

双电源架构的低功耗温室环境感知节点设计^{*}

沈明霞 刘 政 熊迎军 孙玉文 陆明洲 刘龙申

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 为提高电池能量利用率,降低温室环境无线采集节点功耗,延长节点寿命,以 16 位低功耗 MCU (MSP430F149)和 CC1101 射频模块进行温室环境无线采集节点硬件设计,电源管理模块采用 TPS63031 芯片实现双电源供电,即节点在工作和休眠状态下分别采用 3 节 AA 南孚电池和 1 节 3 V 纽扣电池供电,通过 DC-DC 转换,电池可使用能量提高 22.8%。软件协议采用有限状态机(FSM)模型设计,实现节点工作模式和休眠模式的任务调度,使节点休眠时进入 LPM3 深度休眠,大大降低节点功耗。电池放电试验和节点性能测试试验表明,在设定 30 min 采集周期下,设计的供电方案可保证节点 11 019.8 h(约 459.2 d)的可靠使用寿命。

关键词: 温室环境 无线传感器网络节点 双电源 低功耗

中图分类号: S625.5; TN925+.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)11-0298-06

引言

温室已发展成为设施农业的主要生产形式^[1-4]。无线传感器网络凭借其低成本、低功耗、无需布线、灵活性强、自组织等优势,在设施农业领域得到广泛应用^[5-8]。为满足温室环境信息监测周期长、分布广的需求,国内外已研究了多种专用的无线传感器网络节点^[9-17]。这些设计有效实现了对农业环境信息的监测,但仍存在以下问题:采用 CC2430 等 2.4 GHz 等射频芯片其通信距离较 433 MHz 短,成本及功耗较高;NRF905 为 433 MHz 射频芯片,但功能较 CC1101 简单(如不支持无线唤醒和信号强度指示等),且功耗高。

为有效解决温室无线监测节点的低功耗和远距离传输问题,本文在低功耗硬件选择基础上,采用 433 MHz 无线射频通信,引入双电源供电架构和节点休眠机制,在正常工作状态和空闲状态下分别采用主、备电源供电方案,有效降低节点功耗,提高电池能量的利用率及转换效率,延长节点的使用寿命。

1 硬件设计

温室环境信息采集,无线节点电池寿命较短;高温高湿环境及钢架结构易对无线信号产生干扰,为延长节点寿命、降低信号干扰,无线感知节点选用低功耗芯片,基于 433 MHz ISM 频段设计。

1.1 节点组成

无线感知节点由微处理器模块、电源管理模块、传感器模块、无线通信模块、时钟电路和扩展接口组成,如图 1 所示。其中,MCU 采用 TI 公司的 16 位低功耗单片机 MSP430F149,射频芯片选用 TI 公司基于 IEEE 802.15.4 标准开发的 433 MHz ISM 频段的 CC1101。为满足高性能和低功耗需求,节点采用 8 MHz 和 32.768 kHz 双晶振电路,在空闲状态下引入节点休眠机制,设计了高性能的双电源供电管理架构。

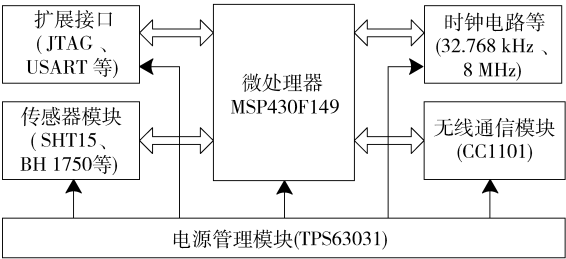


图 1 无线感知节点结构框图

Fig.1 Structure diagram of wireless sensor node

1.2 电源管理模块设计

采集节点引入休眠机制对于降低节点功耗有重要意义。节点电池作为电源提供者,其合理的管理可有效节约能量,延长节点寿命。

1.2.1 设计要求

节点主要芯片选择及电压特性如表 1 所示。节点主要组成部件的典型工作电压是 3.3 V,采用 3 节

收稿日期: 2013-11-03 修回日期: 2014-01-20
^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA10Z226)和江苏省产学研前瞻性联合研究资助项目(SBY201220009)
作者简介: 沈明霞,教授,博士生导师,主要从事机器视觉与信息农业领域研究,E-mail: mingxia@njau.edu.cn

