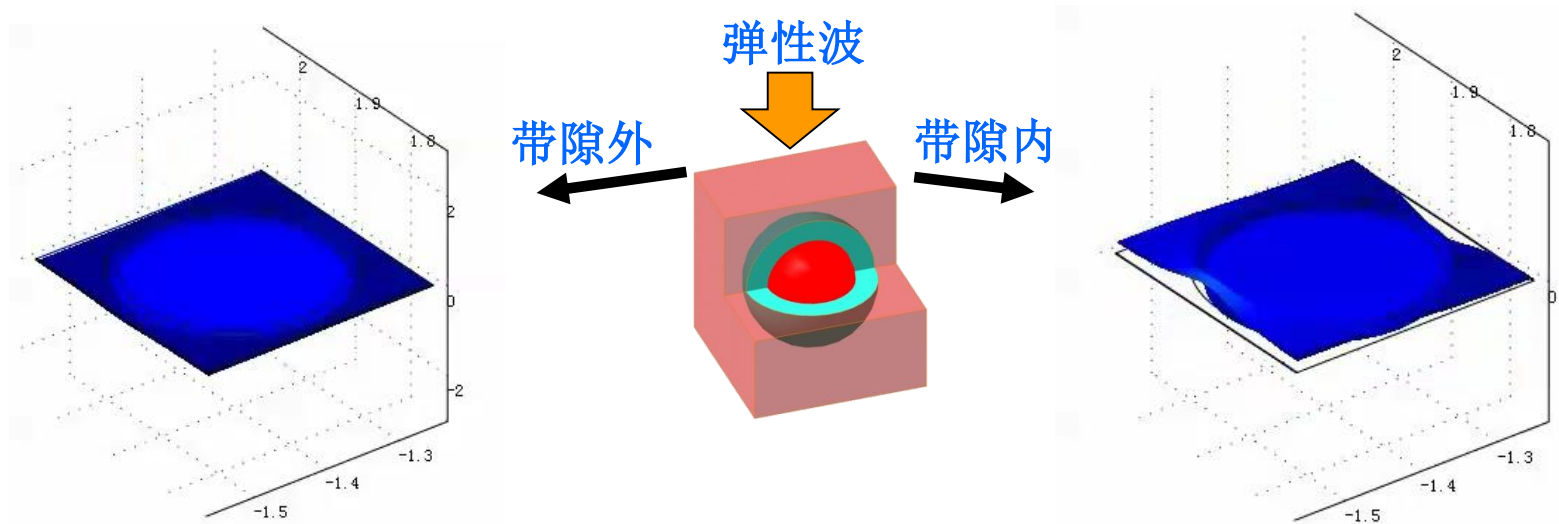


- COMSOL Multiphysics为解决这些问题提供了方便快捷准确的工具。

多物理场耦合接口



- 利用声学超材料局域共振带隙特性，设计低频吸声材料。
