

# 无线传感器自然能量供电设计及实验分析

朱达荣<sup>1,2</sup>, 张建辉<sup>3</sup>, 申兴发<sup>3</sup>, 戴国骏<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009; 2. 安徽建筑工业学院电子与信息工程学院 合肥 230022;  
3. 杭州电子科技大学计算机学院 杭州 310018)

**【摘要】**针对充电传感器节点在低自然能量环境下稳定持续工作问题进行研究和实验分析。基于干电池和充电电池的特性,采用充电电池、干电池、太阳能板组合供电方式,配合能源管理模糊策略,设计出适用于低自然能量环境的可充电传感器节点及相应的网络平台,在室内和室外进行了该节点和常规可充电传感器节点的对比实验。验证了该设计对解决无线传感器网络节点能量受限问题有一定的实际意义。

**关键词** 实验设计; 模糊控制; 供电; 太阳能; 无线传感器网络

中图分类号 TN86

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.05.027

## Design and Experimental Analysis of Environmentally Powered Wireless Sensor

ZHU Da-rong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian-hui<sup>3</sup>, SHEN Xing-fa<sup>3</sup>, and DAI Guo-jun<sup>3</sup>

(1. School of Computer & Information, Hefei University of Technology Hefei 230009;

2. School of Electronics & Information Engineering, Anhui University of Architecture Hefei 230022;

3. College of Computer, Hangzhou Dianzi University Hangzhou 310018)

**Abstract** Energy limitation is one of main constraints to depress the network life time. However, network effective working hours can be extended by transforming the natural energy into the electric energy. Based on the analysis of characteristics of dry batteries and rechargeable batteries, by using combined power supply and energy management fuzzy control strategy, rechargeable sensor nodes suitable for low energy environment and the corresponding network platform are designed. The indoor and outdoor experiment validates that this design has a certain practical significance to solve the problem of energy limitation of wireless sensor network node.

**Key words** design of experiments; fuzzy control; power supply; solar energy; wireless sensor network

无线传感器网络受到广泛的关注和研究,成为IT领域的一个研究热点<sup>[1]</sup>。而能量有限是无线传感器网络明显的不足<sup>[2]</sup>,为克服上述不足,研究者研制了新一代传感器节点——可充电传感器节点<sup>[3]</sup>。可充电传感器节点充分利用自然界的能源,如太阳能、风能等,对节点自带的可充电电池进行充电。由于自然能量对充电电池充电具有时间和充电电量不确定等不可控因素,利用可充电传感器节点构建无线传感器网络将带来如能量管理策略等许多新问题。在自然能量严重缺乏环境(如室内环境),充分利用充电电池储存从自然界所获得的电能,保证传感器节点持续稳定供电,无线传感器节点的自然能量供电方式尤为重要。

## 1 相关研究工作

能量收集将自然界的能量转化成电能,并加以储存。现有研究表明,可以将太阳能<sup>[3]</sup>、风能<sup>[4]</sup>、动力和振动能量<sup>[5]</sup>,以及电磁能<sup>[6]</sup>等的收集技术应用于传感器网络。基于能量收集技术,研究者设计了一些平台从人类活动和自然环境中获取能量<sup>[3,7-9]</sup>。其中为传感器网络而设计的平台有Heliomote<sup>[8]</sup>、Prometheus<sup>[3]</sup>、Trio<sup>[7]</sup>、AmbiMax<sup>[9]</sup>和PUMA<sup>[10]</sup>。Heliomote利用充电电池进行蓄电,Trio利用超大电容和充电电池进行联合蓄电,但也有只用超大电容进行蓄电的平台<sup>[11]</sup>。

在Heliomote平台中,充电电板直接与其电池连接<sup>[8,12]</sup>。蓄电池被反复地频繁充电,由于蓄电池固有

收稿日期: 2010-06-04; 修回日期: 2010-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(60773042, 60803126, 61073161)

作者简介: 朱达荣(1968-),男,博士生,副研究员,主要从事传感器网络、建筑节能、智能控制等方面的研究。

的物理特性, 充电电池可充电的次数非常有限<sup>[11]</sup>。锂电池一般可以充电500次, 而电容可以充电达百万次<sup>[11]</sup>。

在超级电容和蓄电池混用的平台中, 如Prometheus<sup>[3]</sup>, 一般有一个或者多个超级电容和蓄电池组成的蓄电设备序列。从太阳能电池板中获得的能量首先被存储在主超级电容中, 而蓄电池作为备用, 就可以减少蓄电池的充电次数, 利用超级电容具有更多充电次数的优势。但是, 通过测量充电电池的电压并不能准确地获知电池剩余能量, 而通过测量电压却能很准确地获知电容的剩余能量。

