

旋转式可刷新盲文显示装置的设计与评估^{*}陈大鹏^{1,2,3} 申连顺^{1,2} 李晨凯^{1,2} 倪浩君^{1,2} 刘 佳^{1,2,3}(1. 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2. 江苏省智能气象探测机器人工程研究中心 南京 210044;
3. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044)

摘 要: 当前,盲文书等传统盲教工具已难以满足盲人的数字化阅读需求,且已研发的可刷新盲文显示装置也还需要在体积、锁止力、能耗等方面被继续优化。为了帮助盲人或视障者便捷地进行数字化阅读,提出了一种低功耗、可刷新的盲文显示模块,并通过结合旋转结构,设计了一种可穿戴的旋转式可刷新盲文显示装置。首先,依据电磁驱动原理设计了一种盲文点致动器,该致动器可以依靠电磁特性,在无能耗情况下实现对凸起盲文点的锁止。接着,通过对盲文点致动器不同状态的受力分析和有限元分析,确定了满足设计需求的盲文点致动器关键参数。然后,装置的性能测试结果表明盲文点致动器的平均刷新频率为 19.3 Hz,平均锁止力为 166 mN,能够满足盲人触读需求。用户实验表明,盲人受试者使用可穿戴的旋转式可刷新盲文显示装置识别盲文的平均准确率达到 94.66%。因此,可穿戴的旋转式可刷新盲文显示装置为盲人提供了一种便捷的数字化盲文阅读方式。

关键词: 可刷新盲文显示装置;数字化阅读;可穿戴;旋转式;电磁力

中图分类号: TN7;TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design and evaluation of a rotating refreshable Braille display device

Chen Dapeng^{1,2,3} Shen Lianshun^{1,2} Li Chenkai^{1,2} Ni Haojun^{1,2} Liu Jia^{1,2,3}

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Jiangsu Province Engineering Research Center of Intelligent Meteorological Exploration Robot, Nanjing 210044, China;

3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Currently, traditional Braille teaching tools such as Braille books can hardly meet the digital reading needs of the blind or visually impaired (BVI), and the developed refreshable Braille displays (RBDs) still need to be further optimized in terms of volume, locking force, energy consumption and other aspects. To help BVI read digitally conveniently, a low-power Braille display module is proposed, and a wearable rotating RBD is designed by combining a rotating structure. Firstly, an electromagnetic actuator is designed based on the principle of electromagnetic drive. This actuator can rely on electromagnetic characteristics to lock the raised Braille dots without energy consumption. Then, through the force analysis and finite element analysis of the Braille dot actuator in different states, the key parameters of the Braille dot actuator that meet the design requirements are determined. The performance test results of the device show that the average refresh frequency of the Braille dot actuator is 19.3 Hz, and the average locking force is 166 mN, which can meet the needs of BVI for touch reading. User experiments show that the average accuracy of blind subjects in recognizing Braille with the wearable rotating RBD reaches 94.66%. Therefore, the wearable rotating RBD provides a convenient digital Braille reading method for BVI.

Keywords: refreshable Braille display; digital reading; wearable; rotation type; electromagnetic force

0 引 言

盲人或视障者(blind or visually impaired, BVI)是指视

力严重受损或完全丧失的人群。根据中国残联数据,我国视障群体约有 1 800 万^[1]。视力障碍给 BVI 的出行、学习和生活带来了极大挑战,尤其在教育方面,由于无法像视力

收稿日期:2025-10-11

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(62473200)、江苏省青年科技人才托举工程(JSTJ-2024-195)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJ CX25_0489)资助

正常者那样直接阅读和理解文字, BVI 的整体受教育水平较低^[2-3]。目前, BVI 主要通过动觉^[4]和皮肤触觉反馈^[5-6]在盲文书籍上进行阅读^[7]。然而, 盲文书籍普遍存在厚重、昂贵、数量有限、易损坏等问题^[8], 难以满足 BVI 日益增长的学习需求。

随着科技的不断进步, 盲文阅读正朝着数字化方向迅速发展。其中, 可动态呈现数字化信息的可刷新盲文显示器(refreshable Braille display, RBD)近年来受到了广泛的关注和研究。根据盲文载体是否移动以及手指是否固定的阅读条件, 现有 RBD 的盲文感知方式^[9]可以分为 4 种: 第 1 种是“Line display”, 即盲文载体固定, 用户通过在刷新好的盲文行上移动指尖来主动感知盲文字符; 第 2 种是“Clock display”, 在这种方式下, 盲文载体和手指均不动, 用户只能被动感知刷新好的盲文字符; 第 3 种是“Tape display”, 这种方式将 RBD 上呈现的盲文点按顺序从用户固定的指尖下滑过, 用户感知到的盲文字符随载体运动而变化; 最后一种是“Tactile mouse”, 手指和盲文载体同步运动, 用户通过触摸实时感知盲文字符的变化。这 4 种感知方式可满足 BVI 在不同应用场景下的盲文阅读需求。

纸质盲文书的阅读方式是“Line display”类型, 能为 BVI 提供连续且主动的盲文阅读体验。为了给 BVI 提供与在盲文书上阅读类似的感知体验, 许多研究已经开发了一行多方或多方阵列式的 RBD。例如, Chen 等^[10]提出一种基于分层电磁驱动机制的 RBD, 可实现盲文点的密集排列, 并提供超过 150 mN 的锁止力。Kim 等^[11]利用翻转式的锁止结构开发了一种全锁止式 RBD, 该装置实现了阵列化显示与无能耗保持, 满足锁止力需求。Chen 等^[12]采用电磁弹跳技术开发了一种新型的 RBD, 该装置主要通过电磁铁和永磁体的相互作用来实现盲文点的升降^[13]。

