

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212326

头盔式主动降噪耳机前馈降噪设计

李腾飞 万蕊

(西安讯飞超脑信息科技有限公司 西安 710076)

摘要:针对头盔式主动降噪耳机设计过程中所面临的前馈控制器目标传递函数影响因素复杂,人工头声学测试不准确的问题,提出了基于真人佩戴测试数据设计前馈控制器的方法。分析了主动降噪耳机的原理,弥补了现有理论的不足,设计实验验证了噪声源方向、耳垫弹性、反馈控制器、绷带弹性、头盔、测试装置对前馈控制器目标传递函数的影响,给出了设计建议。基于真人佩戴测试数据设计了前馈控制器,并测试了其于反馈控制器配合时的混合降噪效果,其中真人佩戴时测试平均降噪量可达 21.3 dB,人工头佩戴时仅有 10.7 dB,证明了基于真人佩戴测试设计的耳机降噪效果更好,人工头佩戴不能很好的反应真人佩戴的情况。

关键词: 头盔式主动降噪耳机;前馈控制器;主动降噪;真人佩戴测试;混合降噪

中图分类号: TN642 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Design of feedforward active noise control for helmet headset

Li Tengfei Wan Rui

(Xi'an iFLYTEK Hyper-Brain Information Technology Co., Ltd., Xi'an 710076, China)

Abstract: Aiming at the problem of complex factors affecting the objective transfer function of the feedforward controller and the problem of incorrect acoustic test with head and torso simulator in the process of design helmet active noise control headset a method of designing feedforward controller based on human wearing test data is proposed. The principle of active noise control headset is analyzed, which makes up the deficiency of existing theories. Experiments are designed to verify the influence of noise source direction, ear pad elasticity, feedback controller, bandage elasticity, helmet and testing device on the target transfer function of the feedforward controller, some recommendations are proposed. The feedforward controller is designed based on the data of human wearing test, and the effect of hybrid active noise control is tested when it cooperates with the feedback controller. The noise reduction 21.3 dB when the human is wearing, but 10.7 dB when the head and torso simulator is wearing, which proves that the noise reduction effect of headset based on the human wearing test design is better, and the head and torso simulator wearing cannot reflect the human wearing situation very well.

Keywords: helmet active noise control headset; feedforward controller; active noise control; human wearing test; hybrid active noise control

0 引言

头盔式主动降噪耳机是一种完全装入到头盔内部的耳机,为头盔提供了在高噪声环境下进行通话的功能,广泛应用于歼击机、直升机、坦克、装甲车等高噪场景。这些场景除了要求耳机有基本的通话功能之外,还要在几乎全音频频段都具有良好的降噪性能。

早期头盔式耳机完全靠被动降噪来降低环境噪声对通话的影响,其降噪性能取决于耳机的壳体材料,声腔结构等。后来出现了单反馈头盔式主动降噪耳机,其研发采用

耳机与头盔分离的方法,即先将耳机在头盔外完成研发,然后再装入头盔使用。研发过程中需使用绷带将耳机固定在人工头上进行数据测量和降噪量测量,降噪测量的结果与真人佩戴时的主观感受较为一致。近年来,头盔式主动降噪耳机开始在原单反馈降噪的基础上增加前馈降噪,升级为混合降噪,采用传统的耳机与头盔分离的方法研发出的混合降噪耳机,测试时降噪量能提升近 10 dB(50 Hz~1 kHz 平均值),但装入头盔后由真人佩戴时,主观感受上的降噪效果不一定会有很明显的提升。

由于应用场景特殊,对器件国产化有着极为严格的要

联立式(1)~(5)可得出如下结果:

$$\frac{S_e}{NH_{n2e}} = \frac{1 - \frac{H_f}{H_{f0}} + H_c H_b}{1 - H_{s2f} H_f - H_{s2b} H_b} \quad (7)$$

其中:

$$H_{f0} = \frac{H_{n2e}}{H_{n2e} H_{s2f} - H_{n2f} H_{s2e}} \quad (8)$$

式中: H_{f0} 表示 $H_b = 0$ 时,即单前馈状态下,能够将噪声完全消除的 H_f 。

$$H_c = \frac{H_{n2b} H_{s2e} - H_{n2e} H_{s2b}}{H_{n2e}} \quad (9)$$

式中: H_c 反映了反馈传声器和探针传声器的位置差异会导致降噪量差异。

令 $H_c = 0$ 且 $H_{s2f} = 0$, 式(7)将退化为传统的忽略反馈传声器处与耳道内声音信号差异,且不考虑扬声器到前馈传声器这一电声传播路径存在的模型。

