

文章编号:1007-2780(2009)01-0145-06

RGB LED 白光照明单元的组合设计

郭 靖, 金尚忠

(中国计量学院 浙江省现代计量测试技术及仪器重点实验室, 浙江 杭州 310018, E-mail: huangrong1105@163.com)

摘 要: 在含有多个 LED 排列的光源中, 需要对 RGB LED 照明单元的排列组合进行精确的设计。文章将每一个单色 LED 看成是一个非理想的朗伯发射体, 分析了 LED 排列的几种典型结构, 根据设计方程式模拟出了不同 LED 结构的照度分布情况。模拟结果表明, 排列 LED 在其极值范围内可以得到比较均匀的照度分布, 随着 LED 之间距离的增大, 其中心位置的照度随之下降; 增大 LED 阵列中心到被照平面的距离 z , 照度均匀性也随之逐渐降低。

关 键 词: 发光二极管; LED 组合排列; 照度均匀性
中图分类号: TB133 **文献标识码:** A

1 引 言

近年来, LED 在种类、亮度和发光效率等方面都取得了非常大的进步。与传统照明光源相比, 白光 LED 具有无污染、寿命长、体积小、耗能少和可靠性高等优点^[1], 随着性能的提高和价格的不断下降, 其将成为主流照明光源的趋势已为世所公认^[2,3]。

利用 LED 技术实现白光的方法主要有 2 种: 荧光法和组合法^[4]。荧光法是在蓝光 LED 上涂覆黄色荧光粉, 由蓝色和黄色 2 个波段的光合成白光, 其缺点是缺少绿色和红色波段的光, 显色性差。组合法是采用红、绿、蓝 (RGB) 三色发光管或晶粒组合排列, 利用不同的驱动电流调节各管芯的发光强度, 得到不同色温的白光。其优点是显色指数高 (目前实验室可达 90 以上)^[5,6], 具有较高的颜色饱和度, 而且由于不需要荧光粉, 其发光效率也高于白光 LED。组合法具有非常好的灵活性, 只要配备适当的控制器分别操控各色 LED, 使用者可以随意调整喜好的颜色。

大尺寸、多芯片混合白光 LED 模块是获得大功率白光 LED 照明的一个可行途径^[7,8]。不同的照明应用对照度分布的要求不同, 所以 RGB LED 照明单元的排列设计是多芯片混合白光 LED 模块设计的关键。

本文分析了多种不同的 LED 排列的照度均匀情况, 把每一个单色 LED 看成是一个非理想的朗伯发射体, 建立了设计方程式, 对 LED 的均匀照度、LED-LED 之间的距离和 LED 阵列中心到被照平面上的距离 z 的三者关系进行了模拟分析。

2 LED 的光学模型原理

由 LED 芯片的发光原理可知, LED 光强分布是方向角 (光线与光轴间的夹角 θ) 的余弦函数。因此 LED 照射到与光轴垂直方向的平面上时, 该平面上照度可以表达为^[9]:

$$E(r, \theta) = \frac{I(\theta)}{r^2} = \frac{I_0 \cos^m \theta}{r^2} \quad (1)$$

式中 r 为 LED 与该平面之间的距离。将 r, θ 坐标转化为笛卡尔空间坐标 (x, y, z) , 则,

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$
$$\cos \theta = \frac{\sqrt{(z - z_0)^2}}{r}$$

代入式 (1), 因此被照面上任一点的平面照度也可表达为:

$$E(x, y, z) = \frac{(z - z_0)^m L_{\text{LED}} A_{\text{LED}}}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{m+2}{2}}} \quad (2)$$

其中 L_{LED} 是 LED 法线上的光亮度, A_{LED} 是 LED 芯片的发光面积。

3 多个单色 LED 的混光模型与模拟结果分析

利用式(2)来模拟多个单色 LED 不同排列组合的均匀照度分布情况。先从几种典型的混光模型开始,在此基础上分析通用的混光模型。

被照平面上的照度 E 可由单个 LED 的照度分布相加得到^[10]。设 2 个 LED 之间的距离为 d , d 可以调节。随着 d 的增大,2 个 LED 照射的范围也增大。但在照射区域的中间部分,即图 1 中原点附近的区域照度往往会低于两边的照度,造成光照度的均匀性不好。所以在确定 LED 的排列位置时要考虑 d 的合适大小,使原点附近区域的光照度不至于相差太大。受爱里斑的启示,根据斯派罗判据^[11,12],可以计算出 2 个 LED 之间的最大距离。

