

头戴式虚拟现实设备的热舒适研究

王子豪, 何人可, 刘磊, 卢钰洁, 刘春海
(湖南大学, 长沙 410082)

摘要: **目的** 了解头戴式虚拟现实设备的热特性, 以及用户的主观热舒适感受。**方法** 让被试者使用头戴设备 45 min, 过程中采用温度记录器记录数据, 最后用主观量表获取热舒适评分。获得的数据用 SPSS 进行方差分析, 并结合设备的物理属性进一步进行主观热舒适影响因素分析。**结果** 三款头戴设备的平均微环境温度在使用时间内共上升了 8.11 °C, 主观热不适程度随使用时间的增加而增强。数据统计结果表明, 三款设备间的微环境温度和主观热舒适数据差异显著 ($p < 0.05$)。**结论** 头戴式虚拟现实设备在使用时间内的微环境温度变化会对用户造成“轻微不适”的热感受, 在提升产品热舒适方面可以从显示器的发热性和目镜的散热性入手。用户更青睐透气性强、且对面部相对不造成压力的 S 款设计。

关键词: 虚拟现实; 头戴设备; VR 眼镜; 微环境温度; 主观热舒适

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)02-0249-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.02.038

Thermal Comfort of Head-mounted Display

WANG Zi-hao, HE Ren-ke, LIU Lei, LU Yu-jie, LIU Chun-hai
(Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: The work aims to understand the thermal characteristics of head-mounted display and users' subjective thermal comfort. Subjects were asked to wear the headset for 45 minutes. During the process, a temperature recorder was used to record the data. Finally, a subjective scale was used to obtain the thermal comfort score. The obtained data were analyzed by SPSS for variance analysis, and the factors influencing subjective thermal comfort were further analyzed based on the physical attributes of the equipment. The average microclimate temperature of the three head-mounted displays increased by 8.11 °C during the use time, and the subjective thermal discomfort increased with the use time. The statistical results showed that the microclimate temperature and subjective thermal comfort data were significantly different among the three devices ($p < 0.05$). The microclimate temperature change of the head-mounted display during the use time will cause “slight discomfort” to the user. In order to improve the thermal comfort of the product, it can start with the thermal performance of the display and the heat dissipation of the eyepiece. Users prefer the S design with strong air permeability and relatively no pressure on the face.

KEY WORDS: virtual reality; headset; head-mounted display; microclimate temperature; subjective thermal comfort

虚拟现实技术的迅速发展不断地影响着人们的生活, 其与可穿戴智能设备的结合发展使得这项技术迅速进入消费者视野, 头戴式虚拟现实设备“Head-mounted Display”(以下简称“VR 眼镜”)便是其中之一。“设计科学”理论^[1]的广泛传播表明, 工业设

计早已不仅只关注产品的外在形态, 人因工程学也成为指导设计的重要因素。VR 眼镜显示器发热, 以及其主要覆盖在眼眶周围的设计特征使得它的热舒适性与其他类的头戴设备(如自行车头盔、防护面罩等)相比显得格外特殊。本实验以用户面部与 VR 眼镜之

收稿日期: 2000-00-00

基金项目: 深圳华为技术有限公司资金支持(201791451183)

作者简介: 王子豪(1990—), 男, 湖南人, 湖南大学博士生, 主要研究方向为应用人机学。

通信作者: 何人可(1958—), 男, 湖南人, 湖南大学教授, 主要研究方向为设计史论和设计战略。

间形成的微环境的温度为热特性指标,将产品在使用过程中表现出的客观温度数据与用户主观的热舒适感受相结合,从统计学角度出发,理解 VR 眼镜的热效应,探究影响其热表现的因素,从而提出设计改善建议。

1 虚拟现实技术与 VR 眼镜

虚拟现实 (Virtual Reality) 是一种能使人更好地理解、模拟和适应自然的科学方法与技术^[2]。它以计算机科学作为载体,借助实体设备为使用者创造出全新的交互体验,模拟真实场景中的视觉环境、声音、触感,甚至气味等因素,使处在虚拟环境中的人产生一种身临其境的感觉。

