

文章编号:1002-2082(2010)06-0933-06

90 W 太阳能LED路灯的设计及优化

滕道祥

(徐州工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对LED在灯具配光、散热等方面达不到实用要求,无法真正体现出经济节能的问题,参照已有太阳能LED路灯产品,根据相关国家标准和行业标准,确定90 W太阳能LED路灯系统的技术指标和性能要求,在此基础上进行初步设计。对系统中的主要部件进行设计论证和选型,得出一个可行的设计方案,通过MATLAB软件对LED的照度分布和灯具的配光进行仿真,并就配光和散热这两个方面对系统进行优化,使其符合道路照明要求。

关键词: 太阳能发电; LED照明; 配光; 优化设计

中图分类号: TN312.8

文献标志码: A

Design and optimization of 90W solar LED street lamp

TENG Dao-xiang

(Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Since LED lamp can not meet the practical requirements in light distribution and heat dissipation, its power saving and economic advantages are not fully utilized. Based on the existing solar LED streetlamps, technical specification and performance requirement of 90 W solar LED streetlamp are established according to relevant national standards and the industry standards, and the preliminary design is made accordingly. The major components are selected and reviewed, and a design scheme is obtained. MATLAB is used to simulate LED's illumination profile and light distribution, light distribution and heat dissipation are optimized to meet the requirements of street light.

Key words: solar photovoltaic; LED illumination; distribution of light; optimal design

引言

太阳能LED照明产品集成了太阳能光伏发电和LED固态照明两种技术的优点,是新一代能源和新一代光源的结合。太阳能LED路灯并非是太阳能光伏发电技术和LED固态照明技术简单组合的产物,而是将这两种技术融合成的一个系统^[1-2]。因此,设计时需要对这个系统的基本组成、工作原理、实际应用和发展情况等进行了解和分析。依据技术要求,在设计过程中根据道路照明的国家标准和太阳能LED路灯行业的一般标准,进行部件选

型、照明仿真、优化设计是必须的工作。

1 太阳能LED路灯的基本组成、工作原理及技术要求

太阳能LED路灯主要由以下部分组成:太阳能电池板,蓄电池,LED灯具,控制箱和灯杆。其工作原理如图1所示。

太阳能电池板将接收到的太阳光转化为电能,再经控制箱储存到蓄电池中。控制箱根据预先设定好的工作模式控制蓄电池对LED灯的电能供给,

收稿日期:2010-01-30; 修回日期:2010-07-21

作者简介:滕道祥(1961—),男,江苏徐州人,副教授,主要从事物理学和光电技术的研究与教学工作。

E-mail:tdxtt@126.com

并防止蓄电池有过充电和过放电情况发生。

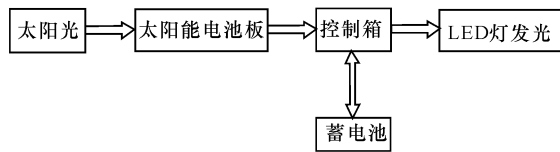


图1 太阳能LED路灯的工作原理

Fig.1 The operation principles of the solar LED streetlamp

系统的技术要求: 1) 每盏灯的工作电压为24 V; 2) 每盏灯的功耗为90 W; 3) 灯具的安装高度为5 m; 4) 灯间距为20 m; 5) 被照路面的面积为20 m×10 m; 6) 被照路面平均照度为10 lx; 7) 被照路面照度均匀度为0.35; 8) 被照路面平均亮度为0.75 cd/m²; 9) 被照路面亮度总均匀度为0.4; 10) 系统所在地区的日照峰值时间为4 h; 11) 系统每天的工作时间为10 h; 12) 系统在无光照时的持续工作时间为7天(连续阴雨天)。

