

## 前言

本应用笔记用于 MEMS 麦克风垫片设计参考，它提供了建议和最佳实践，以取得这些设备的最佳声音性能。

## 目录

1	声音垫片和密封指导 .....	5
1.1	在消费应用中密封 MEMS 麦克风的最佳实践 .....	5
1.2	声学理论 .....	5
1.3	垫片设计建议 .....	7
附录 A	书目 .....	17
2	版本历史 .....	18

## 图片索引

图 1.	应用举例 . . . . .	5
图 2.	MP34DT01 X 射线 . . . . .	7
图 3.	待模拟的 MEMS 麦克风腔面 . . . . .	8
图 4.	MP34DT01 频率响应 . . . . .	8
图 5.	MP34DT01 频率响应 vs. 管长 . . . . .	9
图 6.	MP34DT01 频率响应 vs. 管径 . . . . .	9
图 7.	仿真的复杂几何结构 . . . . .	10
图 8.	MP34DT01 频率响应 vs. 复杂几何结构 . . . . .	11
图 9.	子域材料 . . . . .	13
图 10.	谐振峰值幅度 vs. 材料 . . . . .	14
图 11.	平板电脑举例 - 设计和声腔 . . . . .	15
图 12.	频率响应 . . . . .	15

## 表格索引

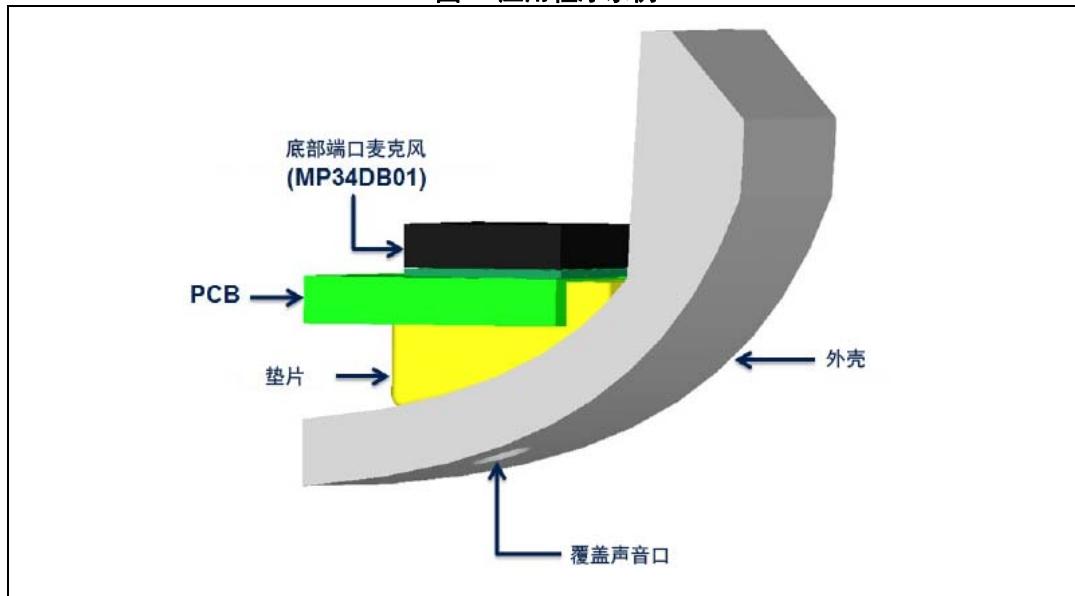
表 1.	谐振峰值 vs. 管长 . . . . .	9
表 2.	谐振峰值 vs. 管径 . . . . .	10
表 3.	谐振峰值 vs. 几何结构 . . . . .	12
表 4.	材料的声属性 . . . . .	13
表 5.	谐振峰值幅度 vs. 材料 . . . . .	14
表 6.	文档版本历史 . . . . .	18
表 7.	中文文档版本历史 . . . . .	18

# 1 声音垫片和密封指导

## 1.1 在消费应用中密封 MEMS 麦克风的最佳实践

MEMS 麦克风由于其形状特点，成为适合很多消费产品的元件，例如笔记本电脑、智能手机、平板电脑及一般便携式设备。消费设备已经变得越来越小而薄，麦克风的声音入口不直接放置在环境中。事实上，装有麦克风的设备一般有一个塑料壳。此机械结构需要设备外壳与声音入口之间有一个垫片，用于导引声波。此外，若麦克风为底部端口，则 PCB 宽度也会增加声源与麦克风声音入口间的路径。下图显示了平板电脑中使用的垫片示例。

图 1. 应用程序示例



基本上，由相关元件（对于底部端口封装，为外壳、垫片和 PCB）产生的声腔会改变麦克风的频率响应。调节声腔内静态波行为的公式很复杂，取决于相关的几何大小，例如外壳上的孔、垫片中的孔，以及仅适用于底部端口配置的 PCB 孔直径。此外，整个频率响应的行为还取决于这些元件的材料。因为这些原因，ST 提供了使用专业工具 COMSOL® 进行的频率响应行为仿真。下面的章节说明了使用此工具进行的实验，用以确定设计适当垫片的基本指导。