令式(7)为0求解 H_f 可得:

$$H_{fh0} = H_{f0} (1 + H_c H_b) \quad (10)$$

其中, H_{fh0} 即混合降噪状态下将噪声完全消除的 H_f , 可作为混合降噪系统中,前馈控制器的设计目标传递函数。可见由于 H_c 的存在,混合降噪系统的最优前馈控制器与单前馈系统的最优前馈控制器有所区别,因此混合降噪系统中前馈控制器的设计必须基于某个已经设计好的反馈控制器。对于大耳罩式耳机来说,由于反馈传声器与人耳耳道相距较远,且为了提升被动降噪,前腔往往会加吸音棉,使得反馈传声器与人耳耳道之间隔了厚厚的声阻尼,导致了 H_c 不可忽略。相反对于入耳式耳机来说,只要出声嘴直径足够大,且反馈传声器到人耳耳道的路径上声阻尼可忽略时, H_c 就可以忽略,前馈控制器和反馈控制器的设计就以可采用分别单独设计的方法,同时设计反馈控制器和以 H_{f0} 为目标设计前馈控制器,实现最优的混合降噪。

令式(7)中 $H_f = 0$ 可得:

$$\frac{S_{eb}}{NH_{n2e}} = \frac{1 + H_c H_b}{1 - H_{s2f} H_f - H_{s2b} H_b} \quad (11)$$

其中, S_{eb} 为单反馈情况下,探针传声器采集到的信号,则探针传声器处的单反馈降噪量为:

$$NR_{cb} = 20 \lg |S_{eb}| - 20 \lg |NH_{n2e}| = 20 \lg \left| \frac{S_{eb}}{NH_{n2e}} \right| \quad (12)$$

主动降噪开启时,耳机播放声音的传递函数为:

$$S_{me} = M \frac{H_{mcf} + H_{mcb} H_b}{1 - H_{s2f} H_f - H_{s2b} H_b} H_{s2e} \quad (13)$$

说明主动降噪系统会对耳机重放的频响产生影响,若想消除该影响则需令:

$$H_{mcf} = 1 - H_{s2f} H_f \quad (14)$$

$$H_{mcb} = -H_{s2b} \quad (15)$$

综上,可以总结出基于模拟电路设计主动降噪耳机固定系数控制器的设计步骤为:

1) 使用电声测试系统例如 SoundCheck 等对耳机的 H_{n2f} 、 H_{n2b} 、 H_{n2e} 、 H_{s2f} 、 H_{s2b} 、 H_{s2e} 进行测试,使用测试系统的后处理算法,按式(8)计算 H_{f0} ,按式(9)计算 H_c 。

2) 使用文献[2]所提到的 AS3435 评估板的方法或其他方法,基于数字电路搭建传递函数为 H_b 的控制器实现单反馈降噪,设计过程可借助式(11)和(12)对降噪效果进行仿真,设计出大于 1 kHz 频段增噪极少,小于 1 kHz 频段降噪量较大的 H_b 。

3) 使用式(10)计算出 H_{fh0} 。

4) 重复步骤 2) 的方法,以 H_{fh0} 为目标传递函数搭建前馈控制器,与反馈控制器配合实现混合降噪,设计过程中可用式(6)和(7)对降噪效果进行仿真,设计出较为理想的降噪效果。

5) 重复步骤 2) 的方法,根据式(14)和(15),以 H_{mcf} 和 H_{mcb} 为目标搭建信号播放控制器 f 和信号播放控制器 b ,实现对播放信号的补偿,抵消主动降噪系统对播放信号频响的影响,该过程可根据式(13)对播放信号的频响进行仿真。

6) 借助电路仿真软件,设计出传递函数为 H_b 、 H_{fh0} 、 H_{mcf} 、 H_{mcb} 的控制器电路,实现耳机的主动降噪和受话功能。

该设计方法的特点在于,仿真过程中考虑了 H_{s2b} 和 H_{s2e} 的差异, H_{n2b} 和 H_{n2e} 的差异,以及 H_{s2f} 的存在对主动降噪效果的影响,仿真更加准确;采用了先基于数字电路快速实现主动降噪和受话功能,再根据数字电路的特性设计模拟电路的方法,避免了复杂的模拟电路调试过程,具有较高的开发效率。