由于上述这些 RBD 的体积大、成本高, 研究者们也开发了通过“Clock display”方式进行感知的单方 RBD。例如, Zhou 等^[14]设计了一种基于电刺激的 RBD, 具有较高的灵活性和实时更新能力, 但存在适应性问题, 且长时间使用可能引起不适。Besse 等^[15]提出了一种基于形状记忆聚合物膜的 RBD, 尽管实现了可伸缩和锁定功能, 但其能耗较高。Qu 等^[16]设计了一种由摩擦电纳米发生器驱动的电弹性体 RBD, 但其制作工艺复杂且不符合标准盲文点尺寸。Bettelani 等^[17]开发的电磁式 RBD, 具备高刷新频率和稳定性, 但需持续供电, 功耗较高。Chen 等^[18]基于横梁结构设计了具备全锁止功能的 RBD, 刷新频率较高, 且仅需低电流即可切换盲文点状态^[19]。

按照“Clock display”方式设计的 RBD 虽然减小了装置的体积和成本, 但刷新一次感知一次的方式无法让 BVI 进行连续的盲文阅读。与“Clock display”方式不同, “Tape display”型 RBD 能够提供连续的盲文阅读体验, 避免了间歇性盲文刷新带来的不便。

现有的 RBD 普遍存在体积大、能耗高、刷新频率低等

问题, 这些问题在一定程度上限制了其在实际应用中的普及与使用。针对这些挑战, 本文基于电磁驱动原理设计了一种低成本的盲文点致动器, 既能确保信息准确传递, 又有效降低了功耗。在此基础上, 本文构建了一个结构紧凑、低功耗并具备锁止功能的盲文显示模块。为了进一步提高盲文阅读的连续性与用户体验, 本文结合盲文显示模块与旋转结构, 设计了一种小型、可穿戴^[20]的“Tape display”型旋转式 RBD。与传统 RBD 不同, 本文设计的旋转式结构不仅提供了更为连续的盲文阅读体验, 还具备小型化与便携性的特点, 满足了 BVI 群体在日常生活中的使用需求。

1 总体结构设计

1.1 可穿戴旋转式 RBD 的设计

为了给 BVI 提供连续且带有相对滑动的摸读体验, 还原用户阅读盲文书籍的使用感受, 本文设计了一种可穿戴旋转式 RBD。该装置主要由旋转结构、盲文显示模块以及指套外壳组成。图 1 为可穿戴旋转式 RBD 的整体结构, 其中旋转结构主要包括旋转轮、步进电机和导电滑环。旋转轮上设有电机轴承固定孔、出线口和盲文显示模块固定槽。为了防止导线随旋转轮转动而发生缠绕, 本设计在旋转轮外部增设了导电滑环, 从而实现外部导线保持静止, 内部导线随旋转轮同步转动, 有效避免了导线缠绕问题。

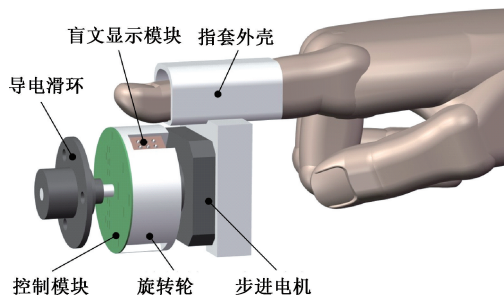


图 1 可穿戴旋转式 RBD 的结构

Fig. 1 Structural of the wearable rotating RBD

可穿戴旋转式 RBD 通过控制电机带动旋转结构转动, 进而驱动盲文显示模块运动, 将实时刷新的盲文信息传递至用户的指腹下。具体过程如下: 系统通过盲文翻译算法将输入的文本信息转换为盲文字符。通过控制程序将翻译后的盲文字符刷新并显示在盲文显示模块上。盲文显示模块刷新完成后, 旋转机构将盲文显示模块精确传送至盲文显示区域。BVI 通过触摸装置表面的盲文显示区域, 感知实时更新的盲文信息, 实现对盲文书阅读过程和感受的模拟。盲文显示模块经过盲文显示区域后, 通过控制程序自动复位, 为下一次盲文刷新做好准备, 整个过程不断循环, 可以为 BVI 提供连续地阅读体验。

1.2 RBD 的设计

1) 结构设计

盲文字符由 6 个或 8 个点组成, 通常排列成 2 列 3 行

(6 点盲文)或 2 列 4 行(8 点盲文)矩阵,每个点可以是凸起或平坦的。通过不同的点组合,盲文可以表示字母、数字、标点符号等。为了帮助 BVI 更好的数字化阅读,本文参照中国盲文标准(GB/T 15720-2008)技术参数(如表 1 所示)设计了一种电磁驱动的小型化 RBD,RBD 主要由盲文显示模块和控制模块组成。

表 1 国家盲文标准技术参数

Table 1 Technical parameters of Chinese Braille standard

设计参数	参考值
点径	1.0~1.6 mm
点距	2.2~2.8 mm
点位移	0.2~0.5 mm
刷新频率	>10 Hz(单行),>1 Hz(多行)
锁止力	>100 mN
工作电压	<12 V

盲文显示模块结构如图 2 所示,从上到下依次为上层框架、致动器、支撑底座。上层框架上设有通孔。致动器包括电磁铁、树脂薄片、探针、永磁体。支撑底座上设有圆形凹槽和导线出线口。上层框架、树脂薄片和支撑底座均由树脂经 3D 打印制成。

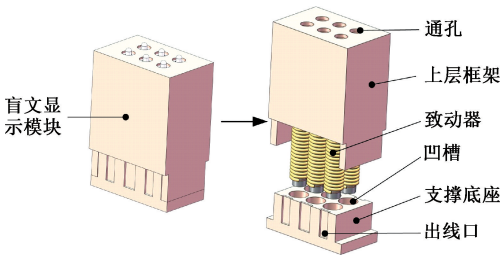


图 2 盲文显示模块结构

Fig. 2 The structural of the Braille display module

2) 盲文点致动器的设计和致动机制

盲文点的凸起与回落状态由致动器控制,致动器在整个 RBD 中起着关键作用,其性能在很大程度上决定了装置的整体性能。本文基于电磁原理设计了一款盲文点致动器,如图 3 所示,该致动器由电磁铁、树脂薄片、探针和永磁体组成。电磁铁由铁芯和线圈构成,铁芯为环形柱体,外径为 2 mm,内径为 1.05 mm,高度为 10 mm,材质为电工纯铁(DT4C)。线圈采用直径为 0.1 mm 的铜漆包线绕制于铁芯的外表面,根据实际需求,绕制了 3 层,大约 300 匝。探针采用直径为 1 mm 的 ABS 棒。由于盲文显示模块上层框架的厚度(0.7 mm),探针的最大上升高度为 1.2 mm,则实际凸起高度为 0.5 mm。永磁体为钕铁硼 N35 材质的圆柱体,直径为 2 mm,高度为 0.5 mm。树脂薄片的外径为 2 mm,内径为 1.05 mm。探针底部与树脂薄片及永磁体牢固连接,置于铁芯内部。致动器通过电磁铁产生的电磁力与永磁体磁力的相互作用驱动探针上下运动,并利用

