

## 基于视锥感光空间的光源相关色温计算

董晓文, 徐杨\*, 高程, 李长军

辽宁科技大学计算机与软件工程学院, 辽宁 鞍山 114051

**摘要** 研究了基于视锥响应三刺激值  $L, M, S$  导出的不同色品坐标空间和不同比例因子对相关色温 (CCT) 计算的影响, 并比较了计算得到的 CCT 与标准 CCT 的差异。在 Houser 等收集的包含 401 个光谱功率分布的数据集上进行了测试, 测试结果表明, 采用比例因子均为 1 时计算得到的  $L, M, S$  直接导出的  $u_c-v_c$  空间表现最好, 均值 CCT 绝对差异, 中值 CCT 绝对差异和最大值 CCT 绝对差异分别为 48, 31 和 851 K。若将  $L, M, S$  转换到由配色函数定义的三刺激值空间  $X_F Y_F Z_F$  导出的  $u_F-v_F$  空间中计算 CCT, 计算得到的 CCT 与标准 CCT 差异的均值 CCT 差异, 中值 CCT 差异和最大值 CCT 差异分别为 42, 21 和 540 K。

**关键词** 颜色; 视锥响应三刺激值  $LMS$  空间; 相关色温; 色度坐标空间; 比例因子; 牛顿法

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0233001

## Calculation of Light Source Corrected Color Temperature Based on Cone Fundamental Space

Dong Xiaowen, Xu Yang\*, Gao Cheng, Li Changjun

College of Computer Science and Software Engineering, University of Science and Technology Liaoning,  
Anshan, Liaoning 114051, China

**Abstract** The influence of different chromaticity coordinate spaces and different scale factors derived from the tristimulus values  $L, M,$  and  $S$  of the cone response on the calculation of correlated color temperature (CCT) is studied, and the difference between the calculated CCT and the standard CCT is compared. Tests are carried out on a data set containing 401 spectral power distributions collected by Houser et al. The test results show that the  $u_c-v_c$  space directly derived from the calculated  $L, M,$  and  $S$  when the scale factors are all 1 is the best, and the absolute differences of the mean CCT, the median CCT and the maximum CCT are 48, 31 and 851 K, respectively. If the  $L, M, S$  are converted to the  $u_F-v_F$  space derived from the tristimulus value space  $X_F Y_F Z_F$  defined by the color matching function to calculate the CCT, the mean CCT difference, the median CCT difference and the maximum CCT difference between the calculated CCT and the standard CCT are 42, 21 and 540 K, respectively.

**Key words** color; cone response tristimulus-value  $LMS$  space; correlated colour temperature; chromaticity coordinate space; scaling factors; Newton method

**OCIS codes**

## 1 引言

色温和相关色温 (correlated color temperature, CCT) 是衡量照明光源光品质的重要指标<sup>[1]</sup>, 是影响照明质量的重要因素。由于不同色温的光源给人们

生理和心理带来的影响是不同的, 因此在光源设计、居室照明设计和摄影等行业中色温都起着至关重要的作用。色温是真实恒星的重要物理特性<sup>[2]</sup>, 也是星模拟器光源的重要参数。在激光显示器技术中, 色温恒定在一定范围内可以确保画面的显示效

收稿日期: 2021-06-23; 修回日期: 2021-07-29; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(61575090, 61775169)、辽宁省教育厅基本科研项目(LJKZ0310)

通信作者: \*xuyang\_1981@aliyun.com

果<sup>[3]</sup>。从物理学角度而言,当辐射源的温度所呈现的颜色与黑体在某一温度的颜色相同时,将此时的黑体温度称为该辐射源的颜色温度,简称色温。当辐射源的颜色与黑体在某一温度下的颜色最接近时,或者说两者在色品图上的坐标点距离最近时,就用该黑体温度来表示此辐射源的色温,并称之为该辐射源的 CCT。

