

分布如图 3 和图 4 所示。

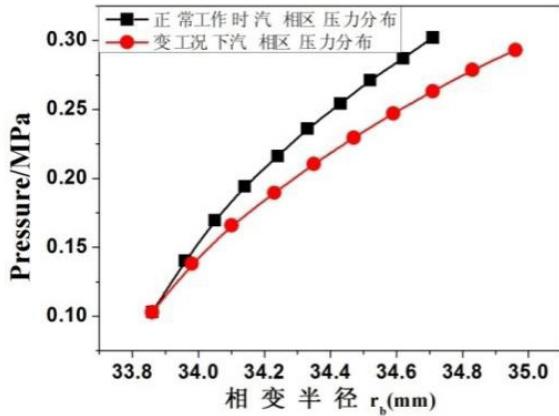


图 3 正常工作时、变工况下机械密封端面汽相区压力分布

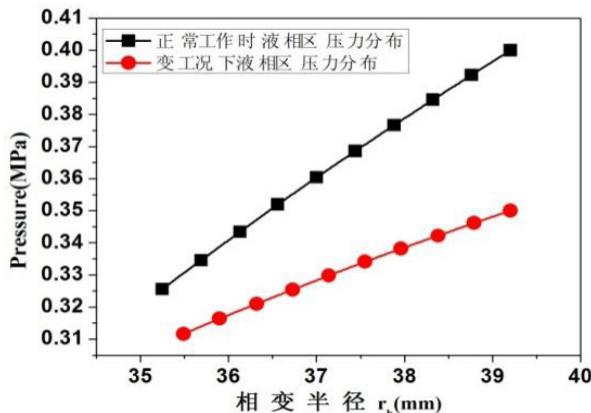


图 4 正常工作时、变工况下机械密封端面液相区压力分布

3.2.2 变工况下机械密封端面压力分布

当密封腔压力骤降 $\Delta p=0.3 \text{ MPa}$ 时, 端面压力分布发生变化, 相变半径与饱和压力分别变为 $r_c=33 \text{ mm}$ 、 $p_c=0.12 \text{ MPa}$ 。在闪蒸瞬间:

$$\Delta h = h_f - h_g$$

其中 Δh 为液体由不饱和至饱和状态的瞬时焓变 (kJ/kg) , h_f 和 h_g 分别为饱和液体与蒸汽的焓值。

设沸腾区压力为 p_b , 抽空瞬间饱和温度为 T_s , 假设端面体积不变, 由公式 (8) 可得沸腾区平均压力 \bar{p}_b , 其值约为其他区域的 20 倍, 表明沸腾区压力是导致密封端面开启

的主要因素。

3.2.3 正常工况下密封端面压力分布与变工况下密封端面压力分布及其失效分析

常规工况下, 液相区膜压近似线性变化, 汽相区则呈对数规律。变工况发生时, 液相区压力变化较小, 汽相区变化显著但仍在可控范围。若密封处于似液相状态, 端面压力波动对密封性能影响有限。由此可见, 液相密封稳定性优于混相密封, 而在混相密封中, 似液相状态又优于似汽相状态。

变工况下, 若密封处于混相状态, 相变半径变化导致沸腾区液膜压力低于饱和压力, 引发剧烈闪蒸, 瞬时压力增幅达 20 倍。此时, 沸腾区压力急剧上升成为推动动环轴向位移的主导因素, 而汽相区与液相区的影响相对较小。

综上, 变工况下密封腔压力变化引起端面压力重分布: 液相区变化平缓, 汽相区呈抛物线型变化, 沸腾区则因闪蒸而压力剧增。沸腾区压力波动是导致密封动环开启力变化并引发失效的核心原因。因此, 抗变工况密封的设计重点在于控制相变半径, 使其尽量处于液相状态, 或最小化混相状态下的半径变化, 从而抑制沸腾区扩展, 降低对动环开启力的影响。根据公式 (9):

$$\rho \cdot \frac{p_2 - p_b + \frac{3\rho\omega^2}{20}(r_2 - r_b)}{\ln r_2 - \ln r_b} = \frac{(p_b^2 - p_1^2)}{2RT \ln(r_b / r_1)} \quad (9)$$

