

新一代中文阅读视力检查仪的设计升级研究

邵 奇, 邱飞岳, 黄 愉

(浙江工业大学 教育科学与技术学院, 杭州 310023)

摘要: 中文阅读视力检查仪是专门为汉语阅读背景人群设计和开发的视功能检查工具, 原版检查仪存在屏幕亮度无法自适应调节、屏幕高度不能始终与患者视线高度持平、对应的小程序功能较为单一等问题; 针对以上问题, 采用定制的段式液晶显示屏、蓝牙 4.2 解决方案、单片机主控模块, 依托 Android Studio 程序开发平台, 设计和开发了新一代中文阅读视力检查仪及其上位控制 APP; 新版检查仪在原有基础上, 增加了通过 APP 连接蓝牙控制丝杆滑台调节屏幕位置和自动调节阅读视力检查仪屏幕亮度的功能, 进一步完善了仪器的软硬件设计; 实验结果表明, 检查仪具有良好的适配性, 满足了为不同年龄段低视力患者的诊断和康复提供技术支持的需求。

关键词: 阅读视力检查表; 蓝牙通信模块; APP 开发

Upgraded Design Research of a New—Version Chinese Reading Acuity Test Instrument

Shao Qi, Qiu Feiyue, Huang Yu

(College of Education Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The Chinese reading acuity test instrument is a visual function inspector tool specially designed and developed for the Chinese readers. However, when using the previous version of test instrument, it fails to adjust the luminance of the screen adaptively or automatically keep the height of the screen always be equal to the patients' sight level, and the function of corresponding Mini Program is relatively limited. In response to the above problems, a new version of Chinese reading acuity test instrument and its corresponding APP was designed and developed by customized segment LCD display, Bluetooth 4.2 solution, STM8 main—control module, and the Android Studio program development platform. The new version of the test instrument is equipped with the new functions of adjusting the position of screen by controlling screw slide table and the luminance of the screen automatically through the APP connecting with the Bluetooth. These new outbreaks improve the design of software and hardware of the test instrument. The experimental results show that the instrument has good adaptability and meets the needs of providing technical support for the diagnosis and rehabilitation of patients with low vision in different ages.

Keywords: reading acuity chart; Bluetooth communication module; APP development

0 引言

阅读视力是从书面语言(物理刺激)中获得意义的心理加工过程。在阅读过程中最先发挥作用的是视知觉能力, 它所包含的分辨和记忆都参与到阅读中来^[1]。阅读视力表是测量阅读视力的方法和工具, 它的检测参数包括阅读视力、最大阅读速度和临界打印尺寸等^[2]。从以上相关参数的测量可以反映视力对读者阅读表现的影响^[3], 进而为临床监控和预防提供指导性意见。

阅读视力测试目前已广泛应用于低视力检查和临床康复等眼科领域^[4-5]。针对现有的纸质阅读视力表人力成本高、自动化程度低、数据收集全部需要手动记录等问题,

通过设计和开发了适合母语为中文的低视力中老年人进行阅读视力测试的 C-READ 中文阅读视力检查仪。基于原版 C-READ 中文阅读视力检查仪的研发思路和设计方法, 实现了新一代阅读视力检查仪的研制和上位控制 APP 的开发。该仪器能够便捷地采集阅读时间、阅读速度、准确率、临界打印尺寸等与阅读功能相关的数据。使用该仪器作为实验工具, 验证了仪器测量上述指标的可靠性并符合视力检查标准, 为低视力中老年人的临床康复提供了良好的技术支持。此外, 该仪器的显示效果良好, 具有记录数据、分析结果等齐全功能。

第一版 C-READ 阅读视力检查仪的有效性已经得到了验证, 但是从实际操作中还发现了一些问题: 测试人员无法自适应地调节液晶屏的亮度; 仪器始终保持恒定的位置不能适应被试的视线高度; 小程序的功能过于单一, 若想让测验仪适配更多移动终端, 需要根据实际检查需求开发 C-READ 上位控制 APP, 新一代 C-READ 阅读视力检查仪 APP 功能设置图如图 1 所示。