早在 20 世纪初,人类便开始对真实场景进行模拟,希望能间接体验到日常生活中无法体验的感觉和经历。1929 年,爱德华·林肯 (Edwin A. Link) 发明了一种飞行体验模拟装置,能使乘坐者获得在空中飞行的感觉。1956 年,莫顿·海力格 (Morton Heilig) 发明了“传感景院”^[3],见图 1,这是一种集合了多个模拟传感器的早期虚拟现实设备。它所具备的宽广视角能呈现出与现实无异的骑摩托车场景,可偏转的座椅和环绕音效使得驾驶者能感受到身临其境的驾驶体验。计算机图形学之父伊万·萨瑟兰 (Ivan Sutherland) 在 1965 年的国际信息处理联合会议上发表的一篇名为《终极显示》的论文,其同样阐述了一种更为先进的虚拟现实技术。所描述的技术不仅可以将人置身于虚拟环境中,更可以与其中的虚拟对象进行互动,如触摸、推挤等。此论文不仅刷新了人们对模拟真实环境概念的认识,还推动了电脑图像学和图形技术的巨大发展,并最终触发了一系列全新人机交互设备的诞生,其中便包括广为人知的 VR 眼镜。



图 1 莫顿·海力格发明的“传感景院”
Fig.1 Sensorama invented by Morton Heilig

当前广大用户主要通过 VR 眼镜来实现虚拟现实体验^[4]。在 2014 年,“脸书”(Facebook) 创新公司以 20 亿美元将“傲库路思”(Oculus) 收购的事件将虚拟现实的概念迅速推及全球。到了 2016 年,“傲库路思”公司正式发售消费者版的 VR 眼镜——Oculus Rift,几乎同一时间,台湾宏达国际电子股份有限公司 (HTC) 和香港三星电子股份有限公司 (SAMSUNG) 分别发布“HTC Vive”和“SUMSUNG Gear VR”的消费者版 VR 眼镜,当然还有索尼公司 (SONY) 发布的“PlayStation VR”。另外,还有不计其数的中小型企业也推出了相应的虚拟现实产品来填补中低端市场的空白。

VR 眼镜目前有三个种类,第一种是“外接式”头显设备,是基于电脑使用的头戴式设备,它具备独立显示屏且价格相对昂贵;第二种是“移动端”头显设备,这种设备虽然不具备独立显示屏,但是价格相对低廉,使用时需要放入手机作为显示屏来使用;第三种则是“一体机”头显设备,这种设备自带运算硬件,但因价格相对昂贵,目前还没有进入广大用户的视野。各种 VR 眼镜为了达到“沉浸式”的效果,都是通过头带的方式,将承载显示器的目镜覆盖在使用者的眼部周围,“包裹式”设计为显示器在工作时提供无光的使用环境。

2 主观热舒适与 VR 眼镜用户体验的研究

温度感觉作为人的感官体验之一,对人的生理和心理感受有着非常大的影响作用^[5]。在 2010 年的“人类居住热环境条件标准”中,人体热舒适被明确定义为“人体对热环境感觉满意的一种意识状态^[6]”。热舒适产生的影响因素包括物理、生理、心理等因素。当体温保持在一个很窄的范围内,即人体生理温度调节的活动范围最小时,人就能处于热舒适的状态。人体热舒适是由中央神经系统、皮肤系统等人体热感受器,在接受到刺激信号时形成的热总集激励作用而产生的。人体热舒适的形成路径见图 2,最后,人体热舒适还包括了舒适与不舒适两种可能性,图 2 中虚线表示前后相关联部分的因果可能性。

