

基于摩擦电传感器的盲文输入系统设计

贺朝武, 冷 宽, 杨媛媛, 贺显明*

重庆科技大学电子与电气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年6月19日; 录用日期: 2026年7月17日; 发布日期: 2026年7月24日

摘 要

传统盲文输入设备存在体积庞大、操作繁琐、便携性差等缺陷, 难以适配信息化时代视障群体即时沟通与信息交互的需求。本文结合垂直接触分离式摩擦纳米发电机工作原理, 设计一套以摩擦电传感器为核心的盲文输入系统。系统采用聚四氟乙烯(PTFE)薄膜与铜电极构建传感单元, 精准捕捉盲文点位按压产生的微弱机械信号并转化为电信号, 依托STM32主控芯片完成信号采集、逻辑解析与数据转换, 搭配OLED显示、语音播报模块及LabVIEW上位机, 实现盲文到电子文本的实时转换。经测试, 该摩擦电传感器灵敏度达 0.95 V/Hz , 最大非线性误差仅 0.29 V 。在系统级盲文输入应用中, 26个英文字母的综合识别准确率达98.5%。本研究可为视障群体提供轻量化、高适配性的人机交互方案, 助力视障人群融入数字化社会。

关键词

摩擦电传感器, 盲文输入, STM32, LabVIEW, 人机交互

Design of Braille Input System Based on Triboelectric Sensors

Chaowu He, Kuan Leng, Yuanyuan Yang, Xianming He*

School of Electronic and Electrical Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: June 19, 2026; accepted: July 17, 2026; published: July 24, 2026

Abstract

Traditional braille input devices suffer from bulky size, complicated operation and poor portability, failing to meet the needs of visually impaired people for real-time communication and information interaction in the information age. Based on the working principle of vertical contact-separation triboelectric nanogenerators, this paper designs a braille input system with triboelectric sensors as

*通讯作者。

文章引用: 贺朝武, 冷宽, 杨媛媛, 贺显明. 基于摩擦电传感器的盲文输入系统设计[J]. 计算机科学与应用, 2026, 16(7): 169-179. DOI: 10.12677/csa.2026.167250

the core. The sensing units of the system are fabricated using polytetrafluoroethylene (PTFE) films and copper electrodes, which can accurately capture the weak mechanical signals generated by pressing braille dots and convert them into electrical signals. With the STM32 main control chip responsible for signal acquisition, logical analysis and data conversion, and equipped with an OLED display module, a voice broadcast module and a LabVIEW upper computer, the system realizes the real-time conversion from braille to electronic text. Tests show that the triboelectric sensor achieves a sensitivity of 0.95 V/Hz with a maximum nonlinear error of merely 0.29 V. In system-level braille input tests, the overall recognition accuracy for the 26 English letters reaches 98.5%. This research provides a lightweight and highly adaptable human-computer interaction solution for the visually impaired, helping them better integrate into the digital society.

Keywords

Triboelectric Sensor, Braille Input, STM32, LabVIEW, HMI

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

数字化与信息化技术的迅猛发展,极大地改变了现代人类的沟通、教育与信息共享方式。然而,全球庞大的视障群体因生理机能限制,在获取和处理数字视觉信息时面临着严峻的数字鸿沟[1]。作为视障人群文字表达与社会融入的基础工具,传统盲文打字机虽然提供了基本的书写可能,但其普遍存在体积笨重、操作繁琐、便携性差以及移动不便等固有缺陷,难以适应高速信息流时代的即时通讯与隐私操作需求[2]。因此,开发轻量化、便携式、高效且易于使用的智能化盲文输入设备,对促进科技普惠、助力视障群体跨越数字鸿沟具有重要的现实意义。

当前,可用于盲文输入的传感技术主要包括压阻式传感、电容式传感与摩擦电纳米发电机(TENG)传感技术,三者适配盲文输入场景时呈现出明显的性能差异。压阻式传感器通过材料电阻变化检测压力,技术成熟、成本较低,但存在灵敏度不足、易受温度干扰、功耗较高等问题,且柔性适配性较差,难以满足盲文输入轻量化、精准按压识别的需求;电容式传感器响应速度快、精度较高,可实现柔性制备,但其易受环境湿度、电磁干扰影响,信号稳定性不足,且需持续供电才能工作,在便携式设备中续航能力受限,同时对封装工艺要求严苛,不利于低成本量产。相比之下,摩擦电纳米发电机(TENG)依托摩擦起电与静电感应双重效应,可将机械接触、按压、滑动等微弱物理动作直接转化为电信号,并且可以完全或部分实现自供电,适配便携式设备的低功耗、轻量化需求;同时具备响应速度快、结构简单、制作成本低、环境适应性强、柔性材料兼容性好等特点,能够精准捕捉盲文输入的微弱按压信号,且不易受常规环境因素干扰,信号稳定可靠。综合来看,TENG 传感技术在便携性、功耗、灵敏度、环境适应性及量产成本等核心维度,均更满足盲文输入设备的实际应用需求,是研制轻量化智能盲文输入设备的极具应用前景的技术方案。

摩擦电传感器已成为柔性传感、可穿戴设备、人机交互等领域的研究热点[3]-[5]。2012 年王中林院士团队[6]首次提出摩擦电纳米发电机(TENG)概念,开辟了机械能向电能转化的全新技术路径,也推动基于 TENG 的自供电传感器快速发展。近年来,国内外科研人员围绕摩擦电传感器开展大量拓展研究:Yuan 等人[7]研制出透明柔性摩擦电传感阵列,实现了对手指触摸轨迹的即时监测与路径追踪;Meng 等人[8]利用铝箔与 Kapton 材料制备摩擦电压力传感器,实现人体细微动作识别与疲劳监测;Zhang 等人[9]结合