收稿日期: 2020-02-25; 修回日期: 2020-03-25。

基金项目: 浙江省重大科技计划项目(2018C01080)。

作者简介: 邵奇(1994-), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生, 主要从事智能控制、教育大数据与个性化学习方向的研究。

邱飞岳(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能控制、优化理论与方法方向的研究。



图 1 新版 C-READ 阅读视力检查仪上位控制 APP 功能设置图

1 新一代中文阅读视力检查仪总体设计

新一代中文阅读视力检查仪总体结构图如图 2 所示, 由硬件设计和上位控制 APP 两部分组成。其中硬件设计基本沿用了第一版 C-READ 检查仪的设计, 主要由蓝牙通信模块、STM8 单片机、液晶显示模块以及电源组成^[6]。上位控制 APP 的主要功能有语音识别、自动控制液晶屏的亮度和对比度、电量读取等功能, 并改进了对收集到的阅读表现数据的拟合方法, 提高了数据分析结果的准确性。本研究旨在通过设计一款基于智能手机等移动终端设备的 C-READ 阅读视力检查 APP 进一步完善 C-READ 阅读视力检查仪的软件开发模块。

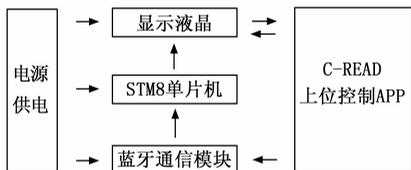


图 2 新版阅读视力检查仪总体结构图

硬件设计中 STM8 起主要的控制作用, 通过连接蓝牙通信模块对从 APP 传来的指令进行数据解析, 再控制检查仪液晶屏的显示。新版 C-READ 阅读检查仪在第一版的基础上, 开发了基于步进电机的丝杆滑台装置, 使得屏幕可以通过滑杆上下滑动, 通过 APP 控制显示的中文测试文本, 自动控制显示屏与眼睛位置保持同一高度, “显示屏+丝杆滑台+支架”结构图如图 3 所示。在进行阅读视力检查时, 先启动阅读视力检查仪的电源, STM8 单片机进入工作状态, 并唤醒蓝牙通信模块准备接受从手机 APP 传来的各种指令; 主试人员将“开机”、“亮度改变”、“关闭”等控制指令发送至单片机; 由此液晶屏幕上将在单片机的指挥下按要求显示阅读检查文本, 以及实现屏幕亮度的调节; 被试阅读液晶屏上逐行显示的句子, APP 的语音识别功能会实时记录阅读数据, 通过新版仪器后台增加的双肢拟合算法自动分析检查结果并生成图表。新一代 C-READ 阅读视力检查仪在原有版本的硬件基础上, 根据实际操作中的检查需求, 不仅增加了蓝牙通信控制模块支持的“显示屏+丝杆滑台+支架”设计, 还进一步完善了 C-READ 相关软件的开发。新版仪器丰富了 C-READ 阅读视力检查仪的软硬件配置, 让检查过程更简单、科学、易操作,

大大节省了人力成本, 为仪器的大范围推广和应用提供了技术支持。

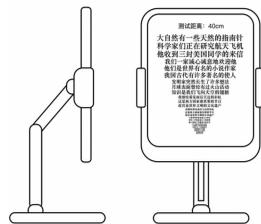


图 3 新版 C-READ “显示屏+丝杆滑台+支架”结构图

2 硬件设计

2.1 蓝牙通信模块

在无线传输领域内, 蓝牙在各种移动终端具备庞大的基础积累^[7]。蓝牙通信模块是 C-READ 阅读视力检查仪的控制枢纽, 连接了单片机和手机 APP 之间的通讯进程。新版 C-READ 沿用了原版的蓝牙 4.2 协议解决方案, 采用 BLE103 芯片, 工作电压为 1.7 V—3.6 V, 接收灵敏度为-78 dBm。新版 C-READ 阅读视力检查仪的一大创新之处就在于通过蓝牙通信模块通过与手机 APP 的数据传输, 控制液晶屏在丝杆滑台上的纵向移动。这种可以上下滑动的装置标有两个最低位和最高位的位置信息, 并配有光电开关作为反馈装置, 用途是在单片机上电初始化或复位时蓝牙通信功能可以了解液晶屏所处的位置, 方便在使用过程中计算位移。新版 C-READ 通过蓝牙通信模块控制丝杆滑台调节液晶屏位置的电路原理图如图 4 所示。