2 前馈控制器设计影响因素

2.1 噪声源方向的影响

耳机对不同方向噪声的隔音能力不同,且前馈传声器装配在耳机上有一定的指向性造成了式(8)和(9)中的 H_{n2e} 、 H_{n2f} 、 H_{n2b} 存在方向性,最终导致 H_{fh0} 存在方向性,根据相关标准可采用4个方向噪声源同时激励的方法进行测试^[11]。对一款耳机进行实测,使用无弹力细带将耳机佩戴到人工头上,噪声源距离人工头 1 m,分别摆放在 0°、90°、180°、270°方向上,以及4个方向噪声源同时激励,对各个传递函数全部进行测量,并由测试系统自动计算出 H_{fh0} ,其频响如图2所示。

其中 800 Hz 以上的频响差异较大。为了使设计的前馈控制器在各个方向上都具有良好的降噪效果,一方面在声学设计上要调整好前馈传声器的位置,耳机前后腔泄露孔的位置,使得 H_{fh0} 受方向的影响更小。另一方面,要用4个方向噪声源同时激励的方法进行 H_{fh0} 的测试,避免出现某个方向降噪很好,其他方向上降噪较差的现象出现。

2.2 细带弹性的影响

在耳机研发初期阶段,头盔和耳机是同步进行研发的,

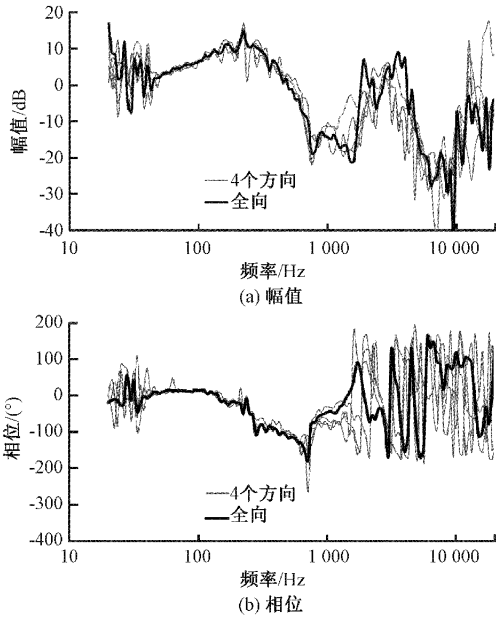


图 2 噪声方向对 H_{fh0} 频响的影响

头盔完成研发之前,只能用绷带将耳机佩戴到人工头上测试数据进行预研,并且在耳机在生产过程中不可避免的会用到绷带固定测试法进行质量管控,因此有必要研究绷带的弹力是否会对前馈控制器的设计造成影响。

绷带和耳垫具有弹性,耳机壳体具有一定的质量,佩戴时会形成机械振动系统,在测试时出现异常共振^[12-13],影响测试结果。

实测一款耳机,分别使用有弹性和无弹性的绷带将耳机佩戴到人工头上,4个方向噪声源距离耳机1m同时激励,测量得到的 H_{fh0} 的频响如图3所示,使用有弹性绷带

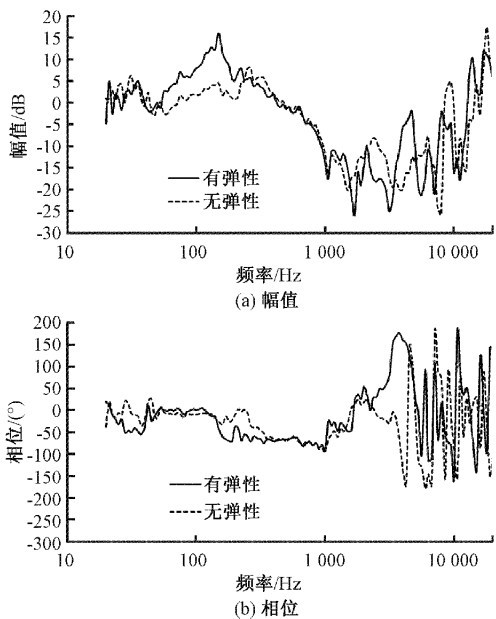


图 3 绷带弹性对 H_{fh0} 频响的影响

和无弹性绷带时, H_{fh0} 的频响曲线 400 Hz 以下和 1 kHz 以上差异均很大。因此研发和生产过程中若不可避免地需要使用绷带固定耳机进行测试时,应采用弹力相同的绷带,并保证松紧度相同。

