

基于层次分析和加权灰色关联分析的 真无线耳机适配度评价

刘永红, 严妍, 王海宁
(湖南大学, 长沙 410082)

摘要: **目的** 为客观评价真无线耳机适配度, 量化定性指标对真无线耳机设计影响, 降低人在决策产品方案过程中的主观性偏差, 建立真无线耳机适配度评价模型。**方法** 采用了层次分析法与加权灰色关联分析法。通过层次分析法来确定影响真无线耳机适配度评价的影响权重值, 建立了包括 3 项准则与 12 项指标的评价体系。进一步结合加权灰色关联分析法计算出 4 款真无线耳机备选方案与最优方案关联度, 建立对各方案的优劣排序。**结论** 建立了精准评价耳机适配度体验的评价体系, 可评估得出符合耳机适配度需求的最佳耳机适配设计方案, 其评估过程具有客观性和准确性。从检验结果可知, 动态场景稳定度重要度权重较高, 耳道空间及耳甲腔空间填充感次之, 静态场景下的稳定度体验与耳朵分区压迫感体验权重最低, Apple AirPods Pro 耳机与最优方案关联性最强。

关键词: 真无线耳机; 适配度; 层次分析法; 灰色关联分析法; 稳定感; 填充感; 压迫感

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)24-0153-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.24.017

True Wireless Stereo Earphone Fit Design Based on Analytic Hierarchy Process and Grey Relational Analysis

LIU Yong-hong, YAN Yan, WANG Hai-ning
(Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: To evaluate the fit of True Wireless Stereo (TWS) earphones objectively, quantify the influence of qualitative factors, and reduce the subjective bias on the decision-making of product design, the evaluation model of fit of TWS earphones was established. The analytic hierarchy process (AHP) and grey relational analysis (GRA) were used in this research. AHP was used for determining the weight value of the fit index of TWS earphones, including three value criteria and twelve indexes. In addition, GRA was utilized for calculating the correlation between four alternative products and optimal products and ranking all four products. Based on AHP and GRA methods, evaluation indexes on the fit of TWS earphones were established. The optimal earphone which meets the requirements of the fit requirement of TWS earphone was selected objectively and accurately. Consequently, the sense of stability of dynamic scene accounts for the highest proportion among all factors, following by the sense of volume of external auditory canal interspace and concha interspace. The proportions of sense of stability of static scene and sense of pressure of external ear regions are lower than others. In addition, the correlation between Apple AirPods Pro and the optimal solution is strongest

KEY WORDS: TWS earphone; fit; analytic hierarchy process; grey relational analysis; sense of stability; sense of volume; sense of pressure

收稿日期: 2021-09-16

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2018WK2032); 湖南省普通高等学校教学改革研究项目(湘教通[2018]436号); 湖南省研究生科研创新项目(CX20190335)

作者简介: 刘永红(1972—), 男, 安徽人, 博士, 湖南大学教授, 主要研究方向为智能产品设计与设计协同创新。

通信作者: 王海宁(1984—), 男, 山东人, 博士, 湖南大学副教授, 主要研究方向为人机交互与用户体验、人体测量学与人因工程。

近年来,随着耳机相关产品的创新发展,耳机产品的人机问题得到了广泛关注,以真无线耳机为代表的耳机产业正面临进一步革新,耳机设计人因研究主要聚焦于耳机佩戴舒适性问题。基于可穿戴产品的特殊性,产品与人体相应部位的适合性极大地决定了产品使用的舒适性、稳定性与安全性。适配度,定义了可穿戴产品与人体的贴合关系,也是影响用户体验满意度的重要指标^[1]。而现有研究中暂未形成系统有效的真无线耳机适配度评价体系,为有效提升真无线耳机用户的体验,本文运用层次分析法与灰色关联分析法建立真无线耳机适配度评价体系。

