

测量距离对发光二极管平均发光强度的影响

刘 建¹ 刘 慧¹ 赵伟强¹ 张保洲^{2*}

¹中国计量科学研究院,北京 100029

²北京师范大学天文系,北京 100875

摘要 国际照明委员会的CIE 127号文件专门针对发光二极管(LED)的光辐射测量方法给出了A、B两个测量“LED平均发光强度”的条件,并得到世界同行的普遍认可。然而,实验测量中发现同一只LED管在不同的测量条件下的平均发光强度相差悬殊,甚至有LED管在A、B两个不同条件下的平均发光强度测量值相差近10%,严重影响了LED光度量值的准确评价。对LED光强空间分布数学建模的分析,通过计算以及实验验证表明将测量角定为 0.5° ,测量距离变为645 mm,能够将LED光强空间分布不均匀对LED平均发光强度测量的距离影响减小到0.5%以下,从而保证LED平均发光强度量值的一致性。

关键词 测量;光度计量;LED平均发光强度;测量距离

中图分类号 O432

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0912001

Impact of Distance between Detector and LED on Measurement of Averaged LED Intensity

Liu Jian¹ Liu Hui¹ Zhao Weiqiang¹ Zhang Baozhou^{2*}

¹National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

²Astronomy Department, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract Commission International de Illumination (CIE) publishes ‘CIE 127 technical report’ (CIE 127) for light emitting diode(LED) measurement. Two different conditions (condition A and condition B) for measurement of averaged LED Intensity are proposed in CIE 127, and the LED measurement method gradually win the worldwide recognition. Most of the LED has a different averaged LED intensity in these two measurement conditions, and the difference is up to 10% in some LED measurements, so it is difficult to evaluate the averaged LED intensity accurately. Mathematical models for different kinds of luminous intensity distribution have been created according to a large amount of measurement data. Simulation results and measurement results make clear that the impact of strong directional luminous intensity distribution can be reduced to less than 0.5% when distance between detector and LED is up to 645 mm, and the equivalent full plane angle is approximately 0.5° , this work makes the value of averaged LED intensity have consistency widely.

Key words measurement; calibration of photometry; averaged LED intensity; measurement distance

OCIS codes 120.5240; 120.3940

1 引言

发光二极管(LED)是一种电致发光的半导体发光器件^[1]。它与传统的白炽灯相比,具有发热低、发光效能高、寿命长和低电压控制等突出优点,与荧光灯相比,又避免了荧光灯管破裂溢出汞的二次污染,是一种节能高效、绿色环保的照明新产品^[2-4]。在当今世界能源紧缺、全球倡导低碳环保的大前提下,世界各国都在政府的大力资助下加快推进LED照明取代传统照明的步伐。

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-05-11

基金项目: 中国计量科学研究院基本业务费(23-AKY1318)

作者简介: 刘 建(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事光辐射计量方面的研究。E-mail: liujian@nim.ac.cn

*通信联系人。E-mail: zhangbzh@bnu.edu.cn

LED主要由发光芯片和封装构成。采用不同材料和不同工艺可以生产出不同颜色的准单色光的LED,也可通过几种芯片集成或在封帽中加入荧光粉制成白光LED。设计时采用不同的封装方式,LED光强空间分布也各不相同,同时还具有光源尺寸小,总光通量小等特点,使得LED的光色参数评价不能沿用传统白炽灯的测量评价方法。

国际照明委员会针对LED光源的特点先后修订出版了CIE 127号文件,给出了LED平均发光强度的概念,并推荐测量平均发光强度的A、B两个条件。A条件:光度探测器接收光阑面积为100 mm²,探测器表面距离LED管前端的距离为316 mm,对应测量角约2°;B条件:光度探测器接收光阑面积为100 mm²,探测器表面距离LED管前端的距离为100 mm,对应测量角约6.5°^[5]。目前,这两个条件得到国际同行的普遍认同。

本文就目前CIE A和CIE B两个测量条件下LED的平均发光强度值普遍不一致的现状,通过大量的测量分析,建立探测器接收面上的LED光强空间分布模型,通过仿真计算以及实验验证的方法给出一个比较合理的LED平均发光强度测量条件,实现了LED平均发光强度量值的统一。

