

丝网印刷技术驱动下的柔性传感器创新及其在汽车领域的应用

徐静静 王泽博 吴双全

旷达汽车饰件系统有限公司, 江苏 常州 213179

摘要:随着智能电子与汽车产业的深度融合,柔性传感器凭借“柔性化、集成化、低成本”的特性,成为技术革新的核心方向。而丝网印刷技术凭借基材兼容性强、功能集成度高、规模化生产优势显著的特点,成为制造柔性传感器的关键支撑技术。首先,对丝网印刷技术适配制造柔性传感器的核心工艺特性进行分析,阐述其在压力、温度、应变、气体等多类型柔性传感器中的创新应用;其次,聚焦汽车领域,系统研究柔性传感器在智能座舱体验优化与车用核心部件安全监测中的具体场景;最后,剖析当前技术面临的可靠性、精度与集成化挑战,并提出升级材料、融合多技术、对标汽车行业测试标准等未来发展路径。丝网印刷技术凭借其独特的工艺优势,已成为连接柔性传感器创新与汽车应用落地的核心纽带,在推动汽车智能化与柔性电子产业化进程中发挥着至关重要的作用。

关键词:丝网印刷;柔性传感器;智能座舱;汽车安全监测;规模化制造

中图分类号:TS106;TP212;TN41

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2026)04-0017-10

Innovation in flexible sensors driven by screen printing technology and its application in the automotive field

Xu Jingjing, Wang Zebo, Wu Shuangquan

Kuangda Automotive Trim System Co., Ltd., Changzhou 213179, Jiangsu, China

Abstract: With the deep integration of intelligent electronics and the automotive industry, flexible sensors, featuring ‘flexibility, integration, and low cost’, have become the core direction of technological innovation. Screen printing technology, with its strong substrate compatibility, high functional integration and significant advantages in large-scale production, has become a key supporting technology for the manufacturing of flexible sensors. Firstly, the core process characteristics of screen printing technology adapted to the manufacturing of flexible sensors were analyzed, and its innovative applications in diverse types of flexible sensors, including pressure, temperature, strain, and gas sensors were elaborated. Secondly, focused on the automotive field, the specific scenarios of flexible sensors in optimizing the intelligent cabin experience and monitoring the safety of core vehicle components were systematically studied. Finally, the reliability, accuracy and integration challenges currently faced by the technology were analyzed, and future development paths

收稿日期:2025-11-10

作者简介:徐静静,女,1984年生,中级工程师,主要从事汽车内饰材料的研发和管理工作,jingjing.xu@kuangdacn.com

通信作者:王泽博,初级工程师,主要从事汽车内饰纺织品多功能、新材料与生态设计的创新研发工作,wangdzyb@163.com

such as material upgrades, multi-technology integration, and align with testing standards of automotive industry were proposed. Screen printing technology, with its unique technological advantages, has become the core link connecting the innovation of flexible sensors and the practical application in automobiles, playing a pivotal role in advancing automotive intelligence and industrialization of flexible electronics.

Keywords: screen printing; flexible sensor; intelligent cockpit; automotive safety monitoring; large-scale manufacturing

随着汽车产业向电动化、智能化、网联化和共享化深度发展,在多领域技术融合赋能下,汽车正由传统交通工具向移动智能终端、储能单元和数字空间加速转型。这一转型促使市场对具备柔性化、分布式及低成本特征的传感器需求日益迫切^[1]。传统刚性传感元件受限于安装空间、形态适配性以及制造成本,难以满足汽车智能座舱交互、动力电池安全监测等车载复杂应用场景的需求。尽管柔性传感器通过柔性基材与功能材料的结合实现了可弯曲、可拉伸以及高集成度的性能突破,但其规模化制造瓶颈仍严重制约着其产业化进程^[2]。

丝网印刷技术作为一种成熟的印刷电子工艺,依托“网版镂空-刮板挤压-油墨转移”的工作原理,可在多种柔性基材上实现功能油墨的精准沉积,兼具低成本、高产能及优异材料兼容性等显著优势^[3]。近年,该技术已在柔性压力传感器、温度传感器等领域取得突破性进展,并逐步向汽车电子领域渗透,构建起从技术开发到场景应用的完整产业链。尽管现有文献已广泛总结柔性传感器在材料合成与器件设计方面的研究进展^[4-5],但鲜有研究系统探讨规模化制造工艺在其中的关键作用。本研究重点阐述丝网印刷技术对柔性传感器制造的支撑作用,并系统探讨柔性传感器在汽车领域的应用价值。

1 丝网印刷技术支撑柔性传感器规模化制造

柔性传感器要实现广泛的商业化落地,必须跨越基材适配性、多维度功能集成以及量产成本这三大核心门槛。而丝网印刷技术凭借其灵活的工艺适配性与成熟的产业基础,为上述痛点提供了一体化解决方案。其不仅能够兼容多种柔性基材,实现功能材料的精准沉积与集成,还能在保证性能的前提

下显著降低生产成本。因此,丝网印刷技术在柔性传感器的制备与商业化量产中占据关键地位。

1.1 丝网印刷技术的核心工艺特性

1.1.1 柔性基材兼容性

丝网印刷技术凭借其温和的工艺条件,可适配聚酰亚胺(PI)薄膜、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜、硅胶、纺织面料等多种柔性基材,且印刷过程不损伤柔性基材的力学性能。例如,在硅胶弹性基体上印刷导电油墨时,调整网版目数与刮板压力,可实现油墨的均匀附着,并使复合后的硅胶基体在拉伸后仍能保持80%以上的断裂伸长率^[6];在纺织面料上印刷导电油墨时,可在保证导电通路连续性的同时,维持织物原有的透气性。这种对复杂柔性基材的卓越兼容能力,是光刻、蒸镀等传统刚性微纳加工工艺难以企及的。

