

热电偶无线传感器节点低功耗优化设计

尚立信^{1,2}, 焦新泉^{1,2}, 陈建军^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 针对飞行器内部线缆复杂度高、布线困难的问题, 提出采用无线通信模式来提高传感器部署的灵活性, 减少线缆运输和安装成本; 为了最大程度地延长无线传感器节点的使用寿命, 对热电偶无线传感器进行了节点低功耗优化设计; 硬件方面, 基于DPM机制设计了能量分块管理模型, 核心处理器采用国产低功耗芯片GD32E230C8T6; 软件方面, 提出了一种基于星型拓扑结构无线传感器网络的低功耗策略, 并基于此策略给出节点剩余能量数学表达式; 实验结果表明, 此节点处于停机储运状态下的电流低于 $1\ \mu\text{A}$, 待机模式下的电流低于 $23\ \text{mA}$, 证实了所设计的热电偶无线传感器具有低功耗、稳定的特点, 能有效延长节点寿命。

关键词: 热电偶传感器; 无线传感器节点; 低功耗; WSNs; 休眠策略; 星型拓扑; GD32E230; Si24R1

Low-power Optimization Design of Thermocouple Wireless Sensor Node

SHANG Lixin^{1,2}, JIAO Xinquan^{1,2}, CHEN Jianjun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electronic Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing (Ministry of Education),

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aimed at the problems of high complexity and difficult wiring inside aircraft, a wireless communication mode is proposed to improve the flexibility of sensor deployment and reduce the cost of cable transportation and installation. In order to maximize the service life of the wireless sensor node, the low-power consumption optimization design of thermocouple wireless sensor is carried out. In the hardware design, an energy block management model is designed based on the DPM mechanism, and the core processor selects a domestic low-power chip (GD32E230C8T6); in the software design, a low-power strategy based on a star topology network is proposed, and the node based on this strategy is deduced to the mathematical expression for residual energy. The experimental results show that the current of this node is lower than $1\ \mu\text{A}$ in the shutdown storage and transportation state, and the current of standby mode is lower than $23\ \text{mA}$, which proves that the designed thermocouple wireless sensor has the characteristics of low power consumption and stability, it can effectively prolong the life of the node.

Keywords: thermocouple sensor; wireless sensor node; low power consumption; WSNs; sleep strategy; star topology; GD32E230; Si24R1

0 引言

随着科技的发展, 飞行器内部结构越来越复杂, 被测节点数量繁多, 种类复杂, 频率和特征不尽相同, 导线和电缆大大增加了测试系统的重量和成本, 同时也降低了测试系统的可靠性^[1]。尤其在一些不方便或不允许布线的关键位置, 根本无法布置电缆获取信号。因此, 研究人员将无线传感器放置于飞行器的多个位置实时获取飞行数据^[2]。但无线传感网络多采用电池供电, 每个节点存储的能量非常有限, 且更换电池不易^[3]。如何最大限度降低节点能耗, 延长无线传感器网络的生存周期仍是亟待解决的问题^[4]。

2017年, 李文艳等人针对短距离射频无线通信提出一种基于流量自适应的超低功耗MAC协议, 根据网络中的通信量对节点休眠时长进行实时调度以降低能耗^[5]。2018年, 贺翔等人提出了一种基于MF-TDMA的低功耗网络设备设计方法, 通过对网络频率和时间资料动态分配节省无线传感网络的能耗^[6]。2019年, DHUNNA G S等人基于动态电压调节(Dynamic Voltage Scaling)设计了节点功率管理机制, 动态改变微处理器的工作电压和频率, 在性能和功耗之间取得平衡^[7]。2020年韩雨龙等人通过减少空闲侦听的方式实现节点低功耗^[8]。2021年, YOU S等人采用动态电源管理(Dynamic Power Management)合理控制节点完全休眠状态的时机和时间长度, 动态开启或关断各组件, 从

收稿日期: 2022-05-26; 修回日期: 2022-06-27。

基金项目: 装备预研重点实验室项目(2021-XXXX-XX-051)。

作者简介: 尚立信(1998-), 女, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事电路与系统方向的研究。

焦新泉(1978-), 江苏泰新人, 教授, 研究生导师, 主要从事微纳器件及测试技术方向的研究。

引用格式: 尚立信, 焦新泉, 陈建军. 热电偶无线传感器节点低功耗优化设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 294-300.

