

文章编号: 1000-7032(2018)07-1008-08

## 生物节律因子的调光计算

周晓明\*, 陈亮, 曾伟森, 周 犇

(华南理工大学物理与光电学院 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对光生物效应重要性及复杂性问题, 提出一种生物节律因子的调光计算方法。给定三通道 LED 工作在额定条件下的光谱分布就能够实现任意比例的混合光源的照度、相关色温、节律因子的便捷计算。实验选用三种色温白光 LED 组成三通道光源, 基于脉冲宽度调制(PWM)原理进行三通道分时调光。在某一照明测试空间距离下, 先测得单通道独立工作时的光谱分布, 并通过调光计算方法得到三通道在任意比例下混合光源的理论照度、相关色温、节律因子; 再测得三通道光源在不同混合比例下的实际照度、相关色温与节律因子。然后将理论与实际计算所得的照度、相关色温、节律因子进行比较, 并分析误差。实验结果表明, 照度、相关色温、节律因子的多条拟合直线与调光计算式所描述直线的斜率差异分别在 6%、2%、3% 以下, 截距差异分别在 2%、5%、3% 以下。用显著性差异检验来检验实际节律因子与理论计算所得节律因子的正态分布特性, 结果显示并无明显差异, 表明在给定各 LED 光源光谱分布的情况下, 调光计算方法不用通过测量混合光源光谱分布, 便能快速有效地计算出混合光源照度、相关色温、节律因子。

**关键词:** 生物节律因子; 调光计算方法; 分时 PWM 调光; 三通道 LED

中图分类号: Q682; TU113.19

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183907.1008

## Dimming and Calculation of Biological Rhythm Factor

ZHOU Xiao-ming\*, CHEN Liang, ZENG Wei-sen, ZHOU Ben

(State Key Laboratory of Subtropical Building Science, School of Physics and Optoelectronics,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

\* Corresponding Author, E-mail: zhouxm@scut.edu.cn

**Abstract:** A dimming and calculation method of circadian factor is proposed in view of the importance and complexities of non-visual biological effects. When the spectral distribution of each of the three channels under the rated conditions is given, the illuminance, CCT and circadian factor of hybrid light at any ratio can be calculated easily. In test, three-channel hybrid light source is composed of three color temperature LEDs, and dimming with PWM on the principle of time sharing. At one testing distance, the spectral distribution of each single channel is measured independently first, and the theoretical illuminance, CCT and circadian factor of hybrid light in continuous gradient are obtained by the dimming and calculation method. Then, the actual illuminance, CCT and circadian factor of hybrid light are measured. Finally, the two illuminances, CCT and circadian factors got by theoretical and actual are compared along with an error analysis. The results show that the fitting line of the illuminance, CCT and circadian factor and the line described by the dimming and calculation method show a low difference in slope, which is below 6%, 2%, 3%, respectively, and the difference in intercept is below 2%, 5%, 3%, respectively. And there is no significant difference between the actual rhythm factor and the

收稿日期: 2017-10-24; 修订日期: 2017-12-13

基金项目: 广东省科技计划(2015A010103005); 亚热带建筑科学国家重点实验室开放项目(2018ZB20)资助

Supported by Science and Technology Project of Guangdong Province(2015A010103005); Foundation of The State Key Laboratory of Subtropical Building Science(2018ZB20)

theoretical calculated rhythm factor under the significant difference test. It is shown that the dimming and calculation method can calculate the illuminance, color temperature and circadian factor of the hybrid light easily and effectively without measuring the spectral distribution of hybrid light when the spectral distribution of each single LED is given.

**Key words:** circadian factor; dimming and calculation method; time-share PWM dimming pattern; three channels LED

## 1 引 言

照明科学的发展使得人们享受到越来越先进的照明,同时不断提高的物质生活水平反过来让人们对照明提出了更高的要求。在照明系统逐步从电气自动化向智能化发展的同时,人们也在越来越多地关注健康照明问题。以光源光谱能量分布为出发点,研究光学参量与光生物效应之间的相互关系,并在此基础上建立相应的调光控制方法,是未来健康照明的发展方向<sup>[1]</sup>。研究表明,高色温光源能够明显影响人体中枢神经系统,通过褪黑素与皮质醇等激素调节人体警觉度、嗜睡程度、生物钟等,同时还伴随着对心率、血压等生理参数的影响<sup>[2-3]</sup>。非视觉生物效应拓宽了照明领域的研究,自从第三类感光细胞 ipRGCs<sup>[4]</sup>被发现以来,对于照明调光研究将不再仅仅针对于视觉效应,在照明实践中也提出了兼顾视觉与非视觉的新的照明要求<sup>[5-6]</sup>。光生物效应区别于明视觉、暗视觉、中间视觉效应,有其相对独立的评价模型与计算方法<sup>[7]</sup>,本文即在此基础上提出光生物节律因子在实际照明应用中的一种调光计算方法,使得在设计调光控制模型中,能便捷地将光生物效应应用于调光系统中。