相变半径 r_c 受密封腔压力 p_i 、外侧压力 p_o 、相变温度 T_c 、相变压力 p_c 、端面内径 r_i 、外径 r_o 及角速度 ω 共同影响。其中 p_i 与 ω 由工况决定, 不可调整; 而 r_i 、 r_o 确定后, T_c 与 p_c 也随之确定。此时, 调节外侧压力(p_o)是控制相变半径、增强密封抗变工况性能的关键。

参考文献

- [1] 变工况下密封腔压力骤降导致端面压力重分布, 相变半径变化引发闪蒸, 推动动轴向位移。若腔压恢复后动环未能复位, 则密封失效。
- [2] 液相密封稳定性最高, 混相密封中似液相状态优于似汽相状态。
- [3] 相变半径变化导致的端面闪蒸是机械密封在变工况下失效的主要原因。
- [4] 通过调节外侧压力控制相变半径, 或采用辅助螺旋密封, 可显著提升密封系统的抗变工况能力。

Design & Implementation of Head-mounted Myopia Detection Device for Teenagers

Zhu Chen

Shanghai Kongjiang Senior High School, Shanghai, 200093, China

Abstract

Excessive exposure to electronic screens, insufficient outdoor activity time, improper eye usage habits and failure to timely grasp vision conditions among teenagers have become the main factors leading to their myopia. This study designs a head-mounted myopia detection device. Utilizing ultrasonic sensors for distance detection, the system converts measured distances into myopia levels through Arduino-based algorithms. Bluetooth-enabled signal transmission delivers real-time results via display and voice announcements, allowing users to monitor their visual acuity in real time. This portable device enables accurate myopia assessment at school or home, offering rapid testing speeds that not only facilitate vision tests every academic year but also help users track myopia changes, facilitating proper glasses prescription. With its compact design, user-friendly operation, and quick measurement capabilities, the device provides instant visual status updates, effectively preventing myopia progression among teenagers.

Keywords

Myopia Detection; Prevention; Ultrasonic Ranging; Bluetooth; Voice Broadcast; Vision Chart Calculation Principle

头戴式青少年视力检测装置设计与实现

陈竹

上海市控江中学，中国·上海 200093

摘要

青少年过度接触电子屏幕、户外活动时间不足、用眼习惯不当及视力情况未能及时掌握，已成为导致其近视的主要因素。针对青少年视力缺乏及时检测的问题，本研究设计一款头戴式近视度数检测装置。该装置借助超声波传感器完成距离检测，通过ARDUINO主控板依据特定算法将测得距离转化为近视度数，再利用蓝牙实现信号传输，最终在显示屏上呈现结果并进行语音播报，方便用户实时查看当前近视度数。此装置可助力近视人群在学校或家中随时获取较为准确的近视度数，且检测速度快，不仅便于学校每学年开展视力检测工作，还能帮助用户掌握自身近视度数变化情况，为配镜提供便利。该装置具有便携、易操作、检测迅速的特点，能让用户及时了解视力状况，有效预防青少年近视度数加深。

关键词

近视检测；预防；超声波测距；蓝牙；语音播报；视力表计算原理

1 研究背景与现状

据世界卫生组织研究报告显示，全球近视患者约 25 亿，中国近视人数达 6 亿，青少年近视率高居世界第一，且呈现出发病年龄小、发病率高、近视度数深的特点。国家卫健委《中国眼健康白皮书》披露，我国大学生近视总体发生率超 90%，儿童青少年总体近视发生率为 53.6%，其中小学生 47.2%、初中生 75.8%^[1]。

眼睛健康影响就业、学习与身心健康，《“十四五”全国眼健康规划（2021-2025 年）》强调眼健康是国民健康重要组成部分，需聚焦儿童青少年近视防治。《儿童青少年近视防控适宜技术指南》要求每学年开展不少于一次视力不良

