

一种低功耗无线传感器网络节点设计

兰 羽

(陕西工业职业技术学院 电气学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 无线传感网络节点功耗直接决定了无线网络的生存周期, 为了降低节点能耗, 在对多种微处理器芯片和射频芯片性能分析比较的基础上, 选择了MSP430F2618处理器芯片和射频芯片CC2520射频芯片, 采用微处理器与无线模块独立架构, 设计了一种性能灵活无线网络节点; 提出了微处理器、射频芯片在工作模式与多种低功耗模式之间切换, 以及微处理器时钟的控制等节能策略, 在此基础上设计了网络路由节点和端节点软件系统; 实验证明: 在发射功率为0 dBm, 数据传输速率为1 MHz时, 设计的节点运行电流和休眠电流(26.1 mA, 1.57 μ A)与传统的Imote节点(35.1 mA, 3.6 μ A)、Mica2节点(56.2 mA, 21 μ A)相比, 明显低于传统节点; 当节点电池容量为2 * 700 mAh, 工作周期为10分钟时, 其生存周期为7.2个月; 设计的节点的寿命达到预期目标。

关键词: 无线传感网络节点; 节点架构; 单片机MSP430F2618; 射频芯片CC2520; 低功耗策略

Design of a Low-power Wireless Sensor Network Node

Lan Yu

(Electrical Engineering Department, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

Abstract: In order to reduce the power consumption of the wireless sensor network, which directly determines the lifetime of the wireless network, based on the analysis and comparison of the performance of various microprocessor chips and radio frequency chips, mSP430F2618 and CC2520 are selected to design a flexible wireless network node based on the independent architecture of microprocessor and wireless module. The energy-saving strategies of microprocessor, RF chip switching between work mode and low power mode, and microprocessor clock control are proposed. Based on these, the software system of network routing node and end node is designed. The experimental results show that the operating and resting currents (26.1 mA, 1.57 μ A) of the designed nodes are significantly lower than those of the traditional Imote nodes (35.1 mA, 3.6 μ A) and Mica2 nodes (56.2 mA, 21 μ A) when the transmitting power is 0 DBM and the Data transfer rate is 1 MHz. When the battery capacity of the node is 2 * 700 mAh and the working cycle is 10 minutes, its life cycle is 7.2 months. The life of the designed node achieves the expected goal.

Keywords: wireless sensor network; node architecture; MCU MSP430F2618; RF chip CC2520; low power strategy

0 引言

无线传感器网络(WSN)是互联网的延伸,是由大量的、廉价的、微型的传感器节点构成,节点间通过自组织、多跳方式组成无线网络,对陌生环境的数据采集并通过无线网络传送至监控中心^[1-2]。它是集数据感知、处理、传输为一体的微型系统,是物理世界连接计算机世界和人类社会的纽带。随着信息技术的发展,无线传感器网络已在国家安全、军事国防、医疗卫生、环境监测、抢险救灾、交通管理等领域已取得广泛的应用^[2-3]。传感节点是无线传感器网络最基本的单元,节点一般由电池供电,能量有限,所以无线传感器节点的能耗决定了网络的性能和生存周期。目前许多商业化的传感器节点片面追求节点性能,忽略了能耗因素,影响节点寿命,限制了无线传感器网络有效生存周期^[4-5]。传感器节点的低功耗设计可有效提高节点和网络的寿命,是无线传感器网络的关键技术之一。有实验表

明,无线传感器网络节点90%以上能耗主要集中在微处理器和射频芯片上^[6-7],因此,本文主要讨论处理器模块和无线模块的低功耗控制的设计,以达到减低节点功耗的目的。

1 节点设计方案

每个无线网络节点都是一个微系统。其可分为4个模块:电源驱动模块、传感器模块、处理器模块、无线通信模块。图1为无线节点结构框。目前主流节点架构有SOC架构,处理器芯片射频芯片各自独立架构、主控制器和协处理器架构3种。

1.1 SOC架构(即集成处理器和射频芯片)

该方案将微控制器和射频芯片整合到单芯片上。优点:可靠性高、易于开发,典型芯片有JN5319、CC2430和CC2530。缺点:灵活性差、功耗高。新推出的CC430系列芯片虽功耗低,但成本高、灵活性依然较差^[8]。

1.2 处理器芯片射频芯片各自独立架构

该方案微处理器器不仅承担数据的处理,还负责功耗

收稿日期:2020-07-06; 修回日期:2020-07-24。

基金项目:陕西工业职业技术学院科研项目(ZK18-03)。

作者简介:兰羽(1975-),男,陕西商洛人,硕士,副教授,主要从事传感器与微系统应用方向的研究。

引用格式:兰羽.一种低功耗无线传感器网络节点设计[J].计算机测量与控制,2021,29(2):262-2266.