2.3 耳垫弹性的影响

与绷带相同,耳垫的弹性也会影响 H_{fh0} 。实测一款耳机,使用无弹性的绷带将耳机佩戴到人工头上,4个方向噪声源距离耳机1m同时激励,耳机的耳垫分别采用普通海绵和弹力更差的惰性海绵, H_{fh0} 的测量结果如图4所示。

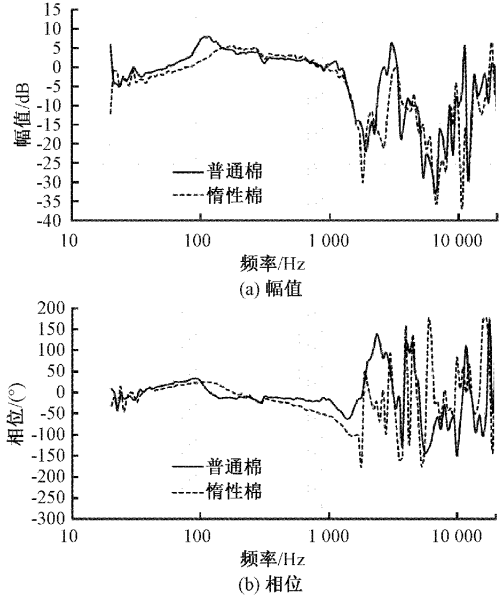


图 4 耳垫弹性对 H_{fh0} 频响的影响

与惰性海绵相比,采用普通海绵时, H_{fh0} 的频响在 100 Hz 处出现共振峰,这使得导致前馈控制器更加复杂难设计,且共振峰的位置受到佩戴松紧的影响,根据文献[9]的分析,这种程度的偏差会使降噪量受佩戴松紧影响很大,因此建议耳垫使用惰性棉。

2.4 反馈控制器的影响

根据式(10), H_b 会对 H_{fh0} 造成影响。实测一款耳机,使用无弹性绷带将耳机佩戴到人工头上,4个方向噪声源距离耳机1m同时激励,调整反馈控制器的增益,每调整一次测试一次 H_{fh0} ,测得经过单反馈降噪后人工头耳内传声器处的残余噪声的频响变化如图5所示。

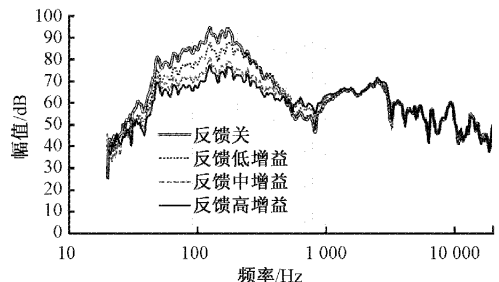


图 5 单反馈降噪后的残余噪声变化

随着 H_b 增益的提高,残余噪声 500 Hz 以下的频段声压级越来越低,同时 500~1 500 Hz 之间由于水床效应^[14]存在一定的增噪。

随着反馈控制器增益的调整,测得的 $H_{f_{h0}}$ 的频响变化如图 6 所示,可见随着反馈控制器增益的提高,反馈降噪量增加的同时, $H_{f_{h0}}$ 频响有较为明显的变化,反馈控制器增益较低时,仅 80 Hz 以下受到较小的影响,增益较高时 20 Hz~3 kHz 受到的影响都比较大。实验证明了反馈控制器增益较高时,混合降噪系统的最优前馈控制器与单前馈降噪系统的最优控制器会存在较大的差异,因此应当根据式(10),基于已经设计好的反馈控制器来设计前馈控制器,实现混合降噪。

