

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.2014.01.012

基于 CC2530 的无线自组网太阳能路灯控制系统

刘玉良, 杨伟明, 张志允

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘要: 为解决现有太阳能路灯控制器硬件成本高、通信效果差等问题, 基于美国德州仪器公司 ZigBee 模块 CC2530 设计了具有无线自组网功能的太阳能路灯系统. 详细阐述系统的硬件设计和上位机、下位机软件设计. 在控制器电压、电流采集电路应用了负阻转换器(NIC)设计, 使蓄电池电压可更真实地反馈到运算放大器的反向输入端; 过采样技术的运用使采集到的电压、电流值更精确. 现场测试结果表明, 该系统不仅实现了无线自组网、数据采集、控制等功能, 而且提高了通信质量, 降低了系统的制造成本.

关键词: 无线自组网; 太阳能路灯控制器; Z-STACK; 状态机

中图分类号: TK513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2014)01-0059-06

Solar Energy Streetlight Control System Based on Wireless Ad Hoc Network with CC2530

LIU Yuliang, YANG Weiming, ZHANG Zhiyun

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to solve the problem of high costs, poor communications effect of the solar energy streetlight control system, a new design of control system with wireless Ad Hoc network was developed based on TI CC2530 model. The hardware and software of the system were described. The design of controller adoption NIC was applied in order to calculate the battery voltage feed back on the inverting input of the amplifier more accurately. Over sampling was also used to make the measurement more precise. Field test showed that the new system can not only realize the function of wireless Ad Hoc network and better data collection, but also reduce the cost of the system greatly.

Key words: wireless Ad Hoc network; solar energy streetlight control system; Z-STACK; state machine

光伏照明作为新能源、新光源领域的新兴产业, 能提供夜间道路照明, 其不消耗电网电能、不架设输电线路、不污染环境、产品附加值高. 在稳定国际市场的同时, 大力开拓国内市场, 光伏照明发展的前景广阔^[1-3].

光伏照明的主要应用就是太阳能路灯. 现有的太阳能路灯控制器一般为单机版和网络版. 单机版通常按照独立光伏系统设计. 控制器只监测本路灯的太阳能电池板、蓄电池电压, 采用电流控制路灯的开启、关闭, 多采用恒流模式充电. 这种单机版的控制器不能实时监测太阳能路灯的状况, 例如灯具损坏、太阳能电池板损坏等故障, 要由巡视人员进行定

期检查, 提高了太阳能路灯的维护成本. 网络版太阳能路灯控制器利用 Internet 网络或手机网络对路灯系统工作状况进行远程监控和汇总^[4-7]. 由于 Internet 网络需要铺设网络线路, 应用场合受限制. 手机网络需配置的无线通信设备及通信费用的成本较高, 实用性不好. 杨超等^[8]提出利用无线自组网来控制太阳能路灯系统, 通过分离的控制器与无线透传自组网节点实现路灯系统的自动控制. 在系统实现过程中, 每个太阳能路灯配备 1 个控制器和 1 个无线节点. 控制器仅作为 1 个多节点控制终端, 成本较高, 而且控制器与无线自组网节点间的串口通信干扰较大, 通信效果不好.

收稿日期: 2013-10-12; 修回日期: 2013-11-13

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金资助项目(20130707); 天津科技大学科学研究基金资助项目(20110123)

作者简介: 刘玉良(1972—), 男, 河北迁安人, 副教授; 通信作者: 杨伟明, 实验师, yangwm@tust.edu.cn.

近年来,一种短距离、低功耗的无线通信网络模块——ZigBee 模块在自动控制领域得到了迅速的应用. 本文基于美国德州仪器公司 CC2530F256 微控制器设计了无线自组网太阳能路灯控制系统,具有数据采集、终端控制和自组网功能,能实时监控太阳能路灯系统的工作,同时降低了硬件成本,提高了通信质量.

