

# 太阳能 LED 路灯照明系统优化设计<sup>\*</sup>

陈 维<sup>1,2</sup>, 沈 辉<sup>2</sup>, 孔贤<sup>2,3</sup>, 邓幼俊<sup>2</sup>

- (1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510070;  
2. 中山大学物理科学与工程技术学院 // 太阳能系统研究所, 广东 广州 510275;  
3. 深圳珈伟实业有限公司, 广东 深圳 518001)

**摘 要:** 在珠海完成国内第一个太阳能 LED 路灯示范工程的工作基础上, 从路灯光源、控制电路、太阳电池组件最佳倾角确定、太阳电池组件和蓄电池容量确定等几个方面对太阳能路灯进行了设计优化, 做到既能保证系统的稳定可靠运行, 又能尽量减少系统规模和降低成本。结果表明采用 LED 作为路灯光源、直接耦合的方式的充放电控制器是太阳能路灯很好的选择, 同时通过科学计算的方法对在珠海地区使用时太阳电池组件最佳倾角和组件和蓄电池容量进行了讨论。使用的方法和结论可以为的其他的太阳能路灯设计提供有力的帮助。

**关键词:** 太阳能路灯; 半导体照明; 太阳电池; 系统设计; LED

**中图分类号:** TK512      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0529-6579 (2005) S2-0095-04

在世界能源短缺, 环境污染日益严重的今天, 充分开发并利用太阳能是世界各国政府可持续发展的能源战略决策。太阳能路灯以其不用专人管理和控制, 安装一次性投资无需日后电费开支, 无需架设输电线路或挖沟铺设电缆, 可以方便安装在广场、校园、公园、街道等多方面的优点而越来越受重视。中山大学太阳能系统研究所在珠海清华大学科技园安装了 41 盏采用白光超高亮度 LED 作为光源的太阳能路灯, 到目前已经正常运行将近两年, 结合运行中遇到的问题, 通过科学计算的方法, 对太阳能路灯进行了设计优化, 做到既能保证系统的稳定可靠运行, 又能尽量减少系统规模和降低成本。太阳能路灯照明系统通常由太阳电池组件、蓄电池、光源、控制器 (交流光源还需逆变器) 等几部分组成。本文从: ①光源选择; ②控制电路; ③太阳电池板最佳倾角确定; ④太阳电池组件和蓄电池容量确定等几个方面对在珠海运行的太阳能路灯照明系统进行了设计优化。

## 1 路灯光源

太阳能路灯与普通路灯不同, 它采用太阳电池作为唯一的供电电源, 因为目前太阳电池组件的成本还比较高, 所以为了降低系统成本, 必须使用高效的光源。LED 是一种能够将电能转化为可见光的半导体发光器件, 近年来 LED 技术已经有了关键的突破, 其性能价格比也有较大的提高, 如表 1 所

示, 与传统的路灯光源相比 LED 光源具有光效率高, 接近白炽灯的两倍, 寿命长, 可达到 10<sup>5</sup>h 以上; 传统的光源功耗比较大, 而且大多在高压下工作, 使用升压逆变环节又降低了能源利用率, 而 LED 采用低压直流供电, 安全而且光源控制成本低, 使调节明暗, 频繁开关成为可能。

表 1 常用路灯光源技术性能  
Tab. 1 The technical performance for light source of common street lamp

| 种类   | 光效/lm W <sup>-1</sup> | 色温 /K          | 平均寿命 /h   | 供电    |
|------|-----------------------|----------------|-----------|-------|
| 白炽灯  | 15                    | 2800           | 1000      | 交流    |
| 卤钨灯  | 25                    | 3000           | 2000—5000 | 交流/直流 |
| 荧光灯  | 70                    | 全系列            | 10000     | 交流/直流 |
| 高压钠灯 | 100—120               | 1950/2200/2500 | 24000     | 交流    |
| 高压汞灯 | 50                    | 3300—4300      | 6000      | 交流    |
| LED  | 25                    | 6400(超高亮、白光)   | 100000    | 直流    |

## 2 控制电路

太阳能路灯系统一般都是小型光伏系统, 世界银行的标准是小型光伏系统控制器自耗电流要小于额定工作电流的 1%, 因此控制器电路的设计与低功耗器件的选择非常重要。珠海太阳能路灯中采用的是由集成运放构成的电压比较器作为控制电路, 这种电路完全是由硬件组成的控制系统, 简单可靠、维护方便、成本低、电路本身功耗也极低, 是一种匹配性很好的电路。这种电路的关键是针对蓄

