

柔性传感器在智能网联汽车上的应用与发展

马雪 孙东睿 金科 王雪 孙相超 于姚

(高端汽车集成与控制全国重点实验室, 长春 130013)

摘要: 通过将柔性传感器集成于汽车座椅、转向盘及动力系统零部件, 可实时监测驾乘人员生理指标(心率、呼吸)与车辆健康状态。系统综述了柔性传感器在智能汽车中的环境感知(如车内气体监测)、人机交互(如触控反馈、智能座舱感知)两大应用场景, 重点解析了柔性压力传感器三大核心技术路线: 基于压阻式原理的纳米复合材料传感器、基于电容式原理的多孔型离子凝胶传感器和基于压电式原理的高分子聚合物传感器, 深入研究了各技术路线的信号转换机制, 为构建智能汽车多模态感知网络提供了理论支持。

关键词: 柔性 气体传感器 压力传感器 智能汽车

中图分类号: U463.6 文献标志码: B DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250021

Application of Flexible Sensors in Intelligent Connected Vehicle and Development

Ma Xue, Sun Dongrui, Jin Ke, Wang Xue, Sun Xiangchao, Yu Yao

(National Key Laboratory of Advanced Vehicle Integration and Control, Changchun 130013)

Abstract: By integrating flexible sensors into automotive seats, steering wheels, and powertrain components, it is possible to monitor the occupants' physiological indicators (heart rate, respiration) and vehicle health status in real-time. This paper systematically reviews 2 major application scenarios of flexible sensors in intelligent vehicles: environmental perception (e. g., in-cabin gas monitoring) and human-machine interaction (e. g., haptic feedback, intelligent cockpit perception). It further analyzes 3 core technical routes of flexible pressure sensors: nanocomposite-based piezoresistive sensors, porous ionogel-based capacitive sensors, and polymer-based piezoelectric sensors. The study delves into signal transduction mechanisms for each technical route, providing theoretical support for constructing multi-modal perception networks in intelligent vehicles.

Key words: Flexible, Gas sensor, Pressure sensor, Intelligent vehicle

1 前言

汽车传感器负责监测和传输车辆运行过程中的各种工况信息, 确保汽车处于最佳工作状态, 直接影响汽车的智能化程度。随着材料科学的进步, 构成柔性传感器的柔性基板材料、传感材料和电极材料不断涌现, 这些新材料具有良好的柔韧性、延展性和导电性, 使柔性传感器能够紧密贴合于汽车的各种复杂曲面, 实现高精度和高灵敏度

的检测。在智能座舱领域, 柔性传感器还可集成到座椅、转向盘等部件中, 实现乘员生理数据的实时监测和个性化调节。多样化的应用场景为柔性传感器在汽车领域的发展提供了广阔的市场空间。

本文回顾柔性气体传感器和柔性压力传感器的种类、工作原理及其在汽车上的应用, 并设想未来的应用场景, 以期为推动汽车制造技术的创新与发展提供参考。

作者简介: 马雪(1996—), 女, 工程师, 博士学位, 研究方向为汽车柔性电子、柔性光伏。

参考文献引用格式:


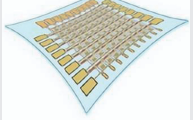
马雪, 孙东睿, 金科, 等. 柔性传感器在智能网联汽车上的应用与发展[J]. 汽车工艺与材料, 2025(7): 31-38.

MA X, SUN D R, JIN K, et al. Application of Flexible Sensors in Intelligent Connected Vehicle and Development[J]. Automobile Technology & Material, 2025(7): 31-38.

