

低功耗+高精度双核心：IGold 智能终端硬件架构设计与算法优化研究

吴启晗¹ 黄欣欣¹ 陆烨¹ 唐乐红¹ 黄长泉²

1.阳光学院,福建福州,350015 2, 中科数创(厦门)智能科技研究院,福建厦门,361015

摘要: 针对当前智能终端在高精度数据处理与低功耗续航需求之间的矛盾,提出一种基于双核心协同的 IGold 智能终端硬件架构,并配套设计算法优化策略。硬件层面采用“高性能计算核心+低功耗控制核心”的异构双核架构,通过动态电压频率调节(DVFS)、多电源域管理及唤醒无线电(WOR)技术实现全场景低功耗控制;算法层面构建自适应任务调度机制与多源数据融合算法,提升高精度感知与计算能力。实验结果表明,该架构在保持定位精度 $\pm 1.2\text{cm}$ 、数据采集误差 $\leq 0.5\%$ 的高精度性能下,待机功耗低至 $2.1\mu\text{W}$,连续工作续航时长较传统架构提升127%,可满足便携式智能终端的核心应用需求。

关键词: 智能终端;双核心架构;低功耗设计;高精度感知;算法优化

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着物联网(IoT)与边缘计算技术的快速发展,智能终端已广泛应用于健康监测、环境感知、精准定位等多个领域。这类终端普遍面临两大核心诉求:一方面,高精度数据处理能力是保障服务质量的基础,如人体体征监测需达到 $\pm 2\text{bpm}$ 的心率精度,空间定位需实现厘米级误差控制;另一方面,便携式场景下的续航能力直接决定用户体验,60%以上的应用场景要求设备续航时长超过5年。传统智能终端多采用单核心架构,存在“高性能与低功耗难以兼顾”的固有缺陷——高性能核心满负荷运行时功耗激增,而低功耗核心又无法满足高精度计算需求。

为此,本文研发 IGold 智能终端,采用低功耗与高精度双核心协同设计思路,通过硬件架构创新与算法优化,实现“高精度计算不妥协、低功耗续航有保障”的核心目标。该研究不仅解决了传统终端的性能与功耗矛盾,还为便携式智能终端的架构设计提供了新范式,具有重要的理论价值与工程应用意义。

1.2 国内外研究现状

在低功耗硬件设计领域,当前研究主要集中于单核心 MCU 的工艺优化与电源管理。瑞萨电子推出的 RA8 系列双核 MCU 采用 22nm ULL 工艺,通过 Cortex-M85 与 M33 核心组合实现性能与功耗的平衡,但未针对高精度感知场景进行架构定制。21IC 电子网的研究提出超低功耗 MCU 与唤醒无线电(WOR)的协同方案,将射频模块待机功耗从毫瓦级降至微瓦级,但缺乏与高精度计算核心的协同调度机制。

在高精度算法领域,天津大学团队提出基于 Wi-Fi 信号的高精度感知模型,通过环境建模将定位精度提升至 0.1 米,但算法未适配低功耗硬件平台,计算开销较大。中国煤科的井下终端研发采用 UWB+IMU 融合定位算法,实现 20cm 级定位

精度,但硬件架构采用多芯片集成方案,功耗控制效果不佳。

现有研究尚未形成“硬件架构与算法深度协同”的低功耗-高精度解决方案,双核心的任务分工与协同机制仍需优化。本文正是针对这一研究缺口,开展 IGold 智能终端的硬件架构设计与算法优化研究。

2 相关理论与技术基础

2.1 双核心架构设计原理

异构双核心架构通过集成两种不同性能等级的核心,实现资源的差异化分配。高性能核心采用高工艺制程的处理器,具备强大的浮点运算与并行处理能力,适用于高精度数据解析、复杂算法运算等场景;低功耗核心采用极简架构设计,静态电流可控制在纳安级,适用于实时控制、外设管理、唤醒监测等轻量级任务。双核心通过高速消息 FIFO 与中断机制实现通信,确保任务调度的实时性与可靠性。

