第 50 卷 第 8 期：3339-3353　　高电压技术　　Vol.50, No.8: 3339-3353
2024 年 8 月 31 日　　High Voltage Engineering　　August 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240649

电力嗅觉传感原理与关键技术研究综述

杨爱军，潘健彬，王琼苑，褚继峰，邓卓立，荣命哲
（电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049）

摘　要：仿生感知技术在电力设备状态监测与故障诊断领域已被广泛应用。结合微型气体传感器与智能算法的电力嗅觉技术，通过检测绝缘介质的特征分解气体，可以有效评估电力设备的故障类型和严重程度。因其成本低、体积小和集成度高的优势，电力嗅觉技术受到越来越多关注。因此，该文针对 SF_6 气体绝缘设备、空气绝缘设备、变压器、电力电缆和储能电池的应用背景，梳理了当前电力嗅觉传感技术的研究现状。首先，总结了不同电力设备状态劣化的产气特性及内在机理，分析了特征分解气体的异同；之后，针对不同特征分解气体，总结了电力嗅觉敏感材料的研究进展与改进方向；然后，对比了陶瓷基底、柔性基底和硅基底的封装差异性，提出了电力嗅觉传感器件的芯片化、集成化发展方向；最后，讨论了基于特征工程和数据驱动的传感器信号处理算法，点明了边缘计算技术在电力嗅觉智能算法方面的应用潜力。该文对电力嗅觉传感原理与关键技术进行了详细归纳，强调了在气体分析方法、气敏材料开发、传感器制备技术和智能算法应用等方面的技术创新潜力，为电力设备的智能化发展提供了指导方向。

关键词：电力设备；气体分解；嗅觉感知；敏感材料；智能算法

Review on Sensing Principles and Key Technologies of Electric Olfaction

YANG Aijun, PAN Jianbin, WANG Qiongyuan, CHU Jifeng, DENG Zhuoli, RONG Mingzhe
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Bionic sensing technology has been widely used in power equipment status monitoring and fault diagnosis. The electrical olfaction which integrates micro-gas sensors with intelligent algorithms can effectively assess the type and severity of faults of power equipment by detecting characteristic decomposition gases from insulating media. This technology is gaining increasing attention due to its low cost, small size, and high integration capability. Consequently, this work focused on the background of SF_6 gas-insulated equipment, air-insulated equipment, transformers, power cables, and energy storage batteries, and summarized the current research status of electric olfactory sensing technology. Firstly, the gas production characteristics and underlying mechanisms of the state deterioration for different power equipment were summarized, and the similarities and differences of characteristic gases were analyzed. Thereafter, the research progress and improvement direction of olfactory-sensitive materials for different characteristic gases were summarized. Then, the packaging differences among ceramic, flexible, and silicon substrates were compared, and the direction of chip-based and integrated olfactory-sensitive component were proposed. Finally, the signal processing algorithms based on feature engineering and data-driven were discussed, and the application potential of edge computing technology in electric olfactory intelligent algorithm was pointed out. This paper provides a detailed summary of the principles and key technologies of electric olfactory, emphasizing the potential for technological innovation in gas analysis methods, gas-sensitive material development, sensor-fabrication techniques, and application of intelligent algorithms, and it guides the intelligent development of power equipment.

Key words: power equipment; gas decomposition; olfactory sensing; sensitive material; intelligent algorithm

基金资助项目：国家自然科学基金(52207170；U2166214)；中国博士后科学基金(2022M712510；2022TQ0252)；陕西省自然科学基础研究计划(2023-JC-JQ-41)；陕西省重点研发计划(2022GXLH-01-11)；电工材料电气绝缘全国重点实验室项目(EIPE23111；EIPE23408；EIPE23314)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52207170, U2166214), China Postdoctoral Science Foundation (2022M712510, 2022TQ0252), Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (2023-JC-JQ-41), Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2022GXLH-01-11), Program of State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (EIPE23111, EIPE23408, EIPE23314).

0 引言

视觉、听觉、嗅觉三大感官是人类感知世界的重要手段。电力视觉、电力听觉、电力嗅觉通过模拟人类三大感官，结合机器学习、深度学习等智能算法，高效分析电力领域视频/图像、音频和气体信号，以实现对电力设备状态的准确感知。

随着人工智能技术的发展，电力视觉和电力听觉已展现出等同甚至超越人类视觉与听觉的感知能力。例如：基于无人机、巡检机器人和智能监控系统的巡检方式，在输电线路和变电设备的智能运维中已经可代替人工巡检，实现设备缺陷和环境安全隐患的智能识别[1]；电力设备的声音信号包含许多运行状态信息，通过音色、音量、音高等音频特征的变化可判断设备是否处于不正常运行状态，甚至判别故障的类型和严重程度[2]。在高电压、大电流、高温、高湿等复杂运行环境中，电气绝缘介质(固体、液体和气体绝缘材料)在放电、过热等故障作用下会分解出不同气体组分，通过分析气体组分可实现电力设备状态诊断。目前，该方法已在变压器(油中溶解气体分析法)[3-4]和气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear，GIS)(SF_6分解气体分析法)[5-6]故障诊断中广泛应用。近年来，随着微型气体传感器技术和人工智能技术的进步，电力嗅觉技术在电力设备状态诊断领域备受关注，但相比于电力视觉和电力听觉的技术成熟度，还存在很大的发展空间。

1 电力设备状态劣化产气机理

电力设备状态劣化产气特性分析是采用电力嗅觉技术实现设备状态诊断的基础和前提。考虑到不同电力设备对应的特征气体各不相同，有必要对特征气体组分含量展开详细讨论。

1.1 SF_6气体绝缘设备——SF_6分解气体

SF_6凭借其优异的绝缘和灭弧性能，广泛应用于气体绝缘开关设备(GIS)、气体绝缘变压器(gas insulated transformer，GIT)和气体绝缘管道母线(gas insulated line，GIL)等设备中。当设备发生放电故障或过热故障时，部分SF_6气体受热分解或在电子的碰撞下分解为SF_x低氟硫化物，设备内部微量水蒸气、氧气等杂质也会分解成OH、O等高活性粒子，这些高活性粒子与SF_x低氟硫化物发生一系列复杂且不可逆的化学反应，生成硫酰氟化物(SOF_2、SO_2F_2、SOF_4等)、H_2S、SO_2等稳定分解产物[7]。如果故障区域存在绝缘材料，游离态S和O原子将与绝缘材料中的C原子反应生成CS_2、CO等，CS_2、CO等气体常作为涉及有机绝缘材料放电故障的特征气体[8]。目前，SF_6分解产物检测已成为SF_6气体绝缘设备状态诊断的重要参考，电力行业标准DL/T 1686—2017《SF_6高压断路器状态检修决策导则》对H_2S和SO_2的浓度做出了相关规定。电力设备预防性试验规程(DL/T 596—2021)新增了对SO_2、SOF_2、H_2S等气体的检测项目。

1.2 空气绝缘电力设备——空气放电分解气体

环保气体绝缘介质的相关研究仍处于探索阶段，目前已提出的环保气体绝缘介质包括但不限于C4气体(全氟异丁腈，C_4F_7N)、C5气体(全氟戊酮，$C_5F_{10}O$)、K6气体[9](主要成分为全氟甲基乙烯基醚，C_3F_6O)、干燥CO_2、洁净空气、以及按不同比例混合制成的多组分绝缘气体。除含氟类环保替代气体外[10-12]，高气压洁净空气正在成为SF_6环保替代的关键气体。中国科学院李康等通过研究空气放电分解产物来识别局部放电故障，发现NO_2可以作为识别空气局部放电的特征分解物[13]。武汉大学张晓星等采用实验和仿真相结合的方式分析了空气在不同湿度和放电电压下的分解组分及其产生机理[14]，指出CO和NO_2可以作为开关柜放电故障的特征组分。因此，CO和NO_2可以作为空气绝缘环保电力装备放电故障诊断的关键特征气体。

1.3 变压器——变压器油中溶解气体

矿物绝缘油是大型电力变压器最主要的绝缘和冷却介质。当变压器内部发生过热或放电故障时，局部释放的大量能量会造成绝缘油或固体绝缘材料的C—H健和C—O健断裂，并伴随产生少量活泼的H游离基和不稳定的小分子烃类自由基。这些游离基和自由基相互作用，最终生成H_2、低分子烃类气体和碳氧化合物[15-16]。这些气体溶解到绝缘油中，通过检测绝缘油中气体含量可以判断变压器的故障类型[17-18]。

如表1所示[19]，变压器过热故障分解气体主要有CH_4和C_2H_4；对于放电故障，分解气体的类型跟放电能量密切相关，低能量放电时以H_2和CH_4为主，高能量放电时以H_2和C_2H_2为主。如果故障涉及到绝缘纸等绝缘材料的分解，分解气体的主要成分除上述气体外，还会含有CO和CO_2。大量研究和试验证明：H_2/CH_4、C_2H_4/C_2H_6、C_2H_4/C_2H_6这3组气体浓度的比值跟变压器内部故障密切相关，形

表 1 变压器故障类型与特征气体的关系

Table 1 Relationship between transformer fault types and characteristic gases

故障类型	主要气体组分	次要气体组分
油过热	CH_4、C_2H_4	H_2、C_2H_6
油纸过热	CH_4、C_2H_4、CO、CO_2	H_2、C_2H_6
油纸局部放电	H_2、CH_4、CO	C_2H_4、C_2H_6、CO_2
油中火花/电弧放电	H_2、C_2H_2	CH_4、C_2H_4、C_2H_6
油纸火花/电弧放电	H_2、C_2H_2、CO、CO_2	CH_4、C_2H_4、C_2H_6

成了油浸变压器故障诊断的最基本方法——三比值法，该方法的使用规则由国际电工委员会做出明确规定[20]。国家标准 GB/T 722—2001 也规定了 H_2、CH_4、C_2H_6、C_2H_4、C_2H_2、CO 和 CO_2 为充油电气设备内部故障诊断的关键气体，并归纳总结了变压器故障与气体组分的关系。相关内容已被更新至电力设备预防性试验规程(DL/T 596—2021)。

1.4 电缆——早期火灾逸出气体

电缆具有远距离、大容量、低损耗的特点，是城市输电和海上输电的核心设备，被誉为国民经济的“血管”。截至 2019 年，全国 66 kV 及以上高压交流电缆在运里程已达到 8.6 万公里，并以每年 7%的增长率快速发展。但电缆火灾事故频发，严重影响了用电安全。

