

文章编号 1004-924X(2015)09-2459-07

用于机载液晶显示的四基色发光二极管背光源

冯奇斌,尹慧娟,李亚妮,吕国强*

(合肥工业大学 光电技术研究院 特种显示技术教育部重点实验室 特种显示技术国家工程实验室
现代显示技术省部共建国家重点实验室,安徽 合肥 230009)

摘要:针对机载液晶显示的特殊要求,设计了一种四基色发光二极管(LED)背光源。采用了能单独控制亮度的红、绿、蓝、琥珀等 4 种颜色的 LED,以克服现有滤光片方法带来的夜模式下显示色域大幅下降的问题。在昼模式下工作时,4 种颜色的 LED 同时发光,混合成白光;在夜模式下工作时,关闭红色 LED 以减少红外辐射,而绿、蓝、琥珀等 3 种颜色 LED 工作。计算了夜模式下 3 种颜色的混合配比。将蓝色 LED 的混光比例作为固定值代入昼模式下计算得到红、绿、琥珀的配比。仿真设计了采用红、绿、蓝三合一 LED 和单独琥珀色 LED 的背光源,分析了它们的性能,并开发了实际样品。测试结果表明:昼模式下,背光模块的发光强度为 23 515 cd/m²(屏前亮度为 1 175 cd/m²),非均匀性为 8.07%,色域为 NTSC(National Television Standard Committee)的 116.5%;夜模式下,背光模块的发光强度为 15.36 cd/m²(屏前亮度为 0.77 cd/m²),非均匀性为 15.49%,色域为 NTSC 的 83.5%,满足机载液晶显示的要求。

关键词:发光二极管(LED);背光源;夜视成像系统;液晶显示;色域

中图分类号:TN27;TN312.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152309.2459

4-primary-color-based LED backlight for aircraft cockpit LCD

FENG Qi-bin, YIN Hui-juan, LI Ya-ni, LÜ Guo-qiang*

(National Key Laboratory of Advanced Display Technology,
National Engineering Laboratory of Special Display Technology,
Key Laboratory of Special Display Technology of the Ministry of Education,
Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn

Abstract: According to the special requirements of Liquid Crystal Display (LCD) in an airplane cockpit, a 4-primary-color-based LED (Lighting Emission Diode) backlight is developed. The LED backlight applies LEDs with 4 different colors of red, green, blue and amber to control the lightness independently. In the day model, all LEDs with different colors are turned on to form white lights. In the night mode, the red LEDs are closed to reduce infrared radiation. The mixed ratio of green, blue, and amber LEDs in the night model is first calculated. With the fixed luminance of blue LEDs, the ratios of red, green, and amber LEDs in the day model are decided. The detailed simulations are performed to decide the physical structures and optical characteristics of the backlight. The 3-in-1 LEDs with the individual amber LEDs are applied in a prototype. Experimental results show that the

收稿日期:2015-03-25;修订日期:2015-06-07.

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(No. 1408085MKL86)

luminance, nonuniformity, and color gamut of the backlight in the day model are 23 515 cd/m² (1 175 cd/m² of panel brightness), 8.07%, and 116.5% NTSC (National Television Standard Committee), respectively; and those in the night model are 15.36 cd/m² (0.77 cd/m² of panel brightness), 15.49%, and 83.5% NTSC, respectively. The developed backlight satisfies the requirements of luminance and night-vision-compatibility of aircraft liquid crystal display.