为了进一步解决使用单一自然能量造成不足, AmibMax平台从多种自然能量中获取电能, 如太阳能、风能。PUMA平台针对多能量源设计了一种分布式功率切换机制和能耗比较算法, 以此最大化所获自然能量的使用效率。然而AmiMax平台中使用风能的装置需要强劲的风力才能获得电能, 但在很多环境下风能非常少。

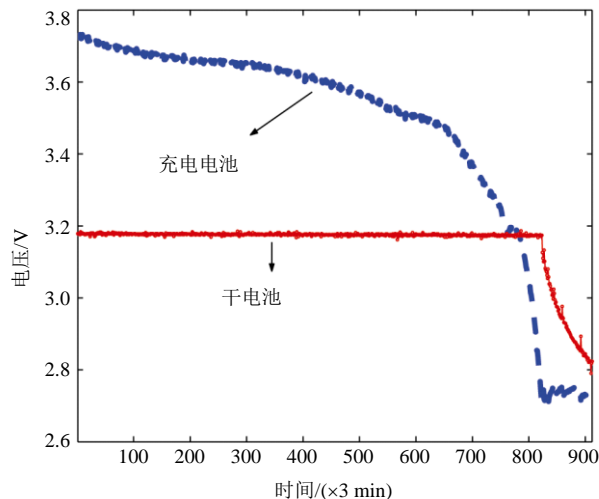
## 2 可充电传感器节点供电设计

单用蓄电池会受到有限充电次数的限制, 配合使用超大电容可以解决充电次数受限的问题。但是电容有漏电严重、电源不稳定、体积过于庞大等不足。在自然能量充裕的环境下, 蓄电池并不需要反复充电, 无需电容。而在自然能量不充裕的情况下, 如在室内, 相对充电电容的漏电问题显得突出, 此时增加电容量不是一个有效的方案。

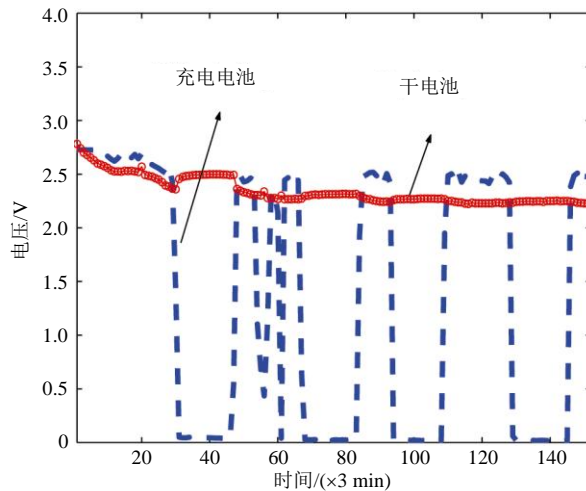
### 2.1 干电池和充电电池的放电特性

将自然能量转化成电能的技术很多<sup>[11]</sup>, 本文以自然能量——光能为例。设计前对干电池和充电电池的放电特性进行了实验观察。

实验中, 干电池的容量为1 500 mAh, 充电电池的容量为1 700 mAh, 都为同样的传感器节点Telos B使节点供电, 节点以1 min的周期和1%的占空比使LED工作, 测量周期(sequence)为3 min。两种电池的端电压特性实验曲线如图1所示。从图1a可以看到, 充电电池的放电特性没有干电池好。干电池在放电起初阶段电压下降缓慢; 在中间较长的供电阶段, 供电电压非常平稳, 梯度几乎为零; 在电池电量接近放尽时, 电池端电压才开始大幅度地下降。而充电电池从放电开始, 电压就开始缓慢下降; 当接近电量放尽时, 电压下降梯度急剧增加, 端电压开始大幅度地下降。



a. 干电池和充电电池的放电特性对比



b. 干电池和充电电池的充放电特性对比

图1 干电池和充电电池的特性对比

在充电和放电同时进行的情况下, 充电电池的电压特性变得更复杂。充电电池同时充电和放电的实验结果如图1b所示。由图可见, 充电电池的电压非常不稳, 变化幅度很大。单用充电电池不稳定的电压供电, 难以保证传感器节点的正常工作。

