

# 基于环境能量采集的多模态家庭服务机器人设计

赵毅, 邵佳悦, 王家硕

河北建筑工程学院, 河北张家口 075000

**【摘要】**本文围绕“声感智联管家”家庭服务机器人展开研究与设计,旨在构建一款低成本、高集成度、适用于家庭场景的智能化服务平台。系统集成了语音识别、人脸识别、环境监测、健康看护、路径导航等多项功能模块,结合行为仲裁机制,实现家庭清洁、安防、健康监护等综合性任务。机器人采用模块化结构与状态机行为控制逻辑,具备灵活扩展与高效运行能力。尤其在健康预警、物品安防及燃气泄漏防控方面,提出了切实可行的技术方案,具备较强的应用价值与推广潜力。

**【关键词】**家庭服务机器人; 多模态交互; 行为仲裁; 健康监护; 安防报警

## 一、引言

近年来,随着人工智能、嵌入式系统与物联网技术的快速发展,家庭服务机器人的研究进入实用化阶段。智能家居市场不断扩展,用户对于个性化、低成本、集多功能于一体的家庭助理型机器人的需求愈加迫切。然而,目前市场上的同类产品存在功能割裂、交互能力弱、扩展性差等问题。因此,本文立足于国内用户的现实需求,提出并实现了一款以行为控制与多模态交互为核心的“声感智联管家”服务机器人。该机器人融合多种智能传感与识别技术,探索在家庭安防、健康看护与环境管理等多方面的协同运行机制,为推动智能服务机器人在家庭场景中的普及提供新路径。

## 二、系统整体设计与行为控制

### (一) 设计目标

本项目旨在构建一款以低成本为核心、面向大众家庭的多功能智能服务机器人。机器人搭载语音识别、路径导航、环境监测、安防报警、清洁与健康看护等功能模块,通过模块化硬件与行为控制系统相结合,提升系统运行效率及用户体验。

### (二) 功能架构与行为系统

系统行为主要包括:自动充电、障碍逃避、路径归航、沿墙行走、人机对话、吸尘清洁、安防监测等。各行为以状态机模式实现,并由行为仲裁器根据传感器反馈进行优先级判断与任务切换,控制机器人执行最适当的动作。机器人通过两个直流电机实现基本运动,配合多传感模块完成各类环境任务。系统功能框架见图1。

