

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107884

面向脉诊客观化的脉搏传感器研究综述*

罗静静^{1,4}, 左晶晶¹, 季仲致¹, 陈启亮², 周 鹏^{1,3}

(1. 季华实验室 佛山 528251; 2. 广州中医药大学基础医学院 广州 510006; 3. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300193; 4. 复旦大学工程与应用技术研究院 上海 210043)

摘要:脉诊客观化是利用现代仪器和设备,客观记录脉象信息、提出分析方法与参数指标,并结合中医脉象信息量化原理服务中医病证辨识的过程。由于脉搏信号质量直接影响脉象分析的方法和结果,脉诊客观化研究的重要内容是脉象信息的采集和处理,关键在于脉搏传感器的选择。本文从脉诊客观化的国内外研究进程以及目前所面临的客观化标准不统一、无法广泛应用于临床等问题出发,列举分析了压力式、光电容积式、光纤式传感器等几种典型的脉搏传感器及其在脉搏监测系统中的应用现状。本文重点介绍了脉诊仪的柔性、面阵式压力传感器,及其在多位点脉搏检测性能上的优势,并展望了脉搏传感器的发展方向及应用领域,为中医脉诊传感器及客观化的进一步研究提供了新的思路。

关键词:脉搏传感器;脉诊客观化;柔性;面阵式;应用现状

中图分类号: TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Research review on pulse sensors for pulse diagnosis objectification

Luo Jingjing^{1,4}, Zuo Jingjing¹, Ji Zhongzhi¹, Chen Qiliang², Zhou Peng^{1,3}

(1. JiHua Laboratory, Foshan 528251, China; 2. School of Basic Medicine, Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510006, China; 3. School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300193, China; 4. Academy for Engineering & Technology, Fudan University, Shanghai 210043, China)

Abstract: Objectification of pulse diagnosis is a process of combining the quantitative principle in traditional Chinese medicine (TCM) to objectively record pulse information, propose analysis methods, and serve for the disease and syndrome identification, by using advanced instruments and equipment. Since the quality of pulse signal directly affects the method and result of pulse analysis, the important content of objectification research of pulse diagnosis is the collection and processing of pulse information, and the key lies in the selection of pulse sensor. Starting from the research progress of the objectification of pulse diagnosis at home and abroad, and the problems that the objectification standards are not unified and can not be widely used in clinical practice, this paper lists and analyzes several typical pulse sensors such as pressure type, photoelectric volumetric type and optical fiber type sensors, and their application status in pulse monitoring system. This paper emphasizingly introduces the flexible and planar pressure sensors of pulse instrument, and its advantages in the performance of multi-site pulse detection, and prospects the development direction and application fields of pulse sensor, which provides a new idea for the further study of pulse sensor and objectification of traditional Chinese medicine.

Keywords: pulse sensor; pulse diagnosis objectification; flexible; area array type; application status

0 引言

在中医“望闻问切”四诊中,脉诊占有重要地位。传

统中医通过触觉感知不同按压力度下患者桡动脉处的脉搏搏动,依据个人经验判断不同脉象下的生理病征信息。脉诊作为我国传统医学中最具特色的一项辅助诊断方法,具有全面、无创、安全等优势。

收稿日期:2021-05-06 Received Date: 2021-05-06

* 基金项目:广东省重点领域科研计划季华实验室项目(X190051TB190)、上海市市级重大专项(2017SHZDZX01)资助

中医手指切脉技巧需深入学习及经验积累,且存在客观描述不完善、标准不统一、医师主观性强、脉象无法以统一标准记录保存等问题,导致脉诊临床诊断时分歧较多,准确性、可重复性较差。为加深对脉象机理的研究,近年来各领域科研工作者们协同合作将传统中医脉诊与现代科技相结合,研制出多种模式的脉诊仪。

脉诊仪通过脉搏传感器实现感知和采集脉象信号,并利用脉象识别技术对信号进行处理和分析,最终得到客观化的定量指标。因此,脉象信息的获取和处理是脉诊客观化研究的关键,而基于压力获取脉搏信号的传感器成为采集脉象信息的关键。随着现代科学在材料、结构、传感器工艺及信号处理等方面的技术突破,脉诊仪也逐渐趋于小型化、智能化、客观化^[1]。对于脉搏信号的采集和分析是目前脉诊仪的两大研究重点。脉搏信号微弱、频率低、信噪比低、信息量大且复杂多变,脉搏传感器采集到的信号质量将直接影响脉搏信号的处理和分析,从而影响整个脉诊系统的客观化。随着科技的进步,柔性面阵式脉搏传感器受到越来越多的关注。下文将介绍几种典型脉搏传感器及各自优势与应用现状,并重点介绍可广泛用于脉诊仪的柔性面阵式压力传感器,展望脉搏传感器的发展方向及应用领域。

1 脉搏传感器研究现状

1.1 国内外研究进程

国际上对脉搏信号的获取分析始于1860年 Vierordt 创建的第一台弹簧杠杆式脉搏描记仪。1953年日本藤田六郎教授用麦秆法、电阵法和羽毛法试图将脉诊客观化,并在之后研制出了非接触式的光电容积式脉搏传感器^[2]。冈田腾研发出了适用于浮中沉三种等级压力检测的传感元件并记录下脉搏波形。近年来,国外研究多致力于传感器或脉搏信号分析处理角度提升脉诊仪性能,缺乏对手指按压把脉机理的深入研究,未能从模拟中医诊脉过程的角度开展脉诊仪设计。

国内研究虽起步较晚,但是从中医学理论研究角度出发关注传感器设计和脉象识别技术。从20世纪50年代初我国^[3]尝试利用机械式传感器直接描记脉搏波形开始,陆续产生了基于不同传感原理和探头形式的脉搏传感器。脉搏传感器经历了由单点式到模拟中医切脉的阵列式多点式的变革。到80年代后,多功能和智能脉象仪相继出现,在一定程度上实现了脉搏信号的客观化描记与分析^[4]。迄今为止脉诊仪在寻脉、取脉、诊脉等关键环节实现了中医脉诊,但尚且没有一款在临床辨证中得到广泛使用,脉诊仪仍处于不断探索研发与创新阶段。

1.2 面临的问题

从20世纪50年代至今,针对脉搏传感器及测量技术的研究取得了很大的进展,但对于脉诊客观化而言,仍然面临很多问题。脉搏信号包含极为丰富的生理病理信息,利用脉搏波形与中医诊断配合实现临床上与病症对应目前还无法实现。并且各类脉搏传感器原理、结构、性能不同,所得脉象图波形及各项测量参数指标不一致,使得脉象诊断标准不统一、客观化指标缺乏一致性,难以广泛应用于临床。

尽管目前各类脉搏传感器在精度等各种性能上有很大提升,但检测原理与中医传统诊脉原理相差较大,对于中医指下触感的真实还原还有一定困难,尤其是多位点、多压力梯度等信息完整度不足。针对以上问题,我们进行了对不同种类脉搏传感器的优劣势对比及举例分析,并在关键指标上进行了整理,总结了一些新兴的脉诊装备。综合分析,我们认为虽仍然任重道远,但将脉象图参数与真实脉象特征及相关病症对应起来,并且实现脉诊客观化是有意义、有前途的。

