

# 基于嵌入式系统的智能电子视力表设计与实现

杜学静

温州星康医学科技有限公司 浙江 温州 325000

**【摘要】**：视力检测是眼健康筛查的关键环节。传统纸质视力表存在流程繁琐、结果依赖主观判断、数据难以管理等问题，已难以满足现代医疗对高效精准检测的需求。本文提出一种基于嵌入式系统的智能电子视力表设计方案。系统以嵌入式微处理器为核心，融合图像显示、人机交互与数据通信技术，实现视力检测的自动化、智能化和数字化。研究详细阐述了整体架构，完成了硬件模块选型与软件算法开发，重点突破视标动态生成、检测距离自适应校准、结果自动判读等关键技术。实验表明，该设备可覆盖 0.1 至 2.0 全量程视力检测，误差控制在  $\pm 0.1$  以内，支持检测数据实时存储与远程上传，显著提升检测效率与准确性，有效减少人为干扰。本成果丰富了智能视力检测设备的设计理论，为眼健康筛查装备的技术升级提供了可行路径，具有良好的临床应用前景与社会价值。

**【关键词】**：嵌入式系统；智能电子视力表；视标生成；自动校准；视力检测；数据管理

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.031

## 1 引言

眼健康是国民健康的重要基础。随着电子产品普及，视力问题高发且日趋低龄化，视力检测作为眼病早筛的关键手段，其重要性日益突出。然而，当前主流检测方法仍依赖纸质视力表与人工操作，存在明显不足：结果易受环境光照、操作者经验及受检者配合度影响，准确性难以保证；流程繁琐、效率低下，难以满足大规模筛查需求；数据依赖人工记录，不利于建立连续、可追溯的眼健康档案。

嵌入式系统凭借体积小、功耗低、响应快和稳定性高的优势，为构建便携式智能视力检测终端提供了理想技术路径。现有电子视力表虽有一定发展，但仍普遍存在视标精度不足、检测距离需人工设定、缺乏自适应校准、判读算法容错性弱、数据管理孤立等问题。

针对上述问题，本文开展基于嵌入式系统的智能电子视力表设计与实现，重点突破视标精准生成、距离自适应校准、智能结果判读与数据互联互通等关键技术，全面提升系统的准确性、实用性与智能化水平，为眼健康筛查提供可靠、可推广的技术方案。

## 2 相关技术基础

本章概述智能电子视力表设计与实现所依托的关键技术体系，涵盖作为核心平台的嵌入式系统、指导系统设计的视力检测标准与原理，以及实现精准、友好交互所涉及的图像处理、显示与人机交互等具体技术。

### 2.1 嵌入式系统：系统的硬件与软件基石

嵌入式系统是专用、可裁剪的计算机系统，以其高可靠性、低功耗和紧凑体积成为本设计的理想平台。其硬件核心在于处理器的选型：ARM 架构处理器在性能、功耗与丰富外设接口上取得良好平衡，适合处理视标生成、多任务调度等复杂计算；MCU(微控制器)成本与功耗极低，适用于简单控制场景；FPGA

(现场可编程门阵列)则凭借并行处理优势，适合高速图像生成与信号处理。软件层面，嵌入式操作系统为应用程序提供资源管理与调度服务。其中，嵌入式 Linux 系统开源、稳定，支持多任务、文件系统及网络协议栈，适用于需要复杂数据管理和网络通信的智能设备；而 FreeRTOS 等实时操作系统则以其极致的轻量级和确定性响应，适用于对时序要求极为苛刻的控制任务。

### 2.2 视力检测标准与核心原理

系统的设计必须严格遵循科学的视力检测原理与国家标准。我国普遍采用《国际标准对数视力表》，其视标(如 E 字、C 字)大小按几何级数(比率约 1.259)规律设计，采用 5 分记录法。检测的核心是评估人眼能分辨的最小视角，其准确性取决于对多项参数的精确控制：视标尺寸必须严格对应于标准视角；视标方向应随机呈现以避免记忆效应；标准检测距离通常为 5 米，在空间受限时可利用镜面反射原理等效实现；环境照度需稳定在 300-500 勒克斯的推荐范围内。智能电子视力表正是通过嵌入式技术实现对上述参数的自动化、高精度控制，从而保障检测结果的科学性与可比性。

