

耳罩式耳机接触压力对降噪量和舒适性的综合影响分析

陈梓涵¹, 余光正^{1,2}, 王业维², 李哲林¹

(1. 华南理工大学设计学院, 广州 510006; 2. 华南理工大学物理与光电学院, 广州 510641)

摘要: 耳罩式耳机是一种与人体表面直接接触的声学穿戴设备,除了耳罩形状和材质,施加在耳罩上的夹紧力将直接影响耳罩在头皮表面的接触压力和降噪量,从而影响佩戴舒适和听觉舒适等体验。针对耳机产品接触压力难以测量和评估的问题,本文设计了一个给被试施加可调夹紧力的装置,同时采用一对压力胶片测量传递至头皮的接触压力。为了分析佩戴过程中的声学指标,在耳道口布置一对微缩传声器,用以捡拾和分析不同噪声环境下双耳噪声暴露剂量的衰减(即降噪量),及其随夹紧力的变化。最后,结合舒适度量表,探讨了夹紧力、接触压力和降噪量等客观参数与舒适性主观感知之间的相关性,从而建议出合适的夹紧力设计范围。本文的实验方法和相关研究结论可为耳罩式耳机的夹紧力设计或评估提供一定的参考。

关键词: 耳罩式耳机; 夹紧力; 接触压力; 降噪量; 佩戴舒适; 听觉舒适

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Analysis on Comprehensive Impact of Contacting Force of Over-Ear Headphones on Noise Reduction and Comfort

CHEN Zihan¹, YU Guangzheng^{1,2}, WANG Yewei², LI Zhelin¹

(1. School of Design, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Over-ear headphones (or around-ear headphones) are acoustic wearable devices that directly contact with the surface of the human body. In addition to the shape and material of the earmuffs, the clamping force applied to the earmuffs will directly affect the contacting force on the scalp and the noise attenuation performance, thereby influencing the user's wearing comfort and hearing comfort. To address the challenge of measuring and evaluating contact pressure in headphone products, a testing device is designed to employ an adjustable clamping force on a subject. In contrast, the contact pressure exerted on the scalp is measured using a pair of pressure-sensitive films. To analyze acoustic parameters during the wearing process, a pair of miniature microphones is positioned at the ear canal entrances to record and analyze the attenuation of binaural noise exposure dose (i.e. noise reduction amount) under different noise environments and various clamping forces. Finally, by incorporating comfort rating scales, the study examines the relationship between objective parameters, including clamping force, contacting force and noise attenuation, and subjective comfort perception. Based on the findings, an appropriate range for

clamping force design is suggested. The experimental methodology and relevant conclusions of this study provide a reference for the design and evaluation of clamping force in over-ear headphones.

Key words: over-ear headphones; clamping force; contact pressure; noise reduction; wearing comfort; hearing comfort

引 言

随着多媒体终端和智能穿戴等行业的迅速发展,耳机产品作为终端设备的重要分支越来越被重视,与之相伴的技术进步也日益被关注^[1-3]。在耳机产品中,头戴式耳机区别于入耳式耳机(In-ear headphones)的最大特点在于配备有支撑耳罩的头带,用来对耳罩施加以合适的夹紧力^[4]。实际应用中,头戴式耳机又可分为直接接触耳廓的贴耳式耳机(On-ear headphones)和完全覆盖但不接触耳廓的耳罩式耳机,如包耳式耳机(Around-ear headphones)或耳罩式耳机(Over-ear headphones)^[5]。耳机产品虽然是一种技术相对成熟的传统电子消费产品,但随着科学技术的进步和智能穿戴产品的发展,用户对耳机舒适性提出了越来越高的要求。例如,美国高通公司发布的音频产品使用现状调研报告显示,从2023年开始,用户对耳机佩戴时耳朵的舒适度的关注首次超过对价格的关注,成为消费者购买耳机产品的最大驱动因素^[6]。

舒适性是一个较为宽泛的概念,从人机工程学的视角来看,耳罩式耳机的舒适性大致可分为视觉舒适性、佩戴舒适性和听觉舒适性。视觉舒适性主要来源于产品的美观设计^[7];佩戴舒适性与人机工程学相关,包括接触材料的舒适性^[8-9]和佩戴力对头部的影响^[10]等;听觉舒适性则由声学因素决定^[11]。其中,佩戴舒适性和听觉舒适性是耳罩式耳机功能性使用和舒适性体验的关键因素,对长期佩戴者的听力保护也至关重要。就耳罩式耳机的佩戴舒适性而言,它不仅受到耳罩材料的影响^[8-9],通常也和接触压力(或夹紧力)有关,甚至被视为影响耳罩式耳机佩戴舒适性的关键因素^[12-13]。Bhattacharya等^[14]的研究提到,听力保护耳罩较低的作用力通常与较高的舒适性评分相关联,紧度较低的耳罩头带弹簧通常被认为更舒适。Williams等^[15]指出,耳罩给耳部周边施加的压力可能是衡量听力保护耳罩舒适性的重要指标之一,这种耳部周围的压力会限制该区域的血流,从而导致不愉快或不适的感觉。Gerges等^[16]指出耳罩的舒适性与其与接触面的接触压力分布直接相关,当总的接触力较大时,更均匀分布也能提供更好的舒适性。Hsu等^[17]也提到压迫感(Sense of oppression)是佩戴听力保护设备时感到不适的第二大原因。因此,研究耳罩式耳机夹紧力对佩戴舒适和听觉舒适的影响对提升用户体验具有重要意义。