2 LED平均发光强度测量中的实际问题

两个测量条件的同时存在,使得大部分的LED在不同的测量条件下有不同的平均发光强度,从而量值很难统一起来,也很难用平均发光强度这一参数来衡量LED的发光性能,使平均发光强度这一物理量变得模糊。

表1摘取了芬兰赫尔辛基理工大学Kärhä等^[6]在CIE A/B条件下测量不同型号LED得到的平均发光强度部分数据。表中的测量数据显示同一只LED管在两个测量条件下的平均发光强度相差悬殊,大部分的LED表现出在A测量条件下的平均发光强度(I_{LEDA})略高于B条件下的平均发光强度(I_{LEDB}),只有两只LED例外,分别是Sideview g和Square r。从LED的名字上看出他们与其他LED的封装形状不一样。并且从 I_{LEDA}/I_{LEDB} 比值来看,最小值为0.25,而最大值为3.958,这意味着LED在不同的测量条件下,测量结果的差别十分巨大,很难准确评价其量值。

表1 赫尔辛基理工大学的LED平均发光强度测量结果

Table 1 Measurement results of averaged LED intensity in Helsinki University of Technology

LEDname	3 mm w	3 mm r	3 mm g	5 mm w	5 mm b	5 mm g	5 mm r
I_{LEDA}/I_{LEDB}	0.989	1.081	1.071	1.089	1.247	1.206	1.179
LEDname	5 mm g	10 mm o	10 mm r	1 W w	1 W g	Sideview g	Square r
I_{LEDA}/I_{LEDB}	1.094	3.958	1.378	1.057	1.337	0.700	0.250

在研究LED光色参数校准的过程中也发现相似的实验现象,在充分老化过的LED中挑选其空间光强分布相似、量值稳定、重复性好的LED分别CIE 127推荐的A、B条件下测量其平均发光强度。测量结果见表2。

表2 LED在A/B条件下的平均发光强度

Table 2 Averaged LED intensity on condition A and B

LED No.	W-11	W-13	W-18	W-19	B-4	B-6	B-7	B-4
I_{LEDA}/cd	2.062	1.894	1.732	1.747	0.325	0.197	0.199	1.155
I_{LEDB}/cd	1.982	1.831	1.670	1.684	0.310	0.188	0.191	1.102
I_{LEDA}/I_{LEDB}	1.040	1.034	1.037	1.037	1.047	1.049	1.041	1.048
LED No.	G-5	G-11	RS12	R-4	R-7	R-15	Y-1	Y-2
I_{LEDA}/cd	0.430	1.671	0.162	0.165	0.168	0.673	0.987	1.055
I_{LEDB}/cd	0.417	1.604	0.160	0.162	0.160	0.638	0.906	0.972
I_{LEDA}/I_{LEDB}	1.031	1.042	1.010	1.019	1.046	1.054	1.090	1.085

表2中的测量结果也表现出在两个测量条件下其平均发光强度的量值不一致,并且从测量结果显示LED在A测量条件下得到的平均发光强度值普遍高于B条件下的平均发光强度4%左右,有的LED甚至高于9%。需要补充的是,用来做实验的LED均是通过老化挑选后得到,其光强的空间分布几乎接近,并且用面响应度分布均匀的探测器来测量从而避免探测器面响应度分布不均匀对测量偏差的影响^[7-9],但是即使在这样的测量条件下,两个条件下测得的平均发光强度差别仍然存在较大的差别。

为了能够让LED平均发光强度的量值统一,使该物理单位发挥有效的意义来评价LED的光度参数,借

助前期建立的 LED 光强空间分布模型来分析 LED 平均发光强度的测量条件。

3 LED 平均发光强度的测量模型

LED 平均发光强度测量条件中, A 条件的测量距离为 316 mm, B 条件的测量距离为 100 mm。假若 LED 在探测器接收面上的光照度分布是均匀的, 同时探测器的面响应度分布也是均匀的, 那么根据照度的距离平方反比定律可以证明两种测量条件下的平均发光强度值是相同的。