## 1.2 声学理论

在麦克风应用中，声音入口顶部放置的垫片成为了谐振器。声谐振器以下述方式工作：当空气受迫进入腔体时，内部的压力增加；当推动空气进入腔体的外力移除后，内部的高压空气流出。腔体压力会稍低于外部，导致空气退回去。此过程会重复发生，压力幅度的变化每次降低。端口（室颈）内的空气具有质量。因为它在运动中，所以它具有一定动量。端口越长，质量越大，反之亦然。端口的直径与空气质量、腔室容量有关。腔室体积区域的端口太小会“窒息”气流，而腔室体积区域的端口太大则会降低端口中空气的动量。

亥姆霍兹谐振为腔体中空气谐振现象，例如当空气吹过空瓶子的顶部时。该名称来自 19 世纪 50 年代赫尔曼·冯·亥姆霍兹发明的设备“亥姆霍兹谐振器”，他作为声学经典理论的作者，使用该设备来识别音乐和其它复杂声音中存在的各种频率或音乐音高。若 MEMS 腔体的体积大于颈，则该谐振器完全对应于亥姆霍兹谐振器。更加普遍的是，可不考虑此条件，因为 MEMS 腔体的体积小于垫片腔体制造的整体容量。因此，因为调节声腔内静态波行为的公式很复杂，取决于每个相关声腔的几何大小，所以必须使用 COMSOL® 等仿真工具。

COMSOL® 工具支持五种分析声时常见的标准问题或场景：

1. 辐射问题：振动结构（例如扬声器）向周围空间辐射声音。若要为无边界的区域建模，必须使用非常远的边界条件。
2. 散射问题：入射波接触物体，产生散射波。必须为非常远的辐射边界条件。
3. 内部空间（如房间）中的声场：声波停留在有限体积内，所以不需要辐射条件。
4. 耦合的流体弹性结构交互（结构声学）。若辐射或散射结构包括弹性材料，则必须考虑物体与周围流体间的交互。在多物理耦合中，声分析为结构分析提供一个负载（声压），结构分析为声分析提供加速度。
5. 传输问题：入射声波传播至具有不同声属性的物体内。压力和加速度在边界连续。

对于麦克风的情况来说，考虑的场景为内部空间中的声场。此外，该工具可为每种表面设置边界条件，以定义模拟的问题。

典型边界条件为：

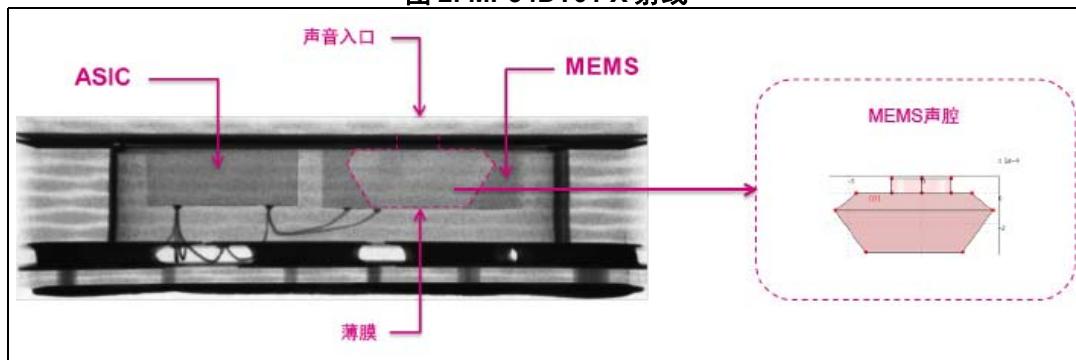
- 声音的硬边界。声音的硬边界是加速度的垂直分量为零的边界。这意味着在边界，压力的法向导数为零。此条件将用于理解声音软边界的依赖。
- 声音的软边界。这意味着在边界，差分压力消失。
- 阻抗边界条件。阻抗边界条件为声音硬边界条件和声音软边界条件的概括。从物理的观点来看，声输入阻抗为压力和垂向质点速度之比。阻抗边界条件很好地反映了局部反应表面，此表面定义为在任何点的垂向速度仅取决于该点压力。
- 辐射边界条件。辐射边界条件允许发出的波以最小反射离开建模域。当模拟麦克风时，永远不会使用此条件。

