

· 光电工程系统技术 ·

基于二分法的 RGB-LEDs 配色研究

徐示波, 吕毅军, 陈焕庭, 高玉琳, 陈 忠

(厦门大学物理与机电工程学院, 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要: 研究如何快速、精确地匹配三基色 RGB 的比例得到任意颜色的光具有重要意义. 提出一种结构简单易于实现的 RGB-LEDs 配色模型, 通过振幅调制电流来改变三基色 LED 辐射功率, 从而调节各基色在混合色中的亮度比例, 使得 RGB-LEDs 能够匹配到任意颜色. 同时给出使用该模型进行配色的精确度评价指标. 在此模型基础上提出一种基于二分法的 RGB 配色算法, 使得混合颜色的色品坐标能够快速、精确地匹配到指定范围. 仿真实验证明了算法的正确性和有效性. 该算法收敛速度快, 配色精确度高, 具有很高的实用价值.

关键词: LED; 配色算法; 色度学; 二分法

中图分类号: O432.3; TN312.8

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)06-0007-04

Color Matching of RGB-LEDs Based on Dichotomy

XU Shi-bo, LV Yi-jun, CHEN Huan-ting, GAO Yu-lin, CHEN Zhong

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Fujian Engineering Research Center for Solid-state Lighting, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The way to match the ratio of RGB trichromatic lights to get arbitrary color of light quickly and accurately is of great significance. An easily realizable RGB-LEDs color matching model with simple structure was proposed. An arbitrary color can be matched by changing trichromatic LED radiation power in the way of current amplitude modulation, which in turn adjusts the proportion of each color's luminous intensity. At the same time, an accuracy evaluation indicator for color matching model was given. Based on the model, a dichotomy algorithm of RGB color matching is employed so that the chromaticity coordinates of mixed color can be quickly matched to a specified scope. The simulation results prove the correctness and validity of the algorithm. This algorithm has a high value in practical application for its rapid convergence and high precision color matching.

Key words: light-emitting diode; color matching algorithm; chromaticity; dichotomy

发光二极管(light emitted diode, LED)是一种利用半导体 PN 结把电能转换成为光能的光电转换器件, 它和白炽灯等其他照明光源相比较, 具有体积小、寿命长、功耗低、安全节能等优点, 已经成为照明产业新的增长点和发展方向^[1-3].

LED 的具体应用也变得日趋广泛, 特别是高亮度的蓝光和白光 LED 出现以后, LED 的应用由普通的仪器仪表数字显示发展到固态照明领域, 逐渐

取代白炽灯, 广泛用作交通信号灯、标志灯、汽车车灯、以及普通照明和显示等. 随着 LED 制造技术的发展和成本的降低, LED 照明将会越来越普及^[4].

由红、绿、蓝三基色(RGB)LEDs 组成的 RGB-LEDs 系统可以产生包括白光在内的任何颜色光. 研究 RGB-LEDs 配色技术, 即研究如何快速、精确地匹配三基色 RGB 的比例得到任意颜色的光, 在许多理论和实际问题中具有重要意义. 在白光合原理

收稿日期: 2009-09-30

基金项目: 863 半导体照明工程重大专项(2006AA03A175); 福建省重大专项(2006H0092); 福建省自然科学基金(2008J0030)

作者简介: 徐示波(1984-), 男, 湖南耒阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为机械设计及精密仪器设计.

论方面,将会涉及如何控制各基色光的辐射功率使得混合光为满足特定色度要求的白光^[5].在照明灯具方面,可以设计出改变颜色的灯具,将 LED 组装成各种阵列,与数字化技术相结合,通过控制系统混光,变换 RGB 三色光源的颜色和亮度达到智能化照明效果,并有可能创造新的应用和市场^[6].在颜色复制方面,要求使用计算机控制光源颜色接近一定主题环境下的真实颜色^[7].

1 RGB-LEDs 配色模型

1.1 模型原理

把 2 种以上的颜色调节到视觉上与某种颜色相同的方法叫做颜色匹配.颜色的混合分为颜色相加混合和颜色相减混合,颜色光的混合属于前者.

根据格拉斯曼定律,任意 2 种颜色混合将产生中间色,在色度图上表现为所产生的颜色是以这 2 种颜色为端点的连线线段上的颜色.3 个线性无关的颜色 R 、 G 、 B 相混合,可以产生以此三点为顶点所构成的三角形内的任意颜色,这个三角形区域称为色域.反之,色域中任意颜色 C 也可以由 R 、 G 、 B 线性混合而成,表示如下^[8]

$$C = aR + bG + cB \quad (1)$$

其中, a 、 b 、 c 分别表示 R 、 G 、 B 颜色的数量比例.