3.1 典型混光模型

3.1.1 2 个 LED 排列

2 个 LED 排列的照度分布方程式如下:

$$E(x, y, z) = z^m A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \{ [(x - d/2)^2 + y^2 + z^2]^{-(m+2)/2} + [(x + d/2)^2 + y^2 + z^2]^{-(m+2)/2} \} \quad (3)$$

依据斯派罗判断法则,令 $\partial^2 E / \partial x^2 = 0$ 且 $x=0, y=0$ 可以确定两个 LED 排放时之间的最大距离 d_0 :

$$d_0 = \sqrt{4/(m+3)}z \quad (4)$$

z 是 LED 阵列中心到被照平面上的距离。如图 1 所示,图 1(a) 是沿着 x 方向的 2 个 LED 排列的示意图型;图 1(b) 根据照度分布方程式模拟出被照屏上 LED 的均匀照度分布沿 x 轴和 LED 阵列中心到被照平面上的距离 z 的变化情况,其中 LED 的 $m=81, d=d_0=0.218z$;图 1(c) 为增大 LED 之间的距离 d 时,模拟照度分布随 x, z 的变化结果,取 $d=1.2d_0$ 。

由模拟的结果可以看出 LED 的均匀照度、LED-LED 之间的距离、LED 阵列中心到被照平面上的距离 z 三者之间的关系。如图 1(b) 所示,照度在 $-0.18 \sim 0.18$ 范围内照度比较均匀,但在远离中心位置,即在 -0.1 和 0.1 之外,照度均匀性逐渐下降。增大 2 个 LED 之间的距离,如图 1(c) 所示,取 $d=1.2d_0$,在 $x=0$ 的位置可以看到照度均匀性有所下降,随着 LED 阵列中心到被照平面上的距离 z 的增大,照度均匀性逐渐降低。

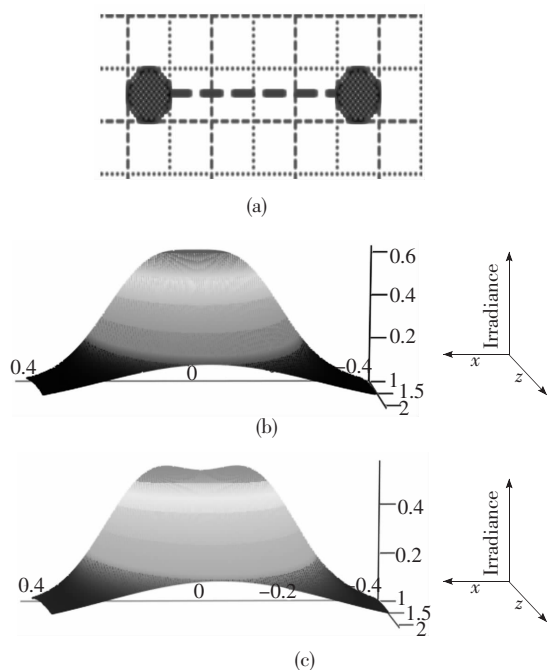


图 1 (a)两个 LED 排列模块;(b)照度随 x, z 的变化关系;(c)增大 LED 距离 d, E 随 x, z 的关系。

Fig. 1 (a)Two-LED array;(b)Uniform irradiance distribution along the x, z direction;(c)Corresponding pattern when the separation between LEDs is slightly increased.

3.1.2 4 个 LED 排成正方形结构

考虑 4 个 LED 排列成正方形的结构,排列方式如图 2(a)所示。设相邻 LED 之间的距离为 d ,被照平面上的照度 E 由每个 LED 的照度分布相加得到,因此有:

$$E(x, y, z) = z^m A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \left[\left(x - \frac{d}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{d}{2} \right)^2 + z^2 + \left(x - \frac{d}{2} \right)^2 + \left(y + \frac{d}{2} \right)^2 + z^2 + \left(x + \frac{d}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{d}{2} \right)^2 + z^2 + \left(x + \frac{d}{2} \right)^2 + \left(y + \frac{d}{2} \right)^2 + z^2 \right] \quad (5)$$

根据斯派罗法则和爱里斑的启示,可以得到 LED 正方形结构排列的 d 的最大值:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4}{m+2}}z \quad (6)$$