AA 电池,电压约 4.8 V 串联降压到 3.3 V 给节点供电。随电池能量消耗,电池电压不断下降,当电池电压低于 3.3 V 时节点将无法正常工作,此时电池仍具有较大剩余能量。在工作电压允许范围内,电压越低,射频发射功率越低,传输距离也就越短。为保证传输距离不受电压下降影响,最大限度地利用电池能量,延长节点寿命,需对电池电压进行提升。

表 1 节点主要组成芯片工作电压

模块名称	芯片名称	工作电压/V	典型工作电压/V
微控制器	MSP430F149	1.8~3.6	3.3
射频模块	CC1101	1.8~3.6	3.3
温湿度传感器	SHT15	2.47~5.5	3.3
光照度传感器	BH1750FVI	2.4~3.6	3
CO ₂ 浓度传感器	COZIR-A	3.25~5.5	3.3

1.2.2 设计方法

图 2 为基于 TI 公司 TPS63031 芯片设计的电源管理模块结构框图。

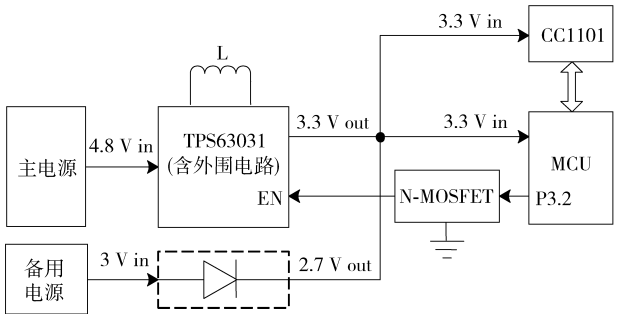


图 2 电源供电管理模块结构框图

Fig.2 Structure diagram of power management module

(1) 主电源供电管理

TPS63031 是单电感降压-升压 DC-DC 转换芯片,其静态电流消耗低于 50 μ A,关机电流低于 0.9 μ A。电感 L 的合理选择是稳压输出 3.3 V 的关键。

$$L_1 = k(V_{IN1} - V_{OUT}) \tag{1}$$

$$L_2 = kV_{OUT} \tag{2}$$

式中 L_1 ——降压模式下最小电感,H
 L_2 ——升压模式下最小电感,H
 V_{IN1} ——最大电源输入电压,V
 V_{OUT} ——DC-DC 稳压输出,V
 k ——系数,取 0.5 μ s/A

按式(1)、(2)分别计算 L_1 和 L_2 ,电感 L 的最小值取值为 L_1 和 L_2 中最大者,输入电压在 1.8 ~ 5.5 V 范围内经 TPS63031 均可稳定输出 3.3 V,且 L 越大,DC-DC 模块的转换效率越高(输出电压 3.3 V,输出电流 20 mA,输入电压为 2.6 ~ 4.6 V 时,转换效率可达 85% 以上)。

(2) 备用电源供电管理

温室环境信息采集多为间歇性采集,节点空闲消耗是主要的能量消耗形式^[18]。节点睡眠(关闭传感器、射频休眠、CPU 进入 LPM3 模式)时理论消耗电流小于 1 μ A,所以空闲状态下进行节点休眠对降低节点能耗意义重大。而低电流下 DC-DC 模块转换效率极低,基于节能考虑,当节点休眠时关闭 TPS63031,借助备用电源(3 V 纽扣电池)给节点供电。

TPS63031 的 EN 引脚经 N 沟道 MOSFET 接地(MOSFET 为电压型器件,功耗低),MOSFET 门极连接 MCU 的 P3.2 脚,采集完成后,MCU 控制 P3.2 脚输出高电平导通 MOSFET,将 TPS63031 的 EN 脚拉低关断。另外为防止正常工作时 TPS63031 输出电压给纽扣电池反向充电,在纽扣电池支路串联锗二极管,利用其单向导电性避免发生危险,锗二极管导通压降为 0.3 V,纽扣电池供电电压下降为 2.7 V,在节点工作电压范围内,可维持节点休眠供电。

2 软件设计

软件低功耗协议的实现主要依赖任务调度机制完成,针对温室环境无线感知节点多任务状态切换频繁,建立合理的节点状态调度机制对于降低节点功耗至关重要。依托硬件,设计了节点周期性采集传输的软件系统,采用状态机模型实现任务调度,深度降低节点功耗,延长节点使用寿命。

