

一款经典开口式音箱的仿真分析

浙江中科电声研发中心
陆晓

目录

- 背景
- 一款经典开口式音箱
- 仿真所涉及的物理场
- 仿真结果
- 总结

背景-1

- 作为智能家居的控制中心，智能音箱融合了人工智能、语音识别、大数据和云计算等诸多先进技术。



(a) 亚马逊



(b) 苹果



(c) 微软



(d) 谷歌



(e) 京东



(f) 小米

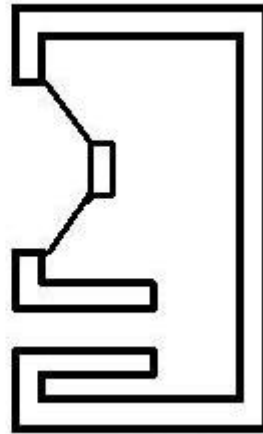
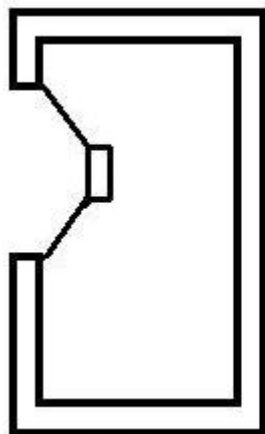
图1 高科和互联网巨头推出的智能音箱

以上图片来自网络

中科电声版权所有，未经书面同意，不得复制、修改和泄露！

背景-2

- 音箱仍是智能音箱最基本的属性，发出悦耳的声音还是智能音箱最基本也是最重要的技术指标之一。智能音箱火爆全球，它给电声产业带来千载难逢的机遇和挑战。
- 开口式音箱与闭箱相比，具有功率更大、截止频率更低和效率更高的特点