图 1 总结了电缆外护套聚氯乙烯(polyvinyl chloride，PVC)材料在不同温度下可能的分解气体组分及其对应的过热阶段。根据电缆规格的不同，电缆正常运行的最高温度在 90~110 ℃。在电缆火灾早期过热阶段，电缆绝缘材料气体分解物一般提前于烟雾颗粒出现。杨爱军等发现，PVC 电缆绝缘材料在 80 ℃下就有 2-乙基己醇(2-ethylhexanol，2-EH)析出，120 ℃以上塑化剂——对苯二甲酸二辛酯(dioctyl terephthalate，DOTP)开始出现，160 ℃以上可检测到大量苯蒸气[21]。易建新等研究了 9 种 PVC 电缆在 70~200 ℃作用下的过热产气特性，也发现了类似现象[22]。只有当电缆温度达到 200 ℃以上时，CO_2、CO、HCl、苯、不饱和烃等分解气体才会出现，这些气体只能实现起火后报警，不适合电缆过热检测。因此，2-EH、DOTP 和苯蒸汽可作为 PVC 电缆早期火灾预警的特征气体组分。

1.5 电化学储能设备——电池热失控逸出气体

储能技术是支撑新能源大规模消纳利用，进而建设新型电力系统的关键。锂电池电化学储能作为发展最快、应用最广泛的储能技术，在全国新型储能装机中占比高达 90%以上。然而热失控安全事故频发，亟需开展锂电池储能安全监测方法研究。锂电池热失控早期会释放大量气体，与温度、电压、烟雾等信号相比，气体信号能对热失控进行更早预警。当锂离子电池遭遇电滥用(过充、过放等)、热滥用(热管理系统失效导致电池异常发热)或者机械滥用(针刺、挤压、碰撞等)时，内部活性组分会发生一系列链式反应，使得电池内部压力增加，进而冲破安全阀，释放大量气体。以往研究表明，锂离子电池热失控除产生小分子气体(H_2、CH_4、CO、CO_2 等)之外，还会有大量电解液挥发蒸汽提前释放。例如，碳酸二甲酯(dimethyl carbonate，DMC)，碳酸甲乙酯(ethyl methyl carbonate，EMC)，碳酸二乙酯(diethyl carbonate，DEC)等[23]。在热失控超早期阶段，电解液挥发蒸汽和 H_2 表现出明显的故障特征，通过检测电池包内部的特征气体，可在热失控超早期阶段评估电池故障，为报警装置和通风系统提供足够长的预警时间[24-25]。通过及时切断电源或者隔绝热源，可有效阻断电池热失控的发生。国家能源局已经把气体检测作为防范锂电池储能热失控火灾事故的重要手段[26]。《电化学储能电站安全规程》(GB/T 42288—2022)明确要求了电化学储能电池需要设置可燃气体传感器和烟雾报警器，以便于电池火灾早期预警。

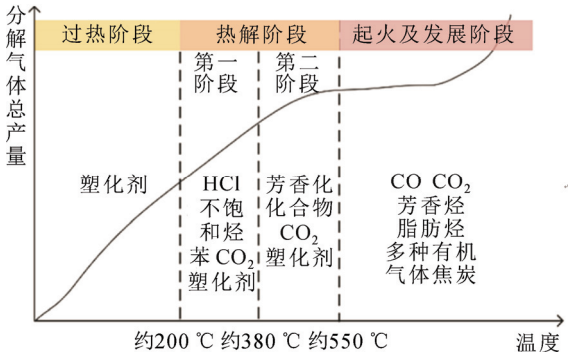


图 1 PVC 材料的不同过热阶段及分解气体

Fig.1 Possible decomposition gases of PVC materials and their corresponding overheating stages

2 电力嗅觉敏感材料

半导体气体传感器结构更简单、成本更低，兼容微机电系统(micro-electro-mechanical system，MEMS)制造工艺，更容易嵌入电力设备内部实现对故障特征气体的在线监测。作为半导体气体传感器的核心，气敏材料种类丰富多样，包括过渡金属氧

化物[27]、碳纳米管[28]、石墨烯[29]、黑磷[30]、过渡态金属硫化物[31]在内的多种半导体材料均可用来感知气体。此外，形貌结构调控、贵金属掺杂和异质结构建也是有效的气敏材料性能改进手段。

2.1 SF_6 分解气体的敏感材料

国家电网企业标准(Q/GDW1896—2013)和南方电网企业标准(Q/CSG114002—2011)都提出了GIS内部H_2S、SO_2和CO分解气体含量的检测需求。然而，现有SF_6气体分解物分析仪大多采用气相色谱仪[32]和电化学传感器原理[33]，现场取气操作过程复杂，无法实现在线监测。桂银刚通过掺杂Ni、Pd、Al的方式增强了碳纳米管(carbon nanotubes，CNTs)检测SF_6分解产物的响应灵敏度，但传感器恢复过程需要借助紫外光照射辅助，增加了气体检测系统的复杂度[34]。褚继峰研究发现还原氧化石墨烯(rGO)薄膜对H_2S和SOF_2气体优异的选择性[35]。陈伟根等基于第一性原理研究了环氧基化石墨烯和钯掺杂的石墨烯对H_2S气体的敏感特性，并通过实验验证了钯掺杂的环氧基化石墨烯低温下对H_2S具有快速响应优势[36]。碳基材料普遍具有疏松多孔的微观形貌结构，有助于SF_6分解气体分子的扩散与吸附。Chen等制备了WS_2纳米片材料，实现了对4种SF_6分解产物的高灵敏检测，并解释了气体分子吸附过程中材料能带的变化机理[37]。相较于碳纳米管、石墨烯、金属硫化物等材料，金属氧化物具有制备简单、灵敏度高、响应速度快、重复性好和稳定性强的优势，是研究最多、时间最长、使用最广泛的材料。Liu等制备了NiO修饰的ZnO纳米花材料，对SO_2、SO_2F_2、SOF_2气体表现出高响应值和较快响应速度，但工作温度超过220 ℃[38]。张晓星等采用阳极氧化法合成TiO_2纳米管，通过掺杂Pt显著提升了TiO_2纳米管材料对SO_2F_2气体的检测灵敏度，但很难自恢复[39]。

如图2所示，半导体气敏材料响应机理可以归结为能带弯曲理论[40]，氧分子吸附于气敏材料表面后夺取自由电子，微观表现为能带弯曲及势垒形成，宏观表现为电阻增加。目标气体分子与吸附氧分子反应后，释放自由电子给半导体气敏材料，改变微观势垒高度及宏观电阻大小[41]。然而，GIS设备内部是填充高气压SF_6的无氧环境，无氧环境导致目标气体与吸附氧之间的氧化还原反应难以正常完成，此时传统的半导体气敏材料往往不能正常工作。因此，气敏材料对无氧环境的耐受是实现SF_6分解

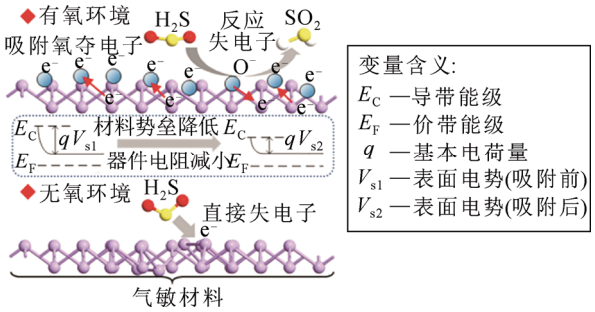


图2 半导体在有氧/无氧环境下的气敏过程

Fig.2 Gas sensing process of semiconductors in aerobic/anaerobic environments

气体在线监测的前提，亟需开发适合于GIS设备内部无氧环境下检测SF_6分解产物的新型气敏材料，使其气敏过程不依赖吸附氧对材料能带的调节作用，而直接与所吸附的气体分子产生电荷交换，促使材料电学特性发生变化，为无氧环境下检测SF_6分解产物提供可行性[42]。

总体来说，在SF_6分解气体检测领域，气体检测管法基本已不再使用，气相色谱和红外光谱都可以实现多种组分气体监测，但成本问题决定了这2种技术很难适用于高压电力开关设备众多间隔的在线监测。电化学传感器的线性度高(如炜盛科技ME3-SO_2)，但内部电解液在开关设备抽真空过程中极易挥发损失，导致其无法部署在电力开关内部进行在线监测，只能设计成带电检测设备进行取气分析。半导体传感器(例如SnO_2-rGO、NiO-ZnO等)成本极低、体积较小，且简单结构使其普遍拥有较长的寿命，很适合部署在高压电力开关设备内部以实现SF_6分解气体的在线监测。但是，半导体传感器大多难以区分不同的SF_6分解气体(如SO_2、SOF_2、SO_2F_2)，需要结合多传感器阵列与电力嗅觉算法，以实现对多组分气体的准确检测。

2.2 空气放电分解气体的敏感材料

不同于SF_6分解气体，空气放电分解气体主要包括臭氧O_3、氮氧化物(NO_2、NO)和碳氧化物(CO、CO_2)，均为常见气体。英国Honeywell、美国3M、日本Figaro、中国炜盛科技已有可用的电化学传感器产品，但是存在小型化困难和使用寿命短的问题。采用半导体气敏材料检测空气放电分解气体，受到了学者们青睐。Korotcenkov等研制了检测O_3的SnO_2传感器，在325 ℃获得了最优的灵敏度[43]。Ko等研制了SnS_2纳米片半导体材料，在100 ℃下实现了体积分数(25~500)×10^{-6}的宽范围NO_2检

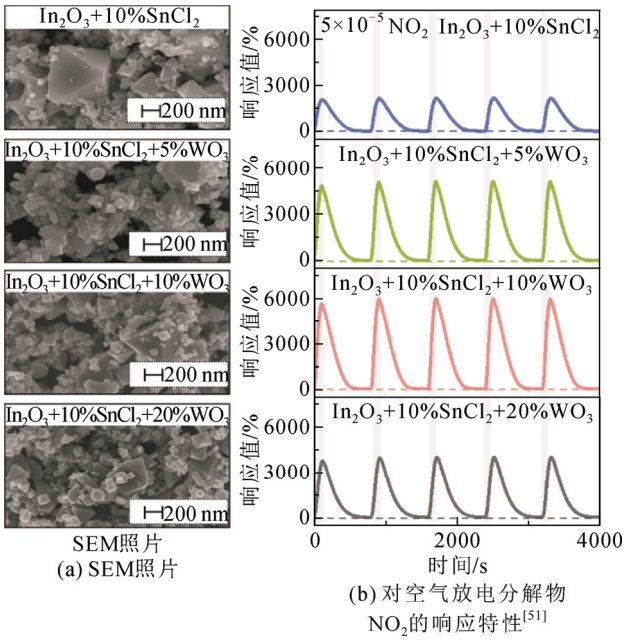
测[44]。卢革宇等制备了分层级花状结构的 WO_3 纳米材料，在 90 ℃下可以检测出体积分数 2×10^{-9} 的 NO_2[45]。Mondal 等发现 WO_3 化学传感器在 425 ℃的最佳温度下，可以检测出体积分数 5×10^{-6} 的 NO[46]。孙建平水热合成了多孔 PdO-ZnO 和 GO-WO_3 敏感材料，可检测出空气开关柜局部放电产生的体积分数 5×10^{-7} 的 NO_2[47]。王冬瑞研制了基于 SnS_2 敏感材料的气体传感器阵列，结合贝叶斯岭模型对空气放电产物 NO_2、CO 和 O_3 进行了识别[48]。Su 等设计了一种磁场环境下自取能的 NO_2 传感器，最低检测限可达 5×10^{-7}[49]。如图 3 所示，褚继峰等按照质量百分比混合了多种金属氧化物，研制了基于 In_2O_3 的三元气敏材料[50-51]，其对体积分数 5×10^{-5} 的 NO_2 表现出 5800%的电阻变化量(即响应值)，而且气体响应过程几乎不受 CO 气体的影响。虽然适合检测空气放电分解气体的半导体敏感材料众多，但空气绝缘电力设备不同于 GIS 设备，工作环境往往复杂多变，现有传感器未能考虑电磁兼容和环境漂移的干扰作用，容易带来巨大的误差。

