

用于液晶显示屏幕检测的大口径小角度LED光源设计

王尧^{1,2} 荆雷¹ 党博石¹ 孙强¹ 刘英¹ 刘华¹ 郝剑^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对液晶显示屏幕检测中光源照明均匀性较差的问题,基于非成像光学理论提出了一种大口径小角度的发光二极管(LED)照明光源设计方法。光源采用阵列式照明方式,对单颗LED设计菲涅耳透镜实现小角度的准直照明;推导阵列均匀照度分布条件并利用TracePro软件进行优化,确定阵列最优间距;最终通过在照明面上的光斑拼接叠加实现均匀矩形照明。照明光源由12×9个配光单元形成均匀方形阵列排布,每两个配光单元间距30 mm。仿真结果表明,光源的发光角度小于 $\pm 10^\circ$,在距光源170 mm的照明面上,平均照度大于45000 lx,非均匀性3.8%,均满足设计指标。该方法设计的阵列式光源无论平均照度还是照度均匀性均比现有光源有明显优势。

关键词 光学设计;非成像光学;匀光照明;阵列式照明;液晶显示器检测;非均匀性

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1022002

Design of LED Source with Large Aperture and Small View Angle Used in the LCD Detection

Wang Yao^{1,2} Jing Lei¹ Dang Boshi¹ Sun Qiang¹ Liu Ying¹ Liu Hua¹ Hao Jian^{1,2}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to increase the illuminance uniformity of the source used in the liquid crystal display(LCD) detection, based on nonimaging optics, a method of a light emitting diode (LED) source with large aperture and small view angle is proposed in this paper. The illumination system of this source is realized by array of LEDs and the lenses. For a single LED, Fresnel lens is designed to collimate the beam with small view angle then, the optimal distance of the array is obtained by deducing the uniform illumination condition and optimizing it with TracePro. Finally, the uniform rectangular illumination is achieved through splicing superposition the spot on the illuminating surface. The illumination source consists of 12×9 optical units which are arranged in uniform rectangle, and the distance between every two optical units is 30 mm. The simulation results show that the viewing angle of the source is less than $\pm 10^\circ$. At the target surface 170 mm away from the source, the average illuminance is greater than 45000 lx, and the nonuniformity is 3.8%. All of the indexes meet the design requirements. Comparing with the existed source, the arrayed source designed in this paper has obvious advantages whether on the average illuminance or the illuminance uniformity.

Key words optical design; nonimaging optics; uniform illumination; arrayed illumination; liquid crystal display detection; nonuniformity

OCIS codes 220.2945; 220.4298; 080.4295; 080.4298

1 引言

液晶显示(LCD)器件^[1],拥有低功耗、轻重量等突出优点,广泛应用于手机、游戏机、车载显示、平板电脑、

收稿日期: 2015-03-13; 收到修改稿日期: 2015-05-19

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ14051702)、国家863计划(2013AA03A116)、吉林省科技发展计划项目(20130206018GX)。

作者简介: 王尧(1984—),女,硕士,助理研究员,主要从事非成像光学方面的研究。E-mail: wangyao0225@126.com

笔记本、数字相机屏等诸多领域。由于繁复的制备工艺以及苛刻的环境条件要求,LCD 制备过程中容易产生多种显示缺陷,如暗点、辉点、暗线、辉线及 Mura 等^[2-5]。随着 LCD 产业的高速发展,传统的人工检测方式由于检测效率低、主观性大、偶然性高等缺点,已经成为 LCD 生产厂家扩大化再生产的制约因素,开发高品质的 LCD 屏幕检测设备势在必行。

LCD 屏幕检测设备中,首先要解决的是大口径小角度的光源照明问题。传统的照明光源多采用白炽灯或气体放电灯,但这些光源由于寿命短、稳定度差等原因,正在逐渐被市场淘汰。发光二极管(LED)具有长寿命、高稳定性、易集成、绿色环保等诸多优点^[6-9],应用于 LCD 屏幕检测的照明系统中成为了一种趋势。但是单颗 LED 的输出光能有限,需要采用多颗 LED 才能实现预定的大面积照明。现有的 LCD 屏幕检测设备中的照明光源针对多颗 LED 芯片,均采用单个球面镜或非涅耳镜作为配光元件进行整体配光,导致均匀性较差,严重影响了 LCD 屏幕检测的准确性。

