

文章编号: 2095-4980(2018)02-0272-05

## 一种节能无线传感器网络

姜倩倩<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 甄贵平<sup>2</sup>

(1.中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999; 2.山东省齐河职业中等专业学校, 山东 德州 251000)

**摘要:** 针对无线传感器网络节点能量受限制问题, 提出一种节能网络, 把监测环境中通电电缆的磁能转化为电能, 实现节点能量的自给。采集的能量采用双边调谐阻抗网络传输, 通过设计原副边回路参数, 令其回路发生谐振来降低自身损耗; 组网模式上, 用节能静态网络模型代替能耗大的动态组网方式, 结合需要, 通过切换节点的工作方式来降低能耗。实验证明, 能量采集模块一个工作周期采集的能量为 10.93 mJ, 能够满足传感网络节点工作周期的最大能耗 4.68 mJ, 验证了节能传感网络可以实现能量自给。

**关键词:** 无线传感器网络; 双边调谐; 节点工作方式; 自给

**中图分类号:** TN806

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201802.0272

## An energy-saving wireless sensor networks

JIANG Qianqian<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, ZHEN Guiping<sup>2</sup>

(1.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;  
2.Qihe Vocational Secondary School, Dezhou Shandong 251000, China)

**Abstract:** Aiming at the energy limitation of wireless sensor network node, an energy-saving network is proposed, which can transform the magnetic field energy of laying wire cables in monitoring environment into electricity power, to ensure energy can be self-sufficient. The collected energy is transmitted by double-tuned impedance network. By designing the loop parameters, the loop is resonated to reduce its own loss. In the networking mode, the energy-saving static network model is adopted instead of the dynamic network model with large consumption. It can also reduce energy consumption by switching working mode of node. The experimental results show that the energy collected by energy harvesting module is 10.93 mJ, which can meet the maximal energy consumption of 4.68 mJ in sensor nodes. It is proved that the energy-saving sensor network can realize self-sufficiency.

**Keywords:** wireless sensor network; double-tuned; working mode; self-sufficiency

智能环境代表各种环境自动化的未来。各种传感器、控制器和执行器应用在各种环境中, 发挥作用的同时也带来一些技术挑战, 如, 每个传感器网络工作都需要有自己的电源, 当传感器网络需要发送大量数据或执行连续测量时, 在几个月内就会耗尽电量, 监视电池的低电量状态是一项标准操作, 更换电池需要人工辅助, 在环境恶劣的条件下更是难以维护。采用能量采集供电的传感器网络可在数年内完全免维护, 环境中能采集的能量有: 风能、太阳能、振动能、电磁<sup>[1-6]</sup>。岳喜海<sup>[7]</sup>等提出了将振动能转换为电能的方法, 但转换振动能的方法输出功率低; JIANG<sup>[8]</sup>等提出将采集到的太阳能存储在 2 个超级电容与锂电池中为传感器节点供电, 但采集太阳能的方法对环境光照强度的要求比较高, 对天气要求严格。针对无线传感器节点自身携带电池的容量有限, 本文提出一种低功耗能量采集传感网络。

### 1 节能式无线传感器网络组成

节能无线传感器网络节点由传感器模块(温度、湿度、电流等传感器)、无线通信模块(A/D、数据处理器和存储器、无线收发器)、能量采集模块和电源管理模块组成, 如图 1 所示。

在网络最底层，用于监测参数的传感器节点，所处环境复杂多变，维修困难，采用自供电方式；其他节点人工维护方便，采用外接电源供电。组网时，只要采集能量能够满足传感器节点需要，整个网络就可以持续稳定运行。

## 2 传感器网络主要节能设计及分析

节能无线传感器网络采取硬件与软件相结合的方式来达到节能目的。硬件上借助监测环境中铺设的电线电流，采集电线中电流产生的磁场能量为传感器节点供电。传感网络节点中能量采集模块采集的能量不能保证节点全天候工作，软件方面可以采取定时休眠的周期性工作模式。