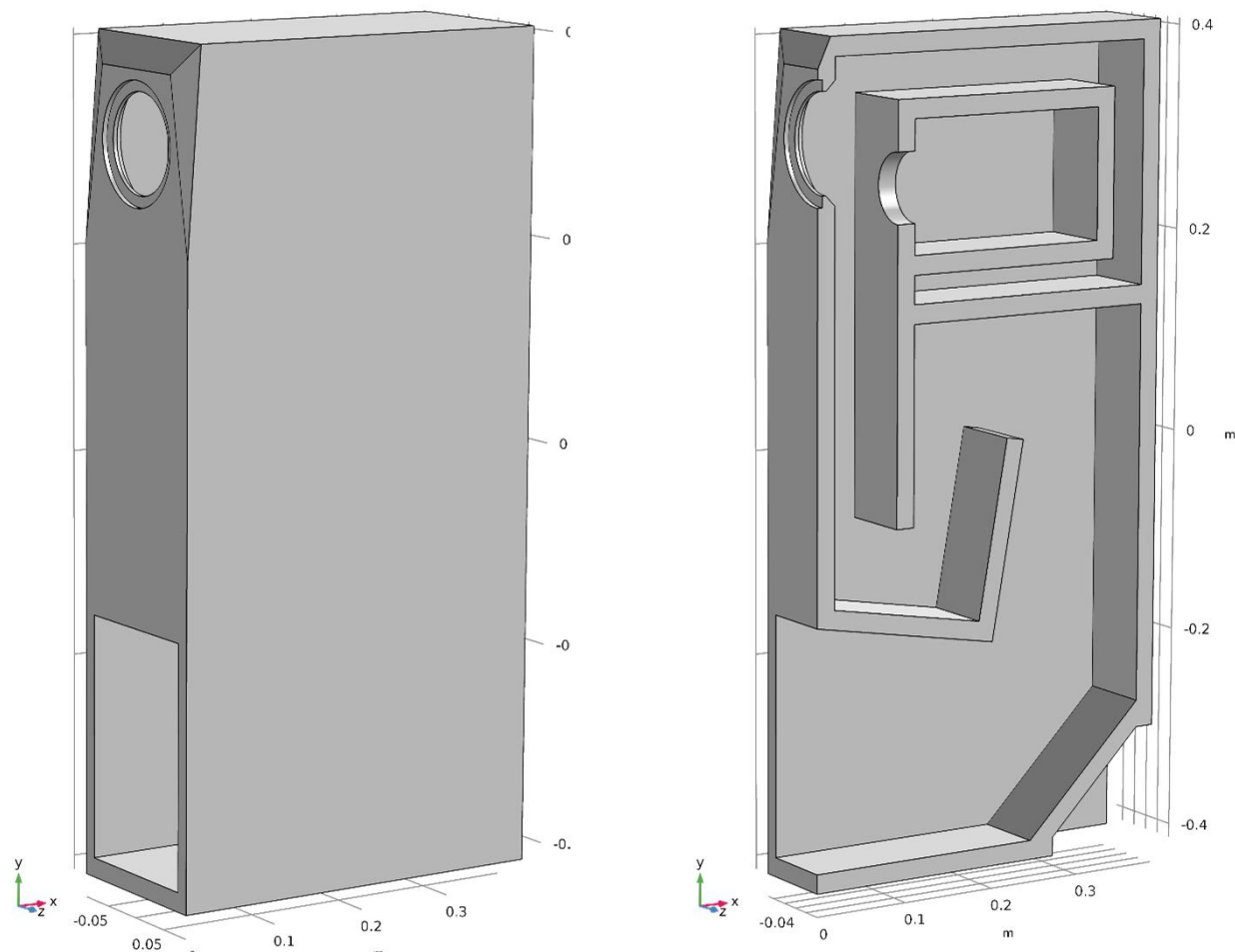


以上图片来自网络

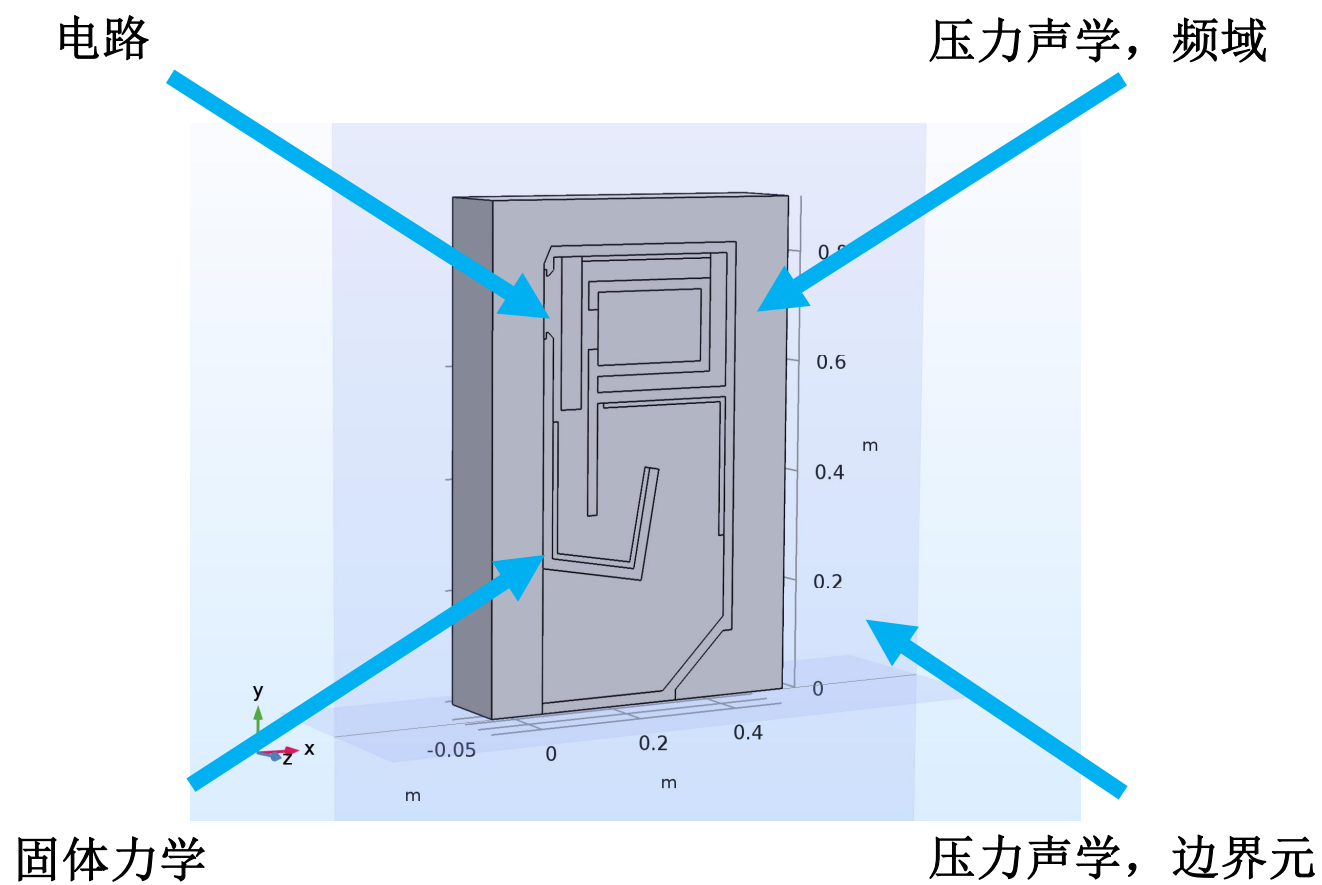
中科电声版权所有，未经书面同意，不得复制、修改和泄露！

一款经典开口式音箱-2

- 特殊设计的音箱内部结构，使得音箱的音质更出色。

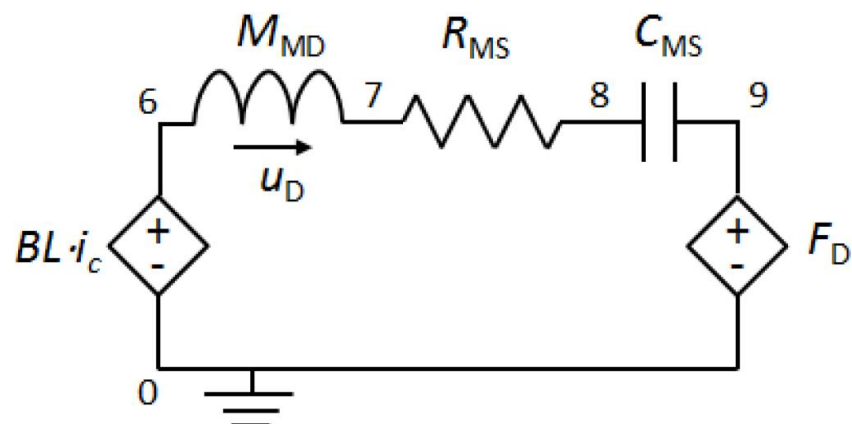
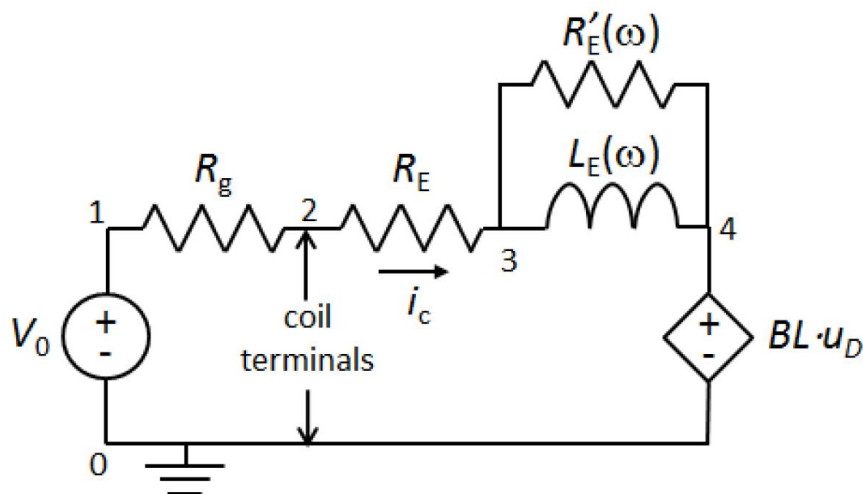


仿真所涉及的物理场-1



仿真所涉及的物理场-2-电路

- 在“电路”接口中建立扬声器磁路和振动系统的等效电路模型，可计算出活塞辐射面上的加速度；
- 该等效电路模型可采用阻抗型类比。



$$L_E(\omega) = \left[\frac{L_E}{\sin\left(n_e \frac{\pi}{2}\right)} \right] \omega^{(n_e-1)}$$

$$R'_E(\omega) = \left[\frac{L_E}{\cos\left(n_e \frac{\pi}{2}\right)} \right] \omega^{n_e}$$

