



高亮度LED 在绿色照明工程中的应用研究*

刘有源 方福波 陈定方

(武汉理工大学物流工程系 武汉 430063)

摘要: 根据色度学原理和LED 的特点探讨了应用高亮度LED 照明时由红绿蓝三种颜色的LED 发光管所发出的光为三原色的配色原理, 应用CIE 色度系统实现三原色配色的计算, 确定了三原色的配色比例; 根据人眼视觉惰性原理, 采用脉宽调制(PWM)的控制方式对LED 亮度进行控制, 从而实现对LED 颜色灰度级的控制和调节, 达到预期的亮度效果

关键词: 高亮度LED; 绿色照明; 配色计算

中图法分类号: TM 923

0 概 述

发光二极管(LED)是一种应用广泛的电子元件,但由于其发光效率和亮度均较低,发光颜色品种少等原因,LED在20世纪90年代以前主要用于仪器仪表的状态、数字和文字等的显示。20世纪90年代初期,LED芯片制造技术和封装技术取得重大发展,LED的发光亮度达到了cd级,产生了所谓的高亮度LED,发光颜色也覆盖到了整个可见光光谱范围,极大拓展了LED的应用范围和领域。世界上许多国家和地区已开始用超高亮度LED取代白炽灯、金属卤钨灯,广泛用作交通信号灯、警示灯、标志灯、汽车、轿车上的高位刹车灯、尾灯、转向灯及仪表盘的照明和显示等。国外有些公司还制作出LED灯泡、LED台灯及小电筒等照明灯具。到目前为止,白光LED的发光效率已达到15~20lm/W,与白炽灯发光效率相当甚至更高,用LED替代白炽灯已成为可能。

与白炽灯相比,LED固体灯具有使用寿命长(达100000h以上),能耗低,发光利用率高,对环境无害,维修费用低,工作稳定等优点,是一种理想的绿色照明光源。由于单只LED管的光通量相对较小,要获得与白炽灯或荧光灯相当的光照度需要多只LED管,因此LED固体照明成本相

对较高。目前,固体灯照明还未得到完全发展,制约LED照明发展的主要因素是LED的亮度和研制成本。随着LED制造技术的发展和成本的不断降低,LED照明将会越来越普及,高亮度LED用于固体灯照明具有广阔的发展前景和市场^[1]。

1 高亮度LED 的配色原理

1.1 颜色匹配原理^[2]

把两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。颜色可以相互混合,这种混合可以是颜色光的混合,也可以是染料的混合,两种混合方法所得到的结果是不同的。前者称为颜色相加混合,后者为颜色相减混合。将几种颜色的光同时或先后快速地刺激人的视觉器官,便产生不同于原来颜色的新颜色感觉,这就是颜色相加混合的方法。实验证明,用红、绿、蓝三原色产生其他颜色最方便,这三种颜色是最优的三原色。在颜色光的匹配实验中,由三原色组成的颜色的光谱组成与被匹配的颜色光的光谱组成可能很不一致。例如,由红、绿、蓝三个颜色光混合的白光与连续光谱的白光在视觉上一致,但它们的光谱组成却不一样。这一颜色匹配称为“同色异谱”。颜色配对:由三原色混合成的颜色只表达被匹配颜色

* 收稿日期: 2002-09-02

刘有源:男,47岁,工学博士,副教授,主要研究领域为机电系统智能CAD、物流自动化系统的数字化接口及模块化设计

广东省佛山市产学研专项基金项目资助(编号:200A19)

的外貌,而不能表达它的光谱组成情况

1.2 颜色方程

若以(C)代表需要匹配的颜色单位,(R),(G),(B)分别代表产生混合色的红、绿、蓝三原色的单位, R, G, B, C 分别代表红、绿、蓝和被匹配色的数量,当达到颜色匹配时,有

$$C(C) = R(R) + G(G) + B(B) \quad (1)$$

在色度学中,常将为匹配相等能量(简称等能)光谱色的三原色数量称为光谱三刺激值,用 $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ 表示,则匹配波长为 λ 的等能光谱色(C λ)的颜色方程为