机器学习算法, 利用 TENG 转向传感器实现了对复杂驾驶动作的高准确率分类; Shi 等人[10]基于表面磨砂改性工艺设计了 TENG 手部追踪器, 能够实时反映三维操控中的运动速度与方向。上述研究均展现出摩擦电传感器优异的传感性能与应用潜力。

尽管摩擦电传感器技术日趋成熟, 但现有产品大多依赖静电计、示波器等精密仪器完成信号采集, 难以实现小型化、集成化与便携式设计, 将其应用到盲文输入设备中的研究仍相对较少。针对上述现状, 本文设计一款基于摩擦电传感技术的盲文输入系统, 结合《国家通用盲文方案》中的盲文六点编码规则, 采用六通道摩擦电传感器阵列采集按压信号, 通过硬件电路优化、嵌入式程序开发与上位机联动, 完成盲文按压信号的采集、处理、转换、显示与语音播报。该系统摒弃传统盲文设备的复杂结构, 依托摩擦电传感器自供电特性简化硬件架构, 兼顾使用舒适性与识别准确性, 为轻量化、便携式盲人友好型人机交互设备的研制与应用落地提供了可行的解决方案。

2. 系统总体方案设计

结合盲文编码规则、摩擦电传感特性以及视障人群的使用需求, 本文构建了传感采集层、硬件处理层、软件控制层、终端交互层四层架构的盲文输入系统, 系统以六点盲文编码为核心逻辑基础, 标准盲文由六个点位组合构成不同字符, 因此本系统配置六组独立的摩擦电传感器作为信号采集单元, 分别对应盲文六个点位。当用户按照盲文规则按压不同点位组合时, 摩擦电传感器基于垂直接触分离模式产生对应的电信号, 六路模拟信号首先进入前置信号处理电路, 完成过压保护、整流、滤波与分压调理, 消除信号杂波与瞬时高压干扰, 将不规则的原始电信号转化为单片机可识别的稳定模拟信号。硬件核心选用 STM32F103C8T6 单片机作为主控单元, 利用其内置 ADC 模块完成六路模拟信号到数字信号的转换, 程序通过预设电压阈值判断各个传感器的按压状态, 将六路点位状态编码为对应十进制数据, 再依据国家通用盲文英语字母编码规则, 完成盲文点位组合到英文字符的映射转换。

为提升系统交互能力与实用性, 硬件端集成 0.96 寸 IIC 接口 OLED 显示屏与 SYN6288 语音合成模块: OLED 屏实时显示六路传感器的电压数值、按压状态编码与解析后的字符, 方便设备调试与状态查看; 语音模块通过串口接收单片机发送的文本指令, 实时播报转换完成的字符, 为视障用户提供听觉反馈。同时, 单片机通过 USB 转 TTL 串口与上位机 LabVIEW 建立通信连接, 将解析后的字符串实时上传至电脑端。LabVIEW 程序完成串口数据接收、字符显示与盲文点位可视化模拟, 借助布尔控件模拟六个盲文点位的亮灭状态, 直观呈现按压组合逻辑, 实现上位机监测、数据存储与可视化展示功能。系统的整体工作流程可概括为: 用户按压盲文点位→摩擦电传感器产生电信号→信号处理电路调理优化→STM32 单片机 ADC 采集与逻辑解析→字符转换与本地显示、语音播报→串口上传数据至 LabVIEW 上位机→上位机可视化展示与数据记录, 如图 1 所示。该总体方案充分发挥摩擦电传感器的传感优势与单片机的控制能力, 结合上位机软件实现多维度交互, 满足盲文输入、状态反馈、设备调试等多项功能需求。

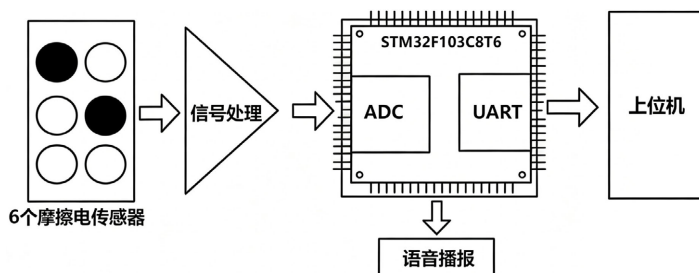


Figure 1. Schematic diagram of braille input system based on triboelectric sensors

图 1. 基于摩擦电传感器的盲文输入系统示意图

3. 摩擦电传感器设计与性能分析

摩擦电传感器是整个盲文输入系统的信号源头，其结构设计、材料选型与传感性能直接决定系统识别准确率与使用体验。本文基于垂直接触分离式摩擦纳米发电机原理完成传感器设计，通过结构选型、有限元仿真、实验对比完成参数与性能优化。

3.1. 传感器结构与工作原理

摩擦电纳米发电机主要分为垂直接触分离式、水平滑动式、单电极式、独立层式四种工作模式，四种模式在输出性能、结构复杂度、耐久性、环境适应性等方面各有优劣。水平滑动式器件虽输出频率较高，但长期使用易出现磨损，耐久性不足；单电极式结构简洁、便于集成，但电压与功率输出较弱；独立层式抗环境干扰能力强、耐用性好，但能量密度偏低。综合对比后，垂直接触分离式摩擦纳米发电机具具备输出电压高、瞬时功率大、结构简单、制作便捷、环境适应性强等优势，完全适配盲文指尖按压的短行程、高频次工作场景，因此本文选定该模式作为传感器核心工作模式。