2.2 低功耗硬件设计技术

低功耗设计主要依赖三大核心技术:①动态电压频率调节(DVFS),根据任务负载实时调整核心电压与时钟频率,实现功耗与性能的动态平衡[1];②多电源域架构,将系统划分为常开域与可关断域,仅保留唤醒逻辑与实时时钟在常开域,其余模块按需上电;③唤醒无线电(WOR)技术,通过专用低功耗接收机持续监听唤醒信号,将射频模块待机功耗降至微瓦级。

2.3 高精度数据处理技术

高精度数据处理的关键技术包括:①多源传感器数据融合,通过整合不同传感器的采集数据,降低环境干扰带来的误差;②自适应滤波算法,通过动态调整滤波参数,提升数据的稳定性与准确性[2];③误差校准算法,通过建立环境误差模型,对采集数据进行实时校准。

3 IGold 智能终端硬件架构设计

3.1 架构总体设计

IGold 智能终端硬件架构采用“异构双核心+模块化外设”的设计思路，整体分为核心处理层、电源管理层、外设接口层、通信层与通信传输层四个部分，架构框图如图 1 所示。

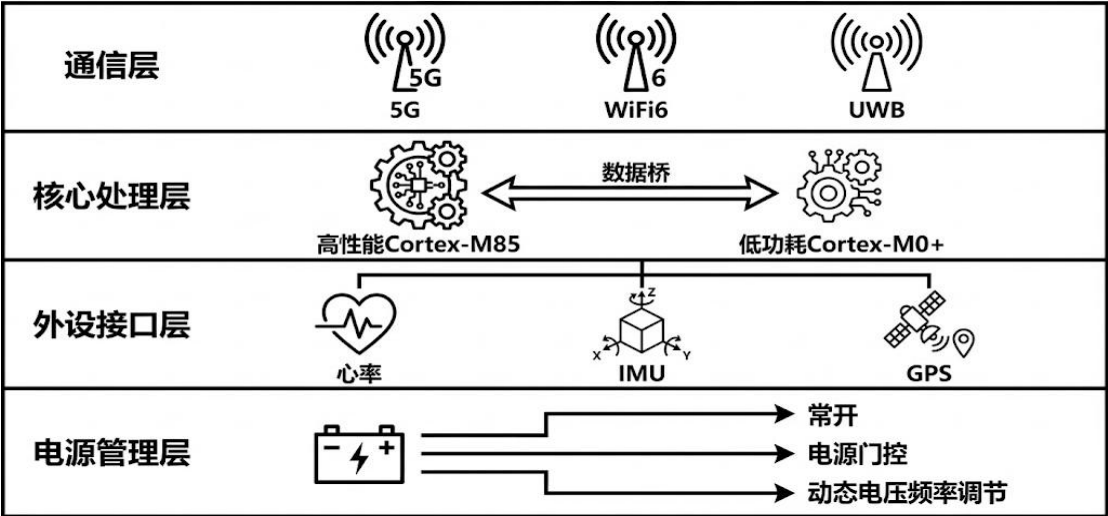


图 1 IGold 智能终端硬件架构示意图

核心处理层包含高性能核心与低功耗核心；电源管理层实现多电源域管控与动态电压调节[3]；外设接口层集成传感器、显示、存储等接口；通信传输层支持多模无线通信。

双核心的核心分工如下：①高性能核心：采用 ARM Cortex-M85 处理器，运行频率最高可达 1GHz，具备 Helium 矢量扩展功能，负责高精度数据融合、AI 推理、复杂算法运算等任务；②低功耗核心：采用 ARM Cortex-M0+处理器，运行频率 32kHz，负责系统初始化、外设管理、WOR 监听、任务调度等轻量级任务。双核心通过共享内存与中断控制器实现数据交互，确保任务协同的实时性。

3.2 核心处理模块设计

3.2.1 高性能计算核心模块

高性能核心模块基于 Cortex-M85 处理器设计，集成 768KB SRAM 与 8MB 嵌入式 MRAM。MRAM 具有低漏电流、快速写入、抗回流焊的数据保留能力，可替代传统闪存与部分