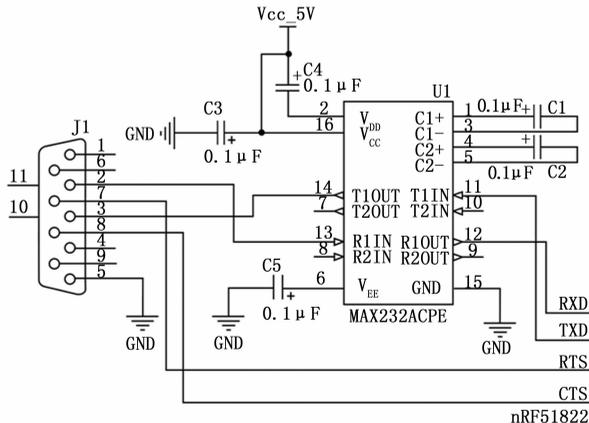


图 4 蓝牙控制丝杆滑台调节液晶屏位置的电路原理图

2.2 液晶显示模块

C-READ 对纸张和打印文字的清晰度的要求极高, 显示文字的设备必须满足文字清晰度的需求。设计新版 C-READ 阅读视力检查仪首要考虑到的就是视力表的识别, 依据国际通用的视力表设计原则和计算公式: 视觉敏锐度阈值 ($\log \text{MAR}$)^[10] = $1.3 - 0.02 \times$ 视力表上全部读对的视标数, 确定了一 $0.3 \log \text{MAR}$ 为能够识别的最小字体^[8]。阅读视力检查仪的文字打印尺寸从大到小以对数级别递减, 与标准视力表一致。在如此小的尺寸下清晰显示一个汉字,

就需要高精度的数码印刷机。那么使用电脑屏幕或者 iPad 等电子设备的屏幕可否满足清晰度的需求呢？电脑屏幕或 iPad 屏幕等清晰度一般由像素密度即每英寸显示的像素数决定。40 cm 距离下 C-READ 文字的实际高度如表 1 所示，由此可知常见的移动设备像素密度很难在 40 cm 的检查距离下显示 -0.3 log MAR 如此小的汉字。因此 iPad 等常见的移动设备便无法达到清晰显示的要求。新版 C-READ 依旧使用定制的段式液晶模块 (LCM) 来显示文字内容，凭借蚀刻、显影等制作工艺，以此达到类似于数码打印的精度，也节约了经济成本。

表 1 40 cm 距离下 C-READ 文字的实际高度

log MAR	40cm 距离下汉字的高度/mm
-0.3	0.290 888 255
-0.2	0.363 610 355
-0.1	0.465 421 336
0.0	0.581 776 818
0.1	0.727 221 31
0.2	0.930 843 932
0.3	1.163 556 097
0.4	1.454 447 428
0.5	1.832 608 506
0.6	2.327 131 885
0.7	2.908 933 317
0.8	3.665 293 947
0.9	4.654 421 308
1.0	5.818 174 338
1.1	7.273 006 428
1.2	9.310 103 183

3 软件设计

3.1 手机 APP 界面和程序设计

新版 C-READ 阅读视力检查仪上位控制 APP 在原有小程序的基础上，围绕实际检查需求在设计和功能方面做了进一步完善。阅读是从可视化的文字或图像中获取信息的过程^[9]，因此新版 C-READ 检查仪 APP 力求从清晰度、色彩搭配、界面布局等方面满足用户的视觉需求。以 APP 初始化界面和登录界面为例，如图 5 所示，简洁柔和的界面设计更加符合一款视功能保健 APP 的风格，有效避免了繁琐的细节设计对主试的视觉干扰。



