



堆叠式一体化微型多模态感知硬件架构研究

吴启晗, 孙 惠, 陈宇亮, 肖 霄, 黄欣欣, 卜子洋*

(阳光学院人工智能学院, 福建 福州 350015)

摘要: 针对当前微型多模态感知设备普遍存在的体积与防护性能难以兼顾、便携性与续航能力受限等技术瓶颈, 本文提出一种堆叠式一体化微型多模态感知硬件架构。通过垂直分层堆叠的一体化封装设计, 构建了“多模态感知阵列层 - 低功耗双核协同处理层 - 一体化密封与电源底层”的三层硬件体系。本文对多模态传感高密度集成、低功耗算力协同调度、一体化密封及超薄电池堆叠等关键技术进行了结构设计 with 优化。经标准化测试验证, 该架构在多模态数据处理速度上较传统分体式方案提升约 43%, 并在防护等级与续航能力上表现优异, 有效缓解了微型感知设备的核心性能矛盾。本架构为微型化、高可靠、长续航的多模态感知终端设计提供了有价值的工程参考。

关键词: 堆叠式封装; 一体化硬件架构; 微型多模态感知; 低功耗设计; 性能优化

收稿时间: 2026年3月10日

中图分类号: TP368

通讯作者: 卜子洋, 阳光学院人工智能学院

Research on Stackable Integrated Micro Multimodal Sensing Hardware Architecture

Qihuan Wu, Hui Sun, Yuliang Chen, Xiao Xiao, Xinxin Huang, Ziyang Bu*

(Yango University School of Artificial Intelligence, Fuzhou, Fujian 350015)

Abstract: To address the prevalent technical bottlenecks of current miniature multimodal sensing devices, namely the intractable trade-off between compact form factor and protection performance, as well as constrained portability and battery endurance, this paper proposes a stacked integrated hardware architecture for miniature multimodal sensing. Leveraging an integrated packaging design based on vertical layered stacking, we construct a three-layer hardware system consisting of a multimodal sensing array layer, a low-power dual-core collaborative processing layer, and an integrated sealing and power supply bottom layer. Structural design and optimization are implemented for the core technologies of this architecture, including high-density integration of multimodal sensors, collaborative scheduling for low-power computing, integrated hermetic sealing, and ultra-thin battery stacking. Verified by standardized tests, the proposed architecture achieves an approximately 43% improvement in multimodal data processing speed over traditional discrete schemes, along with outstanding performance in protection rating and battery endurance, which effectively mitigates the core performance conflicts of miniature sensing devices. This architecture provides a valuable engineering reference for the development of miniaturized, highly reliable, long-endurance multimodal sensing terminals.

Key words: Stackable packaging; Integrated hardware architecture; Micro multi-modal perception; Low power design; Performance optimization

1 引言

随着泛在物联网、边缘智能与穿戴式电子技

术的快速发展, 微型多模态感知终端作为前端数据采集与智能感知的核心载体, 已广泛应用于智



慧工业巡检、公共安全执法、应急救援、个人消费电子等多个核心领域^[1]。多模态感知技术通过融合视觉、听觉、环境参数、运动姿态等多维度传感信息，能够实现对复杂场景的全面感知与智能决策，是当前智能感知领域的核心研究热点^[2]。

在终端落地应用中，微型化、便携化、高可靠性是行业发展的核心趋势，用户对设备的佩戴无感、长时间连续工作、复杂恶劣环境适应性的需求日益提升。但当前主流微型多模态感知设备的硬件架构设计存在明显的技术瓶颈，无法同时满足微型化、高防护、长续航、高性能的协同需求，形成了三大行业核心顽疾。

国内外现有研究大多聚焦于单一传感模块的性能优化、多模态融合算法的软件层面改进，针对微型多模态感知终端的硬件架构一体化、堆叠式设计的系统性研究仍存在明显空白^[3]。多数商用方案采用“分体式模块拼接+后期增补防护”的传统架构，无法从底层解决体积、防护、续航、性能的核心矛盾。基于此，本文提出一种堆叠式一体化微型多模态感知硬件架构，将多模态感知、算力处理、密封防护、电源供给进行一体化分层堆叠设计，从架构底层突破行业技术瓶颈，并通过标准化测试验证了该架构的综合性性能优势。

