

8-14-2020

## Layered Electro-magnetic Refreshable Braille Display with Haptic Rendering

Xinli Wu

*Virtual Reality Laboratory of Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;*

Panfei Zhu

*Virtual Reality Laboratory of Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;*

Wenzhen Yang

*Virtual Reality Laboratory of Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;*

Zhongzheng Jin

*Virtual Reality Laboratory of Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Layered Electro-magnetic Refreshable Braille Display with Haptic Rendering

## Abstract

**Abstract:** Refreshable braille display is an important application of haptic rendering in virtual reality. A prototype of a layered electro-magnetic refreshable braille display was developed, which has complex mechanical structures and a control system, and could dynamically display 20 braille words. *By designing the layered and dislocated braille driving mechanism, this refreshable braille display realized the arrangement of 120 braille points. By switching the current of the electromagnetic coils, the control system of this refreshable braille display realized the movement control of these braille points.* This prototype has the advantages of small volume, low cost, high refresh rate, and can generate enough supporting force for fingertip haptic reading braille.

## Keywords

refreshable braille display, electro-magnetic driving, haptic rendering, the blind

## Authors

Xinli Wu, Panfei Zhu, Wenzhen Yang, Zhongzheng Jin, Jianqiang Xuan, Xu Yan, and Zhichao Zhu

## Recommended Citation

Wu Xinli, Zhu Panfei, Yang Wenzhen, Jin Zhongzheng, Xuan Jianqiang, Xu Yan, Zhu Zhichao. Layered Electro-magnetic Refreshable Braille Display with Haptic Rendering[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 2220-2227.

## 触觉再现的分层电磁式盲文点显器

吴新丽, 祝盼飞, 杨文珍, 金中正, 宣建强, 许艳, 竺志超

(浙江理工大学虚拟现实实验室, 杭州 310018)

**摘要:** 盲文点显器是触觉再现研究的重要应用。研发了一种分层电磁式盲文点显器的原型样机, 包括机械本体和控制系统两部分, 可以动态显示 20 方盲文。创新设计出分层且错位布置的盲文触点驱动机构, 机械本体实现了 120 个盲文触点的空间排布; 通过控制电磁线圈的通断电, 控制系统驱动盲文触点独立上下运动, 动态组合出不同的盲文字符。此原型样机体积小、成本低、刷新频率高, 可生成足够的支撑力, 供指尖触觉阅读盲文。

**关键词:** 盲文点显器; 电磁驱动; 触觉再现; 盲人

中图分类号: TP242.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 09-2220-08

## Layered Electro-magnetic Refreshable Braille Display with Haptic Rendering

Wu Xinli, Zhu Panfei, Yang Wenzhen, Jin Zhongzheng, Xuan Jianqiang, Xu Yan, Zhu Zhichao

(Virtual Reality Laboratory of Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Refreshable braille display is an important application of haptic rendering in virtual reality. A prototype of a layered electro-magnetic refreshable braille display was developed, which has complex mechanical structures and a control system, and could dynamically display 20 braille words. By designing the layered and dislocated braille driving mechanism, this refreshable braille display realized the arrangement of 120 braille points. By switching the current of the electromagnetic coils, the control system of this refreshable braille display realized the movement control of these braille points. This prototype has the advantages of small volume, low cost, high refresh rate, and can generate enough supporting force for fingertip haptic reading braille.

**Keywords:** refreshable braille display; electro-magnetic driving; haptic rendering; the blind

## 引言

触觉再现是虚拟现实技术的重要组成部分, 盲文点显器是触觉再现研究的重要应用之一, 可为盲人提供无障碍的盲文资源, 让盲人享受读书乐趣。盲文又称点字, 是专门为盲人设计的, 靠触觉感知的文字。一个盲文点字由 6 个固定距离的触点组成,