配色的主要任务是确定得到混合颜色 C 的 a 、 b 、 c 数量比.也可以用三刺激值来说明问题,设颜色 R 、 G 和 B 的单位量三刺激值向量分别为 (X_R, Y_R, Z_R) 、 (X_G, Y_G, Z_G) 和 (X_B, Y_B, Z_B) ,因为三刺激值满足线性叠加关系^[9],所以混合颜色 C 的三刺激值 (X_C, Y_C, Z_C) 为

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, (a, b, c) 即为所求颜色 R 、 G 、 B 的配色向量. RGB-LEDs 配色模型的主要任务是求出该配色向量,使得 R 、 G 、 B 颜色按照该向量混合得到颜色 C .

1.2 模型描述

控制 LED 的光通量输出可以通过改变其驱动电流来实现,有 2 种改变驱动电流模式:振幅调制和脉宽调制(PWM).振幅调制是将要传送的信息直接

转变为驱动电流注入 LED 中,其优势在于系统结构简单、易于实现,并且驱动程序效率高^[10].模型中采用振幅调制模式,所得模型具有结构简单,系统易于实现等特点.

RGB-LEDs 配色模型,是通过振幅调制电流来改变三基色 LED 的辐射功率,从而调节各基色在混合色中的亮度比例,使 RGB-LEDs 能够匹配到一定颜色.图 1 为两基色 RG-LEDs 配色模型,三基色 RGB-LEDs 配色模型与此类似.

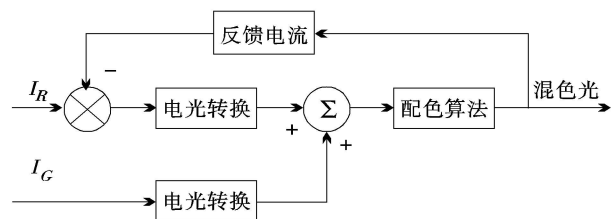


图 1 RG-LEDs 配色模型

图 1 中, I_R 、 I_G 为 R 、 G 颜色 LED 输入电流,然后经过 LED 进行电光转换, Σ 表示对 2 种颜色光混合.配色算法用来检测混色光的色品坐标是否满足要求,并且产生反馈信息调节 I_R 输入值,从而构成闭环控制系统^[11,12].

系统中配色算法处于运算和控制的核心地位,它的作用是完成相关运算,判断配色是否完成以及需要反馈调节的信息.下面将给出该模型中颜色可接受色域和匹配精确度定义^[13-15].

定义色度坐标为 $C(c_1, c_2)$ 点的 δ 域为

$$\delta = \{(x, y) | (x - c_1)^2 + (y - c_2)^2 \leq r^2, r > 0\} \quad (3)$$

其中, r 为 δ 域半径,其大小由具体问题给定.则称 δ 域为颜色 C 可接受色域,即认为 δ 域中任意颜色和 C 颜色在视觉上相等.

设 R 、 G 、 B 配色后的色品坐标为 (x, y) ,定义颜色 C 匹配精确度如下

$$\Delta e = \frac{1}{r} \sqrt{(x - c_1)^2 + (y - c_2)^2} \quad (4)$$

颜色 $C(c_1, c_2)$ 点为配色的理论极限.由模型原理易知,如果 $0 \leq \Delta e \leq 1$ 则表示匹配的色品坐标落在 δ 域,配色结果准确. Δe 数值越小匹配的色品坐标越靠近 δ 域中心,配色结果越精确.

该模型还可以很方便地实现对 RGB-LEDs 的调光.如何保证 RGB-LEDs 系统颜色不变的情况

下,来调节系统的发光强度,这已经成为一个新的挑战^[16].该模型通过改变其中一个基色 LED 的输入电流,配色算法将使各基色 LED 输入电流快速达到新的状态,从而在系统的颜色几乎不发生改变的情况下调整 RGB-LEDs 发光强度.

2 基于二分法的 RGB 配色算法

2.1 算法设计

配色算法总体上分两步进行:首先只对 R 、 G 进行颜色匹配,因为 R 、 G 两者混合后的色品坐标一定在 R 、 G 连接线段上面,故可以得到一定比例使得混合后的色品坐标 $P_0 \in [P, Q]$;固定 R 、 G 数量,然后加入 B 进行匹配,调整 B 就可以使配色后色品坐标落在指定 δ 域,配色完成.

