

DOI: 10.13382/j.jemi.B2609136

柔性传感阵列穴位刚度量化与颈椎病中医分型\*

李梦<sup>1</sup>  汪艳<sup>1</sup>  杨晓琪<sup>2</sup>  胡雪琴<sup>3</sup>  彭晶晶<sup>1</sup>  赵梁婧<sup>1</sup>

(1.安徽信息工程学院机械工程学院(汽车工程学院)  芜湖  241000;2.安徽理工大学机电工程学院  淮南  232001;  
3.浙江中医药大学附属第一医院  杭州  310000)

**摘要:**针对中医颈椎触诊中“穴位瘀滞”状态缺乏客观定量标准的问题,提出了一种基于柔性传感阵列的穴位组织刚度量化方法,并评估其在颈椎病中医病理分型中的有效性。该系统采用镓铟合金-聚偏二氟乙烯(GaIn-PVDF)垂直分布的可穿戴式柔性传感阵列,以微接触、低生理负荷方式贴附于颈部穴位区域。借助GaIn应变单元对皮肤受力形变的高敏响应,结合赫兹接触理论建立了从传感器电阻变化到穴位处组织等效刚度的量化模型。模型输出的组织刚度值与临床邵氏硬度值之间具有强相关性(皮尔逊相关系数为0.96),表明该模型能够有效反映穴位组织的真实僵硬程度。在此基础上,融合了穴位电生理参数和压敏阈值,构建了基于主成分分析(principal component analysis,PCA)与K近邻(k-nearest neighbors, KNN)的多参数中医病理分型模型,其多分类总体预测准确率达85.7%。进一步地,将该传感阵列应用于颈部活动度的监测,构建了融合中医病理分型与西医颈部活动度的综合评估框架。此外,利用PVDF单元的压电效应,将穴位按压信号映射为游戏虚拟角色的动作,实现了人机交互,提升了康复训练的趣味性。本研究为中医穴位诊断的客观化与数字化提供了一种新的技术路径,在家庭健康管理与智慧康复场景中展现出良好的应用潜力。

**关键词:** 柔性传感阵列;GaIn-PVDF;穴位刚度;颈椎病;中医分型;多参数融合

**中图分类号:** TH89;TN6      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Flexible sensor array-based quantification of acupoint stiffness and traditional Chinese medicine classification of cervical spondylosis

Li Meng<sup>1</sup>  Wang Yan<sup>1</sup>  Yang Xiaoqi<sup>2</sup>  Hu Xueqin<sup>3</sup>  Peng Jinjin<sup>1</sup>  Zhao Liangjing<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering (School of Automotive Engineering), Anhui Institute of Information Technology, Wuhu 241000, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. The First Affiliated Hospital of Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** To address the lack of objective and quantitative criteria for the “acupoint stagnation” state in cervical spine palpation in traditional Chinese medicine (TCM), this study proposed a quantitative method for assessing acupoint tissue stiffness based on a flexible sensing array, and evaluated its effectiveness in the TCM pathological classification of cervical spondylosis. A wearable, vertically distributed flexible sensing array made of gallium-indium alloy and polyvinylidene fluoride (GaIn-PVDF) was employed and attached to the cervical acupoint region in a micro-contact and low physiological burden manner. By leveraging the high-sensitivity response of the GaIn strain unit to skin deformation under force and incorporating Hertz contact theory, a quantitative model was established to convert sensor resistance changes into the equivalent stiffness of tissue at the acupoint. The tissue stiffness output by the model showed a strong correlation with clinical Shore hardness values (Pearson correlation coefficient = 0.96), indicating that the proposed model can effectively reflect the true stiffness of acupoint tissue. On this basis, acupoint electrophysiological parameters and pressure sensitivity thresholds were integrated, and a multi-parameter TCM pathological classification model based on principal component analysis (PCA) and K-nearest neighbor (KNN) was constructed, achieving an overall multi-class prediction accuracy of 85.7%. Furthermore, the proposed sensing array was applied to monitor cervical range of motion, and a comprehensive evaluation framework integrating TCM pathological classification with Western medicine cervical range of motion was established. In addition, the piezoelectric effect of the

收稿日期:2026-02-07      Received Date: 2026-02-07

\* 基金项目:安徽省教育厅自然科学研究重大项目(2023AH040383)、安徽信息工程学院校级科技创新平台和科研团队专项(AXG2025\_kjc\_49)资助项目

PVDF unit was utilized to map acupoint pressing signals into the actions of a virtual game character, realizing human-computer interaction and enhancing patient engagement in rehabilitation training. This work provides a new technical pathway for the objectification and digitalization of TCM acupoint diagnosis and demonstrated good potential for use in home health management and smart rehabilitation scenarios.

**Keywords:** flexible sensor array; GaIn-PVDF; acupoint stiffness; cervical spondylosis; traditional chinese medicine syndrome classification; multi-parameter fusion

## 0 引言

组织刚度作为关键的生物力学参数,其异常变化与多种疾病的病理过程密切相关。在颈椎病中,颈部软组织(特别是特定穴位区域)的力学特性改变,如僵硬、筋结等,被认为是评估病情的重要依据。中医理论中的“以痛为腧”思想指出,当脏腑或经络发生病变时,体表特定穴位会出现组织僵硬、压痛等“瘀滞”现象<sup>[1]</sup>;现代临床研究也表明,大椎、肩井等穴位的僵硬程度与颈椎病的常见证型存在显著相关性<sup>[2-3]</sup>。然而,目前对“穴位瘀滞”程度的判断高度依赖医师的个人经验与主观感受,缺乏客观、定量的评估标准。如何将这一传统中医病理概念转化为可精确测量的物理参数,是推动中医诊断客观化进程中亟待解决的关键科学问题之一。针对颈椎健康状态的评估,现有研究主要沿两条路径展开。一类侧重于运动功能的量化,如借助视觉或惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)评估颈部活动范围<sup>[4-6]</sup>,但对中医理论所关注的皮下组织“瘀滞”状态缺乏感知能力。另一类则直接以中医理论为指导,采用经络检测仪、软组织硬度计或红外热成像仪等专用设备<sup>[7-11]</sup>,通过检测穴位的电特性、力学特性或热分布变化进行辨证分析。尽管此类方法融合了中医的整体观念,但所用设备通常专业性较强、体积较大、操作流程复杂,难以满足居家场景下便捷、连续、自主监测的需求。综合来看,现有技术缺乏一种既能贴合皮肤、适于日常穿戴,又能对穴位软组织力学状态进行客观定量感知的传感方法。

为解决上述问题,本文提出一种基于柔性应变传感阵列的穴位组织刚度量化方法,并进行实验验证,探索该方法在颈椎病中医病理分型中的应用价值。首先,本文设计并制备了基于镓铟合金(GaIn)的柔性应变传感阵列,该阵列能够以微接触、低负荷的方式贴附于颈部目标穴位,感知按压过程中皮肤产生的微小形变。其次,结合经典的赫兹接触理论,推导了从传感器电阻变化( $\Delta R$ )到组织等效刚度( $V$ )的物理映射模型,实现了“穴位瘀滞”这一主观概念向客观物理参数的定量转化。在此基础上,进一步融合穴位的电生理参数与压敏阈值,构建多参数特征数据集,采用主成分分析结合K近邻(PCA-KNN)算法,建立了针对颈椎病常见证型的分类模型。最后,探讨了该传感阵列在颈部活动度识别与人机交互中的应用

