

## The Study of WSN Nodes Battery-Powered Performance\*

LÜ Tao, SHI Weibin\*, FAN Kunkun, YANG Kai, YU Jiabao, KONG Weixing, GONG Yanqing, SUN Feng

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Sensor nodes of wireless sensor networks rely mainly on battery power. In order to ensure that the nodes can work stably for a long time, the performance of battery power supply has higher requirements. The authors have set up a network based on ZigBee protocol to test the power consumption of sensor nodes. A method for on-line monitoring the battery voltage based on WSN is provided, and the performance test of Ni-MH batteries and solar battery powered have been done; the measuring error about 1%. The experimental results show that, when the data collection period is from 2 seconds to 600 seconds, the ordinary Ni-MH battery for WSN nodes power supply can maintain its normal work for 10 day, while the 2 000 mAh lithium battery with a 0.7W solar panel powered sensor nodes can maintain the nodes to work for a long time(11 day at least). This work provides a reference for the next node power supply design and estimation of survival time.

**Key words:** wireless sensor networks; ZigBee protocol; Ni-MH battery; solar power supply; survival time

EEACC: 6150P; 8360

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.10.026

## WSN 节点电池供电性能测试研究\*

吕涛, 施伟斌\*, 范坤坤, 杨凯, 余家宝, 孔维行, 巩艳庆, 孙凤

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 无线传感器网络的传感器节点主要依靠电池供电, 为保证节点能较长时间地稳定工作, 对电池的供电性能具有较高的要求。组建了一个基于 ZigBee 协议的节点功耗测试网络, 提供了一种基于 WSN 的电池电压在线监测的方法, 测量误差范围在 1% 左右, 分别对镍氢电池和太阳能电池供电性能进行了测试。实验结果显示, 在数据采集周期为 2s ~ 600s 的情况下, 用普通镍氢电池为 WSN 节点供电只能维持其正常工作 10 天左右; 而使用 2000mAh 锂电池搭配 0.7W 太阳能电池板对传感器节点进行供电时, 可以维持节点(在实验期间)长时间正常工作(至少 11 天以上), 可以为今后节点电源设计和节点生存时间估计提供有益的参考。

**关键词:** 无线传感器网络; ZigBee 协议; 镍氢电池; 太阳能供电; 生存时间

中图分类号: TP393.06

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)10-1457-06

无线传感器网络 WSN (Wireless Sensor Networks) 是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点组成的, 通过无线通信的方式形成的一个多跳的自组织网络, 目前已在医疗健康、环境监测、智能家居等诸多领域得到不同程度的应用。在 WSN 中, 考虑到要求网络系统有尽可能长的工作时间, 因此低功耗几乎就成了目前 WSN 研究的一个核心之一<sup>[1]</sup>。其中基于 ZigBee 技术的 WSN 以其低功耗、低成本和低复杂度受到高度关注, 但其节点的能耗问题仍有待解决<sup>[2]</sup>。目前传感器节点主要依靠电池供电, 为保证节点能较长时间的稳定工作, 故在进

行低功耗设计<sup>[3-5]</sup>与节能策略研究<sup>[6-9]</sup>的同时, 也对供电模块电池的性能提出了较高的要求, 尤其是一些放置于室外的传感器节点, 采用什么样的供电方案才能保证其较长时间的稳定工作, 若采用太阳能电池供电, 如何选择合适的太阳能电池板和锂电池就是一个必须要解决的问题。

目前对电池性能的测试主要是针对电池剩余电量的监测, 通常使用电池荷电状态(State of Charge)来描述电池的剩余电量<sup>[10]</sup>。目前对于电池剩余电量的监测, 主要有两种方法: 一种方法是以电压测量为基础, 另一种方法则是以电流积分为基础。其中

项目来源: 上海市教委科研创新项目(11CX44)

收稿日期: 2013-03-03 修改日期: 2013-09-22

电压测量法是基于电池电压和电池剩余电量之间存在的某种已知的关系,通过测量电池两端的电压来计算电池的剩余电量<sup>[11]</sup>。由于 WSN 应用中节点需要大量布置在实际环境中,传统的专用仪表测量电池电量技术受限于人力物力成本,不能很好地满足实时能耗监测的需要。本文采用电压测量法,设计了一种基于 WSN 的电池电压在线监测的方法,在此基础上设计组建基于 ZigBee 的 WSN 节点功耗测试网络,对传感器节点使用的镍氢电池与太阳能电池的供电性能进行了测量分析;在实验室现有条件下,通过测算节点的实际生存时间来寻找合适的节点供电方式。