本文考虑照明光源大口径小角度的特点,采用阵列式照明方式实现匀光照明。针对单颗 LED 芯片进行小角度准直照明的配光设计,推算并优化多颗 LED 芯片及其配光元件的阵列排布方式及间距,通过拼接叠加照明区域,能够在 200 mm×300 mm 的矩形照明面内实现均匀照明,光源发光角小于 $\pm 10^\circ$ 。对比现有光源,平均照度和照度均匀性都有明显提升。

2 设计原理及结构

2.1 LCD 屏幕检测设备原理

LCD 屏幕检测设备是在 LCD 点亮的情况下进行视觉检测,检测出可能存在的暗点、辉点、暗线、辉线及 Mura 等缺陷。LCD 屏幕检测设备的原理如图 1 所示,包括大口径小角度照明光源、光学镜头、面阵相机[互补金属氧化物半导体(CMOS)]。LCD 等待检目标置于工作台上,在照明光源的背向照射下,通过镜头成像于 CMOS。计算机读取 CMOS 图像数据,与标准数据比较,从而得出被检目标是否存在缺陷。

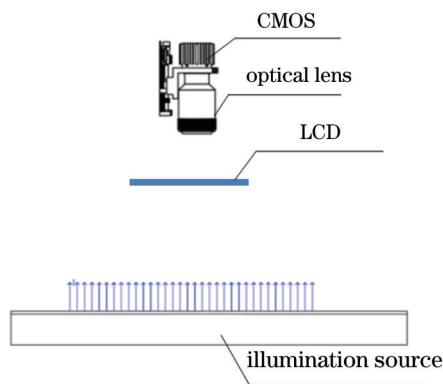


图 1 LCD 屏幕检测设备的原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the LCD screen detection equipment

2.2 光源结构

LCD 检测用的照明光源的整体结构如图 2 所示,包括二次配光模组阵列和扩散膜。

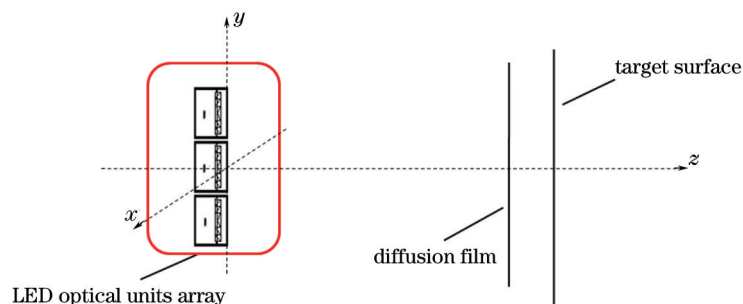


图 2 LCD 检测用的 LED 光源的整体结构

Fig.2 Structure of the LED source used in LCD detection

二次配光模组阵列包含 $N \times M$ 个配光单元,如图 3(a)所示,每两个配光单元中心的间距为 d ,形成均匀的矩形阵列排布。每个配光单元均由 LED 光源、配光透镜和光阑组成,如图 3(b)所示。LED 光源发出的光经过配光透镜准直,再经过扩散膜投射到目标面上,每个单元在目标面上均独立产生一个准直照明光斑,并通过拼接叠加照明区域单元实现预定大面积均匀矩形照明。光阑的主要作用是去除没有参与照明的多余光线,有效控制杂散光。

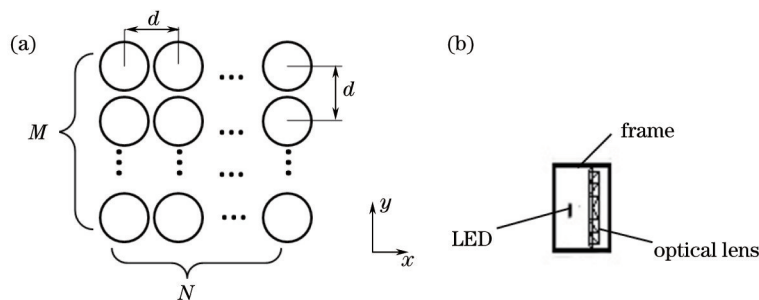


图 3 二次配光模组阵列结构。(a) 二次配光模组阵列排列方式;(b) 单个配光单元结构

Fig.3 Structure of the optical units array. (a) Arrangement of the optical units array; (b) structure of single optical unit

扩散膜用来进一步匀化光线,同时对阵列式排布的 LED 芯片起雾化作用,防止 CCD 相机从上向下检测 LCD 面时拍摄到分散的 LED 芯片,从而破坏照明面的均匀性。