## 1.3 垫片设计建议

ST 为客户提供特定项目提供仿真。本节根据经验提供垫片设计建议。

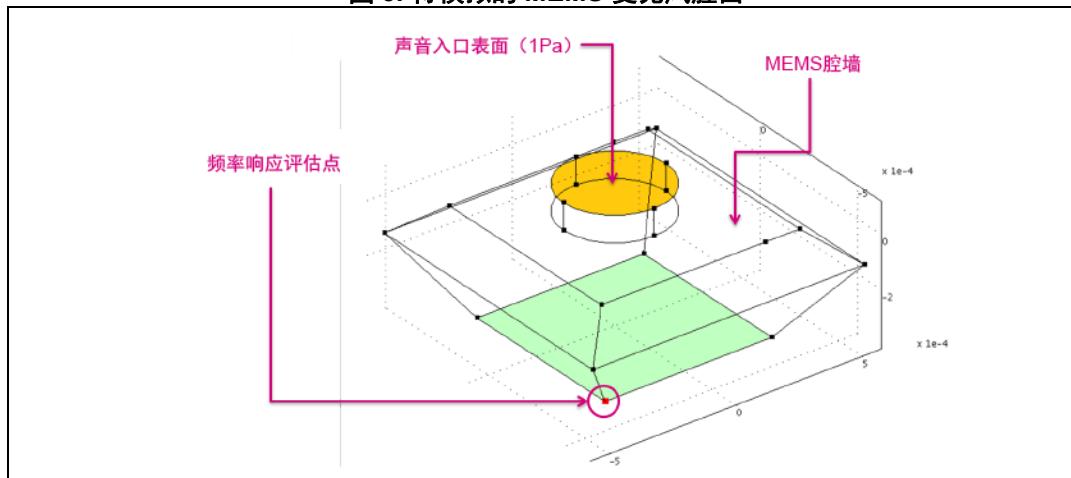
为确定垫片设计的最佳实践，使用 COMSOL® 工具进行实验。该方法模拟已定义的几何结构放置于麦克风声音入口附近的效果。执行这些仿真，检查这些几何形状怎样修改 ST 顶部端口麦克风 MP34DT01 的频率响应。低频行为取决于通风孔和后室，高频响应仅取决于前室的几何形状。大致说来，因为 MP34DT01 的 MEMS 接近声音入口，所以增加垫片会改变整个前室的几何形状。因为这一原因，下述仿真中将不考虑封装的几何形状，且研究范围从 100 Hz 升至 50 kHz。

图 2. MP34DT01 X 射线



使用 COMSOL® 工具执行的第一个仿真表示 MP34DT01 的频率响应，在声音入口施加 1 帕斯卡，将硅材料属性设置为阻抗边界条件。该工具解决了几何形状上每个离散点的声学公式，仿真结束后，可以在相关点画出收集到的数据。频率响应的评估点为 MEMS 薄膜的 4 个角之一。

图 3. 待模拟的 MEMS 麦克风腔面



根据下图所示的仿真结果，可以认为 MP34DT01 麦克风的响应在整个声频带上是平的，在 20 kHz 之后有少量增长。若不考虑此增长，可较好地近似假设麦克风和垫片几何形状的频率响应仅取决于垫片的增加。

图 4. MP34DT01 频率响应



第一个实验使用固定半径的圆柱管仿真（管径 200  $\mu\text{m}$ ），长度变化。另一方面，第二个实验使用固定长度（2 mm），但半径不同的圆柱管仿真。从这两个实验的结果，可以确定垫片长度与宽度的效果。在下述仿真中，垫片以及麦克风腔体表面的边界条件被设置为声音的硬边界。在此条件下，仿真将仅显示几何形状的影响，忽略相关材料的影响。