1 真无线耳机适配度研究概况

耳机产品的舒适度研究范围较广,通常包括物理舒适度(生物力学及温度舒适度)、功能舒适度(可用性、效率及有效性)、声学舒适度(内外耳噪声的影响)及心理舒适度(信任感、习惯性和满意度)^[2]4项研究内容。真无线耳机相对有线耳机和传统蓝牙耳机而言,摆脱了耳机线的束缚,便携性和使用方式的多样性更为出色,耳机形态和交互设计趋势也发生了很大的改变。2020年真无线耳机的全球销量达到3亿台,同比增长230%,已成为目前消费电子增速最快的产品,在无线连接、语音交互、智能降噪、健康监测和听力增强/保护等领域均发挥了重要的作用。耳机舒适度研究跟随耳部产品发展而来,早期耳部产品舒适度研究主要围绕听力保护的隔音耳罩与耳塞,EPPS B W^[3]在1985年研究了隔音耳塞的舒适度、佩戴容易程度及长时与短时舒适度问题。1991年,PARK M Y^[4]主要研究了耳机种类、运动行为、适配过程及适配时长对舒适度的影响。对耳罩式听力保护设备,HSU Y L^[5]通过问卷方式,建立舒适度指标体系,通过五点量表可知,密封性、散热性、重量、头戴压力是影响听力保护设备舒适性的主要因素。随后,耳挂式耳机逐步兴起,CHOI K^[1]定义了影响产品舒适度的评价词,耳挂部分为舒适度、体积感、柔软度、材质感受;耳塞部分为舒适度、体积感和材质感受。CHIU H P^[6]在耳挂式蓝牙耳机的研究中,关于舒适度的评价分为五大指标,包括整体舒适度、整体适配度、整体压迫感、佩戴容易度及脱取容易度。

近年来,真无线耳机舒适度研究逐渐兴起,SONG H^[7]的研究围绕4款真无线耳机,将舒适度、疼痛感、压迫感和稳定度定义为影响佩戴舒适度的四大因素。其中,根据交互状态的不同,将疼痛感拆分为佩戴时的疼痛感、操作时的疼痛感及使用后的疼痛感。周红超^[8]将影响耳机佩戴舒适度的因素定义为耳机的稳固性、耳机的尺寸、耳机曲面与人耳曲面的贴合度。朱兆华^[9]在设计防滑落耳机时,运用跑步及跳绳运动对耳机佩戴的稳定性进行测试。

上述研究中,不同研究者对影响耳机佩戴舒适度评价的研究内容定义不同,在研究耳机佩戴适配度问题时,仅从单一维度进行研究,如稳定度^[9],现有研究评价层次不完善,尚未形成有效的耳机适配度评价指标体系。在其他领域的产品设计评价方法中,已有多种评价方式,包含层次分析法、灰色关联法、价值工程法、模糊评价法等方法^[10]。其中,层次分析法是一种对复杂问题系统化处理的方法^[11],兼顾了评价方式的定性定量特性,可将多目标、多准则、难以量化的复杂决策问题转化为单目标、易于量化的简单数学问题^[12],层次分析法基于评价指标构建权重矩阵,以量化方式对定性问题进行决策^[11]。此外,灰色关联分析法常运用于信息不完备或数据较少情况下,可突破人们认知能力局限^[13],对不确定系统进行因子间定量与排序分析^[14]。一般线性与非线性函数的建立需要大量样本支持^[15],灰色关联模型可在小样本情况下,较好预测变量间关系^[16]。结合真无线耳机适配度评价指标复杂、描述模糊的特点,需将适配度评价进行定量拆分,分解为多层次评价指标,进行定量决策。真无线耳机适配度体系存在较为复杂的结构层次,且各层次指标之间存在一定的关联性,属于典型的灰色系统,适合运用灰色关联分析法进行优度关联计算。本文采用层次分析法与加权灰色关联分析法,建立真无线耳机的适配度评价体系,并对各真无线耳机产品方案优劣进行排序并得到了最佳产品方案,为真无线耳机开发设计提供了定量分析参考。

2 真无线耳机适配度评价流程

设计评价能准确反映设计质量,通过合理的设计评价方法,有效进行方案对比,提高产品市场竞争力。本研究中真无线耳机适配度评价流程如下,首先通过文献查阅建立真无线耳机适配度、满意度打分量表,运用因子分析法构建适配度评价指标层、准则层。随后,根据专家建议构建指标体系阶层结构模型,基于层次分析法,计算各指标综合权重。最终,通过灰色关联分析法对多个真无线耳机设计方案进行灰色关联度计算,关联度最高的即为最优方案。真无线耳机适配度评价流程见图1。