2.1 状态机模型

节点应用程序采用有限状态机(FSM)^[19-20]设计。状态转换图如图 3 所示。

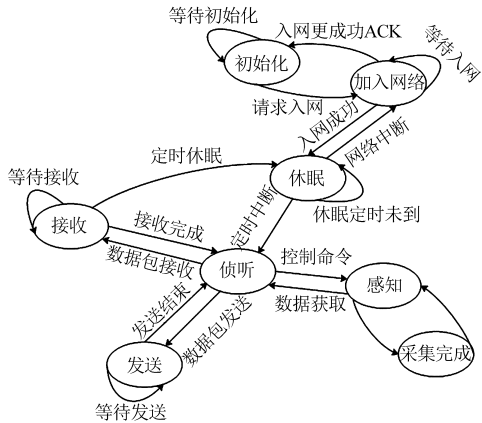


图 3 节点状态机模型

Fig.3 State machine model of node

通过节点状态机模型实现不同节点状态间的转化和任务调度,软件设计引入低功耗休眠模式,并分别采用 8 MHz 和 32.768 kHz 晶振实现高低速处理,进一步降低节点能耗,延长节点寿命。任务实现如下：

(1) 初始化状态: MCU、射频模块、传感器均处于初始化状态,开启外部 8 MHz 晶振,通过 BSP_Init() 对板级初始化;通过 mrfi_SpiInit() 对射频初始化;通过 nwk_nwkInit() 完成网络初始化。

(2) 加入网络状态:此状态下 MCU 和射频模块处于激活模式,传感器未启动,外部 8 MHz 晶振提供时钟,通过 SMPL_Link(0) 完成入网申请。

(3) 休眠状态:此状态下 MCU 进入 LMP3 低功耗模式,射频模块进入睡眠,传感器仍未开启,此时由外部 32. 768 kHz 低速晶振提供时钟,休眠时间通过 Init_Timer() 定时器设定。

(4) 感知状态:进入此状态时,时钟切换回 8 MHz 晶振提供,MCU 从 LPM3 模式下激活,并开启传感器,通过 get_Data() 完成传感器采集。

(5) 数据发送状态:进入此状态时,唤醒射频模块同时关闭传感器,MCU 对传感器采集的数据通过 app_bulid_msg() 进行数据包构建,并调用 SMPL_Send() 发送数据。

(6) 数据接收状态:节点发送完数据后即开启接收模式,进入数据接收状态,通过 SMPL_ACK() 进行数据发送,完成回馈。

2.2 软件流程

采用 C 语言基于 IAR Embedded Workbench 开发环境对节点工作机制进行软件开发。图 4 为节点软件流程。

节点启动后,开启 8 MHz 高速晶振,初始化 CC1101 并向 Coordinator(协调器)发起链路请求,等待 Coordinator 应答建立连接。设定 Timer 休眠定时时间,关闭 8 MHz 晶振转用 32. 768 kHz 低速晶振,CC1101 休眠并使 MCU 进入 LPM3 低功耗模式,开启 Timer 等待定时中断。定时时间到,MCU 退出 LPM3 模式,复位 CC1101,进行传感器信息采集,完成采集后开启 CC1101 的发送模式,MCU 通过 SPI 通信协议将数据传送给 CC1101,通过已建立链路向 Coordinator 发送数据。设定 CC1101 为接收模式,接收 Coordinator 的 ACK 回馈,设定接收中断标志,完成数据发送。

