

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

# 发光二极管光源空间光分布特性快速测量系统

刘显明\*, 叶小广, 陈伟民, 雷小华

(重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**为实现发光二极管(LED)光源空间光分布特性的出厂快速检验,构建了一套空间光分布快速测量系统。该系统利用光纤进行光收集,统一获取与传输LED光源的空间光能量,并使用接触式图像传感器完成统一的光电转换。建立了传感器输出与对应光强之间的关系,提出了使用参考光源矫正的方法得到光源光强分布并使用相关系数表征光源之间的光分布一致性。实验结果表明,系统测量结果可以体现出不一致光源的差异特征,相关系数的高低与一致性的优劣是相同的。与参考光源光强分布的相关系数0.995以上的待筛选光源为高度相关光源,相关系数大于0.99小于0.995的为低度相关光源,相关系数小于0.99的为不合格光源。由于舍弃了传统机械转动方式,该系统提供了一种新的快速的测量方案,基本满足光源空间光分布特性在线测量与质量筛选要求。

**关键词:**发光二极管光源;空间光分布;快速测量;筛选相关系数

**中图分类号:** TN312.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0000

## Rapid-testing system for intensity spatial distribution characteristics of LED

LIU Xian-ming\*, YE Xiao-guang, CHEN Wei-min, LEI Xiao-hua

(Key Laboratory for Opto-electronic Technology & Systems of the Ministry of Education, College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

\* Corresponding author, E-mail: xianming65@163.com

**Abstract:** A set of rapid-testing system for intensity spatial distribution characteristics of light-emitting diodes (LEDs) was designed to screen out LEDs with light distribution defects before they leave the factory. This system used optical fibers for collecting light and a contact image sensor for photoelectric conversion. The relationship between sensor output and its corresponding light intensity was established and the intensity distribution properties could be obtained and corrected by comparing with the data of a reference sample. The correlation coefficient was proposed to quantitatively evaluate the difference between tested sample and reference sample. Experimental results indicate that this system can effectively reflect the differences of intensity distributions of light sources. When the correlation coefficient is greater than 0.995, the tested light source can be screened out as a highly correlated one. When the correlation coefficient is less than 0.995 but greater than 0.99, the light source can be screened out as a low correlated one. When the correlation coefficient is less than 0.99, the light source can be screened out as a non-conformity one and should be eliminated. As the system

收稿日期:2015-06-15;修订日期:2015-07-03.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2013AA03A118)

gives up the traditional mechanical transmissin, it provides a new measurement method with a high speed, and meets the demands of on-line intensity distribution testing very well.

**Key words:** Light Emitting Diode(LED) source; spatial light distribution; rapid measurement; screening correlation coefficient

## 1 引言

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)作为第四代光源在近年取得了快速的发展。无论在传统照明市场还是在科学研究应用中,LED点光源都在大规模地取代传统光源,利于配光是其一大应用优势<sup>[1-3]</sup>。针对LED光源空间光分布的检测,国内外已有一系列的测量标准,如《CIE 127 Measurement of LEDs》和《SJ/T 11394-2009 半导体发光二极管测试方法》等<sup>[4-5]</sup>。一些企业与研究机构研发了基于不同原理、适用于不同场合的检测仪器,最初的测量仪器是依靠双轴转动的方式使光源和探测器处于相对不同的空间方位角,从而依次测试光源在各个角度下的光强<sup>[6]</sup>。这种方式测量简单、精度高,但其测量速度非常慢,在小角度间隔时测量时间甚至要在一小时以上,只适用于实验室标准化测量。广州市光机电技术研究院的任豪等人、国兵器工业第二〇五研究所的陈超等人分别设计了由分布式传感器或光纤代替其中一个轴向旋转的单轴转动测量方式,可大幅减少测量时间,但由于存在机械转动装置,仍然需要数分钟才能完成测量<sup>[7-8]</sup>。以上这些测量系统都是对产品的标准化精确检测,只能用于产品的抽样检测。而复杂的结构与生产工艺使LED往往会存在光轴与机械轴不统一、透镜污损、色彩不一致等方面的质量问题<sup>[4,9-10]</sup>,出厂时需要进行全检才能将其中具有光分布质量问题的样品剔除,显然传统的检测方式因耗时长而无法满足出厂全面检测的需求。