3 真无线耳机适配度评价体系建立

3.1 确定评价指标

基于已有耳机产品网络评价,产品设计领域文献调研查阅,确定了与耳机适配度相关的评价因子12个,建立了真无线耳机适配度、满意度打分量表。共发放50份问卷,其中有效问卷43份,包括设计专家及教师20人,设计专业学生23人,被试均为有多年真无线耳机佩戴经验用户,日均佩戴真无线耳机时长超过2h。

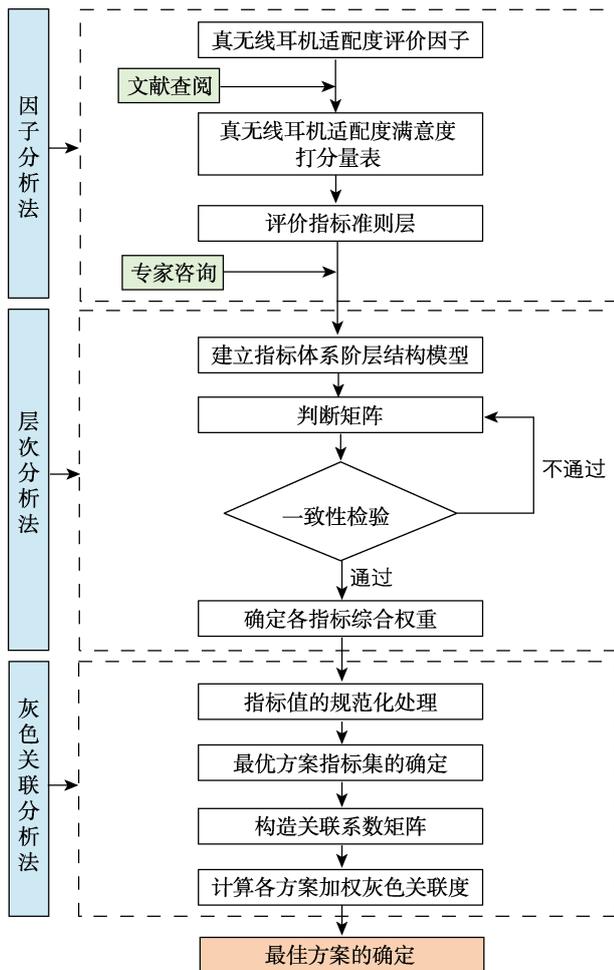


图 1 真无线耳机适配度评价流程
Fig.1 Evaluation process of fit of true wireless earphone

用户以佩戴真无线耳机真实体验为基础，对 12 个评价因子进行满意度 Likert 五点量表打分。首先需依据 *KMO* 值及 *Bartlett* 检验结果，判定 12 个指标是否适合作为因子分析指标。结果可知，*KMO* 值为 0.809，大于 0.6，*Bartlett* = 385.644，*df* = 66，*Sig* = 0.000，评价指标相关矩阵间存在公因子，可以进行因子分析。本文依据主成分分析法进行公因子萃取，共有 3 个公因子：填充感、稳定感和压迫感，见表 1。

3.2 指标内涵

基于因子分析结果，行业内的专家及耳机产品 ID 设计人员意见，结合文献调研结果，对真无线耳机适配度指标（填充感 A_1 、稳定感 A_2 、压迫感 A_3 ）进行内涵拆分，形成指标层要素 12 个。

3.2.1 填充感 A_1

填充感是指耳机形态所造成的涨耳感、异物感和肿胀感。由于大批量耳机的唯一性与耳朵形态的多样性，导致了部分用户的耳机形态与耳朵形态的不完全贴合，为保证耳机佩戴的稳定性，耳机形态应相较于耳朵空间体积更大，从而加强填充感。耳机形态主要分为耳包区域与耳塞区域，相对耳朵来说，匹配了耳

表 1 12 个指标因子分析
Tab.1 12 indexes of factor analysis

提取公因子	评价因子	因子载荷	特征值	方差贡献率	贡献率比重	累积方差贡献率
	填充感	0.878				
填充感	涨耳感	0.846	5.771	48.095%	61.65%	48.095%
	堵耳感	0.814				
	异物感	0.807				
	闷胀感	0.797				
稳定感	胀痛感	0.666	2.474	20.616%	26.43%	68.711%
	稳定感	0.912				
	稳固感	0.909				
	松动感	0.872				
	压迫感	0.836				
压迫感	贴合感	0.758	1.116	9.303%	11.92%	78.014%
	刺痛感	0.632				

