

超低功耗有源 RFID 温湿度传感标签的设计与测试

Design and Test of Active RFID Temperature and Humidity Sensing Tag
With Ultra-low Power Consumption

井新宇

(江阴职业技术学院,江苏 江阴 214400)

摘要: 为了显著降低有源 RFID 温湿度传感标签的功耗,设计了超低功耗有源 RFID 温湿度传感器标签。标签采用微控制器 MSP430 单片机为核心,以温湿度传感器 SHT11 和射频收发芯片 nRF24L01 为外围器件,完成温湿度的检测和发送。详述了温湿度传感标签的软硬件低功耗设计方法,以及功耗的测试与估算。该标签具有功耗小、成本低、运行可靠等特点,可广泛应用于光照、热和气流等环境能量供电的场合。

关键词: RFID 超低功耗 温湿度 传感标签 单片机

中图分类号: TP216 **文献标志码:** A

Abstract: In order to significantly reduce the power consumption of the active RFID temperature sensing tag, an active RFID temperature and humidity sensing tag is designed. With the MCU MSP430 as the core, and the temperature and humidity sensor SHT11 and radio frequency transceiver chip nRF24L01 as its peripheral components, the tag accomplishes the temperature and humidity detecting and sending. The design methods of software and hardware to reach low power consumption, and the test and estimation of the power consumption for the sensing tag are described in detail. The tag features low power consumption, low cost, and reliability of operation, it is widely used in the power supply by environment energy, e. g. light, heat and airflow, etc.

Keywords: RFID Ultra-low power consumption Temperature and humidity Sensing tag MCU

0 引言

射频识别(radio frequency identification, RFID), 俗称电子标签。RFID 射频识别技术是一项利用射频信号,通过空间耦合实现无接触信息传递并通过所传递的信息达到识别目的的技术。

RFID 射频识别技术通过射频信号自动识别目标对象并获取相关数据,识别工作无须人工干预。RFID 按照能源的供给方式分为无源 RFID 和有源 RFID。无源 RFID 读写距离近、价格低;有源 RFID 可以提供更远的读写距离,但需要电池供电,成本要更高一些,适用于远距离读写的应用场合。

1 系统结构与电路设计

1.1 结构组成与基本原理

有源 RFID 电子标签需要电池提供全部工作所需的电源。有源 RFID 温湿度标签具有对阅读器的发射功率要求相对较低、有效阅读距离较远的优点,因此,

应用十分广泛。但有源 RFID 温湿度传感标签对超低功耗、高可靠性等方面有较高的要求。

有源 RFID 系统由有源 RFID 传感标签、阅读器和应用系统 3 部分组成,其结构如图 1 所示。



图 1 系统基本结构图

Fig. 1 Basic structure of the system

有源标签具有唯一的身份识别码(即 ID),有源 RFID 温湿度标签需要外接传感器,对环境温湿度进行测量。在阅读器的有效工作范围内,标签主动地将自己的 ID 和所测得的温湿度通过射频发送给阅读器,阅读器将相关信息存储在自己的存储设备中。存储在阅读器中的数据通过 RS-232/485 等通信方式传送给应用系统,以便对数据作进一步处理,以实施环境温湿度的监控^[1-2]。