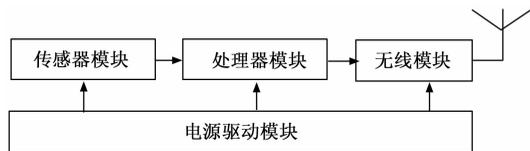


图 1 传感器节点结构图

的控制, 射频芯片负责数据无线收发。优点: 灵活性好(可以嵌入 EZMac 等协议栈, Zigbee 或者 UCOS-2, TinyOS 等操作系统。), 易于扩展, 系统的整体功耗取决于系统的调度和芯片的功耗。典型组合 MSP430 型微处理器和 CC2420 射频芯片^[9]。

1.3 主控制器和协处理器架构

主控制器负责运行应用程序, 协处理器运行协议栈。主控制器通过 API 函数控制协议的运行。优点: 主微控制器效率提高, 便于维护。缺点: 灵活性差, 可支持的协议少, 仅支持 Zigbee 协议。

2 主要元件选择

2.1 微控制器的选择

无线传感网络节点的性能优劣主要体现在微处理器芯片和无线芯片选型上。微处理器的选择首先要考虑的因素是低功耗, 其次考虑性能。目前采用的较多有 TI 公司的 MSP430 系列单片机和 Atmel 公司的 AT2mega 系列单片机。几种典型型号微处理器性能作比较如表 1 所示。从表 1 中知, MSP430 系列单片机能耗方面和总体性能优势较明显。MSP430 系列单片机是一种 16 位微控制器, 其具有功能强大、集成度高、低功耗^[10]。特别是 MSP430F2618 是 MSP430 系列一种典型的低功耗高性能微处理器, 工作电压范围较宽 (1.8~3.6 V), CPU 时钟频率方面: 支持的高频至 16 MHz 和低频至 32 kHz 之间的切换, 以降低自身功耗。内部功能模块方面: 集成有比较器、乘法器、A/D 转换器等^[11]。在存储器方面: 存储单元丰富, RAM 为 8 kB, Flash 为 116 kB, 充足的容量不需再另外扩展存储单元。在模式切换方面: 唤醒时间不到 1 μ s, 根据不同需要有 5 种低功耗模式, 从而灵活的控制节点功耗。另外 MSP430 系列单片机在外设接口有 IIC、SPI、UART 和 DMA 等, 这些接口在不需要时可直接屏蔽, 不增加处理器功耗。基于以上特征, 本文的节点的微控制器选择 MSP430F2618 芯片。

表 1 4 种微处理器特征比较

参数 \ 型号	MSP430F2618	MSP430F149	ATmega128L
工作电压/V	1.8~3.6	1.8~3.6	2.7~5.5
最大工作频率/MHz	16	8	8
RAM/kB	8	2	4
Flash/kB	116	60	128
工作电流/mA	0.36(2.2 V, 时钟 1 MHz)	0.28(2.2 V, 时钟 1 MHz)	20(5 V, 时钟 8 MHz)
待机电流/ μ A	0.5	1.6	30
关闭电流/ μ A	0.1	0.1	20