可行性。本文提出的穴位组织刚度的无创量化方法,为中医“穴位瘀滞”提供了一种柔性、可穿戴的力学定量方法,并为颈椎病的居家辨证辅助诊断开辟了新的技术路径。

## 1 阵列模型设计与性能分析

### 1.1 系统总体设计

本研究提出一种镓铟合金-聚偏二氟乙烯(GaIn-PVDF)垂直分布的柔性阵列结构。GaIn应变传感阵列作为核心感知单元,布设于穴位中心区域,用于采集穴位按压过程中皮肤产生的微小形变信号。

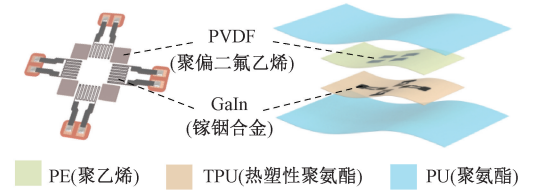
在材料上选用镓铟合金(Ga 75.5%, In 24.5%)作为应变敏感材料。该合金具有优异的导电性、延展性及快速响应特性(响应时间 $<0.1$  ms),其工作温度范围( $-15$  °C ~  $80$  °C)亦适用于人体皮肤表面应用。PVDF压电阵列为辅助感知单元,用于感知按压动作力与人机交互。器件整体以医用聚氨酯(PU)膜为封装层,具有良好的亲肤性。GaIn-PVDF阵列的分层结构如图1(a)所示。系统工作流程如图1(b)所示。

### 1.2 GaIn应变传感单元设计

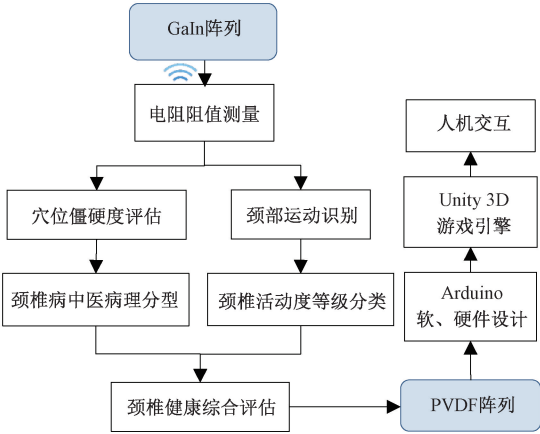
皮肤组织具有明显的各向异性特征,在穴位区域按压的过程中,沿着纤维方向的纵向形变大于横向形变。传统单点传感器仅能感知单一方向的应变,无法区分横、纵向应变分量,导致组织刚度评估存在方向性偏差。基于此,本文提出一种 $2 \times 2$ 正交阵列构型,其中两个GaIn应变单元沿纵向布设(单元Y1、Y2),两个单元沿横向布设(单元X1、X2),如图2所示。4路电阻信号独立采集,可获得独立的横、纵向应变分量。为确定GaIn矩阵4个单元的位置尺寸,本研究借助医用仿真皮肤进行试验。以按压中心为原点,沿着纵向与横向每隔2 mm布设GaIn单元,不同位置单元的电阻输出记录如图3所示。可以看出,距离施力点越近,应变信号越强,且纵向单元的响应幅度高于横向单元,与皮肤组织纤维走向一致。这一结果验证了正交阵列能够有效捕捉各向异性形变,能够分离出有物理意义的横纵向应变分量。

### 1.3 GaIn应变单元的响应特性标定

为定量表征GaIn传感单元的应变响应特性,将初始长度为18 mm的GaIn单元进行0~1 mm(步进0.2 mm)



(a) 器件结构及材料选型  
(a) Device structure and material selection



(b) 系统工作流程图  
(b) System workflow diagram

图 1 传感阵列及系统工作框图

Fig. 1 Sensor array and system working block diagram

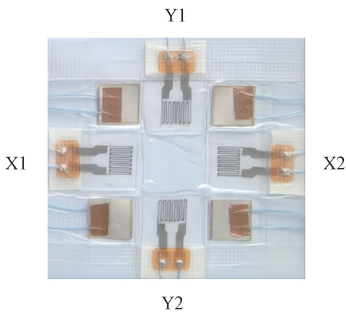


图 2 GaIn-PVDF 传感阵列

Fig. 2 GaIn-PVDF sensor array

与 1~5 mm(步进 1 mm)的加载-卸载测试。结果如图 4 所示,GaIn 电阻  $R$  与拉伸长度  $L$  之间呈现高度线性关系,拟合斜率  $k \approx 2.75$ ,线性拟合决定系数  $R^2 > 0.99$ 。该线性关系是后续刚度量化模型中将电阻变化转换为形变量的关键参数。此外,对器件的循环稳定性、速率依赖性和迟滞特性进行测试。在 100 次循环拉伸测试中,电阻相对变化率  $\Delta R/R$  始终低于 0.1%(图 5)。

在 1~3 mm/s 拉伸速度范围内,不同速度下的输出曲线基本重合(图 6)。迟滞误差最大值为 1.1%(图 7),出现在 0.5 mm 的加载-卸载试验中。可以看出,该传感单元具有良好的响应特性,满足测量要求。

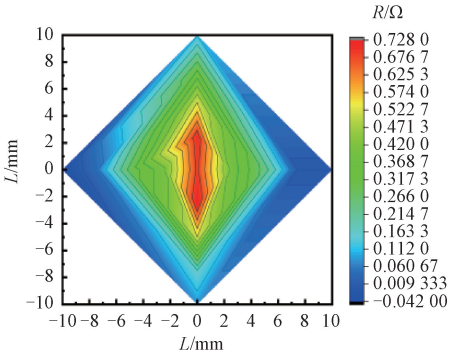


图 3 不同位置布设 GaIn 单元的电阻输出  
Fig. 3 The resistance of GaIn units arranged at different positions

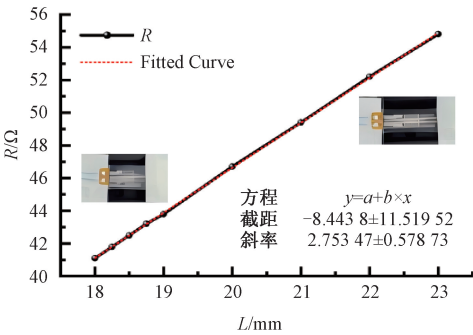


图 4 GaIn 传感单元应变响应

Fig. 4 Response of the GaIn sensor unit under tensile strain

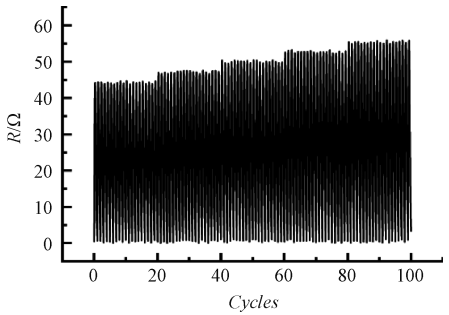


图 5 动态应变下电阻的稳定性

Fig. 5 Stability of resistance under dynamic tensile strain

#### 1.4 阵列力学仿真分析

为进一步验证正交阵列在穴位按压下的应力分布与变形特性,利用 COMSOL Multiphysics 构建三维固体力学有限元模型,如图 8(a)所示。分别于阵列中心施加 1 N、3 N、5 N 的垂直接压力  $F$  以模拟穴位按压,对应的应力分布与变形状态分别如图 8(b)~(d)所示。仿真结果表明:随着按压力由 1 N 增大至 5 N,阵列中心区域的应力峰值与形变幅度均显著增加,呈现明确的力-变形正相关关系。上述结果验证了阵列中心布设 GaIn 传感单元的

