

基于复合式抛物面聚光器的 LED 反光杯建模研究

汪乐 张树生 翟静

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 针对复合式抛物面聚光器(CPC)无法在 TracePro 软件中直接建模的不足,结合 TracePro 软件特点,对 CPC 关键参数进行了分析,通过数学模型对参数之间的几何关系进行了推导,得出了计算公式,实现了 CPC 在 TracePro 中的建模。将 CPC 设计成反光杯应用于 LED 灯具中,可方便地进行光学模拟和分析,进而有效地缩短产品开发周期和开发成本。为 CPC 设计提供了数学依据,通过建模验证了该方法的可行性,有效提高了设计效率。结果表明,用通过该方法设计出的 CPC 做成的 LED 反光杯,可以极大地提高灯具的发光效率。为其在照明领域的发展应用提供了更好的使用价值和前景。

关键词 光学设计;复合式抛物面聚光器;建模;接收角;LED;TracePro

中图分类号 TN312.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.102202

Modeling of LED Reflector Cup Based on Compound Parabolic Concentrator

Wang Le Zhang Shusheng Zhai Jing

(College of Optics and Electronics, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract The compound parabolic concentrator (CPC) cannot be directly modeled in the TracePro software. According to the characteristics of the TracePro software, the CPC key parameters are analyzed through the mathematical model and the geometric relations among the key parameters are derived. The formulas of CPC parameters in TracePro modeling are obtained. Designing CPC as the reflector cup of LED luminaire is convenient for optical simulation and analysis, with which the product development cycle and development costs are reduced. The formula of theoretical calculation is also given, which makes modeling possible in TracePro software. The result shows that LED reflector cup based on the CPC designed by this method can greatly improve the optical efficiency of luminaires, contributing to the development of the LED lighting industry.

Key words optical design; compound parabolic concentrator; modeling; acceptance angle; LED; TracePro

OCIS codes 220.1250; 220.4598; 230.1150; 160.2540

1 引言

复合式抛物面聚光器(CPC)是一种根据边缘光线原理^[1]设计,可以将给定接收角范围内的光线按照接近理想聚光比收集到接收器上的非成像聚光器。CPC 最早由美国 Welford 等^[2]发明,是一种用于进行定期调整、非精确跟踪的集光设备。随后,CPC 被广泛应用于太阳能聚光系统中,如聚光光伏发电、光导聚能和太阳能催化等领域。由于 CPC 会聚平行光的优良特点,使其在照明领域也得到了应用。

如果将 CPC 设计成反光杯,将 LED 光源放置于其出射口位置,根据光路可逆原理^[3,4],光源发出的光线经过发射从入射口出射,便可以很好地控制光线的出射角度。同时,在 CPC 反光杯中,由于光线最多经过一

收稿日期: 2012-05-20; **收到修改稿日期**: 2012-06-24; **网络出版日期**: 2012-08-20

基金项目: 国家发改委投资项目([2011]1333号)资助课题。

作者简介: 汪乐,(1987—),男,硕士研究生,主要从事 LED 灯具光学设计与检测技术等方面的研究。

E-mail: wllxy521@126.com

导师简介: 张树生(1949—),男,教授,主要从事机电一体化技术、检测技术与仪器装置等方面的研究。

E-mail: zss@cjlu.edu.cn

次反射,光线的利用率将远高于其他类型的反光杯。近年来,国外一些大 LED 灯具企业,如 Philips Luminleds、OSRAM 和 GE 照明等公司直接将反光杯替代二次透镜应用于路灯中,可以极大地提高路灯光效。因此,CPC 可以极大地提高能源利用率,在节能减排以及减少城市的光污染^[5,6]方面具有积极作用。CPC 还具有结构简单、对加工精度要求不是很高、成本较低等优点,在 LED 照明领域表现出极大的应用价值。

TracePro 是一套能够进行常规光学分析、照明系统设计、辐射度和亮度分析的模拟分析软件,受到广大光学设计者的青睐。然而现有的 CPC 设计理论大多为原理性设计,不能在 TracePro 中直接建模。针对该问题,本文结合 TracePro 软件自身的特点,对 CPC 实际设计和建模中所需要的关键参数进行了理论推导,得出了相应的公式,将计算结果导入软件中,可以精确地实现在 TracePro 中的建模,为 CPC 的研究提供了数学依据,有利于对 CPC 的优化设计以及对 LED 照明的光学模拟和分析。