甲腔空间与耳道空间。因此，对填充感而言，指标层为耳道空间填充感 A_{11} 与耳甲腔空间填充感 A_{12} 。

3.2.2 稳定感 A_2

稳定感评价了耳机与耳朵的相对位置关系的变化情况。佩戴耳机时，用户的动作和行为具有多样性，在居家休闲场景、学习办公场景、出行场景、运动场景及健身场景中均有佩戴耳机的情况。总之，可将佩戴耳机的场景分为动态场景与静态场景。因此，对耳机的稳定感，指标层为静态场景稳定感 A_{21} 与动态场景稳定感 A_{22} 。

3.2.3 压迫感 A_3

压迫感是指耳机形态对耳朵的局部或整体造成了压力。由于耳机与耳朵形态存在干涉，导致耳机对耳朵产生挤压。耳机适配设计主要聚焦于外耳廓及外耳道部分，为耳朵的外耳部分^[17]，具体而言，与真无线耳机设计相关的耳朵重要解剖结构包括：耳甲艇、耳轮角、对耳轮、耳前切迹、耳道、耳甲腔、耳屏、对耳屏，见图 2。因此，对耳机带来的压迫感而言，可分为耳甲腔压迫感 A_{31} 、对耳轮压迫感 A_{32} 、对耳屏压迫感 A_{33} 、耳轮脚压迫感 A_{34} 、耳前切迹压迫感 A_{35} 、耳屏压迫感 A_{36} 、耳屏间切迹压迫感 A_{37} 及耳道压迫感 A_{38} 。基于以上评价原则及指标，建立了真无线耳机适配度评价指标体系，见图 3。

3.3 构建指标体系

运用问卷调查法，依据 Satty 提出的九级标度表，对准则层与目标层中指标的相对重要性进行打分。如在填充感评价中，对耳道空间填充感与耳甲腔空间填充感的相对重要性进行打分，在稳定感评价中，对耳道空间稳定感与耳甲腔空间稳定感的相对重要性进行打分。并基于层次分析法，分别计算准则层 A_i 占

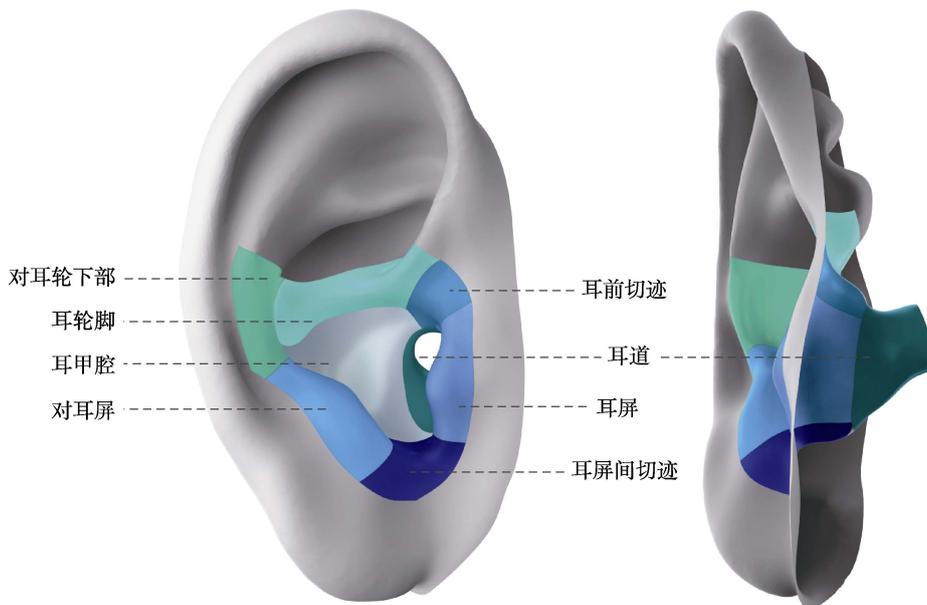


图2 真无线耳机设计相关外耳解剖结构
Fig.2 Anatomy regions of external ear related with TWS earphone