耳机通常使用于户外等具有特定背景噪声的声学环境,即使缺少有源噪声控制(Active noise control, ANC)^[18]的作用,耳罩式耳机也因其较好的密闭性从而营造相对安静的听音环境。因此,本文关注的听觉舒适主要与双耳噪声暴露剂量有关,可以用隔声量或降噪量来加以评估。隔声降噪效果较佳的耳罩式耳机可以使用户在较小音量下清晰地听到播放内容,从而避免或缓解听觉疲劳和听力下降。在佩戴耳机时,施加给耳罩的夹紧力对于噪声的隔离也会产生影响,当夹紧力较小时,耳罩与头皮间的缝隙可能使得噪声暴露量增加,从而影响听觉舒适。为了阻隔噪声需要增大夹紧力,但过高的夹紧力又可能给用户带来显著的不适感。因此,对于耳罩式耳机的舒适性,有必要通过跨学科的知识从佩戴舒适性和听觉舒适性两方面进行综合分析和研究。然而,目前国内外相关研究较少同时兼顾耳罩式耳机的佩戴舒适性和听觉舒适性,特别是没有在可调节的耳罩夹紧力条件下对此进行综合评估。

由于技术条件的限制,头带施加给耳罩的夹紧力,以及通过耳罩传递至头皮的接触压力并不容易测量,更不容易在佩戴过程中进行定量调节。已有研究中,所采用的测量方法主要包括电子传感器^[16]

和有限元模型仿真分析^[19]。但是压力传感器所使用的材料总体上硬度偏大,其本身可能影响佩戴者的舒适感,不利于同时评估不同接触压力下的佩戴舒适度。事实上,能够测量接触压力的技术方案越来越多,包括压力胶片等^[20-21]。借助一定技术手段来准确测量耳罩施加于头皮表面的接触压力,对夹紧力设计和舒适度评估都具有重要意义。然而,在不同夹紧力下分析耳罩接触压力和降噪效果变化量的相关研究,以及对舒适性的影响等方面,还未见有系统、综合的报道。

因此,本文以耳罩式耳机的听觉舒适性与佩戴舒适性为研究目标,首先设计一个安装有数字拉力计的测试装置来调节耳罩式耳机的夹紧力,通过压力薄膜采集不同夹紧力下的接触压力,从而分析耳机佩戴夹紧力的实际变化;然后,在经过隔声处理的声学实验室中,通过4个扬声器营造一个稳态噪声环境,在人工头上用封闭耳道法测量分析夹紧力对噪声暴露的定量影响关系或作用范围;最后,在夹紧力和噪声暴露量的分析结果基础上,在不同夹紧力(4, 8, 12和16 N)水平以及稳态噪声环境下(设置为55 dB,与耳机使用常见噪声环境较为接近),研究耳机接触压力对佩戴舒适性和听觉舒适性之间的影响。本文的实验方法和相关研究结果对耳罩式耳机夹紧力设计具有一定指导意义,对其舒适性评价也具有参考价值。

1 不同夹紧力下的接触压力测试

1.1 测试装置

本文设计的夹紧力调节和测试装置如图1所示,由支架、水平导轨、拉力计及耳罩等部分组成。拉力计的量程为500 N,安装在水平导轨上以实时记录耳罩夹紧力,通过数字拉力计调节和实现不同夹紧力水平。水平导轨的长为500 mm,有效行程为250 mm,通过手柄控制其进退以实现夹紧力增减。实验时,受试者坐在支架中间,两侧拉力计对无头带的悬置耳罩施加外力并传递至受试者头耳部,在拉力计显示屏上显示当前压力数值。在正式实验前,施力装置的准确性和可重复性通过试验已得到验证,即测试过程中拉力计的精度基本保持在 ± 1 N的范围。



(a) Bracket



(b) A case of force testing for a subject

图1 基于数字拉力计的夹紧力调节装置

Fig.1 Clamping force adjustment device based on digital tensiometer

本文重点关注的是夹紧力,而并不关注材质和耳罩形状等其他参数的影响,因此仅以一种典型的耳罩式耳机模型作为研究对象。耳罩的尺寸和结构源于Sennheiser耳罩式耳机(型号为Momentum 4),按照其尺寸设计3D模型并打印成塑料材质的耳罩壳体(如图1所示,已有研究也采用过类似方法^[22]),然后配装该耳机的椭圆环形深色原装海绵耳垫。如前文所述,采用自制耳罩壳体可以去除耳机头带施加的夹紧力,以准确控制和测量外部施加的压力。实验中,拉力计施加的力经过受力点、耳罩壳体、耳垫等传递到受试者头部。

1.2 接触压力测试

在测量中,使用了日本富士公司(FUJI)生产的Prescale-5LW超微压双片型胶片,它能够测量0.006~0.05 MPa(0.87~7.3 psi)的压力。该胶片的最小测试压力和测试压力动态范围均能较好地满足头戴式耳机的佩戴接触压力范围。此外,该胶片轻薄有韧性,能够较好地适应人头耳部附近的头皮复杂曲面,从而提供准确的测量结果。双片型压力胶片由顶层薄膜(涂有特殊的微胶囊成色材料)和底

层薄膜(涂有特定的显色材料)组成。其检测原理如图 2(a)所示,即在耳罩施力区域,顶层薄膜含有颜色的微胶囊因受到挤压而破裂,使成色材料流出,然后与底层薄膜的显色材料反应形成压力印记^[23]。通过图像处理和分析胶片上印记的颜色深浅,可以确定压力的大小;通过颜色分布的均匀程度,亦可以判断压力作用的均匀程度。此外,为了获得更精确的测量结果,本文研究根据实验耳罩的形状,将压力胶片内部裁切出椭圆孔,具体如图 2(b)所示。