计算过程有 2 次两两匹配,即 RG 匹配和 BP_0 匹配.匹配方法是固定其中一个基色的辐射强度值,而只改变另一个基色的辐射强度值,运用二分法思想对这个基色辐射强度区间进行二分收缩求精,求出相应配色数值.

2.2 算法实现

如图 2 所示,算法采用 CIE 1931 标准色度系统,设颜色 R 、 G 、 B 的色品坐标分别为 (x_R, y_R) 、 (x_G, y_G) 、 (x_B, y_B) ,从 B 点作 δ 域的 2 条切线与 RG 直线相交于两点 P 、 Q ,设靠近 G 为 P 点, P 、 Q 横坐标分别为 x_p 、 x_q , P_0 为 PQ 线段上的一点, BP_0 线段和 δ 域边界圆相交于两点,其横坐标分别为 x_r 、 x_s .称以上 4 个横坐标的值为“终值因子”,用来判断配色结果是否满足要求.

基于二分法的 RGB 配色算法具体实现如下:

(1)计算 R 、 G “终值因子” x_p 、 x_q .联立过 B 点的切线方程和 RG 直线方程

$$\begin{cases} y - y_B = k(x - x_B) \\ y - y_R = \frac{y_G - y_R}{x_G - x_R}(x - x_R) \end{cases} \quad (5)$$

由几何关系可知,圆心 $C(c_1, c_2)$ 到 2 条切线 BP 、 BQ 的距离等于半径 r ,故 r 满足

$$r = \frac{|kc_1 - c_2 + y_B - kx_B|}{\sqrt{1 + k^2}} \quad (6)$$

由式(6)解出 k 再代入式(5)中,解得 x 中较小的一个为 x_p ,较大的一个为 x_q .用这两个“终值因

子”来判断 R 、 G 颜色匹配是否达到要求.

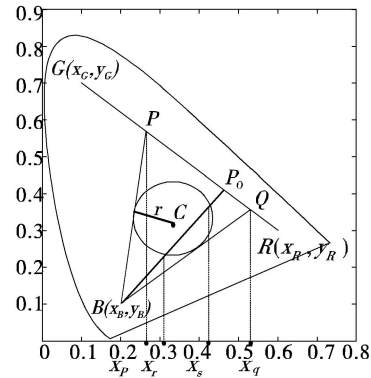


图 2 配色算法示意图

(2)求出颜色 R 、 G 合适比例. G 的辐射功率取定值 β , R 的辐射功率取值范围 $[t_1, t_n]$ ($t_1 < t_n$),取中点 $R: \alpha = \frac{t_1 + t_n}{2}$ 与 $G: \beta$ 匹配,所得 P_0 的横坐标为 x_0 ,各变量变化如下

$$\begin{cases} R = \alpha, x_0 \in [x_p, x_q] \\ t_1 = \alpha, x_0 < x_p \\ t_n = \alpha, x_0 < x_q \end{cases} \quad (7)$$

继续二分迭代匹配,直至 $x_0 \in [x_p, x_q]$.此时可得 R 、 G 颜色匹配数值.

(3)计算 B “终值因子” x_r 、 x_s .已经由 RG 匹配得到了 $P_0(x_0, y_0)$ 点,连接 BP_0 与 δ 域边界圆相交于两点,解下列方程组可以得到此两点的横坐标

$$\begin{cases} y - y_B = \frac{y_B - y_0}{x_B - x_0}(x - x_B) \\ (x - c_1)^2 + (y - c_2)^2 = r^2 \end{cases} \quad (8)$$

解得 x 中令较小的一个为 x_r ,较大的一个为 x_s .用这 2 个“终值因子”来判断 B 颜色匹配是否达到要求.

(4)求出颜色 B 的合适比例.给定 B 辐射功率范围取值范围 $[u_1, u_n]$,取中点 $B: \gamma = \frac{u_1 + u_n}{2}$ 与 RG 的匹配点 P_0 进行匹配, BP_0 匹配后所得色品坐标的横坐标为 x_c ,各变量变化如下

$$\begin{cases} B = \gamma, x_c \in [x_r, x_s] \\ u_1 = \gamma, x_c > x_s \\ u_n = \gamma, x_c > x_r \end{cases} \quad (9)$$

继续二分迭代匹配,直至 $x_c \in [x_r, x_s]$.此时可得 B 颜色匹配数值.

(α, β, γ) 即为所求配色向量,将这个向量进行归一化,即可得到 R 、 G 、 B 的配色比例,其配色后的色品坐标落在 δ 域.