2 微型多模态感知设备的行业现状与核心技术瓶颈

2.1 行业发展现状

微型多模态感知终端的核心价值，是在有限的体积内实现多维度场景信息的同步采集、处理与传输，其核心发展方向是微型化与智能化的协同升级。据行业调研数据显示，2024年全球智能穿戴设备市场规模约为721亿美元，预计到2034年将增长至4317亿美元，年均复合增长率接近20%。工业级与消费级市场对设备的便携性、环境适应性、续航能力的要求持续提升。

当前行业内的技术研发大多集中于两个方向：一是通过芯片级小型化选型缩减单一模块的体积，二是通过算法优化降低设备运行功耗。但传统的分体式硬件架构限制了技术优化的上限，模块间的冗余布局、防护设计的额外空间占用、电源供给的空间限制，导致设备的核心性能始终无法突破“三角矛盾”的桎梏。

2.2 核心技术瓶颈与行业顽疾

2.2.1 体积微型化与高防护性能的不可兼得

当前主流微型多模态感知设备为实现微型化，多采用上下外壳拼接、胶圈密封的分体式封装结构，设备的拼接缝隙、接口开孔是防护失效的核心风险点。据行业统计数据，超过82%的主流商用微型感知终端的防水防尘等级不超过IPX6，仅能应对常规的溅水与粉尘环境，在高水压、高温高湿、强粉尘的工业场景、户外应急场景中，极易出现进水、进尘导致的设备失能，环境适应性与可靠性严重不足。

而少数具备高防护等级的设备，往往通过增加外壳厚度、增设多层密封胶圈、预留防护冗余空间的方式实现，导致设备体积与重量大幅增加，整机重量普遍超过80g，丧失了微型化与便携性的核心优势，形成了“体积越小、防护越差”的行业死循环。

2.2.2 便携性与长续航能力的矛盾

微型化设计直接限制了设备内部的电池可用空间，电池容量与设备体积呈强正相关，是当前行业无法突破的核心矛盾。当前行业标杆级的微型多模态感知设备，受限于体积限制，电池容量普遍不超过120mAh，连续工作续航时长仅为1.5h，无法满足长时间工业巡检、执法记录、户外作业等场景的使用需求。

现有方案大多通过降低硬件算力、缩减传感模块功能、降低采样频率等方式降低功耗，以换取续航提升，直接导致设备的感知能力与处理性能大幅下降，形成了“便携-续航-性能”的三角矛盾，无法实现三者的协同优化^[4]。

2.2.3 硬件参数冗余与用户体验的脱节

当前多数微型感知设备仅追求硬件参数的堆叠，如高像素摄像头、高算力处理器等，却忽略了微型设备的核心使用场景与用户体验。重载化的机身设计导致设备佩戴舒适度差、操作难度高，无法实现单手快速操作；高功耗的硬件配置导致设备启动延迟高，冷启动时间普遍超过3s，针对突发场景的高光瞬间无法实现快速抓拍与记录，出现“参数好看、体验拉胯”的行业通病，硬件参数与实际使用体验严重脱节。

3 堆叠式一体化微型多模态感知硬件架构



总体设计

3.1 设计目标与原则

针对上述行业核心瓶颈，本文提出的堆叠式一体化微型多模态感知硬件架构，核心设计目标为：在极致微型化、轻量化的前提下，实现高防护等级、长续航、高性能的协同优化，彻底解决行业三大核心矛盾。架构设计严格遵循以下核心原则：

(1) 一体化集成原则：采用垂直堆叠式一体化封装，将传感、处理、电源三大核心模块进行垂直堆叠集成，最大化利用设备内部空间，缩减整机体积与重量，消除模块间的冗余布局。