1.1.2 功能油墨集成性

丝网印刷技术具备优异的材料兼容性,可通过多种功能油墨之间的协同作用,实现柔性传感器的多样化功能。该技术不仅适用于银浆、碳浆等导电油墨^[7],还适配压电油墨^[8]、热敏油墨^[9]以及气敏油墨^[10]等功能性油墨,在多层功能性油墨的沉积与集成方面具备独特的工艺优势。丝网印刷技术涉及高精度的套印与分层固化工艺,可在同一柔性基体上实现不同功能层的垂直堆叠,既能保证层间界面的紧密黏附,又能有效避免材料间的物理或化学干扰,进而构建稳定的多维传感结构。以柔性温度-压力复合传感器为例,该器件采用银浆电极层、热敏油墨层与压电油墨层3层结构设计,借助丝网印刷技术的高精度套印特性,实现了温度与压力信号的同步监测。此外,该技术还可灵活调节油墨厚度,以满足不同类型柔性传感器对功能层厚度的差异化需求^[11]。

1.1.3 成本规模经济性

从产业经济角度分析,丝网印刷技术在设备投入成本、生产效率及材料利用率方面具有显著优势。在设备投入成本方面,半自动丝网印刷机的单价为 5 万元~20 万元,卷对卷连续印刷生产线为 50 万元~200 万元(仅为光刻设备的 10%~20%),大幅度降低了生产线的投入成本。在生产效率方面,卷对卷印刷速度可达 10~30 m/min,单条柔性传感元件生产线的日均产能可达 10 万件,具备极高的生产效率。在材料利用率方面,丝网印刷用油墨的利用率

超过 90%,远高于蒸镀工艺(约 30%)与喷墨印刷(约 50%),可显著降低以银浆为代表的贵金属材料的消耗^[12]。丝网印刷技术在低成本、高产能制备柔性传感器方面优势显著,推动了柔性传感器在可穿戴设备、汽车电子等领域的规模化应用。

1.2 丝网印刷赋能多类型柔性传感器创新

得益于上述工艺优势,丝网印刷技术已驱动柔性传感器在多领域实现实质性应用,构建了涵盖压力、温度、应变及气体监测的多元化器件体系。柔性传感器制备工艺的综合对比如表 1 所示。

表 1 柔性传感器制备工艺对比

Tab.1 Comparison of preparation processes for flexible sensors

对比维度	丝网印刷技术	传统制备技术
工艺原理	浆料漏印与固化:利用网版将功能性(如导电、介电、半导体)浆料选择性漏印至基底,固化成膜	微加工与组装:基于光刻、蚀刻、沉积[物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)]等微纳工艺构建微结构,或通过表面贴装技术(SMT)将分立元件贴装至印刷电路板(PCB)
基板兼容性	适应性广:完美支持柔性基板(如 PET 薄膜、PI 薄膜等)、纸张、纺织品及三维曲面,突破刚性基底限制	依赖刚性:主要适用于硅晶圆、玻璃、PCB 印刷基材(如阻燃型玻璃纤维增强环氧树脂层压板)等刚性基材,难以实现弯曲或可穿戴特性
制造成本	低成本:无需昂贵的真空设备和洁净室,材料利用率高,适合大规模低成本制造	高成本:设备资本投入大,工艺复杂,单片制造成本较高
生产效率	极高:适配卷对卷连续化生产,速度快,产能大	中/低:微机电系统(MEMS)工艺流程长、周期慢;SMT 贴片受限于设备速度和工序复杂度
分辨率精度	微米级:受限于网版目数和浆料流变性,难以实现纳米级结构	纳米级:工艺精度极高,适合制造微型化、高集成度的精密传感器
力学特性	柔性可拉伸:器件轻薄可折叠,具有优异的适形性与界面附着力	刚性易碎:质地坚硬,不可弯曲,受机械冲击容易断裂或失效
材料体系	复合材料:基于纳米材料与聚合物基体的复合体系	无机材料:主要采用单晶硅、金属薄膜、氧化物半导体等无机材料
集成度	较小:多为平面结构或简单的三明治结构,难以集成本地复杂信号处理电路	极高:可将传感单元与信号处理电路在同一芯片或封装内集成
环境影响	较优:主要属于增材制造,化学废料少,重点管控有机溶剂挥发	较大:涉及大量化学蚀刻液、光刻胶,且属于高能耗工艺
典型应用	一次性医疗耗材、柔性可穿戴设备(如智能织物、电子皮肤)、智能包装、大面积传感器阵列	高精度工业控制、汽车电子(如胎压、碰撞感应)、消费电子(如手机加速度计、陀螺仪)、高端医疗仪器