图 5. MP34DT01 频率响应 vs. 管长

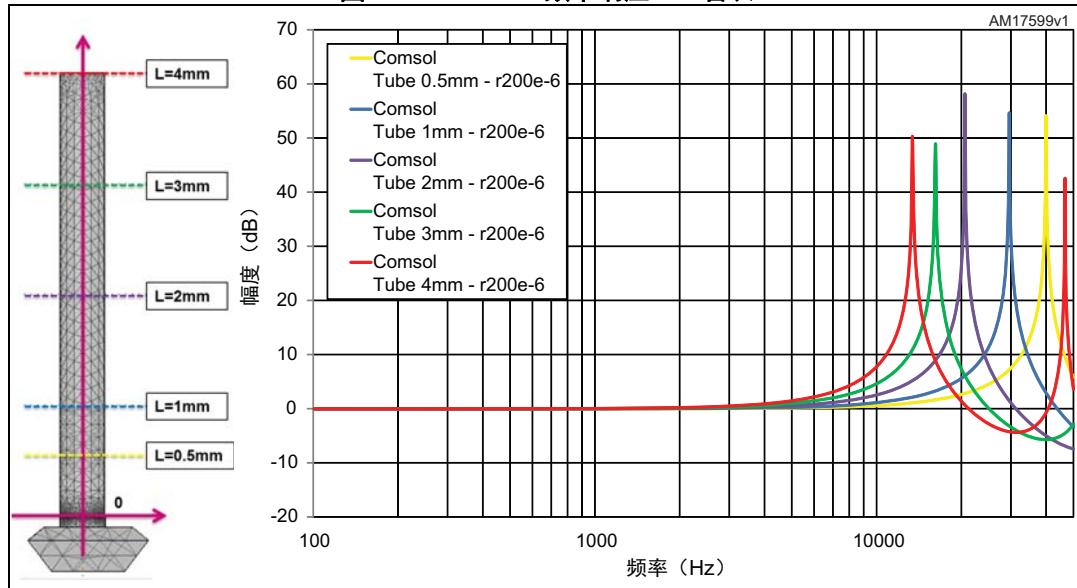


表 1. 谐振峰值 vs. 管长

管长 (mm)	谐振频率 (Hz)
0.5	39900
1	29600
2	20600
3	16200
4	13400

下图显示了频率响应与管径的关系。

图 6. MP34DT01 频率响应 vs. 管径

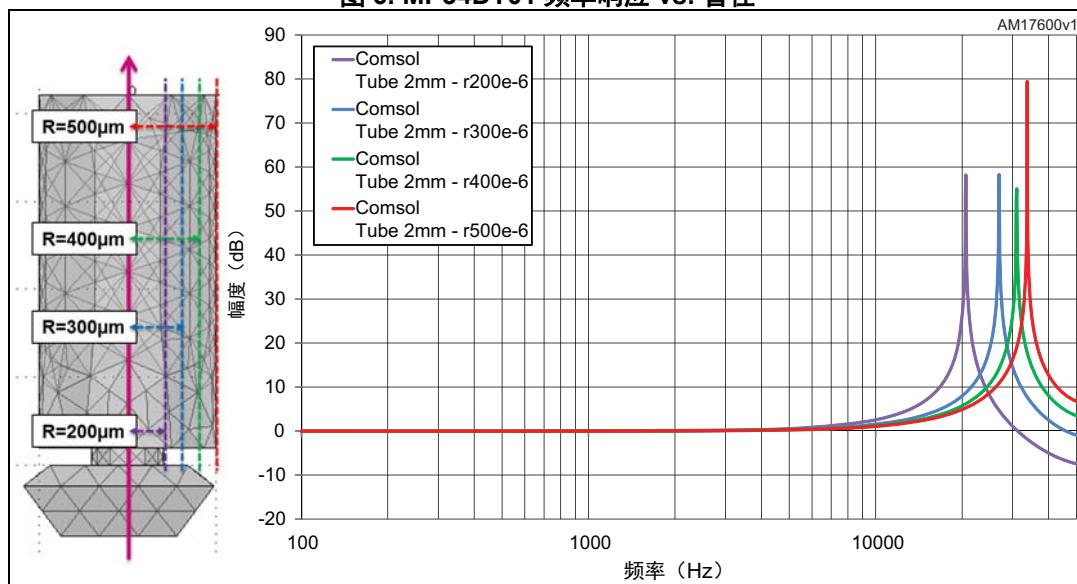


表 2. 谐振峰值 vs. 管径

管半径 ( $\mu\text{m}$ )	谐振频率 (Hz)
2.00E-04	20600
3.00E-04	26900
4.00E-04	31000
5.00E-04	33700