目前,国际照明委员会(international commission on illumination, CIE)的色度学体系是基于 CIE 配色函数的三刺激值 XYZ 空间发展起来的<sup>[4-7]</sup>。常用的基于三刺激值 XYZ 空间导出的色品空间有 CIE1931- $xy$  空间、CIE1960- $uv$  空间、CIE1976- $u'v'$  空间<sup>[4-7]</sup>。其中, $x$  和  $y$  为 CIE1931 均匀颜色空间的色品坐标<sup>[1-2,4]</sup>, $u$  和  $v$  为 CIE1960 均匀颜色空间的色品坐标, $u'$  和  $v'$  为 CIE1976 均匀颜色空间的色品坐标<sup>[1,3-4,6-7]</sup>。在一般应用领域中,虽然 CIE<sup>[7]</sup> 已经不建议使用色品坐标  $u-v$  空间,但是在计算相关色温时仍采用色品坐标  $u-v$  空间。相关色温的计算方法随着计算机技术的发展以及 CIE 相关文件<sup>[7]</sup> 的规范日臻成熟,常用的方法有经验公式法<sup>[8-9]</sup>,查找表法<sup>[10-14]</sup> 和迭代法<sup>[11-13,15-16]</sup>。经验公式法虽然简单,但是误差较大。查找表法或基于查找表法的迭代法的精度都取决于查找表的信息量,信息量越大,结果越精确,但此时需要存储的信息也会变多。迭代法可以按照是否对黑体轨迹色品坐标进行近似处理进行分类。宋喜佳等<sup>[11-12]</sup> 提出的方法和 Krystek<sup>[16]</sup> 提出的方法都需要对黑体轨迹色品坐标进行近似处理。Li 等<sup>[15]</sup> 提出的方法按 CIE 要求计算了黑体轨迹色品坐标,故计算结果非常准确。

CIE<sup>[17]</sup> 于 2020 年提出了 10 个重点研究方向,其中第 6 个研究方向就是研究基于 CIE 2015 年的视锥感光响应光谱曲线<sup>[18-19]</sup> 的色度学体系及其应用。同时,CIE 成立了技术委员会 CIE TC1-98,致力于研究基于 CIE 2015 年的视锥感光响应光谱曲线<sup>[18-19]</sup> 建立的色度学体系的相关课题。因此,在不久的将来,基于视锥感光响应三刺激值  $L, M, S$  发展起来的色度学体系将取代基于三刺激值 XYZ 空间发展的色度学体系。

2020 年,吴志峰等<sup>[20]</sup> 研究了 CCT 测量不确定度。本文利用基于视锥响应三刺激值  $L, M, S$  导出的色品坐标空间来计算光源的 CCT。基于包含 401 个光谱功率分布 (SPD) 的光谱集<sup>[21]</sup>,探索了不同色品坐标空间和不同比例因子对 CCT 计算的影响。通过比较以上所有组合形式来预测 CCT 与目前标

准色温的差异,为 CIE 确定计算光源 CCT 的标准色品坐标空间和计算三刺激值  $L, M, S$  的比例因子提供了重要的参考信息。文章第二部分介绍了目前计算光源 CCT 标准的方法,即基于三刺激值 XYZ 空间的 CIE1960 均匀颜色空间来计算 CCT,包含 401 个 SPD 的数据集,以及基于视锥响应三刺激值  $LMS$  空间来计算 CCT。第三部分对颜色空间和比例因子的选取对 CCT 计算的影响进行了分析与讨论。

## 2 计算相关色温的基本原理

### 2.1 基于三刺激值 XYZ 空间计算相关色温

给定 SPD  $P(\lambda)$ ,光源三刺激值  $X, Y, Z$  的表达式为

$$\begin{cases} X = k \int P(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = k \int P(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = k \int P(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: $k$  为比例因子; $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$  和  $\bar{z}(\lambda)$  为 CIE1931 的配色函数; $\lambda$  为光波波长。由三刺激值  $X, Y, Z$  可以计算出 CIE1931 均匀颜色空间的色品坐标  $x$  和  $y$ , CIE1960 均匀颜色空间的色品坐标  $u$  和  $v$  以及 CIE1976 均匀颜色空间色品坐标  $u'$  和  $v'$ ,相关表达式为

$$\begin{cases} x = X / (X + Y + Z) \\ y = Y / (X + Y + Z) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u = 4X / (X + 15Y + 3Z) \\ v = 6Y / (X + 15Y + 3Z) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u' = 4X / (X + 15Y + 3Z) \\ v' = 9Y / (X + 15Y + 3Z) \end{cases} \quad (4)$$