2 CPC 的结构和设计原理

CPC 的结构模型如图 1 所示,抛物线 A 绕其焦点 F_1 沿逆时针方向旋转了 θ_{\max} ,同时抛物线 B 绕其焦点 F_2 沿顺时针方向也旋转了 θ_{\max} ,从而使抛物线 A 的焦点 F_1 落在抛物线 B 的下方,抛物线 B 的焦点 F_2 落在抛物线 A 的下方。轴 $1'$ 和 1 分别是抛物线 A 旋转前后的对称轴,轴 $2'$ 和 2 分别是抛物线 B 旋转前后的对称轴, F_2C 和 F_1D 分别平行轴 1 和轴 2 ,抛物线段 F_1C 和 F_2D 关于 Y 轴对称并绕 Y 轴旋转一周,形成三维的 CPC。

经过旋转之后, CD 是 CPC 光线入口的直径, F_1F_2 是 CPC 焦平面的直径,也是 CPC 的出光口, θ_{\max} 是 CPC 的最大聚光角^[7,8]。把入射光线与 Y 轴的夹角 θ_i 定义为入射角,当 $\theta_i > \theta_{\max}$ 时,入射光线经过 CPC 反射从入射口射出,而当 $\theta_i < \theta_{\max}$ 时,入射光线经一次反射全部会聚在焦平面上,由此把 $\theta_i < \theta_{\max}$ 的光能量全部收集到焦平面上,这就是 CPC 的聚光原理。

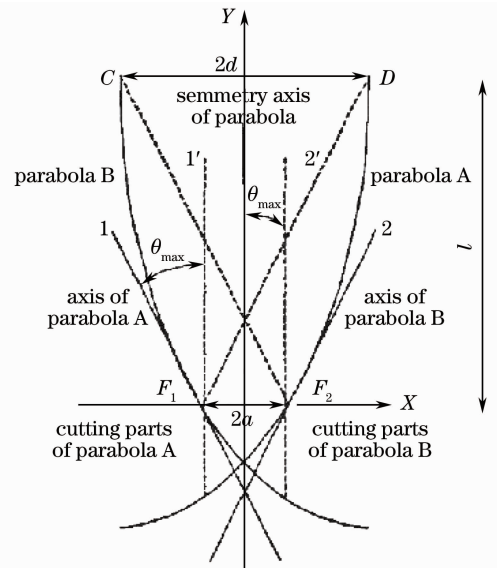


图 1 复合式抛物面聚光器剖面图
Fig. 1 Profile of the CPC

3 CPC 反光杯的设计

图 2 为抛物线的极坐标表达, F 为抛物线 OH 的焦点, OX 为极轴, R 为反光杯入射口半径, θ_{\max} 为最大接收角, ρ 为极坐标极径。则抛物线的极坐标方程为

$$\rho = \frac{2f}{1 + \cos \theta}, \quad (1)$$

抛物面的入射口径 R 为

$$R = \rho \sin \theta. \quad (2)$$

对于一束平行光,经过理想抛物面反射后总能会聚到焦点上。若将光源置于焦点位置,根据光路可逆原理,从抛物面出来的是比较完美的平行光。正是由于抛物面的这个特性使它被广泛应用在各种 LED 照明系统中。将 LED 光源放置在焦平面位置,可以使反光杯出射平行光。对于 CPC 而言,其关键参数主要有聚光比、最大接收角、焦距、侧向焦点位移、轴倾斜度等,下面主要结合 TracePro 软件中对 CPC 建模的几个参数进行推导计算。