3 实验结果与讨论

3.1 实验结果

为了检验算法的正确性和有效性,选用一组 RGB-LEDs 来进行算法仿真实验.先用德国 Instrument Systems 公司 Spectro320e 光谱系统测试 RGB-LEDs 中 R 、 G 、 B 峰值波长分别为:615、540、460 nm,半高宽分别为:13、36、25 nm,在 CIE 1931 标准色度系统中的色品坐标分别是:(0.676 8,0.323 0)、(0.252 1,0.720 4)、(0.143 0,0.034 9).RGB-LEDs 样品的色域范围能符合算法仿真实验的颜色要求.

建立 RGB-LEDs 模型,基于二分法的 RGB 配色算法来匹配标准色品坐标.标准色品坐标选取:标准照明体 A 、标准照明体 $D65$ 及标准照明体 C 、等能白点 E 的色品坐标,其色品坐标见表 1.

表 1 标准色品坐标

标准照明体 A	(0.447 6,0.407 5)
标准照明体 $D65$	(0.312 7,0.329 0)
标准照明体 C	(0.310 1,0.316 3)
等能白点 E	(0.333 3,0.333 3)

由于侧重讨论 R 、 G 、 B 之间的相对辐射功率大小,为了便于计算和比较,取 G 的辐射功率为基准, R 、 B 的辐射功率初始范围是[1,100].取 δ 域半径 $r=0.01$,调整 RGB-LEDs 各基色辐射功率,使得颜色混合后的色品坐标落在标准色品坐标的 δ 域.

配色向量 (α, β, γ) 和实验匹配色品坐标 (x, y) 计算结果见表 2,其中配色精确度由式(4)计算.

3.2 结果讨论

仿真实验中选取了 4 种典型的标准色品坐标作为配色对象.从算法 4 次匹配结果来看,精确度 $\Delta e < 1$,表明匹配的色品坐标都能落在标准色品坐标的 δ 域内,所得配色向量是准确的,符合预期目标.匹配的迭代次数均不超过 7 次就可以得到配色向量,表明算法收敛速度较快.实验选取 $r=0.01$,

表 2 算法配色结果和精确度

配色向量	实验匹配色品坐标	迭代次数	精确度 Δe
A (75,20,9)	(0.448 4,0.411 3)	7	0.39
$D65$ (62,30,37)	(0.318 8,0.331 0)	6	0.64
C (62,30,43)	(0.307 7,0.312 3)	7	0.47
E (75,30,37)	(0.337 5,0.330 5)	5	0.50

精确度 $\Delta e < 0.64$,可以认为所得色品坐标较接近 δ 域中心,所得匹配向量是精确的.

如果要求混合颜色的色品坐标更精确逼近 δ 域中心,可以选取更小的 r 值.随着 r 值变小,此时精确度 Δe 也会变小,同时算法的收敛速度也相应的变慢,迭代次数将会增加.应根据具体问题需要来选取 r 值,如果对所匹配颜色的精确度要求很高,则可以选取较小的 r 值.

4 结束语

文中所提出的 RGB-LEDs 配色模型其结构简单易于实现,为研究 LED 配色理论和配色应用提供一定参考.在此模型基础上提出一种基于二分法的 RGB 配色算法,通过两两匹配、二分求解,能够快速、准确地得到特定色品坐标的配色向量和配色比例.仿真实验证明了算法的正确性和有效性.基于二分法的 RGB 配色算法收敛速度快,配色结果精确度高,具有很高的实用价值.

参考文献

- [1] Pimputkar S, Speck J S, DenBaars S P, et al. Prospects for LED lighting[J]. Nature Photonics, 2009, 32(3): 180-182.
- [2] Steigerwald D A, Bhat J C, Collins D, et al. Illumination with solid state lighting technology[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(2):310-320.
- [3] Craford M G. LED's challenge the incandescents[J]. IEEE Circuits and Devices Mag, 1992, 8(9):24-29.
- [4] Fryc I, Brown S W, Ohno Y. Spectral matching with an LED-based spectrally tunable light source[J]. Proc. of SPIE, 2005, 5941:289-297.
- [5] Yang H, Bergmans W M, Schenk C W, et al. Uniform illumination rendering using an array of LEDs:A signal

(下转第 27 页)

展望未来,NLO材料的发展前景广阔,但还需要理论和技术两方面的较大发展,这有待于研究者去开拓.