2 脉搏传感器的研究进展

目前应用比较广泛的脉搏传感原理有传统的机械式、压力式、光电容积式及近年来广泛兴起的新型脉搏传感器,包含光纤类、微机电系统(microelectromechanical system, MEMS)芯片、传声器、自供电式、新型超声波式和柔性面阵式等。表1整体分析了几类传感器应用于脉诊仪中的优势及存在的问题。基于传统传感原理的压力式、光电容积式等,目前技术较为成熟且应用最为广泛,但由于自身传感原理限制导致的问题也较突出。新型传感器应用于脉搏信息传感,光纤式低损耗抗电磁干扰;MEMS芯片体积小适于集成;传声器、超声式均为非接触式,能较大程度呈现脉象的真实性;柔性面阵式机械性能好、采集信息量大;但都存在技术发展不成熟、难以普及等问题,仍需深入研究。

2.1 压力传感器

压力传感器依据传感原理分为压电式、压阻式、电容式、谐振式以及压磁式(电感式)等,目前基于压力传感器研制出了多种类型的脉诊仪,且技术研究已经较为成熟。图1中列举了几种典型的应用压力传感器的脉诊仪设备。

1) 压电式传感器

压电式压力传感器的基本原理是电介质的压电效应。搏动的脉搏作用于传感器,使压电材料表面产生电荷,从而将压力信号转换为电信号^[5]。这种压电材料有很多,如锆钛酸铅压电陶瓷($\text{PbZrTi}_{1-x}\text{O}_3$, PZT)、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)等,而多孔PP、PVDF等材料因具有柔性,更适用于脉搏传感器当中^[6-9]。

表 1 各种类型的脉搏传感器优势及应用中存在的问题

Table 1 Advantages of various pulse sensors and problems existing in their applications

传感原理	优势	应用中存在的问题
压电式	结构简单,耐高温,重复性、再现性好,机械性能优良,精度较高,与人体皮肤的特征阻抗相匹配	不宜进行静态压力测量,信号放大需特殊的放大器,成本较高
压阻式	应用广泛、技术成熟、动态范围宽,抗过载能力强,灵敏系数高,频率响应高,精度可达 0.1%	黏合剂性能、环境温度影响较大,需温度补偿或恒温条件
电容式	低功耗,温度稳定性好,动态响应好,精度可达 0.1% ~ 0.01%	寄生电容,输出阻抗高,负载能力差,输出特性非线性,后端电路复杂
谐振式	适用于气体压力的测量、体积小、输出频率信号、重复性好、耐振、有良好的稳定性,精度可达 0.01%	工艺较为复杂,生产周期长、成本高且需要高性能的处理电路
压磁式(电感式)	新兴技术、结构简单,输出功率大,信号强	信号采集电路复杂,噪声干扰严重,成熟度低、应用不完善
光电容积式	非接触式测量,抗干扰能力强,具有良好的线性度好	获取的脉搏信息较少,结构复杂成本高
光纤式	低损耗、体积小、耐腐蚀、电绝缘、抗电磁干扰	须用特殊光纤,成本高,用于脉搏传感需深入研究机理
MEMS	灵敏度更高更适于集成、功耗更低且性能稳定	传感器工艺和封装技术须深入研究
传声器	非接触式,干扰小	检查原理不符合中医指压脉诊的特点
超声多普勒	除检测脉搏搏动信息外,还可观察管腔容积、血流速度、脉管三维运动	检测成本高且检测原理不符合中医指压脉诊的特点
基于柔性新材料的面阵式传感器	机械性能、电学性能好及可大面积加工;采集数据量更大,精度更高	阵列一致性差、系统成本高,脉搏信号获取和分析等方面还须深入研究

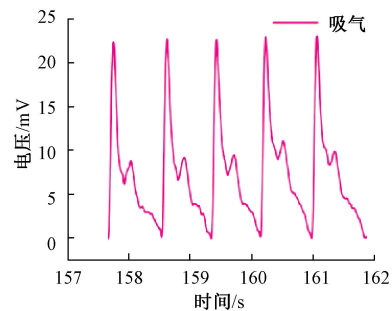


图 1 常见脉诊仪举例

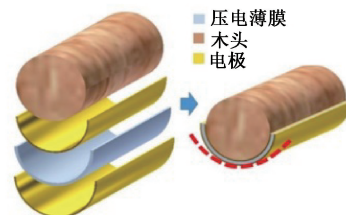
Fig. 1 Examples of common pulse instruments

中国科学院力学研究所^[10]用 PZT 作为压电材料,在聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 衬底上制备柔性传感器,测量动脉血压灵敏度达到 0.005 Pa^{-1} 。2019 年,美国休斯顿大学 Chen 等^[11]利用 III-N 氮化单晶 (III-N) 薄膜制备了一种可以检测微米级形变的柔性压电式脉搏传感器 (flexible piezoelectric pulse sensor, F-PPS),可承受超过 13 000 次的循环力测试,满足了柔性脉搏传感器应用的灵敏度和耐久性要求,将其附着在皮肤表面,可灵敏检测大多数动脉部位带有详细特征峰

的脉搏波形,如图 2(a) 所示。加州大学伯克利分校^[12]采用木质圆柱衬底的柔性多孔 PP 压电驻极体脉搏传感器来模拟中医采脉过程、记录脉搏特性并结合近似熵 (approximate entropy, ApEn) 分析,证实 ApEn 值 0.1 是评价人体健康状况的阈值,如图 2(b)、(c) 所示。压电式脉搏传感器虽结构简单,但无法检测静态压力且需特殊的电荷放大器,这些问题限制了其当前实际应用。



(a) III-N 薄膜 F-PPS 在桡动脉处测得波形^[11]
(a) The waveforms measured at the radial artery with the III-N thin film F-PPS^[11]



(b) 柔性 PP 压电驻极体脉搏传感器示意图^[12]
(b) Flexible PP piezoelectric electret pulse sensor schematic diagram^[12]

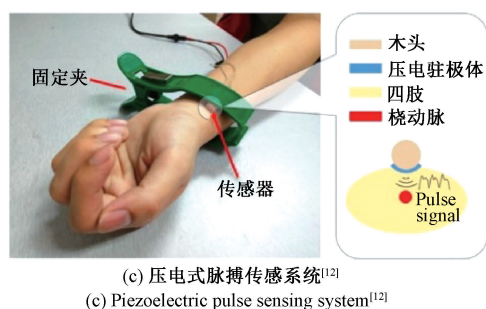


图2 压电式脉搏传感器举例

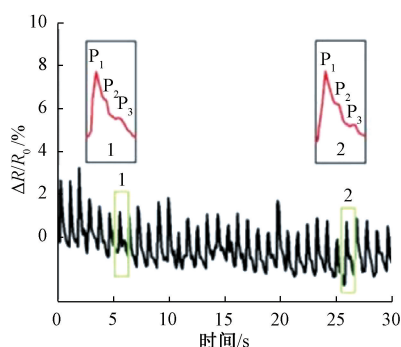
Fig. 2 Examples of the piezoelectric pulse sensors

2) 压阻式传感器

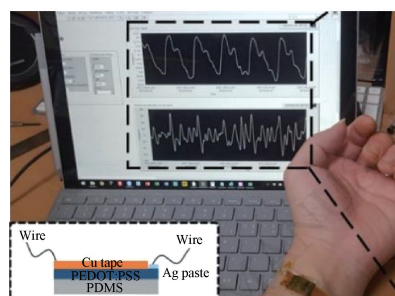
压阻式传感器的基本原理是应力作用下电阻率的变化,结构设计及读出电路比较简单,目前应用最为广泛^[13-14]。根据压力的传导方式(固体、导电液柱、气体)不同,又分为固态压阻式、液压和气动式传感器。借助液体或气体作为脉搏压力变化的传导媒介,可大大提高传感器的性能。

