

文章编号:1000-582X(2009)04-476-05

# 无线网络节点的太阳能最优利用效率

谭春禄<sup>1,2</sup>, 刘 勇<sup>2</sup>, 李秀珍<sup>2</sup>, 仲元昌<sup>2</sup>

(1. 长江师范学院 应用技术学院, 重庆 408100; 2. 重庆大学 通信与测控中心, 重庆 400030)

**摘要:**为了提高在无线传感器网络中太阳能电池供电节点的能量利用效率,研究了太阳能电池与无线传感器网络节点能量之间的供求关系。采用传感器网络节点能量的自适应供求算法,构建了在标准光强下太阳能电池输出功率与传感器网络节点所耗功率的自适应平衡模型。实验结果表明:该模型体现了太阳能电池与网络节点能量的自适应供求关系,确保了传感器节点长期稳定地工作,尽可能地延长了传感器网络的生存周期,为无线传感器网络节点能量的设计提供了理论依据。

**关键词:**太阳能电池;无线传感器网络;自适应算法

**中图分类号:**TP393

**文献标志码:**A

## The optimal energy efficiency of wireless networks nodes based on solar cells

TAN Chun-lu<sup>1,2</sup>, LIU Yong<sup>2</sup>, LI Xiu-zhen<sup>2</sup>, ZHONG Yuan-chang<sup>2</sup>

(1. College of Application Technology, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, P. R. China;  
2. Center of Tracking, Telemetry and Command, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** To improve the energy efficiency of solar cells in wireless sensor networks nodes, the energy relationship between solar cells and the wireless sensor networks nodes is studied. An adaptive algorithm is adopted to ensure the wireless sensor networks work normally at different sunlight intensities. An energy model is designed that reveals the energy relationship between the output power of the solar cells and the power of nodes working normally at a standard sunlight intensity. The experimental results show that the model represents the adaptive energy relationship between the solar cells and the nodes, ensures that the nodes work stably in a long term, and extends the life-cycle of the sensor networks as long as possible. The model has important guiding significance for wireless sensor networks designation.

**Key words:** solar cells; wireless sensor networks; adaptive algorithm

无线传感器网络(WSN)由散布于一定区域内数量庞大的传感器节点组成,通常采用电池供电<sup>[1]</sup>。由于常规电池提供的能量是有限的,且传感器节点经常处在恶劣环境中,为每个节点更换电池很不现

实<sup>[2]</sup>。因此,在无线传感器网络的节点能量设计中,应充分考虑潜在可利用的能源:太阳(光)能、风能、热能、机械振动能、声能、电磁场能等。如何在传感器网络节点上收集并储存这些能量,近年来科学家

收稿日期:2008-12-08

基金项目:国家 973 计划资助项目(2002CB410803);国家专项基金资助项目(3-37)

作者简介:谭春禄(1968-),男,长江师范学院副教授,主要从事测控技术方向研究,(Tel)13072301864;  
(E-mail)zyc@cqu.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊社 <http://qks.cqu.edu.cn>

进行了一些研究,已取得了一定的进展。其中,利用机械振动和光能的能量收集技术已比较成熟<sup>[3-4]</sup>。笔者主要针对基于太阳能的无线传感器网络的能量供求关系展开研究。

太阳能电池工作的基本原理是利用光电材料吸收光子,进而激活太阳能电池中的电子,产生电动势。太阳能电池在光的照射下产生电压,增加相应的调整和储存电路,即可为负载实现供电。太阳能电池的实际输出电压随温度的不同而变化。温度越低输出电压越高,光照越强输出电流越大<sup>[5-7]</sup>。太阳能电池的这些特性决定了在设计无线传感器网络节点时要考虑由于光照强度、时间等因素引起太阳能电池输出功率不同的问题。笔者在解决太阳能电池输出功率差异问题时,采用了自适应算法,从而确保无线传感器网络节点的能量供求平衡,维持节点的正常工<sup>[8-10]</sup>。当太阳能电池功率降低时,自适应算法保证传感器节点正常地检测和处理数据的功能,降低无线通信的次数。实际上,无线传感器网络能量消耗主要集中在无线通信中,如何减少通信的能量消耗,是问题的关键所在。

## 1 传感器节点各模块能量关系

### 1.1 传感器节点各模块能量关系图

无线传感器节点通常包括处理器模块、传感器模块、无线通信模块、太阳能电池、蓄电池。太阳能电池采用光电转换原理,将光能转换为电能,存储在蓄电池中,由蓄电池统一为传感器节点的耗能模块提供能量。处理器根据蓄电池的能量水平、季节的日照时间、日照强度、昼夜关系等及时调整无线通信模块的信息发送频率,以改变节点的能量消耗状况,使传感器网络最大限度的利用有限的电能资源,以维持正常工作。其节点能量流关系示意图如图 1 所示。