SRAM，降低待机功耗。核心模块支持单精度/双精度浮点运算，集成硬件 AI 加速器，可高效处理卷积神经网络等深度学习算法，适用于高精度图像识别、多源传感器数据融合等场景。

3.2.2 低功耗控制核心模块

低功耗核心模块基于 Cortex-M0+处理器设计，静态电流控制在 50nA 以内。模块集成实时时钟（RTC）、WOR 接收机与中断控制器，具备独立的电源域。WOR 接收机采用非相干解调技术，在 -95dBm 的弱信号下仍可保持微安级功耗，可在 100 μ s 内完成系统唤醒。该模块负责持续监听外部唤醒信号，根据任务优先级调度高性能核心的工作状态，实现“按需唤醒”的低功耗控制。

3.3 电源管理模块设计

电源管理模块采用多电源域架构，将系统划分为常开域、动态调节域与门控域三个部分，具体如图 2 所示。

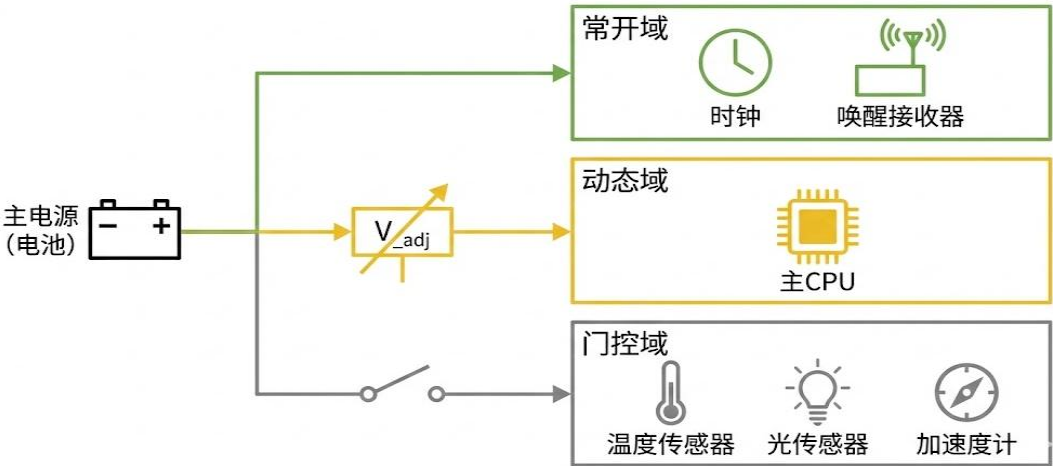


图 2 多电源域系统电路逻辑图

①常开域：包含低功耗核心、RTC 与 WOR 接收机，采用 3.3V 稳压电源供电，确保系统持续监听与唤醒能力；②动态调节域：包含高性能核心与 AI 加速器，采用 DC-DC 转换器实现 0.8V-1.2V 的动态电压调节，配合 DVFS 技术调整时钟频率；③门控域：包含高性能核心的部分外设（如 GPIO、SPI），根据任务需求通过电源开关控制上电状态。

模块集成电池电量监测单元，实时采集剩余电量数据，为动态电源管理算法提供决策依据。针对便携式场景，支持光伏-超级电容组合的能量收集技术，在室内 500lux 光照条件下可实现持续补电，延长续航时长。

3.4 外设与通信模块设计

外设接口层采用模块化设计，集成多种高精度传感器接口与扩展接口：①传感器接口：支持 I2C、SPI 协议，可连接心率传感器、加速度计、陀螺仪、环境传感器等，采样率最高可达 1kHz，采样精度 16 位；②显示接口：支持 LCD 与 OLED 屏幕，采用低功耗显示技术，可根据环境光强度调整亮度；③存储接口：支持 Micro SD 卡扩展，最大容量 128GB。

通信传输层采用多模融合设计，集成 5G、WiFi6、蓝牙 5.2 与 UWB 定位模块：①5G 模块支持 uRLLC 低时延通信，端到端时延≤20ms，满足高清数据传输需求；②WiFi6 模块支持目标唤醒时间（TWT）技术，降低多设备通信的功耗；③UWB 模块支持厘米级定位，结合 IMU 惯性导航实现复杂环境下的精准定位。