检查，建立定期筛查制度，以及时发现问题、调整干预或验证配镜参数。

当前视力检测存在诸多痛点：市面筛查仪多基于“偏心摄影验光”原理，售价超 20 万元，成本高且需专业操作；非正规场所检测不规范致数据不准；医院检测集中在周末，常人满为患。而青少年视力定期筛查是近视预防的关键干预手段，需日常开展。因此，优化流程、减少人工、自动分析数据、呈现直观结果成为迫切需求。^[2]

本研究以单人自助检测为目标，通过硬件搭建与软件编程，构建头戴式自助视力检测仪器，实现近视检测居家化与校园化。

2 视力表检测原理

视力检测以视标为注视目标，视标多为 E 形、数字、汉字等图形，其可见清晰度与视标大小、观察距离相关，核

【作者简介】陈竹（2009-），女，中国山东济南人，从事视力检测研究。

心取决于视角——视标两端对眼节点的张角，视角越大，影像越大，视物越清。视力以最小视角衡量，视角越小视力越好，人类正常视力的最小视角公认为 1 分视角 (1/60 度)。

以我国的视力表常用的 E 形视标 (如图 1 所示，其每一笔画和空隙均等长) 为例说明：视角与视标大小成正比，与观察距离成反比。如图 2 所示，把视标 “E” 某一笔画抽象成线段 AB=x 毫米)，把眼节点抽象为点 N，则观察这一笔画的视角为 $\angle ANB$ ，N 到 AB 的距离 (即观察距离) 为 d 米， $\angle ANB=a$ 分。因为 AB 通常远小于 N 到 AB 的距离，所以可以近似地把 AB 看作弧长，把 N 到 AB 的距离看作相应的半径，则 $\angle ANB$ 就是相应的圆心角。根据角度与弧长、半径的关系以及单位的换算，可得 $a = \frac{60 \times 180x}{1000\pi d}$ (记为公式 *) ≈ 3.4377 (取 $\pi=3.14159$)^[3]。

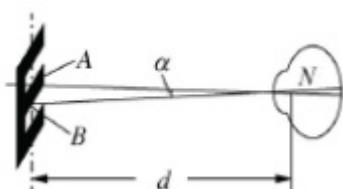


图 1

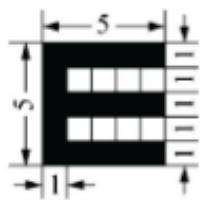


图 2

国际上主流视力记录方法对应不同数学模型：分数制：1862 年 Snellen 首创，公式 $V=d/D$ ，d 为检测距离，D 为正常人看清该视标的最远距离(设计距离)，常见于英美国家^[4]。由视角公式可推得 $D=ad$ ，即视力值与视标大小成反比。小数制：1875 年 Monoyer 提出，用最小视角的倒数来表达视力，即 $V=1/a$ (a 为最小视角)。小数制视力表符合日常生活经验及小数使用习惯，但是，临幊上并不能直接以二者之差来表示或比较处理前后的视力变化。

对数制：1956 年我国缪天荣提出，基于视力与最小视角对数的正比例关系，定义 $V=5-\lg a$ (a 为最小视角)，形成五分记录法，对应“标准对数视力表”，规定标准检测距离，为我国主流使用方法。

3 头戴式视力检测装置系统设计

本眼镜课题是设计一款适用人群广、结构简单、用材轻便、不受场景限制、易操作、无需专业人员、便携、检测快、准确率高、价格低的近视度数检测装置，帮助青少年在家或学校随时测近视度数，掌握度数变化，方便近视防控。

3.1 需求分析

使用场景主要为学校教室和家庭，检测逻辑为：被检者站于特定距离，确定能清晰读取的最佳视标行，通过检测距离与视标设计距离的关系，结合视角原理计算度数。

装置设定测量范围为 5 米以内（符合国际标准检测距离），采用头戴式眼镜作为数据采集端以提升操作效率。系统分为信息采集与接收两个终端，避免移动限制；数据传输采用蓝牙通信，保障稳定性与及时性。接收端配备显示与语音播报功能，实现结果即时反馈。