而实现节能^[9]。2021 年, 王辉等人基于表层漂流附表系统通过软件看门狗减少系统运行时长降低达到低功耗的目的^[10]。

以上研究提出的休眠机制和网络协议主要是降低待机和休眠状态下的节点能耗, 缺少对工作状态下低功耗的研究, 而飞行器内部的无线传感网络节点能量主要消耗在工作模式下^[11]。针对上述问题, 本文基于热电偶无线传感器, 提出了一种适用于星型拓扑结构网络的低功耗策略, 该策略充分考虑了节点在工作状态下的能量消耗, 并结合硬件电路设计, 设计并实现了一种低功耗热电偶无线传感器节点, 能有效延长节点寿命。

1 节点电路设计

热电偶无线传感器节点采用一体式设计, 由传感器模块、电源模块、核心处理器以及无线射频模块组成。热电偶传感器采集到温度值后通过核心处理器内的 AD 模块将其转换为数字电压, 如图 1 所示, 通过射频模块将其发送给中心节点。为达到实时监测的目的, 无线传感器节点和中心节点之间保持时钟同步。

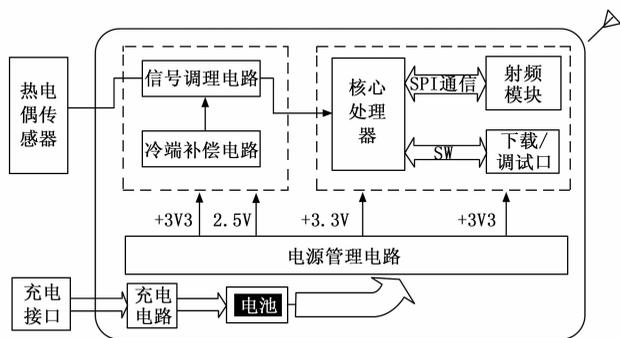


图 1 节点硬件结构示意图

由于无线传感器节点需要周期性采集传感器信号并频繁地处理收发数据, 核心处理器和射频芯片长时间处于工作状态, 消耗节点大量能量。本文选取 GD32E230C8T6 作为核心处理器, 其内部电源管理单元提供了 3 种省电模式: 睡眠模式、深度睡眠模式和待机模式。待机模式下的电流仅 $5.5 \mu\text{A}$, 合理运用低功耗模式可使得应用程序在 CPU 运行时间、速度和功耗的相互冲突中达到平衡。

目前, 无线传感器网络多采用 NRF24L01 作为射频芯片, Si24R1 作为 NRF24L01 的替代使用型号, 软件硬件都可兼容, 在国内工程领域有较高的认可度。表 1 从不同方面对两款芯片的相关参数做了比较。在接收灵敏度、关断功耗、待机功耗和最大发射功率上, Si24R1 优于 NRF24L01, 虽然前者的发射功耗略高于后者, 但后者更小的待机电流和关断电流使得节点在休眠状态下的平均电流更小, 对于无线传感器来说, 射频模块休眠时长远大于工作时长^[12], 所以 Si24R1 的长期功耗更低, 且 Si24R1 的成本要低于 NRF24L01, 所以本节点选择了国产的 Si24R1。

表 1 Si24R1 和 NRF24L01 的参数对比

参数	Si24R1	NRF24L01
最大发射功率	7 dB	0 dB
接收灵敏度	-83 dBm @ 2 MHz	-82 dBm @ 2 MHz
关断功耗	1 μA	1.5 μA
待机功耗	15 μA	26 μA
发射电流 @ 0 dBm	12 mA	11.3 mA

1.1 电源管理电路

无线传感器节点的能量消耗主要在通信模块、处理模块和感知模块, 对这 3 个模块进行能耗分析是研究无线传感网络能耗的第一步。通信模块负责与 sink 节点进行信息交互, 电压控制振荡器和功率放大器芯片内部元件不但有工作功耗, 还有启动功耗。处理模块即核心处理器, 其能量主要消耗在工作电压、运行时钟以及数据处理等方面。感知模块由传感器信号采集芯片及其功能电路组成, 包括信号的采集和调理。

处理模块、感知模块和通信模块都具有多种不同的工作模式, 在传统的嵌入式系统中这些功能模块通常被成为功耗可管理部件 PMC (power manageable component)。PMC 通常不是同时处于工作状态, 而是根据任务需求通过 DPM 机制对其进行调度和状态切换, 不同的状态下消耗的能量不同, 这部分能量由电源单元提供^[13]。大部分 PMC 与电源模块发生关联, 与电源单元发生关联的模块都在消耗能量, 当节点周围无有效事件发生时, 部分模块处于空闲状态, 需要把这些组件关掉或调到更低能耗的状态, 从而节省能量。DPM 是降低无线传感器节点功耗的常用方法。DPM 基本原理是根据系统工作负载的变化情况将部分模块或整个节点切换至低功耗状态, 甚至将其关闭, 在不影响系统性能的前提下, 降低系统的能量消耗。

但仅仅通过 DPM 节省节点能量还是无法满足低功耗的需求, 因为部分 PMC 切换至低功耗状态后仍需电源单元向其提供电流保持低功耗状态, 为了降低甚至消除 PMC 在低功耗状态下的能量消耗, 本文设计了一种电源管理电路, 将能量分模块进行管理。控制模块通过 IO 口输出高低电平来控制线性稳压电路是否正常工作, 若稳压电路不被使能, 则其无法输出足够大的电流, 使得与其连接的 PMC 无法启动进入工作状态, 同时配合 DPM 机制, 进一步节省无线传感器节点的能耗。如图 2 所示, 当节点进入休眠或待机状态时, 失能稳压电路 2 和稳压电路 3, 使得除了处理器之外的组件节点都被关掉, 有效降低节点能耗。