磁力实现凸起探针的锁止。

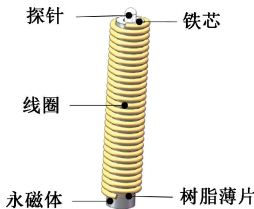


图 3 盲文点致动器

Fig. 3 The Braille dot actuator

3) 致动器有限元分析

盲文点致动器的运动性能主要受电磁铁与永磁体之间电磁特性的影响。在确定装置的整体结构后,对致动器进行了有限元分析^[21],旨在获取满足设计要求的致动器关键参数。

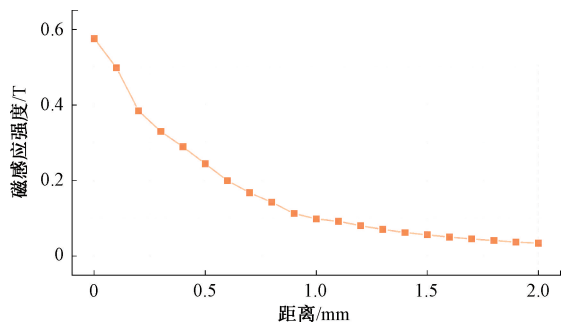
由于永磁体与铁芯之间存在较强的固有吸引力,如何通过向电磁铁施加适当大小的反向电流以产生足够的反向电磁力来有效抵消二者之间的吸引力,是需要重点解决的问题。当永磁体与铁芯吸附在一起时,二者之间的磁力为^[10,12,22]:

$$F_m = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \tag{1}$$

其中, F_m 为永磁体与铁芯之间的磁力; B 为气隙磁感应强度; S 为永磁体与电磁铁铁芯的有效接触面积, $S = 2.28 \times 10^{-6} \text{ m}^2$; μ_0 为真空磁导率,是一个物理常数,其值为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

在计算永磁体与铁芯之间的磁力之前,需要先获得永磁体表面的气隙磁感应强度 B 。根据中国烧结钕铁硼磁铁材料的标准(GB/T 13560-2017),可得 NdFe35 的剩余磁感应强度 B_r 为 1.2 T。在实际计算中,由于磁路中存在漏磁、磁阻等因素, B 一般小于 B_r , 通常在 0.3~0.8 T, 无法直接用于工程计算。本文选用 Ansys Maxwell 电磁仿真软件构建盲文点致动器的电磁模型,并精确设定各项材料参数、几何尺寸以及激励条件。本文沿铁芯轴线方向分析了铁芯下表面与永磁体上表面在不同间距下的 B 值,如图 4 所示。图 4 的结果表明,永磁体与铁芯的间距为 0.1 mm 时, B 大约为 0.49 T, 此时二者之间的磁力约为 217 mN。考虑到实际与仿真存在一定的误差,同时为了降低能耗,将树脂薄片的厚度确定为 0.1 mm。进一步可以确定在未通电流时永磁体与铁芯吸附在一起时的磁力约为 217 mN。

为了确保盲文点能够正常复位,需要得到一个能在电磁铁和永磁体之间达到力平衡的磁动势阈值。电磁铁通入反向电流时,产生的磁场方向与永磁体相反。若电磁铁的磁场恰好能与永磁体的磁场相互抵消,使得两者之间的总磁场强度为零,则永磁体与电磁铁之间的磁吸引力随之消除。在已确定线圈匝数的情况下,可根据实际情况执行相关仿真,得到反向作用力与反向电流大小关系,如图 5 所

图 4 铁芯与永磁体在不同轴向间距下的 B 值Fig. 4 The B values of iron core and permanent magnet at different axial spacings

示。当通入电流为 1.2 A 且磁动势为 360 安匝时,产生的反向作用力为 2.16 mN,足以驱动永磁体下落。考虑到实际情况与仿真之间可能存在一定的误差,将磁动势增加至 390 安匝,即通入线圈的电流为 1.3 A。

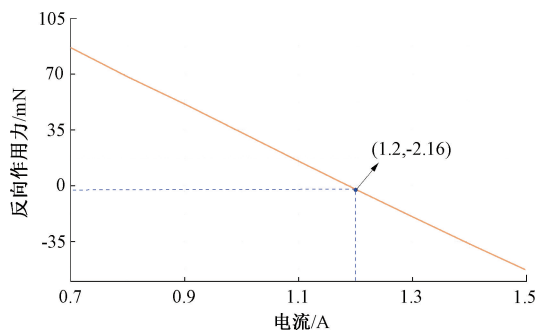


图 5 反向作用力与反向电流的关系

Fig. 5 The relationship between reverse force and reverse current

为了验证通入 1.3 A 反向电流的可行性,通过仿真分析得到电磁铁与永磁体的磁场分布情况,如图 6 所示。同时,得到铁芯底部中点的磁感应强度随气隙长度变化的仿真结果,如图 7 所示。在永磁体与铁芯底部吸合时,由于存