2.2 无线射频芯片的选择

射频芯片选择需从多方面综合考虑, 涉及芯片功能、封装大小、睡眠电流和功耗、通信频段、通信距离、芯片外围器件的多少、技术先进性等, 另外还要考虑芯片的性价比、技术支持和开发成本等因素^[11-12]。随着 IEEE802.15.4 标准的发布, 支持该协议低功耗芯片越要越多, Freescale 公司发布的 MC13192, Chipcon 公司发布的 CC2420, Ember 公司推出的 EM2420, ComXs 公司发布的 ML7065, TI 公司(并购 Chipcon 公司)推出的第二代 2.4 G 无线收发器 CC2520, 都具有很好竞争力。表 2 给出对 CC2420, CC2520 和 MC13192 各主要指标作比较。由表 2 可知, CC2520 的睡眠电流是最低的, 电源电压范围最宽, 1.8 V 即可驱动。CC2520 与 CC2420 比较, 集成的硬件模块增多、缓存增大、指令更加灵活、发射功率增宽、灵敏度增强、性价比提高、更小的封装等优点^[13]。虽然 CC2520 相对 CC2420 收发功率较大, 但作为 WSN 的节点大部分时间是处于睡眠状态, CC2520 睡眠电流仅 0.12 μ A。本文节点的无线模块选择 CC2520 作为收发器件。

表 2 几种无线收发芯片主要参数

参数 \ 型号	CC2520	CC2420	MC13192
频率/GHz	2.4	2.4	2.4
电源电压	1.8~3.8	2.2~3.6	2.0~3.6
收发电流	25.8 mA 0 dBm	14.7 mA 0 dBm	37 mA 0 dBm
睡眠电流/ μ A	0.12 μ A	1.0 μ A	2.5 μ A
最大输出功率	+5d B	0 dB	
接收灵敏度	-98 dBm	-95 dBm	-92 dBm
封装/大小 mm	QFN-28/5×5	QFN-28/7×7	QFN-32/5×5
关闭电流/ μ A	0.1	0.2	0.1
输出功率可控	是	是	是
RSSI	是	是	否

2.3 硬件总体设计

根据以上对典型的微处理器和射频芯片性能分析, 节点的处理芯片选择 MSP430F2618, 射频芯片选择 CC2520, 图 2 为节点硬件总体设计方案。图中 MSP430F2618 和 CC2520 通过 SPI 接口相互通信, GPIO 起辅助通信作用, MSP430F2618 二个通用 GPIO 端口分别控制 CC2520 的 RESETn 和 VERG_EN 端, 实现对 CC2520 的复位和功耗的控制。通过晶振接口配置一个 32 K 的低频晶振和一个 6 M 的高频晶振。预留出 IIC、SPI 等通信接口以及 GPIO 接口以便与传感器模块连接。

3 节点低功耗设计策略

在 WSN 中实现低功耗节点, 硬件设计是一方面, 另外还需要有芯片低功耗控制设计和低功耗协议软件的支持。本文主要从微控制器、射频芯片低功耗控制, 以及微控制器的时钟频率切换等方面研究降低节点功耗措施。

3.1 微控制器低能耗控制

MSP430 单片机超工作时有两种状态: 工作状态和低功

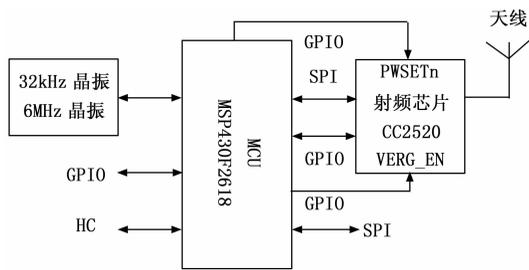


图 2 传感器节点框图

耗状态。当 MCU 无数据处理时，节点立即切换到低功耗模式上，需要处理数据时，立即唤醒 MCU 进入工作模式。处理器低功耗控制策略即最大化低功耗模式的工作时间和不同状态时钟系统的切换。DCO 用于 CPU 激活后的突发短暂运行，32 kHz 晶振用于 ACLK 的时钟^[14]。

MSP430 系列单片机低功耗微处理器，通过状态寄存器中 CPU Off、OSC Off、SCG1、SCG0 位配置来实现工作模式，0000 活动模式 (AM) 分，1000 为低功耗模式 0 (LMP0)，1001 低功耗模式 1 (LMP1)，1010 为低功耗模式 2 (LMP2)，1011 为低功耗模式 3 (LMP3)，1111 为低功耗模式 4 (LMP4)。微处理器内部集成有 CPU、MCLK、SMCLK (次主时钟) 和 DCO、DC 使能禁止、ACLK (辅助时钟) 和计数器功能模块。表 3 列出微处理器在不同状态下，开启部分模块，其余关闭，从而最大限度地降低为控制器功耗。当需要低功耗模式进入活动时，通过中断将微处理器唤醒到活动模式，唤醒时间只需不到 1 μs，响应速度很快。MSP430 系列单片机低功耗正是通过这些实现的。