2 系统初步设计

根据现有路灯的造型并结合太阳能LED路灯的实际需要,路灯整个设计的外观结构如图2所示。

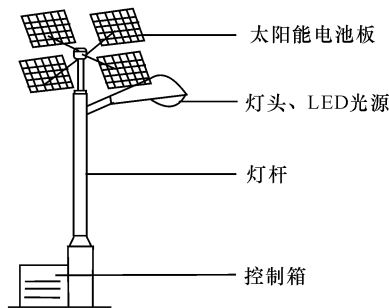


图2 系统结构组成

Fig.2 The makeup of system structure

对系统结构组成中的各部分进行功能抽象,可以得到系统的工作流程,如图3所示。利用光伏效应原理制成的太阳能电池板,白天接收太阳辐射并将其转化为电能输出,经过充放电控制器存储在蓄电池中,夜晚当照度逐渐降至10 lx左右、太阳能电池板开路电压为4.5 V左右时,充放电控制器侦测到这一电压值并动作,蓄电池开始对灯头放电,驱动LED发出具有一定方向性的可见光,经灯罩的处理变换后投射到路面上一定区域,起到照明道路的效果。蓄电池放电达到设计时限后,充放电控制器再次动作,蓄电池放电结束,准备继续充电或再次放电。

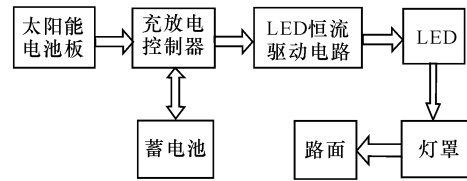


图3 系统工作流程

Fig.3 System workflow

根据系统的技术要求,通过计算分析^[2],确定主要部件选型如下:太阳能电池板选型为ST050-12S型单晶硅太阳能电池板,蓄电池选型为12V4SH-200AH型免维护铅酸电池,LED选用YTLED-E-W-L-01-E-A型LED灯珠,开/关灯自动控制电路采用定制的专用高性能单片机。

3 LED二次光学设计与照度仿真

目前,所有的LED都带有小型透镜,致使其光束一般集中在60°~120°范围内,使得被照面上的光强分布呈高度集中(本设计所选用的LED也是如此)。如不进行特殊设计,将会使路面的照度不够宽阔均匀,甚至会出现“斑马效应”^[3],从而诱发交通事故。城市道路照明设计标准对道路照明中路面照度均匀性有明确的要求^[4],这是路灯设计必须面对的问题。为了解决这个问题,最有效的方法就是进行配光设计,即二次光学设计。

在太阳能LED路灯的灯头中,LED的尺寸相对于其所照射的路面间的距离要小得多,故可将LED看作一个点光源。假设面元dS接受LED点光源S的光照,而点光源S至面元dS的距离为r,并且点光源发出的光束的光轴与面元的法线N之间的夹角为θ,则面元dS上的照度为^[5]

$$E(r, \theta) = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I_0 \cos\theta}{r^2} \quad (1)$$

式中I₀为LED光轴方向上的光强。LED的光强分布不是一个理想的余弦分布,该分布可以表示为

$$I(\theta) = I_0 \cos^m \theta \quad (2)$$

式中θ是出射光线与LED光轴的夹角。

为了简化计算,本设计中将LED的光强看作理想的余弦分布,即

$$I(\theta) = I_0 \cos\theta \quad (3)$$

当LED照射到与其光轴方向垂直的平面上,根据(1)式和(3)式可知,该平面上的光照度分布为

$$E_{\perp}(r, \theta) = E_0(r) \cos\theta = \frac{I_0}{r^2} \cos\theta \quad (4)$$

将其变换到空间直角坐标系内,并将路面看作

$x-y$ 平面,可得:

$$E(x,y) = \frac{ZI_0}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + Z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

式中: (X,Y,Z) 为LED安装位置的坐标; (x,y) 为路面某点坐标值; z 坐标值为0。

点光源的特点是能以 4π 立体角向周围空间发出相同强度的光辐射,而LED只向半空间发光,并具有一定的方向性,所以其发光范围所对应的立体角一般达不到 2π 。知道LED的发射角后,根据光强的定义及发射角和立体角的关系可以算出其发射角内的平均光强。