 - 带隙可以抑制声波在超材料中的传播，并通过粘弹性基体材料耗散能量。

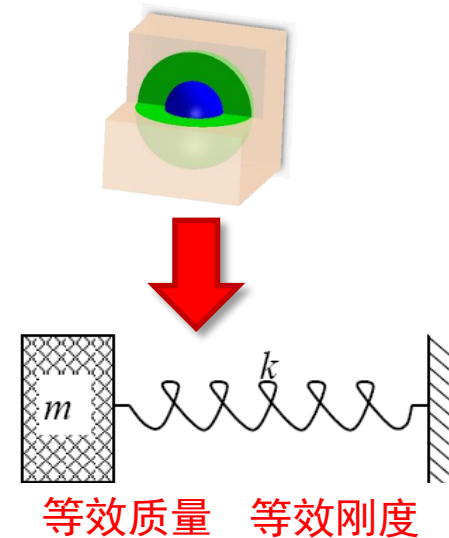
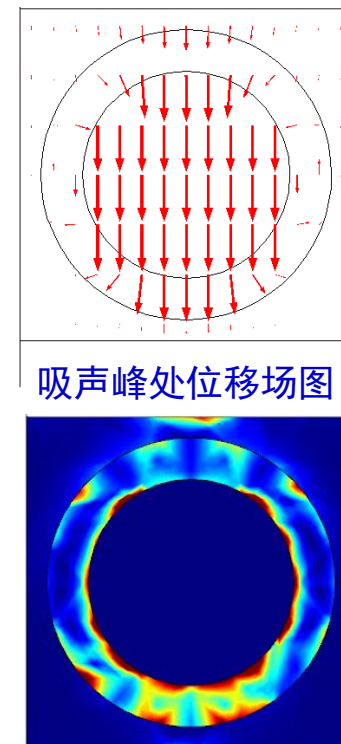
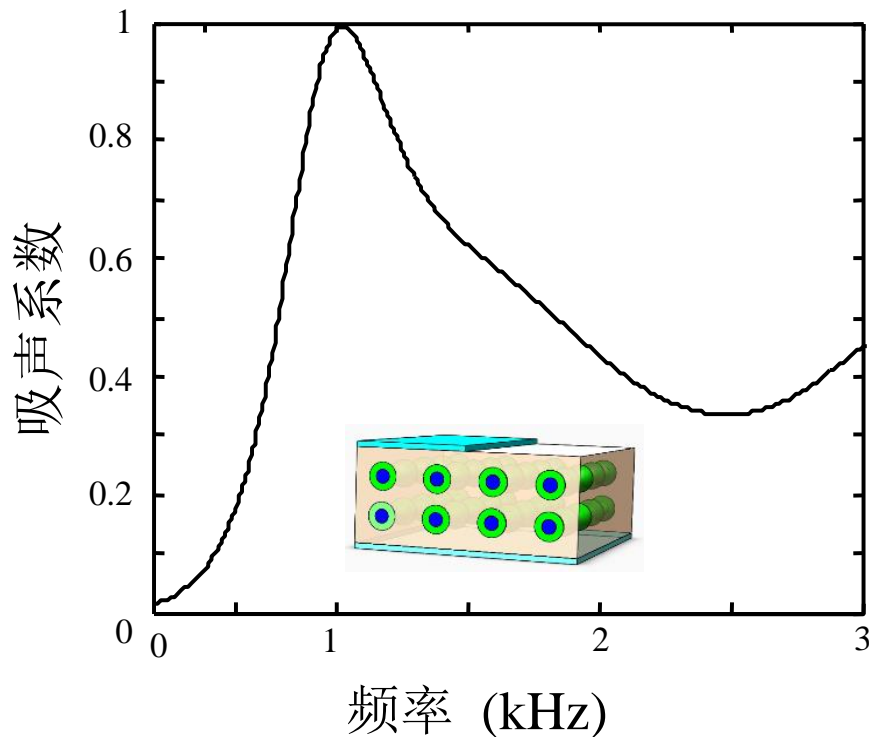