1 系统工作原理

无线自组网太阳能路灯控制系统结构如图 1 所示. 系统由上位机与 ZigBee 无线路灯网络组成. 上位机与 ZigBee 无线路灯网络通过协调器相连;协调器通过 ZigBee 协议接收无线路灯网络上传的数据,然后通过 RS-232 与上位机通信,并接收上位机控制命令下发给无线路灯网络.

上位机监控系统具有路灯监控、控制参数设置、ZigBee 无线数据通信等功能;此外,可根据需要打开

或关闭单灯、组灯,可通过控制单灯电流,达到节能目的;可对路灯模块数据通信超时、状态出错、灯具故障等进行报警,可报告故障路灯的位置,以便及时维修,保证灯亮率.

协调器负责网络的建立及参数配置. 组建网络包括网络初始化及节点加入网络 2 个主要步骤^[9].

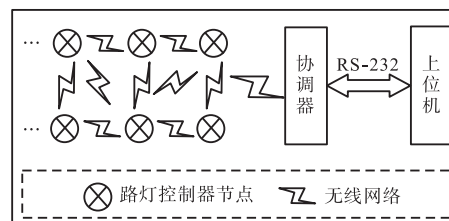


图 1 无线自组网太阳能路灯控制系统结构框图

Fig. 1 Structure diagram of the solar energy streetlight control system based on wireless Ad Hoc network

太阳能路灯控制器节点是无线路灯网络的重要组成部分. 节点由太阳能电池板、太阳能路灯控制器、蓄电池和灯具等组成,如图 2 所示.

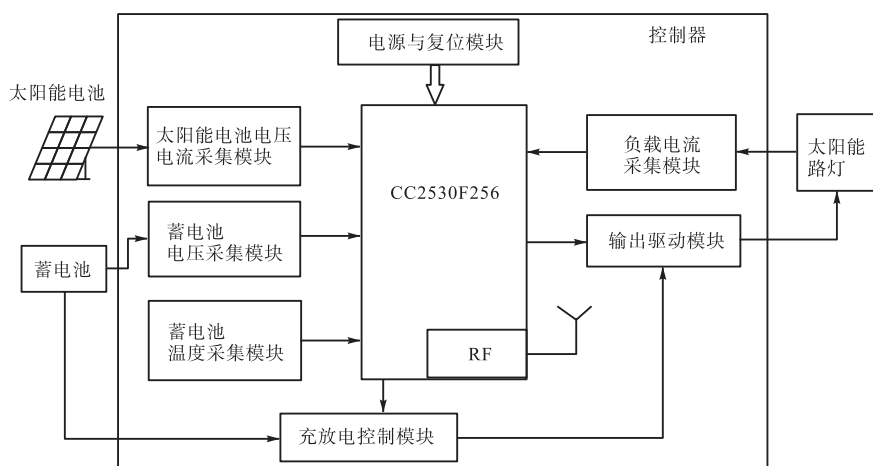


图 2 太阳能路灯控制器节点结构框图

Fig. 2 Structure diagram of the solar energy streetlight control unit

太阳能路灯控制器在无线自组网太阳能路灯系统中起重要作用,其控制功能有:(1)当外界光照条件符合要求时,控制太阳能电池板向蓄电池充电,当光照条件变化时,如黑夜或自然照明条件差时,控制蓄电池向负载供电;(2)通过对太阳能电池板和蓄电池电量进行精确检测,防止蓄电池过充与过放,延长蓄电池使用寿命;(3)通过时控与人工控制确定路灯负载情况,使路灯工作更加人性化,从而延长系统的使用寿命,节约能源;(4)控制路灯节点稳定运行、自动加入无线网络、接收并执行上位机的控制命令、上

传节点数据.

2 硬件设计

无线自组网太阳能路灯控制系统的控制器采用 CC2530F256. 它提供了 1 个真正的片上系统 (SoC) 解决方案,能够以较低的成本建立强大的网络节点,其整合了领先的 RF 收发器、增强型 8051CPU、强大的 AES-128 安全加密功能、2 个可支持多种串行通信

协议的 USART、具有 12 位分辨率可配置的 ADC 和 8 路输入, 并且具有不同的运行模式, 使得此控制器尤其适应超低功耗要求的系统. 由于具有高集成度和强大的功能, 使得 CC2530F256 只需很少的外围设备, 就可搭建无线自组网络系统.