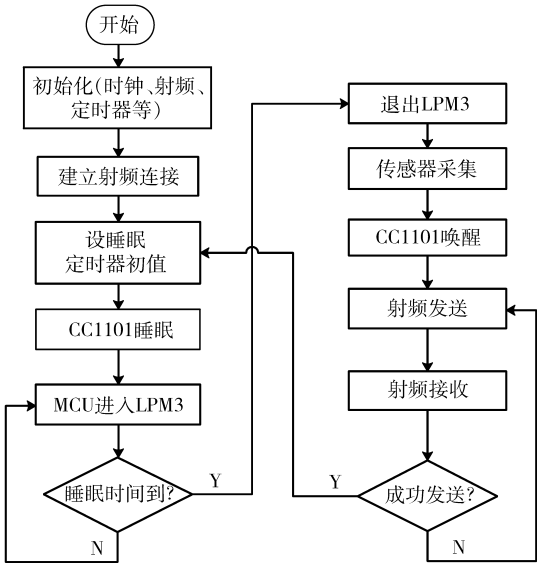


图 4 软件流程图
Fig.4 Flowchart of software

3 试验

3.1 节点功耗测定

对该节点进行空闲等待、射频启动、数据发送和数据接收 4 种状态的功耗测定,试验如图 5 所示。由于不同状态下硬件的电流消耗不同,DC - DC 的输出电流也随状态切换变化而不易测定。试验采用数字可调直流电源 M8811 模拟 3 节南孚 AA 电池给节点供电(约 4. 5 V),在 DC - DC 输出口串联 1 Ω、0. 5% 高精度的电阻,借助 200 MHz 的 TDS2022C 型高精度泰克示波器测量该电阻两端电压,间接测定电流消耗。

节点射频发射速率设为 38. 4 kb/s,发射功率为 0 dBm,单次发送数据长度为 45 字节。图 6 是数据发送和数据接收状态下 1 Ω 精密电阻两端电压的变化曲线及电流消耗变化曲线。图 6a 中,光标 2 为射频睡眠时板级电压 V_{dr} ,光标 1 为射频启动后数据发送时节点的工作电压 V_{sd} ,光标 1 和光标 2 之间曲线为射频启动时间 (T_{st})、发送时间 (T_{sd}) 的一个周期 T_{rf} 。图 6b 中,光标 1 为射频休眠时节点电压 V_{sp} ,光标 2 为射频接收节点电压 V_{re} ,试验发现空闲等待状态节点电压 V_{idle} 与 V_{re} 一致,数据接收时间 T_{re} 与发送

