



北京航空航天大学
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

第二十四届“冯如杯”学生创意大赛
参赛作品

睡眠防噪耳塞的新型设计

目录

摘要.....	3
Abstract	1
引言	1
(一) 研究背景	1
(二) 防噪耳塞的历史及技术现状	1
(三) 当前耳塞优缺点分析	1
正文	2
第一章 总体设计及创意说明	2
(一) 总体设计	2
(二) 创意说明	3
(三) 创意来源	3
第二章 设计实现过程	4
(一) 材料选择	4
(二) 有源降噪设计	4
(三) 主动降噪设计	5
第三章 可行性及市场应用分析	7
(一) 技术难点及我的思考	7
(二) 耳塞的适用人群及市场前景	8
结论	8
参考文献	8

摘要

随着社会的发展，噪声问题日益突出，严重影响到了人们的睡眠质量，进而制造了很多的人际矛盾，不管是舍友关系，邻里关系，还是广场舞的运动者以及睡觉的居民，都需要一种方法来缓解这种矛盾。

本文研究的就是通过设计一种新型耳塞，在噪声接收处直接减少噪声对人的影响。本文设计的耳塞的降噪方法主要是选择合适的慢回弹性材料，放入耳道后可以紧贴内壁，起到最基本的物理隔声作用，且慢回弹性材料可以随时更换，然后结合有源降噪技术，根据杨氏干涉原理，通过产生一个干涉声波，抵消噪声的作用，实现了物理消声，且在这个模块可以加载音乐播放器，满足不同人群的睡眠习惯。最后创造性的根据长耳鸮的生物结构获得的启发，使用了一个利用微穿孔板加空腔深度可调的结构，可以起到物理吸声的作用，且弥补了前面两种降噪技术的缺点，实现了更好的降噪效果。整个设计三重消音，由物理隔声到物理消声，最后物理吸声，以实现最好的降噪效果，给人最安静的睡眠环境。

关键词：睡眠，耳塞，有源降噪，微孔板，空腔

Abstract

With the development of society, noise problems have become increasingly prominent , seriously affecting people's quality of sleep, thus creating a lot of interpersonal conflict , whether roommate relations , neighborhood relations , or square dance movement and the inhabitants of sleep , we need a ways to alleviate this contradiction.

Through this study is to design a new type of ear plugs , the noise at the receiver directly reduce the impact of noise on people. This design ear noise reduction method is mainly slow resilience to choose the right materials, placed in the ear canal can be close to the wall, play a fundamental role in the physical noise , wait a minute resilient material can be replaced at any time , and then combined with active noise reduction according to the principle of Young's interference , the interference by generating an acoustic wave , the noise cancellation effect , the physical realization of the muffler , and this module can be loaded in the music player , to meet different people sleeping habits. Finally, according to the disadvantage of creative inspiration biological structures obtained long-eared owl , the use of a micro-perforated plate plus the use of cavity depth adjustable structure , can play the role of physical sound absorption and noise reduction technology to make up for the previous two achieve a better noise reduction. The whole design triple silencers , noise from the physical to physical muffler , and finally physical absorption, in order to achieve the best noise reduction effect , giving the most quiet sleep environment.

Keyword : sleep , earplug, active noise reduction , microplate, cavity

引言

（一） 研究背景

由于现代经济社会的发展，人们的夜生活日益丰富，大型城市的晚上依然是车水马龙，再加上民航地铁等交通系统的发展，使得噪声问题变得日益突出，对人们的生活影响越来越大，更多的人也意识到了噪声的危害。作为一个大学生，我深切感受到噪声在生活中对我们的深切影响，很多时候同学之间的冲突就是因为制造了噪声干扰到了他人的休息，使得当前的宿舍关系日趋紧张。此外，本文的另一个研究背景是当前各大城市广场舞的规模越来越大，跳舞者与普通市民的冲突日趋激烈，在如何既能保障跳舞者的运动权利又兼顾市民的休息权利时，本文探讨了一种新型的耳塞设计，通过吸声材料的选择，耳塞外形轮廓的设计，结合有源降噪技术以及主动吸声复合结构，最终实现最大程度的吸声降噪，在噪声接收处（人耳）直接减少噪声对人的影响。

（二） 防噪耳塞的历史及技术现状

最早期的耳塞产品来源于欧洲，用蜡质材料构成，使用时用手将蜡弄软，并做成适合耳道的形状，插入耳道从而隔绝声音进入中耳。这种耳塞的使用很方便，价格便宜。但是缺点是不够卫生，使用过后蜡会残留在耳道内，日积月累之后容易导致耳道感染，此外戴久了后会有胀疼感，不适合人的入睡。