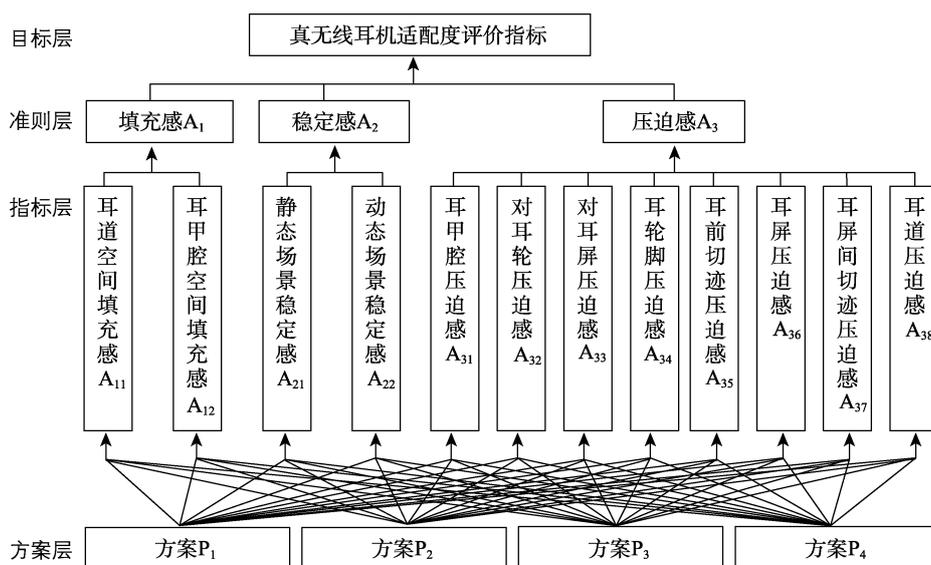


图3 真无线耳机适配度评价指标体系
Fig.3 Evaluation index system of fit of TWS earphone

目标层 A 的重要性权重值，与指标层 A_{ij} 占准则层 A_i 的重要性权重值，记为矩阵 I、II。如填充感占整体适配度的权重，及耳道空间填充感占整体填充感的权重。

计算权重前，需预先对矩阵进行一致性检验。首先需对矩阵 I、II 进行了归一化处理，随后进行最大特征根 λ_{max} 计算，依据最大特征根与判断矩阵阶数 n 进行一致性指标 $C.I.$ 计算。最后引入平均随机一致性指标 $R.I.$ ，计算出检验系数 $C.R.$ ，当 $C.R. < 0.10$ 时通过检验，否则不通过，若不通过则根据经验法调整综合判断矩阵。平均随机一致性指标值见表 2。计算公式如下：

表 2 平均随机一致性指标值
Tab.2 Average random consistency index values

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \tag{1}$$

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{2}$$

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \tag{3}$$

矩阵通过一致性检验后，基于矩阵 I、II，最终

建立了子指标对总目标层的综合权重，计为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ，其中 $w_i \geq 0$ ，且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。

3.4 关联度计算

为了进行较优方案筛选，基于真无线耳机指标复杂、评价模糊的特点，本文采用灰色关联分析法进行设计方案与理想设计方案关联度计算，依据关联系数判断联系紧密程度，从而判定较优方案。

假设真无线耳机设计方案决策系统由 m 个方案和 n 个指标构成，在此研究中，共有 4 个方案与 12 个指标，则 i 个方案的 n 个指标值可构成集合 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ ($i=1, 2, \dots, m$)，根据 m 个方案的 n 个原始指标值可构成如下原始方案指标矩阵：

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.4.1 指标值的规范化处理

为消除量纲影响，需采用极值化方法对矩阵 X 进行规范化处理。本文研究中，评价指标为取值越小越好，因此，指标如下：

$$X_{mk}^* = \frac{M_k - x_{mk}}{M_k - m_k} \quad (5)$$

$$m_k = \min(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{mk}) (k=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

由此可得，方案指标规范化矩阵：

$$X_m^* = \begin{bmatrix} X_1^* \\ X_2^* \\ \vdots \\ X_m^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11}^* & x_{12}^* & \dots & x_{1n}^* \\ x_{21}^* & x_{22}^* & \dots & x_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1}^* & x_{m2}^* & \dots & x_{mn}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.4.2 最优方案指标集确定

由于评价指标取值越小越好，定义 x_{0j} ($j=1, 2, \dots, n$) 为第 j 个指标的最优值，因此，最优值为 $x_{0j} = \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$ ；同样对其 n 个最优指标值进行极值化处理，则可以得到最优值集合 $X_o^* = (x_{01}^*, x_{02}^*, \dots, x_{0n}^*)$ 。

