# 压电传感器在智能感知领域的主要应用研究

姜来新
上海电子信息职业技术学院，上海 201411
DOI: 10.61369/TACS.2026090043

**摘　　要：** 伴随着人工智能、物联网以及柔性电子技术的迅速发展，智能感知已经成为万物互联的基础性技术，被应用到智能制造、智慧医疗、智能机器人、智能交通等各个领域。压电传感器依靠压电效应达成机械能和电能的双向转换，拥有自供电、高灵敏度、快响应、结构简单、适合柔性集成等诸多优点，冲破了传统传感设备依靠外部电源、结构笨重、响应迟缓的技术限制，成了智能感知系统的关键感知单元。本文对压电传感器的工作机理和核心材料体系进行系统的阐述，重点对压电传感器在人体健康感知、机器人仿生感知、工业智能监测、环境智能感知、人机交互感知等领域最新的研究成果进行梳理，分析目前技术应用中遇到的瓶颈问题，预测压电传感技术的未来发展方向，给压电传感技术的智能化、集成化、产业化发展提供理论依据和技术支持。

**关 键 词：** 压电传感器；压电效应；智能感知；柔性传感；智能监测

## Research on Main Applications of Piezoelectric Sensors in the Field of Intelligent Perception

Jiang Laixin
Shanghai Technical Institute of Electronics & Information, Shanghai 201411

**Abstract:** With the rapid development of artificial intelligence, Internet of Things and flexible electronic technologies, intelligent perception has become the fundamental technology for the Internet of Everything, which is applied in various fields such as intelligent manufacturing, smart healthcare, intelligent robots and intelligent transportation. Piezoelectric sensors realize bidirectional conversion between mechanical energy and electric energy based on the piezoelectric effect. Featuring self-powered capability, high sensitivity, fast response, simple structure and suitability for flexible integration, they break the technical limitations of traditional sensing devices such as external power supply dependence, bulky structure and slow response, and have become the core sensing units of intelligent perception systems. This paper systematically elaborates the working mechanism and core material systems of piezoelectric sensors. It mainly reviews the latest research achievements of piezoelectric sensors in human health perception, bionic robot perception, industrial intelligent monitoring, environmental intelligent perception and human-computer interaction perception. The bottlenecks existing in current technical applications are analyzed, and the future development directions of piezoelectric sensing technology are predicted, so as to provide theoretical basis and technical support for the intelligent, integrated and industrialized development of piezoelectric sensing technology.

**Keywords:** piezoelectric sensor; piezoelectric effect; intelligent perception; flexible sensing; intelligent monitoring

## 引言

近些年来，由于纳米材料、柔性制备工艺以及人工智能算法的共同发展，压电传感器由原来的工业力学检测逐渐扩展到柔性可穿戴感知、仿生智能触觉、高精度生命体征监测、智能环境监测等新的领域。新型压电复合材料、结构化传感结构和智能信号处理算法相结合，很好地克服了传统压电传感器柔韧性差、信号串扰、检测维度单一等缺点，大大提高了智能感知系统准确度、稳定性和适应性。因此就需要从压电传感器技术特点出发，对它在智能感知各个细分领域中应用研究的最新进展进行全方位的分析，并从中总结出技术上的不足以及改进途径，进而预测出智能感知技术的发展方向。

作者简介：姜来新（1978—），男，博士，主要从事半导体器件与电子封装互连方面的教学和科研工作。

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

## 一、压电传感器的工作机理

压电传感器的主要理论基础就是压电效应，分为正压电效应和逆压电效应，在智能感知领域主要是利用正压电效应来完成信号的检测。正压电效应就是压电材料在外力的作用下发生机械形变的时候，内部正负电荷中心会发生相对位移，产生极化现象，材料两端表面会形成等量异号的感应电荷，外力撤除之后形变消失、电荷复原，感应电荷量和所受外力大小成线性正比关系[1]。根据上述特点，传感器可以准确地采集压力、拉力、振动、加速度、形变等机械信号，把物理量转换成电信号，从而达到无源、实时感知的目的。