在智能化健康照明发展大趋势下,充分考虑光对人体的影响因素至关重要,如何将研究成果合理、方便、有效地运用到实际照明调光过程中是接下来需要研究的重点问题之一。自 2002 年以来,国内外研究学者相继提出了多种光生物效应评价方法,用来定量评价光生物效应强弱,如 Gall 等<sup>[8]</sup>基于传统光度学概念提出的  $a_{cv}$  模型,Aladov 等<sup>[9]</sup>提出的综合考虑人眼特性的 BioEq 模型,Rea 等<sup>[10]</sup>基于褪黑素抑制作用提出的  $CL_A$  模型,周晓明等<sup>[11]</sup>从不同人群角度出发提出的 M(A) 模型。这些评价模型用不同方法与角度描述了光生物效应与光谱分布的函数关系。而郑莉莉等<sup>[12]</sup>以接

近自然光为目的,研究了节律因子、相关色温与工作电流的关系模型;宋鹏程等<sup>[13]</sup>从光参数出发,建立了相关色温与占空比的函数关系;栾新源等<sup>[14]</sup>利用改进人工鱼群算法优化了 LED 光通量配比。这些研究进一步深化了光生物效应在实际照明中的应用方法。

本文基于三通道分时 PWM(Pulse-width modulation)调光原理,提出一种照度、相关色温、节律因子的调光计算方法,用 PWM 调光方法控制三通道 LED 交替工作,并分别对照度、相关色温、节律因子在一个周期内积分再求平均来计算出有效照度、有效色温、有效节律因子,同时在实测的基础上对该计算方法进行有效性论证,为光生物效应的实际应用提供计算依据,同时也为兼顾视觉与非视觉效应的调光设计打下了基础。

## 2 调光理论与基础

### 2.1 分时 PWM 调光

PWM 调光是 LED 照明的优选调光方案,相比其他调光方法具有调节线性度好、调节精度高等特点<sup>[15-16]</sup>。PWM 调光通过控制脉宽来调节有效电流,从而控制 LED 灯亮度,通过控制混合光源的多通道比例来调节光源相关色温<sup>[17]</sup>。工程实践中一般不用考虑 PWM 调光过程中的色温漂移<sup>[18]</sup>,而相比通过混合 RGB 三基色进行色温调节,混合三通道白光在调节过程中将会有更小的色品漂移<sup>[19]</sup>。本文基于分时 PWM 调光原理实现三通道白光 LED 的协同工作,分时 PWM 调光原理如图 1 所示。脉宽分时原理是指用单片机控制三通道脉冲分时工作,在一个定时周期  $T$  内分别占用不同的脉宽,总脉宽有效周期小于或等于  $T$ (图 1 为有效周期等于  $T$  的情形),该方法也被称为时间混色原理<sup>[20]</sup>。分时 PWM 调光通过控制三通道脉宽比例来调节相关色温,而在保持三通道比例条件下通过控制整体有效脉宽来调节照度。

该方法相对普通 PWM 调光能够实现照度与色温的独立调节,并具有相对稳定的驱动电流等特点。

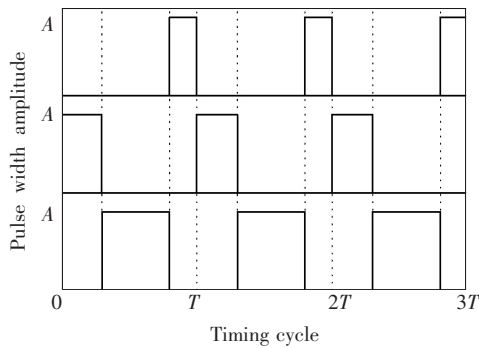


图 1 分时 PWM 调光原理图

Fig. 1 Principle of time-sharing PWM dimming method

## 2.2 照度、相关色温、节律因子有效计算

### 2.2.1 有效照度

照度用来衡量单位面积的光通量,多通道 PWM 调光下,光源有效辐射量为各通道辐射量与照射时间的加权和。而在上述分时 PWM 调光方式下,各通道分时工作,因而在时间上不具相关性。在一个周期  $T$  内,通道 1 的脉宽为  $t_1$ ,通道 2 的脉宽为  $t_2$ ,通道 3 的脉宽为  $t_3$ ,一个周期有效光通量可表示为:

$$\Phi_{\text{有效}} = \frac{\int_0^{t_1} \Phi_1 dt + \int_{t_1}^{t_1+t_2} \Phi_2 dt + \int_{t_1+t_2}^{t_1+t_2+t_3} \Phi_3 dt}{T} = \frac{t_1 \times \Phi_1 + t_2 \times \Phi_2 + t_3 \times \Phi_3}{T}, \quad (1)$$

即有效光通量与三通道脉宽比直接相关,而照度定义为单位面积的光通量,计算公式为:

$$E = \frac{d\Phi}{ds} = d\left(K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda\right) / d\lambda, \quad (2)$$

综合式(1)、(2)即可得有效照度与三通道比例因子的关系。当三通道脉宽之比为  $x:y:z$  时,有:

$$E_{\text{有效}} = x \times E_1 + y \times E_2 + z \times E_3, \quad (3)$$

### 2.2.2 有效色温

相关色温用来衡量光源辐射颜色温度,通常情况计算光源相关色温有直接内插法、三角形垂足法、逐次逼近法等<sup>[21]</sup>,通过相对光谱分布便可计算得色品坐标,从而确定光源相关色温。相关色温与相对光谱分布  $P(\lambda)'$  直接相关,可表示为  $K_{\text{CCT}}(P(\lambda)')$ ,当三通道绝对光谱分布分别为  $P(\lambda)_1, P(\lambda)_2, P(\lambda)_3$  时,一个周期内的有效绝

