

【工业设计】

## 嗅觉显示技术研究综述

王亚男, 严轶凡, 李宇澄, 陈艺中, 陈庆军\*

(东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051)

**摘要:** 目的 随着计算机硬件技术与多通道交互技术的发展, 嗅觉作为一种新型的获取和传递信息的媒介开始在人机交互领域体现出强大的开发和研究潜力, 尤其在面向未来虚拟现实、增强现实、混合现实的应用优势日益显著。通过对相关研究进展进行梳理、归纳和分析, 为该技术的未来发展路径提供参考, 目标是提供更科研严谨、流畅自然、高精度的虚拟嗅觉交互体验。**方法** 通过文献研究、案例分析, 阐述嗅觉显示技术的感知基础, 梳理了该技术的基本含义、构成要素、发展历程、关键技术、评价方法。**结论** 嗅觉显示技术作为新兴技术已经逐渐融入到人们生活的不同领域中, 可提供多元的感知信息, 加速了多通道感知技术的维度与应用潜能。但目前对嗅觉的认知还处在萌芽阶段, 虚拟嗅觉的交互体验还处在相对低保真和粗糙的阶段, 主要存在气味知识不够全面、气味释放装置臃肿、嗅觉显示技术的可获得性与可复制性低等问题, 总结归纳嗅觉显示技术未来在多维气味数据建立、气味释放技术普世化与标准化、系统性评价机制、安全与伦理等问题领域还有着较大的发展与研究潜力。

**关键词:** 嗅觉显示技术; 嗅觉感知; 关键技术; 虚拟现实; 趋势与挑战

中图分类号: TB482 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)14-0059-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.14.007

## Review on Olfactory Display Technology

WANG Yanan, YAN Yifan, LI Yucheng, CHEN Yizhong, CHEN Qingjun\*

(College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China)

**ABSTRACT:** With the advancement of computer hardware technology and multi-channel interaction techniques, olfaction, as a novel medium for acquiring and transmitting information, has begun to demonstrate substantial potential for development and research in the field of Human-Computer Interaction (HCI). Particularly in the context of future applications in Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), and Mixed Reality (MR), its advantages have become increasingly prominent. By reviewing, summarizing, and analyzing the progress in relevant research, the work aims to provide reference for the future development path of this technology, striving for a more scientifically rigorous, naturally fluent, and highly precise virtual olfactory interaction experience. Through literature studies and case analyses, the perceptual foundation of olfactory display technology was elucidated and its fundamental concepts, constituent elements, developmental journey, key technologies, and evaluation methods were sorted out. As an emerging technology, olfactory display technology has gradually integrated into various domains of people's lives, offering diverse perceptual information and accelerating the potential dimensions and applications of multi-channel sensory technology. However, the current understanding of olfaction is in its nascent stage, and the interactive experience of virtual olfaction remains relatively low in fidelity and rough in nature. Predominant issues revolve around insufficient knowledge of odors, unwieldy odor release devices, limited accessibility of olfactory display technology, and low reproducibility. It is concluded that olfactory display technology has great development and research potential in the future in the fields of multidimensional odor data establishment, universality and standardization of odor release technology, systematic evaluation mechanism, safety and ethics.

**KEY WORDS:** olfactory display technology; olfactory sensation; key technologies; Virtual Reality; trend and challenges

收稿日期: 2024-02-23

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (62102078); 上海市浦江人才项目 (21PJC002)

\*通信作者

近年来，嗅觉界面（Olfactory Interfaces）作为一个新兴的研究课题，在人机交互及相关领域的探索逐渐增多。其中，嗅觉显示技术（Olfactory Display Technology）是将具有气味属性的原材料定时、定量地传输到人的嗅觉器官中进行信息的转换，体现了人、机器、嗅觉相互联系最紧密的一环，也是嗅觉界面研究中的热点问题。目前，嗅觉显示技术已被探索性地应用于虚拟环境、驾驶环境、情绪管理等领域，体现了其他感官系统无法取代的独特应用优势与商业潜力。然而，目前嗅觉显示的技术发展还处在萌芽阶段，在技术认知、应用潜能、体验边界上都还存在诸多问题。因此，对现有相关领域的研究工作进行梳理分析有助于更清晰地掌握和理解该技术的发展脉络、研究内容、未来趋势和挑战问题，辅助该技术的阶段性理解，为未来的深度发展提供参考。

## 1 嗅觉显示技术概述

### 1.1 嗅觉感知系统

嗅觉（Olfaction）是人类十分古老的感官之一，也是获取外界信息较为重要的感官通道之一<sup>[1]</sup>。嗅觉感知系统是一种复杂的生物学和神经系统，使人们能够感知、理解和记忆气味。不同于视觉和听觉，嗅觉系统接收化学信号，目前尚不存在类似视觉系统三原色的“基气味”<sup>[2]</sup>，当挥发性物质带有气味特征的分子进入人的鼻腔，受外界环境（如温度或气流）的影响时，它们与鼻腔内的嗅觉受体相互作用，触发神经信号，通过嗅觉神经传递到大脑中的嗅球（Olfactory Bulb）。嗅球对信息进行初步整合和处理，然后将其传递到更高级别的嗅皮层（Olfactory Cortex），进行更深入的感知和解释。这个过程涉及气味的辨别、情感联系，以及与其他感官信息的互动，最终形成人们对气味感知的语义表征，如薰衣草味、柠檬味。嗅觉系统是唯一可以在不经过丘脑的情况下直接影响人大脑的感知系统，因此可以在人有意识和无意识状态下同时产生作用（如图1所示）。

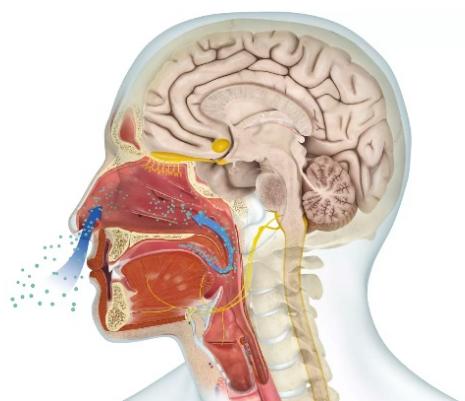


图1 人的嗅觉感知系统  
Fig.1 Human olfactory system

嗅球除了处理气味信息，同时也是人大脑中边缘系统（Limbic System）的重要构成部分之一，并与杏仁核、海马体紧密相连，这决定了嗅觉感知系统对人的心理、认知、记忆与情绪有直接的影响<sup>[3-5]</sup>，进而影响着人们的社交偏好<sup>[6]</sup>、睡眠<sup>[7]</sup>、行为<sup>[8]</sup>、学习<sup>[9]</sup>、注意力<sup>[10]</sup>、健康与饮食<sup>[11]</sup>。2014年，Bushdid等<sup>[12]</sup>科学家发现人类嗅觉系统具备对超过1万亿种嗅觉刺激进行辨别的能力，再次强调了人类嗅觉感知系统的复杂性与高度敏感性。同样的，嗅觉的丧失或缺失也会带来健康、安全、社交与情感、娱乐体验等相关方面的诸多隐患，也是一些疾病（例如中枢神经系统疾病、阿尔兹海默病和帕金森病）的重要预警<sup>[13-14]</sup>。嗅觉感知系统作为人的边缘感官不断潜移默化地影响和体现人类生活的细节。

### 1.2 嗅觉显示技术

类比于视觉系统将色彩、图案、视频元素展示给目标群体的图像显示技术，嗅觉显示技术（Olfactory Display Technology）是一种旨在通过定时、定量地释放特定气味或香气来模拟真实场景下的嗅觉体验，为目标群体释放差异化的气味表征信息以增强虚拟现实、游戏、模拟、训练等领域的沉浸感<sup>[15-16]</sup>。嗅觉显示技术既是嗅觉界面研究中的重要问题，也是热点问题，涉及的是气味输出相关的研究问题和方法。与此同时，嗅觉输入则更关注对目标气味的分析和检测，即电子鼻技术（E-nose Technology）<sup>[17-18]</sup>。该技术涉及一种可以模拟人类嗅觉的设备，它用于检测和识别不同的气味或气体，常用于分析气味的化学成分并对其进行分类和识别<sup>[19]</sup>，目前主要的应用领域包括食品饮食和行业的品控检测、空气质量检测、医疗诊断、安全检测（有害气体）等，所涉及的气味分析等方法与嗅觉显示技术有交叉。本文将主要针对气味的输出，即嗅觉显示技术进行着重分析和梳理。