n_e 为音圈损耗因子，该模型中取值0.7。

F_D : 辐射面受到来自声场的反作用力

$$F_D = \int (\Delta p \cdot n_z) dA$$

仿真所涉及的物理场-2-电路

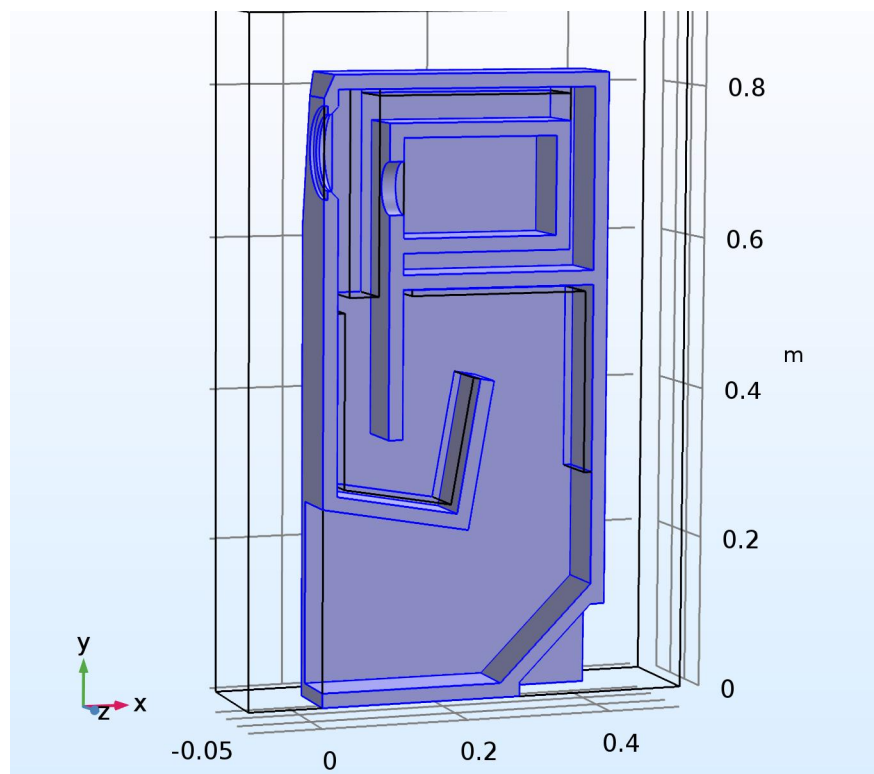
- 从 HOBBY HiFi 杂志可获得该扬声器的T/S参数。

参数			
名称	表达式	值	描述
fmax	2[kHz]	2000 Hz	Maximal study frequency
c0	343[m/s]	343 m/s	Speed of sound in air
rho0	1.29[kg/m^3]	1.29 kg/m ³	Density of air
M_MD	3.71392[g]	0.0037139 kg	Moving mass (voice coil and diaphragm)
C_MS	1.2e-3[m/N]	0.0012 s ² /kg	Suspension compliance
R_MS	0.46[kg/s]	0.46 kg/s	Suspension mechanical losses
BL	4.9[N/A]	4.9 Wb/m	Force factor, flux density (B) times coil length (L)
R_E	6.1[ohm]	6.1 Ω	Voice coil resistance
L_e	0.14[mH]	1.4E-4 H	Voice coil inductance (constant)
n_e	0.7	0.7	Voice coil loss factor
V0	sqrt(8)[V]	2.8284 V	Driving voltage (peak)
V0rms	V0/sqrt(2)	2 V	Driving voltage (rms)
R_g	0[ohm]	0 Ω	Driver output resistance