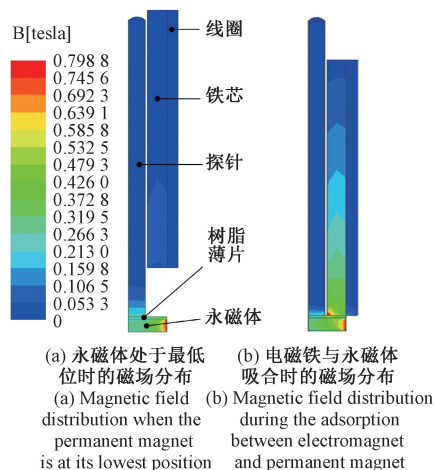


图 6 电磁铁与永磁体的磁场分布情况

Fig. 6 Magnetic field distribution of electromagnet and permanent magnet

在树脂薄片,选取气隙长度为 0.1 mm 时的磁感应强度 0.51 T 作为通入反向电流时的 B 值,代入式(1),可得此时的电磁力为 236 mN。由此可求得此处的反向作用力约为 19 mN,与通入 1.3 A 反向电流仿真得到的结果基本一致。

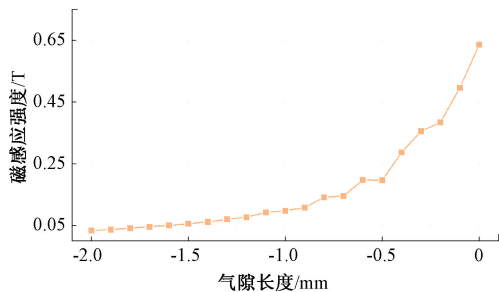


图 7 铁芯底部中点磁感应强度与气隙长度的关系

Fig. 7 The relationship between the magnetic flux density at the midpoint of the iron core bottom and the air gap length

永磁铁位于最低位时,永磁体与电磁铁之间的距离为 2 mm。由图 6(a)可知,永磁体的磁场分布情况受铁芯的影响很小。因此,借助等效电流模型,并结合安培环路定理与毕奥—萨伐尔定律^[23-24],可对永磁体的空间磁场分布展开分析。以圆柱形永磁体底面圆心作为坐标原点,构建空间笛卡尔直角坐标系,进而能够求得半径为 r 、高度为 h 的圆柱形永磁体中心轴线上,距离坐标原点 z 处的磁感应强度为^[25-26]:

$$B_z = \frac{\mu_0 M}{2} \left(\frac{z+h}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} - \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right) = \frac{B_r}{2} \left(\frac{z+h}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} - \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right) \quad (2)$$

其中, M 为磁化强度; B_r 为剩余磁感应强度。

当 z 为 2 mm 时,将各个参数代入式(2),可以得到 B_z 为 0.012 T。代入式(1)可得永磁铁位于低位时的磁力 F_m 为 0.1 mN。由于永磁体、ABS 棒、树脂薄片三者的总重力约为 0.2 mN,且周围存在摩擦等因素,在低位未通入电流时,永磁体不能克服周围摩擦力以及三者总重力,故永磁体处于静止状态。

当永磁体处于最低位时,向电磁铁通入正向电流,此时,电磁铁与永磁体之间的电磁吸引力为 F_{mag_low} :

$$F_{mag_low} = \frac{B_0^2 S}{2\mu_0} \quad (3)$$

$$B_0 = \frac{NI}{R\delta}\mu_0 = \frac{NI}{\delta}\mu_0 \quad (4)$$

$$F_{mag_low} = \frac{(NI)^2 \mu_0}{2\delta^2} S \quad (5)$$

其中, N 为线圈匝数,表示电磁铁上缠绕的导线圈数; U 为输入电压; R 为线圈电阻; I 为输入电流; δ 为气隙长度,表示电磁铁铁芯与永磁体之间的间隙; B_0 为气隙中的磁感应强度。

考虑到在实际情况中存在磁通泄漏的情况,需对上述

的式(5)进行适当变形:

$$F_{mag_low} = \frac{(NI)^2 \mu_0}{2\delta^2 K_f^2} S$$

(6)

其中, K_f 是漏磁系数, K_f 取值取决于实际的电磁机理和工程经验^[10]。在本研究中 K_f 取值 1.5。将已知的各个参数代入式(6)中, 可得电磁铁通入正向电流时, 所能产生的电磁力 F_{mag_low} 约为 24 mN。相比于电磁力, 电磁铁与永磁体之间存在的摩擦力可忽略不计。因此, 永磁体可以被吸起, 并带动探针升起。

综上所述, 铁芯与永磁体之间的磁力所能提供的锁止力约为 217 mN。为了验证计算结果是否合理, 以及二者之间的锁止力能否达到设计需求, 通过仿真得永磁体运动过程中的受力变化曲线, 如图 8 所示。

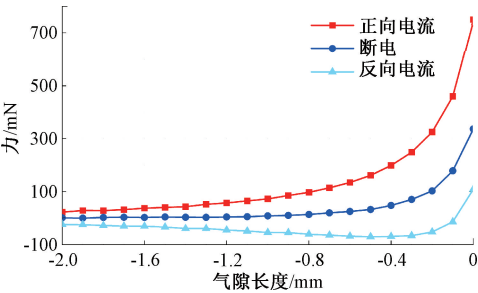


图 8 永磁体运动过程中的受力变化

Fig. 8 Force changes during the motion of the permanent magnet

根据仿真结果可以看出, 在断电的情况下, 永磁体与铁芯的距离为 0.1 mm 时的磁力约为 175 mN, 具体的锁止力大小需要通过实际测量得知。

2 装置性能测试

根据确定的设计参数, 本文制造了 RBD 的原型机, 如图 9 所示, 旋转式 RBD 整体质量约为 206.8 g, 满足人手指端持握与精细操控的人体工学负荷要求。本文通过一系列的性能测试来检验 RBD 在实际使用中的性能表现, 主要包括锁止力测试、刷新频率测试、稳定性测试以及功耗和发热情况。

2.1 锁止力测量

相关研究表明^[8], 盲文点锁止力一般大于 100 mN 时才能确保盲文信息的正确感知, 并具有良好的指尖触感。为了调查盲文点致动器的锁止力是否符合设计要求, 本文组装了完整的盲文显示模块, 并对盲文点致动器的锁止力进行测量。实验使用 IMADA 公司的 ZTS-50N 型测力计, 并利用与测力计配套的 Force Recorder Professional 软件进行数据展示和记录。首先, 将测力计固定在可调高度的测试台上, 如图 10 所示。然后, 将测力计探头放置在凸起盲文点的上方, 逐渐增加施加的力, 直到盲文点下落。通过测力计读取测量过程中施加的最大力(即锁止力)。重复测量 10 组的测量数据如表 2 所示, 可计算出盲文点致动器的