### 2.2 新版可充电传感器节点供电设计原理

基于2.1节的实验结果, 新版可充电传感器节点的供电应采取不同于常规的设计方案。初版充电传感器节点原理如图2a所示, 设计非常简单, 太阳能板直接对节点供电或对蓄电池充电。新版可充电传感器节点原理如图2b所示, 充电电源和传感器节点两个部分之间增加了用于能量管理的控制线路, 充电电源由充电电池、干电池、太阳能板和控制电路4个部分组成。太阳能板可对充电电池充电, 也可对传感器节点供电; 同样, 充电电池和干电池也可以对传感器节点供电。微处理器采集太阳能板、充电电池和干电池的端电压值, 根据特定的算法和控制

策略, 将反馈信息传输给控制电路。控制电路根据微处理器的信息执行供电和充电方案, 有效地解决蓄电池被反复频繁充电的问题。

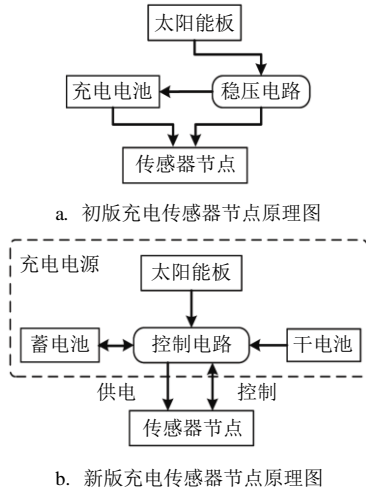


图2 初版和新版充电传感器节点对比

在图2b的充电电源部分, 将干电池替换成充电电池, 可让太阳能充电板直接对两对充电电池轮流充电。考虑到干电池优良的供电特性, 在设计时,

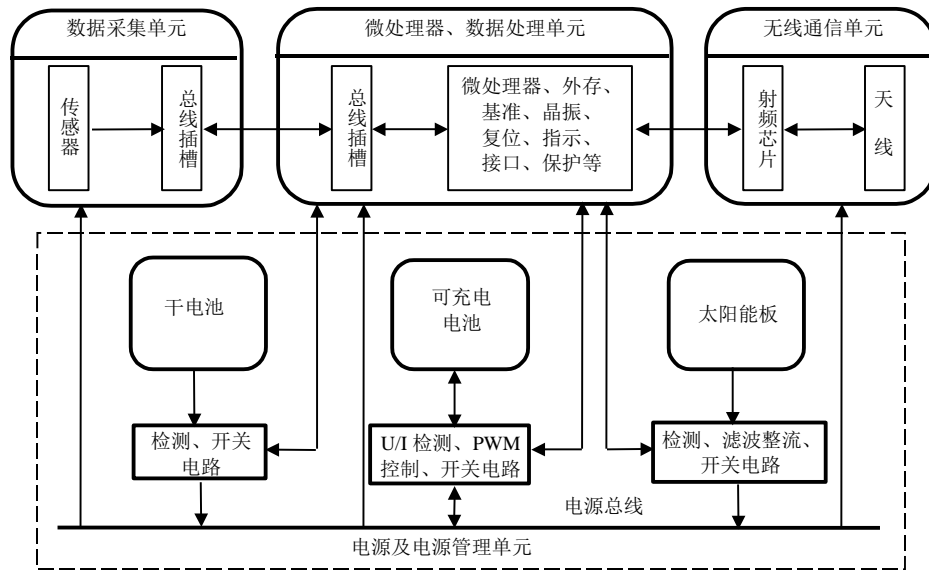


图3 新版充电传感器节点结构图

电源管理及锂电池的充电控制采用Fuzzy控制策略<sup>[13]</sup>, 如图4所示。在保证连续供电的情况下, 供电优先顺序为太阳能板、锂电池、干电池。若锂电池充电没有饱和, 太阳能板同时对锂离子电池充电; 在日照不足或没有日照时, 锂电池补充供电或单独供电; 极端情况下, 由干电池供电。

太阳能板、锂电池、干电池的容量根据传感器节点每天的平均功耗( $E$ )选择, 干电池容量  $E_1 = 2 \sim 5 E$ , 锂电池容量  $E_2 = 2 \sim 3 E$ , 据统计太阳

