文章编号:1007 - 4252(2022)05 - 0005 - 401　　DOI: 10.20027/j.gncq.2022.0047

仿生嗅觉系统研究进展

李　艳[1],谭畅舒[1],杜进桥[1],方亮凯[1],胡一鸣[2],张顺平[2],郭　新[2,*]
(1. 深圳供电局有限公司,深圳 518001;2. 华中科技大学 材料科学与工程学院,武汉 430074)

摘要:仿生嗅觉系统是所有生物感官仿生研究中进展较为缓慢的一项技术。本文介绍了仿生嗅觉系统的研究背景,通过分析人类嗅觉的基本原理及其与仿生嗅觉系统中不同组成的对应关系,详细阐述了仿生嗅觉系统在气体传感器、数据处理系统等方面的发展状况及存在的问题,讨论了仿生嗅觉系统的应用场景,并针对衍生出的新需求对仿生嗅觉系统的未来发展趋势进行了展望。

关键词:仿生嗅觉系统;气体传感器;模式识别;智能传感技术
中图分类号:TP 212.6　　**文献标志码**:A

Research Progress of Bionic Olfactory Systems

LI Yan[1], TAN Chang-shu[1], DU Jin-qiao[1], FANG Liang-kai[1], HU Yi-ming[2], ZHANG Shun-ping[2], GUO Xin[2,*]
(1. Shenzhen Power Supply Company Limited, Shenzhen 518001, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The development of the bionic olfactory systems (BOS) is lagged other biomimetic research of biological senses. This article reviews the research progress of BOS, elaborates how a human olfactory system works and how to emulate the biological olfaction with BOS. Current status and problems of BOS, including gas sensors and data processing systems, are expounded, application scenarios of BOS are discussed, and the future development of BOS is expatiated as well.

Key words: Bionic Olfactory System; Gas Sensor; Pattern Recognition; Intelligent Sensing Technology

0　引言

生物在进化过程中,最早出现在单细胞生物中的化学感受器逐步演化出了高级生物的嗅觉。嗅觉是生物最重要的感官之一,负责感受周围环境中的气味信号,为生物的生存、觅食、繁殖等活动提供了重要的保障[1]。对很多动物来说,嗅觉是它们在生存中最重要的感官。比如,鲨鱼通过嗅觉在海洋中探测到血迹,进而帮助它们寻找猎物[2];犬类通过

收稿日期:2022-06-30;　**修订日期**:2022-09-21
基金项目:工信部 2020-2021 年度物联网关键技术与平台创新类示范项目(090000KK52210135);国家自然科学基金项目(61971202);国家重点研发计划 (2021YFB2401900).
作者简介:李　艳, 女,深圳供电局有限公司电力科学研究院院长,博士,教授级高级工程师,主要从事电力科学研究及管理工作.
通信作者:郭　新, 男, 博士, 教授, 主要研究方向为气体传感器和人工嗅觉(E-mail: xguo@hust.edu.cn).

嗅觉辨别领地[3]等。许多动物都拥有比人类更强大的嗅觉,人们也一直想要利用嗅觉实现更多的功能,所以仿生嗅觉一直是该领域研究的热门课题。

随着社会的发展,人们对气体或气味检测的需求越来越高,嗅觉的使用场景也越来越复杂,需要气体或气味分析设备具有更快的数据处理能力、更短的响应时间、更强的便携性等等。而一般用于检测环境中化学信号的传感器还存在很多问题,无法满足人们的使用要求。此外,现有的数据处理工作模式和人脑还存在巨大差距,高功耗、较低的识别精度也限制了嗅觉模拟在实际生活中的应用。由于生物嗅觉系统在灵敏度、响应时间、识别精度、功耗等指标上具有诸多优点,所以人们也在不断尝试利用物理器件或结合生物技术来实现仿生嗅觉的功能[4]。

1 生物嗅觉与仿生嗅觉系统

1.1 人类嗅觉机理

当外界的气体分子进入鼻腔后,会与鼻腔内嗅觉受体细胞上嗅纤毛的受体(感受器)相结合,从而使嗅觉受体细胞产生一个动作电位,然后通过神经轴将信号传入嗅球,经嗅球汇集后再传入大脑的嗅觉皮层,由大脑完成传入信号的整理和识别,形成对气味的感受[5]。人类虽然只有一千多种受体,但却可以通过不同受体的组合实现对上万种气味的识别[6]。