稳压芯片选择 TPS782, 其最大输出电流可达 150 mA, 完全满足整个系统的最大工作电流的要求。更为重要的, TPS782 的静态电流仅 500 nA, 其意味着当节点处于储运状态时, 整个系统的电流消耗可低于 $1 \mu\text{A}$ 。

1.2 K 型热电偶调理电路

热电偶输出信号属于缓变模拟信号, 其输出信号及其

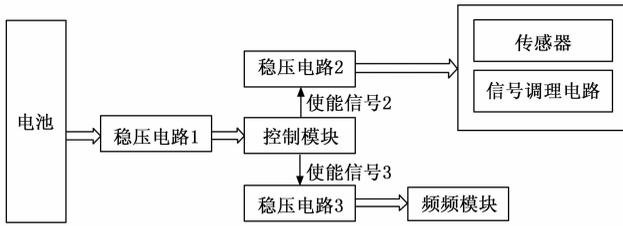


图 2 电源管理电路结构框图

微小，通常为每摄氏度 $10 \mu\text{V}$ 左右，所以热电偶调理电路是实现 K 型热电偶冷端补偿和保证测量精度的核心。

本文选用仪表放大器 AD8227，具有输入噪声低，共模抑制比大的优点，且其典型电流为 $350 \mu\text{A}$ ，满足项目低功耗要求。K 型热电偶信号调理电路如图 3 所示。热电偶较长的导线易发生天线效应，对其他信号造成干扰甚至拾取周围无用的干扰信号，为了消除长引线产生的高频噪声对有效信号造成的干扰，本文在热电偶和 AD8227 之间接入了由两组对称一阶 RC 低通滤波电路组成射频滤波器，提高热电偶信号的测量精度。 $C_1 = C_4 = 0.01 \mu\text{F}$ ，为了提高共模抑制比， C_3 需大于 10 倍的 C_1 ，放大器输入正端接入阻值为 $1 \text{ M}\Omega$ 的电阻 R_{10} 对热电偶进行开路检测^[14]。AD8227 输出信号接入二阶压控低通滤波器，再次对信号进行滤波处理，消除串扰噪声的影响^[15]。反相放大器 AD824 对信号增益做最后的微调，使输出电压 V_{out} 在 ADC 可采集的电压区间。AD824 具有高精度和低噪声的优点，且单个放大器电源电流仅 $500 \mu\text{A}$ ，符合本文低功耗电路设计的需求。

AD8227 放大倍数为：

$$G_1 = 5 + \frac{80000}{R_1 + R_3} \quad (1)$$

二阶压控低通滤波器放大倍数为：

$$G_2 = 1 + \frac{R_8}{R_9} \quad (2)$$

选取 R_1 和 R_3 的阻值分别为 510Ω 和 51Ω ， R_9 和 R_8 的阻值分别设为 $51 \text{ k}\Omega$ 和 $12 \text{ k}\Omega$ 。热电偶信号经过调理后的输出电压值 V_{out} 为：

$$V_{\text{out}} = [(V_+ - V_-)(5 + \frac{80000}{R_1 + R_3}) + V_{\text{Ref}}](1 + \frac{R_8}{R_9}) \quad (3)$$

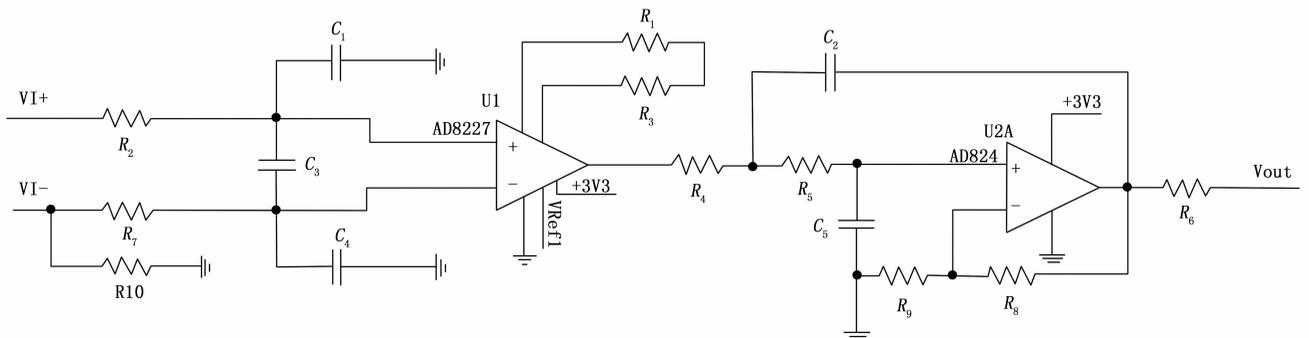


图 3 K 热电偶信号调理电路

1.3 冷端补偿电路

由于 AD8227 并无内置温度传感器实现对冷端的自动补偿，所以选用 PT100 铂电阻设计了如图 4 所示的电路实现对热电偶冷端温度的补偿，冷端电路设计的好坏影响热电偶传感器的测量精度^[16]，为了保证补偿精度，补偿电路的仍然选择低功耗仪表放大器 AD8227。