对光谱分布可表示为:

$$P(\lambda)_{\text{有效}} = \frac{\int_0^{t_1} P(\lambda)_1 dt + \int_{t_1}^{t_1+t_2} P(\lambda)_2 dt + \int_{t_1+t_2}^{t_1+t_2+t_3} P(\lambda)_3 dt}{T} = \frac{t_1 \times P(\lambda)_1 + t_2 \times P(\lambda)_2 + t_3 \times P(\lambda)_3}{T}, \quad (4)$$

当三通道 LED 光源的绝对光谱分布与相对光谱分布存在关系  $P(\lambda)_1 = \alpha P(\lambda)'_1, P(\lambda)_2 = \alpha \cdot P(\lambda)'_2, P(\lambda)_3 = \alpha P(\lambda)'_3$  时,有:

$$P(\lambda)_{\text{有效}}' = \frac{\mu P(\lambda)'_{\text{有效}} = \frac{P(\lambda)'_1 \times \alpha \times t_1 + P(\lambda)'_2 \times \beta \times t_2 + P(\lambda)'_3 \times \gamma \times t_3}{T}, \quad (5)$$

根据色温与相对光谱分布的关系,当三通道比例因子为  $x:y:z$  时,可得到关于有效色温 CCT 的调光计算式:

$$K_{\text{CCT有效}} = \frac{\alpha}{\mu} \times x \times K_{\text{CCT}_1} + \frac{\beta}{\mu} \times y \times K_{\text{CCT}_2} + \frac{\gamma}{\mu} \times z \times K_{\text{CCT}_3}. \quad (6)$$

### 2.2.3 有效节律因子

生物节律因子  $a_{\text{cv}}^{[8]}$  用来定量评价光照对人体产生的非视觉生物效应,计算公式为

$$a_{\text{cv}} = \frac{\int_{380}^{780} P(\lambda) C(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

其中  $P(\lambda)$  为光源的光谱功率分布,  $V(\lambda)$  为明视觉下的光谱响应曲线,  $C(\lambda)$  为非视觉光生物效应的光谱响应曲线。3 个脉宽分时工作,一个周期的有效节律因子可表示为:

$$a_{\text{cv有效}} = \frac{\int_0^{t_1} a_{\text{cv}_1} dt + \int_{t_1}^{t_1+t_2} a_{\text{cv}_2} dt + \int_{t_1+t_2}^{t_1+t_2+t_3} a_{\text{cv}_3} dt}{T} = \frac{a_{\text{cv}_1} \times t_1 + a_{\text{cv}_2} \times t_2 + a_{\text{cv}_3} \times t_3}{T}, \quad (8)$$

即混合光谱有效节律因子  $a_{\text{cv}}$  与三通道脉宽比正向相关,当三通道比例为  $x:y:z$  时,得到有效生物节律因子  $a_{\text{cv}}$  调光计算式:

$$a_{\text{cv有效}} = x \times a_{\text{cv}_1} + y \times a_{\text{cv}_2} + z \times a_{\text{cv}_3}. \quad (9)$$

## 3 实验对比与分析

光源的光谱能量分布是照明应用过程中的重

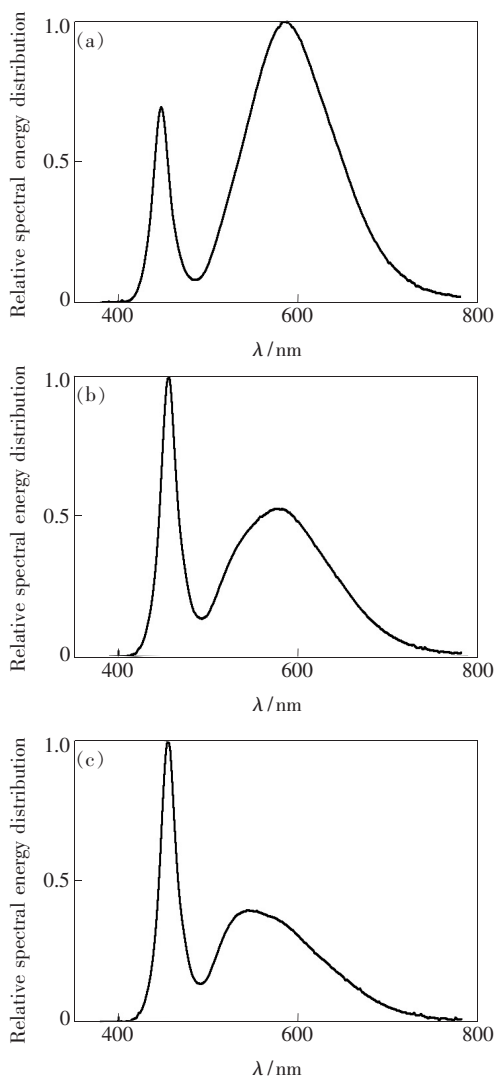


图 2 3 种色温 LED 灯相对光谱分布。(a)3 000 K; (b) 5 000 K; (c)7 000 K。

Fig. 2 Relative spectral distribution of three kinds of LED. (a)3 000 K. (b)5 000 K. (c)7 000 K.

