

文章编号 1004-924X(2015)04-0926-08

## 多主色 LED 照明光源的相关色温调控

郑 峰<sup>1</sup>, 刘丽莹<sup>1</sup>, 刘小溪<sup>2</sup>, 石晓光<sup>1</sup>, 宦克为<sup>1\*</sup>

(1. 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022; 2. 吉林省科学技术信息研究所, 吉林 长春 130000)

**摘要:**通过建立光电热(PET)模型,研究了发光二极管(LED)光源相关色温(CCT)的模型预测控制方法,实现了多主色 LED 光源的相关色温控制。首先,提出了热平衡状态稳定假设和修正的非对称高斯函数作为基函数的假设;根据软模型建模思路,用最小二乘估计求解各个模型参量的回归子模型,分析光谱敏感系数曲线随 CCT 变化的关系。然后,通过重力线法调试出在 3 000, 4 500 和 6 500 K 下 3 个常用色温点处所需的电流控制量。最后,在调设好的电流控制量上加以一定的无规则扰动产生一组验证数据,用于评价模型精度。实验结果表明:建立的多主色 LED 光源的 PET 数学模型能够很好地通过电流控制量和环境温度来预测 LED 的热沉温度和主色合成光谱功率分布函数,进而能够预测控制色温,具有很好的模型精度。得到的色度坐标预测精度优于 $\pm 0.005$ , CCT 预测精度优于 $\pm 150$  K。提出的基于模型的控制方法不仅适用于常用 LED 光源的 CCT 调控,还可推广到更多通道的 LED 光源的色度及 CCT 控制中。

**关键词:**照明光源;多主色发光二极管;相关色温;光电热模型

**中图分类号:** TN312.8; TM923.34 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.0926

## Control of correlated color temperature for multi-primary color LED illumination

ZHENG Feng<sup>1</sup>, LIU Li-ying<sup>1</sup>, LIU Xiao-xi<sup>2</sup>, SHI Xiao-guang<sup>1</sup>, HUAN Ke-wei<sup>1\*</sup>

(1. College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;  
2. Institute of Scientific and Technical Information in Jilin Province, Changchun 130000, China)

\* Corresponding author, E-mail: huankewei@126.com

**Abstract:** Based on the established photo-electro-thermal (PET) model, a model predictive control method of Correlated Color Temperature(CCT) for a Light Emission Diode(LED) was investigated to realize the CCT control of multi-primary color LEDs. The Guassian distribution hypothesis and the thermal equilibrium variable relationship stability hypothesis were presented. The regression sub-models of different model parameters were calculated by least square estimation method successively according to the strategy of soft model. The change trend of spectral sensitive coefficient curves with different CCT curves was analyzed. Then, current control parameter values of 3 typical CCTs at 3 000, 4 500 and 6 500 K were fixed by the gravity line adjusted method. Finally, a set of spectral power distribution curves were obtained by bringing a certainty random variation to the fixed current control parameter values to validate and evaluate the accuracy of the PET model. Experimental results

**收稿日期:** 2014-08-19; **修订日期:** 2014-09-30.

**基金项目:** 2014 年度国家公益性行业(气象)科研专项资助项目(No. GYHY201406037); 2011 年高等学校博士学科点专项科研基金联合资助项目(No. 20112216110006); 吉林省自然科学基金资助项目(No. 201215144)

indicate that the PET model predicts accurately the heat sink temperature and the Spectral Power Density (SPD) of the LED by control of the currents and environment temperatures, the accuracy of predictive chromatic coordinate value is better than  $\pm 0.005$ , and the accuracy of predictive CCT is better than  $\pm 150$  K. The model-based control method has good accuracy for CCT control and can be generalized to the multi-primary color LED illumination with more primary color channels.

**Key words:** illumination source; multi-primary color Light Emission Diode (LED); correlated color temperature; photo-electro-thermal model

## 1 引言

发光二极管 (Light-Emitting Diodes, LED) 技术是未来照明技术中最有前景的技术之一。作为新一代光源,LED 除了高效节能外,其最重要的意义是控制颜色。通过控制 LED 光源的颜色可在景观、陈列、投影、显示等方面丰富它的颜色信息,为专用光源提供了更好的色度及光谱功率分布调谐特性<sup>[1-5]</sup>,在室内照明时,LED 还具有颜色生理及颜色心理方面的调控功能<sup>[6-7]</sup>。LED 技术的迅速发展使得颜色特性在照明要素中占有越来越显著的地位和作用。作为光源的色貌指标,相关色温 (Correlated Color Temperature, CCT) 调控在照明和显示领域的应用日益增多,各种国际照明标准中的相关要求越来越精准,CCT 的控制方法也越来越多<sup>[8-12]</sup>。LED 发光过程是半导体元件中典型的光电热 (Photo-Electro-Thermal, PET) 耦合过程。由于温度实际上是微观粒子运动的宏观统计量,LED 的光电过程必然与热有关。当电子带间跃迁时,半导体材料中电子空穴对的辐射复合与俄歇复合相互竞争,电子状态密度越高,声子散射主导的俄歇复合参与也就越多,因此,热效应对 LED 的光色特性有着很重要的影响。