随着材料技术的发展，使用新型材料并采用新型外形设计的耳塞取代了传统的蜡质耳塞。当前主流的防噪耳塞延续了蜡质耳塞的降噪原理，但是根据材料与制作成型工艺不同分为：预模式耳塞（软材料或软橡胶压制而成），泡沫塑料耳塞（慢回弹性的特殊泡沫塑料制成，使用前将其捏细放入耳道中能自行膨胀充满耳道），人耳模耳塞（常温下能固化的硅橡胶类物质注入外耳道凝固而成）。^[1]

（三） 当前耳塞优缺点分析

预模式耳塞由于制作材料是软橡胶，柔软性较高，佩戴起来比较舒适且价格低廉，但是由于材料较软，无法紧贴耳道壁，所以隔音效果比较差。

泡沫塑料耳塞由于采用了慢回弹性的材料，将其放入耳道后会慢慢膨胀最终紧贴耳道内壁，可以起到相对较好的隔音作用，而且它可以适应几乎所有的耳朵形状，可以大规模量产，但是这种耳塞清洗过后泡沫塑料的弹性效果会减弱，而且这种耳塞对于高频音的隔绝比较差。

人耳模式耳塞由于采用的是硅胶材料，柔软性较差，使用后耳部会有胀痛感，且无法紧贴耳道壁，隔音效果比较差，但是清洗不会变形，可以长期使用。

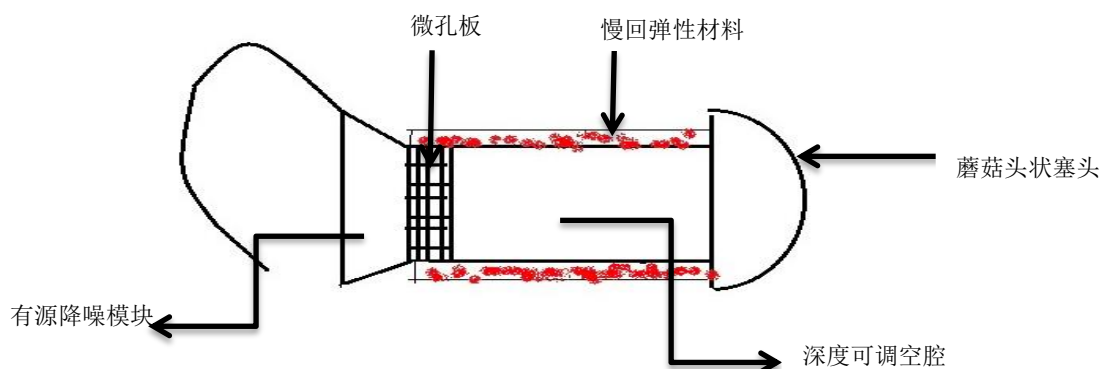
此外，由于现在有源降噪技术的发展，通过数字电路产生与噪声频率相同，幅度相同，相位相反的声波，根据干涉效应，抵消原来的噪声，从而起到降噪作用，但是一个根本的问题是稳定性不高，各种元器件自身的振动不稳定，导致系统具有多个固有频率，在每个固有频率处都可能呈现出尖峰。^[2]

正文

第一章 总体设计及创意说明

(一) 总体设计

图 1 总体结构简图



根据图形可以看到，这种新型耳塞结合有源降噪技术，同时在有源降噪部分的后面增加了一个微孔板以及空腔形成的主动可调降噪部分，在加上整个耳塞设计成蘑菇头形式，由于蘑菇头前端与周身有一个高度差，相当于形成了一个槽，这样可以再在这个槽上套上合适的慢回弹性材料，使用的时候可以把慢回弹性材料套上，插入耳道后，会慢慢回弹，最后紧贴耳壁，起到一个基础的隔声作用。整个装置首先利用有源降噪技术进行第一步的降噪，然后结合当前利用最广泛的慢回弹性材料隔绝声音，在有源降噪过后，由于存在不稳定性，降噪不够充分甚

至有可能带来新的噪声，但是通过后面的微穿孔板以及空腔，可以起到物理降噪的效果，此外由于空腔深度可以调节，降噪的效果也可以调节，可以适应不同频率的噪声，这样一来可以弥补有源降噪的不稳定，从而最大限度的降低噪声保障睡眠。