系统采用阀控密封式铅酸 (valve-regulated lead acid, VRLA) 蓄电池, 整体密封, 不存在普通铅酸蓄电池的气胀、电解液渗漏等现象, 安全可靠、使用寿命长. 但是, 过充电会引起 VRLA 蓄电池正极析氧, 促使活性物质与板栅结合力变坏, 导致蓄电池容量下降. 过放电还会导致 VRLA 蓄电池表面生成 PbSO_4 结晶, 降低极板活性物质的孔率, 缩短使用寿命. 所以, 控制器必须具有良好的防过充、过放电功能.

2.1 VRLA 蓄电池阈值电压温度补偿

VRLA 蓄电池的阈值电压与温度有很大关系, 充

电器的输出电压必须随 VRLA 蓄电池的电压温度系数改变. 系统采用 DS18B20 数字温度传感器, 将 DS18B20 通过液态硅胶紧贴在 VRLA 蓄电池表面采集 VRLA 蓄电池外壳的表面温度. VRLA 蓄电池的充电阈值电压补偿系数 a 为 $-4 \text{ mV}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{单体})$, 补偿后阈值电压^[10]为 $U_h = U + an(t - 25)$, 其中 U 为 25°C 时的标准阈值电压, t 为 VRLA 蓄电池外壳的表面温度, n 为串联单体数.

2.2 VRLA 蓄电池充、放电电路

VRLA 蓄电池充电电路工作在浮充、均充、停止充电状态, 并在浮充、均充、停止充电间自动切换. VRLA 蓄电池放电电路工作在稳流放电、停止放电状态, 并当蓄电池低于放电电压时自动切换到停止放电状态. VRLA 蓄电池充、放电电路如图 3 所示.