充电电源部分使用干电池, 原因是: 1) 干电池的供电电压相对稳定, 有较好的电压特性, 稳定的电压对于传感器节点稳定传输信号强度及提高数据采集精度都有重要的作用; 2) 成本低; 3) 在自然能量不足的情况下, 太阳能充电板所获得的能量是匮乏的, 往往无法给单对充电电池充满电能。在该方案中, 节点可以控制太阳能板、充电电池和干电池的动态供电。

### 2.3 新版可充电传感器节点工作原理及供电策略

可充电传感器节点主要由数据采集单元、数据处理单元、无线通信单元以及电源管理单元4个部分组成, 如图3所示。

数据采集单元主要由各种传感器构成, 负责对外界信息的采集与传输。为了尽量降低能量消耗, 设计为对传感器子板与母板分别供电, 传感器子板的供电可控, 传感器能进入“睡眠”状态。

本文选用锂离子电池作为充电电池, 它具有自放电率低的优点。充电采用3段式充电方式, 即预充电、恒流充电和恒压充电3个过程。

能板每天的工作时间为4~8 h, 考虑充电任务, 容量  $E_3 = 10 \sim 15 E$ 。本文的供电策略中, 节点一天的总功耗约500 mAh, 留两天的余量, 选用容量为1 200 mAh的锂电池和干电池。太阳能板选用5.5 V/5 W, 可以保证太阳能板优先供电。在日照比较充裕的情况下, 太阳能板输出电压约为5.5 V, 大于锂离子电池的最大输出电压, 恒流充电时电流为250 mA。不采用更大的电流可以延长太阳能板的工作时间, 有效地延长电池的寿命。

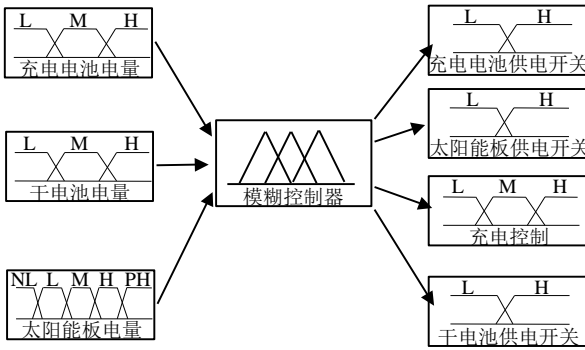


图4 Fuzzy控制策略

### 3 实验评估

按照上述设计方案,本文制作两版可充电传感器节点。初版和新版充电传感器节点同时在室内、室外进行对比实验。两个环境分别是阳光充足的室外露天场所和装有日光灯的实验室,实验时间为2 d。

#### 3.1 实验设计

为了方便实验数据的采集和处理,能量管理方案的调试,本文构建了一个可充电传感器网络。网络平台包括软硬件两个部分,硬件部分由可充电传感器节点、中继节点、Sink和上位机组成,上位机的软件包含数据采集、数据处理与存储、数据的可视化3个部分。在实验中,每个节点设置任务以消耗蓄电池的电或者太阳能充电板所采集的能量。由于只观察节点耗能的情况,节点所执行的任务性质对本文的实验并无影响。节点的任务是让LED灯以30 s的周期和2%的占空比进行工作。同时,节点以1 min的周期对充电电池和节点供给电压值进行采样。节点将数据打包传输到Sink节点,收集到PC机上。

#### 3.2 实验结果与分析

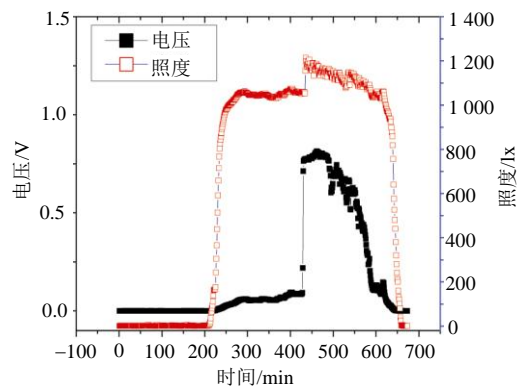
初版充电传感器节点室内和室外实验所获得的实验结果如图5所示,新版充电传感器节点室内实验所获得的实验结果如图6所示。