根据 LED 在探测器接收面上的光强空间分布主要表现为余弦形分布, 正弦形分布和梯形分布三种形式^[10]。其中余弦形分布的数学模型为

$$E_{\alpha} = E_0 \cos^n(\alpha), \quad (1)$$

式中 E_{α} 表示 LED 偏离光学轴 α 时的照度, n 表征 LED 照度分布随方向变化强弱的强度因子, n 越大, 其探测器接收面上的光强空间分布越不均匀。当 α 为半强度角时, $E_{\alpha} = 0.5E_0$, 对任意已知半强度角的 LED, 均能计算出强度因子 n , 从而得到整个探测器接收面上的光强空间分布^[11]。也可以看出, 半强度角越窄, 即 α 越小, 计算得到的 n 越大, 光强空间变化越剧烈。

余弦形分布是 LED 光强分布最普遍的一种, 也是光强空间分布变化最剧烈的一种。半强度角越窄的 LED 将会在平均发光强度测量中差别越大, 这里分别模拟 5 种不同半强度角的余弦形分布 LED 在探测器接收面上的平均发光强度。

根据距离平方反比定律

$$E_{\alpha} = I_{\alpha} / l_{\alpha}^2, \quad (2)$$

式中 l_{α} 为光源到探测器接收面偏离探测面中心 α 位置处的距离, E_{α} 为探测器接收面上该点的照度, I_{α} 为光强。对于 CIE 127 中的 A、B 测量条件来说, A 条件测量距离 $l_A = 316$ mm, 对应的测量角约为 2° , 即探测器接收的光强为 2° 测量角内光强的平均值。同理 B 条件测量距离 $l_B = 100$ mm, 测量角为 6.5° 测量角内的平均值。估算探测器接收面上由于 α 变化导致距离 l_{α} 变化引入的测量结果的偏差。分析可知在 CIE B 条件下由于测量角大引入的偏差最大, 并以此来计算

$$\cos(6.5^{\circ}/2) = 0.9984, I_{3.25^{\circ}} = I_B / \cos(3.25^{\circ}) = 100.16, \quad (3)$$

$$\delta_{\max} = 100\% \times \left(\frac{E_{3.25^{\circ}} \cdot I_B^2 - E_{3.25^{\circ}} \cdot I_{3.25^{\circ}}^2}{E_{3.25^{\circ}} \cdot I_{3.25^{\circ}}^2} \right) = -0.3\%, \quad (4)$$

(4) 式看出探测器接收面内由于 α 不同导致距离变化引入的测量偏差最大值为 -0.3% , 而 LED 光强空间分布的变化引起的偏差比这高 2 个数量级, 所以计算中可以忽略距离变化的影响, 即认为探测器接收面上各点到 LED 顶点的距离相等, 那么探测器接收面上的光强值可以表示为

$$I = I_0 \int_0^{\alpha} \frac{I_{\alpha}}{I_0} d\alpha, \quad (5)$$

式中 I_0 为探测器接收面中心位置探测器响应的光强值, I_{α} 为探测器接收面上偏离中心 α 位置探测器响应的光强值。按 (5) 式计算不同测量条件下探测器接收面上的相对光强分布平均值, 即探测器响应得到的光强值。

表 3 A/B 条件下探测器接收面上相对光强分布的平均值
Table 3 Averaged relative LED intensity on condition A and B

LED No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Half-intensity angle	10°	15°	30°	60°	105°
A condition /%	97.80	99.01	99.76	99.94	99.98
B condition /%	77.10	88.80	97.05	99.28	99.79
I_{LEDA} / I_{LEDB}	1.268	1.115	1.028	1.007	1.002

表 3 中数据为半强度角分别为 $10^{\circ} \sim 105^{\circ}$ 的 5 只余弦形分布 LED 管在使用面响应度分布均匀的探测器分别在 CIE A/B 两个测量条件下得到的 LED 平均发光强度, 可以看出, 不同光强分布的 LED 在 A、B 两个条件下平均发光强度之比是不一样的, 但是总体上是表现出在 A 条件下测量的平均发光强度大于 B 条件下的平均发光强度。这也与本实验测量数据相吻合。