2 柔性传感器的技术概述

传统的刚性传感器通常由具有刚性基板或支架的半导体材料构成,无法适应复杂工况或形状不规则表面,极大制约了其在柔性、智能领域的发展。相比之下,柔性传感器凭借其机械柔韧性与可拉伸性、形貌适应性以及制造上的可扩展性,能够测量动态物体、形状变化的物体以及大面积的非平面区域。表1对刚性传感器与柔性传感器的机械性能进行了简要概括。柔性传感器具有良好的力学和机械性能,能够适应各种复杂场景,并与人类安全互动,从而将物理化学刺激转化为可量化的电信号,例如电容、电压和电阻等,在电子皮肤、人体交互、汽车柔性电子等领域广泛研究。

表1 刚性传感器和柔性传感器的机械性能参数^[1]

参数	刚性传感器	柔性传感器
外观		
拉伸率/%	<1	0~1 000
弹性模量/GPa	1~200	$1 \times 10^{-5} \sim 200$
表面形貌适应性	无法适应不规则表面	可适应不规则表面
机械形变	无法产生机械形变	可产生机械形变
制备方法	微机电系统技术	打印、微机电系统技术
尺寸/m ²	0.01~0.1	1~100
单位面积的成本	高	低
碳足迹	高	低
应用	智能手机、自动驾驶汽车、工业机器人等	皮肤贴片、智能纺织品、工业贴纸传感器、汽车柔性电子等

2.1 柔性传感器的基本结构

柔性传感器主要包括柔性基底、传感材料和柔性电极,彼此之间共同协作,以实现传感器对物理或化学信号的精确测量。

柔性基底通常需要能够承受较高的应变,能够贴附在各种形状的基底表面,为柔性传感器提供稳定支撑和保护。除自身的柔性外,还需考虑材料的热稳定性、透光率、电气特性和化学稳定性等。常见的柔性基底材料有聚二甲基硅氧烷

(Polydimethylsiloxane, PDMS)、热塑性聚氨酯弹性体(Thermoplastic Polyurethane, TPU)、聚酰亚胺(Polyimide, PI)、聚醚醚酮(Polyether Ether Ketone, PEEK)、聚醚砜(Polyethersulfone, PES)、聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)、聚萘二甲酸乙二醇酯(Polyethylene Naphthalate, PEN)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene Terephthalate, PET)和各类水凝胶材料等。

传感材料是柔性传感器中感受外部环境刺激并作出响应的核心部分,需要具备良好的灵敏度,以便准确感知和区分特定的物理或化学变化。传感材料主要包括碳族材料(碳纳米管和石墨烯)、金属氧化物、金属硫化物、金属纳米线(银纳米线、铜纳米线)、导电聚合物(聚苯胺、聚吡咯)以及压电材料(聚偏二氟乙烯(Polyvinylidene Fluoride, PVDF)及其共聚物)等。石墨烯是由二维碳原子单层构成的单原子厚蜂窝状结构,具有较大的表面体积比和较高的导电率,因此适用于超灵敏检测。将利用石墨烯开发的纳米涂层集成到气敏传感器的电路中,大幅提升了气体传感器的分子响应度。高导电性材料通过优化纳米材料界面的电子传输效率,有效提升传感器的灵敏度。金属纳米线具有良好的电导率、光学透明度和高延展性,能够在高度扭曲及多次循环测试试验中保持良好的导通效果。因此,金属纳米线基柔性传感器在人机交互中具有重要的研究价值。

电极材料通常具有良好的导电性、柔韧性和可靠性,能够确保将传感材料感知的信号转化为电信号输出,再进行后续的处理和分析。常见的导电材料有氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)和金属薄膜。

2.2 柔性传感器的制造工艺

由于柔性传感器需要适应复杂曲面和动态形变的应用场景,对制备工艺有特殊的要求。理想的制备工艺应具备高精度、高分辨率、低成本、高效率以及良好的材料兼容性等。

数字光处理(Digital Light Processing, DLP)三维打印技术具有较高的成型精度,能够打印具有表面微结构的敏感元件,近年广泛应用于柔性材料的成型制造^[2]。如图1a所示,该技术利用投影仪

投射紫外线,使光敏树脂中的低分子量材料发生交联固化,转变为高分子量聚合物。在数字光处理器的控制下,紫外光以面投射的方式逐层照射出参考模型的横截面图案,通过逐层打印固化,最终构建出完整的三维模型。DLP打印技术不仅具有高精度的成型能力,且打印速度极快,有效降低了能源消耗。然而,该技术在应用过程中也存在一定的局限性,例如,打印机光源输出的光波波长是固定的,无法调节以适应不同光敏树脂的特性需求。此外,为保证树脂能够充分覆盖打印区域,可加工材料需选择流动性良好的光敏树脂。

