

Low-Power Design and Implementation of Wireless Remote Gas Meter Reading

CUI Yang^{1,2}, JIANG Yu^{1,2}, ZHONG Lihong¹, ZHANG Jian¹, HU Chengquan^{1*}

(1. Department of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China;
2. Changchun Mambo Technology Company, Changchun 130012, China)

Abstract: Low-power design of motes is critical in wireless sensor networks. We consider three main aspects of low power consumption and design and implement the mote for remote gas meter reading. This paper describes the main energy saving methods and the modules of implementation in details. The simulation and experiment results show that our design can extend 3 ~ 5 years of the battery lifetime for gas meter thus it fulfills the application requirement of the gas utility reading system.

Key words: wireless sensor network, low power consumption, power management, automatic meter reading
EEACC: 7230

数字远传燃气表的低功耗设计与实现

崔 洋^{1,2}, 姜 宇^{1,2}, 钟丽鸿¹, 张 健¹, 胡成全^{1*}

(1. 吉林大学计算机科学与技术学院, 长春 130012; 2. 长春曼博科技公司, 长春 130012)

摘 要: 无线传感器网络中节点的能量是一种非常有限资源, 考虑到低功耗实现的三个主要解决方面, 设计并实现了一款低功耗的数字远传燃气表节点, 提出了节点的节能设计要点, 给出了各个模块的具体设计。理论计算和实验表明: 本文的低功耗设计可以使燃气表节点的使用寿命提高至 3 ~ 5 年, 极大程度的满足了燃气公共事业计量抄表的应用需要。

关键词: 无线传感器网络; 低功耗; 电源管理; 远传抄表

中图分类号: TP391s

文献标识码: A

文章编号: 1004 - 1699(2010)02 - 0209 - 06

最近有很多关于公共事业计量抄表的研究: 其中有些研究数字水表的低功耗问题, 设计并实现了采集远传系统, 通过计算得出此设计可以使用 8 ~ 9 年的结论^[1], 但是文章没有考虑到电池的放电特性对系统功耗的影响; 有些研究中设计了水表的采集和远传系统^[2], 但是没有考虑到系统的功耗因素; 有些研究关于电表计量的方案^[3]; 很少有文章针对燃气表抄表计量设计并实现低功耗节点。可以看出将无线传感器网络技术应用于公共事业计量抄表方面具有广泛的应用前景。因无线传感网络节点有自组织、无中心节点、分布广等特点, 低功耗设计具有十分重要的意义^[4-8]。

在本文的第 1 节中, 介绍了燃气计量抄表系统结构及设计的节点实例; 第 2 节中具体介绍了设计低功耗数字燃气表的关键技术; 第 3 节中通过计算得到试验结果, 最后给出结论: 设计的燃气表可以使

用 3 ~ 5 年。

1 燃气计量抄表系统结构

图 1 所示为燃气计量抄表系统结构。在用户家中安装数字远传燃气表, 燃气表节点通过传感器网络将燃气数据传输到抄收的网关设备, 再通过宽带传输将数据传送到数据中心进行汇总处理, 由一套实时监控、自动抄表系统分析软件处理各个用户燃气的使用情况。同时, 可以针对某一用户家的燃气表节点下达特定命令(如欠费关阀、低电提醒等)。

