

无线传感器网络节点长寿命太阳能供电系统研究^①

李楠^② 刘成良 李彦明

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要 为延长无线传感器网络的使用寿命,研究了如何系统地设计无线传感器网络节点的能量自治系统。提出了基于能量收集技术的太阳能供电系统模型,根据农田信息远程监测系统实施的具体要求,设计了无线传感器网络节点长寿命太阳能供电系统,详细地阐述了系统整体结构、功能模块设计、能量管理策略以及实验器件选型,具体地分析了实验测试性能。实验结果表明,该能量自治系统在实验测试条件下,每天 3 至 4 小时的光照时间即可保证无线传感器网络节点以 10% 的工作占空比持续运行约 4 至 5 年。

关键词 能量自治, 能量收集, 太阳能, 无线传感器网络

0 引言

无线传感器网络技术在军事、农业、工业和环境等诸多领域都有着极其广阔的应用前景^[1-3],但无线传感器网络节点大都为随机播撒安放,且由于环境或节点移动等原因,各节点一般采用一次性电池供电,安放后电池更换十分困难或无法更换,因此,节点的能量供应与管理一直是无线传感器网络技术中的研究重点。尽管通过优化网络结构和降低节点功耗等措施在一定程度上可以减少能量消耗^[4],但无法从根本上解决节点的能量耗尽问题,而利用能量收集技术从周围环境中源源不断地采集可用能量,为这一问题的解决开辟了一个新的方向。

能量收集技术包括从光照、振动、温差以及机械运动等资源中获取能量的各种技术。其中光能,尤其是太阳能,由于能量密度较高,开发技术较成熟,因而得到了最为普遍的应用^[5,6]。如今,大功率的太阳能供电系统已广泛应用于生产、生活中的各个领域,但这些大功率的供电系统从成本、安装以及使用效率等角度来讲,都不适合应用于无线传感器网络。目前,针对小型太阳能供电系统的研究已经开展,国内暂时局限于利用太阳能直接为可充电电池充电的方式^[7-9]。这种方式在一定程度上延长了电池使用时间,但由于电池的频繁充放电造成其性能衰退加快,在效率和使用寿命上存在很多缺陷。国

外对此已有相关的具体设计和应用^[10-16],通过提高能量利用效率和增加多级能量存储器的方式延长使用寿命,但由于无线传感器网络节点的供电系统具有一定的针对性,每个系统都有其特定的应用环境和能量需求,实际应用中还需具体设计。因此,本文首先提出了基于能量收集技术的太阳能供电系统模型,然后针对农田信息远程监测系统的实际需求,设计了无线传感器网络节点太阳能供电系统,采用超级电容和聚合物锂电池组成两级能量存储器,并将能量系统与节点控制器相结合,对能量存储器进行状态监测和主动选择,减少了电池的充放电次数,极大地延长了节点的使用寿命。

1 基于能量收集技术的太阳能供电系统模型

环境能量经转换、储存和调节后就可以提供给负载。大多数能量收集系统都需要根据应用环境及实际需求进行具体设计,针对无线传感器网络节点,国外文献中已报导了一些具体的太阳能供电系统设计,据此本文提出了基于能量收集技术的太阳能供电系统模型,结构如图 1 所示。太阳能电池板将光能转换为电能,经调节电路后存储在多级能量存储器中。多级能量存储器一般设计为前级和后级两级,前级实现环境能量存储、负载供电以及为后级充电的功能,后级则可在无光能转换时作为负载的后

^① 863 计划(2006AA10A311)资助项目。

^② 男,1981 年生,博士;研究方向:远程监控与智能维护,机电系统智能控制;联系人, E-mail: linansjtu@sjtu.edu.cn
(收稿日期:2009-08-14)