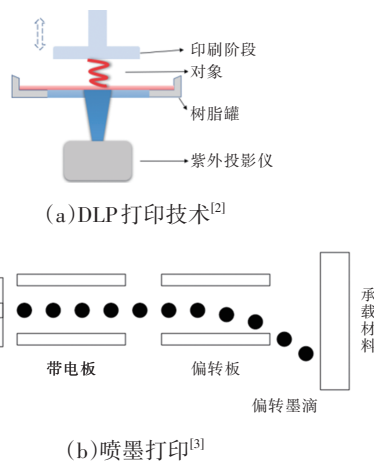


图1 DLP打印与喷墨打印技术原理

丝网印刷是采用由丝线交织组成的网格为模板,将油墨或其他印刷材料推印到基材表面的印刷工艺。用于印刷的导电油墨具有一定的流动性和黏附性,通常由导电复合材料与其他添加剂混合而成。导电复合材料包括导电颗粒(如炭黑、金属颗粒等)以及聚合物基质。印刷时,在网版下放置印刷基板,网版一端涂覆印刷浆料,使刮板以一定角度施加均匀的力,匀速移动到网版的另一端,印刷材料通过网格渗透在基材上形成各种图案。该印刷方式适用于各种柔性基板,包括纸张、金属、布料、塑料等。丝网印刷工艺简单、设备成本低、印刷速度快,广泛应用于广告印刷、柔性电子电路等领域。然而,丝网印刷技术打印精度相对较低,难以印刷微米级别的精细结构,可能难以适配高精度、高灵敏度的柔性传感器的制造。

喷墨打印技术可利用计算机和打印机通过喷嘴按照特定墨量和频率将墨水喷射到柔性基材表面,形成稳定的图形。如图1b所示,打印机通过电

泵对墨水施加一定的力,将墨水压入喷头中,利用振荡器将墨水均匀切割为分散的液滴,液滴首先进入充电板进行充电,随后带电液滴进入偏转板,由于液滴带电量不同,液滴的运动轨迹发生不同角度的偏转,最终在柔性基板上形成不同的形状^[3]。当打印复杂图案时,可添加多个偏转电场,实现液滴的多维偏转。喷墨打印所用的有机墨水和金属墨水可通过溶液法获得,打印效率高,可用于大批量打印。然而,喷墨打印对墨水的控制难度较大,设备成本较高。

3 柔性传感器在汽车中的应用

在汽车行业,柔性传感器逐渐成为气体环境监测、精密设备触控、智能座舱感知的重要工具,其与多种材料的兼容性有效降低了制造成本;同时,得益于有机分子的高度柔韧性和可拉伸性,柔性传感器能够在复杂场景作业;其快速响应和及时反馈的能力大幅提升了检测效率和精度。柔性传感器种类较多,按照用途可分为柔性气体传感器和柔性压力传感器。

3.1 柔性气体传感器

柔性气体传感器常用于检测挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)及有毒气体。半导体二维纳米材料具有较大的比表面积,为气体分子提供了许多吸附位点,且展现出卓越的机械柔韧性和结构稳定性,即使在经历拉伸、弯曲和折叠后仍能维持优异的物理化学性能^[4]。2000年,Novoselov等首次从石墨中剥离出石墨烯^[5]。石墨烯不仅有较大的比表面积,还具备卓越的导电性和导热性,能够在室温下稳定运行,是构建高性能柔性气体传感器的极具潜力的材料。其他二维纳米材料,如MXene、六方氮化硼(h-BN)、石墨相氮化碳(g-C₃N₄)和二维过渡金属二硫化物(TMDs)同样具有独特的电子结构、表面化学和机械性能,在低温操作环境的柔性气体传感领域展现出广阔的应用前景^[6]。

柔性气体传感器具有良好的柔韧性和延展性,可紧密贴合在转向盘上,实时检测驾驶员呼出气体的酒精浓度,及时制止酒驾行为。由于人体呼出的气体浓度较低,仅在 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6}$ 范围