为了获得能适用于生产线快速测量的检测速度,浙江大学沈焕波等人设计了基于散射屏成像式的LED光源测量系统,但该系统无法得到光源两侧的光分布<sup>[11]</sup>。Radiant Zamax公司的Ron Rykowski等设计了半球式反射成像测量系统,但该系统上百万的价格限制了其推广应用<sup>[12]</sup>。目前,在光源空间光分布快速全检方面尚无经济、有

效的在线检测设备。本文设计了一套光纤导光式空间光分布测量系统。该系统利用光纤导光方式来获取光源分布的空间光能量,利用接触式图像传感器(Contact Image Sensor, CIS)对光纤阵列传输的光能量进行统一的光电转换,并利用CPLD与NI数采模块对传感器进行驱动与数据采集,可快速完成所有角度的光强分布测量数据的采集与转换。为了评价产品的空间光分布质量,使用待测光源光强分布与参考光源光强分布之间的相关系数作为判定标准,实现了待测样品光分布参数的量化表征与评估。

## 2 检测系统结构

系统主体包含光信息获取模块与光信息转换模块两个部分。其中,光信息获取模块提供框体以支撑光纤收集光源光能量,光信息转换模块完成光电转换并对传感器数据进行初步处理。

### 2.1 光信息获取模块

系统使用光纤进行导光,本文选用南京春辉有限公司500  $\mu\text{m}$ 的塑料光纤。该光纤的数值孔径为0.5,易于耦合,在可见光波段的导光率大于95%,在照明光导领域有着较大的优势,满足短距离传输的应用需求。图1为光信息获取模块的结构,该模块依照LED检测中的C- $\gamma$ 空间角度系统,使用8个内径为100 mm的1/4圆弧板构成4个角度的C角平面,每个C角平面中覆盖的 $\gamma$ 角

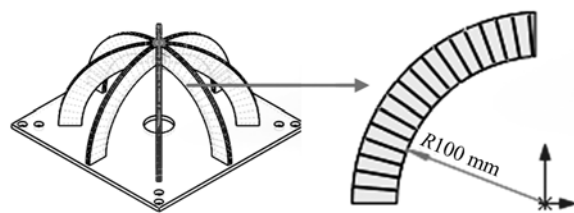


图1 光信息获取模块结构图

Fig. 1 Scheme of light distribution information acquisition module

度为  $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。在圆弧板上刻朝向圆心的 V 型槽后将光纤埋入槽内,在测量时将光源置于圆弧板构成的球心处,以此使光纤端面朝向光源并与该角度的光强保持垂直。

其中,1/4 圆弧板上每个 V 型槽之间的角度间隔决定了测量的角度分辨率。由李存龙等人的研究可知<sup>[13]</sup>,测量间隔在  $5^\circ$  以下时可以很好地还原测量真值,所以,选择测量分辨率较好且使用光纤数目较少的  $5^\circ$  作为光纤分布测量的角度间隔。由于在  $\gamma = \pm 90^\circ$  时无法装夹光纤,  $5^\circ$  测量间隔所需要的光纤总数为 137 根,每根光纤对应不同的测量角度。

### 2.2 光信息转换模块

光信息转换模块需要将收集得到的光能量转换成可读取的数据。系统选用深圳矽感公司型号为 SV2121A4 的 CIS 作为光电转换器件。CIS 依靠级联的 CMOS 图像传感器进行光电转换,同时集成了能完成 1: 1 成像的自聚焦透镜阵列,特别适合采集多根光纤的光输出。

