【特别策划】

头戴产品人因设计与测评研究综述

李哲林[1,2]，张泽苑[1]，王晶晶[1]，姜立军[1,2]，姜山小[1]，杨宇飞[1]，邓祥洪[1]
（1.华南理工大学 设计学院，广州 510006；
2.广东省人机交互设计工程技术研究中心，广州 510006）

摘要：目的 围绕头戴产品人因设计与测评领域的理论、方法、支撑技术与研究进展，综述总结头戴产品的人因设计与测评研究成果，为头戴产品设计提供理论及实践支撑。**方法** 对影响头戴产品人因设计的支撑技术现状进行详细论述，对比头部数据、辅助设计软件工具、测试头模及人因测评方法等 4 个方面的国内外研究进展。以耳罩式耳机人因设计和医用防护用品适配性的评价方法为例，介绍头戴产品人因设计与测评研究思路，，并就目前头戴产品研究存在的问题提出了一些建议。**结论** 我国成年人头部数据库建设及应用已经有了一定的积累，国内外头戴产品的设计研究发展模式存在较大差异性。我国的学术和行业机构应基于自身的优势和需求，建立头部数据共享和设计联盟，促进头戴产品设计能力提升，改善产品的用户体验，激发消费潜能。

关键词：头戴产品；数字化头型；人因设计
中图分类号：TB472　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-3563(2021)16-0049-12
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.16.008

Review on Human Factor Design and Evaluation of Head-mounted Products

LI Zhe-lin[1,2], *ZHANG Ze-yuan*[1], *WANG Jing-jing*[1], *JIANG Li-jun*[1,2], *JIANG Shan-xiao*[1], *YANG Yu-fei*[1], *DENG Xiang-hong*[1]
(1. School of Design, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2.Guangzhou Human-Computer Interaction Design of Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: This paper focus on the theory, method, support technology and research progress in the field of human factor design and evaluation of head-mounted products. The research achievements of human factor design and evaluation of head-wear products are reviewed. This paper provide theoretical and practical support for head-mounted product design. This paper discusses in detail the current situation of support technology for human factor design of head-mounted products, comparing domestic and international research progress in four areas: head data, auxiliary design software tools, test head models and human factors evaluation methods. The human factor design process of earmuff headset and the evaluation method of medical protective equipment suitability are introduced, and some suggestions are put forward on the existing problems in the research of head- mounted products. The construction and application of head database for adults in China has been accumulated to a certain extent, while there are large differences in the development mode of head-mounted product design research at home and abroad. Our academic and industry institutions should establish head data sharing and design alliances based on their own advantages and demands to promote head-mounted product design capabilities, improve the user experience of products, and stimulate consumer potential.

收稿日期：2021-06-25
基金项目：广东省自然科学基金—面上项目“基于中国人三维头型的头面部医用防护产品的适配设计研究”（2021A1515010934）
作者简介：李哲林（1974—），男，湖南人，博士，华南理工大学教授，主要研究方向为人因与设计、人机交互、数字化设计等。

KEY WORDS: head-mounted product; digital head form; human factor design

2017 年 9 月中共中央、国务院在《关于开展质量提升行动的指导意见》中指出，激发质量创新活力，鼓励开展人体工效学设计，鼓励以用户为中心的微创新，改善用户体验，激发消费潜能[1]。2019 年 10 月工业和信息化部在《制造业设计能力提升专项行动计划（2019-2022 年）》中也提到，要在设计基础研究与积累、设计工具与方法方面加快追赶步伐；鼓励建设国民体型数据库、发展人体工学设计[2]。

1 头戴产品设计研究背景

头部是人体的重要组成部分，位于头部的眼、耳、鼻、颅等器官和结构不但表现着个体容貌，同时还负责接收由视觉、听觉、嗅觉、味觉等感官收集而来的外部信息。正是因为头部具有强大的信息接收和处理能力，所以为了保护这些器官和延伸人的信息接收能力，人类设计和制造了各种形式的头戴产品，譬如古代的帽子、战盔等，近代出现的眼镜、防噪音耳罩、航空头盔等[3-8]，信息时代出现的耳机、VR/AR 眼镜和头盔等[9-12]。这些产品包含了一定的功能，能满足用户的特定需求，同时作为一个实物产品，都具有一定的几何和物理特性。产品戴于头部并与头部器官发生接触时，存在几何曲线、曲面要素之间的贴合、间隙、形变等几何特性，同时其物理特性如质量、材质等施加于头部的耳、鼻、颅等部位，出现压力增加、重心改变、温度上升等情况，进一步影响佩戴者的心理和行为，各种因素的集合一定程度上会影响佩戴者的体验。

从经典的人机工程学视角来看，在佩戴过程中头戴产品应该具有使用安全、提高效率、健康和舒适的目的[13]，近年来，可用性、以用户为中心的设计、感性工学、互动式体验、情感化设计等与用户密切相关的研究领域都涉及用户体验的某些方面[14-15]，ISO 9241-210 指出用户体验是在用户与产品交互的过程中产生的，包括用户的心理感觉、肢体感觉，以及用户体验为用户所带来的结果[16]。目前在我国颁布的一些家电产品的工效学标准中，已经提出将用户体验评价作为工效学评测范围[17]。头戴产品作为直接与人体接触且与人存在一定交互的对象，在佩戴和使用过程中会影响人的生理和心理状态，因此全面测评佩戴体验具有必要性。

要对头戴产品进行合理科学的设计和测评，首先要了解头戴产品人因所需的技术支撑体系，见图 1。本文将从影响头戴产品设计和测评的头部数据、软件工具、测试头模及测评方法等 4 个方面进行论述，并以耳罩式耳机人因设计和医用防护用品适配性的评价为例展开探索和思考。

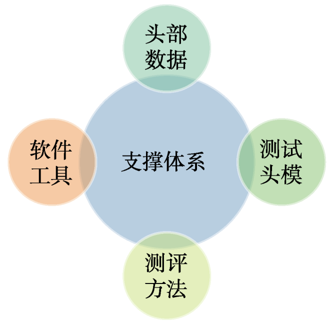


图 1 头戴产品人因设计支撑体系
Fig.1 Support system of head-mounted product human factor design