Key words: Light Emitting Diode (LED); backlight; Night Vision Image System (NVIS); liquid crystal display; color gamut

1 引言

液晶(Liquid Crystal, LC)本身不发光,需要背光提供光线来显示图像,其色域范围主要受背光源的影响。与普通的商用液晶显示器(LC display, LCD)不同,机载液晶显示还需要满足一些特殊要求^[1],如(1)高亮度^[2-3]:为保证环境光亮度很高时飞行员仍能清晰看到显示内容,机载显示屏前亮度要求达到 1 000 cd/m² 以上,远高于普通商业液晶显示屏;(2)昼夜两种工作模式:白天在高亮模式(昼模式)下工作,夜晚在低亮模式(夜模式)下工作,且 2 种模式下均需满足均匀性要求;(3)夜视兼容:夜模式工作时背光需要满足夜视兼容,即背光发出光线不会与夜视成像系统(Night Vision Imaging System, NVIS)相干涉,并保持裸眼可视^[4]。

具有夜视兼容性的 LCD 背光系统不仅要在日光环境下正常工作,而且在夜晚无光或光线微弱条件下也不会发出干扰夜视设备的光和能量,以保证显示设备正常使用并发挥夜视功能。在夜晚工作条件下,使用普通背光系统的 LCD 对 NVIS 影响最大的主要是 610~930 nm 近红外波段的光线。通常采用夜视兼容滤光片来滤除该波段的光线^[5-8],即显示器工作在昼模式时,将滤光片取下以满足亮度要求;工作在夜模式时,将滤光片装上,以滤除波长为 610~930 nm 的红外光线。随着技术的进步, LCD 开始采用 2 种背光模式:一套正常模式;另一套是在光源上安装了红外滤色膜, 2 种模式可以切换。不过,增加滤光片虽然能满足夜视兼容要求,但由于红光的缺失,由红、绿、蓝组成的色域三角缩减为绿和蓝之间的直线,严重影响观看效果,并给飞行安全带来隐患。

为了扩大夜模式下的显示色域,本文设计了一种四基色发光二极管(LED)背光源,选取主波

长在 610 nm 之内的彩色 LED 替代夜模式下的红光。昼模式下, 4 种颜色的 LED 全部打开;夜模式下,关闭红色 LED,点亮其他三色 LED,从而有效地增加了夜模式下的显示色域。

2 四基色 LED 背光理论设计

昼模式下,机载液晶显示器的屏前亮度通常要求达到 1 000 cd/m² 以上,非均匀性小于 10%。对于 7 in(0.015 m²), 4:3 的液晶模块,显示面积约为 0.015 m²。设液晶屏的透过率为 5%,采用的光学膜增益为 1.38,那么昼模式下需要的背光光强 $L_{\text{BLU-day}}$ 为:

$$L_{\text{BLU-day}} = \frac{1\,000 \times 0.015}{0.05 \times 1.38} = 217.40 \text{ cd.} \quad (1)$$

夜模式下,机载液晶显示器的屏前亮度通常要求为 0.5 cd/m²,非均匀性小于 25%。同理,得到夜模式下需要的背光光强 $L_{\text{BLU-night}}$ 为:

$$L_{\text{BLU-night}} = \frac{0.5 \times 0.015}{0.05 \times 1.38} = 0.11 \text{ cd.} \quad (2)$$

背光源需要满足一定的色温要求。本文设计的背光白场色温要求为 6 500 K,色坐标为 (0.330, 0.330)。白色由多种颜色的光混合而成,对于一定色温的白场,采用红(Red, R)、绿(Green, G)、蓝(Blue, B)三基色时,各色比例可以根据下式得到^[9-11]:

$$\begin{pmatrix} R_R \\ R_G \\ R_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1-x_R-y_R}{y_R} & \frac{1-x_G-y_G}{y_G} & \frac{1-x_B-y_B}{y_B} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \frac{x_w}{y_w} \\ 1 \\ \frac{1-x_w-y_w}{y_w} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中: R_R, R_G, R_B 分别是 RGB 三原色的配色比例, $R_R + R_G + R_B = 1$; $(x_R, y_R), (x_G, y_G), (x_B, y_B)$ 分别是 RGB 三原色的色坐标, 由选取的彩色 LED 主波长决定。

为扩大夜模式下的显示色域, 本文设计的背光采用了第 4 种颜色—琥珀色 (Amber, A) 的 LED, 其主波长为 590 nm 左右, 610 nm 以外的光谱能量小于总能量的 5%。RGBA 4 颜色 LED 的主要参数如表 1 所示。