要信息,它同时影响了照明的视觉效果和非视觉效应<sup>[22]</sup>,本文以光谱能量分布为基础,对光源照度、相关色温、节律因子进行测量与计算。实验选用 Ledesk 品牌 cdx 型号 3 种色温 LED 灯,3 种 LED 灯额定电压与额定电流相同,采用杭州远方光电信息公司的光谱彩色照度计 SPIC-200 进行光谱测量,测试时保持同一位置不变。3 种 LED 灯色温在 3 000,5 000,7 000 K 左右,测得光源相对光谱分布分别如图 2(a)、(b)、(c)所示,分别表示为  $P(\lambda)_1$ 、 $P(\lambda)_2$ 、 $P(\lambda)_3$ 。再采用分时 PWM 调光方式,以 1/10 PWM 周期等间隔改变三通道的脉宽比例  $x$ 、 $y$ 、 $z$ ,测得不同脉宽比例下混合光源的等效光谱分布、照度值与相关色温等参数信息。其中三通道 LED 在一个周期内分时复用,三通道有效脉宽占比之和为一个周期  $T$ ,当周期  $T$  量化成 1 个单位时有  $x + y + z = 1$ ,通过通道 1 和通道 2 即可确定第 3 个通道的占比。

### 3.1 照度计算

为了验证 2.2 节理论方法在实际调光中的准确性与实用性,接下来对实测混合光源的照度  $E$  与通道比例进行线性拟合,并与上述计算式进行对比与论证。先测量并计算三通道各比例因子下的混合光源照度  $E_{x,y,z}$ ,然后在混合光源样本照度中我们选取 3 条直线进行线性拟合,即通道  $X=0$ ,通道  $Y$  以 0.1 为步长从 0 到 1 连续变化;通道  $Y=0$ ,通道  $Z$  以 0.1 为步长从 0 到 1 连续变化;通道  $Z=0$ ,通道  $X$  以 0.1 为步长从 0 到 1 连续变化(缺省通道由前两通道比例决定)。测得数据如表 1 所示。

表 1 不同比例因子下的样本照度

Tab. 1 Illuminance samples under different scaling factor

| 序列 $N$ | 0     | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10    |
|--------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 两通道比   | 0/1   | 0.1/0.9 | 0.2/0.8 | 0.3/0.7 | 0.4/0.6 | 0.5/0.5 | 0.6/0.4 | 0.7/0.3 | 0.8/0.2 | 0.9/0.1 | 1/0   |
| $X=0$  | 117.2 | 116.7   | 115.3   | 114.6   | 112.7   | 112.5   | 111.9   | 110.1   | 109.2   | 108.5   | 107.6 |
| $Y=0$  | 87.1  | 91.1    | 93.8    | 95.6    | 98.5    | 102.3   | 105.7   | 107.9   | 110.8   | 113.9   | 117.2 |
| $Z=0$  | 107.6 | 106.2   | 103.5   | 102.1   | 99.4    | 97.3    | 94.9    | 92.7    | 91.5    | 88.7    | 87.1  |

通过线性拟合得到 3 条直线,如图 3 所示。

对应  $X=0$ ,  $E_1 = 116.6 - 0.91 \times N$ , 拟合度  $R^2 = 0.98$ ; 对应  $Y=0$ ,  $E_2 = 87.22 + 2.83 \times N$ , 拟合度  $R^2 = 0.97$ ; 对应  $Z=0$ ,  $E_3 = 106.4 - 1.95 \times N$ , 拟合度  $R^2 = 0.99$ 。

而通过调光计算式(3)得出的上述 3 条直线

可表示为:

$$E_{1\text{有效}} = x \times 107.6 + y \times 117.2 = 117.2 - 0.96 \times N, \quad (10)$$

$$E_{2\text{有效}} = y \times 117.2 + z \times 87.1 = 87.1 + 3.01 \times N, \quad (11)$$

$$E_{3\text{有效}} = z \times 87.1 + x \times 107.6 =$$

$$107.6 - 2.05 \times N, \quad (12)$$

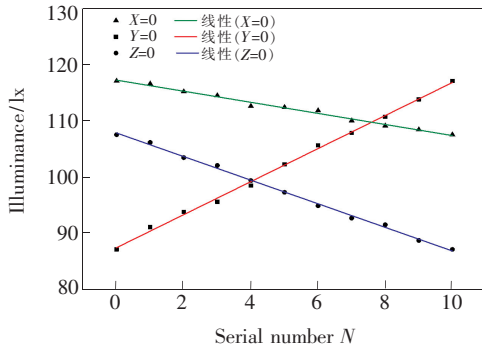


图 3 不同比例因子下样本的照度拟合直线

Fig. 3 Fitting lines of sample illuminance under different scaling factor

表 2 不同比例因子下的样本色温

Tab. 2 CCT samples under different scaling factor

| 序列 $N$ | 0     | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10    |
|--------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 两通道比   | 0/1   | 0.1/0.9 | 0.2/0.8 | 0.3/0.7 | 0.4/0.6 | 0.5/0.5 | 0.6/0.4 | 0.7/0.3 | 0.8/0.2 | 0.9/0.1 | 1/0   |
| $X=0$  | 6 927 | 6 728   | 6 513   | 6 341   | 6 110   | 5 931   | 5 741   | 5 525   | 5 374   | 5 159   | 5 030 |
| $Y=0$  | 3 332 | 3 569   | 3 893   | 4 168   | 4 507   | 4 858   | 5 250   | 5 651   | 6 056   | 6 509   | 6 927 |
| $Z=0$  | 5 030 | 4 845   | 4 671   | 4 448   | 4 258   | 4 110   | 3 905   | 3 758   | 3 664   | 3 561   | 3 332 |