2 头戴产品设计支撑体系

2.1 头部数据库

产品是为特定类型的消费者提供设计服务的，影响头戴产品的设计质量非常重要的因素是该设计是否选择和有效利用了最合适的人体测量数据库[18]。

2.1.1 中国人头型数据库

1998 年，中国开展了对 1988 年调查收集的 22 300 余人头面部数据进行分析和统计，建立了成年人头面部尺寸的基础数据和主要尺寸的二维分布表[19]，中国成年人的头面部产品的设计可以参考这份国标文件进行。2009 年，中国对通过 CT 和 MR 技术采集的 1 261 例中国成年男性的头部三维扫描数据进行统计分析，建立了分层描述的三维头部参数化模型，这是中国成年男性头型的三维尺寸数据国家标准的首次建立，该标准还提供了头型的三维尺寸数据及其关系[20]。2005 年，董芳华等人开发了中国人民解放军男军人三维头面型数据管理系统（DMS），以该系统为平台，通过对单个样本的头部 CT 切片进行检边拟合处理，完成了头面型的参数化三维重建，并利用数据库管理的方式对 1 082 个样本进行了科学的计算，生成了所需的各个型号的参数化三维标准头型，作为头盔合理优化设计的参考依据[21]。香港理工大学 Yan L 等人选取了中国 6 个不同地方各 270 人进行测量，其中男性和女性各占一半，年龄覆盖 18~70 岁，创建了一个高分辨率的中国头型三维扫描数据库[22]。2018 年，Wang H 等人基于中国 7 个代表性城市 2 200 人的数据建立了一个三维扫描数据库，与传统的二维头部测量尺寸相比，高分辨率的三维扫描数据可以展示更详细的头部几何信息[23]。2020 年，Cck A 等人利用二阶聚类和二级自组织映射方法建立了一个中国台湾人口的头部人体测量资料库，此研究利用三维激光扫描仪收集了 1 010 名中国台湾成年男性的人体测量

数据，使用了二阶聚类和 SOM 分析方法进行了头部聚类分析，为中国台湾居民建立了一个精确的三维头部测量系统[24]。

2.1.2　外国人头型数据库。

1997 年，基于对美国、荷兰和意大利 3 个国家 18~65 岁人群扫描的三维身体数据建立了 CAESAR 人体尺寸三维数据库，该数据库包括高质量的头部和面部扫描数据，CAESAR 项目开发了一个三维模型数据库管理系统，可以使用三维形状、人体测量和人口统计数据查询数据库[25]。Ellena T 等人建立了澳大利亚墨尔本市区 222 名年龄在 18 岁及以上的自行车骑手的数字化三维头型数据库，根据形状相似度将研究人群分为了几类，提出了用于定制头盔设计的大规模定制框架[26]。美国陆军进行了第 2 次全军范围的人体测量调查，即 ANSUR II 计划，其中包括来自 12 个军事设施的约 12 000 名美国陆军士兵的 94 种传统手动测量和三维扫描数据[27]。在未成年头部数据收集方面，Goto L 等人对荷兰儿童的头面部进行了详细的描述性数据统计，利用传统的人体测量技术和三维图像得出的测量结果对 6 个月至 7 岁的儿童进行了测量，最终共收集了 303 名儿童的头面部信息[28]。

基于国内外人头型数据库信息，整理国内外头部外数据库信息见表 1。

2.2　辅助设计软件工具

在基于数字化头部数据开展头戴产品设计时，目前存在 3 种使用头部数据的模式：（1）采用二维数据表或三维可视化方式查询数据；（2）采用二次开发插件读取头部数据方式在通用设计软件使用头部数据；（3）提供独立的设计软件工具辅助头戴产品设计，如提供可视化查询和分析功能。辅助设计软件工具见图 2。

以下属于第 1 种模式。Wang H 等人开发了一个基于 Web 可交互的中国三维头部和面部模型与测量数据的查询网站，用户可以在网站中查询和检索各个层次的原始头部数据和可交互的三维头部模型，同时可以获取特定人群的不同百分位的头型特征尺寸，以及所有头部测量数据的统计分析表[29]，见图 2a。Lee W 等人在对 CAESAR 数据库中头部模型进行手工修复时，在三维头部标记了 26 个测点，测量了 30 个与头戴产品设计相关的头部特征尺寸，并以目标产品、目标人群、尺寸类别的数量和关键人体头部尺寸等指标对头部数据进行了统计和分析，并生成了一个可视化的分级系统，通过条件筛选该系统可以生成具有代表性的头部模型[30]，见图 2b。

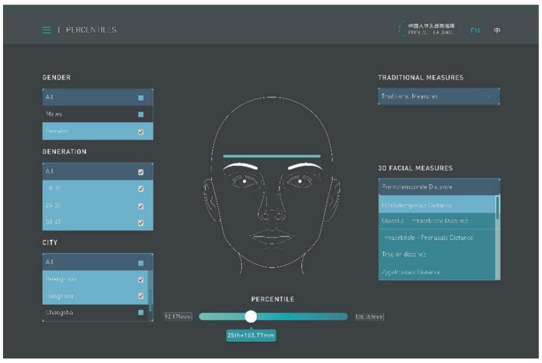
以下属于第 2 种模式。YAN L 等人利用头部数据库随机选取了 144 个头部模型，根据百分位数创建了 5%、50%和 95%的头型模板，并基于 SolidWorks 环境二次开发了一个用户界面，设计师可以与头型模板交互，可以选择头型大小和显示头部特征尺寸。同时在选好头型后，设计师可以直接在三维头模板的表面绘制曲线进行头戴产品的拟合设计，以及把设计好的头戴产品转化为可视化的半透明状态或使用切片工具对头型和产品进行剖切，用于分析产品的内表面与头部形状的贴合程度[31]，见图 2c。

以下属于第 3 种模式。邵玉光等人基于中国男性标准头型，在叠加穴位等信息后，开发了一个用于头戴产品设计的辅助网络平台 Head3DS。在该平台上能

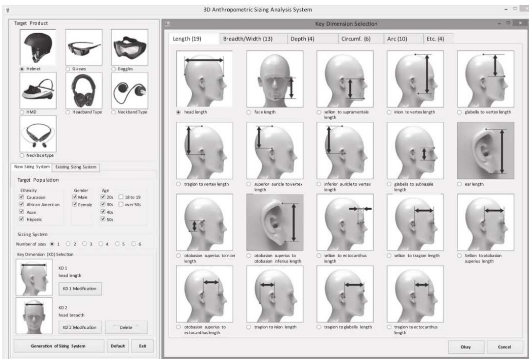
表 1　国内外头部外数据库信息

Tab.1　Domestic and abroad header external database information

数据库名称	建立年份	研究人员/机构	样本数量	样本地区
GB/T 2428-1998	1998	中国标准化与信息分类编码研究所,等	22 300 名（11 150 名男性，11 150 名女性）	中国
SizeChina	2006	Ball R	1 620 名	中国（广州、杭州、重庆、兰州、北京、沈阳）
GB/T 23461-2009	2009	中国人民解放军总后勤部军需装备研究所，北京航空航天大学	1 261 名男性	中国
Chinese Database	2018	Wang H 等人	2 200 名	中国（广州、杭州、长沙、成都、西安、北京、哈尔滨）
Taiwan, China Database	2020	Cck A 等人	1 010 名男性	中国台湾
CAESAR	1997	Robinette K M 等人	美国 4 000 名，荷兰和意大利 10 900 名	美国、荷兰、意大利
Mass Customisation	2018	Ellena T 等人	222 名自行车选手	澳大利亚墨尔本市
ANSUR II	2019	美国陆军	12 000 名美国军人	美国
Dutch Children Database	2019	Goto L 等人	303 名儿童	荷兰