### 2.3 图像处理与交互通信

精准的视标呈现依赖于显示与图像生成技术。OLED 屏幕因其高对比度和快速响应，能显著提升视标清晰度。视标生成采用矢量图形技术，支持无损缩放以适应任意视力等级。人机交互方面，实体按键或遥控器操作简单可靠，适用性广；数据通信则采用 USB 与 Wi-Fi 相结合的方式，兼顾本地传输稳定性与远程上传的便捷性，以支持高效的数据管理。

## 3 智能电子视力表系统架构设计

本系统软件基于嵌入式 Linux 平台，采用模块化设计，确保实时性、稳定性与可维护性。各模块通过清晰接口协同工作，实现智能化视力检测。

### 3.1 核心功能模块

系统初始化模块负责启动时硬件驱动加载与参数配置。视标生成模块依据国标动态渲染 E/C 字等视标，并实时调整其大小、方向与对比度。流程控制模块作为中枢，协调从参数设置到结果输出的全过程，支持根据反馈动态调整视标序列的自适应逻辑。结果判读模块依据算法模型自动分析反馈并判定视力等级。

### 3.2 环境自适应与交互

距离校准模块通过测距数据动态校准视标显示尺寸，确保任意有效距离下视角均等效于标准 5 米视角。光照调节模块依据环境光传感器数据自动调节屏幕亮度，维持标准检测照度。人机交互模块提供医护端（触摸屏/按键）与受检端（无线遥控器）双界面，确保操作直观高效。

### 3.3 数据管理与系统调度

数据管理模块实现检测记录的本地存储、查询与备份。通信模块支持有线（USB）与无线（Wi-Fi）方式，将加密数据上传至健康管理平台。系统采用基于 Linux 的多任务调度机制，高优先级保障流程控制、结果判读等实时任务，低优先级处理数据存储等后台作业，兼顾响应速度与系统效率。

## 4 硬件系统设计与实现

智能电子视力表的硬件系统采用模块化设计，以高性能嵌入式处理器为核心，集成显示、交互、传感、存储、通信与电源管理等功能单元，旨在实现精准、稳定且适应性强的视力检测功能。

### 4.1 核心处理与交互单元设计

本系统的核心控制模块采用基于 ARM Cortex-A 系列的嵌入式处理器，其强大的运算能力和丰富的外设接口为视标实时渲染、多任务调度及模块协同提供了高效支持。该模块配置了 DDR3 内存以确保系统流畅运行，并采用 eMMC 闪存存储操作系统、应用程序及检测数据。电源电路通过高精度 DC-DC 转换器提供多路稳压输出，配合复位与时钟电路，保障了系统启动与运行的稳定性。

人机交互模块分为医护端与受检端。医护端采用电容式触摸屏结合实体按键的设计，兼顾参数设置的便捷性与紧急操作的安全性。受检端则配备专用的 2.4G 无线遥控器，其四向按键与视标方向对应，通信距离覆盖标准检测范围，便于受检者轻松反馈。

### 4.2 环境感知与自适应单元设计

为保障检测条件标准化，系统集成了高精度环境感知模块。距离检测采用红外测距传感器，其测量范围覆盖 0.1 至 10 米，主控芯片依据实时距离数据动态校准视标显示尺寸，确保在任何有效距离内视标视角均等效于 5 米标准值。光照调节模