称为一方。这六个触点呈三行两列排布, 左边自上而下为 1 点, 2 点, 3 点, 右边为 4 点, 5 点, 6 点, 如图 1(a)所示。根据盲人触觉感知的心理或生理特点, 触点的外形通常为半球形, 直径为 1.0~1.6mm, 凸起的高度为 0.2~0.5mm。点距为 2.2~2.8mm、方距为 3.5~4.0mm、行距为 5.0~6.0mm, 如图 1(b)所示。一个汉语盲文字的声母、韵母及声调各占一方, 要显示一个汉语盲文字需要三方, 18 个盲文触点, 图 1(c)所示为“龙”字的盲文字符。

我国是世界上盲人最多的国家, 视力缺失的盲人已经是很不幸了, 不认识盲文的盲人更不幸。国际上, 把不认识盲文的盲人也称为文盲, 无论是生



收稿日期: 2016-05-09 修回日期: 2016-07-11;  
基金项目: 国家自然科学基金(61332017), 国家“863”  
高技术研究发展计划(2013AA013703), 浙江省科技厅  
公益项目(2016C33174), 浙江省自然科学基金  
(LY14F020048);  
作者简介: 吴新丽(1987-), 女, 浙江嘉兴, 硕士生,  
讲师, 研究方向为虚拟现实技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 2220 •

活还是就业, 都受到很大的限制<sup>[1-2]</sup>。长期以来, 由于纸质盲文书集数量少、品种单一、资讯滞后、体积大且笨重、流通不畅, 盲人不仅难以获得, 而且使用起来也很不方便, 极大地限制了盲人群体文化水平的整体提高。

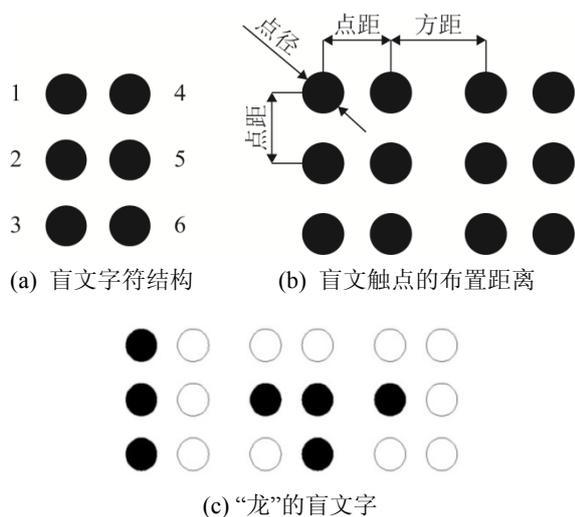


图 1 盲文点字

类似于活字印刷术, 盲文点显示器是一种能将普通文字动态显示成盲文的机电设备, 能够动态组合六个触点, 形成不同的盲文点字, 可以弥补纸质盲文书的多种劣势。因此, 盲文点显示器对提升盲人的文化素质, 改善他们的生活, 具有重要意义。

采用不同的工作原理和驱动器, 国内外学者尝试研发了多种盲文点显示器<sup>[3]</sup>, 包括压电陶瓷式盲文点显示器、形状记忆合金式盲文点显示器、电磁阀式盲文点显示器、气动式盲文点显示器、电刺激式盲文点显示器、温度刺激式盲文点显示器等。

压电陶瓷式盲文点显示器<sup>[4]</sup>采用压电陶瓷双晶片作为驱动器, 将两片具有相反极化方向的压电陶瓷片紧密贴合在一起, 当向其施加正向电压后, 一方伸长, 另一方则收缩, 产生弯曲变形, 固定在压电陶瓷片上的触杆也随之向上运动, 驱动盲文触点上升。当施加负向电压时, 压电陶瓷双晶片向相反方向弯曲, 驱动盲文触点下降。压电陶瓷式盲文点显示器的优点在于功耗低、响应速度快、能给触点提供较大的支撑力, 然而, 压电陶瓷的原材料成本很