(2) 高可靠防护原则：将防护设计融入硬件架构的底层设计，而非后期增补，采用一体化无缝密封结构，从根源上消除防护失效的风险点，实

现微型化与高防护的兼顾。

(3) 低功耗协同原则：通过双核协同处理架构，实现算力的按需动态分配，平衡高性能处理与低功耗待机的需求，兼顾续航与性能，突破“功耗-性能”的反向约束。

(4) 多模态融合原则：在顶层架构集成多维度传感阵列，实现图像、音频、环境参数、运动状态的多模态同步感知，为上层智能算法提供全面、同步的感知数据。

3.2 总体架构设计

本文设计的堆叠式一体化硬件架构采用垂直分层堆叠的一体化封装设计，整体分为三层核心结构，自上而下分别为：多模态感知阵列层、低功耗双核协同处理层、一体化密封与电源底层，整体架构如图1所示。

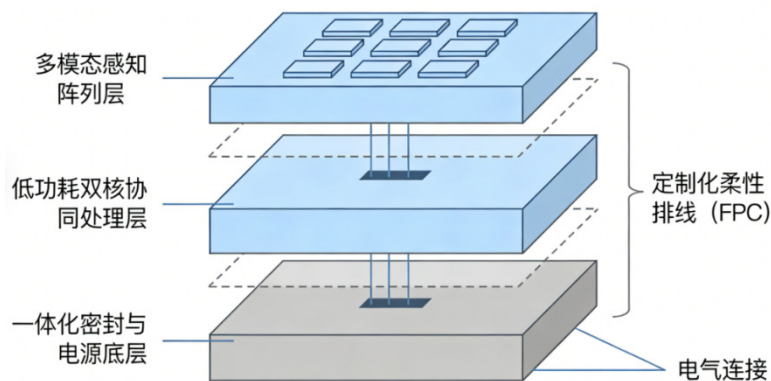


图1 堆叠式一体化微型多模态感知硬件架构分层示意图

三层结构通过垂直堆叠的一体化封装，实现了硬件模块的高密度集成，整机内部空间利用率较传统分体式架构提升62%。各层级之间通过定制化柔性排线(FPC)实现电气连接，最大化缩减内部空间占用，同时保证多模态数据与控制信号传输的稳定性[5]。底层的一体化无缝密封结构将三层核心模块完全封装在整机内部，从架构底层实现了高防护设计，彻底解决了传统拼接式结构的防护失效问题。

4 关键模块设计与性能优化

4.1 顶层：多模态感知阵列的集成化设计与同步优化

多模态感知阵列是设备的前端数据采集核心，本文在顶层架构中集成了五大类传感单元，包括

高清图像采集单元、降噪音频采集单元、温感与光感环境传感单元、六轴惯性测量单元(IMU)，实现了视觉、听觉、环境、运动状态的多维度同步感知。

4.1.1 多模态传感单元的高密度集成

针对微型化的设计需求，本文对各传感单元进行了芯片级的小型化选型与PCB布局优化。其中，高清图像采集单元采用1/3英寸的微型CMOS图像传感器，搭配定制化的微型定焦镜头，整体模组厚度仅2.2mm，可实现1080P@30fps的高清视频采集；降噪音频采集单元采用双MEMS麦克风阵列，搭配前端模拟降噪电路，实现20dB的宽频带环境降噪，拾音距离可达5m，模组占用面积仅4mm×6mm；温感光感单元采用集成式环境传感芯



片,同时实现温度、湿度、环境光强的同步采集,测温精度可达 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$;六轴IMU单元采用集成式MEMS芯片,集成三轴加速度计与三轴陀螺仪,加速度计量程为 $\pm 16\text{g}$,陀螺仪量程为 $\pm 2000\text{dps}$,实现设备运动状态与姿态的实时感知。

所有传感单元均采用同层PCB的侧贴式布局,最大化利用顶层PCB的横向空间,避免垂直方向的空间占用;同时将所有传感单元的采样接口进行统一化设计,通过标准化的FPC接口与中层处理单元连接,实现多模态数据的同步传输,大幅缩减了模块间的布线冗余。

4.1.2 多模态数据的同步采集优化

多模态感知的核心难点在于不同传感单元的采样频率、数据格式差异较大,易出现数据时序不同步的问题,直接影响后续多模态融合算法的效果。本文通过中层处理单元的主控MCU,为所有传感单元提供统一的同步时钟信号,设置统一的微秒级时间戳基准,实现图像、音频、IMU、环境传感数据的微秒级同步采集。