4 解决方案的探讨以及验证

产生这样现象的原因主要还是因为光强的空间分布不均匀。表3中看出,随着LED半强度角的增加,LED光强的相对空间分布均匀性变好,A、B条件下平均发光强度的测量结果也就越接近,即LED平均发光强度不同测量条件下的一致性与探测器接收面上光照度分布的均匀性有关,只要光照度分布越均匀,对测量条件就越不敏感。

光强空间分布不均匀的LED多是有比较窄的半强度角,只要解决窄光束LED在探测器接收面上的光照度分布表现良好的均匀性即能够解决A/B测量条件造成的量值不一致的矛盾。

下面以半强度角为10°的LED为例来反演一个理想的测量距离。

根据(1)~(4)式半强度角为10°的LED数学表达式为

$$I_{\alpha} = I_0 \cos^{182}(\alpha). \quad (6)$$

若要将LED平均发光强度的测量偏差控制在0.5%以内,则要近似满足:

$$\pi r^2 \cdot I_{\alpha} + \frac{1}{3} \pi r^2 \cdot (I_0 - I_{\alpha}) > (1 - 0.5\%) \cdot \pi r^2 \cdot I_0. \quad (7)$$

联立(6)、(7)式可以解得

$$\alpha < 0.52^{\circ}. \quad (8)$$

那么根据探测器的尺寸可以算出对应的测量距离。

CIE 127号文件规定了探测器的接收面窗口面积为100 mm²,但是没有规定形状,通用的探测器接收窗口为圆形,则直径为D=11.3 mm,设测量距离为L,那么有

$$\tan(0.52^{\circ}) > \frac{D/2}{L}, \quad (9)$$

计算得出 $L > 620.9$ mm。

说明探测器与LED顶点的距离至少要大于620.9 mm才能使半强度角为10°的LED在测量平均发光强度时由其光强空间分布不均匀引起的测量偏差小于0.5%。

由此可见,CIE 127文件中推荐的测量距离太近,这对测量方向性很强的LED时都会由于LED光强空间分布的不均匀性引入较大的测量误差。从表3中也可以看出,A条件时测量半强度角为10°的LED时误差可以达到2.20%。

为此,这里可以规定一个比较典型的测量距离来使得LED的平均发光强度能够克服由不同测量距离引起的量值不一致现状。根据前面计算结果,可以推荐测量距离为645 mm,对应的测量角为0.5°,作为测量LED平均发光强度的测量条件,从而规范LED平均发光强度的测量结果。根据该条件重新测量LED管的平均发光强度,其结果如表4所示。

表4 LED在不同测量距离下的平均发光强度

Table 4 Averaged LED intensity on different measurement distances

LED No.	W-11	W-13	W-18	W-19	B-4	B-6	B-7	G-4
I_{LEDA}/cd	2.069	1.883	1.727	1.743	0.327	0.200	0.199	1.151
I_{621}/cd	2.081	1.896	1.737	1.755	0.329	0.202	0.200	1.160
I_{645}/cd	2.082	1.895	1.737	1.755	0.329	0.202	0.200	1.160
I_{645}/I_{LEDA}	1.006	1.007	1.006	1.007	1.008	1.007	1.005	1.008
I_{645}/I_{621}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.002	1.000	1.001	1.000
LED No.	G-5	R-4	R-7	R-15	Y-1	Y-2	W-20	
I_{LEDA}/cd	0.429	0.170	0.167	0.673	0.977	1.040	12.242	
I_{621}/cd	0.431	0.170	0.166	0.677	0.993	1.055	12.614	
I_{645}/cd	0.431	0.171	0.166	0.677	0.995	1.057	12.634	
I_{645}/I_{LEDA}	1.004	1.005	0.994	1.006	1.019	1.016	1.032	
I_{645}/I_{621}	1.000	1.002	1.000	0.999	1.002	1.001	1.002	

表4中测量的LED样品除了G-11和RS12两只LED样品被损坏无法测量和新增一只半角宽度不足20°的W-20样品外,其他的LED样品与表2中一致。对比测量结果可以看出,LED平均发光强度在三种不同测