从这些初始结果，可以说麦克风腔体顶部放置的几何体会产生谐振效应。上述结果可总结为两个基本结论：

1. 首先，增加或减少垫片长度，谐振频率在频域分别向更低及更高方向移动。
2. 相反，减少或增加垫片半径，谐振频率在频域分别向更低及更高方向移动。

因此，若垫片的设计者希望保持频率响应尽可能平，第一个建议就是使垫片短且宽。

下述仿真的目的是进一步增加几何体的复杂性，研究它与谐振频率的依赖性。下图表示了仿真的几何结构与各自的结果。

图 7. 仿真的复杂几何结构

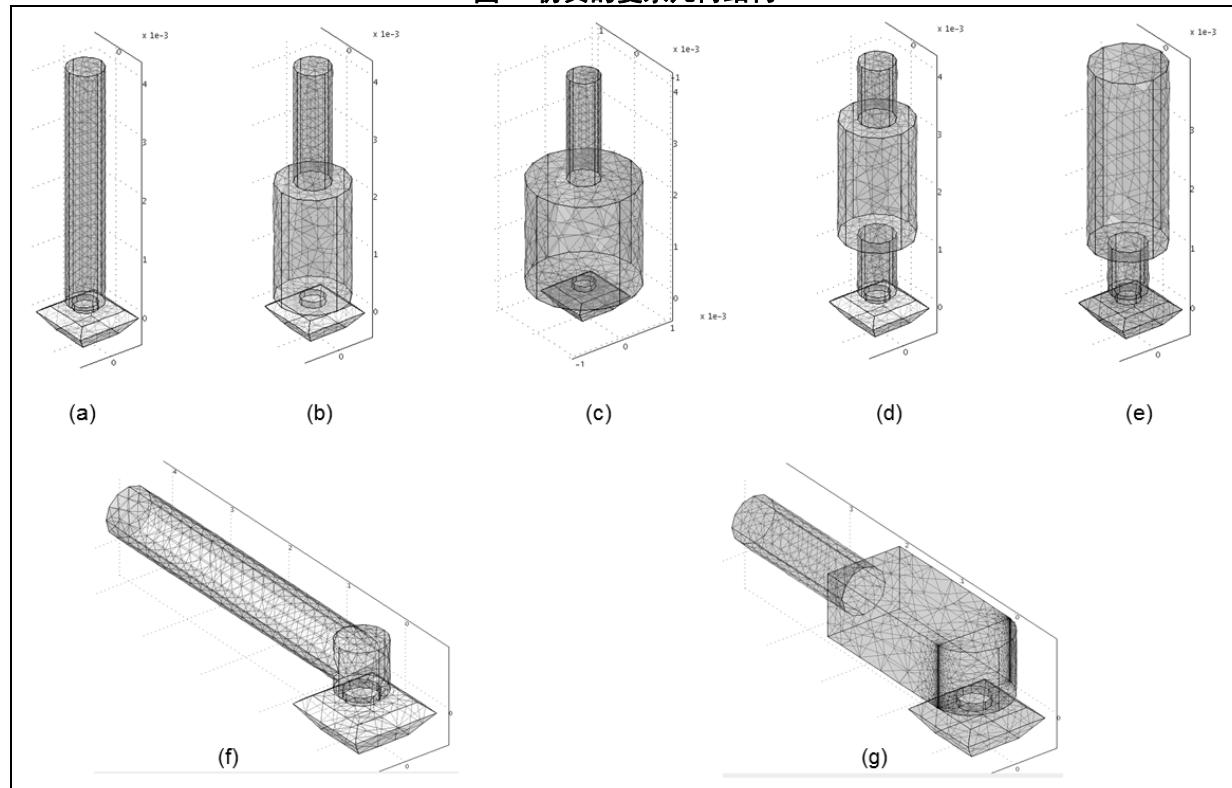
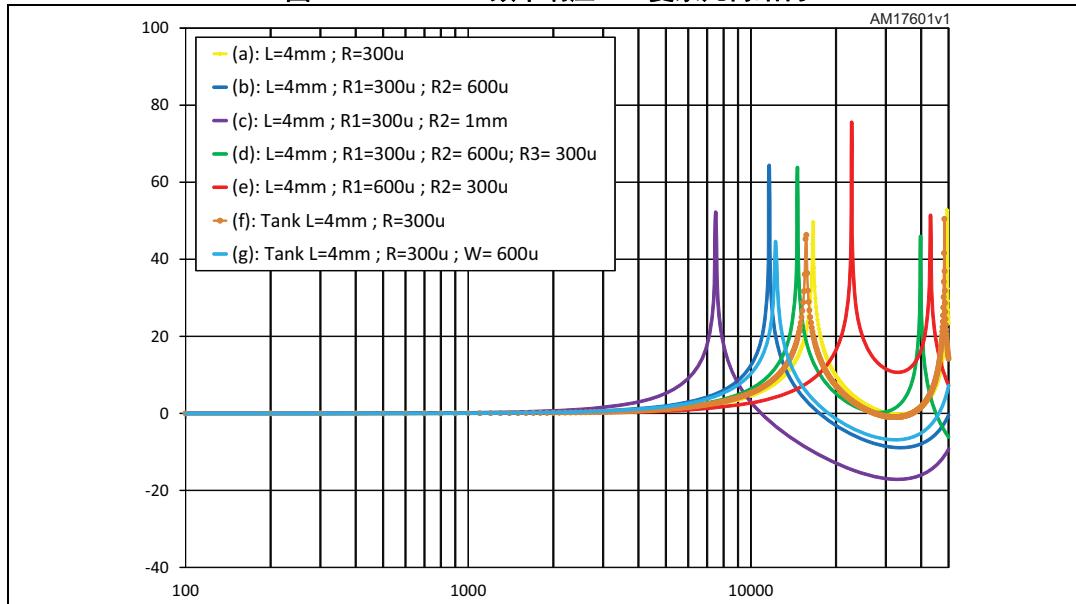


图 8. MP34DT01 频率响应 vs. 复杂几何结构



基本上说，上述仿真的目的是理解在固定几何形状的基础上，增加不同量半径和长度的效果。第一个仿真时简单几何形状，[图 7 \(a\)](#)，下一个几何形状 [[图 7\(b\)](#), [\(c\)](#), [\(d\)](#), [\(e\)](#)] 在前一个的基础上增加复杂度，增加不同的半径和长度量。例如，第二个几何形状包括了麦克风声音入口附近的第二个半径量，第三个达到了 1 mm 的半径，第四个几何形状将第二个半径量换到原来管的中间，最后一个除了接近麦克风声音入口的 1 mm 长部分外，增加了整个体积。[图 7 \(f\)](#) 和 [\(g\)](#) 的几何形状稍有不同。最后两个仿真的目的是检查谐振频率是否与管的倾斜有关。

仿真完成之后，下述给出的观察对理解简单几何形状增加不同量后，谐振频率在频域中如何移动很有帮助。下一个考虑必须与第一个几何形状相比。检查[图 8](#)中的仿真结果可有如下发现：

1. 在声音入口附近一侧引入越大体积的几何形状，会令谐振峰值向越低的频率移动 ([图 7 \(b\)](#), [图 8](#) 中的蓝线)
2. 谐振峰值向低频的移动与声音入口附近几何形状半径的增加成正比 ([图 7 \(c\)](#), [图 8](#) 中的紫线)
3. 当较大的几何体从麦克风声音入口移走时，谐振峰值向更高的频率移动。([图 7 \(d\)](#) ([e\)](#), [图 8](#) 中的绿线和红线)
4. 谐振峰值仅取决于几何形状、长度、宽度。峰值位置与几何体的倾斜无关。[图 7 \(f\)](#) 中的几何形状与[图 7 \(a\)](#)相同，但旋转了 90 度，相应的两个仿真结果几乎相同 ([图 8](#) 中的黄线和橙线)。

在[图 7 \(g\)](#)中的最后一个仿真用于再检查一遍之前的说法。该几何形状与[图 7 \(b\)](#)中类似，仿真结果几乎相同 ([图 8](#) 中的蓝线和青线)