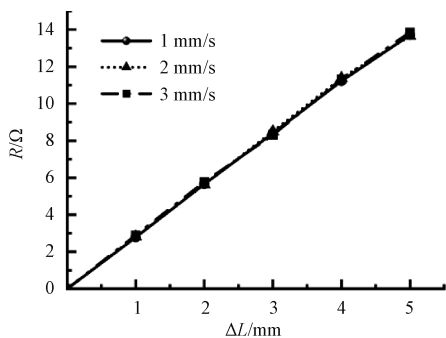


图6 不同拉伸速度下电阻输出结果

Fig. 6 Resistance output at different stretching speeds

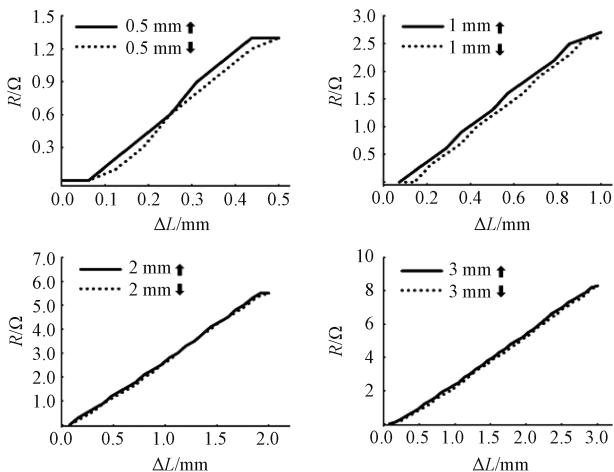


图7 不同应变水平下的电阻回程曲线

Fig. 7 Resistance hysteresis loops at different strain levels

合理性,也为阵列模型中“距离施力点越近、应变信号越强”的结论提供了理论依据。

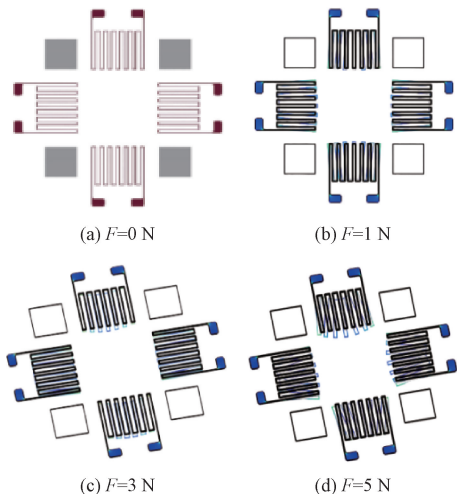


图8 基于COMSOL的阵列应力仿真

Fig. 8 Stress simulation effects of array based on COMSOL

## 2 构建穴位组织刚度量化模型

### 2.1 赫兹接触理论

中医触诊对“穴位瘀滞”的判断依赖医师主观经验,缺乏客观量化标准。为此,本研究引入杨氏模量作为表征材料抵抗形变能力的本构参数,通过构建从传感器电阻变化到组织等效刚度的映射关系,实现瘀滞程度的定量分析。

根据赫兹接触理论,生物软组织可视为各向同性的半无限大弹性体。受其几何形态与力学特性所限,通常难以通过直接拉伸或压缩试验准确测定其杨氏模量。因此,研究者普遍采用微纳米压痕试验技术,结合赫兹接触理论,通过测量压头在特定载荷下的压痕深度与接触面积等参数,间接推算出软组织的宏观杨氏模量<sup>[12-14]</sup>。在小变形、线性弹性的假设下,压头施加的载荷  $F$  与压痕深度  $h$  满足以下关系:

$$E = \frac{3(1-\nu^2)F}{4\sqrt{r}h^{3/2}} \quad (1)$$

式中:  $r$  为压头半径;  $\nu$  为泊松比;  $h$  为压痕深度;  $F$  为载荷力;  $E$  为杨氏模量。

### 2.2 基于 GaIn 应变的组织刚度量化模型

由于活体组织中压痕深度  $h$  的直接测量存在技术困难,本研究利用 GaIn 应变传感器对微小形变的高敏感性,构建了通过电阻变化  $\Delta R$  间接评估压痕深度,进而推断组织刚度的测量方法。器件受力变形状态如图 9(a) 所示,压痕深度  $h$  与 GaIn 变形后长度 ( $L_0 + \Delta L$ ) 近似满足图 9(b) 所示的几何关系:

$$h = \sqrt{(L_0 + \Delta L)^2 - L_0^2} \approx \sqrt{2L_0\Delta L} \quad (2)$$

式中:  $L_0$  为 GaIn 变形区初始长度;  $\Delta L$  为拉伸形变量。由于  $\Delta L$  远小于  $L_0$  ( $L_0\Delta L \gg \Delta L^2$ ), 式(2) 可做上述近似处理。根据图 4 试验结果,器件的电阻变化  $\Delta R$  与形变  $\Delta L$  呈高度线性关系,即:

$$\Delta L = \frac{\Delta R}{k}, k \approx 2.75 \quad (3)$$

将式(2)与式(3)代入式(1),由于压头半径  $r$  与泊松比  $\nu$  在给定试验条件下为常量,可得杨氏模量  $E$  的比例关系:

$$E \propto \frac{F}{(\Delta L)^{3/4}} \propto \frac{F}{(\Delta R)^{3/4}} \quad (4)$$

据此,定义组织刚度值  $V$  以表征穴位处皮肤组织的僵硬程度(即“瘀滞”程度):

$$V = \frac{F}{(\Delta R)^{3/4}} \quad (5)$$

该模型以赫兹接触理论为基础,将难以直接测量的

压痕深度转化为 GaIn 传感器可感知的电阻变化,为穴位瘀滞程度的低成本、便捷量化提供了理论依据。

### 2.3 模型验证

为验证上述刚度量化模型的有效性,本研究从两个层面开展验证实验,分别为仿真皮肤与临床相关性验证。

#### 1) 仿真皮肤验证

使用两种硬度不同的医用标准仿真皮肤(邵氏硬度分别为 14A 与 6A)进行测试。试验平台由驱动器、控制器、丝杠滑台与测力仪等组成。试验时,测力仪压头对仿真皮肤施加作用力,贴附于皮肤表面的 GaIn 阵列随之发生拉伸形变,其横向与纵向的电阻变化分别记为  $\Delta R_x$  与  $\Delta R_y$ ,试验平台如图 9(c)所示。