高而且几乎没有降价空间, 使得压电陶瓷式盲文点显示器的价格非常昂贵, 绝大多数盲人是可望而不可及的<sup>[5]</sup>。

形状记忆合金式盲文点显示器<sup>[6]</sup>采用形状记忆合金作为驱动器, 实现盲文触点的上升和下降, 其特点在于功耗少、质量轻、原材料成本低。然而, 由于形状记忆合金的非线性迟滞特性, 使其响应速度慢、支撑力小且可靠性低, 难以实际应用<sup>[7]</sup>。电磁阀式盲文点显示器<sup>[8-9]</sup>采用电磁阀作为驱动器, 实现盲文触点的上升和下降。电磁阀在电磁线圈通电后产生电磁力带动阀芯运动, 其优点在于响应速度快、支撑力大、可靠性高、价格便宜。它的主要不足在于功耗高、体积大, 使得盲文触点的空间布置困难。

气动式盲文点显示器<sup>[10]</sup>利用空气压缩机向密封装置内部通入压缩空气, 与外界空气形成压强差, 在内部压力作用下, 由高聚物分子材料制成的薄膜就会凸起, 形成盲文触点。微型气压阀驱动器响应速度快、支撑力大、可靠性高。它的主要不足在于需要外接气源、体积大、不便携带、制造成本高<sup>[11-12]</sup>。

电刺激式盲文点显示器<sup>[13-14]</sup>是将电脉冲信号施加到位于指尖的微电极上, 通过微电极的表层电流直接刺激指尖皮肤内的神经末梢, 能够在没有机械驱动器的状况下产生压力或者振动触觉, 盲人根据此触觉信息来识别盲文点字。电刺激式盲文点显示器功耗低、结构简单、制造成本低, 主要问题在于容易引起指尖刺痛感, 且不符合盲人摸读习惯<sup>[15]</sup>。温度刺激式盲文点显示器<sup>[16]</sup>是通过温度的改变刺激指尖皮肤的不同区域, 让盲人识别盲文, 其优点在于装置结构简单, 制造成本低和体积小, 不足之处在于温度不能快速上升与下降, 响应速度慢, 盲文识别率很低<sup>[17]</sup>。

综上所述, 盲文点显示器的研发难点主要体现在盲文触点的空间布置、支撑力大小、控制方法、驱动方式、便携性和制造成本等方面。虽然国内学者采用不同的机理研发了多种盲文点显示器, 但是只有压电陶瓷式和电磁式驱动器最为可行。由于压电陶瓷的原材料成本很高, 一个盲文点字需要 100~150

美元，一行二十个盲文点字的售价为 2000~3000 美元，绝大多数盲人根本无法承受，严重阻碍了盲文点显器的普及。

因此，在没有新材料和新粹取工艺取得重大突破之前，电磁驱动成为目前研发高性能且低成本盲文点显器的首选。本文在前人研究成果基础上，创新研发了一种分层电磁式盲文点显器的原型样机，以期实现盲文触点能快速响应、有足够的支撑力且低成本。

### 1 原型样机

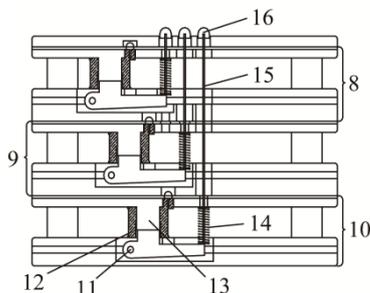
分层电磁式盲文点显器的原型样机主要包括机械本体和控制系统两部分组成。机械本体是指动态显示盲文触点的机械装置，控制系统是指控制盲文触点升降运动的电路模块。

#### 1.1 机械装置

采用电磁感应原理研发盲文点显器机械装置，核心难点在于难以实现盲文触点的空间布置。要在只有长约 1.8cm 宽约 0.8cm 的空间内，排布和驱动 18 个完全独立运动的盲文触点，才能显示 1 个汉语言盲文，这并不是一件容易做到的事。

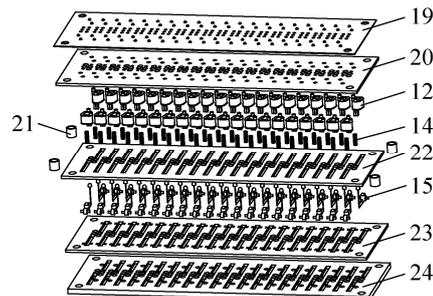
##### 1.1.1 机械装置的原理

基于模块化机构创新设计理念，我们采用分层且错位布置盲文触点驱动器，创新设计出一种分层电磁式盲文显示机械装置(国家发明专利公开号 CN201410632715.9)，如图 2 和图 3 所示。