与视觉、听觉和触觉不同,嗅觉和味觉是人体对外界化学信号的感知。光、声音和压力这些物理信号的检测相对简单,容易进行定量研究,所以在视觉、听觉和触觉的仿生方面都有了较为成熟的产品。相对而言,嗅觉和味觉这类对化学信号的传感是比较复杂的,单一的传感器很难对气体进行识别,只有通过比较几个传感器或受体的信号才能获得有关样品气味的信息[7]。

较于目前的传感器系统,人类嗅觉有很多的优点:首先是受体的高度特异性,现被确定的人类受体就有一千多种,每种受体只与特定的气味分子结合;其次是庞大的受体阵列,人的鼻腔大约有一千万的嗅觉细胞,每个细胞上又有上千的纤毛,嗅觉受体就分布在这些纤毛上;最后是高效的数据处理系统——大脑,它可以实现并行运算,在逻辑判断、识别事物和推理的能力方面远强于电脑。

1.2 仿生嗅觉系统

受到生物嗅觉系统的启发,仿生嗅觉系统是利用传感器阵列模拟生物嗅觉受体对气体进行感知,结合电子技术和计算机模拟大脑对数据进行整合和处理,实现对气体或气味的识别(图 1)。它主要包括传感器阵列、信号预处理和模式识别三部分。

人们使用传感器阵列来模拟生物的嗅觉受体。目前主要有两种方式来实现嗅觉感知:

(1) 利用物理器件实现对气体的感知。利用气体分子或离子与器件的敏感材料之间的吸附和反应,使材料的物理或化学性质发生改变,从而实现对气体的感知;

(2) 利用生物功能部件作为受体,包括嗅觉细胞和嗅觉受体蛋白等,将这些部件连接到微纳传感器,通过这些受体与目标气体的特异性结合,会产生不同的响应信号。

而在数据处理方面,人们首先对数据进行预处理来模拟嗅球的功能,然后利用搭建的人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)来实现大脑的学习和分类功能。

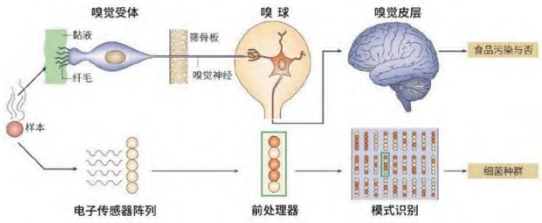

图 1 生物嗅觉与仿生嗅觉对比[8]

Fig. 1 Comparison of biological and bionic olfaction[8]

2 仿生嗅觉系统的研究现状

2.1 嗅觉感受器模拟

2.1.1 生物器件

利用生物器件作为受体的传感器又称仿生嗅觉传感器,其采用的生物敏感部件来自生物器官,是一种天然的化学感受器。与传统检测方法相比,仿生嗅觉传感器继承了生物嗅觉传感器的优点,其特异性受体对气体识别更加精确,且灵敏度和响应时间都略胜一筹[9]。

这种传感器依赖于生物组织培养和机械微加工技术来实现敏感部位的培养和制备,生物材料的寿

命很难控制。与此同时这种传感器还破坏了嗅觉系统的完整性,神经元响应模式也发生改变,于是有科学家提出利用通过体神经信号记录来实现气味识别。Nowotny 等[10]利用在体微电极记录果蝇嗅觉神经元,采用支持向量机分类算法进行气味分类,可以很好地区分 36 种不同的酒类气体和 35 种工业气体。Zhuang 等人[11]还提出了一种新的在体生物电子鼻,如图 2 所示,利用小鼠实现了对香芹酮、柠檬醛、异丁醇、二乙酰基、苯甲醚和乙酸异戊酯等气味的识别。

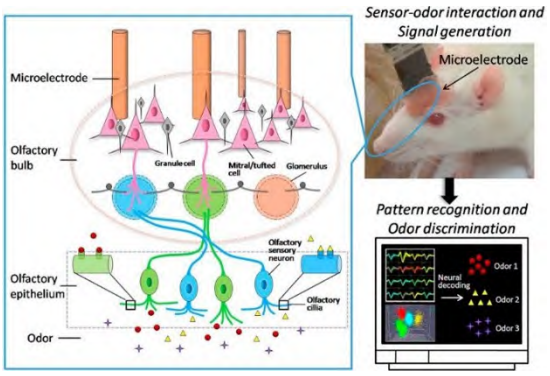

图 2　体内生物电子鼻示意图[11]