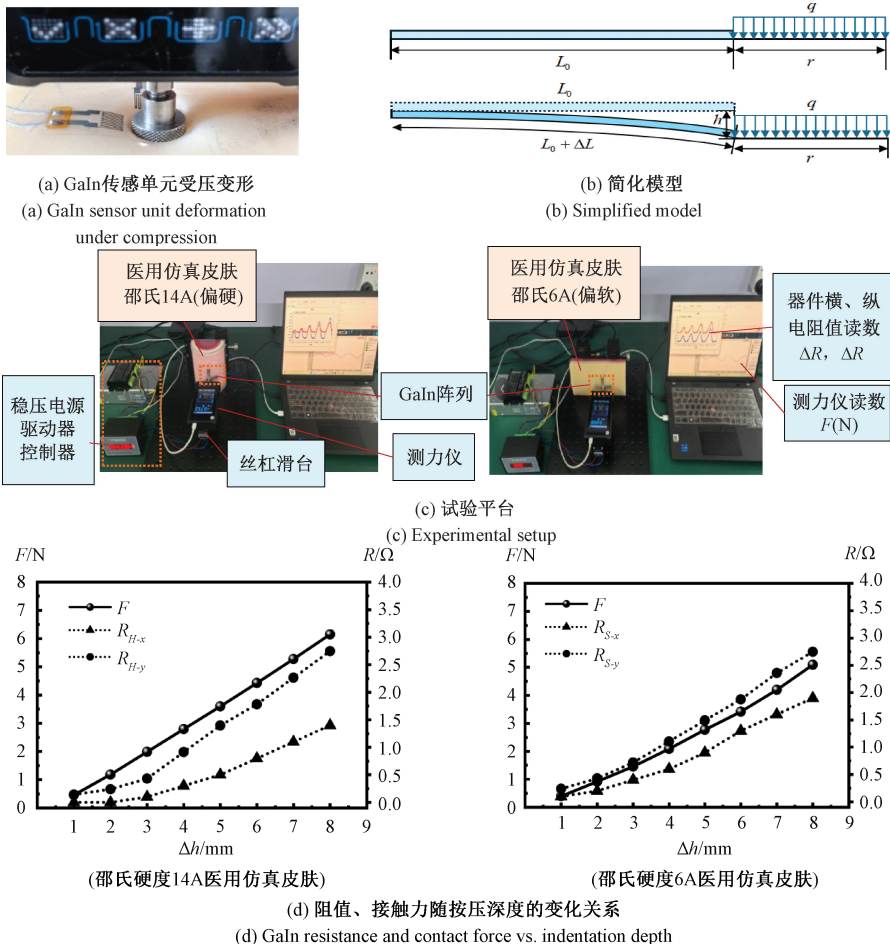
通过上位机控制丝杠滑台带动测力仪同步运动,使压痕深度  $\Delta h$  由 1 mm 逐步增加至 8 mm,测得压头接触力  $F$  和电阻输出。其中,邵氏硬度 14A 仿真皮肤(较硬)上横向与纵向布置的 GaIn 单元电阻值记作  $R_{H-x}$  与  $R_{H-y}$ ,邵氏硬度 6A 仿真皮肤(较软)上布置的上横向与纵向 GaIn 单元电阻值则记作  $R_{S-x}$  与  $R_{S-y}$ ,图 9(d)为两种仿真皮肤上横纵向贴附 GaIn 阵列的电阻值、压头接触力  $F$  随按压深度  $\Delta h$  的变化关系。

根据此数据,可以获得作用力  $F$  与电阻变化的对应关

系。图 9(e)分别为两种仿真皮肤上作用力和横纵电阻变化量  $\Delta R$  之间的关系,分别为  $\Delta R_{H-x}, \Delta R_{H-y}, \Delta R_{S-x}, \Delta R_{S-y}$ 。在此基础上,获得  $\Delta R_{H-x}^{3/4}, \Delta R_{H-y}^{3/4}, \Delta R_{S-x}^{3/4}, \Delta R_{S-y}^{3/4}$ 。由式(5)可知,组织刚度值  $V$  即为上述散点线性拟合所得直线的斜率。由此求得邵氏硬度 14A 与 6A 的仿真皮肤横向与纵向组织刚度值分别为  $V_{H-x} = 3.99, V_{H-y} = 2.51, V_{S-x} = 3.09, V_{S-y} = 2.42$ 。拟合曲线的决定系数  $R^2 > 0.99$ 。可见,同一仿真皮肤的横向与纵向组织刚度存在差异,沿纤维方向(纵向)的刚度值更小。验证了正交阵列设计在捕捉组织力学方向性差异方面的有效性。

#### 2) 临床相关性验证

为进一步验证模型在人体穴位上的有效性,本研究选用临床广泛认可的邵氏硬度计作为参照标准<sup>[15]</sup>。邵氏硬度与杨氏模量存在显著正相关关系,在弹性体范畴内可借助 Gent 模型等经验公式实现二者的相互换算<sup>[16]</sup>。本研究采用邵氏硬度计(HT-651000,适用于人体组织,测量范围 0~100 HA),探究穴位区域组织刚度  $V$  与邵氏硬度  $H$  之间的关联。选取不同性别、不同年龄段的受试者,分别测量不同穴位区域的邵氏硬度值,并计算其在各穴位上的测试均值。同时,根据本文所提刚度量化模型计算对应穴位的等效组织刚度  $V$ 。



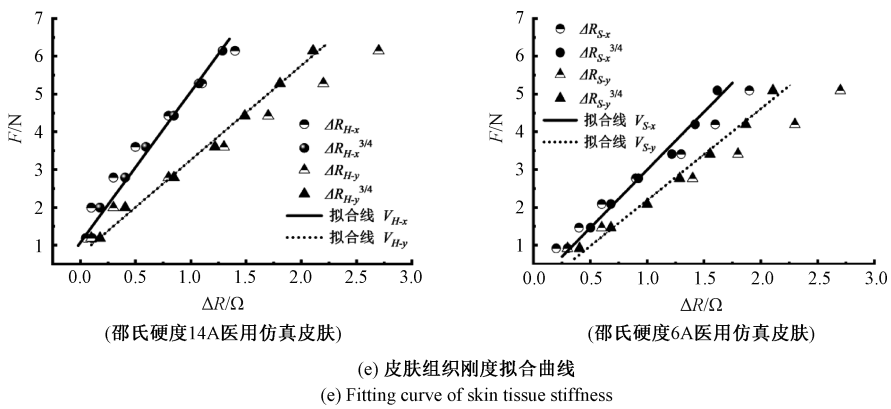


图 9 基于两种仿真皮肤的组织刚度试验

Fig. 9 Tissue stiffness test based on two types of simulated skin

标定出的不同穴位  $H$  与  $V$  数值如图 10 所示。线性拟合结果表明,二者呈现较强的正相关关系,皮尔逊相关系数  $r=0.96$ 。这一结果表明,本文所提组织刚度测量方法与临床标准具有高度一致性,表明该模型能够有效反映穴位组织的真实僵硬程度。在临床转化上具有良好的关联效应,为后续中医病理分型提供了可靠的输入特征。

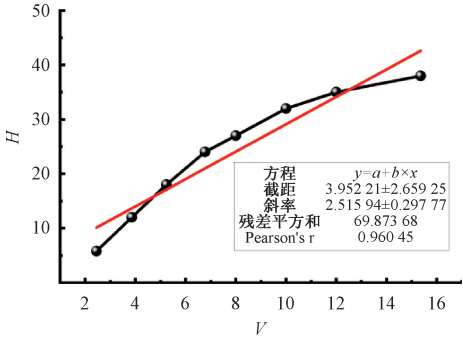


图 10 组织刚度  $V$  与邵氏硬度  $H$  关系

Fig. 10 Relationship between skin tissue stiffness  $V$  and shore hardness  $H$

3 基于多参数的颈椎病中医分型

3.1 多参数特征定义

依据中医理论,颈椎病的常见证型包括风寒型、气滞血瘀型等<sup>[17]</sup>。本研究基于古籍文献分析,筛选出与上述证型关联度最高的阳经穴位——大椎穴、左(右)肩井穴作为核心靶点,并纳入阳池穴、外关穴作为参照。针对每个穴位,定义以下 3 个特征参数:1)组织刚度  $V$ 。反映穴位处皮肤组织的僵硬程度。 $V$  值越大,表明组织越僵硬,即中医“瘀滞”程度越严重,取穴及刚度测量如图 11(a)所示。2)电生理参数  $E$ 。依据中医理论,穴位处具有低

