

# 基于多传感器融合的婴儿床环境智能调控系统设计

唐渝<sup>1,2\*</sup>, 庞宏鑫<sup>1,3</sup>, 钱洪欣<sup>1,4#</sup>, 彭书翰<sup>1</sup>, 梁东冬<sup>1</sup>, 刘金龙<sup>1</sup>, 张康<sup>1</sup>, 税常钊<sup>1</sup>,  
李浩<sup>1</sup>, 甄小琼<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都

<sup>2</sup>成都巨波雷达科技有限公司, 四川 成都

<sup>3</sup>四川师范大学无线传感器网络四川省高校重点实验室, 四川 成都

<sup>4</sup>贵州省通信产业服务有限公司, 贵州 贵阳

收稿日期: 2026年3月24日; 录用日期: 2026年4月22日; 发布日期: 2026年4月30日

## 摘要

本文设计并实现了一种基于STM32双核微控制器与ESP32-S3无线通信模块的智能婴儿床原型系统。系统集成温湿度、光照及摄像头等多类传感器, 采用自适应算法实现环境参数的智能调节, 并支持远程视频监控与数据可视化。硬件设计上采用STM32H743与STM32F407协同处理, 配合BQ25895电源管理及多路稳压电路, 实现了高集成度与低功耗运行。软件层面实现了基于CRC校验的温湿度采集、双核协同的灯光调节算法, 以及远程视频流传输。实验表明, 系统温湿度检测平均误差在 $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ 与 $\pm 3\% \text{RH}$ 以内, 远程视频延迟在0.5~1秒之间, 基本满足实时监护需求。研究进一步展望了多模态感知、AI决策与家居联动的未来发展方向, 为智能婴儿床的系统构建提供了可行的技术方案与参考实现。

## 关键词

智能婴儿床, STM32, ESP32, 温湿度调节, 远程监控

# Design of an Intelligent Environment Regulation System for Cribs Based on Multi-Sensor Fusion

Yu Tang<sup>1,2\*</sup>, Hongxin Pang<sup>1,3</sup>, Hongxin Qian<sup>1,4#</sup>, Shuhan Peng<sup>1</sup>, Dongdong Liang<sup>1</sup>,  
Jinlong Liu<sup>1</sup>, Kang Zhang<sup>1</sup>, Changzhao Shui<sup>1</sup>, Hao Li<sup>1</sup>, Xiaoqiong Zhen<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 唐渝, 庞宏鑫, 钱洪欣, 彭书翰, 梁东冬, 刘金龙, 张康, 税常钊, 李浩, 甄小琼. 基于多传感器融合的婴儿床环境智能调控系统设计[J]. 计算机科学与应用, 2026, 16(4): 471-485. DOI: 10.12677/csa.2026.164146

<sup>2</sup>Chengdu Genbo Radar Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan<sup>3</sup>Sichuan Provincial Key Laboratory of Wireless Sensor Network, Sichuan Normal University, Chengdu Sichuan<sup>4</sup>Guizhou Communication Industry Service Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Received: March 24, 2026; accepted: April 22, 2026; published: April 30, 2026

## Abstract

This paper designs and implements a smart crib prototype system based on an STM32 dual-core microcontroller and an ESP32-S3 wireless communication module. The system integrates multiple types of sensors such as temperature, humidity, ambient light, and a camera. It employs adaptive algorithms for intelligent regulation of environmental parameters and supports remote video monitoring and data visualization. In terms of hardware design, the system utilizes STM32H743 and STM32F407 for collaborative processing, combined with the BQ25895 power management chip and multi-channel voltage regulation circuits, achieving high integration and low-power operation. On the software side, it implements temperature and humidity data acquisition based on CRC checks, a dual-core collaborative lighting control algorithm, and remote video stream transmission. Experiments show that the system's average temperature and humidity detection errors are within  $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$  and  $\pm 3\%\text{RH}$ , respectively, and the remote video delay is between 0.5 and 1 second, which basically meets the requirements for real-time monitoring. The study further outlines future development directions including multi-modal sensing, AI-based decision-making, and smart home integration, providing a feasible technical solution and reference implementation for the construction of smart crib systems.

## Keywords

Smart Crib, STM32, ESP32, Temperature and Humidity Regulation, Remote Monitoring

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

## 1. 引言

随着物联网、嵌入式系统及人工智能技术的快速发展，智慧家居正逐步渗透至育儿领域，推动传统婴儿床向智能化、网络化、人性化方向演进[1]。现代家庭对婴幼儿照护的精细化与安全性提出了更高要求，不仅需要实时监测婴儿的睡眠状态与环境参数，更期望通过智能调控为婴儿营造舒适、健康的成长环境。因此，集成环境感知、自适应调节、远程监护与智能交互功能的智能婴儿床系统，已成为智慧育儿场景中备受关注的研究与应用方向[2]。

当前，智能婴儿床系统多基于单一传感器或简单控制策略，在环境参数综合感知、多模态数据融合、低延迟远程监控及系统集成度方面仍存在提升空间[3][4]。特别是在实时性、可靠性、能效比及用户体验等方面，尚未形成完整的技术体系与成熟的解决方案。因此，构建一套具备高集成度、强实时性、低功耗且支持远程交互的智能婴儿床系统，具有重要的理论研究价值与实际应用意义[5]。

本研究基于 STM32H743 与 STM32F407 双核微控制器架构，结合 ESP32-S3 无线通信模块、多类型传感器及高效电源管理方案，设计并实现了一套智能婴儿床原型系统。系统通过温湿度传感器、光照传感器、摄像头等采集环境与图像信息，利用自适应算法实现环境参数的智能调节，并借助 Wi-Fi 网络实

现远程视频监控与数据可视化。本文围绕系统的硬件设计、控制算法、软件实现及实验验证展开论述，旨在为智能婴儿床的系统构建与功能优化提供一套可行的技术方案与实现参考。

## 2. 相关理论技术

### 2.1. 嵌入式系统与实时操作系统

嵌入式系统作为一种专用计算机系统，广泛应用于物联网终端设备中。其核心特征包括低功耗、高可靠性、实时响应及高度集成化。本系统采用基于 ARM Cortex-M 内核的 STM32 系列微控制器，其具备丰富的外设接口与较强的实时处理能力，适用于多传感器数据采集与复杂控制任务。