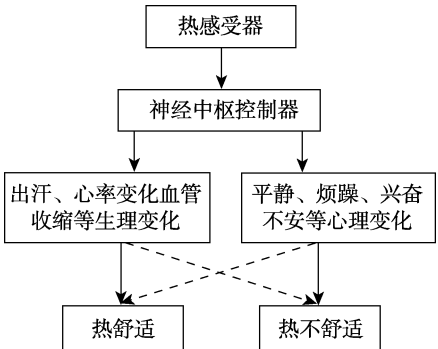


图 2 人体热舒适的形成路径
Fig.2 Formation path of human thermal comfort

虚拟现实设备虽然是近几年的研究热点,但是仍属于朝阳产品,目前其在学术研究与市场反馈方面的信息主要集中在技术方面,如使用 VR 眼镜时所产生的眩晕症状,以及在提升显示器性能方面的研究等^[6]。由于 VR 眼镜自带的处理器和显示器在运行过程中会发热,加之产品在使用时需与面部紧密包裹,产品所产生的热量将累积在人与设备之间形成的密闭空腔内,所以温度的迅速上升将很可能影响用户的使用体验。研究表明,尽管人体头面部面积只占人身体面积的不到 10%,但是它能散失的热量却远大于整个身体的 10%^[7]。作为人体最重要的器官之一,头部的热舒适与否,直接关系到用户对 VR 眼镜主观舒适度评价的好坏。与之相比,其他类型的头戴设备,如头盔的热舒适研究^[4],都具有相当成熟的研究基础。因此,对于 VR 眼镜的主观热舒适度研究将很有必要。

3 国内外头戴设备的主观热舒适研究

目前关于头戴设备的热舒适研究方法主要有物理属性研究法、生理数据研究法、物理和生理相结合的研究方法、以及真实用户实验法^[8-9]。以往研究表明,微环境是人头面部与佩戴的头戴设备之间形成的一个特定空间,空间中温度的变化经常被当作产品热特性的指标。以往相关研究实验,比如自行车头盔^[10]、摩托车头盔^[10]、橄榄球头盔^[11]、个人防护设备^[12]、滑雪鞋^[13]、背部护甲^[14]的热舒适研究都为实验提供了很好的研究基础。本实验的方法建立在以往头戴设备的热舒适研究方法基础上,通过分析微环境的温度变化趋势,结合与之对应的用户主观热舒适数据,从统计学角度出发,理解 VR 眼镜的热舒适表现,并从样本间的物理属性差异出发,解释因不同产品设计所造成的用户主观热舒适差异的原因,从而提出未来设计导向。

4 VR 眼镜的热舒适研究实验

本实验通过测试 26 个人的 VR 体验来研究三款不同的虚拟现实头戴设备的热特性和相应的主观热舒适度。每位被试者以随机的顺序,分三天来体验三款虚拟现实头戴设备,且每次体验安排在同一时间

段,以减少因生理周期因素带来的影响。每次体验时长为 45 min,在这个过程中,通过温度记录仪以及主观问卷来获取 VR 眼镜热特性与被试者的主观热舒适数据,平均微环境温度和主观热舒适数据通过 SPSS 进行方差分析检验差异性 ($p < 0.05$)。

4.1 材料及实验环境设置

由于“一体机”的形式还没有被市场广泛接受,实验选用了“外接式”头显设备和“移动端”头显设备,实验中使用的 VR 眼镜见图 3。而在“外接式”头显设备中,选择了在设计上较为典型且有明显差异的 S 款和 O 款,而由于市面上“移动端”头显设备的形式单一,因此只选取了主流的 G 款。

S 款由一个硬质“环形”头带和目镜组成,佩戴时硬质“环形”头带紧紧包围着用户的头围部,由于整个目镜的重量完全依托在“环形”头带上,所以目镜仅悬在用户的眼前,且对用户面部几乎不造成压力。

O 款的设计有所不同,它是由一个软质的“T 型”头带和目镜部分组成,佩戴时整个目镜由“T 型”头带捆绑固定在用户头面部,目镜会对用户的面部造成一定压力。

G 款和 O 款一样也是由一个软质的头带和目镜部分组成,但它使用的是“一字型”头带,佩戴时没有“T 型”头带的稳固,在使用时为了防止 VR 眼镜从用户面部滑落,头带需要绑得相对更紧,这会对用户面部造成更大的压力。