第一层盲文显示模块(8)，第二层盲文显示模块(9)，第三层盲文显示模块(10)，固定轴(11)，电磁线圈(12)，铁芯(13)，复位弹簧(14)，触针(15)，盲文触点(16)

图 2 分层电磁式盲文显示机械装置的剖切图



电磁线圈(12)，复位弹簧(14)，触针(15)，电路板(19)，铁芯板(20)，套筒底板(21)，压板(22)，固定板(23)，底板(24)

图 3 分层电磁式盲文显示机械装置的爆炸图

分层电磁式盲文显示机械装置包括：第一层盲文显示模块、第二层盲文显示模块、第三层盲文显示模块。第一层盲文显示模块显示盲文字符中的第三点和第四点，第二层盲文显示模块显示盲文字符中的第二点和第五点，第三层盲文显示模块显示盲文字符中的第一点和第六点，如图 2 所示。由于盲文触点的空间分辨率距离很小(点距为 2.2~2.8mm，方距为 3.5~4.0mm)，分层式结构排布可以合理地利用空间，满足盲文触点的空间布置要求，内部结构紧凑，体积小，方便盲人随身携带。盲文触点驱动机构由固定轴，电磁线圈，铁芯，复位弹簧，触针和盲文触点组成，见图 2 所示。每层盲文显示模块均包括由下往上依次平行排布安装的底板、固定板、压板、铁芯板和电路板以及多组盲文触点驱动机构，如图 3 所示。

##### 1.1.2 机械装置的物理样机

通过不断改进设计和加工工艺，完成了分层电磁式盲文显示机械装置的物理样机制造，如图 4 所示，实现了 120 个盲文触点的空间分布，可以显示 20 个盲文，验证了机械装置结构设计的合理性、可行性和正确性。

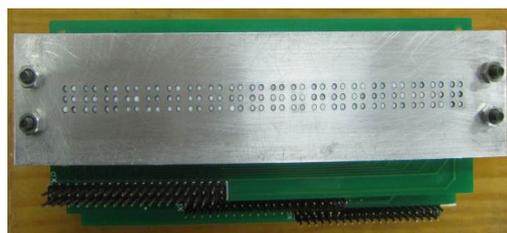


图 4 分层电磁式盲文显示的机械装置

## 1.2 控制系统

为控制 120 个盲文触点的独立升降运动, 开发了分层电磁式盲文点显器的控制系统, 主要包括电源模块、控制电路模块、放大电路模块、主控制模块、液晶显示模块和文件管理模块等, 如图 5 所示。

### 1.2.1 控制系统的模块功能

电源模块给各个模块供电; 控制电路模块用来拓展主控制器 I/O 口的数量; 放大电路模块用来放大主控制器的信号, 驱动盲文显示机械装置的驱动元件电磁线圈; 主控制器用来协调控制各个模块工作; 液晶显示模块用来显示电子中文汉字和盲文, 进行视觉交互提醒; 文件管理模块用来对 SD 卡内

文件进行管理, 方便快捷地进行文件内容读写操作。各个模块组合协调工作构成分层电磁式盲文点显器的控制系统, 驱动 120 个盲文触点动态显示盲文。

### 1.2.2 控制系统的硬件

以 STM32 开发板为控制开发平台, 主控制器读取 SD 卡内 TXT 文档内容, 通过按键触发, 控制电磁线圈的通断电, 驱动盲文触点上下运动, 通过盲文触点凹凸的不同组合, 在分层电磁式盲文显示机械装置上显示盲文字符, 同时在 LCD 液晶屏幕显示盲文字符和对应的中文汉字。图 6 为控制系统的硬件构成。

