

# 多物理场仿真在探究头戴式耳机被动降噪性能中的应用

高若晗<sup>1</sup>，成建<sup>1</sup>，林丽<sup>1</sup>

1. 大北欧通讯设备（中国）有限公司，厦门，福建。

（作者简介：

高若晗（1991-），男，系统集成工程师，主要研究方向耳机产品结构设计及数值仿真；

成建（1993-），男，声学工程师，主要研究方向耳机声学设计；

林丽（1989-），女，高级工程师，主要研究方向耳机产品设计及数值仿真；）

## 摘要

头戴式耳机的降噪功能备受广大消费者的青睐。降噪功能包含主动降噪和被动降噪，其中被动降噪（PNC）性能主要受结构设计、材料属性、环境噪声、应用场景等因素的影响。因此本文考虑了固体塑料的隔音和共振、多孔海绵的吸声作用、空气中声传播、简化人体结构及人耳结构等因素，基于 COMSOL 软件的多物理场仿真探究各因素对被动降噪性能的影响。通过对比分析 FEM 仿真，集总仿真与试验的 PNC 曲线，讨论了多物理场仿真结果在探究头戴式耳机被动降噪性能的适用性。

**关键词：**多物理场 被动降噪 多孔弹性波 头戴式耳机

## 简介

被动降噪技术（Passive Noise Cancellation, PNC）是一种通过物理结构阻挡外部噪声的降噪方式，主要依赖于耳机的材料和声学结构设计来隔离环境噪音，而不涉及电子处理或音频信号的变化。与主动降噪不同，被动降噪不需要使用电力来处理音频信号，因此不需要额外能耗，其与主动降噪相辅相成，共同为用户提供优质的降噪体验。主要有以下作用：