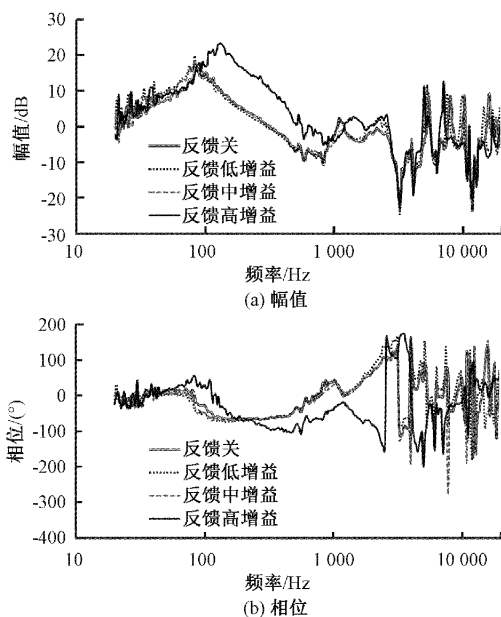


图 6 反馈控制器对 $H_{f_{h0}}$ 频响的影响

2.5 头盔的影响

耳机在头盔内的安装首先要保证耳机壳体上的调音孔透气量不发生变化,否则会引起耳机频响和隔音能力发生变化改变^[15],同时调音孔应尽量远离前馈传声器,尽量避免装入头盔后,式(7)和(8)中的 H_{s2f} 增强。由于头盔对耳机进行了全面的遮挡,以及头盔固定耳机方式会产生较多的共振,不可避免的会造成 $H_{f_{h0}}$ 受头盔影响。实测一款耳机,4 个方向噪声源距离耳机 1 m 同时激励,分别使用无弹性绷带和头盔将耳机佩戴到人工头上,图 7 和 8 分别是在消声室中,使用绷带和头盔对耳机固定进行测试的场景。



图 7 使用无弹力绷带对耳机进行固定

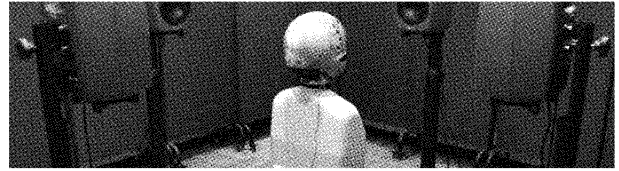


图 8 使用头盔对耳机进行固定

测得 $H_{f_{h0}}$ 的频响曲线如图 9 所示, $H_{f_{h0}}$ 频响曲线的整体趋势大致相同,但改用头盔固定耳机后,造成了 200 Hz 以下幅值提升,500 Hz 出现谐振峰,700 Hz 出现谐振谷,并对 2 kHz 左右的相位产生影响。

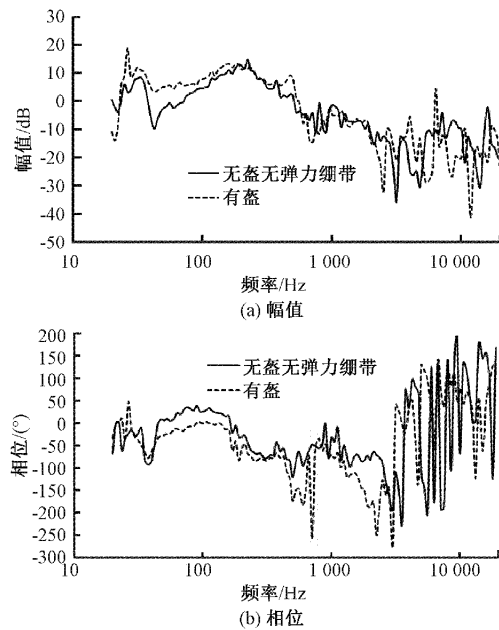


图 9 头盔对 $H_{f_{h0}}$ 频响的影响

实验表明,在人工头上,用无弹力绷带固定耳机与用头盔固定耳机所测得的数据是较为接近的,只是头盔固定耳机装配到人工头上时会增加更多共振。

结合 2.2 节的结论,在研发和生产的各个环节,当不可避免地要使用绷带固定法测试耳机时,应当统一采用无弹力绷带进行测试,测得的数据更接近实际佩戴时的情况。

2.6 测试装置影响

分析 2.5 节的测试数据,测试结果出现较多的共振的原因可能是因为人工头与头盔的硬接触,有必要对比人工头佩戴头盔和真人佩戴头盔测试的区别。

实测一款耳机,4 个方向噪声源距离耳机 1 m 同时激励,使用头盔将耳机佩戴到人工头(如图 8 所示)和真人头上进行测试。如图 10 所示,探针式传声器由一颗长 2.75 mm 宽 1.85 mm 高 0.95 mm 的 MEMS(micro electro mechanical system)传声器焊接到 FPC(flexible printed circuit)柔性线路板组成。信号调理电路板连接传声器,为传声器供电,并将信号增益进行调理,最终输出到声卡。将探针式传声器植入到人工耳耳道中,用医用胶带进行固定,胶