### 2.2. 传感器技术与数据融合

传感器是智能婴儿床系统感知环境信息的关键组成部分。系统采用的 SHT30 温湿度传感器基于电容式湿度传感与带隙温度传感原理，通过 I<sup>2</sup>C 接口输出数字信号，具有高精度与低功耗特性。BH1750 光照传感器则通过内置光电二极管与 ADC 转换，实现环境光照强度的数字化输出。

多传感器数据融合技术通过对来自不同传感器的信息进行协同处理，可提高系统对环境状态判断的准确性与鲁棒性。常用的融合方法包括加权平均、卡尔曼滤波及基于规则的决策融合，本系统采用实时校验与阈值判断相结合的方式，实现对温湿度、光照等环境参数的综合评估与调控。

### 2.3. 无线通信与网络协议

系统采用 ESP32-S3 模块实现 Wi-Fi 通信，其支持 IEEE 802.11 b/g/n 协议，具备较强的无线传输能力与低功耗特性。在应用层，系统基于 TCP/IP 协议栈实现数据传输，可采用 HTTP/HTTPS 或 MQTT 协议与云平台或移动端进行通信，支持远程监控与控制指令的下发。

图像传输采用 RTP/RTSP 流媒体协议，实现实时视频流的低延迟传输[6]。为确保通信安全，系统支持 WPA2/WPA3 加密及 TLS/SSL 传输层安全协议，防止数据泄露与非法访问。

### 2.4. 电源管理与低功耗设计

智能婴儿床系统需具备长时间的稳定运行能力，电源管理方案尤为关键。BQ25895 芯片支持动态电源路径管理，可根据输入电源状态自动切换供电模式，实现系统供电与电池充电的智能管理。TPS63060 升压芯片与 TPS62821 降压芯片则通过高频开关调制，提供稳定的电压输出，满足不同模块的供电需求。

低功耗设计方面，系统通过传感器供电控制、通信模块睡眠唤醒及 CPU 动态调频等技术，有效降低待机与运行功耗，延长系统续航时间。

## 3. 系统架构与硬件设计

### 3.1. 主控与通信模块

STM32H743 系列微控制器以其卓越的计算效能及数据处理能力，可显著增强智能婴儿床系统的运行表现。该系统需实时采集并分析来自温湿度传感器、摄像头图像、蓝牙通信以及触摸屏交互等多路异构信息。凭借该芯片的高性能核心，系统能够实现多任务并行处理的快速响应与稳定运行，充分满足复杂场景下对实时性与效率的严苛要求。

同时，此 MCU 具备丰富的外设接口，如 USART、SPI、I<sup>2</sup>C 等多种通信接口。USART 可用于与 ESP32-S3 模块通信实现 Wi-Fi 功能；I<sup>2</sup>C 接口能方便地连接温湿度传感器等设备，实现数据的快速传输与交互；GPIO 端口数量丰富且可灵活配置，能连接各类传感器、执行器，满足系统多样化的控制需求。



如图 1 为 ESP32, PIN\_5 (ESP\_BOOT0)引脚用于设置芯片的启动模式, 当电平状态不同时, 芯片会进入不同的启动模式, 如正常启动或下载模式等。

众多 ESP\_IO\_XX 引脚可配置为不同功能, 用于通信。ESP\_IO\_TX 和 ESP\_IO\_RX 引脚、ESP\_IO\_1 和 ESP\_IO\_2 与 STM32H743 进行串口通信, 实现双向数据交互, 用于传输控制指令或接收反馈信息等; ESP\_USB\_D+和 ESP\_USB\_D-引脚连接 USB 设备, 实现数据传输、充电等功能, 便于与主机设备通信和交互; 部分 ESP\_IO\_XX 引脚连接摄像头实现 Wi-Fi 互联通信控制。

见图 2, STM32F401 集成了丰富通信接口, USART 可方便与外部设备通信, 用于接收控制指令; 配备充足 GPIO 引脚, 可灵活配置为输入或输出, 满足电机控制(如输出 PWM 信号控制转速、电平信号控制转向)。PIN\_45 与 PIN\_46 与光线传感器通信, 发送特定数据实现控制灯串的亮度参数, PIN\_11 和 PIN\_15 用于输出 PWM 信号控制灯光参数; 电机的三相控制信号(FOC\_CH1-FOC\_CH3)由 PIN\_29-31 输出的 PWM 信号进行调制。

### 3.2. 多核协同任务调度与通信机制

为充分发挥 STM32H743 与 STM32F407 的异构计算优势, 实现高性能数据处理与高实时性控制的协同, 本系统设计了一套层次化的多核协同任务调度与通信机制。该机制以任务特性与实时需求为依据进行核间分工, 通过混合通信协议保障数据交互的可靠与高效, 并依托实时操作系统实现资源的精准调度与实时性保障, 从而确保系统在复杂多任务环境下的稳定、流畅运行。

任务划分依据与核间分工基于两核的架构特点, 系统进行了明确的任务划分。STM32H743 凭借其高性能 Cortex-M7 内核及丰富存储资源, 主要负责计算密集、逻辑复杂的上层应用任务, 具体包括: 多传感器(温湿度、光照、摄像头)数据的采集融合与智能决策分析; 视频流的采集、压缩(JPEG/H.264)与预处理; 基于 LVGL 的图形用户界面渲染及触摸交互处理; 以及通过 ESP32-S3 实现的网络协议栈管理、远程通信调度及云端数据同步。STM32F407 则依托其出色的外设控制能力和实时性, 专注于执行层的高实时性控制任务, 主要包括: 用于环境调节的 PWM 信号生成与执行机构(如调光 LED、通风风扇、加热器)的精准控制; 各类传感器的定时驱动与原始数据读取; 以及系统电源状态监控与动态功耗管理。此种分工策略使得高性能核专注于智能决策与交互, 实时控制核确保执行响应的精确与及时, 实现了资源的最优配置。

双核间高效通信协议设计为实现双核间快速、可靠的数据与指令交互, 系统设计了基于“共享内存 + 消息队列 + 中断同步”的混合通信协议。对于更新频率高、数据量小的状态信息(如实时传感器读数、控制标志位), 在共享的 RAM 区域开辟了结构化数据区, 并通过互斥锁(Mutex)机制确保访问的原子性, 避免数据竞争。对于事件通知、配置命令及复杂数据包(如图像帧元数据), 则采用环形缓冲消息队列实现异步通信, 消息结构包含类型、长度、校验和及负载, 保证了传输的完整性与顺序性。为进一步降低通信延迟, 系统利用芯片提供的硬件信号量(HSEM)或核间中断控制器(IPCC)实现事件驱动的即时通知, 当一方任务完成或产生紧急事件(如异常告警)时, 可立即触发对方中断, 实现微秒级的响应。