本文设计的摩擦电传感器为圆片形结构(图 2(a))，契合手指圆形轮廓，符合人体工学设计，能够降低长期佩戴使用时的皮肤压迫感，同时圆形结构受力均匀、弯曲灵活性强，可保证多次按压动作的稳定性。传感器整体分为三层结构，自上而下依次为顶电极、介电摩擦层、底电极，电极材料选用导电性能优异、价格低廉、易加工的铜箔，介电摩擦层选用聚四氟乙烯(PTFE)薄膜，结构外围为 PDMS 封装外壳，如图 2(b)和图 2(c)所示。PTFE 属于非极性介电材料，介电性能优良、耐高温、化学稳定性强，且与铜箔之间电子束缚能力差异较大，接触分离过程中可产生充足的摩擦电荷，保障信号输出强度。摩擦电传感器工作时基于接触起电效应与静电感应原理，当手指按压传感器时，上层铜电极与 PTFE 介电薄膜紧密接触，由于两种材料对电子的捕获能力不同，电子发生定向转移，铜箔表面富集正电荷，PTFE 薄膜表面富集负电荷，接触界面形成等量异号的电荷分布。当手指松开、两层结构相互分离时，正负电荷因静电引力被拉伸，电极之间的电势差持续增大，进而驱动电子通过外部电路形成定向电流，完成机械能到电能的转化。反复按压与松开的循环动作，会产生连续的脉冲电信号，该信号的电压幅值、频率与按压力度、按压频率直接相关，后续电路与程序可通过识别电信号特征，判断传感器是否被按压，最终实现盲文点位的信号采集。

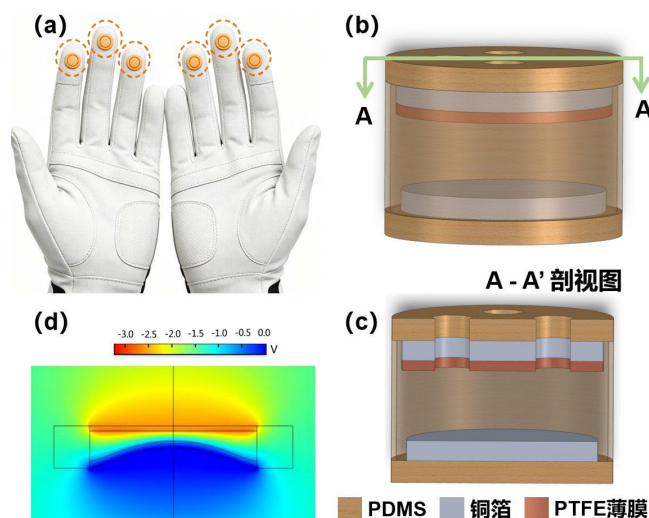


Figure 2. Disk-shaped structure of triboelectric sensor (a), structural schematic diagram (b), structural cross-sectional view (c), potential distribution diagram (d)

图 2. 摩擦电传感器的圆片形结构(a)、结构示意图(b)、结构切面图(c)、电势分布图(d)

3.2. 有限元仿真分析

为深入探究传感器内部电荷分布、电势变化规律，验证结构设计的合理性，本文采用 COMSOL Multiphysics 多物理场有限元仿真软件开展仿真分析，选用软件内置 AC/DC 模块中的静电仿真单元，模拟传感器接触、分离全过程的电势与电荷分布状态。首先进行模型搭建与参数设置，构建传感器二维几何模型，严格按照“铜电极 - PTFE 介电薄膜 - 铜电极”三层结构建模，在 PTFE 薄膜表面设置 $1 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 的面电荷密度模拟接触起电产生的电荷；将下层铜电极设置为接地状态，上层铜电极设置为浮点电势，模拟实际电路连接方式；完成模型网格精细划分，确保仿真精度，最后设置求解条件并启动仿真计算。仿真结果直观呈现了传感器的电势分布特征(图 2(d))。在按压接触阶段，上下两层电极间距极小，电荷重合度高，整体电势差数值较小；当手指松开、两层结构逐步分离时，正负电荷持续分离，电极间电势差不断增大，仿真云图中上下区域颜色发生明显反转，反映出电子流向随结构分离发生改变；当传感器完全分离且无新的按压动作时，电荷分布趋于稳定，电势差维持在固定数值。整个仿真过程完整复现了摩擦电传感器接触一分离的工作机理，证明本文设计的三层圆片形结构能够稳定产生电势变化与电信号输出，结构设计满足盲文传感的基本要求，同时也为后续信号处理电路的参数设计提供了理论依据。

3.3. 性能测试与分析

为研究传感器的传感性能，分析结构参数、激励条件对输出信号的影响，本文利用示波器开展多组对比测试，以手指按压作为激励方式，分别对比分析了不同摩擦层直径、不同按压力、不同激励频率下器件的输出性能，并进行相应的线性拟合与误差分析。首先开展摩擦层直径优化实验，分别制备摩擦层直径为 4 mm、10 mm、16 mm、20 mm 的四款传感器，在相同按压力度与频率下测试输出电压(图 3)。实验数据表明，在合理范围内，传感器摩擦层直径越大，接触面积越大，接触分离过程中转移的电荷量越多，输出电压峰值越高，信号波形越平滑、稳定性越强。综合对比四款器件的波形特征与电压幅值，直径 20 mm 的传感器输出性能最优，因此确定该尺寸作为最终传感单元的标准参数。