通过线性拟合得到 3 条直线,如图 4 所示。

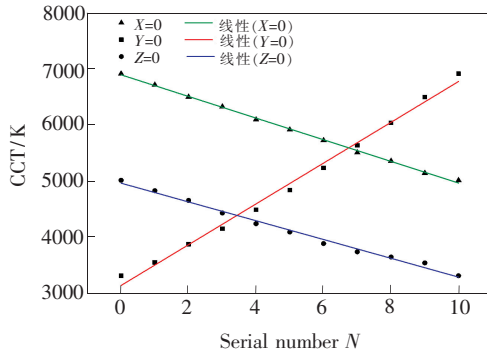


图 4 不同比例因子下样本的色温拟合直线

Fig. 4 Fitting lines of sample CCT under different scaling factor

对应  $X=0, T_1 = 6906.2 - 192.5 \times N$ , 拟合度  $R^2 = 0.99$ ;

对应  $Y=0, T_2 = 3159.7 + 362.9 \times N$ , 拟合度  $R^2 = 0.99$ ;

对应  $Z=0, T_3 = 4976 - 166.7 \times N$ , 拟合度  $R^2 = 0.99$ 。

而通过调光计算式(6)得出的上述 3 条直线可表示为:

$$T_{1有效} = x \times 5030 + y \times 6927 = 6927 - 189.7 \times N, \quad (13)$$

通过样本点拟合得到的直线与通过照度调光计算式得到的直线在斜率上的差异分别为 5%、6%、5%,截距差异均在 2% 以下,表明拟合得到的 3 条直线近似地可以用式(10)~(12)表示,即当某一通道比例确定的情况下,光源照度与其他任意一通道占比线性相关。由于三通道在时间上的相互独立性,可推导得光源照度与三通道比例因子  $x, y, z$  均呈一次相关,表明式(3)在实际调光应用中具有较高的准确性。

### 3.2 相关色温计算

测量并计算得三通道各比例因子下的混合光源色温  $T_{x,y,z}$ ,同样在混合光源样本色温中选取 3 条直线进行拟合,测量数据如表 2 所示:

$$T_{2有效} = y \times 6927 + z \times 3332 = 3332 + 359.5 \times N, \quad (14)$$

$$T_{3有效} = z \times 5030 + x \times 6927 = 5030 - 169.8 \times N. \quad (15)$$

通过样本点拟合得到的直线与通过有效色温调光计算式得到的直线在斜率上的差异分别为 2%、1%、2%,截距差异分别为 1%、5%、1%,表明拟合得到的 3 条直线近似地可以用式(13)~(15)表示,即当某一通道比例确定的情况下,光源相关色温与其他任意一个通道占比线性相关。由于三通道在时间上的相互独立性,可推导得到光源相关色温与三通道比例因子  $x, y, z$  均呈一次相关,表明式(6)在实际调光应用中具有较高的准确性。

### 3.3 节律因子 $a_{cv}$ 计算

测量并计算得三通道各比例因子下的混合光源节律因子 ( $a_{cv}$ ) $_{x,y,z}$ ,同样在混合光源样本色温中选取 3 条直线进行拟合,测量数据如表 3 所示。

通过线性拟合得到 3 条直线,如图 5 所示。

对应  $X=0, a_{cv1} = 0.8864 - 0.0167 \times N$ , 拟合度  $R^2 = 0.99$ ;

对应  $Y=0, a_{cv2} = 0.4275 + 0.0476 \times N$ , 拟合

表 3 不同比例因子下的样本节律因子

Tab.3  $a_{cv}$  samples under different scaling factor

| 序列 $N$ | 0       | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 两通道比   | 0/1     | 0.1/0.9 | 0.2/0.8 | 0.3/0.7 | 0.4/0.6 | 0.5/0.5 | 0.6/0.4 | 0.7/0.3 | 0.8/0.2 | 0.9/0.1 | 1/0     |
| $X=0$  | 0.885 5 | 0.873 7 | 0.856 2 | 0.833 2 | 0.815 6 | 0.802 9 | 0.787 0 | 0.768 4 | 0.754 0 | 0.735 8 | 0.722 3 |
| $Y=0$  | 0.413 6 | 0.465 8 | 0.493 2 | 0.550 3 | 0.610 5 | 0.656 4 | 0.723 4 | 0.768 7 | 0.800 6 | 0.851 6 | 0.885 5 |
| $Z=0$  | 0.722 3 | 0.694 9 | 0.669 1 | 0.636 3 | 0.603 9 | 0.573 8 | 0.535 0 | 0.518 2 | 0.488 5 | 0.454 4 | 0.413 6 |