由于 PET 模型是 LED 的 CCT 控制的关键,本文基于电流控制参数、环境温度和 LED 光谱功率分布之间的关系模型建立了 LED 的 PET 模型。该模型直接面向 LED 光色特性预测和控制的工程应用,在此模型的基础上可实现多主色 LED 在不同 CCT 之间的准确调节控制。

## 2 LED 色温的预测控制方法及原理

### 2.1 LED 的光谱功率分布函数

LED 光谱功率分布 (Spectral Power Distri-

bution, SPD) 的描述形式来自于半导体能带理论,取决于导带的电子分布和价带的空穴分布,可以表述为:

$$E_{\text{ph}} = E_e - E_h = E_g + E_k, \quad (1)$$

其中:  $E_{\text{ph}}$  是光辐射能量,  $E_e$  是电子能量,  $E_h$  是空穴能量,  $E_g$  是带隙能量,  $E_k$  是电子空穴对的平均动能。一般来讲,符合玻尔兹曼分布的电子和空穴的平均动能为  $kT$ , 通常  $kT \ll E_g$ 。LED 的 SPD 具有一个依赖于半导体材料带隙能量的峰值波长  $\lambda_{\text{peak}}$ 。SPD 曲线的轮廓线型依赖于电子空穴对的状态密度分布函数。在半导体材料中,各种散射最终致使 SPD 展宽而使得曲线具有一定的宽度,通常用半功率点的宽度来表示,称为线宽或半峰全宽 (Full Width Half Maximum, FWHM)。实验上,LED 的 SPD 能够较好地进行了高斯函数拟合,所以常用高斯函数模型进行 SPD 模拟仿真。通过高斯函数模拟的 SPD 函数可以表示为:

$$S(\lambda) = A \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda - \lambda_{\text{peak}}}{\sigma}\right)^2\right), \quad (2)$$

$$\text{FWHM} = 2\sigma \sqrt{\ln(4)}. \quad (3)$$

其中:  $\lambda$  为波长,  $S(\lambda)$  是对应波长下的光辐射功率,  $A$  是功率函数幅度,  $\lambda_{\text{peak}}$  为峰值波长,  $\sigma$  是线宽因子。

实际上 LED 的 SPD 受到电子和空穴状态密度差异的影响会呈现出一定程度的非对称性,所以用非对称修正高斯函数可以更好地拟合 LED 的 SPD 曲线,其表达形式为:

$$S(\lambda) = A \cdot \exp\left(-\frac{4\ln(2)(\lambda - \lambda_{\text{peak}})^2}{\left[\sigma + \tau(\lambda_{\text{peak}} - \lambda)\right]^2}\right), \quad (4)$$

$$\text{FWHM} = \sigma \left[ \frac{1}{2 + \tau} + \frac{1}{2 - \tau} \right], \quad (5)$$

其中:  $|\tau| < 2$ , 是非对称系数。

对于掺荧光粉的 LED, 荧光粉辐射的 SPD 分布与半导体发光机理相似, SPD 曲线的轮廓形状

取决于荧光物质中电子的基态密度分布和激发态密度分布。因此,LED 的荧光粉辐射 SPD 曲线也可以由修正的非对称高斯函数来近似。

## 2.2 CCT 计算模型

首先需要对光源的辐射光谱进行色度计算。图 1 给出了 CIE1960 UCS 色度坐标系中对 CCT 定义的色温域及等色温线。图 2 给出了 ANSI 标准中对 LED 光源的色温规格的要求。