图 2 所示为数字远传燃气表的实物图, 设计的远传数字燃气表已经在试点小区进行测试 3 个月, 表具运行稳定, 数据准确, 正确执行各种应用命令。

图 3 所示为燃气抄表系统设计的节点的实物图。其主要功能是采集燃气量, 通过无线网络传输

数据,根据应用命令执行蜂鸣报警、开/关阀门、电压采集等;并且能够自动检测系统电源状态以及掉电、

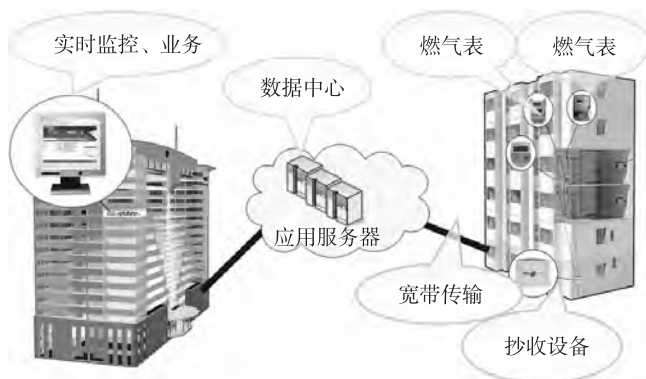


图1 燃气自动抄表系统方案示意图

上电事件,并且把数据、阀门状态、欠费状态等信息保存在非易失性 E2PROM 存储器里。



图2 数字远传燃气表实物图

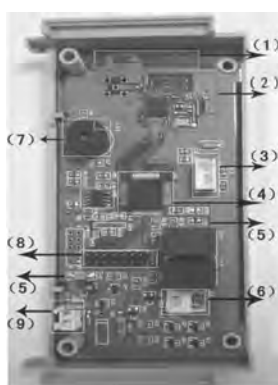


图3 燃气表节点实物图

其中(1) - 天线;(2) - 射频部分;(3) - 流量传感器插槽;(4) - MCU;(5) - 电源管理部分;(6) - 电机阀门插槽;(7) - 蜂鸣器;(8) - JTAG 插槽;(9) - 电源插槽。

2 低功耗设计

2.1 设计要点

燃气表节点的低功耗设计需要考虑以下因素:

2.1.1 硬件部分

(1)尽量选择低功耗,片内资源丰富的控制芯片。射频模块选用工作状态与静态消耗电流都较小、收发电流稳定的芯片。

(2)具体外围电路的设计(如稳压芯片、复位芯片、存储芯片、基本电子元器件等)选择消耗电流小的低功耗电子元件。

(3)选择本身消耗功率较小,具有较好放电特性,容量大并稳定的电池作为供电电源。

(4)在满足系统要求的情况下尽量使用较低的电压和频率。使用动态功率管理(Dynamic Power Management, DPM)和动态电压调节(Dynamic Voltage Scaling, DVS)两种技术来

实现^[9]。

(5)除了处理器模块,无线收发模块,传感器及电源模块这几个必要部分,其余燃气表功能的实现:如 A/D 电压采集、低电压监控,实时时钟等尽量利用处理器芯片自身的资源,尽量不使用其他外设以降低能量消耗。

(6)设计采用动态能量检测管理电路,检测系统的掉电、上电事件。

(7)系统存在静态电流消耗较大又必须使用的模块时,采用低消耗的 MOS 管开关电路,来消除静态电流消耗。

(8)针对节点中必要的应用功能部分的电路设计(如蜂鸣,显示等),采用 K 级或者 M 级电阻。保证仅有较小的电流消耗。

2.1.2 软件部分

(1)采用事件驱动的工作方式,尽量使用中断处理方式减少 MCU(Micro Controller Unit)的活动时间,避免循环、查询、动态扫描等工作方式;让处理器大部分时间都在深层的睡眠状态;采用快速响应的中断方式唤醒进行工作,完成后迅速再进入休眠。