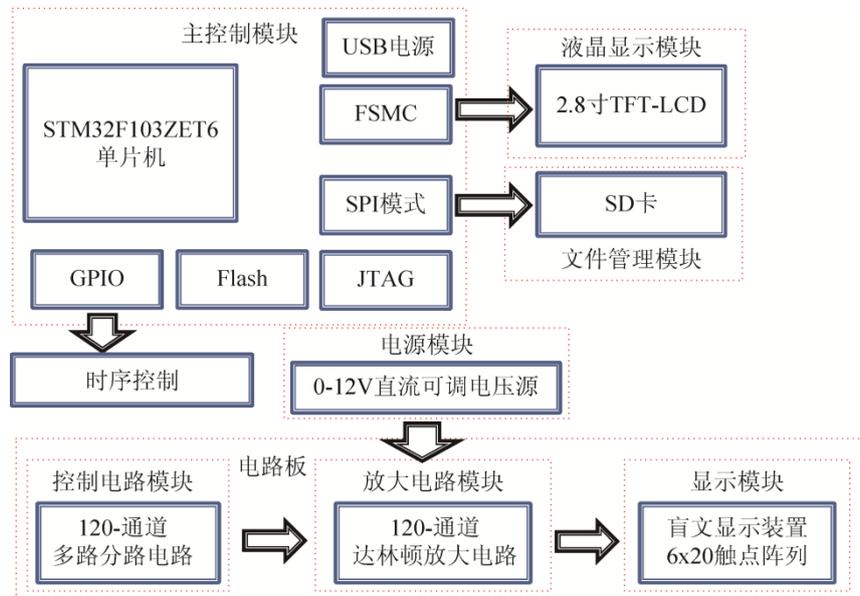


图 5 分层电磁式盲文点显器的控制系统



图 6 控制系统的硬件

## 2 性能分析

通过创新设计和制造了分层电磁式盲文点显器原型样机, 解决了盲文触点空间布置的难题, 实现了 120 个盲文触点的独立运动。本节理论建模和分析盲文触点的力性能和运动性能等, 证明此原型样机能够给指尖触摸提供足够的支撑力, 而且盲文触点运动响应速度快。

## 2.1 盲文触点的力性能分析

分层电磁式盲文点显器的力性能主要包括盲文触点驱动机构生成的电磁力和指尖触摸支撑力。

### 2.1.1 盲文触点驱动机构生成的电磁力

依据电磁学原理,盲文触点驱动机构通过电磁线圈产生电磁力,驱动盲文触点上下运动,动态生成盲文字符。

电磁线圈产生的电磁力  $F_m$  为

$$F_m = \frac{B_0^2 \cdot S}{2\mu_0} \cdot \frac{1}{1 + a\delta} \quad (1)$$

式中:  $F_m$  为电磁力(J/cm 或 N);  $S$  为磁极表面面积( $\text{cm}^2$ );  $\mu_0 = 1.256 \times 10^{-8}$  H/cm 为空气磁导率;  $a = 5$  为修正系数;  $\delta = 0.1$  cm 为气隙长度;  $B_0$  为有铁芯的磁感应强度( $\text{Wb}/\text{cm}^2$ )。

分层电磁式盲文显示机械装置采用电工纯铁作为铁芯,有铁芯的磁感应强度  $B_0$  为

$$B_0 = \mu_r B \quad (2)$$

式中,  $\mu_r = 5000$  H/cm 为电工纯铁的磁导率;  $B$  为无铁芯的磁感应强度( $\text{Wb}/\text{cm}^2$ )。

无铁芯的磁感应强度  $B$  为

$$B = 0.455\mu_0 nI \quad (3)$$

式中:  $\mu_0 = 1.256 \times 10^{-8}$  H/cm 为空气磁导系数;  $n$  为电磁线圈的匝数;  $I$  为流经电磁线圈的电流(A)可由式(4)求得。

$$I = U / R \quad (4)$$

式中:  $U$  为电磁线圈的电压(V);  $R$  为电磁线圈的电阻( $\Omega$ )。

由式(1)~(4)可得,电磁力  $F_m$  主要与电磁线圈的电压  $U$ 、电阻  $R$ 、匝数  $n$  和磁极表面面积  $S$  相关。

### 2.1.2 指尖触摸支撑力

当盲文触点处于凸显状态时,电磁力  $F_m$  需克服触针重力  $G$ ,复位弹簧受压后的弹力  $F_t$  后,才能提供指尖触摸支撑力  $F$

$$F = F_m - F_t - G \quad (5)$$

当分层电磁式盲文显示机械装置确定后,即  $R = 39\Omega$ ,  $n = 1188$ ,  $S = 3.36 \times 10^{-2} \text{cm}^2$ ,  $G = 1.313 \text{mN}$ ,