实时性保障与动态调度策略系统在双核上均搭载了 FreeRTOS 实时操作系统, 构建了独立的实时调度环境。首先, 采用基于优先级的抢占式调度, 为每个任务静态分配优先级, 确保关键任务(如电机控制、视频帧采集)能够及时抢占 CPU 资源。其次, 对具有严格时序要求的任务(如控制周期、视频编码帧截止时间), 实施了最坏执行时间(WCET)预估与截止时间监控, 通过看门狗任务进行超时检测与恢复。此外, 系统运行时动态监控两核的 CPU 利用率与任务队列深度, 若检测到负载不均(如 H7 核因视频编码负载过高), 可动态迁移部分轻量化任务或调整算法参数, 实现负载均衡, 避免单核瓶颈影响系统整体实时性。通过上述多层次调度策略, 系统在保障功能完整性的同时, 显著提升了任务响应的确定性、可靠性及整

体资源利用效率。

### 3.3. 电源与信号管理

BQ25895 包括电源路径管理、电池保护和通信功能，在有外部电源时，优先为系统供电并同时为电池充电；在无外部电源时，由电池为系统供电。在充电过程中，芯片会根据电池的状态(如电压、温度等)自动调整充电参数。从 USB\_VBUS 获取电力，PIN\_2 与 PIN\_3 为 USB 数据线，进行充电检测与协商；通过 PIN\_11 (TS)温度检测电压输入，REGN 脚与 R9 形成分压形成温度窗口，用于温度传感，实现过温保护；PIN\_19 (SW)为开关电源电路，调整输出电压，为系统供电；PIN\_15 (SYS)在电池充电的情况下，当电池电压低于最小系统电压时，开关模式转换器控制高于最小系统电压，仍可为系统供电，实现电源路径管理，保证系统运行，见图 3。

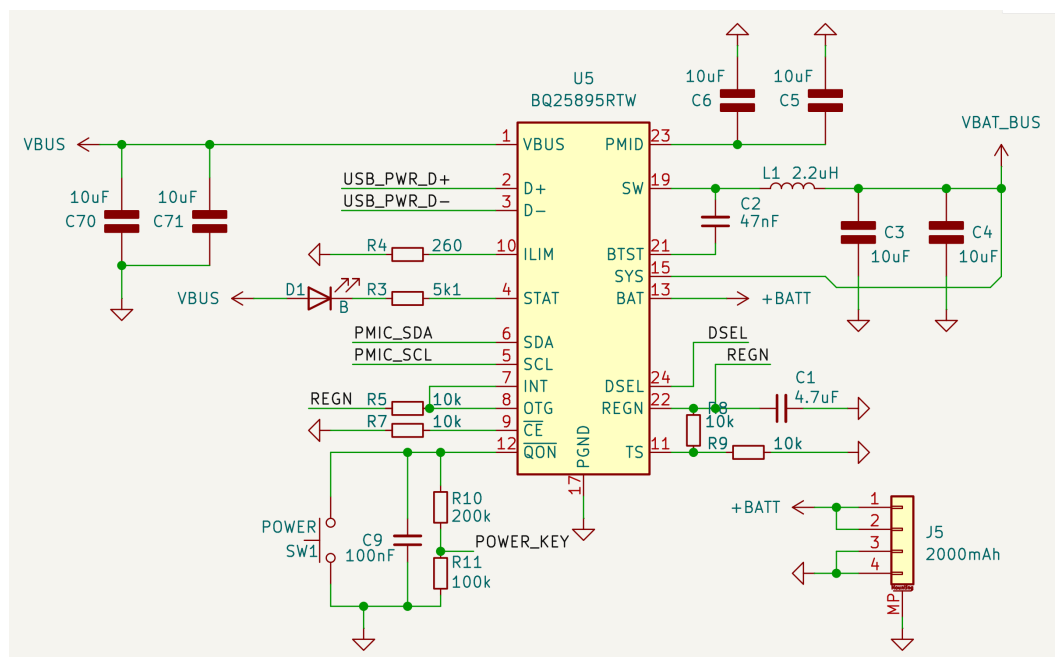


Figure 3. BQ25895 power management chip

图 3. BQ25895 电源管理芯片

如图 4，从电池输出的 VBAT\_BUS 电源连接到 PIN\_2 (VIN)，为芯片提供输入电压，PIN\_3 (EN)接收有效高电平使能芯片工作，若为低电平，则芯片处于低功耗关闭状态，通过对 EN 电平的控制，可灵活开启或关闭升压功能。芯片内部集成了开关电路，通过高频开关动作，将输入的直流电压转换为高频脉冲电压。

输出电压经过由 R10、R12 组成的分压电路后，反馈到 FB 检测，芯片将反馈电压与内部参考电压进行比较，根据比较结果自动调整开关电路的工作频率和占空比，从而精确控制输出电压，使其稳定在设定值 +3.3 V。

如图 5，TPS62821 内部集成了开关电路，会按照一定的频率导通和截止。当内部开关导通时，输入电压通过内部电路施加到 PIN\_6 (SW)；当开关截止时，SW 引脚的电压会发生变化，通过这种高频的开关动作，将输入的直流电压转换为高频脉冲电压。R46 和 R47 组成分压电路，将输出电压按一定比例分压后反馈到 FB 引脚使其稳定在目标值 1.8 V，给 STM32H743 内核 LDO 稳压器供电  $V_{DDLDO}$ 。