带不遮挡耳孔。如图 11 所示,将耳机装到头盔上,由真人佩戴头盔进行数据测试,声卡采集前馈传声器,反馈传声器,探针传声器的信号,由测试系统分析数据。

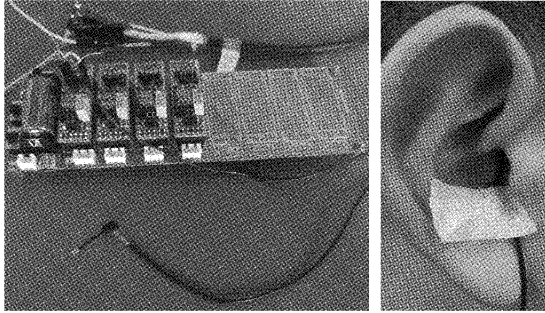


图 10 探针式传声器电路及植入耳道的方式



图 11 真人佩戴头盔进行测试

测试结果如图 12 所示。

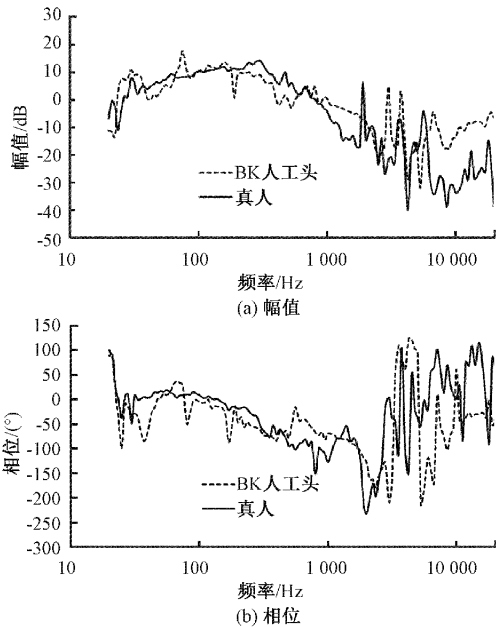


图 12 真人和人工头测试 $H_{f_{h0}}$ 频响对比

两种情况下的测得的 $H_{f_{h0}}$ 频响曲线趋势大致相同,人工头佩戴头盔时 75 Hz 出现共振峰,200 和 500 Hz 附近出现共振谷,1 500 Hz 附近整体增益较高。与真人佩戴时,相比存在着较大的差异。

早期人工头全部采用较硬的材质,例如 BK4128 等,后来为了配合耳机测试,出现了耳朵周围的脸部区域采用软硅胶材料的设计,来模仿人类的佩戴耳机时,耳垫与人皮肤

接触的效果,例如 BK5128 以及 Head acoustic 的 HMS_II.3 人工头等。可以进行合理的推测,若想使人工头能够更加准确的测试头盔式主动降噪耳机,可能需要整个人工头的设计都更加接近真人头,例如头部与头盔接触的部分全部采用软硅胶材质,并在头顶增加头发,来模仿人类发肤与头盔的接触。当前若想设计出真人佩戴时降噪效果最佳的头盔式主动降噪耳机,最好的方法只能是基于真人佩戴进行数据测试。

综上,前馈控制器目标传递函数的影响因素如表 1 所示,头盔式主动降噪耳机设计过程中不能忽略这些问题。

表 1 前馈控制器目标传递函数影响因素总结

影响因素	影响	建议
噪声源方向	800 Hz 以上频响走势	4 个方向同时摆放噪声源
绷带弹性	400 Hz 以下频响走势	使用无弹性绷带
耳垫弹性	100 Hz 附近共振峰	使用惰性棉耳垫
反馈控制器	3 kHz 以下频响走势	基于反馈控制器设计前馈控制器
头盔和测试装置	20 Hz~20 kHz 共振峰谷和频响走势	真人佩戴测试

3 前馈控制器设计

3.1 基于真人佩戴设计

针对一款已经设计好反馈控制器的头盔式主动降噪耳机测试其 $H_{f_{h0}}$, 4 个方向噪声源距离耳机 1 m 同时激励,采用 2.6 节提出的真人佩戴测试法进行测试,测试了 12 人佩戴时的 $H_{f_{h0}}$, 其频响的幅值和如图 13 所示。