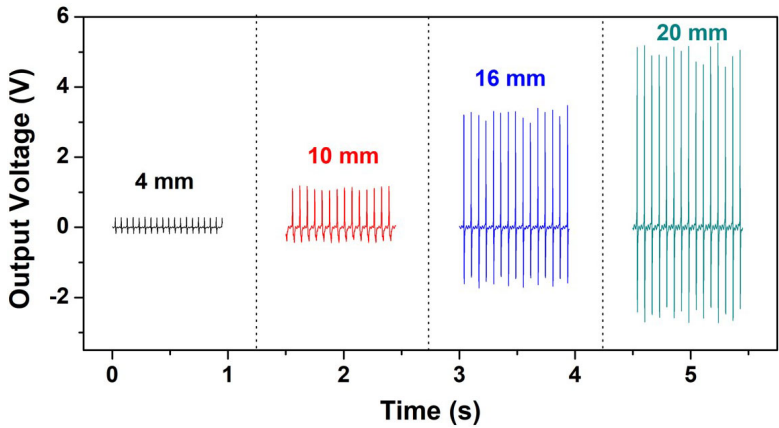


Figure 3. Output voltage diagram of devices under different tribo-layer diameters
图 3. 不同摩擦层直径下器件的输出电压图

在确定传感器尺寸后，固定按压振幅，测试了 1.25 Hz、3.11 Hz、4.16 Hz、6.37 Hz 四组不同激励频率下器件的输出电压，如图 4(a)所示。实验结果表明，输出电压峰值与激励频率呈正相关关系；按压频率越高，传感器接触分离的周期越短，电荷累积效率越高，输出电压峰值随之增大。基于各组频率与对应电压的实测数据，采用最小二乘法开展线性回归分析，计算传感器灵敏度、非线性误差等核心性能指标。

经计算,该传感器在测试范围内的灵敏度为 0.95 V/Hz,说明传感器可精准识别按压频率等微弱机械变化;并且输出电压峰值与输入频率具有良好的线性相关性,信号输出规律稳定;最大非线性误差为 0.29 V,误差数值较小,表明实测值与理论拟合值偏差低,器件能区分不同速率的盲文按压动作。图 4(b)为固定激励频率、改变驱动按压力时的峰值输出电压变化曲线。整体呈现分段式增长特征:当按压力低于 4 N 时,输出电压峰值维持在极低水平且增长平缓,此时作用力不足以让摩擦界面充分紧密贴合,摩擦起电电荷生成量有限;当按压力超过 4 N 后,输出电压随作用力提升快速上升,界面接触面积随压力增大持续扩张,电荷转移量显著提升;当按压力接近 14 N 时,电压增长速率放缓并逐步趋于饱和,摩擦界面已达到完全贴合状态,继续增大压力无法进一步提升有效摩擦接触面积,输出性能达到上限。该响应说明器件可通过输出电压幅值区分不同力度的按压,适配盲文书写中轻重不同的点位输入需求。图 4(c)为器件长时间持续按压下的实时输出电压时域曲线。器件持续工作 5000 个周期后输出电压波形幅值仍可保持为初始幅值的 92.8%,证明该摩擦电传感器摩擦层耐磨性能较好,电荷生成与传输机制具备良好可靠性,可支持盲文输入设备长时间、连续不间断的点位采集工作,满足实际使用场景下的耐久性要求。总之,本文设计的摩擦电传感器灵敏度高、线性度好、非线性误差低,信号输出稳定,能够准确捕捉盲文点位的按压动作,满足盲文输入系统的传感需求。