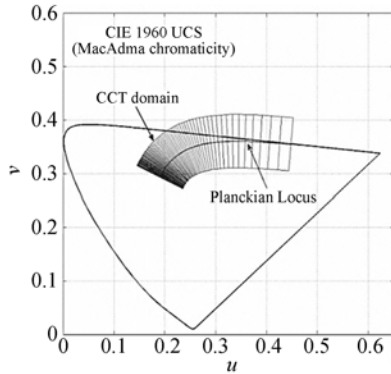


图 1 CIE1960 中的色温域

Fig.1 CCT domain in CIE 1960

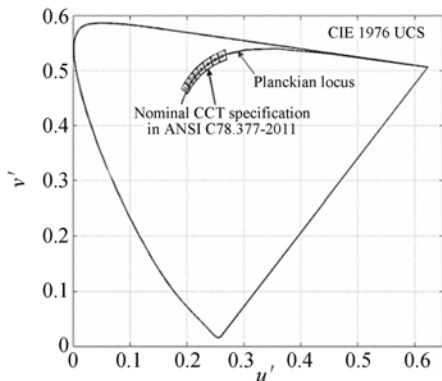


图 2 CIE1976 中的色温规范

Fig.2 CCT standard in CIE 1976

色度计算公式如下:

$$X = k \sum_{\lambda} \bar{x}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda, \quad (6)$$

$$Y = k \sum_{\lambda} \bar{y}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda, \quad (7)$$

$$Z = k \sum_{\lambda} \bar{z}(\lambda) S(\lambda) \Delta\lambda, \quad (8)$$

$$u = u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z}, \quad (9)$$

$$v = \frac{2}{3} v' = \frac{6Y}{X+15Y+3Z}, \quad (10)$$

其中: $k$ 是亮度归一因子, $S(\lambda)$ 是辐射光谱, $\bar{x}(\lambda)$ , $\bar{y}(\lambda)$ , $\bar{z}(\lambda)$ 是 CIE 规定标准人眼的颜色匹配函

数, $\Delta\lambda$ 是光谱数据的波长间隔。 $X, Y, Z$ 被称为颜色的三色刺激值, $u, v$ 是 CIE 的 1960 色度坐标, $u', v'$ 是 CIE 的 1976 色度坐标。由式(11)给出 CCT 的有效范围  $\Delta C$ ,从图 2 可以看出,色温的有效区域是由长度为 0.1 的等色温线段沿着普朗克轨迹覆盖形成的带状区域。

$$\Delta C = [(u_i - u_p)^2 + (v_i - v_p)^2]^{0.5} = 0.05. \quad (11)$$

1960 UCS 虽已被废除,但该系统仍能用于计算 CCT。通常的做法是将  $u, v$  仅作为计算过程值,相关的计算结果都需要变换到现行的 1976 UCS 中显示。

## 2.3 多主色 LED 电热模型的建模方法

本文对于 LED 的 PET 模型的建模是在机理模型基础上通过数据驱动形式建立的半经验模型,即通过实验数据建立公式(4)中待定参数与电流控制量及热沉温度之间的函数关系。模型由式(12)表述,它用于描述控制量,参变量和预测量之间的关系,模型形式由函数集构成。

$$O(I, T, SPD) = \{F\}. \quad (12)$$

设自变量数据为  $X_{iv}$ , 因变量数据为  $Y_{rv}$ , 然后经数据推理可得到数学模型(特定函数形式  $f$  将二者联系起来):

$$y = f(x, \theta, \epsilon), (y \in Y_{rv}, x \in X_{iv}, \theta \in \Theta), \quad (13)$$

其中: $\Theta$ 是模型参数值的集合; $\theta$ 是在经验数据风险最低(Empirical Risk Minimization, ERM)原则下,在  $\Theta$  集中选取的最优值,即对模型的求解。ERM 通常采用最小二乘原则,表示如下:

$$\min \| F(x, \theta) - y \|_{\frac{2}{2}} = \min \sum_i (F(x_i, \theta) - y_i)^2. \quad (14)$$

模型的基本假设为热平衡关系稳定,当系统中所有控制参量确定时,光学和热学状态一定。因此,将 LED 的 PET 模型分为光电和热电两个独立的子模型,即 LED 的温度和 SPD 均只由输入控制量来决定。

## 3 实验与建模

### 3.1 建模实验设备

实验选用的 LED 芯片为 GREE 公司的 RG-BW 多彩 LED(MCE4CT-A2-0000-00A5AA AA1), 光源模块结构如图 3 所示。该芯片将 R,G,B 和 W 这 4 种 LED 芯片紧密排列后统一封装,由 4 个通道独立进行控制,电控模块部分采用 8 位脉冲宽度

调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制每个通道,再通过 DMX512 通信协议由电脑软件进行调控。软件采用专业灯光控制软件 Free Styler。LED 的 SPD 采用 EKO 公司的光谱辐射计 MS700 进行采集,数据谱段为 360~830 nm(1 nm 采样间隔)。LED 光源结构如图 3 所示,通过两路温度传感器(数字温度传感器 18b20)分别监测 LED 光源模块的热沉温度和周围环境中空气的温度。