Fig. 2 Schematic of in-vivo bioelectronic nose[11]

但这类仿生嗅觉传感器的检测气体仅限于生物嗅觉能识别的气味,对更多种类的气体则无能为力。同时,由于生物材料需要保持活性才能工作,传感器的寿命也是一个问题,在一些工作环境较差的地方,这类传感器甚至无法工作。而且由于生物个体的差异性,同种生物不同个体对同样气味的感觉也会不同,所以一致性问题也有待解决。基于上述问题,目前传感器的使用还是以物理器件为主。

2.1.2 物理器件

利用物理器件作为嗅觉受体的感受器就是普遍意义上的气体传感器(图 3)。从 1954 年发展至今,气体传感器已经有了很多不同原理的器件种类。作为仿生嗅觉系统中直接与气体接触反应的部分,气体传感器的性能优劣至关重要。图 3 所示为一般气体传感器的检测系统[12]。目前应用较多的气体传感器有电化学气体传感器、热学式气体传感器、质量敏感气体传感器和光学式气体传感器等。

在所有的气体传感器中,金属氧化物半导体(Metal Oxide Semiconductor, MOS)气体传感器由于其高灵敏度、高响应速度、低成本和简单的工作电路

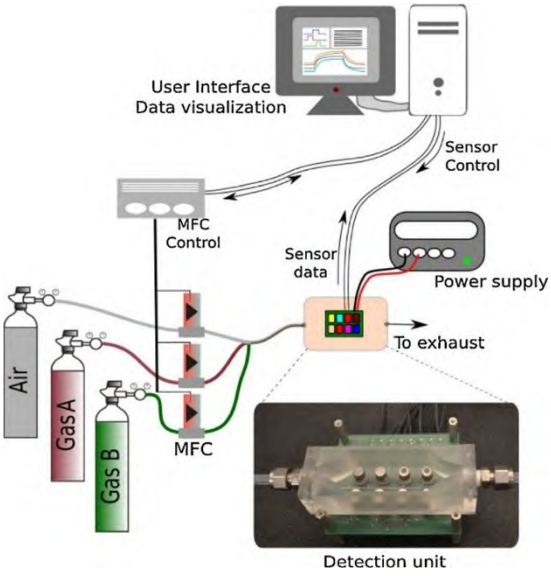

图 3　气体传感器测试装置[12]

Fig. 3 Gas sensor experimental setup[12]

等优点而受到广泛关注,也是应用最多的气体传感器[13]。图 4[14]所示为 MOS 气体传感器的一般结构,由于 MOS 工作需要能量激发,所以一般需要集成加热模块,它依靠气体在材料表面的氧化还原反应进行工作。由于其与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺的兼容性,可以具有较高的集成度,单一器件尺寸最小可到微米级别,“电子鼻”多是使用 MOS 气体传感器作为传感单元。Wu 等人[15]开发了一种利用 MOS 传感器阵列来检测气体的“电子鼻”,可以监测 5 种高度易燃气体。为了提高 MOS 气体传感器的气敏性能,不少研究者进行了改性和掺杂等工作。Xue 等人[16]对 MOS 气体传感器的改性进行了总结,认为纳米结构可以改善气敏性能,同时核-壳结构可以改善电子取向,优化传感性能,但热稳定性和结构稳定性仍需进一步研究和改善。目前 MOS 传感器还存在一些问题无法解决,比如识别气体种类有限,难以识别具有相同官能团的化合物;容易受硫中毒和弱酸影响;工作温度高、功耗高;对湿度很敏感;精度较差等。

声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)式气体传感器对许多化合物更加敏感,具有较高的灵敏度和良好的响应时间,它也是“电子鼻”常用的传感单元。SAW 气体传感器是质量敏感气体传感器的一种,如图 5 所示,其工作原理是压电效应,随着