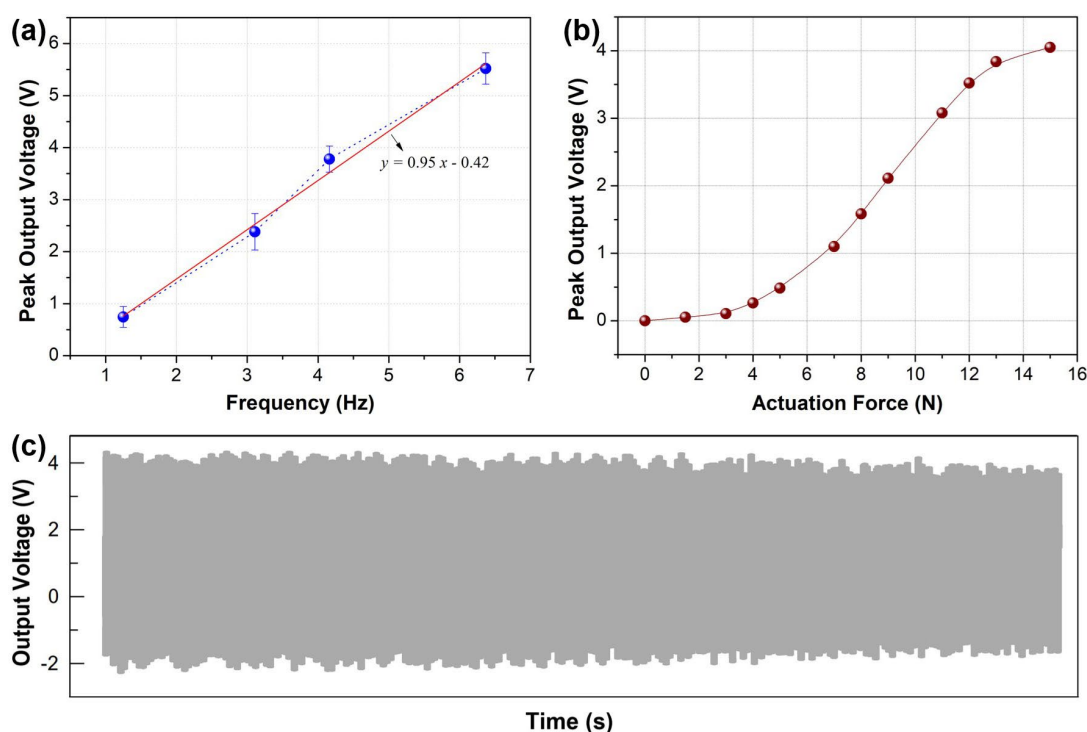


Figure 4. Test results of output performance for triboelectric sensors: (a) Variation in peak output voltage and fitted curves under different excitation frequencies; (b) Response curves of peak output voltage under varying pressing forces; (c) Output voltage stability curve of the device under continuous excitation

图 4. 摩擦电传感器输出性能测试结果, (a) 不同激励频率下输出电压峰值变化及拟合曲线; (b) 不同按压力下输出电压峰值响应曲线; (c) 连续激励下器件输出电压稳定性曲线

4. 系统硬件电路设计

系统硬件电路以 STM32F103C8T6 核心板为主控模块, 主要包含信号处理电路、主控电路、语音模块电路、OLED 显示电路, 所有电路基于立创 EDA 软件绘制原理图与 PCB 板, 硬件选型兼顾性能、成

本与小型化需求。信号处理电路是衔接摩擦电传感器与单片机的关键环节。传感器输出信号存在瞬态高压、负电压、高频杂波等问题,会损坏单片机 ADC 通道,因此为六路传感器设计结构一致的独立处理电路。电路核心元器件包括 P6KE12CA 双向瞬态电压抑制二极管、IN4007 整流二极管、100 nF 瓷片电容与分压电阻,如图 5 所示。其中 P6KE12CA 用于钳位瞬时高压,保护后端电路;IN4007 滤除负电压,保留正向有效信号;电容与电阻组成 RC 低通滤波器,衰减高频干扰信号,同时实现电压分压,将信号调整至单片机 ADC 可识别的 0~3.3 V 区间。根据 RC 滤波电路传递函数,合理匹配电阻与电容参数,保证低频有效信号完整传输。