名城大学的Yanagida<sup>[20]</sup>将嗅觉显示技术的构成要素分为几个关键的构成要素，如图2所示。首先，嗅觉显示技术的实现需要囊括拥有健康嗅觉器官的目标群体，保证其嗅觉感知系统的正常工作；其次，不仅需要有存储妥当的气味原材料，还需要尽量避免气味材料在不必要的境况下出现泄漏、渗出、扩散等问题；然后，根据应用场景的需求，将目标气味分子需要从存储好的容器中生成出来，这里的气味生成方式一般与气味原材料的物理性状有关（液体或固体）；随后，根据虚拟嗅觉体验的需求，对生成出的目标气味分子浓度、种类进行预设，在这个环节中需要对气味分子进行定时、定量、定性的控制，可能是独立气味的释放，也可能涉及多种气味同时生成并混合的目标；最后，当目标气味生成时，还需要借助外界环境的刺激（风或气流等）将气味分子团准确输送到目标群体的嗅觉器官，完成嗅觉感知。

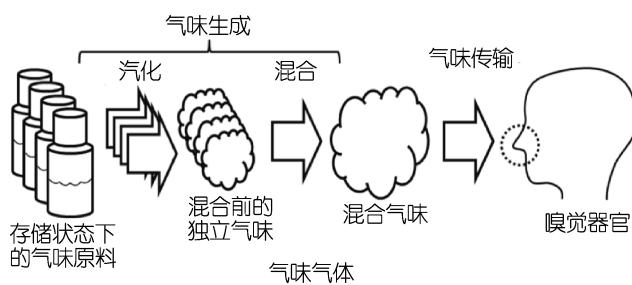


图 2 嗅觉显示技术构成<sup>[20]</sup>  
Fig.2 Construction of olfactory display technology<sup>[20]</sup>

## 2 研究方法

本文梳理和整理嗅觉显示技术的关键信息分为两个阶段(如图 3 所示)。第一阶段包括对该领域相关的代表性文章、出版书籍、设计实践案例等进行初步的阅读理解,形成对该领域技术构成的初步认知;第二阶段包括以嗅觉显示技术为中心的核心文献检索、归纳、对比和整理。这是为了梳理嗅觉显示技术的历史脉络,挖掘现有关键技术方案的优势与劣势并应用,总结归纳该技术的发展趋势与未来挑战。

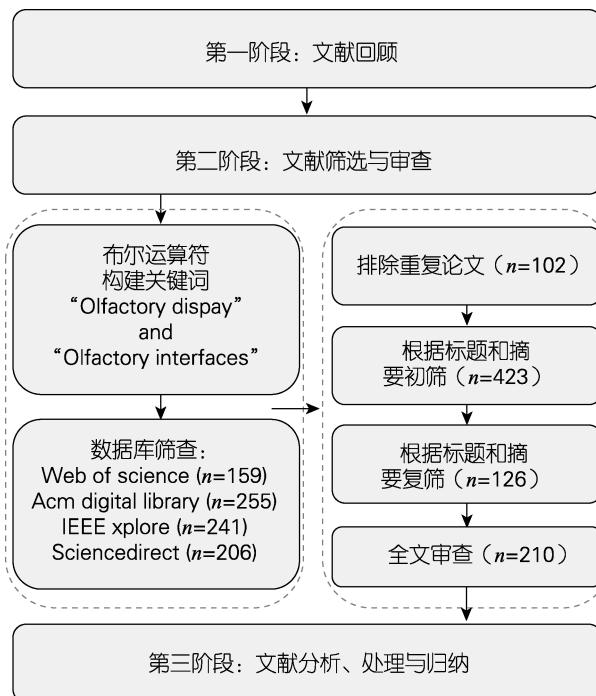


图 3 研究方法与文献审查流程  
Fig.3 Research methodology and process of literature selection

由于嗅觉显示技术领域涉及跨学科交叉的知识,因此在进行数据库检索时定位于 Web of Science、ACM Digital Library、IEEE Xplore 和 ScienceDirect 四个数据库。检索关键词以为嗅觉(Olfaction & Smell)为核心词汇,主要包含“Olfactory Display”、“Olfactory Interfaces”,还包括相关次级关键词

“Virtual Smell”“Digital Smell”,选择“AND”作为链接术语。

由于Kaye<sup>[21]</sup>在2001年正式提出将嗅觉和气味作为一种丰富可交互的媒介,嗅觉显示技术正式进入人机交互领域。因此设定筛选年份为2000年至2023年,文献类型仅限英文,类型包含国际学术会议集、研究性学术文章,以及综述论文。检索领域包含 Computer Science、Engineering、Chemistry 三个领域。通过检索共计获得 861 项研究,分别是: WOS ( $n=159$ ); ACM Digital Library ( $n=255$ ); IEEE Xplore ( $n=241$ ); ScienceDirect ( $n=206$ )。在核心文献筛选审查阶段,人工排除重复文献 ( $n=102$ ),题目和摘要与主题不切合文献 ( $n=549$ ),最终获得纳入全文审查的文献总数为 210 篇,对文章的研究问题、研究方法,以及结论深入地整理、分析与总结。

## 3 嗅觉显示技术发展历程

20世纪50年代至60年代,汉斯·劳贝(Hans·Laube)<sup>[22]</sup>发明了“Smell-O-Vision”技术,并结合电影“Scent of Mystery”将该技术投放至电影院中,根据电影的音轨来释放30种不同的气味。同时期也有类似的技术被提出,如AromaRama<sup>[23]</sup>。这些概念、技术和应用奠定了嗅觉显示技术的雏形。但由于早期对嗅觉系统和相关技术研究的匮乏,面临诸多技术挑战,以上工作并没有取得成功。

20世纪80年代至90年代,基于前人的探索,嗅觉交互技术收获更多的关注。20世纪80年代开始出现电子鼻的研究,专注于检测和识别气味。这也是早期嗅觉技术研究的重要基础,主要用于食品、医药和环境的监测<sup>[24]</sup>。20世纪90年代中期,DigiScents公司开发了数字气味技术(Digital Scent Technology)<sup>[25]</sup>,推出一系列气味播放设备,包括iSmell、AromaJet,以及Pinoke。他们可以通过数字接口与计算机设备互通来传输数字气味信息(网页或邮件)。这也是初期将数字气味融入虚拟现实的早期探索工作之一,推动了在模拟环境中重现真实气味的可能性<sup>[26]</sup>。

进入21世纪,嗅觉这种新颖的媒介受到不同领域学者与科学家的关注,正式进入快速发展的阶段。2001年,学者Kaye<sup>[21]</sup>首次提出“气味作为一种新颖且丰富的媒介在人机交互领域有着巨大的研究探索潜力”。相比之前有限的数字气味技术,21世纪初期至10年代则分别在商业和研究领域涌现出丰富多元的技术解决方案,例如Scentcom、Aromajoin的Aroma Shooter 和 Smelling Screen<sup>[27]</sup>。与此同时,研究者开始注重虚拟嗅觉给目标群体带来的气味体验的感知评估。例如:DigiScent的iSmell项目重点放在评估目标群体对特定气味的反应和气味感受的真实性;Chen 等<sup>[28]</sup>评估了气味元素在虚拟场景下对人的治疗

效果；Nakamoto 等<sup>[29]</sup>将气味融入电子游戏中以评估气味对游戏体验的影响，以及目标群体的反馈和游戏参与度等。21 世纪 10 年代到 20 年代是气味释放装置与控制系统发展的重要时期，技术方案也从原来固定式、臃肿的技术方案逐渐向便携移动式、小型化、可穿戴式的外观发展，以适应和适配复杂多元的使用场景。例如：Covington 等<sup>[30]</sup>发明了可以手持的小型气味释放装置；Dobbelstein 等<sup>[31]</sup>和 Amores 等<sup>[32]</sup>分别设计了可以穿戴的挂饰气味释放装置。在应用的领域上，也逐渐从主流的沉浸式虚拟体验拓展到更广泛的领域，例如健康管理、消息提醒、汽车驾驶、教育培训等。