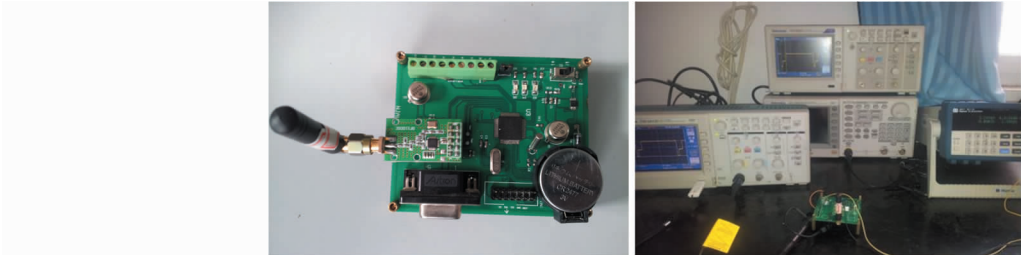


图 5 节点和功耗试验
Fig.5 Node and power consumption test

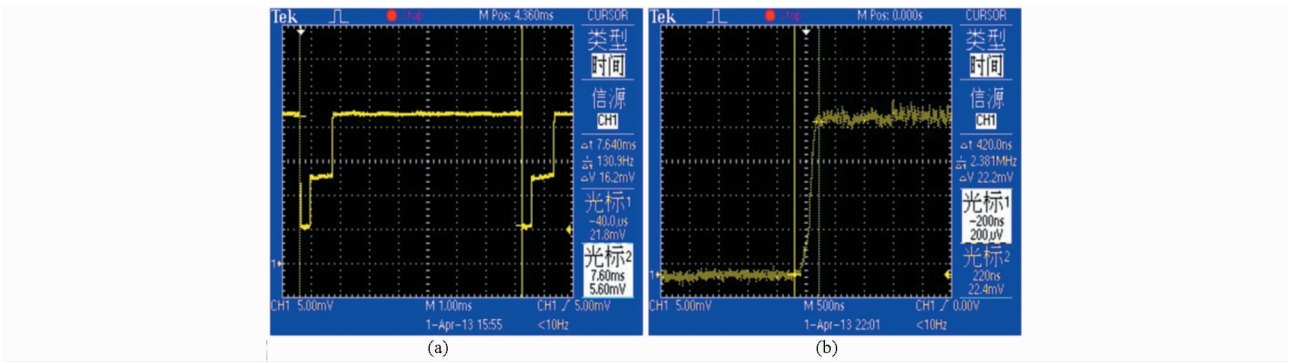


图 6 1 Ω 精密电阻电压波形

Fig. 6 Voltage waveform of the 1 Ω precise resistance
(a) 数据发送状态 (b) 数据接收状态

时间 T_{sd} 也基本一致。

表 2 所示为功耗测定结果。

表 2 试验结果
Tab.2 Test result

工作状态	工作电压	消耗电流	持续时间
空闲等待	$V_{idle} = 0.213\text{ mV}$	$I_{idle} = 0.213\text{ mA}$	
射频启动	$V_{st} = 12.8\text{ mV}$	$I_{st} = 12.8\text{ mA}$	$T_{st} = 0.8\text{ ms}$
数据发送	$V_{sd} = 22\text{ mV}$	$I_{sd} = 22\text{ mA}$	$T_{sd} = 6.4\text{ ms}$
数据接收	$V_{re} = 22.4\text{ mV}$	$I_{re} = 22.4\text{ mA}$	$T_{re} = 6.4\text{ ms}$

假设节点连续工作,一个工作周期内完成一次发送和一次接收,根据表 2 计算平均电流消耗

$$\bar{I} = \frac{12.8 \times 0.8 + 22 \times 6.4 + 22.4 \times 6.4}{0.8 + 6.4 + 6.4} \approx 21.6\text{ mA}$$

从表 2 结果中可以看出,任一工作状态下,节点电流消耗基本恒定,所以节点使用寿命计算式为

$$T = \frac{Q_{res}}{\sum I(t) \Delta t} \tag{3}$$

式中 Q_{res} ——电池容量

$I(t)$ ——对应状态下消耗电流

Δt ——对应状态持续时间

3.2 双电源电路性能测定

电池容量决定节点使用寿命,电池容量估计对节点寿命计算十分必要,采用安时积分法,即对电池放电电流与持续时间积分获得电池当前剩余能量。采用双路电池放电模块对双路 3 节南孚 AA 电池以 21.6 mA 放电电流进行放电试验,放电截止电压设定为 2.4 V,依据 TPS63031 放电性能得放电效率为 85%。表 3 为放电试验数据,绘制的放电曲线如图 7 所示。

试验测得未加 DC-DC 模块,两组电池放电至 3.3 V 时,电池容量分别为 2 230 mA·h 和 2 272 mA·h;加入 DC-DC 转换模块后,放电截止电压设为 2.4 V,测得电池放电容量分别为 2 737 mA·h 和 2 791 mA·h,则未加 DC-DC 模块和加 DC-DC 模块的平均使用

表 3 放电试验数据

Tab.3 Discharge test data

电池组	电池组能量/(mA·h)		能量提高
	无 DC-DC(3.3 V)	有 DC-DC(2.4 V)	百分比/%
电池 1 组	2 230	2 737	22.74
电池 2 组	2 272	2 791	22.84
平均能量	2 251	2 764	22.80
平均使用容量	1 913	2 349	22.80

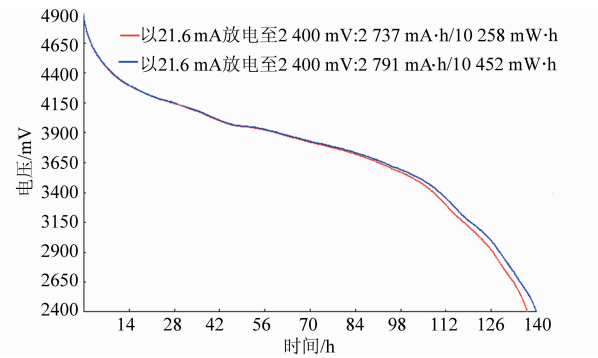


图 7 电池放电结果

Fig. 7 Battery discharge results

容量分别为

$$\frac{(2\,230 + 2\,272) \times 85\%}{2} = 1\,913\text{ mA}\cdot\text{h}$$

$$\frac{(2\,737 + 2\,791) \times 85\%}{2} = 2\,349\text{ mA}\cdot\text{h}$$

可用电池容量提高了 22.80%,延长了节点寿命。

3.3 节点寿命估算

节点不休眠状态和节点休眠时间为 T_s 状态时对应的节点寿命为

$$T_1 = \frac{Q_{res} (0.8 + 6.4 + 6.4 + T_s)}{12.8 \times 0.8 + 22 \times 6.4 + 22.4 \times 6.4 + 22.4 T_s} \tag{4}$$

$$T_2 = \frac{Q_{res} (0.8 + 6.4 + 6.4 + T_s)}{12.8 \times 0.8 + 22 \times 6.4 + 22.4 \times 6.4 + 0.213 T_s} \tag{5}$$