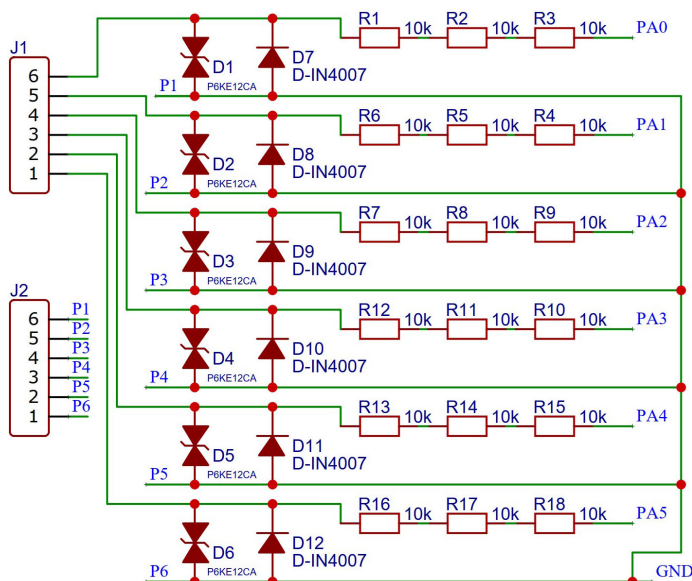


Figure 5. Schematic diagram of the signal processing circuit
图 5. 信号处理电路原理图

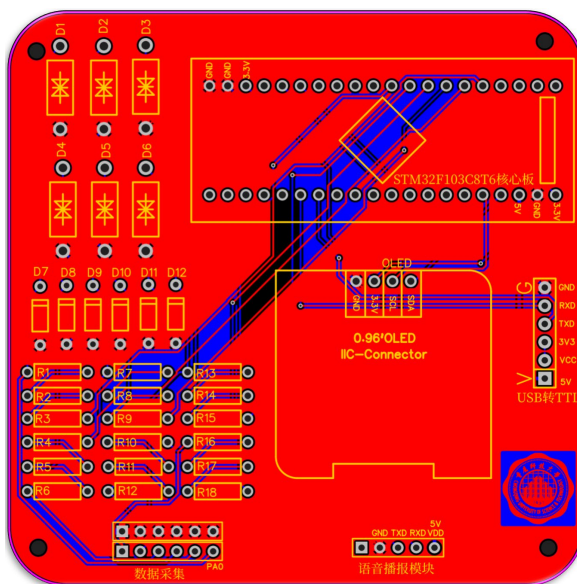


Figure 6. PCB layout of the whole system circuit
图 6. 系统总电路的 PCB 图

STM32F103C8T6 核心板电路包含多个子电路模块。晶振电路配置 8 MHz 高速晶振与 32.768 kHz 低速晶振,前者为单片机提供主时钟,后者用于实时时钟功能,搭配 20 pF 起振电容与限流电阻,保证时钟信号稳定;复位电路采用上电复位与手动复位组合模式,上电时电容充电实现自动复位,外接按键可手动触发复位,提升系统调试便利性;BOOT 选择电路用于配置单片机启动模式,支持闪存、系统存储器等多种启动方式;电源转换电路将外部 5 V 电压转换为单片机及各类模块所需的 3.3 V 电压,搭配滤波电容抑制电源噪声;SWD 调试电路用于程序烧录与在线调试,占用引脚少、操作便捷。SYN6288 语音模块电路采用 UART 串口通信模式,模块外接 5 V 电源,搭配滤波电容滤除电源杂波,16 MHz 晶振为语音芯片提供时钟信号。电路中设置 NPN 三极管与状态指示灯,当语音模块工作时,引脚电平变化触发三极管导通,指示灯点亮,直观反馈模块工作状态。单片机通过串口发送文本指令,模块完成文本到语音的转换,经功放电路驱动喇叭发声。0.96 寸 IIC 接口 OLED 显示屏电路依托 IIC 总线通信,总线上设置上拉电阻保证信号稳定,搭配低压差线性稳压器与滤波电容,为屏幕驱动芯片提供稳定电压。屏幕可实时显示六路传感器电压值、点位状态编码,是系统本地可视化的核心载体。完成各分电路设计后,进行总电路整合与 PCB 布局,PCB 板采用 80 mm×80 mm 圆角矩形设计(图 6),合理规划元器件布局与走线,规避电路串扰问题,最终完成硬件实物焊接与组装。

5. 系统软件程序设计

系统软件分为单片机下位机程序与 LabVIEW 上位机程序两部分,开发工具分别选用 Keil uVision5 与 LabVIEW 2022 Q3,程序设计遵循模块化思想,各功能子程序独立编写、协同调用,便于调试与功能拓展。下位机程序基于 C 语言编写,包含主程序、ADC 采集程序、逻辑判断程序、语音播报程序、OLED 显示程序五大模块。主程序为系统总调度程序,完成所有硬件模块、串口、定时器的初始化工作,之后进入循环状态。循环内依次执行信号采集、数据解析、本地显示、语音播报、串口上传等任务,实现系统全功能闭环。ADC 采集程序负责六路模拟信号的数字化转换。单片机启用 ADC1 与 ADC2 两个模数转换器,ADC1 配置 4 个通道,对应前四路传感器信号,ADC2 配置 2 个通道,对应后两路传感器信号,六路信号分别接入 PA0~PA5 引脚。ADC 采用单次转换模式,转换后的数字量范围为 0~4096,通过公式实际电压 = 采集值/4095.0×3.3 换算为真实模拟电压,完成数据校准。逻辑判断程序是盲文解析的核心。结合多次调试数据,设定 2.7 V 为电压阈值,单片机实时对比采集电压与阈值:电压大于 2.7 V 则判定对应传感器被按下,点位状态标记为 1;反之标记为 0。将六路点位的 0/1 状态组合为二进制编码,转换为十进制数,再根据盲文英文字母编码规则,匹配对应的英文字符,完成盲文到文本的转换。语音播报程序基于串口 1 实现,初始化串口波特率为 9600,按照 SYN6288 模块通信协议封装语音指令帧,包含校验码、播放参数、文本内容等信息。单片机解析出盲文字符后,自动拼接语音指令并通过串口发送,模块接收指令后实时播报字符内容,同时设置延时保证语音播放完整。OLED 显示程序基于 IIC 协议开发,初始化屏幕缓冲区与显示驱动后,调用专用显示函数,实时刷新六路传感器电压值、点位状态码、解析后的字符,界面简洁直观,支持调试人员快速判断传感器与电路工作状态。

上位机程序基于 LabVIEW 内置 VISA 串口库开发,主要实现串口通信、数据读取、字符显示、盲文点位可视化四大功能,LabVIEW 程序面板图如图 7 所示。通讯程序首先配置 VISA 串口参数,串口选择 COM3,波特率 9600 bps,数据位 8 位,停止位 1 位,无校验位,参数与单片机串口保持一致。通过 VISA 配置串口控件建立上下位机通信链路,链路连通后上位机持续监听串口数据。数据读取程序增加数据校验机制,利用反馈节点判断串口缓冲区数据长度,仅当检测到有效数据时才启动读取操作,避免空读取与数据丢失。采用截取字符串函数提取最新传输的字符,保证显示内容与输入动作实时同步。布尔控件程序用于盲文点位可视化,使用六个布尔指示灯对应盲文六个点位。根据上位机接收的点位状态码,控