3.1 聚光比

对于一个聚光器,定义聚光比^[7,8] C 为

$$C = \frac{A_i}{A_0} = \frac{1}{\sin \theta_{\max}}, \quad (3)$$

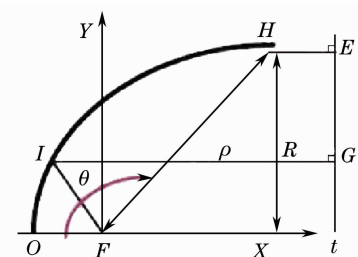


图 2 抛物面的极坐标形式
Fig. 2 Polar form of the paraboloid

式中 A_i 为入射光束的截面积, A_o 为出射光束的截面积。
 C 越大, 聚光效果越好, 即对应的最大接收角 θ_{\max} 越小。

3.2 接收角

定义接收角^[9]为边缘光线被反射器反射一次后出射在接收器边缘时(仍在出射面内)的入射光线与垂直方向的夹角 θ_{\max} 。如图 3 所示, 将一根圆杆与水平面成 θ_{\max} 角放置于聚光器入射端。圆杆上有一个圆环, 圆环上系有一根细线, 将细线的一端系于焦点 q 。将细线拉直, 并保证垂直于圆杆, 圆环从 M 走到 P , 细线另一头 m 走过的轨迹即为抛物线。

3.3 抛物面的倾斜

首先, CPC 并非普通的聚光器。从截面来看, 两个反射面的焦点并不一定是在同一点上。也就是说, CPC 并非共焦系统^[10,11], 所以就不满足成像系统的特点, 为非成像系统。如图 3 所示, 右面反射镜的焦点在 q 点, 左面反射镜的焦点在 p 点。这就是“复合”的真正意思, 即由两片反射镜组合在一起。两片反射镜的光轴并不重合, 但是它们有自己的对称轴 Z 。不同形态的 CPC 可由抛物线经旋转得到。经过旋转, 可以获得需要的接收角。小于接收角的光线将经过系统反射, 到达吸收面; 而大于接收角的光线将会被系统反射出去, 无法到达吸收面。

事实上, 由(3)式可知, 减少接收角也就增大了聚光比 C 。CPC 旋转之后的几何模型如图 4 所示, 基于此模型对 CPC 旋转前后的关键参数之间的关系进行一些数学计算。

由图 4 可知, 在直角三角形 T_1KT_2 中, 由勾股定理和抛物线定义可得: $T_1K^2 = KT_2^2 + T_1T_2^2$ 。而由抛物线定义有, $KT_1 = KT_2 + 2f$, $OT_1 = a'$, $KT_1 = R$ 。因此有

$$R = 1 + 2f, \quad (4)$$

$$R^2 = (r + a')^2 + l^2, \quad (5)$$

$$R = \frac{2f}{1 - \cos \phi}, \quad (6)$$

$$r = R \sin(\phi - \theta_{\max}) - a', \quad (7)$$

$$l = R \cos(\phi - \theta_{\max}). \quad (8)$$

由(4)、(6)、(7)式可得

$$(2f + l)^2 = l^2 + (r + a')^2, \quad (9)$$

$$f = \frac{\sqrt{l^2 + (r + a')^2} - 1}{2}. \quad (10)$$

当 $R = 2a'$ 时, $\phi = 90^\circ + \theta_{\max}$, 代入(5)式可得

$$\theta_{\max} = \arcsin\left(\frac{f}{a'} - 1\right). \quad (11)$$

因此, 在已知出口半径 a' , 入射口半径 r 和长度 l 时, 可以根据(10)、(11)式计算出焦距 f 和最大聚光角 θ_{\max} , 至此完成了 CPC 关键参数的计算。

在 TracePro 中, 根据需要, Axis tilt 可任意选择, 只要保证开口口径不为 0 即可。对于规范的聚光器, 轴倾斜即为接收角 θ_{\max} 。Lateral focal shift 即焦点在 Lateral 方向(图 2 的 Y 方向)上的移动量。若 Lateral focal shift 为 0, 焦点未发生移动, 仍在焦平面与中心轴的交点。对于规范的聚光器^[11], Lateral focal shift 即为 a' , 即保证满足边缘光线原理。

为了研究 CPC 旋转一定角度对出射光线的影响, 对旋转前后的 CPC 进行模拟, 结果如图 5~8 所示, 分别对 CPC 旋转 0° 、 10° 、 20° 、 30° 进行对比。