带隙外局域共振单元随基体弹性波同相运动，允许弹性波传播

带隙内局域共振单元反作用于基体弹性波，弹性波传播被抑制

水下低频吸声材料的设计

- 利用声学超材料局域共振带隙特性，设计低频吸声材料。
 - 带隙频率取决于局域共振单元的**共振频率**。

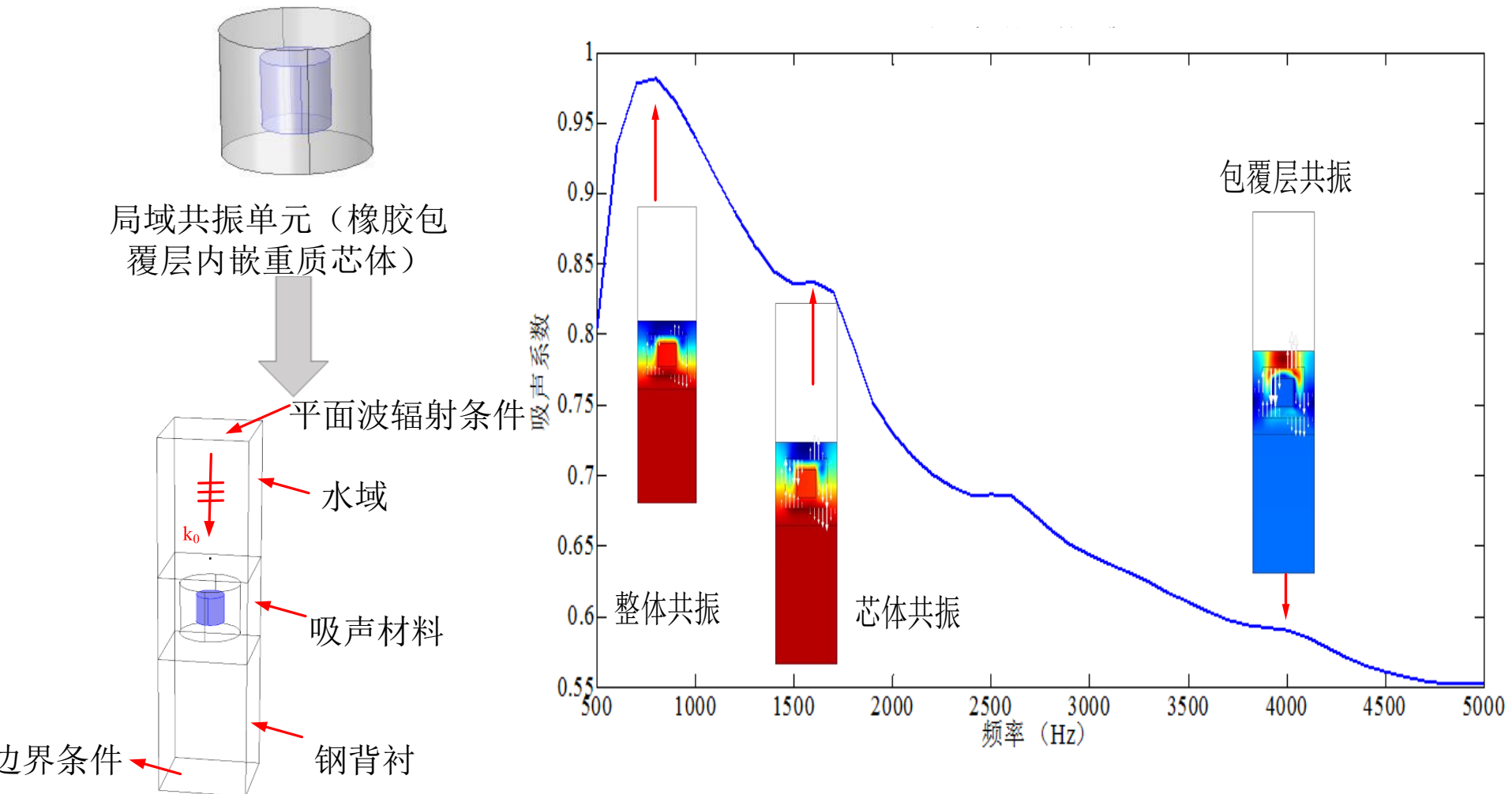


$$f \downarrow = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k \downarrow}{m \uparrow}}$$