备能源,并在自身消耗以后通过前级补充能量。传感器节点通过能量管理单元监测多级能量存储器的状态,完成供电电源选择和存储器充电控制的功能。

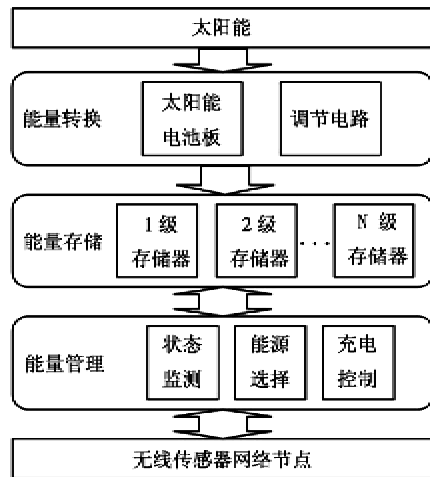


图1 无线传感器网络节点太阳能供电系统模型

2 无线传感器网络节点太阳能供电系统设计

在太阳能供电系统模型的指导下,设计了无线传感器网络节点长寿命太阳能供电系统,系统整体结构如图2所示。

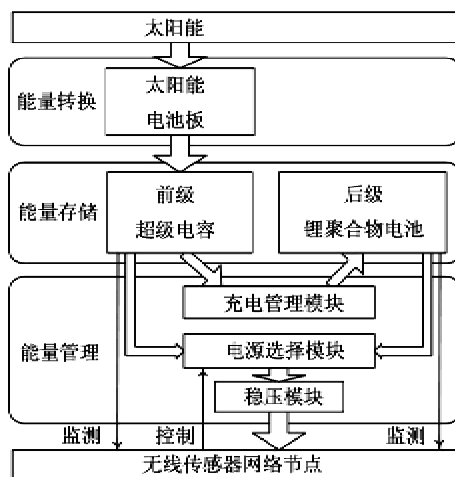


图2 太阳能供电系统整体结构图

2.1 无线传感器网络节点设计

无线传感器网络节点的能量主要消耗在信息采集和网络数据通讯两方面。节点通讯一般工作在发送、接收、空闲和休眠4种模式下,其中休眠模式的功耗比其他模式的功耗低1~2个数量级。因此,降

低节点功耗的方法,除了选择低功耗的传感器和控制器之外,就是尽可能地减少数据通讯频率,使其主要工作在休眠状态,而在通讯状态时完成数据采集处理和信息发送的功能。

节点控制器选择超低功耗的 MSP430F2418,其待机模式功耗仅为 0.5 μ A,几乎不会造成电池消耗,非常适合低功耗系统应用。网络通讯模块选用低成本、低功耗的射频器件 CC2420。

2.2 能量转换和存储方法

传统的太阳能电池组件通过太阳能电池板直接为单级可充电电池充电,尽管电池一般具有几百次的充电循环次数,但频繁的充放电将会大大减少其使用寿命,而采用两级能量存储器的设计则可以有效地解决这一问题。两级能量存储器的前级必须具有较长的充放电循环次数以便存储频繁的、不稳定的能量输入,后级则应具有较高的能量密度以提供充足的后备能量输出。光照充足时,使用前级供电,光照不足且前级耗尽时,使用后级供电,并在后级消耗以后使用前级为其充电补充。通过供电电源选择,尽可能多地使用前级供电,减少后级的充放电次数,有效地延长其使用寿命。实际设计时,采用超级电容和聚合物锂电池分别作为前级和后级能量存储器。

超级电容具有重复使用寿命长、无记忆效应及充放电速度快等特点,其充放电循环次数大于50万次,十分适合作为前级存储器使用。后级存储器作为后备能源,有多种可充电电池可供选择。常用的可充电电池如铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、液态锂离子电池和聚合物锂电池的性能比较如表1所示,表中数据由网络资料整理得到。聚合物锂电池具有循环寿命长、能量密度高、自放电率低、无记忆效应、无污染及安全性好等特点,更适合作为后级能量存储器。

2.3 能量管理策略

无线传感器网络节点通过监测两级能量存储器的电压,经逻辑判断,完成供电电源的选择和充电控制的功能。将能量状态监测纳入无线传感器网络系统中,不仅可以实现合理地选择供电电源,有效地延长使用寿命,还可以根据能量状态调整网络通讯的参数,如根据各节点因光照不同引起的能量差异,调整各节点的数据发送频率及数据传输任务的分配,实现具有能量感知的无线传感器网络信息传输。