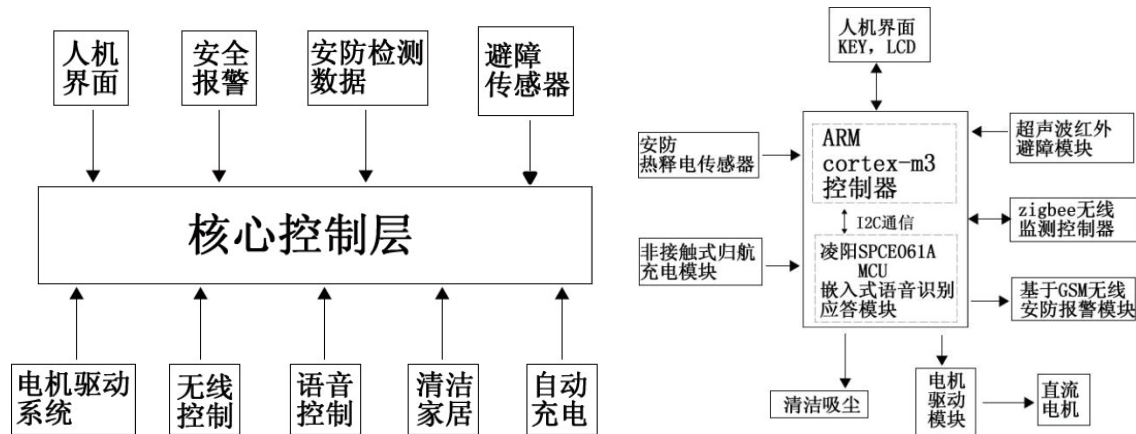


图1 系统功能框架图

### 三、核心功能模块与技术实现

#### (一) 健康监测与突发事件预警系统

##### 1. 晕倒检测预警系统

基于 DSP 的防晕倒的数字图像预警系统构成框架见图 2。系统具体内容如下：

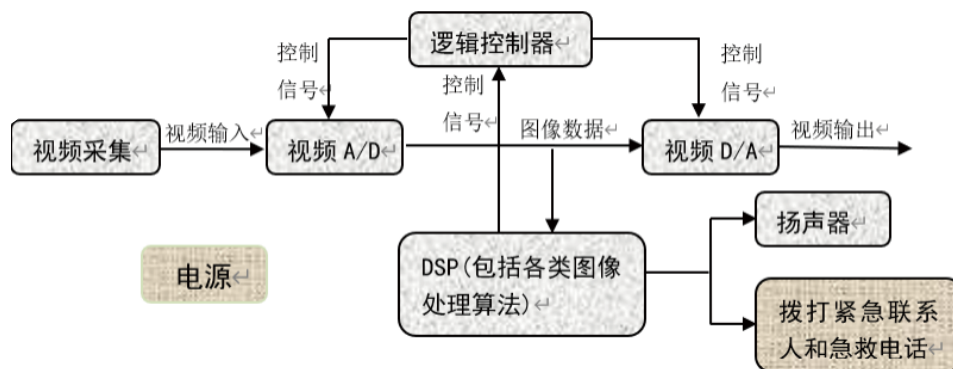


图2 基于 DSP 的防晕倒的数字图像预警系统构成框架

(1) 图像采集。使用 CCD 摄像机采集人脸和眼睛的图像，并经过高精度 A/D 转换，得到数字化的图像数据。

(2) 可编程逻辑器。系统中的可编程逻辑器由三部分组成：FLASH 存储器、SDRAM 和 CF 卡。FLASH 存储器支持带电擦写且断电后数据不丢失，主要用于存储系统启动代码及核心程序。SDRAM 具备高速读写能力，负责存放系统运行时的代码和临时图像数据。CF 卡通过 EMIF 的 CE2 接口连接，用于保存采集的原始图像数据及识别结果，实现大容量数据的持久存储。

(3) 图像分析和处理。为了兼顾开发效率和实时性能，系统采用 PC 机与 DSP 协同处理采集到的信息，实现对居家人员精神状态的高效实时判别。PC 机的使用显著缩短了开发周期；同时，将计算机平台上的视觉识别函数库移植到 DSP，降低了 DSP 的开发难度。DSP 凭借其强大的浮点运算能力，提升了疲劳检测模块的实时处理能力。数字多媒体处理器 TM320DM642 作为眼睛检测与疲劳识别系统的核心，负责对采集到的数字眼睛图像进行处理与识别。处理后的数据存储于数据存储器，识别结果则通过 LCD 显示器实时呈现。

(4) 图像显示、报警。图像显示部分采用 LCD 屏幕，报警器则通过扬声器发出提示声音。DSP 接

收采集到的原始图像后, 调用体征检测程序进行处理。系统采用由粗到精的模式识别策略, 逐步检测人体特征。由于未使用红外照明产生的“亮点”效应, 直接在整幅图像中检测特定体征存在较大难度。

## 2. 疲劳检测预警系统

在本系统中, 首先检测居家人员的躯干区域, 其次在该区域内分析更细微的体征特征。结合人员面部运动特点, 采用基于 Kalman 滤波的人脸跟踪算法, 有效提升体征检测的速度和稳定性。通过对处理后得到的二值化图像, 系统判断眼睛的开合状态, 并根据眼睛闭合时间和眨眼频率等参数综合评估疲劳状态。若连续多帧图像无法正常检测眼睛状态, 系统将自动重新初始化, 开启新一轮检测周期。疲劳检测流程见图 3, 具体流程如下:

(1) 图像预处理。对采集到的图像进行光照补偿和中值滤波, 提升图像质量, 降低噪声干扰。

(2) 人脸检测与跟踪。利用肤色特征检测、假脸去除和人脸定位, 结合 Kalman 滤波进行预测跟踪, 实现对人脸的持续稳定检测。

(3) 疲劳特征提取。通过人脸检测算法计算眼睛的开闭程度, 统计眼睛闭合时间、眨眼频率和 PERCLOS (闭眼时间百分比) 等关键指标, 并分析它们与疲劳状态的关联。

(4) 疲劳判定与报警。根据疲劳特征判断用户是否疲劳, 如检测到疲劳状态则触发报警信号并执行应急操作, 同时继续处理后续图像。

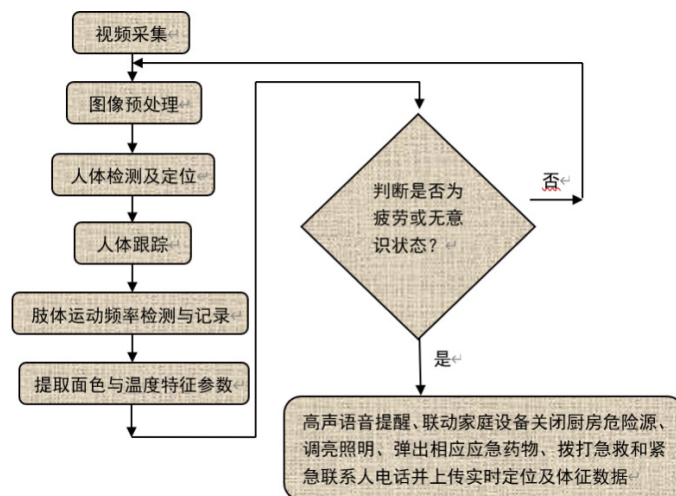


图 3 疲劳检测流程图

## 3. 点滴液位监测装置

点滴报警电路原理见图 4。下面介绍两种液滴报警装置。

(1) 固定型光学液滴报警器。

①电源要求: +5V 直流电。

②适用范围: 适用于 500ml 标准点滴瓶。

③工作原理: 当点滴瓶中的液体剩余约 8% 时, 报警器自动发出声音报警。

④使用限制: 报警液面高度不可调节, 避免在阳光直射环境下使用。

(2) 称重型液滴报警器。

①电源要求: +5V 和 -5V 直流电。

②适用范围: 兼容各种容量的点滴瓶。

③工作原理: 通过吊钩感知瓶体重量, 液体低于设定值时触发报警。报警阈值可通过可调电阻设

定。每更换瓶型需重新校准数值。

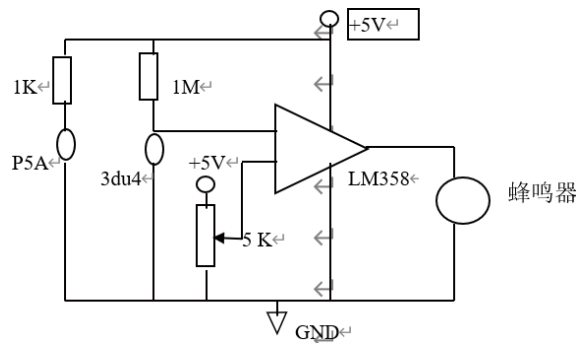


图4 点滴报警电路原理图

## (二) 智能安防与报警系统

### 1. 外来人员入侵报警设计

该系统集成机器人摄像头与红外传感器，通过人脸识别算法与家庭成员数据库实时比对，检测陌生人进入时长。一旦陌生面孔持续超过 10 秒，系统立即触发 85dB 蜂鸣器与红灯闪烁，并联动智能门锁与手机推送功能，实现远程通知。配合动态行为识别技术，能有效降低误报率，并自动生成带时间戳的短视频存档，作为家庭安防“黑匣子”。系统的工作流程见图 5，报警电路原理见图 6。