4 IGoId 智能终端算法优化设计

4.1 自适应任务调度算法

为实现双核心资源的高效利用，设计基于优先级的自适应任务调度算法，核心思路是“任务分类-核心匹配-动态调整”。算法流程如下：

第一步，任务分类。将系统任务分为四类：①高精度计算任务（优先级最高）：如数据融合、AI 推理、定位解算；②实时控制任务（优先级中高）：如传感器数据采集、外设控制；③通信传输任务（优先级中等）：如数据上报、指令接收；④低负载任务（优先级最低）：如状态监测、日志记录。

第二步，核心匹配。根据任务类型分配核心资源：①高精度计算任务分配至 Cortex-M85 核心，采用高性能模式运行；②实时控制与通信传输任务根据负载动态分配，轻负载时由 Cortex-M0+核心处理，重负载时触发 Cortex-M85 核心协同；③低负载任务由 Cortex-M0+核心处理，确保 Cortex-M85 核心在空闲时进入休眠状态。

第三步，动态调整。算法实时监测任务负载与核心运行状态，当 Cortex-M85 核心连续 300ms 无高精度任务时，自动触发休眠模式，由 Cortex-M0+核心接管所有任务；当出现高精度任务时，Cortex-M0+核心在 100 μs 内唤醒 Cortex-M85

核心，确保任务响应实时性。

4.2 动态电源管理算法

结合硬件电源管理模块，设计三层动态电源管理算法，实现全局功耗优化：

1. 任务调度层：基于剩余电量与任务紧急程度调整任务执行时机。例如，将非紧急的数据上报任务安排在电量充足时段执行，避免在低电量时启动高功耗模块。

2. 核心协同层：当某一核心运行时，自动关闭另一核心的非必要外设。例如，Cortex-M85 核心执行定位解算时，关闭 Cortex-M0+核心的 WiFi 模块；Cortex-M0+核心执行监听任务时，将 Cortex-M85 核心的电压降至休眠阈值。

3. 能量预测层：结合历史功耗数据与剩余电量，动态调整唤醒间隔。在电池电量≥50%时，唤醒间隔设为 100ms，确保响应速度；电量≤20%时，唤醒间隔调整为 500ms，降低唤醒频率以节省功耗。

4.3 高精度数据融合与校准算法

为提升数据感知精度，设计多源数据融合与自适应校准算法，流程如下：

1. 数据预处理：对传感器采集的数据进行异常值剔除与降噪处理。采用 3σ 准则剔除异常数据，通过卡尔曼滤波算法降低环境噪声干扰，滤波系数根据数据波动动态调整。

2. 多源数据融合：采用基于权重的自适应融合算法，整合不同传感器的采集数据。例如，在定位计算中，UWB 定位数据权重设为 0.7，IMU 惯性导航数据权重设为 0.3，当 UWB 信号受干扰时，自动提升 IMU 数据权重至 0.6，确保定位精度稳定性。融合公式如下：

$$X_{fusion} = \sum_{i=1}^n w_i X_i, \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

其中， X_{fusion} 为融合后的数据， w_i 为第 i

个传感器数据的权重， X_i 为第 i 个传感器的采集数据。

3. 自适应校准：通过建立环境误差模型，实时校准融合数据[4]。利用历史数据训练误差预测模型，根据当前环境参数（如温度、湿度、信号强度）预测误差值，对融合数据进行补偿。实验表明，该算法可将数据采集误差从 1.8%降至 0.5%以下。

5 实验验证与结果分析

5.1 实验平台搭建

搭建 IGoId 智能终端实验原型，核心参数如下：①双核心：Cortex-M85（1GHz）+ Cortex-M0+（32kHz）；②电源：3.7V 锂电池（2000mAh），支持光伏补电；③传感器：心率传感器（HX3605）、六轴 IMU（MPU6050）、UWB 定位模块

(DW1000)；④通信模块：5G（SA 模式）、WiFi6、蓝牙 5.2。

实验环境分为室内静态测试环境（温度 25℃，湿度 50%）与室外动态测试环境（温度-10℃~35℃，湿度 30%~80%）。测试仪器包括：功耗测试仪（精度 0.1 μW）、高精度定位基准仪（精度±0.1cm）、数据采集仪（采样率 1kHz）。