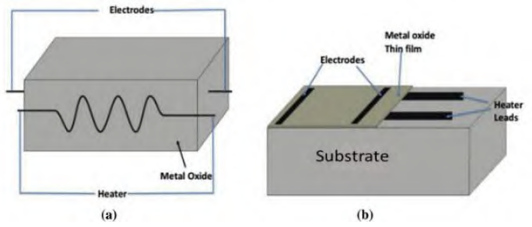

图 4 MOS 气体传感器:(a) 块状和(b) 薄膜传感元件[14]

Fig. 4 Metal oxide semiconductor gas sensors with (a) bulk and (b) thin film sensing element[14]

SAW 器件表面的气体吸附,其振荡器的振荡频率会发生改变[17]。通过微纳加工,其传感器尺寸也能达到微米级别,但外围电路较为复杂。Hao 等人[18]开发了一种基于 SAW 阵列的便携式“电子鼻”,能够将化学性质相似的气体和聚合物归为同一族,在气体检测和识别的实际应用中具有广阔的前景。但对于混合气体,SAW 很难对单一气体做出精确测量。

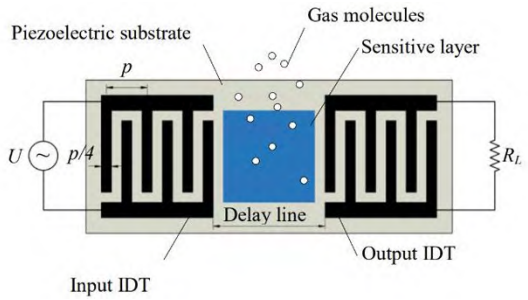

图 5 SAW 传感器结构示意图[17]

Fig. 5 Structure of SAW sensor[17]

相对来说,光学式气体传感器的测量比 MOS 和 SAW 气体传感器都要精准,能够区分混合物中的单个化合物。光学式气体传感器基于光学原理对气体进行探测,主要有红外吸收型、荧光型、光谱吸收型等,其中红外吸收型应用最多。以非分散红外气体分析技术(Non-Dispersive Infra-Red, NDIR)为例,它通过测量红外光光源发出的辐射经过待测气体后的光谱强度变化,可以得到待测气体的红外吸收,进而分析气体种类和浓度[19],图 6[20]为其结构示意图。但这类传感器需要集成光的发射和吸收装置,所以一般造价较高,且体积较大,新型的 NDIR 单一气体传感器体积一般在 2 cm^3 以上。

2.2 嗅球和大脑模拟

嗅球用来收集嗅觉细胞传来的数据,大脑对嗅球处理后的数据进行处理,产生气味的感知和识别。这两部分在仿生嗅觉系统中分别对应数据预处理和模式识别。

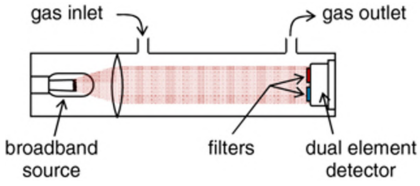

图 6 NDIR 气体传感器结构示意图[20]

Fig. 6 Schematic diagram of a NDIR gas sensor[20]

数据预处理是将数据由测量结果进行降维,去除环境因素的影响。一般采用特征参数选择或特征提取[21],排除除气体外其他因素(气压、湿度、温度等)对响应数据产生的影响,即将数据由测量空间变换到特征空间。可以通过建立数学模型分析不同因素对数据产生的影响并建立相关模型,减少这些因素对数据的影响,还可以利用主成分分析、线性判别分析、自组织映射等方法进行降维处理,保留样本大部分特征信息。

而模式识别是对特征空间进行分类,识别不同气味。传统方法有多元线性回归、主成分分析和线性判别分析[22-23]等,这些方法较为简单且容易实现,但缺乏学习能力,实际应用中识别精度不高。而 ANN 是一种新型的数据处理方法,包括 BP 神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)、卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)、循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)等[24-26],通过构建相关神经网络,并利用数据库进行学习、训练,识别不同气体的响应特征,进而进行分类,该方法能随着数据库的丰富不断学习,进而不断提高识别精度。近年来还有脉冲神经网络(Spiking Neural Network, SNN)的相关研究[27],如图 7 所示,利用场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)型气体传感器与 SNN 结合构建了仿生嗅觉系统。SNN 模仿人脑的数据处理方式,摆脱了传统 ANN 的限制,能够实现全特征提取和并行运算,有望成为下一步模式识别方法。