设休眠时间 T_s 为 30 min,则相同电池寿命下,

节点进行休眠的使用寿命约是未休眠使用寿命的 105 倍,且 T_s 越大,节点寿命越长。电池放电试验中已测定 3 节南孚 AA 电池平均使用容量为 $2\,349\text{ mA}\cdot\text{h}$,则可供节点有效运行约 $11\,019.8\text{ h}$ (约 459.2 d)。依据表 3 空闲等待电流 $I_{\text{idle}}=0.213\text{ mA}$,选取容量为 $2\,400\text{ mA}\cdot\text{h}$ 的纽扣电池 CR1220,则可保证节点至少达 $11\,267.6\text{ h}$ (约 469.5 d) 以上的连续休眠,所以节点实际寿命决定于 3 节南孚 AA 电池的供电寿命,即 $11\,019.8\text{ h}$ (约 459.2 d)。

4 结束语

针对温室环境信息采集周期性长,传输数据量

少的特点,设计了一款适用于温室环境的低功耗无线传感器节点。节点基于双电源供电架构,采用有限状态机模型设计,实现深度睡眠和周期性环境采集。试验测定 3 节南孚 AA 电池经电源管理电路给节点供电,有效电池容量可提高 22.8%。假设休眠时间为 30 min,该 3 节南孚 AA 电池可保证节点 $11\,019.8\text{ h}$ (约 459.2 d) 的可靠使用寿命,是不采用休眠机制节点的 105 倍。表明设计的节点可充分利用电池电量,降低节点功耗,有效延长节点使用寿命,为温室环境信息采集的可靠性与稳定性提供可靠保证。

参 考 文 献

1 李萍萍,王纪章. 温室环境信息智能化管理研究进展[J]. 农业机械学报,2014,45(4):236-243.
Li Pingping, Wang Jizhang. Research progress of intelligent management in greenhouse environmental information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):236-243. (in Chinese)

2 周长吉. 中国温室的发展与标准化进程[J]. 农业工程学报,2003,19(增刊 1):88-91.
Zhou Changji. The development and standardization process of Chinese greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(Supp. 1):88-91. (in Chinese)

3 何勇,聂鹏程,刘飞. 农业物联网与传感仪器研究进展[J]. 农业机械学报,2013,44(10):216-226.
He Yong, Nie Pengcheng, Liu Fei. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(10):216-226. (in Chinese)

3 彭里. 温室大棚检测控制系统研究[J]. 计算机工程,2000,26(12):194-195.
Peng Li. Study on control system of greenhouse[J]. Computer Engineering, 2000, 26(12):194-195. (in Chinese)

4 杜尚丰,李迎霞,马承伟,等. 中国温室环境控制硬件系统研究进展[J]. 农业工程学报,2004,20(1):7-12.
Du Shangfeng, Li Yingxia, Ma Chengwei, et al. Research progress of greenhouse environment control hardware system in China[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1):7-12. (in Chinese)

5 李洪文,高焕文,陈君达. 固定道保护性耕作的试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(4):73-77.
Li Hongwen, Gao Huanwen, Chen Junda. Experimental study on fixed way of conservation tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2000,16(4):73-77. (in Chinese)

6 Kim Y, Evans R G, Iversen W M. Evaluation of closed-loop site-specific irrigation with wireless sensor network[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009,135(1):25-31.

7 LópezRiquelmea J A, Sotoa F, Suardíaza J, et al. Wireless sensor networks for precision horticulture in southern Spain[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009,68(1):25-35.