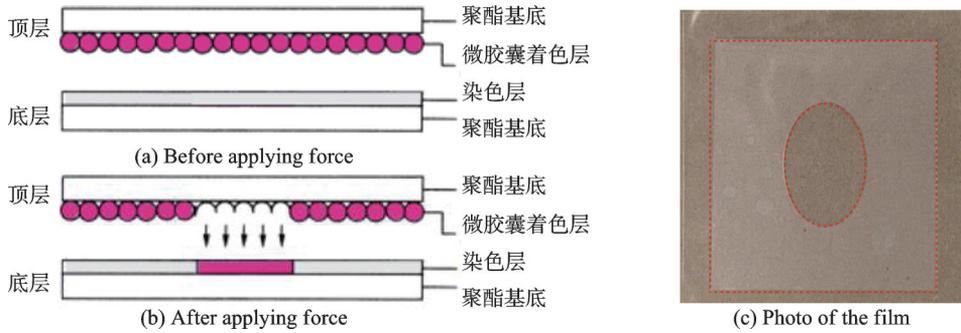


图 2 压力胶片原理

Fig.2 Working principle of pressure film

基于厂家提供的颜色-压力的参数映射关系^[23],本文使用自己编程的 MATLAB 脚本,对实验中测得的压力胶片数据进行了计算处理。首先读取图像中接触区域内每个像素点的灰度值。根据特定的函数换算关系,逐个将像素点的灰度值与比色卡的标准灰度值对比,将每个像素点的灰度值映射到对应的压强值。然后,对所有像素点的压强值进行累加,得到整张胶片的总压强。通过压强到压力的转换关系,将总压强转换为压力数值,从而计算出整张胶片的总压力均值,即为受试者佩戴实验耳机时的实际接触压力。施加于耳罩壳体的夹紧力分布为 4, 8, 12 和 16 N, 图 3 展示了某位受试者在 4 个不同夹紧力水平下的压力胶片着色效果示例,可清晰地反映出接触压力随夹紧力的变化趋势。

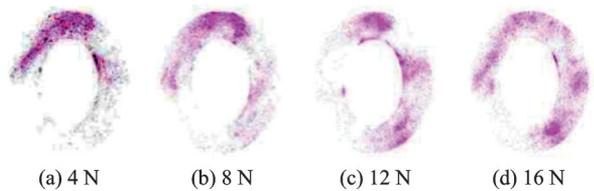


图 3 4 种夹紧力水平下的压力胶片

Fig.3 Pressure film at four clamping force levels

1.3 接触压力分析

本实验共招募 17 名志愿者作为受试者,其中男性 10 名,女性 7 名,所有受试者听力均正常,且所有涉及真人受试者的实验均已通过华南理工大学附属第二医院的伦理审查。在 4 个夹紧力条件下,测量和统计出的平均接触压力结果如图 4 所示。可见,随着夹紧力的递增(即 4, 8, 12 和 16 N),接触压力的测量结果方差也逐渐增大,可见在较大的夹紧力作用下,本文测量接触压力的误差也有所增加,这可能是手动操作过程中引入的。但在整体上,接触压力随夹紧力水平的增加呈现明显上升趋势。通过线性回归分析得到接触压力和夹紧力水平之间的线性关系非常显著($p < 0.001$),其回归方程的表达式为

$$F_{\text{contact}} = -0.538 + 0.605F_{\text{clamp}} \quad (1)$$

式中 F_{contact} 和 F_{clamp} 分别表示接触压力和夹紧力。这说明整体

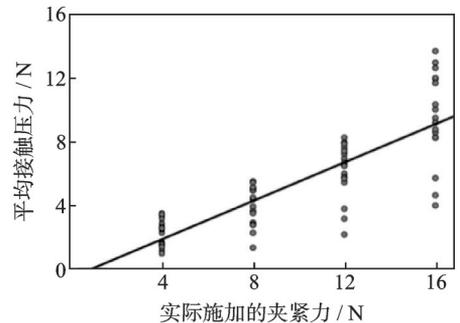


图 4 不同夹紧力水平下的接触压力

Fig.4 Contact pressure at different clamping force levels

上接触压力的数值略低于施加的夹紧力,这可能是作用力传递过程中接触面不均匀等原因造成的统计偏差,但具体原因还有待进一步分析研究。除去这个偏差后,接触压力大约为所施加夹紧力的60%左右,可视为接触压力相较于夹紧力存在一定损耗,但是随着夹紧力增大的比例基本稳定,这一较为稳定的对应关系为后续夹紧力物理量与舒适性主观量的相关分析提供了依据。

2 夹紧力对降噪量的影响

2.1 测试环境及装置

不同夹紧力对降噪量的影响也在图1所示的测试环境进行,该测试室的尺寸约为2.8 m(长)×2.3 m(宽)×2.1 m(高)。本底噪声不超过30 dB(A),混响时间约0.18 s。房间中央放置夹紧力调节装置和一个高度可调的座椅,使受试者的双耳离地高度与四周扬声器离地高度一致,约为1.2 m。扬声器放置在房间的4个角落,与中心听音位置的直线距离约为1.4 m。