制对应指示灯亮灭, 模拟盲文按压点位, 让操作人员直观观察每一路传感器的工作状态。最终上位机界面集成字符显示区、点位指示灯区、串口参数区, 人机交互体验良好。

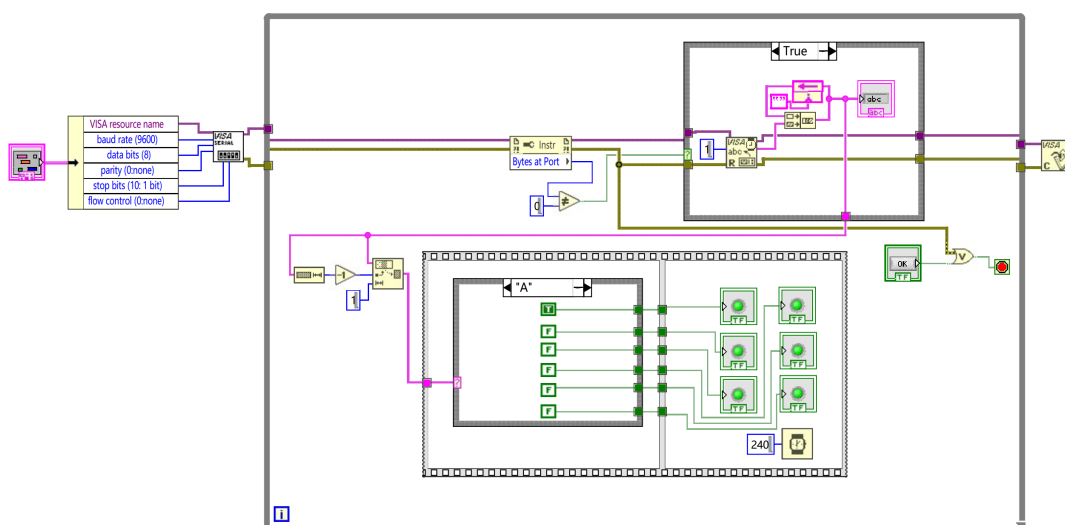


Figure 7. Front panel of LabVIEW host software

图 7. 上位机的 LabVIEW 程序面板图

6. 系统调试与功能验证

系统通过软硬件设计、优化、加工后得到如图 8 所示的系统样机实物图。接下来, 对系统样机进行调试与功能验证; 系统调试分为硬件调试、软件调试、整体联调三个阶段, 逐模块排查故障, 确保各单元正常工作后, 开展功能测试与准确率验证。

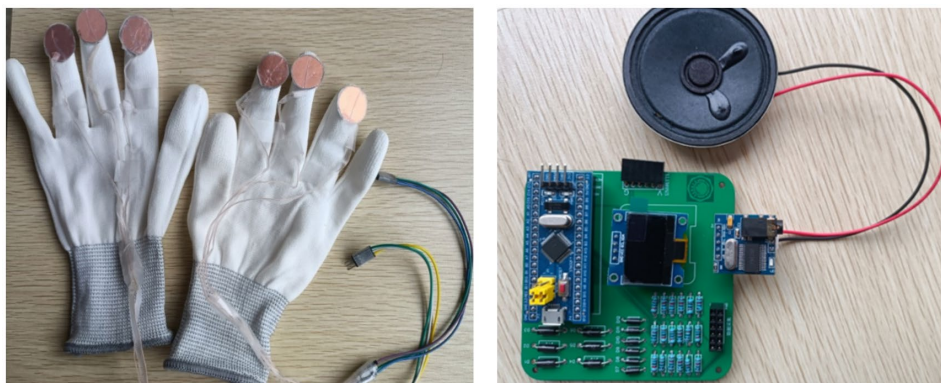


Figure 8. Photo of the system prototype

图 8. 系统样机实物图

硬件调试优先测试信号处理电路, 将摩擦电传感器直接接入示波器, 未加处理电路时, 按压传感器会产生几伏瞬态电压; 依次接入稳压二极管、整流二极管、RC 滤波电路后, 信号被稳定在 0~3.3 V 范围内, 负电压与高频杂波被完全滤除, 电路达到预期效果。随后分别测试 OLED 屏幕、语音模块、串口模块, 接通电源后屏幕正常点亮、数据刷新, 语音模块播报清晰, 串口通信握手成功, 硬件模块全部正常。软件调试依次对各子程序进行单模块测试。ADC 程序测试中, 多次采集同一传感器电压, 数据波动小、

稳定性强, 阈值 2.7 V 可精准区分按压与松开状态; 逻辑判断程序逐一测试 26 个英文字母对应的盲文点位组合, 编码匹配无误; 上下位机串口通信稳定, 数据传输无丢包、乱码现象。

完成分模块调试后进行系统整体功能验证。测试时, 操作人员按照盲文编码规则按压指尖传感器, 观察 OLED 屏幕电压与状态变化、聆听语音播报内容、查看 LabVIEW 上位机字符与点位指示灯。选取典型字符串 “HELLO WORLD” 进行输入测试(图 9), 系统可实时、完整还原输入内容, 响应延迟低。



Figure 9. Display interface of the string “HELLO WORLD”
图 9. 字符串 “HELLO WORLD” 的显示界面

为分析系统识别精度, 开展准确率测试。针对 26 个英文字母, 每个字母重复输入 100 次, 统计正确识别次数。测试结果显示, 26 个字母综合识别准确率达到 98.5%(图 10), 误差主要来源于极端按压力度不均、外界轻微电磁干扰等因素, 整体准确率完全满足日常使用需求。综合调试与测试结果表明, 该系统硬件稳定、软件逻辑可靠、功能完整, 实现了基于摩擦电传感器的盲文输入目标。