1.2 硬件电路设计

温湿度传感标签硬件电路主要由 nRF24L01 射频芯片、MSP430F1232 单片机和 SHT11 组成。其硬件电路原理图如图 2 所示。

修改稿收到日期:2011-12-19。

作者井新宇(1971-),男,2008年毕业于江南大学控制工程专业,获硕士学位,副教授;主要从事仪器仪表、嵌入式技术的研究和教学工作。

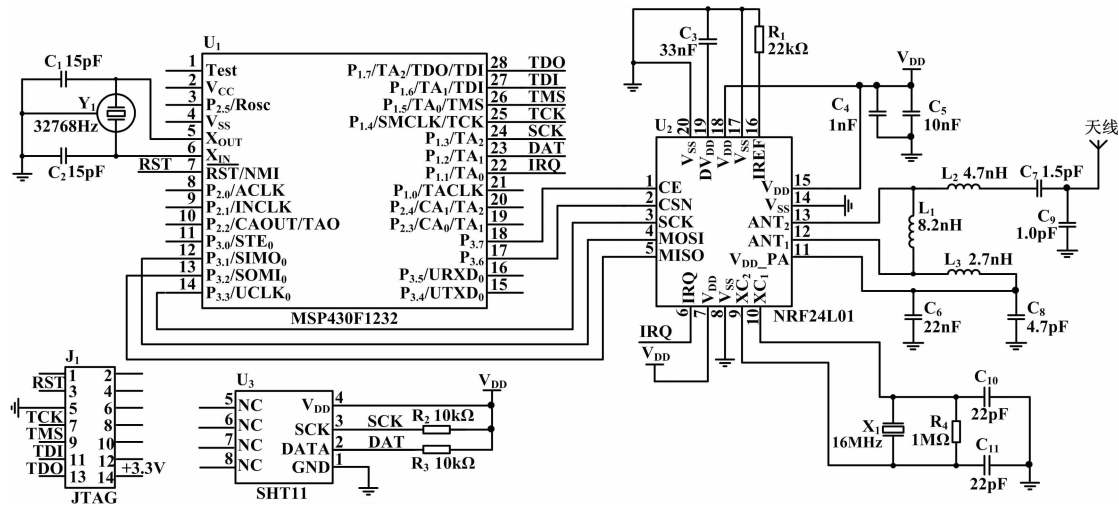


图 2 硬件电路原理图

Fig. 2 Principle of the hardware circuitry

单片机将大量的外围模块整合到片内,具有丰富的外部接口。电路充分发挥了 MSP430 单片机的低功耗性能,利用其 SPI 口与 nRF24L01 通信^[3]。

射频模块 nRF24L01 通过由 MOSI、MISO 和 SCK 组成的 SPI 接口,与 MSP430F1232 相连。MSP430F1232 单片机接 32 768 Hz 的低频晶振,nRF24L01 接 16 MHz 的晶振,通过低速的单片机控制高速收发的射频芯片。系统上电时,单片机通过 SPI 对 nRF24L01 进行状态配置。当系统处于发射模式时,nRF24L01 就把从单片机接收到的数据以 2 Mbit/s 的速率发射出去;若系统设为接收模式,则 nRF24L01 用来监测天线信号。若有同频的信号,就加以接收并打开数据包读取地址。若数据包地址与系统地址相同,就取出数据包中的有用数据,IRQ 信号置低电平并通知单片机来取走数据。

2 电子标签的低功耗设计

由于电子标签在监测系统中数量众多、分布广泛,且长期工作在无人值守的状态。因此,降低其功耗,延长电池寿命十分必要。本设计主要从器件选择、软硬件设计等方面来降低标签功耗,具体介绍如下。

2.1 超低功耗微处理器的选用

就微处理器的功耗而言,在不影响系统性能的情况下,采取两种方法来有效降低系统的功耗:①选用较低的工作电压;②降低工作频率,合理选择和控制时钟频率。

有源 RFID 传感标签选用了 TI 公司的 16 位超低功耗单片机 MSP430F449,其工作电压范围为 1.8 ~ 3.6 V,本设计采用 2.2 V 电压供电。

低功耗的实现与其灵活的时钟系统密切相关。MSP430 单片机具有 5 种用来实现超低功耗性能的低功耗模式。MSP430 系列单片机提供 1 ~ 2 个外部晶振输入和 1 个内部数字控制振荡器 (data control oscillator, DCO)。为了提高频率的稳定性,MSP430X4XX 系列采用了增强锁相环技术 (phase locked loop, PLL),通过低频时钟 (LFXT1)、高频时钟 (XT2) 和片内数字控制 RC 振荡器 (DCO),产生 4 种时钟信号,即辅助时钟 (ACLK)、分频辅助时钟 (ACLK/n)、主时钟 (MCLK) 和子系统时钟 (SMCLK)。