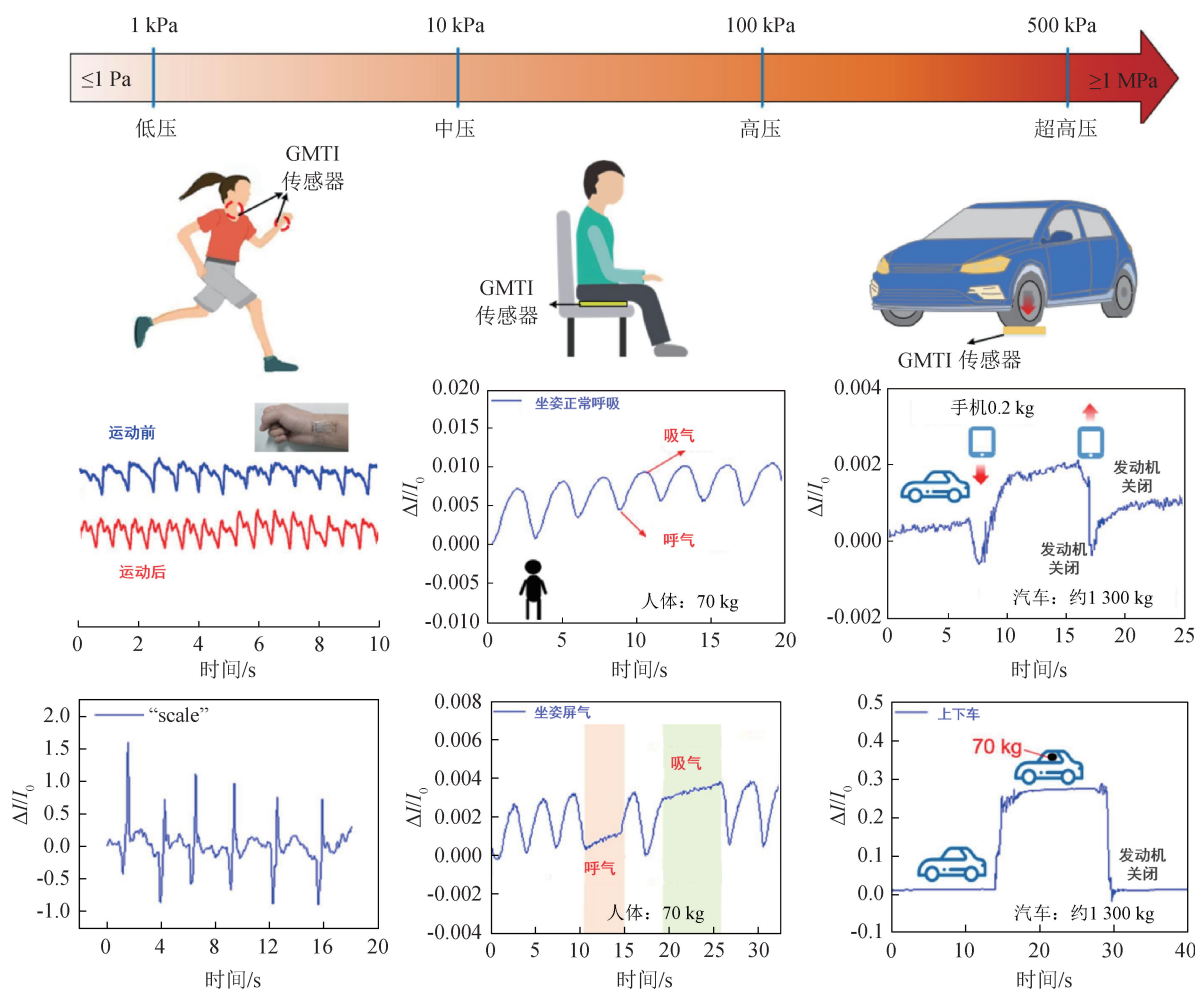
1.2.1 柔性压力传感器

丝网印刷技术可通过电极-介电层-电极电容结构或导电敏感层电阻结构,实现压力信号的有效感知。在消费电子领域,通过在 PET 薄膜上印刷银浆电极与碳纳米管介电层,可制备梯度微共形隧穿界面(GMTI)传感器。将其应用于智能手环,可实现检测精度达 ± 2 次/min 的心率监测;将其用于智能手机屏下压力按键,可实现响应时间小于 50 ms 的快速触控(图 1)^[13]。在医疗健康领域,以硅胶为基

材,通过印刷碳浆敏感层制作智能床垫压力传感阵列,可精确监测患者翻身频率,误差控制在每小时 1 次以内,并能提供高精度(分辨率 1 mm $\times$ 1 mm)的压力分布图,有效预防临床压疮^[14]。

1.2.2 柔性温度传感器

基于热敏油墨电阻随温度变化的特性,丝网印刷技术为高精度温度监测提供了一种高效的实现途径。在工业监测领域,柔性温度传感器能够以薄膜的形式紧密贴合于电容器等设备表面,不仅安装简



$\Delta I/I_0$ —电流的变化量与初始电流的比值,用来判定传感信号的强弱;“scale”—被测试人员需说出的单词。

图 1 柔性压力传感器的各种应用

Fig. 1 Various applications of flexible pressure sensors

便,而且可实现精确的温度测量,实现了对设备运行状态进行实时监测与故障预警的功能^[15]。在可穿戴领域,将聚噻吩基有机热敏油墨印刷至纺织面料上,可构建具有舒适触感的智能服饰,能够实时监测人体皮肤温度(精度 $\pm 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$),并在检测到体温超过 $38.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的发热阈值时,自动触发声光报警机制^[16]。丝网印刷技术制备的薄膜式温度传感器,可在汽车的排气管道上使用,用来监测排气管道的温度变化,其制备工艺如图 2 所示^[17]。

1.2.3 柔性应变传感器

选用导电聚合物或银纳米线等高拉伸性复合油墨,通过丝网印刷技术构建传感器,其电阻会随基材的形变产生线性变化。在土木工程领域,此类传感器被贴合于桥梁及大坝等混凝土结构的表面,能够精确监测低至 0.1% 的微小应变,从而可针对结构

