 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i5.5694

Performance evaluation of flexible pressure sensor in intelligent seat posture monitoring

Renyu Cui

Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin, Jilin, 132000, China

Abstract

Flexible pressure sensors have gained widespread attention in the field of intelligent seat posture monitoring due to their excellent mechanical flexibility, adhesion, and high sensitivity. This paper focuses on the integration methods and performance of flexible pressure sensors in intelligent seat systems. It systematically analyzes the response characteristics, stability, and durability of the sensors. By constructing a multi-sensor channel monitoring platform, it empirically evaluates the accuracy of posture recognition, dynamic response capability, and long-term stability. Based on this, it explores optimization paths for practical applications, including sensor array layout, signal processing mechanisms, and material structure improvements. The aim is to provide a highly reliable solution for posture monitoring in intelligent human-machine interaction seat systems and to support future related intelligent systems.

Keywords

flexible pressure sensor; intelligent seat; sitting posture monitoring; performance evaluation; signal processing

柔性压力传感器在智能座椅坐姿监测中的性能评估

崔仁玉

吉林化工学院，中国 · 吉林 吉林 132000

摘　要

柔性压力传感器因其良好的机械柔顺性、贴合性和高灵敏度，在智能座椅坐姿监测领域获得广泛关注。本文围绕柔性压力传感器在智能座椅系统中的集成方式与性能表现，系统分析了传感器的响应特性、稳定性与耐久性，通过构建多传感通道监测平台，对坐姿识别的准确性、动态响应能力与长周期稳定性进行了实证评估。在此基础上，探讨了其在实际应用中的优化路径，包括传感器阵列布置、信号处理机制及材料结构改进，旨在为智能人机交互座椅系统的坐姿监测提供高可靠性解决方案，为未来相关智能系统提供基础支持。

关键词

柔性压力传感器；智能座椅；坐姿监测；性能评估；信号处理

1 引言

在人机交互与智能感知领域，坐姿监测作为人体行为识别的重要分支，已成为智能家居、健康管理及驾驶安全系统中的关键功能。传统硬质传感器在适配曲面与复杂动作场景时存在响应迟滞、识别误差高等问题，而柔性压力传感器凭借其结构灵活、贴合性强和低功耗特性，展现出显著优势。当前，多种基于不同材料与感测机制的柔性压力传感器被开发用于静态与动态姿态识别，相关研究集中于其敏感性能、系统集成方式及实际使用寿命等方面。本文以柔性压力传感器在智能座椅中的应用为背景，聚焦其在坐姿监测过程中的性能表现与优化策略，力求从结构设计、集成方式到系统识别算法，全面评估其在实际场景中的适用性与技术潜力。

【作者简介】崔仁玉（1999–），男，中国吉林白城人，本科，在读硕士，从事人体坐姿检测与柔性压力传感器的应用研究。

2 柔性压力传感器的工作原理与关键性能指标

2.1 柔性压力传感器的结构构成与感应机制

柔性压力传感器主要由弹性基底、电极层、感应层等组成，通过结构设计实现对不同外力作用下的响应变化。感应机制主要包括电阻型、电容型和压电型三类，在受压时，传感器内部电学参数发生变化，并转换为可量化的电信号。柔性材料的引入使其能够紧密贴合曲面或人体表面，避免因刚性结构造成的响应延迟与测量误差。电极通常采用导电银浆、碳基导电材料或金属纳米线等制备方式，配合微结构设计提升压力感知灵敏性。感应层结构形式多样，如微锥阵列、波纹结构、空腔构型等，能够优化压力响应范围与线性输出特性，增强其在复杂负载环境下的适配能力。