块则通过环境光传感器持续监测环境照度，并自动调节显示屏的 PWM 调光电路，使屏幕亮度始终维持在 300-500 勒克斯的最佳识别范围内，有效抵消环境光干扰。

### 4.3 数据存储与通信单元设计

系统采用 eMMC 内置存储与 SD 卡扩展存储相结合的方式。eMMC 保障系统核心数据与记录的可靠存储，而可热插拔的 SD 卡则为大批量检测数据的离线导出与备份提供了便利。通信模块提供有线与无线双模式：USB 2.0 接口用于高速本地数据传输与调试；Wi-Fi 模块支持检测数据加密后无线上传至云端健康管理平台，实现数据的远程同步与管理。

### 4.4 电源管理与显示单元设计

电源模块设计兼顾灵活性与可靠性，支持宽电压输入的 AC-DC 适配器供电与锂电池组供电两种模式，以适应固定与移动筛查场景。内部集成多路电压转换、锂电池充电管理及过压过流保护电路，确保为各模块提供纯净、稳定的电力供应。显示模块选用高分辨率 OLED 屏幕，凭借其自发光、高对比度与快速响应的特性，确保视标呈现极为清晰。屏幕通过 MIPI DSI 高速接口与主控连接，在提供充足带宽的同时简化了布线。

## 5 软件系统设计与实现

智能电子视力表的软件系统基于嵌入式 Linux 平台，采用模块化设计实现各核心功能。本章节详细阐述系统初始化、视标生成、检测流程控制、结果判读以及数据管理与通信等关键模块的具体设计与实现。

### 5.1 系统初始化与视标生成

系统启动后，初始化模块首先执行，完成硬件驱动加载、外设检测、文件系统挂载及内存管理配置，并读取默认检测参数，为后续模块运行奠定稳定基础。初始化异常时，系统将通过界面与指示灯进行告警。

视标生成模块基于 OpenGL 矢量绘图技术实现。该模块依据国家标准的数学定义，精确、无失真地绘制 E 字、C 字等视标图形。每次呈现时，系统随机生成视标方向，并实时结合距离检测数据，通过视角计算公式动态调整其像素尺寸，确保在任何有效检测距离下视标的视角恒定，从而保证了检测的标准化与准确性。

### 5.2 检测流程与结果判读

检测过程的协调由流程控制模块负责，该模块采用状态机模型进行调度，涵盖待机、设置、进行、完成等阶段。系统提供自动与手动两种检测模式：自动模式下，系统依据预置算法，根据受检者反馈自动调整视标大小与序列，直至判定最终视力值；手动模式则由医护人员根据观察手动控制流程，适用于特殊人群。流程支持暂停、重测等灵活操作。

结果判读模块采用“多次验证与阈值判断”相结合的策略

以提升客观性。系统比对遥控器输入方向与视标实际方向，通常每级视标呈现三次，累计两次或以上正确即判定通过。模块内置了误操作过滤机制，能够识别并忽略抢答或连续异常输入，随后自动重显当前视标，从而有效排除偶然误差，确保判读结果的稳定可靠。

### 5.3 数据管理与通信

数据管理模块将每次检测的记录以结构化形式存储于本机 eMMC 存储中，并支持通过 SD 卡导出。系统提供历史记录查询、修改与删除功能。

通信模块提供 USB 有线与 WiFi 无线双通道数据传输能力。数据上传前进行分包与校验，失败时自动重传，确保可靠性。该模块不仅支持将检测数据加密后上传至云端健康管理平台，还允许上位机通过指令远程控制设备，实现参数配置、任务下发与数据调取，为集中化的设备运维与智慧医疗管理提供支撑。

## 6 系统测试与性能验证

为确保智能电子视力表各项设计指标达到预期，本章对系统进行了全面测试与性能验证。测试遵循模块化与整体性相结合的原则，涵盖了硬件功能、软件逻辑、检测精度及系统稳定性等多个维度。

### 6.1 测试环境与方案

测试在可控的实验室环境与模拟的实际应用场景中同步开展。实验室测试侧重于功能验证与参数精确校准，使用测距仪、标准光照计、示波器等仪器进行比对。实际场景测试则重点考察系统的实用性与环境适应性。测试设备包括系统原型机、标准对数视力表、上位机监控软件等，构建了完整的验证平台。