3 仿生嗅觉的应用与发展

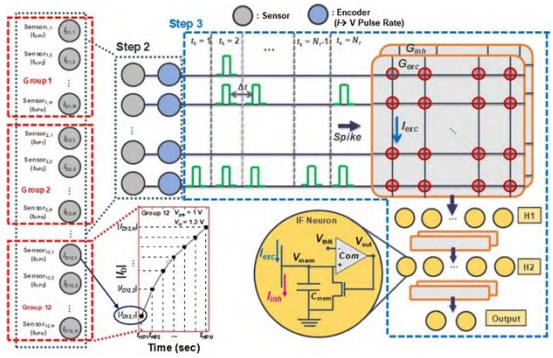

图 7　用于仿生嗅觉系统的 SNN 和 FET 型传感器阵列的示意图[27]

Fig. 7 Schematic diagram of the SNN and FET-type sensor array for the bionic olfactory system[27]

3.1　环境监测

随着工业化的发展,空气中的污染物逐渐增多,种类也有所增加,严重危害人类的生命健康安全。近 10 年以来,人们对空气质量的关注越来越多。室外空气中颗粒物、臭氧、二氧化氮、二氧化硫等都是人们关注的重点,空气中这些污染物的增多会明显提高一个地区的发病率。据报道[28],2016 年室外空气污染估计导致全世界 420 万人过早死亡。除此之外,室内空气污染(甲醛、苯、氨、放射性氡以及微生物污染物等)也严重危害着人们的生命健康安全。为了解决这些问题,不少国家颁布了相关安全标准,进行了对应气体检测研究,且已经用于多种场合[29-30]。

以甲醛为例,世界卫生组织规定室内甲醛含量应在 0.08 ppm 以下,否则在一定时间内会损害人们的健康。用于室内甲醛含量检测的方法有很多,比如气相色谱法、电化学法、MOS 气体传感器、石英晶体微量天平气体传感器等,但与 MOS 气体传感器相比,其他检测方法具有设备尺寸大、操作复杂、成本高、寿命不足等缺点,所以目前研究较多的是 MOS 气体传感器[31]。Gu 等人[32]利用金掺杂的 In_2O_3 纳米片获得了一种高选择性和灵敏度的甲醛传感器,在 100 ℃的低工作温度下对 50 ppm 的甲醛有85.67 的高响应,检测阈值(Limit of Detection, LOD)低至 1.42 ppb。但 MOS 气体传感器容易受室内其他气体如甲醇、乙醇、苯、甲苯等的干扰,因此对甲醛的检测常是几种传感器混合使用,对其他室内污染气体检测也是如此。

3.2　食品工业

仿生嗅觉在食品检测中的应用包括对食品质量的检测、对水果新鲜度的检测以及检测谷物的虫害、霉变等。在食品加工和存放过程中的变质会产生特定的气体或微生物,利用仿生嗅觉对食品质量进行实时追踪监测可以有效预测食品的储存期限,减少食品变质带来的危害。相较于其他对单一气体检测要求较高的应用场景,食品工业更偏重于风味检测。比如 Jonas 等人[33]用四种不同导电聚合物制备气体传感器,设计了“电子鼻”用于橙子的霉变检测,且只需要 40 s 就能完成一个测量周期。还有研究人员利用“电子鼻”实现了食品饮料的风味检测:Kouki 等人[34]利用“电子鼻”对不同葡萄酒的香气进行了识别,同时通过拓展香气的特征,实现了对不同种类咖啡的区分。

3.3　缉毒与防爆检测

可燃性气体(甲烷、氢气等)在含氧密闭环境中浓度达到一定程度后,只需要很小的火源就能引起爆炸。在地下矿洞、使用天然气的室内或者一些实验室中,有很多因为可燃性气体浓度过高导致的爆炸案例。使用仿生嗅觉对可燃性气体进行实时检测就可以提前做出预警,有效减少这类爆炸的发生。甲烷的爆炸下限为 4.9% ~20%。Wang 等人[35]设计了一种利用吸收型光纤进行高灵敏度甲烷检测的系统,其灵敏度达到甲烷气体爆炸下限的 0.02%,这种测量方法不会引起燃烧和爆炸,还能远程控制,能够用于地下矿洞可燃性气体检测。