MX-811 型脉诊仪是将水银血压计接于传感器探头,以气导方式加压感测脉搏。此外,ZM-III型、ZMC-I型、MX-Y-I型等脉诊仪也都采用压阻式脉搏传感器。韩

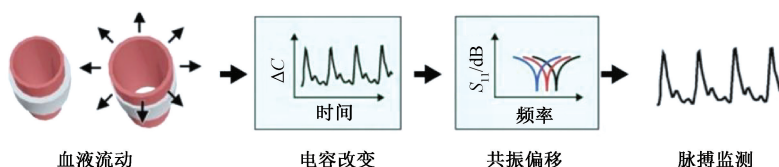
国科学技术研究院将基于三维微孔介质弹性体的压阻效应制备的柔性可穿戴压力传感器用于脉搏波检测^[14]。清华大学任天令教授课题组利用石墨烯多孔网络(graphene porous networks, GPN)与PDMS复合材料制备的压力应变传感器,可用于监测手腕血压^[15]。北京航空航天大学研制的基于高导电性过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物(MXene)和具有多孔结构聚乙烯醇缩丁醛(polyvinyl Butyral, PVB)材料的高灵敏度压阻传感器可用于呼吸、脉搏等生理信号检测当中^[16]。近期,北京航空航天大学展示了一种基于分层3D和多孔结构的还原氧化石墨烯纤维织物(reduced graphene oxide fiber fabric, rGOFF)作为关键传感元件的柔性压力传感器,在压缩应变为66.0%时具有最高灵敏度系数($GF = 1\ 668.48$),可用于监测脉搏,如图3(a)所示^[17]。2019年韩国的Ho等^[18]提出了一种基于旋涂在PDMS基底上PEDOT:PSS(由PEDOT和PSS两种物质构成,PEDOT是EDOT(3,4-乙烯二氧噻吩单体)的聚合物,PSS是聚苯乙烯磺酸盐)传感膜的新型柔性压阻式脉搏传感器,以鲨鱼皮肤作为仿生模具制作PDMS,与平面PDMS基板相比,鲨鱼皮的几何形状增大了接触电阻,从而显著提高了脉搏传感器的灵敏度,可达 62.56 kPa^{-1} ,如图3(b)所示。



(a) 基于rGOFF的压阻传感器电阻随时间的相对变化^[17]
(a) The relative variation of the resistance of the piezoresistive sensor based on rGOFF with time^[17]



(b) 新型柔性压阻式脉搏传感器^[18]结构图及脉搏测试图
(b) Structure diagram and pulse test diagram of a new flexible piezoresistive pulse sensor^[18]



(c) 基于两个可变电容器的脉搏传感器传感原理^[22]
(c) The sensing principle of the pulse sensor based on two variable capacitors^[22]

图3 压阻和电容式脉搏传感器举例

Fig. 3 Examples of piezoresistive and capacitive pulse sensors

经过调研我们发现,借助柔性新材料提升灵敏度的方式目前正广泛应用于脉搏传感器当中。但压阻式脉搏

传感器阻值易受环境、接触面干扰,稳定性低,需温度补偿或恒温环境,是在广泛应用中需要考虑的问题。

3) 电容式传感器

电容式压力传感器是利用电容敏感元件将被测压力转换成与之成定量关系的电量输出的压力传感器^[19]。在实际应用中常采用差动式结构来改善非线性、提高灵敏度和减小外界因素(如电源电压、环境温度等)的影响,也可通过使用微结构电极或介电层的方法提高灵敏度^[20]。

近日,南方科技大学报道了一种具有梯度内嵌微结构离子膜的电容传感器,有效提高了传感器的结构可压缩性,可用于脉搏、呼吸等健康监测中^[21]。史丹佛大学的 Boutry 等报道了一种完全由可生物降解材料制成的基于边缘场电容技术的压力传感器,用于实时监测动脉血管血流^[22]。该传感器通过电感耦合无线操作,具有可忽略的迟滞、毫秒级的快速响应时间及优异的循环稳定性,其传感原理如图 3(c) 所示。

由于极板间的静电引力很小,需要的作用能量极小且固有频率很高、动态响应时间短,故电容式传感器很适合测量动态(振动、瞬时压力等)及小压力输入。然而,如何减小寄生电容、解决输出特性非线性和负载能力差、后端测量电路复杂等问题,也一直是研究的重点。

2.2 光电容积式

光电容积式(photoplethysmograph, PPG)传感器检测脉搏的原理是血管容量随脉搏搏动发生变化,引起血管中血红蛋白对光线的吸收量随之变化,通过监测光线强度来获取脉搏信号^[23]。在脉象信号采集过程中一般采取光线的反射式接收方式。相较于其他类型的传感器,光电式传感器具有抗干扰能力强、信号稳定性好、具有绝缘性、不受电磁干扰等优势^[24]。然而,对深度不敏感使测量的 PPG 信号与毛细血管、微动/静脉等不同血管类型的脉动成分混合,导致测量信号混合成分多、信噪比较低^[25]。通过多波长提取动脉脉搏的方法和植入式 PPG 传感器可以进行改进。

日本研究人员 Mikio Aritomo 等于 1999 年首创将光电传感器应用在脉搏信号采集设备当中。日本 NEC 公司的 Hashimoto 等^[26]通过设计柔性贴片式的光电脉搏传感器来监测脉搏波,稳定条件下与腕带式性能等效,但贴合度更高且可随意放置,对身体运动噪声的抑制效果非常明显。

虽然已有大量应用实例,验证目前光电式脉搏传感器便携、传输速度快且无创非接触,但测定脉搏时受人体组织散射作用及血管弹性影响较大,灵敏度、信噪比不高,且易受到环境光等噪声干扰造成信号失真^[27],应用有待更多的临床试验支持。

2.3 新型脉搏传感器

1) 光纤脉搏传感器

光纤传感器在应用上分为传光型和感光型,前一种起到传输光的作用,传感元件要与光纤连在一起;后一种

既有传输又有传感作用。作为传感用的光纤,原理是通过对所传输光的偏振、强度、相位、波长、周期、频率等进行调制,通过检测器获得调制结果而进行传感^[28]。

目前医学上常用的光纤压力传感器是 FOP-125,具有专为医疗领域设计的超小体积,高精度和高分辨率。Fan^[29]设计了一种基于高灵敏度光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的方形膜片压力传感器,灵敏度在 0~200 kPa 范围内可达 3.402 pm/kPa,且测定系数较高,为 0.998 5。华中科技大学在 2019 年提出了一种基于膜片的光纤脉搏传感器,是一种由运动腕带和直径仅为 1 cm 的铝膜片光纤传感器尖端组成的可穿戴设备,采用相干相位检测提高检测信噪比,恢复高保真脉搏波形,对微弱的声信号具有高灵敏度^[30]。李娜等^[31]在 2020 年提出了一种以迈克尔干涉为理论基础的反射式异芯光纤传感器,灵敏度为 155.148 nm/RIU,并探究了其在脉搏和呼吸监测上的应用。宋大伟^[32]在 2018 年设计了一款基于布拉格光纤光栅的脉搏测量装置,以外界弯曲曲率为横坐标,反射峰对应中心波长(dB)的相对光强为纵坐标,测得反射峰对应的微弯灵敏度为-0.6 dB/m。