逆压电效应主要用在执行器上，即给压电材料施加交变电场时，材料就会产生周期性的机械形变，可以用于智能驱动、微振动控制等。在智能感知系统里，部分集成化的压电器件可以做到“感知－驱动”的一体化，既具备了信号采集的功能又具备了主动调控的能力，从而大大提高了智能设备的集成度和智能化程度。相比于传统的传感技术，压电传感最大的优点就是自供电，不需要外接电源和复杂的供电电路，可以有效地降低传感器的功耗，减小传感器的体积，适合于微型化、分布式、柔性化的智能感知场景[2]。

## 二、压电传感器在智能感知领域的核心应用研究

### （一）智慧医疗与人体生理智能感知

健康监测属于智能感知领域的重要应用之一，传统的医疗检测设备体积大、操作繁杂、不能进行全天候的实时监测，不能满足居家健康管理、慢性病监测、运动健康监测等需求[3]。基于柔性压电材料的可穿戴压电传感器，由于具有良好的生物相容性、柔性贴合性和无源感知的优点，可以准确地采集人体微弱的生理信号，从而达到对人体健康状态进行智能化、实时化、无创化监测的目的，是智慧医疗领域的一个研究热点。

柔性压电传感器可以贴附在人体手腕、颈部、胸腔等处，准确地捕捉到脉搏的起伏、呼吸的起伏、心脏的微小震动等微弱的力学信号，经过信号滤波、放大和算法解析，得到心率、呼吸频率、脉搏波形、心血管弹性等主要的健康指标。压电传感器相比光电传感设备来说，不被光线、皮肤色素影响，信号更稳定，能很好地识别出微小的脉搏异常信号，为高血压、心律失常、动脉硬化等心血管疾病的早期筛查提供数据支撑。相关研究显示，利用 PVDF-TrFE 复合薄膜制作的压电传感贴片可以准确地采集到桡动脉、颈动脉的脉搏信号，心血管参数检测准确率可以达到 98% 以上，可以进行全天候无创监护。

压电传感器可以贴附到关节、四肢等部位上，可以对关节弯曲、肢体摆动、步态变化等运动形变信号进行实时采集，利用机器学习算法对运动姿态、运动幅度、步态特征进行分类识别，被广泛地应用在运动康复、姿态矫正、步态分析等领域[4]。根据脑卒中、骨关节损伤患者康复训练的需求，以压电传感集群为基础的智能康复设备可以对患者的肢体运动进行实时采集，并且能够准确地评价康复训练的效果，从而达到智能化监测和指导的目的。同时该类传感器可以用于运动健康监测，准确地统计出运动步数、运动幅度，并且可以识别出异常的运动姿态，从而避免运动损伤的风险。

### （二）智能机器人仿生触觉感知

仿生触觉感知是智能机器人实现自主作业、精准操作、环境自适应的主要能力，传统的机器人依靠视觉感知，不能准确地识别出接触力度、物体材质、表面纹理等物理信息，不能完成精密抓取、柔性操作等复杂的任务。压电传感器由于具有高灵敏度、快响应、柔性集成等特点，是机器人电子皮肤、仿生触觉系统的主要感知器件，使机器人由“视觉智能”向“触觉智能”转变[5]。

利用复合压电材料制作出高密度传感阵列，粘贴在机器人机械手和机身表面，模仿人体皮肤的触觉感知作用，准确地对接触压力、形变大小、接触位置、振动频率等各方面力学信息进行检测。相比于传统的电容式触觉传感器，压电触觉传感器的响应速度比它要快很多，响应延迟少于20ms，压力检测的分辨率也比它高得多，可以达到0.5N 的精度，而且具有自供电能力，不需要一直供电，可以有效地减少机器人的功耗。有关实验表明，将 MXene 复合压电传感器与仿生机械手相结合之后，可以对平面形变进行0.1mm 级别的精确捕捉，对玻璃、金属、塑料等不同材质的物体的抓取成功率可以达到98% 以上，很好地解决了传统机器人抓取力度不稳定、容易损坏易碎物品的问题。

