

基于 LED 和超级电容的智能小区太阳能路灯

智能小区不只是高科技的应用，更注重节能和环保，本太阳能路灯照明系统在一般太阳能路灯的基础上进一步进行了优化，采用了 led 光源和超级电容，充电效率更高，元件寿命更长，比一般太阳能路灯更加节能和环保。本太阳能路灯系统主要由光伏电池极板、储能电池、超级电容器、照明灯具和控制器等几个部分构成。

1 照明灯具及控制方式的设计

1.1 照明灯具的设计

传统的照明灯具效率低，如白炽灯、卤钨灯等，不适合智能建筑节能理念，各种照明光源的性能比较如表 1 所示。白光超高亮度的 LED 灯具，光效为 45 lm/W，虽然不高，但是发出的光线都在可见光范围内，适合用于照明光源。LED 灯具寿命长，可达 100 000 h 以上，可以有效减少灯具垃圾。另外，LED 由低压直流电源供电，更加安全，而且适合频繁开、关。因此太阳能照明系统选择了 12 V、10 W 的白光超亮大功率 LED 灯具，其光效可以达 450 lm/W，相当于 50 W 的白炽灯，可以达到良好的照明效果。

表 1 常用路灯光源技术性能

种类	光效/ (lm/W)	色温/ K	平均寿命/ h	供电 电源
白炽灯	15	2 800	1 000	交流
卤钨灯	25	3 000	2 000 ~ 5 000	交流/ 直流
荧光灯	70	全系列	10 000	交流/ 直流
高压钠灯	100 ~ 120	1 950/2 200/ 2 500	24 000	交流
高压汞灯	50	3 300 ~4 300	6 000	交流
大功率 LED	45	6 400 (超 高亮、白光)	100 000	直流

1.2 照明灯具的控制方式

太阳能照明灯具的开、关控制方式主要有两种： 定时控制和光照控制。

定时控制是设定每天的开、关灯时间后由系统自动控制，但是随着季节的变化需要不断调整设定时间，否则就会出现天黑不亮灯，天亮不熄灯的情况，造成能源浪费。光照控制是系统通过检测光照度来开、关照明灯具，如光照度低于 10 lx 时开灯，高于 10 lx 时熄灯，这样既能满足用户的需要，又能节约电能，符合智能建筑的理念。所以系统照明灯具的开、关采用光照控制方式。

光照控制方式的工作时间和本地的纬度及当天的太阳赤纬角有关，而且日出前半小时和日落前半小时，天空的余光足够照明，可以不开路灯，这样每天可以少开灯 1 h 。智能小区位于东经 116.84° 、北纬 38.31° 的位置，本地区光照控制路灯在冬至时工作时间最长为 12 h ，夏至时工作时间最短为 9 h 。可以看出，光照太阳能路灯工作时间变化不是太大，可以认为是均衡性负载，其对太阳能电池倾角的影响不大。

2 太阳电池

2.1 太阳电池板最佳倾角的确定

太阳电池板要朝向赤道安装，通常面向正南或稍微偏西，而且相对地平面应有一定的倾角，即太阳电池板倾角。因为太阳光的照射角度随时间的变化而变化，使得固定倾角下的太阳电池板接收的太阳能量也随之改变，所以太阳电池板倾角的确定对整个系统来说至关重要，在太阳能路灯系统优化设计中，要根据负载情况、当地气候状况和经纬度来确定太阳电池板的最佳倾角，使其接收的太阳光全年平均量最大。本系统负载近似为均衡性负载，太阳电池板最佳倾角的确定采用了国际流行的“全年均衡冬季最大”的接收太阳能辐射量的光伏系统设计原则。即在保证全年电池板日照量均衡的前提下，最佳倾角使冬季日照量尽量达到最大，以提高系统在太阳辐射较弱月份的发电量，满足蓄电池均衡充电和负载的需要。

以沧州市区过去 $10 \sim 20$ 年的气象资料数据为依据，可以使用天空散射辐射各向异性的模型，算出太阳能电池板不同倾角时所接收到的太阳辐照量，结合“全年均衡冬季最大”理论，可以确定太阳电池板倾角取本地纬度 38° 即可。因为夏季小倾角的电池板接收到的太阳辐照量大，冬季大倾角的电池板接收到的太阳辐照量大，所以可以在 38° 倾角基础上适当增加 $5^\circ \sim 10^\circ$ ，效果会更好，而且有利于积雪滑落，减小维护工作量。本系统太阳电池板倾角取 43° 。