综合传感原理及应用实例可以看出,光纤本身具有大容量、低损耗、体积小、耐腐蚀、电绝缘、抗电磁干扰等优势,且传感探头体积小,不需前端放大装置。相比于其他通过血管的容积变化来间接测量血压的方式,基于血管壁的应力传导使光纤发生形变的测量原理充分考虑到血管壁的自然形态,使得光纤脉搏传感器的测量细节更加丰富,有广阔的研究前景。

2) MEMS 芯片

相比于其他类型的传感器,MEMS 芯片尺寸更小,通常在毫米或微米级,灵敏度更高更适于集成、功耗更低且性能稳定,非常适用于智能化电子产品当中^[33]。

近年来 MEMS 脉搏传感器广泛应用于智能手表手环等穿戴式设备的脉搏检测当中,如 Epson E200 手表中配置的光学式 MEMS 脉搏感测器等^[34]。东京大学的 Nguyen 等^[35]提出并实现了一种基于 MEMS 压阻悬臂梁的脉搏传感器,将其附着于血管上方的皮肤表面可测量脉搏波,用两个传感器还可以测量脉搏波传播速度(pulse wave velocity, PWV),如图 4(a) 所示。2018 年 Su 等^[36]提出了一种包含 3 个 MEMS 压力传感器,1 个血氧探测器和 1 个三轴加速度计的可穿戴式多传感器脉搏监测系统。日本的 Nguyen 等^[37]在 2019 年报道了利用附在眼镜鼻垫上的带有压阻悬臂的 MEMS 压力传感器,其输出的低通和高通滤波信号可实现同时测量脉搏波和呼吸率,传感分辨率约为 0.01 Pa。

微型化、便携化、高精度的 MEMS 脉搏传感器在当今智慧医疗领域具有广阔的发展前景,但在集成及制作工艺上仍有很大的进步空间。

总结而言,这种将压力脉搏波与超声脉管图像结合分析的方式,改变了传统脉诊仪只能获得单一的压力信息的方式,可以实现脉象可视化,能更加全面地为脉诊提供客观依据。但大多设备庞大、成本较高,难以实现普及化和便携化^[51]。

6) 柔性阵列式压力传感器

单点单压力的一维脉搏检测装置不能像手指一样精细感觉并全面反馈脉象信息;光电式、阻抗容积式脉诊仪和传声器等检测方式不符合中医指压诊脉的特点;刚性探头也无法提供良好的舒适度和贴合性,当探头面与采集区域有微小偏移时易干扰脉象信号的采集^[52]。由此,从仿生学角度出发模拟手指触觉,并能多点采集脉象信息的柔性面阵式压力传感器的出现成为必然。

我国关于柔性阵列式压力传感器的研究开始于 1987 年,最早东南大学实现了压阻式 16×16 触觉敏感阵列数据处理和触觉图像识别。随着柔性电子材料及可穿戴医疗设备的发展,柔性压力传感器凭借其优良的机械、电学性能以及大面积可加工等优势在电子皮肤、机器人感知、人机交互、生物医疗器械及家庭健康监测等方面应用越来越广泛^[53-54]。其基本组成包含柔性衬底、作为核心的传感结构层、介电层及电极 4 部分。作为传感结构层的高灵敏度柔性传感材料,具有高灵敏度、宽动态频率响应范围、易加工、温度稳定好、超薄超轻超柔性等优势,典型材料选择及举例如表 2 所示,目前应用最为广泛的石墨烯、纳米线等材料均能提供优异的灵敏度。

表 2 柔性压力传感器传感结构层的材料选择及举例

Table 2 Material selection and examples of flexible pressure sensor sensing structure layer

材料选择	举例	灵敏度
碳材料(碳纳米管、石墨烯类、炭黑)	PDMS 介电层填充在两层单壁碳纳米管薄膜 ^[55]	0.23 MPa^{-1}
	分层工程弹性碳纳米管织物 ^[56]	0.05 kPa^{-1}
	多层石墨烯纳米片与 PDMS 掺杂成多空洞结构 ^[57]	0.23 kPa^{-1}
金属纳米线	基于超薄金纳米线 ^[58]	1.14 kPa^{-1}
导电弹性体	水凝胶中空球形微结构 ^[59]	133.1 kPa^{-1}
ZnO 纳米线	温水热工艺与热纳米压印光刻技术结合 ^[60]	$21.2 \text{ } \mu\text{V/kPa}$

2019 年上海中医药大学^[61]利用美国 PPS 公司设计的 3×4 通道柔性阵列式传感器采集了多维脉搏图特征并用线性插值算法计算了阵列脉搏体积参数,如图 5(a)所示。2020 年 Hao 等^[62]提出了一种基于 5×1 柔性压阻式传感器阵列,并加入 PDMS 层来放大被测脉搏信号。韩国的 Kwangsun 等^[63]报道了一种利用注射器将柔性脉搏传感器阵列植入皮下来实现对脉搏信号的表征,有助于开发新型柔性医疗电子植入式设备,实现对人体生命信号的实时监测,测试得到的脉搏波信号如图 5(b)所示。香港中文大学的 Luo 等^[64]利用如图 5(c)所示的规则交织的纺织材料,制作了高重复性和低滞后的柔性压阻传感器阵列,使得多个传感器性能变化仅为 5%,磁滞回线偏差 10% 以下,用以监测脉搏压力和脉搏波速度,表明将可穿戴传感系统用于多功能心血管检测的潜力。2018 年,中国科学院北京纳米能源与系统研究所^[65]通过掩模辅助 Ni 涂层和碳纳米管(carbon nanotube, CNT)织物的融合,在普通织物基底上实现了大面积织物基压力传感器阵列的制备,可实现对于脉搏的检测。

然而,使用柔性面阵式脉搏传感器也有很多问题亟待解决,例如,缺少对手指切脉机理的深入研究、无法将

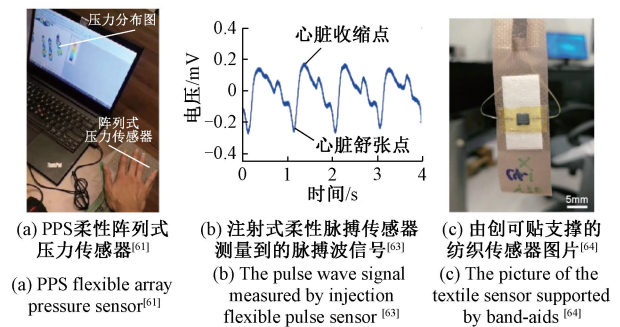


图 5 柔性阵列式压力传感器举例

Fig. 5 Examples of flexible array pressure sensors

脉搏信号与病症对应;并未将面阵式传感器的很多采集参数客观化,如采集区域、施压范围、手指自由度等参数;还有通常使用的柔性硅橡胶,虽有减震滤波的作用,但可能会因吸振作用导致脉搏信号丢失部分信息等。

表 3 中列举了多种脉搏传感器,虽传感原理各异,但都具有各自的优势及不足。传统压力传感器应用最广泛,检测性能仍有很大提升空间;MEMS 传感器体积小易于集成;柔性面阵式采集信息量更全面但目前检测误差相对较大。