内^[7],因此,该气体传感器需要具备较高的灵敏度。Chen等^[8]通过氟烷基硅烷对MXene进行表面修饰,成功提升了材料的疏水性、机械稳定性以及气敏性能。其在PI衬底上制备的MXene传感器对乙醇分子表现出极高的灵敏度,在室温下的响应范围为 $6 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ 。随后,Li等^[9]发现在MXene前驱体溶液刻蚀过程中,层间铝被去除,-F、-O、-OH被引入刻蚀的纳米片表面,用碳酸氢钠处理分层的MXene可加速-F末端的取代,仅保留纳米片。经过三甲基乙酸酐修饰后,MXene的形貌呈现出卷曲多孔的骨架。末端修饰的MXene柔性气体传感器对乙醇的灵敏度提高为原来的5倍,同时对水蒸气的响应降低了71%。基于MXene的柔性气体传感器能够实时监测吸入的乙醇气体浓度,由于减少了湿度的干扰,增强了对VOCs的响应能力。未来,随着智能汽车的快速发展,柔性气体传感器不仅可用于酒精浓度检测,还可检测甲醛、一氧化碳等有害气体。

3.2 柔性压力传感器

柔性压力传感器的工作原理通常是将外界的压力变化转换为电信号,转换过程通常基于材料的电阻、电容和电压的变化。由于人体绝大多数生命体征,如心跳、脉搏、呼吸等均会产生压力信号,所以柔性传感器有望在人体生理数据监测、手势识别和触摸控制等方面大范围应用。根据传感器机理不同,柔性压力传感器主要分为柔性压阻式传感器、柔性电容式传感器和柔性压电式传感器,如图2所示。

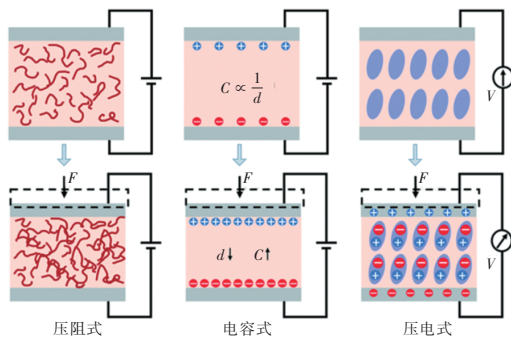


图2 典型的柔性压力传感器的工作原理^[10]

3.2.1 柔性压阻式传感器

压阻式传感器的原理是利用电极之间的压阻层将外界施加的压力信号转换为电阻^[11-13],具有灵敏度高、测量范围广、寿命长、结构简单、易于集成

的优点^[14]。当柔性材料受到外部压力时,其内部的导电网络结构发生变化,导致电阻改变,其电阻由电极与压阻层之间的接触电阻、压阻层材料和电极的内阻决定,压阻材料的电阻计算如下:

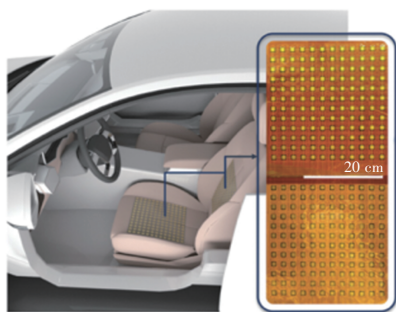
$$R = \rho L / S \quad (1)$$

式中: R 为压阻材料的电阻, ρ 为压阻材料的电阻率, L 为压阻材料的有效长度, S 为压阻材料的横截面积。

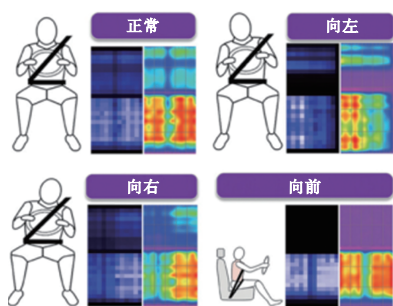
驾驶员疲劳和分心一直是交通事故的重要原因,驾驶员监控系统可提供驾驶员状态信息,有效保证驾人员乘人员安全^[15-16]。通过部署在驾驶员座椅上的压阻式传感器对车辆运行过程中疲劳引起的位置和姿势变化进行预测分析,从而检测驾驶员疲劳状态^[17-18]。因此,需要对座椅上的压力分布进行高分辨率映射并对其变化进行实时分析,以实现更高的姿势识别精度。压力传感矩阵是将多个压力传感器集成,能够更加精准地映射和追踪压力信息。Ren等^[19]基于MXene/海绵压阻式传感器提出了一种具有互补性能的八阵列背域传网络。仿生压阻传感器能够覆盖背部区域,捕捉脊柱运动,用于脊柱行为监测,该传感器在低应变范围内的灵敏度为 $1.3 \times 10 \text{ kPa}^{-1}$ 。