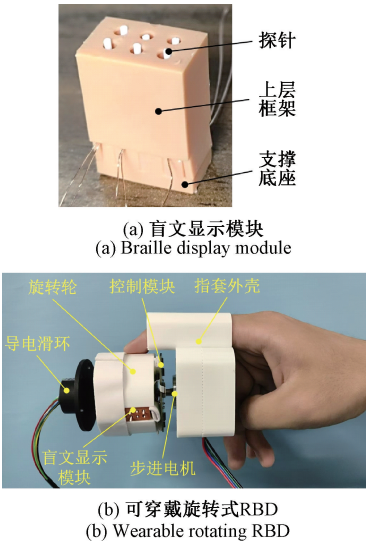


图 9 RBD 的原型机

Fig. 9 The prototype of the RBD

平均锁止力为 166 mN。虽然测量结果与计算和仿真得出的数据存在一定的差异, 但仍能满足锁止力大于 100 mN 的设计要求, 差异的产生主要是由于材料和工艺差异、测量设备的微小误差以及仿真模型中简化假设未能完全考虑实际因素所导致的。

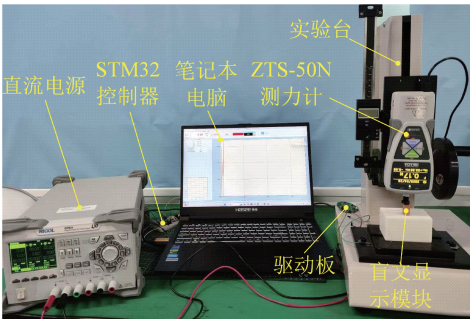


图 10 致动器性能测试的实验场景

Fig. 10 Experimental scenario for actuator performance testing

表 2 盲文点致动器锁止力测试结果

Table 2 Braille dot actuator locking force test results

mN			
序号	锁止力	序号	锁止力
1	170	6	170
2	170	7	160
3	170	8	170
4	160	9	160
5	160	10	170

2.2 刷新频率测量

为了满足视障用户阅读盲文实时性和舒适性, RBD 中致动器的刷新频率至少应达到 10 Hz, 以确保盲文信息传达的流畅性^[8]。为此, 使用图 10 中的实验设备继续测量盲

文点致动器的刷新频率。在测试时,将测力计顶端面置于盲文点的顶部,结合 Force Recorder Professional 软件记录盲文点致动器在一个完整周期内从弹跳状态到复位状态所需的时间,并将采样频率设定为 1 kHz,以确保采样数据的准确性和实时性。

通过多次测试得到了 6 个盲文点致动器的从弹跳状态到复位状态所需的平均时间,如表 3 所示。从表中的数据可以看出,盲文点致动器的平均刷新频率约为 19.3 Hz,高于 10 Hz 的设计要求,说明提出的 RBD 在刷新频率方面具有良好的性能。

表 3 致动器刷新频率的测试结果

Table 3 Test results for the refresh rate of actuator

序列号	周期/ms	刷新频率/Hz
1	54	18.5
2	51	19.6
3	53	18.7
4	50	20.0
5	51	19.6
6	51	19.6

2.3 功耗与发热

由于采用锁止式驱动控制策略,电磁铁仅在盲文点状态翻转时短时通电,而状态保持无需持续供能,实际实验过程中,致动器的通电时间为 5 ms。因此,根据 $Q = I^2RT$ 可以得出单次翻转所需能量为 0.041 J。在实际使用过程中,每个致动器在一个旋转周期内最多通电 2 次,且每个周期的时长 >1 s,因此,实验过程中将致动器以 500 ms 时间间隔周期性刷新盲文点状态。在连续 100 轮循环后,对线圈温升进行测试,电磁铁无明显发热。该现象表明在正常工作条件下,盲文点刷新过程的平均功耗较低,线圈热负荷不显著,能够满足连续运行及触觉安全性的要求。

2.4 稳定性

为了保障装置工作的稳定性,对装置的单点刷新和多点刷新分别做了测试,具体分为随机单点刷新、相邻两点分步刷新和同步刷新、对角两点分步刷新和同步刷新。每种方案都做了 30 次重复测试,并记录能完整达到预期效果的次数,实验结果如表 4 所示。

表 4 稳定性测试结果

Table 4 Stability test results

类别	方式	刷新准确率/%
单点	分步/同步	100.0
相邻两点	分步刷新	100.0
	同步刷新	93.3
对角两点	分步刷新	100.0
	同步刷新	96.7

根据实验结果可以看出,分步刷新在 3 种实验中的结果都比较好;在两点同步刷新中,相邻两点和对角两点的刷新准确率都能达到 93% 以上。为确保盲文信息再现的准确性,本文装置在后续测试和用户实验中均采用单点分步刷新的方式执行实验。

本节通过测试电机转动过程中各盲文显示模块对字符的显示准确性,验证装置在动态运行下显示盲文字符的稳定性。实验选取了图 11 所示的多个字符(盲文点排列方式彼此不同)作为测试对象。实验中,将 RBD 原型机水平放置于平坦的桌面上,以确保装置在无外部干扰的稳定环境中运行,电机转速设置为恒定的 20 rpm。在装置启动并进入稳定运行状态后,测试人员对测试字符进行连续的刷新测试,并记录每次显示内容是否与预设字符一致。每组字符共进行 20 次重复测试,以提高实验结果的可靠性,并观察是否存在盲文点无法完全弹出、显示滞后或错位等异常现象。

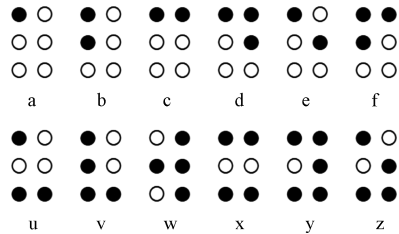


图 11 装置稳定性测试对应的盲文字符
Fig. 11 Braille corresponding to device stability testing

实验结束后,根据统计结果,所有盲文显示模块在每次测试中均能准确显示预设字符,字符刷新准确率达到 100%。这一结果表明,所设计的盲文显示装置在电机转动过程中表现出良好的字符刷新一致性与显示稳定性,具备在动态运行环境中稳定输出盲文信息的能力,适用于移动场景下的盲文信息传递需求。