2.3 设计原理

LED 经过二次配光透镜后照射到与光轴方向垂直的平面上时,该平面上的照度可以近似认为是发光角度的余弦多次方的函数^[10-12]:

$$E(r, \theta) = E_0(r) \cos^m \theta, \quad (1)$$

其中 $E_0(r)$ 是距 LED 光源 r 处轴上的照度值, θ 为光线与光轴的夹角, m 为光源的辐射模式值,其取值可通过 $\theta_{0.5}$ (照明系统的发光角,其定义为发光强度值为轴向强度值一半时的角度)来确定:

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{0.5})}. \quad (2)$$

如图 4 所示,设 LED 光源的位置为 $A(x_0, y_0, 0)$,照度面上任意点的坐标为 $P(x, y, z)$,则可得:

$$E(x, y, z) = \frac{z^m L_{\text{led}} A_{\text{led}}}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2]^{(m+2)/2}}, \quad (3)$$

其中 L_{led} 是 LED 经过配光透镜后的亮度, A_{led} 是 LED 经过配光透镜后的发光面积。 z 为配光透镜出光面到目标照度面的距离。

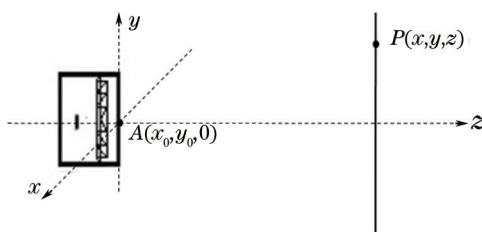


图 4 LED 照明示意图

Fig.4 Schematic diagram of the LED lighting

对于一个间距为 d 的矩形 $N \times M$ LED 阵列光源来说,目标面上的照度分布为:

$$E(x, y, z) = z^m L_{\text{led}} A_{\text{led}} \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left\{ [x - (N+1-2i)(d/2)]^2 + [y - (M+1-2j)(d/2)]^2 + z^2 \right\}^{-(m+2)/2}, \quad (4)$$

根据斯派罗法则,对(4)式求二次导数,当满足在 $x=0, y=0$ 处, $\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = 0$ 时,可以得到照度均匀分布的条件:

$$f(D) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left\{ \left[(N+1-2i)^2 + (M+1-2j)^2 \right] (D^2/4) + 1 \right\}^{-(m+6)/2} \left\{ 1 - [(m+3)(N+1-2i)^2 - (M+1-2j)^2] (D^2/4) \right\}, \quad (5)$$

其中 $D=d/z$ 。可以看出 d 是关于 m, N, M 的函数,当 N 和 M 都是偶数时, $D=d/z$ 的值由函数 f 的零值求得。当 N

和 M 都是奇数时, $D=d/z$ 的值由函数 f 的最小值求得。对于其他情况, $D=d/z$ 的值由函数 f 的零值或者最小值给出。

对于大于 4×4 的阵列 ($N \times M > 4 \times 4$, 而且 $m > 30$), 有一个照度均匀分布条件的经验公式^[10]:

$$d = \sqrt{\frac{1.2125}{m - 3.349}} \times z. \quad (6)$$

在实际应用中, LED 光源经过二次配光透镜整形后, 并不严格的遵循(1)式, 因此, 对于光斑半径和半发散角的计算可能引入误差, 导致采用均匀照度分布条件得到的 d 与实际情况存在偏差。通过联合使用 Tracepro 软件的优引擎和 Scheme 语言计算的间距 d 进行优化, 最终得到最佳的阵列间距。

3 设计过程

3.1 设计指标

LCD 检测用的照明光源要求光束出射角度小, 光能分布均匀, 同时要求照明口径大, 整体厚度薄。其具体的设计指标如表 1 所示。

表 1 LCD 检测用的光源的主要设计指标

Table 1 Main design indexes of the source used in LCD detection

Indexes	Value
Illuminated area	200 mm×300 mm
Lighting distance	170 mm
Average illuminance	Greater than 40000 lx
Nonuniformity	Less than 5%
Viewing angle	Less than $\pm 10^\circ$

3.2 扩散膜选择

由于 LCD 屏幕在检测过程中, CCD 相机从上向下拍摄 LCD 屏幕, 阵列式排布的 LED 芯片会在 CCD 靶面上成像, 从而破坏照明面的均匀性, 因此在光源出光面和照明目标面中间加入扩散膜, 对多颗 LED 芯片起到雾化作用, 同时也能进一步均匀光线。