光强的定义及发射角和立体角的关系如下^[6]:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (6)$$

$$\Omega = 4\pi \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (7)$$

式中: $d\Omega$ 为某一发光方向的立体角; $d\Phi$ 为这个立体角内的光通量; α 是光源的发射半角; Ω 是 α 对应的立体角。由此可知,LED光轴上的光强要比 I_{av} 大,3 W 白光LED光轴上的光强为1 W 白光LED光轴上光强的(2~3)倍^[7]。由于国内LED生产企业的产品在性能方面很接近,所以设计中选取的3 W 白光LED光轴上的光强可以取80 cd,以便于进一步计算和仿真。将 $I_0=80$ cd 代入(5)式,并取LED的安装位置坐标为(0,0,5),用MATLAB进行仿真,可得单颗LED的照度仿真,如图4和图5所示。

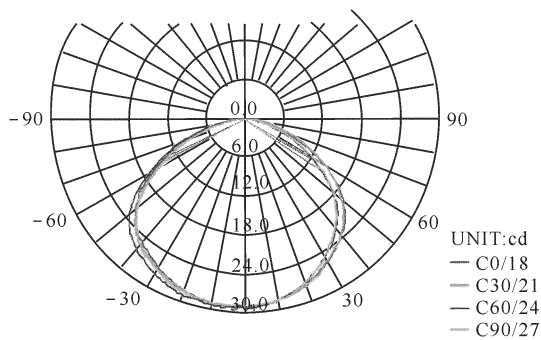


图4 单颗1 W LED的光强分布
Fig. 4 The light intensity distribution of a single 1 W LED

为选出适合于道路照明或最接近设计要求的配光方案,用MATLAB分别对30颗LED平面矩阵分布(10×3)的照度仿真、30颗LED半圆柱内面分布(10×3)的照度仿真、30颗LED倒V字型分布(10×3)的照度仿真(因灯头设计大小适中,取LED间距为0.022 m,且LED阵列距被照路面5 m)。其

结果分别如图6~图9所示。

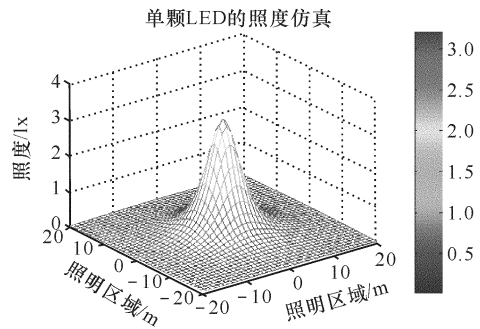


图5 单颗LED的照度仿真三维视图
Fig. 5 The illuminance simulation graphics of a single 1 W LED

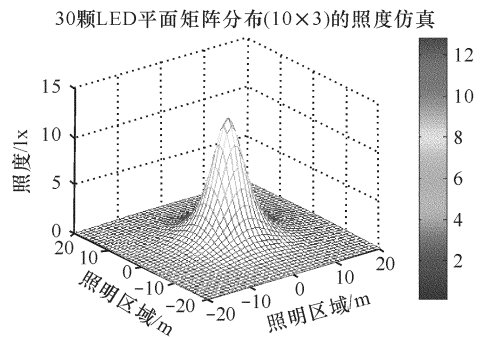


图6 平面矩阵分布(10×3)的照度仿真
Fig. 6 The illuminance simulation of the plan matrix distribution (10×3)

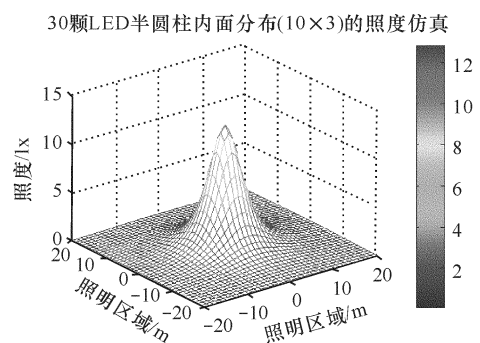


图7 半圆柱内面分布(10×3)照度仿真
Fig. 7 The illuminance simulation of semi-cylinder distribution (10×3)