传感器的驱动和输出采用相关采样设计,使用 CPLD 模块生成 CIS 驱动脉冲以及数据采集需要的相关脉冲,使用 NI PXI 系统以及 NI 6115 板卡进行数据采集。CPLD 模块生成如图 2 所示的 4 路脉冲信号。其中,CIS 的时钟脉冲和起始脉冲送给 CIS 作为驱动,与这两路脉冲具有相关时序关系的采样时钟和采样触发脉冲送给数采单元。

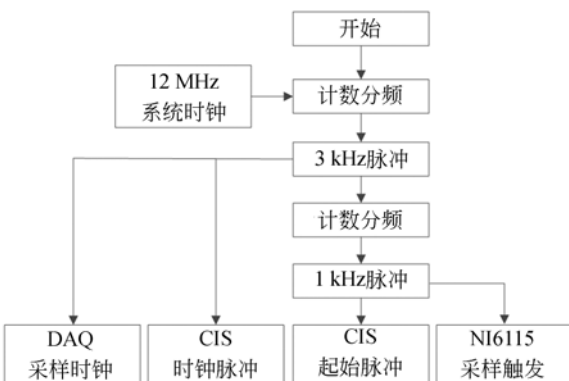


图 2 CPLD 模块多路脉冲生成程序框图

Fig. 2 Generation of multi-channel pulse in CPLD module

## 3 系统分析

### 3.1 系统能量传输分析

在完成对系统的光信息获取与转换之后,设计了专用的装夹模块,形成如图 3 所示的测量系统。

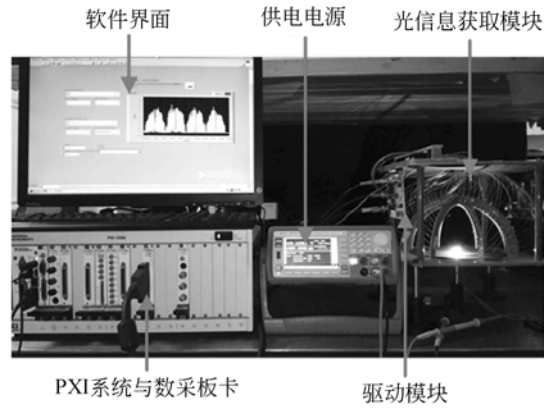


图 3 测量系统图

Fig. 3 Photo of measurement system

如图 4 所示,整个系统的光传输分为 5 个步骤:①表示光耦合入光纤入光端面的过程;②表示光在光纤中的传输过程;③表示光从光纤出光端面射出的过程;④表示光经过 CIS 传感器成像系统的过程;⑤表示光照射到 CMOS 传感器阵列表面的过程。

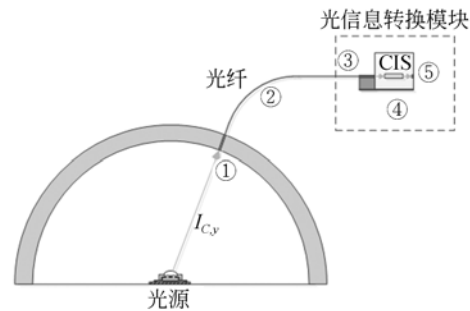


图 4 光能量传输过程示意图

Fig. 4 Process of light energy transfer

将第  $n$  根光纤对应的空间  $(C, \gamma)$  角下的光强记为  $I_{C, \gamma}$ , 光源归一化后的光谱能量曲线为  $p_\lambda(\lambda)$ , 照射到光纤端面的光谱能量曲线的最大值为  $P_m$ , 人眼视见函数为  $V(\lambda)$ , 则入射光强可以表示为:

$$I_{(C, \gamma)} = 683 \times P_m \int_{380}^{780} p_\lambda(\lambda) V(\lambda) d\lambda. \quad (1)$$