因为每款产品都有其独特的游戏平台,所以实验无法使每款设备都拥有完全相同的体验内容。为了尽可能减少体验内容对实验结果的影响,每款设备都以同类型的视频游戏为主,实验时每位参与者都以站立姿势为主,且必须站在规定的操作区域内,VR 体验实验环境见图 4。

本实验采用上海沃第森电子科技有限公司生产的,尺寸直径为 17 mm,厚度为 5 mm 的纽扣型温度数据记录仪 (iButton Hygrochron——DS1923) 去测量微环境的温度。由于眼镜与面部形成的空间体积有限,为了尽可能获得科学稳定的数据,实验最终在微环境中放置三个记录仪,放置位置分别是右侧颧骨上方、眉心中间和 VR 眼镜左边目镜的内侧。这三个位

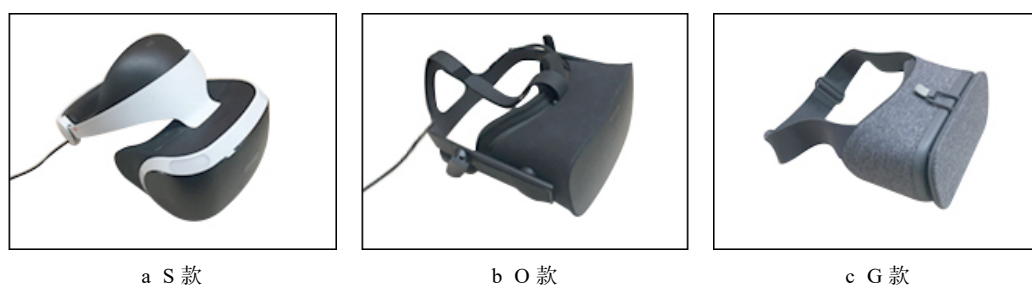


图 3 实验中使用的 VR 眼镜
Fig.3 Head-mounted display used in this experiment

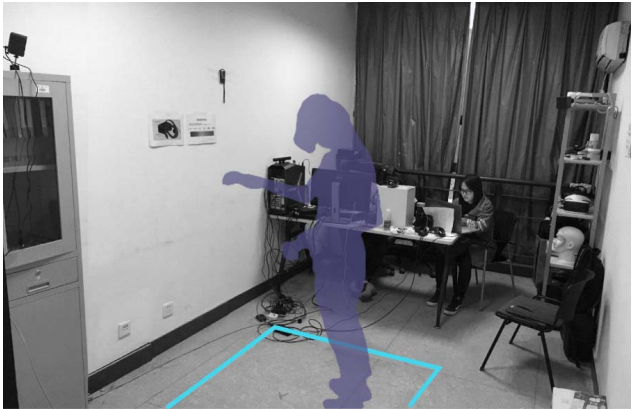


图 4 VR 体验实验环境
Fig.4 VR experiment environment

置在预实验阶段被确定为是不会干扰到用户的使用体验以及实验结果的，温度数据记录器放置位置见图 5。

本实验在一个可控制的实验室环境下进行。实验室的平均温度为 $22.92\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 $38.56\%\pm 7.43\%$ ，风速小于 0.2 m/s 。环境温度通过空调控制，并用德图仪器国际贸易有限公司生产的温、湿度检测仪器（Testo 610 Thermo-hygrometer）进行