智能环境自适应感知利用压电传感阵列通过对接触振动信号时频特性的分析来判断物体是否为硬或软、表面是否为纹路等，并且实现对未知物体的智能识别与分类[6]。采用深度学习算法的压电触觉感知系统能够实现复杂的环境下的自适应操作，可完成精密零件装配、柔性物品抓取、易碎物品搬运等任务，被广泛应用于工业机器人、服务机器人、特种探测机器人等。同时基于磁压电复合材料的传感器件可以实现无复杂的解码来完成定向力学感知，从而大大提高机器人和人之间的交互以及远程操控的准确性。

### （三）工业智能监测与智能制造感知

工业智能感知是智能制造、工业设备状态监测、安全生产管控的基础，需要传感器具有高精度、高稳定性、抗干扰、全天候工作能力。压电传感器由于具有优良的力学检测性能、耐高温、抗振动、成本低等特点，在工业设备故障诊断、机械振动监测、工业压力检测、智能制造过程质控等方面得到广泛应用，从而推动工业生产向智能化、无人化、高精度方向发展。

压电传感器可以准确获取电机、轴承、齿轮、机床等工业设备运转时产生的振动和冲击信号。设备正常工作和故障时振动频率、振幅有很大差别，利用实时采集压电传感信号并配合频谱分析、机器学习算法，可以准确地找出设备磨损、松动、卡顿、异常振动等早期故障，从而达到对设备故障的提前预警和预测性维护的目的，防止设备突然出现故障造成生产停滞和安全事故的发生。相比于传统的人工巡检方式，压电智能监测系统可以实现24小时不间断的监测，故障识别准确率可以达到95% 以上，大大降低了工业运维成本，提高了生产安全[7]。

Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License 

智能制造过程中质控上，将压电传感器嵌入到自动化生产线、精密加工设备当中，对加工压力、刀具变形、工件受力状况实行实时监测，精准调节加工精度，保证精密零件加工的稳定性[8]。冲压、锻造、注塑等成型工艺中用压电传感器实时采集成型压力的变化，根据压力变化情况调节工艺参数，从而达到减少产品次品的目的。在工业安全生产方面，压电传感器可以用来做管道压力监测、设备冲击检测、厂房结构振动监测，及时发现管道泄漏、结构松动、设备过载等安全隐患，从而达到工业生产安全智能化防控的目的。

**（四）智能人机交互感知**

人机交互是智能终端、智能家居、虚拟现实（VR）、增强现实（AR）等智能设备的主要功能，压电传感器因为具有高灵敏度、柔性适配、低功耗等特点，打破了传统的触控交互方式，给人们带来了多样化的、智能化的、沉浸式的交互体验。传统的触控传感只能识别接触的位置，不能感知到按压力度、触摸的姿态等信息，交互维度单一，压电智能传感系统可以实现力度、位置、振动、形变的全方位感知，大大提高人机交互的智能化水平。

在智能终端设备中，柔性压电传感薄膜可以集成到手机、平板、智能手环的屏幕上和机身里，从而达到压力触控、轻重按压区分开来、曲面触控交互的效果，代替传统的机械按键和单一触控模式。压电传感在智能家居中可以应用到智能门窗、触控墙面、柔性触控面板上，依靠压力感应来完成智能灯光、家电的触控控制，满足各种家居交互需求。压电触觉反馈传感器在虚拟环境中能够对人的触摸力度、手势动作做出正确的识别，并且可以给虚拟环境发出触觉振动反馈，提高用户沉浸式的交互体验[9]。

基于压电传感的智能手势识别设备，通过采集手指弯曲、手势形变的力学信号，再利用人工智能算法进行准确的手势识别，在智能操控、无人设备远程控制、无障碍智能交互等方面得到应用，为人机交互轻量化、智能化的发展提供技术支持。

**（五）智能人机交互感知**

人机交互技术是智能终端、智能家居、虚拟现实、增强现实、智能穿戴设备的核心功能，传统触控交互仅能识别接触位置，存在交互维度单一、反馈单一、体验感差等缺陷，难以满足沉浸式、智能化、轻量化的交互需求。压电传感器凭借高灵敏度、曲面柔性适配、多维感知、低功耗的优势，打破了传统交互模式的技术局限，实现了力度、位置、振动、形变的全方位多维交互。