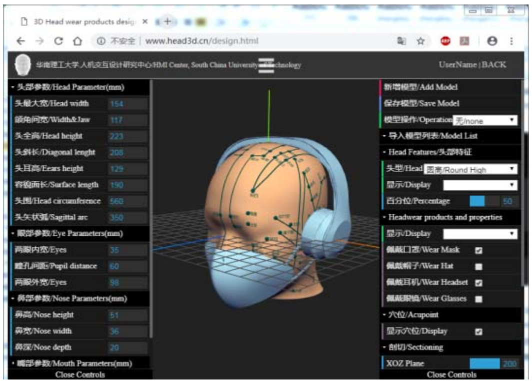


a Chinese Head Base 数据库界面



b 三维头型分级系统界面

c SizeChina 辅助设计界面



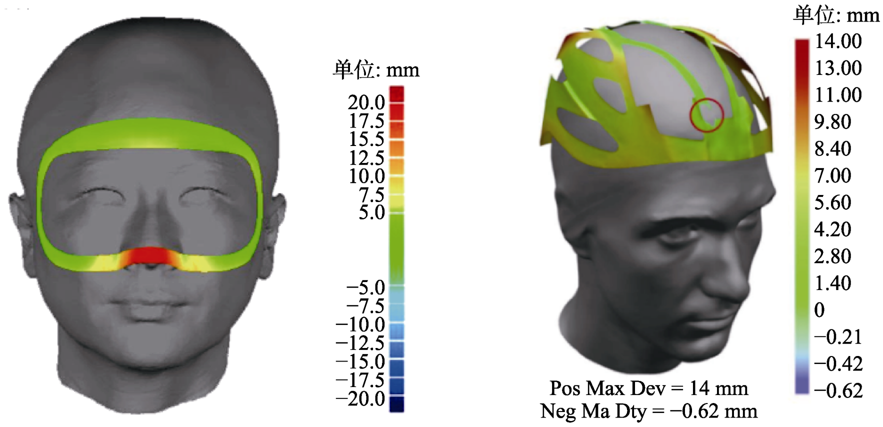
d Head3DS 界面

e Mannequin 平台

图 2 辅助设计软件工具

Fig.2 Assist in designing software tools

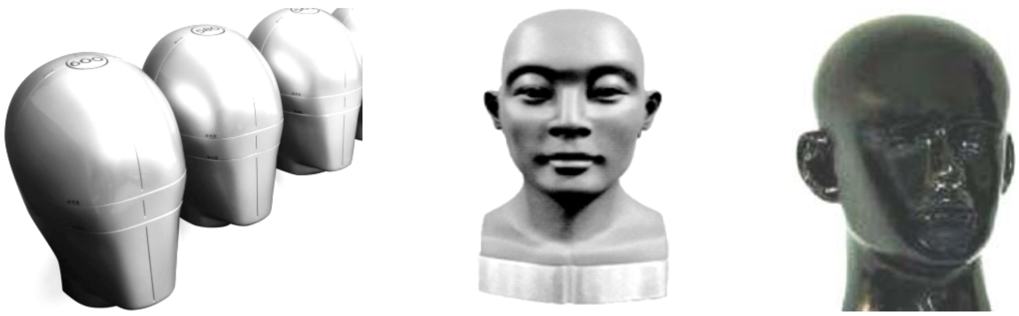
够上传在通用软件中建好的头戴产品模型，并在这个辅助网络分析平台中进行虚拟试戴，分析不同头型、不同百分位时的几何干涉情况[32]，见图 2d。为了更好地利用人体数据，代尔夫特工业设计工程学院的 Robinette K M 等人和 Goto L 等人为 CAESAR 项目开发了一个三维模型数据库管理工具 Mannequin，该工具基于三维扫描数据库进行三维人体测量分析，可以使用三维形状、人体测量和人口统计数据查询数据，同时生成自定义人体数字化模型，允许设计师在不需要工程背景的情况下探索三维身体形状变化，并且创建三维设计人体模型，作为产品设计的尺寸依据[25,28]，见图 2e。



a 用WRAP分析VR眼镜　　b 用CATIA V5R21分析头盔

图 3　头戴产品的适配性分析

Fig.3　Fit analysis of head-mounted products



a 中国头模　　b BHead210 头模　　c 呼吸阻力检测头模

图 4　中国头戴产品设计与检测用的头模

Fig.4　Head mould for head-mounted product design and testing in China

还有一种方式利用通用软件强大的建模和分析功能来进行设计分析，如将头部数据直接导入通用软件中进行建模和分析，见图 3。靳文奎通过 WRAP 软件（Geomagic 公司，美国）分析了虚拟现实眼镜的区域匹配性，计算和分析了头面部和产品之间的间隙分布[33]，见图 3a。Ellena T 等人通过 CATIA V5R21 软件（Dassault 公司，法国）中的距离分析工具测量了头部和头盔内侧衬网之间的间隙[34]。

以上提到的包含头部数据的辅助设计软件工具，基本都采用了可视化的方式表达二维和三维尺寸，使用户易于理解每项数据代表的人体范围。然而只有 Head3DS 和 Mannequin 能在网络上发布三维人体模型供设计师查询与分析，其他的仅能在一些公开发表的文献中看到部分描述，设计师无法直接使用这些数据并运用到实际的设计中。

2.3　测试头模

当产品设计或试制完成后，如要对产品实物原型或成品进行测试分析，不可避免地需要实体头模。从材料来分类，可以分为硬质头模、软质头模、仿真头模；从功能来分类，可以分为展示头模和测试头模；从复杂程度来分类，可以分为简单头模和集成传感器头模。国内部分头戴产品设计与检测用的头模，见图 4。

系列金属头模用于设计适合中国人头型的产品，该头模不具有软组织层，没有完整的头面部特征[35]，见图 4a。我国的人工头模 BHead210，其头面部尺寸按照 GB/T 2428-1998 制作，头传递函数和头形参数更加符合我国的实际情况，在其耳道内还安装着一对相位匹配的测量传声器，用于耳机、声环境等测试[36]，见图 4b。GB2626-2019 中提出在检测防疫呼吸面具时大部分指标的检测方法明确需要使用大、中、小 3 种型号的头模[37]。用于 GB2626 系列标准规定的测试呼吸阻力的头模，采用硬质材料制作，不适合检测受压、温湿度等方面的性能[38]，见图 4c。陈晓等人开展了三维标准头模的设计加工与应用研究，提出了采用头指数对头盔适戴性进行测评的方法，为防弹头盔的盔形设计提供了依据[39]。梅灿华等人很早就提出了仿真头模概念，并指出标准仿真头模的关键技术是使头模的表面的物理性能尽可能接近人体面部肌肉和皮肤组织，但至今未有产品出现[40]。