为了全面评估装置的综合性能,本文在感知方式、锁止力、刷新频率、工作电压及可拓展性等关键指标方面将提出的 RBD 与已有的代表性成果进行了对比,如表 5 所示。与传统的 Clock 型和 Line 型 RBD 相比,本文装置在能耗、锁止力、刷新频率和可拓展性等方面实现了良好的性能平衡。

3 用户实验

为了检验所设计装置阅读盲文的效果,本文共邀请了 10 名视力受损的受试者参与实验,其中有 6 名先天性失明,另外 4 名均在 10 岁后失明。10 名受试者中包括 4 名女性,8 名受试者的年龄介于 18~35 岁,2 名受试者年龄大于 45 岁。所有受试者均具有良好的盲文阅读经验。没有受试者报告其触觉感知能力有任何缺陷,并且他们不知道该研究的目的。在实验过程中,保持环境安静,且没有任何关于阅读信息的提示。

表 5 与已有 RBDs 的性能对比

Table 5 Performance comparison with existing RBDs

相关研究	感知方式	显示内容	锁止力/mN	刷新频率/Hz	工作电压/V	工作状态	可拓展性
文献[27]	Clock	盲文	160	>10.00	6.0	持续通电	不支持
文献[18]	Clock	盲文	>5 000	17.10	6.0	断电后锁止	不支持
文献[28]	Line	盲文	>1 000	5.71	9.0	断电后锁止	不支持
文献[12]	Line	盲文/触觉图形	>5 000	16.00	6.6	断电后锁止	支持
本文装置	Tape	盲文	166	19.30	6.0	断电后锁止	支持

3.1 电机最佳转速实验

BVI 用户在识别纸质盲文书籍中的盲文字符时,平均阅读速度约为 116 字/min^[12]。当采用旋转式 RBD 进行阅读时,由于旋转轮每转一圈可呈现 3 个字符,为匹配上述阅读速率,旋转轮转速约为 39 rpm。在此基础上,为进一步探究不同转速对盲文识别效果的影响,本实验设计了多档转速条件,将电机转速依次设定为 30~40 rpm,以 1 rpm 为步长,共计 11 个转速档位。

在实验准备阶段,首先向受试者介绍提出的 RBD 的组成和功能,并说明实验的整体流程。为获得准确的实验结果,每位受试者都将接受 20~30 min 的培训,以确保在正式实验过程中能够熟练、准确地使用该设备进行盲文阅读。

实验过程中,每位受试者需在每个转速条件下进行盲文识别测试。测试内容为由数字 0~9 构成的 10 位随机排列的盲文字符。受试者通过手指接触旋转轮上的盲文,逐一阅读所识别的字符信息。为确保实验的客观性与可重复性,每种转速下的测试均独立进行,且数字的排序是随机的。

实验人员在每轮测试过程中记录受试者所识别出的盲文字符与给定字符的匹配情况,计算识别准确率。通过对比不同转速下的识别准确率变化,可评估旋转速度对盲文识别效率与准确性的影响。

实验结束后,统计实验得到的相关测试数据,得到转速与平均识别准确率的关系,如表 6 所示。可以看出,电机转速在 35~40 rpm 时,随着转速的升高,盲文字符的平均识别准确率大致呈下降趋势。当电机转速为 40 rpm 时,盲文字符的平均识别准确率最低,约为 85.6%。电机转速在 30~35 rpm 的平均识别准确率趋于稳定,约为 96.5%,但阅读时间随转速的降低而不断增加。考虑到实际阅读效率,后续用户实验的电机转速均设置为 35 rpm。

3.2 盲文阅读对比实验

为比较传统盲文书与提出的 RBD 在阅读效率和识别准确性方面的差异,本节执行了盲文阅读对比实验。实验包括两部分:一为受试者通过纸质盲文书阅读盲文,二为受试者使用旋转式 RBD 进行盲文阅读。

1)受试者通过纸质盲文书阅读盲文

本实验使用盲文纸制作了两份盲文阅读材料。每份

表 6 最佳转速实验结果

Table 6 Experimental results of the best rotational speed

转速/rpm	时间/s	平均准确率/%
30	72.0	96.7
31	69.7	97.1
32	67.5	96.3
33	65.5	96.7
34	63.5	95.8
35	61.7	96.3
36	60.0	95.0
37	58.4	93.8
38	56.8	91.0
39	55.4	89.5
40	54.0	85.6

材料上的盲文字符均由一个由 70 个汉字组成的有意义句子翻译而来,两份材料的文本内容彼此不同。所有盲文字符均严格遵循盲文规范,以确保每份阅读材料具有良好的可读性和准确性。制作完成的盲文阅读材料被平整放置在桌面上。在受试者完成准备之后,实验人员开始计时。受试者按照图 12(a)所示的实验情境,使用其惯常的阅读方式依次阅读两份材料。阅读完成后,实验员将受试者口述复述的阅读内容与标准答案逐字比较,计算盲文识别的正确率,并记录所用时间。

2)受试者通过 RBD 阅读盲文

在本实验中,每位受试者都需要使用旋转 RBD 连续阅读两条不同的盲文句子。每条盲文句子都由一个包含 70 个汉字的有意义句子翻译而来,但其内容与纸质盲文阅读中读取的内容完全不同。在受试者准备好后,他们根据图 12(b)所示的实验场景读取盲文字符。当受试者完成所有盲文字符的阅读后,实验人员将计算他们的盲文识别准确率以及阅读所花费的时间。

应注意,通过两种方式由受试者阅读的 4 个句子的含义都很简单,不会给受试者的理解带来困难。按照相同步骤重复上述实验过程 3 次,取 3 组数据的平均值作为最终结果,结果如图 13 所示。结果显示,通过纸质盲文书阅读盲文的平均准确率约为 96.51%,使用可穿戴旋转式 RBD 阅读盲文的平均识别准确率约为 94.66%。在阅读时间方