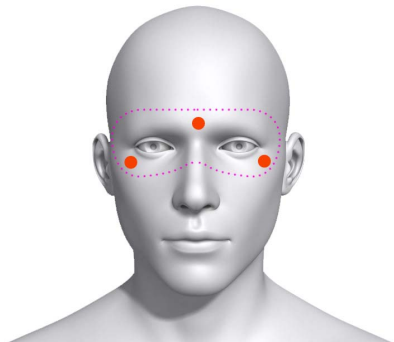


图 5 温度数据记录器放置位置
Fig.5 Location of temperature data recorder

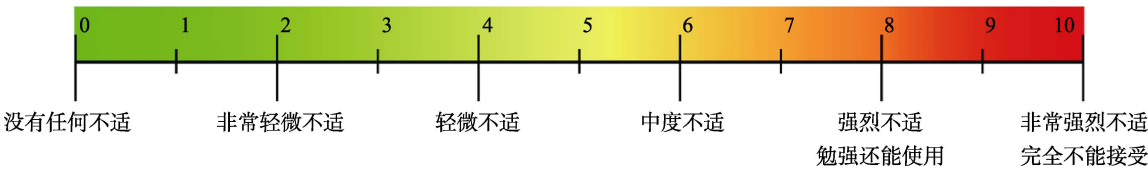


图 6 主观热舒适李克特量表
Fig.6 Rickett scale of subjective thermal comfort

表 1 微环境温度测量结果（ $^{\circ}\text{C}$ ）

Tab.1 Experiment result of microclimate temperature ($^{\circ}\text{C}$)

	1 分钟	10 分钟	20 分钟	30 分钟	45 分钟	平均温度
S 款	25.23	28.69	30.37	31.39	32.06	29.55
O 款	24.94	28.83	31.03	32.42	33.50	30.14
G 款	24.66	29.85	31.73	32.59	33.14	30.39
平均温度	24.94	29.12	31.04	32.13	32.90	30.02

监控。

4.2 实验参与人员

总共 26 名在校大学生（16 名女性和 10 名男性）参加了此实验，他们平均年龄是 22.77 岁（年龄标准差为 2.27）。所有的参与者均为自愿参与，且都有电脑游戏操作经验，身体状况良好，且视力良好，都不戴眼镜。每一位参与者以随机的顺序分三天体验三款 VR 设备，每天体验一款，且体验都在相同时间段进行。

4.3 实验过程

每次实验时长为 45 min。在正式实验前，参与者被要求先在实验室静坐 10 min 以适应环境，期间可自由增减衣物，以达到舒适状态^[15-16]。接下来由实验人员固定好温度记录器，参与者签署实验告知书，并在实验人员的帮助下正确穿戴好 VR 眼镜。实验开始后，温度记录仪器以 30 s 的间隔开始记录温度数据。实验期间参与者始终站在一个规定区域内。在实验第 10、20、30、45 min 的时候，实验人员向参与者询问主观热舒适感受，主观问卷的问题是“请根据量表，就您此刻在头部范围的热舒适程度打分”，参与者的回答是基于主观热舒适李克特量表（见图 6），“0”表示没有任何不适，“10”表示极度不舒服。

5 实验结果与讨论

5.1 微环境温度测量结果与讨论

三款 VR 眼镜在 45 min 的使用过程中的平均微环境温度为 $30.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，实验前后平均微环境温度从 $24.94\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $32.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，共升高了 $8.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，微环境温度测量结果见表 1。在 45 min 内 G 款 VR 眼镜的平均微环境温度最高，为 $30.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，O 款为 $30.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，S 款为 $29.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。统计分析结果表明，三款 VR 设备的平均微环境温度差异显著（ $p<0.05$ ）。

三款 VR 眼镜的平均微环境温度处于 26.00 ℃到 36.50 ℃之间，这与之前其他头戴设备的微环境温度范围表现一致^[9]。持续上升的微环境温度主要是由于 VR 眼镜本身电子屏幕产生的热量以及 VR 眼镜“包裹式”的覆盖结构，使得热量聚集，从而导致温度升高。

G 款平均微环境温度最高，由于目镜受重力影响，在使用过程中目镜会不时从面部滑落，而 G 款仅有“一字型”的头带将目镜固定在面部，无法像其他两款设备的“T 型”和硬质“环形”头带那样从多方位固定，因此 G 款只能将头带拉得很紧以防止滑落，这样就造成了 G 款与面部的挤压贴合，而其高密闭性就会导致微环境的透气性较差。此外，G 款的内部覆盖材料是棉质的，相对其他两款的塑料材质而言，棉质的保温效果更好。以上原因都会使 G 款的微环境温度相对较高。