2.2 太阳电池组容量的确定

LED 的功率为 10 W ，每天工作 12 h ；设太阳电池的功率为 W_S ，效率为 40% ，留 20% 的余量，每天日照工作时间为 5 h ，则有：

$$WS \times 5 \text{ h} \times 40\% \div 120\% = 10 \text{ W} \times 12 \text{ h}$$

解得 $WS = 72 \text{ W}$ 为了满足蓄电池的储能要求，太阳电池组功率选择要大些，系统选择 12 V 、 100 W 的太阳电池组。

3 蓄电池组及超级电容的选择

目前来说大容量、价格便宜的储能器件还是铅酸蓄电池，虽然超级电容优点很多，可是其储能量对于太阳能路灯系统来说，应付连续的阴雨天还是不容易实现的。不过超级电容器可以辅助蓄电池更好地进行工作，超级电容和蓄电池组成储能元器件，可以提高充电效率，延长蓄电池的寿命，提高系统的供电可靠性。其结构如图 1 所示。

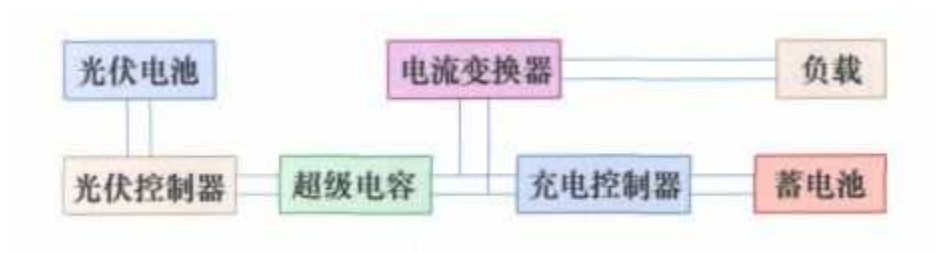


图 1 太阳能路灯系统的结构

3.1 蓄电池组容量的选择

在太阳能路灯系统中，蓄电池是储能设备，其容量大小直接关系到照明时间的长短，对蓄电池组选择的依据主要是额定电压和额定容量。蓄电池容量的计算公式为：

$$C = \frac{DFQ}{LUK_a V_t}$$

式中， C 为蓄电池组容量，单位为 $\text{A} \cdot \text{h}$ ； D 为最长无日照用电天数，取 6 天； F 为蓄电池组放电效率的修正系数，通常取 1.05； Q 为日用电量，单位为 $\text{W} \cdot \text{h}$ ，本系统取 $120 \text{ W} \cdot \text{h}$ ； L 为蓄电池组充放电效率，通常取 0.9； U 为蓄电池组的放电深度，通常取 0.6； K_a 为线路损失，通常取 0.98； V_t 为系统工作电压，取 12 V 。

根据公式算出蓄电池组容量 $C = 120 \text{ A} \cdot \text{h}$ ，可以选择 $120 \text{ A} \cdot \text{h} / 12 \text{ V}$ 的单体蓄电池一只。

负载的日耗电量为 $10 \text{ W} \times 12 \text{ h} = 120 \text{ W} \cdot \text{h}$ ，即 $10 \text{ A} \cdot \text{h}$ ， $120 \text{ A} \cdot \text{h}$ 蓄电池可以提供 12 天的用电量，按照放电深度为 0.6，则可以使用 7 天。实际使用中连续 7 个阴雨天太阳能路灯能够正常照明。

3.2 超级电容的选择

超级电容器是一种新型储能元器件，它是以双电层为原理，采用多孔碳材料为电极的 EDLC 超级电容，拥有大至数千法的电容量，其性能介于传统充电电池和普通电容器之间，可以在很短的时间内充满电，同时又如其他充电电池一般可储存大量电能。放电时利用移动导体间的电子（而不依靠化学反应）释放电流，从而为灯具提供电源。但是目前来说其价格太高，大容量供电不易实现，只能用来辅助蓄电池。

太阳电池的输出功率随天气的变化而变化，这种不稳定的充电电流影响了蓄电池寿命，无形中会提高系统成本，造成更多的环境污染。所以系统设计了超级电容这种可以快速充电、放电的中间元件。特别是在太阳光照射不强时，控制系统把太阳电池输出的不稳定的电能存储在超级电容器里面，充满之后再以恒定电流给蓄电池充电，这样可以提高蓄电池的寿命，同时超级电容的储能也可以在连续的阴雨天为路灯提供更多的能量，增加照明时间。