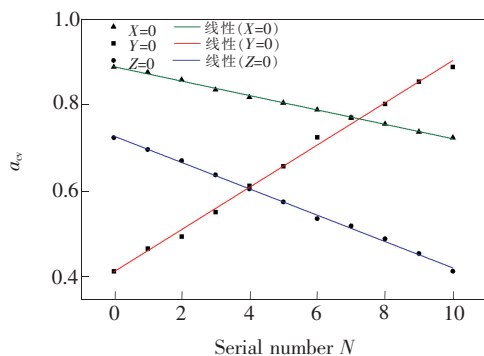


图 5 不同比例因子下样本的节律因子拟合直线

Fig. 5 Fitting lines of sample  $a_{cv}$  under different scaling factor

度  $R^2 = 0.99$ ;

对应  $Z=0, a_{cv3} = 0.726 - 0.0305 \times N$ , 拟合度  $R^2 = 0.99$ 。

而通过调光计算式(9)得出的上述 3 条直线可表示为:

$$a_{cv1 \text{有效}} = x \times 0.7233 + y \times 0.8855 = 0.8855 - 0.01632 \times N, \quad (16)$$

$$a_{cv2 \text{有效}} = y \times 0.8855 + z \times 0.4136 = 0.4136 + 0.04719 \times N, \quad (17)$$

$$a_{cv3 \text{有效}} = z \times 0.4136 + x \times 0.7223 = 0.7223 - 0.03087 \times N. \quad (18)$$

通过样本点拟合得到的 3 条直线与通过节律因子调光计算式得到的 3 条直线在斜率上的差异分别为 3%、1%、2%, 截距上差异分别为 1%、3%、1%, 表明拟合得到的 3 条直线近似地可以用式(16)~(18)表示, 即当某一通道比例确定的情况下, 节律因子与其他任意一个通道占比线性相关。由于三通道在时间上的相互独立性, 可推导得节律因子与三通道比例因子  $x, y, z$  均呈一次相关, 表明式(9)在实际调光应用中具有较高的准确性。

为了进一步证明其准确性, 接下来将验证通过调光计算式得出的节律因子与通过实测光谱数据计算出的节律因子两者之差的正态分布特性。先通过实际测量得到光源的光谱分布  $P(\lambda)_{x,y,z}$  与关系式(7)计算得到三通道在不同比例因子下的生物节律因子  $a_{cv}$ , 再通过  $a_{cv \text{有效}} = x \times a_{cv1} + y \times a_{cv2} + z \times a_{cv3}$  调光计算式计算出对应的节律因子  $a_{cv \text{有效}}$ , 其中  $x, y, z$  分别为三通道比例; 接下来随机选取其中 20 个样本点, 并检验两组样本点有无显著性差异, 通过  $\Delta a_{cv} = a_{cv \text{有效}} - a_{cv}$ , 得到数据如表 4 所示。

表 4  $\Delta a_{cv}$  随机样本

Tab.4 Random samples of  $\Delta a_{cv}$

| 序列 $N$                      | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $X/Y/Z(10^{-1})$            | 0/3/7   | 0/5/5   | 0/8/2   | 1/1/8   | 1/4/5   | 1/8/1   | 1/9/0   | 2/2/6   | 2/6/2   | 3/0/7   |
| $a_{cv \text{有效}}(10^{-4})$ | 5 551.7 | 6 495.5 | 7 911.2 | 4 916.6 | 6 332.3 | 8 219.9 | 8 691.8 | 5 697.2 | 7 584.8 | 5 062.1 |
| $a_{cv}(10^{-4})$           | 5 503   | 6 564   | 8 006   | 4 731   | 6 290   | 8 323   | 8 737   | 5 904   | 7 652   | 5 182   |
| $\Delta a_{cv}(10^{-4})$    | 48.7    | -68.5   | -94.8   | 185.6   | 42.3    | -103.1  | -45.2   | -206.8  | -67.2   | -119.9  |
| 序列 $N$                      | 11      | 12      | 13      | 14      | 15      | 16      | 17      | 18      | 19      | 20      |
| $X/Y/Z(10^{-1})$            | 3/3/4   | 3/7/0   | 4/2/4   | 4/5/1   | 5/1/4   | 5/4/1   | 6/2/2   | 7/0/3   | 8/1/1   | 9/0/1   |
| $a_{cv \text{有效}}(10^{-4})$ | 6 477.8 | 8 365.4 | 6 314.6 | 7 730.3 | 6 151.4 | 7 567.1 | 6 932   | 6 296.9 | 7 077.5 | 6 914.3 |
| $a_{cv}(10^{-4})$           | 6 415   | 8 332   | 6 365   | 7 699   | 5 891   | 7 607   | 6 991   | 6 363   | 6 946   | 6 949   |
| $\Delta a_{cv}(10^{-4})$    | 62.8    | 33.4    | -50.4   | 31.3    | 260.4   | -39.9   | -59     | -66.1   | 131.5   | -34.7   |