在图5a中,当时间 $t > 210$  min时,天色逐渐转明,照度增强,充电电板的电压也逐渐升高。在时间 $t < 420$  min时,实验室没有人,灯未开,因此为1 098 lx,电压为0.155 V。当时间 $t > 420$  min时,实验室的灯全部打开,照度瞬间增强,因而图中电压和照度的测量值都瞬间跳变增大。照度增加到1 200 lx,电压增加到0.768 V。在 $t > 460$  min时,照度开始下降,相应的电压也随着降低。第二天的试验结果如图5b所示,在 $400 \text{ min} < t < 680 \text{ min}$ 时,照度逐渐增强,电压也逐渐增大。而在 $680 \text{ min} < t < 820 \text{ min}$ 之间是中午时间,实验室里人都已经离开,灯关闭,所以照度略有降

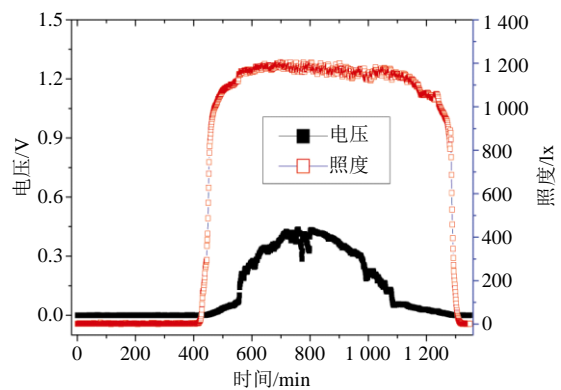
低,电压也稍有降低。虽然实验室所有的灯已关闭,但是透过窗户的自然光依然很强。所以,此时电压没有降低多少。在 $t > 820 \text{ min}$ 时,照度开始下降,电压逐渐降低。

室外的充放电实验如图5c、5d所示。在图5c中,充电电压变化除了有抛物线形状的整体特性以外,中间有很多采样周期的充电电压突然下降,这是由于当天是多云天气,云朵不时遮挡了光线的缘故。而第二天的天气较好,充放电曲线是一个较完整的抛物线形状,如图5d所示。

在图5中,电压的抛物线形状的电压变化,正好隐含了自然照度的强弱变化,并且都有电压最高峰滞后于照度最高峰的现象。在图5d中,照度最高峰的时间是 $t = 310$ ,而电压最高峰的时间是 $t = 420 \text{ min}$ 。造成这种滞后现象是由于传感器节点同时还在放电。对于更复杂的耗电情况,充电电压的变化将更复杂。比较室内室外两种环境下的充电状况,室内充电电压最高值很难达到1 V,一般可以达到0.6~0.8 V,太阳能板能有效地供电的时间非常短。而在室外环境,光能比较充裕,充电电压在1.5 V以上的时间也只能达到150~200个周期。由此可见,该形式的可充电传感器节点并不能稳定持续工作,尤其是室内情况更差。

