

# 智能家居环境多感知机器人终端硬件系统设计

胡俊涛

北华航天工业学院电子与控制工程学院, 河北 廊坊 065000

**[摘要]**随着物联网与人工智能技术的深度融合, 智能家居环境对终端设备的感知能力、响应速度及交互智能提出了更高要求。本文聚焦于多感知机器人终端硬件系统的整体架构设计, 深入探讨传感器融合、低功耗计算单元选型、异构通信协议适配以及边缘智能处理等关键技术环节。通过构建高集成度、强鲁棒性的硬件平台, 旨在解决传统家居设备在复杂动态环境下的感知盲区与延迟问题, 实现从被动执行向主动感知的范式转变, 为下一代家庭服务机器人的硬件基础提供理论支撑与设计参考。

**[关键词]**多感知; 机器人终端; 硬件系统; 智能家居

DOI: 10.64635/ja.2026.1364

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

## Hardware System Design of a Multi-Sensing Robotic Terminal for Smart Home Environments

Hu Juntao

School of Electronics and Control Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang, Hebei 065000, China

**Abstract:** With the deep integration of the Internet of Things and artificial intelligence technologies, smart home environments have placed higher requirements on the sensing capability, response speed, and interaction intelligence of terminal devices. This paper focuses on the overall architectural design of a multi-sensing robotic terminal hardware system, and provides an in-depth discussion of key technical aspects, including sensor fusion, selection of low-power computing units, adaptation of heterogeneous communication protocols, and edge intelligent processing. By constructing a highly integrated and robust hardware platform, the study aims to address the sensing blind spots and latency problems of traditional home devices in complex and dynamic environments, realize a paradigm shift from passive execution to active perception, and provide theoretical support and design reference for the hardware foundation of next-generation home service robots.

**Keywords:** multi-sensing; robotic terminal; hardware system; smart home

### 引言

在数字化浪潮的推动下, 居住空间正经历着从静态庇护所向动态智能生态系统的深刻变革。传统的智能家居系统往往依赖于分散的单一功能设备, 彼此之间缺乏有效的协同机制, 难以应对日益复杂的家庭生活场景。特别是在面对突发状况或需要多模态交互时, 现有系统常表现出反应滞后、信息割裂等局限性。在此背景下, 具备高度自主性与环境适应能力的多感知机器人终端应运而生, 成为连接物理世界与数字世界的核心枢纽。此类终端不仅需要精准捕捉环境中的视觉、听觉、触觉等多维信息, 还需在毫秒级时间内完成数据融合与决策生成, 这对底层硬件系统的设计提出了前所未有的挑战。

### 1 多源异构感知模块的协同架构设计

#### 1.1 多维传感阵列的空间拓扑与冗余配置

在构建智能家居环境下的多感知机器人终端时, 传感

器物理布局的合理性直接决定了信息采集的广度、精度与鲁棒性。本系统摒弃了传统简单的堆叠式安装模式, 转而采用基于人体工学原理与环境几何特征分析推导出的立体拓扑结构。视觉传感器被精心部署于机身头部的高位区域, 利用其广角特性获取全景图像, 模拟人类双眼的视野覆盖范围, 确保对前方及侧方环境的无死角监控; 激光雷达与毫米波雷达则被策略性地置于机身中轴线的不同高度层, 形成前后交错、高低互补的探测层级, 这种布局不仅有效消除了近距离盲区, 还能穿透烟雾、灰尘等遮挡物, 实现全天候的环境感知。声学阵列采用环形麦克风组设计, 配合板载专用的波束成形硬件电路, 能够实现对声源方向的精确定位与干扰抑制。这种空间上的非均匀分布并非随意安排, 而是经过严格的视场角重叠分析与信号覆盖仿真后得出的最优解, 旨在最大化信息增益。为了进一步提升系统在极端环境下的生存能力, 关键感知节点引入了硬件

级的冗余配置。例如，在核心避障路径上，不仅配置了高精度的固态激光测距单元，还同步集成了红外飞行时间（ToF）传感器与超声波模组。当某一类传感器因环境因素导致数据质量下降时，如强光干扰致使摄像头失效，或吸音材料吸收声波导致超声波失灵，冗余模块能够通过硬件逻辑快速切换输入通道，确保控制指令的连续性。这种硬件层面的容错机制，避免了单纯依赖软件滤波可能带来的延迟风险，为机器人的安全运行构筑了第一道坚实的防线，实现了从单一感知向多维互补的跨越。