### 1 伏安特性监测系统软件设计

目前关于 WSN 节点网络生存时间与电池供电性能的研究大多集中在理论分析与仿真阶段,与现实环境中的实际效果相差较大,故本文作者搭建如图 1 所示的测试平台,以 ZStack-CC2530-2.2.0-1.3.0 为基础组建 WSN,可较准确的实现对数据的远程采集与监测。

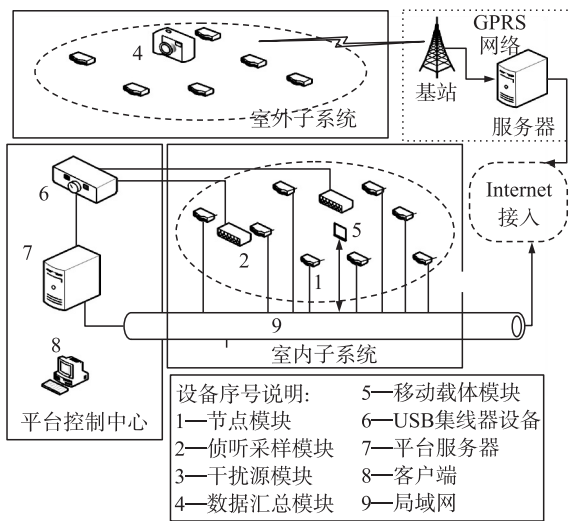


图 1 WSN 测试平台硬件系统架构图

#### 1.1 节点数据采集及传输的实现

由 CC2530 数据手册中对 ADC 控制寄存器 ADCCON2 的描述可知<sup>[12]</sup>,当寄存器 ADCCON2 的 [3:0]位为 1111 时,可实现对 1/3 电源电压的 AD 采样,所以可通过这种方式实现对传感器节点电池电压的采集。同时使用 ADC 的 AIN7 通道实现对太阳能充电电压即锂电池电压的采集,使用 ADC 的 AIN0-AIN1 进行差分采样实现对太阳能电池板充电电流的采集。由于太阳能电池板的输出电压为 5 V,超出了 CC2530 的工作电压 3.3 V,故将其输出电压使用 10 MΩ 的电阻进行分压后采集。

由于终端节点发送给协调器的数据,除了包含采集的实验数据以外,还有其他相关的辅助信息,因此需要对终端节点与协调器之间的数据通信格式进行如表 1 所示的相应规定,以确保实验数据的可靠传输。同时为便于上位机软件处理,对协调器节点与 PC 机之间的数据通信格式也进行了相应的规定如表 2 所示。

表 1 终端节点-协调器数据通信格式

序号	0	1	2	3	4	5
内容	节点 ID	数据 类型	数据序号 低八位	数据序号 高八位	数据 低八位	数据 高八位

表 2 协调器-PC 机数据通信格式

序号	名称	备注
[0]	数据开始标志位	字母'D'
[1:2]	设备序号	范围 1~99
[4:7]	设备网络地址	
[9]	数据类型	1、7、9
[11:14]	数据序号	范围 0~9999
[16:20]	数据	范围 0~9.999

#### 1.2 上位机软件的实现

使用 VC++6.0 开发设计,主要实现对串口控件的操作、串口数据的接收和处理、显示界面的设计与数据库的操作。图 2 为上位机软件界面,可对节点网络分布以及电池伏安特性等工作状态参数进行实时监控。



图 2 上位机软件界面

#### 1.3 与现有测试技术比较

本文对现有测量技术进行改进,采用电压测量法,结合 WSN 技术,提供了一种基于 WSN 的电池电

压在线监测的方法,可以实现电池电压的远程测量与采集工作;与使用精密测量仪器测得数据相比较,测量误差范围在 1% 左右。与常用人工测量的方式相比较,因为网络节点布置环境复杂,在需要被测节点电池数量较多时具有明显优势,大量减少了测试的工作量与人工成本。本文基于此,对 WSN 节点电池供电性能进行测量分析,试图在现有的实验条件下寻找合适的节点供电方式,在不影响节点正常工作的前提下尽量延长其生存时间。