总体来说，在空气放电分解气体检测领域，O_3、NO_2 和 CO 是最典型的特征分解气体。但是臭氧不稳定，在空气环境中容易分解成氧气。半导体传感器很适合于检测 NO_2 气体，目前也已经有大量研究报道了各式各样的 NO_2 传感材料，例如 In_2O_3 三元氧化物材料和 SnS_2 材料等，但有关空气放电分解物的检测尚未形成明确标准。

2.3 变压器油中溶解气体的敏感材料

变压器内部出现过热或局放故障时会产生微量气体，包括 CH_4、C_2H_2、C_2H_4、C_2H_6、CO 等。通过监测油中溶解气体组分含量，可评估变压器的工作状态[52-53]。Köck 等制备了一种由超长单晶 SnO_2 纳米线构成的气体传感器，可在 200~250 ℃范围有效检测 CH_4 气体[54]。江军等研制了基于钯材料(Pd)的光纤布拉格光栅氢气传感器，通过分析金属钯吸附氢气后的电阻变化，在无需脱气的情况下，直接检测油中溶解氢气[55]。此外，硒化钨(WSe_2)[56]、碳基纳米材料[57]也可用于变压器油中溶解气体检测。

然而，单纯的、未经过表面掺杂或者修饰的半导体材料经常出现选择性差、灵敏度低、响应缓慢、工作温度高(通常>300 ℃)等问题，研究人员将半导体材料与金属颗粒、石墨烯等进行掺杂，增强气敏性能，有效提高了对油中溶解气体的灵敏度和选择性，并降低了工作温度[58]。Jiang 等通过水热法合成氧化钨纳米片/还原氧化石墨烯纳米复合材料[59]，能够在较低工作温度下(150 ℃)显示出最佳 C_2H_2 传感性能，具有体积分数 1.3×10^{-6} 的检测限，可应用于大型变压器油中溶解 C_2H_2 的在线监测，如图 4 所示。Cui 等研究发现，钯掺杂层状硒化钨对 H_2 和 C_2H_2 具有理想的吸附效果，可通过对 H_2 和 C_2H_2 的灵敏检测来评估变压器的工作运行情况[57]。陈伟根等基于密度泛函理论发现钯掺杂的 2 维 SnP_3 材料具有检测 CO、C_2H_2 和 C_2H_4 气体的潜力[60]。国网

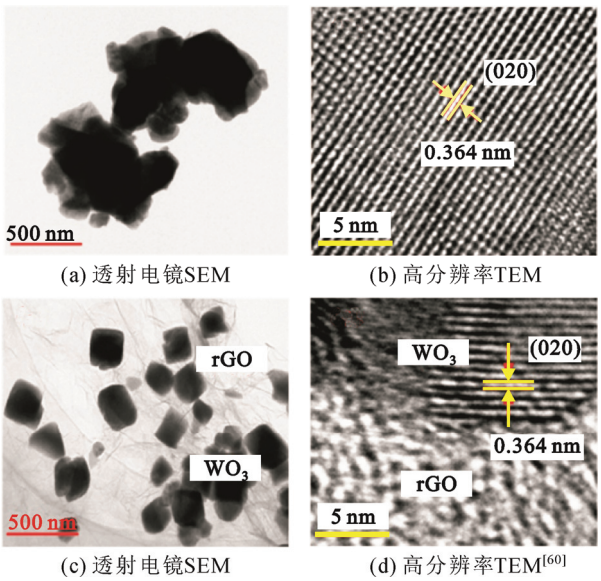


(a) SEM照片

(b) 对空气放电分解物 NO_2的响应特性[51]

图 3 三元气敏材料

Fig.3 Ternary gas-sensitive materials



(a) 透射电镜SEM (b) 高分辨率TEM

(c) 透射电镜SEM (d) 高分辨率TEM[60]

图 4 氧化钨材料的微观形貌

Fig.4 Microscopic morphology of WO_3 materials

吉林省电力有限公司电力科学研究院的 Lin 等制备了氮掺杂 Pd/NC 材料[58]，由于阳离子 Pd 与表面氮的协同作用，材料对 H_2 的选择性远优于 C_2H_2 和 CO。目前，变压器油中溶解气体检测大多需要脱气过程，亟需研制直接部署于油内的新型传感材料。

总体来说，在变压器油中溶解气体检测领域，目前油色谱在线监测装置已经成为超特高压变压器的标配，可同时监测 H_2、CH_4、C_2H_4、C_2H_6、C_2H_2、CO 和 CO_2 等多种气体。此外，光纤传感器可以内置于变压器油液中，但检测下限普遍较高。为缩减气体检测装置体积，电化学传感器与半导体传感器被大量研究，但大多只对特定气体(H_2、CH_4、CO 等)表现出灵敏性。

2.4 电缆绝缘材料过热气体的敏感材料

相较于烟雾检测法，电缆绝缘材料过热释放的气体分子有望在火灾发展早期进行预警，相关研究成果总结在表 2 中。Han 等制备了基于 SnO_2 纳米纤维的气体传感器，并用于电缆过热的早期检测[23]。Zhang 等使用了含有 SnO_2 纳米纤维和 Ba-Sr-Co-Fe 复合材料的双电极传感器，通过其化学电阻和电位计输出，可以准确感知 PVC 电缆过热释放的有机物挥发气体[61]。Zhang 等开发了 ZnO 纳米棒传感器，可用于检测 PVC 电缆火灾早期释放的 2-EH 和 DOTP 特征气体，选择性良好[62]。Li 等采用表面改性方法，提高了 ZnO 传感器对 2-EH 的响应 [63]。Yi 等通过对 SnO_2 空心纳米纤维改性，提高了传感器对邻苯二甲酸二辛酯(dioctyl phthalate，DOP)和 2-EH 的响应性能[64]。杨爱军采用 10 种商用传感器和 12 种自制的金属氧化物半导体传感器检测了 DOP、2-EH 和苯蒸汽[65]，在 90~200 ℃温度区间内，实现了对电缆过热状态的准确判断[22]。

综上所述，电缆绝缘材料过热产气敏感材料主要集中于研究传感器材料优化和性能提升方法，以增强电缆过热特征气体的检测能力。然而，电缆过热产生的气体组分众多，半导体敏感材料对电缆过热标志气体的选择性仍然有待提高。

总体来说，在电缆早期火灾逸出气体检测领域，目前主流方式仍采用烟雾报警器来预警早期火灾。相较于检测电缆过热产气，检测火灾烟雾颗粒具有一定的滞后性。目前，已研制出对苯蒸汽敏感的电化学传感器，但苯蒸汽是 PVC 电缆在温度达到 200 ℃以上才大量释放的气体，不满足早期火灾预警的需要。半导体传感器(如 SnO_2)等可以检测出 PVC 电缆在 200 ℃以下过热释放的 2-EH、DOTP 等气体，有望实现更加早期的电缆火灾预警。

表 2 电缆过热气体敏感材料

Table 2 Gas-sensitive materials for cable overheating detection

敏感材料	测试气体	参文
SnO_2	DOP、2-EH、电缆过热分解气体	[63]
12 种半导体基传感器	2-EH、苯、DOTP	[22]
SnO_2	2-EH、12 种其他物质燃烧气体	[64]
ZnO	2-EH、DOP	[65]
CuO-ZnO and Cr_2O_3-ZnO	DOP、2-EH、电缆过热分解气体	[66]
SnO_2-In_2O_3-ZnO	DOP、2-EH、电缆过热分解气体	[67]

2.5 电池热失控逸出气体的敏感材料

作为锂电池热失控早期逸出的关键气体，氢气检测受到重点关注。四方光电开发了热导氢气传感器(ATRS-1010-H2)，慧闻科技开发了锂电池热失控安全监测模组(MSZ3005)，简家文团队采用 Cr 纳米颗粒修饰 Pd 膜，制备选择性极高的 H_2 敏感材料，并系统性地研究了环境湿度、O_2 含量、工作温度等因素对其气敏性能的影响[66]。

相较于 H_2、CO、CH_4 等气体，电解液蒸汽包括碳酸二甲酯(dimethyl carbonate，DMC)、碳酸甲乙酯(ethyl methyl carbonate，EMC)都会在热失控过程中大量逸出。通过监测锂电池热失控过程的电解液蒸汽变化，有望实现更加早期的故障预警。黄佳等发现铜离子有机金属框架(metal organic framework，MOF)气敏材料能够在室温下对 DMC 气体表现出极高的灵敏度，检测下限达到 5×10^{-8}[67]。Du 等基于双臂碳纳米管制备了 DMC 传感器，检测下限能达到 10^{-7}，响应时间仅 3.6 s[68]。CeO_2-In_2O_3 纳米空心球被用于制备碳酸二乙酯(diethyl carbonate，DEC)传感器，其对 DEC 的响应性能在 200 ℃时达到最佳。曾大文等研制了基于 SnO_2 材料的电解液蒸气传感器，检测限可以达到 10^{-9} 级别[69]。Su 等发现立方体 SnO_2 敏感材料对 EMC 的检测限低至 10^{-5}[70]，使用气相色谱质谱联用仪分析敏感材料的气敏机理，推测 EMC 气体分子吸附在材料表面后发生分解，中间分解产物与 SnO_2 表面吸附氧发生二次反应，因此表现出优异的气敏性能。Yan 等报道了 1 种 Fe_3O_4 纳米核壳结构材料，也可以作为高灵敏检测电解液蒸气的传感材料[71]。需要注意的是：锂电池模组通常的使用寿命长达 10 年，而且使