考虑到规则形状耳罩腔体的共振现象,参考实际耳罩腔体设计方案,对图1(b)所示的耳罩腔体内部设置了图5所示的4种腔体边界:腔体A为直接通过3D打印的椭圆柱腔体;腔体B为腔体A基础上用橡皮泥填充一个光滑斜面而成,以破坏其椭圆柱空腔的对称性;腔体C是在腔体B的基础上进一步简单加工一些细纹,使得表面更粗糙;腔体D则在腔体C的基础上粘附一层绒布。为了测量不同接触压力和耳罩腔体边界条件下的降噪量,布置微缩传声器DPA 4060^[24]于耳道口,用封闭耳道法进行测量,如图6所示。

2.2 降噪量的定性测试方法

如前文所述,为了消除耳罩式耳机的头带支架对拉力计施加的夹紧力的影响,采用了1.1节所述的实验装置。降噪量对每个受试者个体而言会存在细微差别,因为每个人的耳部周围头皮曲面不同。但基于图1或图6所示的实验装置,耳罩的着力点是一个活动的联结,使得耳罩面可以自适应地贴合不同的头皮表面。为了简化测量,本文选用了基于平均头部模型的人工头^[25]。虽然人工头捡拾与真人受试者可能存在一定差异,但本文的客观量分析中重点是关注降噪量与夹紧力水平之间的关系,选用人工头可以避免头动等因素的干扰,可以获得更加稳定而可靠的结果。

具体测量流程为:首先在不佩戴耳罩的情况下,在人工头模型耳道口处捡拾噪声信号,得到实验噪声环境的头中心处声压 $P_0(f)$;然后,在布置好封闭耳道的微缩传声器之后,捡拾不同夹紧力条件以及不同腔体条件下左、右耳的声压 $P_{L/R}(K, T, f)$,测量得到耳道口频率响应的声压级(Sound pressure level, SPL)用相对幅度值表示,其计算式为

$$\text{SPL}(K, T, f) = 20 \lg P_{L/R}(K, T, f) / P_0(f) \quad (2)$$

式中: K 表示4种腔体, T 表示4种夹紧力, f 表示频率(单位Hz)。考虑左、右耳对称性,仅以左耳测试数

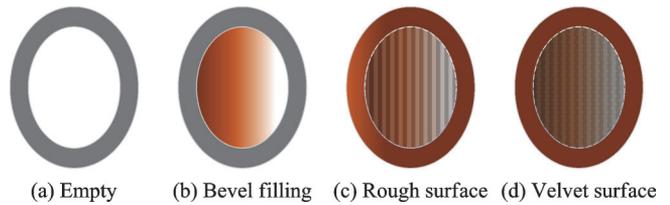


图5 耳罩腔体结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of earmuff cavity

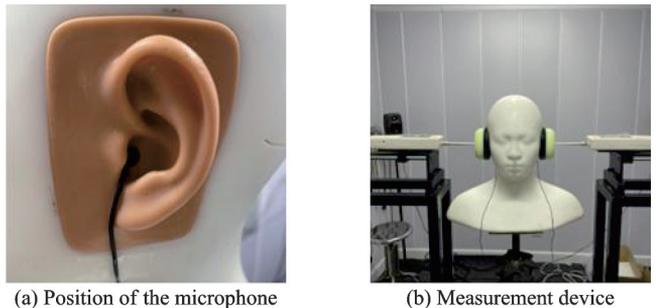


图6 基于人工头的降噪量测量

Fig.6 Measurement of noise reduction based on artificial head

据为例进行分析,如图7所示。当 $K=0, T=0$ 时表示未佩戴耳机,即 Open-ear 的情况,如图7中的黑色虚线所示。由于测试设备的限制并没有对声压级进行较准,为了避免误差而采用了相对声压级,同时也在低频段将最小夹紧力和未佩戴耳罩的声压级进行了对齐,很显然这些处理对降噪量单一参量的变化趋势并没有影响。可见,耳罩的隔声主要对中高频段产生作用,随着频率升高,隔声效果显著提升。在4种夹紧力水平下,在未经处理的空腔体A的对称结构作用下,在大约600~800 Hz的范围出现明显的共振峰。填充橡皮泥斜面破坏对称性后的耳罩腔体B、C和D,其在低频段的共振峰均显著降低,峰值由空腔的60 dB降低至约40 dB。在4 N的夹紧力下,只有腔体D的共振效应基本能完全被消除;随着夹紧力增大到12 N,腔体C的共振效应也被消除;而腔体B的共振效应则需要16 N的夹紧力下才会消失,这说明共振峰随夹紧力增大而减弱的程度逐渐变缓。