表 3 脉搏传感器举例及性能对比
Table 3 Examples and performance comparison of pulse sensors

传感器类型	检测性能				
	灵敏度	检测限	响应时间/ms	分辨率	其他指标
GPn 与 PDMS 复合材料制备的压阻式传感器 ^[15]	8.5 kPa^{-1} ($\Delta R/R_0/\text{压力}$)	响应范围:2 000 kPa	80		
基于 MXene 和 PVB 材料的高灵敏度压阻传感器 ^[16]	11.9 kPa^{-1}	可检测最小压力: 6.8 Pa	100		
基于 rGOFF 的柔性压阻式传感器 ^[17]	GF=1 668.48	可检测最小压力: 1.17 Pa	30		
具有梯度内嵌微结构离子膜的电容传感器 ^[21]	220 kPa^{-1}	响应范围:360 kPa	<10	18 Pa	
FOP-125 光纤压力传感器	5 mmHg			<0.4 mmHg	体 积:125 μm
基于将 MoS_2 沉积到 FBG 光纤芯上的脉搏传感器 ^[31]	弯曲曲率灵敏度: 8.1 nm/mm^{-1}				波长偏移:1.08 nm 反射光强度提高:~20 dB
基于 MEMS 压阻悬臂梁的脉搏传感器 ^[35]		可检测最小压力: 0.02 Pa			芯片尺寸:1.5 mm×1.5 mm×0.3 mm
包含三个 MEMS 压力传感器的脉搏传感器 ^[36]		检测范围:0~20 kPa	2		芯片尺寸:2 mm×2 mm×0.9 mm
点阵式三部 ^[66] 压阻式脉搏传感器	0.5 mV/mmHg	量程:0~300 mmHg			每个传感器大小:10 mm×7.5 mm×0.5 mm 平均预测误差:0.19%
基于 CMOS 的 5×5 电容阵列式 ^[67]	1.57 mV/mmHg	1 kPa 的全量程范围			单体尺寸:0.75 cm×1 cm 最大误差:3.2%
基于 MEMS 技术悬臂梁阵列式 ^[68]	0.54 mV/mg	施加悬臂梁顶端力范围为:0~600 mg			芯片尺寸:4 mm×4 mm×0.5 mm 线性度:4.28% 重复性:2.18%
柔性阵列谐振式脉搏换能器 ^[69]	0.2 mV/mmHg	量程:-100~+200 mmHg			每个谐振腔尺寸:14.8 mm×5 mm 非线性:0.5%
PPS 压阻式 3×4 通道柔性阵列式传感器 ^[61]	0.5 mV/mmHg	量程:0~300 mmHg			阵列大小:10 mm×7.5 mm 传感元件面积:2.5 mm×2.5 mm 厚度:0.5 mm

注:表中 1 mmHg~0.133 kPa,人体桡动脉血管压强 60~100 mmHg 即 7.98~13.33 kPa。

2.4 脉搏传感器的应用

近几年随着传感技术的进步,脉搏传感器的尺寸可以达到毫米级,促进了脉诊仪由单点式向多点多通道和面阵式发展,脉象图由二维向三维方向发展^[70-71]。近年来国内外也致力于开发无创非接触式的传感器,这类传感器通常在体表间接测量人体生化参数,可以自动消除仪表自身系统误差且测量精度高。

目前脉搏传感器的应用领域也越来越广泛。如图 6 所示,从最初实现基本的健康监测,即对人体脉搏信号、血氧饱和度、心率、收缩压等生理信号检测,到应用于无线睡眠监测^[72]、便携式手机监护系统^[73]、微型化和网络

化的多生理参数实时监测系统^[74]、进行体征信息管理的智能终端人机交互界面^[75-76]、便携式无线脉搏监测系统如智能手环^[77]等领域当中。近年来,还出现了支持心率测量的耳机,通过内嵌在左耳下端的测量模块,心率信息可以通过蓝牙传输到手机上,用户可以结合手机 app 来查看心率数据。

利用脉搏传感器检测到的脉搏波形分析还可用于评估左心室射血时间、动脉壁僵硬程度、连续心输出量等^[78-79]。叶思婷等指出利用极速脉搏波技术可以探讨成人颈动脉弹性功能,以研究早起动脉粥样硬化的进展方式^[80]。



图6 脉搏传感器的应用

Fig. 6 Application of pulse sensors

由于每个人的心跳是完全不同的,通过检测每个人的血液流动引起的红外光变化具有高度准确性。目前,一些公司已经开始利用心脏信号进行人员识别,通过佩戴在手腕上的脉搏传感器采集信息,可以检测人员独特的心脏特征,从而识别身份。然而,实现这种用途的最大障碍依然是需要足够大的数据库和复杂的图像处理和数据分析。

目前也有很多科研机构在进行有关穿戴式压力传感器对脉搏信号实时监测的研究,通过结合传感技术与纺织技术开发嵌入脉搏传感器的智能服装,达到实时监测人体脉搏信号的目的。

3 结 论

脉诊是中医临床极具特色的诊断方式,人体的脉象当中包含着非常复杂的生理及病理信息,但由于“脉理精微,其体难辨”,中医诊脉的主观性和差异性限制了中医事业的发展。因此,能够将中医脉诊客观化、规范化、现代化的脉搏监测系统的出现,具有十分重要的临床诊疗意义。脉搏传感器作为脉诊仪中的重要组成部分,是获取脉象信息的重要环节,对其研究也是重中之重。

我们认为,对于脉诊客观化及脉搏传感器的进一步研究可从以下几个方面开展:1)脉象信号是人体多种物理信号的协同作用,脉诊仪的采集装置也应包含不同原理的传感器协同检测、全面收集脉象信息,实现多元传感器的同时稳定工作;2)统一中医脉诊客观化诊断标准,克服中医的主观性,使得脉诊仪的监测数据可以精准匹配到对应病症^[81],建立智能化、标准化的诊断流程;3)建立面阵式脉搏传感器标定、测试的相应规范、标准,提升面阵式传感器的精确度及稳定性;4)紧密结合临床,开展大量样本的临床研究,在临床应用中不断发展完善;5)加强

多学科、多领域融合,从脉搏传感器技术、图像获取及处理技术、脉象识别技术等多个方向促进学术交流;6)实现便携式、移动式、智能化、小型化的面阵式脉搏传感器设计,提升人机交互性,实现实时采集和无线传输的远程互联网诊疗;7)将医生对于脉象的主观感觉与脉搏传感器客观采集到的数据信息结合分析,可以大幅提高诊断效率和准确性。

参考文献

- [1] 赵军宁,张翼冠,胡镜清,等. 分子版治未病——基于中医药理学与新一代技术装备的精准中医学发展前瞻[J]. 中药药理与临床,2019,35(4):2-9.
ZHAO J N, ZHANG Y G, HU J Q, et al. Molecular cure of disease: A prospective study of precision Chinese medicine based on traditional Chinese medicine science and new generation of technical equipment [J]. Pharmacology and Clinics of Traditional Chinese Medicine, 2019, 35(4): 2-9.
- [2] 梁中庆. 光闸式桡动脉波传感器的研制[J]. 中国医学物理学杂志, 1996, 13(1): 55-57.
LIANG ZH Q. Development of radial artery wave sensor with optical brake [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 1996, 13(1): 55-57.
- [3] 刘耀远,牛朴钰,申屠慰,等. 传感器种类及方案在中医脉象检测中的应用[J]. 中国中医药现代远程教育, 2021, 19(5): 191-193.
LIU Y Y, NIU P Y, SHEN T W, et al. Application of sensor types and schemes in pulse detection of traditional Chinese medicine [J]. China Modern Distance Education of Traditional Chinese Medicine, 2021, 19(5): 191-193.
- [4] 闪增郁,张喜,党娇娇,等. 基于智能脉诊仪的“人与天地相参”研究[J]. 中医杂志, 2019, 60(24): 58-62.
SHAN Z Y, ZHANG X, DANG J J, et al. Research on the coherence of man and heaven and Earth based on intelligent pulse detector [J]. Journal of Traditional Chinese Medicine, 2019, 60(24): 58-62.
- [5] CHEN Z F, WANG Z, LI X M, et al. Flexible piezoelectric-induced pressure sensors for static measurements based on nanowires/graphene heterostructures [J]. ACS Nano, 2017, 11(5): 4507-4513.
- [6] JIN C, XIA C, ZHANG S, et al. A wearable combined wrist pulse measurement system using airbags for pressurization[J]. Sensors, 2019, 19(2): 386-393.
- [7] 清华大学深圳研究生院. 一种基于 PVDF 压电传感器测量脉搏心率的检测设备: CN201810159852.3[P]. 2018-09-18.