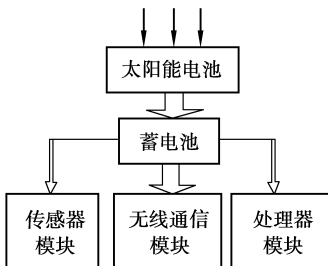


图 1 传感器节点各模块能量关系

### 1.2 最大功率点的阻抗匹配

设太阳能电池的电压为  $e_s$ , 电流为  $i_s$ 。其电压-电流( $e_s - i_s$ )特性在忽略太阳能电池内部小的串联

和并联电阻以后可以表示为

$$i_s = I_{ph} - I_0(e^{q/KT e_s} - 1), \quad (1)$$

其中: $I_{ph}$ 是太阳能电池的短路电流; $I_0$ 为二极管反向饱和电流; $q$ 为电子电荷; $K$ 为波尔曼常数; $T$ 为绝对温度。

设太阳能电池输出功率时电压为  $V_m$ , 电流为  $I_m$ , 则太阳能电池的最大输出功率  $P_m$  为

$$P_m = V_m \cdot I_m. \quad (2)$$

又太阳能电池的输出功率  $P_s$  及功率对电压的微分  $dP_s/de_s$  可由下式表示

$$P_s = i_s e_s = \{I_{ph} - I_0(e^{q/KT e_s} - 1)\} e_s, \quad (3)$$

$$\frac{dP_s}{de_s} = i_s - e_s I_0 \frac{q}{KT} e^{q/KT e_s}. \quad (4)$$

由(4)式可求得  $V_m, I_m$ , 在设计传感器节点的能量模块时,蓄电池和太阳能电池板之间的阻抗取为

$$R = \frac{V_m}{I_m}. \quad (5)$$

这时太阳能电池的利用效率最大,输出有效功率最大。在实际工作中,由于受光强度的不同,所以不同时刻的功率也是不同的,且满足一定的关系。设实际输出功率  $P_f$  与最大额定功率  $P_m$  的比值为  $\eta$ , 即

$$P_f = \eta \cdot P_m. \quad (6)$$

### 1.3 传感器节点能量平衡方程

在无线传感器节点中,消耗能量的模块主要包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块。随着集成电路工艺飞速发展,高性能和低功耗的处理器、传感器技术日益成熟,使得传感器节点的实际工作耗能主要集中在无线通信模块上。经实际测量,传感器节点将 1 bit 信息传输到 100 m 距离需要的能量大约相当于执行 3 000 条计算指令耗能。设在无线传感器网络中无线通信模块需要的能量为  $E_{com}$ , 处理器模块需要的能量为  $E_{cup}$ , 传感器模块需要的能量为  $E_{sen}$ , 整个传感器节点需要的能量为  $E_{sum}$ <sup>[11-13]</sup>, 则满足

$$E_{sum} = \lambda(E_{com} + E_{cup} + E_{sen}), \quad (7)$$

其中: $\lambda$ 是常数,近似为 1,通过试验可测量具体数值; $E_{sen}, E_{cup}$ 近似为固定值, $E_{com}$ 是与发送信息量和发送距离有关的值,其值将随设计节点不同而有所不同,将在后面仿真试验中讨论。

设在 1 d 中有效光照时间为  $h$ , 蓄电池的充电效率为  $\beta$ , 1 d 中传感器节点可供消耗的能量为

$$E_{sol} = P_f \cdot h \cdot \beta. \quad (8)$$

为了保障传感器网络在长期的阴雨天气中正常工作,根据太阳能光伏系统设计原理引入了一个抵御灾害系数  $\alpha$ , 这样可列出总的能量关系方程

$$E_{\text{sol}} = \alpha \cdot E_{\text{sum}} \quad (9)$$

## 2 自适应供求算法

由于不同的地理纬度上,光照时间是不同的;在相同的地理纬度上夏季和冬季的光照时间也是不同的。在地球上某一纬度的光照时间可以根据下面的公式计算

$$H = \frac{2\arccos(\text{tg}\varphi \cdot \text{tg}\delta)}{15^\circ} \quad (10)$$