(2)尽量精简系统在工作状态下的代码量,提高代码效率;低占空比的操作模式,降低工作和休眠时间的比例。

(3)采用动态电源管理,检测电源部分的上电、掉电事件,以及电压状态。通过程序控制,需要工作时才接通相应模块的电源。

(4)功能模块部分(显示、按键、蜂鸣等),不工作状态时采用降低功耗的程序操作,保证模块处于关闭状态,降低能量消耗。

2.2 系统设计

燃气表节点总体结构图 4 所示。

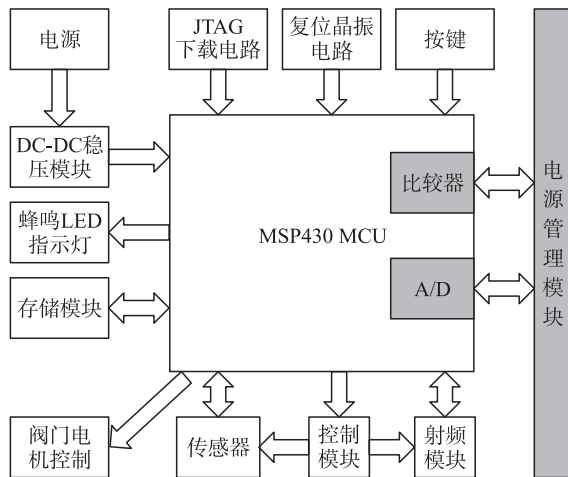


图 4 燃气节点系统结构图

2.2.1 处理器的选择

处理器是功率消耗的主要来源,选择合适的 CPU(Central Process Unit),需要对 CPU 的性能和功耗方面进行权衡和比较。

本设计针对燃气自动抄表系统的情况,选择了 TI(Texas Instruments)公司出品的 MSP430 系列单片机。MSP430 系列单片机^[10]采用低功耗设计,有五个休眠的等级,活动状态 1 M 频率、2.2 V 电压下电流消耗仅 280 μ A,休眠状态下电流消耗仅为 0.1 μ A。

2.2.2 射频模块的选择

下表 1 介绍了几种无线射频产品,详细列出了各种射频芯片的性能参数^[1]

表 1 无线模块部分比较

型号	CC2420	MC13192/3	JN5121	CC2430	EM2420
性能					
制造厂商	TI	Freescall	Jennic	TI	Ember
发送灵敏度 (dBm)	-94	-92	-93	-94	-94
发送能量 (dBm)	0	0	+1	0	0
电流消耗 (mA)					
发送	20	42	50	27	20
接收	17	35	40	25	17
电源电压(V)	2.1~3.6	2.0~3.4	2.2~3.6	2.0~3.6	2.1~3.6
OFF(μ A)	0.02	<1 μ A	1 μ A	0.9	1 μ A

由上表 1 可知, TI 公司出品的 CC2420 芯片在功耗方面表现优异,并且在休眠模式下电流消耗极低,满足低功耗设计的要求,因此选择了 CC2420 为系统的 RF 芯片。

2.2.3 传感器模块设计

如图 5 电路是燃气流量检测和强磁干扰检测电路示意图,左侧的两个方框表示燃气表内部的干簧管,设计两个电容用于过滤高频干扰。两个干簧管连接到 MSP430 单片机的两个具有中断功能的引脚

上。当燃气流量达到一个基本单位时,两个干簧管依次吸合一次,两个单片机引脚分别产生一次跳变,从而依次触发中断,流量计数。当两个输入端同时产生中断时表示有异常事件,用于检测强磁干扰。图 6 所示为传感器的实物图。

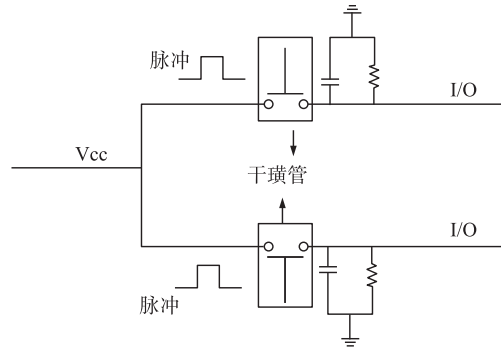


图 5 传感器模块



图 6 传感器实物图

采集流量传感器部分采用高电平 Vcc 为公共端,干簧管在大部分时间里处于零电平,没有电流消耗。采用 M 级电阻的设计,在有脉冲来时,电流消耗仅为 μ A 级,消耗极低。

2.2.4 电源管理模块设计

电源管理部分采用 MSP430 片上的比较器 A、A/D 转换器的设计方式,定时监测电池电压信息,共同完成系统对掉电、上电的监测。具体设计如图 7 所示:

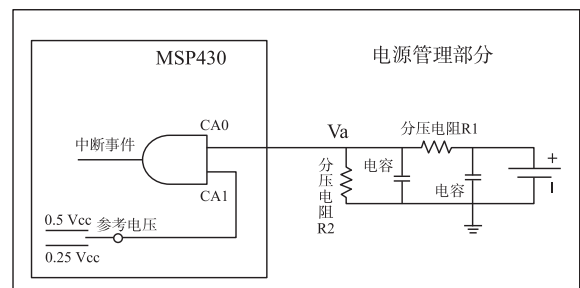


图 7 电源管理模块

2.2.5 掉电、上电检测:

MSP430 内比较器 A 有两个模拟输入端 CA0 和 CA1,主要功能是比较两个输入端电压大小的关系。本系统采用 3 节 5 号电池供电,电池电压通过分压电阻连接到比较器的 CA0 端。比较器的 CA1 端连

接到内部的参考电压发生器上。参考电压发生器能够产生 $0.5V_{cc}$ (V_{cc} 为 MSP430 的供电电压) 和 $0.25V_{cc}$ 两种基准电压。比较 CA0 和 CA1 两端的电压值,当 $0.5V_{cc} > CA0 > 0.25V_{cc}$ 时,认为电池欠压;当 $CA0 < 0.25V_{cc}$ 时,则认为系统掉电。

V_a 点电压计算公式:

$$V_a = \frac{R_2 // R_{in}}{(R_2 // R_{in}) + R_1} V_{bat}$$

(其中, R_{in} 表示模拟比较器 CA0 端的输入电阻; $R_2 // R_{in}$ 表示 R_2 、 R_{in} 两个电阻并联; V_{bat} 表示电池电压; V_a 表示 CA0 点电压。)

电池电压下降到 1.2 V 时,系统已经不能工作了;并且 V_a 最大值不能超过单片机供电电压的最大值,所以在分压电阻阻值的选择上要满足

$$0.5V_{cc} = \frac{R_2 // R_{in}}{(R_2 // R_{in}) + R_1} \times 3 \times 1.2V$$

$$\frac{R_2 // R_{in}}{(R_2 // R_{in}) + R_1} \times 3 \times 1.6V < 3.3V$$

欠压中断:将 CA1 连接到参考电压发生器的 $0.5V_{cc}$ 端时,当 V_{bat} 下降到 3.6 V 时, $V_a = 0.5V_{cc}$,触发比较器 A 中断,表明电池欠压;此时的中断称为电池欠压中断。中断发生后会将 CA1 连接到参考电压发生器的 $0.25V_{cc}$ 端。

掉电中断:当 $V_a = 0.25V_{cc}$,会再次出现比较器 A 中断,并称为系统掉电中断。系统掉电中断只可能出现在拿掉电池的情况。

上电中断:在系统掉电中断子程序中,将 CA1 连接到参考电压发生器的 $0.5V_{cc}$ 端。电池被取下后,由于后备电源的作用,单片机还会工作一段时

间;监测如果满足 $V_{bat} > 3.6V$ 时,三节电池被重新安装,系统历经 $V_a = 0.5V_{cc}$,会出现比较器 A 中断,这个中断称为系统上电中断。

根据各个中断的情况不同,可以选择性的开启或关闭特定的功能模块。

2.2.6 A/D 电池电压监测:

对于电源电压要求严格监控,而对实时性没有很高的要求的系统,可以定时启动 A/D 转换采集 V_a 来监视电池电压。当电池电压下降到一定极限时,让系统进行掉电保护。

2.2.7 低功耗设计:

设计的电源管理部分使用单片机内部资源,在不使用时可以软件操作关闭。分压电阻的设计都采用 M 级电阻将静态消耗的电流降到最低;通过电源管理部分可以检测整个系统的电源情况,有选择的开启/关闭各个部分。