分别对 K 型热电偶和 PT100 铂电阻在 $0 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度区间内的“热电势-温度”进行曲线拟合，得到拟合方程 $Y = KX$ 和 $Y = PX$ ， K 为 K 型热电偶的补偿系数，值为 0.04042 ， P 为 PT100 的补偿系数，值为 0.302758545 ， K 和 P 的单位均为 $\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。

该冷端补偿电路的补偿电压为 U_c ，单位为 mV ，有：

$$U_c = P(5 + \frac{80000}{R_{13} + R_{14}}) \quad (4)$$

当热电偶传感器冷端完全被补偿时，有：

$$U_c = KG_1 \quad (5)$$

本文设计的 K 型热电偶冷端补偿电路解决了调理电路不平衡及 AD8227 无法自动补偿冷端的问题，将热电偶的调理电路和冷端补偿电路分开，保证了电路的对称性以获得更高的共模抑制比。保证补偿精度的同时兼具降低节点功耗的作用，因为其供电输入由电源模块控制，节点进入休眠状态时电源模块关断补偿电路的供电使能，使其停止工作，最大程度降低电流。

2 低功耗策略设计

2.1 无线传感器网络功耗分析

无线传感器节点能量受限是限制网络数据传输能力的重要原因之一，对能量消耗进行系统分析并提出低功耗策略是解决能量受限的主要方法^[16]。

从无线传感器网络的无线通信协议和工作内容出发，对无线传感器节点的工作流程和状态转换的分析，节点能量消耗的主要原因有以下两点：1) 空闲侦听，节点的主要能量消耗集中在数据的发送和接收部分^[17]，射频模块处于接收状态时能量消耗最大，远大于休眠或待机模式下的能量消耗^[18]。节点处于接收状态监听远端的指令时并没有执行传输任务，却有大量的能量被消耗。2) 数据冲突，两个

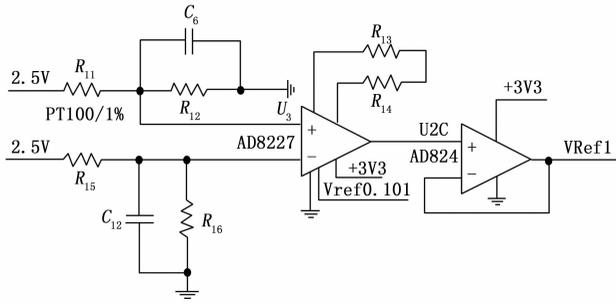


图 4 K 型热电偶冷端补偿电路

或多个节点同时访问信道, 会在接收节点处产生数据冲突, 互相干扰对方的无线信号, 影响接收节点接收的数据的准确性^[19]。重传发生冲突的数据, 除了增加传输延迟外, 还会造成节点能量消耗^[20]。

经过以上分析, 本文基于星型拓扑无线传感器网络设计了一种低功耗策略, 避免同一频道的节点和中心节点通信时产生冲突碰撞, 减少数据冲突对节点能量的消耗。除了减少节点空闲侦听, 本文重点针对工作模式设计软件策略来降低功耗。

为降低节点能耗, 本文设计了停机和运行两种工作状态, 节点在运行状态下有工作、待机和休眠 3 种工作模式, 如图 5 所示。在接口插入对应储运插头, 无线传感器处于停机状态时, 此时系统电流低于 1 μ A。

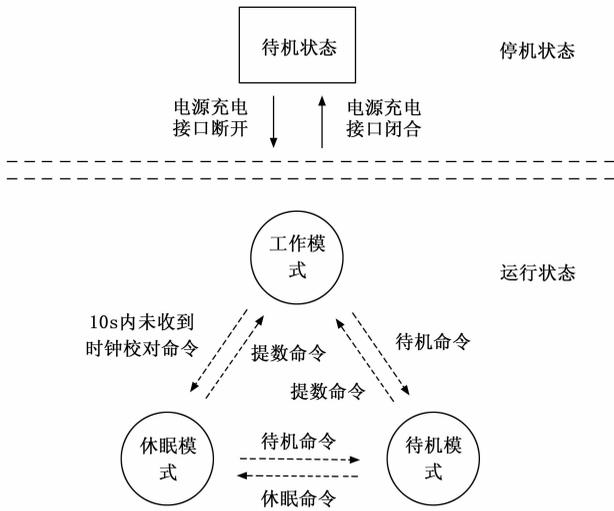


图 5 无线传感器工作转换示意图

2.2 工作模式低功耗策略

为保证多路传感器在时分复用网络中数据传输的实时性和准确性, 本文在节点进入工作状态之前, 在 PC 端设计时隙表, 并通过中心节点将每个节点的发数时间区间发送出去, 子节点收到后配置自身的发数区间。如图 6 所示, 为避免通道干扰, 一个节点在发送数据时其他节点不与中心节点通信, 无线传感网络进入工作状态后, 每个节