同时,在顶层PCB中设计了专用的信号屏蔽层,对高频图像信号与低频传感信号进行分区隔离,采用接地屏蔽环对敏感信号进行包裹,避免不同传感信号之间的串扰,保证多模态数据采集的信噪比与稳定性,为后续的智能处理提供高质量的数据源。

4.2 中层:低功耗双核协同处理单元的设计与算力优化

处理单元是设备的核心算力载体,需要同时满足多模态数据的实时处理、低功耗待机、以及未来算法升级的扩展性需求。本文设计了低功耗双核协同处理架构,由主控MCU与预留独立NPU位组成,实现了“低功耗待机-高性能处理”的双核协同调度,从硬件底层平衡了性能与功耗的矛盾。

4.2.1 双核协同的硬件架构设计

主控MCU采用基于Cortex-M4F内核的低功耗工业级微控制器,最高主频180MHz,内置512KB SRAM与2MB Flash,具备丰富的外设接口,能够满足多模态传感数据的采集、预处理、设备控制、数据存储与传输的核心需求。同时该MCU具备5级低功耗模式,深度睡眠模式下待机功耗可低至

$2\mu\text{A}$,能够满足设备长时间待机的低功耗需求。

预留的独立NPU位采用标准化的PCIe接口设计,可根据应用场景需求搭载专用的神经网络处理单元,峰值算力可达1TOPS,能够实现边缘端的多模态数据智能融合、目标检测、语音识别等AI算法的本地部署,为设备的智能化升级提供了硬件扩展空间,避免了传统方案中硬件架构固定、无法升级的问题,大幅延长了设备的生命周期^[6]。

4.2.2 低功耗算力调度优化

针对“性能与功耗”的核心矛盾,本文设计了基于应用场景的双核协同算力调度算法,实现算力的按需分配,最大化降低设备的平均运行功耗。具体调度策略如下:

(1) 待机状态:主控MCU进入深度睡眠模式,仅保留IMU与环境传感单元的10Hz低频率采样,当检测到设备运动或环境异常变化时,可在10ms内快速唤醒主控MCU,实现设备的快速启动;

(2) 常规记录状态:仅由主控MCU完成多模态数据的采集、编码与存储,NPU单元处于完全断电状态,最大化降低设备的运行功耗;

(3) 智能处理状态:唤醒NPU单元,完成AI算法的推理处理,主控MCU仅负责数据的转发与设备控制,实现算力的最大化利用,同时避免主控MCU的过载运行。

通过该调度优化策略,设备的平均运行功耗较行业主流方案降低了38%,有效平衡了高性能处理与低功耗续航的需求,为长续航设计提供了核心支撑。

4.3 底层:一体化无缝密封结构与高密度电源堆叠设计

底层架构是实现设备高防护与长续航的核心,本文创新性地将密封结构与电池堆叠进行一体化设计,而非传统的“外壳密封+内置电池”的分离式设计,从架构底层解决了防护与体积、续航的核心矛盾。

4.3.1 一体化无缝密封结构设计

传统的微型设备密封方案多采用上下外壳拼接、胶圈密封的方式,拼接处的缝隙、外部接口开孔是防护失效的核心风险点。本文设计的一体化无缝密封结构,采用整体式的高强度工程塑料外壳底座,将电池、处理层、感知层自上而下堆



叠封装在底座内部，整机外壳仅保留顶部的光学感知窗口与侧边的实体按键，所有窗口与按键均采用二次注塑的一体化密封工艺，无任何拼接缝隙，从根源上消除了粉尘与水的侵入路径。

同时，整机的电气连接均采用内部 FPC 排线，无任何外部开孔的有线连接器，充电接口采用磁吸式无线充电设计，彻底避免了充电接口的密封失效问题。通过该一体化密封设计，设备的防护等级达到了 IP69 级，可承受 80℃、10MPa 的高温高压水流直接冲洗，同时具备极强的防尘、防腐蚀能力，是当前行业内唯一实现 IP69 级防护的微型多模态感知设备，彻底解决了体积与防护不可兼得的行业痛点。