$$C(\lambda) = \bar{r}(R) + \bar{g}(G) + \bar{b}(B) \quad (2)$$

通常,并不直接用三原色数量来表示颜色,而用三原色各自在 $\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}$ 总量中的相对比例-色度坐标表示颜色,某一特定色颜色的色度坐标 r, g, b 分别为: $r = \bar{r}/(\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}), g = \bar{g}/(\bar{r} + \bar{g} + \bar{b})$ 和 $b = \bar{b}/(\bar{r} + \bar{g} + \bar{b})$.由于 $r + g + b = 1$,所以只用 r, g 即可表示一种颜色,故颜色方程可改写为

$$(C) \quad r(R) + g(G) + b(B) \quad (3)$$

对于不同的波长的光谱色,其三刺激值是波长的函数,用 $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ 来表示,光谱三刺激值又称为颜色匹配函数,它的数值取决于人眼的视觉特性

在上述可能具有负值方程的颜色匹配条件下,所有的颜色,包括白黑系列的各种灰色、各种色调和饱和度的颜色,都能由红、绿、蓝三原色的相加混合产生(匹配).

1.3 CIE色度图^[2]

对于人眼视觉来说,颜色与三刺激值一一对应,亦即由三刺激值唯一确定.通常以图1所示的CIE-XYZ色度图作为配色计算的依据

该色度图特性:从红端到540nm一带的绿色,光谱轨迹几乎是直线,此后光谱轨迹突然转弯,颜色从绿色转为蓝-绿,蓝-绿又从510nm到480nm伸展开来,带有一定的曲率,蓝色和紫色波段却又压缩在光谱轨迹尾部的较短范围.连接400nm和700nm的直线是光谱上所没有的由紫到红的颜色.光谱轨迹及连接光谱轨迹两端所形成的马蹄形内包括一切物理上能实现的颜色,而坐标系统的三个原色点都落在这个区域之外,也就是说,三原色点的色度是假想的,在物理上不可能实现.同样,凡是落在光谱轨迹和红端到紫端直线范围以外的颜色也都是不能有真实光线产生的

根据该色度图上还可推算出由两种颜色相混

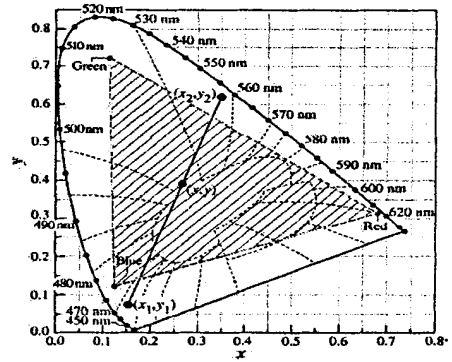


图1 多色混合

合所得出的各种中间色.色度图准确地表示了颜色视觉的基本规律以及颜色混合的一般规律,这个色度图也叫做混色图

2 配色计算

由格林斯曼定律可知,任意两非互补色以任意比例混合将产生中间色.在色度图上表现为任意两个颜色(包括互补色)相混合,所产生的颜色是以两种颜色为端点的连线线段上的颜色.三个线性无关的颜色相混合,所产生的颜色是以此三点为顶点所围成的三角形内的颜色,如图3所示.采用三色LED混色也正是基于此原理

配色的主要任务是确定三原色数量比,也就是确定三刺激值,从而进一步确定红、绿、蓝三种颜色LED管的数量比.文中所提到的配色,主要是指匹配白光,也就是在红、绿、蓝三原色LED管都达到最亮时,混合光为选定的白光,此时称为达到白平衡

设在CIE-XYZ色度系统中,所要配出的白光为 $W(x_w, y_w, z_w)$,CIE所用三原色为 $X(x_R, y_R, z_R)$, $Y(x_g, y_g, z_g)$, $Z(x_b, y_b, z_b)$,所用LED发光管发光的色度坐标分别为 $X(x_R, y_R, z_R)$ 、 $Y(x_g, y_g, z_g)$, $Z(x_b, y_b, z_b)$,则根据格林斯曼定律有

$$\left. \begin{aligned} X &= x_r(X) + y_r(Y) + z_r(Z) \\ Y &= x_g(X) + y_g(Y) + z_g(Z) \\ Z &= x_b(X) + y_b(Y) + z_b(Z) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