该照明光源要求发光角度较小, 同时考虑到能量利用率的问题, 应采用小扩散角高透射率的扩散膜。最终选择 Luminix 公司 LSD 扩散膜, 其厚度 0.25 mm, 透射率高于 90%, 发散角度 $\pm 5^\circ$, 其散射特性如图 5 所示。

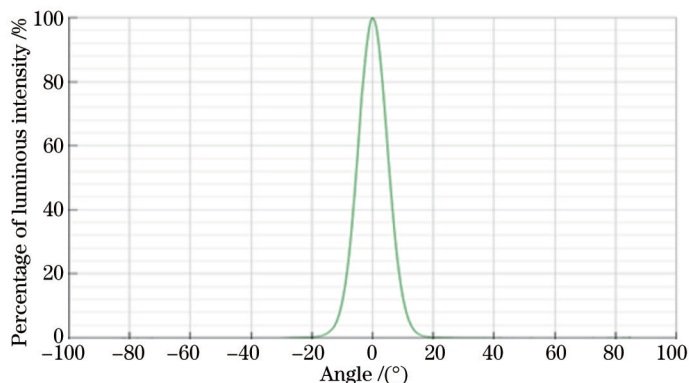


图 5 扩散膜散射特性

Fig.5 Scattering properties of diffusion film

需要指出, 加入扩散膜后的照明光源整体的发光角度 θ_s 由扩散膜的发散角 θ_d 和光源的发光角 θ_l 共同决定, 其公式为:

$$\theta_s = \sqrt{\theta_d^2 + \theta_l^2}. \quad (7)$$

3.3 配光模组阵列设计

根据设计指标要求和(6)式, 计算出光源发光角 θ_l :

$$\theta_1 = \sqrt{\theta_s^2 - \theta_d^2} = 8.66^\circ . \quad (8)$$

针对单颗LED进行配光设计,需要将通过配光透镜之后的光线发光角度控制在 8.66° 以内。这是一个准直配光的设计,由于LED发出的光线近似朗伯分布,若采用普通的光学透镜进行配光,会导致透镜曲率半径过小,厚度大,难以加工,因此在设计中采用了菲涅耳透镜以降低透镜厚度,实现准直配光,同时采用注塑成型技术进行加工,也降低了加工难度。

菲涅耳透镜的光学参数如表2所示。透镜采用聚碳酸酯(PC)材料注塑成型,其折射率为 $1.59(\lambda=0.5461\text{ nm})$,通光孔径为 26 mm ,透镜厚度 3 mm ,焦距为 8 mm ,每毫米 0.25 个环带。

表2 配光透镜参数

Table 2 Parameters of optical lens

Parameters	Diameter /mm	Thickness /mm	Focal length /mm	Rings /mm ⁻¹
Value	26	3	8	0.25

对单个配光单元进行光学仿真模拟,LED选取OSRAM公司Golden DRAGON系列芯片LUW_W5SM,每个芯片的光通量为 98 lm 。其发光强度分布如图6所示。图6(a)为未加扩散膜时的光强分布,可以看出光源发光角 θ_1 为 8.2° ,满足(7)式的要求;加入扩散膜后其光强分布如图6(b)所示,照明光源的整体发光角度 θ_s 为 9.8° ,也即 $\theta_{0.5} = 9.8^\circ$ 。