图 2(a)为 4 个 LED 排成的正四边形结构,坐标原点选在正方形的中心位置;图 2(b)为根据照度分布方程式模拟出的被照屏上 LED 的均匀照度分布沿 x 轴的变化情况,其中 LED 的 $m=3$,取 $z=1, \rho=\rho_0=0.8944$ 。

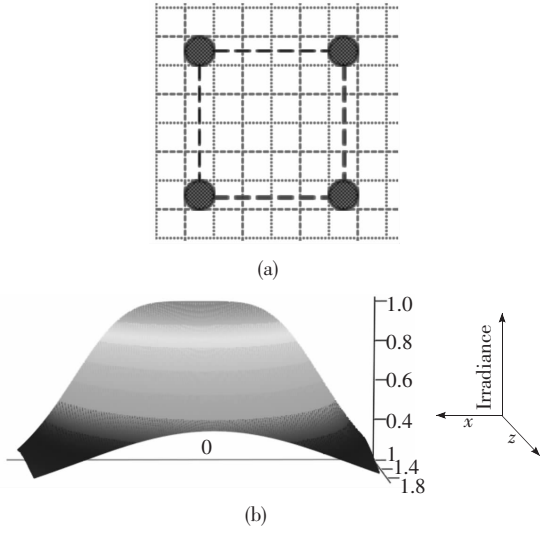


图 2 (a)4 个 LED 排列模块;(b)照度随 x,z 的变化关系.
Fig. 2 (a)Four-LED array;(b)Uniform irradiance distribution along the x,z direction.

如图 2(b)所示,在 $-0.5 \sim 0.5$ 范围内照度比较均匀,但在远离中心位置,即在 -0.5 和 0.5 之外,照度均匀性逐渐降低。若给定的 4 个 LED 排列成正方形,可以根据模拟计算的结果排列正方形相邻顶点的距离在 $0.894 4$ 之内,得到的照度在一定范围内具有较好的均匀性。随着 LED 阵列中心到被照平面的距离 z 增大,照度均匀性随之逐渐降低。

3.1.3 正六边形 LED 排列

考虑 6 个 LED 排成正六边形的结构,如图 3 所示建立坐标原点,令原点到每个 LED 的距离为 ρ ,被照平面上的照度 E 可由每个 LED 的照度分布相加得到,因此有:

$$E(x,y,z) = z^m A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \sum_{n=1}^6 \left[\left(x - \rho \cos \frac{\pi}{3} n \right)^2 + \left(y - \rho \sin \frac{\pi}{3} n \right)^2 - z^2 \right]^{-\frac{m+2}{2}} \quad (7)$$

根据斯派罗法则和爱里斑的启示,可以得到 LED 正六边形结构中 ρ 的极限值:

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{2}{m+2}} z \quad (8)$$

图 3 中,图 3(a)为 6 个 LED 排成的正六边形

结构,坐标原点选在正六边形的中心位置;图 3 (b)为根据照度分布方程式模拟出的被照屏上的均匀照度分布沿 x 轴的变化情况,其中 LED 的 $m=3$,取 $z=1, \rho=\rho_0=0.632 5$ 。

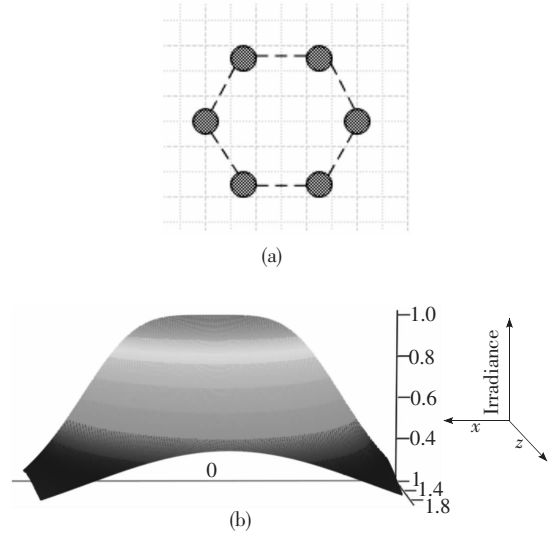


图 3 (a)6 个 LED 排列模块;(b)照度随 x,z 的变化关系.
Fig. 3 (a)Six-LED array;(b)Uniform irradiance distribution along the x,z direction.