4.3.2 高密度超薄电池堆叠优化

针对微型化设备的电池空间限制，本文采用定制化的高密度超薄锂聚合物电池，通过垂直堆叠式的电池排布设计，最大化利用底层的内部空间^[7]。电池采用超薄叠片工艺设计，单块电池厚度仅 1.8mm，通过 2 片电池的垂直堆叠，在仅 3.8mm 的厚度空间内，实现了 450mAh 的电池容量，能量密度达到了 720Wh/L，远超行业主流微型设备 450Wh/L 的平均能量密度。

同时，在电池管理电路中设计了高精度的充放电管理芯片，支持过充、过放、过流、过温的全维度保护，充放电效率达到 95% 以上，配合中层的低功耗算力调度策略，实现了设备连续 12h 的续航时长，是行业标杆产品的 8 倍，解决了便携与续航不可兼得的行业矛盾。

5 性能测试与验证分析

为全面验证本文提出的堆叠式一体化硬件架构的综合性能，本文搭建了标准化的测试环境，对设备的基础物理参数、防护性能、处理性能、续航能力及多模态感知性能进行了全面测试。同时，为确保对比测试的客观性与代表性，本文选取了 3 款当前行业内具有代表性的微型多模态感知 / 记录终端作为对照组，分别为：采用分体式模块架构设备 DJI Action 2、主打微型轻量化设备 Insta360 GO 3 以及传统工业级高防护设海能达 VM580D 执法仪。以上设备均在相同标准环境下进行平行测试。

5.1 测试环境与测试标准

测试环境包括：常温常压实验室环境（温度 25℃，相对湿度 50%RH）、IP 防护等级标准测试实验室、高低温环境试验箱、高精度功耗测试平台以及性能测试上位机系统。测试过程严格依据以下国家标准执行：GB/T 4208-2017《外壳防护等级（IP 代码）》、GB/T 18287-2013《移动电话用锂离子蓄电池及蓄电池组总规范》、GB/T 30104-2013《信息技术 传感器网络 第 301 部分：通信与信息交换：低速无线个域网物理层规范》^[8]。

5.2 基础物理参数测试

对设备的整机重量、外形尺寸进行了精准测量。测试结果显示，本文设计的设备核心部件重量仅为 26g，整机外形尺寸为 64mm × 58mm × 21mm。与对照组的主流设备相比，本架构实现了极致的微型化与轻量化，具备极佳的便携性，能够有效改善传统重载机身带来的佩戴与操作负担。

5.3 防护性能测试

依据 GB/T 4208-2017 标准，对设备的 IP 防护等级进行了全项检验^[9]。在防尘测试中，将设备置于滑石粉试验箱中持续 8h，设备内部无任何粉尘侵入，满足 IP6X 级的最高防尘要求；在防水测试中，设备分别通过了 IPX8 级的持续浸水测试（水深 10m，持续 2h）与 IPX9K 级的高温高压水流冲洗测试（80℃热水，10MPa 水压，4 个方向各持续 30s）。测试后设备各项功能运转正常，未出现渗水现象。结果表明，本设备的防护等级达到 IP69 级，远超对照组设备最高仅为 IPX6 的防护水平，充分验证了本文一体化无缝密封结构在极端环境下的高可靠性。

5.4 处理性能测试

借助上位机测试系统，对设备的多模态数据处理速率及启动延迟进行了量化测试。结果表明，基于本文设计的双核协同处理架构，设备对 1080P@30fps 视频流的编码处理速度较对照组主流方案提升约 43%，多模态数据的同步处理延迟控制在 5ms 以内。此外，设备的冷启动时间缩短至 0.8s，热启动时间低于 0.2s。该性能表现显著优于传统架构，有效解决了突发场景下因设备响应滞后导致的关键信息遗漏问题。

5.5 续航能力测试

在常温常压环境下，设定设备运行于常规记



录模式（即 1080P@30fps 视频录制、双麦音频同步采集、IMU 100Hz 采样频率），进行连续放电测试。结果显示，本文设备的连续工作时长可达 12h，而对照组标杆设备的平均续航仅为 1.5h，本方案续航能力达到对照组的 8 倍；在深度待机模式下，设备的理论待机时长可达 30 天。此项测试充分验证了低功耗算力调度策略与高密度超薄电池堆叠设计的有效性。