### 2.1 双边调谐变换网络设计及分析

双边调谐阻抗变换网络的等效电路图如图 2 所示。图中， $U_a, R_a$  分别为磁电换能器的等效电压源、等效电阻， $R_L$  为负载整流电路的等效阻抗。虚线框内为双边调谐设计需求， $L_1, L_2$  分别为原副边线圈的电感， $M$  为原副线圈互感， $R_{s1}, R_{s2}$  分别为原副边线圈的等效电阻， $R_{p1}, C_{p1}$  与  $R_{p2}, C_{p2}$  分别为原副边线圈的寄生电阻与电容。为了与  $L_1$  和  $L_2$  组成 LC 谐振回路在原副边分别加入调谐电容  $C_1, C_2$ ， $Z_{in}$  为阻抗传输网络的等效输入阻抗， $Z_1$  为未加入调谐电容时的等效输入阻抗， $I_1, I_2$  分别为流入原副边的电流。

通过设计阻抗变换网络双边回路参数，使其达到谐振状态来降低网络自身的能耗，从而提高整个阻抗变换网络的功率传输效率。双边回路谐振时，虚框内阻抗为纯阻性，此时只要满足  $R_a$  与  $Z_{in}$  的共轭<sup>[9]</sup>相等，即：

$$R_a = Z_{in}^* \tag{1}$$

双边调谐阻抗网络获得最大输入功率  $P_{in}^{max}$ ：

$$P_{in}^{max} = I_1^2 \text{Re}[Z_{in}] = \frac{U_a^2}{4R_a} \tag{2}$$

理想情况下，忽略寄生电阻与电容  $R_{p1}, R_{p2}, C_{p1}, C_{p2}$ ，双边回路谐振后传输网络的输入功率经过极少部分阻性消耗后传递到负载电路，设原副边线圈匝数比为  $n$ ，为了方便计算，假设完全耦合，得：

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{M}{L_1} = \frac{L_2}{M} \tag{3}$$

式中  $N_1, N_2$  分别为原副线圈匝数。设流过负载的电流为  $I_L$ ，谐振频率为  $\omega$ ，则可推算出负载获得的功率为：

$$P_L = |I_L|^2 R_L = \frac{1}{1 + \omega^2 C_2^2 R_L^2} \cdot \frac{L_1^2 U_a^2 R_L}{4M^2 R_a^2} = \frac{1}{4n^2} \cdot \frac{U_a^2 R_L}{R_a^2} \cdot \frac{1}{1 + \omega^2 C_2^2 R_L^2} \tag{4}$$

由上式可知，匝数确定后，通过调节原副边回路参数，可以实现磁电换能与负载的阻抗匹配，使负载获得较高的功率。

### 2.2 储能电路设计及分析

把图 2 中的负载换成整流充电电路，见图 3。

双边调谐后，双边调谐网络以最大功率对储能电容进行充电，提高了电路对超级电容的充电效率，缩短了充电时间。为方便计算，在对超级电容充电的过程中，忽略整流电路的二极管压降。储能电容  $C_s$  两