表 1 RGBA LED 的主要参数

Tab. 1 Specifications of RGBA LEDs

颜色	色坐标 (x, y)	20 mA 时的光强/mcd
R	(0.670, 0.300)	700
A	(0.587, 0.413)	690
G	(0.220, 0.740)	1 200
B	(0.142, 0.081)	400

LCD 工作在昼模式时, 4 种颜色的 LED 同时工作, 公式(3)转化为:

$$\begin{pmatrix} x_W \\ y_W \\ 1 \\ z_W \\ y_W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_R & x_G & x_B & x_A \\ y_R & y_G & y_B & y_A \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ z_R & z_G & z_B & z_A \\ y_R & y_G & y_B & y_A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_R \\ R_G \\ R_B \\ R_A \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中: $z_i = 1 - x_i - y_i, i \in \{W, R, G, B, A\}$; R_R, R_G, R_B, R_A 分别是 RGBA 4 色的配色比例, $R_R + R_G + R_B + R_A = 1$; $(x_R, y_R), (x_G, y_G), (x_B, y_B), (x_A, y_A)$ 分别是 RGBA 的色坐标, 见表 1; (x_W, y_W) 取(0.330, 0.330)。

式(4)中包括 3 个方程, 4 个未知变量, 存在多组解, 故本文首先计算夜模式下 AGB 3 色的比例, 如下:

$$\begin{pmatrix} R'_A \\ R'_G \\ R'_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_A}{y_A} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1-x_A-y_A}{y_A} & \frac{1-x_G-y_G}{y_G} & \frac{1-x_B-y_B}{y_B} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \frac{x_W}{y_W} \\ y_W \\ 1 \\ \frac{1-x_W-y_W}{y_W} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

将 A, G, B, W 的色坐标代入式(5), 可得到夜模式下 AGB 的配光比例为 0.49 : 0.41 : 0.1。

考虑到计算结果的合理性和不同颜色的 LED 数量的差异不易太大, 昼模式时, 将蓝光比例 R_B 固定为夜模式下的 0.1, 带入式(4)可求解得到 R_R, R_A, R_G , 由此得到 RGBA 的比例为 0.14 : 0.50 : 0.1 : 0.26。结合式(1)的背光亮度, 可以算出 RGBA 4 色 LED 需要提供的单色光光强如下:

$$\begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \\ L_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 217.4 \times 0.14 \times 1\ 000 \\ 217.4 \times 0.50 \times 1\ 000 \\ 217.4 \times 0.10 \times 1\ 000 \\ 217.4 \times 0.26 \times 1\ 000 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30\ 436\ \text{mcd} \\ 108\ 700\ \text{mcd} \\ 21\ 740\ \text{mcd} \\ 56\ 524\ \text{mcd} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

根据表 1 可以得到 RGBA LED 的数量:

$$\begin{pmatrix} N_R \\ N_G \\ N_B \\ N_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30\ 436/700 \\ 108\ 700/1200 \\ 21\ 740/400 \\ 56\ 524/690 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 44 \\ 91 \\ 55 \\ 82 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

考虑驱动电路设计的一致性和 LED 布置的可行性, 4 种 LED 的数量应一致。目前商用 LED 的外形大概是 3 mm × 3 mm, 如果采用 RGB 独立封装的 LED, 在 7 in(0.015 m²)的面积上无法布置如此多的 LED, 故选用 RGB 三合一的全彩 LED, 每个 LED 含有 6 个管脚, 红、绿、蓝芯片可单独控制, 如图 1 所示, 相关参数如表 2 所示^[12]。