近些年，人机交互领域的科学家们开始希望将嗅觉显示技术作为一种普及型技术拓展到更多领域，尝试挖掘气味尚未开发的潜能。2019 年，Maggioni 等<sup>[33]</sup>正式提出通过借鉴“工具设计”（Toolkit Design）的研究思路与方法探索嗅觉显示技术，并提出可以不依

赖于气味播放装置的虚拟嗅觉软件设计工具；2021 年，Lei 等<sup>[34]</sup>和 Wang 等<sup>[35]</sup>提出高保真嗅觉显示设计工具包；Brooks 等<sup>[36]</sup>提出可以快速设计和迭代的低保真工具套件。由此也可以看出，嗅觉显示技术逐渐从由专业人员才能设计和开发的阶段进入到普世化的技术发展阶段。这有利于让更多的用户使用和接触到该项技术，以更好地推进未来研发和迭代的速度。

#### 4 嗅觉显示关键技术

嗅觉显示技术关乎需要触发的气味类型（包括库存中已有的气味源及库存中气味源合成的新气味）、气味原材料生成的技术方案与控制方法，以及目标群体面向虚拟嗅觉的气味感知效果评估三个主要的方面。嗅觉显示技术的研究方法涉及多个不同的学科领域，囊括化学、计算机科学、电子工程、机械工程、设计学等领域的交叉知识（如图 4 所示）。

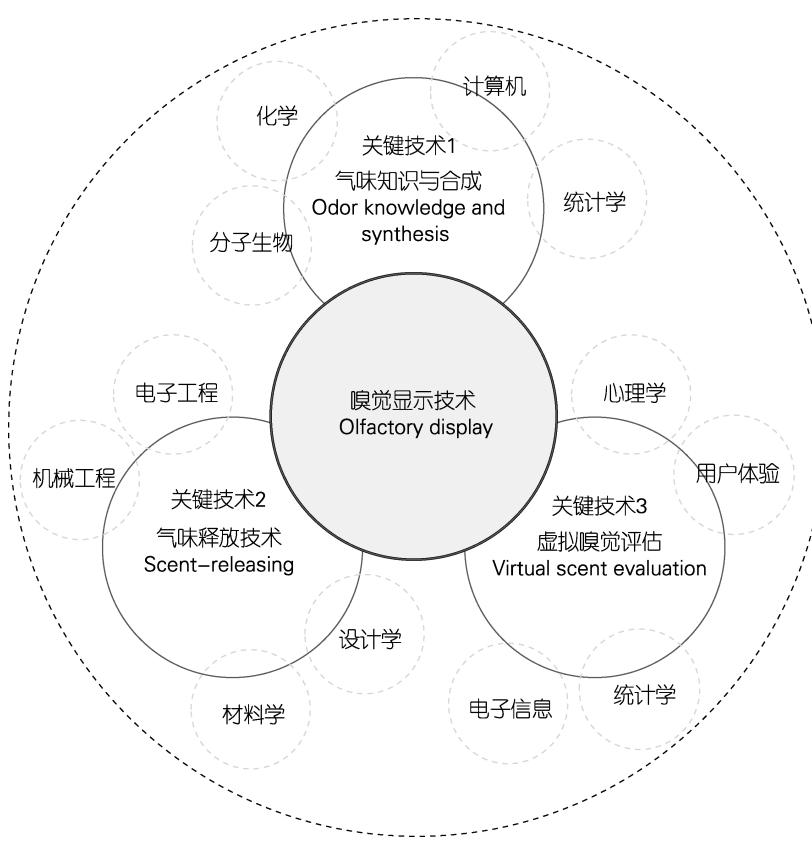


图 4 嗅觉显示技术知识构成  
Fig.4 Knowledge construction of olfactory display technology

##### 4.1 气味知识与合成

嗅觉显示技术中，气味的生成和合成涉及模拟和再现真实世界中的气味<sup>[37]</sup>。该技术的核心在于理解和重现那些激发人类嗅觉系统反应的化学物质的特性，技术路线与电子鼻技术相通。气味的生成一般存在如下两种情况。

1) 库存中的气味原材料本身就是目标气味。这

种情况下仅须对该气味根据设计需求（例如传感器输入的信号判定）定时、定浓度地进行释放即可，所需计算成本较少，气味原材料储备也较小，通常情况在 10 个气味存储仓以内<sup>[29-32]</sup>。因此，该方法气味生成的总体硬件体积也会相对较小，可以更灵活地适应不同的物理环境（如便携、穿戴、与 VR 头显结合等）。设计者需提前设定好要释放的气味种类，是目前大多

数气味播放装置所采用的方式。

2) 目标气味需要从库存中的多个气味原材料中, 根据特定比例进行混合以生成近似目标的气味, 这通常也被称为“气味复现”(Odor Reproduction/Representing)<sup>[38]</sup>。这种情况需要对目标气味进行分析、识别和建模, 通过模拟出气味的化学成分和特性来生成数字化的气味描述。

气味复现需要相对复杂的实验、计算和数据处理过程, 目前主要的方法如下。

1) 构建气味的化学信息模型(Chemical Information Model)。这种方法主要关注气味分子的化学特征, 例如分子结构(形状、大小, 以及电荷分布)和功能团(醇类、醛类、酮类等), 以及通过化学反应的模拟, 测试这些化学性质是如何与嗅觉受体相互作用并产生特定的虚拟嗅觉感受, 进而根据需求得到目标气味的化学信息模型<sup>[39-40]</sup>。例如, Pintore 等<sup>[39]</sup>运用自适应模糊分区(AFP)方法分析比较了两个大型嗅觉数据库中化合物的嗅觉特征并指出 PMP 2001 数据库的信息内容更具可靠性与一致性。该方法需要化学、分子生物等领域的知识, 能够从分子层面理解气味, 但可能无法解释复杂的生物学与心理学因素对虚拟嗅觉的感知。

2) 机器学习与深度学习(Machine Learning and Deep Learning)。该方法不仅涉及支持向量机(SVM)<sup>[41]</sup>、线性回归<sup>[42]</sup>、决策树与随机森林<sup>[43]</sup>等常用机器学习方法, 也包括深度神经网络的算法(DNN)<sup>[44]</sup>、卷积神经网(CNN)<sup>[45]</sup>、图神经网络(GNN)<sup>[46]</sup>等深度学习方法, 目标是处理和分析大量的化学和感官特征数据。其中, Sharma 等<sup>[47]</sup>使用深度神经网络对化合物数据集进行特征提取和分析来预测化学化合物是否为潜在的气味分子及其与嗅觉受体的相互作用, 达到的预测准确率为 94.83%。Guo 等<sup>[48]</sup>提出 ODRP 的深度学习框架, 用于对电子鼻监测的数据来预测气味描述。研究通过整合传感器数据和深度学习技术, 实现了对气味描述的自动化预测, 提高了气味识别的准确性和效率。通过对分子结构、物理化学属性或感官描述来构建气味数据训练模型, 通过学习不同化学物质与气味之间的关联来识别和预测气味特征。该方法适用于处理复杂和非线性的数据, 但往往需要的数据量较大且解释性可能较差。

3) 统计建模(Statistical Model)。该方法需要使用统计学技术来分析和解释气味数据<sup>[49-50]</sup>。Gudziol 等<sup>[49]</sup>使用“Sniffin’ Sticks”嗅觉测试方法对 83 位嗅觉受损的患者进行嗅觉功能评估, 根据线性回归 ANOVA 分析解释自我感知的嗅觉功能改善与实际嗅觉测试结果存在统计学上的显著相关性。通过分析化学物质的相互作用构建预测模型, 可以揭示不同变量之间的关系, 但很难获取非量化的感官数据。

4) 心理物理方法(Psychophysics)通过关联目

标群体气味感知的心理与生理机制来提供更深度的用户体验分析。例如, Su 等<sup>[51]</sup>采用嗅觉阈值、辨别和识别(TDI)等方法对嗅觉功能进行综合评估, 并表明这些心理物理测试能够为嗅觉障碍的诊断和治疗提供重要信息, 有助于理解嗅觉障碍的病理生理机制。该方法的结果往往更容易受到主观因素的影响。