在机场或地铁等检查站口也可利用气体传感器实现对毒品和易爆物品的检查。毒品一般具有特殊气味,但这种特征性气味在外面浓度很低,需要高灵敏度、高特异性的气体传感系统。易爆炸物品一般含氮和氧作为氧化剂,因此对这两种成分进行特征性气体分析可以实现爆炸物检测。

3.4　疾病诊断

呼吸检测是仿生嗅觉应用的新生领域,可以用于下一代非入侵式的医疗诊断和监测设备。人们呼出气体的成分十分复杂,包含 200 多种挥发性有机物(Volatile Organic Compounds, VOCs)[36]且部分成分浓度极低,研究发现很多疾病会导致部分 VOCs 气体浓度发生改变[37]。因此,通过对特定 VOCs 成

分的特异性检测,有望实现对很多疾病的预防和诊断[38-40]。

研究发现,哮喘患者与健康人相比其呼出气体中 NO 含量会从少于 25 ppb 变成高于 50 ppb[41-42];人们呼出气体中丙酮的含量也可以用来判断是否患有糖尿病,正常人呼出气体中丙酮含量≤ 0.9 ppm,而糖尿病人呼出丙酮含量会明显增高,严重患者可达几十甚至上百 ppm[43];除此之外,烷类、硫化氢、氨等也可用于人体疾病诊断。现在用于气相呼吸检测的技术有很多,气相色谱、MOS 气体传感器、电化学气体传感器、FET 气体传感器、光纤传感等,其中基于 MOS 的传感器具有体积小、成本低、易操作、低功耗、易维护等特点而备受青睐,是现在研究的重点[44]。

3.5 智能家居与智能设备

随着社会的发展,智能家居和智能设备的应用也越来越多,智能家居的提出实现了人们对家庭环境的实时监测和控制。比如在冰箱中集成“电子鼻”,人们可以实时监测食物状况,在食物即将变质时冰箱给予提醒。智能手机和手表等设备也缺乏嗅觉的集成,这些设备一般随身携带,集成仿生嗅觉系统可以帮助人们检测周围环境,甚至可以通过检测人们的呼出气体来预估健康状况。另外,虚拟现实技术(Virtual Reality, VR)的发展提出了新的实时嗅觉同步系统,可以达到更高程度地身临其境,这就需要高性能的“电子鼻”实时监测目标地点的空气成分,进而在 VR 设备中实现气味的再现。

而新的应用场景的需要,也对仿生嗅觉系统提出了新的要求。目前,仿生嗅觉的发展趋势集中表现为:

(1)提高灵敏度和工作性能;

(2)降低功耗和成本;

(3)缩小尺寸,简化电路,与应用整机相结合,这也是仿生嗅觉系统一直追求的目标。

4 总结及展望

随着社会的不断进步,人们对环境监测的要求越来越高,导致对智能传感设备的需求越来越高,仿生嗅觉的使用环境也越来越复杂。目前传感技术正在向低功耗、高集成度、高精度方向发展,气体传感器和仿生嗅觉传感器都大有可为。在各器件的一致性得到保证的条件下,传感器阵列需要进一步优化其敏感性和选择性;同时阵列微型化也是必然趋势,这将有利于降低尺寸、功耗和成本等,此外,在保障性能的同时应优化阵列来减少冗余信息和噪声信号。新一代人工神经网络技术的发展也在不断提高对传感器阵列数据的处理能力,使更高精度、更快速度的气味识别和检测成为可能。未来,仿生嗅觉的使用场景将越来越多,高灵敏度、低功耗、低成本、应用与整机相结合等是仿生嗅觉系统发展的主要趋势。

参考文献:

[1] Ache B, Young J, Ache B, et al. Olfaction: Diverse Species, Conserved Principles [J]. Neuron, 2005, 48(3): 417-430.

[2] Rygg A, Cox J, Abel R, et al. A Computational Study of the Hydrodynamics in the Nasal Region of a Hammerhead Shark (sphyrna Tudes): Implications for Olfaction [J]. Plos One, 2013, 8(3): e59783.