2.3 燃气表工作流程

软件部分采用事件驱动机制来降低功耗,节点初始化后进入 LPM3 休眠模式,有事件触发时才被唤醒进入中断处理程序。节点入网成功后,每一小时维护一次网络并且上传数据、请求命令;根据应用程序的需求执行相应的操作;

工作流程主要分成三个部分:电源管理部分、表具功能部分、无线收发部分。电源管理部分主要负责电源的掉电、上电检测以及电池电压的采集;表具功能部分是执行燃气公司定制的燃气表的功能,如开关阀门、声光指示等;无线部分主要负责无线网络的通信。具体功能流程详见图 8 所示。

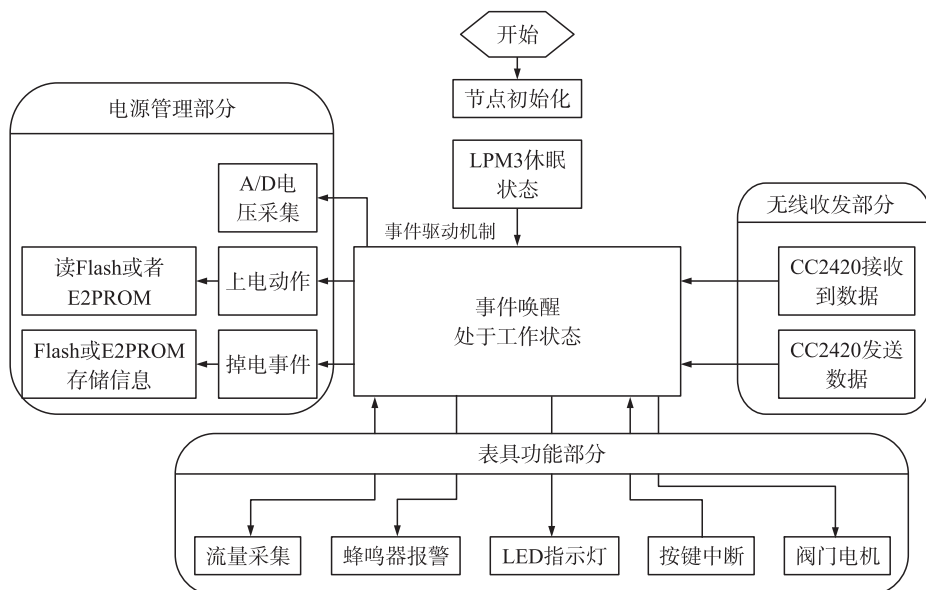


图 8 功能流程图

3 试验结果

3.1 各模块能量消耗

通过理论计算以及对燃气表节点的实际测试,得到如表 2 所示系统各个模块的能量消耗情况;

由表 2 可知,工作状态下系统在所有模块全开时最大电流消耗是 60 ~ 80 mA;其中阀门部分消耗最大 40 ~ 60 mA,但是阀门部分在多数时间里都在关闭状态;其余射频部分消耗最大 17 ~ 20 mA,占总消耗 > 60%;蜂鸣、LED 灯、按键、A/D、存储部分都是少数时间在应用要求的情况下才使用,能量消耗可以忽略不计。

系统在活动状态下的电流消耗为

$$I_{\text{active}} \approx (400\mu\text{A} + 600\mu\text{A})/2 + 20\text{mA} + 3.3\mu\text{A} + (20\text{A} + 40\mu\text{A})/2 + (20\mu\text{A} + 40\mu\text{A})/2 = 20.5633\text{mA}$$

静态时消耗大概在 60μA 左右,稳压模块的静态电流消耗以及电源管理模块(主要分压电阻上)的消耗较大;稳压模块用来给单片机系统提供一个稳定的电源电压,电源管理的比较器部分用来实时的检测系统电源的掉电、上电事件;实际测试得:

$$I_{\text{LDO}} \approx 30\mu\text{A}, I_{\text{power}} \approx 30\mu\text{A}$$

系统在休眠状态下的静态电流消耗为:

$$I_{\text{static}} \approx 1.6\mu\text{A} + 0.02\mu\text{A} + (40\mu\text{A} + 60\mu\text{A})/2 + 0.3\mu\text{A} + 1\mu\text{A} + 1\mu\text{A} = 53.92\mu\text{A}$$