其中: $H$ 表示光照时间; $\varphi$ 为无线传感器网络节点所在位置的地理纬度; $\delta$ 为太阳赤纬; $\varphi$ 、 $\delta$ 通常是固定值,通过查表可得到。设光照效率为 $\varphi$ ,这样有效光照时间 $h$ 为

$$h = \varphi \cdot H, \quad (11)$$

$\varphi$ 大致满足下面关系式:取每年12月22日为0,然后每增加1d, $n$ 增加1,算法每365d循环一次

$$\varphi = \begin{cases} 0.6 + \frac{2}{1825}n; \\ 1.0 - \frac{2}{1825}n. \end{cases} \quad (12)$$

在设计算法时,依据式(11),调节传感器节点的信息收发频率,以达到节点最有效地利用能量的目的。为了有效节约资源,减小传感器节点的体积,采用的蓄电池容量小于太阳能电池产生的电量。当蓄电池电量充满时,节点处于活跃期,信息收发次数增多;蓄电池电量不满时,节点保持节点正常信息收发;当蓄电池电量下降为60%时,调用灾害天气处理程序;当遇到灾害天气且蓄电池电量下降为20%时,节点处于休眠期,传感器模块正常工作,处理器正常处理数据,降低数据发送频率到 $\tau am$ ( $\tau$ 为常数)。由于在上面能量计算中,增加了灾害因子 $\alpha$ ,在算法设计中只要适当降低能量消耗,就能避免传感器网络停止工作。在365d中根据光照时间长短适当调整无线通信的次数;在1d中根据光照强度、温度变化和蓄电池电能储量水平,增加或减少无线通信的次数。算法设计流程如图2所示。

假定在无线传感器网络中,发射和接收的数据帧有 $a$ -bit信息<sup>[4]</sup>,将 $a$ -bit信息传送距离 $d$ ,通信模块发送耗能和接收耗能分别为

$$E_{\text{TX}}(a, d) = a \cdot E_{\text{elec}} + \xi_{\text{amp}} \cdot a \cdot d^k, \quad (13)$$

$$E_{\text{RX}}(a) = a \cdot E_{\text{elec}}, \quad (14)$$

其中: $E_{\text{elec}}$ 表示发射和接收电路每发送或接收

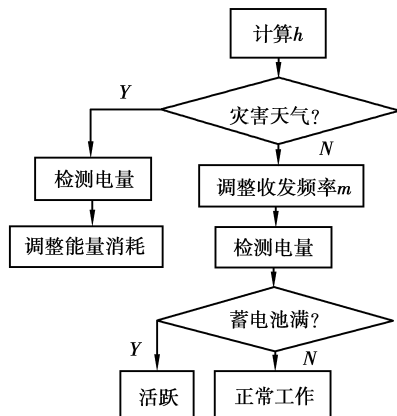


图2 自适应算法流程图

1 bit的耗能; $\xi_{\text{amp}}$ 表示发射器将1 bit数据传送 $1 \text{ m}^2$ 消耗的能量; $k$ 为传播衰减指数, $2 \leq k \leq 5$ ,取值由周围的环境决定,当网络环境平坦无障碍时, $k$ 取值2,在建筑物和植被茂密的地区进行远距离传送时, $k$ 取值3~5。假定在无线传感器网络中每簇有 $B$ 个节点<sup>[6]</sup>,从一段时间中每个节点收发损耗能量约为

$$E_{\text{com}} = m \cdot E_{\text{TX}}(a, d) + (B-1) \cdot m \cdot E_{\text{RX}}(a). \quad (15)$$

由式(7)、(8)、(9)、(13)、(14)、(15)得在自适应算法中应调节的收、发频率 $m$ 值( $m$ 为每天收发次数)为

$$m = \frac{1}{\xi_{\text{amp}} \cdot a \cdot d^k + B \cdot a \cdot E_{\text{elec}}} \cdot \left( \frac{P_t \cdot h \cdot \beta}{\alpha \cdot \lambda} - E_{\text{cup}} - E_{\text{sen}} \right), \quad (16)$$

其中, $h$ 的变化由式(10)、(11)、(12)确定,其它变量在实验中可得到固定的参数,从而 $m$ 值在某一时刻是确定的,并随 $h$ 周期性变化。

## 3 仿真分析与实验结果

笔者在仿真试验中检验了自适应算法的有效性和可靠性,并给出了保证算法可靠工作的参数的取值范围,并验证了能量模型的正确性。

对单个无线传感器网络节点进行自适应算法的仿真时,假定该节点放置在北纬 $30^\circ$ ,该地区日照时间在一年中的变化式由式(10)、(11)、(12)确定,代入式(14)得到在此纬度的自适应数学模型。根据该模型调节自适应算法的参数,设节点的能量损耗系数 $\lambda$ 为0.9,距离基站距离 $d$ 为100 m,设定仿真中