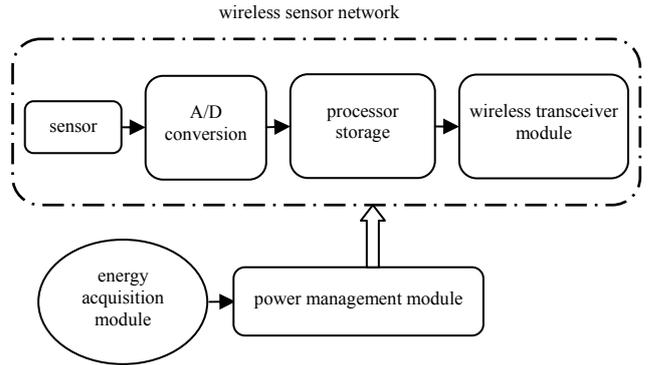


Fig.1 Parts of energy-saving wireless sensor node  
图1 节能无线传感器节点组成

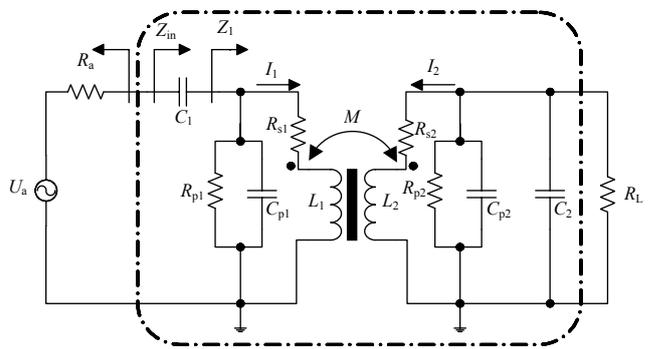


Fig.2 Equivalent circuit of double-tuned impedance transformation network  
图2 双边调谐阻抗变换网络等效电路图

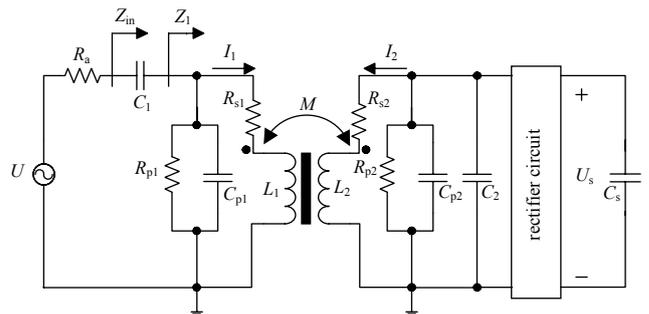


Fig.3 Schematic of charging circuit  
图3 充电电路原理图

端的电压与充电时间的关系可以表示为  $U_s^{[10]}$ :

$$U_s = U_{in} \frac{1 - e^{-2\omega C_1 L_1 t / \pi C_s L_2}}{\omega^2 M C_1 L_1 / L_2} \quad (5)$$

式中:  $U_s$  为储能电容两端的电压;  $U_{in}$  是原线圈的输入电压。其充电过程与 RC 电路类似, 充电电压随着时间成指数增长。可见充电时间常数与基站发出信号的频率、原副线圈的互感、原副线圈电感比值、原副边电感、原边调谐电容和储能电容有关。当电路参数一定时, 储能电容电压  $U_s$  与天线的双边网络输入电压  $U_{in}$  成正比。

### 2.3 组网及工作方式分析

组网方式的不同也直接影响传感器节点的能耗。高效的路由算法可以降低无线传感器网络中节点的能耗, 分簇路由算法中的低功耗自适应集簇分层型 LEACH<sup>[11]</sup>、固定簇半径的分簇 HEED<sup>[12]</sup>等协议, 从不同角度延长传感网络的寿命。LEACH, 组网时要求每个节点初始存储的能量相等, 但是簇规模有随机性, 节点通过能量采集技术得到的能量并不相同, 它没有考虑到每个节点剩余能量完全相同的假设, 导致能量极低的节点当选为簇头, 造成节点失效, 网络无法运行。HEED, 通过剩余能量与节点密度 2 个参数选取簇头, 簇首的选取需要节点进行大量的运算, 增加了节点自身的功耗, 没有考虑到簇头与基站之间如何实现远距离的数据传输问题。节能式无线传感器的静态组网方式, 代替了复杂动态组网, 使节点的程序简单, 能耗降低, 传感网络能够持久运行。静态组网图如图 4 所示。

在这种网络中, 用汇聚节点与中继节点代替动态组网中的簇头, 避免了节点之间竞争簇头的环节。每一类节点分工不同, 传感器节点的工作方式设置不同。减少传感器节点工作时间, 就降低了传感器节点功耗。

传感器节点的能耗主要来自: 敏感单元(传感器)、无线通信模块、电源管理电路。传感器节点的一个工作周期可以分为: 数据采集、数据发送、休眠阶段。因此, 节点的平均能耗可以表示为  $E_{avg}$ :

$$E_{avg} = U_{sup} (T_{act} \times I_{act} + T_{sen} \times I_{sen}) \quad (6)$$