用矩阵的形式表示为

$$T_{LED} = A \times T_{XYZ} \quad (5)$$

式中: $T_{LED} = \{X \ Y \ Z\}^T$, $T_{XYZ} = \{X \ Y \ Z\}^T$ 于是

$$T_{XYZ} = A^{-1} \times T_{LED} \quad (6)$$

在CIE-XYZ色度系统中 有

$$W = [x_w \quad y_w \quad z_w] \times T_{XYZ} \quad (7)$$

将式(6)代入可得

$$W = [x_w \quad y_w \quad z_w] \times A^{-1} \times T_{LED} \quad (8)$$

设 $[x_w \quad y_w \quad z_w] \times A^{-1} = [b_1 \quad b_2 \quad b_3]$, 则 b_1, b_2, b_3 即为以 X, Y, Z 为三原色时 W 的色度坐标 亦即为以 X, Y, Z 为三原色匹配 W 时, 三原色的亮度或光通亮之比

通过计算得到配色的色度坐标, 由色度系统的单位即可得知红绿蓝三种LED发光管的总的光强或光通比, 由每种发光管的特性参数即可确定各种LED发光管的大致数量比

3 LED 发光管的排列设计

三原色的配色比例决定了混色后所得的颜色, 亦即红绿蓝三原色LED的相对数量决定了混色的颜色 在实际应用中, LED一般都是直立安装, 其光线近似为以LED发光中心为顶点, 以LED的光轴为中轴的倒圆锥体形 LED的分布位置对参与混色的光具有直接影响, 效果如图2所示 图中红绿蓝三色圆心的位置为发出相应颜色LED的发光中心的位置

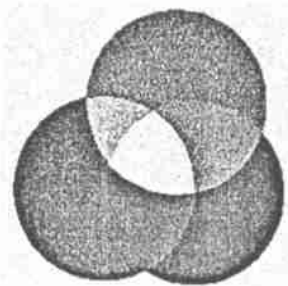


图2 三色LED混色

由图2可知, 混色区域分为单色区域, 两种单色混合区域和三色混合区域 单色LED的位置不同, 各种颜色区域的面积大小不同 单色LED相互间的距离减小时, 两种或三种单色混合的区域就增大, 反之则减小 用三原色进行配色就是用两种或三种原色混色获得另一种单一的颜色, 要求在混色时尽量避免其他颜色的出现 因此要获得较为理想的配色效果, 必须尽量减小参与混色的LED之间的间距, 从而增大混色区域

由格林斯曼定律可知, 混合色的色调决定于三原色的相对比例, 混合色亮度为混色前颜色亮度的总和 LED各方向上的光强是不等的, 它产生的光照不均匀 图3所示为相邻红绿蓝LED混色的示意图, 图中曲面代表LED光强分布

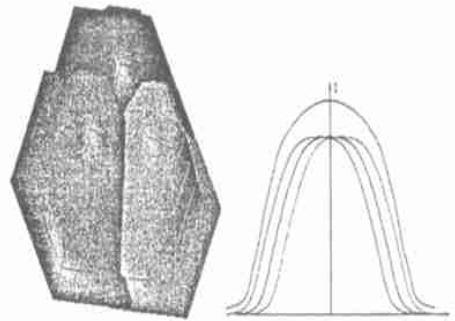


图3 CIE-XYZ色度

从图中可以看出, 相邻红绿蓝LED混色时, 根据其相互间的距离, 混色后光强的分布可以产生一个或多个波峰, 而使得局部亮度高, 所混合颜色与周围有明显差异 附近的LED的光也有一部分射到该区域, 但由于强度很小, 对波峰和波谷的影响很小 当相邻几个LED混色产生一个强度分布波峰时, 可以将这几个LED看作为一个发光单元, 混色区域可以看作是由若干个这样的发光单元所照亮, 混色结果也就是这若干个发光单元排列起来发光的结果 因此, 在排列LED管时, 要形成由配色计算所得三原色LED相对数量比所确定的LED发光单元, 并使得各发光单元分布均匀, 分布距离适当