点按照预先设定的发数区间依次向中心节点发送采集数据。

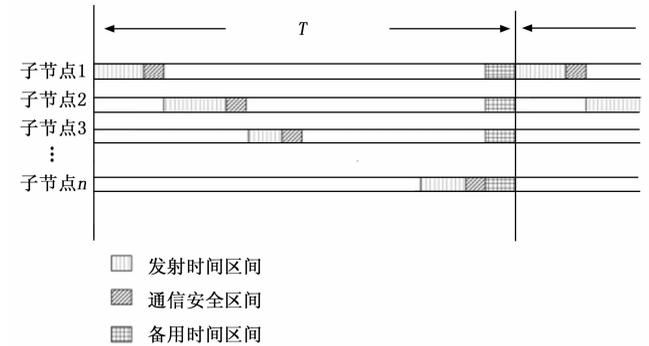


图 6 网络时隙示意图

为了提高数据传输的稳定性, 相邻数据包之间的发射间隔不少于 10 μ s, 节点间的通信安全区间不少于 20 μ s。节点在备用时间区间里可与中心节点建立双向通信维护时钟同步、修改节点参数等。

子节点监听到中心节点发射的提数命令后进入工作模式, 工作模式下节点的工作流程如图 7 所示, 节点定时采集数据, 当定时器结束时, 将数据发射出去, 同时自动重载定时器数值, 进行下一轮的采样。定时器时长在初始化阶段根据中心节点下发的时隙表进行配置。网络内所有子节点需严格按照时隙表周期性发射数据。由于发射的速率大于采样频率, 对于时分复用的系统, 节点发射数据所需的时间只占一个时隙表的小部分时间区间 T_0 , 节点在剩余的时间区间 T_1 内无需发射数据, 如图 8, 因此降低节点 T_1 时间段内节点工作电流是节省节点能量、延长电池寿命的关键要素。

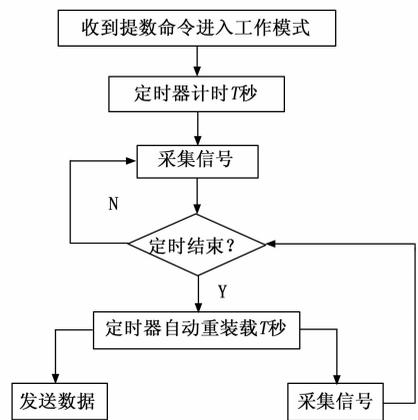


图 7 子节点工作流程图

Si24R1 芯片的工作机制为工作在 T_1 时间段内射频模块提供了 3 种可供选择的低功耗模式——待机模式 Standby、发射空闲模式 Idle-TX 和关断模式 Shutdown, 不同模式下功耗不同, 如表 2 所示, 射频模块发射功率为 0 dBm。

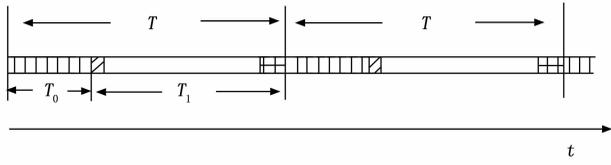


图 8 节点时隙图

表 2 Si24R1 不同模式下的功耗

发射电流 I_{tx}	低功耗电流 I_{lp}		
	待机电流 I_{sub}	发射空闲电流 I_{idle}	关断电流 $I_{shutdown}$
12 mA	15 μ A	380 μ A	1 μ A

为了减少节点在 T_1 时间区间内的能量损耗，降低节点平均工作电流，本文基于时分复用系统提出一种低功耗策略：

本文设计节点在 T_0 时间区间内发射前一周期 (T 秒) 内采集的数据，如图 8 所示，发射完毕进入 T_1 时间区间，射频模块由发射模式转换为低功耗模式，其工作电流从毫安级下降至微安级。进入下个周期 T 前，射频模块由低功耗模式转为发射模式。

射频模块的模式转换路径如图 9 所示，退出关断模式需要 1.5~2 ms 的转换时间。对于数据实时度高的高频信号监测系统，周期 T 可能只有几十毫秒，2 ms 的转换时长会严重影响采样数据密度，使得部分数据丢失，导致数据准确度下降。因此，对于低频信号的监测，可选择关断模式作为射频的低功耗模式，对于高频信号的监测，则选择待机模式，以免频繁切换模式降低传输数据的完整度。

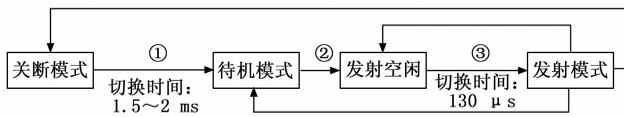


图 9 射频模块模式转换路径

为了计算并表示“工作”模式下的平均电流，射频模块不同模式下电流表示如表 3，传感器工作电流 I_{sens} ，控制模块工作电流 I_{run} 。

①普通节点整个工作周期 T 内射频模块在一直处于发射模式，平均工作电流为：

$$I_{aver1} = I_{run} + I_{tx} + I_{sens} \quad (6)$$

②本文节点采用此低功耗策略，平均工作电流为：

$$I_{aver2} = \frac{T_0(I_{run} + I_{tx} + I_{sens}) + (T - T_0)(I_{run} + I_{lp} + I_s)}{T} \quad (7)$$