阻抗、高电位的特性<sup>[18]</sup>。本研究选用中医穴位仪检测穴位阻抗,记为电生理参数  $E$ 。 $E$  值越低,表明穴位处经络通畅程度越差。3)压敏阈值  $F$ 。利用测力仪记录诱发疼痛的最小力值,记为压敏阈值<sup>[19]</sup>。 $F$  值越小,表明穴位处越敏感,即“痛则不通”的病理状态越明显。对于每位受试者,测量 5 个穴位的上述  $V$ 、 $E$ 、 $F$  3 个参数,如图 11(b)所示。其中,组织刚度  $V$  包含横向( $V_x$ )和纵向( $V_y$ )共 4 个量值,分别选取两个方向上的最大值作为该方向的刚度分量特征值。因此,每个受试者的特征向量维度为:5 个穴位 $\times$ (2 个组织刚度分量 + 1 个电生理参数 + 1 个压敏阈值)= 20 维。

3.2 基于 PCA-KNN 的分类模型结构

本研究构建的诊断模型采用“PCA 降维 + KNN 分类”。由于原始特征空间为 20 维,直接使用 KNN 分类存在“维度灾难”风险——高维空间中样本稀疏,距离度量失效。因此,本研究采用主成分分析(PCA)进行特征降维。PCA 的核心思路是将原始  $p$  维数据特征  $X=[x_1, x_2, \dots, x_p]^T$  通过线性变化投影到低维空间,使得投影后的特征在方差最大化的方向上保留原始数据的主要信息。即计算协方差  $C$  的特征值和特征向量:

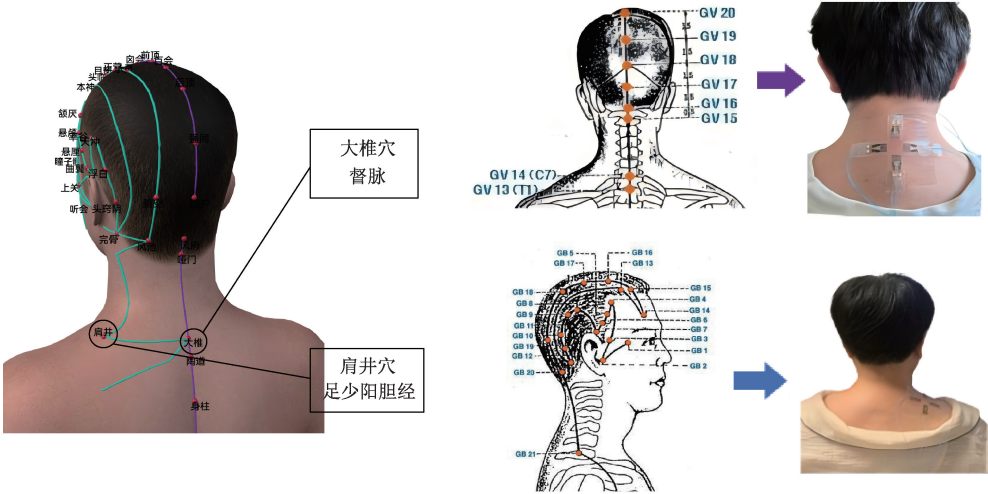
$$C = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})^T \tag{6}$$

求解特征方程  $C \times v = \lambda \times v$ ,得到特征值  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$  及其对应的特征向量  $v_1, v_2, \dots, v_p$ 。

本研究于 2024 年 2 月至 2025 年 10 月期间开展临床试验。本研究共纳入受试者 120 名,选取浙江中医药大学附属医院等 3 家医院就诊的 106 名患者(风寒型 42 例、气滞血瘀型 36 例、其他型 28 例)作为实验组,对照组由 14 名健康个体组成。参与者年龄在 20~65 岁,平均年龄为  $53.73 \pm 1.78$  岁。结合医生临床诊断结果作为分类标签(风寒型/气滞血瘀型/其他型/健康),构建多参数输入与证型输出的分类数据集。

经降维处理后,前 4 个主成分 PC1-PC4 的累计方差贡献率( variance ratio)分别为 0.73、0.23、0.03、0.006,如图 11(c)所示。因此,选择 PC1 和 PC2 作为降维后的二维输入特征。这一降维策略在保留原始数据主要异变信息的同时,将特征维度从 20 维将至 2 维,有效避免了维度灾难。降维后,采用 KNN 算法进行病理分类。KNN 是一种基于实例的非参数分类方法,在特征空间中寻找

距离最近的  $K$  个训练样本,通过多数投票决定其类别。其优势在于决策边界直观、对小样本数据适应性良好,适合中医辅助诊断这一解释性要求较高的场景。本文采用五折交叉验证评估模型性能,将数据集随机分为 5 等份,每份 24 人,依次将其中的 4 份(96 人)作为训练集、1 份(24 人)作为测试集,重复 5 次,所得混淆矩阵结果如图 12 所示。



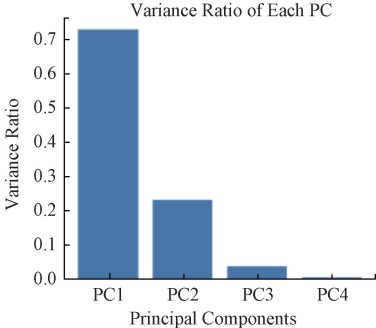
(a) 取穴及组织刚度测量

(a) Acupoint selection and tissue stiffness measurement



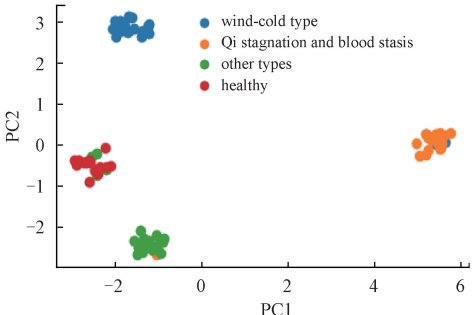
(b) 穴位多维度采集

(b) Six types of continuous neck movements and the dataset



(c) PC1-PC4 累计方差贡献率

(c) Variance ratio of PC1-PC4



(d) 基于PCA-KNN模型的分类结果

(d) Classification results based on the PCA-KNN model

图 11 基于多参数的颈椎病中医分型

Fig. 11 TCM classification of cervical spondylosis based on multi-parameters

在此基础上,求解 PCA-KNN 算法对应的各类别分类性能指标,具体参数如表 1 所示。

此外,也比较了 PCA 与其他算法的分类准确率,如表 2 所示。

本研究提出的多参数模型与仅使用单一特征的分类模型相比,融合多参数( $V$ 、 $E$ 、 $F$ )的模型预测准确率有显著提升,如表 3 所示,融合多参数的模型预测准确率显著高于任一单一特征,提升了 13.6~20.4 个百分点。这一