为了尽可能地降低系统功耗,在满足功能要求的前提下可通过以下两种方式实现系统的低功耗:①按一定比例降低主时钟频率;②通过程序设计和时钟频率控制,实现最优化的系统低功耗^[4]。

MSP430 系列单片机的各个模块都可以在 CPU 休眠的状态下独立工作,若需要主 CPU 工作,则任何一个模块都可以通过中断唤醒 CPU,从而使系统以最低功耗运行。使用软件将 CPU 设定到某一低功耗模式,在需要时使用中断将 CPU 从休眠状态中唤醒,工作完成后又可以进入相应的休眠状态。

MSP430 的 6 种工作模式以及各模式下电流比较如图 3 所示。

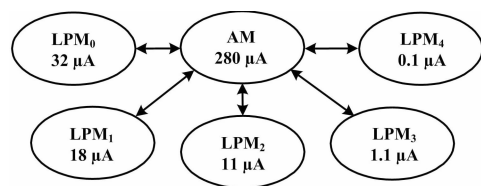


图 3 6 种工作模式及其电流比较

Fig. 3 Six operating modes and the comparison of currents

通过前文分析可知,任何一种低功耗模式只能与活动模式进行切换。这样 MCU 可在整个过程中长时间保持睡眠状态,只有产生中断时才激活,中断响应时间仅为 $6 \mu\text{s}$ 。

在进行软硬件设计时,采用以下方式降低功耗。

① 采用低功耗的器件和电路设计,并尽量降低其功耗;

② 不要让不用的 I/O 引脚悬空,应将其设置为输入并上拉到电源;

③ 若不需要很高精度的时钟或者高速响应处理任务,应尽可能不用外部晶振,而使用内部的 DCO 作为 MCLK;

④ 在进入低功耗模式前,应尽可能将 MCLK 改为 DCO 模式。DCO 模式在进入功耗模式后,在得到中断唤醒时,以最快速度启动工作的时钟源,这样可大大减少在唤醒时的能源消耗。如果唤醒后确实需要高速时钟源,此时可以再转换到高速时钟源上使用^[5]。

2.2 无线传输模块的低功耗设计

数据传输模块负责与其他标签进行无线通信,交换控制信息并采集、收发数据。无线通信消耗的能量占据了整个无线传感器网络能耗的绝大部分,因此对这一模块的选取和设计关系到低功耗设计的全局。除了考虑功耗因素外,还应兼顾数据传输模块的灵敏度、误帧率以及传输距离等综合性能^[6-9]。

本设计选用 NORDIC 公司的高速、低功耗、低成本 2.4 GHz 无线收发芯片 nRF24L01。它具有增强型 ShockBurst 功能,集成了双向通信所需要的链路层,输出功率、频道选择和协议可通过 SPI 接口进行设置。nRF24L01 有掉电模式 (power down)、待机模式 I (standby-I)、待机模式 II (standby-II)、发射模式 (TX mode)、接收模式 (RX mode) 5 种工作模式。其中,掉电模式的工作电流最小,仅 900 nA,无线收发芯片 nRF24L01 应尽量在此模式下工作,仅在需要传输数据时才转入 TX 或 RX 模式。各种模式间的转换过程也会产生功耗,模式间切换的延时主要由晶振起振的稳定时间决定,选择起振快、负载电容小的晶振可以减小延时。

对于无线数据传输,主要采取以下两种方法使系统在超低功耗状态下工作。

① 系统处于待机模式

待机模式可以将系统平均电流消耗降到很小,在没有数据收发时,可以保证快速进入 ShockBurst RX 和 ShockBurst TX 模式。5 种工作模式下的电流和 nRF24L01 的工作时序分别如表 1、表 2 所示。

表 1 5 种工作模式电流

Tab. 1 The operating currents of five modes

序号	工作模式	工作电流
1	TX mode, 0dBm 输出	11.1 mA
2	RX mode, 2 Mbit/s	12.3 mA
3	standby-I mode	22 A
4	standby-II mode	320 μA
5	power down	900 nA