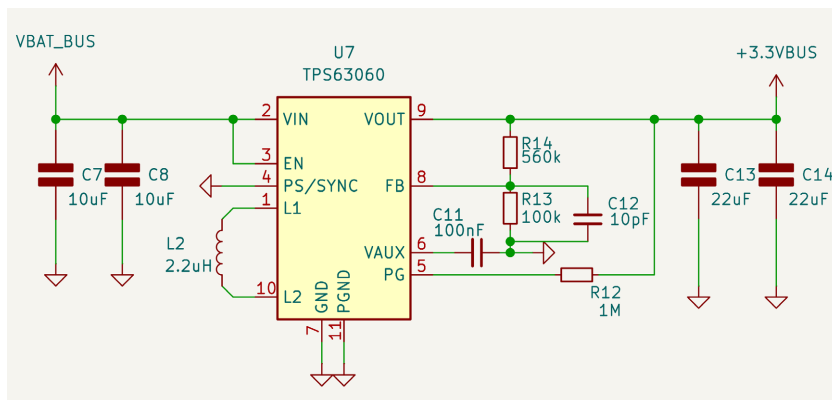


Figure 4. TPS63060 automatic boost chip

图 4. TPS63060 自动升压芯片

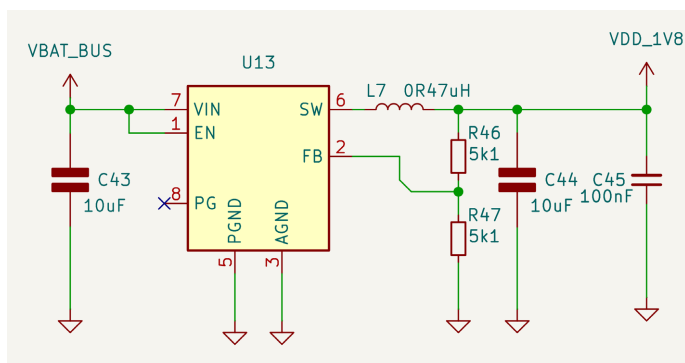


Figure 5. TPS62821 power buck converter circuit

图 5. 电源降压转换器电路 TPS62821

### 3.4. 传感器模块

通过 SENSOR\_POWER 信号控制 AO3401A 的导通与截止, 来决定是否给 SHT30 温湿度传感器供电, 当需要传感器工作时, SENSOR\_POWER 置高, Q4 导通, 传感器得电; 不需要工作时, SENSOR\_POWER 置低, Q4 截止, 传感器断电, 可降低系统功耗。传感器工作时, 通过 SDA 和 SCL 引脚与主控 STM32 进行 I2C 通信, 在时钟信号 SCL 同步下, 通过 SDA 线读写传感器内部寄存器数据, 获取温湿度测量值等信息。见图 6。

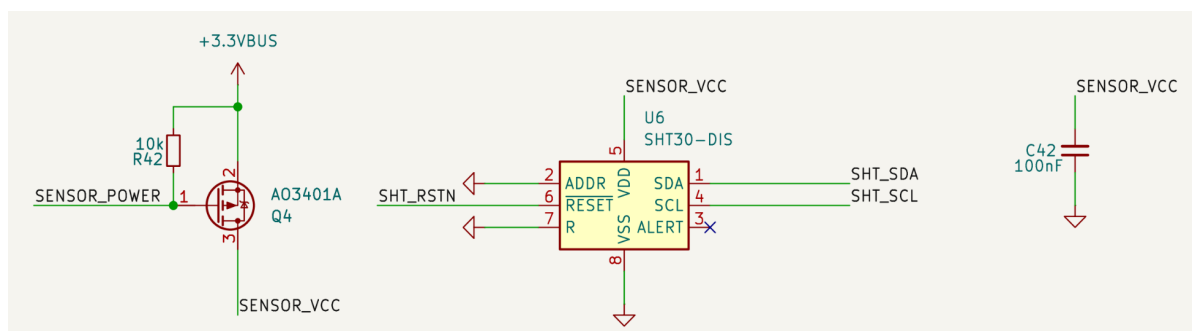


Figure 6. SHT30 temperature and humidity detection chip

图 6. 温湿度检测芯片 SHT30

### 3.5. USB\_HUB 模块

CH334R 芯片是核心信号处理元件,上行端口支持 USB 2.0 高速和全速。USB\_BUS\_D+和 USB\_BUS\_D-是外部输入 USB 差分数据信号,分别连接到芯片的 PIN-10 (DPU)和 PIN\_9 (DMU)。CH334R 对输入的 USB 信号处理,后通过 PIN\_5-8 (DM1-DM4)、PIN\_1-4 (DP1-DP4)输出多路 USB 差分信号,连接到 USB\_HUB 相关线路(USB\_HUB\_D1-D4+/-),实现将一路 USB 信号扩展或转换为 4 路输出,从而使整个系统可以通信交互。见图 7。

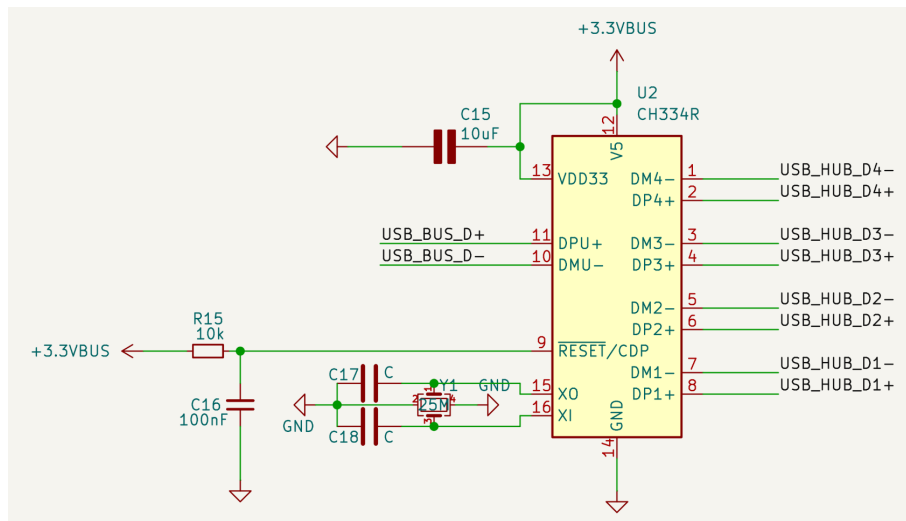


Figure 7. CH334R 4-port USB-HUB controller chip

图 7. 4 端口 USB-HUB 控制器芯片 CH334R

### 3.6. 智能灯控模块

SCL 和 SDA 引脚用于与主控 STM32F401 进行 I2C 通信,传输传感器采集到的光线数据及接收主控设备的指令; ADDR 引脚设置芯片地址,方便主控设备区分和访问不同传感器。

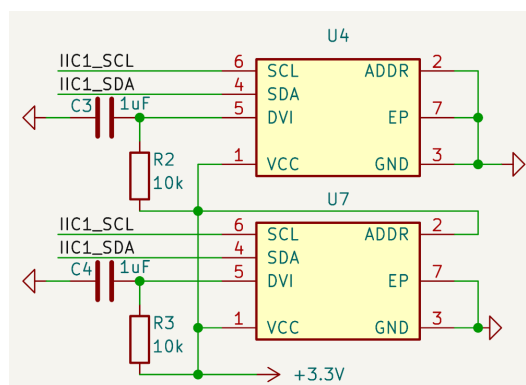


Figure 8. BH1750 ambient light sensor

图 8. 光照传感器 BH1750

工作原理为传感器上电,获取 3.3 V 电源开始工作,此时 I2C 总线空闲, IIC1\_SCL 和 IIC1\_SDA 因上拉电阻保持高电平,主控通过 I2C 总线发送起始信号(SCL 高电平时, SDA 由高变低),然后发送包含