用过程中无法拆解。半导体型传感器的设计寿命却小于 5 年，与锂电池模组寿命不相匹配。因此，亟需研制长寿命免维护的新型半导体气敏材料或者设计气敏材料的延寿方法，满足锂电池模组长期安全监测的迫切需求。

总体来说，在锂电池热失控气体检测领域，电化学传感器可用来检测 H_2、CH_4 等还原性气体，CO_2 气体可以用固体电解质传感器进行检测。除 H_2、CH_4、CO_2 等常规气体外，电解液蒸汽被认为是热失控早期的特征气体之一，逐渐受到更多学者的关注。半导体传感器具有一定的工作温度，可以抵抗电解液蒸汽吸附产生的材料中毒效应，有望实现更加早期的热失控故障预警。

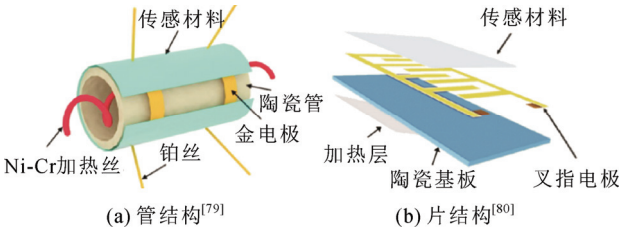
3 电力嗅觉传感器件

气体传感器是实现电力嗅觉的关键元件。目前已有的传感器主要包括电化学气体传感器、催化燃烧式传感器、光学型传感器和半导体气体传感器。其中，电化学传感器的线性度高，但内部的电解液易挥发，导致工作环境温度范围普遍较窄，使用寿命一般小于 3 年。催化燃烧型传感器的线性度高，但气体选择性非常差，在复杂气体环境中无法使用。光学型传感器依赖成本高昂的光学系统和大体积的气体吸收池，很难实现大批量分布式在线监测。相比其他类型的气体传感器，半导体气体传感器的主要优势在于成本极低、体积小、寿命较长、容易集成和工作温度范围宽。考虑到电力设备内部空间有限且监测需求量大，半导体气体传感器凭借微体积和低成本可以取得最好的应用前景。因此，本文主要围绕半导体气体传感器进行综述。

半导体气体传感器主要包括气敏材料和基底两部分结构。其中，气敏材料用来感知气体成分变化，并输出电信号。基底用来承载气敏材料，并形成检测通道。电力嗅觉传感器件的外形封装由基底决定，本文将针对现有的陶瓷基底、柔性基底、硅基底展开详细讨论。

3.1 陶瓷基底器件

作为当前应用最为广泛的电力嗅觉传感器件，半导体金属氧化物(metal oxide semiconductor，MOS)气体传感器具有工艺简单、成本低廉的显著优势[72]。早在 1968 年，日本费加罗公司就推出第 1 代基于氧化铝陶瓷管的 Taguchi 型气体传感器[73]，其代表性设计如图 5(a)所示。陶瓷管内部贯穿螺旋式加热丝，可提供 200 ℃以上的工作温度；陶瓷管外部印刷有金属电极，用于检测其表面涂覆传感浆料的电信号。



(a) 管结构[79] (b) 片结构[80]

图 5 陶瓷基底结构

Fig.5 Schematic structure of ceramic substrate

虽然管式结构的设计最大程度上保证了材料的均匀径向加热，但柱状表面不利于传感浆料的批量化涂覆，难以保证传感器的一致性。在此基础上，衍生出了基于平面陶瓷基板的传感器结构，如图 5(b)所示。陶瓷基板底部为加热器，顶部为叉指状测试电极，气敏材料涂覆在叉指电极表面即完成组装。

研究人员采用片式平面陶瓷基底开发了大量用于电力设备故障气体检测的气体传感器。例如：Chen 等将 MXene-SnO_2 材料滴涂在平面陶瓷基底上，制备了用于氢气传感的纳米复合传感器，能够快速、准确、持续地监测电池组中的氢含量，并进一步评估锂离子电池的健康状况[74]。Tang 等制备了 ZnO/MoS_2 和 Co_3O_4-Co_3S_4 异质结材料，并将其分别用于 SF_6 放电分解产物中的 SO_2 和 CO 气体检测，表现出体积分数为 10^{-9} 级的超敏感特性和优异的长期稳定性，为 SF_6 电气绝缘设备故障气体传感器的研制提供了解决方案[75]。

截至目前，陶瓷片式半导体传感器仍占据市场主导地位[76]。相较于管式结构，片式平面结构能够利用丝网印刷的方式批量沉积传感浆料以提升一致性[77]。但陶瓷基底仍存在体积较大、功耗较高(超过 400 mW)的问题[78]。

3.2 柔性基底器件

不同于以陶瓷、玻璃等为代表的刚性传感器基底，兼顾柔韧性和延展性的柔性传感基底可满足无法避免的弯曲、拉伸及折叠等特殊应用场景。与刚性陶瓷基底相似，柔性基底主要由可弯折衬底、导通电极和传感层 3 部分组成，见图 6。

柔性基底通常分为聚合物基材、纺织基材和纸基材 3 种类型，其基本参数及性能见表 3[82-84]。其中，聚酰亚胺(polyimide，PI)、聚对苯二甲酸乙二

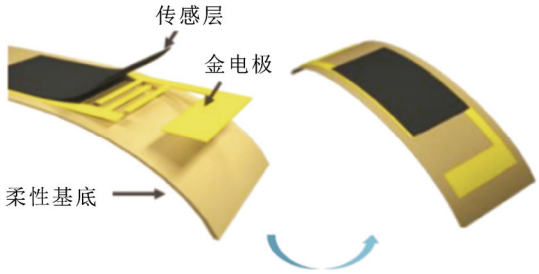


图 6 柔性基底结构[81]

Fig.6 Schematic structure of flexible substrate[81]

醇酯(polyethylene glycol terephthalate，PET)和聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane，PDMS)具有良好的机械变形特性，是当前应用最为广泛的柔性聚合物基底。Chen 等报道了基于 PI 基底的 Ti_3C_2Tx/WSe_2 传感器，对挥发性有机化合物表现出超快的响应恢复速度(9.7 s、6.6 s)[85]。Zhao 等在柔性 PI 基底上合成了高质量的 MoS_2 薄膜，在室温下对体积分数 2.5×10^{-5} 的 NO_2 气体的响应值约为 55%。经过 4000 次弯曲循环测试，该器件仍保持良好的机械稳定性[86]。沈林武等重点研究了 PET 型氢气传感器的稳定性，发现传感器性能在上百次弯折循环后未发生明显改变[87]。此外，Zhao 等研发了基于 PDMS 柔性基底的 GaSe 传感器，实现了室温下 5×10^{-10} 超低体积分数的 NO_2 气体检测[88]。综上所述，柔性气体传感器在挥发性有机物(volatile organic compounds，VOCs)、H_2、NO_2 等特征气体检测方面优势明显，证明了其在电力嗅觉传感领域具有巨大应用潜力。尽管柔性气体传感器具有成本低、体积小、灵活度高等显著优势，但仍面临诸多现实挑战。例如，气敏材料通常需要较高的工作温度，柔性基材却无法耐受高温，只能寄希望于室温气敏材料[89-90]。

3.3 硅基底器件

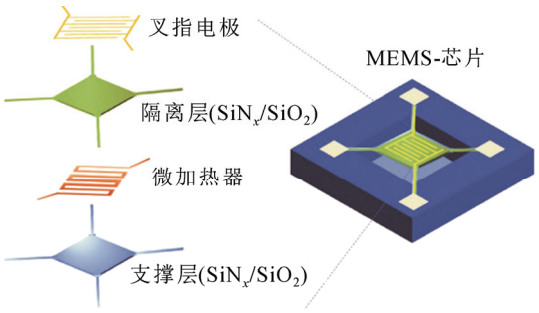
为提高器件小型化、集成化和智能化程度，人们近年来更加关注 MEMS 硅基气体传感器[91]。图 7(a)展示了典型 MEMS 器件的微热板结构，从上到下依次为气敏材料、叉指电极层、隔离层、加热层和支撑层。由于微加热器和支撑基板之间的结构差异，硅基底可分为封闭膜结构和悬空膜结构，如图 7(b)、7(c)所示。悬空膜式微热板采用四周悬梁与支撑基板连接，能够极大减小因热传导导致的热量耗散，显著降低器件功耗至 30~60 mW[92]。

微型 MEMS 传感器具有热响应速度快、易于封装集成、产品一致性好等优势，已被广泛应用于电

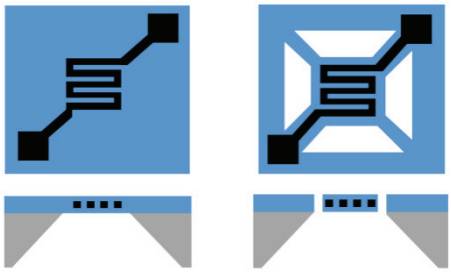
表 3 不同材质柔性基板的性能比较[85-87]

Table 3 Comparison of performance of different materials for flexible substrates

基底类型	优点	缺点	热稳定性
聚合物	柔韧性好、易加工	拉伸性差、热膨胀系数大	低于 410 ℃(PI)，低于 100 ℃(PET)
有机硅聚合物	生物相容性好、拉伸性好、柔韧性好	表面粘附性能差、热膨胀系数大	低于 100 ℃(PDMS)
纺织品	柔韧性好、耐磨透气、易加工	粗糙、拉伸性差	低于 200 ℃
纸基材	成本低廉、环保可降解	粗糙、吸湿性强	低于 100 ℃



(a) MEMS气体传感器结构[98]



(b) 封闭膜式 (c) 悬空膜式器件的原理结构[99]

图 7 MEMS 气体传感器典型结构

Fig.7 Typical structure of a MEMS gas sensor

力嗅觉检测领域。褚继峰研制了尺寸小于 3.6 mm 的 MEMS 微型传感阵列，实现了对不同故障情况下 SF_6 放电分解气体的区分[93]，结合支持向量机(support vector machine，SVM)算法实现了高达 75.23%的识别准确率[94]。Wang 等开发了基于 In_2O_3 纳米材料的 MEMS 传感器，对 NO_2 气体表现出优异的选择性，体积分数检测限低至 2.5×10^{-7}[52]。Kondalkar 等设计了体积分数 2×10^{-3} 宽量程范围的 MEMS 氢气传感器[95]。Su 等通过构建 Pt/AlGaN/GaN 三明治结构，实现了对氢气的高选择性检测[96]。Wenger 等利用 MEMS 传感器检测锂电池热失控早期产生的挥发性有机化合物，提高了电化学储能设备的安全性[97]。然而，基于悬空膜结构