疲劳损伤进行早期预警^[18]。在机器人领域,此类传感器被集成于柔性机械手指表面,用于感知 0~50 N 范围内的抓取力度,其测量误差控制在 $\pm 0.5 \text{ N}$,能够实现对易碎物品的柔性无损抓取^[19]。

1.2.4 柔性气体传感器

利用丝网印刷技术将氧化锡半导体或酞菁铜等气敏油墨制备成传感器,能够实现对特定气体浓度的精确监测,且该工艺支持微型化设计,最小传感面积可达 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。在环境监测领域,基于此技术研制的便携式甲醛传感器,检测范围覆盖 $0 \sim 1 \text{ mg/m}^3$,测量误差控制在 $\pm 0.05 \text{ mg/m}^3$ ^[20]。在医疗诊断领域,该传感器被集成于防护口罩内部,用于实时监测呼出气体中的丙酮浓度。丙酮是糖尿病的重要表征生物标志物,其浓度指标有助于辅助临床实现无创诊断^[21]。

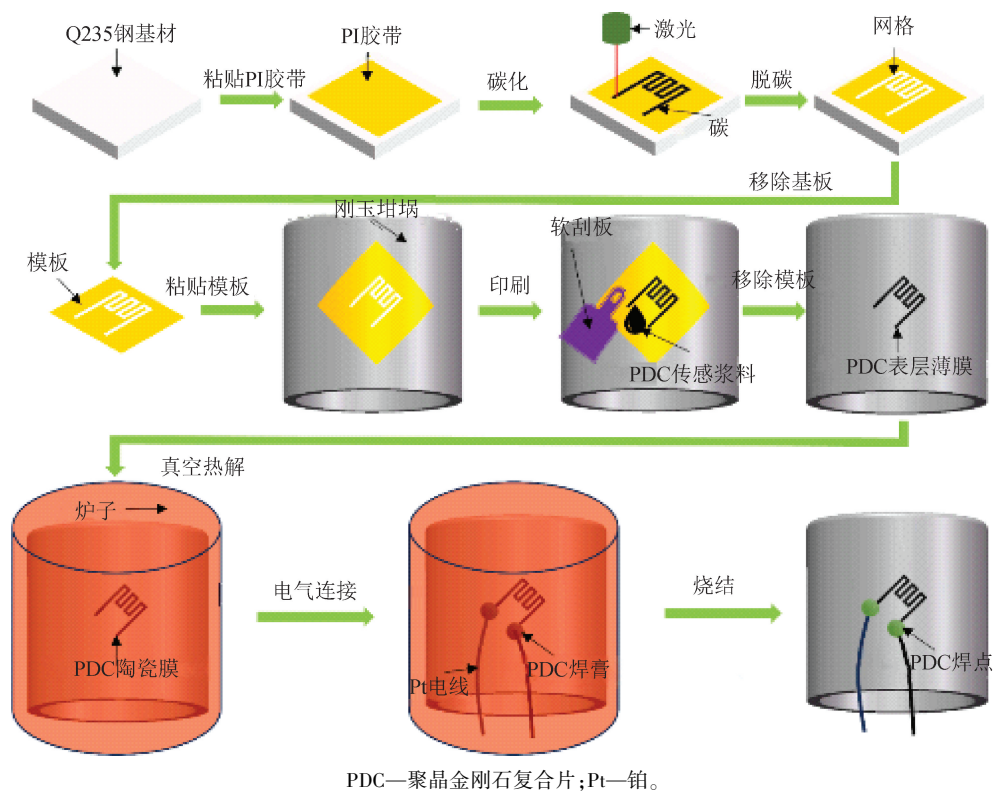


图 2 丝网印刷技术制备薄膜式温度传感器

Fig. 2 Preparing of thin-film temperature sensor by screen printing

2 柔性传感器在汽车领域的创新应用

在汽车智能座舱向“第三生活空间”升级的过程中,汽车内饰纺织品不再是单纯的装饰元素,而是集功能性、舒适性与智能性于一体的核心载体,其性能直接影响用户的驾乘体验与汽车座舱的经济价值^[22-23]。首先,舒适性是面料设计的基础要求。汽车内饰纺织品所用纤维多为超细纤维,所用面料多为羊毛混纺面料,结合透气针织结构,赋予内饰柔软触感和热调节功能,可有效缓解车内环境夏季闷热、冬季冰冷的局限性。不仅如此,经由起绒、磨毛及抗静电工艺处理的面料,既优化了亲肤性,又显著减少了灰尘吸附与静电干扰,提升了座舱的洁净度与用户的驾乘愉悦感^[24-25]。其次,功能性升级是适配座舱高频使用的关键。一方面,耐磨抗污是核心指标,经聚氨酯涂层或纳米防护处理的面料,能够抵御咖啡、油污等日常污渍,并且在上万次摩擦测试后仍保持完好;另一方面,严格的阻燃性更是硬性要求,面料必须符合遇火快速炭化的行业标准,以保障驾乘人员安全。而且,部分高端面料通过嵌入相变纤维

具备温感调节功能,可实现温度的自适应调节^[26-27]。最后,智能融合与绿色环保成为新的发展趋势。智能面料通过集成高导热性纱线与柔性导电纤维,不仅保障了座椅加热、通风的功能,而且实现了按摩模式切换及座椅调节等交互功能。与此同时,利用再生聚酯纤维制成的环保面料也日益普及,这有助于智能座舱实现绿色低碳升级^[28]。

面料智能化的发展趋势对制造工艺提出了更高要求。其中,丝网印刷技术凭借其规模化制造的能力,为柔性传感器在汽车领域的应用提供了成本与产能支撑。目前,利用该技术生产的柔性传感器,已深度渗透至智能座舱与车用核心部件安全监测两大场景(图3),为汽车的感知能力、交互体验与安全管理提供了关键支撑,有力推动了汽车功能升级与体验革新。