$F_t = 0.03 \text{mN}$ ,支撑力  $F$  与电磁线圈的电压  $U$  成正比。若给电磁线圈施加不同的电压值,就会生成不同大小的支撑力  $F$ 。

理论上,当施加电压  $U = 4 \text{V}$  时,分层电磁式盲文显示机械装置可以生成支撑力  $F \approx 0.15 \text{N}$ ,就已能满足盲人指尖触觉辨识盲文的需求。

## 2.2 盲文触点的运动性能分析

熟识盲文的盲人可以在一分钟内摸读 200 多个盲文字,一点都不比明眼人看书慢。如果盲文点显器更新盲文的速度跟不上盲人摸读的速度,会极大地降低盲人阅读的体验感。因此,能否实时更新盲文是盲文点显器的重要性能,也是盲文点显器能否实际应用的关键要素。前人研究已表明由于盲文触点动态响应速度慢,形状记忆合金式盲文点显器难以被盲人所接受。

对于分层电磁式盲文点显器,盲文触点动态响应性能主要与控制系统的延时和盲文触点上升运动时间相关。

### 2.2.1 控制系统的延时

以 STM32 开发板为开发平台,控制系统为单机工作。控制系统的初始化包括外设的初始化和文件系统的初始化,是在盲人触摸阅读之前完成,不计入盲文触点动态响应性能。当盲人正式触摸阅读后,控制系统对文件数据的分配和发送是瞬时完成,消耗时间可以忽略不计。在盲文换行显示人机交互时,为确保检测到盲文换行指令信号是正确的,而不是由外干扰信号造成的,需要在按键扫描程序中加入  $t_1 = 10 \text{ms}$  的延迟,以保证人机交互的正确性。

### 2.2.2 盲文触点上升运动时间

盲文触点从最低位置上升到最高位置所消耗的时间为盲文触点上升运动时间。在上升运动过程中,盲文触点受到电磁力  $F_m$ ,触针的重力  $G$ ,复位弹簧受压后的弹力  $F_t$  和运动时的摩擦阻力  $F_f$  共同作用。

为求得盲文触点上升运动时间,构建盲文触点

的动力学模型:

$$F_m - F_t - F_f - G = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (6)$$

式中:  $m = 0.134 \times 10^{-3}$  kg 为触针质量(kg);  $x$  为触针的位移(m),  $t_2$  盲文触点上升时间(s)。

当分层电磁式盲文显示机械装置确定后, 即触针的位移  $x = 0.7$  mm; 复位弹簧受压后的弹力取最大值  $F_t = 0.03$  mN; 理论上摩擦阻力  $F_f = 0$  N, 可以求得触针上升时间  $t_2 \approx 0.527$  ms。

因此, 盲文触点的响应时间为  $T = t_1 + t_2 = 10.527$  ms, 每秒刷新频率  $f = 1/T \approx 95$  次。理论上, 此分层电磁式盲文点显器在 1 min 内可以更新 5700 个盲文, 足够满足盲人快速阅读的需求。

### 3 触觉感知盲文实验

控制系统使用 ULN2803 达林顿管实现电磁线圈通断电, 电磁线圈产生的电磁力驱动触针上下运动, 通过程序控制盲文触点的组合方式, 呈现出不同的盲文字符。我们设计触觉感知盲文实验, 进一步验证和评价分层电磁式盲文点显器的性能。