表 2 nRF24L01 的工作时序

Tab. 2 The work timing of nRF24L01

序号	工作时序	max	min
1	power down \rightarrow standby	1.5 ms	
2	standby \rightarrow TX/RX	130.0 μs	
3	CE 高电平保持时间		10 μs
4	CSN 低电平, CE 上升沿延时时间		4 μs

nRF24L01 采用低功耗工作模式,其控制流程如图 4 所示。

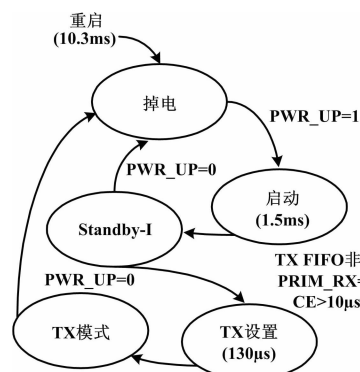


图 4 低功耗 nRF24L01 控制流程图

Fig. 4 Flowchart of nRF24L01 low-power consumption

nRF24L01 通过设置配置寄存器的 PWR_UP 位为低进入掉电模式,达到最低功耗;设置配置寄存器的 PWR_UP 位为高进入 standby-I。standby-I 可以使无线部分在电流比较低的情况下有较短的反应时间。设置 PWR_UP 为高、PRIM_RX 为低,此时数据载荷已在 TX_FIFO 中,同时 CE 出现 $10 \mu\text{s}$ 的高电平脉冲,即进入发射模式。nRF24L01 具有自动应答和自动重发功能,使数据传输模块的功耗大大增加。因此,需要去掉一些不必要的辅助功能,例如自动应答和自动重发等。

② 采用短距离多跳数传输

无线信号在空气中的传播与通信距离呈指数关系。衰减节点的通信距离将直接影响无线通信模块的发射功率,进而引出功耗的问题。通过寄存器将 nRF24LE1 的功率放大器配置成 4 种不同的输出功率,

射频收发功率输出设置值如表 3 所示。

表 3 射频收发功率输出设置值
Tab.3 Settings of the RF power output of receiving and transmitting

序号	RF 输出功率/dBm	电流消耗/mA
1	0	11.1
2	-6	8.8
3	-12	7.3
4	-18	6.8

通过降低输出功率,可以降低电子标签的功耗。无线传感器网络节点具有自组织、中断自我修复的功能,需要设计合适的通信协议和路由算法,以实现短距离、自组织和多跳数传输数据的无线通信系统,从而提高系统通信的可靠性^[7-8]。

2.3 温湿度传感器

本设计采用低功耗的数字式温湿度传感器 SHT11。该传感器在测量和传输完成后将自动转入休眠模式,等待下次命令的开始,从而降低传感器模块的功耗。SHT11 具有极高的可靠性与长期稳定性。片内装载的校准系数可保证互换性,电流极低,休眠电流为 3 μA,平均电流为 28 μA。

2.4 软件低功耗设计

电子标签软件低功耗设计的流程如图 5 所示。

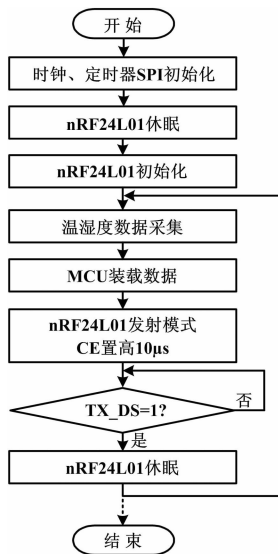


图 5 低功耗软件流程图

Fig.5 Software design flowchart for low-power consumption

采用定时中断的方法实现电子标签按一定的时间间隔进行温湿度的采集与无线传输,定时器定时时间可以设定为 10 s,具体步骤如下。

- ① 初始化 MSP430 时钟、定时器、SPI 等;

- ② 置 nRF24L01 于掉电模式,也即休眠状态,初始化 nRF24L01,包括发送速率、发射功率、频段、地址和校验等;