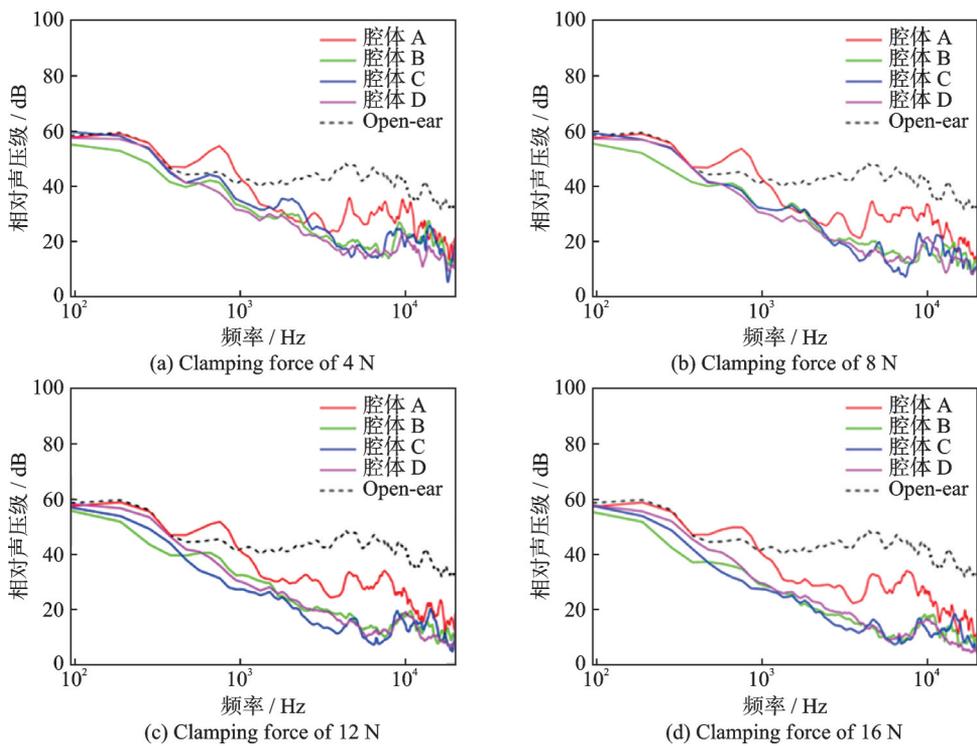


图7 4种腔体条件下声压的频响曲线

Fig.7 Spectral response curves of sound pressure under four types of cavities

2.3 噪声幅度谱及降噪量分析

进一步地,对图7所示的双耳声压进行降噪量的计算,计算公式如下

$$\Delta N(K, T, f) = 20 \lg \left| \frac{P_{L/R}(K, T, f)}{P_{L/R}(f)} \right| \quad (3)$$

式中声压 $P_{L/R}(K, T, f)$ 和 $P_{L/R}(f)$ 分别表示佩戴耳机和未佩戴耳机(即 Open-ear)的双耳噪声谱。进一步地,用式(4)对降噪量 $\Delta N(f)$ 按频段进行平均,即

$$\Delta N(K, T) = \frac{1}{\text{count}(f_i)} \sum_{f_i=f_{\text{down}}}^{f_{\text{up}}} \Delta N(K, T, f) \quad (4)$$

式中:count表示计数; f_{up} 表示统计频率的上限; f_{down} 表示统计频率的下限。采用式(3)计算得到不同频段

内的平均降噪量如图8所示。结果表明,在不同频段内,腔体A可能由于共振现象的存在使得不同夹紧力条件下其降噪量并无显著区别。但是,经过处理的3个腔体B、C、D的降噪量值随着夹紧力的增大而增大,且随着频率升高其隔声量也随之增大,在2 kHz以上的高频段达到约24~32 dB;低频段的隔声效果最差,大约在5 dB以内;而中频段的隔声效果介于低频和高频之间,约为8~15 dB。全频段内,随夹紧力增大趋势缓慢,每增加4 N的夹紧力,其降噪量仅提升约1.0~3.0 dB。这说明降噪量作为耳罩式耳机的关键客观参数,与夹紧力有着密切关系,尤其在高频段的提升尤为显著。虽然这些降噪量数据仅在人工头模型上采集,但由于“夹紧力→接触压力→降噪量”的单调性变化十分显著,相比于真人受试者头部和耳廓外形与人工头外形之间的细小差别^[25-26],这种单调性变化趋势也可以推广至真人受试者佩戴耳机的情况。

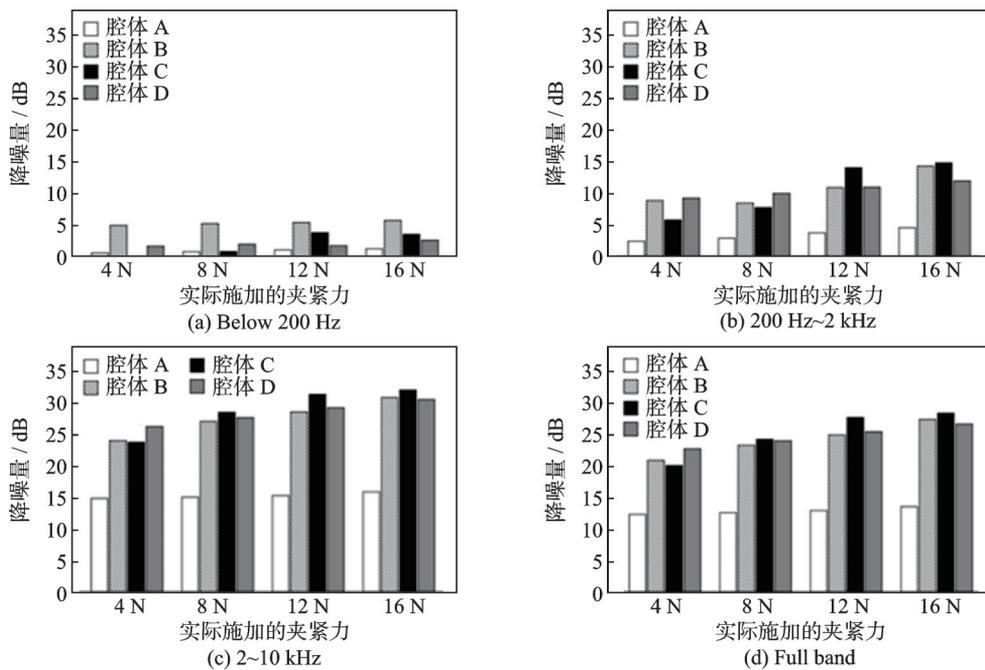


图8 不同耳罩腔体在不同夹紧力水平下的降噪量

Fig.8 Noise reduction of different earmuff cavities under different clamping force levels