[3] Kokocinska-kusiak A, Woszczylo M, Zybala M, et al. Canine Olfaction: Physiology, Behavior, and Possibilities for Practical Applications [J]. Animals, 2021, 11(8): 2463.

[4] Zhen Q, Qi D, Liang H, et al. Recent Advances in Bioinspired Olfaction/Gustation Sensors and their Applications [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2014, 33(5): 609-619.

[5] Sharma A, Kumar R, Aier I, et al. Sense of Smell: Structural, Functional, Mechanistic Advancements and Challenges in Human Olfactory Research [J]. Current Neuropharmacology, 2019, 17(9): 891-911.

[6] Buck L B. The Search for Odorant Receptors [J]. Cell, 2004, 116: S117-S119.

[7] Davies J T. Olfaction Thoeries [M]. Springer, Berlin, Heidelberg, 1971: 322-350.

[8] 王 平, 庄柳静, 秦 臻, 等. 仿生嗅觉和味觉传感技术的研究进展 [J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(12): 1313-1321.

[9] Son M, Lee J Y, Ko H J, et al. Bioelectronic Nose: an Emerging Tool for Odor Standardization [J]. Trends in Biotechnology, 2017, 35(4): 301-307.

[10] Nowotny T, De bruyne M, Berna A, et al. Drosophila Olfactory Receptors as Classifiers for Volatiles From Disparate Real World Applications [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9(4): 046007.

[11] Zhuang L, Guo T, Cao D, et al. Detection and Classifica-

tion of Natural Odors with an in VivoBioelectronic Nose [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2015, 67: 694-699.
[12] Fonollosa J, Fernandez L, Gutierrez-galvez A, et al. Calibration Transfer and Drift Counteraction in Chemical Sensor Arrays Using Direct Standardization [J]. Sensors and Actuators B, 2016, 236: 1044-1053.
[13] Liu H Y, Meng G, Deng Z H, et al. Progress in Research on VOC Molecule Recognition by Semiconductor Sensors [J]. Acta Physico - Chimica Sinica, 2022, 38 (5): 2008018.
[14] Patial P, Deshwal M. Selectivity and sensitivity property of metal oxidesemiconductor - based gas sensor with dopants variation: a review [J]. Transactions on Electrical and Electronic Materials, 2021: 1-13.
[15] Wu Z, Wang H, Wang X, et al. Development of Electronic Nose for Qualitative and Quantitative Monitoring of Volatile Flammable Liquids [J]. Sensors, 2020, 20 (7): 1817.
[16] Xue S, Cao S, Huang Z, et al. Improving Gas - sensing Performance Based on Mos Nanomaterials: A Review [J]. Materials, 2021, 14(15): 4263.
[17] Guz L. Technical Aspects of Saw Gas Sensors Application in Environmental Measurements [C]. //MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2019, 252: 06007.
[18] Hao H, Tang K, Ku P, et al. Development of a Portable Electronic Nose Based on Chemical Surface Acoustic Wave Array with Multiplexed Oscillator and Readout Electronics [J]. Sensors and Actuators B, 2010, 146(2): 545-553.
[19] Jha R, Jha R K. Non - dispersive Infrared Gas Sensing Technology: a Review [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(1): 6-15.
[20] Hodgkinson J, Tatam R P. Optical gas sensing: a review [J]. Measurement science and technology, 2012, 24(1): 012004.
[21] Persaud K, Dodd G. Analysis of Discrimination Mechanisms in the Mammalian Olfactory System Using a Model Nose [J]. Nature, 1982, 299(5881): 352-355.
[22] Jamalabadi H, Mani-Varnosfaderani A, Alizadeh N. PPy-metal oxide hybrid nanocomposite sensor array for simultaneous determination of volatile organic amines in high humid atmosphere [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17 (24): 8282-8289.
[23] Akbar M, Ali A, Amira A, et al. An Empirical Study for Pca- and Lda-based Feature Reduction for Gas Identification [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(14): 5734-5746.
[24] Chu J, Li W, Yang X, et al. Identification of Gas Mixtures Via Sensor Array Combining with Neural Networks [J]. Sensors and Actuators B, 2021, 329: 129090.
[25] Zhang C, Fu Y, Deng F, et al. Methane Gas Density Monitoring and Predicting Based on Rfid Sensor Tag and Cnn Algorithm [J]. Electronics, 2018, 7(5): 69.
[26] Zhang W, Wang L, Chen J, et al. A Novel Gas Recognition and Concentration Detection Algorithm for Artificial Olfaction [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-14.
[27] Kwon D, Jung G, Shin W, et al. Efficient Fusion of Spiking Neural Networks and Fet-type Gas Sensors for a Fast and Reliable Artificial Olfactory System [J]. Sensors and Actuators B, 2021, 345: 130419.
[28] Wang H, Abajobir A A, Abate K H, et al. Global, Regional, and National Under-5 Mortality, Adult Mortality, Age - specific Mortality, and Life Expectancy, 1970 - 2016: a Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2016 [J]. The Lancet, 2017, 390(10100): 1084-1150.
[29] Fergus J, Fergus J W. A Review of Electrolyte and Electrode Materials for High Temperature Electrochemical Co_2 and So_2 Gas Sensors [J]. Sensors and Actuators B, 2008, 134(2): 1034-1041.
[30] Ghosh R, Gardner J, Guha P, et al. Air Pollution Monitoring Using Near Room Temperature Resistive Gas Sensors: a Review [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(8): 3254-3264.
[31] Yuan Z, Yang C, Meng F. Strategies for improving the sensing performance of semiconductor gas sensors for high-performance formaldehyde detection: a review [J]. Chemosensors, 2021, 9(7): 179.
[32] Gu F B, Di M Y, Han D M, et al. Atomically dispersed Au on In_2O_3 nanosheets for highly sensitive and selective detection of formaldehyde [J]. ACS sensors, 2020, 5 (8): 2611-2619.
[33] Gruber J, Nascimento H, Yamauchi E, et al. A Conductive Polymer Based Electronic Nose for Early Detection of Penicillium Digitatum in Post-harvest Oranges [J]. Materials Science & Engineering: C, 2013, 33(5): 2766-2769.
[34] Fujioka K, Tomizawa Y, Shimizu N, et al. Improving the Performance of an Electronic Noseby Wine Aroma Training to Distinguish Between Drip Coffee and Canned Coffee [J]. Sensors, 2015, 15(1): 1354-1364.
[35] Wang J L. Spectrum Absorption Methane Gas Sensor with