## 1.2 传感器信号预处理与模数转换的硬件加速

原始传感器输出的数据往往包含大量噪声、无效背景信息及高频抖动，若直接将海量原始数据上传至主处理器，不仅会严重占用宝贵的系统带宽资源，还会导致数据处理延迟，无法满足实时控制的需求。为此，本硬件系统在每一个感知子模块内部嵌入了专用的现场可编程门阵列（FPGA）或专用集成电路（ASIC）芯片，构建了分布式信号预处理架构。对于图像数据，片上集成的硬件加速器负责执行实时的去噪算法、白平衡校正及感兴趣区域（ROI）提取，将非结构化图像转化为结构化特征图；对于音频信号，内置的数字信号处理器（DSP）核心则专注于回声消除、噪声抑制与语音增强，直接从硬件底层滤除环境杂音。在模数转换（ADC）环节，系统采用了高分辨率、高采样率的并行转换架构，针对不同频率特性的传感器信号，设计了自适应采样时钟发生器。该发生器能够根据信号的动态范围自动调整采样率与量化位数，既保证了微弱信号的采集精度，又避免了高频信号的混叠失真。更重要的是，所有经过预处理后的结构化数据均通过片间高速串行接口直接传输至中央处理单元，完全跳过了传统MCU的中转瓶颈，显著提升了数据吞吐效率。这种细粒度的硬件控制策略，不仅大幅降低了系统延迟，还减轻了主控芯片的计算负载，使得多源数据融合算法能够在更纯净的数据基础上高效运行，为后续的智能决策提供了高质量的信息支撑。

## 2 边缘智能计算单元的异构架构与能效优化

### 2.1 多核异构计算平台的层级化部署

面对智能家居环境中海量多模态数据的实时处理需求，单一通用处理器架构已难以兼顾高性能计算与低功耗运行的双重目标。本系统构建了由中央控制单元、专用神经网络加速器及低功耗微控制器集群组成的三级异构计算平台，实现了计算任务的精细化分层与高效分流。中央控制单元选用基于先进ARM架构的高性能多核应用处理

器，作为系统的逻辑中枢与调度核心，负责运行复杂的操作系统内核、解析多协议网络数据以及执行高层任务规划与决策生成。其强大的浮点运算能力与丰富的外设接口，确保了系统在面对复杂场景时的统筹全局能力。神经网络加速器则采用存算一体架构的专用AI芯片，内部集成了数十亿个晶体管构成的矩阵乘法阵列，专门承担卷积神经网络（CNN）与Transformer模型的推理任务。该模块具备极高的算力密度与能效比，能够在毫瓦级功耗下完成对视觉特征提取、语音语义理解等深度学习的并行计算，彻底解决了传统GPU在移动端推理时面临的延迟高、发热严重的瓶颈。微控制器集群则广泛分布于各个传感器节点，负责底层的驱动管理、简单的状态机控制及本地闭环反馈，确保在主系统故障或断网情况下基础功能依然可用。这种层级化部署使得高频低延迟的原始数据理由微控制器在本地闭环完成；中等复杂度的特征融合由神经网络加速器并行处理；而涉及长时序规划与多设备协同的复杂逻辑则由中央处理器统筹。各计算单元之间通过统一的高速互联总线进行数据交换，形成了物理层面的“端-边”协同基础。硬件架构的灵活性使得系统能够根据当前负载情况，动态调整各计算节点的唤醒状态与工作频率，从而在保障毫秒级响应速度的同时，最大程度地降低系统整体功耗，为长时间无间断运行提供了坚实的算力支撑。

### 2.2 动态电压频率调节与热管理机制

在移动机器人终端的设计中，续航能力与散热性能是制约其实际应用的两大核心因素。本硬件系统引入了基于负载感知的动态电压频率调节技术，构建了精细化的能效管理体系。系统实时监控各计算单元的指令吞吐量、缓存命中率及内存访问模式，通过内置的硬件逻辑电路预测即将到来的计算需求，提前调整供电电压与时钟频率。在待机或低负载状态下，系统自动进入深度休眠模式，仅保留必要的看门狗电路与中断唤醒机制，将静态功耗降至微瓦级别；一旦检测到异常事件或用户指令，硬件中断机制能在微秒级时间内唤醒相关模块，迅速恢复工作状态，消除了软件轮询带来的延迟。针对高算力芯片产生的集中热量，硬件系统设计了分层散热架构。核心计算单元表面贴装超薄均温板，利用相变材料快速扩散局部热点，避免温度骤升导致的性能降频；机身内部预留了符合流体力学原理的自然对流风道，并辅以微型静音风扇进行辅助散热。温度传感器实时监测关键节点的温升曲线，当温度接近阈值时，硬件逻辑将强制降频或限制部分非关键功能的运行，防止

过热损坏。这种软硬结合的温控策略,不仅确保了机器人在连续高强度工作下的长期稳定性,还有效延长了电池寿命与元器件使用寿命,为智能家居环境下的全天候服务提供了可靠的硬件保障。此外,系统还采用了智能风扇转速控制算法,根据温度变化平滑调节风扇转速,在保证散热效果的同时最大限度降低噪音干扰,营造安静的家居环境。