- Shenzhen Graduate School of Tsinghua University. A pulse and heart rate detection device based on PVDF piezoelectric sensor: CN201810159852.3 [P]. 2018-09-18.
- [8] MOGHADAM B H, HASANZADEH M, SIMCHI A. Self-powered wearable piezoelectric sensors based on polymer nanofiber-metal-organic framework nanoparticle composites for arterial pulse monitoring[J]. ACS Applied Nano Materials, 2020, 3(9):8742-8752.
- [9] DT A, TENG M, SY A, et al. Piezoelectric PVDF-based sensors with high pressure sensitivity induced by chemical modification of electrode surfaces [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 316, DOI: 10.1016/J.SNA.2020.112424.
- [10] DAGDEVIREN C, SU Y, JOE P, et al. Conformable amplified lead zirconate titanate sensors with enhanced piezoelectric response for cutaneous pressure monitoring[J]. Nature Communications, 2014, 5:4496.
- [11] CHEN J, LIU H, WANG W, et al. High durable, biocompatible, and flexible piezoelectric pulse sensor using single-crystalline III-N thin film [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(37), DOI: 10.1002/adfm.201903162.
- [12] JING N, MEINING J, YAO C, et al. Human pulses reveal health conditions by a piezoelectret sensor via the approximate entropy analysis [J]. Nano Energy, 2019, 58:528-535.
- [13] WU F, CHEN, XIN, et al. Progress in achieving high-performance piezoresistive and capacitive flexible pressure sensors: A review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 43(8):177-190.
- [14] 闫文吉,陈红亮,陈洪敏,等. 硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6):59-65.
- YAN W J, CHEN H L, CHEN H M, et al. Research on on-line compensation method for measurement error of silicon piezoresistive pressure sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6):59-65.
- [15] PANG Y, TIAN H, TAO L, et al. Flexible highly sensitive and wearable pressure and strain sensors with graphene porous network structure [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8:26458-26462.
- [16] QIN R, HU M, LI X, et al. A highly sensitive piezoresistive sensor based on MXenes and polyvinyl butyral with a wide detection limit and low power consumption[J]. Nanoscale, 2020, 10: 1622-1630.
- [17] JIANG X P, REN Z L, FU Y P, et al. Highly compressible and sensitive pressure sensor under large strain based on 3D porous reduced graphene oxide fiber fabrics in wide compression strains [J]. ACS Applied Materials And Interfaces, 2019, 11(40):37051-37059.
- [18] HO H J, JOON S P, BUMKYOO C. Flexible piezoresistive pulse sensor using biomimetic PDMS mold replicated negatively from shark skin and PEDOT:PSS thin film[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 286:107-114.
- [19] 赵海文,王曼菲,刘吉晓,等. 基于双电层电容的柔性触觉传感器机理研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2):25-32.
- ZHAO H W, WANG M F, LIU J X, et al. Mechanism research of flexible tactile sensor based on dual-layer capacitance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2):25-32.
- [20] MADUPU A, SHARMA A, ISHWARI P G, et al. Analysis and enhancement of capacitive pressure sensor's sensitivity through material engineering processes [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, DOI: 10.1016/J.MATPR.2020.10.287.
- [21] BAI N, WANG L, WANG Q, et al. Graded intrafillable architecture-based iontronic pressure sensor with ultra-broad-range high sensitivity [J]. Nature Communications, 2020, DOI: 10.1038/s41467-019-14054-9
- [22] BOUTRY C M, BEKER L, KAIZAWAY, et al. Biodegradable and flexible arterial-pulse sensor for the wireless monitoring of blood flow [J]. Nature Biomedical Engineering, 2019, 3(1):47-57.
- [23] YOSHIDA Y, YUDAE, YOKOYAMAK, et al. Evaluation of nocturnal heart rate variability for strenuous exercise day using wearable photo electric pulse wave sensor [J]. Exerc Rehabil, 2018, 14(4):633-637.
- [24] 陈真诚,宋浩,朱健铭,等. 基于光电容积脉搏波的呼吸监测系统研究 [J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(5):579-584.
- CHEN ZH CH, SONG H, ZHU J M, et al. Respiratory monitoring system based on photoelectric volumetric pulse wave [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(5):579-584.
- [25] 陈剑虹,郭亚亚,郑铤,等. 基于光电容积脉搏波特征参数的血管弹性检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3):11-17.
- CHEN J H, GUO Y Y, ZHENG Y, et al. Detection of blood vessel elasticity based on photoelectric volumetric pulse wave parameters [J]. Journal of Electronic

- Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3):11-17.
- [26] HASHIMOTO M, IHARA K, KAJITANI H, et al. To make a flexible patch type photoelectric pulse wave sensor highly sensitivity [J]. Proceedings of the International Display Workshops, 2019, DOI: 10.36463/IDW. 2019. FLX6-4L.
- [27] 庞宇, 蒋伟, 张博臻. 基于 PPG 的脉搏波信号采集及其噪声处理 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39(12): 112-114, 118.
- PANG Y, JIANG W, ZHANG B ZH. Pulse wave signal acquisition and noise processing based on PPG [J]. Transducer and Microsystem, 2020, 39(12): 112-114, 118.
- [28] 张中流, 何宁, 何斌, 等. 基于分布式光纤传感技术的结构受力测量新方法 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 45-55.
- ZHANG ZH L, HE N, HE B, et al. A new method for structural force measurement based on distributed optical fiber sensing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 45-55.
- [29] FAN Q G, JIA ZH A, FENG D Q, et al. Highly sensitive FBG pressure sensor based on square diaphragm [J]. Optik, 2021, 225, DOI: 10.1016/J. IJLEO. 2020. 165559.
- [30] 汪静逸. 面向智慧医疗的光纤传感网关键技术及应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- WANG J Y. Research on key technology and application of optical fiber sensor network for intelligent medical treatment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [31] 李娜. 异芯光纤的传感特性及其在生命健康监测中的应用 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020.
- LI N. The sensing characteristics of different core fiber and its application in life and health monitoring [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020.
- [32] 宋大伟. 设计一款基于光纤光栅的脉搏测量传感器 [J]. 数码世界, 2018(6): 226.
- SONG D W. Design of a pulse measurement sensor based on fiber grating [J]. Digital World, 2018(6): 226.
- [33] SONG P SH, MA ZH, MA J, et al. Recent progress of miniature MEMS pressure sensors [J]. Micromachines, 2020, 11(1): 56.
- [34] 赵正平. MEMS 智能传感器技术的新进展 [J]. 微纳电子技术, 2019, 56(1): 1-7.
- ZHAO ZH P. New progress of MEMS smart sensor technology [J]. Micronanoelectronic Technology, 2019, 56(1): 1-7.
- [35] NGUYEN T V, MIZUKI Y, TSUKAGOSHI T, et al. MEMS-based pulse wave sensor utilizing a piezoresistive cantilever [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(4), DOI: 10.3390/s20041052.
- [36] SUN Y, DONG Y, GAO R, et al. Wearable pulse wave monitoring system based on MEMS sensors [J]. Micromachines, 2018, 9(2): 90.
- [37] NGUYEN T V, ICHIKI M. MEMS-Based sensor for simultaneous measurement of pulse wave and respiration rate [J]. Sensors, 2019, 19(22): 4942.
- [38] 张玉满. 基于复合探头脉象检测系统及方法的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- ZHANG Y M. Research on pulse detection system and method based on composite probe [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [39] 周鹏, 高雄飞, 张玉满, 等. 基于驻极体传声器的脉象检测系统和方法 [J]. 传感技术学报, 2015(3): 374-380.
- ZHOU P, GAO X F, ZHANG Y M, et al. Pulse detection system and method based on electret microphone [J]. Journal of Sensor Technology, 2015(3): 374-380.
- [40] YUDANINGTYAS E, DJURIATNO W, KHABIB A, et al. Electret condenser microphone as a traditional Chinese medicine arterial pulse sensor [J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 197: 11024.
- [41] 李鸿冰, 韩文佳, 姜亦飞, 等. 柔性自供电传感器的研究进展 [J]. 电子元件与材料, 2020, 39(8): 1-12.
- LI H B, HAN W J, JIANG Y F, et al. Research progress of flexible self-powered sensor [J]. Electronic Components and Materials, 2020, 39(8): 1-12.
- [42] SUNGJUN P, SOO W H, WONRYUNG L, et al. Self-powered ultra-flexible electronics via nano-grating-patterned organic photovoltaics [J]. Nature, 2018, 561(7724): 516-521.
- [43] YANG J, WANG ZH L, LIN ZH M, et al. Triboelectric nanogenerator enabled body sensor network for self-powered human heart-rate monitoring [J]. Acs Nano, 2017: 7b02975.
- [44] 楼梦娜. 织物基和纤维基自驱动压力传感器的制备及其在人体运动和脉搏信号监测领域中的应用 [D]. 上海: 东华大学, 2020.
- LOU M N. Fabrication of self-actuated pressure sensors based on fabric and fiber and its application in the field of human motion and pulse signal monitoring [D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [45] 张浩强, 安蒙蒙, 卜朝晖, 等. 基于超声回波信号的