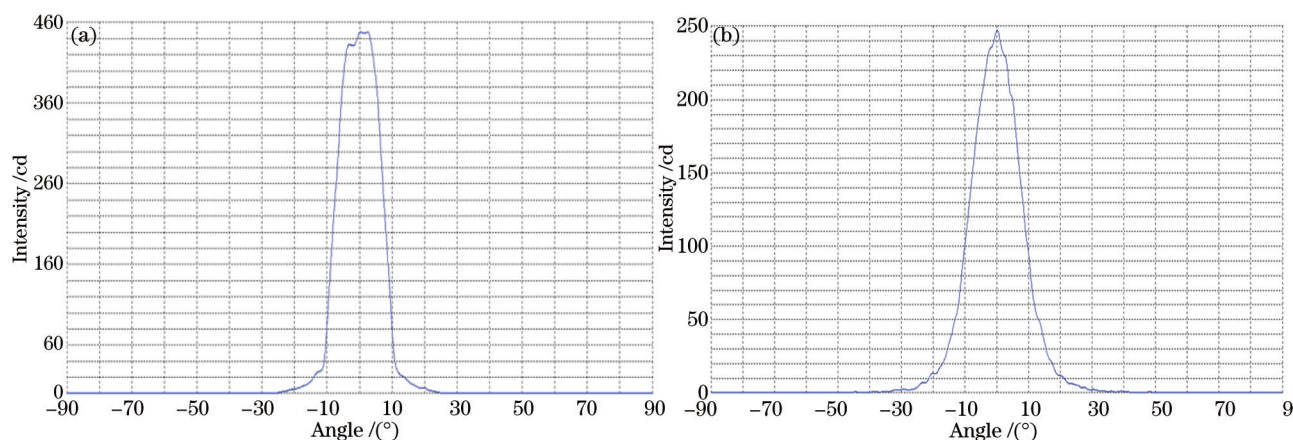


图6 单个配光光源的发光特性。(a) 单个配光单元光强分布;(b) 加入扩散膜后单个配光单元光强分布

Fig.6 Optical properties of the single optical unit. (a) Intensity distribution of the single optical unit;

(b) intensity distribution of the single optical unit with diffusion film

由(2)式得

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos 9.8^\circ)} \approx 47.154 , \quad (9)$$

照明距离 $z=170\text{ mm}$,根据(6)式可以计算阵列间距

$$d = \sqrt{\frac{1.2125}{47.154 - 3.349}} \times 170 \approx 28.28\text{ mm} . \quad (10)$$

由于单个配光模块在照明目标面上并不严格的遵循余弦多次方函数分布,因此 28.28 mm 的阵列间距还需进行进一步优化。基于TracePro软件,结合使用其优化引擎和Scheme宏语言对计算的间距 d 在 $\pm 2\text{ mm}$ 范围内进行反馈优化,最终得到最佳的阵列间距 $d=30\text{ mm}$ 。

4 设计结果及分析

4.1 照明光源仿真

根据照明面积和平均照度要求,LCD检测用的照明光源的最终结构如图7所示。采用 108 个配光单元,形成 12×9 的均匀矩形阵列排布,每两个配光单元间距 30 mm 。光源模块采用高导热陶瓷或金属基板作为封装基板。扩散膜放置在光源与照明面之间,距照明面 5 mm 处。

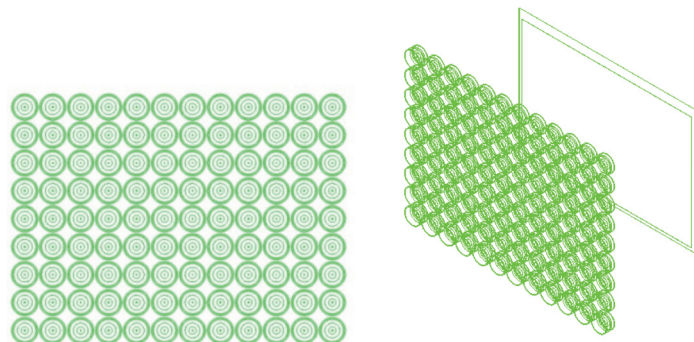


图 7 LCD 检测用的照明光源的最终结构

Fig.7 Final structure of the illumination source used in LCD detection

在 TracePro 中对 LCD 检测用照明光源进行光学仿真模拟。该光源的光强分布如图 8 所示,发光角度为 $\pm 9.8^\circ$ 。在距光源 170 mm 处,放置 200 mm \times 300 mm 的目标照明面,其照度分布如图 7 所示。非均匀度^[13-14]是照明光源

的一个重要评价指标,其定义为 $\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2}{N\bar{E}^2}} \times 100\%$, 其中 N 为采样点个数, E_i 为第 i 个采样点的照度, \bar{E} 为平均照度。图 9 中将照明面分为 128 \times 128 份进行采样,得到平均照度为 45720 lx,非均匀度为 3.8%。