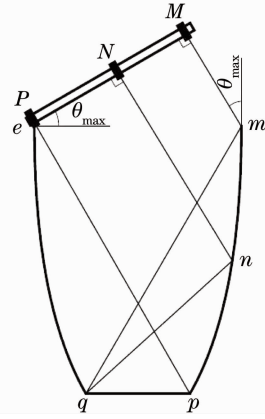


图 3 最大接收角和拉线法

Fig. 3 Schematic of acceptance angle and string method

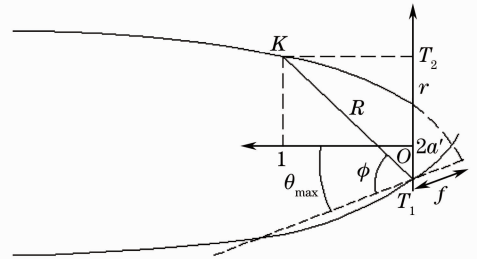


图 4 旋转前后各参数之间的关系图

Fig. 4 Relation among the various parameters before and after rotation

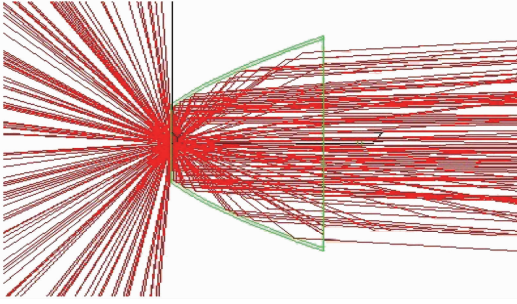


图 5 旋转前光线分布示意图

Fig. 5 Light distribution diagram before the rotation

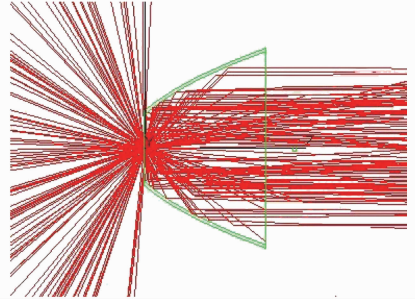


图 6 旋转 10° 时的光线分布示意图

Fig. 6 Light distribution diagram after rotating by 10°

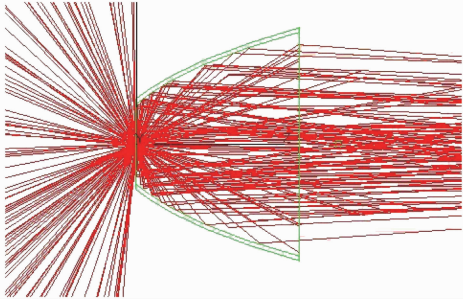


图 7 旋转 20° 时的光线分布示意图

Fig. 7 Light distribution diagram after rotating by 20°

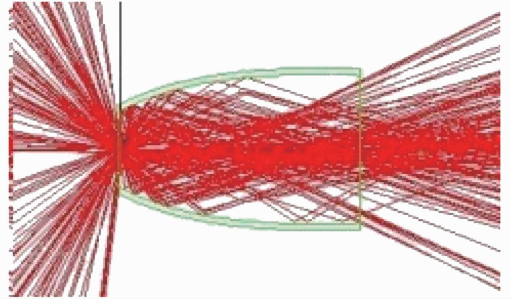
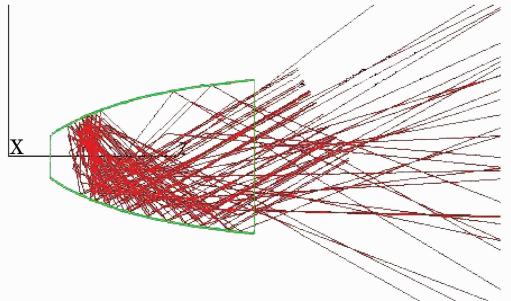


图 8 旋转 30° 时的光线分布示意图

Fig. 8 Light distribution diagram after rotating by 30°

从图 5~8 可以看出,未旋转和旋转角度过大时都会使部分光线出射到系统外。这是由于不旋转时系统的聚光效果不明显,而旋转角度过大则使光线偏转过大而逃逸到系统之外。当旋转 20° 时,聚光效果较好。通过该方法,可以根据设计需求控制灯具的出光角度^[2,12~14],使更多的光线照射到需要光线的地方,为人们所利用,真正节约能源的同时还能有效地防治光污染。