- 指端脉搏波提取[J]. 中国医学物理学杂志, 2020(10).
- ZHANG H Q, AN M M, BU ZH H, et al. Pulse wave extraction based on ultrasonic echo signal [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020(10):1306-1311.
- [46] ALMOHIMEED I, ONO Y. Flexible and wearable ultrasonic sensor for assessment of skeletal muscle contractile properties [C]. 2019 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS). IEEE, 2019: 1-3, DOI: 10.1109/FLEPS.2019.8792301.
- [47] SEMPIONATTO J R, LIN M, YIN L, et al. An epidermal patch for the simultaneous monitoring of haemodynamic and metabolic biomarkers. [J]. Nature Biomedical Engineering, 2021, DOI: 10.1038/S41551-021-00685-1.
- [48] HUANG A, YOSHIDA M, ONO Y, et al. Continuous measurement of arterial diameter using wearable and flexible ultrasonic sensor [C]. 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). IEEE, 2017: 1-4.
- [49] 高璐佼,牛婷立,芦煜,等. 四诊合参辅助诊疗仪辨识量化人体气血状态应用研究[J]. 中华中医药杂志, 2019,34(4):1419-1422.
- GAO L J, NIU J L, LU Y, et al. Comprehensive analysis of data gained by four diagnostic devices in quantifying human qi and blood state [J]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine, 2019, 34(4): 1419-1422.
- [50] 肖沪生,任亚娟,徐芳,等. 基于超声瞬时波强技术的生理性弦脉及高血压弦脉的三部脉诊能量学研究[J]. 中国中西医结合影像学杂志, 2020, 18(6): 575-578.
- XIAO H SH, REN Y J, XU F, et al. The energy study of three pulse diagnosis of physiological chord and hypertensive chord based on ultrasonic transient wave intensity technique [J]. Chinese Journal of Integrated Traditional and Western Medicine Imaging, 2020, 18(6): 575-578.
- [51] 周雪, 滕晶. 彩色多普勒超声技术在现代脉诊客观化中的应用[J]. 世界最新医学信息文摘, 2020, 20(80):246-248.
- ZHOU X, TENG J. Application of color doppler ultrasonography in objectification of modern pulse diagnosis [J]. World Latest Medical Information Digest, 2020, 20(80):246-248.
- [52] 胡亮亮,王蕾,李媛媛,等. 多点式脉象传感器研究新进展及思考[J]. 中医药导报, 2019, 25(2):46-48.
- HU L L, WANG L, LI Y Y, et al. New progress and thinking of multi-point pulse sensor research [J]. Review of Traditional Chinese Medicine, 2019, 025(2): 46-48.
- [53] RAN X, WANG C, XIAO Y, et al. A portable sitting posture monitoring system based on a pressure sensor array and machine learning [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 331, DOI: 10.1016/J. SNA. 2021.112900.
- [54] 杨培云,滕晶,齐向华. 浅析现代脉诊仪的研究进展[J]. 湖南中医杂志, 2018, 34(4):202-204.
- YANG P Y, TENG J, QI X H. A brief analysis of the research progress of modern pulse diagnostic device [J]. Hunan Journal of Chinese Medicine, 2018, 34(4): 202-204.
- [55] 张亚玲,孙玉平,上媛媛. 不同层数单壁碳纳米管薄膜柔性应变传感器的性能研究[J]. 人工晶体学报, 2020,49(5):854-860.
- ZHANG Y L, SUN Y P, SHANG Y Y. Study on the performance of flexible strain sensor with different layer numbers of single-walled carbon nanotubes [J]. Journal of Artificial Crystals, 2020, 49(5):854-860.
- [56] XU L L, LIU Z K, ZHAI H, et al. Moisture-resilient graphene-dyed wool fabric for strain sensing [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(11): 13265-13274.
- [57] WU Q, QIAO Y, GUO R, et al. Triode-mimicking graphene pressure sensor with positive resistance variation for physiology and motion monitoring [J]. ACS Nano, 2020,14(8):10104-10114.
- [58] ZHU B, LING Y, YAP L W, et al. Hierarchically structured vertical gold nanowire arrays based wearable pressure sensors for wireless health monitoring [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, DOI: 10.1021/acsami.9b06260.
- [59] LU Y, QU X, ZHAO W, et al. Highly stretchable, elastic, and sensitive mxene-based hydrogel for flexible strain and pressure sensors [J]. Research, 2020(11): 1-13.
- [60] WANG Y, ZHU L, DU C. Flexible difunctional (pressure and light) sensors based on ZnO nanowires/graphene heterostructures [J]. Advanced Materials Interfaces, 2020:1901932.
- [61] CUI J, TU L P, ZHANG J F, et al. Analysis of pulse signals based on array pulse volume [J]. Chinese Journal of Integrative Medicine: English Edition, 2019, 25(2): 103-107.