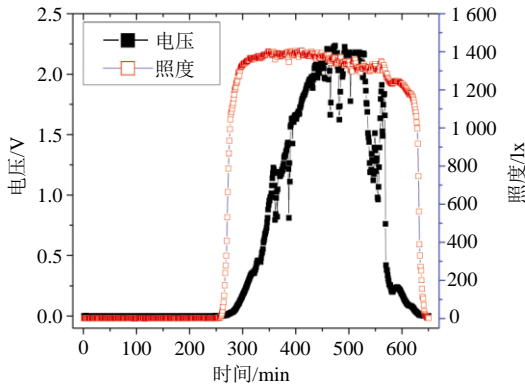


a. 第一天室内供电特性

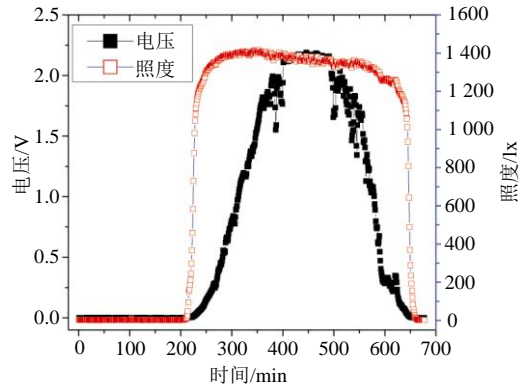


b. 第二天室内供电特性



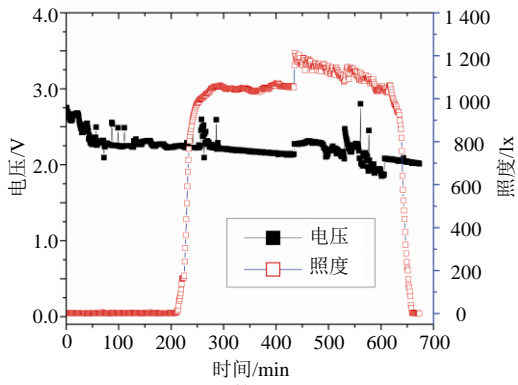


c. 第一天室外供电特性

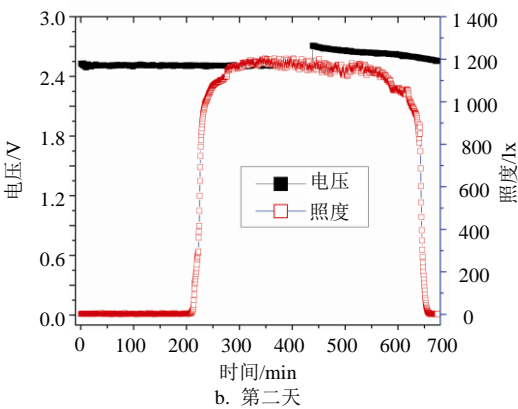


d. 第二天室外供电特性

图5 初版节点室内外的供电特性



a. 第一天



b. 第二天

图6 新版节点室内供电特性

新版可充电传感器节点实验的时间同上。在图6a中,直到时间 $t=429$  min时,充电电池的充电仍

不足,未能对传感器节点供电,在该时间内都由干电池供电。在图6a中,在 $t>429$  min时,充电电池开始供电,干电池停止供电;但是由于充电电池的能量有限,到时间 $t=620$  min时,充电电池停止供电,继续由干电池供电。在 $429$  min $<t<620$  min内,充电电池仍能供电。相对图5a中的供电情况,图6a的供电时间更长,供电电压也更稳定。

图6b描述了实验第二天的供电情况。在该图中, $t<850$  min的时间段内,传感器节点都由干电池供电,供电电压稳定在2.44 V。而 $t>850$  min时,充电电池开始供电,开始时供电电压为2.68 V,供电直到整个实验结束,结束时供电电压为2.4 V。相对实验第一天的结果,在第二天中,充电电池供电时间比较长。其原因可以从图6b中看出,第二天中充电电池有较长的充电时间。从实验结果可见,新版可充电传感器节点的供电方式即使在室内都能保障传感器节点持续稳定地工作。

### 4 总结与展望

基于干电池和充电电池的特性分析,采用充电电池、干电池、太阳能板组合供电方式,配合能源管理模糊控制策略,本文设计并实现了新型的可充电传感器节点,并利用该传感器节点构建了可充电传感器网络平台,进行了相关实验。对该新型的可充电传感器节点能在室内的低自然能量环境下稳定持续地工作,实验验证了该设计对解决无线传感器网络节点能量受限问题有一定的实际意义。

在大型可充电传感器网络中,采用整体能源调度和节点能量管理相结合的方案,使节点部分休眠、部分工作地交替进行,会大大延长网络的有效生命周期。从自然环境中获取能量,将其转化成电能,理论上,其生命周期可以没有上限,但充电电池供电受到外界环境影响非常大,具有明显的不可靠性,如何利用好充电电池的优点,需要深入的研究。另外,大规模的可充电传感器网络超长期工作时的能量采集、消耗情况,以及在自然能量供电情况下的路由、能量管理策略等新课题都需要深入的研究。

### 参 考 文 献

[1] AKYILDIZ I F, KASIMOGLUI H. Wireless sensor and actor networks: research challenges[J]. Ad hoc Networks Journal, 2004, 2(4): 351-367.