记与这根光纤对应的传感器像元的输出为  $F_c$ , 经过系统的传输,  $F_c$  可表示为:

$$F_c = K_c K_3 K_3(n) K_{2l}(n) K_1(n) q \times P_m \int_{380}^{780} p_\lambda(\lambda) [K_2(\lambda)]^l V_c(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中:  $q$  和  $K_1(n)$  是在①过程中产生的误差参数,  $q$  表示光纤入光端面装夹误差引起的实际测量光强  $F'_1$  与期望测量光强  $F_1$  之间的比值:

$$q = F'_1 / F_1, \quad (3)$$

$K_1(n)$  表示第  $n$  根光纤入光端面造成的损耗; 积  $K_2(\lambda)^l$  表示在②过程中光纤传导时的损耗;  $K_3(n)$  表示在③过程中出光端面造成的损耗;  $K_5$  表示在⑤过程中感光像元接收到的能量与照射到该像元区域内的能量的比值;  $K_c$  是一个与积分时间、传感器线性度有关的量;  $V_c(\lambda)$  表示传感器的光谱灵敏度, 光谱积分范围选择可见光波段的原因是本系统的检测对象为可见光光源。在光经过 CIS 中自聚焦阵列的过程中(过程④), 由于自聚焦透镜的功能是成 1:1 的等高实像, 其能量传输特性和①~③过程的光纤传输过程类似, 而且距离较短, 这里忽略其损耗。

$$Q = 683 \times \int_{380}^{780} p_\lambda(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

$$Q_c = K_c K_3 K_3(n) K_{2l}(n) K_1(n) q \times \int_{380}^{780} p_\lambda(\lambda) [K_2(\lambda)]^l V_c(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

则光强和像元输出的表达式可以记为:

$$I_{(c,\gamma)} = Q \times P_m, \quad (6)$$

$$F_c = Q_c \times P_m. \quad (7)$$

### 3.2 矫正方法

由式(4)~式(7)可以看出, 待测参数光强和传感器输出都是与光源强度相关的量, 只要解决  $Q$  与  $Q_c$  的差异就可以解决测量问题。直接测量  $Q_c$  几乎是不可能的。观察  $Q$  与  $Q_c$  的构成, 其中大多数参数是与装配和系统硬件器件本身有关的误差矫正系数, 多为定值, 与光源相关的参数仅有两个:  $q$  与  $p_\lambda(\lambda)$ ; 与传感器本身相关的参数为  $K_c$ , 为了便于说明, 暂时忽略  $K_c$  的影响。系数  $q$  表征加工和定位误差带来的光能量的差异, 待检测的光源应用于照明领域, 光源的空间光分布是均匀变化的, 在加工和定位误差较小的情况下, 系数  $q$  接近 1。  $p_\lambda(\lambda)$  是光源的归一化光谱。系统最重要的应用是检测同一批光源光分布参数的差异性, 在实际矫正中, 采用同一批次中某一个光源

作为标准光源进行矫正可以解决  $q$  与  $p_\lambda(\lambda)$  在标准光源与待测光源间的差异性。在现实生产中, 经过分光分色机的筛选, 同一批次的样品在光谱分布方面的差异不大, 因此  $p_\lambda(\lambda)$  的差异可以忽略不计。对于本就比较接近的  $q$  值, 在同一批次的光源间差异更小。此时可以使用如下公式进行矫正:

$$I_{ck}/I_{dc} = F_{c-ck}/F_{c-dc}, \quad (8)$$

式中:  $I_{ck}$  与  $F_{c-ck}$  分别为参考光源的标准光强与本系统的像元输出值,  $I_{dc}$  与  $F_{c-dc}$  分别为待测光源的标准光强与本系统的像元输出值。在矫正过程中, 为了消除参数  $K_c$  的影响, 取  $F_{c-ck}$  和  $F_{c-dc}$  相同时的  $I_{ck}$  作为待测光源矫正后的光强即  $I_{dc}$ 。具体做法是测量参考光源在不同电流驱动下系统传感器的像元输出值, 记为  $F_{c-ck}(I)$ ,  $I = 5, 10, 20, \dots, 150$  mA。使用标准化测量仪器测量相同电流下的标准光强输出  $I_{ck}(I)$ 。因为电流间隔较小, 默认相邻的两个电流间的光强变化为一个线性变化, 那么通过一次插值就可以得到任意  $F_{c-dc}$  时待测光源校正后的光强  $I_{dc}$ 。