此外实验中还发现,若 $\theta > \theta_{\max}$,则光束将被系统反射出去,极大地降低了光线的利用率^[15,16],如图 9 所示。因此,在实际设计中根据需要适当调整该角度,可以满足用户需求。

图 9 $\theta > \theta_{\max}$ 时光束被反射出系统Fig. 9 Beam reflected off by the system when $\theta > \theta_{\max}$

4 模拟仿真与实验分析

4.1 模拟仿真

通过对 CPC 各参数的推导计算,可以很容易地在 TracePro 软件中对 CPC 进行建模。建立焦平面半径为 $a=17$ mm,最大聚光角 30°,长度为 50 mm 的非规范 CPC 为例。由(10)式可求得焦距 $f=25.5$ mm,CPC 的厚度设为 1mm,则在 TracePro 中所需设置的参数如下:Front length 50 mm;Back length 0;Lateral focal shift 17 mm;Thickness 1 mm;Axis tilt 30;Focal 25.5 mm。系统生成模型的轮廓图和三维框架图如图 10 和图 11 所示。

由(7)式可以直接求出所建立 CPC 模型的入射口半径为 $r=69$ mm。由此可以判断 CPC 的出口半径是否满足实际要求。

在实际设计中,还需要根据 CPC 的光学模拟和分析的结果,综合考虑 CPC 的长度、出口半径和光斑等要求,实现 CPC 的优化设计,从而满足不同用户的需求。

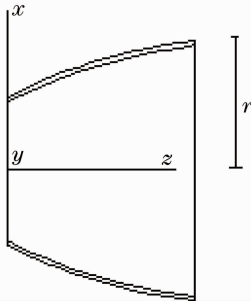


图 10 CPC 轮廓图

Fig. 10 Contour figure of CPC

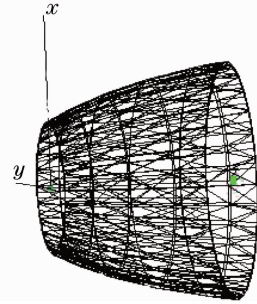


图 11 CPC 三维框架图

Fig. 11 Three-dimensional framework diagram of CPC

4.2 实验分析

将上述 CPC 模型做成 LED 筒灯的反光杯,验证其整灯的光电色参数。所用测试仪器为杭州远方光电有限公司的 HASS-2000 高精度快速光谱辐射计。测试条件为:220 V/50 Hz 主流电,电源输出功率为 7 W,室温 25 ℃,采用 4π 全立体角测试,整灯进行常温老化 2 h 后测量。实验所用光源为 10 颗 philips LXH8-PW30 模组,测试结果如表 1 所示。

表 1 光通量与光效关系表

Table 1 Relationship between luminous flux and optical efficiency

Number	P / W	ϕ / lm	Luminous efficiency $/(\text{lm}/W)$	Rendering index
1	7.012	424.8	60.58	85.3
2	7.013	439.9	62.72	84.7
3	7.012	499.74	71.27	84.7
4	7.013	564.2	80.45	85.7

实验中编号 1~4 均为 7 W 筒灯,编号 1 和 2 为市场上常见的筒灯反光杯,3 对应旋转 10° 的 CPC,4 对应旋转 20° 的 CPC。结果表明,将旋转一定角度的 CPC 做成反光杯应用于 LED 筒灯中,其光学效率要远高于普通的反光杯。实验中发现,将 CPC 旋转 20° 角做成的反光杯的发光效率要高于旋转 10° 角的光杯。可见对 CPC 旋转不同角度做成的反光杯对灯具光学效率影响较大。

5 结 论

通过对 CPC 的关键参数进行分析,结合 TracePro 软件自身特点,对相关参数进行了推导,并给出了理论计算公式,从而在 TracePro 软件中实现了建模。将通过该方法设计出的 CPC 做成的 LED 反光杯,可以极大地提高灯具的发光效率。该方法为 CPC 设计提供了数学依据,通过建模验证了该方法的可行性,有效地提高了设计效率。实验结果表明,经过该方法优化设计的结果能够极大地提高 LED 灯具的光学效率,当旋转 20° 时与传统反光杯相比,灯具发光效率提高了 15 lm/W。该方法为提高 LED 灯具光效提供了一个简单可行的方法,为 LED 照明领域的发展应用提供了更好的实用价值和前景。