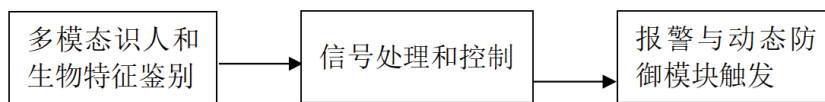


图5 外来人员入侵系统工作流程图

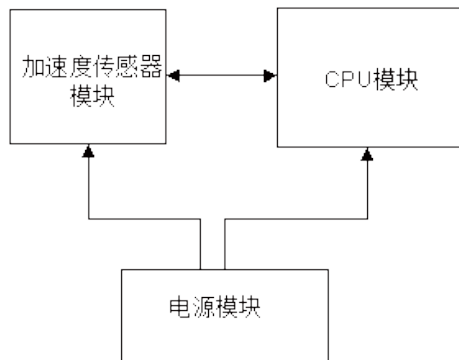


图6 报警系统电路原理图

### 2. 物品移动监控报警器

本装置可对目标物品的状态信息进行实时监测，依托三轴加速度传感器，实现对物品在前后、左右、上下六个方向上的运动信息采集，用于判断是否存在移动或振动行为，并通过无线通信及时向接收端发出报警信号，从而有效防范物品丢失。

(1) 检测器模块。检测器部分由以下组件构成：

①加速度传感器模块：采用三轴加速度传感器，可感知物品在三个空间维度（X、Y、Z 轴）的运动变化，捕捉物品的移动与轻微振动行为。原理见图 7。

② CPU 与通信模块：配置 8 位 CPU，结合 ZigBee 无线通信模块，完成对传感器数据的处理与无线传输。

③电源模块：提供稳定的 3V 电压输出，支持加速度传感器与 CPU 模块的运行，系统整体使用锂

电池供电, 满足低功耗便携式使用需求。

(2) 接收报警器模块。接收端用于接收检测器发送的无线数据, 并进行状态响应, 主要由以下部分组成:

① CPU 处理模块: 接收并解析检测器发来的运动信息, 判断是否达到报警阈值。

② 声光报警模块: 当检测到物品异常移动或震动时, 立即启动声光双重提示, 提醒用户注意。原理见图 8。

③ 电源模块: 同样采用 3V 电压驱动, 使用锂电池供电, 保障设备的移动性和续航能力。

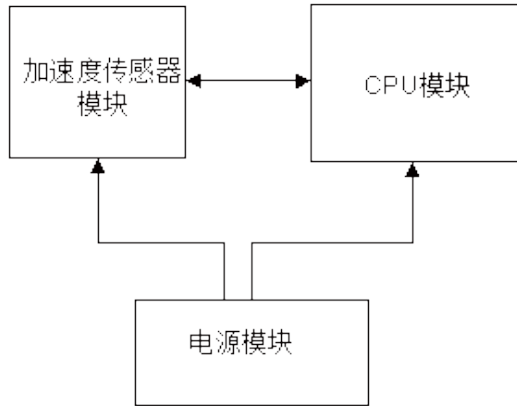


图7 加速传感器原理图

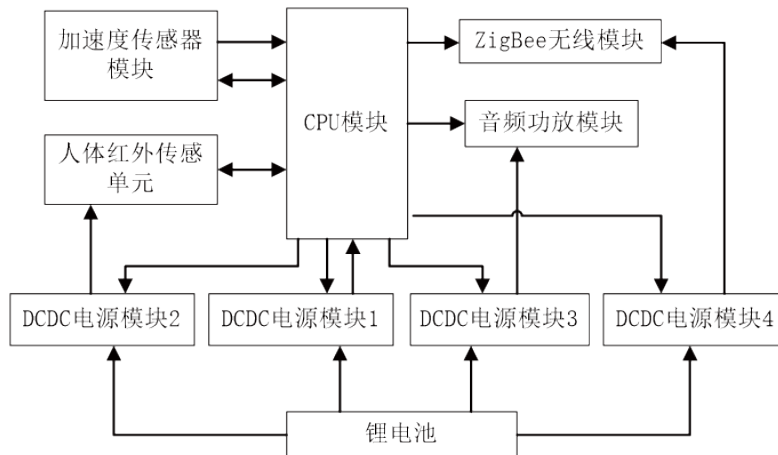


图8 声光报警原理图

(3) 系统创新点。该装置具有以下突出优势:

① 多维方向识别与双模式检测: 通过三轴加速度传感器获取六个方向上的运动数据, 既能识别位移, 也能感知微振, 提高了状态检测的准确性。

② 无线低功耗设计: 采用 ZigBee 模块实现稳定的无线通信, 具备低功耗、远距离、抗干扰等特性, 适用于复杂环境下的连续监测。

③ 结构简洁、便携性强: 设备小型轻便, 采用无线设计, 无需布线, 易于安装与携带, 适用于家庭、办公及外出等多场景防盗需求。

### (三) 可燃气体泄露报警设计

本系统旨在设计一种以“防患于未然”、科学分级、人性化为特色的可燃气体检测与报警系统。系统采用技术成熟、成本低廉的 52 系列单片机 AT89S52 作为主控核心, 构建起集分级传感检测、警情

区分声光报警及强制控制机构于一体的自动化检测报警系统。

### 1. 系统功能与报警机制

系统通过气敏传感器实时监测环境中可燃气体的浓度变化，并根据不同浓度设定科学的三级报警机制：

- (1) 一级报警：浓度达到初级阈值，系统发出普通预警，提示用户进行安全检查；
- (2) 二级报警：浓度接近安全临界值，系统发出明显声光警报，提示需及时检修燃气设备；
- (3) 三级报警：浓度达到高级别危险值，系统启动强烈声光警报，并在无人干预情况下自动切断气源，启动通风排气装置，防止事故发生，实现“预防为主、防控结合”的自动控制策略。

### 2. 系统组成结构

系统主要由以下几个部分组成：

- (1) 传感器检测电路：以气敏传感器（如 MQ-2）检测空气中可燃气体浓度变化，并将变化转化为电压信号，气敏检测流程与电路连接见图 9；
- (2) A/D 转换模块：使用 ADC0804 将模拟电压信号转换为数字量；
- (3) 单片机控制模块：AT89S52 负责接收数字信号并进行逻辑判断，驱动声光报警电路及控制外设；
- (4) 声光报警电路：当达到报警阈值时，驱动蜂鸣器和指示灯进行警报提示；
- (5) 强制控制装置：在高级别报警状态下，系统控制电磁阀切断气源，并启动排气系统。

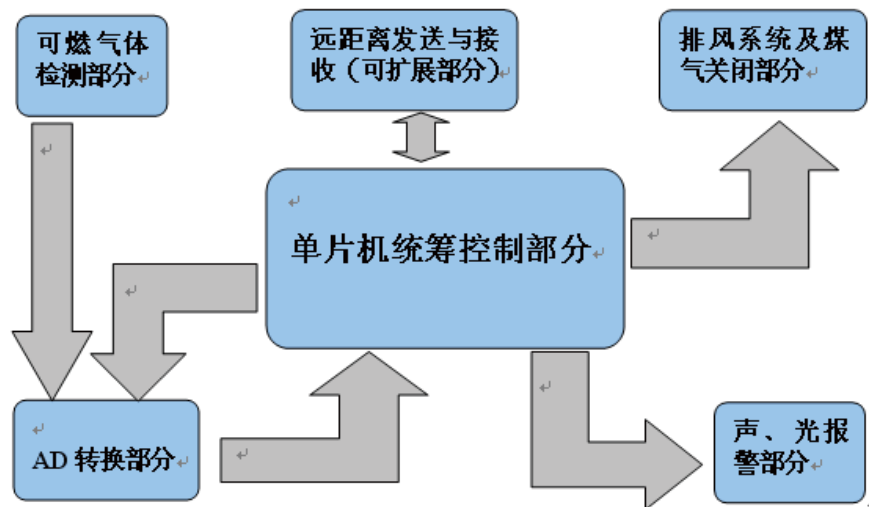


图9 气敏检测流程与电路连接图

### 3. 主控单元与信号采集电路设计

主控单元选用 AT89S52 微处理器，A/D 转换芯片采用 ADC0804。ADC0804 的时钟信号（CLK）通过电容 C1 接地以实现时钟稳定。气体浓度经传感器检测后转化为模拟电压信号，并送入 ADC0804 的模拟输入端 VIN，完成模数转换。