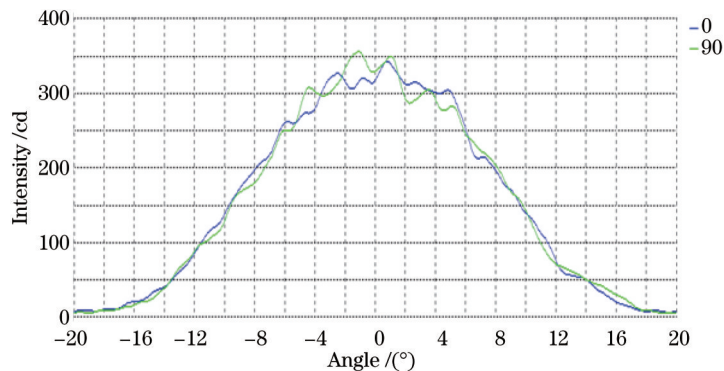


图 8 照明光源光强分布

Fig.8 Intensity distribution of the illumination source

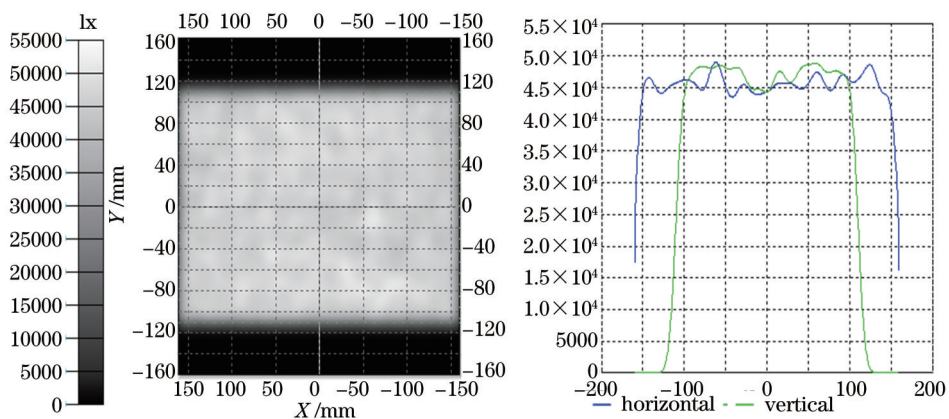


图 9 照明光源照度分布

Fig.9 Illuminance distribution of the illumination source

4.2 与现有配光设计对比

现有的 LCD 检测用的照明光源对多颗 LED 只是简单的采用一个大的球面镜或非涅耳镜作准直配光。针对 12 \times 9 均匀分布的 LED 芯片阵列的现有配光设计,进行仿真模拟,配光元件仍采用厚度 3 mm,焦距为 8 mm,每毫米 0.25 个环带的菲涅耳透镜。图 10 为现有照明光源在距光源 170 mm 的照明面上的照度分布,可以看出

照明面上边缘照度仅为中心照度的50%左右。这是由于对多颗LED进行整体配光,会降低对每个LED发出光线的精确控制,尤其是边缘的LED的配光准确度较差,严重影响了照度均匀性。

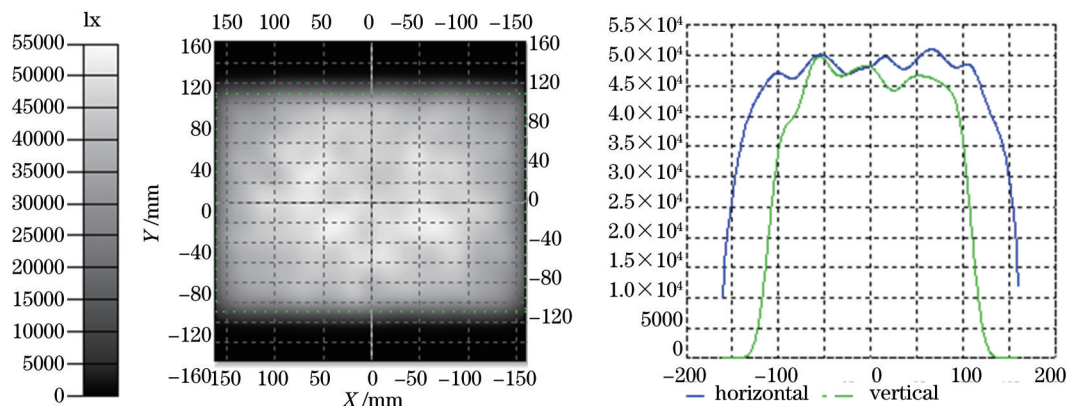


图 10 现有光源的照度分布

Fig.10 Illuminance distribution of the existed source

仍然对照明面进行128×128的采样分析,表3给出了现有配光设计与本文阵列式设计平均照度和非均匀性的对比值。现有照明系统平均照度为39904 lx,比阵列式照明光源小5816 lx,非均匀度仅为17.4%。所设计的阵列式照明光源无论平均照度还是照度均匀性均比现有照明光源有显著提高。