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2005—08—10  
基金项目: 国家十五科技攻关资助项目 (2004BA411A09, 2004BA411A19); 广东省科技计划资助项目 (2004A11005002)  
作者简介: 陈维 (1977 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 沈辉; E-mail: shenhui1956@163.com  
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电池的充放电特性设计一个比较好的电压回差，同时器件的选择要可靠，再加上发光二极管构成的充放电状态指示电路，便成了一个具有实用功能的控制器电路，具有防蓄电池过放电、过充电功能。

本系统采用直接耦合的方式的充放电控制器电路，根据 LED 同蓄电池的匹配特性，能够做到功率自适应，在太阳辐照不足的几个月，由于蓄电池的充电状态通常较低，使蓄电池放电时端电压也较低，这样负载工作电流较小、功率小，系统也能够工作更长的时间。反之在太阳辐照比较充足时，负载工作电流较大、功率大，也会更亮。

3 确定太阳电池板最佳倾角

在独立光伏系统设计中，太阳电池组件平面通常朝向赤道，相对地平面有一定倾角。由于太阳辐照量随季节、气候变化，倾角不同，各个月方阵面接受到的太阳辐照量差别很大，而且由于蓄电池在充电时受其额定容量限制，放电时又受到放电深度限制，因此在太阳能路灯优化设计中，要按照负载情况，当地气候状况、地理条件来确定最佳倾角，使方阵平面上的太阳辐照量尽量满足连续性、均匀性，极大性的要求，降低系统成本。

3.1 负载情况

太阳能路灯类产品主要有定时和光控两种工作方式，实际上是衡型负载方式和季节性负载方式工作。定时控制：不受外界影响，定时开关灯，但是存在天黑灯不亮或天亮灯还亮的问题。光控太阳能路灯在户外光线暗到一定程度（200 lx）时自动开灯，天亮时自动关灯，优点是可以根据光照情况自动控制光源工作，不存在天未黑光源就工作和天已黑还不工作的情况，一年四季均可以正常工作。

光控方式的工作时间与当地的纬度和当日的太阳赤纬相关。由日出和日落的时角公式：

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan \phi \tan \delta] \quad (1)$$

$\phi$ —纬度； $\delta$ —赤纬，当天赤纬角为在太阳时正午，光线与赤道平面的夹角。

在通常情况下，日出前 0.5 h 和日落后 0.5 h，虽然没有日照，但是天空尚有余光，这是可以不需要开灯照明，因此光控太阳能路灯工作时间可以减少 1 h，可以用下面公式计算路灯工作时间为：

$$T = 23 - 2 / 15 \cos^{-1}[-\tan \phi \tan \delta] \quad (2)$$

通过公式（2）计算，可得到安装在珠海的光控太阳能路灯全年工作时间变化图 1，从图中可以看出光控太阳能路灯最长工作时间在冬至，为 12.35 h，在夏至时最短工作时间 9.65 h；由于珠海地区纬度比较低，光控太阳能路灯全年日工作时间变化不是

很大，因此虽然该处光控太阳能路灯是季节性不均衡负载，但是负载量变化不是很大，负载情况不是影响太阳电池组件最佳倾角的主要因素。再考虑到控制开关灯的可靠性和控制器成本，在珠海设计的太阳能路灯采用的光控方式工作。

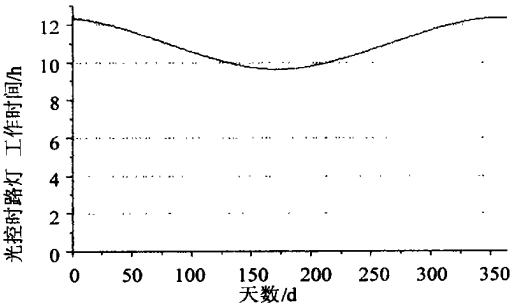


图 1 珠海光控太阳能照明系统全年工作时间变化  
Fig 1 The variety of working period illuminating system by light control ling at Zhuhai