表 3 方法有效性比较

测量方法	耗时	成本代价	精度
常用电表测量法	被测电池较多时 耗时较多	一般	较高
专用仪器测量法	少	高	高
本方法	较少	较低	较高

## 2 测试实验方案

根据目前实验室现有电池情况,针对不同型号不同容量的电池,制定了以下分组测试方案:

(1) 镍氢电池测试实验 根据节点所用电池的容量分为三组,每组由 4 个传感器节点组成,分别以 2 s、30 s、1 min、10 min 4 种不同数据发送频率向网络协调器发送自身的电池电压数据,具体的分组信息如表 4 所示。

(2) 太阳能电池板及锂电池测试实验 如表 5 所示,对现有的锂电池和太阳能电池板分成四组,四组节点同时以相同的数据发送频率向网络协调器发送自身的电池电压数据。本实验对 2 s、1 min、10 min 3 种不同数据发送频率各进行为期 9 天的测试。

表 4 镍氢电池测试分组

频率	电池型号		
2 s	1 300 mA(GP)	1 600 mA(PH)	2 400 mA(GP)
	-4 号节点	-5 号节点	-7 号节点
30 s	1 300 mA(GP)	1 600 mA(PH)	2 400 mA(GP)
	-8 号节点	-9 号节点	-10 号节点
1 min	1 300 mA(GP)	1 600 mA(PH)	2 400 mA(GP)
	-11 号节点	-12 号节点	-13 号节点
10 min	1 300 mA(GP)	1 600 mA(PH)	2 400 mA(GP)
	-14 号节点	-15 号节点	-16 号节点

注:(1) 针对不同的发射频率,每组电池各测两周;(2) 表中()中标注的 GP 是指电池品牌为 GP,PH 代指电池品牌 PHILIPS。

表 5 太阳能电池板及锂电池测试实验分组

组号	传感器节点号	锂电池容量/mAh	太阳能电池板规格/W
1	1	1 000	0.7
2	2	2 000	0.7
3	3	2 000	0.4
4	18	1 000	

## 3 实验数据分析

本文作者在研究生实验楼六楼利用 ZigBee 网络第 26 信道组建测试网络,进行了连续四周的测试实验。图 3 为测试网络某一时刻的网络拓扑结构图。

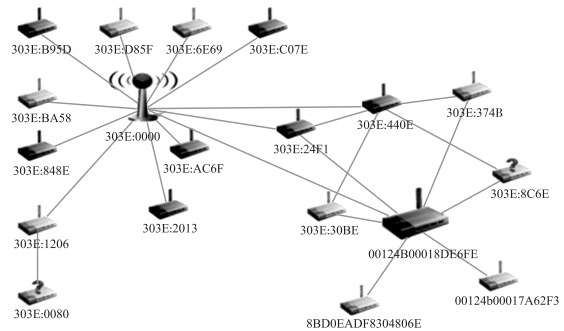


图 3 测试网络某一时刻网络拓扑图

### 3.1 镍氢电池测试数据及结论

图 4 为某公司将测试数据进行处理后,两节镍氢电池在电池电量为 0、25%、50%、75% 和满电时的电压值取平均值后的散点图。并由此得出电池电量与电压关系的估算关系式(1),式中 C 为电池电量百分比,V 为电池空载时的电压。

$$C = 26.048 \cdot V^2 - 32.349 \cdot V - 22.508 \quad (1)$$

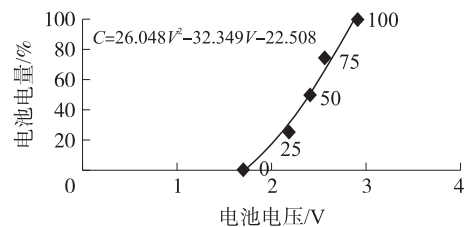


图 4 镍氢电池电量-电压关系

由于测试结果只作为以后传感器节点电池选型的参考依据,对数据的精确度要求并不高,因此在随后对使用镍氢电池的传感器节点耗电量的计算中,可采用关系式(1)估算电池的电量。

图 5 为 3 种不同容量的电池在以 2 s、30 s、1 min 及 10 min 不同的数据发送频率由传感器节点向协调器发送长度为 6 byte 的数据时的日耗电量比