- [62] HAO Z, WANG D. Arterial pulse signal amplification by adding a uniform PDMS layer to a pyrex-based microfluidic tactile sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(4):2164-2172.
- [63] KWANGSUN S, JUHO K, SUNGBUM C, et al. Flexible-device injector with a microflap array for subcutaneously implanting flexible medical electronics[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2018: 1800419.
- [64] LUO N, ZHANG J, DING X, et al. Textile-enabled highly reproducible flexible pressure sensors for cardiovascular monitoring [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, 3(1):1700222.
- [65] LIU M, PU X, JIANG C, et al. Large-area all-textile pressure sensors for monitoring human motion and physiological signals [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(41):1703700. 1-1703700. 9
- [66] LUO C, CHUNG C. Non-invasive holistic health measurements using pulse diagnosis: II. exploring TCM clinical holistic diagnosis using an ingestion test [J]. *European Journal of Integrative Medicine*, 2016 (8): 926-931.
- [67] PENG J Y, LU S C. A Flexible capacitive tactile sensor array with CMOS readout circuit for pulse diagnosis[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2015, 15(2): 1170-1177.
- [68] 赵正平. MEMS 智能传感器技术的新进展[J]. *微纳电子技术*, 2019, 56(1):1-7.
- ZHAO ZH P. New progress of MEMS smart sensor technology [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2019, 56(1):1-7.
- [69] AN Y J, KIM B H. Flexible non-constrained RF wrist pulse detection sensor based on array resonators [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2016, 10(2): 300-308.
- [70] 王常海, 司帆, 朱晓晓, 等. 3D 打印技术在指压式三部脉象采集中的应用及脉象要素分析算法研究[J]. *中华中医药杂志*, 2020, 35(1):378-381.
- WANG CH H, SI F, ZHU X X, et al. Application of 3D printing technology in finger pressure three-part pulse collection and research on pulse element analysis algorithm [J]. *Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2020, 35(1):378-381.
- [71] 辛莉, 路永平, 陈腾, 等. 冠心病患者脉象和脉图相关性研究进展[J]. *浙江中医杂志*, 2019, 54(2): 154-155.
- XIN L, LU Y P, CHEN T, et al. Study on the correlation between pulse pattern and pulse pattern in patients with coronary heart disease [J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2019, 54(2):154-155.
- [72] 叶光雷, 郭必纳. 用于监测睡眠呼吸暂停患者生命体征的集成系统 [J]. *中国医疗器械杂志*, 2019, 43(1):33-35,51.
- YE G L, GUO B N. An integrated system for monitoring vital signs in patients with sleep apnea [J]. *China Journal of Medical Devices*, 2019, 43(1):33-35,51.
- [73] 廖远, 张梦新, 刘文涵, 等. 低功耗便携式多导联心电图信号采集系统设计[J]. *传感器与微系统*, 2019, 38(5):99-102.
- LIAO Y, ZHANG M X, LIU W H, et al. Design of portable multi-lead ECG signal acquisition system with low power consumption [J]. *Transducer and Microsystem*, 2019, 38(5):99-102.
- [74] 时局. 便携式多生理参数实时监测系统的设计[D]. 大连: 大连交通大学, 2019.
- SHI J. Portable multi-physiological parameters real-time monitoring system design [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2019.
- [75] 戴廷飞, 刘逸, 叶阳阳, 等. 人机共享控制机器人系统的应用与发展[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3): 62-73.
- DAI T F, LIU M, YE Y Y, et al. Application and development of man-machine shared control robot system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3):62-73.
- [76] 翟延忠, 翟宝蓉, 马强, 等. 基于 STM32 的人机交互终端的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2020, 445(2): 109-113.
- ZHAI Y ZH, ZHAI B R, MA Q, et al. Design of human-computer interaction terminal based on STM32[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020, 445(2):109-113.
- [77] 刘牧军, 吴蒙, 李振南, 等. 智能手环的研发与临床和睡眠监护中的应用研究进展[J]. *世界睡眠医学杂志*, 2020, 50(2):192-194.
- LIU M J, WU M, LI ZH N, et al. Research progress of intelligent bracelet development and clinical application in sleep monitoring [J]. *World Journal of Sleep Medicine*, 2020, 50(2):192-194.
- [78] 朱耀斌, 李志强, 丁楠, 等. 脉搏传感器应用的研究进展[J]. *中华实用诊断与治疗杂志*, 2019, 33(3): 306-309.
- ZHU Y B, LI ZH Q, DING N, et al. Progress in pulse sensor application [J]. *Journal of Chinese Practical Diagnosis and Therapy*, 2019, 33(3):306-309.

- [79] 张爱华,常婷婷,漆宇晟,等. 基于脉搏信号融合分析的心率监测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10):163-171.
ZHANG AI H, CHANG T T, QI Y SH, et al. Heart rate monitoring method based on pulse signal fusion analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(10):163-171.
- [80] 叶思婷,周婷,孟令萃,等. 极速脉搏波技术评估健康成人颈部血管弹性功能及其相关影响因素[J]. 影像研究与医学应用, 2020, 4(18):112-114
YE S T, ZHOU T, MENG L C, et al. Evaluation of cervical vascular elastic function by pulse wave method in healthy adults [J]. Imaging Research and Medical Applications, 2020, 4(18):112-11
- [81] 石玉琳,许家佗. 中医病证智能化诊断与分类研究进展[J]. 中国中西医结合杂志, 2019, 39(6):763-768.
SHI Y L, XU J T. Research progress in intelligent diagnosis and classification of TCM diseases and syndologies[J]. Chinese Journal of Integrated Traditional and Western Medicine, 2019, 39(6):763-768

作者简介



罗静静 (通信作者), 2009 年于浙江大学获得学士学位, 2014 年于英国谢菲尔德大学获得博士学位, 现为复旦大学工程与应用技术研究院智能机器人研究院青年研究员, 主要研究方向为健康信息学、人机交互、智能系统设计。

E-mail: luojingjing@fudan.edu.cn

Luo Jingjing (Corresponding author) received her B.Sc. degree in 2009 from Zhejiang University and Ph.D. degree from the University of Sheffield, UK in 2014. She is currently a young researcher at Institute of Intelligent Robotics, ACADEMY for Engineering & Technology, Fudan University. Her main research interest includes health informatics, human-computer interaction and intelligent system design.



左晶晶, 2017 年于大连理工大学获得学士学位, 2020 年于天津大学获得硕士学位, 现为季华实验室初级研究员, 主要研究方向为压力传感器、硬件电路设计及接口调试。

E-mail: zuojj@jihualab.com

Zuo Jingjing received her B.Sc. degree in 2017 from Dalian University of Technology, received her M.Sc. degree in 2020 from Tianjin University. Now, she is a junior researcher in JiHua Laboratory. Her main research interest includes pressure sensor, hardware circuit design and interface debugging.



陈启亮, 2020 年于福建中医药大学获得医学博士学位, 目前在广州中医药大学基础医学院从事师资博士后工作, 主要研究方向为中医诊断与人工智能装备设计研发。

E-mail: chenqiliang@gzucm.edu.cn

Chen Qiliang received his M.D. degree from Fujian University of Tradition Chinese Medicine in 2020. At present, he is working as a postdoctoral for teaching in School of Basic Medicine, Guangzhou University of Chinese Medicine. His main research interests are TCM diagnosis and artificial intelligence equipment design and development.



周鹏, 2007 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学精仪学院生物医学工程专业, 副教授, 副系主任, 中医大数据与人工智能研究中心主任, 主要研究方向为神经工程、智能中医。

E-mail: zpzp@tju.edu.cn

Zhou Peng received his Ph.D. from Tianjin University in 2007. Currently, he is an associate professor and vice dean of Department of Biomedical Engineering, School of Precision Instrument, Tianjin University, and the director of the Research Center for Big Data and Artificial Intelligence in Traditional Chinese Medicine. His main research interest is neural engineering and intelligent traditional Chinese medicine.