的 MEMS 传感器缺少支撑，很易出现断裂、变形等问题。而且，材料热膨胀系数不匹配也会引发微热板结构变形，严重影响器件的耐久性，这是该领域亟待解决的热点问题。

3.4 集成式嗅觉传感芯片

MEMS 工艺为气体传感器指明了低功耗、微型化的发展方向，但气体传感器的正常工作仍然需要信号调理、采样、数据处理、交互通讯等外围电路模块，围绕传感器芯片所开发的气体检测装置体积很难做小。随着近年来互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor，CMOS)制造工艺的崛起，气体传感器芯片有望与其他集成电路实现一体化封装，包含信号采样、存储器、微处理器、I^2C 通讯等功能电路[100]。例如：多款温湿度传感器(德州仪器 HDC1080、盛思锐 SHT35)可以同时采样环境温度和湿度信息并转换为 I^2C 信号，实现与单片机之间的实时通讯，很容易集成在各种电子设备内部，适用于大量工业和消费电子场景[101]。在 CMOS 气体传感器领域，盛思锐还开发了集成 CO_2 气体、温度、湿度检测的传感器(SCD41)，可以对环境中 CO_2 的含量进行准确监测，并带有温度漂移补偿功能[102]。Perelló-Roig 等将 MEMS 传感器与 CMOS 集成电路相结合，采用自持振荡工作原理实现了对丙酮的特异性检测[103]，如图 8 所示。不过，现有的 CMOS 集成式传感器只能针对简单气体进行检测，电力设备故障特征气体种类繁多，亟需研制对目标气体特异性敏感的电力嗅觉传感专用芯片。

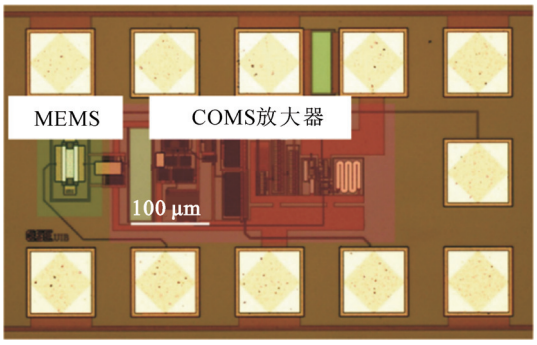


图 8 CMOS-MEMS 集成的气体传感芯片[107]

Fig.8 CMOS-MEMS integrated chip for gas sensing[107]

4 电力嗅觉智能算法

先前研究大多着重于改进气敏材料，在灵敏度提升方面不断有新成果报道[104]。然而，交叉敏感固有缺陷导致多组分气体识别研究进展缓慢[105]。生物鼻的感受器数量有限，但却具有辨别成千上万种气体的能力，这是因为大脑可以激活神经元的不同组合以辨别不同气体[106]。类似地，电力嗅觉利用气体传感器的交叉敏感特性构建阵列，获取蕴含气体信息的高维信号。为实现多组分气体识别，需采用智能算法模型来解析传感器阵列的高维信号。

4.1 基于特征工程的气体识别

影响气体识别准确率的关键是传感器信号的特征提取。如果信号特征差异较小，可能导致错误的气体识别，因此有必要从传感信号中挖掘足够的关键信息。以往研究大多将传感器的响应值(稳态特征)作为唯一特征来描述原始信号[107]，热衷于拓展阵列的规模以期获得更多信号的特征，增加气体识别结果的可靠性。

Xu 等构建了包含 10 个传感器的阵列，研究了支持向量机(SVM)、K 近邻(K-nearest neighbor，KNN)和多类逻辑回归(multinomial logistic regression，MLR)对 6 种不同气体的分类能力[108]。但该阵列不但功耗高，输出信号的相似性也导致某些气体的分类准确度较低。传感器的响应恢复曲线形态(瞬态特征)也包含了大量气体信息，Lundström 等建议将瞬态特征(响应时间、恢复时间等)也作为传感信号的描述符，有助于提升气体识别准确度[109]。褚继峰通过采集传感器信号曲线的瞬态与稳态特征，结合遗传算法-反向传播神经网络(genetic algorithm based back propagation neural network，GA-BPNN)，识别了不同组分含量的 NO_2 和 CO 混合气体，准确率达 94.55%[110]。然而，传感器时间序列信号本身维度很高，特征工程的降维操作实际上损失了大量的有用信息。

4.2 基于数据驱动的气体识别

不同于手工特征提取，数据驱动下的特征学习不依赖于特征工程进行模型训练，可以最大程度地保留传感器信号的关键信息，降低人为因素对气体识别精度的影响[111]。目前，该方法已在语音识别、图像识别、文本语言、自动驾驶等领域取得了大量成果，可以推广到电力嗅觉领域，提升气体识别精度与设备故障诊断准确率。Han 等对比了多种的深度神经网络(VGG-16、VGG-9、Resnet-18，Resnet-34 和 Resnet-50)对半导体气体传感器阵列对 CO、CH_4 和 C_2H_6 混合气体响应数据集的识别性能，验证了 Resnet-50 能够在气体识别的应用中表现出色，识别正确率达 96.67%[112]。鉴于图像数据与气体传感器

响应数据存在较大差异，采用数据垂直对齐的处理方式能够进一步增强深度神经网络对传感器阵列响应的识别性能。Peng 等通过改进 VGG-16 提出 GasNet 气体识别网络，并用商用气体传感器构建了 CO、CH_4、H_2 和 C_2H_4 的响应数据集，识别正确率达 95.2%，远超其他传统机器学习的方法[113]。Zhao 等提出 1D 深度卷积网络能够在 C_2H_4 和 CH_4、C_2H_4 和 CO 的混合气体数据集中表现出优秀的识别精度，验证了深度神经网络对高维特征的提取优势在气体识别中能发挥重要作用[114]。Zhou 等结合了卷积神经网络(convolutional neural networks，CNN)和长短期神经网络(long short-term memory，LSTM)，用以分析传感器响应。采用 4 种半导体气体传感器来识别 CO、CH_4 和 C_3H_8，取得了高于 97%的识别准确率[115]。

然而，电力设备的工作环境往往复杂多变，气体传感器的响应信号很容易受到自身漂移和外部噪声的影响。基于数据驱动的气体识别算法模型可以挖掘更深层次的信号特征，泛化能力也优于特征工程。考虑气流因素和杂质气体的影响，杨爱军提出一种基于多尺度自注意力卷积神经网络的(multiscale convolutional neural network with attention，MCNA)气体识别算法模型[116]。采用自注意力层提取气体传感器时间序列信号的深层关键特征，显著提升了算法模型的泛化能力，对混合气体识别准确率可以达到 94.98%，结构如图 9 所示。

4.3 边缘计算技术

为准确分析电力设备故障特征气体的组分含量，需构建智能化算法模型，对气体传感器芯片输出信号进行分析。然而，现有传感器装置与智能算法模型往往采用分立式设计，传感器信号需先传输至后端监测平台，再结合复杂的算法模型来解析目标气体成分[109,117]。复杂的算法模型需要借助高算力、高成本的计算平台，为应对深度学习算法模型对计算资源的巨大需求，常用方式是将深度学习模型的训练与推理部署在云端数据中心。在执行深度学习模型推理之前，移动端设备需要先将传感器数据发送至云端。然而，大量数据都通过高延迟、带宽波动的广域网传输到云端数据中心，容易造成较大的端到端延迟和较高的移动端设备能耗问题。

随着电网公司数字化、智能化建设的持续加速，边缘计算在电力设备智能化监测领域开始大量推广[118-119]。相比于云数据中心处理方式存在的瓶颈问题，边缘计算技术将模型推理过程从云端下沉到移动端，从而移动端设备上实现低时延与低能耗的传感器数据解析，国家“十四五”规划提出加强边缘计算等基础技术的研究与建设[120]。但是，传统的 ARM、DSP 系列芯片的计算资源有限，无法在复杂场景下实现对大量电力设备运维任务的全面感知与智能决策。此时，更高算力的 RK3399、Jetson Nano 等边缘计算芯片逐渐凸显出优势[121]，这也为扩大电力嗅觉应用领域奠定了技术基础。

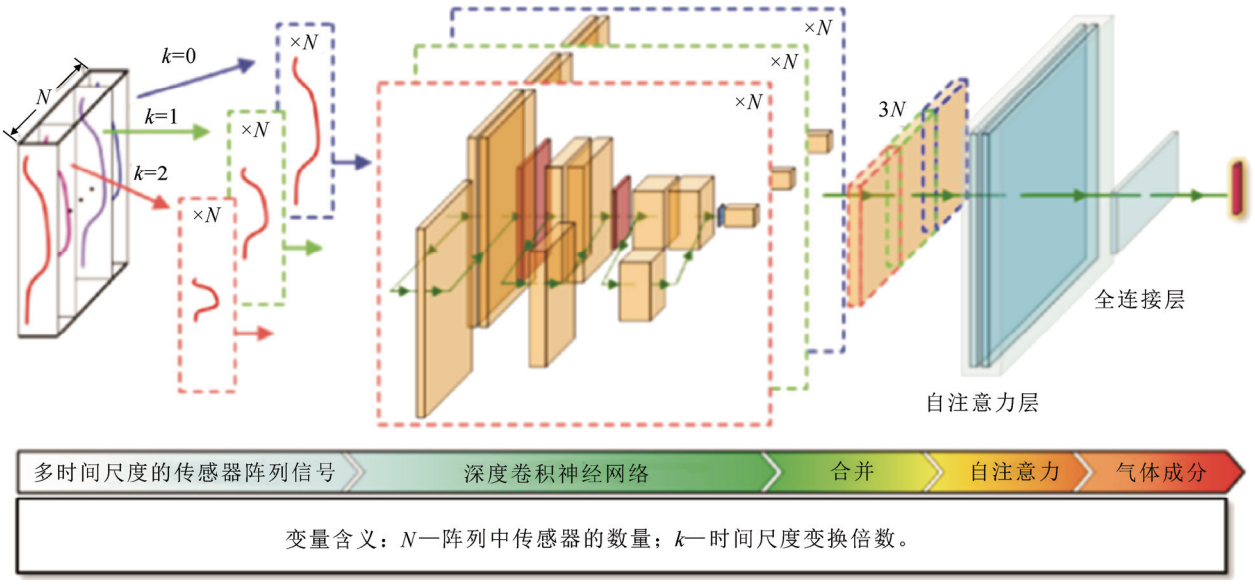


图 9 基于 MCNA 框架的气体识别模型[120]

Fig.9 MCNA framework for gas identification model[120]