较,表5为相应的节点生存时间。由图5可知,3种不同容量的电池在以2s的数据发送频率时耗电量明显比其他发送频率下要高很多。在30s、1min及10min3种数据发送频率下各种型号的电池的耗电量基本接近。由以上数据可知,当传感器节点以较高的数据发送频率(实验中的2s每次)进行数据传输时,节点的能量主要消耗在射频数据传输过程;当节点的数据发送频率较低时(实验中时间间隔30s以上),节点的能量主要由维持节点正常运行所消耗。因此,应进行传感器节点的低功耗设计,以降低传感器节点的功耗,延长传感器节点储能期间的供电时间。

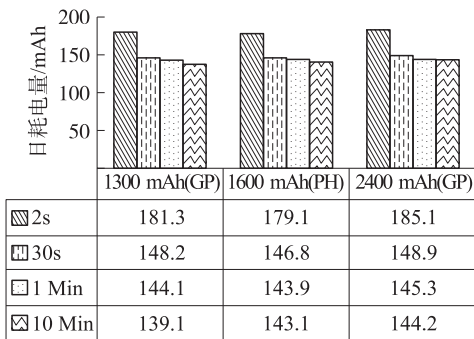


图5 镍氢电池日耗电量

表6 节点生存时间

频率	容量		
	1 300 mAh	1 600 mAh	2 400 mAh
2 s	7 d	9.2 d	10.9 d
30 s	8.5 d	10.7 d	12.6 d
1 min	9 d	11 d	12.9 d
10 min	9.2 d	11.4 d	13.4 d

此外,当节点数据发送频率相同时,理论上每个节点消耗的电量应该一样,但在实验过程中会出现图5所示现象,除了参考文献[13-14]所提到的原因外,还受到以下因素的影响:

(1)由于节点放置的位置不同,在进行数据通信时所消耗的电量也不一样;

(2)由于本实验所用电池已循环充放电的次数不同,造成即使是同品牌、同规格的电池在性能上也会存在差别;

(3)不同型号容量的电池在消耗相同电量时的压降不同,本文在采用统一的电压-电量关系式换算后,计算出的电池电量也存在一定差异。

### 3.2 太阳能电池测试数据及结论

对太阳能电池的主要测试项目及测试周期如

表7所示。表8是实验期间的天气情况记录。图6则是使用太阳能电池板和锂电池的传感器节点以及只使用锂电池的传感器节点的电池电压实时曲线图。

表7 测试项目及周期

数据发送频率	开始时间	结束时间	实验周期
2 s	11.22	11.30	9 d
1 min	12.1	12.9	9 d
10 min	12.10	12.18	9 d

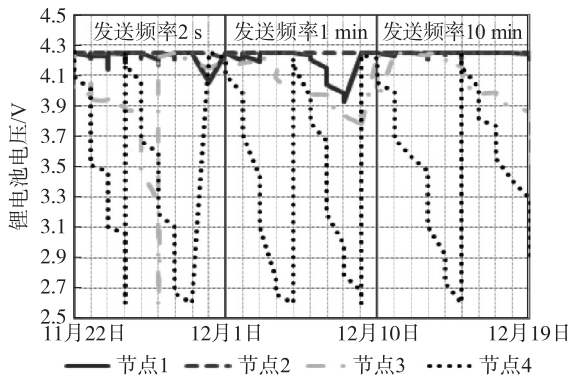
表8 测试期间天气情况

日期	平均温度/℃	天气	湿度	日期	平均温度/℃	天气	湿度
11.22	14	多云	46%	12.6	14	阴	72%
11.23	11.5	晴	57%	12.7	12	小到中雨	73%
11.24	12	晴	51%	12.8	6.5	小雨	93%
11.25	15.5	晴	62%	12.9	3.5	多云	64%
11.26	17.5	多云	63%	12.10	3	晴	45%
11.27	17.5	多云	59%	12.11	5	晴	45%
11.28	19	晴	81%	12.12	6.5	晴	43%
11.29	18	阴	75%	12.13	9	晴	39%
11.30	9	小雨	82%	12.14	9	晴	67%
12.1	8	阴转小雨	63%	12.15	4.5	多云	58%
12.2	6.5	多云转晴	58%	12.16	5.5	晴	52%
12.3	8	晴	58%	12.17	7	多云	59%
12.4	11	晴	53%	12.18	8	多云	58%
12.5	12	晴	59%	12.19	11	晴转多云	57%