表 3 在不同工作模式 CPU 状态、振荡器及时钟状态

CPU 状态、振荡器及时钟	工作模式
活动模式 (AM)	CPU、MCLK、SMCLK、ACLK 均处于活动状态
低功耗模式 0 (LMP0)	CPU、MCLK 禁止
低功耗模式 1 (LMP1)	CPU、MCLK 禁止，在活动模式，如果 DCO 为用作 MCLK 及 SMCLK，则直接流发生器保持有效；ACLK 活动
低功耗模式 2 (LMP2)	CPU、MCLK、SMCLK 禁止，如果 DCO 为用作 MCLK 及 SMCLK，则直接流发生器保持有效；ACLK 活动
低功耗模式 3 (LMP3)	仅 ACLK 有效
低功耗模式 4 (LMP4)	CPU 及所有时钟禁止

3.2 射频芯片的低能耗控制

节点能量主要消耗在收发数据时即节点处在活动模式，这时节点能耗占系统总能耗 90% 以上。因此，系统在无需收发数据时射频芯片 CC2520 需置于低功耗模式，以降低节点能耗。CC2520 有活动模式和低功耗模式，低功耗模式有 LPM1 和 LPM2，低功耗模式和活动模式可根据需要随意切换。在低功耗 LPM1 时，时钟关闭，数字电压调节器开启，

保持数据；在低功耗 LPM2 时，时钟关闭，数字电压调节器关闭、时钟关闭，不保持数据，这时芯片内部的模拟模块处于电源关闭状态，电流值仅为 30 nA，芯片进入深度休眠，此时功耗极低，缺点是激活时间较长。CC2520 在不需要收发数据时，通过微控制器使其 CC2520 的 VERG_EN = 0，实现 LPM2 模式芯片进入深度休眠。另外根据实际环境因素和通信距，通过软件设置 CC2520 的 TX2POWER 寄存器的值，来调节射频芯片 CC2520 的输出功率，综合功耗和通信距离的折中，以降低节点功耗。

3.3 微控制器的时钟控制

有研究表明，微处理器的工作频率和节点的功耗成正比^[15]。MSP430F2618 在不同的工作模式切换，时钟频率也进行切换，节点的晶振电路配置了高频和低频的晶振。低频 32 kHz 和 12 kHz 晶振，为在节点低功耗、低速运行，以及低速外设提供时钟；高频 6 MHz 的晶振和内部的数控振荡器 DCO，为在节点实现高性能、快速响应的处理能力提供时钟。这些时钟源可产生 ACLK、SMCLK、MCLK，通过软件可调控频率。系统可节点工作模式灵活切换时钟：例如在低功耗时选用 12 kHz 晶振；在节点有数据处理量大时，选用高频 6 MHz 晶体提供 MCLK；在节点数据处理量少时，选用电低频 32 kHz 晶振。

节点在满足上述措施后，在设计节点 MAC 协议时，使用能量均衡消耗，同时尽量减小数据碰撞机率，减少重传次数，从而降低节点能耗，延长网络的生命周期。

4 软件设计

节点软件设计是在 TI 公司免费提供的 Zstack-2.1.0-1.3.0 协议栈的基础上，以 IAR FOR MSP430 为开发平台，采用 C++ 编程进行软件设计。主要涉及协调节点和端节点。

4.1 协调节点软件设计

在 WSN 布网中，协调节点作为汇聚节点，数据处理量较大，并在网络整个周期中一直工作，一般固定电源供电，软件设计协调节点时，不考虑低功耗措施。图 3 为协调器工作流程，通电后节点初始化，接着扫描信道 (选择网络标和确定低能量的信道)，建立一个网络，并置于开放状态，允许外部设备加入，然后处于等待侦听状态，如接收到外部设备申请加入网络的信号，立即发出应答信号，接着给该设备分配一个网络地址 (16 位)；判断有无上行数据，有则将数据通过串口发送给上位机，然后继续侦听。