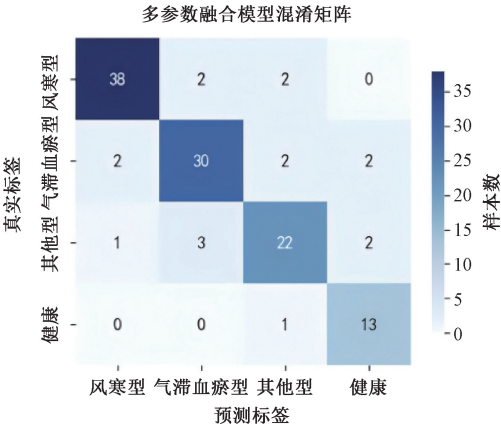


图 12 多参数模型混淆矩阵结果

Fig. 12 Confusion matrix results of the multi-parameters model

结果表明穴位组织刚度作为本文提出的新型量化指标,能够有效补充电生理与痛阈参数的信息维度,三者联合可更全面地反映穴位病理状态。

表 1 各类别分类性能指标结果

| Table 1 Classification performance metrics results for each category (%) |          |          |          |
|--------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| 类别                                                                       | 精确率      | 召回率      | F1-score |
| 风寒型                                                                      | 88.5±3.2 | 86.7±4.1 | 87.6±3.5 |
| 气滞血瘀型                                                                    | 82.3±4.5 | 80.0±5.2 | 81.1±4.8 |
| 其他型                                                                      | 78.6±5.1 | 83.3±4.8 | 80.9±4.9 |
| 健康                                                                       | 88.7±3.8 | 90.0±3.5 | 87.8±3.6 |
| 加权平均                                                                     | 85.7±2.9 | 85.2±3.1 | 84.4±2.4 |

表 2 不同算法分类准确率

| Table 2 Classification accuracy of different algorithms |          |                                             |
|---------------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------|
| 方法                                                      | 准确率/%    | 说明                                          |
| 无降维 + KNN                                               | 55.2±3.8 | 20 维特征直接分类, 维度灾难导致性能下降                      |
| PCA + Kmeans                                            | 81.3±2.5 | n_clusters = 4                              |
| PCA + 决策树                                               | 83.5±2.1 | criterion = 'entropy', min_samples_leaf = 5 |
| PCA + KNN(本文)                                           | 85.7±2.9 | K = 3, 欧氏距离                                 |

表 3 不同特征选择与病理分型预测情况

| Table 3 Prediction of pathological classification based on different feature selections |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 特征选择                                                                                    | 预测准确率/% |
| 组织刚度 $V$                                                                                | 72.1    |
| 电生理参数 $E$                                                                               | 68.5    |
| 压敏阈值 $F$                                                                                | 65.3    |
| 多参数融合 ( $V, F, E$ )                                                                     | 85.7    |

3.3 颈部活动度识别与中西医综合评估

颈椎活动度(cervical range of motion, CROM)是评估

颈椎功能状态指标,可量化颈椎在矢状面(后伸/前屈)、冠状面(左侧屈/右侧屈)和水平面(左旋/右旋)3个维度的运动范围,为颈椎疾病的临床诊断与疗效评估提供客观依据<sup>[20]</sup>。本研究将 GaIn 传感阵列贴敷于大椎穴附近,受试者依次完成后伸、前屈、左侧屈、右侧屈、左旋、右旋 6 种标准动作,采集 6 种标准动作下的 4 路电阻信号,经预处理后转换为二维图像,作为模型的输入数据集,如图 13(a)所示。模型输出的分类为颈部活动度 4 个等级:Grade 0(正常,活动度≥90%正常值)、Grade 1(轻度受限,75%~89%)、Grade 2(中度受限,50%~74%)和 Grade 3(重度受限,<50%)。

本文采用 Keras 构建卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)结构,如图 13(b)所示。包含两层卷积-池化模块,随后接入全连接层和 Softmax 输出层。采用交叉熵作为损失函数,Adam 优化器(学习率 0.001),批量值设置为 32。为缓解过拟合,本文采用了数据增强和 L2 正则化( $\lambda = 0.001$ )。模型在测试集上的分类准确率与损失值曲线如图 13(b)~(c)所示,在 20 轮后趋于收敛,结果分别为 99.4%和 0.074。作为对比,在同一数据集上测试了支持向量机(径向基核函数,  $C = 1.0$ )和随机森林(100 棵树,最大深度 10),准确率分别为 94.5%和 95.1%。CNN 性能略优,可能归因于其自动提取局部时序特征的能力。需要指出的是,上述结果基于 120 人样本,数据集确显不足,后续研究需通过扩大样本量进一步验证模型的泛化能力。综合前文中医病理分型与颈部活动度识别,将个体颈椎健康状况映射至二维评估坐标系中,如图 13(e)所示。该坐标系以中医证型为横轴、以活动度等级为纵轴,借助象限定位实现中西医评估指标的有机融合。例如,处于“气滞血瘀型”且“活动度中度受限”(案例 B)的个体,应以活血化瘀为主、辅以活动度训练;而处于“风寒型”且“活动度正常”(案例 C)的个体,则以祛风散寒为主。上述框架为颈椎健康的个性化管理提供了可视化的分析思路。

4 力反馈交互系统设计

作为阵列交互功能的一项初步研究,本节基于偏二氟乙烯(PVDF)压电薄膜的力-电转换特性,即受力时产生的机械应变可使晶体两端产生极化电荷<sup>[21-22]</sup>。这一力-电转换关系可用压电方程描述为:

$$U = \frac{g_{33} \times F \times h}{A}$$
 (7)