a	6[cm]	0.06 m	Piston radius of driver (equivalent)
S_D	a^2*pi	0.01131 m ²	Driver equivalent area
M_MS	M_MD+2*S_D^2*8*rho0/(3*pi^2*a)	0.0052 kg	Moving mass (including acoustic load)
Fs	63[Hz]	63 Hz	Fundamental resonant frequency
Q_ES	0.52	0.52	Electrical Q factor at Fs
Q_MS	4.4	4.4	Mechanical Q factor at Fs
Q_TS	0.47	0.47	Total Q factor of driver at Fs
V_AS	3.9[L]	0.0039 m ³	Equivalent volume compliance



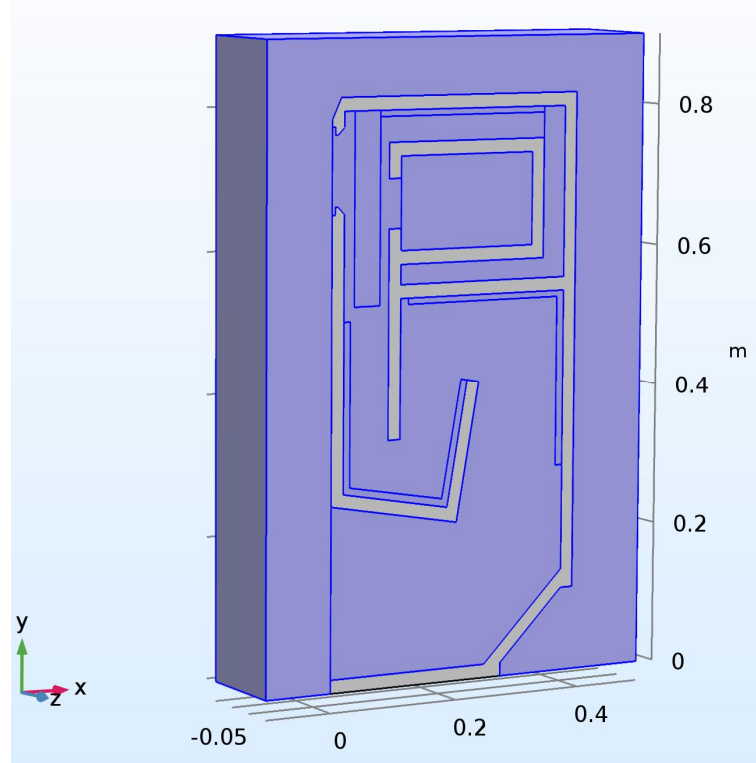
仿真所涉及的物理场-3-固体力学

- 使用“固体力学”接口，同时考虑箱体的结构振动和声场的耦合作用。
- 基于有限元方法求解；
- 指定对称边界和固定约束边界。



仿真所涉及的物理场-4-压力声学，频域

- 基于有限元方法求解。
- 建立包围音箱的长方体空气域。
- 因音箱放置于地面上，故空气域不需包围音箱底面。

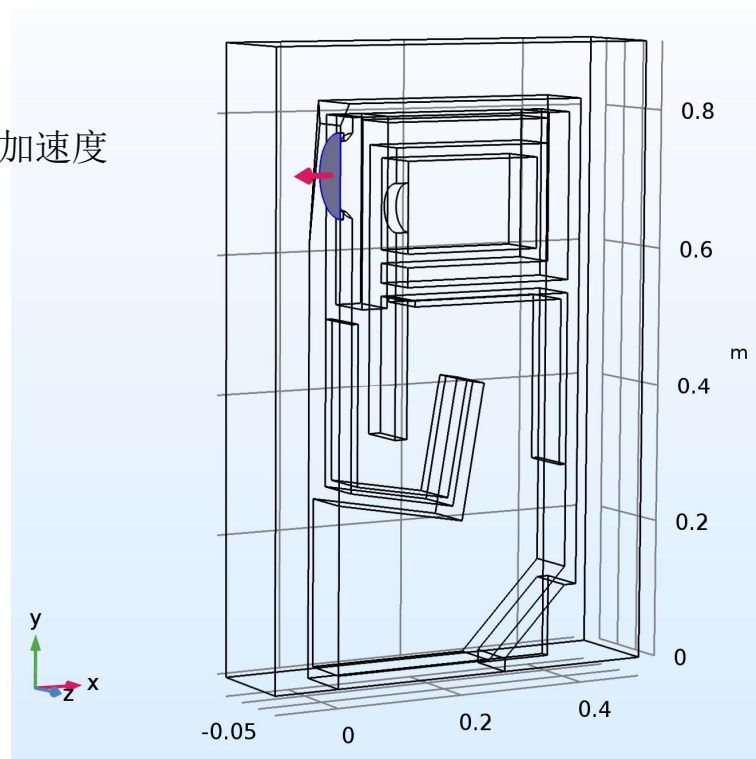


仿真所涉及的物理场-4-压力声学，频域

- 将声源（辐射面）等效为一个平板活塞；
- 辐射面上的法向加速度由“电路”物理场接口计算得到；

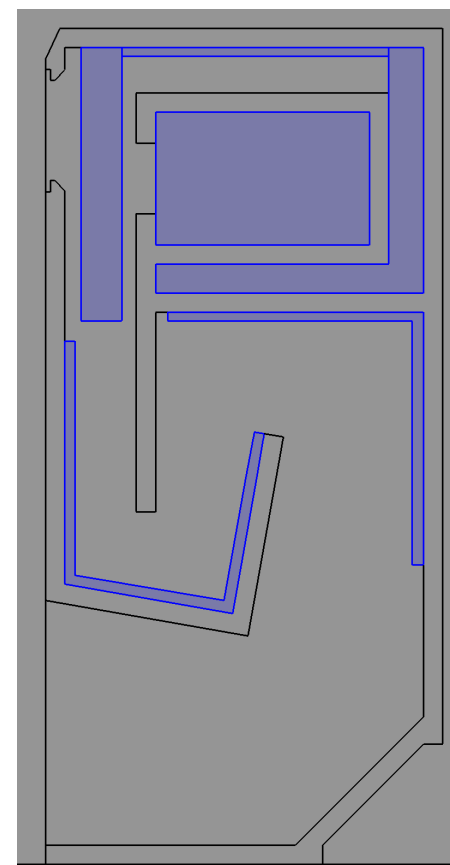
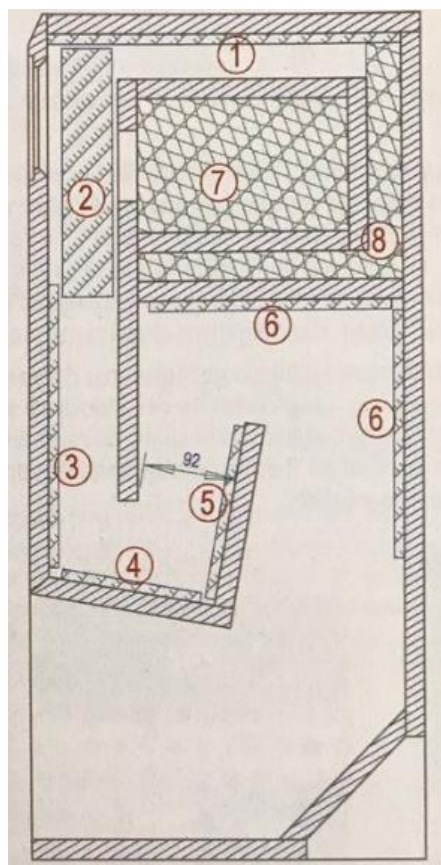
\mathbf{a} : 辐射面的法向加速度