不同的方法都有其相应的应用领域和局限性。化学信息模型和心理、物理方法更侧重于基础学科的研究, 其他两种方法则更加注重大数据和复杂系统。在实际的应用中这些方法也需要通过相互补充来更全面地理解气味知识。2023 年, Lee 等<sup>[46]</sup>首先将嗅觉分子的结构与用户的嗅觉感知进行映射, 并通过图神经网络构建了 POM 工具, 从而预测了 50 万种气味种类。

## 4.2 气味释放技术

气味释放技术(Scent-releasing Techniques), 或气味播放技术<sup>[52]</sup>, 涉及如何将气味原材料从存储仓中释放和传输到目标群体的嗅觉器官。具体方式的选择受到气味原材料和目标虚拟气味体验的需求。表 1 中列举了这四种方式的代表性设计案例。

1) 喷射式主要是将气味原料从存储器中向一定距离外的用户进行传输<sup>[53-56]</sup>。其中, Seah 等<sup>[55]</sup>使用固定式的制泡机来传递多感官(视觉结合嗅觉)信息, 如图 5a 所示。Hu 等<sup>[56]</sup>提出并设计一种固定放置在用户前方两侧、释放精确定点的气味信息系统, 旨在提高用户在沉浸式虚拟环境下的、真实主动的气味体验。该方法有助于远距离气味的释放, 喷射能力较强, 在使用方式上主要采用固定位置的方式, 且喷射式设备本身往往体积较大从而导致使用场景相对较为局限。

2) 气泵电磁阀结合的方式通过内置电机旋转带动气流变化以达到对气味分子进行传输的效果<sup>[57-60]</sup>, Yamada 等<sup>[57]</sup>提出可以穿戴在身上的嗅觉显示技术, 通过结合气泵与气味棉, 根据不同的行走地点进行不同气味的释放。Lu 等<sup>[60]</sup>设计在线上教学环境下使用的气味释放装置, 通过教学环节中的关键内容(如提问、集中注意)来释放不同类型的气味, 如图 5b 所示。该方法的体积相对轻便, 控制精确, 但硬件部分在工作时也会相应产生物理震动。

3) 加热可以促使气味分子快速运动, 也可结合外界气流的辅助来调整气味的传输。Dobbelstein 等<sup>[31]</sup>设计了可以作为挂饰并释放八种不同气味的装置, 来对手机接收的信息和待办事项进行提醒, 如图 5c 所示。Liu 等<sup>[63]</sup>利用该方法设计制作了柔性、迷你的气味播放装置。该方法支持体积大小较灵活的使用方式, 但热控方式易受到外界因素和原型制作方法的影响, 对释放的气味进行量化计算和控制会有较大挑战。

表 1 气味释放技术部分代表性研究案例  
Tab.1 Selected design and research cases of odor-releasing technologies

释放原理	时间	项目名称	气味原料	气味数量	使用方式	操作软件	应用领域
喷射式	2004	Fragra <sup>[53]</sup>	液体精油	4	手部佩戴		沉浸式游戏
	2011	SpotScent <sup>[54]</sup>	香味气体	多种	固定放置		VR 多场景
	2018	SensaBubble <sup>[55]</sup>	香味雾气	3	固定放置	Ardiuno	提示、教育、娱乐
	2021	aBio <sup>[56]</sup>	液体香水	2	固定放置	HTC vive	VR 多场景
(2) 气泵/电磁阀	2006	Wearable Olfactory display <sup>[57]</sup>	香水/精油	3	背部穿戴	Windows	空间增强
	2016	Tiny olfactory display <sup>[58]</sup>	液体香水	4	头部佩戴	Oculus	VR 多场景
	2018	I smell trouble <sup>[59]</sup>	精油	3	固定放置	Ardiuno	汽车驾驶
	2023	Atmospheror <sup>[60]</sup>	精油	4	固定放置	Ardiuno	线上教学
加热/气流	2006	Olfactory information for the Home video <sup>[61]</sup>	液体芳香片	9	固定放置		气味电影
	2011	Sound perfume <sup>[62]</sup>	固体香膏	8	头部佩戴	安卓系统	面对面社交
	2017	InScent <sup>[31]</sup>	固体香膏	8	颈部悬挂佩戴	安卓系统	消息提示
	2017	WARWICK <sup>[30]</sup>	精油	6	固定放置	安卓系统	沉浸式体验
(4)	2022	Soft, miniaturized, wireless Olfactory interface <sup>[63]</sup>	固体香膏	2/9	面部穿戴		沉浸式体验
	2016	Esscence <sup>[32]</sup>	香水,精油	1	颈部佩戴	安卓系统	健康情绪管理
	2018	ViScent <sup>[64]</sup>	精油	6	头部佩戴	HTC vive	沉浸式体验
	2019	Odor reproduction system <sup>[65]</sup>	液体化学品	16	固定放置	安卓系统	气味复现
压电雾化	2020	On-face olfactory interface <sup>[66]</sup>	纯露	1	面部佩戴	安卓系统	开放式穿戴与应用

4) 超声波压电雾化将液体气味经过超声波震动打散后,生成一定高度的水雾后再传输到人的嗅觉器官,结合了气味的生成与传输两个阶段。例如:Amores 等<sup>[32]</sup>利用压电雾化设计了一款可以作为项链穿戴的气味释放装置; Wang 等<sup>[66]</sup>进一步压缩压电雾化技术的体积,提供一种可以穿戴在面部的嗅觉界面,旨在提供私人的嗅觉体验,如图 5d 所示。该方法是静音

的且可提供精度较高的控制,但气味原材料受限于液体材料,对气味存储仓的要求较高。其他研究学者也会尝试采用复合的方法来释放气味。

除此之外, Brooks 等<sup>[36]</sup>也有尝试通过电刺激三叉神经来触发嗅觉感受,但因其属于半侵入式的方法,气味体验和用户接受度还需要未来更多的实验和测试,如图 5e 所示。

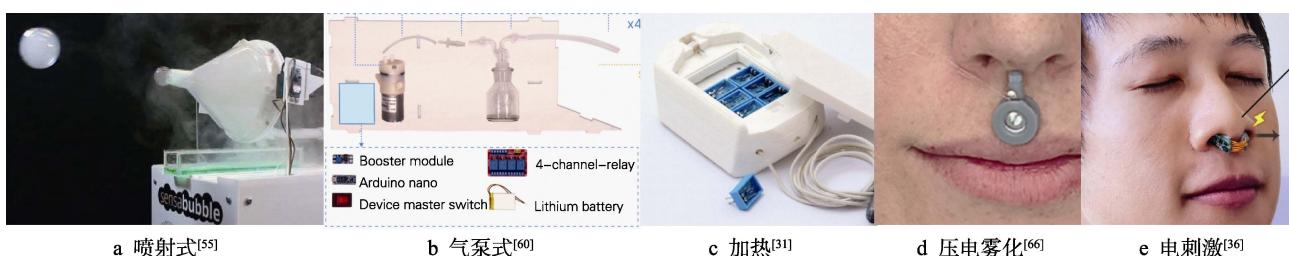


图 5 代表性气味释放技术  
Fig.5 Selected odor-releasing technologies

#### 4.3 虚拟嗅觉感知评估方法

在目标气味传输到用户群体的嗅觉感官后,需要对虚拟嗅觉释放的效果进行评估,其影响因素包括气味的浓度(Gas Concentration)及气味的质量(Odor Quality)。前者关系到目标群体是否感知到定量的气味<sup>[67]</sup>,后者关系到生成的合成气味特性是否符合设计预期<sup>[38]</sup>。目前,感知评估主要包括两类:面向目标群体的用户体验评估方法和技术性能评估方法。

前者的评估主要涉及人参与的用户测试,主要研究和评估人在虚拟嗅觉体验过程中的感知和接收程

度。较为常见的方法是用户体验研究法(User Experiences Study)<sup>[68]</sup>。需要注意的是,在招募被试的时候需要尽量避免对气味过于敏感、易过敏、较弱嗅觉感知,以及在感冒或有长期抽烟、使用过多香水习惯的用户来保证实验结果的相对准确性。该方法会通过问卷或访谈(Questionnaire and Interview)来收集对模拟气味的感知和反应,结合里克特量表对气味识别、气味强度,以及气味愉悦度等内容进行综合评分。该方法也是目前人机交互领域采用较多、较为常见的方法<sup>[31-32,60,66]</sup>。例如: Lu 等<sup>[60]</sup>设计两个里克特量表