#### 3.1 分层电磁式盲文点显器的实验设计

实验对象由 3 名女性和 3 名男性组成, 23~27 岁, 6 个人都不了解盲文点显器功能, 均无先前经验。像平常触摸平面动作一样, 实验对象的食指指尖腹部沿盲文触点平移, 触觉感知盲文触点的凹凸情况, 如图 7 所示。在触摸过程中, 要求实验对象有意识地施加一定指尖压力, 判断凸起的触点是否有足够的支撑力, 能让指尖触觉能正确地判断出触点是凸起的。

#### 3.2 电压与指尖触摸支撑力的实验

由 3.1.2 可知, 指尖触摸支撑力与电磁线圈的电压成正比。电压过小, 电磁线圈无法提供足够大的指尖触摸支撑力, 降低指尖触觉辨识盲文字符的正确率。电压过大, 虽然可以提供足够大的支撑力, 但是会增加不必要的功耗。

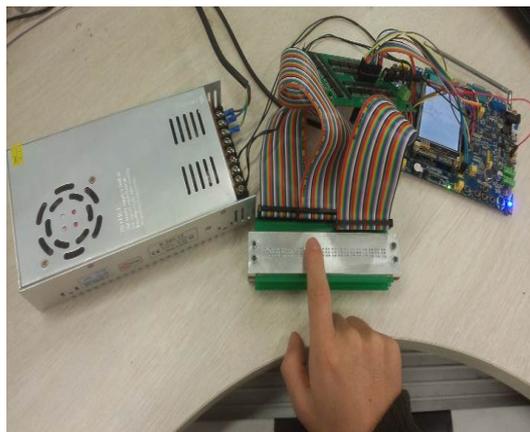


图 7 分层电磁式盲文点显器的实验设计

理论上, 施加 4V 电压, 分层电磁式盲文点显器就能生成足够的支撑力, 让指尖触觉辨识出盲文。然而, 实际上, 由于受到: 1) 电磁线圈的材料差异; 2) 机械本体加工和装配的误差; 3) 不同人指尖触觉感知的敏感性差异; 4) 电路板的电压损耗等各种原因, 都会影响支撑力的大小。为保证分层电磁式盲文点显器的工作可靠性, 开展此实验是很有必要的。

通过可调电压器, 分别向电磁线圈加载 3~9 V 的工作电压。在不同的电压情况下, 6 名实验对象触觉感知盲文触点, 记录指尖对支撑力的感知情况, 如表 1 所示。

表 1 电压大小与触点支撑力的感知

对象	A1 (男)	A2 (女)	A3 (男)	A4 (女)	A5 (男)	A6 (女)
电压	支撑力					
3V	小	小	小	小	小	小
4V	较小	较小	较小	较小	较小	较小
5V	较小	较小	较小	刚好	较小	较小
6V	刚好	足够	刚好	足够	足够	足够
7V	足够	足够	足够	足够	足够	足够
8V	足够	足够	足够	足够	足够	足够
9V	足够	足够	足够	足够	足够	足够

由表 1 可知, 电压在 5V 以下, 指尖触摸触点时感受到的支撑力比较小, 在触摸过程中, 盲文触点会掉落, 不能较好地判断出盲文触点是否凸起; 当电压值调到 6V 时, 指尖触摸触点时感受到的支撑力已足够, 在触摸过程中, 盲文触点已不会掉落,

能够明显地判断出盲文触点是凸起的。当电压调到 7V 以上，在触摸过程中，指尖要施加较大的作用力，才能让盲文触点掉落，支撑力已过剩了。

从实验中得出，给电磁线圈施加 6V 电压是合适的，能够保证盲文触点的力性能。此外，在此实验过程中，我们也测试了盲文触点的响应速度，实验者均认为盲文触点能够快速的上下运动。

### 3.3 正确显示和触觉辨识盲文字符的实验

以 6V 电压作为工作电压，在保证有足够的指尖触摸支撑力下，测试分层电磁式盲文点显器的控制系统能否正确的显示出盲文字符；测试实验对象能否通过触觉正确地辨识出盲文字符。在分层电磁式盲文点显器显示出“床前明月光，疑是地上霜”的盲文字符后，如图 8 所示。实验者一边手指触摸盲文点显器的盲文触点，一边对照液晶屏幕上的盲文字符，判断盲文点显器的盲文触点凸起情况是否正确，记录实验者判断结果的数据。