$$\mathbf{a} = i\omega u_D \mathbf{e}_x$$



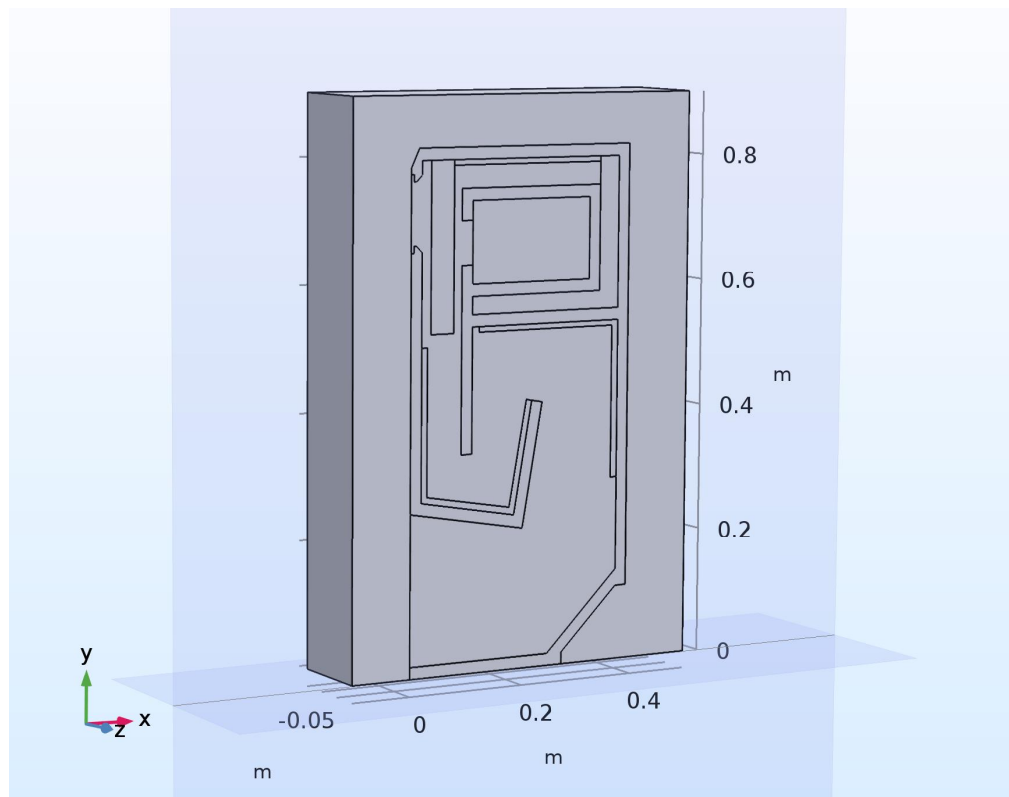
仿真所涉及的物理场-4-压力声学，频域

- 建立吸音棉的 **Delany-Bazley-Miki** 多孔介质声学模型，需要设置其流阻率和密度等材料参数。



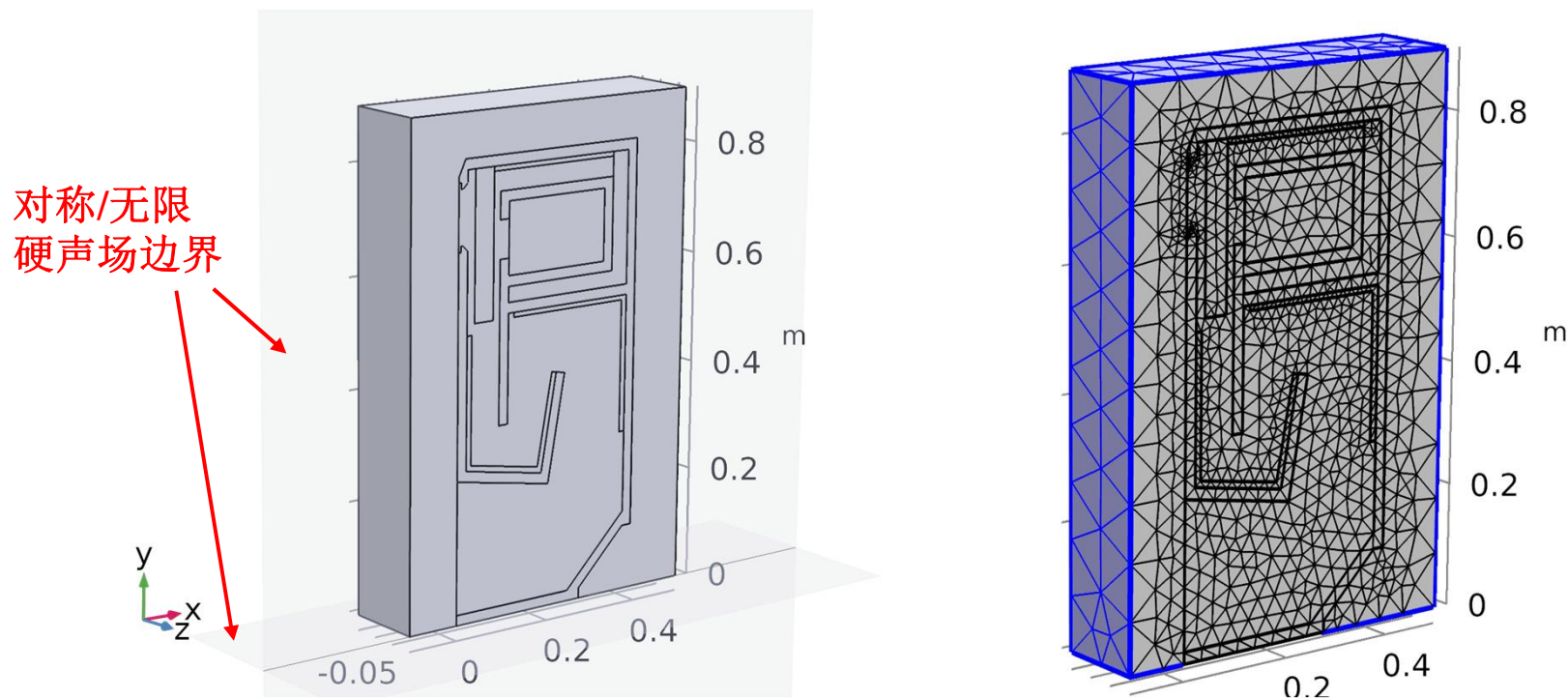
仿真所涉及的物理场-5-压力声学，边界元

- 无限空域部分；
- 基于边界元方法求解。

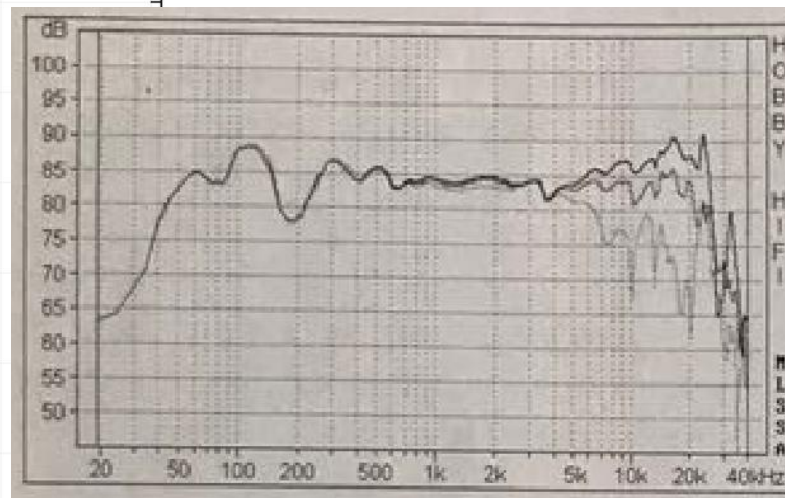
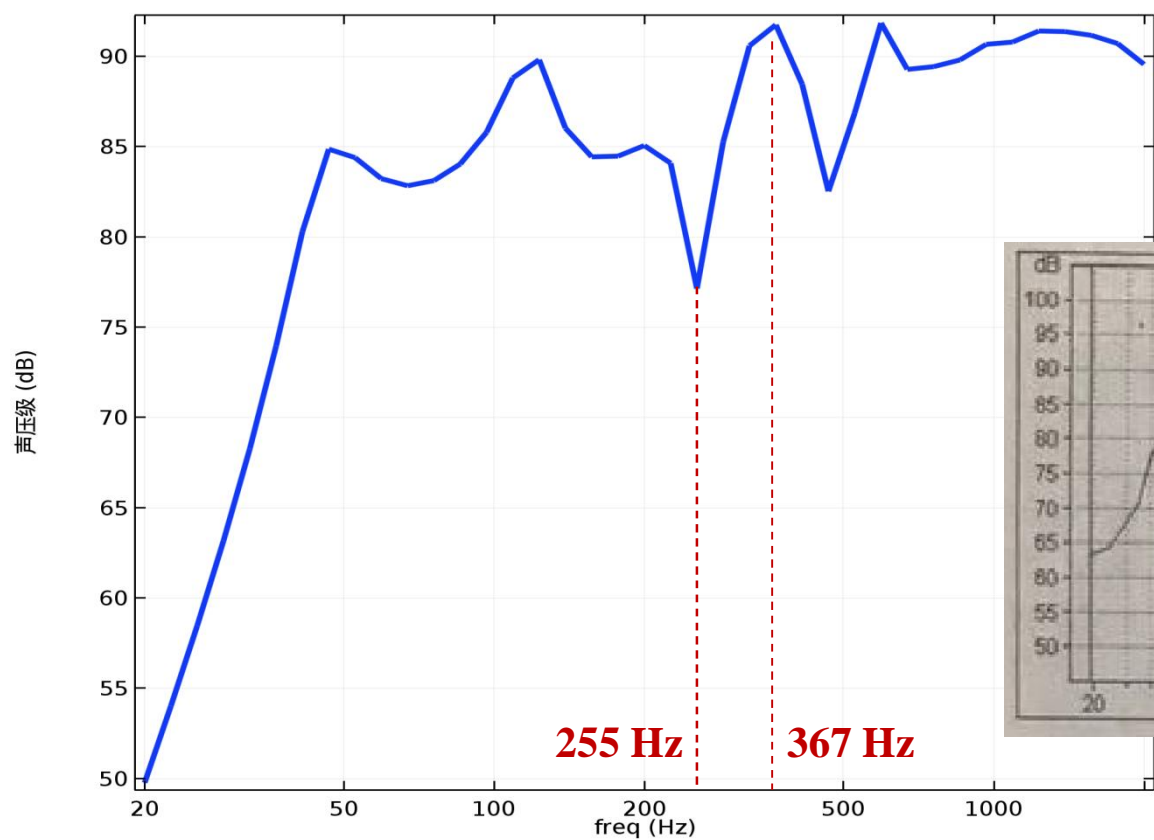