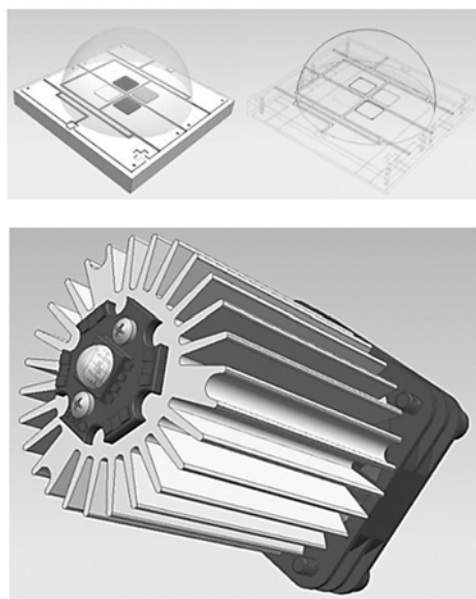


图 3 四主色 LED 光源芯片结构图

Fig. 3 Structure of LED chip with 4 primary colors

4 种 LED 芯片被封装在一起,结构上非常紧密,实际上每个芯片的发热都会影响到其它芯片,因此芯片的温度是由 4 路芯片共同功耗发热贡献的结果。芯片热量由封装底部扩散,经由铝基印刷电路板(PCB),再到铝型材散热器表面与风扇吹入的空气交换进行散热。由于采用热平衡关系稳定假设,所以每次调节 LED 驱动电流状态都稳定 5 min 之后再行数据测试记录。

### 3.2 LED 的温度模型

根据软模型建模思路,首先假设电热模型为线性结构,形式如下:

$$X_{et} = \{x_i\} = \{1, t_s, I_B, I_W, I_G, I_R\}, \quad (15)$$

$$C_t = \{c_i\} = \{c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\}, \quad (16)$$

$$t = X_{et} C_t^T = \sum_{i=0}^5 c_i \cdot x_i, \quad (17)$$

其中:  $t$  是 LED 的热沉温度,  $t_s$  是环境周围的空气温度,  $I_B, I_W, I_G, I_R$  分别为 B, W, G, R 4 个通道的电流调控量。实验数据测试方案见表 1。

表 1 建模实验数据的测试方案

Tab. 1 Scheme of modeling data measurement

组序	B	W	G	R	备注
1	1	0	0	0	
2	0	0	1	0	
3	0	0	0	1	
4	0	1	0	0	12 组调控测试, 每组
5	1	0	1	0	I 以 10 为步进单位
6	1	0	0	1	递增调控, 由 5 增至
7	0	0	1	1	255, 每组 26 个数据
8	0	1	0	1	测试点。测试记录
9	1	0	1	1	温度和 SPD。
10	1	1	0	1	
11	0	1	1	1	
12	1	1	1	1	

根据最小二乘法, LED 电热模型的求解结果如图 4 所示。通过确定系数(R-square)和均方根(RMSE)的值可以看出模型与数据间高度吻合, 模型的可信度非常高。

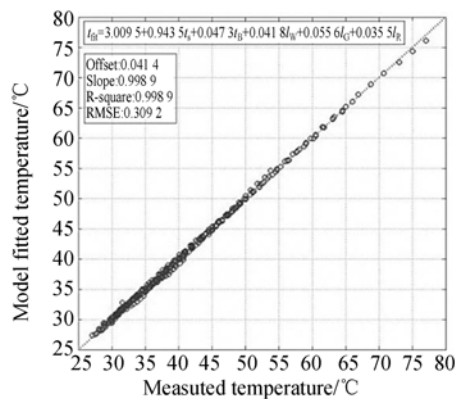


图 4 模型拟合温度与实测温度

Fig. 4 Fitted temperature vs. measured temperature

### 3.3 LED 的 SPD 模型

LED 的 SPD 是由 4 个通道合成的, 根据公式(4)分别建立子 SPD 模型对应 4 个通道, 然后合成可得:

$$\mathcal{P} = \{P_{jk}\} = \begin{Bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{41} & \cdots & P_{45} \end{Bmatrix}, \quad (18)$$