从仿真结果可以看出,3种方案中方案(1)和方案(2)产生的照度及其分布基本相同,但光照中心区的照度都要比方案(3)大,可以通过分析这3种情况下被照路面某一方向上的照度变化来确定哪一种方案的照度均匀性要好一些或是更适合设计要求。取与 x 轴和 y 轴均呈 45° 方向上6个点为研究对象,这6个点的坐标和对应的照度值如表1所示。

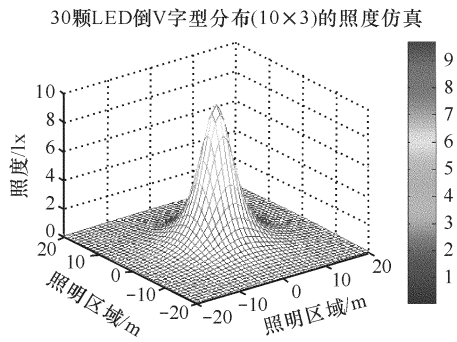


图8 倒V字型分布(10×3)的照度仿真

Fig. 8 The illumination simulation of inverted V distribution(10×3)

表1 3种配光方案在被照路面上与x,y轴均呈45°方向上的照度分布

Table 1 The aperture illumination of three schemes of light distribution on the lighted road with the x, y axis is 45°

方案	坐标					
	(0,0)	(2,2)	(4,4)	(6,6)	(8,8)	(10,10)
方案(1)	18	8.44	3.718	1.674	0.845	0.474
方案(2)	18	8.44	3.718	1.674	0.845	0.474
方案(3)	9.670	7.637	6.798	1.257	0.633	0.355

根据表1中的数据,用MATLAB进行仿真可以得到如图9所示的相应照度变化曲线。

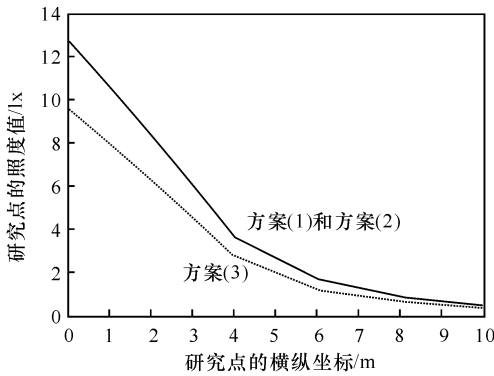


图9 各方案在被照路面上的照度分布

Fig. 9 The aperture illumination of various schemes on the lighted road

4 优化设计

从上面的分析可知,单纯靠改变LED的分布来改善LED阵列的照度分布作用不大,其照度分布仍然达不到设计要求,可以推知其亮度总均匀度也达不到设计要求。要想达到设计要求,需要采用其他措施。目前,最常用的方法是用透镜。透镜的使用有两种方式,第一是先用微透镜使单颗LED

的光照均匀,并形成模块,再将这种模块进行阵列排布;第二是先将LED阵列排布好,再用一块较大的透镜或厚度小的透镜组对整个灯具进行散光,以达到光照均匀的目的^[8]。这两种方法中,第一种结构复杂且不利于灯具散热,所以本设计在选用第一种改进方案的基础上采用第二种加透镜的方法,并使用由2块薄透镜组成的薄透镜组。其中,一块为菲涅耳透镜,它将LED发出的光校正为平行光;另一块为柱面透镜,它对校正好的平行光进行发散。