2.1 智能座舱的体验革新

随着汽车产业向智能化转型,座舱设计正从单一的功能堆叠向具备主动服务能力的移动空间演进。柔性传感器凭借其形态适应性与高灵敏度,突破了传统刚性器件的限制,成为重塑人机交互逻辑的核心驱动力。



图3 柔性传感器在汽车领域的创新应用
Fig. 3 Innovative applications of flexible sensors in automotive field

表2 汽车柔性传感器关键技术指标与现状的分析

Tab. 2 Analysis of key technical indicators and current status of automotive flexible sensors

应用领域	关键指标	目标量化范围	技术瓶颈	改进方向
座舱交互	灵敏度	$>1.0 \text{ kPa}^{-1}$	低压线性度不足	微结构电极设计
	响应时间	$<50 \text{ ms}$	难以提高响应速度	高介电材料应用
	循环寿命	$>10 \text{ 万次}$	柔性基底易疲劳	自修复材料/封装优化
健康监测	信号信噪比	$>20 \text{ dB}$	运动干扰大	差分传感/滤波算法
	生物相容性	无毒、低致敏	长期稳定性(酸碱环境的耐受性)差	表面涂层改性
车规级环境	工作温度	$-40 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$	高温漂移严重	耐高温复合材料
	耐湿热性	$85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 85% ~ $95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 95%	阻值漂移大	高阻隔薄膜封装

注:漂移是指传感器设置的基线值升高或者降低,会降低传感器的灵敏度。

压力传感带,当检测到轻握压力大于 5 N 时自动触发巡航定速功能,检测到握力大于 20 N 时则取消巡航;同时在方向盘表面印刷弧形碳浆传感层,用户可以通过滑动按压的方式调节音响音量,从而有效避免因低头操作带来的安全隐患^[30]。最后是内饰交互方面,中控与车门内饰板采用压力与电容复合传感面板来替代传统的物理按键,实现了触摸即响应的功能,显著降低了内饰设计的复杂度与制造成本^[31]。

2.1.2 驾驶员健康监测

柔性生物传感器通过非侵入的方式实时守护驾驶员健康,实现了对生理信号、心电活动及疲劳状态的综合监测。生理信号监测方面,将柔性传感器集成在方向盘的包覆皮革中,通过接触皮肤实时监测心率^[32]。心电活动监测方面,通过在座椅安全带中集成聚偏二氟乙烯(PVDF)压电传感器来监测心电信号,并在一旦检测到驾乘人员出现心律不齐的症状时,不仅会提醒驾驶员停车休息,还会自动推送附

2.1.1 全域交互系统

基于丝网印刷技术制备的柔性压力传感器,能够构建起座舱的多维度交互网络。首先是座椅交互方面,在座椅表面集成的阵列式压力传感器,其空间分辨率可达 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,系统能够通过压力分布识别乘客身份,准确率超过 95%,且可自动调用包括靠背角度和腰部支撑力度在内的个性化座椅参数。在车辆行驶过程中,系统会实时监测驾乘人员的坐姿变化,并能一旦检测到身体前倾或单侧压力集中等疲劳坐姿特征时,立刻触发语音提醒与座椅振动预警^[29]。其次是方向盘交互方面,在握把处印刷

近医院的导航信息^[33]。疲劳驾驶判断方面,车内的疲劳检测系统会结合座椅压力传感器感知的背部压力分布与车载摄像头捕获的眼睑闭合度信息,对疲劳状态进行双重验证,准确率超过 90%,能够有效避免单一传感器可能产生的误判现象^[34]。

2.1.3 环境自适应调节

在分布式柔性场景中,丝网印刷技术凭借低成本、大面积制造及卓越的柔性适配能力发挥着核心赋能作用。其能利用银纳米线、碳浆等导电油墨,在硅胶、薄膜等柔性基材上精准制备分布式电极、线路及传感阵列,满足非平面与可弯折的应用需求。相比蒸镀与光刻技术,丝网印刷技术简单且适配连续化生产,大幅降低了柔性传感器的量产成本。同时,印刷油墨与高拉伸率基材结合紧密,形成的功能层具备高附着力与优异的耐弯折性能,能充分满足分布式场景对器件耐用性的严苛要求。

基于分布式柔性感知技术,智能座舱通过温湿度监测、空气质量检测及声光调节,实现了车内座舱

环境的精准协同控制。在温湿度控制方面,基于 PI 薄膜制备的柔性传感器分布于座椅、中控及车顶处,实时监测各区域温度。当驾驶员区域温度超过 28 ℃ 时,系统自动调节空调优先对该区域降温^[35]。在空气质量监测方面,空调进风口集成的柔性半导体气体传感器能够追踪甲醛与 PM_{2.5} 浓度,一旦超标便启动空气净化并切换外循环模式,当 PM_{2.5} 数值突破特定阈值时及时提醒车主更换滤芯^[36]。在声光调节方面,车顶光敏传感器根据光辐照度自动调节天窗遮阳帘开合度;车门声敏传感器则持续监测车外噪声,当检测到超过 60 dB 的噪声时,系统通过调节车门夹层隔声材料的充气量提升车门隔声等级,确保座舱的静谧性^[37-38]。