式中:  $U_{sup}$  是电源电压;  $T_{act}, T_{sen}$  分别为无线通信时间、数据采集时间;  $I_{act}, I_{sen}$  分别为无线通信、数据采集时的电流值。在设计无线传感器各部分时, 尽可能地降低时间参数与电流参数, 就能降低能耗。通过程序设计调整各部分的工作时间来实现对能量的最优化。

无线传感器在通信时能耗最大, 要尽量减少通信模块发送数据量, 降低其能耗。如果多个节点同时发送, 它们相互重叠, 导致接收到的信号难以辨认, 需要重传才能把信息正确地发送到目的地。冲突引起的重传造成能量浪费。当多个节点都发送数据到同一个汇聚节点时, 自动重发延时(Automatic Retransmission Delay time, ARD)可以调整自动重发的时差, 在下一个数据发送周期, 不同节点的数据间会有一个时间差, 避免了数据的冲突。无线通信模块在发送与接收工作时, 一直保持着发送与接收数据状态, 功耗大; 进入睡眠状态时, 则关闭发射与接收功能, 以降低功耗。因此, 根据需要, 让定时器控制其在工作与睡眠 2 种状态之间切换, 实现低功耗。

## 3 实验

实验选用 NORDIC 半导体公司的 nRF24LE1 无线模块, 该芯片自带 MCU, RF 收发模块, 芯片的工作电压在 1.8~3.6 V 之间, 内部 16 M 晶振的起振时间为 3~5 ms, 其内置的 MCU 与射频收发器的通信时间为 1~2 ms, 发射数据用时 1 ms。完成一次数据通信之后, 其内置的 MCU 产生一个高电平指示信号, RF 无线收发模块进入深度睡眠模式。传输速率可达 2 Mbps, 高速传输速率用其本身的低功耗模式, 休眠电流为 1.6  $\mu$ A, 可以通过定时器唤醒。ARD 自动调整重发的时延, 避免传感器节点间的数据冲突, 不同区域分配不同的频段避免相互之间干扰。

### 3.1 电容充电实验

监测环境中交变电流信号的频率  $f$  为 50 Hz, 绕组线圈采用铜线, 原副边线圈的匝数比为  $n=N_2:N_1=3:1$ ,  $L_1$  为 3.2 H,  $L_2$  为 28.8 H,  $M$  为 9.6 H。加入调谐电容, 双调谐阻抗变换网络达到谐振状态时, 从式(4)中可以看出, 随着负载的增大, 网络输出功率呈先增大后减小的趋势。参数确定, 得出最佳负载值 470  $\Omega$ 。

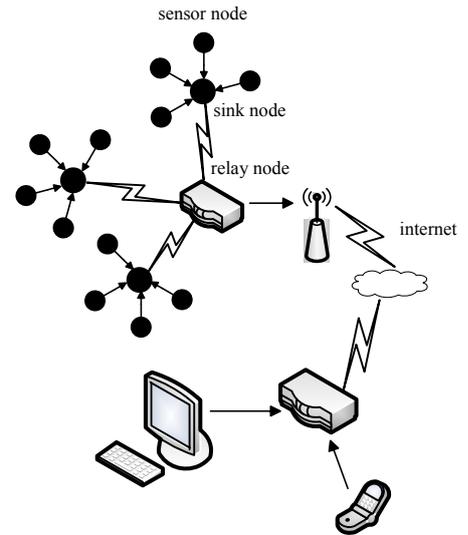


Fig.4 Schematic of wireless sensor network  
图 4 网络结构模型

采用图 3 充电电路，在相同的激励下，阻抗网络以及直接整流电路对 1 000  $\mu\text{F}$  超级电容  $C_s$  充电。图 5 是采用双边调谐阻抗网络前后储能电容两端电压与充电时间关系，图 6 是采用双边调谐阻抗网络前后储能电容所获的平均功率与充电时间关系曲线图。从 2 个图中可以看到，阻抗匹配前，电容充电至 3 V 用时 230 s，平均充电功率为 4.9 mW。阻抗匹配后，该过程缩短为 30 s，平均充电功率提高至 43 mW，为前者的 877%。这是由于调谐后，电路实现了阻抗匹配，有效提高了能量采集器的输出功率与对超级电容的充电功率，大幅度缩短了充电时间。