仿真所涉及的物理场-5-压力声学，边界元

- 根据音箱的工作环境，设置**对称/无限边界条件**；
- 边界元表面的网格也要满足一个波长内**5到6个单元**的网格划分原则。



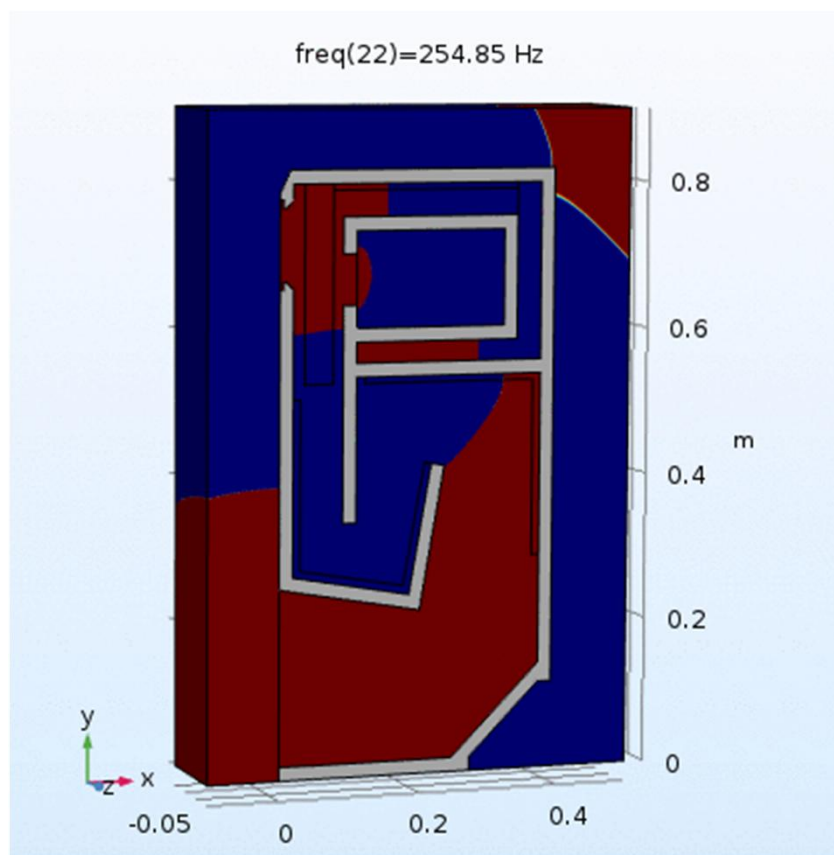
仿真结果-1-声压级曲线



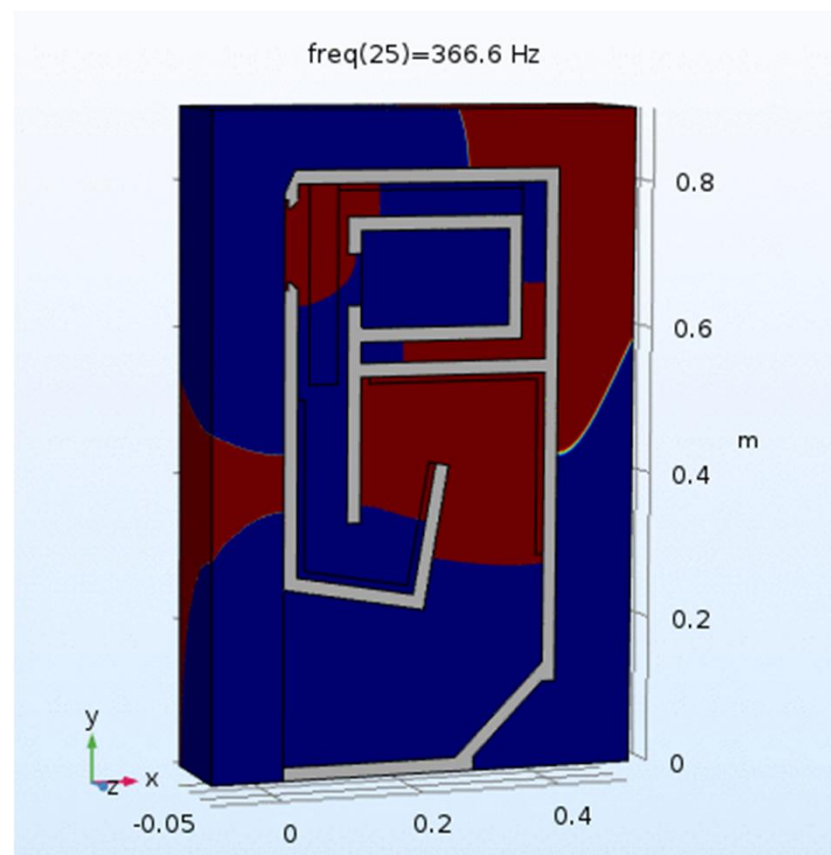
HOBBY HiFi给出的测量结果

仿真结果-2-声波传递动画

- 倒相孔在声波传递过程中的作用。



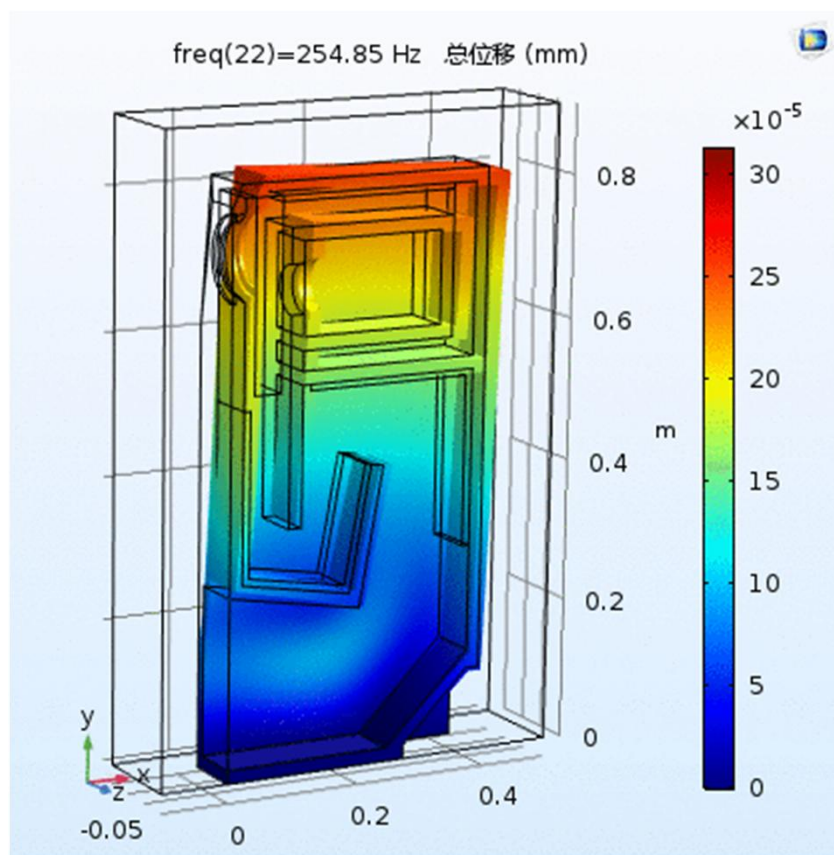
255 Hz



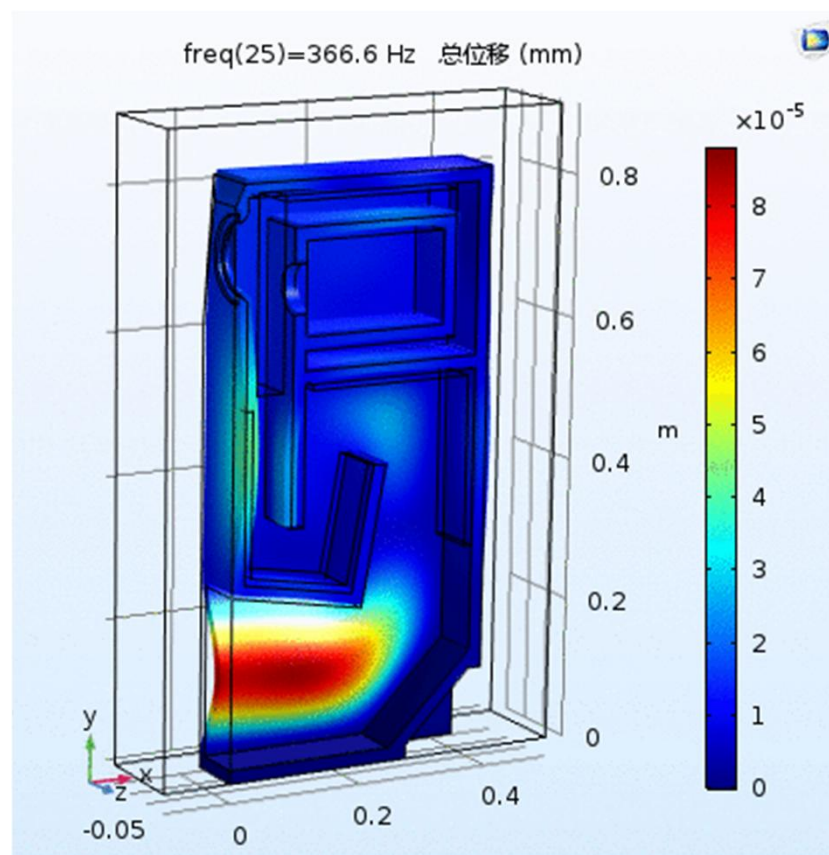