3 舒适性综合分析

3.1 主观测试流程

舒适性主观评测的实验流程如图9所示。首先,为了评估在稳态噪声环境和不同夹紧力水平共同作用下的听觉舒适性,受试者在中度噪声环境(55 dB)条件下,随机体验4组不同的夹紧力水平(4、8、12和16 N)。每组噪声持续30 s,同时使用传声器拾取耳罩内的噪声信号。噪声停止后,受试者填写舒适度问

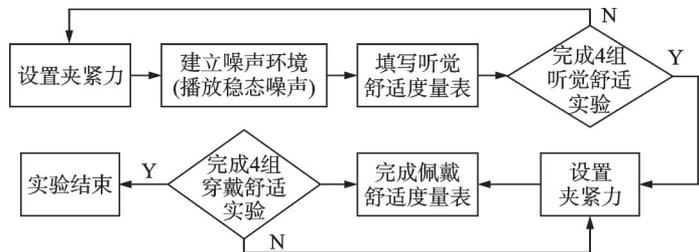


图9 主观实验流程图

Fig.9 Subjective experimental flowchart

卷。4组均测试完毕后,为避免因上次实验的夹紧力造成的不适对后续佩戴舒适性评估的影响,间隔2h进行佩戴舒适性的评估。受试者在无噪声环境下以随机顺序体验4个夹紧力水平,每组持续3min。虽然这低于实际使用过程中的佩戴时长,但已有研究表明,3min的短期佩戴试验可以有效预测长期舒适度^[27]。此外,在不播放声音的前提下,过长时间的佩戴可能会导致受试者的不耐烦情绪,从而可能影响仅基于接触压力(以及与此密切相关的降噪量)进行评分的准确性。因此,选择3min作为舒适度评估的时间是合理的,并有助于提高实验结果的可靠性。施力结束后,受试者填写舒适度问卷,以收集实验过程中受试者对于佩戴舒适性的主观感知评分。

3.2 舒适度评估

通过舒适度量表,收集受试者在噪声环境中对不同夹紧力下耳罩式耳机佩戴舒适性和听觉舒适性的主观评价,以进一步分析夹紧力与主观舒适感知之间的关系。佩戴舒适性可以理解为佩戴耳机时受到的作用力的舒适程度^[10]。至于听觉舒适性,在过往的研究中,通常采用“烦恼度”这一指标作为对噪声引起的不良反应的度量方式^[28],而烦恼与舒适度有着强相关性^[29]。因此本文以噪声烦恼度作为评价听觉舒适的指标。采用如图10所示的李克特量表,以7级分数指标对受试者的主观感觉进行衡量,其中只对第1级和第7级进行了语义解释,级数越高代表舒适性越差。

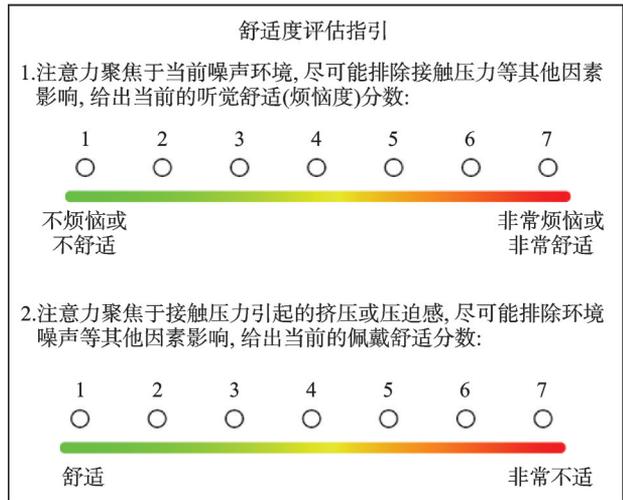


图10 听觉舒适和佩戴舒适度量表

3.3 结果分析与讨论

图11反映的是17名受试者在4种夹紧力水平(4、8、12、16 N)下的听觉舒适性和佩戴舒适性的平均值。通过多元方差分析评估夹紧力水平对这两项评分的影响。结果表明,夹紧力水平对听觉舒适性评分无显著影响($F=0.083, p>0.05$),但对佩戴舒适性评分有显著影响($F=67.003, p<0.001$)。对于听觉舒适性,本实验结果显示夹紧力水对听觉舒适性无显著影响。再结合前文2.3节在人工头模型上的测量分析结果,夹紧力的增加引起了降噪量的增大。因此,在听舒适性评估实验中夹紧力的增加也势必引起受试者所佩戴耳罩内的降噪量增加,进而可知降噪量变化也没有引起听觉舒适性的改变。当然,由于实验条件的限制,这也可能是由于实验中降噪量的水平十分有限所致(仅设置55 dB的稳态噪声)。后续的研究中可针对噪声环境对耳罩式耳机听舒适性的影响进行研究,分析稳态或动态噪声、更高声压级的噪声等对听舒适的影响。另一方面,从图11的结果可见,佩戴舒适性评分在不同夹紧力水平之间的差异显著($p<0.001$),且夹紧力水平与佩戴舒适性评分显著正相关(Spearman相关系数 $r_s=0.877, p<0.001$)。这表明在本实验中,夹紧力水平不会影响听觉舒适性的主观感知,但随着夹紧力的增加,佩戴舒适性显著下降。