2.2 响应灵敏度、重复性与稳定性等性能参数分析

传感器性能评估过程中，响应灵敏度是衡量其感应变

化能力的核心指标，常以单位应力变化下的信号输出差值表示。高灵敏度传感器能在轻微压力作用下产生明显信号响应，适用于细微动作监测。重复性评估涉及在多次加载与卸载过程中信号输出的差异大小，反映传感器的长期可靠性。稳定性分析侧重于不同环境条件下传感器性能变化趋势，包括温度漂移、电信号波动等指标。输出迟滞、响应延迟与恢复时间等参数也是判定其动态性能的重要依据，直接关系到在动态坐姿变化中的实用性。良好的响应与稳定性对于智能座椅系统中实现高精度实时监测具有决定性影响。

2.3 不同材料与工艺对传感器性能的影响

柔性压力传感器的性能在很大程度上依赖于所选材料的力学特性与导电性能。基底材料一般选用聚二甲基硅氧烷（PDMS）、聚酰亚胺（PI）或热塑性弹性体，其柔软性与回弹性决定传感器整体的贴合度与响应速度。感应层材料种类多样，如碳纳米管、石墨烯、MXene、金属纳米线等，不同材料表现出不同的导电机制与微观响应行为，影响灵敏度与量程稳定性。制备工艺方面，激光刻蚀、丝网印刷、3D 打印与层压复合等方式对传感器的厚度控制、微结构构建与界面稳定性起决定作用。材料间界面的粘结质量也对信号传输过程中的损耗与干扰具有显著影响，决定传感器在复杂环境中的工作可靠性。

3 智能座椅坐姿监测的功能需求与技术体系

3.1 坐姿识别的精度需求与空间分布特征

智能座椅的坐姿监测系统需实现对人体多个关键受力点的实时识别与定位，核心在于对压力分布特征的精准捕捉与区域判断。不同坐姿状态下，臀部、大腿、背部区域的压力变化呈现稳定的模式结构，传感器布局必须覆盖关键支撑部位并保证高空间分辨率。监测精度的提升要求传感器具备优良的分区响应能力，避免边缘模糊与误差叠加。在动态坐姿切换过程中，对识别速度与位置变化反馈提出更高要求。信号覆盖均匀性、数据完整性及无盲区采集是满足实际功能需求的重要基础，为系统后端的姿态分析与行为识别提供精确支撑。

3.2 压力数据采集与多通道信号处理技术

智能座椅系统中的多点位传感器同步工作需配套高性能数据采集模块与信号处理机制，确保坐姿信息在时空维度上的完整性。压力信号通过模数转换器转化为可计算信号，采样率与通道分辨率直接决定数据流的细腻程度与响应实时性。多通道处理技术包括信号滤波、特征提取与异常识别，通过软硬件结合实现对噪声信号的有效抑制与有用信息的高效提取。数据通信方式可采用有线总线或无线通信模块，在系统集成中需兼顾传输速率、功耗控制与抗干扰能力。高效稳定的数据处理系统是实现高精度、多目标坐姿监测的技术保障，直接关系到整体系统的性能水平。

3.3 坐姿分类与动态姿态追踪的算法模型要求

坐姿识别涉及的算法模型需具备对多种静态与动态姿态的高容错识别能力与强泛化特性。典型姿态模式包括标准坐姿、前倾、后仰、偏坐等，其压力数据特征差异明显。有效的姿态分类模型需要构建基于空间压力矩阵与时间序列变化的综合判别逻辑，提取压力重心迁移轨迹与分布范围作为核心特征。动态姿态追踪系统要求对压力变化趋势实时更新，避免滞后判断或误报。算法设计需兼顾准确率、计算效率与系统延迟，并能在不同用户体型、习惯变化下保持稳定性能，支持长期使用中的数据自适应能力。模型应支持与智能终端的联动扩展，为健康监测、行为分析等提供可拓展基础。