传感器地址和读写控制位的寻址字节。传感器根据自身 ADDR 引脚设置的地址，判断是否为目标设备。若地址匹配，传感器在第 9 个时钟周期拉低 SDA 进行应答(ACK)，表示准备好接收或发送数据。见图 8。

如图 9，二极管 D1-D6 设计是为了防止电源反接，确保电流只能按照正确方向流动，保护后续电路元件不被反向电压损坏。AO3400 主要用于控制 LED 灯串的通断及亮度调节；对于开关控制，是通过输入的 PWM 信号控制栅极。当 PWM 信号为高电平且高于阈值电压时，AO3400 导通，LED 灯串点亮；当 PWM 信号为低电平时，AO3400 截止，LED 灯串熄灭；对于亮度调节，是利用 PWM 的占空比来实现，占空比越大，单位时间内 AO3400 导通时间越长，LED 灯串获得的平均电流越大，亮度越高；反之，亮度越低。由 W\_PWM 和 Y\_PWM 信号控制，进而控制白光和暖光 LED 灯串的亮灭及亮度。

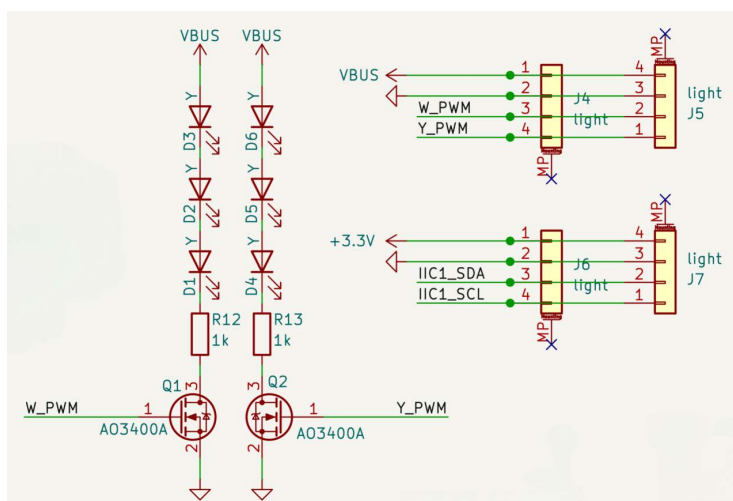


Figure 9. LED driver circuit  
图 9. 灯光驱动电路

### 3.7. 远程监控模块

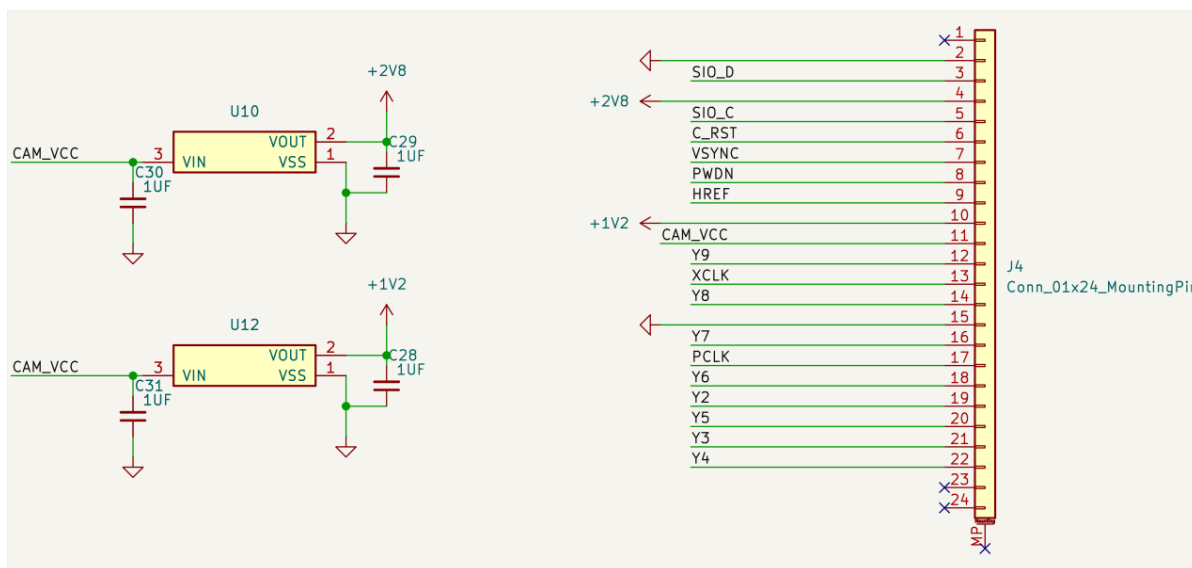


Figure 10. OV2640 camera schematic design diagram  
图 10. 摄像头 OV2640 原理设计图

摄像头采用多个不同电压输出的降压芯片，是因摄像头内部不同电路模块(如传感器模块、数字处理模块等)需要不同的供电电压。设计多种控制和数据传输信号引脚，满足摄像头与主控芯片之间复杂的通信需求，图像数据引脚(Y9-Y4)采用并行传输方式，可提高数据传输速率，满足实时图像采集和处理的需求；串行通信引脚(SIO\_D 和 SIO\_C)用于配置摄像头参数，如分辨率、帧率、曝光时间等；复位引脚(C\_RST)可在必要时将摄像头复位，保证其工作状态正常；同步信号引脚(VSYNC 和 HREF)以及像素时钟引脚(PCLK)共同确保图像数据能被主控芯片准确接收和处理。见图 10。