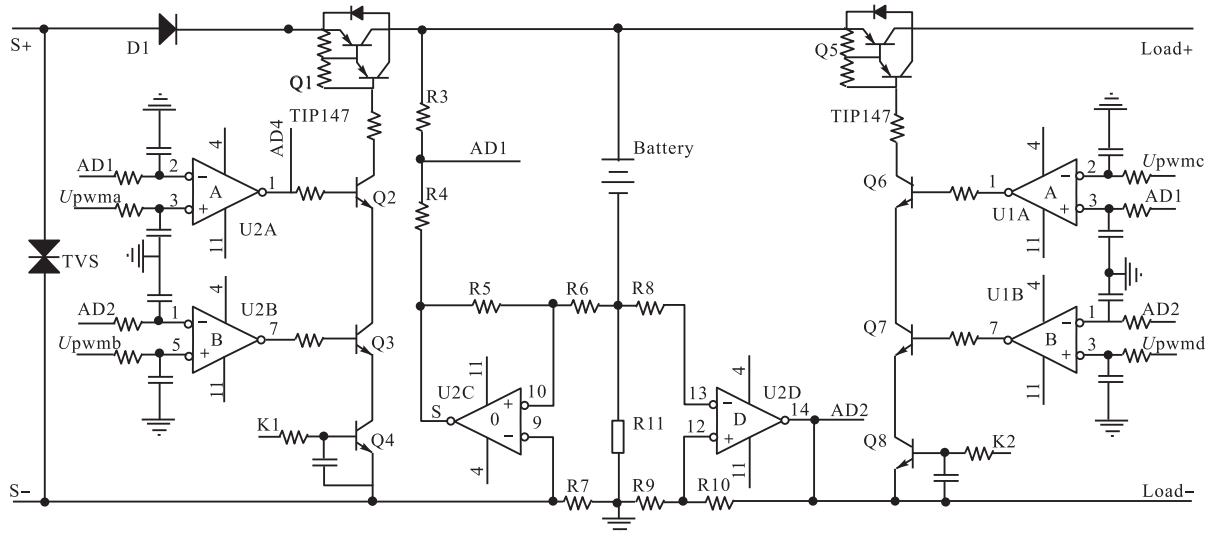


图 3 VRLA 蓄电池充、放电电路

Fig. 3 Circuit of charge and discharge of the VRLA

运算放大器 U2A、U2B、U2C、U2D, 大功率达林顿三极管 Q1, 三极管 Q2、Q3、Q4 等组成蓄电池充电电路. 其中 Q4 由程序控制, 从而控制充电电路是否工作: 当 K1 输入高电平, Q4 饱和导通, 充电电路正常工作; 当 K1 输入低电平, Q4 截止, 关闭充电电路^[11].

运算放大器 U2C 用来消除电流取样电阻 R11 上的压降对蓄电池电压测量的影响, 它与 R6、R7 组成负阻转换器 (NIC)^[12], 以提高蓄电池电压采样精度. R11 上的压降为正, U2C 与 R5、R6、R7 组成反向差动放大器, 输出电压为负, 目的是在 AD1 的取样信号中减去 R11 上的压降, 采集到真实的蓄电池电压值. 输出电压经 R3、R4 组成的分压电路由 AD1 输

出做相应处理, 同时送入 U2A 反向输入端, 完成充电电压调节^[13].

充电电路中电压调整三极管 Q1 的输出电压为

$$U_{\text{out}} = \frac{R_3 + R_4}{R_4} U_{\text{pwma}} + \left[-\frac{R_3}{R_4} \left(-\frac{R_5}{R_6} I_{\text{out}} R_{11} \right) \right] \quad (1)$$

R11 上的电压为

$$U_{R11} = I_{\text{out}} R_{11} \quad (2)$$

蓄电池电压为

$$U_{\text{Bat}} = U_{\text{out}} - U_{R11} \quad (3)$$

将式(1)、式(2)代入式(3)得

$$U_{\text{Bat}} = \frac{R_3 + R_4}{R_4} U_{\text{pwma}} + \left[-\frac{R_3}{R_4} \left(-\frac{R_5}{R_6} I_{\text{out}} R_{11} \right) \right] - I_{\text{out}} R_{11}$$

式中: I_{out} 是流经 VRLA 蓄电池的电流; U_{pwma} 为运算放大器 U2A 输入端的电压. 当满足 $\frac{R_3}{R_4} \times \frac{R_5}{R_6} = 1$ 时, 能够消除蓄电池电流取样电阻上的压降对蓄电池电压采样的影响, 得到

$$U_{Bat} = \frac{R_3 + R_4}{R_4} U_{pwma}$$

设 U_h 为 VRLA 蓄电池温度补偿后浮充电压值, I_q 为蓄电池均充电流值. 设置 $U_{pwma} = U_h$, 当 $U_{Bat} > U_{pwma}$ 时, U2A 工作在比较器状态, U1A 输出低电平, 截止, 充电停止, 实现防过充功能; 当 $U_{Bat} < U_{pwma}$ 时, U2A 工作在线性放大器状态, 此时 U2A 输出控制 Q2 实现浮充功能; 当 $U_{Bat} \ll U_{pwma}$ 时, U2A 工作在比较器状态, U1A 输出高电平, 饱和导通, 此时由 U_{pwmb} (运算放大器 U2B 输入端的电压) 控制 Q3, 实现均充.

U2B、U2D 与三极管 Q3 等组成稳流电路. 取样电阻 R11 上流过的电流与 U2D 组成跨阻放大器, 输出电压送入由 U2B 组成的反向放大器, 完成电流调节和均流充电, 电流值由式 (4) 得出.

$$I_{out} = U_{pwmb} / \frac{(R_9 + R_{10})R_{11}}{R_9} \quad (4)$$

充电电路工作在浮充、均充是由微控制器通过 AD4 端口测量运放 U2A 输出电压进行控制的, 当 U2A 输出电压 $> 11\text{ V}$, Q2 工作在饱和导通状态, 充电模式为由 U_{pwmb} 控制的均充. 当 U2A 输出电压 $< 1\text{ V}$ 时, 充电模式为由 U_{pwma} 控制的浮充模式.