(OCESI and OCES-S) 来评估 Atmospheror 的有效性, 包括学习的专注等级、强度, 以及气味识别等效果; Wang 等<sup>[66]</sup>利用被试间用户测试方法评估, 并结合里克特九分量表, 验证了气味浓度感知与其他相关感官的主观评价。该方法一般反应用户的主观感受。此外, 面向用户研究的还包括对用户生理反应的检测 (Bio Data Collection and Analysis), 以获取虚拟嗅觉感知的量化评估结果。例如, 通过采集用户的脑电信号 (EEG)<sup>[69]</sup>、心电信号 (ECG)<sup>[70]</sup>或皮肤电信号 (GSR)<sup>[71]</sup>。Ninenko 等<sup>[69]</sup>通过脑电图的实验范式来记录被试在执行基于嗅觉的指令延迟任务时的脑活动, 并分析了嗅觉刺激, 以及其转化为运动反应的空间和频谱 EEG 属性; Omam 等<sup>[71]</sup>通过数学分析皮肤电反应 (GSR) 和脑电图 (EEG) 信号探究人类皮肤和大脑活动之间的关系, 使用分形理论分析了当被试暴露于不同的愉悦气味刺激时, GSR 和 EEG 信号的分形维数变化情况。该方法的使用需要注意相应设备的选择和对数据进行处理分析的精确性。

技术性能测试主要针对嗅觉显示设备的技术评估, 包括气味释放的速率和精准度。一般在气味释放速率上采用流量计, 通过测量某一点位的流体速率来确保气味分子按照预设的速度被释放<sup>[72]</sup>。这对需要快速切换的应用场景 (如 VR、AR) 至关重要, 并需要能够感应和识别特定气味分子浓度的化学传感器 (TVOC)<sup>[73]</sup>, 例如乙醇传感器<sup>[36]</sup>、甲醛传感器等, 也称作电子鼻。Yamada 等<sup>[57]</sup>使用手持的气味计 (Futaba Electronics Co., FPO-II) 测量评估可穿戴嗅觉释放装置在气味浓度、气味类型, 以及气味切换的性能。Liu 等<sup>[63]</sup>使用乙醇传感器测试和评估微型面部可穿戴气味释放的加热与浓度的相互关系。因为该类传感器品类相对受限, 能涵盖的气味范围也较小。

## 5 嗅觉显示技术应用领域

### 5.1 沉浸式体验与虚拟现实

嗅觉显示技术在沉浸式体验的应用方面涵盖了游戏、教学、观影、旅游、饮食, 以及健康等诸多领域, 特别在沉浸式虚拟体验中发挥着巨大的潜力。Niedenthal 等<sup>[74]</sup>开发的沉浸式品酒游戏, 通过抓握式嗅觉释放装置探索虚拟场景下嗅觉的主动交互行为。Archer 等<sup>[75]</sup>将嗅觉融入沉浸式体验游戏以提升恐怖游戏的叙事体验。嗅觉显示技术还被用于融合辅助多感官信息, Zou 等<sup>[76]</sup>通过追踪用户视觉注意力和行为动态来调节气味释放浓度, 辅助虚拟场景下的气味识别。Brooks 等<sup>[77]</sup>采用该技术释放薄荷和辣椒素气味以模拟冷与暖的感受。Richard 等<sup>[78]</sup>在教育领域提出了一款融合嗅觉的多模态计算机应用程序, 用于辅助字母学习与记忆。此外, 嗅觉显示技术还辅助增强了虚拟环境下的心理与生理健康, 提升了积极情绪。例

如: Rizzo 等<sup>[79]</sup>通过释放特定气味进行刺激, 来增强用户的沉浸感并辅助战后士兵创伤后应激障碍 (PTSD) 的治疗; Lai 等<sup>[80]</sup>利用该技术增强虚拟冥想环境的美学感受, 从而调节情绪并提升冥想的幸福感。嗅觉显示技术在该领域下的探索与应用目前较多的是关注更沉浸、更自然、更流畅的技术层面。

### 5.2 教育与培训

嗅觉显示技术在教育培训领域被用来激发学习者的积极情绪、降低学习压力、提高学习专注度, 以及增强学习效率。Kwok 等<sup>[81]</sup>提出 SAMAL 系统, 结合视觉、听觉和嗅觉刺激, 通过多模态氛围场景促进学生的情感体验和学习效果以激发积极情绪。Covaci 等<sup>[82]</sup>使用真实香料和豆类气味, 并结合多人在线游戏式教学场景, 降低学习压力和提高专注力。Garcia-Ruiz 等<sup>[83]</sup>将气味引入虚拟场景的英语教学中以激活学习者的积极情绪并降低学生在练习英语口语时的焦虑感。Lu 等<sup>[60]</sup>通过环境气味显示来增强线上教学中学生和教师之间的互动和反馈, 辅助学生注意力集中, 减少线上学习的压力。嗅觉显示技术还应用于辅助增强学习与记忆效率。Alkasasbeh 等<sup>[84]</sup>利用不同气味来代表不同国家信息以制作多感官地理学习网站, 从而辅助学生在地理知识学习中的表现, 让学习者能更有效地记住知识。Lai<sup>[85]</sup>运用气味作为沟通媒介, 通过释放五种气味与艺术品相关联, 增强了参与者对艺术作品的感知和理解。嗅觉显示技术涵盖在教育与培训下的各个方面, 展示了该技术在提高学习体验和效果方面的多样性。

### 5.3 医疗与健康

嗅觉显示技术在医疗和健康上的应用主要有日常的健康监测、对特定疾病的治疗、辅助心理健康治疗, 以及对特定人群的关怀。该技术可以作为信息提醒用于监测目标群体的健康状态, 通过连接个人生理数据定制化嗅觉提醒。Amores 等<sup>[86]</sup>通过衣服被动捕捉与心脏跳动和呼吸相关的细微胸部振动, 允许通过创建生理规则来触发不同的气味。嗅觉显示技术也可以辅助特定疾病的治疗, Arzi 等<sup>[87]</sup>利用气味控制睡眠呼吸频率从而辅助治疗睡眠呼吸暂停的问题。嗅觉显示技术在关怀领域也有独有的应用潜力, 它可以辅助提升嗅觉障碍人群的灵敏度、帮助患有认知障碍的儿童等。例如, Hummel 等<sup>[88]</sup>将嗅觉界面应用于训练嗅觉敏感性低或者有障碍的群体, 并得到了嗅觉显著增强的效果。

### 5.4 汽车驾驶辅助

在汽车驾驶辅助领域, 嗅觉显示技术主要应用于面向驾驶员的嗅觉提醒、状态调节、驾驶体验, 以及车内环境调节等四个方面。此外, 还有面向乘客, 用于缓解晕车症的应用。首先, 嗅觉提醒汽车状态或者驾驶员影响驾驶的行为, 具有比视觉通知更舒适、更

聚焦的安全与警示作用,可以减少对主要视觉注意点的干扰。Dmitrenko 等<sup>[89]</sup>将驾驶信息通过区别的嗅觉刺激反馈来辅助驾驶,降低驾驶员的视觉负载,通过薰衣草、薄荷和柠檬气味来传达“减速”“车距短”

“车道偏离”,其他气味传达“慢下来”“加油”“经过一个兴趣点”等附属驾驶信息。该技术还用来调节驾驶员的驾驶状态,保持对路况良好的专注力和反应速度。Funato 等<sup>[90]</sup>使用气味的释放来预防驾驶员的疲倦程度并辅助保持警觉。在情感链接方面,嗅觉显示技术还可以为驾驶员提供新的驾驶体验,提升车内环境舒服度。Dmitrenko 等<sup>[91]</sup>研究驾驶员通过气味类型改变处于愤怒状态的驾驶员的情绪状态。Dmitrenko 等<sup>[92]</sup>通过构建三维的气传输框架,极大地改善了驾驶员的身体和情绪状态。该技术还用于调节车内环境,特别是改善乘客的晕车症状。Schartmüller 等<sup>[93]</sup>利用该技术以非侵入性的方式缓解晕动症带来的晕车问题,这尤其有利于未来自动驾驶的情境。