菲涅耳透镜和柱面透镜各自的外形及工作原理分别如图10和图11所示。

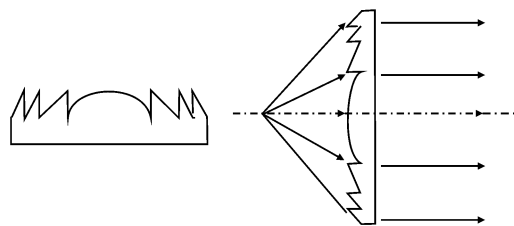


图10 菲涅耳透镜的外形及工作原理

Fig. 10 The shape and operation principle of Fresnel lens

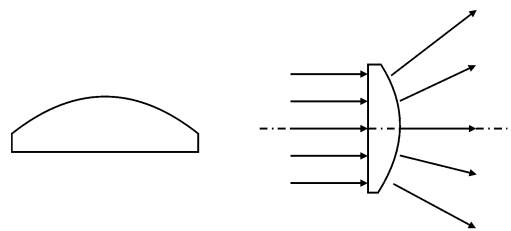


图11 柱面透镜的外形及工作原理

Fig. 11 The shape and operation principle of cylindrical lens

这2块薄透镜的尺寸根据灯具的尺寸来定,因为本设计的重点不在灯具的外形尺寸设计上,所以这里不予讨论,但有一点是肯定的,那就是两者的焦距都要很小,以避免灯具过大。安装时,尽量使LED位于菲涅耳透镜的焦平面上。从前面的仿真可以看出,选用的方案中心照度大于设计指标,而且本设计采用对称方式进行路灯安装,故加了由这2块透镜构成的透镜组后,从灯具中出射的光在被照路面上的照度分布和亮度分布能够达到设计要求。

LED的工作状态和散热设计不仅直接关系到LED实际发光效率,也关系到其实际使用寿命。通常所说的LED芯片光效是指结点温度在25℃时的芯片光效。由于散热设计和环境因素影响,在实际使用中,LED芯片的结点温度往往会大大高于25℃,所以会导致光效大幅下降。LED是个光电器

件,其工作时只有15%~25%的电转换成光能,从其余的电几乎都转换成热能,从而使LED的温度升高。在大功率LED中,散热是个不容忽视的问题。若不加散热措施,LED的结点温度会急速上升,当其温度上升超过最大允许温度时,LED芯片会因过热而损坏。因此在大功率LED灯具设计中,除配光设计外还必须有散热设计。

目前,在解决LED照明系统的散热问题上主要采用的方法有:调整LED的间距、合理加大LED与金属芯印制板间距离、打孔方式和安装风扇。这些方法在实际应用中受到许多客观条件的影响,散热效果并不是很理想。因为铝制散热器制造工艺成熟,且价格较为便宜,所以本设计采用铝制散热器散热,其大致结构一般是由数片铝片组成栅格。将LED阵列安放在铝制散热器上,由于铝片具有良好的导热性,所以可以把LED产生的热量传导出,通过合理设计可以使得LED的温度不至于高到会影响其光效的程度。这个方法虽然可以解决一些问题,但是铝制散热器的尺寸和重量都不可能做得很小,这就给灯具的整体设计带来了很大的困难。因此,要想兼顾散热和灯具外型设计这两个方面,还需要对常用的散热方法进行改进。

本设计通过改变铝制散热器中铝片的形状,并加上液体循环系统对LED的散热进行优化,其基本原理如图12所示。整个散热系统被规划成一个铝制的管状回路,管子很细,其中充满传热性很好的液体(如乙二醇(分子式为 $C_2H_6O_2$))。回路中设置一个冷凝段,该段比其他部分要粗,且相对其他部分有一个很小的高度,而外壁则被由可以发生吸放热互逆反应的化学物质的混合粉末包裹并封闭着。由于是互逆反应,所以这种混合粉末可以反复使用。利用化学反应吸热原理,当管子中的温度高到警戒温度时,混合粉末遇热发生化学反应吸收管子中液体传递过来的热量,使液体温度降低;当管子中的温度低于警戒温度时,其发生逆反应,将热量慢慢散发出去。另外,在与LED阵列相对的一方还有一个缓冲段。缓冲段比散热段还要粗,其作用是使散热段两端保持一定温差。由于一个系统的热传递具有由高温部分传递给低温部分的特性,再加上缓冲段的作用和冷凝段比其他部分位置要高的设置,所以管状回路中将形成如图12中所示的热量传递的液流,使LED产生的热量不断被带走并消耗,从而保证LED的工作温度稳定在一个合适的范围内。