的主要参数<sup>[15]</sup>如表 1 所示。

表 1 仿真中设定的主要参数

太阳能电池 功率 $P_m$ /mW	传感器模块需 要能量为 $E_{sen}$ /J	处理器模块需 要能量为 $E_{cup}$ /J	数据包头 /byte	数据包长 /byte	发送接受 电力能耗 /(nJ · bit <sup>-1</sup> )	放大倍数 $\xi_{amp}$ /(pJ · (bit · m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> )
12	1	1	25	1 000	40	0.001 3

设在 365 d 中的天数  $n$  为横坐标,对自适应算法正常状态下收发次数  $m$  为纵坐标,得到的仿真结果如图 3 所示。图 3 显示了节点能够根据当前的光照条件,自动调节收发模块的收发信息的频率。取每年 12 月 22 日为 0,因为这天的日照最短,收发次数最少。然后每增加 1 d,  $n$  增加 1,图中显示了收发次数  $m$  在 365 d 中的变化情况。

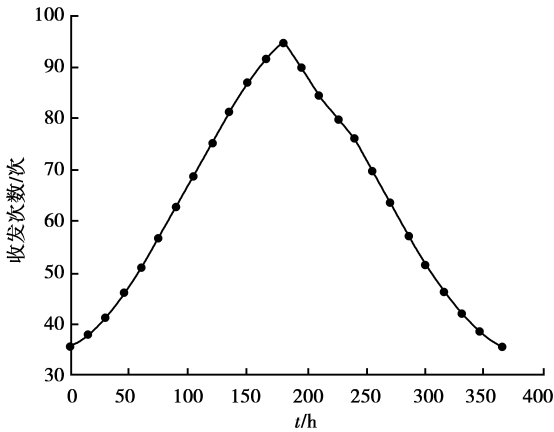


图 3 365 d 中收发次数 ( $m$  值) 的仿真图

设仿真的是冬至日(白天时间最短),由公式(11)计算得到有效光照时间为 5.696 8 h,在 1 d 中节点收发数据频率  $m$  的分布情况如图(4)所示。该仿真模拟的是在 365 d 中日照时间最短 1 d 的情况,在约 4 am,节点开始减少信息收发次数  $m$ ,到 9 am 时降到最低点;然后随着光照加强,节点逐渐恢复正常工作,在 14 pm 节点处于活跃期,  $m$  达到峰值。

在灾害天气模型仿真中,假定连续十天,日照强度为平时的 50%,这样贮存蓄电池的电能下降。当下降到蓄电池容量 60%,开始调用了自适应算法保障机制,即发送数据的频率为  $\frac{\tau m}{\alpha}$ ,  $\tau$  为常数。当电量下降为蓄电池容量的 20% 时,传感器节点基本停止收发数据。设电量水平  $t$  即当前电量与蓄电池容量的比值,经反复试验仿真,得出灾害因子  $\alpha = 2^{\frac{1}{t}}$ 。在自适应算法中,电量正常情况下该因子为 1,只有电

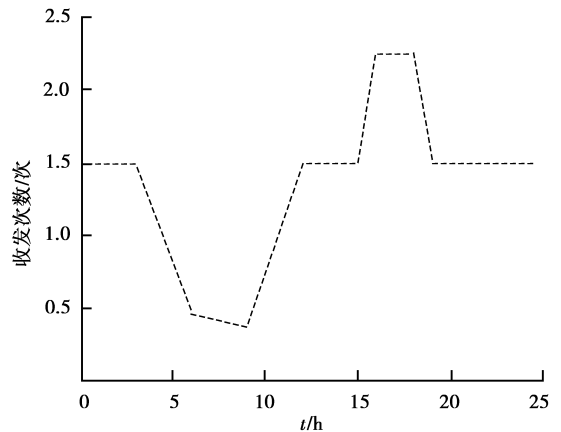


图 4 1 d 中收发次数 ( $m$  值) 的仿真结果图

量下降为蓄电池容量 60% 时,算法才调用灾害因子,从而改变频率  $m$ 。

仿真试验证明该能量关系模型的正确性,采用该模型的自适应算法适合采用太阳能电池的无线传感器网络,能够使能量利用实现最优化。

## 4 结 论

研究了太阳能电池在无线传感器网络节点中能量最优利用效率问题,提出了基于时间和蓄电池能量状况的自适应供求算法,能够有效地提高采用太阳能供电的无线传感器网络节点能量的利用效率。在该能量模型中提出了根据纬度、光照强度、日照时间等调节节点能量消耗的思想,为类似传感器网络设计提供了理论依据。通过无线传感器网络节点仿真和测试证明该无线传感器网络能量供求模型的可靠性和自适应算法的有效性。

### 参考文献:

[1] 刘新华,李方敏. 无线传感器网络中一种能量均衡的分布式成簇算法[J]. 传感技术学报, 2007, 20(11): 2465-2469.  
LIU XIN-HUA, LI FANG-MIN. Energy balancing distributed clustering algorithm for wireless sensor network[J]. Journal of Transduction Technology, 2007, 20(11): 2465-2469.