367 Hz

仿真结果-3-音箱的振动

- 箱体的振动位移。



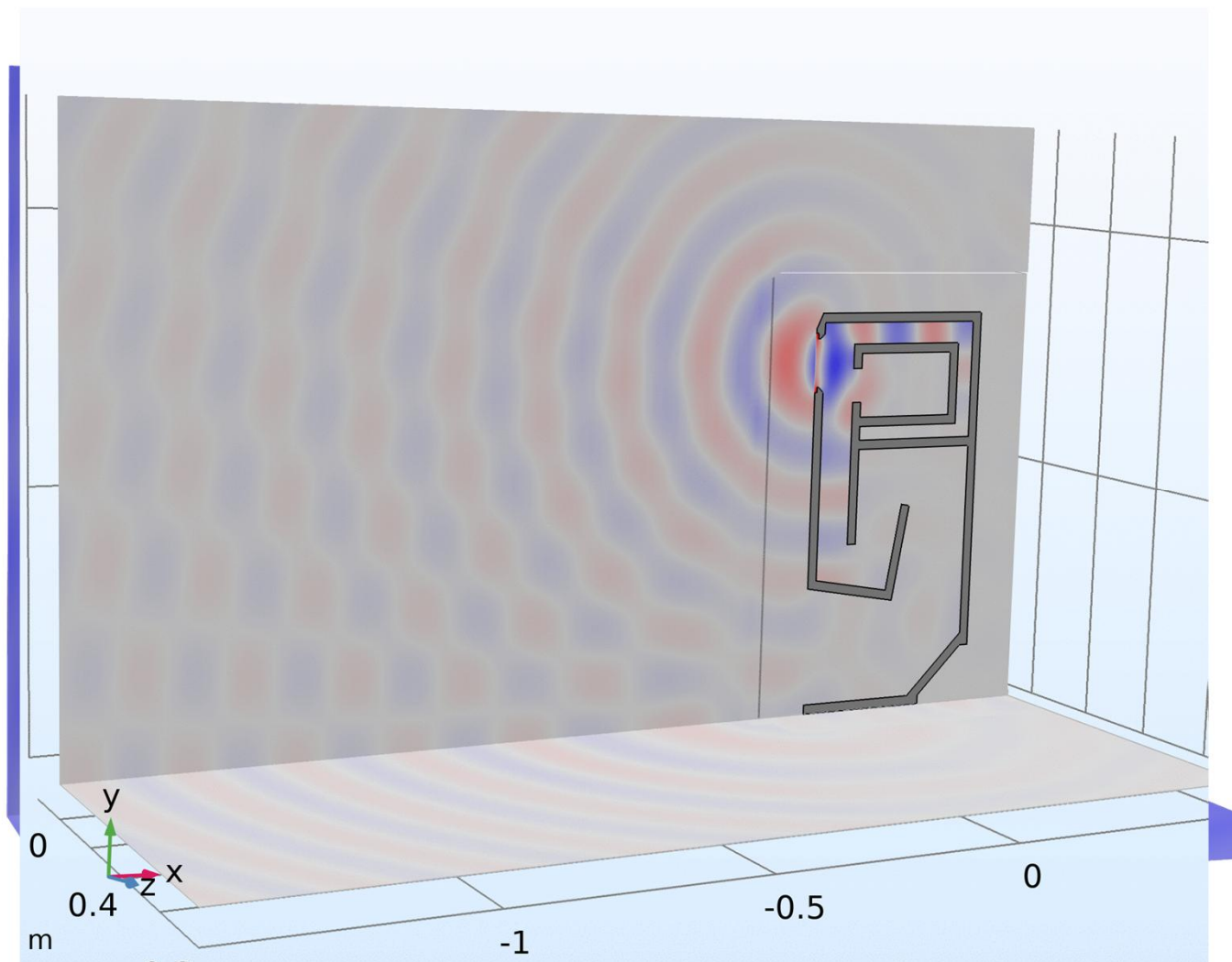
255 Hz



367 Hz

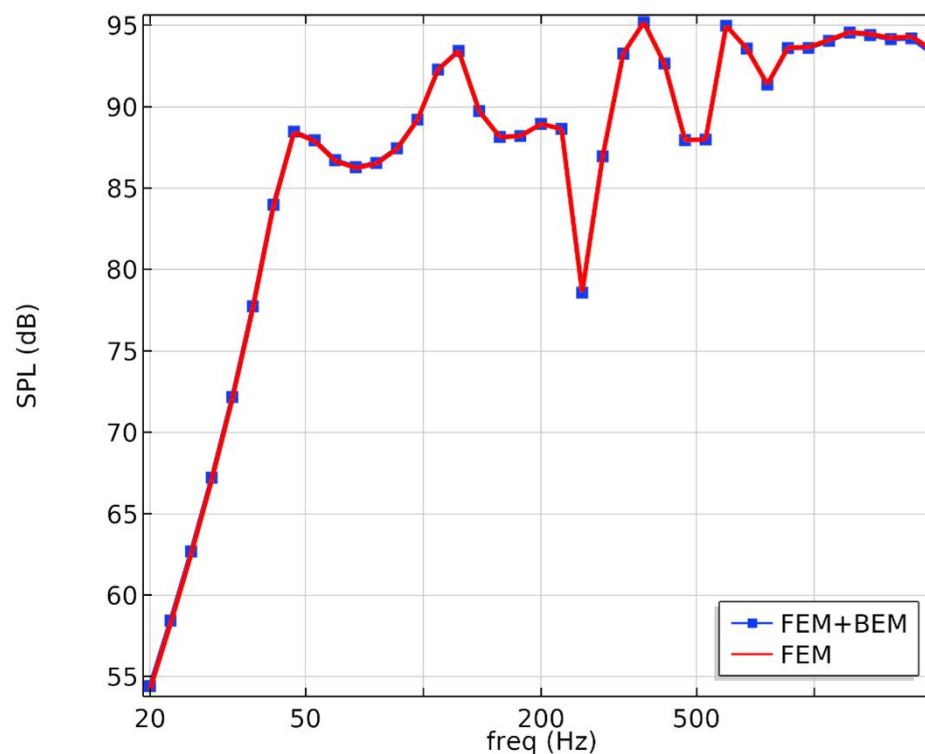
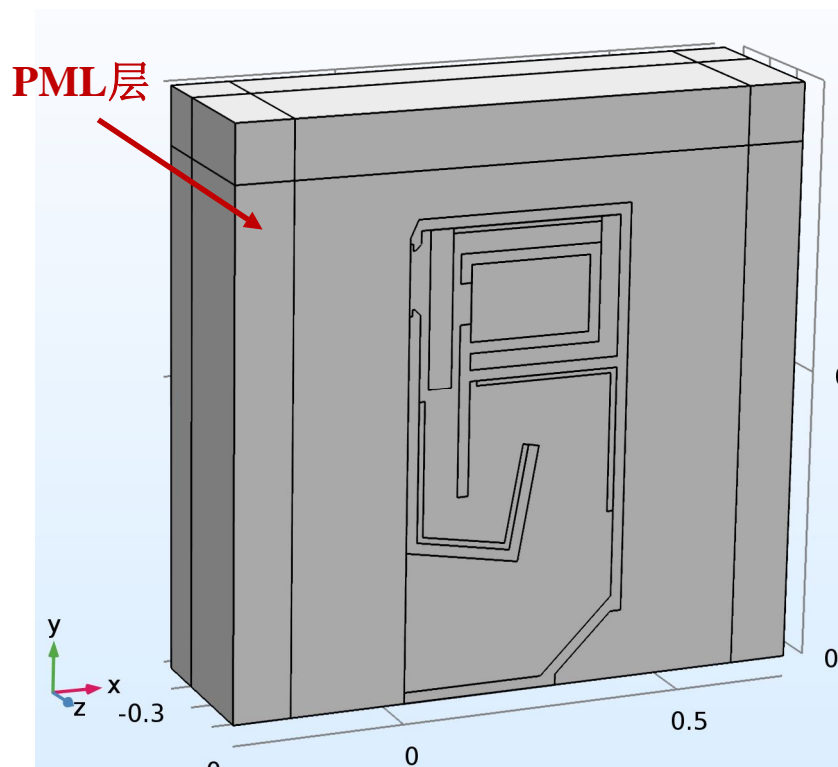
仿真结果-4-声场分布

- 箱体内外的声场分布图。



仿真结果-5

- 有限元耦合边界元 vs 有限元
 - 针对该音箱声场的仿真模型，有限元耦合边界元法计算耗时约14 min，有限元法计算耗时约26 min；
 - 在保证相同计算精度的前提下，有限元耦合边界元法的计算效率较高。