如图 3(b)所示,照度在 $-0.6 \sim 0.6$ 范围内照度比较均匀,但在远离中心位置,即在 -0.6 和 0.6 之外,到照度均匀性逐渐下降。若给定的 6 个 LED 排列成正六边形,可以根据模拟计算的结果排列正六边形的中点到顶点的距离在 $0.632 5$ 之内,所得到的照度在一定范围内具有较好的均匀性。增大 LED 阵列中心到被照平面的距离 z ,照度均匀性随之逐渐降低。

3.2 通用的 LED 混光模型

在以上几种简单模型的基础上,结合 LED 阵列的实际应用,推导出了几种通用的 LED 混光模型。

3.2.1 圆环排列结构

在机器视觉应用中^[13],最常用的就是 LED 圆环排列。考虑一个半径为 ρ 的 LED 圆环排列,其中 LED 的个数 $N \geq 3$,照度 E 的表达式为:

$$E(x,y,z) = z^m A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \sum_{n=1}^N \{ [x - \rho \cos(2\pi n/N)]^2 + [y - \rho \sin(2\pi n/N)]^2 + z^2 \}^{-(m+2)/2} \quad (9)$$

根据斯派罗判断法则可以确定 LED 圆环排列的最大半径为：

$$\rho_0 = \sqrt{2/(m+2)}z \tag{10}$$

在圆环结构中，照度 E 与 LED 的个数 N 相关。考虑 9 个 LED 的排列情况。图 4(a) 为 9 个 LED 均匀排成的圆环结构，坐标原点选在圆环的中心；图 4(b) 为根据照度分布方程式模拟出的被照屏上的均匀照度分布沿 x 轴的变化情况，其中 LED 的 $m=3$ ，取 $z=1$ ， $\rho=\rho_0=0.6325$ 。

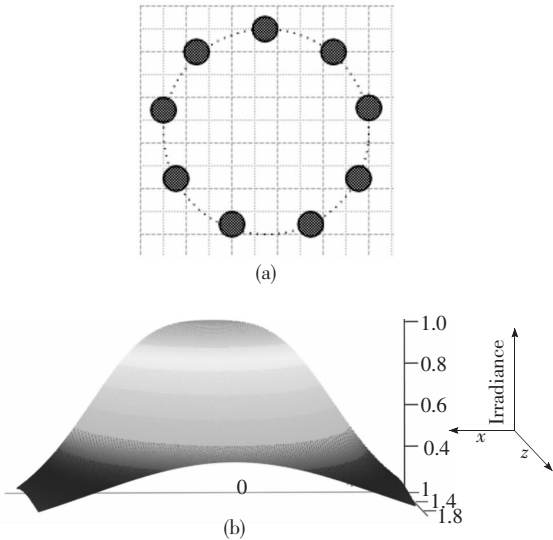


图 4 (a) 环形结构；(b)照度随 x,z 的变化关系。
Fig. 4 (a)Circular ring of LED array; (b)Uniform irradiance distribution along the x,z direction.

如图 4(b)所示，照度在 $-0.5\sim0.5$ 范围内照度比较均匀，在远离中心位置，即在 -0.5 和 0.5 之外，可以看到照度均匀性随之降低。若给定 N 个 LED 排列成圆环，可以根据计算模型先确定圆环半径的最大距离。排列半径在最大距离之内，得到的照度在一定范围内具有比较好的均匀性。随着 LED 阵列中心到被照平面的距离 z 的增大，照度均匀性随之逐渐降低。

3.2.2 线性排列

在结构照明应用中，最常用的是 LED 的线性排列^[14]。在这种线性结构中，设 LED-LED 之间的距离为 d ， N 个 LED 组成线性结构的照度 E 可以表达为：

$$E(x,y,z) = z^m A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \sum_{n=1}^N \{ [x - (N+1-2n) \cdot (d/2)]^2 + y^2 + z^2 \}^{-(m+2)/2} \tag{11}$$

根据斯派罗判断法则和爱里斑的启示，可以确定 LED-LED 之间的最大距离为：

$$d_0 = \sqrt{12/(m+3)}z \tag{12}$$

在线性结构中，照度分布 E 与 LED 的个数 N 和 LED 之间的距离 d 有关。考虑 9 个 LED 的排列情况。图 5(a) 为 9 个 LED 均匀排成的线性结构，坐标原点选在线段的中点位置；图 5(b) 为根据照度分布方程式模拟出的被照屏上的均匀照度分布沿 x 轴的变化情况，其中 LED 的 $m=81$ ，取 $z=1$ ， $d=d_0=0.135$ 。