8 乔晓军,张馨,王成,等. 无线传感器网络在农业汇总的应用[J]. 农业工程学报,2005,21(增刊 2):232-234.
Qiao Xiaojun, Zhang Xin, Wang Cheng, et al. Application of WSN in agricultural summary[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Supp. 2):232-234. (in Chinese)

9 郭文川,程寒杰,李瑞明,等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报,2010,41(7):181-185.
Guo Wenchuan, Cheng Hanjie, Li Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):181-185. (in Chinese)

10 张瑞瑞,赵春江,陈立平,等. 农田信息采集无线传感器网络节点设计[J]. 农业工程学报,2009,25(11):213-218.
Zhang Rui Rui, Zhao Chunjiang, Chen Liping, et al. Design of wireless sensor network node for farmland information acquisition[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11):213-218. (in Chinese)

11 王卫星,罗锡文,孙道宗,等. 面向茶园信息传输的无线传感器网络节点设计[J]. 农业工程学报,2011,27(5):169-173.
Wang Weixing, Luo Xiwen, Sun Daozong, et al. Design of wireless sensor network node for tea plantation information transmission[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5):169-173. (in Chinese)

12 姜晟,王卫星,孙道宗,等. 能量自给的果园信息采集无线传感器网络节点设计[J]. 农业工程学报,2012,28(9):153-158.
Jiang Sheng, Wang Weixing, Sun Daozong, et al. Design of energy self-sufficient wireless sensor network node for orchard information acquisition[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9):153-158. (in Chinese)

13 李宏亮,陈立平,张瑞瑞. 一种农业信息采集传感器网络节点和系统设计[J]. 计算机工程与科学,2010,32(11):29-32.
Li Hongliang, Chen Liping, Zhang Rui Rui. Design of a node and system for wireless sensor network used in agriculture information

- collection[J]. Computer Engineering & Science, 2010, 32(11):29–32. (in Chinese)
- 14 蔡文斌, 苏义鑫. 基于农业大棚低功耗无线环境监测系统的设计[J]. 华中农业大学学报, 2008, 27(4):549–552.
Cai Wenbing, Su Yixin. A low power wireless environmental surveying system based on agricultural greenhouse[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2008, 27(4):549–552. (in Chinese)
- 15 杨志勇, 王卫星. 无线传感器网络节点电源系统设计[J]. 通信电源技术, 2008, 25(6):63–64.
Yang Zhiyong, Wang Weixing. Design of wireless sensor network node power supply system[J]. Telecom Power Technologies, 2008, 25(6):63–64. (in Chinese)
- 16 王蔚云. 无线传感器网络节点低功耗设计与研究[D]. 南京: 东南大学, 2008.
Wang Weiyun. Research and design of low power wireless sensor network node[D]. Nanjing: Southeast University, 2008. (in Chinese)
- 17 彭继刚. 基于 ZigBee 在能耗评估系统中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2009.
Peng Jigang. Application in energy consumption evaluation system based on ZigBee[D]. Ji'nan: Shandong University, 2009. (in Chinese)
- 18 Wei Ye, Heidemarm J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]//Proceedings of 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002), 2002, 3:1567–1576.
- 19 Grieskampw, Gurevich Y, Schvltew, et al. Generating finite state machines from abstract state machines [J]. Software Engineering Notes, 2002, 27(4):112–122.
- 20 Habibi A, Moinudeen H, Tahar S. Generating finite state machines from system C[C]//Proceedings of 2006 Design, Automation and Test in Europe, DATE'06, 2006, 2:1–6.

Design of a Low-power Environmental Acquisition Node Based on Dual-power Structure for Greenhouse

Shen Mingxia Liu Zheng Xiong Yingjun Sun Yuwen Lu Mingzhou Liu Longshen
(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: To improve battery energy efficiency and reduce power consumption of wireless collection nodes for greenhouse environment, hardware design for Greenhouse Wireless Acquisition nodes is achieved by low-power 16-bit MCU (MSP430F149) and RF module CC1101. Power management module is designed based on chip TPS63031 to implement dual-power supply, which allows nodes' power supplied respectively by three Nanfu-AA batteries and one 3 V button battery under working and sleeping mode. And 22.8% usable energy of batteries is improved effectively by using the DC–DC conversion. FSM module is adopted to software protocol design, implementing nodes' task scheduling between working mode and sleeping mode. When the LPM3 mode is entered, node's power consumption is greatly reduced. The discharge experiment of batteries and test of nodes performance show that design of power supply scheme in this paper guarantees node work for 11 019.8 h (about 459.2 d), with the setting of 30 min acquisition cycle.

Key words: Greenhouse environment WSNs node Dual-power Low power