## 6 发展趋势与挑战

### 6.1 搭建拓展的气味数据库

随着 AI 技术的突破式发展,借助人工智能算法来搭建拓展的气味数据库势不可挡。嗅觉显示技术本身具有较强的跨学科知识整合属性。该技术的进一步深入发展还需要不断促进化学领域、计算机科学、数据处理与分析专业知识的融合,促进全面、创新、精准的嗅觉模型建模解决方案。但面临目前研究方法的繁杂、嗅觉感知主客观评估的难度,在未来的研究中仍需注意提高获取嗅觉数据的质量和效率,可通过推进系统的嗅觉数据分享机制、搭建标准化数据库共享平台等思路提高基础嗅觉研究的效率和质量。同时,气味数据库的构建还需更关注终端用户的体验与市场需求,开展用户导向的应用与体验驱动研究路径,进行更具有实际应用价值的拓展气味数据库构建,面向个人和市场推进更精细化、个性化的气味生成与合成方案。

### 6.2 气味释放技术普世化与标准化

虽然气味释放技术的各项性能都在不断迭代,但因为目前研究对嗅觉系统认知的有限性,已有气味释放装置的结构、材料设计依然存在诸多问题,也进一步地影响了终端用户进行标准化嗅觉体验的可能。例如,气味原料存储空间无法更好地被优化、硬件控制部件无法更灵活地适应更复杂的物理空间(如曲面、柔性空间),以及多变的放置方式(如穿戴、桌面放置),导致气味传送部件无法提供标准化的释放距离、气味释放浓度等气味释放参数,增加了设计师与终端用户之间的体验壁垒。这使大部分气味释放技术目前只存于实验与测试环境,无法真正进入商业和市场,

限制了该项技术的普适性,距离构建行业标准也还有极大的距离。虽然一些学者开始初探标准化嗅觉显示工具设计<sup>[33-36]</sup>,但未来还需要更细分的设计工具来支撑复杂多元的应用创新,并不断迭代设计规范。新材料、新工艺的探索也是深入挖掘该技术潜能的重要部分,需要充分发挥多学科交叉的优势,整合创新。

### 6.3 系统的评价机制

虽然在虚拟嗅觉感知的评价方法上已有诸多的探索,囊括从设计学领域的用户体验与研究、心理学领域的对照实验、盲测实验等方法再到工程技术领域的技术性能测试。但是目前的测试和评估方法依然相对割裂,方法之间缺乏相互补充、相互融合的有效运行机制。这需要首先对现有评估方法的优势和劣势进行系统的评估、分析和比对,并能够在面对不同虚拟嗅觉体验的评估需求时,可以更有效地判断和选择目标评估的手段和结果,特别需要考虑到不同气味释放技术的使用,更智能、更针对性地进行推荐。最终通过构建智能、全面、系统的虚拟嗅觉感知评价机制来探索和挖掘嗅觉感知的体验边界,更好地辅助嗅觉显示技术的开发与高质量的用户嗅觉体验。

### 6.4 安全与伦理问题

即使嗅觉显示技术作为一种新兴的新型技术而急需探索和发展,但目前虚拟嗅觉的感知依然需要真实存在的气味分子侵入式地进入用户的嗅觉感知系统及大脑,类比脑机接口技术( Brain-Computer Interfaces )<sup>[94]</sup>,也同样涉及使用嗅觉显示技术的安全、伦理,以及技术使用边界问题。这些问题涉及用户的健康、隐私、心理影响等多重维度。在安全性上,首先需要考虑目标气味原材料中化学物质的安全性,必须严格控制气味材料筛选机制。同时,还需要考虑气味材料传输到目标群体的时间和浓度,以免出现任何不适等症状。与此同时,在正式使用该项技术前需进行用户的知情同意,尤其在开展对用户心理、情绪有影响的用户测试时,并对用户数据采取保护措施。目前在该方面还需要进一步开展持续的监管和评估。

## 7 结语

本文对人机交互领域的新兴课题嗅觉显示技术的相关知识进行脉络性梳理和分析,包括嗅觉感知系统的基本工作原理、嗅觉显示技术的发展与历程。本文详细阐述了该技术的三个关键技术,分别列举了其在目前学术研究领域中的常用方法,分析了技术与方法类型并提出其优势与缺点。随后,分别从虚拟现实、教育培训、健康医疗,以及汽车驾驶等领域阐述了虚拟嗅觉的潜能。最后,本文对未来发展趋势和挑战展开分析,从四个角度探索了嗅觉显示技术的拓展潜能。人们对嗅觉的理解还处在萌芽阶段,该技术依然

需要受到更多的关注和研究, 通过不断拓展领域认知以发挥其在未来虚拟现实甚至元宇宙背景下的独特潜能。

## 参考文献:

- [1] 魏永祥, 韩德民. 嗅觉研究现状[J]. 中国医学文摘(耳鼻咽喉科学), 2007(4): 214-215.  
WEI Y X, HAN D M. Current Status of Olfactory Research[J]. China Medical Digest (Otolaryngology), 2007(4): 214-215.
- [2] DOTY R L. Olfaction[J]. Annual Review of Psychology, 2001, 52(1): 423-452.
- [3] HERZ R S. The Emotional, Cognitive, and Biological Basics of Olfaction: Implications and considerations for Scent Marketing[J]. Sensory Marketing, 2011(1): 87-107.
- [4] OLOFSSON J K, EKSTRÖM I, LINDSTRÖM J, et al. Smell-based Memory Training: Evidence of Olfactory Learning and Transfer to the Visual Domain[J]. Chemical Senses, 2020, 45(7): 593-600.
- [5] LE GUÉRER A. Olfaction, taste, and cognition[M]. Cambridge: The Cambridge Press, 2002.
- [6] LI W, MOALLEM I, PALLER K A, et al. Subliminal Smells Can Guide Social Preferences[J]. Psychological Science, 2007, 18(12): 1044-1049.
- [7] SCHREDL M, ATANASOVA D, HÖRMANN K, et al. Information Processing During Sleep: The Effect of Olfactory Stimuli on Dream Content and Dream Emotions[J]. Journal of Sleep Research, 2009, 18(3): 285-290.
- [8] HOLLAND R W, HENDRIKS M, AARTS H. Smells Like Clean Spirit: Nonconscious Effects of Scent on Cognition and Behavior[J]. Psychological Science, 2005, 16(9): 689-693.
- [9] GARCIA-RUIZ M, EL-SEOUD S A, EDWARDS A, et al. Integrating the Sense of Smell in an Educational Human-Computer Interface[J]. Interactive Computer Aided Learning, 2008, 2: 1-7.
- [10] RINALDI L, MAGGIONI E, OLIVERO N, et al. Smelling the Space Around Us: Odor Pleasantness Shifts Visuospatial Attention in Humans[J]. Emotion, 2018, 18(7): 971.
- [11] BOESVELDT S, DE GRAAF K. The Differential Role of Smell and Taste for Eating Behavior[J]. Perception, 2017, 46(3-4): 307-319.
- [12] BUSHDID C, MAGNASCO M O, VOSSHALL L B, et al. Humans Can Discriminate More than 1 Trillion Olfactory Stimuli[J]. Science, 2014, 343(6177): 1370-1372.
- [13] SCHIFFMAN S S. Taste and Smell Losses in Normal Aging and Disease[J]. Jama, 1997, 278(16): 1357-1362.
- [14] 邢栋, 魏宏权. 嗅觉训练治疗嗅觉障碍的研究进展[J]. 中国中西医结合耳鼻咽喉科杂志, 2022, 30(4): 317-320.
- XING D, WEI H Q. Research Progress of Olfactory Training for The Treatment of Olfactory Disorders[J]. Chinese Journal of Integrative Otolaryngology, 2022, 30(4): 317-320.
- [15] YANAGIDA Y, TOMONO A. Basics for Olfactory Display[M]// Human Olfactory Displays and Interfaces: Odor Sensing and Presentation. New York: IGI Global, 2013: 60-85.
- [16] 周忠, 周颐, 肖江剑. 虚拟现实增强技术综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(2): 157-180.  
ZHOU Z, ZHOU Y, XIAO J J. A Review of Virtual Reality Augmentation Technology[J]. Science in China: Information Science, 2015, 45(2): 157-180.
- [17] WILSON A D, BAIETTO M. Applications and Advances in Electronic-Nose Technologies[J]. Sensors, 2009, 9(7): 5099-5148.
- [18] 王俊, 崔绍庆, 陈新伟, 等. 电子鼻传感技术与应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 160-167.  
WANG J, CUI S Q, CHEN X W . Research Progress of Electronic Nose Sensing Technology and Application[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 160-167.
- [19] 刘红秀, 骆德汉, 张泽勇. 机器嗅觉系统气味识别算法[J]. 传感技术学报, 2006(6): 2518-2522.  
LIU H X , LUO D H, ZHANG Z Y. Odour Recognition Algorithms for Machine Olfaction System[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(6): 2518-2522.
- [20] YANAGIDA Y. A Survey of Olfactory Displays: Making and Delivering Scents[C]// Proceedings of Sensors, 2012 IEEE. Limerick: IEEE, 2012: 1-4.
- [21] KAYE J N. Symbolic Olfactory Display[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [22] OLOFSSON J K, NIEDENTHAL S, EHRNDAL M, et al. Beyond Smell-O-Vision: Possibilities for Smell-Based Digital Media[J]. Simulation & Gaming, 2017, 48(4): 455-479.
- [23] GHINEA G, TIMMERER C, LIN W, et al. Mulsemedia: State of The Art, Perspectives, and Challenges[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM), 2014, 11(Sup.1): 1-23.
- [24] GARDENER J W, BARTLETT P N. A Brief History of Electronic Noses[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1994, 18(1-3): 210-211.
- [25] GLAZER R. DigiScents[M]// The Berkeley-Haas Case Series. Berkeley: University of California, 2007.
- [26] 孙晓天. 嗅觉信息化产品的发展综述及其设计研究[J]. 包装工程, 2022, 43(6): 24-31.  
SUN X T. Development and Design of Olfaction Informationization[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(6): 24-31.
- [27] MATSUKYRA H, YONEDA T, ISHIDA H. Smelling Screen: Development and Evaluation of An Olfactory