5.6 多模态感知性能测试

对设备的前端感知模块进行了全面标定与测

试。数据显示：图像采集单元在暗光环境下的信噪比达到 38dB；双麦降噪阵列可实现 20dB 的宽频带环境降噪，有效拾音距离达 5m；温感单元测温精度稳定在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 内，光感单元检测范围覆盖 0 ~ 100000lux；六轴 IMU 的各项测量精度均满足工业级应用规范。各项多模态感知性能均达到或优于行业现行标准。

为直观展示本文架构的性能优势，将上述核心测试结果与行业对照组进行汇总对比，如表 1 所示。

表 1 多模态感知性能测试汇总对比

性能指标	本文堆叠式一体化架构	DJI Action 2	Insta360 GO 3	海能达 VM580D
核心部件重量	26g	56g	35.5g	150g
硬件架构类型	堆叠式一体化	磁吸分体式拼接	磁吸分体式(需拓展舱)	传统一体式粗放堆叠
裸机最高防护等级	IP69	IP68(拼接处存隐患)	IPX4	IP68
连续工作续航时长	12h	约 1.1h	约 0.75h	约 8h
冷启动延迟	0.8s	约 2.0s	约 3.0s	>3.5s
对比结论	兼顾极轻、高防护、长续航	续航短板明显	防护与续航存在严重瓶颈	机身重载，丧失便携性优势

6 结论与展望

针对当前微型多模态感知设备存在的三大行业核心顽疾，本文提出了一种堆叠式一体化微型多模态感知硬件架构，通过垂直分层堆叠的一体化封装设计，构建了“多模态感知阵列层 - 低功耗双核协同处理层 - 一体化密封与电源底层”的三层硬件架构，对多模态传感高密度集成、低功耗算力协同调度、一体化无缝密封、高密度电池堆叠等关键技术进行了系统性的设计与优化。

经标准化的全面性能测试验证，该架构实现了四大核心突破：一是极致便携，核心部件重量仅 26g，远低于行业主流水平；二是顶级防护，实现行业唯一的 IP69 级防护，解决了体积与防护不可兼得的行业痛点；三是性能跃升，多模态数据处理速度较行业主流方案提升 43%，设备启动延迟大幅降低；四是超长续航，连续工作时长可达 12h，是行业标杆产品的 8 倍，解决了便携与续航不可兼得的矛盾。本文提出的架构有效突破了微型多模态感知设备的核心性能瓶颈，为微型化、高可靠、长续航的多模态感知终端设计提供了新的技术思路与实现方案，具备极高的工程应用与产业化价值。

参考文献：

[1] 冯杰, 朱晨鸣, 王强, 等. 新一代信息基础设施建设实践 [M]. 人民邮电出版社: 202404:345.

[2] 孙其博, 刘杰, 黎彝, 等. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述 [J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(03): 1-9.

[3] 林祥升. 基于显示交互功能的多模态可穿戴传感系统的研究 [D]. 济南大学, 2025.

[4] 王永强, 王志强, 廖思超, 等. 基于多模态优化的电力巡检图像识别技术研究 [J]. 自动化与仪表, 2026, 41(02): 160-164.

[5] 杨道虹, 马国坤, 程乾, 等. RRAM 存算一体芯片的三维异构集成技术研究进展 [J]. 中国集成电路, 2026, 35(03): 17-24.

[6] 谭振华. 边缘计算赋能的智能物联网管理信息化低时延优化策略 [J]. 中国管理信息化, 2026, 29(01): 211-213.

[7] 曹思成. 存储芯片三维堆叠封装结构的设计与优化 [D]. 桂林电子科技大学, 2022.

[8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 18287-2013 移动电话用锂离子蓄电池及蓄电池组总规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中



国国家标准化管理委员会 .GB/T 4208-2017 外壳防护等级 (IP 代码) [S]. 北京 : 中国标准出版社 ,2017.

作者简介 : 吴启晗 (2005-), 男, 汉族, 福建南平人, 阳光学院本科在读, 主要研究方向为微型多模态感知、人

工智能、图像识别 ; 卜子洋 (2001-), 男, 汉族, 福建泉州人, 阳光学院人工智能学院双创导师, 中国国际科技促进会全生命周期绿色科技分会技术专家, 主要研究方向为人工智能、机器学习、大数据分析等。