（二） 创意说明

整个装置的核心创意是整合了当前应用最为广泛的利用慢回弹性材料降噪以及有源降噪，在二者的基础上通过增加一个微孔板以及可调深度空腔，不仅可以有效缓解有源降噪的不稳定性问题，而且可以使降噪更为充分，此外，根据具体情况可以选择合适的深度，从而接收适当的声音，避免盗贼以及可能发生的突发情况。

此外这个设计的另一个创意是解决了慢回弹性耳塞的不耐用问题。由于慢回弹性材料每次清洗过后弹性变差，导致降噪效果变差，在这个设计里，通过简单地外形设计，可以使慢回弹性材料像套筒一样套在槽里面的，当经过几次清洗弹性变差后可以更换新的弹性材料。这就像我们每天使用的中性笔前段都有一个增加摩擦的塑胶部分，它套在笔筒上，可以拆下来。

（三） 创意来源

增加微孔板与空腔以降噪的创意来源是观看科教频道《探索发现》的一期节目而受到启发。在这期节目里介绍了一种国家二级保护动物——长耳鸮，长耳鸮因耳羽发达而得名，广泛分布于我国北方，长耳鸮在飞行过程中几乎不发出声音，且在捕食过程中需要近距离靠近听觉敏锐的猎物（田鼠等），因此如何减少其飞行过程中声音的产生是其捕食成功的关键。长耳鸮之所以能够飞行时无声，和其皮肤与覆羽结构有关。长耳鸮皮肤表皮层很薄且覆有蜡质物质，真皮层组织疏松，有许多微管状小孔，在 225 倍可以看到皮肤真皮层与皮下组织间有薄空腔存在，且覆羽层柔软蓬松，羽毛间存在均匀的空气间隙。^[3]这种生理结构就相于一个板子，上面有许多微小的孔均匀分布，在板子后面存在一个空腔，这样一个简单地结构就可以起到吸声降噪的作用。

第二章 设计实现过程

（一） 材料选择

耳塞的材料主要包括两部分：慢回弹性材料以及其他主体部分材料。对于材料的选择主要要求是隔声性能良好。在此基础上需要具有一定的硬度，强度，柔韧性，与皮肤接触时无刺激性，无毒性，同时需要具有耐老化性。对于塑料橡胶及橡塑材料的性能经过试验后需要满足表 1 的要求。

表 1 材料的性质与指标^[4]

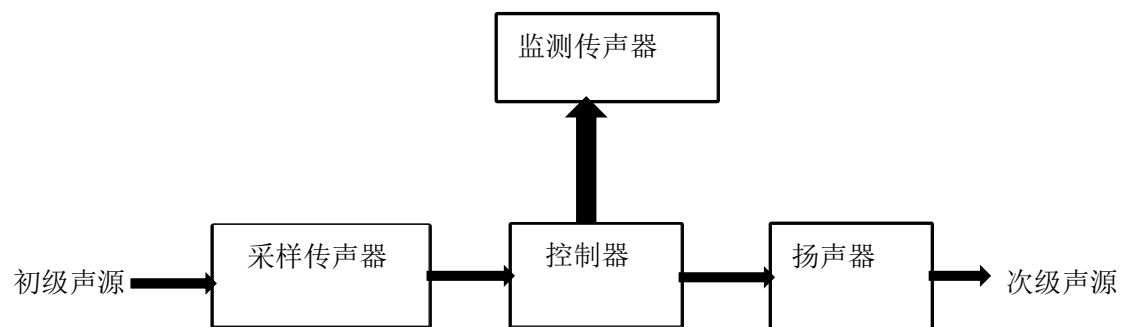
种类	材料性能	指标
塑料与橡胶材料	耐热性	无显著变形，不发粘不龟裂
	耐寒性	无硬化，无破损，无龟裂
	耐油性	无异常变形
橡塑材料	比重	<1.4
	扯断强度 Pa	>150
	扯断伸长率%	>400
	硬度 HS	<50
	耐热性	无显著粘着性
	老化系数（100° C*96h）	扯断强无显著粘着性度和扯断伸长率降低值均 20%
	耐油性	无异常

对于慢回弹性材料，当前聚氯乙烯（PVC）是国内制作慢回弹性耳塞的主要材料，这种材料虽然慢回弹性好，放入耳道后不会有胀疼感，且造价便宜，但是 PVC 材料长期使用且亲密接触人体的话，对人的健康会带来影响。所以当前欧盟已经采用了一种新的材料聚氨酯（PU），慢回弹 PU 材料内部存在大量泡孔且相互连通，可以起到很好的隔绝声音作用，且 PU 材料慢回弹性好，具有记忆作用，作为耳塞材料不会有不舒服感，且不会对人体有害。^[5]其余主体部分材料选用硅胶材料即可，硬度较高，且具有一定隔声性能，加工性能好。