Chen等^[20]提出了一种基于热压聚酰胺-酰亚胺(Hot-pressed Polyamide-Imide, H-PAI)纤维与聚合物半导体聚苯胺(Polyaniline, PANI)的高度稳定且可恢复的柔性压阻式传感器矩阵。通过刚性苜蓿基团修饰聚酰胺-酰亚胺(Polyamide-Imide, PAI)纤维并热压,PAI的抗蠕变和抗松弛特性增强,改善了传感器的可恢复性和灵敏度。PANI通过在化学界面与PAI键合,制备PANI@PANI纤维压阻复合材料。纳米结构的PANI可改善纤维在压力载荷下的摩擦特性,增强传感器的形变恢复能力和信号输出稳定性。如图3a所示,将2个压力传感矩阵集成到汽车座椅的座垫和靠背中,模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)采集到的数据是一个 12×24 的阵列,经归一化后输入卷积神经网络中。通过卷积层提取数据特征,输出坐姿的分类结果,包括正常、左倾、右倾和前倾(图3b)。该压力传感器矩阵坐姿识别准确率达100%,灵敏度高达 35.3 kPa^{-1} ,响应时间为43 ms。未来可在

转向盘外圈下侧部署压力传感器矩阵,通过检测驾驶员的抓握力协助检测驾驶员的疲劳状态,有效提高行车安全系数。



(a)压力传感器矩阵



(b)不同坐姿的压力映射

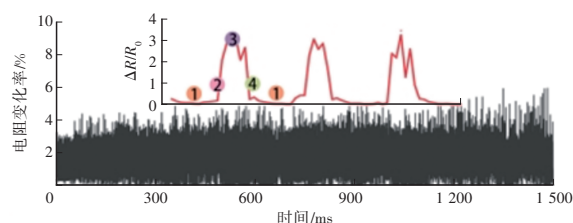
图3 汽车座椅中的压力传感器^[20]

轮胎作为车辆与路面接触的唯一部件,支撑着车辆的质量和负载,并传递车辆的驱动力、制动力和转向力。轮胎的结构变形和温度直接影响车辆的安全,因此,轮胎的健康监测尤为重要。He等^[21]报道了一种夹层结构的柔性传感器,该传感器具有碳纳米管/石墨烯自组装导电网络和柔性防护基底。双导电网络结构的设计原理是利用不同尺寸的导电材料在拉伸时的电阻变化率($\Delta R/R_0$)不同:丁腈橡胶-石墨烯的导电网络在拉伸时易产生微裂纹,电阻大幅增加;丁腈橡胶-碳纳米管的导电网络表现出高度的相互解缠,能在大应变下保证导电路径的完整性。交错的碳纳米管和石墨烯的协同传感层确保了导电通路的连续性,并提供了热监测能力。因此,碳纳米管-石墨烯的组合使传感器具有高灵敏度和较大的工作范围。如图4a所示,研究人员将传感器粘贴在轮胎侧壁上进行了循环加载-卸载测试,由于侧壁变形在轮胎运行过程中呈周期性变化,为定量比较传感器的信号响应,对轮胎上的4个特征位置(上、下、左、右)进行监测。如图4b所示,位置1的信号响应变化

幅度最小,位置2和位置4的信号响应变化幅度相似(由于轮胎结构对称),而位置3的电阻变化率 $\Delta R/R_0$ 最大,因为该位置直接承受负载。试验结果与有限元分析结果相似(轮胎在空间中的变形分布)。柔性压阻式传感器可通过简单的数据转换监测轮胎负载和结构健康。