欧美的仿生头模及在防护口罩方面的应用见图 5。美国国家职业安全卫生研究所（NIOSH）和其国家个人防护技术实验室根据数字头型的人体测量尺寸开发了仿真头模，其表层皮肤为仿生硅树脂聚合

a NIOSH 头模　b 佩戴口罩动态测试　c GRAS 头模　d 佩戴口罩语音测试

图 5 欧美的仿生头模及在防护口罩方面的应用

Fig.5 European and American bionic head mould and its application in protective mask

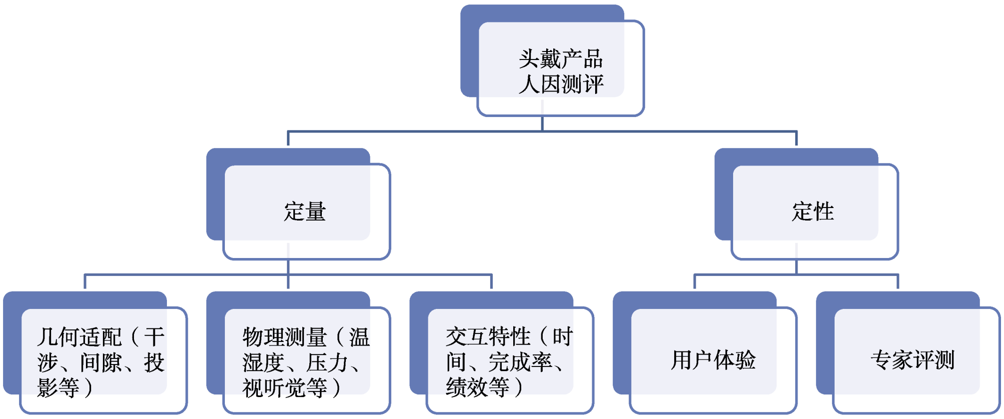


图 6 头戴产品人因测评内容

Fig.6 Head-mounted product human factor evaluation content

物，局部组织厚度根据美国人体测量尺寸定义，见图 5a。在佩戴口罩的动态测试中，采用仿生头模用于测量 N95 过滤式面罩式呼吸器（FFR）的适合度，以研究其对空气中粒子的防护能力，可对不同尺寸的 N95 FFR 产品进行定量的拟合因子评价[41]，见图 5b。丹麦 Knowles 公司推出的 GRAS 头模是在全球普通人体的大量统计数据基础上的建立，具有与普通人体相同的面部特征，其表面采用硬质材料制作，配备有耳廓模拟器和 KEMAR 口腔模拟器，目前主要用于声学模拟实验，见图 5c。以色列团队通过 GRAS 头模研究佩戴各种口罩时造成的声音影响，发现医用口罩实际上都起着语音低通声学滤波器的作用[42]，见图 5d。Seo H 以第 6 次韩国人三维人体测量调查数据分析为基础，对 44 个面部测量数据进行了层次聚类，将分类结果用于小、中、大头模的制作和呼吸器性能的评估，但传感器集成相关技术未见报道[6]。Ellena T 基于澳大利亚三维头部形状人体测量数据库和改进的层次聚类算法，研究了代表澳大利亚的成年骑车人群体的一套新的数字头型模型，制造了 4 个头模[26]。

我国在头模产品方面做得比较简单，在头面部特征参数、仿生软组织、动态头模等方面只开展了零星的研究工作。而欧美的 NIOSH 等机构在 2010 年就制造出了用于呼吸防护检测的仿真头模并用于检测实验，在传感器技术、头面部软组织分布测定、仿真人头制作等方面也积累了丰富的数据资料和经验。头戴产品形态与头型的适配性对产品功能的有效性、佩戴舒适性非常重要，设计和检测阶段用仿真头模检测都能使产品适配性提到有效提升。GB/T 38880-2020 中已经提出测试头模时需要采用 2±2 HA 硬度材料，并有大、中、小 3 种头模，同时要求头模能实现静止—摇头—点头—说话—静止的运动模拟[43]。目前我国的其他国家标准并没有明确规定检测用头模材质和精确尺寸，检测方法中头模应部署的传感器种类、参数、位置也没有要求。

2.4 头戴产品人因测评

头戴产品的人因测评对应于人因设计的目标：安全、舒适、效率和健康指标。在针对具体产品进行测评时，可以将定量的指标测量和定性的体验测试相结合[17]，见图 6。由于篇幅所限，仅对尺寸适配和压力舒适性进行论述。

2.4.1 尺寸适配性

产品适配性表现为产品的尺寸、形状和比例符合身体的尺寸、形状和比例，头戴产品的适配性即该类产品要符合头面部形态特征。随着人们选择产品的范围增大和对美好生活的追求，产品与人体的适配性、舒适性和健康要素越发引起人们的关注，已成为目前研究的热点。头部区域曲面变化最为丰富，对可穿戴产品的适配性要求也最高[33]。由于头面部表面为有弹性的软组织结构，头戴产品的材质有硬质和软质，所

以在适配性方面有如下几个问题需要考虑：（1）设计阶段在软件中的静态适配如何反映出实际佩戴中的动态变形；（2）接触区域表达适配的几何要素集合定义；（3）不同产品的适配性综合测评指标不同，测评体系也存在差异。

不同产品的适配性测评都有各自的特点。如在 GB19083-2010 中引入了适合因子这一指标来定义和测量口罩的密合性，间接反映了来自口罩的形状尺寸设计、口罩带、鼻夹及接触面部的适配性[44]。头盔佩戴合适的一个关键因素是要确保它和头部的形状匹配良好且不会在头盔衬垫和头部之间留下明显的间隙，Ellena T 提出以头盔适配指数来定义头盔模型和人头部的适配程度，其中采用了 2 个参数：（1）间隔距离，即头部形状与定义衬垫内部网格的所有点之间的平均最小距离；（2）间隙均匀度，即间隙分布的标准偏差，被定义为与平均值的离散度[34]。靳文奎提出形成以适配测试组为对象、以适配评价等级量表为工具、以虚拟适配为手段、以区域适配权重为指标的头面部产品适配性客观评价方法体系[33]。朱兆华以入耳式耳机曲面和人耳甲腔曲面之间的曲面形态误差来分析适配程度，然后采用有限元仿真分析耳机佩戴舒适度[45]。

2.4.2　压力舒适性

佩戴头戴产品会与人体皮肤直接接触，产品对人体产生的压力是舒适度的重要衡量指标，称为压力舒适性。Yin H 等人和 Cui W 等人指出在所有的舒适性客观验证方法中，压力和舒适度之间的关系最为显著[46-47]。贾丰源等人指出均匀的压力分布会提升穿戴舒适度[48]。根据 Denton M J 的研究，人体认为舒适的压力范围为 1.96~3.92 kPa，超出这个范围人体将感到不舒适感[49]。接触部位产生过大压力或长时间压迫会阻止血液流动，造成皮肤细胞损伤，导致器械相关性压力性损伤（Device-Related Pressure Injury，简称 DRPI）[50]。从文献分析来看，目前开展的头戴产品的压力舒适性分析主要针对特种领域的头盔、商用领域的耳机和 VR 眼镜，以及大规模、长时间使用场景下的头面部防护用品等。