4 LED 亮度控制

控制LED亮度的方法有两种 一种是改变流过LED的电流, 另一种是脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制LED的点亮时间 一般而言, 除红色LED随电流的增大亮度会达到饱和外, 其他LED的亮度会随工作电流的增大而增大 通过控制流过LED的工作电流, 可以在较大范围内对LED亮度进行控制 但电流的控制不易于用软件实现, 故不适用于数字控制 而PWM方式能很方便地用软件实现, 故在数字电路中有着广泛的应用

根据塔尔波特(Talbot)定律^[3]

$$\bar{L} = \frac{1}{T} \int_0^T L(t) dt \quad (9)$$

式中: \bar{L} 为眼睛对周期变化光感觉的视觉亮度; T 为周期 当亮度函数 $L(t)$ 为一常数 L 时, 视觉亮度变为

$$\bar{L} = \frac{1}{T} L \quad (10)$$

脉宽调制方式控制LED的亮度实际上是控制LED的点亮的时间, 周期性的改变其在一个周

期内点亮时间的长短,从而实现LED亮度的变化。LED在工作状态下,其工作电流保持稳定,在点亮状态时其亮度只与LED的本身特性有关,而与时间无关,故其亮度函数为一常数。LED周期性点亮和熄灭时,其亮度满足公式(10)。改变循环周期内LED的点亮时间,即可得到LED不同的亮度级别,称之为不同的灰度级。在工作状态下,连续地改变LED在循环周期中的点亮时间,则实现了LED亮度灰度级的连续变化。将循环周期 T 等分为 n 等份,则LED的灰度级相应地分为 n 级。

要使得LED在灰度级变化过程中,人眼觉察不到亮度的跳变,即没有闪烁感,LED的亮灭变化频率要大于临界频率,其循环周期至少不大于 $0.1 \sim 0.02$ s。实验证明,当LED的灰度为256级时,红绿蓝三原色混色后无颜色的跳变,人眼的感觉颜色是渐变的。256级灰度对应着256级亮度,也就对应着256种颜色变化,则红绿蓝三原色混色后可产生256种颜色,即为所谓的24位颜色。

目前在嵌入式控制系统中普遍采用C-51系列单片机,外部晶振频率可达20 MHz,机器周期为 $1 \mu\text{s}$,能够很容易地满足临界频率的要求。采

用C-51系列单片机对红绿蓝LED进行256级灰度控制时,将LED的亮灭变化周期均分为256级;可以对红绿蓝三种颜色的LED管进行单色控制和混色控制。要对红绿蓝三种原色进行分别控制实现24位颜色的生成时,可采用分段延时的控制方法实现对占空比的控制。在进行颜色混合时,三原色按一定的亮度比进行混合,也就是按一定的灰度级进行混合,不同的灰度级对应不同的占空比不同,在循环周期中LED点亮的时间不同,最低灰度级的点亮时间为 t_1 ,中间灰度级与最低灰度级的点亮时间差为 t_2 ,最高灰度级与中间灰度级点亮时间差为 t_3 ,最高灰度级的熄灭时间为 t_4 ,根据这个时间差异实现对三种颜色的LED的控制。

参考文献

- 1 吴春蕾,冯启明,曹汉平.虚拟FPC总线设计与实现.武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2002,26(6):815~817
- 2 汤顺青.色度学.北京:北京理工大学出版社,1990.6
- 3 郝允祥,陈遐举,张保洲.光度学.北京师范大学出版社,1988.8

Applications of High Brightness LED in Green Lighting Engineering

Liu Youyuan Fang Fubo Chen Dingfang

(Department of Logistics Engineering, WUT, Wuhan 430063)

Abstract

High brightness LED is a kind of green light source and shows promise of wide applications. Based on the principles of chromaticity and the characteristics of LED, this paper approaches the color mix theories using the lights emitting from the selected three LEDs of red, green and blue as tricolor in the lighting applications of high brightness LEDs. It implements the related color matching calculation method with tricolor employing the CIE chromaticity system, which can be used to determine the proportion of the tricolor. According to the inertia of eyes, pulse width modulation (PWM) is employed to control the brightness of LEDs, thus the gray degree is conveniently controlled and adjusted so as to implement the expected brightness. This provides us a precondition for the development of green lights of high brightness LEDs.

Key words: high brightness LED; green light; color matching calculation