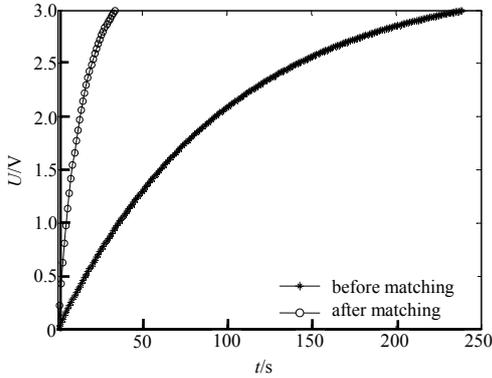


Fig.5 Relationship between voltage of capacitor and charging time  
图5 储能电容电压与充电时间关系曲线

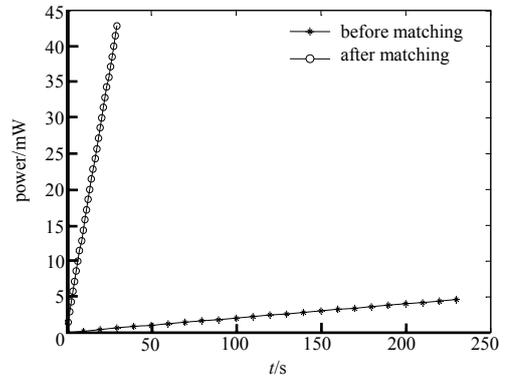


Fig.6 Relationship between average power and charging time  
图6 平均功率与充电时间关系曲线图

### 3.2 负载驱动试验

无线传感器上电即启动工作模式，可实现数据实时处理与发射，最后传感器进入休眠状态。MCU 的工作持续时间为 12 ms，其中发送数据时间为 500  $\mu\text{s}$ 。其工作电压为 1.8~3.6 V，完成采集控制等任务时，工作电流为 4 mA，发射数据时电流为 14 mA。整个工作过程约为 250 ms，其中数据采集处理时间  $T_1$  约为 220 ms，无线发送数据时间  $T_2$  约为 30 ms。

如果休眠时间不计，把数值代入式(6)，可得到一个工作周期最大能耗  $E_{\text{avg}}$ ：

$$E_{\text{avg}} = 3.6 \times (4 \times 220 + 14 \times 30) = 4.68 \text{ mJ} \quad (7)$$

图 7 是无线传感网络工作时，储能电容与传感网络两端电压的变化，从图中可以看出，当传感器两端电压高于 3.3 V 时，无线传感器开始工作，MCU 通过 A/D 完成数据采集后，启动无线发射模块发射数据，发射完毕后，无线传感器进入低功耗模式。

在传感器节点整个工作周期中，设储能电容工作前电容电压为  $U_{s0}$ ，工作结束后电压为  $U_{s1}$ ，图中可以读出  $U_{s0}$ 、 $U_{s1}$  分别为 3.3 V、2.95 V，提供的能量为  $E$ ，则：

$$E = \frac{1}{2} C_s (U_{s0}^2 - U_{s1}^2) = 0.05 \times (3.3^2 - 2.95^2) = 10.93 \text{ mJ} \quad (8)$$

因此储能电容所存储的能量能够满足节点能耗的要求。设能量采集电路利用率为  $\delta$ ：

$$\delta = \frac{E_{\text{avg}}}{E} = \frac{4.68}{10.93} \approx 0.428 = 42.8\% \quad (9)$$