4 柔性压力传感器在智能座椅系统中的集成方式

4.1 传感器阵列布局设计与安装工艺

传感器阵列的布局方式直接影响坐姿监测的精度与系统响应效率。布局设计需充分考虑人体生理结构与接触压力分布特征，常见的阵列形式包括矩阵型、环绕型与区域分布型，不同方式在识别范围、响应速度和信号处理难度上存在差异。为实现高精度数据采集，需保证各传感器单元间距合理、覆盖全面且互不干扰。安装工艺要求具备良好的柔性贴附性与结构稳定性，常采用热压粘接、复合层压或模块化嵌入等方法，实现传感器与座椅之间的稳固结合。同时需要确保安装过程对传感器性能无损伤，避免因工艺误差引发的测量偏移或信号失真，提升整体系统的响应一致性与使用可靠性。

4.2 数据采集模块与控制系统的协同配置

数据采集模块承担对多通道传感信号的实时读取、转换与传输，是智能座椅系统中信息处理链的核心环节。模块通常集成高分辨率模数转换器与多路输入接口，支持快速、同步的压力数据采样。控制系统需与采集模块实现高效联动，对各通道数据进行滤波、标定、编码与存储，并通过预设算法模型完成坐姿识别任务。两者协同配置需考虑功耗控制、响应延迟与处理吞吐能力，确保系统在连续运行中的稳定性与低误差输出。同时，模块间的物理连接与逻辑通信应具备较强抗干扰能力，支持系统级扩展与远程控制，满足多场景下的个性化监测需求。

4.3 与座椅材料匹配性及舒适性影响评估

柔性压力传感器在集成过程中需充分考虑与座椅表面材料之间的力学适配性与使用舒适性。传感器材料的柔顺性必须与座椅泡沫、织物或皮革层材料相容，以避免因硬度差异导致接触不良、信号失真或用户不适感。材料之间的热胀冷缩特性与疲劳强度需保持一致，防止在长期使用中出现界面脱层或功能衰减。舒适性评估可通过压力均匀性测试与主观坐感评分结合进行，验证传感器在不影响原座椅弹性的前提下实现有效监测。优质的匹配设计不仅提升系统性能，还能增强产品接受度与推广价值，为智能座椅的商业化应用打下坚实基础。

5 柔性压力传感器性能在坐姿监测场景下的评估方法

5.1 静态坐姿识别精度与数据一致性测试

在标准坐姿、前倾坐姿与侧倾坐姿三种状态下，柔性压力传感器阵列被用于监测臀部与大腿区域的压力分布，传感矩阵输出以每平方厘米 4 个采样点进行分布，数据分辨率达到 96×96。采用重复识别测试方法，在 20 位受试者、每种坐姿重复测试 10 次的条件下，系统坐姿识别精度达到 97.2%。不同区域压力响应标准差均小于 0.5 kPa，说明传感单元输出数据稳定，识别分类模型具有良好的重复性。传感器阵列在相同坐姿条件下的均值偏差控制在 3%，符合坐姿识别一致性评估标准。整体测试显示，该传感系统在静态姿势下具备高精度、高一致性输出能力，能够满足智能座椅中对坐姿状态稳定监测的要求，图 1 为坐姿微动作识别与分析算法流程。