当垫片设计者必须引入不同的体积时，这些仿真的几何形状很有帮助。当整个应用中必须将麦克风放置在离底盘很远或与底盘垂直时，会发生这种限制。下表根据仿真的几何形状总结了谐振频率的位置。

**表 3. 谐振峰值 vs. 几何结构**

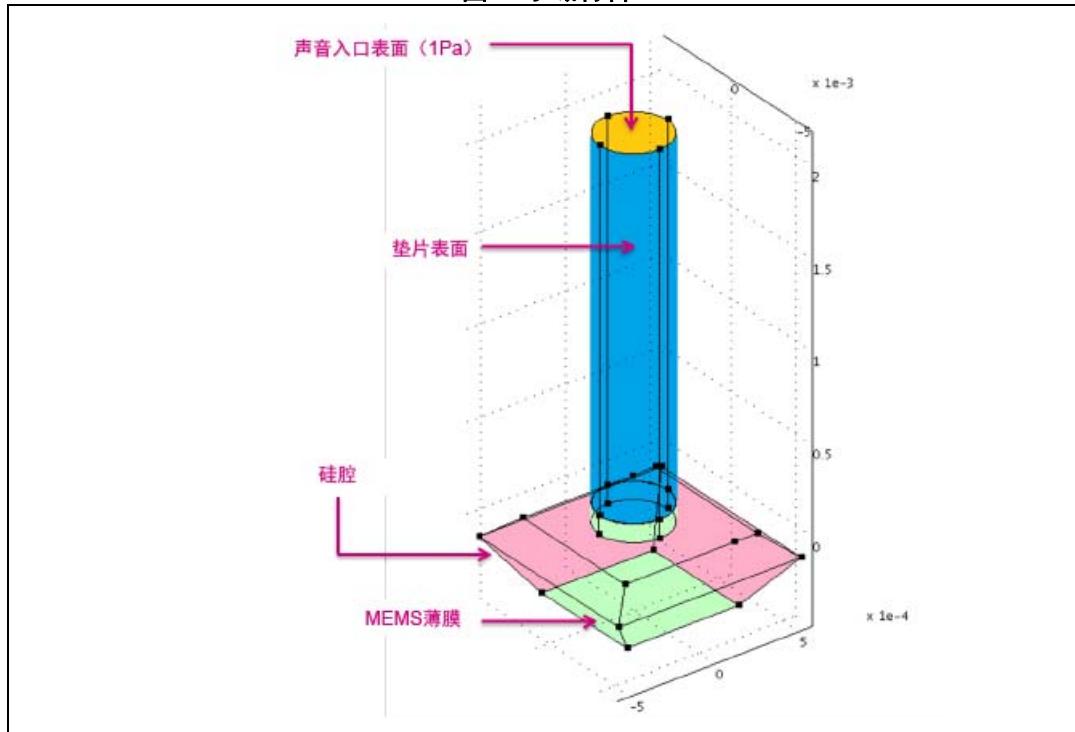
几何结构	谐振频率 (Hz)
(a): L = 4 mm; R = 300 $\mu$	16600
(b): L = 4 mm; R1 = 300 $\mu$ ; R2 = 600 $\mu$	11600
(c): L = 4 mm; R1 = 300 $\mu$ ; R2 = 1 mm	7500
(d): L = 4 mm; R1 = 300 $\mu$ ; R2= 600 $\mu$ ; R3 = 300 $\mu$	14600
(e): L = 4 mm; R1 = 600 $\mu$ ; R2 = 300 $\mu$	22700
(f): Tank L = 4 mm; R = 300 $\mu$	15600
(g): Tank L = 4 mm; R = 300 $\mu$ ; W = 600 $\mu$	12200

目前执行的仿真侧重于几何形状对麦克风频率响应的贡献。还要引入另一个重要的参数来实现对垫片的适当分析：相关材料的声阻抗。基本上说，谐振频率的位置取决于整个结构的几何形状，谐振频率的幅度取决于材料的声阻抗。COMSOL® 工具允许将仿真中每个表面的材料属性设置为边界条件。以下仿真的目的是确定谐振峰值幅度与材料声属性之间的关系。通过在工具中将阻抗边界条件<sup>(a)</sup> 设置为声音硬边界来达到此目标。对于每个表面，将适当设置材料的声阻抗。仿真执行步骤为，首先设置结构声音开口的压力 (1Pa)，设置 MEMS 薄膜的声阻抗 (120\*150)，设置硅腔阻抗 (2000\*1500)。上述参数对于整个实际情况通用，垫片表面声阻抗可根据设计者的偏好而变。事实上，垫片可能由塑料、橡胶或其它材料组成。此外，外壳也可能由铝、钢或塑料制成。