- [ 2 ] INCHEON P, TAKESHI M D. Energy reduction in wireless sensor networks through measurement estimation with second order recurrent neural networks [C] // 3rd International Conference on Networking and Services, Greece: ICNS, 2007: 438352.
- [ 3 ] ALIPPI C, CHRISTIAN G. An adaptive system for optimal solar energy harvesting in wireless sensor network nodes [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2008, 55(6): 1742-1750.
- [ 4 ] SHAO X G, CHENG L J. An adaptive immune optimization algorithm for energy minimization problems [J]. Journal of Chemical Physics, 2004, 120(24): 11401-11406.
- [ 5 ] 陈桂兰, 孙晓. 光伏发电系统最大功率点跟踪控制 [J]. 电子技术应用, 2001, 27(8): 33-35.  
CHEN GUI-LAN, SUN XIAO. Tracing and control of maximum power point application in PV system [J]. Application of Electronic Technique, 2001, 27(8): 33-35.
- [ 6 ] NIYATO D, HOSSAIN E. Analysis of different sleep and wakeup strategies in solar powered wireless sensor networks [C] // 2006 IEEE International Conference on Communications ( ICC 2006). Turkey: IEEE, 2006: 3333-3338.
- [ 7 ] ALIPPI C, GALPERTI C. An adaptive maximum power point tracker for maximising solar cell efficiency in wireless sensor nodes [C] // 2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Island of Kos: ISCAS, 2006: 3722-3725.
- [ 8 ] 汪泉第, 孔卫. 事件驱动型无线传感器网络生存期分析 [J]. 重庆大学学报, 2007, 30(6): 30-34.  
WANG QUAN-DI, KONG WEI. Lifetime of event-driven wireless sensor networks [J]. Journal of Chongqing University, 2007, 30(6): 30-34.
- [ 9 ] CUI X Y, ZHANG X D, SHANG Y K. Energy-saving strategies of wireless sensor networks [C] // IEEE 2007 International Symposium on Microwave, China: IEEE, 2007: 178-181.
- [ 10 ] WANG Y, WU H Y, NELAVELLI R, et al. Balance-based energy-efficient communication protocols for wireless sensor networks [C] // 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Portugal: IEEE, 2006: 1648973.
- [ 11 ] WANG A, HEINZELMAN W B. Energy-scalable protocols for battery-operated microsensor networks [J]. The Journal of VLSI Signal Processing, 2001, 18(3): 223-237.
- [ 12 ] GUAN X, WANG Y X, LIU F. An energy-efficient clustering technique for wireless sensor networks [C] // The 2008 IEEE International Conference on Networking, Architecture, and Storage. USA: IEEE, 2008: 248-252.
- [ 13 ] LIU X, WANG Q Y. An energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks [C] // 2008 the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. USA: IEEE, 2008: 1728-1733.
- [ 14 ] YOUNIS O, FAHMY S. A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 660-669.
- [ 15 ] HEINZELMAN W, CHANDRAKSSA H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.

(编辑 侯 湘)

(上接第 467 页)

- [ 12 ] 张朋, 张超, 郭陈江, 等. 建筑物的 SAR 回波信号模拟方法 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 1742-1744.  
ZHANG PENG, ZHANG CHAO, GUO CHEN-JIANG, et al. SAR raw signal simulation for building [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(7): 1742-1744.
- [ 13 ] 昂海松, 舒永泽, 周建江, 等. 复杂目标 RCS 计算的新方法—曲面像素法 [J]. 电子与信息学报, 2001, 23(10): 962-969.  
ANG HAI-SONG, SHU YONG-ZE, ZHOU JIAN-JIANG, et al. A new method for RCS prediction of complex objects—curved surface pixel method [J]. Journal of System Simulation, 2001, 23(10): 1742-1744.
- [ 14 ] RIUS J M, FERRANDO M, JOFRE L. High frequency RCS of complex radar targets in real time [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagat, 1993, 41(9): 1308-1319.
- [ 15 ] MICHAELI A. Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagat, 1984, 32(3): 252-258.

(编辑 侯 湘)