超级电容充电时间可以用下面公式计算：

$$Cdv = It \quad (1)$$

式中， C 为电容器的额定容量； dv 为电容器工作电压变化； I 为电容器充电电流； t 为电容器充电时间。

根据式（1），13.5 V、480 F 的电容器充电时间为（充电电流为 10 A）：

$$t = \frac{Cdv}{I} = \frac{480 \text{ F} \times 13.5 \text{ V}}{10 \text{ A}} = 648 \text{ s}$$

可以看出其充电时间是很短的，便于系统快速充电。

超级电容的放电时间由公式：

$$Cdv - ICR = It \quad (2)$$

得到：

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{Cdv - ICR}{I} \\
 &= \frac{480 \text{ F} \times 13.5 \text{ V} - 0.83 \text{ A} \times 480 \text{ F} \times 0.02 \text{ } \Omega}{0.83 \text{ A}} \\
 &= 7798 \text{ s} \approx 2 \text{ h}
 \end{aligned}$$

如果放电截止电压为 3.5V，则放电时间为：

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{Cdv - ICR}{I} \\
 &= \frac{480 \text{ F} \times (13.5 \text{ V} - 3.5 \text{ V}) - 0.83 \text{ A} \times 480 \text{ F} \times 0.02 \text{ } \Omega}{0.83 \text{ A}} \\
 &= 5774 \text{ s} \approx 1.6 \text{ h}
 \end{aligned}$$

由式（2）可以看出，超级电容器的储能对负载放电可以达到 1.6 h，延长了系统的供电时间。

4 太阳能控制器的设计

太阳能路灯系统作为一种小型光伏系统，其控制器自身损耗电流应小于额定工作电流的 1%，系统控制器电路的设计都选择了低功耗元器件，采用的是由集成运放构成的电压比较器作为控制电路，这种电路简单可靠、维护方便、成本低并且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电池的充放电特性设计一个比较好的电压回差，同时元器件的选择要可靠，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。

控制系统在光伏控制器和充电控制器基础上增加了超级电容，跨接在直流母线和地线之间，以便稳定直流母线的电压，并缓冲光电池提供的过大能量，然后放电给蓄电池，再提供给负载。

光伏控制器在设计时通常采用升压电路，产生比光伏电池板两端更高的电压，以利于向蓄电池充电，同时也克服了传统电路中防倒灌二极管将蓄电池电压钳位在 12 V 的弊端。但当光照不足时，若要使蓄电池能够继续充电，该控制电路会导致光伏电池的工作点脱离最大功率输出点，会使得光伏路灯系统的发电效率下降。因此设计控制系统时需预设弱光段的阈值，以实现在弱光下能通过超级电容缓冲来保证蓄电池正常充电的目的。

若直接采用光伏电池对蓄电池充电，当光照较弱且存在其他干扰因素时其输出电压会不稳定，导致光伏电池在充电时难以保持在充电最小电压上，最后导致系统在该光照范围内不能对蓄电池正常充电。系统通过采用超级电容，把阴天时太阳电池的不稳定的输出能量蓄积起来，等到满足一定的电压条件时，通过升压电路把超级电容中的能量释放到蓄电池，升压电路图如图 2 所示。这种采用超级电容的方式可以提高在太阳光照射不强时的发电效率。