**减少环境噪声：**通过隔离外部声音，用户能够更清楚地听到耳机中的音频内容，而不受周围环境的干扰。

**提高音质感受：**被动降噪在提高外界噪音的隔离的同时，也提高耳机音频辨识度，用户可以很轻易的感受到耳机美妙的音频，而不需要很强的专注度，缓解疲劳。

**保护听力：**因为减少了背景噪声，用户不需要将音量调得很高就能听清楚声音，这有助于保护听力，减少长时间高音量使用耳机带来的听力损害。

总而言之，被动降噪是头戴式耳机设计中非常重要的一部分，尤其在需要长时间使用的场景中，它能配合主动降噪为用户提供安静的听音环境和舒适的佩戴体验。

## 理论/实验设计

多种因素影响被动头戴式耳机的降噪效果，包括但不限于：

**声学屏障：**被动降噪耳机通常使用厚实的耳罩材料（如泡棉、皮革等）来形成物理屏障，阻止噪声进入耳道。材料的密度和厚度决定了它能吸收或反射多少声音。

**密封设计：**耳罩的封闭设计也是关键，能够有效减少空气中的声音通过耳机进入耳朵。这种紧密的贴合有助于隔绝中低频噪声，特别是环境中的持续噪音，如空调或引擎声。

**结构阻尼：**有些耳机在结构中加入吸声材料，这些材料可以吸收高频声音，减少耳机外壳的振动和声音泄漏。

用于本次实验的头戴耳机包含完整的声学结构，保证了实验数据与仿真数据的准确信。其声腔结构设计简化示意图如下：

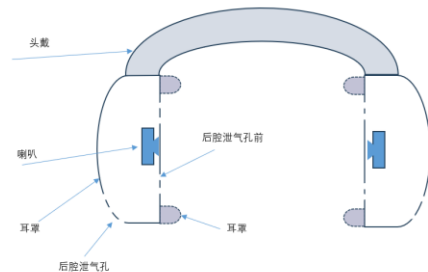


图 1. 头戴式耳机声腔结构简化示意图

## 实验方法

为了更加清晰地对比实验和仿真结果，我们对实验装置进行一定地简化：

1. 实验环境设定为消音室，以避免声波在墙体和地面的反射进而影响频响结果。

2. 为了简化实验变量并方便实验和仿真结果对照，使用 B&K4128 仿躯干代替真人。

3. 尽量简化噪音声场地复杂性以及仿真计算量，本实验设置距离头部正前方 1 米处的全频噪声源。

4. 简化耳机，保留对 PNC 影响比较大的后壳模块和耳罩模块。

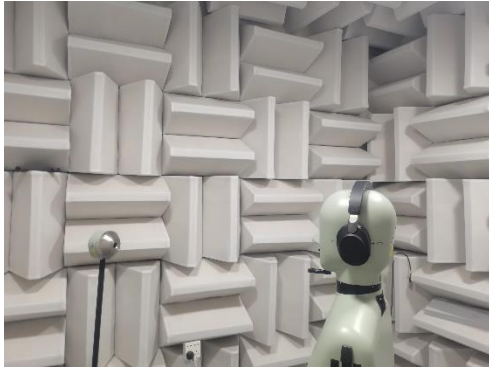


图 2. 头戴式耳机 PNC 曲线测量示意图

## 数值模型

根据设计经验，在噪声源的环境下塑胶件和泡棉自身的共振、前腔空气的共振以及用户佩戴时耳罩与人耳的间隙等因素对 PNC 效果有比较明显的影响，因此一般先做对单物理场的模态、频响仿真，再进行多物理场耦合的 PNC 效果综合分析，更有利于对仿真结果进行解释和分析效果综合分析更有利于对仿真结果进行解释和分析。<sup>[2]</sup>

### 1. 耳机的密封性仿真分析

耳罩的密封性是耳机被动降噪（PNC）效果的主要影响因素之一。因此，有必要在耳机夹持力作用下对耳罩的变形进行预先模拟，模拟结果如图所示：

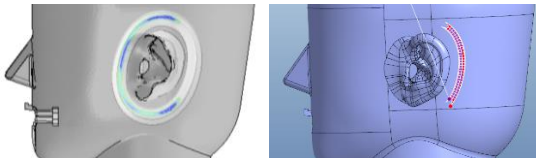


图 3. 头戴式耳机夹紧力下的密封模型示意图

左图中有颜色的区域表示耳罩与人头完全贴合的部分（即 0 缝隙），可以看到耳后（即图中耳罩右侧）存在部分缝隙。经测量，该区域缝隙的最小值为 0.07mm，最大值为 2.45mm。

直接导入该模型会导致计算量过大，因此本文根据计算结果，认为匹配较为良好，将缝隙设置为 0 进行后续计算。

下图为在实验过程中耳罩与人头贴合情况，其间隙基本为 0，可忽略间隙。



图 4. 头戴式耳机夹紧力下的密封情况

### 2. 简化后耳罩的模态及扫频分析

共振是结构本身的固有特性，耳罩本身的共振，可能对 PNC 效果产生影响，有可能导致 PNC 曲线为正值，即不仅没有隔绝外界噪音，反而放大了噪音。因此，我们可以利用 COMSOL 有限元软件，通过简单的模态分析，并基于模态叠加的方法在我们关心的频段内进行扫频分析，预先了解结构振动特性，以评估可能带来的声学方面的风险。

由于耳罩中部件较多，在本工作中，对其进行简化，该模型仅包含了泡棉和与其连接的耳机壳体，并将实际的配重施加在耳机壳体上。简化的耳罩系统如下图所示：

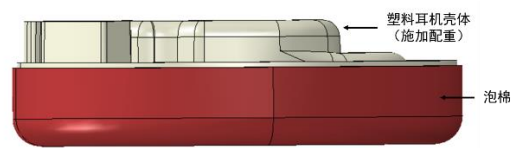


图 5. 头戴式耳机耳罩系统示意图

由于泡棉底面基本与人脸贴合，在进行模态分析时，需要将底部接触区域设置为固定边界条件，以逼近实际佩戴状态。因此，该简化系统近似于一个弹簧振子系统。

对该简化系统进行模态分析，并基于其前 100 阶的模态分析结果，进行了 1-2000HZ 的扫频分析，之后在泡棉上任意选取两点，绘制其频率-位移曲线，结果如下图所示：