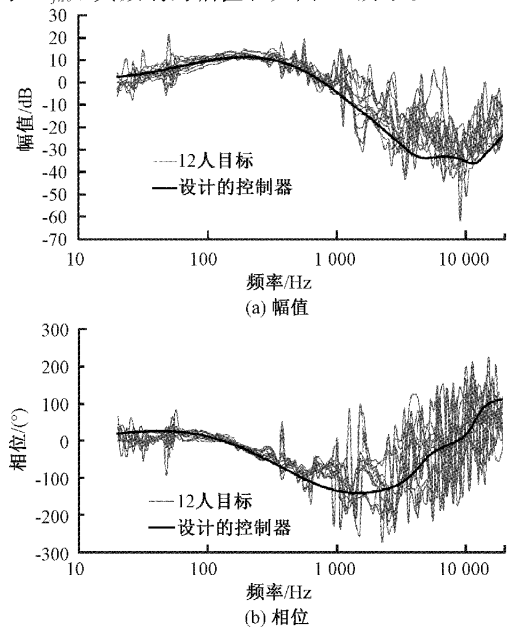


图 13 基于真人佩戴设计 $H_{f_{h0}}$

其中较粗的虚线是以 12 个 $H_{f_{h0}}$ 频响曲线为目标,设计的前馈控制器的频响曲线,设计过程使用恒玄的 BES2500 数字电路开发平台搭建前馈控制器,使用式(6)和(7)对混合降噪进行仿真。12 人的降噪曲线仿真结果如图 14 所示。

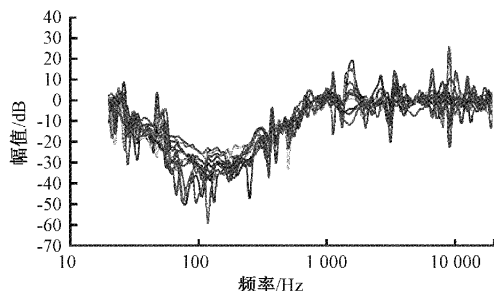


图 14 12 人佩戴耳机的降噪曲线仿真

12 人佩戴耳机的降噪量最大值大部分在 29~50 dB 之间,个别人的个别频点甚至可达到 59 dB,这说明前馈控制器的频响设计效果是比较好的。

采用 2.6 节提出的真人佩戴法,根据式(6)的原理对降噪量进行实测,测试结果如图 15 所示。

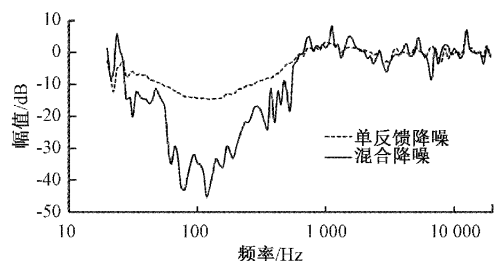


图 15 真人佩戴实测降噪曲线

可见真人佩戴时,混合降噪量在单反馈降噪量的基础上显著增加,最大降噪量由 15 dB 增加到 40 dB,50 Hz~1 kHz 的平均降噪量由 8.6 dB 增加到 21.3 dB,前馈与反馈控制器实现了良好的配合,并在真人佩戴时实现了良好的降噪效果。

3.2 人工头测试降噪量

将 3.1 节设计好的耳机用人工头测试降噪,分别使用无弹力绷带和头盔将耳机固定到人工头上进行降噪量测试,测试结果如图 16 所示,使用人工头进行测试时,无弹力绷带和头盔固定耳机的测试结果较为接近,仅 200 Hz 以下的频段降噪量有所区别,但与真人佩戴测试相比,降噪量均明显变差。50 Hz~1 kHz 的平均降噪量分别为真人头盔 21.3 dB, BK 人工头头盔 14 dB, BK 人工头绷带 9.8 dB。因此将对传统的用人工头测试主动降噪耳机的方法,直接用于测试头盔式耳机的降噪量是不准确的。

3.3 基于人工头佩戴设计

若将 3.1 节采用的真人佩戴测试降噪量的方法定为测试真实降噪效果的标准,对基于人工头佩戴耳机测试数据

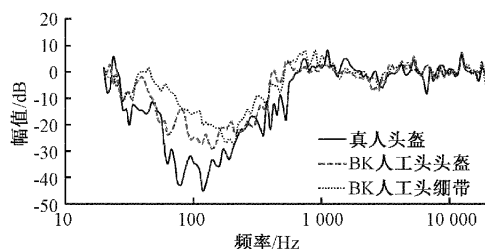


图 16 不同测试方法测得的降噪曲线

所设计控制器的降噪效果进行验证。分别基于真人佩戴,人工头佩戴,人工头无盔佩戴无弹力绷带固定 3 种方式测得的 $H_{f_{h0}}$ 设计前馈控制器,测试降噪量,结果如图 17 所示。

