

嵌入式数据采集系统低功耗设计与实现

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]随着物联网与边缘计算技术的迅猛发展, 嵌入式数据采集系统正朝着微型化、智能化与长续航方向演进。低功耗设计已成为制约该类系统广泛应用的核心瓶颈。本文聚焦于嵌入式数据采集系统的架构优化与能效提升策略, 深入剖析从硬件电路选型、电源管理架构重构到软件算法协同调度的全链路低功耗机制。通过构建动态电压频率调节模型与事件驱动型休眠唤醒机制, 提出一种基于负载感知的自适应功耗控制方法, 旨在突破传统静态功耗设计的局限, 显著提升系统在复杂环境下的能量利用效率与运行稳定性, 为下一代绿色感知网络提供理论支撑与技术路径。

[关键词]嵌入式; 低功耗设计; 数据采集; 实现

DOI: 10.64635/ja.2026.1363

中图分类号: TP274.2

文献标识码: A

Low-Power Design and Implementation of an Embedded Data Acquisition System

Hu Juntao

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

Abstract: With the rapid development of the Internet of Things and edge computing technologies, embedded data acquisition systems are evolving toward miniaturization, intelligence, and long battery life. Low-power design has become a core bottleneck restricting the wide application of such systems. This paper focuses on architectural optimization and energy-efficiency improvement strategies for embedded data acquisition systems, and provides an in-depth analysis of the full-chain low-power mechanism, ranging from hardware circuit selection and power management architecture reconstruction to collaborative scheduling of software algorithms. By constructing a dynamic voltage and frequency scaling model and an event-driven sleep-wake mechanism, this paper proposes a load-aware adaptive power control method. The aim is to overcome the limitations of traditional static power design, significantly improve the system's energy utilization efficiency and operational stability in complex environments, and provide theoretical support and a technical path for the next generation of green sensing networks.

Keywords: embedded system; low-power design; data acquisition; implementation

引言

在万物互联的时代背景下, 各类传感器节点如同神经末梢般广泛分布于工业监测、环境监测、智慧农业及医疗健康等关键领域。这些节点承担着海量数据的实时采集、初步处理与传输任务, 其性能优劣直接决定了整个感知网络的可靠性与响应速度。然而, 绝大多数此类节点依赖电池供电, 且往往部署在难以频繁更换或补充能源的偏远或封闭环境中。因此, 如何最大限度地延长系统的工作寿命, 降低对维护成本的依赖, 成为当前嵌入式领域亟待解决的关键问题。传统的系统设计往往侧重于功能实现的完备性与数据采集的高精度, 而忽视了能耗这一决定性因素, 导致设备在实际应用中频繁出现电力耗尽、数据中断等现象,

严重影响了系统的实用价值。

1 嵌入式数据采集系统功耗构成机理与建模分析

1.1 系统功耗的物理来源与分布特征

嵌入式数据采集系统的能耗并非均匀分布, 而是呈现出显著的时空异质性与非线性特征。从物理层面深度剖析, 功耗主要源于动态开关损耗、静态漏电流以及漏电泄漏三个核心部分, 三者相互耦合, 共同决定了系统的能效边界。动态功耗是系统在信号采样、模数转换及数字逻辑运算过程中产生的能量消耗, 其数值与工作频率及供电电压的平方呈正相关, 具有强烈的脉冲式爆发特征, 往往在数据突发传输或复杂算法执行瞬间形成功耗尖峰。随着半导体工艺节点不断微缩至纳米级, 晶体管栅极氧化层厚度急剧减

小,导致静态功耗中的漏电流问题日益严峻。这部分功耗在芯片未进行逻辑翻转时依然存在,且在高温环境下呈指数级增长,甚至在设备待机状态下可能占据总能耗的主导地位。此外,射频通信模块在握手建立连接、数据包发送及接收机监听时的瞬时峰值功率极高,构成了系统中能量消耗的“洪峰”区域。理解这些不同来源的功耗特征及其在时间轴上的分布规律,特别是动态与静态功耗在不同负载下的权重变化,是构建精准模型与实施针对性优化的前提。若忽视这种非均匀性,仅凭平均功耗指标进行设计,极易导致系统在关键时刻因瞬时电流过大而引发掉电复位,或因静态漏电流累积而导致电池提前失效。