图 5 新版 C-READ 上位控制 APP 初始化界面和用户登录界面

原版 C-READ 阅读视力检查仪液晶屏的亮度是始终不变的，无法根据检查环境的实际光照条件进行调节。考虑到用户可能受到屏幕亮度和对比度的影响，新版 C-READ 阅读视力检查仪上位控制 APP 根据检查需求开发了相关功能，主试通过 APP 自动调节液晶屏的亮度和对比度，以适应不同的光照环境，避免对被试阅读产生影响。本研究依托 Android Studio 程序开发平台，在此编程环境下开发与 C-READ 中文阅读视力检查仪适配的上位控制 APP。以亮度调节为例，APP 程序通过蓝牙向后台发送“亮度指令”，单片机接收到“改变亮度指令”后启动 PWM 调光，主试拖动亮度条即可完成屏幕亮度的调节，编程环境下的代码贴图如图 6~9 所示。

```
private void setBrightness(int progress){
    if(readerApp.isBLEDevConnected()){
        readerApp.getGHBleClient().sendBrightnessChangeCommand(progress);
    }
}

```

发送亮度指令

图 6 “发送亮度指令”代码贴图

```
if(msg.Message.Length==msg.Message.RData[1])
{
    if(msg.Message.RData[9]==sendmsg.Message.RData[msg.Message.RData[1]-1]==true)
    {
        msg.To(msg.Message.RData[2])//ctrl id
        case #A3//Reset LcdAllChannel to set or reset
        //set msg.Message.RData[11]==0x0 to enable all channel
        //set msg.Message.RData[12]==0x1 to display all channel
        uint i;
        LcdDisplayData_send[0];
        for(i=0;i<20;i++)
        {
            LcdDisplayData_send[i]=msg.Message.RData[13];
            LcdData1Channel(LcdDisplayData_send[i]);
        }
        break;
        case #A31//BackLight Ctrl
        LcdBackLightControl(msg.Message.RData[13]);
        break;
        case #A32//LcdSetOnChannel
        if(msg.Message.RData[3]==0x66||msg.Message.RData[4]==0x0||msg.Message.RData[4]==0x1)//check data
        {
            LcdSetOnChannel(msg.Message.RData[3],msg.Message.RData[4]);
            BLEData(msg.Message.RData[3],1);
        }
        break;
    }
}

```

接收到改变亮度指令

图 7 “接收到亮度改变指令”代码贴图

```
void InitLcd()
{
    pinMode(LcdData_Pin, OUTPUT | PULLUP);
    pinMode(LcdCl2_Pin, OUTPUT | PULLUP);
    pinMode(LcdCl3_Pin, OUTPUT | PULLUP);
    pinMode(LcdCl4_Pin, OUTPUT | PULLUP);
    digitalWrite(LcdCl_Pins, LOW);
}

for (uint8_t i = 0; i < 20; i++)
{
    LcdDisplayData[i] = 0x; //not show any chart
}
LcdData1Channel(LcdDisplayData);
}

```

PWM 调光

图 8 “PWM 调光指令”代码贴图

3.2 APP 总体流程图

新版 C-READ 阅读视力检查仪上位控制 APP 总体流程图如图 10 所示。主试通过手机、iPad 等移动终端打开 APP 启动程序。APP 会先提示操作人员进入登录界面完成登录并通过蓝牙连接 C-READ 阅读视力检查仪，确认连接后进入视力表选择界面。开始阅读视力检查环节前，主试朗读实验指导语，帮助被试进一步明确检查步骤和相关注意事项。与此同时，主试还要根据实际光照环境适当调节液晶屏的亮度和对比度，防止因为屏幕光照过强或过弱影响被试阅读。测试开始后，再次向被试强调要快速准确地阅读句。当屏幕上出现文本时程序自动计时，APP 通过

```

@Override
public View onCreateView(@NonNull LayoutInflater inflater, @Nullable ViewGroup container, @Nullable Bundle savedInstanceState) {
    root = LayoutInflater.from(getActivity()).inflate(R.layout.fragment_diagnose, root, null);
    ButterKnife.bind(this, root);

    //view相关的初始化动作必须在这里完成

    //亮度条滑动
    intensitySeekBar.setOnSeekBarChangeListener(new SeekBar.OnSeekBarChangeListener() {
        @Override
        public void onProgressChanged(SeekBar seekBar, int i, boolean b) {
        }

        @Override
        public void onStartTrackingTouch(SeekBar seekBar) {
        }

        @Override
        public void onStopTrackingTouch(SeekBar seekBar) {
            //不论是拖动结束还是 点击结束 都会触发这个
            //滑动结束触发
            Log.v("tag", "SEEKBAR Stop", msp: "progress:"+seekBar.getProgress());
            setBrightness(seekBar.getProgress());
        }
    });
}
return root;