由 U1A、U1B、Q5、Q6、Q7、Q8 等组成的放电电路可工作在稳流放电、停止放电状态. 当蓄电池低于放电电压时, 自动切换到停止放电状态, 工作原理与充电电路原理相同.

3 软件设计

软件设计包括上位机监控软件与下位机软件. 下位机软件包括路灯控制器节点软件和协调器软件, 路灯控制器节点软件实现数据采集、接收并转发数据的路由功能; 协调器软件实现组网, 按照 ZigBee 协议接收无线网络中节点数据并通过 RS-232 与上位机监控软件进行数据交互.

3.1 下位机软件

下位机软件基于 Z-STACK 协议栈进行开发, Z-STACK 协议栈提供名为操作系统抽象层 OSAL 的协

议栈调度程序, 其库代码封装了 ZigBee 协议栈的实现细节, 向开发人员提供 ZigBee 协议描述的各层功能组件模块的 API 接口. 开发人员在协议栈调度程序中调用 API 接口进行应用程序开发, Z-STACK 底层封装了自动组建网络、加入节点、数据收发等功能, 其应用程序开发包括为 3 个步骤: (1) 应用程序涉及的软、硬件初始化编码; (2) 在 Z-STACK 协议栈中注册该事件编码; (3) 在合适的地方调用功能函数编码. 在协议栈中, 每个任务都是 1 个事件, 且有相应的标志位. 协议栈以任务轮询方式工作, 轮流查询所有标志位, 若标志位有效, 则调度程序执行该任务事件处理函数; 若同时有多个事件发生, 则调度程序根据优先级顺序执行相应事件处理函数. 图 4 为 Z-STACK 协议栈工作流程.

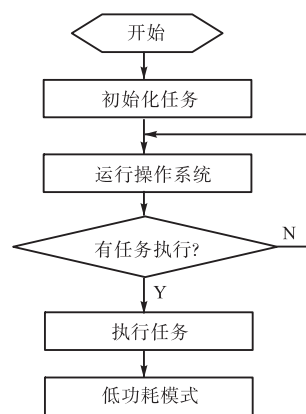


图 4 Z-STACK 协议栈工作流程

Fig. 4 Working process of the Z-Stack

应用软件是在 Z-STACK 提供的示例工程 SampleApp.eww 基础上开发的. 首先在 APP 文件夹中 SampleApp.c 与 SampleApp.h 中用户添加事件初始化函数, 包括定时器、I/O 口、ADC、PWM 初始化和事件处理函数; 其次在 SampleApp_Init() 函数中调用应用程序初始化函数与注册任务号, 进行功能初始化并把相应的事件号添加到协议栈的事件数组中; 最后根据要求触发该事件来调用用户功能函数, 把采集到的数据通过 void SampleApp_SendPeriodicMessage(void) 函数发送出去, 或者将通过 void SampleApp_MessageMSGCB(aInComing MSGPacket_t *pkt) 函数接收到的数据进行解析、处理.

在事件处理函数中, 对电压、电流数据采集应用过采样技术. 过采样是牺牲速度来换取分辨率的软件手段, 在软件中将 1 个和采样频率相关的 PWM 白噪声叠加到输入端, 按照过采样理论, 增加 4 倍采样

可提高 1 位分辨率, 增加 256 倍采样, 理论上可提高 4 位分辨率, 此时 ADC 每秒采样 4 000 次, 能够满足系统需要. 采用过采样技术使 CC2530 片上 ADC 的分辨率由 12 位提高到 16 位^[14-15], 大大提高了数据采集的精度.

编译 SampleApp 工程后, 通过 CoordinatorEB-Pro 下载程序到协调器中. 协调器运行软件后, 能够自动加入无线网络, 收发无线自组网中数据, 也能够通过串口与上位机进行数据交互.