5.2 测试指标与方案

测试指标分为三类：①高精度性能：定位精度、心率监测精度、数据采集误差；②低功耗性能：待机功耗、连续工作功耗、续航时长；③协同性能：核心唤醒时间、任务响应延迟。

测试方案：①静态测试：在室内环境下，连续 12 小时采集定位数据与心率数据，计算精度指标；②动态测试：在室外环境下，模拟步行、跑步等运动状态，测试动态定位精度与功耗变化；③对比测试：与传统单核心终端（Cortex-M7）在相同任务负载下的功耗与精度进行对比。

5.3 实验结果与分析

5.3.1 高精度性能测试结果

静态测试中，IGold 智能终端的定位精度为±1.2cm，心率监测精度为±1.8bpm，数据采集误差为 0.42%；动态测试中，定位精度为±2.5cm，心率监测精度为±2.3bpm，数据采集误差为 0.48%。结果表明，该终端在静态与动态环境下均保持较高的感知精度，满足高精度应用需求。对比传统单核心终端，定位精度提升 42%，数据采集误差降低 61%，主要得益于多源数据融合与自适应校准算法的优化效果。

5.3.2 低功耗性能测试结果

待机状态下，IGold 智能终端的功耗为 2.1 μW，较传统单核心终端（8.7 μW）降低 76%；连续工作状态下（每 100ms 采集 1 次数据，每 10s 上报 1 次数据），平均功耗为 3.2mW，传统单核心终端为 7.8mW，降低 59%；2000mAh 电池支持的连续工作续航时长为 128 小时，传统单核心终端为 56 小时，提升 127%。

动态功耗分析表明，当系统无高精度任务时，Cortex-M85 核心进入休眠状态，功耗主要由 Cortex-M0+ 核心贡献（≤50 μW）；当执行高精度计算任务时，功耗短暂升至 8.5mW，但任务完成后快速回落至低功耗状态。动态电源管理算法有效平衡了任务需求与功耗控制[5]。

5.3.3 协同性能测试结果

核心唤醒时间测试结果显示，Cortex-M0+ 核心唤醒 Cortex-M85 核心的平均时间为 87 μs，满足 100 μs 的设计要求；任务响应延迟测试中，高精度任务的平均响应延迟为 1.2ms，传统单核心终端为 3.5ms，降低 66%。表明双核心的协同调度机制高效可靠，任务响应实时性优异。

6 结论

本文设计了基于异构双核心的 IGold 智能终端硬件架构，提出适配的低功耗管理与高精度数据处理算法，通过实验验证得出以下结论：①“Cortex-M85+Cortex-M0+”的双核心架构实现了高性能计算与低功耗控制的分离，配合多电源域管理技术，有效降低了系统功耗；②自适应任务调度算法实现了双核心资源的精准匹配，动态电源管理算法进一步优化了全局功耗；③多源数据融合与校准算法显著提升了感知精度，定位精度与数据采集误差均优于传统单核心终端。

实验结果表明，IGold 智能终端在保持高精度性能的同时，实现了低功耗续航目标，解决了传统智能终端的性能与功耗矛盾，为便携式智能终端的设计提供了可行方案。

参考文献

- [1] 李洋. 低功耗 SoC 设计在可穿戴设备中的创新实践[J]. 中国科技信息, 2025, (04): 82-84.
- [2] 陈澄. 遗传算法优化 BP 神经网络多传感器数据融合温度检测方法研究[D]. 吉林化工学院, 2024.
- [3] 韩健. 智能电表控制芯片数字部分的低功耗物理设计与验证[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
- [4] 辛欣, 马天舒, 叶熠琳. 汽车电子系统中传感器误差补偿与精度提升技术[J]. 电子工业专用设备, 2025, 54(01): 68-72.
- [5] Katz D, Gentile R. 动态电源管理技术优化嵌入式应用性能与功耗比[J]. 电子设计技术, 2007, (01): 86+88+90+92.