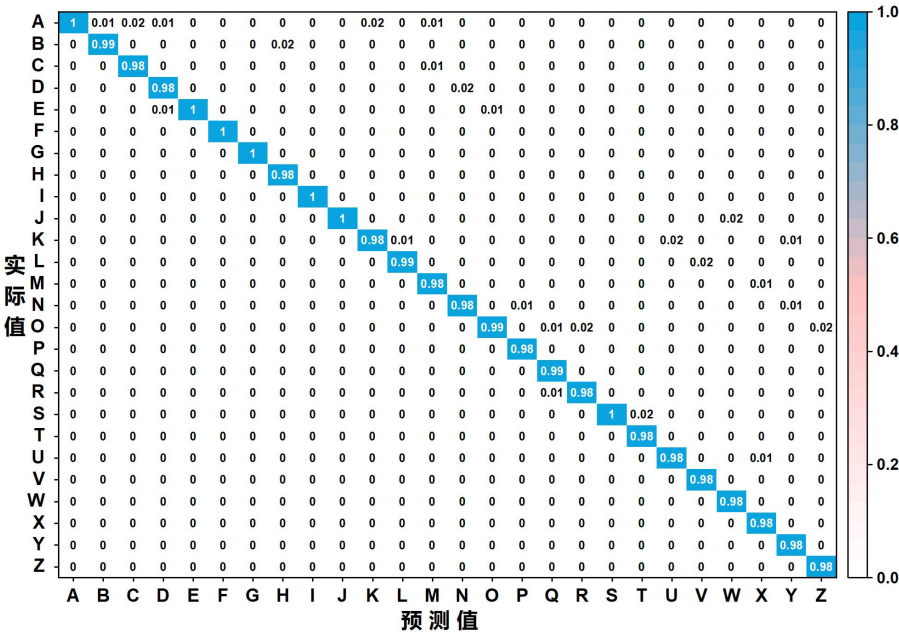


Figure 10. Confusion matrix for braille input accuracy of 26 English letters
图 10. 26 个英文字母盲文输入准确率混淆矩阵图

7. 结论

本文结合视障人群的使用需求与摩擦电传感技术的优势,设计并实现了一套基于垂直接触分离式摩擦电传感器的盲文输入系统。系统以六通道摩擦电传感器采集盲文按压信号,通过信号处理电路优化原始信号,借助 STM32 单片机完成模数转换、逻辑编码,搭配 OLED 显示、语音播报、LabVIEW 上位机,构建了集信号采集、处理、解析、输出于一体的完整盲文输入方案。经测试,本文设计的摩擦电传感器综合性能优异,灵敏度 0.95 V/Hz,线性度与稳定性良好;整套盲文输入系统对 26 个英文字母输入准确率达 98.5%,具备响应迅速、操作简单、便携轻巧、成本低廉等特点,有效解决了传统盲文打字机笨重、操作繁琐的痛点,能够帮助视障群体更好地适配信息化社会。本系统虽完成盲文输入核心功能,但存在字符类型单一、有线传输灵活性差、缺少视障用户实测、制作工艺简陋与信号识别精度仍可提升等问题。后续可扩充中英文及各类字符库,借助 3D 打印优化制作工艺,加装高精度 ADC 模块并改用无线传输,同时结合视障用户实测反馈优化使用体验,丰富设备实用功能,全面完善系统整体性能与实际应用效果。总体而言,该设计为摩擦电传感器在盲文辅助设备领域的应用提供了可行方案,具备一定的实用价值与推广前景。

基金项目

本研究得到重庆市自然科学基金面上项目(项目编号: CSTB2022NSCQ-MSX1312)的资助。

参考文献

- [1] 李嘉楠,李学勇.平台助盲降低数字鸿沟-基于应用程序视觉无障碍功能的经验证据[J].经济学(季刊),2025,25(4):943-960.
- [2] 彭林.多功能液态金属复合材料的制备及其在柔性电子器件中的应用[D]:[博士学位论文].北京:北京化工大学,2025.
- [3] 霍青元,赵鑫悦,夏永涛,等.纤维基柔性应力应变传感器在运动与健康监测领域中的最新研究进展[J].纺织工程学报,2026,4(1):15-36.
- [4] 赵磊磊.基于摩擦纳米发电机的多模态柔性传感器及其应用研究[D]:[博士学位论文].济南:山东大学,2025.
- [5] 闫风光,周丽平,王忠建,等.基于双层电极的摩擦电触觉感知阵列研究[J].计量与测试技术,2025,51(9):110-114.
- [6] Fan, F., Lin, L., Zhu, G., Wu, W., Zhang, R. and Wang, Z.L. (2012) Transparent Triboelectric Nanogenerators and Self-Powered Pressure Sensors Based on Micropatterned Plastic Films. *Nano Letters*, **12**, 3109-3114. <https://doi.org/10.1021/nl300988z>
- [7] Yuan, Z., Zhou, T., Yin, Y., Cao, R., Li, C. and Wang, Z.L. (2017) Transparent and Flexible Triboelectric Sensing Array for Touch Security Applications. *ACS Nano*, **11**, 8364-8369. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b03680>
- [8] Meng, X., Cheng, Q., Jiang, X., Fang, Z., Chen, X., Li, S., *et al.* (2018) Triboelectric Nanogenerator as a Highly Sensitive Self-Powered Sensor for Driver Behavior Monitoring. *Nano Energy*, **51**, 721-727. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.07.026>
- [9] Zhang, H., Cheng, Q., Lu, X., Wang, W., Wang, Z.L. and Sun, C. (2021) Detection of Driving Actions on Steering Wheel Using Triboelectric Nanogenerator via Machine Learning. *Nano Energy*, **79**, Article ID: 105455. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105455>
- [10] Shi, S., Jiang, Y., Xu, Q., Zhang, J., Zhang, Y., Li, J., *et al.* (2022) A Self-Powered Triboelectric Multi-Information Motion Monitoring Sensor and Its Application in Wireless Real-Time Control. *Nano Energy*, **97**, Article ID: 107150. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107150>