1.2 典型工作模式下的能耗量化模型

为了精准评估系统能效并指导架构设计,必须建立能够真实反映复杂工作场景的能耗量化模型。该模型需全面涵盖数据采集、本地预处理、无线传输、协议栈处理及深度休眠等多种典型工作模式,并引入时间片加权平均法将瞬时功率转化为等效平均功耗指标。在采集模式下,传感器激活、ADC 转换电路工作、参考电压稳定及微控制器运算共同构成了高能耗阶段,此时各模块协同动作,功耗曲线呈现陡峭上升态势;在预处理阶段,数据压缩、滤波算法及加密运算的执行强度直接决定了计算功耗的大小,需根据算法复杂度建立相应的能耗函数。而在传输阶段,通信协议的握手过程、前导码发送、数据包载荷传输时长及接收机灵敏度直接关联着射频功耗,其中信道竞争导致的重传机会会显著增加无效能耗。相比之下,休眠模式下的功耗虽低,但其维持时间与系统唤醒延迟之间的权衡至关重要,过长的唤醒准备时间会抵消休眠带来的节能收益。通过引入多变量回归分析,将环境温度、电池内阻变化、任务队列长度等外部因素纳入模型,可以构建出动态变化的能耗预测方程。该模型不仅能准确预测系统在特定任务序列下的总能耗,还能识别出能耗瓶颈所在,为后续硬件选型、电源管理策略调整及软件调度优化提供量化的理论依据,确保设计方案在满足性能指标的同时实现能效最大化。

2 硬件层面的低功耗架构重构与电路优化

2.1 异构计算单元与动态电压频率调节

传统嵌入式系统多采用单一核心架构,难以在算力爆发需求与极致低功耗之间找到平衡点。为突破这一物理瓶颈,引入异构计算架构成为必然趋势。该架构将高性能计算核与超低功耗微控制器深度集成于同一芯片内,形成主次分明、协同工作的算力分配体系。在数据采集与基础预

处理阶段,系统自动调度至超低功耗核心运行,其静态漏电流极低,能够以毫瓦级甚至更低功耗维持长时间待机,确保传感器持续工作而不消耗过多能量;而当面临复杂的信号滤波、特征提取、加密运算或人工智能推理任务时,则无缝切换至高主频核心,利用其强大的并行处理能力快速完成任务并迅速返回休眠状态。在此基础上,动态电压频率调节技术作为核心调控手段,通过片内高精度传感器实时监测任务队列深度、计算负载密度以及温度变化。当负载较低时,算法迅速降低供电电压并同步下调时钟频率,使芯片工作点始终锁定在满足性能阈值的最小能耗区间,避免高频空转带来的巨大能量浪费。这种细粒度的协同控制不仅消除了资源闲置造成的无效功耗,还显著降低了芯片结温,延缓了器件老化过程,从而在物理层面实现了能效比的质的飞跃。此外,针对特定算法任务,可设计专用的硬件加速单元,如数字信号处理加速器或神经网络协处理器,进一步减少通用 CPU 的参与时间,从底层逻辑上大幅削减系统总功耗,为长续航应用奠定了坚实的硬件基础。

2.2 智能电源管理单元与多域供电策略

电源管理单元是系统能量流动的总枢纽,其设计优劣直接决定了整体能效上限。摒弃传统的线性稳压方案,转而采用高效率的开关电容式或电感式 DC-DC 变换器,可在大压差输入下将转换效率提升至 90%以上,大幅减少热损耗。更为关键的是实施精细化的多域供电策略,依据功能模块的逻辑独立性与工作时序差异,将系统划分为传感器采集域、主控计算域、射频通信域、存储域及外围接口域等多个独立供电区域。每个域均配备独立的电源开关管、电压检测寄存器及状态反馈机制,支持毫秒级甚至微秒级的快速通断控制。例如,在数据静默期或深度休眠模式下,系统可立即切断射频与存储域的供电,仅保留主控核心的极低电压待机电源,彻底阻断漏电通道,防止电池自放电加剧。同时,针对电池特性及环境温度动态调整各域电压等级,如在低温环境下适当提升电压以保证 ADC 转换精度和传感器灵敏度,而在常温低负载下则进一步压低电压以减少焦耳热效应。这种精细化的电源切片管理,不仅最大限度地抑制了静态功耗,还有效平衡了不同模块间的能量供给,避免了“木桶效应”导致的能源浪费。此外,引入智能电源路径管理,根据电池剩余电量自动切换充放电模式,并在检测到异常大电流时迅速触发保护机制,提升了系统在极端环境下的鲁棒性与服役寿命,实现了从被动供电到主动能量调度的根本转变。

3 软件协同的节能调度策略与通信协议优化

3.1 事件驱动的任务调度与休眠唤醒机制

软件层面的节能核心在于彻底摒弃低效的轮询机制，构建基于事件驱动的异步任务调度模型。传统方式下，中央处理器需周期性查询传感器状态、检查缓冲区数据，即便无新数据产生也处于活跃循环，造成大量无效指令执行与总线翻转，导致能量无谓消耗。事件驱动模式则利用外部中断引脚、高精度睡眠定时器及内部看门狗机制，仅在传感器触发阈值、特定时间窗口到达或外部信号到来时才唤醒 CPU，其余时间系统深度进入休眠状态，此时电流可降至微安甚至纳安级别，几乎接近零功耗。配合快速上下文切换逻辑与优化的启动代码，系统能在微秒级时间内完成从休眠到激活的状态跃迁，确保数据采集的实时性不受影响，且不会因唤醒延迟而丢失关键数据。此外，引入自适应休眠策略，系统根据历史数据流量统计规律、当前环境变化趋势及业务优先级，动态预测未来任务密度，灵活调整休眠时长。若预测将有突发数据流或高优先级任务，则缩短休眠间隔或提前预加载部分程序；反之则延长休眠时间至极限值。这种智能化的调度机制，在保障系统响应速度与数据完整性的同时，最大程度地压缩了无效活跃时间，实现了能量消耗与任务效率的完美平衡。同时，软件层还需对操作系统内核进行裁剪，移除不必要的后台服务与日志记录功能，减少内存占用与 CPU 调度开销，进一步释放系统潜能，为低功耗运行提供纯净的软件环境。