在显著性水平  $\alpha = 0.05$  下, 检验假设  $H_0: \mu = \mu_0 = 0; H_1: \mu \neq \mu_0 = 0$ , 通过计算得平均  $\Delta a_{cv} = -7.98$ , 最小方差无偏估计  $S^{*2} = 12\ 087.93$ ; 又有  $t_{1-\alpha/2}(n-1) = t_{0.975}(19) = 2.093$ , 因为  $|-7.98 - 0| \cdot \sqrt{\frac{12087.93}{20}} = 0.324\ 7 < 2.093$ , 故接受  $H_0$ , 表明两组  $a_{cv}$  并无明显差异, 通过节律因子调光计算式 (9) 能够得到有效的节律因子  $a_{cv}$ 。

本实验研究是在三通道 PWM 脉宽  $t_1 + t_2 + t_3 = T$  条件下开展论证的, 更为一般地, 当  $t_1 + t_2 + t_3 = \lambda T, 0 < \lambda < 1$  时, 可令  $\lambda T = T'$ , 即有  $t_1 + t_2 + t_3 = T'$ , 在此条件下式 (3)、(6)、(9) 依然成立。本实验得出的方法还可以在预设照度、相关色温、节律因子的条件下反过来计算三通道比例。通过测量工作面光源三通道独立工作时的光谱分布  $P(\lambda)_1, P(\lambda)_2, P(\lambda)_3$ , 即可得到对应照度分别为  $E_1, E_2, E_3$ , 相关色温分别为  $K_{CCT1}, K_{CCT2}, K_{CCT3}$ , 节律因子分别为  $a_{cv1}, a_{cv2}, a_{cv3}$ , 而  $\alpha, \beta, \gamma$  为三通道 LED 光源的绝对光谱分布与相对光谱分布的比例系数,  $\mu$  可通过  $\alpha, \beta, \gamma$  计算得出。在预设照度、相关色温、节律因子为  $E, K_{CCT}, a_{cv}$  情况下, 通过矩阵乘法关系:

$$\begin{bmatrix} E_1 & E_2 & E_3 \\ \frac{\alpha}{\mu} K_{CCT1} & \frac{\beta}{\mu} K_{CCT2} & \frac{\gamma}{\mu} K_{CCT3} \\ a_{cv1} & a_{cv2} & a_{cv3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ K_{CCT} \\ a_{cv} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

即可解得三通道比例因子。

## 参 考 文 献:

- [1] 王茜, 郝洛西, 曾莹. 健康光照环境的研究现状及应用展望 [J]. 照明工程学报, 2012, 23(3):12-17.  
WANG Q, HAO L X, ZENG K. Research progress and application prospect of healthy lighting [J]. *China Illuminat. Eng. J.*, 2012, 23(3):12-17. (in Chinese)
- [2] WOUT J M, VAN B. Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work [J]. *Appl. Ergonom.*, 2006, 37(4):461-466.
- [3] MCDUGAL D H, GAMLIN P D. The influence of intrinsically-photosensitive retinal ganglion cells on the spectral sensitivity and response dynamics of the human pupillary light reflex [J]. *Vision Res.*, 2010, 50(1):72-87.
- [4] BERSON D M, DUNN F A, TAKAO M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock [J]. *Science*, 2002, 295(5557):1070-1073.
- [5] 居家奇. 照明光生物效应的光谱响应数字化模型研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2011.  
JU J Q. *Research on Digitalized Model of Spectral Response for Biological Effects of Lighting* [D]. Shanghai: Fudan University, 2011. (in Chinese)
- [6] REA M S, FIGUEIRO M G, BULLOUGH J D. Circadian photobiology: an emerging framework for lighting practice and research [J]. *Light. Res. Technol.*, 2002, 34(3):177-187.
- [7] 姚其, 居家奇, 程雯婷, 等. 不同光源的人体视觉及非视觉生物效应的探讨 [J]. 照明工程学报, 2008, 19(2):14-19.

## 4 结 论

考虑到光生物效应的重要性及复杂性, 提出一种生物节律因子的调光计算方法。给定三通道 LED 工作在额定条件下的光谱分布就能够快速计算得到任意比例下混合光源的照度、相关色温、节律因子, 也可以根据目标照度、相关色温、节律因子与各单通道照度、相关色温、节律因子的矩阵关系求得三通道比例因子。通过实验可知, 混合光源的照度、相关色温、节律因子与各单通道脉宽比均呈线性关系。对比通过快速计算式得出的与通过实际测量得出的混合光源样本拟合直线, 照度、相关色温与节律因子的直线斜率差异分别在 6%、2%、3% 以下, 截距差异分别在 2%、5%、3% 以下。同时对通过快速计算式得出的节律因子与通过实际测量得出的节律因子差值做正态分布显著性检验, 发现两组节律因子并无显著性差异, 表明调光计算方法能有效地计算出节律因子。需要指出的是, 本文所采用 LED 光源为同类型光源, 不同色温 LED 灯之间辐射强度差异不大, 因而色温关系模型中  $\alpha/\mu, \beta/\mu, \gamma/\mu$  近似为 1, 当混合光源为辐射强度差异较大 LED 时, 需要根据实际情况计算出  $\alpha/\mu, \beta/\mu, \gamma/\mu$ 。本文提出的调光计算方法准确性较高且大大地简化了混合光源照度、相关色温与生物节律因子的计算, 有利于兼顾视觉与非视觉生物效应的调光技术应用, 如何将光生物效应研究成果更加便捷、合理、全面、有效地应用到实际照明工程中还需要更加广泛与深入的研究。