Optical Fiber Based on Frequency Harmonic Detection Mechanism [J]. Advanced Materials Research, 2012, 383-390: 2907-2911.

[36] Pauling L, Robinson A B, Teranish R, et al. Quantitative Analysis of Urine Vapor and Breath by Gas-liquid Partition Chromatography [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1971, 68(10): 2374-2376.

[37] Kuo T C, Tan C E, Wang S Y, et al. Human Breathomics Database [J]. Database-the Journal of Biological Databases and Curation, 2020.

[38] Oakley-girvan I, Davis S, Oakley-girvanI, et al. Breath Based Volatile Organic Compounds in the Detection of Breast, Lung, and Colorectal Cancers: a Systematic Review [J]. Cancer Biomarkers, 2018, 21(1): 29-39.

[39] Das S, Pal S, Mitra M, et al. Significance of Exhaled Breath Test in Clinical Diagnosis: a Special Focus on the Detection of Diabetes Mellitus [J]. Journal of Medical and Biological Engineering, 2016, 36(5): 605-624.

[40] Mazzatenta A, Pokorski M, Sartucci F, et al. Volatile Organic Compounds (vocs) Fingerprint of Alzheimer's Disease [J]. Respiratory Physiology & Neurobiology, 2015, 209: 81-84.

[41] Moncada S, Higgs A. The L-arginine-nitric oxide pathway [J]. New England journal of medicine, 1993, 329(27): 2002-2012.

[42] Pavord I D, Shaw D E, Gibson P G, et al. Inflammometry to assess airway diseases [J]. The Lancet, 2008, 372(9643): 1017-1019.

[43] Yamane N, Tsuda T, Nose K, et al. Relationship between skin acetone and blood β-hydroxybutyrate concentrations in diabetes [J]. Clinica Chimica Acta, 2006, 365(1-2): 325-329.

[44] Das S, Pal M. Non-invasive monitoring of human health by exhaled breath analysis: A comprehensive review [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2020, 167(3): 037562.