O 款的平均微环境温度居中，因为此款设备的“T 型”头带在使用过程中有额外的头带分支加以平衡和稳固 VR 眼镜的目镜，所以不需要像 G 款那样将头带拉得特别紧。因而 O 款与面部的贴合力度会相对较低，用户佩戴起来面部感受也相对舒适。在前文人体热舒适的形成路径简图中已经提到，人体热舒适是由生理和心理两方面决定的，面部的舒适感和微环境的透气性都会从这两个方面影响用户的热体验感受。

S 款平均微环境温度最低，此设备的整个目镜部分是完全依托在其硬质“环形”头带上的，整个目镜对面部几乎不造成压力，仅仅只是轻触于眼眶周围，舒适透气；目镜与面部接触的材料为轻薄的硅胶，柔软的材质使其与面部接触时能带来良好触感，并轻柔贴合面部。因此，相较其他两款而言，S 款具有更好的微环境透气性和面部佩戴舒适性。

5.2 主观热舒适测量结果与讨论

三款 VR 眼镜的平均主观热舒适随着产品使用时间的增长而减弱，主观热舒适测量结果见表 2，且平均主观热舒适值为 2.81，所对应量表的热舒适值为“轻微不适”(0 表示没有不舒服，10 表示极度不适)。统计分析结果表明三款 VR 眼镜的平均主观热舒适差异显著 ($p<0.05$): G 款 (3.32) > O 款 (2.79) > S 款 (2.31)。

这个结果证实了在使用 VR 眼镜时，微环境温度的升高会对使用者造成热不舒服。这与以往其他类的

头戴设备热舒适研究结果一致，即头戴设备由于包裹头部而导致散热不良，引起微环境的温度上升，诱发“热压力”，引起主观热不舒服^[15]。更有研究表明，额头相对头部其他位置，如太阳穴、后脑、头顶等来说毛细血管更密集，对热的反应也更敏感^[16]。实验中的 VR 眼镜主要是覆盖在眼眶、额头部分，此位置具备的高出汗率也可能是造成热不舒服的原因之一。

VR 眼镜在使用上为了达到完好的蔽光性，通常采用“包围式”的设计，这种设计虽然能达到效果，但还是会导致相应部位热量的上升。而良好的透气性是提升头戴设备佩戴舒适度最直接的方法^[9]，S 款的设计刚好抓住了这一特性，目镜的悬挂和硅胶材质的运用能在达到完好蔽光性的同时，保持面部良好的透气性与舒适性，这也正是它的主观热舒适评分高于其他两款的原因。

6 实验结论

本实验提供了 VR 眼镜这类头戴设备的热舒适研究基础。实验结果表明，在 45 min 内，微环境温度持续升高，并对用户造成“轻微不适”的热感受，因此 VR 产品在热舒适表现方面的设计还有待提升。而提升 VR 眼镜的热舒适，具体可以从显示器发热性能、目镜的散热表现，以及产品与面部接触部分的材料选择入手。减少产品运行时的发热量，提升微环境的透气性以及面部材料的接触舒适度，都能从生理和心理两方面提升用户的热舒适度。在微环境内，用云导热系数高的材料也能使聚集的热量迅速散失到外界，从而降低微环境的温度。

主观研究结果表明三款设备在热舒适感受上存在差异。主观热舒适最好的是 S 款，其次是 O 款，G 款的主观热舒适最差。S 款的设计表明，为了达到“沉浸式”效果所需要的无光环境，不一定需要通过将目镜紧贴面部、甚至造成压力才可以实现。S 款的设计证实了头戴设备能在保持完好蔽光性的同时，几乎不对用户面部造成压力，且微环境也能具有良好透气性。其次，虽然 O 款和 G 款的目镜边框材质都选择了棉和合成纤维制成的亲肤材料，但是这样的材料几乎将产品与面部之间形成的微环境变成了“保温盒”，然而 S 款采用的硅胶轻薄边框能避免这个问题。

7 结语

由于本实验属于 VR 热舒适的初期研究，只提供了 VR 头戴设备的热属性基础数据。VR 眼镜的重量、对面部造成的压力以及通风性能等因素对主观热舒适的影响都需要在未来针对具体的需求进行严格的变量控制才能得出相关结论。