3.4.3 关联系数矩阵的构造

求解第 i 个方案的第 j 个指标与最优方案的第 j 个指标的关联系数：

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_{0j}^* - x_{ij}^*| + \rho \max_i \max_j |x_{0j}^* - x_{ij}^*|}{|x_{0j}^* - x_{ij}^*| + \rho \max_i \max_j |x_{0j}^* - x_{ij}^*|} \quad (8)$$

式中 ρ 为分辨系数， $\rho \in [0, 1]$ ，一般取 $\rho = 0.5$ 。

综上可得关联系数矩阵：

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \dots & \varepsilon_{1n} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \dots & \varepsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{m1} & \varepsilon_{m2} & \dots & \varepsilon_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.4.4 加权灰色关联度的确定

R_i ($i=1, 2, \dots, m$) 为 X_i 对 X_o 的关联度。根据关联系数行向量 E_i 和各子指标权重向量 W 可得如下各方案关联度：

$$R_i = E_i \times W = [\varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i2}, \dots, \varepsilon_{in}] \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

关联度 R_i 反映了 X_i 与 X_o 之间关系的密切程度，即单个方案与最佳方案的关联性，因此可按照关联度大小排序得到各方案的优劣排序。

4 实例结果与分析

4.1 基于层次分析法的真无线耳机评价指标权重排序

本部分共邀请 30 名具有 2 年及以上真无线耳机使用经验，每周使用时长超过 14 h 的专家用户，基于问卷调查法对各指标的重要程度进行评判。准则层与指标层权重矩阵一致性检验均通过，随后，依据矩阵结果计算出指标层各指标对总目标权重，见表 3。在准则层中，稳定感 s 所占权重最大，其次为填充感，最后为压迫感。三者分值分别为 0.415 8、0.332 4、0.251 8。在指标层中，动态场景稳定度 > 耳道空间填充感 > 耳甲腔空间填充感 > 静态稳定度 > 耳屏压迫感 > 耳屏间切迹压迫感 > 耳道压迫感 > 对耳屏压迫感 > 耳前切迹压迫感 > 耳轮脚压迫感 > 耳甲腔压迫感 > 对耳轮压迫感。在填充感评价中，耳道空间填充感权重高于耳甲腔空间填充感，权重分别为 0.209 3、0.123 1。在稳定感评价中，动态场景稳定度权重高于静态场景稳定度权重，分别为 0.326 4、0.089 4。相对而言，8 个区域的压迫感权重均较低，耳屏、耳屏间切迹、耳道与对耳屏压迫感权重更高，分别为 0.057 4、0.040 1、0.033 9 与 0.029 4。而耳前切迹、耳轮脚、耳甲腔与对耳轮压迫感权重相对而言更低，均为 0.02~0.03。

4.2 基于灰色关联法的真无线耳机关联度计算

基于市场评价，本文初步筛选出 4 款市场评价较好的真无线耳机进行最优方案评价，对 4 款真无线耳机适配度进行对比分析。本部分共邀请 6 位具有真无线耳机使用及设计经验专家依次对 4 款真无线耳机（耳机 1：Apple AirPods 2、耳机 2：HUAWEI Freebuds 3、耳机 3：Apple AirPods Pro、耳机 4：HUAWEI Freebuds Pro）适配度指标进行评分。为减少品牌因素对被试评价的影响，实验以盲评方式进行，主试从被试身侧为其佩戴耳机，被试用手进行局部角度调整，避免观察到耳机和品牌标识。

以 6 位专家对 4 款真无线耳机指标打分的平均值为后续计算用数据，专家打分统计结果，见表 4。

根据式(13)求得 4 款真无线耳机关联度：

$$R = E \times W = \begin{bmatrix} 1.000 & 1.000 & 0.333 & 0.333 & 1.000 & 1.000 & 0.795 & 1.000 & 1.000 & 0.990 & 1.000 & 1.000 \\ 0.613 & 0.500 & 0.421 & 0.415 & 0.457 & 0.630 & 0.886 & 0.616 & 0.600 & 0.760 & 0.394 & 0.531 \\ 0.422 & 0.439 & 1.000 & 1.000 & 0.500 & 0.895 & 1.000 & 0.572 & 0.568 & 0.860 & 0.591 & 0.381 \\ 0.333 & 0.333 & 0.800 & 0.810 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.2093 \\ 0.1231 \\ 0.0894 \\ 0.3264 \\ 0.0214 \\ 0.0207 \\ 0.0294 \\ 0.0231 \\ 0.0259 \\ 0.0574 \\ 0.0401 \\ 0.0339 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.716 \\ 0.519 \\ 0.731 \\ 0.531 \end{bmatrix} \quad (14)$$