表 2 系统各模块能量消耗

状态	控制器	射频	传感器	电源检测部分	蜂鸣	LED	存储	稳压模块	阀门
工作	400 ~ 600μA	Tx:20mA Rx:17mA	3.3μA	400μA(A/D) 20 ~ 40μA(比较器)	16.5mA	10.4mA	330μA	20 ~ 40μA	40 ~ 60mA
休眠	1.6μA	426μA	无	无	无	无	无	无	无
OFF	无	0.02μA	0μA	40 ~ 60μA(共)	0.3μA	0μA	1μA	无	1μA

3.2 系统整体功耗分析

(1)初次入网时功耗:根据系统的网络协议,MCU 上电后正常入网,初次入网所花费的时间 $t_{\text{join_net}} \approx 10\text{s}$ (异常状况的时间不能确定,不考虑),然后马上进入休眠状态,MCU 运行在 LPM3 模式,射频模块关闭。

(2)每个周期唤醒时功耗:节点在正常入网后每一个小时唤醒一次,做网络检测以及数据上传、命令下达等动作,处理完成马上进入休眠状态;工作时间 $\approx 4\text{sec}$ 。

休眠与工作时间的占空比是:

$$K > T_{\text{sleep}}/T_{\text{active}} = (10 \times 60 \times 60) : 4 = 9000 : 1$$

由表 2 各模块能量消耗可知一个周期内(1 小时)的能量消耗是:

$$E_{\text{active}} < 20.5633\text{mA} \times 4\text{sec} = 0.02284\text{mAh}$$

$$E_{\text{sleep}} = 53.92\mu\text{A} \times 1\text{h} = 0.05392\text{mAh}$$

(3)传感采集部分功耗:传感器部分采用中断方式,每次有脉冲来时电路消耗主要是 M 级电阻(假设是 1M 电阻)的消耗以及 MCU 唤醒处理中断时的消耗(如果 MCU 已经处于工作状态,电流消耗已经计算过,不必重复计算)。

$$I_{\text{sensor}} = 3.3\text{V}/1\text{M} + 400\mu\text{A} = 0.40033\text{mA}$$

每一次中断处理程序仅处理计数和强磁干扰的检测工作,工作时间 $< 3\mu\text{sec}$, $T_{\text{sensor}} \approx 3 \times 10^{-6}\text{sec}$ 。

而分别依次上两个脉冲时累计燃气流量

0.001m^3 ,脉冲频率的高低取决于用户使用的燃气量的多少,一般的用户一个月的燃气使用量是 10m^3 左右,即每个月有中断 2×10^4 次,平均中断的频率是 $F_{\text{interrupt}} = 0.0077$ 次/sec。

则可以计算在一个周期内(1 小时)

$$E_{\text{sensor}} = I_{\text{sensor}} \times T_{\text{sensor}} \times F_{\text{interrupt}} \times 3600\text{sec} = 9.247 \times 10^{-9}\text{mAh}$$

传感器上消耗的电流极少,基本接近于 0mAh

(4)各功能部分功耗:蜂鸣和 LED 指示灯只在有强磁干扰以及低电时才工作,存储器仅在上电、掉电时操作;按键部分仅在欠电、欠费、开阀时使用;以上各部分在硬件设计及嵌入式程序操作上都考虑了低功耗,大部分时间内处于关闭状态,静态电流消耗接近 0μA,能量消耗可以暂不考虑。

(5)电源管理部分功耗:电源管理中 A/D 采集电池电压部分,每次持续时间: $t_{\text{AD}} \approx 1\text{sec}$; 电流消耗: $I_{\text{AD}} \approx 400\mu\text{A}$ 。