其中:  $j = \{1, 2, 3, 4\}$ , 对应  $\{A, \lambda_{peak}, \sigma, \tau\}$ ;  $k = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ , 对应  $\{B, W_1, W_2, G, R\}$ 。

$$S_k(\lambda, P_{jk}) = P_{1k} \cdot \exp\left(-\frac{4 \ln(2)(\lambda - P_{2k})^2}{[P_{3k} + P_{4k}(P_{2k} - \lambda)]^2}\right), \quad (19)$$

$$S_{LED} = \sum_k S_k(\lambda, P_{jk}), \quad (20)$$

式中:  $S_k(\lambda, P_{jk})$  表示第  $k$  个通道的 SPD 函数。由于 W 通道是蓝光激发荧光粉, 所以是双峰结构的 SPD, 需要细分为  $W_1$  和  $W_2$  通道。因此, SPD 模型是由 5 个非对称高斯函数构成的非线性模型, 每个函数有 4 个参量(参量用  $j$  表示)。假设每个通道的 SPD 只与本通道的控制量和热沉温度有关, 所以解释变量应该由  $t$  和  $I$  构成。高斯分布假设是硬模型建模思路的基础, 而参量与解释变量之间的关系并不明确, 需要通过软模型建模思路去求解 20 个待定参量  $P_{jk}$ , 模型表述如下:

$$\mathbf{X}_{es} = \{x_i\} = \{1, t, I_k, tI_k, t^2, I_k^2\}, \quad (21)$$

$$\mathbf{C}_{jk} = \{c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\}_{jk}, \quad (22)$$

$$\mathbf{P}_{jk} = \mathbf{X}_{es} \mathbf{C}_{jk}^T = \left\{ \sum_{i=0}^{i=5} c_i \cdot x_i \right\}_{jk}. \quad (23)$$

按照表 1 测试的 SPD 曲线如图 5 所示。12 组调控测试, 每组 26 次递增调节, 共计 312 条 SPD 曲线。

同样根据最小二乘求解方法, 每个通道按照

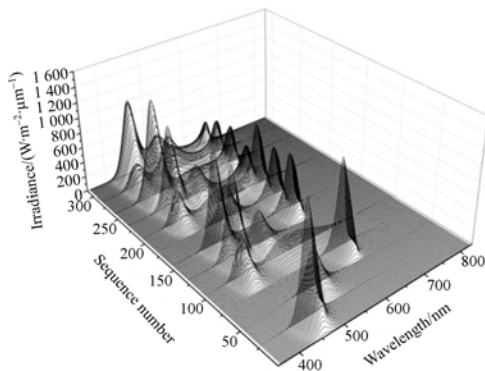
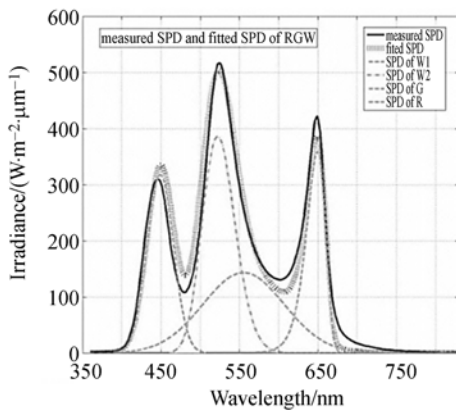
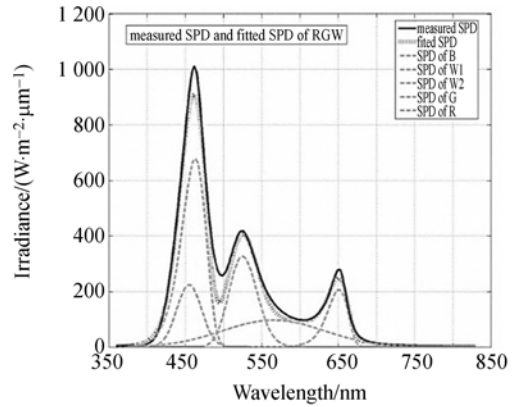