（二） 有源降噪设计

有源降噪就是根据两个声波相消性干涉或声辐射抑制的原理，使抵消声波与原声波频率相等、相位相反，从而相互抵消，达到降低噪声的目的。有源降噪耳塞可以看作是有源消声技术在空间一个点上的应用，是空间有源消声的一种简单化模型。此耳塞由初级传声器、控制器、次级声源（扬声器）和监测传声器组成，包括上述 4 部分的系统称为闭环控制系统。初级信号采样一般用传声器；控制器主要完成延迟、放大和倒相功能，采用数字信号处理技术（信号转换器、放大器、存储器等）组成；次级声源用于辐射二次噪声；监测传声器在闭环控制系统或反馈系统中来拾取信号以控制滤波器改变滤波频率，就可以进行对信号误差的补偿，消除声反馈。监测传声器返回“误差信号”，是滤波器自适应调整，改善对各频率声波波形拾取的灵敏。^[6]在控制过程中系统各部件性能随外界条件变化而变化，因此采用单片机技术，使之具有一定的自适应能力，通过单片机进行动态的调整。

图 2 有源降噪流程图



在这个板块中还可以添加一个音乐播放器，这样可以适应一部分睡眠喜欢听音乐的群体需求，音乐的下载可以通过蓝牙无线传输，还可以设置定时播放及定时关闭的功能，当使用者设置了听音乐时间，到了时间便关闭，然后开启有源降噪的功能，从而最大程度上保证用户的睡眠质量。

（三）主动降噪设计

主动降噪结构就是将一个微穿孔板吸声结构以及一个类似海绵一样的多孔疏松结构结合，再在后面接一个空腔，形成一个主动吸声结构，也就是长耳鸮的皮肤与覆羽那样的吸声构造。

图 3 主动降噪结构简图



查阅资料后明白，微穿孔吸声结构的原理是穿孔板上每一个穿孔与其相对应的空气层组成的系统类似于亥姆霍兹共振器，穿孔板共振吸声结构可理解为许多亥姆霍兹共振器的并联。当声波进入小孔后便激发空腔内空气振动，如果声波频率与该结构共振频率相同时，腔内空气便发生共振，穿孔板孔颈处空气柱往复振动，速度、幅值达最大值，摩擦与阻尼也最大，此时，使声能转变为热能最多，即消耗声能最多，从而发挥高效吸声作用。^[7-8]

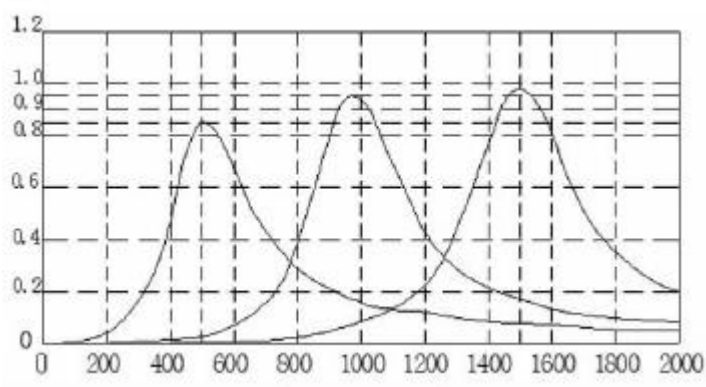
微穿孔板吸声的效果主要受到微穿孔板厚度，孔径，穿孔率，及板厚空腔深度，它的吸声系数表达式^[9]是

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + [\omega m - \cot(\frac{\omega d}{c})]^2} \quad (1)$$

r : 相对声阻, d : 空腔深度, m : 相对声质量, ω : 入射波角频率, c : 声波在空气中传播速度

考虑耳塞的实际大小，选择孔板的厚度为 $t=1\text{mm}$ ，开孔直径 $d=0.5\text{mm}$ ，孔间距 $b=4\text{mm}$ ，运用 matlab 软件，可以得到不同空腔深度时，吸声系数与入射频率的图像。