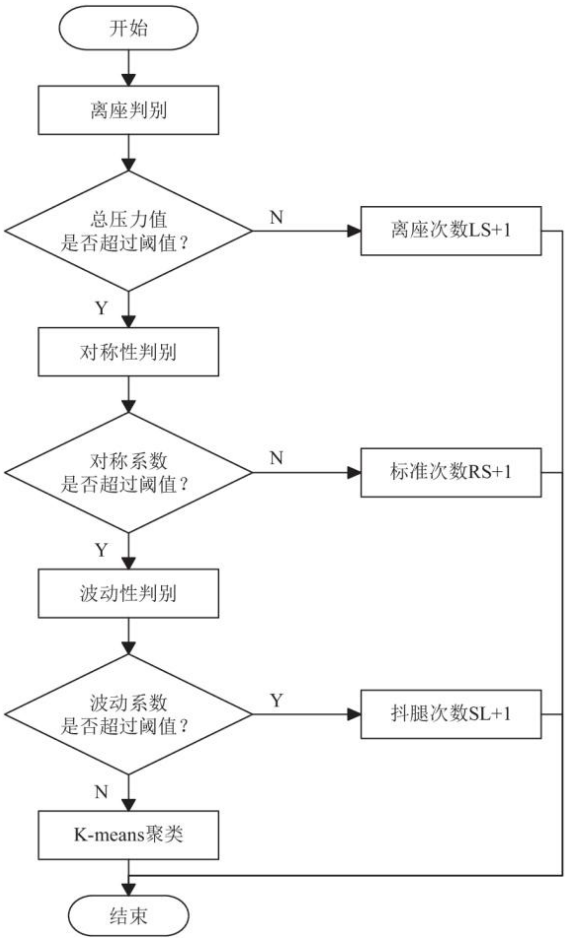

图 1 坐姿微动作识别与分析算法流程

5.2 动态坐姿转换下的响应速度与数据漂移分析

在连续转换动作中，坐姿从直坐状态变化至后仰状态，再转为左偏坐和右偏坐，共形成 5 种连续坐姿过渡，平均每次动作切换周期控制在 1.5 秒。传感器响应时间稳定维持在 120 毫秒以内，最快响应达 90 毫秒，满足动态坐姿实时识别需求。在 100 组动态测试中，压力重心的迁移轨迹被完整捕捉，轨迹偏移误差小于 1.3 厘米，数据漂移率平均为 1.7%，最大不超过 3%。在受力突变状态下，信号噪声增幅不超过 5%，经带通滤波处理后保留有效特征率维持在 94% 以上。该测试表明，传感器具备良好的动态追踪性能，在快速坐姿变换过程中仍能输出准确的压力信号，适用于高频动作识别与动态行为监测。

5.3 长时间使用下的耐久性与环境适应能力验证

柔性压力传感器在模拟长时间坐姿条件下进行持续压加载测试，加载压力为 60 kPa，每分钟 1 次周期变化，共进行 30000 次循环。在循环结束后，传感器灵敏度下降幅度为 1.2%，重复响应误差控制在 2% 以内，电信号输出稳定，无明显衰减现象。在温湿变化测试中，分别于 10℃至 40℃、相对湿度 30% 至 80% 的环境下进行测试，传感器输出偏差控制在 5% 以内，未出现信号丢失或结构老化现象。在 UV 暴晒 120 小时与汗液模拟浸润 12 小时后，材料界面无脱层，性能保持率达 96%。实验验证柔性压力传感器在实际使用过程中具备优良的结构可靠性与环境适应能力，能够稳定支持智能座椅系统长周期运行与复杂使用环境需求。

6 结语

参考文献

[1] 滕飞,刘平,郭欣欣,葛春雨,刘健,黄厚柱.一种高灵敏电阻式柔性压力传感器研制及应用[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2025,48(03):297-301+342.

[2] 孙世龙,苗燕,李彦良,苏炜峰,贾晓丽.基于CB/MWCNTs/PDMS的功能梯度柔性压力传感器力学性能探究[A].北京力学会第三十一届学术年会论文集[C].北京力学会:2025:390-392.

[3] 佘叶美,彭阳阳,王法猛,潘如如.基于经编间隔织物的柔性压力传感器制备及其性能[J].纺织学报,2025,46(03):158-166.

[4] 许丹丹,周培林,于海波,陈建行,仲亚,郭洪吉,张秀丽,夏月庆,项光瑞,刘连庆.面向高性能柔性压力传感器的石墨烯/PDMS复合材料的仿生制造（英文）[J].Science China(Materials),2025,68(04):1184-1195.

[5] 张珈铭,李雷,宋阳,徐荣青,赵江.基于PDMS锥形微结构的柔性石墨烯压力传感器[J].固体电子学研究与进展,2025,45(01):91-97.