[2] CHEN J J, KUO C F. Energy-efficient scheduling for real-time systems on dynamic voltage scaling (DVS) platforms[C]//13th IEEE International Conference on

- Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, RTCSA 2007. [S.l.]: IEEE, 2007.
- [3] JIANG X, POLASTRE J, CULLER D. Perpetual environmentally powered sensor networks[C]//Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2005, [S.l.]: [s.n.], 2005.
- [4] GANESAN D, CRISTESCU R, BEFERULL-LOZANO B. Power-efficient sensor placement and transmission structure for data gathering under distortion constraints[J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2006, 2(2): 155-181.
- [5] MENINGER S, JO M, AMIRTHARAJAH R, et al. MIT vibration-toelectric energy conversion[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2001, 9(1): 64-76.
- [6] WANT R, RES I, SANTA CLARA C A. An introduction to RFID technology[J]. IEEE Pervasive Computing, 2006, 5(1): 25-33.
- [7] DUTTAP, HUI J, JEONG J, et al. Trio: Enabling sustainable and scalable outdoor wireless sensor network deployments [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks. New York: ACM, 2006.
- [8] LIN K, YU J, HSU J, et al. Helimote:enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2005.
- [9] PARK C, CHOU P H. Ambimax: Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes[C]//2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad hoc Communications and Networks, SECON'06. [S.l.]: IEEE, 2006.
- [10] PARK C, CHOU P H. Power utility maximization for multiple-supply systems by a load-matching switch[C]// Proceedings of the 2004 International Symposium on Low Power Electronics and Design, ISLPED'04. [S.l.]: [s.n.], 2004.
- [11] ZHU T, ZHONG Z, GU Y, et al. Leakage-aware energy synchronization for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2009.
- [12] KANSAL A, HSU J, ZAHEDI S, et al. Srivastava, power management in energy harvesting sensor networks[J]. ACM Trans on Embedded Computing Sys, 2007, 6(4): 32.
- [13] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其MATLAB仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
SHI xin-min, HAO zheng-qing. Fuzzy control and MATLAB simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.

编辑 黄莘

(上接第719页)

## 参 考 文 献

- [1] 黄生乔, 马兵. 微波等离子体化学合成纳米粉体材料研究与应用[J]. 过程工程学报, 2002, 2(6): 564-569.  
HUANG Sheng-qiao, MA Bing. Research and application of synthesis of nanopowders by microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition method[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2002, 2(6): 564-569.
- [2] 黄建良, 汪建华, 满卫东. 微波等离子体化学气相沉积金刚石膜装置的研究进展[J]. 真空与低温, 2008, 14(1): 1-5.  
HUANG Jian-liang, WANG Jian-hua, MAN Wei-dong. The development of apparatus to grow microwave plasma chemical vapor deposition diamond films[J]. Vacuum and Cryogenics, 2008, 14(1): 1-5.
- [3] SONG H, HONG J M, LEE K H, et al. Stable microwave coaxial cavity plasma system at atmospheric pressure[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(5): 1-5.
- [4] YAMADA H, CHAYAHARA A, MOKUNO Y, et al. Numerical analysis of power absorption and gas pressure dependence of microwave plasma using a tractable plasma description[J]. Diamond & Related Materials, 2006, 15(9): 1395-1399.
- [5] HASSOUNI K, SILVA F, GICQUEL A. Modelling of diamond deposition microwave cavity generated plasmas[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43: 1-45.
- [6] GROTHJOHN T A, KING G L, TAN W. Microwave plasma processing machine modeling and diagnostics for plasma-assisted chemical vapor deposition[J]. Journal of the Moscow Physical Society, 1995, 5(1): 55-70.
- [7] RACKOW K, EHLBECK J. Microwave-based characterization of an atmospheric pressure microwave-driven plasma source for surface treatment[J]. Plasma Sources, Science and Technology, 2011, 20(3): 9.
- [8] 刘学观, 郭辉萍. 微波技术与天线[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 41-44.  
LIU Xue-guan, GUO Hui-ping. Microwave technology and antenna[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001: 41-44.
- [9] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 77-81.  
LIAO Cheng-en. Basis of microwave technology [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001: 77-81.
- [10] YAMADA H, CHAYAHARA A, MOKUNO Y, et al. Model of reactive microwave plasma discharge for growth of single-crystal diamond[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2011, 50(01AB02): 1-6.
- [11] PLEULER E, WILD C, FUNER M, et al. The CAP reactor, a novel microwave CVD system for diamond deposition[J]. Diamond and Related Materials, 2002, 11: 467-471.
- [12] LI X J, TANG W Z, YU S W, et al. Design of novel plasma reactor for diamond film deposition[J]. Diamond and Related Materials, 2006, 15(2): 334-340.

编辑 税红