3.2 系统设计

本装置以国际标准视力表视角原理为基础，通过超声波测距模块获取视标实际检测距离 d，结合分数制视力公式 $V=d/D$ (D 为视标设计距离) 计算视力值。

3.2.1 视力计算的理论依据

标准视力表中，不同视力值对应的视标在 5 米标准检测距离下的设计距离 D 固定。结合 $D=ad$ ，可计算各视标在标准检测距离 5 米下的设计距离，如表 1 所示。例如，视力 1.0 对应的视标设计距离为 5 米，视力 0.5 对应的视标设计距离约 9.98 米。

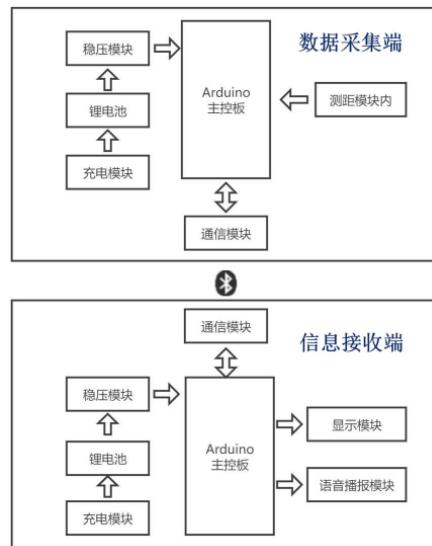


图 3

表 1 视力值与视标设计距离对应关系

视角 / 分	视角对数	对数制视力	小数制视力	设计距离(m)	标准检测距离(m)	分数制视力
$10.0000(10^{10})$	1.00	4.00	0.10	50.00	5.00	5/50
$7.9433(10^9)$	0.90	4.10	0.12	39.72	5.00	5/40
$6.3096(10^8)$	0.80	4.20	0.15	31.55	5.00	5/32
$5.0119(10^7)$	0.70	4.30	0.20	26.06	5.00	5/26
$3.9811(10^6)$	0.60	4.40	0.25	19.91	5.00	5/20
$3.1623(10^5)$	0.50	4.50	0.30	15.81	5.00	5/16
$2.5119(10^4)$	0.40	4.60	0.40	12.56	5.00	5/12
$1.9953(10^3)$	0.30	4.70	0.50	9.98	5.00	5/10
$1.5849(10^2)$	0.20	4.80	0.60	7.93	5.00	5/8
$1.2589(10^1)$	0.10	4.90	0.80	6.30	5.00	5/6
$1.0000(10^0)$	0.00	5.00	1.00	5.00	5.00	5/5
$0.7943(10^{-1})$	-0.10	5.10	1.20	3.97	5.00	5/4
$0.6310(10^{-2})$	-0.20	5.20	1.50	3.15	5.00	5/3
$0.5012(10^{-3})$	-0.30	5.30	2.00	2.51	5.00	5/2

3.2.2 系统设计

传统的视力视力筛查仪多采用“偏心摄影验光”原理，并辅以人工检测的手段进行，本文研究并实现了一种头戴式简易视力检测装置，如图 3 所示，分为数据采集端和信息接收端：

数据采集端：通过超声波测距模块检测实际距离 d ，调用预存的视标设计距离 D ，经 ARDUINO 主控板按 $V=d/D$ 计算视力值，再通过蓝牙发送至接收端。^[2]

信息接收端：接收蓝牙传输的视力数据，通过显示模块呈现数值，并借助语音模块进行播报。

3.2.3 硬件设计

主控模块：选用 ARDUINO 主控板，其开发难度低、价格便宜、资源丰富、体积小巧，具备充足 I/O 接口，适配各模块集成需求。

测距模块：采用 HC-SR04 超声波模块，测量范围 2cm-400cm，精度达 3mm，满足 5 米内测量需求。由发射器、接收器和控制回路组成，Trig（触发）与 Echo（回声）引脚连接 ARDUINO 实现距离读取。