5 结论

作为一种仿生传感技术，电力嗅觉已经在电力设备状态监测领域取得了一系列研究进展，包括但不限于产气机理分析、敏感材料制备、传感器件封装和嗅觉算法设计等方面。但是，受制于气敏材料筛选难、传感器大批量制造难和智能算法模型训练难等问题，电力嗅觉技术仍然有很大的提升发展空间，可以从以下方面开展相关研究工作：

1）作为电力嗅觉感知技术的理论基础，准确分析特征气体的组分含量是实现电力设备故障诊断的前提，现有研究大多采用气相色谱、红外光谱、光声光谱、质谱等方法来分析电力设备产气成分。但是，不同精密分析设备的精度、量程存在差异，不同电力设备所产生的特征分解气体组分含量也各不相同，单一的气体分析方法无法适用于所有电力设备。因此，有必要研究基于多种精密仪器融合的气体分析方法，获得更加准确的故障特征气体。

2）尽管前人已经提出大量的电力设备故障特征气体敏感材料，但新型气敏材料仍缺乏合理有效的开发流程。除高通量测试筛选方法之外，通过阐明材料气敏机理来指导材料开发，也是一种可行的研究思路。目前，气敏机理分析方法主要有第一性原理仿真计算、幂律响应推导和原位实验测试等，但不同方法之间普遍缺少交叉验证。

3）半导体气体传感器主要结构包括气敏材料和承载基底两部分。目前，大多数研究只是简单将气敏材料滴涂在承载基底表面，导致同批次半导体传感器之间的性能差异巨大，难以满足工业生产的需求。磁控溅射法可以将气敏材料均匀覆盖在基底表面，通过控制溅射功率与时长，很容易提升传感器的均一性。而且，磁控溅射是 MEMS 工艺的关键环节，有利于半导体传感器的大批量规模化制备。

4）电力嗅觉包括前端的高性能传感器与后端的智能算法模型。算法性能的关键取决于数据集的质量，必须考虑传感器运行环境对数据集的影响，以提升算法的迁移能力。此外，智能算法模型的训练大都需要借助高算力计算平台，往往与电力嗅觉传感器分离，无法满足电力设备低成本在线监测的需要。边缘计算提供了更强大的计算资源，为智能嗅觉算法模型下沉至传感监测端提供了技术支撑，更满足实际电力设备运维检修的需要。

参考文献 References

[1] 赵振兵，张 薇，翟永杰，等. 电力视觉技术的概念、研究现状与展望[J]. 电力科学与工程，2020，36(1)：1-8.
ZHAO Zhenbing, ZHANG Wei, ZHAI Yongjie, et al. Concept, research status and prospect of electric power vision technology[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(1): 1-8.

[2] 翟永杰，杨 旭，彭雅妮，等. 基于计算机听觉技术的电力设备状态监测研究综述[J]. 广东电力，2019，32(9)：24-32.
ZHAI Yongjie, YANG Xu, PENG Yani, et al. Research overview on state monitoring of electrical equipment based on computer hearing technology[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(9): 24-32.

[3] 杨天荷，陈伟根，李志军. 基于悬臂梁光纤 F-P 声传感器的光声光谱检测法及其对微量乙炔气体的检测[J]. 高电压技术，2020，46(6)：1922-1928.
YANG Tianhe, CHEN Weigen, LI Zhijun. Detection of trace ethyne by photoacoustic spectroscopy based on fiber-optic cantilever acoustic sensor[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1922-1928.

[4] 张晓星，刘 恒，张 英，等. 基于光声光谱峰面积的微量乙炔气体定量检测[J]. 高电压技术，2015，41(3)：857-863.
ZHANG Xiaoxing, LIU Heng, ZHANG Ying, et al. Quantum detection of trace acetylene gas based on the peak area of photoacoustic spectroscopy[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 857-863.

[5] 马晨曦，乔胜亚，周文俊，等. SF_6 变压器中悬浮电位放电分解气体的生成规律[J]. 高电压技术，2020，46(11)：4052-4060.
MA Chenxi, QIAO Shengya, ZHOU Wenjun, et al. Decomposed gases generated by partial discharges at floating potential defects in SF_6 gas transformers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 4052-4060.

[6] 张 英，张晓星，李军卫，等. 基于光声光谱法的 SF_6 气体分解组分在线监测技术[J]. 高电压技术，2016，42(9)：2995-3002.
ZHANG Ying, ZHANG Xiaoxing, LI Junwei, et al. On-line monitoring technology of SF_6 gas decomposition components based on photoacoustic spectroscopy[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2995-3002.

[7] 张晓星. 组合电器局部放电非线性鉴别特征提取与模式识别方法研究[D]. 重庆：重庆大学，2006.
ZHANG Xiaoxing. Study on nonlinear discriminant feature extraction and pattern recognition for partial discharge in GIS[J]. Chongqing, China: Chongqing University, 2006.

[8] 廖建平，楚金伟，王 奇，等. SF_6 分解产物测试在高压直流套管状态诊断与分析中的应用[J]. 高压电器，2017，53(6)：186-190.
LIAO Jianping, CHU Jinwei, WANG Qi, et al. Application of SF_6 decomposition products detection to state diagnosis of high-voltage DC bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 186-190.

[9] XIAO S, CHEN Y, TANG M, et al. Characteristics of perfluoromethyl vinyl ether: a new eco-friendly alternative gas for SF_6[J]. High Voltage, 2024, 9(3): 509-527.

[10] ZHANG X X, LI Y, TIAN S S, et al. Decomposition mechanism of the C5-PFK/CO_2 gas mixture as an alternative gas for SF_6[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 336: 38-46.

[11] LI Y, ZHANG X X, ZHANG J, et al. Study on the thermal decomposition characteristics of C_4F_7N-CO_2 mixture as eco-friendly gas-insulating medium[J]. High Voltage, 2020, 5(1): 46-52.

[12] FU Y W, WANG X X, WANG X H, et al. Theoretical study on decomposition pathways and reaction rate constants of C_4F_7N with O atom[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(10): 105202.

[13] 李 康，郭润睿，JAVED H，等. 空气局部放电衍生物气体生成规律的研究[J]. 电工电能新技术，2017，36(8)：1-7.
LI Kang, GUO Runrui, JAVED H, et al. Study of air by-products for-

mation characteristics under corona discharge[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(8): 1-7.

[14] 陈林聪，张晓星，裘吟君，等. 空气开关柜局部放电特征分解组分实验与仿真[J]. 南方电网技术，2016，10(9)：69-76，82.
CHEN Lincong, ZHANG Xiaoxing, QIU Yinjun, et al. Experiment and simulation on characteristic decomposition components under partial discharge in air switchgears[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10 (9): 69-76, 82.

[15] HALSTEAD W D. Thermodynamic assessment of the formation of gaseous hydrocarbons in faulty transformers[J]. Journal of the Japan Petroleum Institute, 1973, 59(9): 239-241.

[16] 杜　林，王五静，张彼德，等. 基于 ReaxFF 场的矿物绝缘油热解分子动力学模拟[J]. 高电压技术，2018，44(2)：488-497.
DU Lin, WANG Wujing, ZHANG Bide, et al. Molecular dynamics simulation of mineral insulating oil pyrolysis based on force field ReaxFF[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 488-497.

[17] 马宏忠，肖雨松，孙永腾，等. 基于 ICEEMDAN 和时变权重集成预测模型的变压器油中溶解气体含量预测[J]. 高电压技术，2024，50(1)：210-220.
MA Hongzhong, XIAO Yusong, SUN Yongteng, et al. Prediction of dissolved gas concentration in transformer oil based on ICEEMDAN and time-varying weight integrated prediction model[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 210-220.

[18] 范志远，杜　江. 基于相关变分模态分解和 CNN-LSTM 的变压器油中溶解气体体积分数预测[J]. 高电压技术，2024，50(1)：263-273.
FAN Zhiyuan, DU Jiang. Prediction of dissolved gas volume fraction in transformer oil based on correlation varia-tional mode decomposition and CNN-LSTM[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 263-273.

[19] 国家能源局. 变压器油中溶解气体分析和判断导则：DL/T 722—2014[S]. 北京：中国电力出版社，2015.
National Energy Administration. Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: DL/T 722—2014[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2015.

[20] IEC. Interpretation of the analysis of gases in transformers and other oil-filled electrical equipment in service: IEC 60599: 1978[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 1978.

[21] LIU Y, GEYIK U, KOBALD A, et al. Overheat diagnosis of power cable based on gas sensors: device/material exploration[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 350: 130837.

[22] HAN J, CHEN W J, YU A H, et al. Detection of semi-volatile plasticizers as a signature of early electrical fire[J]. Frontiers in Materials, 2019, 6: 250.

[23] 杨梦洁，杨爱军，叶奕君，等. 基于气体分析的锂离子电池热失控早期预警研究进展[J]. 电工技术学报，2023，38(17)：4507-4538.
YANG Mengjie, YANG Aijun, YE Yijun, et al. Research progress on early warning of thermal runaway of Li-ion Batteries based on gas analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4507-4538.

[24] YANG M J, RONG M Z, YE Y J, et al. Comprehensive analysis of gas production for commercial $LiFePO_4$ batteries during over-charge-thermal runaway[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108323.

[25] YANG M J, RONG M Z, PAN J B, et al. Thermal runaway behavior analysis during overheating for commercial $LiFePO_4$ batteries under various state of charges[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: 120816.

[26] 国家能源局. 防止电力生产事故的二十五项重点要求(2023 版)[EB/OL]. (2023-03-09)[2024-04-06]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-03/09/c_1310705209. htm.
National Energy Administration. 25 key requirements for preventing electricity production accidents (2023 edition)[EB/OL]. (2023-03-09)[2024-04-06]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-03/09/c_1310705209.htm.

[27] BARSAN N, KOZIEJ D, WEIMAR U. Metal oxide-based gas sensor research: how to?[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 121(1): 18-35.

[28] 刘王挺. 碳纳米管传感器及检测局部放电导致 SF_6 分解生成的组分研究[D]. 重庆：重庆大学，2010.
LIU Wangting. Study on carbon nanotubes sensor and detect SF_6 decomposition components under partial discharge[J]. Chongqing, China: Chongqing University, 2010.

[29] HUANG X, QI X Y, BOEY F, et al. Graphene-based composites[J]. Chemical Society Reviews, 2012, 41(2): 666-686.

[30] CHOI W, CHOUDHARY N, HAN G H, et al. Recent development of two-dimensional transition metal dichalcogenides and their applications[J]. Materialstoday, 2017, 20(3): 116-130.

[31] DUAN X D, WANG C, PAN A L, et al. Two-dimensional transition metal dichalcogenides as atomically thin semiconductors: opportunities and challenges[J]. Chemical Society Reviews, 2015, 44(24): 8859-8876.