```

图 9 “亮度条滑动指令”代码贴图



图 11 新版 C-READ 上位控制 APP 检查项目选择界面和患者诊断信息界面

语音识别检查被试的阅读情况, 程序停止计时并与标准测试文本比对后确定被试本句的正确读出字数。当检查过程中, 被试需要调整视线高度进行阅读时, 主试通过程序控制丝杆滑台调节液晶屏向最低位移动以保持与被试的视线在同一高度。当被试向主试示意无法继续阅读时检查结束。后台程序会通过 Matlab R2017a 曲线拟合工具自动分析检查数据并生成结果图表。检查项目选择界面和被试诊断信息界面如图 11 所示。

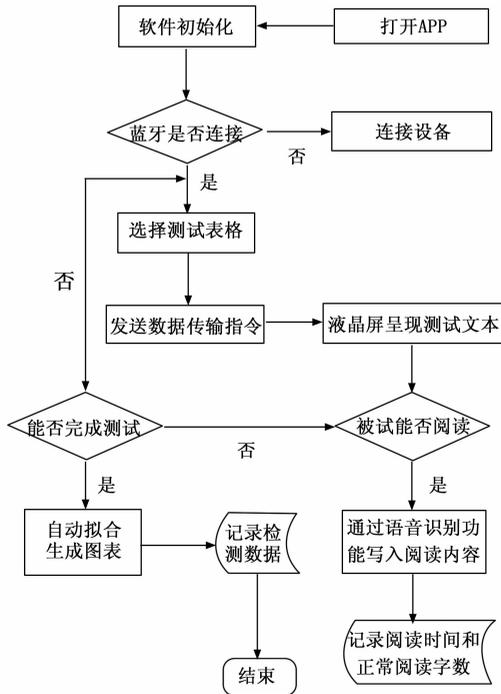


图 10 新版 C-READ 上位控制 APP 总体流程图

4 实验结果与分析

40 名 40~70 岁低视力中老年人在知情同意的前提下自愿参加了阅读视力检查, 研究严格遵守赫尔辛基宣言的原则进行。在开始检查之前, 先使用国际标准近视力表对每名被试进行矫正或裸眼视力检查, 排除可能因为黄斑病变、白内障或者其他眼科问题导致无关变量影响实验结果。将

这 40 名中老年患者随机分为两组, 其中对照组使用 C-READ 纸质图表测试, 纸质版图表 A 如图 12 所示。而另一组为实验组, 采用新版 C-READ 阅读视力检查仪进行测试。每位被试按照随机顺序进行 ABC 三个表格的测试, 且在每两张视力表测试的间隙给被试两分钟的放松时间, 以排除视觉疲劳效应对实验结果的影响。本实验累计收集数据 40 份, 均为有效数据。本项实验的目的是检验新版 C-READ 阅读视力检查仪在临床视力检查和康复的有效性, 通过分析纸质阅读材料和使用 C-READ 阅读视力仪的检查结果之间差异是否显著。

表 2 实验组和对照组 3 个测量指标的 T 检验

	t	Sig
RA	0.467	0.642
CPS	1.071	0.27
MRS	4.382	0.00

表 3 数据分析指标 指标名称

指标名称	指标含义
最大阅读速度	患者能够阅读的最大速度, 单位为汉字/分钟 (WPM)
阅读敏锐度	患者可以看清的最小文字对应的字号, 单位为 log MAR
临界打印尺寸	患者以最大速度阅读时的最小字号, 单位为 log MAR