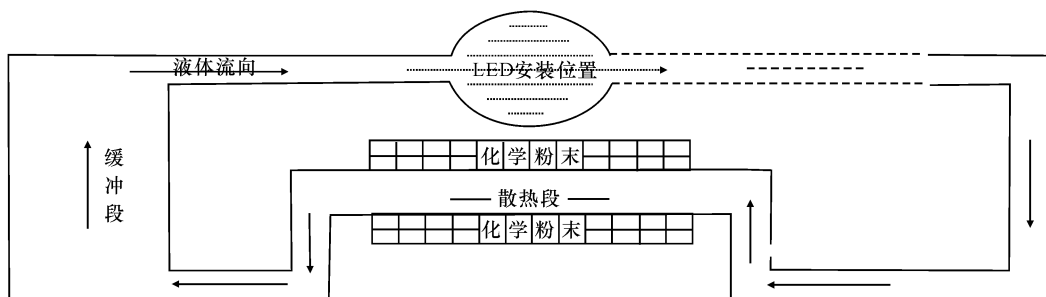


图12 散热器优化原理

Fig. 12 The optimizing principles of the radiator

5 结论

LED发光具有方向性,光照分布不均匀,主要能量集中在与其光轴垂直的平面上的一定区域内,并且由这个区域中心向外照度下降很快。LED阵列分布方式的不同可以改变其照度分布,但是改变不大,不能从根本上改变照度分布不均匀的情况。这一问题可以通过安装透镜来解决,在灯具出光面加装由菲涅耳透镜和柱面透镜构成的薄透镜组是一种有效的方法。LED路灯的散热问题可以通过安装铝制散热器来解决,但一般铝制散热器很难兼顾散热和重量这2个方面,本文散热优化中提出的改进方法可以解决这个问题。通过数值计算和仿真

优化相结合的方法,本文设计的路灯系统可以达到预先确定的设计指标和性能要求。

参考文献:

- [1] 沈辉,曾祖勤. 太阳能光伏发电技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
SHEN Hui, ZENG Zu-qin. The technology about the solar photovoltaics generating [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 吴晗平. 光电系统设计基础[M]. 北京:科学出版社,2010.
WU Han-ping. Opto-electronic system design basis [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)

- [3] 张芸,刘铁根,张学敏,等.LED 路灯光强模拟分布及实验验证[J]. 光学仪器,2008,30(1):45-49.
ZHANG Yun, LIU Tie-gen, ZHANG Xue-min, et al. Research on an optical system for the LED energy-saving road lighting[J]. Optical Instruments, 2008, 30(1): 45-49. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 中华人民共和国建设部.CJJ45-2006 城市道路照明设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. CJJ45-2006 The design standards of urban road lighting [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [5] 安连生. 应用光学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2002.
AN Lian-sheng. Applied optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [6] 王乐.LED 应用于照明的计算和仿真[J]. 照明工程学报,2007,18(1):25-30.
WANG Le. Computer simulation and the luminaire design of LED illumination[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2007, 18(1): 25-30. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 霍彦明,吴淑梅,谭峻廷,等. 基于 MATLAB 的 LED 阵列的研究与仿真[J]. 应用光学, 2009, 30(2):191-194.
HUO Yan-ming, WU Shu-mei, TAN Jun-ting, et al. Distribution characteristics of LED arrays based on MATLAB[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(2): 191-194. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 胡海蕾.LED 照明光学系统的设计及其阵列光照度分布研究[D]. 福建:福建师范大学,2005.
HU Hai-lei. Design of LED illumination system and research of illuminance distribution of LED arrays [D]. Fujian: Fujian Normal University, 2005. (in Chinese)