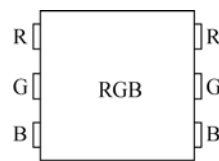


图 1 RGB 三合一 LED
Fig. 1 3-in-1 LED

表 2 三合一和琥珀色 LED 的主要参数

Tab. 2 Specifications of 3-in-1 and amber LEDs

颜色	色坐标 (x, y)	20 mA 时的光强/mcd
R	(0.700, 0.299)	700
G	(0.189, 0.718)	1 200
B	(0.133, 0.075)	400
A	(0.563, 0.428)	690

由于实际采用的 4 色 LED 的色坐标和上述计算值有所偏差,重复上述计算过程,得到夜模式下 AGB 的配光比例为 0.57 : 0.34 : 0.09。将 3 个配比分别作为固定值带入式(4),计算得到的 RGBA 的配光比例均不合理。参考式(5)得到的数值,固定夜模式下得到的 A 和 B 的比例,得到昼模式下 R 和 G 的配比分别为 0.16 和 0.49。

根据显示面积的长宽比例,选取全彩 LED 的总数量为 96 颗(12×8),琥珀色 LED 和全彩 LED 间隔排布,如图 2 所示。昼模式下,三合一全彩 LED 和琥珀色 LED 同时打开;夜模式下,关闭三合一 LED 中红色芯片,只点亮三合一 LED 中绿色、蓝色及琥珀色芯片。

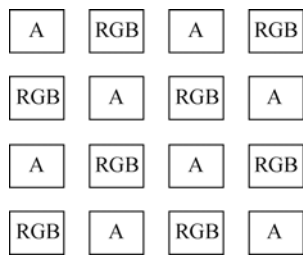


图 2 四基色 LED 布置图

Fig. 2 Arrangement of four-primary-color LEDs

3 软件仿真

对 RGBA 四基色 LED 背光源进行光学仿真,仿真模型如图 3 所示,包括 RGB 三合一 LED 和琥珀色 LED 各 96 颗。每个 LED 的外形尺寸为 3 mm×3 mm(芯片面积为 1 mm×1 mm),RGB 彩色 LED 和琥珀色 LED 交叉排列。令长轴方向 LED 的间距为 5.6 mm,短轴方向 LED 的间距为 5.5 mm,背光的发光面积为 144.8 mm×109.0 mm,大于显示面积(142.24 mm×106.68 mm)。

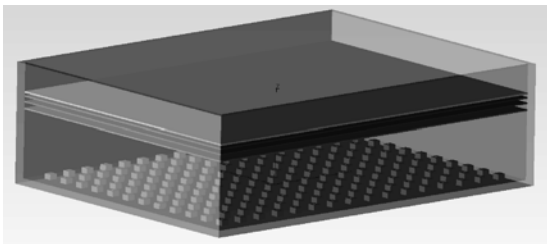
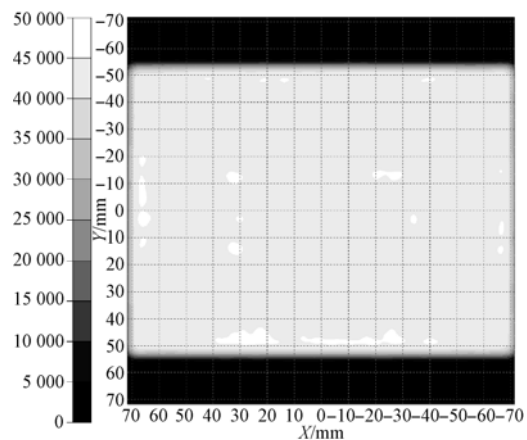


图 3 四基色 LED 背光仿真模型

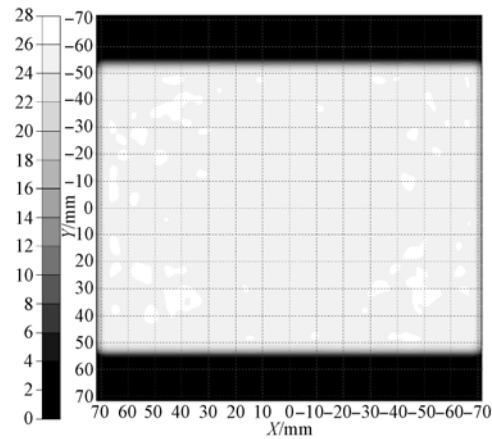
Fig. 3 Simulation model of 4-primary-color LED