Fig.10 Evaluation scale of listening and wearing comfort

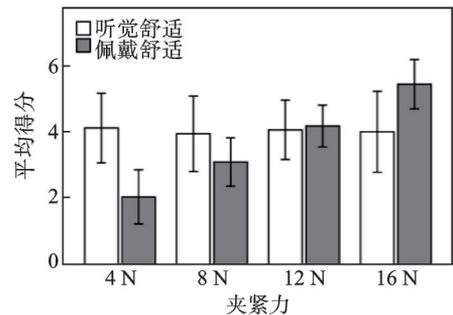


图11 不同夹紧力水平的舒适性平均评分
Fig.11 Average comfort rating results for different clamping force levels

为进一步分析接触压力对佩戴舒适性的影响,本文进行了回归分析。回归分析得到的方程为:佩戴舒适性 $=2.033+0.299\times$ 接触压力。这意味着接触压力每增加1 N,佩戴舒适性评分平均增加0.299。此外,该回归模型的 R^2 为0.452,表明接触压力可以解释约45.2%的佩戴舒适性评分变异。尽管仍有54.8%的变异由其他未包含在模型中的因素决定,但接触压力这一单一变量已能够解释接近一半的变异量,这表明接触压力是影响佩戴舒适性的关键因素。

综上所述,在现有的实验条件限制下,佩戴舒适性比听觉舒适性更直接受到夹紧力的显著影响,提升夹紧力对听觉舒适性的提升甚微,反而会显著影响佩戴舒适性。另一方面,从两者变化趋势可见,用户对佩戴舒适性的主观感知比听觉舒适性敏感。因此,在设置耳罩式耳机的夹紧力时,以及普通的稳态噪声环境下(如本文设置的55 dB),需要优先考虑佩戴舒适性。

考虑到本文所采用的舒适性评估问卷为7分制,1分为舒适,7分为非常不适,因此可以3分作为舒适性评分的分界限,即舒适性评分为3分及以下时,认为舒适性较佳。从图11可知,当夹紧力水平为8 N时,佩戴舒适性评分已略超过3分的水平。因此,在本研究条件下,夹紧力低于8 N时,耳机的佩戴舒适性与听觉舒适性相对较佳,根据1.3节中的接触压力回归方程,8 N夹紧力对应的接触压力均值为4.30 N。因此,综合考虑佩戴舒适性与听觉舒适性,建议接触压力小于4.30 N。

4 结束语

本文以耳罩式耳机的听觉舒适性与佩戴舒适性为研究对象,通过改变佩戴时的夹紧力,探讨其对这两种舒适性的影响及相互作用。研究表明:夹紧力从4 N增加到16 N时,耳罩施加于头皮表面的接触压力等比例增加,但实际接触压力仅为夹紧力的约60%;耳罩的降噪量变化并不明显,仅增加了约5.0~7.0 dB,可见耳罩的降噪量随夹紧力增大的提升量并不显著,这可能与耳罩所使用的海绵和皮革的材质有关。主观评价结果表明,夹紧力确实是影响佩戴舒适性的重要因素之一,但对听觉舒适性没有显著影响。在不同夹紧力条件下,受试者的佩戴舒适性评分与接触压力之间存在显著正相关关系:随着夹紧力增加,佩戴舒适性评分增加,佩戴舒适性降低,而听觉舒适性评分无显著差异。因此,在设计耳罩式耳机时,应优先考虑较低的夹紧力以实现较佳的佩戴舒适性。

在本文的实验条件下,建议施加于耳罩的夹紧力低于8 N。佩戴舒适性评分的回归方程的 R^2 为0.452,这意味着还有54.8%的评分变异未被解释,也意味着需要考虑更多变量以更准确理解和预测舒适性。接下来可进一步研究耳罩尺寸、耳垫材质、头带的施力方式等引起的接触压力和降噪量的变化,以获得这些客观量与佩戴舒适性和听觉舒适性等主观量之间更准确的相关性分析结果。此外,本文实验假设基于稳态噪声环境,然而实际佩戴中噪声环境可能更为复杂,非稳态噪声的变化可能影响佩戴舒适性和听觉舒适性的感知。此外,耳机的头架设计、耳罩材质以及佩戴时长等因素也可能对舒适性产生影响。由于这些因素在本文研究中未得到控制,因此研究结果存在一定的局限性。在未来的研究中,可以考虑更为多样化的佩戴环境,以进一步验证和扩展本文结论。

参考文献:

- [1] JENSEN R, LAURIDSEN N, POULSEN A, et al. Analysis of subjective evaluation of user experience with headphones [C]//Proceedings of Conference on Headphone Technology of Audio Engineering Society. [S.l.]: Aalborg, 2016.
- [2] WANG T, WANG Y, YU G, et al. Analysis and validation on multi-dimensional assessment for comfort of in-ear headphones [C]//Proceedings of Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 135-149.
- [3] CHEN Z, YU G, WANG T, et al. A study on the force comfort of over-ear headphones based on 3D anthropometric data[C]//Proceedings of Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. [S.l.]: ACM,

2024: 16-28.