通信模块：采用 HC-05 蓝牙模块，传输稳定、功耗低、成本低，支持透传功能，通过 TX、RX 交叉连接主控板，简化程序设计，默认从机模式可通过 AT 指令配置参数。

显示与语音模块：显示选用 OLED 屏幕，尺寸小、分辨率高、功耗低；语音采用 JQ8900-16P 模块，音质清、控制灵活，通过串口指令驱动扬声器播报。

电源模块：采用锂电池供电，输出稳定 4.8V 电压，自带充电模块与过充保护，保障安全与寿命，配合稳压模块节省空间。

3.2.4 软件设计

软件的设计主要依靠主控模组 ARDUINO 来实现控制超声波测距模块采集检测距离，通过调节按钮调用存储的设计距离，视力运算，经蓝牙发送并播报视力数据等功能。软件功能流程图如图 4 所示。

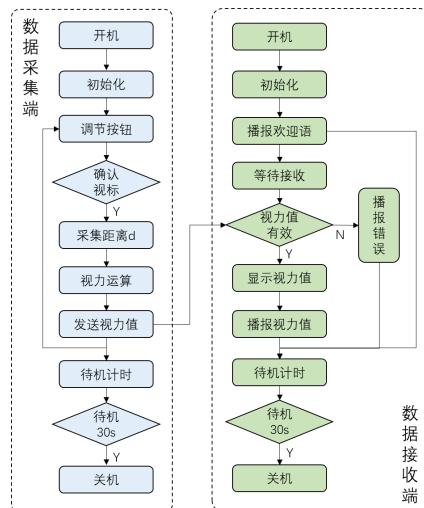


图 4

初始化配置采集端 ARDUINO 主控板 I/O 引脚模式：设超声波模块引脚模式，配置按钮引脚为输入并启用内部上拉电阻，初始化蓝牙模块参数。

调节按钮：默认设计距离 50 米，按按钮依次切换标准视力表上的视标设计距离 (D) 并存储。确认视标时，发 10uS 以上高电平触发超声波模块，测 Echo 引脚高电平时间，按 “测试距离 $d = (\text{高电平时间} \times 340\text{M/S}) / 2$ ” 计算得 d ，进一步根据分数制视力公式 $V=d/D$ 运算得小数制视力值。视力值保留一位小数后经蓝牙发送至数据接收端。

初始化配置数据接收端 ARDUINO 主控板 I/O 引脚：设蓝牙、显示、语音模块引脚模式，初始化模块参数，并设置播报欢迎语。接收数据时，检测串口数据，读数据并校验，有效则存视力值，无效则播报错误。

系统设置了待机模式，待机 30s 后检测装置自动关机。

4 制作与调试

按电路连接图连供电、传感器、执行器、通信等模块后进行整体组装，含头戴式框架与接收端外壳。

头戴式框架使用轻质耐用材料，固定超声波模块、主控板、锂电池、蓝牙模块（采集端）；使用连杆机构调节超声波模块角度位置，确保对准视标；合理布线并预留长度，确保使用时灵活无卡顿。^[3] 接收端外壳按器件尺寸与安装要求制作，并预留显示窗口、喇叭孔、按钮孔等，安装各器件和外壳后成为独立的接收装置。

组装后的成品外观如图 5 所示。



图 5

分如下步骤进行测试：

模块测试：单独测试各电子模块功能，确保超声波测距准确、蓝牙传输稳定、显示与语音反馈正常。超声模块调试时，发 10uS 以上高电平触发模块，测 Echo 引脚高电平时间，按公式算距离，可用定时器输入捕获功能提高测时精度。蓝牙数据传输测试时：将模块装到采集端与接收端，连主控板，上电配对，发测试数据，检测出蓝牙正常工作的最远和最佳距离。

整体调试：开机检查模块启动状态，头戴采集端选取不同视标检测，验证接收端显示与播报准确性；多次改变检测距离，优化精度与稳定性。

场景验证：在家庭、教室等不同环境下开展多人多次