参考下图，设置黄色、粉色、绿色的表面，依据其实际的声阻抗保持不变，蓝色表面将根据不同材料的属性而修改。

a. 声阻抗定义为材料密度与材料中声音速度的乘积： $Z_{acu} = \rho \times c$ 。

图 9. 子域材料



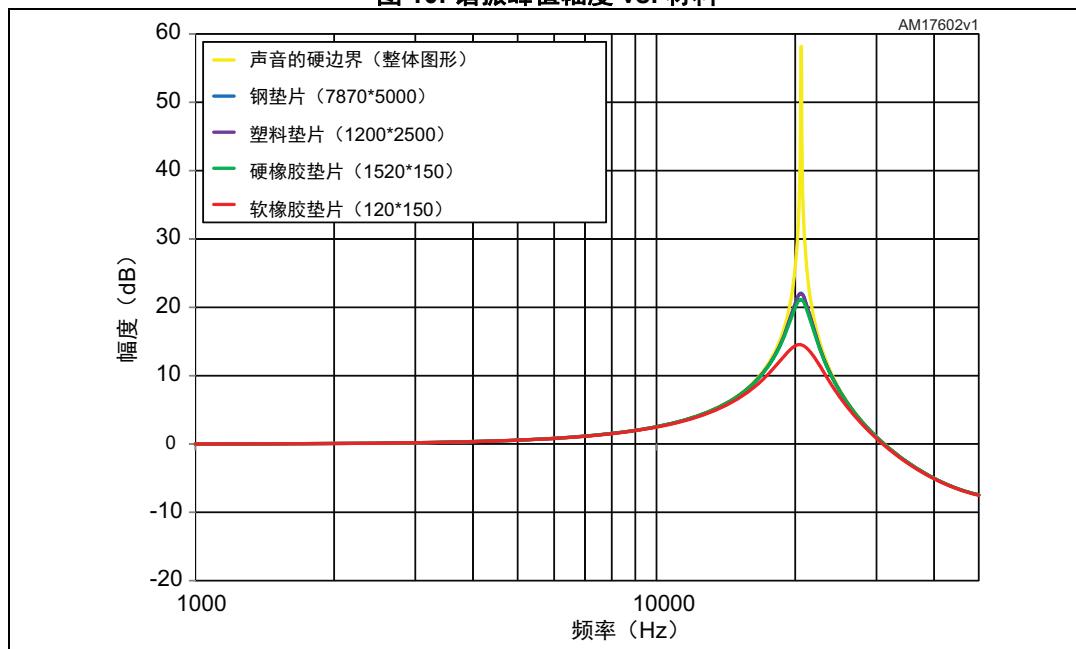
下表总结了电子制造商最常见材料的声学属性：外壳为塑料或铝；垫片为软和硬橡胶；电子元件为硅片和 PCB。

表 4. 材料的声学属性

材料	密度 (kg / m <sup>3</sup> )	材料中的声音速度 速度 (m/s)
空气	1.2	343
铝	2700	6400
PCB	1850	2740
玻璃	2400	4000
硅	2000	1500
硬橡胶	1520	150
软橡胶	200	150
塑料	1200	2500
铅	11340	1150
钢	7870	5000
MEMS 薄膜	120	150

下图说明了当保持硅片和 MEMS 薄膜材料固定不变，仅改变垫片材料时的谐振峰值幅度变化行为。整个应用的几何形状表现为谐振器，材料的声属性表现为阻尼因子。峰值随垫片材料的软度成比例衰减。垫片设计者可根据其自身需求选择垫片材料。频率响应必须尽可能平，材料必须选为尽可能软。

图 10. 谐振峰值幅度 vs. 材料



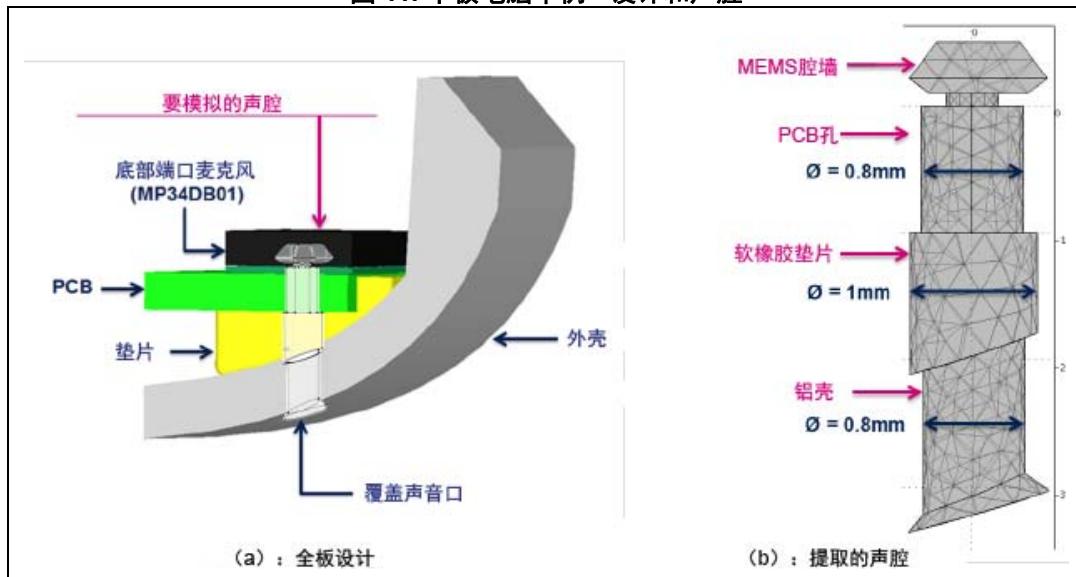
下表总结了仿真结果。

表 5. 谐振峰值幅度 vs. 材料

MEMS 腔体	MEMS 薄膜	垫片 材料	谐振峰值 (dB)
硅	薄膜	声音的硬边界	58.153088
硅	薄膜	钢垫片	22.064283
硅	薄膜	塑料垫片	21.99249
硅	薄膜	硬橡胶垫片	21.136204
硅	薄膜	软橡胶 垫片	14.517481