(a)智能轮胎滚动测试系统



(b)轮胎以平均2 km/h的速度滚动

图4 轮胎中柔性传感器的可靠性测试^[21]

3.2.2 柔性电容式传感器

电容式传感器主要采用具有微小间隙的平行板电容器结构,能够将压力变化转换为电容的变化。平行板电容器的电容 C 计算如下:

$$C = \epsilon_0 A / d \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为介电常数, A 为两极板的正对面积, d 为两极板之间的间距。

当传感材料受到压力而发生形变时,电极板的间距和正对面积会发生变化,进而实现对压力的精确测量。电容式传感器具有响应速度快、能耗低、压力范围宽、耐用性强的优势。

Kwon等^[22]开发了一种用于压力检测的多孔型离子凝胶,即使在压力很低的情况下,多孔电离凝胶的孔隙也会有效闭合而变形。同时,压力引起凝胶与电极之间的接触面积变化,从而使电容变化。随后,Zammali等^[23]将具有高介电常数的软介电凝胶与离子导体集成,制备的新型电容式传感器的压强检测下限低至0.2 Pa,当压强低于1.2 kPa时,传感器的灵敏度为 4.2 kPa^{-1} ,响应时间为13 ms。基于对压力的超灵敏响应,电容式传感器可用于精确检测来自声波、脉冲和气流的微弱信号,在语

音识别和气体泄漏预防方面具有重要作用。

3.2.3 柔性压电式传感器

压电式传感器可将机械变量(位移或力)转换为电信号(电荷或电压),具有自供电、成本低、响应速度快的优势,非常适用于低功率车载电子设备^[24-25]。在外界压力作用下,压电晶体材料内部偶极矩发生极化,在晶体中分离出正、负电荷,从而产生电势差^[26]。传统的无机压电材料,如钛酸钡(BaTiO_3)、锆钛酸铅($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$)等色散弱,无法充分极化。Liu等采用MXene修饰 BaTiO_3 表面,并将其与聚偏氟乙烯-三氟乙烯(PVDF-TrFE)进行复合,结构如图5所示^[27]。通过静电纺丝法制备了 $\text{BaTiO}_3/\text{MXene}/\text{PVDF-TrFE}$ 复合薄膜,并将其应用于压电式压力传感器。研究发现,该MXene改性策略能够有效增强 BaTiO_3 在PVDF-TrFE基体中的分散性,显著提高极化效率,增强传感器的压电性能。

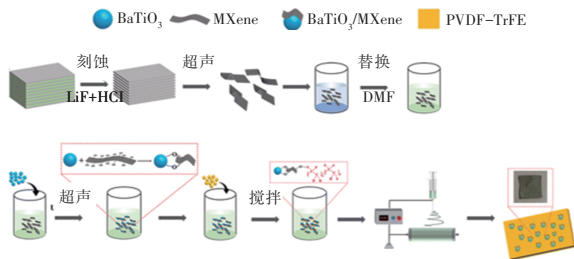


图5 Mxene纳米片与 $\text{BaTiO}_3/\text{MXene}/\text{PVDF-TrFE}$ 复合薄膜制备^[27]

此外, BaTiO_3 等传统无机压电材料非常坚硬且相对致密,难以变形贴合在曲面上。PVDF是一种具有优异延展性和生物兼容性的聚合物,具有较大的压电灵敏度、化学稳定性和机械柔韧性^[28-30]。Cao等开发了一种具有夹层结构的压电压力传感器。该传感器的中间层填充了柔韧性极佳的PDMS,而上层和下层则分别填充了聚偏氟乙烯-三氟乙烯(Poly(Vinylidene Fluoride-Trifluoroethylene), P(VDF-TrFE))和 BaTiO_3 ,结构如图6所示^[31]。通过界面极化技术,实现了上、下压电薄膜之间偶极子的定向排列,从而提高传感器的压电输出和灵敏度。该传感器能有效区分不同的身体运动、面部微表情以及喉咙振动,可应用于智能座舱交互系统,通过捕捉喉咙振动和细微语音变化,提高语音助手的准确性,同时分析面部