表 1 可充电电池性能比较

电池种类	电压 (V)	体积 能量密度 (Wh/L)	重量 能量密度 (Wh/kg)	循环次数	自放电率 (%/月)	记忆效应	安全	环保
铅酸电池	2.0	60 ~ 75	30 ~ 40	250 ~ 300	5 ~ 15	无	好	有毒
镍镉电池	1.2	110 ~ 130	40 ~ 60	300 ~ 700	15 ~ 30	有	好	有毒
镍氢电池	1.2	140 ~ 300	40 ~ 80	400 ~ 1000	25 ~ 35	少许	好	低毒
液态 锂离子电池	3.6/3.7	250 ~ 360	100 ~ 160	500 ~ 1000	5 ~ 10	无	较好	低毒
聚合物 锂电池	3.7	300 ~ 460	120 ~ 170	500 ~ 1000	2 ~ 5	无	好	无毒

实际设计时,聚合物锂电池的充电电路由锂电池专用充电管理芯片完成,供电电源的选择则由节点控制器控制低功耗的双路模拟开关器件完成。在控制程序中,首先设定电容切换门限电压和电池切换门限电压,然后将检测到的实际电压与门限电压进行比较判断,在保证节点正常工作的条件下,尽可能多地选择电容供电,减少电池充放电次数,并在电池电压低于设定值时,使用电容通过充电电路对其充电。

3 系统实施

农田信息远程监测系统利用无线传感器网络技术,实现了农田信息(环境温度、环境湿度、土壤温度、土壤湿度)的自动采集、数据传输和远程监测,系统整体结构如图 3 所示。无线传感器网络节点采集的信息经网关节点汇集转发,然后通过全球移动通信系统/通用无线分组业务(GSM/GPRS)网络连接至 Internet 服务器,完成数据存储、信息发布以及客户端浏览等功能。考虑到农田环境中丰富的太阳能资源,非常适合利用太阳能为节点提供能量。

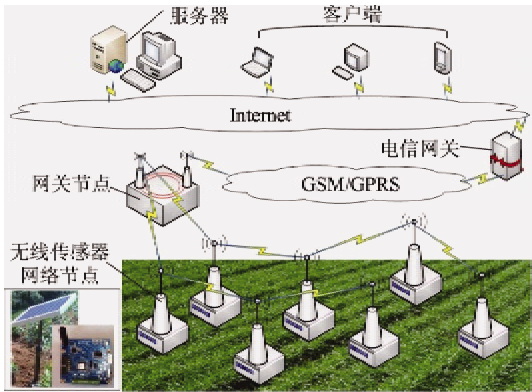


图 3 农田信息远程监测系统整体结构

根据系统实际需求,设计了节点太阳能供电系统,具体器件选型如表 2 所示,测试时实物如图 4 所示。为加快实验测试进程,选择的聚合物锂电池的容量为 300mAh,实际应用中可根据需求选择足够容量的电池。

表 2 实验测试时的器件选型

器件	参数
太阳能电池板	尺寸:40mm×80mm 峰值电压 4.8V,开路电压 5.5V 峰值电流 80mA
超级电容	单体电容 25F,额定电压 2.7V (使用时两个串连)
聚合物锂电池	工作电压 3.7V,充电电压 4.2V 300mAh
充电管理芯片	BQ2057C
电源选择芯片	MAX4544
稳压芯片	MIC5209-3.3
传感器节点	控制器 MSP430F2418 和 RF 器件 CC2420 等

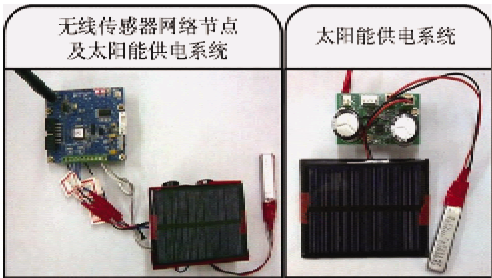


图 4 测试用实物图

4 实验测试与分析

实验测试了传感器节点的功耗和连续工作时的性能。传感器节点每 10 秒采集并发送一次传感器

信号和能量存储器电压信号至网关节点,网关节点与服务器通过串口通讯完成数据记录。

4.1 传感器节点功耗测试

测试开始前,将 300mAh 聚合物锂电池电量充满,电压为 4.2V,不再提供太阳能充电,单独使用电池供电至电量耗尽系统停止工作为止,设置电池切换门限电压为 3V。测试结果如图 5 所示,从 10 月 29 日 09:56 开始,至 10 月 31 日 04:04 系统停止工作,持续时间为 42h,可得节点平均电流消耗为 $300\text{mAh}/42\text{h} = 7.1\text{mA}$ 。