假设每周采集一次,则可以计算在一个周期内(1 小时)

$$E_{\text{AD}} = I_{\text{AD}} \times t_{\text{AD}} = 1.111 \times 10^{-4}\text{mAh}$$

(6)整体功耗:

由以上 5 点可以算出系统一天的能耗是:

$$E_{\text{day}} < (E_{\text{active}} + E_{\text{sleep}} + E_{\text{sensor}} + E_{\text{AD}}) \times 12 = 0.9224533\text{mAh}$$

系统一年的能耗是:

$$E_{\text{year}} = E_{\text{day}} \times 365 = 336.695458\text{mAh}$$

(7)针对煤气表自动抄表系统,考虑到电池的容量、成本等方面因素,系统采用3节5号电池串联的方法充当电源;由于节点的硬件设计,单节电池放电到1.2V左右时系统已经不能正常工作了,假设电池电压下降到1.2V左右时,3节电池的放电量分别为1000、1500、2000mAh时,节点可以工作的天数见表4。

表4 工作天数

容量(mAh)	使用天数
1000	1084
1500	1626
2000	2168

如果选择以色列等国家生产的高能电池,还可以大大提高系统的正常工作时间。

4 结论

在本文中,主要设计并实现了应用在燃气自动抄表系统中的数字远传燃气表节点,给出了一种燃气表节点的低功耗设计方法;对设计的燃气表节点通过计算分析得到结论:设计的节点在普通3节电池串联的情况下可以使用3-5年。

但是在该设计中,燃气表节点在静态下电源管理与稳压模块部分仍然有较大的电流消耗,下一步的工作将会重点改进这两部分的设计,来进一步降低系统能量消耗。

参考文献:

[1] Lee Young-woo, Eun Seongbae, Oh Seung-hyueb. Wireless Digit-

al Water Meter with Low Power Consumption for Automatic Meter Reading [C]//Proc of International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology 2008. Daejeon: IEEE, 2008: 639-645.

[2] Zhou Ying, Li Hongsheng. Design of New Low Power Loss Non-magnetic Water Meter [C]//Proc of The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI' 2007). Xian: IEEE, 2007: 356-359.

[3] XU Chun-sen, CHEN Xiang-jian, LI Di, et al. Automatic Electric Meter Reading System Based on ZigBee [C]//Proc of Wireless Communications Networking and Mobile Computing, Dalian: IEEE, 2008: 1-4.

[4] Choi Moonsuk, Ju Seongho, Lim Yonghun. Design of Integrated Meter Reading System Based on Power-Line Communication [C]//Proc of Power Line Communications and Its Applications. Daejeon: IEEE, 2008: 280-284.

[5] Eun S, So S, Chae Y. A Scheme to Categorize Ubiquitous Sensor Network Services and Their Practical Issues [J]. Journal of IEMEK, 2007, 2(3): 202-208.

[6] Lee J, Jung S, Jung K. Development of Automation System by Wireless Telemetry [J]. Journal of Industrial Science Research Center, 2003, 17(1): 121-126.

[7] Jung W. Design of Automatic Meter Reading System with RF Transceiver Module [J]. Journal of Korea Computer Information Society, 2004, 9(4): 179-184.

[8] 唐云建,梁山,冯会伟,等. 低功耗射频唤醒无线传感器网络设计[J]. 传感技术学报,2007,20(10):2328-2332.

[9] 章坚武,张季姬. 无线传感器节点低功耗的研究[J]. 传感技术学报,2007,20(12):2679-2682

[10] MSP430x13x, MSP430x14x, MSP430x14x1 Mixed Signals Microcontroller SLAS272E - July 2000 - Revised August [Z]. TI Corporation 2003:1.



崔洋(1985-),男,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络,嵌入式系统,cuiyang08@mails.jlu.edu.cn;



胡成全(1957-),男,教授,研究方向为无线传感器网络,嵌入式系统,环境智能,hucq@jlu.edu.cn.