依据结果可知, $R_3 > R_1 > R_4 > R_2$, 即真无线耳机 3 同理想设计方案最为接近, 为最佳设计方案, 真无线耳机 2 与理想设计方案差距最大。

4.3 结果说明

整体而言, 开展真无线耳机适配设计时, 提升真无线耳机佩戴稳定度较为重要, 相较于静态场景, 设计师应该重点关注动态场景下的耳机稳定度。其次, 耳道空间填充感相较于耳甲腔空间填充感, 显著影响了真无线耳机的适配度评价。而压迫感评价整体来说更加不重要。8 个区域压迫感评价中, 耳屏、耳屏间切迹、耳道、对耳屏压迫感权重更大, 因此用户在佩戴耳机时更加看重该 4 个区域的压迫感受, 设计师应当尽量避免该 4 个区域产生较为强烈压迫。

依据已有真无线耳机适配设计经验, 结合适配度评价指标研究结果, 推导出开展真无线耳机适配设计几大原则如下。

1) 稳定感主要表现在耳机整体体量上, 合适的体量将辅助耳机佩戴得平稳。耳部区域空间具有局限性, 可承受的耳机体量有限, 过大的体量, 将加大不稳定感, 降低佩戴的美观度, 因此, 具有较大体量的耳机采用辅助形态提升稳定感。而较小的体量, 将使得耳机不容易佩戴稳固, 易发生滑落。根据本文研究可知, 动态场景稳定感比静态场景稳定感更为重要, 因此在设计时, 应着重进行动态场景的稳定度测试。

2) 填充感主要反映在耳机尺寸上, 朱兆华^[18]指出耳机尺寸过小时, 会引发耳机滑落问题; 尺寸过大, 会使得用户在佩戴耳机过程中出现胀痛症状。针对耳部不同区域, 应该运用不同的设计策略, 如耳塞宽度应略大于耳道宽度, 耳包宽度应略大于耳甲腔宽度, 以减少耳机的松动、滑落与丢失。根据分析结果可知, 耳道空间填充感相较于耳甲腔空间填充感更为重要, 因此, 应优先提升耳道的填充体验。

3) 压迫感主要体现在耳机形面上, 相对耳甲腔形态而言, 耳机形态差异程度将影响耳部各区域的压

迫感受。提升产品形态与人体形态的贴合度, 将有效提高产品佩戴的舒适性。基于本研究结果, 应优先提升耳屏、耳屏间切迹、耳道、对耳屏区域对应的耳机形态贴合度, 将耳机形面调整至与耳朵形态曲面贴合状态, 以减少压迫感。

对 4 款真无线耳机而言, 真无线耳机 3 与理想方案最为接近, 真无线耳机方案 1 关联度随后, 而真无线耳机方案 2 与理想设计方案差距最大。

5 结语

适配度问题是影响真无线耳机舒适度的重要因素, 优化真无线耳机适配度将有助于舒适评价及产品满意度的整体提升。本研究围绕真无线耳机适配度问题, 运用层次分析法建立了包括 3 项准则和 12 项指标的设计评价体系, 并运用加权灰色关联法对 4 款真无线耳机适配度进行评价, 建立了完整的真无线耳机适配度评价体系, 有效实现适配度最佳方案选择, 为后续设计方案提供了量化分析参考。

适配度评价体系中, 动态场景稳定感权重最高, 耳道空间及耳甲腔空间填充感次之, 而耳朵各个部分的压迫感权重较低, 因此, 在真无线耳机适配设计时, 应着重提升动态场景下的耳机佩戴稳定度, 优化耳道空间填充感受与耳甲腔空间填充感受, 其次考虑静态场景下的耳机佩戴稳定度与耳朵分区的压迫感体验。后续研究可进一步增加职业背景、使用习惯、学历等用户筛选条件, 并结合用户耳部测量学数据进行分层抽样, 扩大整体样本量, 以进一步完善该研究。

参考文献:

- [1] CHOI K, BAN K, CHOE J, et al. 1C3-4 a Framework for Affective Quality of Ear-related Product Design[J]. The Japanese journal of Ergonomics the Japanese Journal of Ergonomics, 2015, 51(10): 426-429.