3.2 上位机软件

在上位机软件中主要实现了以下 3 个功能:

(1) 协调器与上位机监控软件通过 RS-232 串口通信. 首先把 SerialPort 控件添加到主窗口中, 选择 DtaReceived 事件生成 SerialPort1_DataReceived() 函数, 初始化串口属性. DataReceived 事件是在辅线程被触发的, 当接收到 1 条完整的数据返回主线程中处理时, 需要进行跨线程处理. 程序采用同步委托方法 Invoke. 首先声明委托 delegate void mydelegate1 (StringBuilder sb), 其次定义 1 个委托实例并实例化委托对象 mydelegate1 mydelegate = new mydelegate1 (updateReceiveSB), 然后定义 1 个实例方法 private void updateReceiveSB (StringBuilder sb), 最后进行调用 this.Invoke(mydelegate, sb).

(2) 协调器与上位机监控软件之间传输数据的编码与解码, 解析出控制命令与数据. 监控软件处理协议数据时采用有限状态机模式, 把复杂的协议数据分解成有限个稳定的状态, 在每个状态上判断事件, 将连续处理变为离散数字处理, 符合计算机的工作特点, 同时因为有限状态机具有有限个状态, 所以在实际的工程中更容易实现.

(3) 实时对上传的数据进行解析, 并根据解析的控制命令字和数据进行快速响应处理, 程序采用事件触发方式对采集到的数据进行实时处理. 以上传模块控制测试数据事件为例:

首先定义委托 public delegate void delegateRequestUploadModuleTstData (string recStr);

定义事件 public event delegateRequestUploadModuleTestData eventRequestUploadModuleTestData;

定义事件触发函数 public void requestUploadModuleTestDataFun () {

eventRequestUploadModuleTestData (_recStr); }.

然后, 在可能有该事件产生的窗口中注册该事件 mainform.eventRequestUploadModuleTestData += ret-

SuccessRequestUploadModuleTestData. 其中 retSuccessRequestUploadModuleTestData 为该事件处理函数.

最后, 在产生该事件的地方调用事件触发函数 requestUploadModuleTestDataFun () .

4 测试实验

基于 CC2530 无线自组网太阳能路灯系统方案已在常州某太阳能电池板公司的厂区道路进行了性能测试, 包括无线自组网测试和远程控制测试. 厂区铺设太阳能路灯的道路宽约 10 m, 两路灯间距约 40 m, 共 50 盏路灯、1 台上位机与 1 个协调器组成测试系统.

无线自组网测试分别在晴天、雾天、阴天和雨天 4 种天气条件下进行. 为了简化测试, 在测试自组网成功率时屏蔽了传感器数据发送环节. 测试表明, 在实验条件下节点的组网成功率均达到 100%.

进行远程控制测试实验时, 厂区的车辆较少, 基本上没有障碍物, 在上位机操作界面对太阳能路灯的平均响应时间进行测试. 将 50 个路灯节点平均分为 5 组, 进行了全开、全闭、组开、组闭、单灯控制和上传数据 6 项控制, 结果见表 1.

表 1 太阳能路灯远程控制测试结果

Tab. 1 Result of remote control test of the solar energy streetlight control system

实现功能	传输模式	响应时间/s
全开	单向	2 ~ 3
全闭	单向	2 ~ 3
组开	单向	3 ~ 4
组闭	单向	3 ~ 4
单灯控制	单向	6 ~ 10
上传数据	双向	10 ~ 12

测试结果表明: 该设计性能组网稳定, 在有效距离内, 能准确控制路灯的亮与灭; 电路设计和通信方式的改进, 使得控制器的利用率较高, 降低了硬件成本, 也明显改善组网、数据传输通信质量; 系统实现了数据采集、控制等功能, 提高了设备的智能化控制程度, 方便对照明系统进行管理.

5 结 语

本文以 ZigBee 模块 CC2530 为控制核心, 实现了无线自组网太阳能路灯系统设计, 实现了过充、过

放保护和温度补偿功能,并进行了测试.设计中利用电流采样电阻分压技术进行补偿,使得测量值更接近蓄电池端电压.利用过采样技术,进一步提高了电压测量精度.由于硬件结构和通信方式的改进,控制器的利用率较高,降低了硬件成本,也明显改善通信质量.