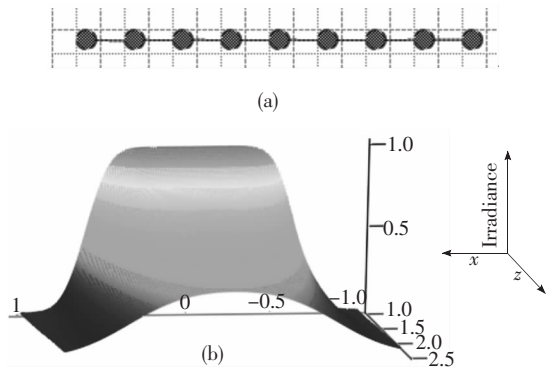


图 5 (a) 线性结构；(b)照度随 x,z 的关系变化。
Fig. 5 (a) Linear array of LEDs; (b)Uniform irradiance distribution along the x,z direction.

如图 5(b)所示，照度在 $-0.65\sim0.65$ 范围内照度比较均匀理想，但在远离中心位置在 -0.65 和 0.65 之外，可以看到照度均匀性随之降低。若给定 N 个 LED 排列成线性结构，可以根据计算模型先确定相邻 LED 之间的最大距离，排列 LED 在最大距离之内，得到的照度在一定范围内具有比较好的均匀性。当增大 LED 阵列中心到被照平面的距离 z ，照度均匀度随之逐渐降低。

3.2.3 方形排列结构

LED 方形排列也是 LED 实际应用中常见的排列结构，如外科手术中照明光源。在方形结构排列中，假定相邻 LED 之间的距离为 d ， $N\times M$ 个 LED 组成的方形 LED 结构的照度为：

$$E(x,y,z) = z^m A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left\{ \left[x - (N+1-2i) \times \frac{d}{2} \right]^2 + \left[y - (M+1-2j) \times \frac{d}{2} \right]^2 + z^2 \right\}^{-\frac{m+2}{2}} \tag{13}$$

根据斯派罗判断法则和爱里斑的启示,可以确定 LED-LED 排放时之间的距离为:

$$d_0 = \sqrt{4/(m+3)}z$$

(14)

在方形结构中,照度分布 E 与 LED 的个数 N 和 LED 之间的距离 d 有关。仍然考虑 9 个 LED 的排列情况。图 6(a)为 9 个 LED 均匀排布的 $N \times M$ 方形结构, $N=3, M=3$; 图 6(b) 为根据照度分布方程式模拟出的被照屏上的照度分布

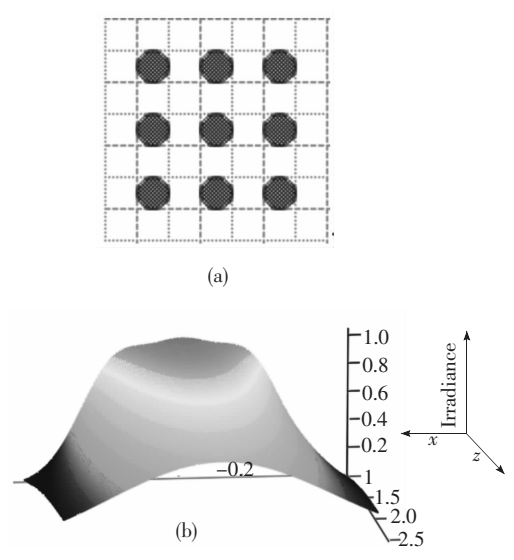


图 6 (a)方形结构;(b)照度随 x, z 的变化关系。
Fig. 6 (a)Square ring LED array;(b)Uniform irradiance distribution along the x, z direction.

参 考 文 献:

[1] Narukawa Y. White-light LEDs [J]. *Opt. Photo. News*, 2004, 15: 24-29.

[2] 陈志忠,秦吉新,胡晓东,等. 大功率白光 LED 的制备和表征 [J]. *液晶与显示*, 2004 , 19(2): 83-86.

[3] 吴庆,黄先,刘丽,等. 色坐标对白光 LED 光通量的影响 [J]. *发光学报*, 2007, 28(5): 736-740.

[4] 吴海彬,叶光,王昌铃. 多芯片集成大功率白光 LED 照明光源 [J]. *液晶与显示*, 2005, 20(3): 250-253.

[5] 蒋大鹏,侯风勤,范希武,等. 白色发光二极管色坐标和显色指数的一致性 [J]. *液晶与显示*, 2002, 17(3): 219-220.

[6] 刘行仁. 白光 LED 固态照明光转换荧光体 [J]. *发光学报*, 2007, 28(3): 291-301.