### 3 高速通信总线与能源管理系统的集成设计

#### 3.1 高带宽低延迟的内部互连网络

在多感知机器人终端的硬件架构中,内部数据通道的传输效率直接决定了系统对复杂环境的实时响应能力。面对多路高清视频流、激光雷达点云以及毫米波雷达数据的并发输入,传统的 UART 或 I2C 等低速串行总线已完全无法满足带宽需求,极易造成数据拥堵与处理滞后。因此,本系统采用了基于 PCIe Gen4 协议与 MIPI CSI-3 标准构建的高速串行互联架构,形成了星型与环型混合的高拓扑密度网络。视觉传感器与激光雷达的数据流通过高速差分信号线直接接入中央处理器的 DMA(直接内存访问)控制器,实现了零拷贝传输机制,彻底绕过了 CPU 的中转干预,将数据传输延迟压缩至微秒级别。为了应对多源异构数据在时间轴上的严格对齐要求,系统集成了高精度的硬件时钟分发网络,利用超低抖动的锁相环(PLL)技术为所有传感器提供统一的参考时钟,确保视觉帧率与雷达扫描周期实现微秒级的同步,从而为后续的多模态融合算法提供精确的时间基准。在外部通信层面,硬件平台支持 Wi-Fi 6E、5G Sub-6GHz 及蓝牙 Mesh 等多种无线协议的物理共存。通过射频前端集成的多天线阵列设计与智能天线切换算法,系统能够在家庭复杂的电磁环境中保持连接的稳定性。针对智能家居场景下常见的多设备干扰问题,硬件层实现了实时的信道扫描与自动避让机制,一旦检测到特定频段拥塞,立即在物理层切换至备用频段,确保控制指令的下发不受影响。此外,为了应对家庭环境中金属家具遮挡或信号衰减的挑战,硬件设计预留了冗余的射频通道,并引入了板载的信号增强电路以提升接收灵敏度。这种高可靠性的通信链路,不仅实现了机器人与家庭其他智能设备之间的无缝协同,更为构建全屋智能生态奠定了坚实的物理基础,确保了信息流动的畅通无阻。

#### 3.2 智能电源分配与能量回收策略

能源管理系统是保障机器人终端持续稳定运行的核心命脉,其设计优劣直接决定了设备的续航能力与服务可靠性。本硬件系统摒弃了传统线性稳压方案中效率低、发热大的弊端,全面采用高效率的 DC-DC 变换器架构,并

构建了智能化的电源分配网络(PDN)。系统内部集成了高精度的电流电压采样电路,能够实时监测各功能模块的功耗动态,并通过软件算法动态调整各路输出电压与电流,有效避免了空载损耗与轻载低效问题。对于电池供电的移动机器人,硬件电路深度集成了库仑计与先进的电池管理系统(BMS),能够以毫安时的精度实时估算剩余电量与健康状态(SOH)。在低电量预警触发时,系统会执行分级保护策略,优先切断非关键负载,保障核心感知与控制模块的供电,确保机器人能安全返回充电座完成补能。更具创新意义的是,本设计引入了动能回收机制,旨在提升系统的整体能效比。当机器人在下坡行驶或紧急制动减速过程中,驱动电机可瞬间转化为发电机模式,产生的电能通过专用整流电路高效回充至储能单元。虽然单次回收的能量有限,但积少成多,显著延长了机器人的连续工作时间。此外,系统还设计了宽输入范围的电源接口,兼容多种快充协议,确保在极短时间内完成能量补充。这种绿色的能源设计理念,不仅降低了用户的维护成本,也符合可持续发展的时代趋势,为智能家居环境下的全天候服务提供了强有力的能源支撑,使机器人真正成为家庭生活中不可或缺的智能伙伴。

### 4 结论

本文围绕智能家居环境多感知机器人终端硬件系统的设计,从多源异构感知架构、边缘智能计算单元及高速通信能源系统三个核心维度进行了深入的理论与技术分析。通过构建高集成度、强鲁棒性的硬件平台,有效解决了传统系统在感知盲区、处理延迟及能耗控制等方面的痛点,实现了从单一功能向多维智能的跨越。研究成果不仅丰富了机器人硬件设计的理论体系,更为未来家庭服务机器人的工程化落地提供了切实可行的技术路径,具有显著的学术价值与广阔的应用前景。

#### [参考文献]

- [1]郑天成.基于聊天机器人的智能家居控制系统设计[D].华中科技大学,2023.
- [2]黄祥才.基于 Thread 的智能家居无线传感网络系统设计[D].华中科技大学,2019.
- [3]汪东芳.智能家居机器人的研究与开发[D].南京理工大学,2018.
- [4]刘凤超.无线传感网络与移动机器人结合的智能家居系统[D].西南科技大学,2017.
- [5]刘景泰,张森,孙月.面向智能家居/智慧生活的服务机器人技术与系统[J].集成技术,2016,5(3):38-46.