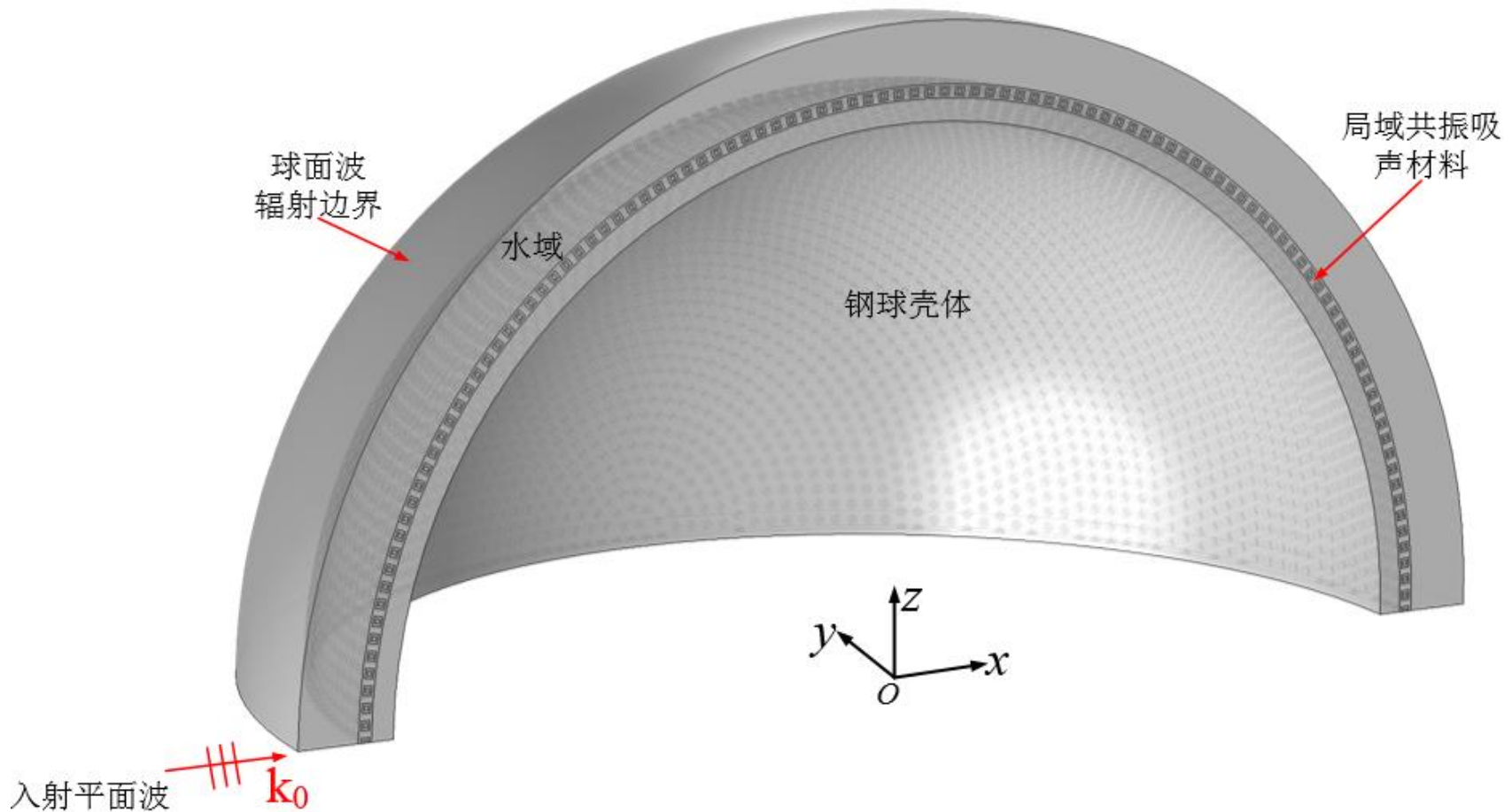
等效模型共振频率

吸声峰处能量耗散密度

• COMSOL建模分析——单元胞无限模型

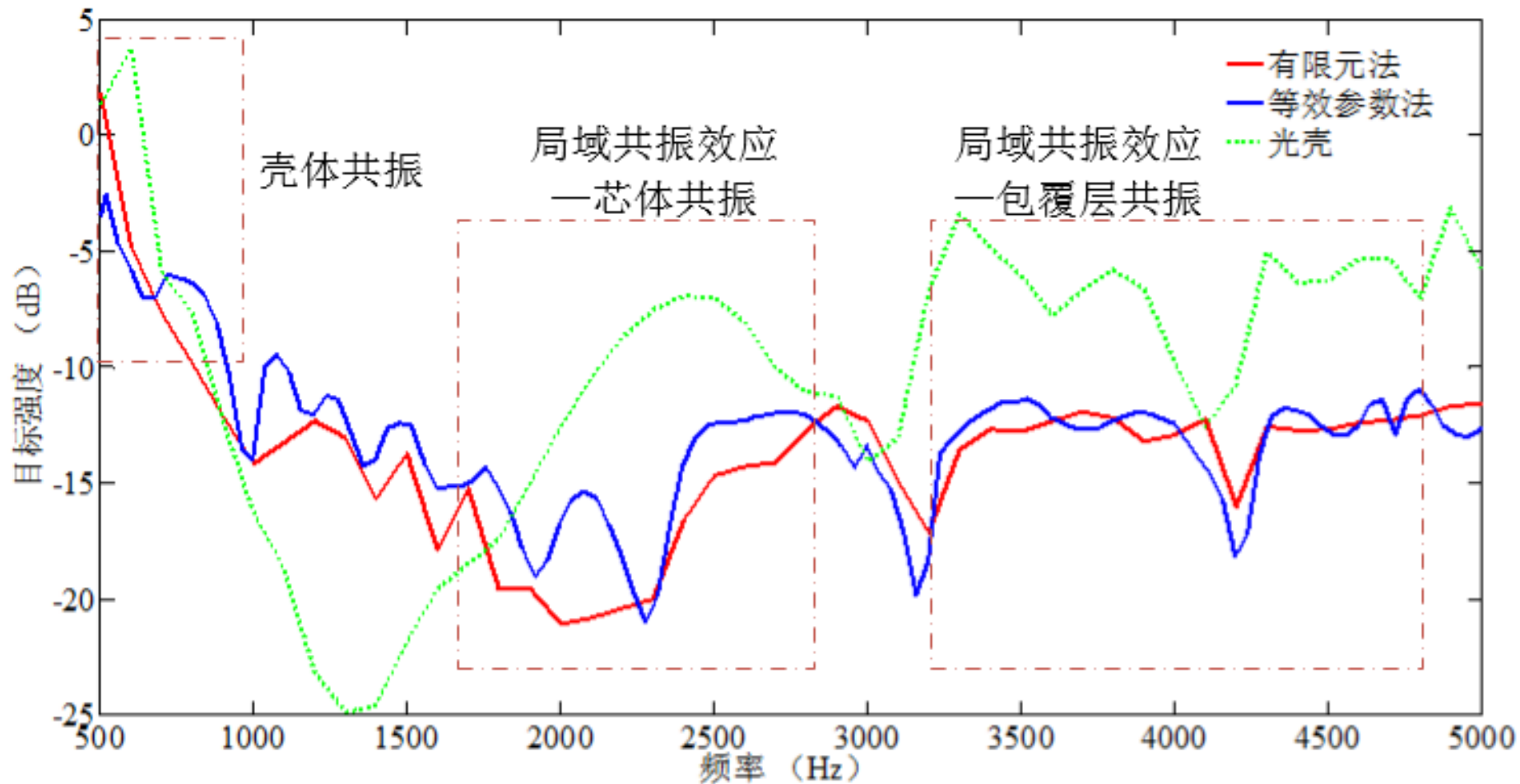