在智能终端领域，超薄柔性压电传感薄膜可集成于手机、平板、智能手环、智能手表的屏幕与机身内部，实现轻重按压区分、曲面触控、压力感应等新型交互功能，替代传统机械按键与单一平面触控模式，丰富智能终端的交互方式[10]。在智能家居领域，压电传感器可应用于智能门窗、触控墙面、柔性触控面板，通过压力感应实现灯光调控、家电启停、场景模式切换等智能化家居交互，提升家居生活的智能化与便捷度。

在 VR/AR 虚拟现实领域，压电触觉反馈系统可精准识别用户手势动作、触摸力度、肢体形变，同时通过逆压电效应输出振动反馈，构建沉浸式触觉交互场景，解决虚拟交互无触感、真实度低的痛点，大幅提升虚拟仿真、虚拟训练、虚拟娱乐的交互体验。基于压电传感的智能手势识别设备，可精准采集手指弯曲、手势形变的力学特征，结合人工智能算法实现精准手势识别，广泛应用于智能设备操控、无人设备远程控制、无障碍智能交互等场景，推动人机交互向轻量化、智能化、无感化方向发展。

## 三、结论

压电传感器依托独特的机电耦合特性、无源自供电优势、高灵敏度与柔性适配能力，完美契合现代智能感知技术轻量化、低功耗、高精度、全天候、分布式的发展需求，已广泛应用于智慧医疗健康监测、智能机器人仿生感知、工业智能制造监测、环境智能感知、沉浸式人机交互等核心领域，是现代智能感知体系不可或缺的核心器件。本文系统梳理了压电传感器的压电效应机理、主流材料体系、核心应用场景与最新研究成果，深度剖析了当前压电传感技术存在的材料性能受限、多维感知能力不足、智能化集成度低、产业化体系不完善等技术瓶颈与应用短板。

随着纳米材料改性技术、柔性微纳制备工艺、人工智能信号处理算法的持续迭代升级，压电智能传感技术将逐步实现性能优化、结构创新、算法赋能与工艺升级，有效突破现有技术短板。未来通过持续推进材料复合改性、结构多维设计、智能集成赋能、产业标准构建，将进一步提升压电传感器的检测精度、环境适应性与运行稳定性，持续拓展其高端化、精细化、多元化应用场景，为智能制造升级、智慧医疗普及、智能装备创新、智慧城市建设提供强有力的底层感知技术支撑，助力我国智能感知产业高质量、可持续发展。

*参考文献*

[1] 蒋庆磊，李振亚，包彬彬，等 . 压电加速度传感器结构参数对测量影响分析 [J]. 机械工程与自动化 ,2025,54(6):84-87.

[2] 马明玉，顾晨，刁章彪，等 . 压电陶瓷传感器系统仿真与接口电路设计方法研究 [J]. 国外电子测量技术 ,2025,44(11):120-125.

[3] 许光毅，李艳，顾锦涛，等 . 柔性压力传感器及其微型化的发展现状与趋势 [J]. 包装工程 ,2025,46(21):11-21.

[4] 陈穆瑶，古依聪，康彦姝，等 . 低温压电加速度传感器温度漂移优化设计 [J]. 舰船电子工程 ,2025,45(11):148-152.

[5] 徐一唯，胡志军 . 多孔形 PVDF 压电传感器的设计与性能分析 [J]. 电子技术 ,2025,54(7):4-6.

[6] 压电式传感器：机器健康监测中探测早期故障的首选 [J]. 设备管理与维修 ,2025,(11):6.

[7] 吴明鑫 . 基于离子液体的多功能柔性传感器和离子压电性能的研究 [D]. 东莞理工学院 ,2025.

[8] 贾旭莹 . 聚丙烯腈环化增强柔性压电传感器设计与研究 [D]. 中北大学 ,2025.

[9] 安琪 . 面向心音心电同步检测的压电式心音传感器设计及系统研究 [D]. 中北大学 ,2025.

[10] 李嘉 . 基于柔性多传感器融合的下肢动作采集及识别研究 [D]. 太原科技大学 ,2025.

 Copyright © This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License