3.2 气候情况

珠海市地处北回归线以南，属亚热带海洋性季风气候，光照充足。太阳辐射年总量为 4 651.6 MJ/m<sup>2</sup>，是广东省内太阳能资源较丰富的地区之一。从图 2 可以看出，珠海地区一年中总辐射量最少的时段是春季，阴雨天气比较多，大气透明度差，中、低云层经常布满天空，该段时间散射辐射量在总辐射量中占的比例很高，从表 2 可以看出 2 月份的散射辐射量比例是全年最高值达到 65.6%；夏季主要是晴热天气，阳光充足，水平面上太阳辐照度是全年最大的，而且太阳辐照量中直接辐照占的比例很高；秋季的珠海地区秋高气爽，晴空万里，虽然太阳高度角相逐渐减小，但是太阳辐照量仍然比较高；冬季，晴天居多，尤其是前冬，雨量稀少。

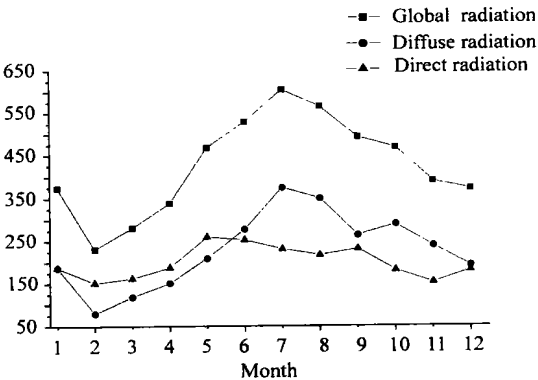


图 2 珠海地区月平均太阳辐照量变化  
Fig2 Monthly average of global diffuse and direct solar radiation at Zhuhai

表 2 珠海地区月平均辐照量中散射辐照比例

Tah 2 The percentage of diffuse radiation among monthly average global radiation at Zhuhai

| 月份   | 1月    | 2月    | 3月    | 4月    | 5月    | 6月    | 7月    | 8月    | 9月    | 10月   | 11月   | 12月   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 散射比例 | 50.0% | 65.6% | 57.7% | 55.3% | 55.4% | 47.6% | 38.1% | 38.2% | 46.7% | 38.5% | 38.9% | 48.5% |

3.3 倾斜面太阳辐照度计算

倾斜面上太阳辐照计算一般是以过去 10—20 年的气象资料数据作为依据，在提供的水平面太阳辐照量数据基础上，可以使用 Hay<sup>[1]</sup> 提出的天空散射辐射各向异性的模型算出朝向赤道不同倾角的方阵面上所接苏到的太阳辐照量。

其表达式为：

$$H_T = H_B R_B + H_D [R_B H_B / H_0 + 0.5 (1 - H_B / H_0) (1 + \cos \beta)] + 0.5 \theta H (1 - \cos \beta) \tag{3}$$

$$R_B = \cos \theta_i / \cos \theta_z$$

入射角： $\theta_i = \cos^{-1} [\cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos (\gamma_s - \gamma)]$ <sup>[2]</sup>

天顶角： $\theta_z = \cos^{-1} [\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega]$ <sup>[3]</sup>

太阳方位角： $\gamma_s = \sigma_{sw} * \sigma_{ns} * \gamma_{so} + \left[ \frac{1 - \sigma_{sw} * \sigma_{ns}}{2} \right] * \sigma_{\omega} * 180^\circ$ <sup>[3]</sup>

式中： $\gamma_{so} = \sin^{-1} \left[ \frac{\sin \omega \cos \delta}{\sin \theta_2} \right]$ ,  $\sigma_{sw} = \begin{cases} 1 & |\omega| \leq \omega_w \\ -1 & \text{其他} \end{cases}$ ,  $\sigma_{ns} = \begin{cases} 1 & \phi (\phi - \delta) \geq 0 \\ -1 & \text{其他} \end{cases}$ ,  $\sigma_{\omega} = \begin{cases} 1 & \omega \geq 0 \\ -1 & \text{其他} \end{cases}$ ,  $\omega_w = \arccos (\tan \delta / \tan \phi)$

$\beta$  为斜面倾角， $\rho$  为地物表面反射率， $\theta_i$  为入射角， $\theta_z$  为太阳天顶角； $\alpha$  为太阳高度角； $\gamma$  为表面方位角， $\gamma_s$  为太阳方位角。