表 3 现有光源与阵列式照明光源照明性能的比较

Table 3 Illumination properties comparison between the existed source and the arrayed source

	Average illuminance /lx	Nonuniformity
Existed design	39904	17.4%
Arrayed design	45720	3.8%

5 结 论

采用阵列式照明方式完成了一款具有大口径小角度照明特点的LCD检测用光源设计工作。针对单颗LED进行配光设计,采用菲涅耳镜形成准直照明。计算并优化阵列间距,形成12×9的均匀方形阵列排布,在照明面上通过拼接叠加照明区域单元形成200 mm×300 mm面积的均匀矩形照明。光源发光角度小于±10°,目标照明面平均照度45720 lx,非均匀性3.8%,满足设计指标要求,对比现有的照明光源均匀性性能有显著提高。

参 考 文 献

- 1 Gao Hongjin, Dong Youmei. The Technology of LCD and FPD[M]. Beijing, Beijing University of Posts and Telecommunications Publishing House, 2007: 7-28.
高鸿锦,董友梅.液晶与平板显示技术[M].北京:北京邮电大学出版社,2007:7-28.
- 2 H W Kim, S I Yoo. Non referential method for defects inspection of TFT-LCD pad[J]. ImageProcessing: Machine Vision Applications, 2008: 325-328.
- 3 Ye Han. Key Technologies Research of AOI for Display Defect Inspection of LCD[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 9-11.
叶 涵. LCD显示缺陷自动光学检测关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2013:9-11.
- 4 Jae Y Lee, Suk I Yoo. Automatic detection of region-mura defect in TFT-LCD[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2008, 91(2): 322-329.
- 5 Lu Xiaopeng, Li Hui, Liu Yunjie, et al.. Algorithm for fast TFT-LCD Mura defect image segmentation based on Chan-Vese model[J]. Chinese J Liquid Crystals and Displays, 2014, 29(1): 146-151.
卢小鹏,李 辉,刘云杰,等.基于Chan-Vese模型的TFT-LCD Mura缺陷快速分割算法[J].液晶与显示,2014,29(1):146-151.
- 6 Cheng Zhiming, Zeng Ping, Zhang Zhihai, et al.. Research on multi-direction collimation beam on the plane parallel with LED lighting

- plane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1008001.
- 程治明, 曾平, 张志海, 等. 与LED发光面平行平面上多向准直光束的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1008001.
- 7 Hao Fei, Shi Jinfei, Zhu Songqing, *et al.*. Optimal positioning of forward installed square LED arrays for machine vision system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1215001.
- 郝飞, 史金飞, 朱松青, 等. 机器视觉系统前置矩形LED阵列的优化布置[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1215001.
- 8 Xin Di, Liu Hua, Lu Zhenwu, *et al.*. Optical design of the LED illumination system with adjustable view angle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522003.
- 辛迪, 刘华, 卢振武, 等. 可变视场角LED照明光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522003.
- 9 Xu Yuzhen, Lin Weiming. A novel LED photo-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.
- 10 Ivan Moreno, Maximino Avendaño-Alejo, Rumen I Tzonchev. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(10): 2265-2272.
- 11 Allen Jong-Woei Whang, Yi-Yung Chen, Yuan-Ting Teng. Designing uniform illumination systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays[J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(3): 94-103.
- 12 Huang Qilu, Wu Fengtie. Investigation of uniform illumination of near-field targets using a conic light-emitting diode array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 3039-3043.
- 黄启禄, 吴逢铁. 基于近场均匀照明的LED二次曲线阵列的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 3039-3043.
- 13 Liu Yanyan, Li Guoning, Zhang Yu, *et al.*. Detection and correction of response non-uniformity based on visible light area CCD[J]. *Chinese J Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(5): 759-763.
- 刘妍妍, 李国宁, 张瑜, 等. 可见光面阵CCD响应非均匀性的检测与校正[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(5): 759-763.
- 14 Hongyin Zhu, Xucheng Xue, Tianbo Ma, *et al.*. Correction of the non-uniformity for Multi-TDICCD mosaic camera on FPGA[C]. *IEEE*, 2010, 1-4.

栏目编辑: 韩峰