AT89S52 为 8 位单片机，当输入电压为 5V 时输出为满量程 255（FFH），对应的最小分辨率约为 0.0196V。实测中，电压信号的变化通常以 0.02V 为单位，已能满足报警系统的基本精度要求。如需进一步提高分辨率，可选用 12 位 A/D 转换器，但对于本系统的应用场景，该精度已足够。

值得注意的是，实际测量中 ADC0804 输出的电压值通常比标准值偏高 0.01 ~ 0.02V。由于本设计

直接将 +5V 电源作为基准电压, 电压偏差可能由电源稳定性引起。对此可通过调整基准电压或在软件中对测量值进行校正来补偿误差。

ADC0804 的直流输入阻抗为  $1\text{M}\Omega$ , 满足常规电压采集要求。测试表明, ADC0804 可在  $2 \sim 5\text{MHz}$  时钟频率下正常工作, 具备省略外部分频电路的能力, 从而简化了系统硬件设计。

AT89S52 接收 ADC0804 转换后的数字信号, 并与系统中预设的各级报警电压阈值进行比较。根据判断结果, 单片机发出相应的报警控制命令, 确定是否进入报警状态、所处的报警等级, 以及是否执行后续的声光提示或联动控制操作, 实现智能化、分级响应的报警机制。

ADC0804 接脚说明及基本电路见图 10。

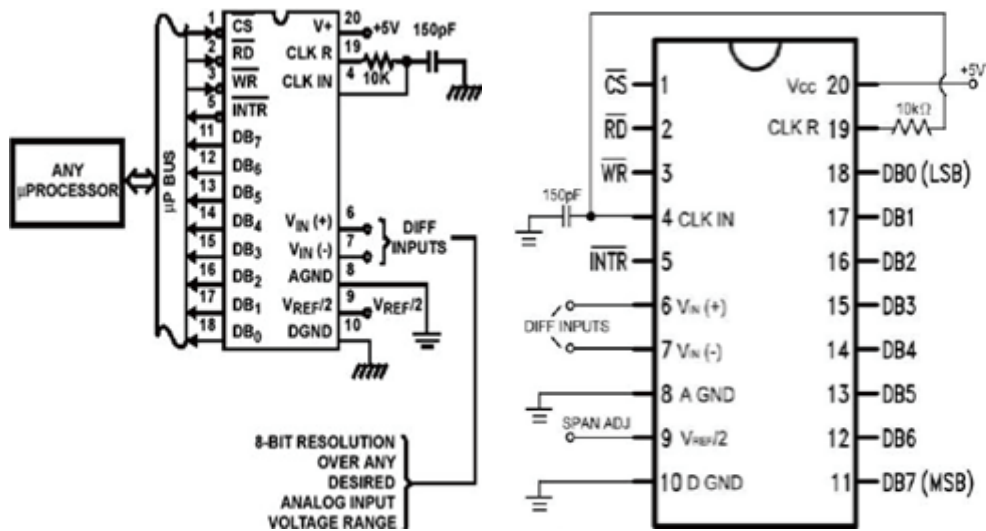


图 10 ADC0804 接脚说明及基本电路

#### 4. 气体检测与报警驱动电路设计

气体检测原理与声光报警电路见图 11。

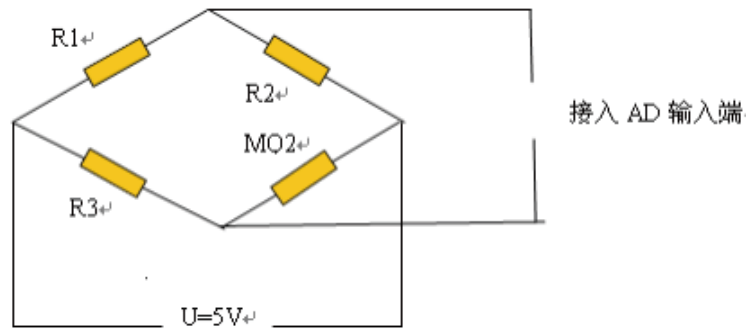


图 11 气体检测原理与声光报警电路图

气体检测电路由气敏传感器 MQ-2 与电阻  $R_1=1\text{K}\Omega$ 、 $R_2=10\text{K}\Omega$ 、 $R_3=1\text{K}\Omega$  构成单臂工作电桥。该电桥的输出电压为其开路电压, 当电桥满足平衡条件  $R_1 \times R_2 = R_3 \times R_4$  时, 其输出为  $0\text{V}$ 。气敏传感器在检测到可燃气体时, 电阻随气体浓度升高而显著减小, 从而打破电桥平衡, 输出电压随之变化。

实验结果显示: 在无可燃气体或浓度极低时, MQ-2 的输出电阻约为  $20\text{K}\Omega$ ; 而在高浓度条件下, 其电阻降至约  $0.1\Omega$ , 接近于短路状态。由此可得该电桥输出电压范围约为  $0 \sim 4.76\text{V}$ , 完全满足 ADC0804 的模拟输入要求 ( $0 \sim 5\text{V}$ )。经过调试验证, 该电路在外部干扰影响下依然能保持稳定输出, 其输出电压与传感器电阻基本呈正比关系。

需要注意的是, 由于电桥桥臂电流不恒定, 该电路的输出电压与传感器电阻之间并非严格线性, 存

在一定非线性误差。后续可通过算法修正或增加线性补偿模块进一步优化输出精度。

由于单片机 I/O 口输出能力有限,系统通过三极管 S8550 放大电流以驱动报警蜂鸣器。单片机的 P2.0 端口用于控制二级以上报警的声音输出,实现声光联动提示功能。电路结构简单,响应迅速,适合多种环境部署。

### 参考文献

- [1] 郝迪迪, 陆子睿, 汤懿. 智能管家机器人设计 [J]. 设计, 2023, 36(18): 51, 50.
- [2] 苏建国, 王博, 王嗣朝, 等. 基于 STM32F407 的智能管家机器人设计 [J]. 工业控制计算机, 2022, 35(11): 146-148.