实验通过研究检查材料不同是否会对测试结果造成影响, 继而探究新版 C-READ 阅读视力检查仪的有效性。实验采取 T 检验方法, 先计算同一个患者 3 个视力表测验的平均值, 之后以测验材料 (纸质材料-测验仪) 为分组变量进行 T 值检验。实验组和对照组在与阅读表现相关的 3 个测量指标的 T 检验结果如表 2 所示, 3 个测量指标所对应的含义如表 3 所示。通过分析表 2 中数据可以发现, 两组被试在使用不同测试工具进行阅读视力检查时最大阅读速度

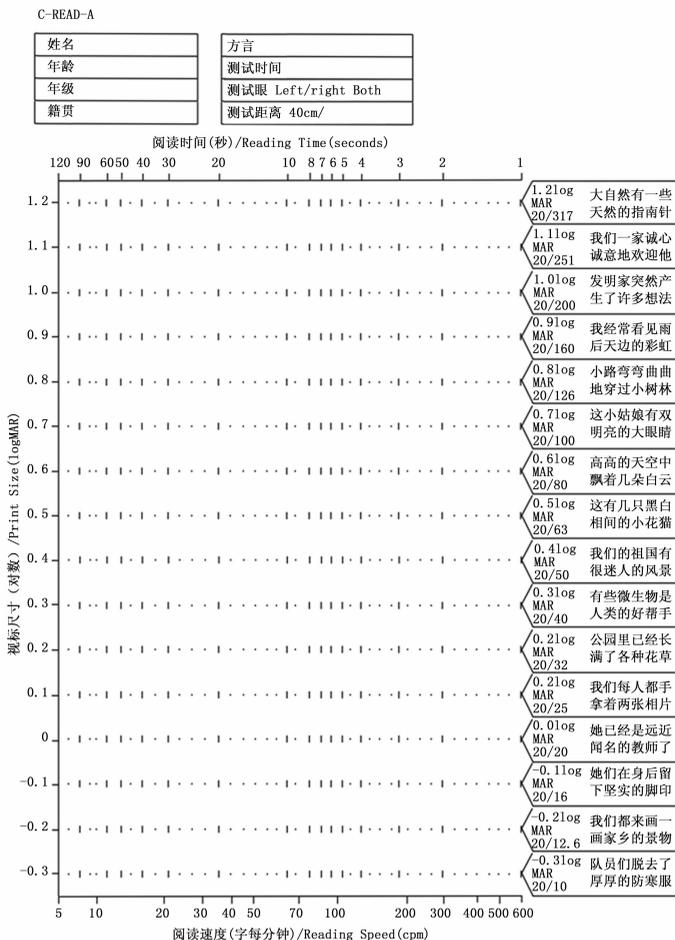


图 12 C-READ 纸质版图表 A

MRS 具有显著差异，而阅读敏锐度 RA 和临界文字尺寸 CPS 差异不显著。实验组使用新版 C-READ 阅读检查仪测得的阅读速度约为 138.7 ± 16 WPM，而对照组在使用传统纸质阅读材料测验时约为 162.1 ± 32.5 WPM。通过进一步的方差成分分析可以看出，中老年被试的个体间差异是导致最大阅读速度不同最主要的原因。本实验的被试群体为 40~70 岁中老年人，一方面可能存在即使已经参加了预实验但还是无法完全理解测试流程的被试，他们在阅读过程中很难快速准确地阅读而导致速度偏慢；另一方面，在使用新版 C-READ 阅读检查仪进行测试时，中文阅读背景老年人“谨慎阅读”的特点更加凸显，由于追求阅读准确率而放慢阅读速度，具体表现为眼跳距离短、极少采用跳读。而对照组的测试环境更贴近于日常 E 字视力检查表，被试对于检查步骤相对熟悉也可能使其在最大阅读速度指标方面表现更佳。但这种非自动化的视力检查工具涉及人工测量、记录、统计等多项可能引起误差的因素，除此之外国内外学者的测试结果也都体现了 C-READ 具有良好的检查可靠性，测试人员在临床试验时可以自如地互换顺序，使用不同的测验来测试一名被试阅读功能表现的相关指标，或者用来监测和评估在一定时间内被试阅读功能表