- [2] DOUTRES O, SGARD F, TERROIR J, et al. A Critical Review of the Literature on Comfort of Hearing Protection Devices: Analysis of the Comfort Measurement Variability[J]. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2020, 3548(10): 1-12.
- [3] EPPS B W, CASALI J G. Hearing Protection Device Comfort and User Preference: An Investigation and Evaluation Methodology[J]. 1985, 29(8): 814-818.
- [4] PARK M Y, CASALI J G. An Empirical Study of Comfort Afforded by Various Hearing Protection Devices: Laboratory Versus Field Results[J]. *Applied Acoustics*, 1991, 34(3): 151-179.
- [5] 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.
- [6] CHIU H P, CHIANG H Y, LIU C H, et al. Surveying the Comfort Perception of the Ergonomic Design of Bluetooth Earphones[J]. *Work*, (Reading, Mass), 2014, 49(2): 235-243.
- [7] SONG H, SHIN G W, YOON Y, et al. The Effects of Ear Dimensions and Product Attributes on the Wearing Comfort of Wireless Earphones[J]. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2020, 10(24): 1-15.
- [8] 周红超. 耳机人体工学设计与研究方法[J]. *装饰*, 2020(12): 4.
ZHOU Hong-chao, Ergonomic Design and Research Method for Earphone[J]. *ZHUANGSHI*, 2020(12): 4.
- [9] 朱兆华, 吉晓民, 高瞩, 等. 人耳曲面特征点提取与形状分类方法研究及应用[J]. *机械科学与技术*, 2018, 37(3): 409-417.
ZHU Zhao-hua, JI Xiao-min, GAO Shu, et al. An Approach to Design Earphones by Extracting Characteristic Points and Classifying Shape of Auricular Conchae[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2018, 37(3): 409-417.
- [10] 高俊杰, 余隋怀, 赵晓彤. 无人机造型设计层次灰关联评价方法研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(12): 106-110.
GAO Jun-jie, YU Sui-huai, ZHAO Xiao-tong. Multi-Hierarchy Grey Relation Evaluation Method on UAV Styling Design[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(12): 106-110.
- [11] NADERZADEH M, ARABALIBEIK H, MONAZZAM M R, et al. Comparative Analysis of AHP-TOPSIS and Fuzzy AHP Models in Selecting Appropriate Nanocomposites for Environmental Noise Barrier Applications[J]. *FLuctuation and noise letters*, 2017, 16(4): 1750038
- [12] 龚贵宝. 基于模糊层次分析法的区域电网发展诊断研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
GONG Gui-bao. Study on Diagnosis of Regional Power Grid Development Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [13] 曾波, 刘思峰, 崔杰. 白化权函数已知的区间灰数预测模型[J]. *控制与决策*, 2010.
ZHENG Bo, LIU Si-feng, CUI Jie. Prediction Model for Interval Grey Number with Known Whitenization Weight Function[J]. *Control and Design*, 2010, 25(12): 1815-1820.
- [14] 陈燕. 数据挖掘技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
CHEN Yan. *Data Mining Technology and Application*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [15] YE J. Fuzzy Decision-Making Method Based on the Weighted Correlation Coefficient under Intuitionistic Fuzzy Environment[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(1): 202-204.
- [16] 刘震. 灰色关联与预测建模技术及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
LIU Zhen. Grey Incidence and Grey Forecasting Models with Their Application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [17] 齐娜, 李莉, 赵伟. 中国成年人耳廓形态测量及分类[J]. *声学技术*, 2010, 29(5): 518-522.
QI Na, LI Li, ZHAO Wei. Morphometry and Classification of Chinese Adult's Auricles[J]. *Technical Acoustics*, 2010, 2010, 29(5): 518-522.
- [18] 朱兆华. 入耳式耳机曲面造型人性化设计方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
ZHU Zhao-hua. Humanized Design Method for Earphone with Surface Form[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.