通过以上 Hay 模型的计算，得到图 3 的不同倾角平面的月平均太阳辐照量变化。从图 3 可以看出在 2—4 月是各倾角平面获得太阳辐照量最低的时段，而且这段时间几种倾角平面获得的太阳辐照度相差不大，分析原因主要是因为 2—4 月是珠海地区的雨季，阴、雨天气比较多，散射辐照量在总辐照量中占的比例很高，从表 2 可以看出这 3 个月散射辐照量比例都在 55% 以上，由于改变倾角对太阳电池组件多接受直接辐射作用比较大，但是对散射辐照作用不大，因此在 2—4 这 3 个月不同倾角的平面接受的太阳辐照量差别不是很大；在夏季的 5—8 几个月，以 0° 平面接受的太阳辐照量最大，15° 和 22° 倾斜角平面接受的太阳辐照度很接近，然而 40° 平面接受到的太阳辐照量相比较其他 3 种倾角来说辐照量降低很多；珠海地区在秋季天气秋高气爽，晴空万里，虽然太阳高度角逐渐减小，太阳辐照量仍然

比较高，15°、22°、40° 几种倾斜角平面获得太阳辐照量很接近，而 9 月以后 0° 平面接受的太阳辐照量快速减少，降幅很大；冬季，晴天居多，尤其是前冬，雨量稀少，冬季的 1 和 12 月份，高度角是全年最低时期，从图 3 以看出在不同角度倾斜面上，太阳辐照量差别较大，在 40° 时能获得最大的太阳辐照量，水平面上的太阳辐照量被严重减小，同时冬至前后光控制太阳能照明系统工作时间是全年最长的，因此倾斜角度应当适当照顾冬季的太阳辐照。

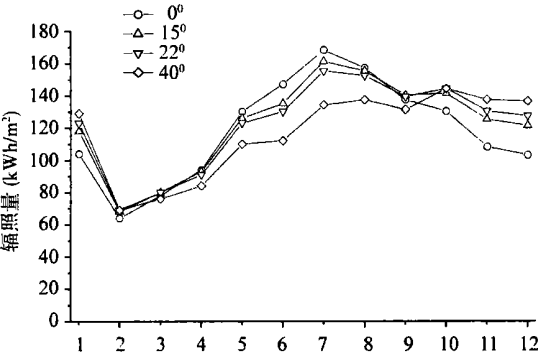


图 3 珠海地区不同倾斜角平面的月平均太阳辐照量变化  
Fig 3 Monthly average solar radiation of different slope plane at Zhuhai

通过对图 3 不同倾角平面的月平均太阳辐照量变化的分析，结合我们使用负载情况，在太阳能路灯系统设计时，首先要考虑系统在 2—4 月低太阳辐照量情况的正常工作需求，在珠海地区使用的光控太阳能路灯是冬季耗电量大的季节性负载，但是负载量变化不是很大，负载情况不是影响太阳电池板最佳倾角的主要因素，综合几个方面的因素，珠海太阳能路灯的太阳电池组件布置倾斜角度是取当地的纬度 22°，这样不但能够适当的照顾冬季时负载用电增加，而且在春季 2—3 月有最佳输出，进入夏季后又能比 40° 倾角时产出更多的电能，快速对蓄电池进行恢复性充电，延长蓄电池的寿命。

4 太阳电池板和蓄电池容量确定

确定太阳电池和蓄电池容量的组合，既是在保证路灯负载可靠性需要的前提下，确定使用最少的太阳电池组件和蓄电池容量，以最优化设计达到可靠性和经济性的最佳结合。对于可靠性国内外大多采用负载缺电率（LOLP）来衡量<sup>[4-7]</sup>，其定义为系

统停电与实际所需要用电时间比值。IOLP 值在 0 到 1 之间，数值越小，可靠性越高。对于可靠性要求应该有一定的限度，以往在国内光伏系统设计时，往往不论其用途如何，总是设计成要达到不停电，即要求  $IOLP=0$ ，实际上交流电网对大城市供电也只能达到  $IOLP=10^{-3}$  数量级，因此要求价格相对昂贵的光伏系统达到 100% 的可靠性，显然是不合理的。因而在太阳能路灯设计时，在满足负载合理的可靠性的同时，要有最佳的经济性，由表 3 的推荐，珠海太阳能路灯设计的可靠性 IOLP 值为 0.1，能够保证 4—5 个阴雨天的供电。按照这个可靠性设计，系统配置如表 4 所示，使用 8 支 1W 大功率白光 LED 作为灯负载，2 块 20Wp 太阳电池组件（朝南 220 倾斜角布置），12V，40AH 免维护铅酸蓄电池。