图 5 测试的 LED 的 SPD 曲线  
Fig. 5 Measured SPD curves of LED



(a) RGW 拟合的 SPD 曲线  
(a) Fitted SPD curves by RGW



(b) RGBW 拟合的 SPD 曲线  
(b) Fitted SPD curves by RGBW

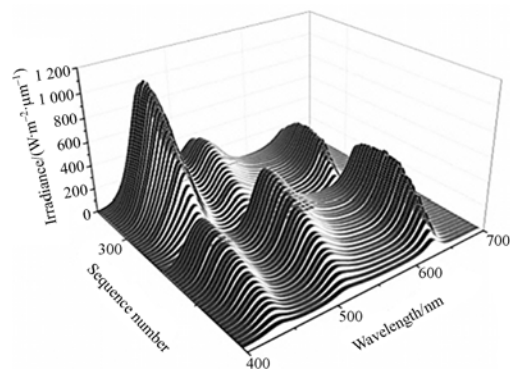
图 6 LED 的多主色 SPD 曲线拟合效果

Fig. 6 Fitted SPD curves of multi-primary color LED

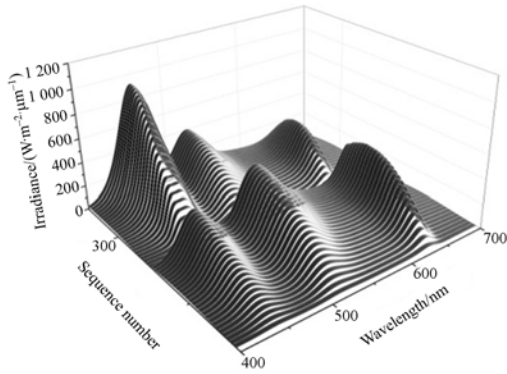
表 1 列出的数据进行建模。图 6(a) 和 6(b) 分别为 RGW 和 RGBW 组合的 SPD 曲线建模拟合效果。

从图 6(a) 和 6(b) 中可以看出, SPD 曲线的峰谷依然有一定的差别, 这主要是因为高斯分布假设本身是一种统计近似假设, 高斯函数不能够完美逼近实际的钟形分布数据。此外, 求解采用的最小二乘法也有一定的局限, 该方法是一种无偏估计, 即拟合均值为零, 所以会伴随产生 SPD 曲线峰值的欠拟合和谷值过拟合。但总体来讲, SPD 模型对数据的解释效果很好, 拟合的 SPD 曲线与测试 SPD 数据基本上一致。

图 7(a) 给出了 RGW 和 RGBW 的调控 SPD 测试数据曲线, 图 7(b) 给出了由 SPD 模型计算的预测数据曲线。



(a) RGB 和 RGBW 组合测试的 SPD 曲线  
(a) Measured SPD curves by RGB and RGBW



(b) RGB 和 RGBW 组合根据模型计算的 SPD 曲线  
 (b) Model fitted SPD curves by RGB and RGBW  
 图 7 测试及模型计算的 LED 的 SPD 曲线  
 Fig. 7 Measured and model fitted SPD of LED

由于 SPD 模型中的 20 个模型参数均是二次非线性形式的逼近函数,所以 SPD 模型的计算数据反映出的变化趋势是连续光顺的。从图中可以看出,谱峰强度随电流增大到一定程度后开始衰减,R 通道的谱峰衰减比其他通道更为显著。SPD 模型能够很好地预测电流增大后热效应导致的强度衰减趋势。

3.4 CCT 调控

根据混色理论,多主色 LED 的色度是由独立主色色度坐标所张成的色域空间,按照重力线法进行调整。图 8 给出了 RGBW 4 个通道的独立主色色度坐标点  $\{P_{tR}, P_{tG}, P_{tB}, P_{tW}\}$  (独立通道电流调控量设置为  $I_k=255$  时),还给出了 2 个三角形几何中心的色度坐标点  $\{P_{tRGB}, P_{tRGW}\}$ 。

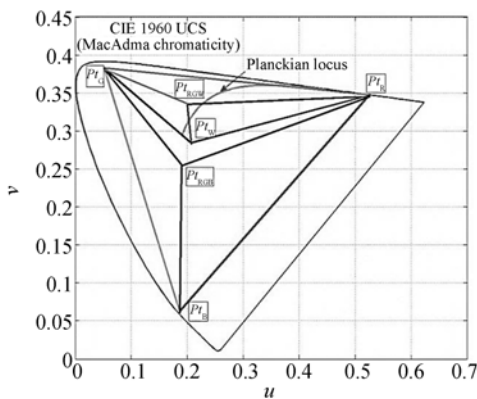


图 8 RGBW LED 的色域及重力线  
 Fig. 8 Color gamut and gravity lines of RGBW LED

由图可以看出,  $P_{tRGB}$  的点距离普朗克轨迹略远,这是由于热效应致使 R 通道的光辐射强度的

衰减程度显著比 B 和 G 通道大,所以该点的坐标显著向  $P_{tG}$  和  $P_{tB}$  方向偏移。CCT 的控制至少需要 3 个主色通道,对于 4 通道主色 LED 可通过 RGBW,RGB 和 RGW 的调控实现,存在一定的冗余控制能力。B 与 W 通道中的蓝色成分谱线调控作用冗余,所以本文采用 RGW 三主色进行 CCT 调控。根据色域和亮度理论,LED 色度坐标的调整和移动必然会在一定程度上牺牲亮度。所以调整策略是将  $P_{tRGW}$  作为初始点(该点为 RGW 通道电流控制量均为 255 时的色度坐标点),逐渐减小电流调控量  $I$ ,使其沿着重心线移动,直至逼近目标 CCT 点的色度坐标为止。