2.2 车用核心部件的安全监测

柔性传感器依托丝网印刷的低成本与适配性,可实现对汽车底盘、电池以及电机等核心部件的分布式、高精度监测。

2.2.1 车身结构健康监测

采用导电聚合物油墨印刷的柔性应变传感器,能够灵活粘贴于车身各个关键部位。其中,车架监测是将传感器贴附于铝合金或碳纤维车架的表面,用于捕捉车辆转向以及制动过程中的应变分布,从而准确评估车架结构的力学强度与疲劳寿命,确保车架满足超过 10 年的设计寿命要求^[39]。针对车门铰链的监测,可将传感器安装于铰链处,以记录开关门时的应力变化。其监测量程为 0~100 MPa,一旦监测到应力数值超过 80 MPa,汽车安全监测系统立即发出警报,提示铰链可能存在松动或磨损的风险^[40]。针对轮胎的监测,是将柔性传感器粘贴于轮胎侧壁以监测其滚动形变,基于这些形变数据来辅助判断胎压状态及轮胎磨损程度的^[41]。

2.2.2 新能源汽车核心部件监测

针对新能源汽车电池与电机的温度敏感特性,丝网印刷技术被用于构建分布式柔性温度监测网络。其中,动力电池监测是将传感器直接印刷于电池单体表面,实时监测每节电芯温度的。一旦温度超过 60 ℃,系统会触发冷却系统或断电保护,避免热失控^[42]。驱动电机监测是在定子绕组上印刷金属氧化物热敏油墨传感器,以精确监测运行过程中的温度波动(误差±1 ℃),防止绝缘层老化,确保电机的 H 级绝缘性能(极限温度 180 ℃)^[43]。充电安

全监测通过在充电枪与电池接口处集成温度传感器,以监测充电过程中,特别是快充模式下的温度变化,并在一旦检测到温度超过 105 ℃ 的阈值时,系统立即切断充电回路以保障安全^[44]。

2.2.3 底盘与悬架系统监测

柔性压力传感技术为底盘动态控制提供了关键的数据支撑。将传感片粘贴于减震器表面,能够实时监测路面冲击载荷。其测量范围覆盖 0~50 kN,误差控制在±1 kN。这些数据为车辆车身电子稳定系统提供输入参数,实现了精准的车辆底盘监测^[45]。此外,在悬架弹簧与摆臂上安装的应变传感器,可实时监测受力变化用于评估悬架性能,并在弹簧应力超 150 MPa 时预警故障风险,实现对悬架系统的有效监测^[46]。

3 丝网印刷柔性传感器的挑战与展望

尽管丝网印刷技术与柔性传感器已在多领域实现应用,但仍面临可靠性、精度与集成化等瓶颈,需通过技术创新推动产业升级。

3.1 核心技术挑战

3.1.1 长期服役可靠性不足

汽车与工业场景的环境十分复杂,涵盖高温、高湿、振动及化学腐蚀等因素,这对柔性传感器的油墨附着力与基材耐久性提出了更高要求。例如,应用于汽车座舱座椅的传感器长期受汗液腐蚀与摩擦影响,容易出现灵敏度下降。动力电池包内的温度传感器,长期处在 120 ℃ 以上的高温或-40 ℃ 以下的低温环境中,会导致传感器的材料老化,性能稳定性下降,误差可能增大至±2 ℃^[47]。

3.1.2 传感测量精度低

当前,丝网印刷柔性传感器的精度仍低于传统精密传感器,如前者温度传感误差约±2 ℃,而目标精度需达±0.5 ℃;应变传感误差约±5%,而目标需控制在±1%。这种精度水平难以满足高端智能驾驶对高精度数据的需求,例如 L4 级驾驶自动化对定位精度要求小于 10 cm,这就要求传感数据误差必须控制在 0.1% 以内^[48]。

3.1.3 集成化与数据融合难度大

现有传感器多为单一功能型,实现压力、温度与应变等多参数集成需要突破多层印刷对齐精度的技

术瓶颈(当前套印精度 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$,目标精度 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$)。此外,车用传感器采集的生理、环境及结构等多维度数据接口与协议缺乏统一标准,如控制器局域网总线与以太网并存,导致数据融合效率低(延迟 $>100\text{ ms}$),难以支撑高效、实时传输的场景化决策^[49]。

3.2 未来发展方向

3.2.1 材料与工艺升级

耐高温($150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上)PI薄膜,具备修复效率超90%的自修复导电油墨,以及耐盐雾性能超过1 000 h的气敏油墨等耐候性材料的开发,克服了传感器10年的寿命瓶颈^[50]。同时,基于电子束光刻技术开发线宽 $<5\text{ }\mu\text{m}$ 的纳米级网版,并结合高精度自动化的印刷设备,可实现传感精度与集成度的双重提升^[51]。

3.2.2 多技术融合创新

推动丝网印刷与喷墨印刷、激光切割技术的结合,充分发挥丝网印刷制备大面积导电层的效率优势、喷墨印刷实现高精度传感点的分辨率优势,以及激光切割定制外形的灵活性优势,有效平衡了制造的规模化与个性化^[52]。在数据处理方面,引入人工智能技术,结合机器学习算法对多维度传感数据进行实时分析。例如,基于坐姿、心率和握力等多维特征识别驾驶员疲劳状态(准确率预期 $>95\%$),推动传感功能从单一的数据监测迈向主动的故障预测^[53]。

3.2.3 汽车应用场景深化

针对汽车领域需求,开发满足汽车使用标准的柔性传感器,并基于汽车行业测试标准进行认证(如ISO 16750环境可靠性标准、AEC-Q100半导体标准)^[54]。推动传感器与自动驾驶、车联网融合,如车身应变传感网推送至医疗平台,构建“感知-决策-服务”一体化的车用智能网络^[55]。