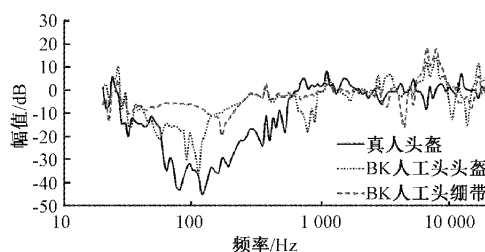


图 17 不同设计方法的真人佩戴测试降噪曲线

测得的 50 Hz~1 kHz 的平均降噪量分别为真人头盔 21.3 dB, BK 人工头头盔 10.7 dB, BK 人工头绷带 5.5 dB。以人工头测试得到的 $H_{f_{h0}}$ 为目标设计前馈控制器,在真人佩戴测试时,降噪效果较差,甚至在 7 kHz 出现增噪。因此若以真人佩戴测试的降噪量为判定真实降噪效果的标准,在设计前馈控制器时,也应当采用真人佩戴的方式测试数据。

4 结 论

头盔式主动降噪耳机前馈控制器设计过程中的数据测试,以及降噪量的测试,在原则上都应当由真人佩戴进行测试,不建议用人工头代替真人;需要使用绷带固定在人工头上进行研发和降噪量的测试时,应采用无弹力绷带固定耳机;测量数据和测试降噪时,噪声源必须在 4 个方向上同时激励;混合降噪系统设计过程中,前馈控制器的设计要基于已设计好的反馈控制器;耳垫选用惰性棉材料填充,更有利于前馈降噪设计。

参考文献

- [1] 李楠,安峰岩,杨飞然,等.一种用于主动降噪耳机的权重滤波误差信号滤波-x 最小均方法[J].应用声学,2018,37(3):391-399.
- [2] 张帅.一种大耳罩有源降噪耳机的设计与实现[D].成都:电子科技大学,2018.
- [3] 郑保宾,唐文其.耳机被动降噪特性分析[J].电声技术,2020,44(3):33-36.
- [4] 陈浩.基于 DSP 的有源降噪耳机系统设计与研究[D].南京:南京信息工程大学,2018.

- [5] MILJKOVIC D. Active noise control: from analog to digital—Last 80 years [C]. 2016 39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), IEEE, 2016:1151-1156.
- [6] RAVINCHANDRA K A, FEI T K, YONG L C. Active noise reduction using LMS and FxLMS algorithms[J]. Journal of Physics Conference Series, 2019, 1228:012064.
- [7] 史雄坤. 基于 DSP 的主动降噪耳机的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- [8] 谢豫娟, 谢锡海. 基于改进的 FXLMS 算法的主动降噪耳机系统研究[J]. 电声技术, 2021, 45(6):71-75.
- [9] 张亚东, 郑保宾. 前馈式降噪耳机设计[J]. 电声技术, 2018, 42(4):1-3.
- [10] IEC. IEC60318-4: Electroacoustics-simulators of human head and ear-Part 4: Occluded-ear simulator for the measurement of earphones coupled to the ear by means of ear inserts[S]. IEC, 2010.
- [11] 中国电子音响行业协会. T/CAIACN 006-2021, 无线降噪耳机技术要求和测量方法[S]. 中国电子音响行业协会, 2021.
- [12] POLDY C A. Headphones in loudspeaker and headphone handbook[M]. Focal Press, 2001.
- [13] 郑保宾, 张亚东. 耳罩式耳机异常共振分析[J]. 电声技术, 2017, 41(Z1):35-40.
- [14] 吴礼福, 李佳强, 陈定, 等. 一种调节反馈有源噪声控制系统水床效应的频域自适应算法[J]. 应用声学, 2019, 38(1):45-51.
- [15] 张亚东, 张毅. 一款入耳式耳机的仿真与分析[J]. 电声技术, 2014, 38(9):17-21.

作者简介

李腾飞(通信作者), 工程师, 主要研究方向为有源噪声控制、声频测量、嵌入式开发。

E-mail: 762735353@qq.com

万蕊, 工程师, 主要研究方向为有源噪声控制、语音增强。

E-mail: 798574071@qq.com