未来的实验建议可在确定具体的佩戴方式后(如 S 款的硬质“环形头带”)，再根据需要测量的值进行

表 2 主观热舒适测量结果

Tab.2 Experiment result of subjective comfort evaluation

	10 分钟	20 分钟	30 分钟	45 分钟	平均值
S 款	1.44	1.85	2.56	3.37	2.31
O 款	1.78	2.44	3.22	3.70	2.79
G 款	2.04	2.89	3.70	4.63	3.32
平均值	1.76	2.39	3.16	3.9	2.81

变量控制。比如针对 S 款,可以继续探究微环境覆盖材质的设置与微环境温度变化的相关性,这样将会得出更具有实践设计意义的结果。

参考文献:

- [1] 戈登·诺克斯,汪芸. 艺术、科学与大数据 II [J]. 装饰, 2016(2): 59-67.
GORDON K, WANG Yun. Art, Science and Big Data II [J]. Zhuangshi, 2016(2): 59-67.
- [2] ZHAO Qin-ping. A Survey on Virtual Reality[J]. Science in China (Series F: Information Sciences), 2009, 52(3): 348-400.
- [3] HEILIG M L. Sensorama Simulator: the United States, 3,050,870[P]. 1962-8-28.
- [4] SHARPLES S, COBB S, MOODY A, et al. Virtual Reality Induced Symptoms and Effects (VRISE): Comparison of Head Mounted Display (HMD), Desktop and Projection Display Systems[J]. Displays, 2008, 29(2): 58-69.
- [5] LIBRARY W E. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 2(3): 56-57.
- [6] ASLANDERE T, DREYER D, PANKRATZ F. Virtual Hand-button Interaction in a Generic Virtual Reality Flight Simulator[C]. Nanjing: 2015 IEEE Aerospace Conference, 2015.
- [7] BOGERD C P, BRUHWILER P A. The Role of Head Tilt, Hair and Wind Speed on Forced Convective Heat Loss through Full-Face Motorcycle Helmets: A Thermal Manikin Study[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2008, 38(3-4): 346-353.
- [8] BOGERD C P, AERTS J M, ANNAHEIM S, et al. A Review on Ergonomics of Headgear: Thermal Effects[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2015(45): 1-12.
- [9] PANG T Y, SUBIC A, TAKLA M. A Comparative Experimental Study of the Thermal Properties of Cricket Helmets[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2013, 43(2): 161-169.
- [10] BRUHWILER P. Radiant Heat Transfer of Bicycle Helmets and Visors[J]. Journal of Sports Sciences, 2008, 26(10): 1025-1031.
- [11] BRUHWILER P A. Role of the Visor in Forced Convective Heat Loss with Bicycle Helmets[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2009, 39(1): 255-259.
- [12] WARDININGSIH W, TROYNIKOV O, NAWAZ N, et al. Influence of Wearing Impact Protective Garment on Thermophysiological Comfort of The Wearer[J]. Procedia Engineering, 2014(72): 551-556.
- [13] COLONNA M, MONCALERO M, NICOTRA M, et al. Thermal Behaviour of Ski-Boot Liners: Effect of Materials on Thermal Comfort in Real and Simulated Skiing Conditions[J]. Procedia Engineering, 2014(72): 386-391.
- [14] DOTTI F, FERRI A, MONCALERO M, et al. Thermophysiological Comfort of Soft-Shell Back Protectors under Controlled Environmental Conditions[J]. Applied Ergonomics, 2016(56): 144-152.
- [15] DE B G, AERTS J M, VANDER S J, et al. Quantification of Local Ventilation Efficiency under Bicycle Helmets[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2012, 42(3): 278-286.
- [16] SMITH C J, HAVENITH G. Body Mapping of Sweating Patterns in Male Athletes in Mild Exercise-Induced Hyperthermia[J]. European Journal of Applied Physiology, 2011, 111(7): 1391-1404.