按照上述的矫正方法, 对每根光纤对应的像元输出进行矫正, 就可以得到  $C = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  下,  $\gamma = -85^\circ \sim 85^\circ$  的光强分布。在上述的矫正方法中, 参考光源除了作为矫正光源之外, 还是系统进行一致性筛选时的合格样品光源。这就意味着要选取发光轴与机械轴偏差小、光源整体配光完善的光源作为参考光源。测量数据使用相关系数表征, 如公式(9)所示:

$$R = \frac{\sum_i [I_m(\gamma_i) - \bar{I}_m][I_e(\gamma_i) - \bar{I}_e]}{\sqrt{\sum_i [I_m(\gamma_i) - \bar{I}_m]^2 \sum_i [I_e(\gamma_i) - \bar{I}_e]^2}}, \quad (9)$$

相关系数表征的是两组数列之间的线性程度, 在这里用来表征光源光型及光强分布的一致性特别合适。使用待测光源矫正后的光强分布与参考光源的光强分布之间的相关系数表征二者的线性程度, 也就是二者光型之间的关联性<sup>[14]</sup>。通过相关系数的判定将相关性低的光源认定为差异光源, 并予以剔除。

## 4 实验与结果

实验室自制的测量系统如图3所示。使用安

捷伦公司 B2901A 型直流电源对 LED 光源进行供电。实验样品选择 12 颗同批次暖白型 LED 光源进行试验,12 颗 LED 光源的平均色温为 3 150 K,测试电流为 80 mA,标号为 TDN1 ~ TDN12。其中,TDN1 作为参考光源,TDN11 进行人为的表面透镜磨花处理,TDN12 进行人为的表面划伤处理。将各个光源在远方 LED626 分布光度计测量系统下进行标准测量并观察其差异性。为了更明显地体现差异,将测量结果进行归一化处理,如图 5 所示。从标准测量可以看出,TDN11 和 TDN12 为人工损坏的光源,差异明显;而且在同批次未处

理的光源中,TDN9 和 TDN10 是与其它同批次光源差异最大的。而在自制系统的测量结果中,也可以看出这 4 盏光源的差异,并且差异有增大的趋势,这与之前忽略的  $q$  是有关的。当差异较大时,由加工误差引起的测量差异也会变得比较明显。

表 1 为各个光源光强分布与参考光源光强分布间的相关系数。由表可以看出:TDN9 ~ TDN12 的差异在相关系数中也有所体现,其数值都小于 0.995。由此说明,相关系数可以作为光强分布一致性的筛选指标。