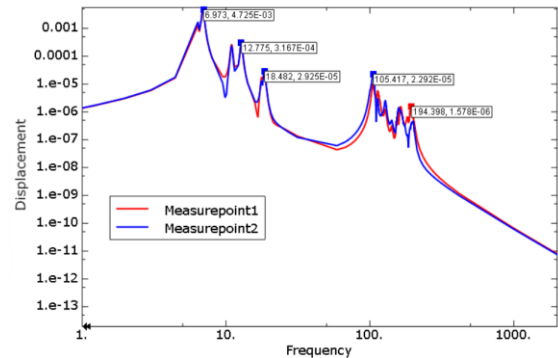


图 6. 头戴式耳机耳罩扫频分析位移曲线

由于泡棉非常柔软，其对应的前六阶固有频率均低于 20 Hz，通过扫频结果也可以看到，最显著的共振峰值出现在 6.97Hz，之后的 12.78Hz 和 18.48Hz 也有一定程度的共振峰，然而，它们都低于人耳可听见的频率，因此并不是我们关心的。值得注意的是，在 105Hz 出现一个较明显的峰值，之后持续下降，一直到 194Hz 才显著下降。从后续的实验曲线和仿真结果中，我们也观察到在该范围内（100-200Hz）PNC 曲线出现了正值，但是数值不大，这与此处分析是相吻合的，虽然耳罩会在该范围内发生共振，但幅值很弱，因此影响并不太大。

### 3. 简化的耳罩空气前腔模态分析

除了结构本身的共振，还需考虑当声波通过后壳，耳罩或者声学网布进入前腔后，会引起的腔内空气的共振。如果声波频率恰在空腔共振频率周围，则会引起前腔空气的共振，从而使腔内声压级升高。

对于规则形状的腔体，我们可以根据亥姆霍兹共振理论计算<sup>[1]</sup>。而对于向本案例中不规则形状腔体，我们可以借助 COMSOL 软件压力声学模块分析前腔的共振频率，从而有助于探究前腔空气共振对 PNC 效果的影响。

采用 COMSOL 内置的空气材料属性，基本参数设置如下：

属性	变量	值	单位	属性组
<input checked="" type="checkbox"/> 密度	rho	rho(pA,T)	kg/m <sup>3</sup>	基本
<input checked="" type="checkbox"/> 声速	c	cs(T)	m/s	基本
热膨胀系数	alpha...	alpha_p...	1/K	基本
平均摩尔质量	Mn	0.02897...	kg/mol	基本
本体黏度	muB	muB(T)	Pa·s	基本
相对磁导率	mur_js...	1	1	基本
相对介电常数	epsilo...	1	1	基本
动力黏度	mu	eta(T)	Pa·s	基本

图 7. 前腔空气内置属性

计算得到前五阶模态的特征频率如下，其中一阶模态非常低，可以忽略不计，值得注意的是二阶和三阶模态，其对应的特征频率为 3389.9Hz 和 3816.3Hz，这与后续 PNC 曲线仿真中高频区域出现的峰值是相匹配的，可见腔体的几何形状和大小，对高频的 PNC 性能有较大影响。