现的变化情况。

本研究还以年龄分段将被试分成三组，分别为：40~49 岁、50~59 岁和 60~70 岁。虽然也可以两两之间进行 T 检验以考察平均数的差异，但由于分组数等于三组，故使用方差分析来显示平均数的差异。因此本研究还以 MRS、CPS、RA 为检验变量，进行单因素方差分析以探究 3 个年龄段中老年低视力患者之间测得的阅读表现指标的平均数，分析结果如表 4 所示。

表 4 三组 MRS、CPS、RA 单因素方差分析

		平方和	自由度	均方	F	Sig
MRS	组间	16 580.542	2	8 287.436	10.584	0.000
	组内	93 980.362	120	764.478		
	总计	110 560.904	122			
CPS	组间	0.084	2	0.042	3.254	0.040
	组内	1.402	120	0.014		
	总计	1.486	122			
RA	组间	0.036	2	0.018	1.902	0.170
	组内	0.870	120	0.008		
	总计	0.906	122			

基于上述实验证明了新版 C-READ 阅读视力检查仪的测量可行性，将来可以将 C-READ 阅读检查仪作为临床干预效果的评价指标，为不同年龄段低视力群体的康复训练提供借鉴。通过定期使用该检查来观测每个患者的康复进度，根据检查结果适时调整干预治疗方案，在一段时间后再次进行该检查，可以检验患者的阅读功能表现是否得到明显改善，为建立不同年龄段被试的阅读表现常模数据集奠定理论和实践基础。

5 结束语

通过设计和开发与 C-READ 阅读测验仪相匹配的上位 APP，完善了 C-READ 软件配置。在简化了检查流程的基础上，大大降低了人力成本。语音识别功能可以实现对被试阅读内容的判断和统计，并自动分析阅读表现数据，为科学指导下老年人进行更专业的日常视功能检查和保健提供依据。此外 APP 的界面设计简洁直观，综合考虑了色彩搭配、空间布局等因素，还增加了“实验指导语”部分，方便主试在测试开始前帮助被试进一步明确实验步骤和注意事项，体现了软件设计的合理性和人文性，也为 C-READ 阅读视力检查在视功能诊断和评估方面的大范围普及提供了技术支持。

参考文献:

[1] Jackson M D, McClelland J L. Sensory and cognitive determinants of reading speed [J]. Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 1975, 14 (6): 565-574.
 [2] 王晨晓, 刘志慧, 高继托. 中文阅读视力表的设计要素研究和分析 [J]. 中华眼科杂志, 2013, 49 (6): 536-540.

- [3] Gordon E. Legge, Gary S. Rubin, Denis G. Pelli, et al. Psychophysics of reading—II. Low vision [J]. *Vision Research*, 25 (2): 253–265.
- [4] McClure, E M. Macular degeneration: do conventional measurements of impaired visual function equate with visual disability [J]. *British Journal of Ophthalmology*, 2000, 84 (3): 244–250.
- [5] Hazel C A, Petre K L, Armstrong R A, et al. Visual function and subjective quality of life compared in subjects with acquired macular disease [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2000, 41 (6): 1309–1315.

- [6] 陈龙翔, 邱飞岳, 傅攀, 等. 基于蓝牙通信的阅读视力检查仪设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2019 (7): 280–284.
- [7] 时继潮, 李新红, 吴阳明, 等. 蓝牙 4.2 协议的一主多从防丢器 APP 设计 [J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2017 (7): 44–46.
- [8] 王晨晓, 吕帆, 徐丹, 等. 快速系列视觉呈现、全屏及纸面显示方式下汉字阅读速度的比较 [J]. *中华眼科杂志*, 2007 (8): 704–708.
- [9] 梁培培, 蒋海升. 手机教育类 APP 体验创新路径探析——以“英语流利说”APP 为例 [J]. *出版广角*, 331 (1): 35–38.