徐莹等人研究了飞行员头盔的压力舒适度。其实验方法为确定人体头部 4 个区域（额部、颞部、顶部和枕部）的舒适度分布比例，根据比例对被试施加压强，在不同压强下对被试进行主观舒适度询问和眼动实验，判断其舒适度感觉[51]。王珊珊建立了基于男子颈部三维模型的衣领压感舒适性验证方法[52]。

Gerges S N Y 等人通过定制的压力垫对隔音耳罩进行了压力与压力分布测量[53]。刘宗明等人基于头戴式耳机使用场景和 GB/T 2428-1998 给出的成年男性头部尺寸进行了模型重构，并进行了受力分析，生成了等效应力云图，对耳机结构进行了优化[54]。朱兆华等人对 310 个耳甲腔曲面进行了三维扫描及模型重构，并用于耳机舒适度应力分析。该研究采用耳印模型采集了 310 位中国男女青年的耳甲腔结构，并且通过三维扫描重构出了耳部特征曲线模型。并且在建立皮肤—软骨双重模型后，在 ABAQUS 中对某款耳机佩戴时的压力进行了仿真分析[55]。Kaneko H 等人对镜框与耳朵周围接触部位产生的压力和形变进行了仿真分析，采取 CT 技术获取了一位被试的眼周及耳朵部分的模型，并且构造了厚度为 5 mm 的模型。最终得出了眼镜与头部接触时的受力云图，并将佩戴前与佩戴后的模型进行了对比，分析了其形变规律[56-57]。

Lee W 等人通过压力胶片测试了飞行员佩戴不同呼吸面罩时的压力分布，并以此作为判断是否有效提升飞行员呼吸面罩佩戴舒适性的指标[58-59]。Zhuang Y Z 对头戴式呼吸面罩的佩戴舒适性进行了仿真分析，在不同的载荷条件、不同的摩擦条件和不同的固定皮带拉力条件下对头戴式呼吸面罩在头面部产生的压力分布进行了仿真，得出了压力分布受上述不同因素影响下的变化规律[60]。Lei Z 等人对 6 个 N95 FFR 与 5 个新开发的数字头模（小，中，大，长/窄和短/宽）之间的接触压力进行了计算和实验研究，基于 FFR 与头面部接触区域分区域建立了多层弹性结构与刚体结构相结合的仿真头模，并进行了仿真与实物实验[61]。Cai M 等人对 N95 FFR 多种情况下的压力舒适性进行了较为完善的研究。根据头部 CT 图像建立了包含皮肤层、嵌有 8 块肌肉的脂肪组织层和颅骨层的面部三维模型，对 4 种常见表情（平静、快乐、悲伤和惊讶）状态下佩戴口罩的压力分布进行了仿真实验，确定了不同表情下 FFR 在人脸的压力分布及表情变化时的压力变化规律，并且对口罩进行了定制化人脸密封设计，使用三维扫描和打印的方式进行了实物压力测试，并与仿真结果进行对比，证实了其压力分布的优化结果[62-64]。

压力测量可通过真实实验使用压力传感器获得，或是利用有限元模拟仿真获得压力分布特性。贴合部位头面部曲面越复杂，传感器越弯曲，面积越受限，电子传感器测量压力的难度越高，可以尝试使用超薄压力胶片来进行定性测量然后量化压力值，如 Lee W 所采用的测量。如果需要高精度压力值，有限元分析软件更合适。

3　头戴产品人因设计的探索与思考

基于对头戴产品人因设计相关的共性支撑技术进行的论述，在实际的产品设计中，将灵活选择其中的一些技术要素，用于头戴产品的人因设计与测评。以下内容分别为笔者在人因设计和测评体系中已经开展的探索。

3.1　根据头部曲面的耳罩人因设计

深入挖掘用户在使用头戴式耳机过程中的舒适

a 定义耳罩接触区域　b 构建平均网格曲面　c 测量耳上游离部深度

d 耳罩整体形态　e 优化后的耳罩整体效果　f 试戴实物测试压力分布

图 7　耳罩设计流程
Fig.7　Earmuff design process

性问题，发现网咖消费群体对耳机不适感反映特别强烈，超过 92%的不适感集中在耳廓及其周围头部曲面，由此针对该群体使用的耳罩式耳机进行人因设计，耳罩设计流程见图 7。首先采集小样本的三维头部模型的接触区域曲面，见图 7a。构建平均接触区域曲面，见图 7b。以良好的适配性为目标，根据平均特征曲面进行耳罩造型设计，见图 7c—d。评估耳罩的舒适性，通过富士 5LW 超微压感压纸进行压力分布测试，结合舒适度量表进行主观验证，见图 7e—f。结果显示，改进设计的耳罩在平均压力、压力集中区域及提升舒适度方面效果较为理想。

3.2　头面部防护用品的适配性评价体系

长时间佩戴头面部防护用品或佩戴不当，容易引起佩戴者的头面部软组织受损及心理的不舒适感[65]，该类产品存在需要关注的适配性问题。合理评价头面部防护用品的佩戴适配性，有利于科学评价用户佩戴体验和改良设计，笔者在评价体系方面有以下思考。

3.2.1　数字化头型间隙分析

为实现头面部防护用品与三维头部模型的良好适配，考虑人机接触曲面形态、可接受间隙、头部的生理特性等，遵循先整体后局部的曲面适配原则，将头面部分为额头、颧骨、鼻部、嘴部和脸部左右两侧 6 个适配区域（Z1~Z6）。通过对接触面的形态分析，考虑软组织厚度分布及人体受力分布特性，定义可穿戴产品接触面适配程度。头面部形态与产品形态的适配接触并不是所有区域都如刚性体配合那样严丝合缝，对于可变形产品而言，在软组织层很薄的近似刚性点处适配程度高压痕浅，如面颊颧骨处；在软组织层厚曲率半径大的接触位置会出现压痕深，如眼部下方面颊处；而在头面部曲率半径小位置可能出现无接触且存在大间隙，如鼻部与面部结合处，对于这些区域适配评价时分析建立合适的权重。