- COMSOL建模分析——有限尺寸模型



敷设声学覆盖层壳体模型

• COMSOL建模分析——有限尺寸模型



敷设声学覆盖层壳体目标强度

- COMSOL建模分析——有限尺寸模型

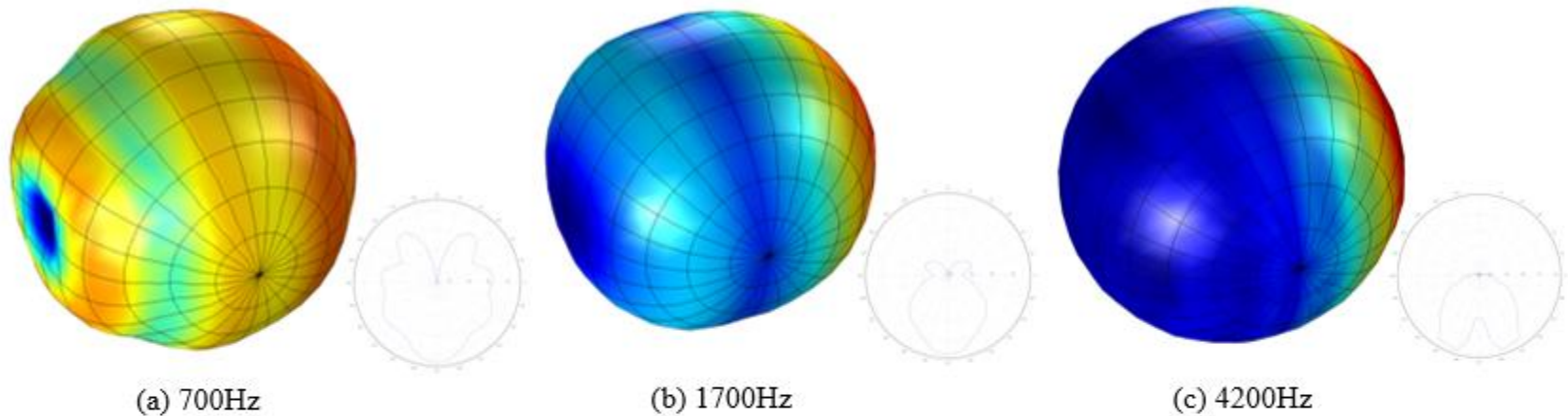


图1 远场声压

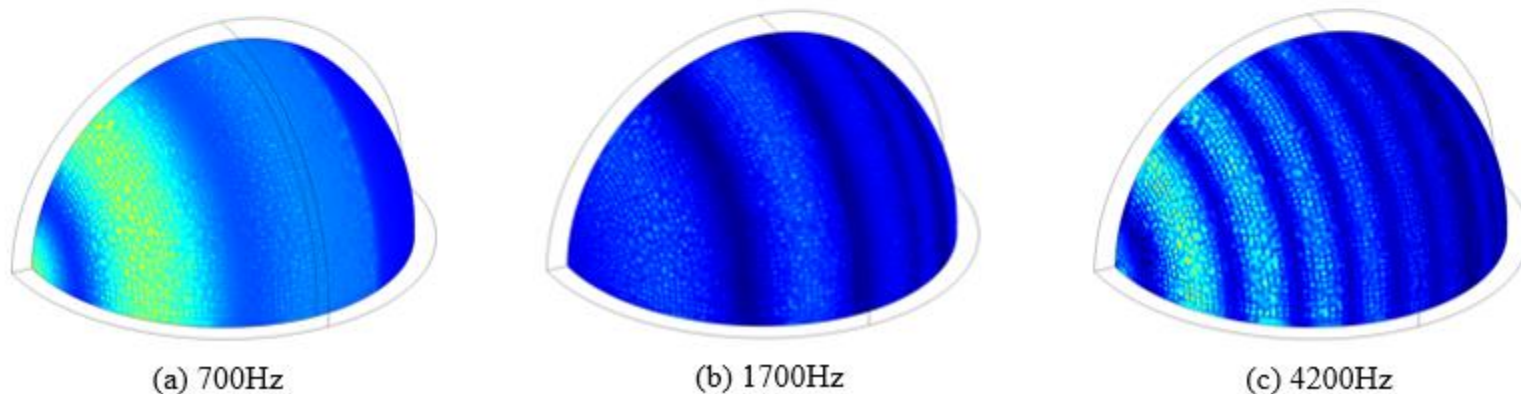
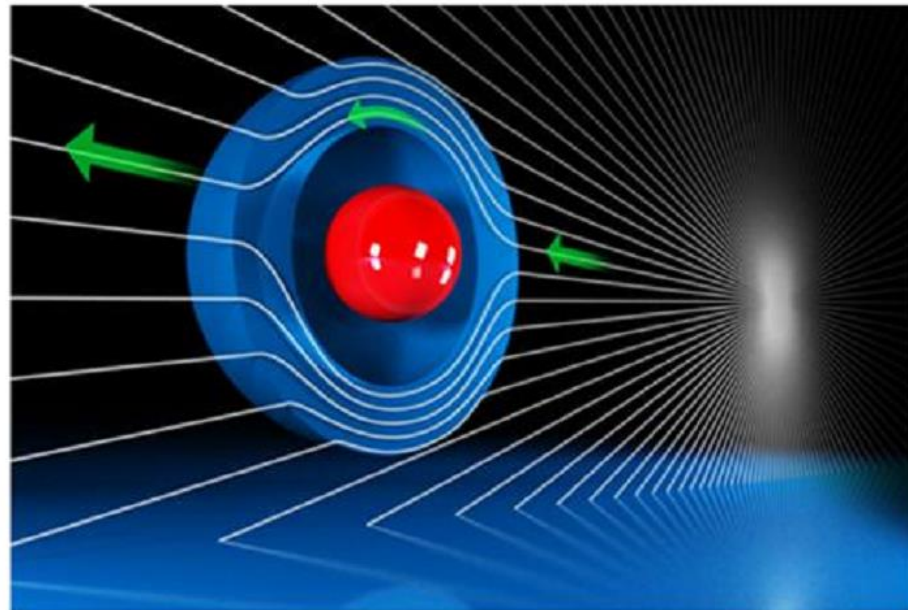