## 4. 智能调控算法与实现

### 4.1. 温湿度自适应调节

该流程是实现从传感器中获取温度和湿度值，并进行 CRC 校验以确保数据的正确性，最后将读取处理后的温湿度值实时显示在终端 GUI 界面中。

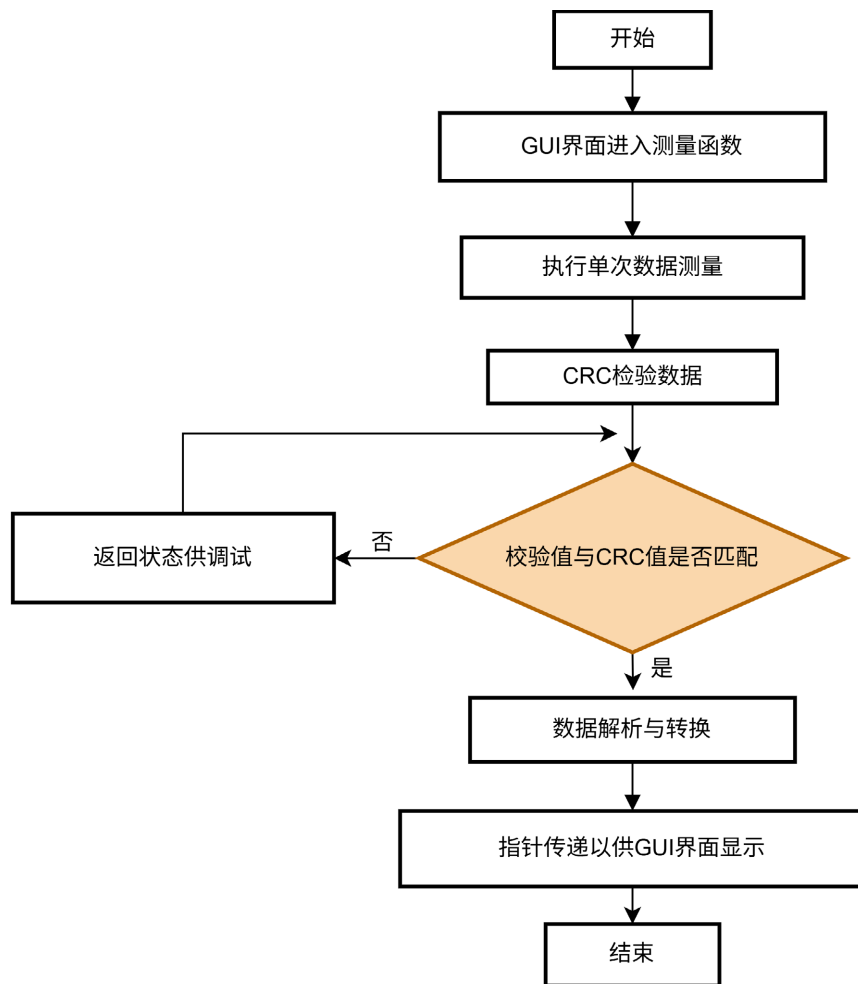


Figure 11. Temperature and humidity data acquisition algorithm flowchart  
图 11. 采集温湿度算法流程图

首先，定义缓冲区 buf 存储从传感器读取的原始数据，rv 记录测量函数返回状态，crc 用于校验计算。在确认温湿度数据指针有效后，启动 SHT30 单次测量，并将结果存入 buf。随后分别对温度数据(buf [0]、

buf [1])和湿度数据(buf [3]、buf [4])进行 CRC 校验, 与传感器返回的校验值(buf [2]和 buf [5])进行比对, 确保数据无误后再进行解析。解析时, 温度值由 buf [0]和 buf [1]合并为 16 位无符号整数(高字节在前), 湿度值由 buf [3]和 buf [4]以相同方式合并。根据 SHT30 的特性, 温度和湿度值需要经过一定的公式转换, 温度转换如公式(2.1), 湿度转换如公式(2.2)。

$$T = -45 + 175 \times (\text{temp} / 65535) \quad (2.1)$$

temp 是自定义的用来存储温度的原始数据(16 位无符号整数), 该公式是根据 SHT30 的量程(-45°C 到 +130°C)推导的。

$$H = 100 \times (\text{humd} / 65535) \quad (2.2)$$

humd 是自定义的用来存储湿度的原始数据, 该公式是根据 SHT30 的量程(0%到 100%)推导的。

该流程通过 CRC 校验保障数据可靠性, 并在校验失败时通过返回值反馈错误, 确保系统能及时处理异常。最终, 转换后的温湿度数据传递至控制器进行进一步处理与显示。整体流程见图 11。

#### 单次读取数据

SHT30 单次测量的实现过程包括参数检查、命令发送、数据读取及错误处理。具体步骤如下:

首先, 函数接收用于存储测量结果的缓冲区指针 buf 及其大小 buf\_size, 并在确认 buf 有效后, 通过 sht30\_send\_cmd 发送测量启动指令。若指令发送失败(rv != 0), 则调用 sht30\_soft\_reset()对传感器进行软复位, 恢复其正常工作状态。之后, 利用 HAL\_I2C\_Master\_Receive 从 I2C 总线读取传感器返回的原始温湿度数据。

为确保数据的正确性, 对读取的温湿度数据分别进行 CRC 校验。校验算法以 0xFF 为初始值, 逐字节处理数据, 并通过位移与多项式 0x31 进行异或运算得到最终校验值, 与传感器返回的 CRC 字节进行比较。该算法在数据量较大时可能影响处理效率, 后续可通过查表法或条件提前终止等方式进行优化。

## 4.2. 光照感知与灯光控制

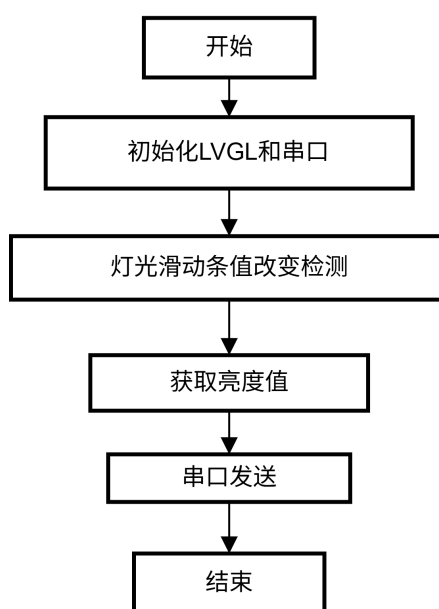


Figure 12. Terminal control flowchart for smart light control

图 12. 智能灯控的终端控制流程图

灯控的功能实现整体思路为 STM32F4 控制光照传感器和 LED, STM32H7 控制终端来调节灯光亮度。在 STM32H7 端, 构建 GUI 界面中添加控制白光和黄光亮度的滑动条, 当滑动条数值改变时, 通过串口将亮度数据发送给 STM32F4; 在 STM32F4 端借助串口接收来自 STM32H7 的亮度数据, 调节 PWM 输出, 从而控制白光和黄光的亮度。整个过程 STM32H7 和 STM32F4 的串口配置(波特率、数据位、停止位、校验位等)必须相同。