4.2 端节点软件设计

端节点主要负责数据采集，在监测区域布置是随机分布的，其驱动电源采用电池，寿命有限。因此，在设计端节点时尽量降低功耗。图 4 为其工作流程，包含主程序流程图 (左边部分) 和中断服务程序流程图 (右边部分)。首先节点通电，系统初始化，时钟 MCLK 选择 1 MHz，接着扫描信道，发出申请加入网络信号，加入失败，重新申请，直到收到响应信号，取得网络地址，表明成功进入网络。随后，端节点测量环境参数，发送给协调器，发送完毕切

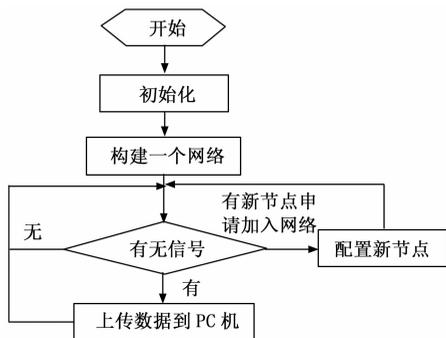


图 3 协调器工作流程图

换进入 LPM3 (低功耗模式三), 等候系统唤醒进入下一轮数据采集周期。

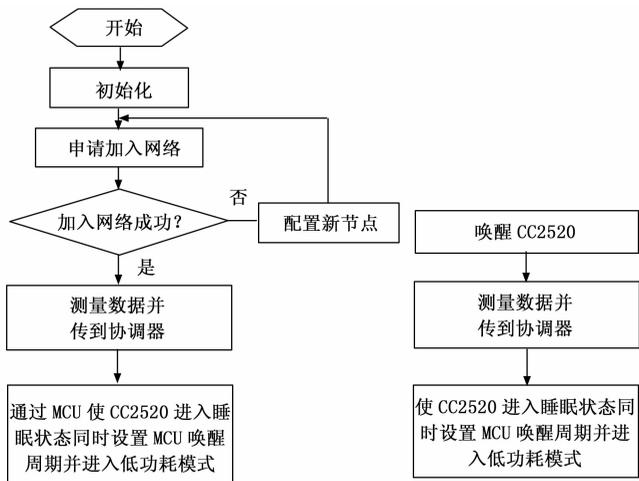


图 4 端节点工作流程图

5 实验及分析

无线传感节点的功耗测试通过测量传感节点的工作电流来实现。测试时默认网络中各端节点都是对等的, 且端节点间通信代价都相同。完成了对端节点工作状态和睡眠状态电流的测量。节点采用两节 1.5 V 电池串联 3 V 作为电源。电池型号: AA-1.5 V, 电量; 2 * 700 mAh。

测量方法: 测量一个工作周期内节点电流情况, 包括收发模式下、低功耗模式下对应电流值, 节点一个周期内功耗等于工作状态功耗加睡眠状态功耗。测量周期根据数据采集的需要进行设置, 为了测试方便, 设置测量周期为 10 min, 而节点从系统节点在处理器 LPM3 模式与活动模式间切换, 射频芯片在深度睡眠 LPM2 与活动模式间切换; 具体实现过程:

- 1) 通过 MSP430F2618 使 CC2520 的控制端口 RESETn = 0, VREG_EN = 0, CC2520 进入 LPM2 模式 (深度睡眠);
- 2) 选择 ACLK 时钟, 设置定时计数器周期为 300 s;
- 3) 通过设置状态寄存器 SR, 选择 32 K 时钟, 使 MSP430F2618 进入 LPM3 模式。

定时器满 300 s, 产生定时中断, MSP430F2618 微控制

器被唤醒, 进入正常工作模式, 其实现如下: 1) MSP430F2618 使 CC2520 的控制端口 VREG_EN = 1, 使 CC2520 进入活动模式; 2) 端节点采集数据并传送给协调器; 3) 数据传送完毕, 又使 CC2520 进入 LPM2 模式, 再重启计时器, 使 MSP430F2618 进入 LPM3 模式。

通过这种方法, 由定时器定期唤醒切换, 节点不处理数据时进入低功耗模式, 处理数据时切换至工作模式, 使微处理器和射频芯片的低功耗特性得到实现, 从而极大地降低节点功耗。