根据重力线原理,可以利用 SPD 模型计算出对应 CCT 值下最优 SPD 所需的调控量 ( $I_k$ )。但由于 SPD 模型在主色峰值波长处的残差正是色温敏感系数曲线的最强位置,所以 SPD 模型的拟合误差变换到 CCT 后并不能满足标准要求,需要再次修正 SPD 模型。在此仅需修正影响最大的主色高斯峰的幅值参量,即对 SPD 模型中的  $P_{1k}$  参量增加一个修正因子  $m_{1k}$ 。增加的峰强修正因子应该是 CCT 的函数,修正公式为:

$$P'_{1k} = P_{1k} + m_k(CCT) \{k=W, G, R\}, \quad (24)$$

$$m_{1k}(CCT) = \left\{ \sum_{i=0}^{i=2} c_i \cdot CCT^i \right\}_k. \quad (25)$$

修正因子  $m_{1k}$  需要根据实验测定,在 SPD 计算出的调控量 ( $I_k$ ) 的基础上,同样依据重力线法可测定  $m_{1k}$ ,使得 SPD 修正模型所计算的 CCT 值与光谱辐射计测试的 SPD 所计算的 CCT 值之间的偏差足够小。下面给出暖白 (3 000 K)、正白 (4 500 K) 和冷白 (6 500 K) 3 个 CCT 进行参数调控后的结果,调控量  $I_k$  和模型修正因子  $m_{1k}$  如表 2 所示。

表 2 CCT 调控量及模型修正因子

Tab. 2 Control parameters for CCT and modified factor

CCT/K	$I_W$	$m_{1W}$	$I_G$	$m_{1G}$	$I_R$	$m_{1R}$
3 000	51	-10	123	-20	255	35
4 500	160	-35	134	10	255	55
6 500	255	0	71	0	60	-10

为了进一步验证模型精度,在表 2 中给出的 CCT 调控参量的基础上施加一定的无规则扰动,生成一组数据,SPD 曲线如图 9 所示。将该组数据所计算的色度坐标和测试的色度坐标进行对比,结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出,模型

预测的色度坐标与实测数据的色度坐标偏差很小,并且都落在标准要求的容差四边形中。图 11 给出了数据点色度坐标的偏差情况, $u'$ 和 $v'$ 均优于 $\pm 0.005$ ,CCT 优于 $\pm 150$  K,完全满足多主色 LED 的相关色温调控要求。