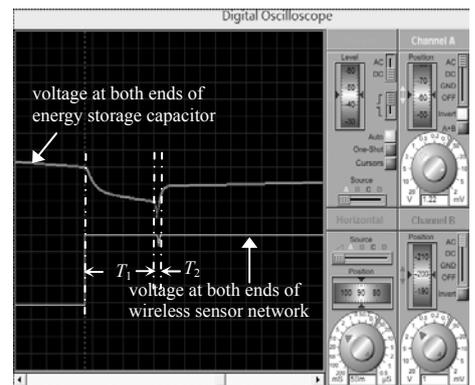


Fig.7 Discharge process of the storage capacitor  
图7 储能电容放电过程

## 4 结论

本文讨论的节能式无线传感器的监测网络，根据调谐与阻抗变换原理对能量采集器进行了阻抗匹配，以最大功率对储能超级电容进行充电，结果表明，该电路大幅度提高了采集器的输出功率与对储能超级电容充电的效率。通过简单的网络构成，设置汇聚节点与中继节点替代动态组网中的簇头，避免了节点之间竞争簇头的环节，减少了传感器节点功耗，实现了传感网络稳定持续运行。实验验证了储能电容两端电压与时间之间呈指数曲线关系，并验证了采集电路采集的能量能够满足传感网络正常工作所需要的能量，且采集能量利用率为 42.8%。

## 参考文献:

- [1] STEPHEN N G. On energy harvesting from ambient vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006,293(1):409-425.
- [2] QIU J,WEN Y M,LI P. Design and testing of piezoelectric energy harvester for powering wireless sensors of electric line monitoring system[J]. Journal of Physics, 2012,111(7):07E510.
- [3] LI P,WEN Y M,LIU P G,et al. A magneto electrical energy harvester and management circuit for wireless sensor network[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2010,157(1):100-106.
- [4] AZEVEDO J A,SANTOS F E. Energy harvesting from wind and water for autonomous wireless sensor nodes[J]. IET Circ. Syst., 2012,6(6):413-420.
- [5] 代显智,文玉梅,李平,等. 采用磁电换能器的振动能量采集器[J]. 物理学报, 2010,59(3):2137-2146. (DAI Xianzhi,WEN Yumei,LI Ping,et al. Vibration energy harvester based on magnetoelectric transducer[J]. Journal of Physics, 2010,59(3): 2137-2146.)
- [6] BERTOLDO S,RORATO O,LUCIANAZ C,et al. A wireless sensor network ad-hoc designed as anti-theft alarm 200 system for photovoltaic panels[J]. Wireless Sensor Network, 2012,4(4):107-112.
- [7] 岳喜海,杨进,文玉梅,等. 多方向宽频磁电式振动能量采集器[J]. 仪器仪表学报, 2013,34(9):1961-1967. (YUE Xihai, YANG Jin,WEN Yumei,et al. Multi direction broad band magnetoelectric vibration energy harvester[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013,34(9):1961-1967.)
- [8] JIANG X,POLASTRE J,CULLER D. Perpetual environmentally powered sensor network[C]// The Fourth 205 International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Berkeley:[s.n.], 2005:463-468.
- [9] CHARLES K A,MATTHEW N O S. Circuit[M]. Beijing:Machinery Industry Press, 2014.
- [10] Zalbide I,Vicario J,Velez I. Power and energy optimization of the digital core of a Gen2 long range full passive RFID sensor tag[C]// IEEE International Conference on RFID. Las Vegas,USA:IEEE, 2008:125-133.
- [11] KOUR H,SHARMA A K. Hybrid energy efficient distributed protocol for heterogeneous wireless sensor network 210[J]. International Journal of Computer Applications, 2010,4(6):1-5.
- [12] PAN S Q,LI P,WEN Y M,et al. An energy management circuit based on up-conversion to power wireless sensor nodes[C]// PIERS Proceedings. Stockholm:[s.n.], 2013:12-15.

## 作者简介:



姜倩倩(1985-),女,北京市人,在读硕士研究生,主要研究方向为光电检测与信息处理。email:ha.mibibi@163.com.

王磊(1962-),男,四川省绵阳市人,研究员,主要研究方向为信息传输与处理、电子技术应用。

甄贵平(1982-),女,山东省德州市人,讲师,主要研究方向为软件开发、语音识别。