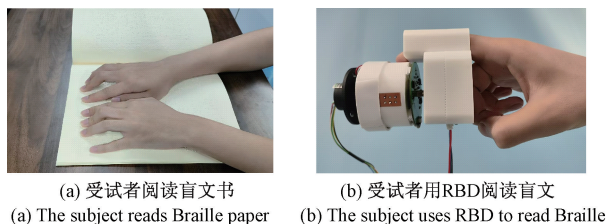


图 12 实验场景

Fig. 12 Experimental scenarios

面,阅读纸质盲文材料的平均阅读时间较短,大致在 39.48 s,而使用旋转式 RBD 的平均阅读时间比纸质阅读的平均时间长,大约为 79.91 s。可以看出,两种方式在阅读时间上存在显著差异。

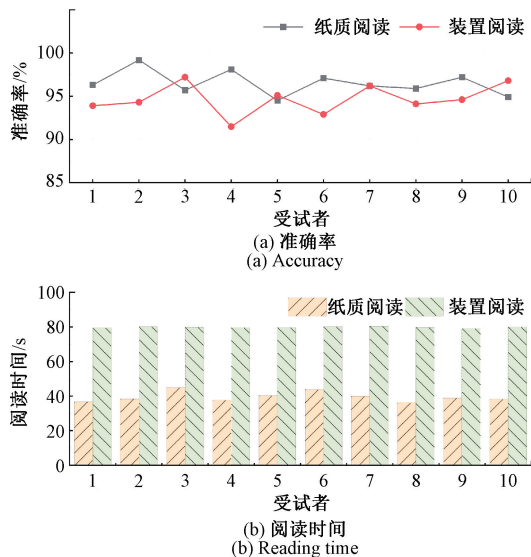


图 13 对比实验结果

Fig. 13 Compare the results of the experiment

为了比较两种阅读方式在识别准确率上的差异,本文使用 SPSS 27.0 软件对统计数据进行了分析。正态性检验结果显示,两种阅读方式的识别准确率数据均符合正态分布。因此,使用配对样本 T 检验来研究数据之间的差异,显著性水平设定为 0.05。结果显示,使用纸质材料阅读盲文与使用旋转式 RBD 阅读盲文的识别准确率无显著差异($p=0.07$)。结果表明,在使用纸质材料阅读盲文与旋转式 RBD 阅读盲文时,它们在盲文识别准确率方面表现出相似的效果。

3.3 讨 论

本节通过两个实验检验了所设计的可穿戴旋转式 RBD 在盲文数字化阅读中的可用性与有效性。在实验一中,本文主要探讨了不同电机转速对盲文识别效果的影响。通过对不同转速下的阅读表现进行详细分析,本文最终确定了最佳电机转速为 35 rpm。在实验二中,本文进一步评估了旋转式 RBD 在盲文阅读中的实际应用效果,以纸质盲文书与旋转式 RBD 为主体,进行阅读时间与识别

准确率的对比实验,从而分析了不同方式的性能差异。从准确率的分析结果来看,BVI 利用旋转式 RBD 阅读文本信息,取得了与纸质盲文阅读相似的结果。在阅读时间方面,两种阅读方式存在差异,主要是由于旋转式 RBD 上两个盲文方之间的间距较大,并且需要匹配单方盲文在指间的滑动速度,导致其阅读速度受限于旋转轮的旋转速度。

实验结束后,通过访谈方式让受试者对提出的 RBD 进行评估。部分受试者表示,装置与纸质盲文书的阅读体验差异不大,能够正确理解阅读的内容。然而,也有受试者指出,尽管装置的盲文点具备一定的触觉反馈能力,但其触感清晰度不及纸质盲文,尤其在长时间阅读中更易产生模糊感。尽管存在局限,大多数受试者在体验后对该装置表现出浓厚兴趣,认可其在盲文数字化阅读方面的应用潜力。

通过旋转结构与可穿戴设计的结合,提出的 RBD 有效解决了传统电磁式 RBD 在便携性和功耗等方面的固有问題。提出的 RBD 设备质量仅为 206.8 g,轻量化设计不仅实现了设备小型化,还显著提升了 BVI 用户在日常穿戴和长期使用中的舒适度。在核心性能上,旋转式动态刷新机制是保障 BVI 用户实现流畅阅读的关键,减少了盲文显示模块的数量,并通过结合盲文点致动器的高刷新频率以及旋转结构的转动,确保了盲文信息的连续动态呈现,消除了传统设备因间歇性刷新带来的感知中断。更为重要的是,在实现高频率刷新的同时,单次刷新能耗约为 0.041 J,且盲文点致动器具有锁止功能,可以在无刷新时保持盲文点的静止状态,进一步降低能耗。该设计在能效上超越了传统方案,显著提升了设备的实用性。

4 结 论

为了帮助 BVI 进行高效的数字化盲文阅读,并针对已有 RBD 在刷新速度、锁止力等方面存在的技术困难,本文基于电磁驱动原理设计了一种可穿戴旋转式 RBD。为了能够给盲文点提供较大的锁止力,同时降低功耗,设计了一种盲文点致动器。该致动器可以依靠电磁特性,在无能耗的情况下实现盲文点凸起的锁止。所设计的盲文显示模块具有体积小、刷新频率高、锁止力大等特点。为了能够给 BVI 提供连续的滑动触感,设计了旋转结构,将其与盲文显示模块结合,完成可穿戴旋转式 RBD 的设计。通过实验验证,本文所设计的装置满足 RBD 的设计要求。用户实验和主观感知评价结果表明,本文开发的可穿戴旋转式 RBD 能帮助 BVI 高效地进行数字化盲文阅读。

鉴于不同 BVI 用户在指尖触觉敏感度、阅读滑动速度及盲文阅读习惯等方面存在差异,当前设计的 RBD 在适配性与个性化方面尚显不足。未来可结合机器学习算法,依据用户的触觉特性与使用习惯,动态优化刷新频率、旋转速度等参数,从而提升个性化的触读体验。