该无线自组网系统不仅可以应用在太阳能路灯控制,还可以推广应用到农业节水灌溉、池塘水产养殖等无人值守现场的监测和控制.

参考文献:

- [1] 魏政,于冰清.我国光伏产业发展现状与对策探讨[J].中外能源,2013,18(6):15-24.
- [2] 付静.我国光伏产业国际竞争力现状及提升路径[J].河北大学学报:哲学社会科学版,2013,38(2):53-57.
- [3] Femia N, Fortunato M, Vitelli M. Light-to-light: PV-fed LED lighting systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8): 4063-4073.
- [4] 白金柯.基于手机网络的太阳能路灯远程监控系统设计[J].价值工程,2011(35):168-169.
- [5] Muselli M, Notton G, Louche A. Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management[J]. Solar Energy, 1999, 65(3): 143-157.
- [6] Tse K K, Ho M T, Chung H S H, et al. A novel maximum power point tracker for PV panels using switching frequency modulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(6): 980-989.
- [7] Alippi C, Galperti C. 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.
- [8] 杨超,王雷.无线自组网太阳能路灯控制器设计[J].自动化仪表,2012,33(5):25-27,31.
- [9] Gislason D. ZigBee Wireless Network[M]. Amsterdam, Holland: Elsevier, 2008.
- [10] 周志敏,纪爱华.太阳能LED路灯设计与应用[M].2版.北京:电子工业出版社,2012.
- [11] 铃木雅臣.晶体管电路设计[M].周南生,译.北京:科学出版社,2011.
- [12] 赛尔吉欧·弗朗哥.基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M].刘树棠,朱茂林,荣玫,译.3版.西安:西安交通大学出版社,2011.
- [13] 冈村迪夫.OP放大电路设计[M].王玲,徐雅真,李武平,译.北京:科学出版社,2010.
- [14] 杨伟明,刘全玺,刘成臣,等.基于STM32微控制器的数控稳压稳流电源设计[J].天津科技大学学报,2012,27(5):56-60.
- [15] 施文康,余晓芬.检测技术[M].3版.北京:机械工业出版社,2010.

责任编辑:常涛

(上接第50页)

- [15] Kappas I, Abatzopoulos T J, Van Hoa N, et al. Genetic and reproductive differentiation of *Artemia franciscana* in a new environment[J]. Marine Biology, 2004, 146(1): 103-117.
- [16] 张波,郭金昌,商占恒,等.旧金山湾卤虫(*Artemia franciscana*)在中国渤海湾地区的引种[J].海湖盐与化工,1993,22(3):7-9.
- [17] Tackaert W, Sorgeloos P. Biological management to improve *Artemia* and salt productions at Tanggu Saltworks in the P. R. China[C]// Cheng L. Proceeding of International Symposium on Biotechnology of Saltponds. Tanggu: Salt Research Institute, 1991: 78-83.
- [18] 管越强,张道川,印象初.渤海湾海丰盐场卤虫种类组成与生殖特性[J].海洋环境科学,2003,22(4):1-3.
- [19] 王婧,隋丽英,贺华,等.山东埕口盐场海欣分场卤虫种群生态调查[J].生物学杂志,2012,31(11):2848-2854.
- [20] 苏秀榕,李太武,欧阳芬,等.卤虫卵营养价值的研究[J].营养学报,1997,19(1):119-121.
- [21] 陈立新,葛国昌.我国若干地区所产卤虫卵及幼虫的主要营养成分[J].海洋通报,1996,15(3):19-27.
- [22] 黄旭雄,陈马康,魏文志.几种植物浆养殖卤虫的饵料效果[J].水产学报,2000,24(3):254-258.
- [23] Léger P, Bengtson D A, Simpson K L, et al. The use and nutritional value of *Artemia* as a food source[J]. Oceanography and Marine Biology, 1986, 24: 521-623.

责任编辑:周建军