式中:  $U$  为开路电压;  $g_{33}$  为压电常数;  $F$  为按压力;  $h$  为 PVDF 薄膜厚度;  $A$  为受力面积。

通过实验测定了压头进给深度  $\Delta L$  在 1~6 mm 变化过程中 PVDF 薄膜的开路电压输出,实验结果如图 14 所

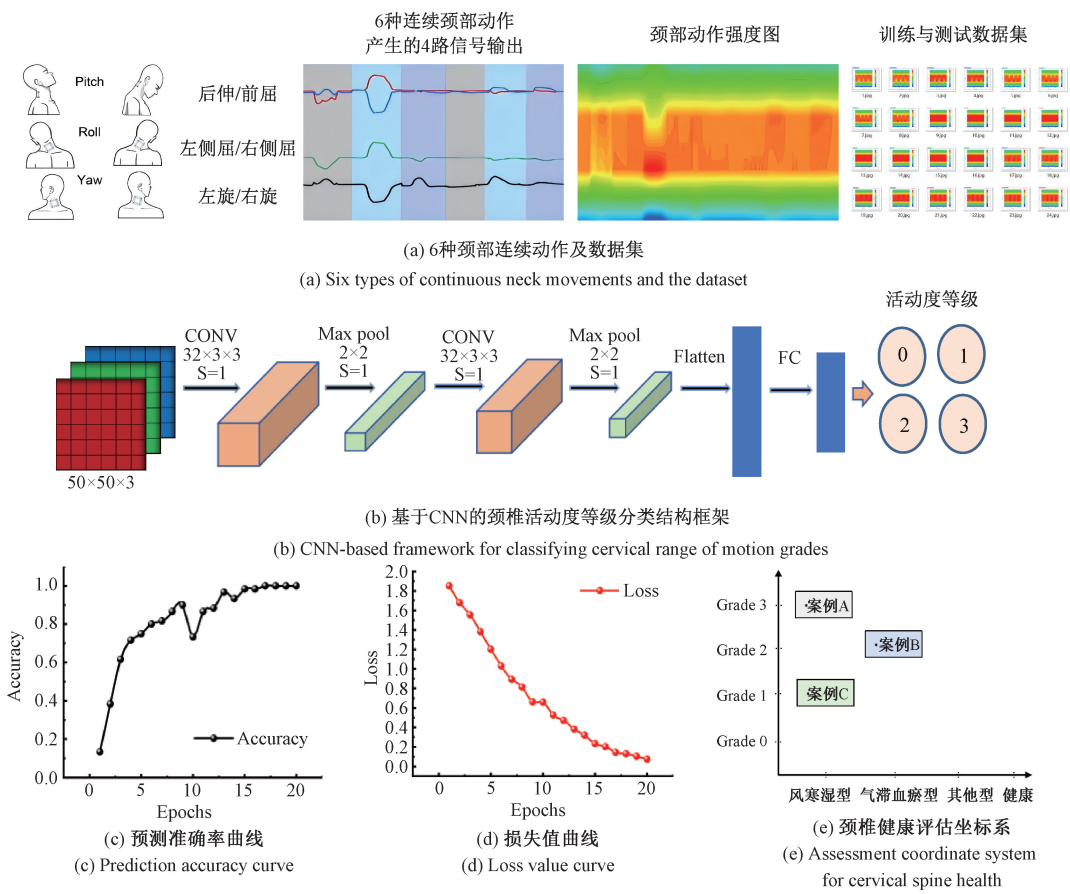


图 13 颈椎健康综合分析

Fig. 13 Comprehensive analysis of cervical spine health

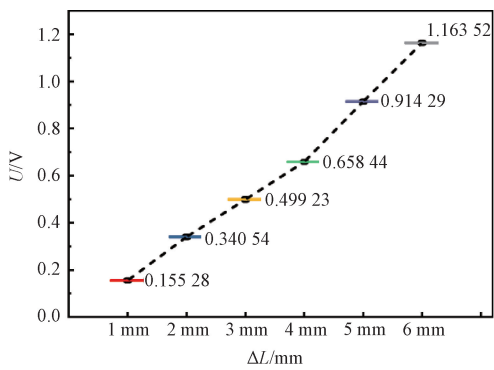


图 14 开路电压随按压深度变化关系

Fig. 14 The relationship between open-circuit voltage and pressing depth

条件下,不同按压速度所对应的开路电压均保持稳定,标准差小于 0.05 V。该特性确保了具有不同按压习惯的用户均能产生一致的交互指令。

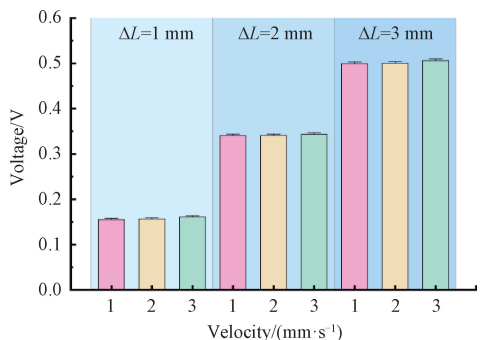


图 15 开路电压随按压速度变化关系

Fig. 15 The relationship between open-circuit voltage and indentation speed

示。分析可知,开路电压均值与按压深度呈现出良好的线性关系,拟合优度  $R^2>0.98$ 。电压输出与用户按压深度存在直接关联,交互意图清晰且明确。此外,本研究还对按压深度  $\Delta L$  处于 1~3 mm 范围,按压速度分别为 1 mm/s、2 mm/s、3 mm/s 时对应的开路电压输出进行了测试,结果如图 15 所示。由图 15 可见,在相同按压深度

基于 PVDF 力-电转换模型,进一步建立交互逻辑模型。将 4 个 PVDF 单元布设为 2×2 阵列,每个单元对应一个独立的交互指令。定义第  $i$  个单元的电压输出为  $V_i$ ,则交互指令由下式决定:

$$C_i = \begin{cases} 1, V_i > V_{th} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $C_i = 1$  表示触发指令,  $C_i = 0$  表示无动作。阈值  $V_{th}$  根据力-电压转换模型设定为 0.8 V (对应约为 4.5 N 的按压力), 通过实验确定该阈值可有效区分有意按压与无意触碰。

将 PVDF 薄膜阵列布设于 GaIn 传感单元周围, 以感知按压动作的力量与位置。基于上述模型, 以 Arduino Uno R3 为核心控制器, 用于人机交互<sup>[23]</sup>。本文设置 1 kHz 采样率实时采集 4 路电压信号, 当  $V_i > V_{th}$  时, 通过串口通信向 Unity 3D 游戏引擎发送指令, 触发虚拟角色对应产生前、后、跳跃、停止的动作, 过程如图 16 所示。此外, 本研究针对 15 名志愿者开展了初步的体验性调查研究。调查结果显示, 与接受传统穴位按摩指导的受试者相比, 采用游戏交互系统进行训练的受试者, 其自我报告的训练愉悦感提升了 65%, 并且更倾向于长期坚持该项康复训练。

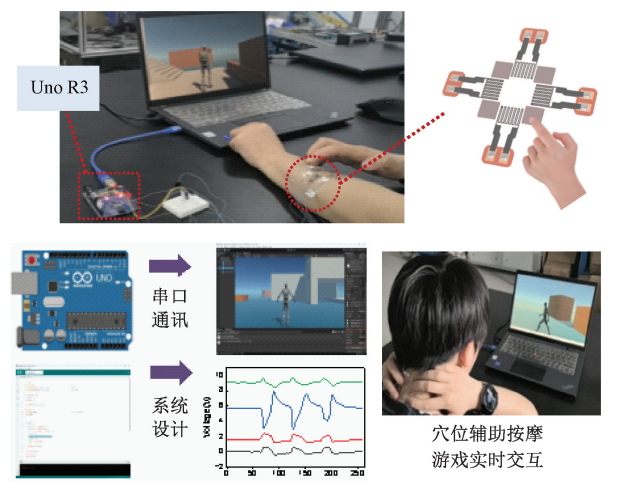


图 16 PVDF 阵列人机交互

Fig. 16 Human-machine interaction using PVDF array

在此基础上, 本文结合现有颈椎健康监测方案, 如视觉识别、IMU、柔性电子、中医经络等, 与本文柔性传感阵列进行对比, 结果如表 4 所示。可以看出, 本文柔性阵列核心探究了组织“瘀滞”状态的量化方法, 实现了中医病理分型的辅助诊断, 同时兼顾了穿戴便携性与交互功能。

表 4 不同系统的比较

Table 4 Comparison of different systems

| 系统/器件                     | 刚度量化 | 中医分型 | 穿戴便携 | 交互功能 |
|---------------------------|------|------|------|------|
| 视觉识别 <sup>[4]</sup>       | —    | —    | —    | —    |
| IMU <sup>[5]</sup>        | —    | —    | ✓    | —    |
| 柔性电子 <sup>[6]</sup>       | —    | —    | ✓    | 部分   |
| 经络检测/热成像 <sup>[8-9]</sup> | —    | ✓    | —    | —    |
| 本文                        | ✓    | ✓    | ✓    | ✓    |

5 结 论

本文提出的基于柔性应变传感阵列的穴位组织刚度量化方法, 能够有效替代中医传统触诊中对“瘀滞”状态的主观判断。通过与临床邵氏硬度标准进行对比验证, 该方法被证明具有与现有临床工具相当的评估能力, 同时其可穿戴形式降低了使用门槛。此外, 融合多参数模型在区分颈椎病常见证型方面的性能优势, 为中医诊断从经验依赖转向数据驱动提供了一条可行的技术路径。

另外, 传感阵列在力反馈交互方面的初步验证, 也展示了其在“评估-干预”闭环管理中的拓展潜力。该传感阵列具有柔性、便携、低成本的特点, 契合家庭场景下连续健康监测的需求。后续工作将重点围绕临床样本的扩充展开, 以推动该方法从可行性验证走向实际临床应用。

参考文献

[ 1 ] 孙迪.《黄帝内经》形体结构复音术语研究[ D ]. 沈阳:辽宁中医药大学, 2021:20-22.