定义适配评价指数为 *FHW*，假设选用三维间隙（GA）、曲面曲率值（SV）和有效贴合面积（CA）变量，按照 6 个适配区域，并且考虑各区域软组织厚度权重，则三维间隙对适配性的定量关系模型：

$$FHW_g = \sum f_i(GA, SV, CA) \tag{1}$$

其中，f_i 为 6 个适配区域的适配间隙的关系函数。

3.2.2　仿真头模压力分析

将常用的医用护目镜和口罩等佩戴到仿真头模上，如上所述，由于在仿真头模上会被产品压迫的位置部署有柔性压力传感器，所以可以收集到被产品施加的若干离散的压力值 $P(x, y, z)$。考虑各区域软组织厚度权重，则压力对适配性的定量关系模型：

$$FHW_p = \sum f_i(P) \tag{2}$$

其中，f_i 为 6 个适配区域的适配压力关系函数，需要在本项目中深入研究才能确定。

3.2.3　主观评价数据分析

设计实验让被试佩戴医用护目镜和口罩，并设定佩戴的小时数，对头面部佩戴时的适配程度进行主观评价。被试对佩戴防护用品进行主观评价打分 N_i，其中 i 为适配区域序号，包含感受的适配和不适配的区域，并将实验中任何与佩戴适配性有关的问题，填写到适配性调研问卷中。建立对适配性主观感受的定性关系模型：

$$FHW_u = \sum f_m(N) \tag{3}$$

其中，f_m 为 6 个适配区域的适配主观评价关系

函数。

3.2.4　构建适配性综合评价体系

基于上述与适配性相关的间隙、压力的定量关系及主观评价的定性关系分析，在进行综合评价时，赋予各变量合适的权重系数，构建综合评价指标：

$$FHW = a\sum f_i(GA,SV,CA)+b\sum f_i(P)+ c\sum f_m(N) \tag{4}$$

其中，a、b 和 c 为权重系数，可采用多次实验优化这些系数。

以适配性综合评价指标为参考依据，采用头部产品的人因设计准则，如考虑贴合处面积、曲面形态、软组织厚度分布、头面部触压敏感程度等因素，开展头面部防护用品的优化设计及评价。

4　结语

本文首先论述了头戴产品人因设计的重要性，并以头戴产品设计和测评支撑体系中的头部数据、软件工具、测试头模及测评方法等方面的研究现状进行了较为详细的论述，并以耳罩式耳机和医用防护用品为例介绍了笔者所做的前期研究。在头戴产品的人因设计方面，提出如下问题和可以探索的方向。

1）目前我国成年人的头部数据库及国家标准参数已被用于头戴产品设计，但是未成年人的人体尺寸数据还不够全面，尤其缺少未成年人头部三维数据库。现有未成年人头面部尺寸国家标准不足以支撑开展未成年人头戴产品人因设计，由于未成年人监护及采集人体数据伦理问题，设计和研究团队在采集未成年人样本数据集上存在较大难度，这直接影响了未成年人头戴产品的设计发展。例如在这场新型冠状病毒肺炎疫情中我国及时发布了儿童口罩技术规范，但在构建规范时所要求测试的仿生头模需要学术机构和企业共同推动。

2）国内外从事头戴产品的设计研究的发展模式存在一些差异。如荷兰代尔夫特工业设计工程学院在人体测量数据的基础研究和设计应用方面积累了 40 多年经验，近年在婴幼儿头部数据采集和产品设计方面具有独特性，该研究团队学者也结合亚洲人头部数据进行了一系列深入研究，形成了从数据到应用及人才培养的全方位发展。我国的标准建设机构为国家标准及国防需要开展了一系列头部数据采集，高校团队的头戴产品设计研究以企业项目为驱动，设计研究团队采集头部数据满足企业需要用于支撑设计，这就导致高校团队的头戴产品设计研究缺少持续性和前瞻性。如能基于我国学术和行业机构的特长和需求，建立合适的头部数据共享和设计联盟，公益与有偿相结合的模式分享数据等资源，将极大促进中小设计企业的头戴产品设计能力，有效改善头戴产品的用户体验，激发消费潜能。

参考文献：

[1] 新华社．中共中央 国务院关于开展质量提升行动的指导意见[EB/OL]．(2017-09-05)[2021-06-02]．http://www.gov.cn/zhengce/2017-09/12/content_5224580.htm.
Xinhua News Agency. The CPC Central Committee and the State Council on Carrying out Quality Improvement Action Guidelines[EB/OL]. (2017-09-05)[2021-06-02]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-09/12/content_5224580.htm.

[2] 工业和信息化部产业政策司．制造业设计能力提升专项行动计划(2019-2022 年)解读[EB/OL]．(2019-10-29)[2021-06-02]．https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcjd/art/2020/art_96c6133037854892a2ce2dffc8d55431.html.
Department of Industrial Policy, Ministry of Industry and Information Technology. Interpretation of the Special Action Plan for Manufacturing Industry Design Capacity Improvement (2019-2022)[EB/OL]. (2019-10-29)[2021-06-02]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcjd/art/2020/art_96c6133037854892a2ce2dffc8d55431. html.

[3] 陈作荣，杨宜谦，马和中．航空头盔典型件冲击保护性能实验研究[J]．北京航空航天大学学报，1998(2): 80-82.
CHEN Zuo-rong, YANG Yi-qian, MA He-zhong. Experimental Study on Impact Protection Performance of Typical Aviation Helmet[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998(2): 80-82.

[4] 张晓兵，安新伟，刘璐，等．头盔显示器的发展与应用[J]．电子器件, 2000(1): 51-59.
ZHANG Xiao-bing, AN Xin-wei, LIU Lu, et al. Development and Application of Helmet Display[J]. Electronic Devices, 2000(1): 51-59.

[5] 李哲林，邵玉光，孙乐赞，等．基于 3D 头型的头戴产品设计的 Web 图形系统开发[J]．人类工效学，2018, 24(6): 72-75.
LI Zhe-lin, SHAO Yu-guang, SUN Le-zan, et al. Development of Web Graphics System for Head-wear Product Design Based on 3D Head Shape[J]. Ergonomics, 2018, 24(6): 72-75.

[6] SEO H, KIM J I, KIM H. Development of Korean Head Forms for Respirator Performance Testing[J]. Safety and Health at Work, 2020, 11(1): 71-79.

[7] International Organization for Standardization. ISO/TR 4869-4-1998, Acoustic Listener Part 4: Measurement of the Effective Sound Pressure Level of Level-dependent Sound Recovery Earmuffs [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1998.

[8] British Standards Institution. BS EN ISO 4869-4-2000, Acoustics. Hearing Protectors. Effective Sound Pressure Level Measurement of Level Dependent Sound Recovery Earmuffs[S]. London: British Standards Institution, 2000.

[9] DAVE, BAKUL. Smart Glasses Designed to Generate Dynamic Responses[J]. Materials & Processing Report, 1999, 14(3): 115-118.

[10] 范玉洁, 宋胜仿, 刘世纯, 等. 应用智能眼镜监测学龄儿童用眼行为的效果分析[J]. 第三军医大学学报, 2021, 43(14): 1396-1401.
FAN Yu-jie, SONG Sheng-fang, LIU Shi-chun, et al. Analysis of the Effect of Monitoring the Eye Behavior of School-age Children with Smart Glasses[J]. Journal of Third Military Medical University, 2021, 43(14): 1396-1401.

[11] JIN W, HE R. An Exploratory Study of Fit Assessment of the Virtual Reality Glasses[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021(6): 1-10.

[12] 王子豪, 何人可, 刘磊, 等. 头戴式虚拟现实设备的热舒适研究[J]. 包装工程, 2020, 41(2): 249-254.
WANG Zi-hao, HE Ren-ke, LIU Lei, et al. Thermal Comfort of Headset Virtual Reality Equipment[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(2): 249-254.