微表情以提供个性化驾乘体验。在驾驶员监测系统,该传感器能用于监测驾驶员的疲劳状态和注意力分散情况。此外,在健康监测系统中,该传感器能用于持续监测驾乘人员的心率、呼吸等生理状态和情绪变化,提供全面的健康管理与安全保障。

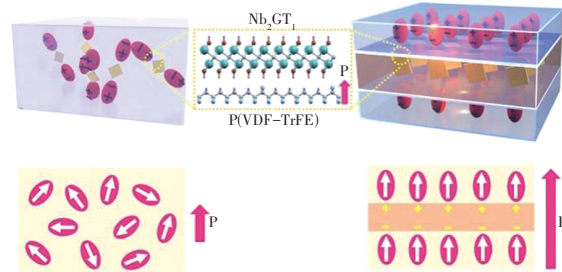


图6 单层和夹层结构薄膜中界面极化形成的偶极子排列示意^[31]

4 结束语

随着汽车智能网联化的发展,柔性传感器在未来汽车的智能生态服务领域展现出巨大的应用潜力。例如,与传统的人机界面(Human Machine Interface, HMI)相比,柔性压力传感器能够更自然地感知用户的动作和状态,提高交互的准确性和易用性,与柔性触摸屏结合可达到更好的效果。在智能座舱中,柔性传感器可集成到汽车的座椅、触控装置等部件中,实时监测驾乘人员的呼吸频率、心跳、脉搏等生理指标。在汽车制造过程中,柔性传感器可紧密贴合到复杂零部件的表面,实时监测工艺质量,确保汽车制造的精度和可靠性,不仅提高了生产效率,还为汽车制造业的智能化升级奠定了基础。

然而,目前柔性传感技术仍处于发展阶段,还存在明显的不足。未来,柔性传感器的发展方向应着重于以下方面:首先,提高传感器的灵敏度和响应速度,以便能够更精准地感知人体的细微动作;其次,降低制造成本,提升生产效率和产量,以更好地满足市场需求;最后,积极开发新材料和制造工艺,提高器件的使用寿命和可靠性。随着技术的不断进步和应用领域的不断拓展,柔性传感器必将成为未来汽车智能化发展过程中的中流砥柱,助力实现更加智能化和人性化的操作体验。

参考文献:

[1] LUO Y F, ABIDIAN M R, AHN J-H, et al. Technology

- Roadmap for Flexible Sensors[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(6): 5211–5295.
- [2] 严宏浩. 基于DLP三维打印的柔性压力传感器设计及制作研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [3] 张帆. 基于喷墨打印柔性传感技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [4] WANG S Y, LIU X X, ZHOU P. The Road for 2D Semiconductors in the Silicon Age[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(48).
- [5] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films[J]. *Nature*, 2004, 306(5696): 666–669.
- [6] CHIA X, PUMERA M. Characteristics and Performance of Two-Dimensional Materials for Electrocatalysis[J]. *Nature Catalysis*, 2018, 1(12): 909–921.
- [7] ZHAO H R, LIU L C, LIN X Z, et al. Proton-Conductive Gas Sensor: A New Way to Realize Highly Selective Ammonia Detection for Analysis of Exhaled Human Breath[J]. *ACS Sensors*, 2020, 5(2): 346–352.
- [8] CHEN W Y, LAI S-N, YEN C-C, et al. Surface Functionalization of $Ti_3C_2T_x$ MXene with Highly Reliable Superhydrophobic Protection for Volatile Organic Compounds Sensing[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(9): 11490–11501.
- [9] LI X, AN Z J, LU Y L, et al. Room Temperature VOCs Sensing with Termination-Modified $Ti_3C_2T_x$ MXene for Wearable Exhaled Breath Monitoring[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 7(13).
- [10] ZANG Y P, ZHANG F J, DI C-A, et al. Advances of Flexible Pressure Sensors Toward Artificial Intelligence and Health Care Applications[J]. *Materials Horizons*, 2015, 2(2): 140–156.
- [11] ZHANG Y, CHANG T-H, JING L, et al. Heterogeneous, 3D Architecturing of 2D Titanium Carbide (MXene) for Microdroplet Manipulation and Voice Recognition[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(7): 8392–8402.
- [12] YU Z C, XU J H, GONG H X, et al. Bioinspired Self-Powered Piezoresistive Sensors for Simultaneous Monitoring of Human Health and Outdoor UV Light Intensity[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(4): 5101–5111.
- [13] YU Z Z, TANG Y, CAI G N, et al. Paper Electrode-Based Flexible Pressure Sensor for Point-of-Care Immunassay with Digital Multimeter[J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(2): 1222–1226.
- [14] PYO S, LEE J, KIM W, et al. Multi-Layered, Hierarchical Fabric-Based Tactile Sensors with High Sensitivity and Linearity in Ultrawide Pressure Range[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(35).
- [15] RATHI R, SAWANT A, JAIN L, et al. Driver Fatigue and Distraction Analysis Using Machine Learning Algorithms[J]. Springer Singapore, 2020, 1165: 1037–1046.
- [16] ZENG X L, WANG F Y, WANG B B, et al. In-Vehicle Sensing for Smart Cars[J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2022, 3: 221–242.
- [17] CLEMENT F S C, VASHISTHA A, RANE M E. Driver Fatigue Detection System[C]// 2015 International Conference on Information Processing (ICIP). Pune, India: IEEE, 2015.
- [18] SIKANDER G, ANWAR S. Driver Fatigue Detection Systems: A Review[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(6): 2339–2352.
- [19] REN X R, WANG S L, XIONG D, et al. Heterogeneously Assembled Bionic Piezoresistive Sensor for Spinal Behavior Monitoring[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485.
- [20] CHEN K F, YANG H, WANG A, et al. Smart Driving Hardware Augmentation by Flexible Piezoresistive Sensor Matrices with Grafted-on Anticreep Composites[J]. *Advanced Science*, 2024, 12(3).
- [21] HE S X, WU J, LIU S Y, et al. A Fully Integrated Multifunctional Flexible Sensor Based on Nitrile Rubber/Carbon Nanotubes/Graphene Composites for Smart Tire[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 486.
- [22] KWON J H, KIM Y M, MOON H C. Porous Ion Gel: A Versatile Ionotronic Sensory Platform for High-Performance, Wearable Ionoskins with Electrical and Optical Dual Output[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(9): 15132–15141.
- [23] ZAMMALI M, LIU S, YU W. A Flexible, Transparent, Ultralow Detection Limit Capacitive Pressure Sensor[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, 9(17).
- [24] QIU X L, BIAN Y Q, MEI X D, et al. Fully Transparent Flexible Piezoelectric Sensing Materials Based on Electrospun PVDF and Their Device Applications[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2024, 9(5).
- [25] HABIB M, LANTGIOS I, HORNBOSTEL K. A Review of

- Ceramic, Polymer and Composite Piezoelectric Materials [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55(42).
- [26] QIN J, TANG Y X, ZENG Y Y, et al. Recent Advances in Flexible Sensors: From Sensing Materials to Detection Modes[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 181.
- [27] LIU X, TONG J L, WANG J J, et al. BaTiO₃/MXene/PVDF-TrFE Composite Films via an Electrospinning Method for Flexible Piezoelectric Pressure Sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, 11(14): 4614–4622.
- [28] MARTINS P, LOPES A C, LANCEROS-MENDEZ S J P I P S. Electroactive Phases of Poly (vinylidene fluoride): Determination, Processing and Applications[J]. *Progress in Polymer Science*, 2014, 39: 683–706.
- [29] SAXENA P, SHUKLA P. A Comprehensive Review on Fundamental Properties and Applications of Poly (Vinylidene Fluoride) (PVDF)[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2021, 4(1): 1–19.
- [30] MOHAMMADPOURFAZELI S, ARASH S, ANSARI A, et al. Future Prospects and Recent Developments of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Piezoelectric Polymer; Fabrication Methods, Structure, and Electro-Mechanical Properties[J]. *RSC Advances*, 2023, 13(1): 370–387.
- [31] CAO C, ZHOU P, WANG J Q, et al. Ultrahigh Sensitive and Rapid-Response Self-Powered Flexible Pressure Sensor Based on Sandwiched Piezoelectric Composites[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 664: 902–915.