- ③ MCU 打开全局中断;

- ④ MCU 采集温湿度数据并通过 SPI 口把有效数据写入 nRF24L01TX_FIFO 缓存;

- ⑤ MCU 控制引脚 CE 置高大于 10 μs 后,经 130 μs 晶振稳定,nRF24L01 进入 TX 模式开始发送数据帧;

- ⑥ 控制位 TX_DS 置位,引脚 IRQ 产生中断信号,完成一次数据发送,此时应立即使 nRF24L01 进入掉电模式。

2.5 低功耗电源设计

电子标签采用电池供电,需使用 DC/DC 电压转换器。转换器需要符合两个条件:一是转换器上消耗的能量尽可能小,二是电池电压降到很低时能照常工作。所以,应选择超低功耗、超低输入电压的 DC/DC 电压转换器。TI 公司的 TPS61200 在输入电压范围和功耗上都符合要求,转换效率高达 90%,能自动切换升压/降压模式,静态电流小于 55 μA,电压输入范围为 0.3 ~ 5.5 V,输出范围为 1.8 ~ 5.5 V 可调,输出短路保护、过热保护,具有节电模式。

2.6 PCB 布局设计

PCB 布局对系统性能和功耗影响很大。nRF24L01 的供电电源必须经过良好的滤波,与数字电源走线分开,并尽量靠近芯片的 V_{DD} 引脚处,且经高质量的 RF 电容去耦。V_{SS} 应直接与敷铜地层连接,也可在离 V_{SS} 脚尽量近的地方放置过孔连接,值得注意的是,所有数字信号和控制信号走线不能离晶体和电源走线太近。nRF24L01 采用鞭形 PCB 天线,天线的频率和阻抗必须与射频芯片匹配,以获取最大的传输功率,减少无效的功率损耗。通常在 nRF24L01 的外围电路接入 L₁、L₂、L₃、C₇ 和 C₉ 等电容和电感,作为天线阻抗与射频芯片的匹配网络,并抑制高频噪声^[9]。

3 功耗测试与估算

功耗测试与估算采用示波器测试 nRF24L01 在各个工作过程所持续的时间和所消耗的电流,温湿度标签电池使用时间的计算基于平均电流,即电池容量 (mAh) 除以标签消耗的平均电流 (mA)。

平均电流的定义如下:

$$I_a = Q_{\Sigma} / T_{\Sigma} \quad (1)$$

式中: I_a 为平均电流; Q_Σ 为总电荷; T_Σ 为工作周期。

$$Q_{\Sigma} = i_1 t_1 + i_2 t_2 + \dots + i_n t_n \quad (2)$$

式中: i_n 为执行第 n 个过程所消耗的电流; t_n 为执行

第 n 个过程所需要的时间。

通过串联采样电阻,实现电流/电压的转换,从而实现电流的测量。设计中采样电阻取精度为 1%、阻值为 $1\ \Omega$ 的电阻。标签工作电压为 3.3 V、工作周期为 0.2 s、发送速率为 2 Mbit/s、发射功率为 0,并采用泰克公司的 TDS1012B 数字存储示波器进行测量。测得脉冲的幅值约为 12 mV,即 TX 模式工作电流为 12 mA,分析波形可知,nRF24L01 标签被唤醒到完成数据帧组装约为 300 μ s,工作电流约为 1 mA;标签进入 TX 模式准备发送需要约 130 μ s,电流约为 8 mA;标签发送数据约为 100 μ s,工作电流约为 12 mA。

若电池使用 750 mAh 的锰锂电池,由上述公式可计算得到电池的使用时间为 6.5 年。如果考虑到电池的实际自放电率,实际使用时间会更短一些,本计算得到的是标签每隔 0.2 s 检测的温湿度。如每隔 10 s 检测温湿度,甚至一天仅检测几次,其余时间标签进入深度休眠状态,则将延长电池使用时间^[10]。