(上接第 275 页)

测试表明, 经过加权处理之后评估健康度最接近人工标定的健康度, 在各种不同健康状态下的测试结果都比较稳定, 具有最佳效果。而没有加权处理的结果偏离比较大。虽然整体趋势也比较一致, 但在很多情况下, 并不嫩准确地反应设备应有的健康状态。

4 结束语

针对设备在进行健康管理过程中存在的样本不均衡性, 本文利用了 SVDD 模型超球面的特点, 通过权重因子融合了采集参数值变化对健康状态的影响。结合二项式回归拟合算法, 提出了一种适用于采样不均衡条件下的设备健康度评估方法。该方法有效解决了实际工作中由于样本缺乏或样本不均衡情况下设备健康度评价的难题。特别是利用指数函数动态调整各参数在取值不同情况下对健康状态的影响, 反映了各个参数对健康状态影响的动态变化, 对健康度的准确评估具有重要意义。通过对某型雷达发射机的实际评估和分析, 该方法对于准确评估设备的健康度适应性好, 具有不错的实用价值。

参考文献:

- [1] 赵仙保, 宣征南, 韩念琛. 基于相对健康度模型的齿轮箱运行状态综合评价 [J]. *机械传动*, 2019, 43 (2): 26–30.
- [2] 吕建伟, 余鹏, 魏军, 等. 舰船装备健康状态评估方法 [J]. *海军工程大学学报*, 2011, 23 (3): 72–76.
- [3] 曹正洪, 沈继红. 基于模糊集理论的传感器健康度评价方法 [J]. *电机与控制学报*, 2010, 14 (5): 79–83.
- [4] 王维, 齐玉玲. 基于大数据分析的列车健康度诊断方法 [J]. *电力机车与城轨车辆*, 2018, 41 (6): 87–89.
- [5] 刘志文, 董旭柱, 吴争荣, 等. 基于多种测度的配电网关键设备在线状态评估 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30 (11): 52–57.
- [6] 肖坚红, 赵永红, 薛晓茹, 等. 电能表健康度分析及整体运行状态预测方法 [J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32 (7): 77–80.

- [7] 邱文昊, 黄考利, 金赛赛, 等. 基于健康度分析与和声蚁群算法—支持向量机的故障预测模型 [J]. *计算机应用*, 2015 (11): 3252–3255.
- [8] Houman, Hanachi, Christopher, et al. Performance—Based Gas Turbine Health Monitoring, Diagnostics, and Prognostics: A Survey [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018.
- [9] 许刚, 王坤, 王志红, 等. 基于权重分析的灰色关联度法在供水管网健康度评价中的应用 [J]. *给水排水*, 2014 (7): 164–167.
- [10] 李鑫, 刘莹莹, 李赣华, 等. 基于模糊变权原理的卫星健康评估方法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36 (3): 476–480.
- [11] 吴魁, 孙洁, 蒋波, 等. 基于 LSTM 的风洞设备健康状态评估方法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26 (3): 288–291.
- [12] 雷亚国, 贾峰, 周昕, 等. 基于深度学习理论的机械装备大数据健康监测方法 [J]. *机械工程学报*, 2015 (21): 49–56.
- [13] 张春, 舒敏. 基于支持向量机的健康状态评估方法 [J]. *计算机系统应用*, 2018 (3): 18–26.
- [14] Jing Z, Ying Y, Ding S X, et al. A Fault Detection and Health Monitoring Scheme for Ship Propulsion Systems using SVM Technique [J]. *IEEE Access*, 2018, (99): 1–1.
- [15] 马咏雪. 基于 SVDD 的模拟电路异常检测方法研究及应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [16] 谷梦瑶, 陈友玲, 王新龙. 多退化变量下基于实时健康度的相似性寿命预测方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23 (2): 362–372.
- [17] 杨森, 孟晨, 王成. 基于模糊 SVDD 的电子装备状态评估模型研究 [J]. *计算机工程与设计*, 2013, 34 (2): 676–680.
- [18] 李凌均, 韩捷, 郝伟, 董辛, 何正嘉. 支持向量数据描述用于机械设备状态评估研究 [J]. *机械科学与技术*, 2005 (12): 1426–1429.
- [19] 邓胡滨, 刘觉夫. 均值方差的递推算法及其应用 [J]. *计算机与现代化*, 1996, (4): 9–11.