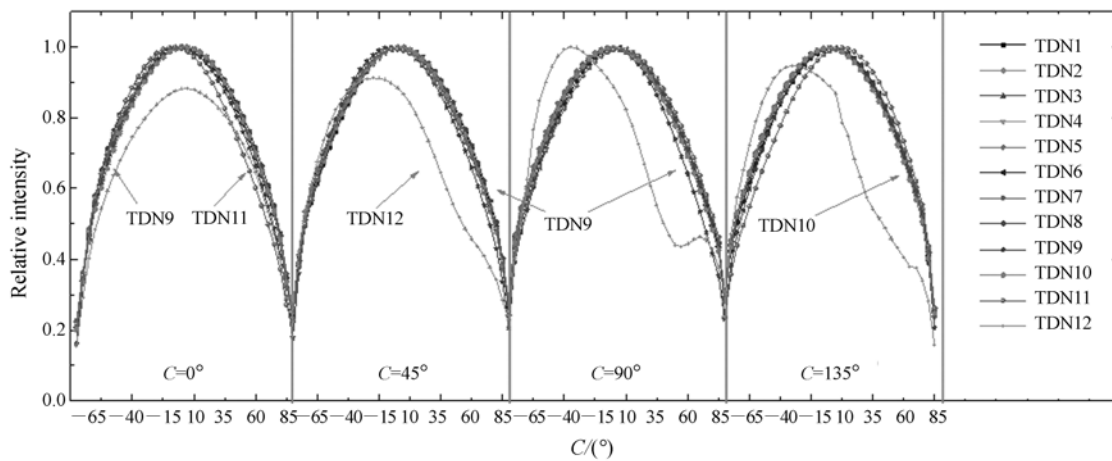


图 5 远方 LED626 分布光度计的测量结果

Fig. 5 Testing results for everfine LED 626 goniophotometers

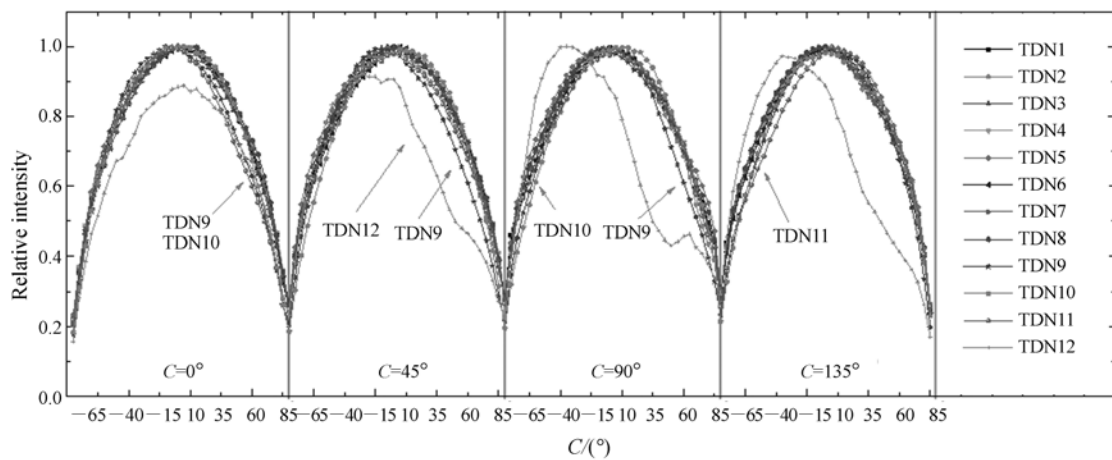


图 6 本设计系统测量结果

Fig. 6 Results of intensity distribution tested by designed system

表1 各光源相关分析结果  
Tab.1 Correlation analysis of samples

序号	相关系数	序号	相关系数
TDN1	1.000 0	TDN7	0.998 7
TDN2	0.996 6	TDN8	0.998 8
TDN3	0.998 4	TDN9	0.989 0
TDN4	0.998 0	TDN10	0.990 8
TDN5	0.997 4	TDN11	0.986 9
TDN6	0.998 2	TDN12	0.808 7

## 5 结 论

本文构建了一套基于光纤导光的LED光源

光强分布一致性筛选特性快速测量系统,通过分析系统的光传输特性建立了系统传感器输出与光强间的关系。以12盏LED光源为实验对象,通过标准仪器测量与本系统测量结果的对比,验证了所提相关系数对差异性的评价能力。实验结果表明,当待测光源与参考光源的光强分布相关系数大于0.995时,可以认定为高度一致光源;当相关系数大于0.99小于0.995时,为低度一致光源,不适用于一致性要求高的场合;当相关系数小于0.99时为不合格光源,应该直接选择剔除。虽然本文所设计的系统针对的是LED灯珠样品,但该方法同样适用于具有较大发光面积的LED灯具,仅需将光信息获取模块的结构进行放大即可。