4 结束语

有源 RFID 电子标签对低功耗性能指标要求极高,所以在设计低功耗性能突出的系统时,需要认真考虑其软硬件实现方法。采用低功耗电路设计方法、低

功耗器件选取方法和低功耗休眠机制,可实现电子标签的低功耗设计。该设计对于使用电池供电以及利用环境能量供电的无线传感网络具有重要的意义。

参考文献

- [1] 谭晖. Nordic 中短距离无线应用入门与实践[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009:156-188.
- [2] 孟海斌,张红雨. 基于有源 RFID 的超低功耗温湿度传感标签的设计[J]. 微型机与应用,2011(5):17-20.
- [3] 刘志平,赵国良. 基于 nRF24L01 的近距离无线数据传输[J]. 应用科技,2008(3):55-58.
- [4] 岳杰,李彤,夏斌,等. 基于 nRF9E5 的无线温湿度传感器网络节点设计[J]. 微计算机信息,2010(5):36-37.
- [5] 曹磊. MSP430 单片机 C 程序设计与实践[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007:30-32.
- [6] 曾勇,杨涛,冯月晖. 基于 nRF24L01 的超低功耗无线传感器网络节点设计[J]. 电子技术应用,2008(7):45-48.
- [7] 陈德海,梁毓明. 低功耗温室无线测量节点的设计[J]. 自动化仪表,2010(5):65-68.
- [8] 杨海粟,吴长奇,刘立芳. 基于 nRF905 的无线传感器网络节点的设计与实现[J]. 微型机与应用,2010(15):55-62.
- [9] 谭晖. nRF 无线 SOC 单片机原理与高级应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009:10-20.
- [10] 郑长征,张胜全,吴传菊. 基于 nRF9E5 的粮库无线测温节点的设计[J]. 粮油加工,2008(8):83-86.

(上接第 50 页)

实际运行情况,提出一种基于 PFC 和 GPRS 技术的远程自动抄表系统。该抄表系统所采用的 PFC 技术保证了数据在电力线上稳定、可靠地传输,不存在电力线载波数据传输技术的信号阻塞及数据采集盲区;GPRS 利用无线公网,便可实现对用电装置的实时跟踪监测,且运行成本低廉,能够实现自动切换。这种抄表系统构建简单,不受地理位置的限制,适用于用户多、位置分布散、不定期和长时间的数据采集环境,是一种经济实用的自动抄表系统。

参考文献

- [1] 谭志强,黄懿. 自动抄表技术的发展[J]. 电测与仪表,2009(1):1-5.
- [2] 王艳,刘素英,李玉忠. 低压电力载波抄表系统[J]. 继电器,2002(7):48-51.

- [3] 赵普琴. 基于 GPRS 技术的无线远程抄表系统设计与实现[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版,2010,24(11):89-92.
- [4] Mak S, Twacs T. A power line communication technology for power distribution network control and monitoring [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986(1):66-71.
- [5] 赵永平,张世平,赵万生. TWACS 调制信号时频分析方法的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报:自然科学版,2005(6):839-841.
- [6] 张贤达,保铮. 盲信号分离[J]. 电子学报,2001,29(12):1766-1771.
- [7] Cardoso J F, Souloumiac A. Blind beamforming for non-gaussian signals[J]. IEE Proceedings of Radar and Signal Processing, 1993, 140(6):362-370.
- [8] 曹玉珍,陈成,胡勇,等. 基于独立成分分析的肌电信号消噪方法研究[J]. 信号处理,2003,19(4):369-372.
- [9] 伍飞云,杨智,范正平,等. 基于独立分量分析和小波变换的膈肌肌电信号降噪[J]. 信号处理,2010,26(10):1532-1538.
- [10] 吴斌,赵学增,滕志军. 基于自适应陷波器的工频电力通信信号检测[J]. 电力系统自动化,2003,27(20):35-38.

行业信息

国家人力资源和社会保障部“653 工程”

——仪表及系统功能安全高级研修班顺利开班

2012 年 10 月 25 ~ 27 日,仪表及系统功能安全高级研修班顺利开班。详情请登陆 www.paimag.com。