- [4] STASIUNAS R. Overview of headphones[D]. Helsinki: Aalto University, 2001: 1-12.
- [5] OLIVE S E, WELTI T, KHONSARIPOUR O. Preference ratings of around-ear and on-ear headphones[C]//Proceedings of the 144th Convention of Audio Engineering Society. Milan: AES, 2018.
- [6] QUALCOMM. Research report on the current status of audio product usage 2023[R/OL]. (2023-01-10) [2023-12-01]. <https://www.qualcomm.cn>.
- [7] COOPE M, HUISMAN G, HEKKERT P. Haptic aesthetics in product design: Designing headphones that feel beautiful[C]//Proceedings of IASDR 2023: Life-Changing Design. [S.l.]: Design Research Society, 2023.
- [8] LI Y X, CHU P Y, WU C T, et al. Exploring the emotional differences between over-ear headphones made of different materials[C]//Proceedings of International Conference on Human-Computer Interaction. Cham: Springer, 1991.
- [9] SYAIFOELIDA F, MEGAT HAMDAN M A M, MURRAD M, et al. The qualitative measurement towards emotional feeling of design for product development[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 344: 012024.
- [10] 林欢, 邓小雷, 林丽, 等. 基于人机工程学的头戴式耳机舒适性设计[J]. 包装工程, 2018, 39(20): 171-175.
LIN Huan, DENG Xiaolei, LIN Li, et al. Headset comfort design based on ergonomics[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(20): 171-175.
- [11] 胡月. 听觉舒适与空间关联关系实验研究: 以沈阳养老机构为例[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
HU Yue. Experimental study on the relationship between auditory comfort and spatial correlation: Taking Shenyang pension institutions as an example[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.
- [12] CUI W, OUYANG Q, ZHU Y. Field study of thermal environment spatial distribution and passenger local thermal comfort in aircraft cabin[J]. Building and Environment, 2014, 80: 213-220.
- [13] 贾丰源, 陈君毅, 吴海波, 等. 基于静态体压分布的座垫舒适度影响因素分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 611-616.
JIA Fengyuan, CHEN Junyi, WU Haibo, et al. Influencing factor analysis of cushion comfort based on static body pressure distribution[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(4): 611-616.
- [14] BHATTACHARYA S K, TRIPATHI S R, KASHYAP S K. Assessment of comfort of various hearing protection devices (HPD)[J]. Journal of Human Ergology, 1993, 22(2): 163-172.
- [15] WILLIAMS W. Clamping pressure and circum-aural earmuffs[J]. Noise & Health, 2007, 9(35): 45-50.
- [16] GERGES R, GERGES S. Earmuff comfort evaluation[C]//Proceedings of INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference. [S.l.]: Institute of Noise Control Engineering, 2014, 249(8): 206-212.
- [17] HSU Y L, HUANG C C, YO C Y, et al. Comfort evaluation of hearing protection[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2004, 33(6): 543-551.
- [18] SHEN X, SHI D, GAN W S. A hybrid approach to combine wireless and earcup microphones for ANC headphones with error separation module[C]//Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Singapore: IEEE, 2022: 8702-8706.
- [19] 刘宗明, 李健国. 基于人机工程学的头戴式耳机造型设计[J]. 包装学报, 2018, 10(5): 39-45.
LIU Zongming, LI Jianguo. Headphone modeling design based on ergonomics[J]. Packaging Journal, 2018, 10(5): 39-45.
- [20] 杨宇飞. 基于人头面部曲面的头戴式耳机耳罩造型设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
YANG Yufei. Research on the earmuff shape of headset based on the surface of human head[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [21] LEE W, YANG X, JUNG D, et al. Ergonomic evaluation of pilot oxygen mask designs[J]. Applied Ergonomics, 2018, 67: 133-141.
- [22] PECOLT S, BŁAŻEJEWSKI A, KRÓLIKOWSKI T, et al. Measuring station for testing on-ear headphones, made by 3D printing used in Industry 4.0[J]. Procedia Computer Science, 2023, 225: 1699-1708.
- [23] FUJI Film. Prescale pressure film[EB/OL]. (2015-01-01) [2023-12-01]. <http://www.fujifilm.com/products/prescale/prescalefilm/>.
- [24] YU G, WU R, LIU Y, et al. Near-field head-related transfer-function measurement and database of human subjects[J]. The

Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143(3): EL194.

- [25] GUO Z, LU Y, ZHOU H, et al. Anthropometric-based clustering of pinnae and its application in personalizing HRTFs[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2021, 81: 103076.
- [26] 余光正, 王业维, 谭伟, 等. 一种基于统计形状模型生成含耳廓声学人工头模型的方法: CN117409135A[P]. 2024-01-16.
YU Guangzheng, WANG Yewei, TAN Wei, et al. Method for generating auricle-containing acoustic artificial head model based on statistical shape model: CN117409135A[P]. 2024-01-16.
- [27] IVERGARD T B K. User tests of ear defenders[J]. American Industrial Hygiene Association Journal, 1976, 37(3): 139-142.
- [28] 李豪, 陈克安, 赵焕琦, 等. 面向满意度的产品声品质分级方法及应用[J/OL]. 振动工程学报, 2024: 1-9. (2024-04-18). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZDGC20240415001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
LI Hao, CHEN Kean, ZHAO Huanqi, et al. Satisfaction-oriented product sound quality classification method and its application[J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-9. (2024-04-18). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZDGC20240415001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [29] 施丽莉. 低频噪声烦恼度实验室研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
SHI Lili. Laboratory study of the noise annoyance of the low frequency noise[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.

作者简介:



陈梓涵(1998-),女,硕士研究生,研究方向:工业设计、人机工程、声学穿戴产品设计等, E-mail: zihan_chan@126.com。



余光正(1978-),通信作者,男,教授,博士生导师,研究方向:建筑声学、电声学、声信号处理、声学穿戴产品设计等, E-mail: scg-zyu@scut.edu.cn。



王业维(1993-),男,博士研究生,研究方向:声信号处理、头相关传输函数等, E-mail: leverrier@foxmail.com。



李哲林(1974-),男,教授,硕士生导师,研究方向:工业设计、人机工程等, E-mail: zhelinli@scut.edu.cn。

(编辑:张黄群)