假设传感器节点数据发送周期的占空比为 D_c ,节点通讯时电流为 I_{active} ,节点休眠时电流为 I_{sleep} ,则节点平均电流消耗 I_{average} 可通过式

$$I_{\text{average}} = D_c \times I_{\text{active}} + (1 - D_c) \times I_{\text{sleep}} \quad (1)$$

得到。

测试时为加快实验进程,在节点待机期间未使用低功耗模式,此时测量其待机期间平均电流约为 4mA,而使用低功耗模式时,平均电流约为 300 μA ,根据公式(1),令 $I_{\text{average}} = 7.1\text{mA}$, $D_c = 10\%$, $I_{\text{sleep}} = 4\text{mA}$,则可得 $I_{\text{active}} = 35\text{mA}$ 。若待机期间使用低功耗模式,则 $I_{\text{average}} = 35\text{mA} \times 0.1 + 0.3\text{mA} \times 0.9 = 3.77\text{mA}$ 。

工作时间可延长至 $300\text{mAh}/3.77\text{mA} = 79.6\text{h}$ 。若设计为每 1 分钟发送一次数据,即 $D_c = 1/60$,则 $I_{\text{average}} = 0.88\text{mA}$,工作时间可延长至 340.9h。

据此可知,使用低功耗模式及降低节点通讯频率,可有效地延长节点无光照时的持续工作时间。

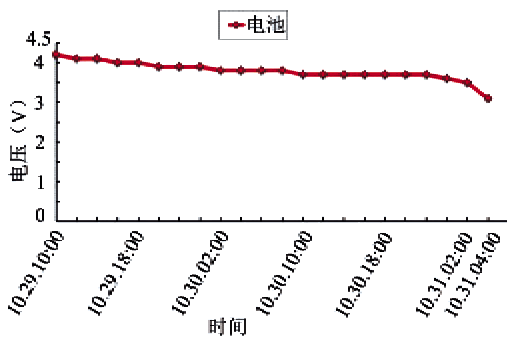


图 5 电池单独供电时电池电压

4.2 传感器节点连续工作供电性能测试

测试时间开始于 18:00,连续测试持续时间 24h,测试结果如图 6 所示。图 6(a)为超级电容和锂聚合物电池的电压变化曲线,图 6(b)则为供电电源选择的切换状态。

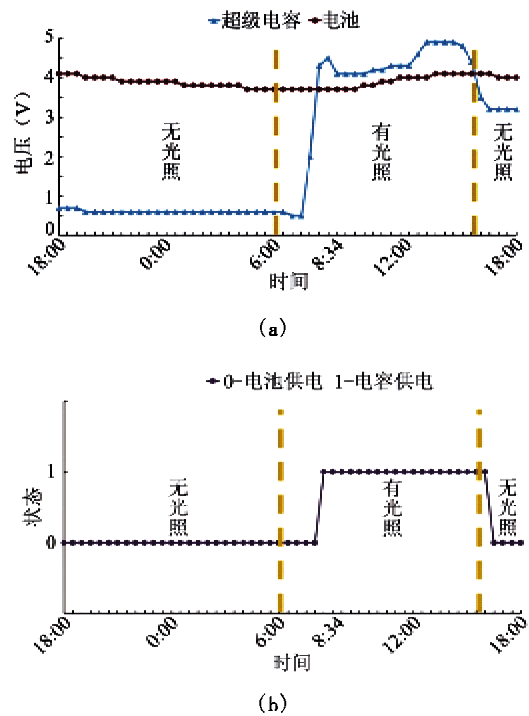


图 6 传感器节点连续工作供电性能测试

无光照时,电容初始电压为 0.7V,电池初始电压为 4.1V,此时电池供电,约 14h 后,电池电压从 4.1V 降至 3.7V;有光照后,电容电压从 0.7V 升至 3.5V,此过程约需 30min,然后切换至电容供电,电容升至 4.5V 后开始给电池充电,电池电压回升至 4.1V 约需 4h 光照。光照不足时,电容电压从 4.8V 降至 3.5V,此过程为电容供电,可持续约 1h,然后切换至电池供电。