3.2.4 绿色工艺推广

研发挥发性有机化合物(VOC)质量浓度低于50 g/L的水性功能油墨和无溶剂油墨,替代VOC质量浓度高于300 g/L的传统溶剂型油墨,显著减少环境污染。此外,改进印刷工艺使材料利用率超过95%,以符合“双碳”战略下产业绿色发展的要求^[56]。

4 结论

柔性传感器已成为推动汽车智能化转型的核心引擎,重塑了座舱交互体验与车身感知能力。丝网

印刷技术作为核心制备工艺,创新驱动点主要体现在3个方面:首先是工艺适配性与形态自由度,突破了传统制造限制,实现了在方向盘、座椅、车架等复杂曲面基底上的大面积直接印刷与分布式传感阵列构建;其次是多材料集成与多模态融合,通过复合导电聚合物、纳米材料等功能介质,实现了对生理信号、环境参数及力学应变的多维感知一体化制造;最后是混合制造与智能化升级,结合喷墨打印、激光图形化及AI算法,有效克服了精度与可靠性瓶颈,满足了汽车行业测试标准对性能与寿命的严苛要求。综上所述,丝网印刷技术凭借其低成本量产优势与持续的技术迭代,已成为连接柔性电子创新与汽车产业落地的关键纽带,有力推动了汽车电子向轻量化、智能化及场景化服务方向演进。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 工业和信息化部召开《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》编制工作启动会[J]. 稀土信息, 2019(2): 7.
- [2] COSTA J C, SPINA F, LUGODA P, et al. Flexible sensors: from materials to applications [J]. Technologies, 2019, 7(2): 35.
- [3] 钱鑫, 苏萌, 李风煜, 等. 柔性可穿戴电子传感器研究进展[J]. 化学学报, 2016, 74(7): 565-575.
- [4] 卢成帅, 韩文佳, 张志良, 等. 水性聚氨酯基柔性传感材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2025, 42(1): 133-146.
- [5] 刘文博, 王韞, 朵有宁, 等. 基于柔性传感的软体机器人交互研究进展[J]. 机器人, 2024, 46(2): 195-218.
- [6] YANG Y H, DUAN S, ZHAO H. Advances in constructing silver nanowire-based conductive pathways for flexible and stretchable electronics[J]. Nanoscale, 2022, 14(32): 11484-11511.
- [7] WANG Z Z, ZHOU M, LU B Y, et al. Synthesis of silver nanoparticle/multi-walled carbon nanotube composites and their application in electronic pastes [J]. Nanomaterials, 2025, 15(3): 152.

- [8] CARBONE C, BENWADIH M, D'AMBROGIO G, et al. Influence of matrix and surfactant on piezoelectric and dielectric properties of screen-printed BaTiO₃/PVDF composites[J]. *Polymers*, 2021, 13(13): 2166.
- [9] OLIVEIRA D B, ARAÚJO A, FORTUNATO E, et al. Recent advances on thermochromic inks for security applications [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2026, 11(6): e01437.
- [10] SIMONENKO N P, FISENKO N A, FEDOROV F S, et al. Printing technologies as an emerging approach in gas sensors: survey of literature [J]. *Sensors*, 2022, 22(9): 3473.
- [11] ZHANG J J, LAN P S, WEN J X, et al. High-performance flexible pressure sensor array via screen-printing with enhanced sensitivity and low crosstalk[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(16): 30771-30777.
- [12] KHAN S, LORENZELLI L, DAHIYA R S. Technologies for printing sensors and electronics over large flexible substrates: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(6): 3164-3185.
- [13] LI P, TAI G J, LUO W, et al. Skin-inspired graded micro-conformal tunneling interface for piezoresistive sensors with broad-range ultra-sensitivity [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 503: 158470.
- [14] WYSS J K M. A soft flexible and stretchable pressure sensor array designed to warn of pressure ulcer formation [D]. Vancouver: University of British Columbia, 2020.
- [15] HUDA A S N, TAIB S. Suitable features selection for monitoring thermal condition of electrical equipment using infrared thermography [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 61: 184-191.
- [16] PAVEL I A, LAKARD S, LAKARD B. Flexible sensors based on conductive polymers [J]. *Chemosensors*, 2022, 10(3): 97.
- [17] CUI Z F, DUAN W J, LU Z G, et al. A high-temperature resistant curved conformal thin-film polymer derived SiCN temperature sensor based on screen printing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1013: 178566.
- [18] MISHRA M, LOURENÇO P B, RAMANA G V. Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: a review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 48: 103954.
- [19] KOIVIKKO A, SADEGHIAN RAEI E, MOSALLAEI M, et al. Screen-printed curvature sensors for soft robots [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(1): 223-230.
- [20] BELAL M A, HAJRA S, PANDA S, et al. Advances in gas sensors using screen printing [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, 13(8): 5447-5497.
- [21] KUMAIL A, WEI J, WANG C, et al. Acetone gas sensors for noninvasive diabetes diagnosis: a comprehensive review [J]. *The Chemical Record*, 2025, 25(11): e202500105.
- [22] 周凤飞, 柴雅凌. 车用纺织品的发展(一) [J]. *产业用纺织品*, 2002, 20(6): 15-18.
- [23] 吴湘济, 辛斌杰, 马施琼, 等. 汽车用座椅面料的应用分析[J]. *产业用纺织品*, 2013, 31(2): 38-43.
- [24] 邹关华. 国产化纺织面料在汽车座椅中的应用[J]. *产业用纺织品*, 2008, 26(8): 29-32.
- [25] 张宇群, 罗胜利, 廖银琳. 汽车座椅面料的热舒适性研究[J]. *产业用纺织品*, 2018, 36(6): 10-14.
- [26] 李艳梅, 仇晓坤. 汽车用座椅面料的开发[J]. *产业用纺织品*, 2005, 23(4): 13-16.
- [27] 刘聪, 魏孟媛, 葛兰, 等. 汽车内饰用座椅面料产品标准的对比分析[J]. *产业用纺织品*, 2022, 40(12): 36-40.
- [28] 宫海飞. 大提花汽车座椅面料的创意设计[J]. *产业用纺织品*, 2018, 36(8): 5-9.
- [29] 李超, 孙婉, 贾西苑, 等. 经编间隔织物的应用及其发展[J]. *产业用纺织品*, 2016, 34(5): 31-33.
- [30] 深圳纽迪瑞科技有限公司. 车规级压力感应柔性传感器在智能座椅中的应用技术白皮书[Z]. 深圳: 纽迪瑞科技有限公司, 2022.
- [31] TAI 矽微电子有限公司. TCAE31A 车规级双模人机交互芯片应用指南[Z]. 上海: 泰矽微电子有限公司, 2022.
- [32] ALVES C, CUSTÓDIO T, SILVA P, et al. Smartplastic: innovative touch-based human-vehicle interface sensors for the automotive industry [J]. *Electronics*, 2021, 10(11): 1233.
- [33] WANG J Y, LI L X, LIU H, et al. Screen-printed highly sensitive and anisotropic strain sensors with asymmetrical inner concave honeycomb cross-conducting structure for health monitoring of medical electrophysiological signals[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(21): 25732-25748.
- [34] PARLATO S, CENTRACCHIO J, CINOTTI E, et al. A flexible PVDF sensor for forcecardiography [J]. *Sensors*, 2025, 25(5): 1608.
- [35] ABBAS Q, ALSHEDDY A. Driver fatigue detection