- Display System for Presenting a Virtual Odor Source[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, 19(4): 606-615.
- [28] CHEN Y. Olfactory Display: Development and Application in Virtual Reality Therapy[C]//16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence Workshops (ICAT'06). Hangzhou: IEEE, 2006: 580-584.
- [29] NAKAMOTO T, OTAGURP S, KINOSHITA M, et al. Cooking up an Interactive Olfactory Game Display[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2008, 28(1): 75-78.
- [30] COVINGTON J A, SAMUEL O A, TIELE A. Development of A Portable, Multichannel Olfactory Display Transducer[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(12): 4969-4974.
- [31] DOBBELSTEIN D, HERRDUM S, RUKZIO E. inScent: A Wearable Olfactory Display as An Amplification for Mobile Notifications[C]//Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers. Hawaii: Association for Computing Machinery, 2017: 130-137.
- [32] AMORES J, MAES P. Essence: Olfactory Interfaces for Unconscious Influence of Mood and Cognitive Performance[C]//Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Denver: Association for Computing Machinery, 2017: 28-34.
- [33] MAGGIONI E, COBDEN R, OBRIST M. OWidgets: A Toolkit to Enable Smell-based Experience Design[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2019, 130: 248-260.
- [34] [34] LEI Y, LU Q, XU Y. O&O: A DIY Toolkit for Designing and Rapid Prototyping Olfactory Interfaces[C]// Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New Orleans: Association for Computing Machinery, 2022: 1-21.
- [35] WANG Y, CUI Z, GONG H, et al. Olfackit: A Toolkit for Integrating Atomization-based Olfactory Interfaces into Daily Scenarios[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2023(3): 1-20.
- [36] BROOKS J, LOPES P. Smell & Paste: Low-fidelity Prototyping for Olfactory Experiences[C]// Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Hamburg: Association for Computing Machinery, 2023: 1-16.
- [37] 杨斌, 文震. 气体传感器技术研究与应用[J]. 科技中国, 2020(6): 12-17.
- YANG B, WEN Z. Research and Application of Gas Sensor Technology[J]. Scitech in China, 2020(6): 12-17.
- [38] WEN T, LUO D, HE J, et al. The Odor Characterizations and Reproductions in Machine Olfactions: A Review[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2329.
- [39] PINTORE M, WECHMAN C, SICARD G, et al. Comparing the Information Content of Two Large Olfactory Databases[J]. Journal of Chemical Information and Modeling, 2006, 46(1): 32-38.
- [40] MASSON C, MUSTAPARTA H. Chemical Information Processing in the Olfactory System of Insects[J]. Physiological Reviews, 1990, 70(1): 199-245.
- [41] HUSNI N L, HANDAYANI A S, NURMAINI S, et al. Odor Classification Using Support Vector Machine[C]// Proceedings of the 2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS). New York: IEEE, 2017: 71-76.
- [42] JHA S K, HAYASHI K. A Novel Odor Filtering and Sensing System Combined with Regression Analysis for Chemical Vapor Quantification[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 200: 269-287.
- [43] CHOI Y, KIM K, KIM S, et al. Identification of Odor Emission Sources in Urban Areas Using Machine Learning-based Classification Models[J]. Atmospheric Environment: X, 2022, 13: 100156.
- [44] ZHANG J, TIAN T, WANG S, et al. Research on An Olfactory Neural System Model and Its Applications Based on Deep Learning[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32: 5713-5724.
- [45] WU D, LUO D, WONG K Y, et al. POP-CNN: Predicting Odor Pleasantness with Convolutional Neural Network[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(23): 11337-11345.
- [46] LEE B K, MAYHEW E J, SANCHEZ-LENGLING B, et al. A Principal Odor Map unifies Diverse Tasks in Olfactory Perception[J]. Science, 2023, 381(6661): 999-1006.
- [47] SHARMA A, KUMAR R, SEMWAL R, et al. DeepOlf: Deep Neural Network Based Architecture for Predicting Odorants and Their Interacting Olfactory Receptors[J]. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 2020, 19(1): 418-428.
- [48] GUO J, CHENG Y, LUO D, et al. ODRP: A Deep Learning Framework for Odor Descriptor Rating Prediction Using Electronic Nose[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(13): 15012-15021.
- [49] GUDZIOL V, LÖTSCH J, HÄHNER A, et al. Clinical Significance of Results From Olfactory Testing[J]. The Laryngoscope, 2006, 116(10): 1858-1863.
- [50] BRÄMERSON A, JOHANSSON L, EK L, et al. Prevalence of Olfactory Dysfunction: The Skövde Population-Based Study[J]. The Laryngoscope, 2004, 114(4): 733-737.
- [51] SU B, BLEIER B, WEI Y, et al. Clinical Implications of Psychophysical Olfactory Testing: Assessment, Diagnosis, and Treatment Outcome[J]. Frontiers in Neuroscience, 2021, 15: 646956.
- [52] 吴新丽,杨文珍,余岭,等.虚拟嗅觉气味生成装置的研究进展[J].系统仿真学报,2014,26(9): 1882-1888.
- WU X L, YANG W Z, YU L. Survey of Virtual Olfactory Technology[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(9): 1882-1888.