由此推算,在现有测试条件下,每天 3 至 4h 的光照时间即可保证节点持续工作约 4 至 5 年(充电电池寿命一般为 4 至 5 年,如果充电电池到时仍可使用,则工作时间更长),还可以通过降低节点通讯频率等方式进一步延长节点工作时间。若光照时间不满足要求,则当电池容量不足时无法保证节点的连续工作,而只能间歇性工作。增大电池容量,则可以增加节点在无光照时的连续工作时间,保证节点长期持续工作。

5 结论

本文针对农田信息远程监测系统中的实际需求,研究设计了无线传感器网络节点长寿命太阳能供电系统,在基于能量收集技术的太阳能供电系统模型的指导下,采用超级电容和聚合物锂电池组成两级能量存储器,并通过传感器节点控制器对其进

行状态监测和主动选择,实现了能量的智能化自治管理。该能量自治系统在实验测试条件下,每天3至4小时的光照时间即可保证节点以10%的工作占比持续运行约4至5年,极大程度地延长了无线传感器网络节点的使用寿命。实际应用时,需要综合考虑系统需求、功能及成本要求,进行针对性设计,以期达到更高的实用性能。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422
- [2] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330
- [3] Arampatzis Th, Lygeros J, Manesis S. A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Limassol, Cyprus, 2005. 719-724
- [4] Anastasi G, Conti M, Francesco M D, et al. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 2009, 7(3): 537-568
- [5] Chalasani S, Conrad J M. A survey of energy harvesting sources for embedded systems. In: *Proceedings of the SoutheastCon, IEEE*, Huntsville, USA, 2008. 442-447
- [6] Penella M T, Gasulla M. Review of commercial energy harvesters for autonomous sensors. In: *Proceedings of the Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, IEEE, Warsaw, Poland, 2007. 1-5
- [7] 高歌. 关断储能太阳光伏电池充电电路的分析与设计. *太阳能学报*, 2008, 29(4): 404-406
- [8] 冯显争, 李训铭. 智能型太阳能充电电路设计. *东南大学学报(自然科学版)*, 2008, 38(S2): 194-198
- [9] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政. 用于太阳能照明系统的智能控制器. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, (9): 1195-1198
- [10] Zhang P, Sadler C M, Lyon S A, et al. Hardware design experiences in ZebraNet. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor System*, Baltimore, USA, 2004. 227-238
- [11] Kansal A, Potter D, Srivastava M B. Performance aware tasking for environmentally powered sensor networks. In: *Proceedings of the Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, New York, USA, 2004. 223-234
- [12] Jiang X, Polastre J, Culler D. Perpetual environmentally powered sensor networks. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Los Angeles, USA, 2005. 463-468
- [13] Raghunathan V, Kansal A, Hsu J, et al. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, Los Angeles, USA, 2005. 457-462
- [14] Dutta P, Hui J, Jeong J, et al. Trio: Enabling sustainable and scalable outdoor wireless sensor network deployments. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, Nashville, USA, 2006. 407-415
- [15] Simjee F, Chou P H. Everlast: Long-life, supercapacitor-operated wireless sensor node. In: *Proceedings of the 2006 International Symposium on Low Power Electronics and Design*, Tegernsee, Germany, 2006. 197-202
- [16] Corke P, Valencia P, Sikka P, et al. Long-duration solar-powered wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors*, Cork, Ireland, 2007. 33-37

Research on a long-duration solar-powered wireless sensor node energy system

Li Nan, Liu Chengliang, Li Yanming

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract

In order to prolong the lifetime of wireless sensor networks, this paper proposes a systematic approach to design of an energy autonomous system for wireless sensor nodes. A model of a solar-powered wireless sensor node energy system based on energy harvesting technology is presented. A long-duration solar-powered energy system for wireless sensor nodes was developed for the practical demand of the farmland information remote monitoring project. This paper illuminates the system configuration, the functional elements design, the energy management strategy, the experimental device selection and the performance testing analysis in detail. The experimental results show that this energy autonomous system, with 3 ~ 4 hours of sunlight required per day under the test condition, enables the wireless sensor nodes to operate for about 4 ~ 5 years at the duty cycle of 10%.

Key words: energy autonomous, energy harvesting, solar power, wireless sensor networks