- YAO Q, JU J Q, CHENG W T, *et al.*. Discussion on the visual and non-visual biological effect of different light sources [J]. *China Illuminat. Eng. J.*, 2008, 19(2):14-19. (in Chinese)
- [ 8 ] GALL D, BIESKE K. Definition and measurement of circadian radiometric quantities [C]. *Proceedings of The CIE Symposium 2004 on Light and Health Health: Non-Visual Effects. Ilmenau: Technical University of Ilmenau*, 2004:129-132.
- [ 9 ] ALADOV A V, ZAKGEIM A L, MIZEROV M N, *et al.*. Concerning biological equivalent of radiation of light-emitting diode and lamp light sources with correlated colour temperature of 1 800 K – 10 000 K [J]. *Light Engi.*, 2012, 20(3):9.
- [ 10 ] REA M S, FIGUEIRO M G, BULLOUGH J D, *et al.*. A model of phototransduction by the human circadian system [J]. *Brain Res. Rev.*, 2005, 50(2):213-228.
- [ 11 ] 周晓明, 刘丹丹. 不同年龄群体的光生物效应评价方式 [J]. *发光学报*, 2017, 38(6):721-728.  
ZHOU X M, LIU D D. Valuation of photobiological effects in different age groups [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(6):721-728. (in Chinese)
- [ 12 ] 郑莉莉, 郭自泉, 严威, 等. 三基色白光 LED 的司辰节律因子研究 [J]. *发光学报*, 2016, 37(11):1384-1389.  
ZHENG L L, GUO Z Q, YAN W, *et al.*. Investigation on the circadian action factor of RGB white LEDs [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(11):1384-1389. (in Chinese)
- [ 13 ] 宋鹏程, 文尚胜, 尚俊, 等. 基于 PWM 的三基色 LED 的调光调色方法 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2):285-292.  
SONG P C, WEN S S, SHANG J, *et al.*. A dimming method for RGB LED based on three channels PWM [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2015, 35(2):285-292. (in Chinese)
- [ 14 ] 栾新源, 刘廷章, 周壮丽. 基于改进人工鱼群算法的 LED 混光方法 [J]. *发光学报*, 2015, 36(1):113-120.  
LUAN X Y, LIU T Z, ZHOU Z L. LED color mixing design based on improved artificial fish swarm algorithm [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1):113-120. (in Chinese)
- [ 15 ] 田立东, 周继军, 秦会斌. PWM 调光 LED 驱动器设计 [J]. *机电工程*, 2012, 29(4):465-468.  
TIAN L D, ZHOU J J, QIN H B. Design of PWM dimming LED driver [J]. *Mechan. Electric. Eng.*, 2012, 29(4):465-468. (in Chinese)
- [ 16 ] 王元庆. 脉宽调制亮度调节方式下冷阴极荧光灯性能的实验研究 [J]. *发光学报*, 2004, 25(4):455-459.  
WANG Y Q. Experimental research on the feature of CCFL with PWM dimming [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2004, 25(4):455-459. (in Chinese)
- [ 17 ] 周锦荣. 功率型白光 LED 的非线性混合调光方法 [J]. *发光学报*, 2017, 38(9):1249-1255.  
ZHOU J R. Nonlinear mixed-dimming method for power while LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(9):1249-1255. (in Chinese)
- [ 18 ] BECZKOWSKI, SZYMOM, STIG M N. LED spectral and power characteristics under hybrid PWM/AM dimming strategy [C]. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Atlanta, Georgia, USA*, 2010:731-735.
- [ 19 ] DYBLE M, NARENDRAN N, BIERMAN A, *et al.*. Impact of dimming white LEDs: chromaticity shifts due to different dimming methods [C]. *Optics & Photonics 2005, International Society for Optics and Photonics, San Diego, USA*, 2005: 59411H-1-9.
- [ 20 ] 李楠, 潘永雄, 苏成悦, 等. 基于时间混色方式的冷暖双 LED 调光调色光源 [J]. *广东工业大学学报*, 2016, 33(1):77-82.  
LI N, PAN Y X, SU C Y, *et al.*. A dimming lighting based on cold and warm white LEDs in time hybrid color mode [J]. *J. Guangdong Univ. Technol.*, 2016, 33(1):77-82. (in Chinese)
- [ 21 ] 代彩红, 于家琳. 光源相关色温计算方法的讨论 [J]. *计量学报*, 2000, 21(3):183-188.  
DAI C H, YU J L. Discussion on calculation method of color temperature correlation [J]. *Acta Metrologic. Sinica*, 2000, 21(3):183-188. (in Chinese)
- [ 22 ] ÁMUNDADÓTTIR M L, LOCKLEY S W, ANDERSEN M. Unified framework to evaluate non-visual spectral effectiveness of light for human health [J]. *Lighting Res. Technol.*, 2016, 49(6):1477153516655844.



周晓明(1963 -),男,湖南衡阳人,博士,教授,2004年于华南理工大学获得博士学位,主要从事物理场生物效应,LED健康照明的研究。

E-mail: zhouxm@scut.edu.cn