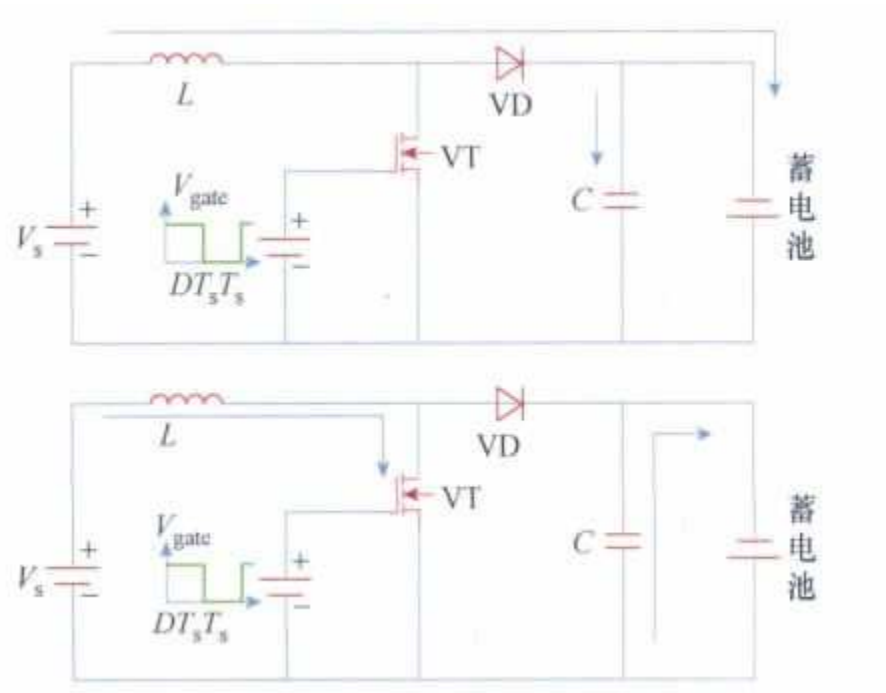


图 2 充电升压电路

LED 的控制电路比较简单，直流驱动即可，且其寿命可达 10 万 h。但是，驱动电流的大小在很大程度上影响着 LED 的寿命，如果电流太大，则可能引起 LED 光衰现象严重，且寿命减少。故必须合理设计其驱动电路，如图 3 所示为用 BUCK 电路实现的 LED 恒流控制电路。

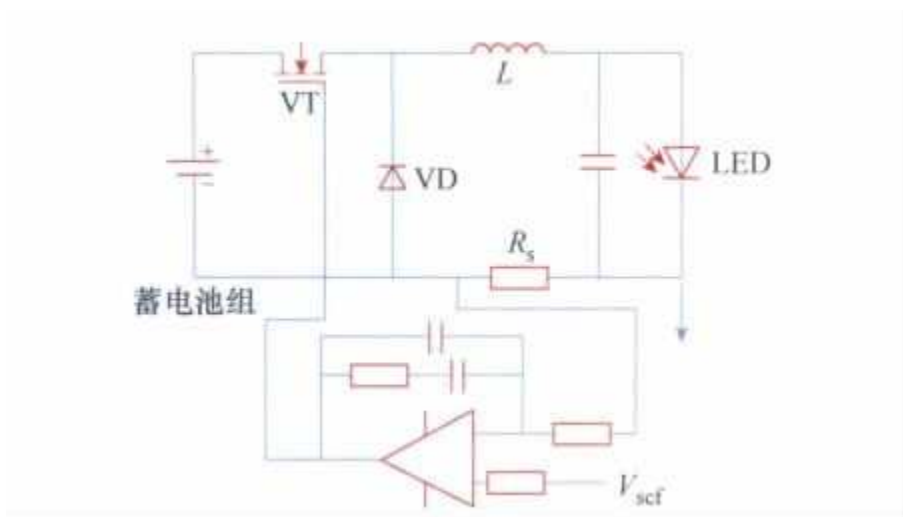


图 3 LED 的恒流控制电路

5 防雷接地的设计

LED 路灯的工作电压为 12 V，属于安全电压，不做电气保护接地。但 LED 路灯金属灯杆应做防雷接地，接地电阻经测试为 8 Ω，符合要求。

太阳能路灯照明系统的配置本智能小区的一盏太阳能路灯的系统基本配置如表 2 所示：

表 2 太阳能路灯系统的基本配置

组 成	数 量	参 数
照明灯具	1 盏	12 V、10 W 大功率白光 LED
太阳电池	1 块	100 W
蓄电池	1 块	120 A·h、12 V
超级电容	5 只	2.7 V、2 400 F
控制器	1 台	12 V、10 A
组件支架	1 套	—

6 结束语

智能小区太阳能路灯系统投入运行后,10 W的新型LED 光源足够用来照明,超级电容的应用能够保证给蓄电池合理充电,提高了充电效率,延长储能元器件的寿命,特别是阳光不太充足的时候,系统能够更好地存储能量,其储能可以连续供照明灯具使用 7 天。系统的设计始终遵循智能建筑“节能和环保”的理念,应用了太阳能、长寿命的LED 光源和超级电容。如果再增加 25 只超级电容器,则电容储能可以供给路灯一天的照明,随着超级电容容量的扩大和价格的降低,将其用做储能元件是可行的,智能小区的太阳能路灯系统也是对超级电容器应用的一个尝试。