下述仿真是一个研究底部端口麦克风频率响应的实际例子。特别指出，下图显示了平板电脑麦克风部分的可能结构。在本例中，底部端口麦克风装在 PCB 上，软橡胶垫片用于允许麦克风声音入口和外壳间的声耦合。

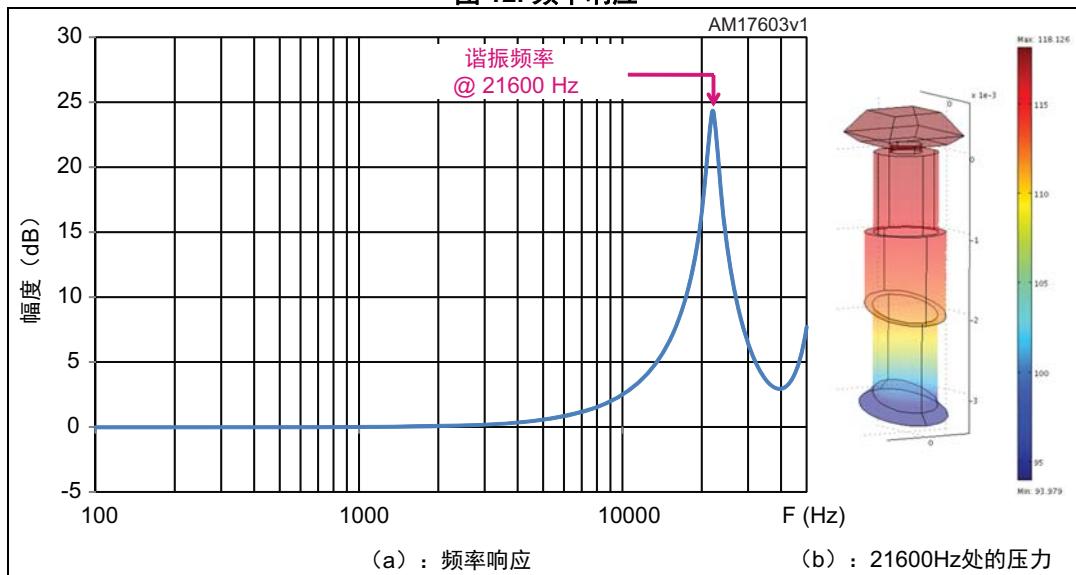
图 11. 平板电脑举例 - 设计和声腔



前面已经说明，声学仿真包括了所有相关元件的几何形状。[图 11 \(b\)](#) 表示了待仿真的声腔，它是从[图 11 \(a\)](#) 中的整个结构抽取的。另一方面，必须在仿真器中设置材料的声学属性以得到合适的仿真结果。此仿真中包括的材料是电子设备制造商常用的；印刷电路包括 FR4，垫片为软橡胶，外壳由铝制成。

使用 COMSOL® 工具以研究几何形状和材料的影响，结果示于下图。

图 12. 频率响应



[图 12 \(a\)](#) 显示了 21600 Hz 附近谐振峰值的特性频率响应；[图 12 \(b\)](#) 显示了腔内分布的压力幅度，单位 dB SPL。腔体内的压力图在谐振频率处绘制；这就是为什么最大值正好在 MEMS 薄膜处的原因。

这就是当麦克风内置于最终应用中时，垫片影响麦克风频率响应的典型例子。垫片一般引入一个谐振峰值；它的位置及密度取决于用户选择的设计。当最终应用必须为平坦的频率响应特性时，垫片是一个关键主题，必须非常仔细地设计，同时也需要均衡的频率响应。例如，若必须增强声音频带范围而不使用任何模拟或数字均衡工具，则垫片是有帮助的。换句话说，对于必须均衡的声音频带来说，垫片是一个强有力的因素。

**附录 A 文献目录**

1. COMSOL 用户指导版本 3.5a
2. COMSOL 建模指导版本 3.5a
3. COMSOL 声模块介绍
4. 亥姆霍兹谐振 - 维基百科, 免费百科全书

## 2 版本历史

表 6. 文档版本历史

日期	版本	变更
2014 年 1 月 9 日	1	初始版本

表 7. 中文文档版本历史

日期	版本	变更
2015 年 11 月 17 日	1	中文初始版本

**重要通知 - 请仔细阅读**

意法半导体公司及其子公司（“ST”）保留随时对 ST 产品和 / 或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于 ST 产品的最新信息。ST 产品的销售依照订单确认时的相关 ST 销售条款。

买方自行负责对 ST 产品的选择和使用，ST 概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

ST 不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的 ST 产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致 ST 针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和 ST 徽标是 ST 的商标。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。

© 2015 STMicroelectronics - 保留所有权利 2015