表 3 对不同使用场合光伏系统 IOLP 推荐值<sup>[6]</sup>  
Tab 3 Recommended IOLP values for different applications

| 使用类别      | IOLP 值    |
|-----------|-----------|
| 太阳能路灯等    | $10^{-1}$ |
| 户用光伏系统    | $10^{-2}$ |
| 微波通信站光伏系统 | $10^{-4}$ |

表 4 太阳能路灯系统构成

Tah 4 The composing of solar steet lamp illuminating system

| 组 成    | 数 量 | 参 数                                                                              |
|--------|-----|----------------------------------------------------------------------------------|
| 太阳电池组件 | 2   | $P_{mp}=20W$ , $V_{mp}=18.0V$ , $I_{mp}=1.11A$ , $V_{oc}=21.8V$ , $I_{sc}=1.30A$ |
| 蓄电池    | 1   | 12V, 40AH 免维护铅酸蓄电池                                                               |
| 灯 具    | 1   | 8 支 1W 大功率白光 LED                                                                 |
| 控制器    | 1   | 光控, 防蓄电池过放电、过充电功能                                                                |

5 总 结

在光伏发电应用的过程中，不少产品由于没有按照光伏发电的工作特点和运行规律来进行设计，往往使系统无法长期正常地运行，根据珠海当地的气候情况，结合太阳能光伏发电的特点，对该处运行的太阳能路灯进行设计优化工作是很有意义的，它不但降低了太阳能路灯系统成本，而且提高了系统的可靠性。经过对太阳能半导体照明路灯系统实际近 1 年的测试观察，结果基本符合设计要求，太阳能路灯控制器能够准确地对整个系统进行控制，能够正确的对蓄电池进行过充电、过放电保护，蓄电池在经过 4 天的连阴天后，路灯仍然正常工作。

参考文献:

[1] HAY J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surface [ J ] . Solar Energy , 1979 , 23 (4) : 301—307.

[2] BRAUN J E, MITCHELL J C. Solar geometry for fixed and tracking surfaces[ J ] . Solar Energy, 1983, 31(5): 439—444.

[3] 郭廷玮, 刘鉴民. 太阳能的利用[ M ] . 北京: 科技文献出版社, 1987: 22—30.

[4] TSALIDES Ph, THANAILAKIS A. Loss of load probability and related parameters in optimum computer-aided design of stand-alone photovoltaic systems[ J ] . Solar cells. 1986, 18(2): 115—127.

[5] ELMAGHRABY M H, ABEDAND Y A, EL-SAYES M A. Proposed generalized models for estimating the reliability of a stand-alone solar photovoltaic power system [ J ] . Electric Power Systems Research. 1985, 8(2): 111—118.

[6] HONTORIA L, AGUILERA J, ZUFIRIA P. A new approach for sizing stand alone photovoltaic systems based in neural network[ J ] . Solar energy, 2005, 78(2): 313—319.

[7] 杨金焕, 汪征, 陈中华. 负载缺电率用于独立光伏系统最优化设计[ J ] . 太阳能学报. 1999, 20(1): 93—99.

The Optimal Design of Solar LED Street Lamp lighting System

Chen Wei<sup>1,2</sup>, Shen Hua<sup>2</sup>, Ding Kongxian<sup>2,3</sup>, Deng Youjun<sup>2</sup>

(1.Guangzhou Institute of Energy Conversion, CAS, Guangzhou 510640, China;

2.School of Physics Science and Engineering //Solar System Research Institute of Sun Yat sen university, Guangzhou 510275, China;

3.Sherzhen Jiawei Industries Co. Ltd, Shenzhen 518001, China )

**Abstract:** On the basic of completing the Chinese first solar LED street lamps project at Zhuhai, to pursue reliability and economy of solar steet lamp systems, the systems were optimally designned from four aspects: light source, charging controller circuit, optimum tilt angle of photovoltaic module, sizing of photovoltaic module and storage battery. As a result, the LED light source and direct—coupling charging controller are very good choices for solar street lamp systems, at the same time, by the method of scientific calculation, the optimum tilt angle of photovoltaic module, sizing of photovoltaic module and storage battery were discussed, too. At the last, the method and conclusion in this paper can also be used to help the design of other solar street lamp syetems.

**Key words:** solar energy; semiconductor illumination; solar cell; system design; LED