模态阶数	特征频率 (Hz)
1	1.8858
2	3389.9
3	3816.3
4	5732.1
5	6212.2

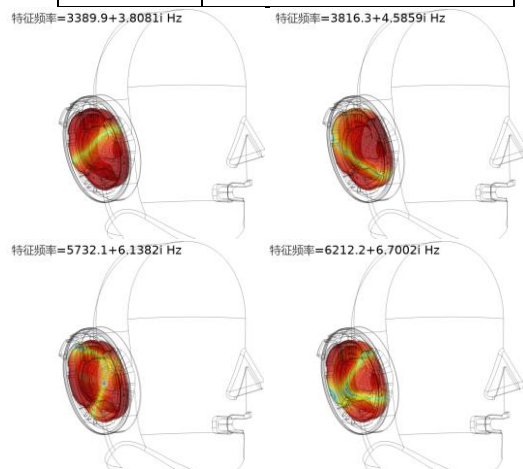


图 8. 前腔空气模态示意图

### 4. 简化的耳罩多物理场 PNC 分析

COMSOL 软件提供了丰富的多物理场模块，利用固体力学、多孔弹性波、压力声学物理场以及相应的多物理场耦合模块对塑胶后壳、PU 皮、泡棉和空气域进行建模。得益于 COMSOL 内部穿孔板边界条件，很方便地对后壳中的 SAATI mesh 进行建模。与此同时，利用完美匹配层模拟消音室环境，以排除声波在地面和墙壁反射对结果造成的干扰。通过背景压力场引入人头正前方 1 米处的全频噪声源。

如下图，根据实际佩戴效果，将耳罩佩戴到 B&K 4128 人头模型上。

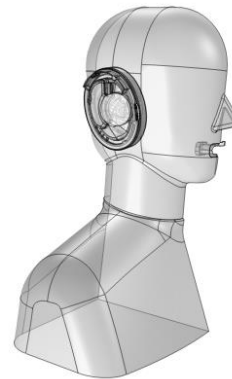


图 9. 耳罩佩戴在 B&K 4128 人头模型示意图

为了对比 PU 皮对 PNC 效果的影响，在此对两种情况下进行仿真：1. 将皮革设置为空气域，即不考虑皮革对外部声波的反射和吸收；2. 将皮革设置为真实的固体力学域。

此外，集总参数法由于其仿真快速，广泛应用于设计前期，为工程师提供了重要的参考。由此，在下文中也与集总参数法对应的仿真结果进行对照。

### 实验/仿真结果对照

如下是本次实验与仿真结果，横坐标是频率，纵坐标是声压级衰减值。

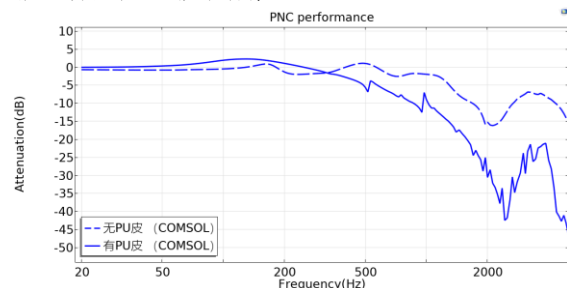


图 10. 有无 PU 皮在 COMSOL 仿真中的结果

根据图 10 仿真结果，可以分析：

- PU 皮作为固体薄板，对中高频有比较明显的提升作用，此结果也是与经验相符的。
- 低频 100-200 Hz 处有共振峰，即在此频率范围内，耳罩不仅没有降噪，反而加

大了放大了噪声。这与前文中结构共振频率相吻合，由此可以猜测，这种情况是由于泡棉的共振导致的；

- 在高频 3389.9 Hz 和 3816.3 Hz 附近存在凸起的共振峰，这与前文提到的前腔空气共振频率相吻合，由此可以猜测，这种情况是由于前腔空腔共振导致的；
- 考虑到随着计算频率范围的增加，COMSOL 几何网格尺寸也相应地成倍增长，导致计算资源耗费巨大，因此本文只计算了 20 Hz ~ 5000 Hz 频率范围。