根据昼模式下各颜色的亮度配比和表 1 的额

定参数,设定昼模式下红色 LED 的发光强度为 $30\ 436/96=317\text{ mcd}$,同理得到 GBA 三色 LED 的发光强度分别为 1 132.3,226.5 和 588.8 mcd。夜模式下 RGBA 各 LED 的发光强度分别为 0,0.47,0.11 和 0.56 mcd。模型中包括 1 片扩散膜和水平、垂直方向各 1 片增亮膜。模型初始混光腔高度为 10 mm。改变腔体高度,当腔体高度为 26 mm 时,昼/夜模式下的亮度均匀性均能满足要求。2 种工作模式下的照度仿真结果如图 4 所示。经计算,昼模式和夜模式下亮度分别为 $20\ 307\text{ cd/m}^2$ 和 11.57 cd/m^2 ,非均匀性分别为 5.7% 和 14.7%。



(a) 昼模式
(a) Day mode



(b) 昼模式
(b) Night model

图 4 亮度仿真结果

Fig. 4 Luminance simulation results

4 测量实验与结果

本课题组开发了四基色 LED 背光源并进行了测试,如图 5 所示。

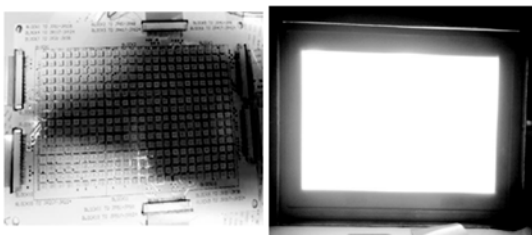


图 5 四基色 LED 背光

Fig. 5 4-primary-color LED backlight prototype

采用液晶显示五维测量台和 TOPCON 公司的 SR-UL1R 色度亮度计对背光进行了测试。昼模式下,为了达到高亮度、宽色域,RGBA 4 色 LED 全部打开,此时背光系统的光谱能量如图 6 所示。

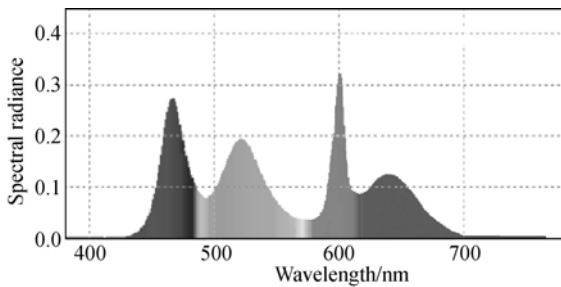


图 6 昼模式下四基色 LED 背光的光谱能量

Fig. 6 Spectrum of 4-primary-color LED backlight in day model

按照国军标测试了 9 点亮度^[13],测试数据如表 3 所示。

表 3 昼模式下 9 点测试数据

Tab. 3 Measurement data of nine points in day model (cd/m²)

测试点	亮度	测试点	亮度	测试点	亮度
P1	23 515	P4	22 418	P7	22 145
P2	22 522	P5	20 001	P8	22 761
P3	21 460	P6	22 418	P9	21 940

中心亮度(P1)为 23 515 cd/m²,当液晶屏的透过率为 5%时,昼模式下屏前亮度为 23 515 × 5% = 1 175 cd/m²。非均匀性 ρ 为:

$$\rho = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}, \quad (8)$$

其中: L_{max} 和 L_{min} 分别是 9 个测量点中亮度的最大值和最小值,由此得到本文开发的四基色 LED 背光昼模式下的非均匀性为 8.07%。

夜模式下,为了防止近红外泄露,关闭红色 LED,其光谱能量如图 7 所示。从图中可见,红波段主波长在 600 nm 附近,波长在 610 nm 以上的光的辐射能量已经非常微弱;到 625 nm 以上时,辐射能量减小为 0。