### 6.2 硬件与软件模块测试结果

硬件性能测试表明：核心控制模块运行稳定，供电与时钟信号精准；显示模块的 OLED 屏幕亮度可在 300-500 勒克斯范围内线性调节，视标显示清晰；距离检测模块在 0.5-5 米范围内的测量误差  $\leq \pm 2$  厘米，满足视角校准要求；通信模块有线（USB）与无线（Wi-Fi）传输稳定，数据包成功率达 100%。

软件功能测试显示：系统初始化正常，各软件模块启动与协同无误；视标生成模块能按标准随机生成不同方向、大小的 E/C 视标，且距离自适应缩放功能准确有效；检测流程控制模

块在自动与手动模式下切换流畅，状态逻辑正确；结果判读模块能有效过滤抢答等误操作，判读策略可靠；数据管理与通信功能完整，支持本地操作与远程上传。

### 6.3 综合性能验证与优化展望

通过与标准视力表进行双盲对比测试，本系统检测结果的误差控制在  $\pm 0.1$  以内，满足临床精度要求。在为期 24 小时的连续性压力测试中，系统运行稳定，未出现死机、卡顿或数据错误，证明了其良好的可靠性。

测试也揭示了可进一步优化的方向：一是在户外强光下屏幕对比度有待提升，可通过采用更高亮度的 OLED 屏幕改进；二是面对极快速反馈时系统响应存在毫秒级延迟，计划通过优化任务调度优先级加以改善；三是数据管理界面可进一步简化，以提升老年用户的友好性。这些优化将使系统在准确性、实时性与易用性上达到更高水平。

## 7 结论与展望

### 7.1 研究结论

本文完成了基于嵌入式系统的智能电子视力表的设计与实现。系统采用分层架构，硬件以 ARM Cortex-A 处理器为核心，集成显示、人机交互、距离检测、光照调节、存储与通信模块；软件基于嵌入式 Linux 平台，实现了视标生成、流程控制、结果判读与数据管理等核心功能。关键技术取得突破：采用矢量图形技术实现高精度、无失真视标显示；结合红外测距与动态缩放算法，实现检测距离自适应校准；通过“多次验证+阈值判断”策略提升判读鲁棒性；构建本地存储与远程传输融合的数据机制，增强数据可追溯性与共享能力。测试表明，系统支持 0.1 至 2.0 全量程检测，误差  $\leq \pm 0.1$ ，距离偏差  $\leq \pm 2$  厘米，数据传输成功率 100%，连续运行 24 小时稳定可靠，显著优于传统纸质视力表。

### 7.2 未来展望

未来工作将聚焦四方面：一是拓展功能，集成屈光、色觉等筛查，结合 AI 实现早期预警；二是优化交互，引入人脸识别与语音控制，提升特殊人群适用性；三是构建云端眼健康平台，实现数据跨机构共享与大数据分析；四是推进硬件小型化与低功耗设计，发展可穿戴、便携式设备，支持家庭与流动场景应用。同时，加强产学研合作，推动产品标准化、低成本化，加速在医疗、教育和社区的普及，为全民眼健康提供智能化技术支持。

## 参考文献：

- [1] 张蓓蕾,梅丽丽,徐菁菁,等.智能视力表测量视力和理论视力的比较[J].中华眼视光学与视觉科学杂志(中英文),2025,27(4):275-280.
- [2] 项毅帆,陈晴晶,胡伟玲,等.基于移动终端的视力智能检查和管理系统的研发及临床应用价值评估[J].中华实验眼科杂志.2021,(9).
- [3] 曹苏琪,赵宇锴,侯方,等.视力表的历史、现状与发展趋势[J].中华眼视光学与视觉科学杂志.2021,23(10).
- [4] 石宝勇,王子秋,马荟.视力表投影仪亮度均匀性计量检定方法研究[J].质量与认证,2025(7):101-103.