注:11月27日14:00节点3电池提供的能量不能维持其正常工作,使用市电对其充电一次;节点18分别在11月25日10:12、11月29日2:28、12月5日10:29、12月9日14:45和12月15日19:35不能正常工作,并分别对其电池进行充电;同时,节点18在每结束一个测试周期时分别于12月1日、12月10日进行补充充电。

由图6中节点1和节点2的电压变化曲线可知,使用0.7W太阳能电池板收集能量,并采用锂电池将能量储存起来对传感器节点进行供电,即使在实验期间出现了连续3天(3d)的阴雨天气时,也可以维持传感器节点的正常运行,节点电池电压仍然维持在3.9V以上。图6中节点1的电压波动比节点2的电压波动较为明显,原因是1000mAh锂电池受其容量所限并没有将太阳能电池板收集到的全部能量储存起来,在出现连续阴雨天时电池电量的消耗会较明显的体现在电压下降上。





注:11月27日14:00节点3电池提供的能量不能维持其正常工作,使用市电对其充电一次;节点18分别在11月25日10:12、11月29日2:28、12月5日10:29、12月9日14:45和12月15日19:35不能正常工作,并分别对其电池进行充电;同时,节点18在每结束一个测试周期时分别于12月1日、12月10日进行补充充电。

图6 锂电池+太阳能电池板节点电池电压变化曲线

如图6中节点3曲线所示,节点3在以2s每次的频率向协调器发送数据的过程中,锂电池电量在正常工作了5天(5d)左右后电量耗尽。与节点2的电压变化曲线相比可知,0.4W太阳能电池板收集的能量不足以维持传感器节点在以2s每次的频率向协调器发送数据的状态下长期运行。

图6中所示节点18只采用1000mAh锂电池供电,未使用外接太阳能电池板收集能量。实验期间节点18分别在11月25日10:12、11月29日2:28、12月5日10:29、12月9日14:45、12月15日19:35时不能正常工作。由此可知,1000mAh的锂电池仅能维持传感器节点在以2s每次的频率向协调器发送数据的状态下正常运行3天~4天(3d~4d)。结合表8可知,在连续4天(4d)阴雨天太阳能电池板无法正常收集能量时,传感器节点将无法正常工作。

在对太阳能电池板搭配锂电池组合方案的供电时效性进行测试中,考虑到该组合方案以后的实际应用环境,本文采用最直接的测试方式,在室外实际环境中进行测试,而非在实验室环境中搭建标准测试条件(标准测试条件应为:光谱AM1.5,辐照度 $1000\text{ W/m}^2$ ,温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ),实际测试条件如表9所示。

表9 供电时效性测试条件

测试场地	最高温度	最低温度	平均温度	天气	相对湿度
实验楼六楼窗外	$29\text{ }^\circ\text{C}$	$23\text{ }^\circ\text{C}$	$26\text{ }^\circ\text{C}$	晴转多云	53%

以2000mAh容量锂电池为例,如果直接用电源适配器对其充电一般需要3h左右充满电;而采用0.7W太阳能电池板对其供电,在实验测试期间

的光照条件下,从上午8:30开始测试,需要充7个多小时;实验发现中午(10:00~14:00左右)光照充足的情况下充电效率较高,约占总电量的60%~80%左右;夜间或者光线较弱时,太阳能电池板充电电流几乎没有,此时太阳能电池板不能对锂电池进行有效的电量补充,只能一直依靠锂电池自身所蓄电量为节点供电。因此,在实际应用中,一般会先对锂电池用电源适配器进行充电,再搭配太阳能电池板对传感器节点进行供电。

同时,在使用锂电池时还应注意:

(1)由于锂电池没有记忆效应,即使电池还有部分电量残存的情况下充电都是有效的,可以随用随充。在平时使用中注意不要过度放电,否则会对电池造成不可逆的容量损失,对其自身使用寿命造成损害。在实际应用过程中,如果遭遇连续阴雨天气,当上位机监测端显示节点电压较低、太阳能电池板无法满足其供电需求时,要及时对锂电池进行充电。

(2)在前期使用电源适配器对锂电池充电时注意不能过充,当电源适配器充电完成指示灯亮时,要及时停止充电过程。

在后续研究中,为了提高太阳能电池板搭配锂电池组合方案的光电转换效率,充分利用太阳能,除选用转换效率更高的太阳能电池板外,在现有条件下也可考虑增加光敏传感器来获取当天太阳照射相对位置信息,利用单片机控制步进电机的转动来调节太阳能电池板的角速度,从而实现对太阳光线入射位置的较大角度跟踪,尽可能保持太阳光线垂直照射在太阳能电池板,提高其太阳能采集效率。