两种平均工作电流的差值为：

$$I_d = I_{aver1} - I_{aver2} = (I_{tx} - I_{lp})(1 - T_0/T) \quad (8)$$

已知射频模块的发射电流一定大于待机电流，($I_{tx} - I_{lp}$) > 0，所以只有满足约束条件式 (9) 时，才能保证 I_d 为正值，休眠策略才能起到降低功耗的作用。 $T_0 = T$ 时，

此时休眠时间区间 $T_1 = 0$ ，节点不具备执行休眠策略的条件， $I_d = 0$ 。

$$T > T_0 \quad (9)$$

在发射速率一定的条件下，采样的数据量越大，发射完成所需的时间就越长。为了保证节点数据传输的稳定性和准确性，需保证 T_0 至少大于节点发射一周期数据所需的时间。为了得到采样频率 f_s 和 T_0 的数学关系，设数据长度为 2 Byte，每包有效负载长度 X Byte ($X \leq 32$)，射频模块传输一包有效数据的时间为 t_{TX} ，对发射时间区间 T_0 进行约束：

$$T_0 \geq \frac{(2f_s \times T)}{X} t_{TX} \quad (10)$$

将式 (10) 带入式 (9) 得到式 (11)，只要采样频率 f_s 满足式 (11)，节点采集数据就能在周期内传输完成，使得节点数据传输的准确性和稳定性得以保证。

$$0 < f_s \frac{X}{2t_{TX}} \quad (11)$$

同时满足约束条件式 (9)、(10) 的平均工作电流差值的表达式：

$$0 < I_d < (I_{tx} - I_{lp}) \left(1 - \frac{2f_s \times t_{tx}}{X}\right) \quad (12)$$

平均工作电流 I_d 越大，本文休眠策略降低功耗的效果就更显著。分析式 (12)， I_d 和节点 f_s 成正相关，因此，得出结论：本文休眠策略的低功耗效果和节点的采样频率有关，采样频率越低，节省的节点能量越多，低功耗效果越好。

2.3 分级监听策略

本文设计了分级监听策略减少节点在非工作模式下监听中心节点消耗的能量。每隔 10 s 监听一次定义为待机模式，每隔 600 s 监听一次定义为休眠模式，待机模式的监听等级高于休眠模式。工作模式下收到待机命令或长期（设置时间 10 s）未收到命令信息，自动进入待机模式，收到休眠指令，则进入休眠模式。

2.3.1 待机模式

节点在待机模式下，每 10 s 监听 27 ms（根据实际情况修改），收到数据提取命令自动进入工作模式，收到休眠指令，则进入休眠模式。

2.3.2 休眠模式

节点在休眠模式下，每 600 s 监听 27 ms，收到待机命令，自动进入待机模式，收到数据提取命令，自动进入工作模式。相对于待机模式，休眠模式无需监听的时段更长。

GD32E230C8T6 存在多种低功耗模式，考虑到节点每项功能的可行性，本文选择低功耗模式时考虑了 GD32E230C8T6 不同低功耗模式的唤醒条件、唤醒延迟等参数，唤醒条件如表 3 所示。

为了降低节点功耗，减小节点体积，本文节点没有设计专门的存储模块，因此节点配置参数、临时采样数据等信

表 3 GD32E230C8T6 低功耗模式

模式	唤醒条件	唤醒延迟	SRAM	功耗
睡眠	任何中断	无	保持	3.7 mA
深度睡眠	任意外部中断	IRC8M 唤醒时长	保持	25.5 μ A
待机	NRST/WKUP/ FWDGT/RTC	上电序列	擦除	3.6 μ A

息都保存在 GD32E230C8T6 的 SRAM 中。虽然核心处理器处于待机模式下的电流只有 3.6 μ A, 但被唤醒时 SRAM 会被擦除。深度睡眠模式的功耗比睡眠模式更低且可以利用 RTC 唤醒。综上考虑, 本文设计节点在待机模式下, MCU 处于深度睡眠模式, 射频模块处于关断模式, 关闭传感器相关电路; 节点在休眠模式下, MCU 处于深度睡眠模式, 射频模块和传感器相关电路都被关闭。

3 测试与分析

对节点在“工作”模式下的低功耗设计进行评估, 将节点放入测试环境实现温度监测, 各项参数设置如下: 采样频率为 5.12 kHz, 数据传输速率为 2 Mbps, 发射功率为 0 dbm, 数据长度为 2 Byte, 有效负载长度为 26 Byte。