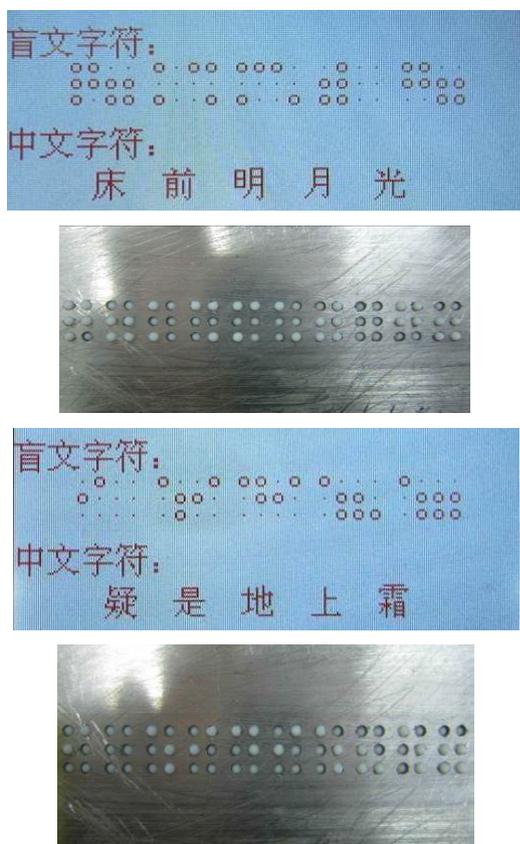


图 8 盲文字符的显示和触觉辨识实验

由图 8 可得，此盲文点显器能够正确的显示出“床前明月光，疑是地上霜”的盲文字符，表明其控制系统能够有效的的工作。此外，数据统计结果表明，实验对象能够触觉辨识出 66.7% 的盲文字符，正确率并不算高，主要原因在于：1) 实验对象均不认识盲文，缺少触觉辨识盲文字符的训练和经验积累；2) 受限于研制经费不足，此原型样机的制造比较粗劣，存在各个盲文触点凸起的高度不够一致的情况，影响了触觉辨别盲文的正确率。

下一步我们的主要工作是筹集资金，制造出高精度的样机，确保各个盲文触点能凸起在同一高度，并在盲人中开展测试实验，以验证其工作性能。

## 4 结论

在信息时代，盲文点显器能够满足广大盲人朋友的阅读需求，提高盲人知识水平。本文研发了一种分层电磁式盲文点显器的原型样机，介绍了其机械本体和控制系统，分析了盲文触点的力性能和运动性能，并开展了相关实验。在此原型样机基础上，进一步改进加工和装配工艺，提高盲文触点的运动精度，降低功耗，完善盲汉翻译程序，是很有望研发出体积小、成本低、刷新频率高和指尖触摸支撑力大的新型盲文点显器，供盲人指尖触觉阅读盲文。

另外，此盲文点显器的工作原理不仅可以实时生成适合于指尖触觉感知的作用力，而且能够通过电压值调节作用力大小，也能适用于虚拟现实触觉再现的其它应用领域。

### 参考文献:

- [1] 赵家良.“视觉 2020”行动与我国防盲治盲工作 [J]. 中华眼科杂志, 2002, 38(10): 577-579.
- [2] 朱延慧, 丁志辉. 美国盲人听觉阅读训练 [J]. 现代特殊教育, 2005, 10(1): 38-39.
- [3] 杨文珍, 许艳, 吴新丽, 等. 盲文显示装置的研究进展 [J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2015, 33(5): 660-668.
- [4] F Yeh, H Tsay, C Yang. Computer Aided Optimal Design and Dynamic Analysis of Piezoelectric Braille Display Cell [J]. Applied Mechanics and Materials (S1662-7482), 2014, 615(1): 309-312.

(下转第 2234 页)