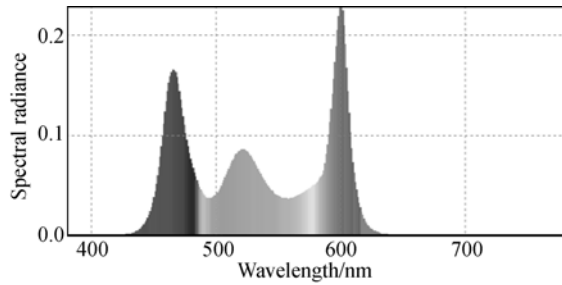


图 7 夜模式下四基色 LED 背光的光谱能量

Fig. 7 Spectrum of 4-primary-color LED backlight in night model

夜模式下 9 点测试数据如表 4 所示。根据式(8)可算出夜模式下 LED 背光的非均匀性为 15.49%。

表 4 夜模式下 9 点测试数据

Tab. 4 Measurement data of nine points in night model (cd/m²)

测试点	亮度	测试点	亮度	测试点	亮度
P1	15.36	P4	13.44	P7	14.16
P2	14.26	P5	11.24	P8	14.32
P3	13.18	P6	12.56	P9	13.44

昼模式下,背光源的色域主要由 4 个颜色的 LED 发光光谱决定,不再是色三角,而是由四基色组成的四角形。分别开启 4 个颜色的 LED,测得四基色的色坐标分别为 R(0.698 0, 0.301 0), G(0.191 0, 0.705 0), B(0.137 5, 0.075 7), A(0.584 9, 0.411 1),计算得到昼模式下 LED 背光源的色域范围为 116.5% NTSC。夜模式下背光源色三角由 GBA 三色决定,由此组成的色三角面积为 NTSC 标准的 83.5%。传统三基色和本文四基色的 LED 背光在昼夜模式下的色域图如图 8 所示(彩图见期刊电子版)。其中红色和土黄色分别为四基色和三基色背光昼模式下的色域,蓝色和绿色分别为四基色和三基色背光夜模式下的色域。可以看出,相对于传统的由绿和蓝组成的

两点之间的直线,采用四基色 LED 背光后,夜模式下的色域较三基色(直线)背光有了很大的提高。

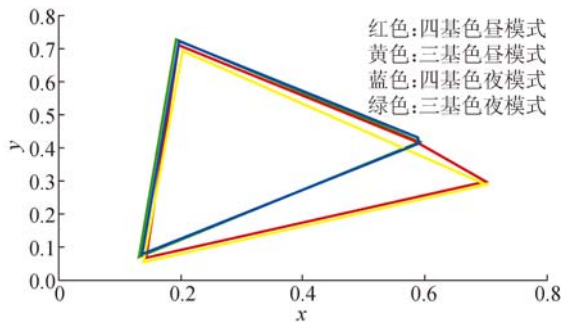


图 8 四基色和三基色 LED 背光色域图

Fig. 8 Color gamuts of 3- and 4-primary-color LED backlights in day and night models

参考文献:

- [1] FRANCIS N. Factors affecting efficiency and output of LEDs used in display-backlighting applications for aircraft cockpits [J]. *Journal of Information Display*, 2009;10-14.
- [2] DARREL G H. Technology challenges for military and avionics displays [C]. *Proceedings of Society for Information Display Americas Display Engineering and Applications Conference, San Jose CA*, 2005;13-16.
- [3] 汪显波,董戴,吕国强,等. 用大功率白光 LED 实现高亮度背光源设计[J]. *现代显示*, 2007,2:51-56. WANG X B, DONG D, LÜ G Q, *et al.*. A high brightness backlight design using high power white LEDs [J]. *Advanced Display*, 2007, 2: 51-56. (in Chinese)
- [4] 许明辉,胡元刚. 夜视兼容原理及在机载液晶显示器上的实现[J]. *现代显示*, 2006,59:48-51. XU M H, HU Y G. The theory of NVIS-compatible and the implementation in cockpit [J]. *Advanced Display*, 2006, 59:48-51. (in Chinese)
- [5] 谢剑斌,夏显忠,夏利锋,等. 可实现红外夜视兼容的液晶显示器背光模组: 中国, CN2758817 [P]. 2006. XIE J B, XIA X Z, XIA L F, *et al.*. NVIS-compatible LCD backlight: Chinese patent, CN2758817 [P]. 2006. (in Chinese)
- [6] ADIEL A, FARMINGTON H. Night vision goggle compatible liquid crystal display device: US, 5262880 [P]. 1993.
- [7] 程海峰,门金凤,刘世利,等. 吸收型近红外滤光片的制备[J]. *红外技术*, 2006,28(10):591-593. CHENG H F, MENG J F, LIU SH L, *et al.*. The preparation of near infrared absorbing filter [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(10):591-593. (in Chinese)
- [8] 门金凤,程海峰,陈朝辉,等. 夜视兼容近红外吸收滤光片的研究进展[J]. *材料导报*, 2008,22(6):13-16. (in Chinese) MENG J F, CHENG H F, CHEN CH H, *et al.*. Research progress in NIR absorbing filter for NVIS-compatible lighting [J]. *Materials Review*, 2008, 22(6):13-16. (in Chinese)
- [9] 荆其诚,焦书兰. 色度学[M]. 北京:科学出版社, 1979:91-98;279-282; 291-292. JING Q CH, JIAO SH L. *Colourometry* [M]. Beijing: Science Press, 1979:91-98; 279-282; 291-292. (in Chinese)
- [10] 高竹青,范正修,李如凤. 光学薄膜的色度分析[J]. *光子学报*, 2000,29(9):838-842. GAO ZH Q, FANG ZH X, LI R F. Chroma analysis of optical films [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(9):838-842. (in Chinese)
- [11] 赵星,方志良,宋丽培,等. 数字光处理背投电视色度学特性的研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(2): 355-358. ZHAO X, FANG ZH L, SONG L P, *et al.*. Study

5 结 论

为了改善机载液晶显示夜模式下的显示色域,本文开发了基于红、绿、蓝、琥珀色四基色的 LED 背光源。昼模式下,4 色 LED 全部打开,亮度达到 23 515 cd/m²,非均匀性为 8.07%,色域为 NTSC 的 116.5%。夜模式下,红色 LED 关闭, G, R, A 的 LED 工作,亮度达到 15.36 cd/m²,非均匀性为 15.49%,色域为 NTSC 的 83.5%。相比于传统的采用滤光片的夜视兼容工作方式,四基色 LED 背光源的色域有了极大提高,保证了夜模式下显示的品质及飞行安全。

on colorimetric characters of digital light processing rear projection television [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(2):355-358. (in Chinese)

[12] Nichia LED catalog 2014 [Z/OL]. www.nichia.co.jp.

[13] 国军标 GJB 5435-2005:机载有源矩阵液晶显示器

光度和色度测量方法[S]. 2006.

National military standard GJB 5435-2005: The photometric and colorimetric measurement method for active matrix liquid crystal display in aircraft cockpit [S]. 2006. (in Chinese)

作者简介:



冯奇斌(1970—),女,天津人,副教授,1992年于上海机械学院获得学士学位,1995年于华东工业大学获得硕士学位,2006年于维也纳工业大学获得博士学位,主要从事立体显示、LED背光等方面的研究。E-mail: fengqibin@hfut.edu.cn

通讯作者:



吕国强(1962—),男,浙江新昌人,教授,博士生导师,1983年、1986年于浙江大学分别获得学士、硕士学位,主要从事立体显示、液晶显示等方面的研究。E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)