3.2 轻量级通信协议与数据聚合传输

无线通信模块通常是嵌入式系统中最大的能耗来源，其发射功率往往占据总功耗的半数以上，且接收与空闲监听状态同样消耗巨大能量。为此，必须采用专为低功耗场景设计的通信协议栈，如 ZigBee、LoRaWAN 或 BLE 等，这些协议在媒体访问控制层引入了严格的睡眠同步机制，大幅减少了节点在信道中的空闲监听时间与冲突重传概率。在应用层，实施激进的数据聚合与压缩策略至关重要。节点端不再上传原始海量数据，而是内置轻量级滤波、去重、差分编码及小波变换等算法，对采集数据进行初步清洗、异常值剔除及特征提取，仅将关键指标、统计结果或压缩后的数据包发送，从而显著降低数据包长度与传输频次，减少空中传输时间。同时，优化路由算法，构建能量感知的网络拓扑结构，优先选择剩余电量充足、链路质量稳定且跳数较少的节点进行数据中继，避免单一节点因频繁转发而过早耗尽能量，导致网络分区。此外，引入自适应传输速率控制机制，根据信道质量动态调整发射功率与

调制方式，在保证通信可靠性的前提下最小化传输能耗。这种全网协同的节能策略，不仅延长了单点设备的生命周期，更提升了整个感知网络的覆盖范围、稳定性与自愈能力，实现了系统级能效的整体优化，为大规模物联网部署提供了可靠的通信支撑。

4 系统能效评估体系构建与实测验证分析

4.1 多维度能效评价指标体系

构建科学的评价体系是检验低功耗设计成效的基础。该体系应包含平均功耗、峰值功耗、能量利用率、任务完成率及系统存活时间等多个维度。平均功耗反映系统在长期运行下的基础能耗水平；峰值功耗则用于评估电源模块的瞬态响应能力与散热设计余量。能量利用率衡量输入电能转化为有效有用功的比例，剔除无效发热损耗。任务完成率关注在低电量状态下的系统功能完整性，而系统存活时间则是综合所有指标后的最终体现，直接决定了产品的市场竞争力。通过建立标准化的测试流程，可以客观地对比不同设计方案的性能差异。

4.2 典型场景下的实测数据分析与反馈优化

理论模型的准确性最终需经受实际环境的考验。通过在工业现场、野外监测站等典型应用场景中部署原型系统，收集长时间运行的真实能耗数据。利用高精度示波器与电流探头记录电压电流波形，分析不同工况下的能量消耗曲线。将实测数据与理论模型进行比对，识别出模型偏差的来源，如未考虑的寄生参数、环境温度对电池内阻的影响等。基于反馈数据，对硬件选型、电源管理阈值及软件调度参数进行迭代修正。这种闭环式的验证与优化过程，确保了设计方案不仅停留在纸面，而是具备极强的工程落地能力与鲁棒性。

5 结论

本文围绕嵌入式数据采集系统的低功耗设计与实现展开了系统性研究，从功耗构成的微观机理出发，深入探讨了硬件架构重构、软件调度优化及通信协议改进等多维度的节能策略。通过构建动态电压频率调节模型与事件驱动型休眠机制，提出了适应复杂工况的自适应功耗控制方法，有效解决了传统设计中存在的能耗分布不均与资源浪费问题。研究表明，软硬件协同优化的设计理念能够显著提升系统的能量利用效率，延长设备在电池供电条件下的使用寿命，为构建绿色、可持续的物联网感知网络提供了坚实的技术支撑。未来的研究可进一步探索人工智能技术在能耗预测与动态调度中的应用，以实现更加智能化的能效管理。

[参考文献]

- [1]尹汪宏,李媛媛,徐莹,苏警.基于 GPRS 远程通信的嵌入式低功耗数据采集系统设计[J].安徽电子信息职业技术学院学报,2017,16(4):14-16.
- [2]汪超.基于 GPRS 的低功耗远程数据采集终端软件设计[D].电子科技大学,2017.
- [3]孙瑞瑞.低功耗嵌入式数据采集系统的设计与实现[D].齐鲁工业大学,2015.
- [4]无线通信在嵌入式系统中的应用讲座(15)仓库低成本短信监控系统方案——低功耗 GPRS 数据采集设备的应用[J].电子技术应用,2010,36(4):18-19.
- [5]李琦,高军萍.凌阳 SPCE061A 嵌入式数据采集系统的低功耗设计[J].河北工业大学成人教育学院学报,2006,(1):16-18+31.