[7] 陈凤,袁银麟,郑小兵,等. LED 的光谱分布可调光源的设计 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2060-2064.

[8] Mueller-Mach R, Mueller G O, Krames M R, *et al.* High-power phosphor-converted light-emitting diodes based on III-nitrides [J]. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* 2002, (8): 339-345.

[9] 吴继宗,叶关荣. 光辐射测量 [M]. 北京:机械工业出版社,1992.

[10] Ivan Moreno. Uniform illumination of distant targets using a spherical light-emitting diode array [J]. *Opt. Engineering*, 2007, 46: 033001(1-7).

[11] Gennert M A, Wittels N, Leatherman G L. Uniform frontal illumination of planar surfaces: Where to place the lamps [J]. *Opt. Eng.* , 1993, 32: 1261-1271.

[12] 郁道银,谈恒英. 工程光学 [M]. 北京:中国工业出版社,1994.

沿 x 轴的变化情况,其中 LED 的 $m=81$,取 $z=1$, $d=d_0=0.2185$ 。

如图 6(b)所示,照度在 $-0.3 \sim 0.3$ 范围内照度比较均匀,在远离中心位置,即在 -0.3 和 0.3 之外,照度均匀性逐渐降低。若给定 N 个 LED 排列成方形结构,可以根据计算模型先确定相邻 LED 之间的最大距离,排列 LED 在最大距离之内,得到的照度在一定范围内具有较好的均匀性。增大 LED 阵列中心到被照平面的距离 z ,照度均匀度随之逐渐降低。

4 结 论

照度分布受 LED 本身参数 $\theta_{1/2}$ 、LED 的几何排列结构以及排列结构中 LED 的个数等因素影响。在本文中把每一个单色 LED 看成是一个非理想的朗伯发射体,分析了 LED 排列的几种典型结构,根据设计方程式模拟出了不同 LED 结构的照度分布情况。由模拟结果可以看出,排列 LED 在其极值范围内,可以得到比较均匀的照度分布。随着 LED 之间距离的增大,其中心位置的照度随之下降;增大 LED 阵列中心到被照平面的距离 z ,照度均匀性也随之逐渐降低。根据设计方程式及所建立的模型,参照照度分布要求,可以设计出 LED 之间的最大距离和 LED 的排列位置,并确定 LED 阵列中心到被照平面的距离。

[13] Dubovikov A L, Repin S S, Natarovskii S N. Features of the use of LEDs in artificial-vision systems [J]. *J. Opt Technol.*, 2005,72:40-42.

[14] 郑喜凤,宋新丽,刘贵华,等. 一种基于区域最大值的 LED 显示屏亮度特征数据提取方法 [J]. 液晶与显示, 2008, 23(4): 453-457.

Design for White Light Source Based on RGB LED Illumination Module

GUO Jing, JIN Shang-zhong

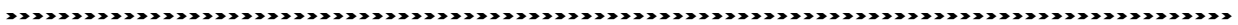
(Key Laboratory of Zhejiang Province Modern Measurement Technology and Instrument ,
China Jiliang University, Hangzhou 310018, China, E-mail :huangrong1105@163.com)

Abstract

Due to different situations requiring different uniform irradiance distribution, light sources with multiple LEDs become the preferred choice. So designing LED arrays for uniform irradiance is an essential problem. According to analyzing several typical configurations of LED illumination modules, the equations and formulas were established and the limit distance between LEDs was simulated with considering each single LED as a nonideal Lambertian emitter. From the result of simulation we can get the uniform irradiance in the distance of LEDs’ limit situation. Luminous intensity of center placement would abate, while the distance of LED increases; the increasing distance between the LED arrays center and the irradiance plane leads to the slacking down of the center irradiance.

Key words: light-emitting diodes; LED arrays; illumination uniformity

作者简介:郭靖(1983—),女,河北沧州人,硕士研究生,主要从事 LED 混光方面和光学设计的研究。



网上看《液晶与显示》

向《液晶与显示》投稿,经审查发表,将以印刷版、光盘版、网络版同时出版。若您想从网上阅读《液晶与显示》,请点击:
<http://www.yejingyuxianshi.org>(《液晶与显示》期刊网址);<http://yjys.chinajournal.net.cn>(“中国期刊网”《液晶与显示》的网址);<http://yjyxs.periodicals.net.cn/default.html>(“万方数据资源系统(ChinaInfo)”《液晶与显示》的网址)。