被唤醒到完成数据收发用时不到 1 s, 大部分时间处于睡眠状态。

参数设置: 射频功率: 0 dBm, 数据传输速率: 1 Mbps, 数据包大小: 32 Byte。

1) 低功耗模式电流测量: 本节点的低功耗模式是指射频芯片 CC2520 处于 LPM2 模式 (掉电), 微处理器 MPS430F149 处于 LPM3 模式, 此时测量得到节点电流为低功耗模式电流 (休眠电流): $I_{LPM} = 1.57 \mu A$ 。

2) 工作模式电流测量: 节点工作模式是指射频芯片 CC2520 处于发送模式, 微处理器 MPS430F149 处于 AM, 射频芯片 CC2520 处于发送模式, 此时测量得到节点电流即为节点工作电流: $I_{AM} = 26.1 \text{ mA}$ 。

表 4 本节点与 Imote 节点、Mica2 节点性能进行比较

节点	发射功率/ dBm	休眠电流/ μA	运行电流/ mA	最低工作 电压/V
设计节点	0	1.57	26	1.8
Imote	0	3.6	35.1	1.8
Mica2	0	21	56.2	2.7

一般无线传感器网络节点, 在一个工作周期内, 其大部分时间都在休眠状态, 而数据的采集、处理和收发整个过程不要 1 s。通过测量节点休眠电流 I_{LPM} , 工作电流 I_{AM} , 设置节点工作周期为 10 min, 数据操作时间 1 s。一个工作周期 10 min 节点的能耗:

$$I_T = \frac{I_{Active} \times 1s + I_{sleep} (600 - 1) \times 10^{-3}}{600} \approx 0.0448 \text{ mAh}$$

如果节点电池容量为 2 * 700 mAh, 则节点生存周期为:

$$Y = \frac{2 \times 700 \text{ mAh}}{I_T \times 6 \times 24 \times 30} \approx 7.2 (\text{月})$$

表 3 数据表明, 将设计的节点与目前传统的 Imote 节点、Mica2 节点性能进行比较, 本文设计的节点功耗明显低于二者, 特别是低功耗状态 (睡眠模式) 的功耗极低, 在低功耗模式下的休眠电流达到微安级。因此对于不需要频繁采集数据的场合, 本节点具有更好的优越性, 提高无线网络生存周期。

6 结束语

为了降低无线传感器网络中节点功耗, 延长无线传感器网络生存周期。微处理器芯片和射频芯片采用独立架构,

选择了低功耗的 MSP430F2618 处理器和 CC2520 射频芯片设计了一种低功耗传感器节点。实验证明：在发射功率为 0 dBm 时，设计的节点运行电流和休眠电流（26.1 mA，1.57 μ A）与传统节点的 Imote 节点（35.1 mA，3.6 μ A）、Mica2 节点（56.2 mA，21 μ A）比，明显低于传统节点，该节点如电池容量为 2 * 700 mAh，工作周期为 10 分钟，其寿命为 7.2 个月。其可在恶劣环境或者狭小空间或者户外等，需要定期采集数据的场合应用。

参考文献：

[1] 李姿景, 乐丽琴. 提高寿命周期的节能传感器网络设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018. 32 (7): 115 - 121.

[2] 潘琢金, 刘继磊, 罗 振, 等. 低功耗无线传感器网络节点的设计与实现 [J]. 计算机工程与设计, 2015. 36 (12): 3225 - 3229.

[3] 彭 宇, 罗清华, 潘大为. 一种无线传感器网络低功耗节点的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (12): 2571 - 2574, 2578.

[4] 杨 冲. 低功耗无线传感器网络节点设计 [D]. 北京: 北方工业大学, 2012.

[5] 毕 莹. 无线传感器网络节点的低功耗研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.

[6] 于 凯, 谢志军, 金 光, 等. 低功耗无线传感器网络节点设计

计与实现 [J]. 微电子学与计算机, 2012, 29 (9): 157 - 159, 163.

[7] 曾 闯, 江 虹. 一种低功耗传感器网络节点及路由设计 [J]. 自动化仪表, 2013. 34 (10): 51 - 54, 59.