串口发送端(STM32H7), 在终端基于 LVGL 搭建好 GUI 环境和调节滑动条界面, 添加事件回调函数, 以 `lv_slider_get_value` 来获取手动调制滑动条的所需灯光值, 配置 USART1 串口以 `HAL_UART_Transmit` 函数将数据发送给接收端以便调节光照强度。见图 12。

串口接收端(STM32F4), 在 `HAL_UARTEx_RxEventCallback` 函数中, 对来自 STM32H7 串口数据进行解析; 根据数据的标识 `USART1_BUFF` 值, 提取对应的亮度值。根据提取的亮度值, 更新控制白光和黄光的定时器 TIM2 的比较值(CCR1 和 CCR2), 从而改变 PWM 占空比, 实现对灯光亮度的控制。见图 13。

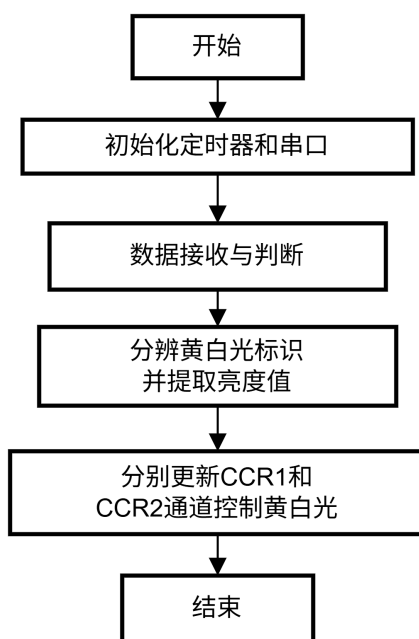


Figure 13. LED control terminal flowchart  
图 13. LED 控制端流程图

### 4.3. 远程监控与数据可视化

系统初始化阶段, 首先完成对 OV2640 摄像头模块的参数配置(如分辨率、帧率、图像格式), 并初始化 ESP32 主控芯片及外围串口等组件。随后, 系统尝试接入预设的 Wi-Fi 网络, 持续进行连接状态检测, 直至成功建立连接。连接成功后, 系统会禁用 Wi-Fi 睡眠模式以维持网络连接的长期稳定, 并启动内置的摄像头视频流服务器, 同时在本地日志或显示设备上输出其网络 IP 地址, 供用户访问。

进入核心工作循环后, OV2640 摄像头持续采集原始视频数据。ESP32 调用内置的图像信号处理器 (ISP) 及编码器对原始图像进行预处理与实时压缩。为适应物联网设备资源有限及网络环境多变的挑战, 系统实施了一套综合性的视频流传输优化策略:

受限带宽下的码率自适应机制: 系统实时监测网络吞吐量、往返时延(RTT)及丢包率。基于这些参数,

动态调整视频编码的输出码率与分辨率。例如,当检测到带宽下降时,算法会逐步降低帧率(如从 15 fps 降至 10 fps)或切换至更低的分辨率(如从 VGA 切换至 QVGA),优先保证视频流的连续性,避免因网络拥塞导致的卡顿或断流。

**高效视频压缩算法与性能平衡:**在压缩算法选择上,系统优先采用对嵌入式平台友好的 H.264 编码,其在压缩效率与计算复杂度之间取得了良好平衡。对于更高性能的 ESP32-S3 等型号,可评估支持 H.265 (HEVC)以进一步降低码率。同时,系统持续监控编码过程的 CPU 占用率,通过调整编码复杂度参数(如 GOP 结构、搜索范围)确保主控芯片有足够的资源处理图像识别等并发任务,防止系统过载。

**抗网络抖动与丢包的处理策略:**为应对不稳定的无线网络,系统在传输层和应用层采取了多重措施。包括:1) 前向纠错(FEC),在数据包中添加冗余信息,可在少量丢包时直接恢复;2) 选择性重传,针对关键帧(I 帧)或高优先级数据包请求重传;3) 客户端播放缓冲,通过增加数十至数百毫秒的缓冲区来平滑网络抖动引起的延迟波动;4) 优雅降质,在网络持续恶化时,主动暂时降低画面质量或转换为静态图片推送模式,维持基础的信息可获取性。

处理后的视频流通过 Wi-Fi 网络,经由 RTSP 或 WebSocket 等协议,稳定地推送至云端中转服务器或直接对接到指定的手机应用程序。用户可通过浏览器访问 Web 界面或打开专属 APP,实时观看流畅、延迟可控的视频画面,实现远程监控。

在用户交互层面,监控界面不仅提供实时视频的播放、暂停、本地截图与短片录制功能,还对所有视频数据按时间戳及事件标签进行自动化归档管理。用户可按日期或特定事件(如告警触发时刻)快速检索与回放历史录像。

结合运行在 ESP32 或云端的轻量级图像识别算法(如基于帧差法的运动检测或简单的表情/姿态分析),系统能够辨识婴儿的显著状态变化(如持续哭闹、大幅翻身)。一旦检测到预设的异常事件,系统将立即通过集成推送服务(如微信通知、APP 消息)向家长手机发送告警信息。

此外,为实现全方位的环境监测,监控界面以画中画或叠加字幕的形式,融合显示来自 SHT30 温湿度传感器及 BH1750 光照强度传感器的实时数据。从而构建了一个集实时视频、历史回溯、智能告警、环境感知于一体的综合监测视图,为用户提供了全面且直观的远程看护体验[7]。

## 5. 实验与结果分析

### 5.1. 温湿度检测功能

使用高精度温湿度仪器作为标准参考设备,在测试室内设置不同的温湿度组合,通过智能婴儿床的 SHT30 温湿度传感器进行测量,记录测量值并与标准值对比,测量 4 种情况,计算误差范围;结果如表 1 所示,平均误差为 $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$  (温度)和 $\pm 3\%$  RH (湿度)范围内。

**Table 1.** Real-time temperature and humidity test data  
**表 1.** 实时温湿度测试数据

测试环境	标准温度 $^{\circ}\text{C}$	测量温度 $^{\circ}\text{C}$	温度误差	标准湿度%	测量%	湿度误差
室内恒温恒湿	22	21.8	-0.2	42	41.7	-0.3
靠近窗户	25	25.3	0.3	45	45.2	0.2
室内, 空调开启	23	22.4	-0.6	37	36	-1.0
室内, 无空调	31	31.6	0.6	66	68.4	2.4