[32] 泰普能量. THE-100oL 型移动式多组分 SF_6 分解产物在线监测分析系统 [EB/OL]. (2020-03-18)[2024-04-16]. http://www.p-union.cn/productinfo/1494170.html.
Theory & Practice. THE-100oL mobile multi-component SF_6 decomposition product online monitoring and analysis system[EB/OL]. (2020-03-18)[2024-04-16]. http://www.p-union.cn/productinfo/1494170.html.

[33] 国电西高公司. GDFJ-311M SF_6 气体分解产物测试仪[EB/OL]. (2019-12-13)[2024-04-16]. https://www. hvhipot. cn/product/894. html.
HV Hipot Electric. GDFJ-311M SF_6 gas decomposition products analysis device[EB/OL]. (2019-12-13)[2024-04-16]. https://www.hvhipot.cn/product/894.html.

[34] 桂银刚. 金属掺杂碳纳米管传感器检测六氟化硫分解产物的气敏特性研究[D]. 重庆：重庆大学，2017.
GUI Yingang. Gas sensing properties studies on metal doped carbon nanotubes detecting SF_6 decomposed products[J]. Chongqing, China: Chongqing University, 2017.

[35] CHU J F, WANG X H, WANG D W, et al. Highly selective detection of sulfur hexafluoride decomposition components H_2S and SOF_2 employing sensors based on tin oxide modified reduced graphene oxide[J]. Carbon, 2018, 135: 95-103.

[36] 高　新，李志慧，刘宇鹏，等. 改性石墨烯基传感器对 SF_6 分解组分 H_2S 的吸附机理及检测特性研究[J]. 电工技术学报，2023，38(13)：3606-3618.
GAO Xin, LI Zhihui, LIU Yupeng, et al. Study on adsorption mechanism and detection characteristics of modified graphene sensors for SF_6 decomposed component H_2S[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3606-3618.

[37] CHEN D C, TANG J, ZHANG X X, et al. WS_2 nanostructure-based gas sensor for SF_6 decomposition products: experimental and first-principles study[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 21(22): 20171-20176.

[38] LIU H C, ZHOU Q, ZHANG Q Y, et al. Synthesis, characterization and enhanced sensing properties of a NiO/ZnO p-n junctions sensor for the SF_6 decomposition byproducts SO_2, SO_2F_2, and SOF_2[J]. Sensors, 2017, 17(4): 913.

[39] 张晓星，吴法清，铁　静，等. 二氧化钛纳米管气体传感器检测 SF_6 的气体分解组分 SO_2F_2 的气敏特性[J]. 高电压技术，2014，

40(11)：3396-3402.
ZHANG Xiaoxing, WU Faqing, TIE Jing. TiO_2 nanotube array sensor for detecting SF_6 decomposition component SO_2F_2[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3396-3402.

[40] KIM H J, LEE J H. Highly sensitive and selective gas sensors using p-type oxide semiconductors: overview[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 192: 607-627.

[41] BÂRSAN N, HÜBNER M, WEIMAR U. Conduction mechanisms in SnO_2 based polycrystalline thick film gas sensors exposed to CO and H_2 in different oxygen backgrounds[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 157(2): 510-517.

[42] ZHENG W, XU Y S, ZHENG L L, et al. MoS_2 van der Waals p-n junctions enabling highly selective room-temperature NO_2 sensor[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(19): 2000435.

[43] KOROTCENKOV G, BRINZARI V, CHO B K. Interference effects between hydrogen and ozone in the response of SnO_2-based gas sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 243: 507-515.

[44] KO K Y, SONG J G, KIM Y, et al. Improvement of gas-sensing performance of large-area tungsten disulfide nanosheets by surface functionalization[J]. ACS Nano, 2016, 10(10): 9287-9296.

[45] WANG C, SUN R Z, LI X, et al. Hierarchical flower-like WO_3 nanostructures and their gas sensing properties[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 204: 224-230.

[46] PATRA D C, MONDAL S P. Gold nanoparticle-modified tungsten oxide flakes as nitric oxide sensor electrodes for fruit quality monitoring[J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(4): 3111-3120.

[47] 孙建平. 空气开关柜局部放电特征气体的气敏传感器研究[D]. 淄博：山东理工大学，2022.
SUN Jianping. Gas sensor study of partial discharge characteristic gas in air switchgear[D]. Zibo, China: Shandong University of Technology, 2022.

[48] 王冬瑞. 面向空气绝缘电力设备放电分解物检测的 SnS_2 基气敏传感器研究[D]. 青岛：中国石油大学(华东)，2020.
WANG Dongrui. Research on SnS_2 based gas sensors for detecting decomposed products of air-insulated power equipment[D]. Qingdao, China: China University of Petroleum (East China), 2020.

[49] SU Y J, CHEN S, LIU B H, et al. Maxwell displacement current induced wireless self-powered gas sensor array[J]. Materials Today Physics, 2023, 30: 100951.

[50] CHU J F, WANG Q Y, YANG A J, et al. Method of sieving the optimal NO_2 sensitive material[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 375: 132929.

[51] WANG Q Y, LI H Y, CHU J F, et al. Real-time monitoring of air discharge in a switchgear by an intelligent NO_2 sensor module[J]. ACS Sensors, 2023, 8(12): 4646-4654.

[52] 曾利平. 油浸式电力变压器故障诊断的研究[D]. 长沙：中南大学，2011.
ZENG Liping. Research on fault diagnosis of oil-immersed power transformer[D]. Changsha, China: Central South University, 2011.

[53] 习邓林. 变压器油中氢气检测系统研究[D]. 武汉：华中科技大学，2021.
XI Denglin. Research on detection system of hydrogen in transformer oil[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[54] KÖCK A, TISCHNER A, MAIER T, et al. Atmospheric pressure fabrication of SnO_2-nanowires for highly sensitive CO and CH_4 detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2009, 138(1): 160-167.

[55] 江　军. 基于光学传感技术的变压器油中溶解气体传感研究[D]. 北京：华北电力大学，2016：1-27.
JIANG Jun. Dissolved gases detection in power transformer oil based on optical sensing techniques[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2016: 1-27.

[56] CUI H, ZHANG X X, ZHANG G Z, et al. Pd-doped MoS_2 monolayer: a promising candidate for DGA in transformer oil based on DFT method[J]. Applied Surface Science, 2019, 470: 1035-1042.

[57] LIN H D, GUO J C, YANG D Y, et al. Pd/C-based sensor for gas sensing in transformer oil[J]. Catalysts, 2023, 13(7): 1113.

[58] LEE J H, PARK M S, JUNG H, et al. Selective C_2H_2 detection with high sensitivity using SnO_2 nanorod based gas sensors integrated with a gas chromatography[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 307: 127598.

[59] JIANG Z K, CHEN W G, JIN L F, et al. High performance acetylene sensor with heterostructure based on WO_3 nanolamellae/reduced graphene oxide (RGO) nanosheets operating at low temperature[J]. Nanomaterials, 2019, 8(11): 909-929.

[60] 刘宇鹏，侯文君，周　渠，等. 基于密度泛函理论的油中特征气体在钯掺杂 SnP_3 单层上吸附及传感性能研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(5)：2040-2049.
LIU Yupemg, HOU Wenjun, ZHOU Qu, et al. Investigation on adsorption and sensing performance of characteristic gas in oil on palladium-doped SnP_3 monolayer based on density functional theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 2040-2049.

[61] ZHANG H, ZHANG Z B, LI Z, et al. A chemiresistive-potentiometric multivariate sensor for discriminative gas detection[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 3495.

[62] ZHANG H, LI Z, YU A H, et al. Detection of 2-ethyl hexanol and dioctyl phthalate with potentiometric sensor based on ordered ZnO nanorods sensing electrode[J]. Materials Letters, 2023, 330: 133330.

[63] LI Z, HAN J, CHEN W J, et al. Detection of vapors from overheated PVC cables with modified sea urchin-like ZnO for fire warning[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 350: 130841.

[64] YI J X, CHEN W J, HAN J, et al. Sensitive and selective detection of plasticizer vapors with modified-SnO_2 hollow nanofibers for electrical fire warning[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 287: 364-370.

[65] LIU Y Y, CHEN S Q, XIAO B, et al. Ultra-large Sn_3O_4 nanosheets with Sn^{2+} defect for highly efficient hydrogen sensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2024, 401: 135025.

[66] SUN J Y, ZHANG W B, JIANG X Q, et al. Optimizing the performance of a Pd film-based room-temperature H_2 sensor by eliminating the clamping effect with Cr nanoparticles[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(4): 4051-4058.

[67] LU Y, ZHANG S Q, DAI S L, et al. Ultrasensitive detection of electrolyte leakage from lithium-ion batteries by ionically conductive metal-organic frameworks[J]. Matter, 2020, 3(3): 904-919.

[68] LI X, KANG N, WU M, et al. Diethyl carbonate (DEC) gas sensor based on CeO_2 loaded In_2O_3 hollow spheres for thermal runaway monitoring of Li-ion batteries[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2022, 61(10): 107002.

[69] WANG H J, XIONG R, CUI Z, et al. Ultrasensitive detection for lithium-ion battery electrolyte leakage by rare-earth Nd-doped SnO_2 nanofibers[J]. ACS Sensors, 2023, 8(4): 1700-1709.

[70] SU H Y, YANG H M, MA C F, et al. High response and selectivity of the SnO_2 nanobox gas sensor for ethyl methyl carbonate leakage detection in a lithium-ion battery[J]. ACS Sensors, 2024, 9(1): 444-454.

[71] ZHANG E P, YAN W J, ZHOU S Y, et al. Fe_3O_4@uio66 core-shell composite for detection of electrolyte leakage from lithium-ion batteries[J]. Nanotechnology, 2023, 34(13): 135501.

[72] LIANG Q H, ZOU X X, CHEN H, et al. High-performance formaldehyde sensing realized by alkaline-earth metals doped In_2O_3 nanotubes with optimized surface properties[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 304: 127241.

[73] WATSON J, TANNER D. Applications of the Taguchi gas sensor to alarms for inflammable gases[J]. Radio and Electronic Engineer, 1974, 44(2): 85-91.

[74] CHEN Q D, ZHANG Y, TANG M C, et al. A fast response hydrogen sensor based on the heterojunction of MXene and SnO_2 nanosheets for lithium-ion battery failure detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2024, 405: 135229.

[75] TANG M C, ZHANG D Z, SUN Y H, et al. Chemiresistive detection of SO_2 in SF_6 decomposition products based on ZnO nanorod/MoS_2 nanoflower heterojunctions: experimental and first-principles investigations[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2024, 403: 135170.

[76] 谢东成. MEMS MOS 气体传感器的低功耗及阵列化研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2021.
XIE Dongcheng. Study on low power consumption and array of MEMS MOS gas sensor[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2021.