[13] 丁玉兰. 人机工程学(第 5 版)[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.
DING Yu-lan. Ergonomics (5th Edition)[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017.

[14] 江蕊. 产品设计中的用户体验与应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
JIANG Rui. User Experience and Application in Product Design[D]. Changsha: Hunan University, 2006.

[15] 丁一, 郭伏, 胡名彩, 等. 用户体验国内外研究综述[J]. 工业工程与管理, 2014, 19(4): 92-97.
DING Yi, GUO Fu, HU Ming-cai, et al. User Experience Research Review at Home and Abroad[J]. Industrial Engineering and Management, 2014, 19(4): 92-97.

[16] International Organization for Standardization. ISO 9241-210, Ergonomics of Human-system Interaction Part 210: Human-centred Design for Interactive Systems[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.

[17] 中国标准化研究院, 合肥美的电冰箱有限公司, 青岛海尔智能技术研发有限公司, 等. GB/T 36608.1-2018, 家用电器的人类工效学技术要求与测评第 1 部分: 电冰箱[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2018.
China Institute of Standardization, Hefei Midea Refrigerator Co., LTD., Qingdao Haier Intelligent Technology RESEARCH and Development Co. , LTD. , et al. GB/T 36608. 1-2018, Ergonomics Technical Requirements and Evaluation for Household Appliances Part 1: Refrigerators[S]. Beijing: Standardization Administration, 2018.

[18] 钮建伟. 面向适配设计的三维人体数据多分辨率描述与聚类分析[D]. 北京: 清华大学, 2009.
NIU Jian-wei. Multi-resolution Description and Cluster Analysis of 3D Human Data for Adaptive Design[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.

[19] 中国标准化与信息分类编码研究所, 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 总后军需装备研究所, 等. GB/T 2428-1998, 成年人头面部尺寸[S]. 北京: 国家质量技术监督局, 1998.
Institute of Standardization and Information Classification and Coding, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, General Quartermaster Equipment Institute, et al. GB/T 2428-1998, Head-face Dimensions of Adults[S]. Beijing: The State Bureau of Quality and Technical Supervision, 1981.

[20] 中国人民解放军总后勤部军需装备研究所, 北京航空航天大学. GB/T 23461-2009, 成年男性头型三维尺寸[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2009.
PLA General Logistics Department Quartermaster Equipment Research Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics. GB/T 23461-2009, 3D Dimensions of Male Adult Headforms[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration, 2009.

[21] 董芳华, 陈晓, 周宏. 基于 CT 的男军人三维头面型 DMS 应用[J]. 计算机工程, 2005(12): 214-217.
DONG Fang-hua, CHEN Xiao, ZHOU Hong. Application of 3D DMS Based on CT in Male Soldiers[J]. Computer Engineering, 2005(12): 214-217.

[22] YAN L, BA LL R, JUSTICE L. The 3D Chinese Head and Face Modeling[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(1): 40-47.

[23] WANG H, YANG W, YANG Y U, et al. 3D Digital Anthropometric Study on Chinese Head and Face[C]. Lugano: 3DBODY. TECH 2018 9th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies, 2018.

[24] CCK A, MJW B, JML A. Developing Sizing Systems Using 3D Scanning Head Anthropometric Data-ScienceDirect[J]. Measurement, 2020(10): 152.

[25] ROBINETTE K M, DAANEN H, PAQUET E. The CAESAR Project: a 3-D Surface Anthropometry Survey[C]. London: International Conference on 3-d Digital Imaging & Modeling. IEEE, 1997.

[26] ELLENA T, MUSTAFA H, SUBIC A, et al. A Design Framework for the Mass Customisation of Custom-Fit Bicycle Helmet Models[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2018, 64: 122-133.

[27] CHOI H J, GARLIE T N, PARHAM J L. Anthropometric Analyses of Head and Face Shape to Design Protective Headgear for U. S. Army Personnel[C]. Washington D. C: AHFE 2019 International Conference on Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping, 2019.

[28] GOTO L, LEE W, MOLENBROEK J, et al Traditional and 3D Scan Extracted Measurements of the Heads and Faces of Dutch Children[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2019, 73: 102828-102832.

[29] WANG H, YANG Y, CHEN W, et al. Responsive Web

Design for Chinese Head and Facial Database[M]. Berlin: Springer, Cham, 2018.

[30] LEE W, YANG X, JUNG H, et al. Application of Massive 3D Head and Facial Scan Datasets in Ergonomic Head-product Design[J]. International Journal of the Digital Human, 2016, 1(4): 1-10.

[31] YAN L, BALL R M, CHOW E. A Design and Evaluation Tool Using 3D Head Templates[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2016, 13(2): 153-161.

[32] 邵玉光. 基于三维头型及穴位分布的头戴产品辅助设计平台研究[D] 广州：华南理工大学, 2020.
SHAO Yu-guang. Assistant Design Platform of Head Products Based on THREE-DIMENSIONAL head Shape and Acupoint Distribution[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[33] 靳文奎. 基于头面部三维形态知识的产品适配设计研究[D]. 长沙：湖南大学, 2019.
JIN Wen-kui. Product Adaptation Design Based on 3D Morphological Knowledge of Head and Face[D]. Changsha: Hunan University, 2019.

[34] ELLENA T, SUBIC A, MUSTAFA H, et al. The Helmet Fit Index: an Intelligent Tool for Fit Assessment and Design Customisation[J]. Applied Ergonomics, 2016, 55: 194-207.

[35] Ball R. 3-D Design Tools from the SizeChina Project[J]. Ergonomics in Design the Quarterly of Human Factors Applications, 2009, 17(3): 8-13.

[36] 唐玲，付中华. 中国人标准头模 BHead210 的头相关传递函数数值计算[J]. 声学技术，2014，33(3)：237-242.
TANG Ling, FU Zhong-hua. Numerical Calculation of Head Correlation Transfer Function for Chinese Standard Head Module BHead210[J]. Acoustic Technology, 2014, 33(3): 237-242.

[37] 中钢集团武汉安全环保研究院有限公司，军事科学院防化研究院，3M 中国有限公司. GB 2626-2019，呼吸防护　自吸过滤式防颗粒物呼吸器[S]. 北京：国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会, 2019.
Wuhan Safety and Environmental Protection Research Institute of Sinosteel Group Co., LTD., Defense and Chemical Research Institute of Military Academy of Sciences, 3M China Co., LTD. GB 2626-2019, Respiratory Protection Non-powered Air-purifying Particle Respirator[S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, Standardization Administration, 2019.

[38] 方圆仪器. 各类口罩、医用防护服检测仪器汇总[EB/OL]. (2020-02-04)[2021-06-02]. http://www.wzfyyq.com/M/News/show/id/162. html.
FANGYUAN INSTRUMENT. All Kinds of Masks, Medical Protective Clothing Testing Instrument Summary[EB/OL]. (2020-02-04) [2021-06-02]. http: //www.wzfyyq. com/M/News/show/id/162. html .