为了设置发射区间长度 T_0 , 首先需要对本节点进行通讯测试, 为保证无线通信的实时性, 周期尽可能短, 经计算取 T 为 25 ms。测试结果如表 4 所示。节点与节点间的通信安全间隙为 20 μ s, 所以 T_0 等于 4.92 ms, T_1 等于 20.08 ms。

表 4 测试数据量与传输时间

采样频率/kHz	帧长度/Byte	包数/包	发送时间/ms
5.12	256	10	4.906

测试节点工作模式下的运行电流 $I_{0,0}$ 和待机电流 $I_{0,1}$: 控制器使能各个模块正常工作, 节点以 T 为一个大周期, 周期性向中心节点发送采集的温度数据, 测得 $I_{0,0} = 32.2$ mA, $I_{0,1} = 22.4$ mA。

平均工作电流:

$$I_0 = \frac{I_{0,0} \times T_0 + I_{0,1} \times (T - T_0)}{T} = 24.33 \text{ mA} \quad (13)$$

用两节锂电池组供电, 总容量 1.0 A · h, 认为容量低于 85% 时的电压不再适合给节点供电, 节点在工作模式下的电池使用时长:

$$T_{\text{bat}} = \frac{C_{\text{bat}} \times 85\%}{I_0} = 39.9 \text{ h} \quad (14)$$

将本文节点与 Imote 节点、Mica2 节点^[21]对比, 分别代入式 (14) 计算节点运行寿命, 如表 5 可知本文节点功耗更低, 运行寿命更长。

改变节点采样频率在同样的测试环境下测试运行电流和待机电流, 带入式 (13) 和式 (14), 得到节点运行寿命 T_{bat} 和采样频率 f_s 的关系, 如图 10 所示, 采样频率越低, 本文低功耗策略延长节点运行寿命越长, 低功耗效果更

显著。

表 5 本文节点、Mica2 和 Imote 节点工作电流

节点类型	工作电流/mA	节点运行寿命/h
本文节点	24.3	39.9
Imote	35.1	24.2
Mica2	56.2	15.1

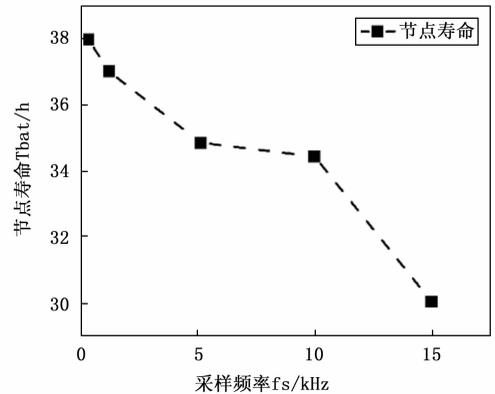


图 10 采样频率对节点运行寿命的影响

4 结束语

本文基于热电偶无线传感器进行了低功耗优化设计, 提出了一种适用于星型拓扑结构网络的低功耗策略, 设计了一种低功耗热电偶无线传感器节点。硬件电路方面, 选用低功耗处理器芯片和射频芯片, 设计了电源管理电路动态管理节点各组件的电源, 优化 K 型热电偶信号调理电路和冷端补偿电路, 在冷端补偿精度满足项目需求的基础上降低了电路能耗; 软件设计方面, 提出了一种降低运行能耗的策略, 推导出节点功耗和采样频率的数学关系, 证明了低采样频率的节点采用此策略降低能耗的效果更显著。非工作模式则采用分级监听策略, 进一步降低空闲节点能耗。通过试验测试表明, 本节点运行稳定, 功耗较低, 具有一定的工业价值。

参考文献:

- [1] 李金龙, 刘建妥, 张德智, 等. 基于无线传感器网络的飞行器测控通信系统测量方案设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (2): 409-411.
- [2] 闫新峰, 金文, 耿健, 等. 小型空间飞行器集成化遥测系统设计与实现 [J]. 测控技术, 2020, 39 (7): 73-77.
- [3] 刘嵘, 陈金刚. 基于无线传感器网络的低功耗目标探测系统设计与实现 [J]. 航天器环境工程, 2021, 38 (2): 218-223.
- [4] 杨旭, 王春佳, 李莉. 基于簇的无线传感器网络交会路由协议 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (5): 265-270.
- [5] 李文艳, 邵世祥. WSN 中流量自适应的超低功耗 MAC 协议 [J]. 计算机技术与发展, 2017, 27 (3): 113-116.