图 4 不同空腔深度时下吸声系数与频率关系



共振频率为 500Hz，1000 Hz，1500 Hz 时，对应空腔深度为 25mm，6mm，2mm。根据图像可以看出在每个共振频率处，吸声系数达到最大值。因为耳塞插入人耳的深度不能太大，因此可以选择空腔深度在 0-20mm，在这个范围内，可

以找到 500Hz 到 1500Hz 内对应的共振频率，通过调节空腔深度从而起到良好的吸声作用。其他参数与吸声效果的具体关系可以查阅参考文献。^[10-11]

第三章 可行性及市场应用分析

(一) 技术难点及我的思考

1. 整个耳塞的实现过程中最难的地方在于加工制作的难度大。

因为耳塞塞入耳道的体积不能太大，因此在有源降噪模块，对电子电路的集成性要求很高，此外在主动有源降噪部分，空腔有一定深度，且微孔板的孔径较小，分布较密，打孔的难度很高。

在我的思考中，由于现在的集成电路发展较快，使用高度集成的电路板，可以实现一个基本的感应声源然后产生一个相对应的次级声源的过程，在这个模块算法不需要非常精确，结构不需要太复杂，因为后面还有一个主动降噪的部分。至于微孔的打孔过程，可以使用激光打孔，激光很细，而且可以用电脑控制，虽然成本较高，但是可以通过建立生产线大批量生产，从而用提高产量的方法降低成本。

2. 耳塞的辐射问题

因为在耳塞里面加了有源降噪的部分，由于有电路的存在，且电路还要产生次级声源，在这个过程中会产生一定的辐射。

在我的设想中，有源降噪部分因为是电子电路控制，因此可以设置定时功能，睡觉前设置一两个小时，然后自动关闭，后面的主动降噪部分以及慢回弹性材料承担后续的物理降噪功能。整个电子电路规模较小，这样一来辐射的作用应该会比较小的。

3. 主动降噪部分空腔深度是一定的，对应的噪声频率范围也是一定的

这个问题是无法避免的，当超出这个频率范围后，空腔深度已经无法调节以获得相应的共振频率，而人的耳道深度是一定的，因此这个时候已经无法过多的改变空腔深度。但是考虑到吸声系数还与其他参数有关，因此可以建立不同的生产线，对应不同的孔径以及穿孔率，从而获得不同的频率范围，以满足不同的环境要求

（二）耳塞的适用人群及市场前景

这个耳塞的定位很清楚：最大程度的隔声以满足使用者的睡眠要求。因此适用人群主要针对的是城市里面饱受噪声困扰的居民。现在受噪声困扰的人越来越多，而与之相反的是居民对生活质量要求越来越高，因此睡眠耳塞的市场前景还是很大的。虽然成本比较高，但是因为可以重复使用，且防噪声性能好，还是会吸引很多人使用。

结论

本项目通过长耳鸮的生物结构获得启发，然后查阅相应资料了解到一种新的吸声降噪的，并结合目前的有源降噪技术及慢回弹性材料降噪技术，有效的弥补了二者的一些缺点，可以取得良好的降噪。但是由于我水平有限，且对于生产实践的过程不是很了解，在具体实行的过程中肯定会出现很多我未考虑到的问题。但是我相信未来肯定会出现类似的降噪耳塞以保护居民的睡眠质量。

参考文献

- [1]盛惠娟. 防噪耳塞综述及探讨[J]. 防护装备技术研究, 2010, (2)
- [2]余文斌等. 一种新型有源消声耳塞的研究[J]. 航天医学与医学工程, 2012, (6)
- [3]孙少明. 长耳鸮皮肤与覆羽耦合吸声降噪特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2008, 6, (3)
- [4]孙凤卿. 护听器标准的研究[J]. 劳动保护科学技术, 1987, (4)
- [5]周耿. 慢回弹聚氨酯发泡材料的隔声性能研究[N]. 浙江理工大学学报, 2010, 5 (3)
- [6]张珂, 余国华. 有源降噪技术的应用与系统实现[J]. 机电工程, 2000, (3)
- [7]周新祥. 噪声控制及应用实例[M]. 北京: 海洋出版社, 1999
- [8] 盛胜我等. 微穿孔平板空间吸声体的理论分析[J]. 声学学报, 2004, 29(4)
- [9]马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报, 1997, 22 (5)
- [10]左言言. 微穿孔板吸声结构的吸声性能及其应用[J]. 中国机械工程, 2007, 18 (7)
- [11]田汉平. 穿孔板的吸声结构的频率特性分析[J]. 淮北煤炭师范学院学报, 2005, (1)