[39] 陈晓，钮建伟，祖媛媛. 3D 标准头模系列的设计、加工与应用[J]. 中国个体防护装备, 2013(5): 5-9.
CHEN Xiao, NIU Jian-wei, ZU Yuan-yuan. Design, Processing and Application of 3D Standard Head Die Series[J]. China Personal Protective Equipment, 2013(5): 5-9.

[40] 梅灿华，金士良，洪跃，等. 眼面护具用高速粒子冲击测试仪研制[J]. 中国个体防护装备, 2005(6): 11-13.
MEI Can-hua, JIN Shi-liang, HONG Yue, et al. Development of High Speed Particle Impact Tester for Eye Face Protection[J]. China Personal Protective Equipment, 2005(6): 11-13.

[41] BERGMAN M S, ZHUANG Z, HANSON D, et al. Development of an Advanced Respirator Fit-Test Headform[J]. Journal of Occupational & Environmental Hygiene, 2014, 11(2): 117-125.

[42] GOLDIN A, WEINSTEIN B, SHIMAN N. How Do Medical Masks Degrade Speech Reception[J]. Patient Care, 2020(5): 12-19.

[43] 中国纺织工业联合会. GB/T 38880-2020，儿童口罩技术规范[S]. 北京：国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会, 2020.
China National Textile and Textile Industry Council. GB/T 38880-2020, Technical Specification of Children Mask[S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, Standardization Administration, 2020.

[44] 苏健. GB 19083-2010《医用防护口罩技术要求》标准解读[J]. 中国个体防护装备, 2011(2): 24-26.
SU Jian. GB 19083-2010 “Technical Requirements for Medical Protective Masks” Standard Interpretation[J]. China Personal Protective Equipment, 2011(2): 24-26.

[45] 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 of In-ear Earphone Surface Modeling[D]. Xi’an: Xi’an University of Technology, 2018.

[46] YIN H, SHEN X, HUANG Y, et al. Modeling Dynamic Responses of Aircraft Environmental Control Systems by Coupling with Cabin Thermal Environment Simulations[J]. Building Simulation, 2016, 9(4): 459-468.

[47] CUI W, QIN O, ZHU Y. Field Study of Thermal Environment Spatial Distribution and Passenger Local Thermal Comfort in Aircraft Cabin[J]. Building & Environment, 2014, 80(10): 213-220.

[48] 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.
JIAO Feng-yuan, CHEN Jun-yi, WU Hai-bo, et al. Analysis of Influencing Factors of Cushion Comfort Based on Static Body Pressure Distribution[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(4): 611-616.

[49] DENTON M J. Fit Stretch and Comfort[J]. Textiles, 1971(3): 12-17.

[50] 蒋琪霞，朱冬梅，王桂玲，等. 新型冠状病毒肺炎防护装备所致压力性损伤的发生特征分析[J]. 医学研究生学报, 2020, 33(8): 850-854.

JIANG Qi-xia, ZHU Dong-mei, WANG Gui-ling, et al. Analysis on the Occurrence Characteristics of Stress Injury Caused by Covid-19 Protective Equipment[J]. Journal of Graduate Medical Sciences, 2020, 33(8): 850-854.
[51] 徐莹, 赵鑫, 张露丹, 等. 飞行员头盔的压力舒适性研究[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(4): 452-457.
XU Ying, ZHAO Xin, ZHANG Lu-dan, et al. Pressure Comfort of Pilot Helmet[J]. Space Medicine and Medical Engineering, 2018, 31(4): 452-457.
[52] 王珊珊. 基于男子颈部三维模型的服装压感舒适性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
WANG Shan-shan. Clothing Pressure Comfort Based on Three-dimensional Model of Men's Neck[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
[53] GERGES S N Y, GERGES R N, DIAS R A. Technical Notes. Earmuff Noise Leakage Measurements and Evaluation[J]. Archives of Acoustics, 2015, 40(1): 109-115.
[54] 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): 44-50.
LIU Zong-ming, LI Jian-guo. Modeling Design of Headset Based on Ergonomics[J]. Chinese Journal of Packaging, 2018, 10(5): 44-50.
[55] 朱兆华, 吉晓民, 高瞩, 等. 针对耳机定制设计的人耳甲腔曲面形态层级聚类算法研究与应用[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(4): 571-581.
ZHU Zhao-hua, JI Xiao-min, GAO Zhu, et al. Research and Application of Hierarchical Clustering Algorithm of Human Ear Shell Cavity Surface Shape for Customized Design of Headset[J]. Mechanical Science and Technology, 2019, 38(4): 571-581.
[56] KANEKO H, KAKUNAI S, MORITA M, et al. Mechanical Evaluation of Spectacles at Contact Area around Ear[J]. Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu A Hen/transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part A, 2007, 73(725): 139-144.
[57] KAKUNAI S, MIYAMAE M, ABO M, et al. Mechanical Evaluation of Spectacle Nose Pad[J]. Proceedings of the Japan Society for Photoelasticity, 2013, 13: 107-111.
[58] LEE W, XY B, DJ C, et al. Ergonomic Evaluation of Pilot Oxygen Mask Designs[J]. Applied Ergonomics, 2018, 67: 133-141.
[59] LEE W, JUNG D, PARK S, et al. Development of a Virtual Fit Analysis Method for an Ergonomic Design of Pilot Oxygen Mask[J]. Applied Sciences, 2021, 11(12): 5332.
[60] ZHUANG Y Z. Sensitivity Analysis of Important Parameters Affecting Contact Pressure between a Respirator and a Headform[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2011. 41(3): 55-64.
[61] LEI Z, YANG J, ZHUANG Z. Headform and N95 Filtering Facepiece Respirator Interaction: Contact Pressure Simulation and Validation[J]. Journal of Occupational & Environmental Hygiene, 2012, 9(1): 46-58.
[62] CAI M, SHEN S, WANG S N, et al. Customized Design and 3D Printing of Face Seal for an N95 Filtering Facepiece Respirator[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2018, 15(3): 226-234.
[63] CAI M, SHEN S, LI H. The Effect of Facial Expressions on Respirators Contact Pressures[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2017, 20(10): 1122-1131.
[64] CAI M, SHEN S, LI H, et al. Study of Contact Characteristics between a Respirator and a Headform[J]. Journal of Occupational & Environmental Hygiene, 2015, 13(3): 50.
[65] 夏杰, 段霞, 曹程秀, 等. 新型冠状病毒疫情期间防护用品所致护理人员压力性损伤的现况调查及危险因素分析[J]. 护理管理杂志, 2020, 20(4): 252-256.
XIA Jie, DUAN Xia, CAO Cheng-xiu, et al. Stress Injury of Nursing Staff Caused by Protective Equipment during Novel Coronavirus Epidemic[J]. Journal of Nursing Management, 2020, 20(4): 252-256.