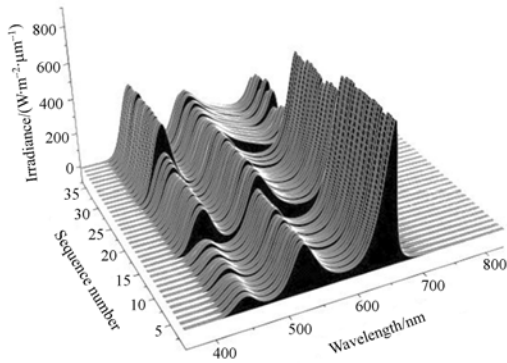


图 9 电流调控参量及测试的 SPD 曲线

Fig. 9 Measured SPD curves and current control parameters

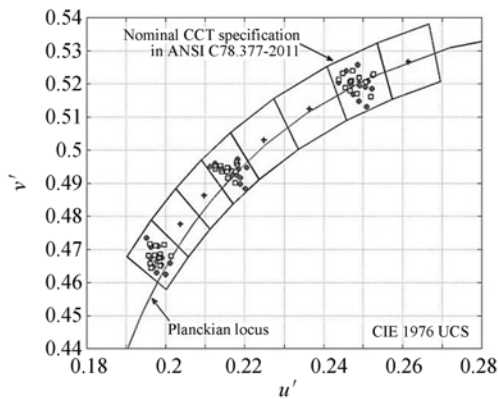


图 10 数据的色度分布

Fig. 10 Distribution of chromatic values

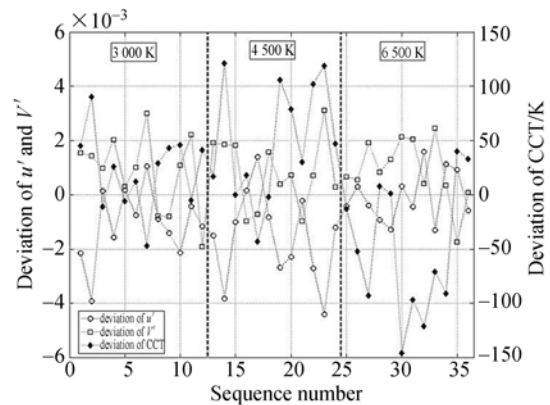


图 11 模型计算与测试数据间的色度坐标的偏差

Fig. 11 Deviation of chroma coordinate between predicted and measured data

## 4 结 论

本文以 C78.377-2011 标准对 LED 照明光源提出的 CCT 色度要求为依据,介绍了 LED 光电热参量的建模原理及方法,研究了 RGBW 多主色 LED 的电流调控量、温度、SPD、CIE 1976 色度坐标和 CCT 之间的模型关系。重点是在高斯分布假设和热平衡变量关系稳定假设的基础上,通过软模型建模思路,建立了用于 CCT 调控的光电热模型。最后分析了模型的预测精度,在 3 000, 4 500 和 6 500 K 3 个常用的色温四边形容差域内,模型预测值与实测数据之间的色度坐标偏差优于 $\pm 0.005$ ,CCT 预测偏差优于 $\pm 150$  K,完全满足多主色 LED 的色温调控要求。本文所研究的基于多主色 LED 光电热模型的 CCT 调控方法能够进一步推广到更多通道的 LED 光源的色度及 CCT 控制中。

## 参考文献:

- [1] 陈风,郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响[J]. 光学精密工程,2008,16(3): 415-419. CHEN F, ZHENG X B. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 415-419. (in Chinese)
- [2] 刘洪兴,孙景旭,刘则洵,等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. 光学精密工程,2012,20(7): 1147-1454.

- LIU H X, SUN J X, LIU Z X, *et al.*. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1147-1454. (in Chinese)
- [3] 冯奇斌,杨光磊,井长龙,等. 固态体积式真三维立体显示发光二极管投影光源[J]. 光学精密工程,2014, 22(5): 1113-1119. FENG Q B, YANG G L, JING CH L, *et al.*. LED-based projection light source for solid-state volumetric true-3D display[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1113-1119. (in Chinese)

- [4] 钟文姣,魏爱香,招摇瑜. 结温对 GaN 基白光 LED 光学特性的影响[J]. 发光学报, 2013, 34(9):1203-1207.  
ZHONG W J, WEI A X, ZHAO Y Y. Dependence of GaN-based white LED colorimetric parameters on junction temperature [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(9):1203-1207. (in Chinese)
- [5] 吴丽,沈健,徐立国. 改善显示品质的直下式 LED 背光技术[J]. 液晶与显示, 2014, 29(6):1106-1110.  
WU L, SHEN J, XU L G. Direct-lit LED back light technology for improving the picture quality [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6):1106-1110. (in Chinese)
- [6] KATSUURA T, JIN X, BABA Y, et al.. Effects of color temperature of illumination on physiological functions[J]. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 2005, 24(4): 321-325.
- [7] DAI Q, INOUE M, SHIMOMURA Y, et al.. Effects of diurnal variation of the lighting color temperature on physiological and psychological functions in office environment[J]. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 2001, 20(2): 149. (in Japanese)
- [8] 陈东灵,林志贤. 三基色光源连续色温调控方法的研究[J]. 计算机与现代化, 2012, 1(6):179-182.  
CHEN D L, LIN ZH X. Study on method of adjusting color temperature continuously based on three primary lighting sources [J]. *Computer and Modernization*, 2012, 1(6):179-182. (in Chinese)
- [9] 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.  
XU Y ZH, LIN W M. A novel LED photo-electro-thermal model with simplified variables [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0523001. (in Chinese)
- [10] HOUSERA K W, WETA M, AURÉLIEN D, et al.. Whiteness perception under LED illumination [J]. *The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, 2014, 10(3):165-180.
- [11] MANG O Y, HUANG T W, HSIEH Y F, et al.. Optimizing maximal brightness and correlated color temperature for multi-primary color displays [J]. *PIE*, 2009, 7443, 74431:2-6.
- [12] BACCARI S, TIPALDI M, IANNELLI L, et al.. Photoelectrothermal model predictive control for light emitting diodes [C]. *Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on, Grand Wailea Maui, HI, USA*, 2012:394-399.

## 作者简介:



郑峰(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,2004年、2007年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光度、色度与辐射度探测,复杂体系仪器的建模及模型评估,分子光谱及化学计量等方面的研究。E-mail: feng1214@126.com

## 通讯作者:



宦克为(1982—),男,吉林长春人,博士,讲师,2004年、2007年、2014年于长春理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事红外技术方面的研究。E-mail: huankewei@126.com

## 导师简介:



石晓光(1957—),男,吉林长春人,博士,教授,2009年于长春理工大学获得博士学位,主要从事红外技术方面的研究。E-mail: shixg@cust.edu.cn