Sun Di. Study on the compound terms of body structure in Huangdi Neijing[ D ]. Shenyang: Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2021:20-22.

[ 2 ] 刘科, 张乐, 欧梁, 等. 点穴运动疗法治疗颈型颈椎病的临床研究[ J ]. 中国中医骨伤科杂志, 2024, 32(7): 34-39.

Liu Ke, Zhang Le, Ou Liang, et al. Clinical study on the treatment of cervical spondylosis by acupoint manipulation therapy[ J ]. Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine Orthopedics, 2024, 32(7): 34-39.

[ 3 ] 秦美影.《黄帝内经》针灸五体辨证挖掘与应用研究[ D ]. 广州:广州中医药大学, 2024:7-9.

Qin Meiyong. Research on the excavation and application of five body differentiation in acupuncture and moxibustion in Huangdi Neijing [ D ]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2024:7-9.

[ 4 ] Muhammad Y, Maisam A, Sikandar A, et al. Cervical spine fracture detection and classification using two-stage deep learning methodology[ J ]. IEEE Access, 2024, 12, 72131-72142.

[ 5 ] Pan Huimin, Wang Hong, Li Dongxuan, et al. Automated, IMU-based spine angle estimation and IMU location identification for telerehabilitation[ J ]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2024, 21(1):96.

[ 6 ] Li Meng, Huang Yongyue, Kan Yanpeng, et al. S2HM: Self-powered spine health monitoring using Piezo/Triboelectric Nanogenerators[ J ]. IEEE Sensors Journal,

- 2024, 24(22): 37711-37723.
- [7] 张鑫瑜, 周海燕. 现代化经络诊断方法及其应用[J]. 中医学, 2024, 13(9): 2189-2193.
- Zhang Xinyu, Zhou Haiyan. Modernized meridian diagnostic methods and their applications[J]. Traditional Chinese Medicine, 2024, 13(9): 2189-2193.
- [8] 刘洪秀. 颈型颈椎病胸穴部位软组织硬度研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2024: 12-16.
- Liu Hongxiu. Study on soft tissue stiffness of acupoints in cervical spondylosis [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2024: 12-16.
- [9] 尹继勇, 车旭东, 田量. 红外热成像引导推拿治疗神经根型颈椎病疗效观察[J]. 湖南中医药大学学报, 2018, 38(3): 320-323.
- Yin Jiyong, Che Xudong, Tian Liang. Clinical effect of infrared thermal imaging guided massage and treatment of nerve-root type cervical spondylosis [J]. Journal of Hunan University of Chinese Medicine, 2018, 38(3): 320-323.
- [10] 陈丽萍. 智能电针仪应用前景调查及治疗颈椎病颈痛的临床评价研究[D]. 成都: 成都中医药大学, 2024: 4-7.
- Chen Liping. The application prospect survey of intelligent electroacupuncture stimulator and clinical trial of electroacupuncture for neck pain caused by cervical spondylosis [D]. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2024: 4-7.
- [11] 李启弘. 人体十二经穴位皮肤阻抗变化实时检测方法研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2017: 7-9.
- Lee Chee-Horng. Research on real-time detection method of skin impedance change of human twelve meridian acupoints [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2017: 7-9.
- [12] 戴安娜. 基于压痕技术与曲面成像表征活体人脸皮肤力学性能[D]. 天津: 天津大学, 2018: 37-40.
- Dai Anna. Mechanical properties of human face skin based on indentation technique and curved surface imaging[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018: 37-40.
- [13] Zorzi J E, Perotoni C A. Estimating Young's modulus and Poisson's ratio by instrumented indentation test[J]. Materials Science And Engineering: A, 2013, 574: 25-30.
- [14] Ivanova Z, Aleksiev T, Dobrev H. Use of a novel indentometer to evaluate skin stiffness in healthy and diseased human skin [J]. Skin Research And Technology, 2023, 29(7): e13384.
- [15] 王修远, 杨骥. 硬皮病皮肤硬化程度评估方法及其技术进展[J]. 中国临床医学, 2021, 28(6): 948-951.
- Wang Xiuyuan, Yang Ji. Evaluation methods and technical progress of skin sclerosis in scleroderma[J]. Chinese Journal of Clinical Medicine, 2021, 28(6): 948-951.
- [16] 王源绍, 聂子豪. 基于 Mooney-Rivlin 模型的橡胶件刚度与硬度关联性研究[J]. 机械强度, 2023, 45(3): 692-700.
- Wang Yuanshao, Nie Zihao. Study on the correlation between stiffness and hardness of rubber parts based on Mooney-Rivlin model [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(3): 692-700.
- [17] 吴文忠, 吴晓亮. 图解颈椎病中医外治法[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2023.
- Wu Wenzhong, Wu Xiaoliang. External treatment of cervical spondylosis in Traditional Chinese medicine[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2023.
- [18] 成俞沛, 郭扬, 张润琛, 等. 经络与穴位探测研究进展[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2025, 27(2): 329-336.
- Cheng Yupei, Guo Yang, Zhang Runchen, et al. Advances in meridian and acupoint detection[J]. World Science and Technology-Modernization of Traditional Chinese Medicine, 2025, 27(2): 329-336.
- [19] 杨广印, 杨素音, 罗来, 等. 基于督脉和膀胱经的颈型颈椎病压痛敏化穴位定位研究[J]. 云南中医药大学学报, 2023, 46(3): 52-57.
- Yang Guangyin, Yang Suyin, Luo Lai, et al. Research on localization of tenderness sensitization acupoints for cervical-type cervical spondylosis based on the governor vessel and bladder meridian [J]. Journal of Yunnan University of Chinese Medicine, 2023, 46(3): 52-57.
- [20] Marloes T, Erik T, Cesar F, et al. Normative values of cervical range of motion for both children and adults: A systematic review [J]. Musculoskeletal Science and Practice, 2020, 49: 102182.
- [21] Zhou Linlin, Yang Tao, Wang Kang, et al. Hybrid nanogenerators based on PVDF/6H-SiC composite film with enhanced mechanical energy utilization efficiency [J]. Ceramics International, 2023, 49(22): 36114-36122.

[22] 曹从军, 赖凯旋, 王旭升, 等. 基于柔性压电薄膜的可穿戴脉搏传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(10):35-47.  
Cao Congjun, Lai Kaixuan, Wang Xusheng, et al. Design of wearable pulse sensor based on flexible piezoelectric thin film [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 ( 10 ): 35-47.

[23] 吕春雨, 郑涵宇, 李烨, 等. 基于柔性压阻传感器的智能交互控制系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2026, 47(4):363-372.  
Lyu Chunyu, Zhen Hanyu, Li Ye, et al. Flexible piezoresistive sensors for intelligent interaction application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2026, 47(4):363-372.

作者简介



**李梦**(通信作者), 2009 年于安徽理工大学获得学士学位, 2012 年于安徽理工大学获得硕士学位, 现为安徽信息工程学院副教授及硕士生导师, 主要研究方向为精密测量、柔性电子技术、摩擦纳米发电机等。

E-mail: mengli2@iflytek.com

**Li Meng** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2009, M. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2012, respectively. Now she is an associate professor and M. Sc. supervisor in Anhui Institute of Information Technology. Her main research interests include precision measurement, flexible electronics technology, and triboelectric nanogenerators, etc.