- systems using multi-sensors, smartphone, and cloud-based computing platforms: a comparative analysis[J]. *Sensors*, 2021, 21(1): 56.
- [36] HE X L, ZHANG X H, ZHANG R, et al. More intelligent and efficient thermal environment management: a hybrid model for occupant-centric thermal comfort monitoring in vehicle cabins [J]. *Building and Environment*, 2023, 228: 109866.
- [37] FRANCIOSO L, FORLEO A, TAURINO A M, et al. Linear temperature microhotplate gas sensor array for automotive cabin air quality monitoring[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 134(2): 660-665.
- [38] SAMARASINGHE P N, ZHANG W, ABHAYAPALA T D. Recent advances in active noise control inside automobile cabins: toward quieter cars[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2016, 33(6): 61-73.
- [39] LIAO W J, LIU X K, YANG J J, et al. An integrated assessment model of automobile smart cabin comfort based on weight optimization[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2025, 26(7): 1709-1729.
- [40] ZYMELKA D, TOGASHI K, KOBAYASHI T. Carbon-based printed strain sensor array for remote and automated structural health monitoring [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(10): 105022.
- [41] MITTELMARK M B, BAUER G F, VAANDRAGER L, et al. The handbook of salutogenesis [M]. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [42] ANDREWS J B, CARDENAS J A, LIM C J, et al. Fully printed and flexible carbon nanotube transistors for pressure sensing in automobile tires[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(19): 7875-7880.
- [43] SUN N, RONG Q L, WU J, et al. Fully printable integrated multifunctional sensor arrays for intelligent lithium-ion batteries [J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 7361.
- [44] WAWRZYNIAK M, EL BOURKADI L, PEYRARD M, et al. Flexible screen-printed temperature sensor for active regulation onto screen-printed heater [C] //2024 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems(FLEPS), 2024: 1-4.
- [45] GB/T 41578—2022 电动汽车充电系统信息安全技术要求及试验方法[S].
- [46] HOSSAIN M J, KAMATH S S, MOUNA S T, et al. Evaluation of health monitoring parameters for automotive pneumatic elastomeric system using soft pressure sensors for enhanced vehicle performance[J]. *Smart Materials and Structures*, 2025, 34(3): 035033.
- [47] ISO 16750-4: 2023 Road vehicles environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment part 4: climatic loads[S].
- [48] REID T, HOUTS S, CAMMARATA R, et al. Localization requirements for autonomous vehicles. [J] *SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles*, 2019, 2(3): 173-190.
- [49] 石晏丞, 李军. 汽车自动驾驶领域的传感器融合技术[J]. *装备机械*, 2021(3): 1-6.
- [50] TAN Y J, WU J K, LI H Y, et al. Self-healing electronic materials for a smart and sustainable future [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(18): 15331-15345.
- [51] WU W. Printed electronics technologies[M]. London: The Royal Society of Chemistry, 2022.
- [52] 蔡子墨, 匡翠方, 杨华勇, 等. 激光融合制造及在柔性微纳传感器的应用(特邀)[J]. *中国激光*, 2024, 51(4): 244-273.
- [53] BLASCH E, PHAM T, CHONG C Y, et al. Machine learning/artificial intelligence for sensor data fusion-opportunities and challenges[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2021, 36(7): 80-93.
- [54] AEC Q100 Failure mechanism based stress test qualification for integrated circuits[S].
- [55] 张新钰, 卢毅果, 高鑫, 等. 面向智能网联汽车的车路协同感知技术及发展趋势[J]. *自动化学报*, 2025, 51(2): 233-248.
- [56] 冠华. 《印刷工业大气污染物排放标准》(GB 41616—2022)实施[J]. *广东印刷*, 2023(1): 8.

珍爱自然资源

守护美丽中国