## 5.2. 远程监控功能

在测试室内不同位置放置 OV2640 摄像头，连接到稳定的 Wi-Fi 网络，通过手机或电脑远程访问摄像头画面，测试画面的实时性，记录在网络信号波动时的表现；统计延迟时间平均为 0.5~1 秒，基本满足实时监控需求，但在网络信号较弱时，画面出现卡顿现象。

## 6. 发张趋势

智能婴儿床的发展正朝着高度集成化、智能化与人性化的方向迈进，未来将在多模态感知、自适应决策、场景化服务及安全可信交互等方面实现系统性突破。通过融合毫米波雷达、红外热成像、音频情感识别等非接触式传感技术，并结合边缘计算与机器学习算法，系统能够实现对婴儿呼吸、心率、睡眠阶段等生理状态的持续监测与智能分析[8]，进而依据婴儿实时状态与行为习惯自动调节摇床节奏、环境光色温及音乐播放等参数，形成真正意义上的自适应照护体系[9]。在功能拓展层面，产品将更注重个性化与场景联动，不仅可根据婴儿年龄、健康状况提供差异化照护策略，还能与智能空调、加湿器、空气净化器智能家居设备协同工作，构建一体化的“育儿微环境”，并依托云平台扩展为涵盖健康数据管理、育儿知识推送及远程咨询服务的综合育儿生态[10]。与此同时，随着数据维度的丰富，系统将在硬件加密、通信安全与用户隐私保护方面持续强化，以符合日益严格的婴幼儿产品安全标准。人机交互亦趋向自然化与无障碍化，融合语音、手势甚至情感识别技术，提升操作便捷性与情感亲和力，并在设计中注重家居融合性、材料环保性与模块化可升级性，以实现产品的可持续演进。总体而言，智能婴儿床正从单一功能产品转型为集健康监护、环境调节、智能互动与家庭服务于一体的智慧育儿伙伴，在未来的智慧家庭生态中扮演日益重要的角色。

## 7. 结论

本研究针对智能婴儿床系统的实际需求，设计并实现了一套集环境感知、智能调控与远程监护于一体的硬件原型与软件框架，主要贡献可归纳为以下三个方面：首先，在系统架构设计上，创新性地采用基于 STM32H7、STM32F4 与 ESP32 的多核异构协同架构，结合模块化的电源管理方案(如 BQ25895 电源路径管理与 CH334R USB 信号拓展)，实现了高性能处理、实时控制与无线通信的有机融合，在保障系统稳定运行的同时显著提升了功能集成度与扩展灵活性。其次，在调控算法与交互实现方面，提出了基于 CRC 校验与公式转换的温湿度自适应读取机制，设计了串口协同的双核灯光调节策略，并构建了以 LVGL 为基础的多功能图形用户界面，实现了从数据采集、处理到人机交互的闭环智能控制。最后，在远程监护功能上，实现了基于 OV2640 摄像头与 ESP32-S3 的实时视频流采集、压缩与网络传输，并集成数据叠加与历史回溯功能，为家长提供了直观、连贯的多维度婴儿状态监控体验。

然而，本研究仍存在若干局限性：在感知与控制层面，传感器数据在强干扰或极端环境下可能出现波动，影响调控精度；电机驱动在频繁启停及低速运行中仍存在轻微抖动，控制平滑性有待提升。在系统性能与可靠性方面，远程监控功能高度依赖网络质量，在信号不稳定时易出现画面延迟或中断；此外，当前系统功能主要基于规则判断，在婴儿状态识别与个性化安抚策略方面尚未引入更智能的决策机制。

在未来，研究可从以下方向进一步深化：在技术融合上，可引入多模态感知与轻量化人工智能算法，实现基于婴儿哭声、动作与生理信号的智能状态识别与自适应安抚决策。在系统优化方面，应重点改进网络传输协议与本地数据处理效率，提升远程监控的实时性与鲁棒性；同时，优化电机控制算法与音频处理电路，增强执行机构的平稳性与输出音质。在生态与安全层面，需进一步拓展与智能家居平台的互联能力，构建场景联动的“育儿微环境”；并持续强化数据加密、安全通信与隐私保护机制，确保系统在功能扩展的同时符合日益严格的婴幼儿产品安全标准。通过上述改进，智能婴儿床系统有望从当前的

功能集成原型，逐步演进为真正智能、可靠、安全且具备良好用户体验的家庭育儿辅助平台。

## 基金项目

本研究得到四川师范大学无线传感器网络四川省高校重点实验室 2024 年开放课题(WSN2024003)的支持和资助。

## 参考文献

- [1] 潘铭志, 陈嘉欣, 刘慧玲. 基于 STM32 单片机的智能婴儿床设计[J]. 机械工程与自动化, 2021(5): 161-163.
- [2] 侯丽红. 基于 STM32 的智能婴儿床系统设计[J]. 科学技术创新, 2023(25): 225-228.
- [3] 肖元秀, 胡佳美, 楚天鹏. 基于微信小程序的婴幼儿健康监测系统设计[J]. 电脑知识与技术, 2023, 19(27): 46-48.
- [4] 高南, 孙晨曦, 钟承宏. 一种智能看护婴儿床的设计[J]. 电子产品世界, 2022, 29(11): 28-32.
- [5] 陈习, 郭会娟. 基于具身认知的智能婴儿床多通道交互设计研究[J]. 安徽工业大学学报(社会科学版), 2022, 39(3): 35-38+42.
- [6] Ahn, J.Y. (2019) A Study on Visualization and Communication of Parenting and Baby Related Data through a Mobile Application Associated with the Smart Baby Bed. *Proceedings of the Spring International Conference of the Korean Society of Design Science*, Seoul, 1 May 2019, 216-221.
- [7] Shahadi, H.I., Muhsen, D.H., Haider, H.T. and Taherinia, A.H. (2020) Design and Implementation of a Smart Baby Crib. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **671**, Article ID: 012050.
- [8] 杨广, 彭杰. 基于 STM32 的智能看护婴儿床设计[J]. 电子测试, 2024(2): 59-63.
- [9] 杜宝强, 朱传奇, 武涛. 基于物联网的智能婴儿床远程监控系统[J]. 物联网技术, 2023, 13(2): 7-10.
- [10] 张开心, 张梦瑶, 刘梦然, 等. 基于嵌入式平台的智能婴儿床设计与实现[J]. 河南科技, 2022, 41(8): 25-28.