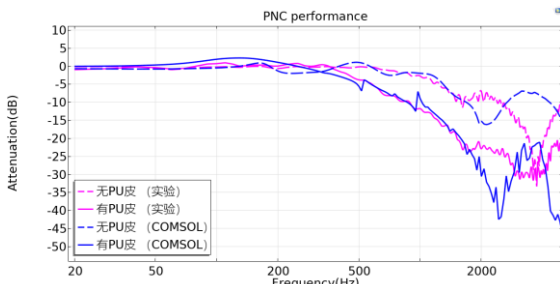


图 11. 有无 PU 的实验/COMSOL 仿真对比

根据图 11 中仿真结果和相应的试验结果对比可以分析：

- 无论是否考虑 PU 皮，在 1.8 kHz 之前都与实验对照较好；
- 1.8 kHz 之后的差异，主要原因可能有泡棉属性参数在高频区域的变化、腔体的尺寸形状、其他被简化的结构的共振（例如实际测试中的头带，在仿真中被忽略）、实际结构中的结构零件，其对应的共振频率也比较集中在高频区，因此简化模型无法捕捉。

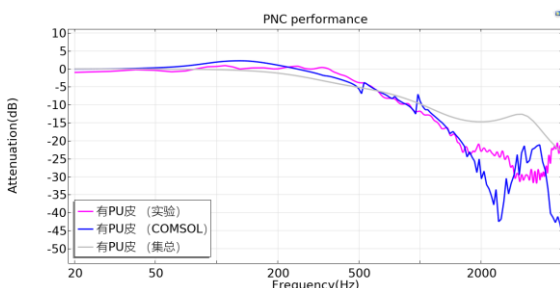


图 12. 考虑 PU 皮的实验/COMSOL/集总结果对比

根据图 12，针对考虑 PU 皮并包含集总参数法结果进行对比分析：

- COMSOL 仿真结果更接近实验结果；尤其在 800 Hz 之后，集总参数的仿真结果与实验偏差较大。
- 相对集总参数方法获得的光滑曲线，COMSOL 仿真结果能体现结构和空腔共振带来的共振峰，从而对 PNC 造成的各种影响。

## 结论

耳机的 PNC 性能模拟是一个典型的多物理场问题，涉及结构振动，声传播，以及关键材料参数选取。为深入理解和分析影响 PNC 效果的各项因素，本文利用 COMSOL 多物理场软件进行了多个数值模拟，包括耳罩在夹紧力作用下与人头贴合程度的强度分析，结构共振及扫频分析，以及声腔共振分析，最后，对简化的头戴式耳机进行了声固耦合的被动降噪分析，分别考虑了声学网布和耳罩外包皮革的影响，获取 20-5000 Hz 频率范围内对应的 PNC 曲线。

最后将 COMSOL 有限元分析结果与集总参数方法的模拟结果及实验结果进行了对比，结果表明采用 COMSOL 有限元仿真，拥有以下优势：

- 仿真结果在低中频段与实验曲线吻合良好，相比集总参数法，准确性更高；
- 可以考虑结构和腔体共振对 PNC 效果的影响，这是集总参数法无法实现的；
- 可以查看三维的云图及动画，便于直观理解，从而为后续的优化提供方法；

尽管采用 COMSOL 有限元仿真，相对集总参数方法而言，依旧存在基础数据获取较难，前处理及计算耗时长的问题（尤其对于高频的分析，通常需要划分更密的网格来获取精度合理的结果，将需要更长的计算时间）。但随着数据的积累，计算机计算效率的提升，这些问题终将迎刃而解。

综上所述，采用 COMSOL 进行多物理场有限元仿真，在探究头戴式耳机被动降噪性能方面展现出了较高的可靠性和有效性，对于耳机产品的前期设计与开发具有重要的指导意义。

## 参考文献

- [1] 朱哲民, 龚秀芬, 杜功焕, 《声学基础》[M]. 南京大学出版社, 南京, 2022.
- [2] 韦煜, 《微型扬声器设计与仿真》[M]. 清华大学出版社, 北京, 2022.

## 致谢

请在此处撰写致谢内容。

## 附录

您可以添加附录。如需添加附录，请在此部分之前插入分页符。