- [6] 贺翔, 谢奕刚. 一种低功耗无线振动监测网络的实现方法 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2018, 18 (5): 58-60.
- [7] DHUNNA G S, AL-ANBAGI I. A Low Power WSNs Attack Detection and Isolation Mechanism for Critical Smart Grid Applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2019; 1.
- [8] 韩雨龙, 薛志超, 文丰. 低功耗热电偶无线传感器节点设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (15): 131-136.
- [9] YOU S, ESHRAGHIAN J K, IU H C, et al. Low-power wireless sensor network using fine-grain control of sensor module power mode [J]. Sensors, 2021, 21 (9): 3198.
- [10] 王辉, 丁军航, 兰勇, 等. 表层漂流浮标系统超低功耗改进设计及实现 [J]. 现代电子技术, 2021, 44 (12): 115-12.
- [11] 杨永金. 基于 LoRa 的低功耗无线水质传感器设计与研究 [J]. 中国新通信, 2021, 23 (23): 10-11.
- [12] 廖利, 王华东. 基于人工蜂群的无线传感器网络能耗均衡算法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (1): 170-172, 190.
- [13] 陈高杰, 陈章位, 姚雪庭. 一种基于改进的动态能量管理的无线传感器节点节能技术研究 [J]. 计算机科学, 2014, 41 (10): 139-143.
- [7] MIN B W, REBEIZ G M. A 10~50 GHz CMOS distributed step attenuator with low loss and low phase imbalance [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2007, 42 (11): 2547-2554.
- [8] 马凯文. 基于 SiGe 工艺的微波数控移相器芯片及 SoC 研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [9] 李飞宇. 基于 0.13 μm SiGe BiCMOS 的数字移相和低噪声放大技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [10] 徐艳蒙. 一种 X 波段低插损 5 位数控衰减器设计 [J]. 天津理工大学学报, 2016, 32 (4): 34-38.
- [11] 沈天宇. 硅基毫米波 Ka 波段全 RF 相控阵接收前端芯片的研究与设计 [D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [12] CHAO L, QING L, YI H L, et al. A Ka-band Single-chip SiGe BiCMOS Phased-array Transmit Receive Front-end [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64 (11): 3667-3677.
- [13] BAE J, NGUYEN C. A novel concurrent 22~29/57~64 GHz dual-band CMOS step attenuator with low phase variations [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64 (6): 1867-1875.
- [14] BON-HYUN KU, SONGCHEOL HONG. 6-bit CM-OS digital attenuators with low phase variations for X-band phase-array systems. IEEE Trans [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58 (7): 1651-1663.
- [15] 刘美杉, 张为, 郝东宁. 0~21 GHz 高精度宽带硅基数字衰减器设计 [J]. 浙江大学学报, 2021, 55 (7): 1399-1406.
- [14] 李亚政, 甄国涌, 贾兴中, 等. 基于 AD590 的热电偶冷端方法优化设计 [J]. 电子测量技术, 2021, 44 (12): 156-160.
- [15] 侯卫周, 谷城. 压控电源二阶低通有源滤波电路设计与仿真 [J]. 实验技术与管理, 2014, 31 (10): 103-106.
- [16] 姜亚竹, 蔡萍. 钻井井场测控系统的 ZigBee 模块低功耗设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (2): 121-124.
- [17] MUZAKKARI B A, MOHAMED M A, KADIR M F A and MAMAT M. Queue and priority-aware adaptive duty cycle scheme for energy efficient wireless sensor networks [J]. IEEE Journals&Magazines, 2020, 17231-17242.
- [18] 王丽红, 于光华, 夏魁良. 邻域搜索蚁群算法在无线传感器网络数据融合中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (6): 298-301.
- [19] 李道全, 魏艳婷, 张玉霞, 等. 基于改进蚁群算法的 WSN 能量均衡路由算法 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (17): 117-124.
- [20] 朱洪翔, 董青, 闫利军. 基于无线传输的机轮胎压测试系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 28-32.
- [21] 兰羽. 一种低功耗无线传感网络节点设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (2): 262-266.
- [16] 李红云. 基于 BiCMOS 工艺的分布式衰减器研究和设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [17] ELLINGER F, VOGT R, BACHTOLD W. Calibratable adaptive antenna combiner at 5.2 GHz with high yield for laptop interface card [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48 (12): 2721-2720.
- [18] 方兆显. 6~18 GHz CMOS 六位数控衰减器设计 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [19] 张岩龙. 面向硅基相控阵的衰减器与锁相环研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [20] 石文波. 硅基微波毫米波衰减与限幅放大集成电路研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [21] 陈曦. Ka 波段高精度 MMIC 六位数字衰减器的研究与设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [22] SJOGREN L, INGRAM D, BIEDENBENDER M, et al. A low phase-error 44 GHz HEMT attenuator [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1998, 8 (5): 194-195.
- [23] 戴永胜, 李平, 孙宏途, 等. 高性能 2~18 GHz 超宽带 MMIC 六位数字衰减器 [J]. 微波学报, 2012 (6): 84-87.
- [24] 郭嘉炜. 高精度硅基幅相控制单元的研究与设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [25] DAVULCU M, CALISKAN C, KALYONCU I, et al. 7-Bit SiGe BiCMOS Step Attenuator for X-Band Phased-Array RADAR Applications [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 26 (8): 1-3.
- [26] 刘志军, 方园, 高学邦, 等. DC-20 GHz 宽带单片数控衰减器 [J]. 集成电路设计与开发, 2009, 34 (3): 43-46.
- [27] 钱桂香. 2~18 GHz 单片六位数字衰减器的研究与设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.