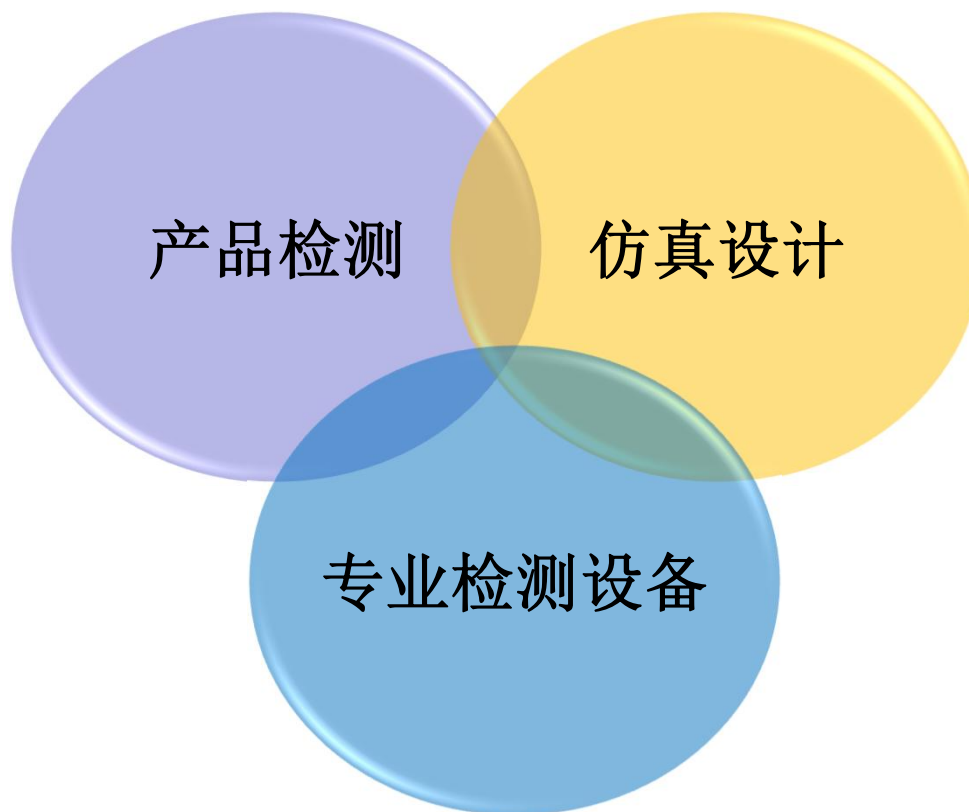
总结

- 建立了一套完整且高效的音箱低频声场特性的仿真分析方法；
- 使用有限元+边界元混合仿真分析方法以提升计算效率，可减少约一半计算时间；
- 声压级的仿真结果与测量结果不仅趋势非常吻合，并且几个主要峰谷频率点也非常一致。

中科电声-1-简介

- 2007年由中国科学院声学研究所与浙江省嘉善县人民政府共同投资组建；
- 2010年牵头创建浙江省嘉善电声产业技术创新服务平台（省级重大科技创新服务平台）；
- 2010年与浙江省嘉善县质监局合作共建浙江省电子电声产品质量检验中心（省级产品检测中心）；
- 2015年成为中国首个COMSOL认证咨询机构；
- 已申请22项发明专利（其中15项已获授权）；
- 已发表10篇学术论文。





中科电声-3-产品检测

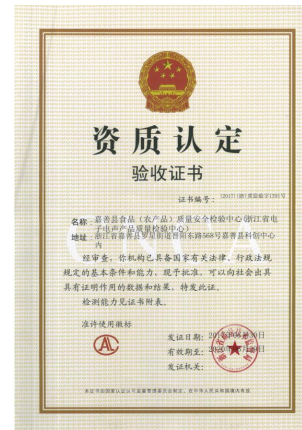
- 基于中科电声高规格实验室和诸多高端仪器设备，中科电声已向江浙沪、广东、山东、福建和江西等省市的百余家企事业单位或个人提供了各类产品性能或特性的检验检测项目。
- 客户送测产品既包括国家标准规定中的七大类电声产品，也有许多非国家标准规定范围内的电声产品，还包括噪声源测试等。



全消声实验室

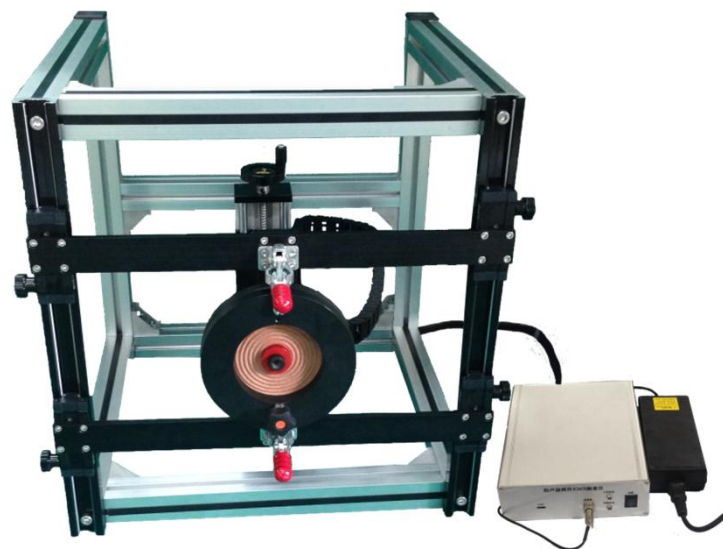
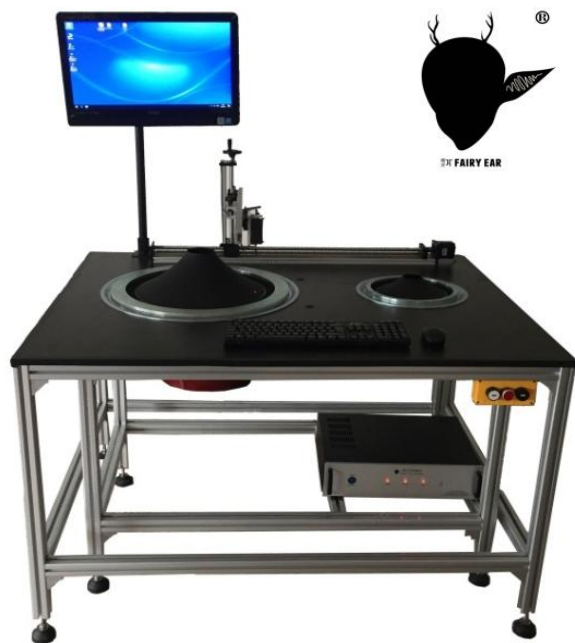
净空尺寸：9.25 × 8.4 × 6.95 m³；截止频率：68 Hz；

本底噪声：1.0 dB(A)；自由场半径：3~4 m。



中科电声-4-专业检测设备

- 中科电声已研制的电声专业检测设备包括：扬声器异常音和常规参数在线检测仪、扬声器振膜F0检测仪、扬声器部件变位测量仪、扬声器部件劲度系数测量仪、扬声器驱动力系数测量仪、扬声器功率寿命测量仪和扬声器部件粘弹性测量仪等；
- 以上设备的需求均来自电声企业，产品特性和功能也是针对性地解决电声企业在研发和生产过程中的技术难题。



中科电声-5-仿真设计

- 所涉及的扬声器特性包括磁路、振动系统、声场、温度场和失真特性，以及扬声器结构振动和强度等特性；
- 所分析的对象包括扬声器单体、音箱、消音箱、耳机和车内声场等；
- 中科电声的服务方式主要是咨询服务（包括答疑、项目、战略合作伙伴关系等）；
- 所服务的客户主要是电声企业和电声工程师，服务企业近百家，涵盖了国内电声业界的主要先锋企业。

中科电声客户



Beta Three
贝塔斯瑞



谢谢！ 期待与大家合作。

浙江中科电声研发中心
Zhejiang Electro-Acoustic R&D Center, CAS

浙江嘉善
晋阳东路568号（科创中心）
1号楼1107-1307室
邮编：314100
电话：+86 573 84291361
传真：+86 573 84291362
电邮：jsbs@mail.ioa.ac.cn
网址：www.zkds.net



www.zkds.net