量距离下,随测量距离增加,其平均发光强度值变化减小。当测量距离变为 645 mm 时,其平均发光强度值已经不再随测量距离有明显变化,并且即便是半角宽度很窄的 LED(W-20,其在 CIE B 条件下测得的平均发光强度为 10.510 cd)在 645 mm 的测量距离下,其平均发光强度值也趋于统一。由此表明将 LED 平均发光强度的测量距离推荐为 645 mm 是可行的。

5 结 论

LED 发光多具有方向性,使得在测量 LED 平均发光强度时,不同光强空间分布的 LED 对测量条件的依赖性很大,特别是测量窄光束 LED 的平均发光强度时,CIE 127 推荐的两个不同测量条件得到的平均发光强度相差悬殊,不能真实地表现 LED 的平均发光强度。通过研究分析,将测量条件中的测量距离加长到 621 mm 以上,将能够更为准确地表述 LED 的平均发光强度。考虑到目前 LED 的光效越来越高,探测器在这样的测量距离下也能表现出良好的线性水平,建议将探测器面到 LED 顶点的测量距离定为 645 mm,对应的测量角约为 0.5° ,从而规范 LED 平均发光强度的量值,使得量值统一,能够准确地评价 LED 的平均发光强度。

参 考 文 献

- 1 Hao Yunxiang, Chen Xiaju, Zhang Baozhou. Photometry[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2010.
郝允祥,陈遐举,张保洲.光度学[M].北京:中国计量出版社,2010.
- 2 Editorial Department of 'Light and Lighting'. The next development of LED[J]. Light and Lighting, 2010, (1): 45-46.
《光源与照明》编辑部. LED 发展的下一步想法[J]. 光源与照明, 2010, (1): 45-46.
- 3 Chen Guolong, Yao Qi, Zhu Lihong, *et al.*. Design of a temperature-controlled test system for luminous intensity spatial distribution characteristics of high power LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 031202.
陈国龙,姚琦,朱丽虹,等.可控温大功率 LED 光强空间分布测试系统的设计[J].激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 031202.
- 4 Xu Yuzhen, Lin Weiming. A novel LEDphoto-electro-thermal model with simplified variables[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0523001.
徐玉珍,林维明.一种简化变量的新型 LED 光电热模型[J].光学学报, 2013, 33(5): 0523001.
- 5 CIE. Measurement of LED[S]. CIE127-2007.
- 6 Kärhä P, Manninen P, Hovila J, *et al.*. Determination of Luminous Intensity of Light-Emitting Diodes with Modified[OL]. <http://www.pmodwrc.ch/newrad2005/pdfabstracts/Newrad044.pdf>. [2015-7-10].
- 7 Liu Jian, Liu Hui, Zhao Weiqiang, *et al.*. The impact of uniformity of detector responsivity on measurement of averaged LED intensity[J]. Acta Metrologica Sinica, 2012, 33(4): 317-320.
刘建,刘慧,赵伟强,等.探测器响应度不均匀性对测量 LED 平均发光强度的影响[J].计量学报, 2012, 33(4): 317-320.
- 8 Cai Wentao, Liu Xianming, Lei Xiaohua, *et al.*. Far-field condition analysis of surface light source[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s212002.
蔡文涛,刘显明,雷小华,等.面光源的远场条件分析[J].光学学报, 2013, 33(s2): s212002.
- 9 Jian Liu, Baozhou Zhang, Hui Liu, *et al.*. Impact of detector spatial uniformity on the measurement of averaged led intensity[J]. IEEE Photonics, 2014, 6(1): 6800107.
- 10 Liu Jian, Liu Hui, Zhao Weiqiang. The mathematical model of LED luminance distribution field[J]. China Light & Lighting, 2015, (3): 25-28.
刘建,刘慧,赵伟强. LED 光照场的数学建模研究[J].中国照明电器, 2015, (3): 25-28.
- 11 Chung T M, Dai S. A study of the spatial intensity distribution of LED for general lighting[J]. Journal of Light & Visual Environment, 2010, 34(4): 170-175.

栏目编辑:何卓铭