[8] 周建民, 尹洪妍, 徐冬冬. 基于 Zigbee 技术的温室环境监测系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2011 (9): 50 - 52.

[9] Razzaque M A, Ahmed M H U, Hong C S, et al. QoS-aware distributed adaptive cooperative routing in wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2014, 19 (8): 28 - 42.

[10] Alkaraki J N, Kamal A E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey [J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 11 (6): 6 - 28.

[11] 李俊斌, 胡永忠. 基于 CC2530 的 Zigbee 通信网络的应用设计 [J]. 电子设计工程, 2011, 19 (16): 108 - 111.

[12] 任 伟, 顾小莉, 王丽华. 基于 Zigbee 的低功耗无线温室环境监测系统设计 [J]. 农机化研究, 2014 (9): 103 - 107.

[13] 谢伟杰. 无线传感器网络节点低功耗电源管理芯片研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.

[14] 金 纯, 王升刚, 尹远阳. WSNs 中一种基于移动新标检测的定位算法 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (2): 142 - 145.

[15] 杜晓玉, 李 辉, 周 林. 基于定向移动的水下传感器网络覆盖算法 [J]. 计算机工程, 2015, 41 (2): 76 - 80.

实现了将压力传感器电桥输出小信号转换为标准信号输出，提高了长线传输信号的信噪比，同时省去了压力变换器设备，降低了使用成本。

参考文献：

[1] 欧阳承曦. 硅压阻式压力传感器高精度温度补偿技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[2] 董 健. 压阻式冲击硅微机械加速度传感器的温度补偿 [J]. 机电工程, 2008 (4): 80 - 83.

[3] Vorathin E, Hafizi Z M, Aizzuddin A M, et al. A highly sensitive multiplexed FBG pressure transducer based on natural rubber diaphragm and ultrathin aluminium sheet [J]. Optics and Laser Technology, 2018, 106: 177 - 181.

[4] 曹庆伟. 扩散硅压力传感器灵敏度温度归一化补偿算法 [J]. 仪器仪表用户, 2017, 24 (5): 1 - 4.

[5] Vorathin E, Hafizi Z M, Aizzuddin A M, et al. Temperature-independent chirped FBG pressure transducer with high sensitivity [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 117: 49 - 56.

[6] 曹 钢. 硅微压力传感器设计、制造及批量调理与测试技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.

[7] 丁 勇, 卢文科, 左 锋. 差动变压器式位移传感器测量系统优化 [J]. 微型机与应用, 2017, 36 (6): 29 - 32, 36.

[8] 吴亚林, 赵 扬. 压阻式传感器热灵敏度漂移的变压源补偿

[J]. 传感器技术, 2000 (3): 38 - 40.

[9] 慕艾霖. 基于 MEMS 技术磁场/压力/加速度传感器集成化研究 [D]. 哈尔滨市: 黑龙江大学, 2016.

[10] Imran A, Muhammad A, Khuram S, et al. A highly accurate, polynomial-based digital temperature compensation for piezoresistive pressure sensor in 180 nm CMOS Technology [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20 (18): 52 - 56.

[11] Wang T, Tang Z J, Lin H M, et al. A low temperature drifting acoustic wave pressure sensor with an integrated vacuum cavity for absolute pressure sensing [J]. Sensors, 2020, 20 (6): 1788.

[12] 陈 勇, 郭方方, 白晓弘, 等. 基于 SOI 技术高温压力传感器的研制 [J]. 仪表技术与传感器, 2014 (6): 4 - 6.

[13] 朱立无, 程旺苗, 方联欧. 多只电阻并联或串联总温度系数 α 的计算 [J]. 中国计量, 2011 (10): 95 - 96.

[14] 滕 敏. 压阻式压力传感器零点温漂补偿公式的推导 [J]. 河南师范大学学报 (自然科学版), 2011, 39 (1): 101 - 103, 112.

[15] 严家明, 毛瑞娟, 谢永宜. 两种数据融合算法对扩散硅压力传感器的温度补偿 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (9): 1363 - 1365.

[16] 罗秦川, 张生才, 姚素英, 等. 多晶硅压力传感器热灵敏度漂移补偿技术 [J]. 传感器技术, 2003 (5): 33 - 36.