参考文献

- [1] 王新, 谷亚东. 基于双目立体视觉的盲人避障技术研究[J]. 电子测量技术, 2025, 48(7): 98-106.
WANG X, GU Y D. Research on obstacle avoidance technology for blindbased on binocular stereo vision[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(7): 98-106.
- [2] 陈大鹏, 丁益, 娄隽铖, 等. 数据驱动的纹理摩擦建模与触觉渲染方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(5): 339-351.
CHEN D P, DING Y, LOU J CH, et al. Research on data-driven texture friction modeling and tactile rendering method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(5): 339-351.
- [3] CHEN D P, DING Y, WU H, et al. Visually impaired people learning virtual textures through multimodal feedback combining vibrotactile and voice [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2025, 33: 453-465.
- [4] PINZON D, VEGA R, SANCHEZ Y P, et al. Skill learning from kinesthetic feedback[J]. The American Journal of Surgery, 2017, 214(4): 721-725.
- [5] OZIOKO O, KARIPOTH P, HERSH M, et al. Wearable assistive tactile communication interface based on integrated touch sensors and actuators[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2020, 28(6): 1344-1352.
- [6] 童天宏, 梁冬泰, 谢林涛. 基于触觉感知的新型视触觉传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(2): 185-192.
TONG T H, LIANG D T, XIE L T. Design of a new visual and tactile sensor based on tactile perception[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(2): 185-192.
- [7] CHEN D P, LIU J, TIAN L, et al. Research on the method of displaying the contour features of image to the visually impaired on the touch screen[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2021, 29: 2260-2270.
- [8] YANG W ZH, HUANG J P, WANG R R, et al. A survey on tactile displays for visually impaired people[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2021, 14(4): 712-721.
- [9] RUSSOMANNO A, O'MODHRAIN S, GILLESPIE R B, et al. Refreshing refreshable Braille displays[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2015, 8(3): 287-297.
- [10] CHEN H, TAO W T, LIU CH, et al. A novel refreshable Braille display based on the layered electromagnetic driving mechanism of Braille dots[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2023, 16(1): 96-105.
- [11] KIM J, HAN B K, PYO D, et al. Braille display for portable device using flip-latch structured electromagnetic actuator[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2020, 13(1): 59-65.
- [12] CHEN D P, ZHANG S, SHEN L SH, et al. Design and evaluation of an electromagnetic bounce-type refreshable braille display[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2025, 33: 705-716.
- [13] 陆熊, 孙东, 鄢昱星, 等. 基于电磁力控制的非接触式二维力触觉再现系统[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 174-180.
LU X, SUN D, YAN Y X, et al. Non-contact two-dimensional haptic rendering system based on electromagnetic force control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 174-180.
- [14] ZHOU Z L, YANG Y CH, LIU H H. A Braille reading system based on electrotactile display with flexible electrode array [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(4): 735-737.
- [15] BESSE N, ROSSET S, ZARATE J J, et al. Understanding graphics on a scalable latching assistive haptic display using a shape memory polymer membrane[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2018, 11(1): 30-38.
- [16] QU X CH, MA X, SHI B J, et al. Refreshable Braille display system based on triboelectric nanogenerator and dielectric elastomer [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(5): 2006612.
- [17] BETTELANI G C, AVERTA G, CATALANO M G, et al. Design and validation of the readable device: A single-cell electromagnetic refreshable Braille display[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2020, 13(1): 239-245.
- [18] CHEN D P, ZHANG Y J, HU X H, et al. Development and evaluation of refreshable braille display and active touch-reading system for digital reading of the visually impaired [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2024, 32: 934-945.
- [19] 陈大鹏, 高亚洲, 宋爱国, 等. 基于触摸屏交互的指套式盲文再现系统[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 199-208.
CHEN D P, GAO Y ZH, SONG AI G, et al. Fingertip Braille display system based on touch screen interaction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 199-208.
- [20] 莫依婷, 宋爱国, 秦欢欢. 指端可穿戴式力触觉交互装置设计与评估[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 161-168.

- MO Y T, SONG AI G, QIN H H. Design and evaluation of a wearable fingertip haptic interaction device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 161-168.
- [21] 张苏嘉, 苏益凡, 周伟, 等. 碳纤维拉索缺陷的电磁层析成像有限元仿真[J]. 电子测量技术, 2024, 47(8): 86-92.
- ZHANG S J, SU Y F, ZHOU W, et al. Finite element simulation of electromagnetic tomography for defects in carbon fiber cables [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(8): 86-92.
- [22] 钱煌, 陆熊, 张坤榕, 等. 面向电磁式力触觉再现的三维电磁作用力测量系统[J]. 电子测量技术, 2019, 42(1): 45-48.
- QIAN H, LU X, ZHANG SH R, et al. Three-dimensional electromagnetic force measurement system for electromagnetic haptic rendering [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(1): 45-48.
- [23] DRORY A. Motivating the Biot-Savart law[J]. The Physics Teacher, 2023, 61(5): 368-370.
- [24] KWON M, JUNG J, JANG T, et al. Magnetic forces between a magnet and a solenoid[J]. The Physics Teacher, 2020, 58(5): 330-334.
- [25] ZHANG Y Y, LENG Y G, ZHANG H, et al. Comparative study on equivalent models calculating magnetic force between permanent magnets [J]. Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment, 2020, 1(1): 43-65.
- [26] ZHANG Y Y, LENG Y G, LIU J J, et al. Comparison of magnetic force calculation on permanent magnets with models of equivalent magnetic charge and magnetizing current[J]. Journal of Magnetism, 2019, 24(3): 392-401.
- [27] SAIKOT M M H, SANIM K R I. Refreshable braille display with adjustable cell size for learners with different tactile sensitivity[J]. IEEE Transactions on Haptics, 2022, 15(3): 582-591.
- [28] LEONARDIS D, LOCONSOLE C, FRISOLI A. A passive and scalable magnetic mechanism for braille cursor, an innovative refreshable braille display[J]. Meccanica, 2020, 55: 1639-1653.

作者简介

陈大鹏, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为力触觉人机交互、盲人数字化教育。

E-mail: dpchen@nuist.edu.cn

刘佳(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能机器人、虚拟/增强现实。

E-mail: liujia@nuist.edu.cn