- [53] MOCHIZUKI A, AMADA T, SAWA S, et al. Fragra: A Visual-Olfactory VR Game[C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH 2004 Sketches (SIGGRAPH '04). Denver: Association for Computing Machinery, 2004: 123.
- [54] NAKAIZUMI F, NOMA H, HOSAKA K, et al. SpotScents: A Novel Method of Natural Scent Delivery Using Multiple Scent Projectors[C]// Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006). Alexandria: IEEE, 2006: 207-214.
- [55] SEAH S A, MARTINE PLASENCIA D, BENNETT P D, et al. SensaBubble: A Chrono-Sensory Mid-Air Display of Sight and Smell[C]// Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Toronto: Association for Computing Machinery, 2014: 2863-2872.
- [56] HU Y Y, JAN Y F, TSENG K W, et al. Abio: Active Bi-Olfactory Display Using Subwoofers for Virtual Reality[C]// Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia. Chengdu: Association for Computing Machinery, 2021: 2065-2073.
- [57] YAMADA T, YOKOYAMA S, TANIKAWA T, et al. Wearable Olfactory Display: Using Odor in Outdoor Environment[C]// Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006). Alexandria: IEEE, 2006: 199-206.
- [58] HASHIMOTO K, NAKAMOTO T. Tiny Olfactory Display Using Surface Acoustic Wave Device and Micro-pumps for Wearable Applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(12): 4974-4980.
- [59] DMITRENKO D, MAGGIONI E, OBRIST M. I Smell Trouble: Using Multiple Scents to Convey Driving-Relevant Information[C]// Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction. Boulder: Association for Computing Machinery, 2018: 234-238.
- [60] LU Q, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Atmospheror: Towards an Olfactory Interactive System for Enhancing Social Presence and Interaction in Synchronous Online Classes[C]// Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Hamburg: Association for Computing Machinery, 2023: 1-8.
- [61] KIM D W, NISHIMOTO K, KUNIFUJI S. An Editing and Displaying System of Olfactory Information for the Home Video[C]// Proceedings of the International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems. Berlin: Springer, 2006: 859-866.
- [62] CHOI Y, CHEOK A D, ROMAN X, et al. Sound Perfume: Designing a Wearable Sound and Fragrance Media for Face-to-Face Interpersonal Interaction[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology. Lisbon: Association for Computing Machinery, 2011: 1-8.
- [63] LIU Y, YIU C K, ZHAO Z, et al. Soft, Miniaturized, Wireless Olfactory Interface for Virtual Reality[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2297.
- [64] PATNAIK B, BATCH A, ELMQVIST N. Information Olfactation: Harnessing Scent to Convey Data[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2018, 25(1): 726-736.
- [65] WEN T, LUO D, JI Y, et al. Development of a Piezo-electric-Based Odor Reproduction System[J]. Electronics, 2019, 8(8): 870.
- [66] WANG Y N, JUDITH A, PATTIE M. On-Face Olfactory Interfaces[C]// Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Hawaii: Association for Computing Machinery, 2020: 1-9.
- [67] SUGIMOTO S, NOGUCHI D, BANNNAI Y, et al. Ink Jet Olfactory Display Enabling Instantaneous Switches of Scents[C]// Proceedings of the 18th ACM international conference on Multimedia. Firenze: Association for Computing Machinery, 2010: 301-310.
- [68] 辛向阳. 交互设计: 从物理逻辑到行为逻辑[J]. 装饰, 2015(1): 58-62.  
XIN X Y. Interaction Design: From Logic of Things to Logic of Behaviors[J]. Decoration, 2015(1): 58-62.
- [69] NINENKO I, KLEEVA D F, BUKREEV N, et al. An Experimental Paradigm for Studying EEG Correlates of Olfactory Discrimination[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2023, 17: 1117801.
- [70] TONACCI A, BILLECI L, DI MAMBRO I, et al. Wearable Sensors for Assessing the Role of Olfactory Training on the Autonomic Response to Olfactory Stimulation[J]. Sensors, 2021, 21(3): 770.
- [71] OMAM S, BABINI M H, SIM S. Complexity-based Decoding of Brain-Skin Relation in Response to Olfactory Stimuli[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2020, 184: 105293.
- [72] PHILPOTT C M, WOLSTENHOLME C R, GOODENOUGH P C, et al. Comparison of Subjective Perception with Objective Measurement of Olfaction[J]. Otolaryngology—Head and Neck Surgery, 2006, 134(3): 488-490.
- [73] JIANG H, XU W, CHEN Q. Evaluating Aroma Quality of Black Tea by an Olfactory Visualization System: Selection of Feature Sensor Using Particle Swarm Optimization[J]. Food Research International, 2019, 126: 108605.
- [74] NIEDENTHAL S, FREDBORG W, LUNDÉN P, et al. A Graspable Olfactory Display for Virtual Reality[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2023, 169: 102928.
- [75] ARCHER N S, BLUFF A, EDDY A, et al. Odour Enhances the Sense of Presence in a Virtual Reality Environment[J]. Plos One, 2022, 17(3): e0265039.
- [76] ZOU S, HU X, BAN Y, et al. Simulating Olfactory Cocktail Party Effect in VR: A Multi-Odor Display Ap-

- proach Based on Attention[C]// Proceedings of the 2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). New York: IEEE, 2022: 474-482.
- [77] BROOKS J, NAGLES S, LOPES P. Trigeminal-Based Temperature Illusions[C]// Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Hawaii: Association for Computing Machinery, 2020: 1-12.
- [78] RICHARD E, TIJOU A, RICHARD P, et al. Multi-Modal Virtual Environments for Education with Haptic and Olfactory Feedback[J]. *Virtual Reality*, 2006, 10: 207-225.
- [79] RIZZO A A, GRAAP K, PAIR J, et al. User-Centered Design Driven Development of a Virtual Reality Therapy Application for Iraq War Combat-Related Post Traumatic Stress Disorder[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies. Esbjerg: University of Reading, 2006: 113-123.
- [80] LAI M K, WING CHUNG S. TranScent in Stillness: Exploring the Feasibility of Using Incense Art with Virtual Reality for Meditation[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Digital and Interactive Arts. Aveiro: Association for Computing Machinery, 2021: 1-7.
- [81] KWOK R C W, CHENG S H, IP H H S, et al. Design of Affectively Evocative Smart Ambient Media for Learning[C]// Proceedings of the 2009 Workshop on Ambient Media Computing. Beijing: Association for Computing Machinery, 2009: 65-76.
- [82] COVACI A, GHINEA G, LIN C H, et al. Multisensory Games-Based Learning-Lessons Learnt from Olfactory Enhancement of a Digital Board Game[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, 77: 21245-21263.
- [83] GARCIA-RUIZ M A, EDWARDS A, AQUINO-SANTOS R, et al. Integrating the Sense of Smell in Virtual Reality for Second Language Learning[C]// E-Learn: World Conference on E-Learning in Corporate, Government, Healthcare and Higher Education. Las Vegas: Association for the Advancement of Computing in Education (AACE), 2008: 2647-2652.
- [84] ALKASASBEH A A, GHINEA G. Using Olfactory Media Cues in E-Learning – Perspectives from an Empirical Investigation[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79: 19265-19287.
- [85] LAI M K. Universal Scent Blackbox: Engaging Visitors Communication Through Creating Olfactory Experience at Art Museum[C]// Proceedings of the 33rd Annual International Conference on the Design of Communication. Limerick: Association for Computing Machinery, 2015: 1-6.
- [86] AMORES J, HERNANDEZ J, DEMENTYEV A, et al. Bioessence: A Wearable Olfactory Display that Monitors Cardio-respiratory Information to Support Mental Wellbeing[C]// Proceedings of the 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). New York: IEEE, 2018: 5131-5134.
- [87] ARZI A, SELA L, GREEN A, et al. The Influence of Odorants on Respiratory Patterns in Sleep[J]. *Chemical senses*, 2010, 35(1): 31-40.
- [88] HUMMEL T, RISSOM K, REDEN J, et al. Effects of Olfactory Training in Patients with Olfactory Loss[J]. *The Laryngoscope*, 2009, 119(3): 496-499.
- [89] DMITRENKO D, MAGGIONI E, VI C T, et al. What Did I Sniff? Mapping Scents onto Driving-Related Messages[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. Oldenburg: Association for Computing Machinery, 2017: 154-163.
- [90] UNATO H, YOSHIKAWA M, KAWASUMI M, et al. Stimulation Effects Provided to Drivers by Fragrance Presentation Considering Olfactory Adaptation[C]// Proceedings of the 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2009: 881-886.
- [91] DMITRENKO D, MAGGIONI E, BRIANZA G, et al. Caroma Therapy: Pleasant Scents Promote Safer Driving, Better Mood, and Improved Well-Being in Angry Drivers[C]// Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Hawaii: Association for Computing Machinery, 2020: 1-13.
- [92] DMIRENKO D, VI C T, OBRIST M. A Comparison of Scent-Delivery Devices and Their Meaningful Use for In-Car Olfactory Interaction[C]// Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Ann Arbor: Association for Computing Machinery, 2016: 23-26.
- [93] SCHARTMÜLLER C, RIENER A. Sick of Scents: Investigating Non-Invasive Olfactory Motion Sickness Mitigation in Automated Driving[C]// Proceedings of the 12th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications. Washington D C: Association for Computing Machinery, 2020: 30-39.
- [94] 王行愚, 金晶, 张宇, 等. 脑控: 基于脑-机接口的人机融合控制[J]. *自动化学报*, 2013, 39(3): 208-221.  
WANG X Y , JIN J , ZHANG Y, et al. Brain Control: Human-Computer Integration Control Based on Brain-Computer Interface Approach[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(3): 208-221.