参考文献

- [1] Vilson R A, Carlos A B, Roberto R P. All-optical control of light on a silicon chip[J]. *Nature*, 2004:1081 - 1085.
- [2] Mohan S, In-Seok Shin, Ronald D C, et al. Optical limiting behavior of octa-decyloxy metallo-phthalocyanines [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 90(1):31 - 37.
- [3] 孟献丰, 陆春华, 等. 激光防护材料的研究进展[J]. *激光与红外*, 2005, 35(2): 71 - 73.
- [4] So B K, Lee S M, et al. *Optical Mater*, 2003, 21 (1-3):87.
- [5] 石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 等. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [6] M D Levenson. Feasibility of measuring the nonlinear index of refractive by third-order frequency mixing [J]. *IEEE J. Quant. Electr*, 1974, QE - 10(10): 110 - 115.
- [7] S R Friberg, P W Smith. Nonlinear optical glasses for ultrafast optical switches [J]. *IEEE J. Quant. Electr*, 1987, QE - 23(12): 2089 - 2094.
- [8] M Sheik-Bahae, A A Said, E W Van Stryland. High sensitivity single n_2 measurement [J]. *Opt. Lett*, 1989, 14(17): 955 - 957.
- [9] Agrawal G P, Cojan C, Flytzanics C. Nonlinear optical properties of one-dimensional semiconductors and conjugated polymers[J]. *Phys. Rev. B*, 1978, 17: 776 - 789.
- [10] M Cha, W E Torruellas, S H Yuan. Third-order optical spectroscopy of polythiophene [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1995, B 12: 882 - 888.
- [11] W E Tomrellas, D Neher, R Zanon. Dispersion measurements of the third-order nonlinear susceptibility of polythiophene [J]. *Chemical Physics Letters*, 1990, 175: 11 - 16.
- [12] P G Huggard, W Blau, D Schweitzer. Large third-order optical nonlinearity of the organic metal a-[Bis (ethylenedithio) tetrathiofulvalene] triiodide [J]. *Appl. Phys. Lett*, 1987, 51(26): 2183 - 2185.
- [13] F Kajzar, Y Okada-Shudo, C Meritt, et al. Second- and third-order nonlinear optical properties of multilayer and composite C60-based thin films [J]. *Synthe. Metals*, 1998, 94(1):91 - 98.
- [14] E E B Campbell, et al. Third-order susceptibility of Li@C60 [J]. *Adv. Mater*, 1999, 11(1): 405 - 408.
- [15] 李忠玉. 有机三阶非线性光学材料的研究进展[J]. *吉林化工学院学报*, 2008, 25(4):23 - 31.
- [16] Fu G, Yoda T, Kasatani K, et al. Third-Order Optical Nonlinearities of Naphthalocya-nine-Derivative-Doped Polymer Films Measured by Resonant Fem to second De-generate Four-Wave Mixing [J]. *Jpn. J. App I. Phys.*, 2005, 44:3945 - 3950.
- [1] processing perspective [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(3):1044 - 1056.
- [6] Moreno I, Molinar L M. Color uniformity of the light distribution from several cluster configurations of multi-color LEDs [J]. *Proc. of SPIE*, 2005, 5941:359 - 365.
- [7] Yamaguchi M, Teraji T, Ohsawa K, et al. Color image reproduction based on the multispectral and multiprimary imaging: Experimental evaluation [J]. *Proc. of SPIE*, 2002, 4663:15 - 26.
- [8] Csuti P, Schanda J. Colour matching experiments with RGB-LEDs [J]. *Color Research and Application*, 2008, 33(2):108 - 112.
- [9] Moreno I, Contreras U. Color distribution from multicolor LED arrays [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6):3607 - 3618.
- [10] Ashdown I. Neural networks for LED color control [J]. *Proc. of SPIE*, 2004, 5187:215 - 226.
- [11] Muthu S, Schuurmans F, Pashley M. Red, green and blue LED based white light generation: Issues and control [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(2):327 - 332.
- [12] Borges C F. Trichromatic approximation for computer graphics illumination models [J]. *Computer Graphics*, 1991, 25(4):101 - 104.
- [13] Muthu S, Schuurmans F, Pashley M. Red, green and blue LEDs for white light illumination [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8 (2):333 - 338.
- [14] Borbely A, Schanda J. Colour matching using leds as primaries [J]. *Color Research and Application*, 2004, 29(5):360 - 364.
- [15] Zhang Lei, Guo Xia, Shen Guang-di, et al. The color matching of white led based on two single color LEDs [J]. *Research & Progress of SSE*, 2007, 27(4):567 - 571 (in Chinese).
- [16] Dyble M, Narendran N, Bierman A, et al. Impact of dimming white LEDs: Chromaticity shifts due to different dimming methods [J]. *Proc. of SPIE*, 2005, 5941: 291 - 299.

(上接第10页)