图2 吸声材料位移

敷设声学覆盖层壳体远场声压与壳体位移云图

声隐身斗篷的设计

- 声隐身斗篷是目前声学超材料领域中的研究热点之一，它通过设计密度或模量各向异性材料，人为构造一个覆盖障碍物的壳体，使声波绕开被覆盖区域而在这种材料中穿行而过。



声隐身斗篷的设计

- 声隐身斗篷实现的关键是超材料各向异性材料参数的实现。这一点在COMSOL中可以轻松实现。

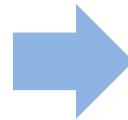
斗篷材料参数

$$\rho_1(r) = \rho_r(r) + \sqrt{\rho_r^2(r) - \rho_b^2} = \frac{r}{r - R_1} + \sqrt{\frac{2R_1}{r - R_1}}$$

$$c_1(r) = \sqrt{\frac{B^* \rho_r}{\rho_b^2}} = \frac{R_2 - R_1}{R_2} \frac{r}{r - R_1} c_b$$

$$\rho_2(r) = \rho_b^2 / \rho_1 = \frac{r - R_1}{r + \sqrt{2R_1(r - R_1)}}$$

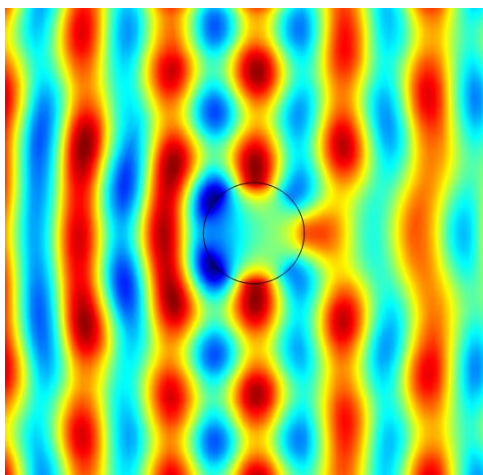
$$c_2(r) = c_1(r) = \frac{R_2 - R_1}{R_2} \frac{r}{r - R_1} c_b$$



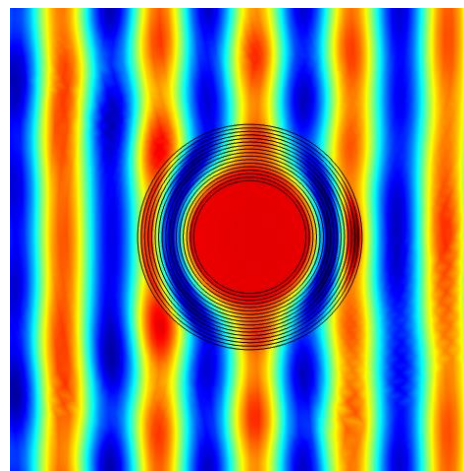
名称	表达式	单位
r	sqrt(x^2+y^2)	m
rho1	rhob*(r+sqrt(2*r*R1-R1^2))/(r-R1)	kg/m ³
c1	cb*(R2-R1)/R2*r/(r-R1)	m/s
rho2	rhob^2/rho1	kg/m ³
c2	c1	m/s

声隐身斗篷各向异性参数设置

- 声隐身斗篷实现的关键是超材料各向异性材料参数的实现。这一点在COMSOL中可以轻松实现。



未敷设声学斗篷



敷设声学斗篷

COMSOL仿真计算结果

- COMSOL为开展减振降噪研究提供了有力的工具
- 软件中灵活的参数设置功能，建模功能，多物理场耦合接口为可以快速建模并解决复杂动力学问题
- 软件计算功能强大，其并行计算功能可以用于多尺度大规模有限元模型的求解

COMSOL
CONFERENCE
2015 北京

谢谢!