参 考 文 献

- Liu Lingzhi, Li Jianhong. The optical performance of compound parabolic concentrators (CPC)[J]. *Energy Technology*, 2006, **27**(2): 52~56
- 刘灵芝,李骛洪.复合抛物面聚光器(CPC)光学分析研究[J].*能源技术*,2006,**27**(2):52~56
- W. T. Welford, R. Winston. *The Optics of Nonimaging Concentrators*[M]. New York: Academic Press, 1978. 3~8
- Du Chunxu, Wang Pu, Wu Yuting *et al.*. Concentration ratio analysis of linear Fresnel reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0808001
- 杜春旭,王 普,吴玉庭等.线性菲涅耳聚光装置的聚光比分析[J].*光学学报*,2011,**31**(8):0808001
- Wang Fei, Sui Chenghua, Ye Biqing. The research about design parameter of compound parabolic concentrator[J]. *Optical Instruments*, 2010, **32**(3): 68~72
- 汪 飞,隋成华,叶必卿.关于复合抛物面聚光器设计参数的研究[J].*光学仪器*,2010,**32**(3):68~72

- 5 Zhang Xin, Tu Qifei, Song Xianjie. Brief introduction of CPC and its function in the design of LED vehicle lamps[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2006, **17**(1): 46~49
张鑫, 屠其非, 宋贤杰. CPC简介及其在LED汽车灯具设计中的作用[J]. *照明工程学报*, 2006, **17**(1): 46~49
- 6 Zhou Xiaoli, Liu Muqing, Zhu Shaolong *et al.*. Study on LED's luminous flux measurement using a compound parabolic concentrator[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(9): 1137~1140
周小丽, 刘木清, 朱绍龙等. 基于复合抛物面收集器的LED光通量测量的研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(9): 1137~1140
- 7 Wang Hong, Zhang Xiaofan, Wang Haihong *et al.*. Design for optical freeform reflector of LED streetlight[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 727~731
王洪, 张小凡, 王海宏等. 自由曲面LED路灯反射器设计[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(4): 727~731
- 8 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on tendue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2297~2301
余桂英, 金骥, 倪晓武等. 基于光学扩展量的LED均匀照明反射器的设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2297~2301
- 9 Wang Hong, Zhang Qihui, Zhang Xiaofan *et al.*. Free form reflector design for street uniform illumination [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(12): 143~146
王洪, 张奇辉, 张小凡等. 实现道路均匀照明的自由曲面反射器设计[J]. *光电工程*, 2009, **36**(12): 143~146
- 10 Su Zhouping, Que Lizhi, Zhu Zhuowei *et al.*. Optical system design of the compact collimator for LED source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 022203
苏宙平, 阙立志, 朱焯炜等. 用于LED光源准直的紧凑型光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(2): 022203
- 11 Chao-Heng Chen, Zhi-Peng Chen. An integrated LED reflector for backlight system[C]. *SPIE*, 2008, **7058**: 705~810
- 12 Karsten Eichhorn. LEDs in automotive lighting[C]. *SPIE*, 2006, **6134**: 613405
- 13 Hueseyin Murat, Herbert DeSmet, Dieter Cuypers *et al.*. Increased lumens per etendue by combining pulsed LEDs[C]. *SPIE*, 2005, **5740**: 1~12
- 14 Fang Zhilie, Liu Muqing. Technology status of light emitting diodes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 062502
方志烈, 刘木清. 半导体照明光源的技术进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(6): 062502
- 15 Cao Yujie, Jin Shangzhong, Cen Songyuan. Design for LED lamps with high color rendering index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1222002
曹宇杰, 金尚忠, 岑松原. 高显色指数LED灯的设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1222002
- 16 Renyong Yu, Shangzhong Jin, Songyuan Cen *et al.*. Effect of the phosphor geometry on the luminous flux of phosphor converted light-emitting diodes[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(23): 1765~1767