## 参考文献:

- [1] 顾雯雯. 微流控细胞芯片LED诱导透射式荧光检测微系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2159-2165.  
GU W W. LED induced transmitted fluorescence detector integrated in microfluidic cell chip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2159-2165. (in Chinese)
- [2] 赖伟, 陈伟民, 刘显明, 等. 发光二极管道路灯光强空间分布的非线性优化设计[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 214-221.  
LAI W, CHEN W M, LIU X M, *et al.* Nonlinear optimization of light intensity spatial distribution for LED road luminaires [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 214-221. (in Chinese)
- [3] 王尧, 刘华, 荆雷, 等. 发光二极管道路照明的配光优化设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1463-1468.  
WANG Y, LIU H, JING L, *et al.* Light distribution optimization of LED luminaires for road lighting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1463-1468. (in Chinese)
- [4] CIE Technical Report. *Measurement of LEDs* [R]. CIE Pub. No. 127.
- [5] SJ/T 11394-200. 半导体发光二极管测试方法[S]. SJ/T 11394-200. Measure methods of semiconductor light emitting diodes [S]. (in Chinese)
- [6] CIE Technical Report. *The measurement of absolute luminous intensity distribution* [R]. CIE Pub. No. 70.
- [7] 任豪, 王巧彬, 李康业, 等. LED光源光强空间分布特性的快速测试[J]. 光学仪器, 2008, 30(6): 6-9.  
REN H, WANG Q B, LI K Y, *et al.* Fast-measurement on intensity spatial distribution characteristics of LED [J]. *Optical Instruments*, 2008, 30(6): 6-9. (in Chinese)
- [8] 陈超, 占春连, 杨鸿儒, 等. LED光学参数综合测试装置: CN102213615A [P]. [2011-10-12].  
CHEN CH, ZHAN CH L, YANG H R, *et al.* LED optical parameters comprehensive testing device: CN102213615A [P]. [2011-10-12]. (in Chinese)
- [9] 屠大维, 吴仍茂, 杨恒亮, 等. LED封装光学结构对光强分布的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 832-838.  
TU D W, WU R M, YANG H L, *et al.* Effect of optical structure on output light intensity distribution in LED package [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 832-838. (in Chinese)
- [10] 叶钊, 任建伟, 李宪圣, 等. 用于星上定标光源的LED筛选装置[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 64-71.  
YE ZH, REN J W, LI X SH, *et al.* Screening device for LED as spaceborne calibration light source [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 64-71. (in Chinese)
- [11] 沈焕波. 成像式LED光学性能参数检测技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2012.  
SHEN H B. *Imaging-based methods for photometric measurement of LEDs* [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [12] RYKOWSKI R, KOSTAL H. Novel approach for

- LED luminous intensity measurement [J]. *SPIE*, 2008, 6910:.
- [13] 李存龙,陈伟民,刘显明,等. 基于误差理论的LED灯具光强分布测量精确度分析[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(10):1537-1541.  
LI CH L, CHEN W M, LIU X M, *et al.*. Analysis of measurement accuracy for light intensity distribution of LED luminaries based on error theory [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(10):1537-1541. (in Chinese)
- [14] CHIEN W T, SUN C C, MORENO I. Precise optical model of multi-chip white LEDs[J]. *Optics Express*, 2007, 15(12):.

#### 作者简介:



刘显明(1984-),男,博士,副教授,主要从事光谱分析、光学无损检测、照明光学测量等方面的研究。E-mail: xianming65@163.com



叶小广(1988-),男,硕士研究生,主要从事LED照明、光学测量以及LED可靠性的研究。E-mail: cqyexiaoguang@foxmail.com



陈伟民(1955-),男,教授,博士生导师,主要从事光电技术及系统方面的研究。E-mail: wmchen@cqu.edu.cn



雷小华(1980-),女,博士,副教授,主要从事光学设计、光学测量等方面的研究。E-mail: xhlei@cqu.edu.cn