[77] JAANISO R, TAN O K. Semiconductor gas sensors[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2013.

[78] SHARMA S, MADOU M. A new approach to gas sensing with nanotechnology[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012, 370(1967): 2448-2473.

[79] GAO X, LI F, WANG R, et al. A formaldehyde sensor: significant role of *p-n* heterojunction in gas-sensitive core-shell nanofibers[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 258: 1230-1241.

[80] WANG J X, ZHOU Q, WEI Z J, et al. Experimental and theoretical studies of Zn-doped MoO_3 hierarchical microflower with excellent sensing performances to carbon monoxide[J]. Ceramics International, 2020, 46(18): 29222-29232.

[81] 范树兴. 基于碳纳米材料/金属氧化物复合结构的低温柔性气体传感器研究[D]. 济南：山东师范大学，2023.
FAN Shuxing. Study on low temperature flexible gas sensor based on carbon nanomaterials/metal oxides composite structure[D]. Jinan, China: Shandong Normal University, 2023.

[82] PAWAR K K, KUMAR A, MIRZAEI A, et al. 2D nanomaterials for realization of flexible and wearable gas sensors: a review[J]. Chemosphere, 2024, 352: 141234.

[83] ALRAMMOUZ R, PODLECKI J, ABBOUD P, et al. A review on flexible gas sensors: from materials to devices[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 284: 209-231.

[84] BAG A, LEE N E. Recent advancements in development of wearable gas sensors[J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 6(3): 2000883.

[85] CHEN W Y, JIANG X F, LAI S N, et al. Nanohybrids of a MXene and transition metal dichalcogenide for selective detection of volatile organic compounds[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1302.

[86] ZHAO Y X, SONG J G, RYU G H, et al. Low-temperature synthesis of 2D MoS_2 on a plastic substrate for a flexible gas sensor[J]. Nanoscale, 2018, 10(19): 9338-9345.

[87] 沈林武，王一涛，梁祖源，等. 一种基于电子隧穿机制的柔性氢气传感器[J]. 传感技术学报，2020，33(2)：186-193.
SHEN Linwu, WANG Yitao, LIANG Zuyuan, et al. A flexible hydrogen sensor based on electron tunneling mechanism[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(2): 186-193.

[88] ZHAO Y F, FUH H R, COILEÁIN C Ó, et al. Highly sensitive, selective, stable, and flexible NO_2 sensor based on GaSe[J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(4): 1901085.

[89] 赵连家. 聚合物/MXene 复合材料制备及其柔性传感性能研究[D]. 长春：吉林大学，2023.
ZHAO Lianjia. The preparation of polymer/MXene composites and studies of their flexible sensing performance[D]. Changchun, China: Jilin University, 2023.

[90] 徐 浩. $Ti_3C_2T_x$ 基传感器集成及人机交互应用研究[D]. 长春：吉林大学，2023.
XU Hao. Research on integration and human-machine interaction of $Ti_3C_2T_x$ based sensor[D]. Changchun, China: Jilin University, 2023.

[91] ZHAO Y X, ZHANG H H, ZHANG S C, et al. Toward highly trustable miniaturized semiconductor gas sensors[J]. Matter, 2022, 5(7): 1985-1989.

[92] HSUEH T J, PENG C H, CHEN W S. A transparent ZnO nanowire MEMS gas sensor prepared by an ITO micro-heater[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 304: 127319.

[93] CHU J F, YANG A J, WANG Q Y, et al. Multicomponent SF_6 decomposition product sensing with a gas-sensing microchip[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2021, 7: 18.

[94] CHU J F, WANG Q Y, LIU Y Y, et al. Fault diagnosis of SF_6-insulated equipment by micro gas sensor array[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 222-230.

[95] KONDALKAR V V, PARK J, LEE K. MEMS hydrogen gas sensor for in-situ monitoring of hydrogen gas in transformer oil[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 326: 128989.

[96] SU H, WANG Y K, XU F, et al. Dual-gas sensor based on the Pt NPs/AlGaN/GaN high electron mobility transistor for H_2 and NH_3 gases detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(1): 92-100.

[97] WENGER M, WALLER R, LORENTZ V R H, et al. Investigation of gas sensing in large lithium-ion battery systems for early fault detection and safety improvement[C]//Proceedings of IECON 2014 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Dallas, USA: IEEE, 2014: 5354-5659.

[98] 尹嘉琦，沈文锋，吕大伍，等. 金属氧化物半导体 MEMS 气体传感器研究进展[J]. 材料导报，2024，38(1)：22070075.
YIN Jiaqi, SHEN Wenfeng, LÜ Dawu, et al. Advances in MEMS gas sensors based on metal-oxide semiconductor materials[J]. Materials Reports, 2024, 38(1): 22070075.

[99] 艾治州. 硅基 MEMS 气体传感器研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2019.
AI Zhizhou. Study of silicon-based MEMS gas sensor[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2019.

[100] GARDNER J W, GUHA P K, UDREA F, et al. CMOS interfacing for integrated gas sensors: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(12): 1833-1848.

[101] 德州仪器. 2% RH 低功耗数字相对湿度传感器(HDC1080DMBR)[EB/OL]. (2016-01-27)[2023-03-16]. https://www.ti.com.cn/product/cn/HDC1080/part-details/HDC1080DMBR.
Texas Instruments. 2% RH low-power digital relative humidity sensor (HDC1080DMBR)[EB/OL]. (2016-01-27) [2024-03-16]. https://www.ti.com.cn/product/cn/HDC1080/part-details/HDC1080DMBR.

[102] 盛思锐公司. 新一代微型 CO_2 传感器[EB/OL]. (2021-10-01)[2024-04-16]. https://sensirion.com/cn/products/product-catalog/SCD41.
Sensirion. New generation of micro CO_2 sensors[EB/OL]. (2021-10-01) [2024-04-16]. https://sensirion.com/cn/products/product-catalog/SCD41.

[103] PERELLÓ-ROIG R, VERD J, BOTA S, et al. CMOS-MEMS VOC sensors functionalized via inkjet polymer deposition for high-sensitiv-

ity acetone detection[J]. Lab on a Chip, 2021, 21(17): 3307-3315.
[104] YANG A J, WANG D W, WANG X H, et al. Recent advances in phosphorene as a sensing material[J]. Nano Today, 2018, 20: 13-32.
[105] HU W W, WAN L T, JIAN Y Y, et al. Electronic noses: from advanced materials to sensors aided with data processing[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(2): 1800488.
[106] 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.
[107] DUTTA L, TALUKDAR C, HAZARIKA A, et al. A novel low-cost hand-held tea flavor estimation system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 4983-4990.
[108] XU M, WANG J, GU S. Rapid identification of tea quality by E-nose and computer vision combining with a synergetic data fusion strategy[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 241: 10-17.
[109] EKLÖV T, MÅRTENSSON P, LUNDSTRÖM I. Enhanced selectivity of MOSFET gas sensors by systematical analysis of transient parameters[J]. Analytica Chimica Acta, 1997, 353(2/3): 291-300.
[110] CHU J F, LI W J, YANG X, et al. Identification of gas mixtures via sensor array combining with neural networks[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 329: 129090.
[111] SHANG C, YANG F, HUANG D X, et al. Data-driven soft sensor development based on deep learning technique[J]. Journal of Process Control, 2014, 24(3): 223-233.
[112] HAN L, YU C C, XIAO K T, et al. A new method of mixed gas identification based on a convolutional neural network for time series classification[J]. Sensors, 2019, 19(9): 1960.
[113] PENG P, ZHAO X J, PAN X F, et al. Gas classification using deep convolutional neural networks[J]. Sensors, 2018, 18(1): 157.
[114] ZHAO X J, WEN Z H, PAN X F, et al. Mixture gases classification based on multi-label one-dimensional deep convolutional neural network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 12630-12637.
[115] YANG G, SONG R J, WU Y, et al. An algorithm based on transformer and temporal convolution network for early identification of ternary gas mixture[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(19): 23753-23764.
[116] PAN J B, YANG A J, WANG D W, et al. Lightweight neural network for gas identification based on semiconductor sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 2500908.
[117] REN W J, ZHAO C H, NIU G Q, et al. Gas sensor array with pattern recognition algorithms for highly sensitive and selective discrimination of trimethylamine[J]. Advanced Intelligent Systems, 2022, 4(12): 2200169.
[118] 何 楠，刘弘景，刘宏亮，等. 配网设备局部放电边缘侧精简特征提取与短报文传输技术研究[J]. 电工电能新技术，2024，43(1)：95-104.
HE Nan, LIU Hongjing, LIU Hongliang, et al. Research on edge-side simplified feature set extraction and short message transmission mechanism for partial discharge of distribution network equipment[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(1): 95-104.
[119] 李 鹏，刘 念，胡秦然，等. “新型电力系统数字化关键技术综述”专辑评述[J]. 电力系统自动化，2024，48(6)：1-12.
LI Peng, LIU Nian, HU Qinran, et al. Commentary on special issue of reviews on key technologies for digitalization of new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 1-12.
[120] 中央网络安全和信息化委员会办公室. “十四五”国家信息化规划[EB/OL]. (2022-01-19)[2024-04-16]. https://www.cac.gov.cn/2022-01/19/c_1644194876070929.htm?eqid=c89fa0ef000cc29d0000000364476b7a&eqid=c9019b5900049c85000000036497bac0.
Office of the Central Cyberspace Affairs Commission. The 14th five year plan for national informatization[EB/OL]. (2022-01-19)[2024-04-16]. https://www.cac.gov.cn/2022-01/19/c_1644194876070929.htm?eqid=c89fa0ef000cc29d0000000364476b7a&eqid=c9019b5900049c85000000036497bac0.
[121] 古宇轩. 基于RK3399Pro的人员检测和计数系统的研究与实现[D]. 南京：南京邮电大学，2023.
GU Yuxuan. The research and implementation of human detection and counting system based on RK3399Pro[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.



杨爱军
1986—，男，博士，教授，博导
主要从事电力设备状态监测、智能传感、微能量收集方面的研究工作
E-mail: yangaijun@mail.xjtu.edu.cn

YANG Aijun
Ph.D., Professor



褚继峰(通信作者)
1993—，男，博士，助理教授，硕导
主要从事电力设备状态监测与故障诊断、电力嗅觉传感方面的研究工作
E-mail: jfchu93@xjtu.edu.cn

CHU Jifeng
Ph.D.
Corresponding author



荣命哲
1963—，男，博士，教授，博导
主要从事电弧电接触、大容量直流开关设备、电力设备状态监测方面的研究工作
E-mail: mzrong@mail.xjtu.edu.cn

RONG Mingzhe
Ph.D., Professor

收稿日期 2024-04-28 修回日期 2024-07-26 编辑 卫李静