- [3] 屈世龙, 杨瑞青, 张庆晨, 等. 智能教室管家机器人设计与研究 [J]. 装备制造技术, 2022(5): 87-89, 93.
- [4] 董润, 王如想, 孙浩. 智能家居家用清洁机器人技术现状 [J]. 中国科技信息, 2024(16): 37-40.
- [5] 苏晨, 彭欣颖. 智能管家机器人运动轨迹自动化控制模型设计 [J]. 制造业自动化, 2020, 42(12): 143-146, 151.
- [6] 黄巧巧, 李敏, 王献合. 基于互联网+的智能管家机器人设计 [J]. 电子技术, 2020, 49(2): 88-89.

# Design of a Multimodal Home Service Robot Based on Ambient Energy Harvesting

ZHAO Yi, SHAO Jiayue, WANG Jiashuo

Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China

---

**Abstract:** This paper presents the research and design of the “Sound-Sensitive Smart Butler,” a home service robot aimed at providing an intelligent, low-cost, and highly integrated platform for domestic applications. The system incorporates multiple functional modules, including voice recognition, facial recognition, environmental monitoring, health care, and path navigation. Through the integration of a behavior arbitration mechanism, the robot is capable of executing comprehensive tasks such as household cleaning, security monitoring, and health surveillance. Featuring a modular structural design and a state machine-based behavior control strategy, the robot offers strong scalability and efficient operation. Notably, the proposed solutions for health warning, object security, and gas leakage prevention demonstrate practical applicability and considerable potential for widespread adoption.

**Keywords:** Home Service Robot; Multimodal Interaction; Behavior Arbitration; Health Monitoring; Security Alarm

---

版权所有 © 2025 本文作者和香港科技出版集团。本作品根据知识共享署名国际许可证 (CC BY 4.0) 获得许可。 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access