## 4 结束语

本文在搭建的测试平台上基于ZigBee协议组建了一个WSN节点功耗的测试网络,对WSN节点的镍氢电池与太阳能电池的供电性能进行了初步测试。实验结果表明,在数据采集周期为2s~600s的情况下,用普通镍氢电池为WSN节点供电只能维持其正常工作10天(10d)左右,无法保证节点在室外环境下长时间正常工作,显然,为了使无线传感器网络得到实际应用,需要对现有通信协议和供电方案等进行改进。太阳能电池板与锂电池组合是一种可行的供电方案,根据数据采集频率和应用系统的工作条件需要选择合适的电池功率和容量,在本文所述的实验条件下,使用2000mAh锂电池搭配0.7W太阳能电池板对节点进行供电能维持其在室外环境下长时间工作。

同时,本文提供了一种基于 WSN 的电池电压在线监测的方法,可实现电池电压的远程采集与测试工作;与常用人工测量的方式相比较,在需要被测电池数量较多时具有明显优势,大量减少了测试的工作量;由于采用 WSN 技术,在消耗较小电量的基础上可完成电池电压的采集,不会影响电池的后期正常使用。

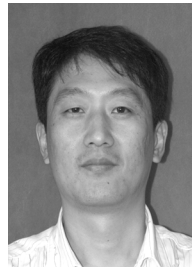
本文的工作可以为 WSN 节点的电源设计以及 WSN 系统的生存时间估计提供参考,同时也提供了一种电池电压远程测试的方法。未来我们将对影响电池使用寿命的因素以及在不同条件下如何确定太阳能电池板和锂电池的优化参数开展进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 李晓维,徐勇军,任丰原. 无线传感器网络技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007:1-10.
- [2] 白飞,喻晓峰,杨岳磊. ZigBee 网络的节能技术研究[J]. 兵工自动化,2008,27(10):78-80.
- [3] 李文江,魏娟. ZigBee 无线传感器网络节点的低功耗设计[J]. 成都大学学报(自然科学版),2008(3):67-69.
- [4] 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.
- [5] Christian C Enz, Nicola Scolari, Uroschanit Yodprasit. Ultra Low-Power Radio Design for Wireless Sensor Networks[C]//IEEE International Workshop on Radio-Frequency Integration Technology, Singapore, Nov 30-Dec 02, 2005. 1-17.
- [6] 李帅,刘宏立,刘述钢. 基于 ZigBee 的无线传感网络节点能耗性能分析[J]. 科技导报,2009,27(13):64-66.
- [7] 陈友荣,刘半藤,程菊花,等. 无线传感网优化生存时间的分布式功率控制[J]. 传感技术学报,2011,24(12):1787-1793.
- [8] Sonavanea S S, Kumarb V, Patilc B P. Designing Wireless Sensor Network with Low Cost and Low Power [C]//16th IEEE International Conference on Networks, 2008. 1-5.
- [9] 应必娣,陈惠芳,赵问道,等. 低能耗无线传感器网络路由算法[J]. 传感技术学报,2007,20(5):1109-1113.
- [10] 石璞,董再励. 基于 EKF 的 AMR 锂电池 SOC 动态估计研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):1-3.
- [11] 唐慧强,李超. 基于 CC2530 的锂电池电量检测系统的设计[J]. 化工自动化及仪表,2011(3):350-353.
- [12] Texas Instruments Incorporated, CC253X User's Guide[EB/OL]. <http://www.ti.com/cn/lit/ug/swru191c/swru191c.pdf>, 2012. 1.6.
- [13] 李久芳. 电动汽车镍氢电池剩余容量的测试研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2004:13-14.
- [14] 谭巧玲. MH\_Ni 电池充放电特性的建模与仿真[D]. 北京:北方工业大学,2007:26-28.



吕涛(1988-),男,上海理工大学硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络, sdrzlt2007@163.com;



施伟斌(1967-),男,上海理工大学副教授,目前的主要研究领域是无线传感器网络和计算机辅助设计技术, shi-weibin@usst.edu.cn。