(2)~(4)式表明,(1)式中比例因子  $k$  的选取并不影响色品坐标的计算。给定任何一个色温  $T$  (单位为 K) 下普朗克辐射体<sup>[4]</sup> 的 SPD,结合(1)式可以计算出普朗克辐射体的三刺激值  $X(T), Y(T), Z(T)$ 。然后,利用(3)式可计算出色品坐标  $u(T)$  和  $v(T)$ 。图 1 为黑体轨迹和 401 个 SPD 的色品坐标在  $u-v$  平面内的分布。其中,标注 black body 的曲线是普朗克辐射体色品坐标  $u(T)$  和  $v(T)$  在  $u-v$  平面的分布,也称黑体轨迹;标注 spectrum locus 的曲线为  $u-v$  平面内的光谱轨迹,标注 connecting line 的曲线为连接光谱轨迹的直线。

目前对于给定 SPD,计算相关色温的标准办法<sup>[7]</sup> 是令  $(u, v)$  是给定光源的色品坐标,  $[u(T),$

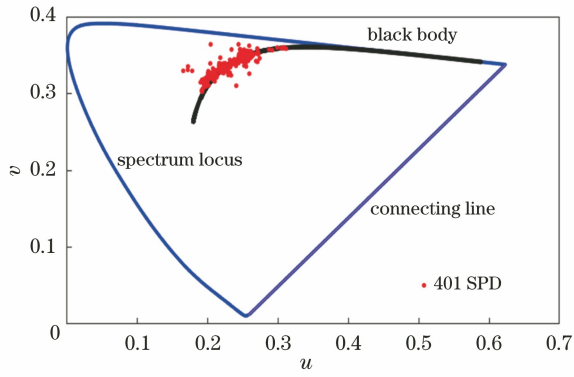


图 1 黑体轨迹和 401 个 SPD 的色品坐标在  $u-v$  平面内的分布

Fig. 1 Distribution of blackbody locus and chromaticity coordinates of 401 SPDs in  $u-v$  plane

$v(T)$  是色温为  $T$  的普朗克辐射体的色品坐标, 它们之间的距离为

$$d_{uv}(T) = \sqrt{[u - u(T)]^2 + [v - v(T)]^2}, \quad (5)$$

若  $T_0$  使得函数  $d_{uv}(T)$  达到最小, 则称色温  $T_0$  为给定光源的 CCT。通常要求给定光源到普朗克辐射体光谱轨迹的最短距离不大于  $5.0 \times 10^{-2}$ 。利用给定 SPD 计算 CCT 的算法众多, 通常取目标函数  $f(T)$  为距离函数的平方, 即

$$f(T) = [u - u(T)]^2 + [v - v(T)]^2. \quad (6)$$

使用牛顿法<sup>[15]</sup>来计算 CCT, 牛顿法是从光源的色品坐标  $(u, v)$  出发来计算 CCT, 是一种求可微函数  $f'(T)$  解的迭代方法。只要满足测试光源到普朗克辐射体光谱轨迹的最短距离不大于  $5.0 \times 10^{-2}$ , 该方法可计算光源色温在 500 K~1 MK 范围内的 CCT, 且绝对误差小于 0.0012 K。

## 2.2 光源光谱功率分布数据集

将 Houser 等<sup>[21]</sup>收集的 401 个 SPD 作为测试数据集, 该数据集包括了所有的光源光谱, 如 106 个荧光灯(包括 CIE F1-F12 光谱), 31 个高强放电灯, 17 个钨丝灯(包括 CIE A 光源光谱), 8 个 CCT 在 2000~4999 K 范围内的黑体辐射光谱, 6 个 CCT 在 5000~8000 K 的 CIE D 光源和 6 个其他光源(如接近理想原色的夹式白炽灯)。同时, 该数据集也包含了现代的 LED 光源光谱, 如 159 个 LED 磷光灯, 68 个 LED 混合灯, CCT 范围为 2600~6900 K。

图 1 中的圆点是 401 个 SPD 的色品坐标在  $u-v$  平面内的分布, 可以看出多个点分布在黑体轨迹上。

## 2.3 基于视锥响应三刺激值 LMS 空间计算相关色温

若  $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$  为 CIE 2015 2° 视锥感光响应光谱曲线<sup>[18-19]</sup>, 则视锥感光响应三刺激值  $L,$

$M, S$  的表达式为

$$\begin{cases} L = K_L \int P(\lambda) \cdot \bar{l}(\lambda) d\lambda \\ M = K_M \int P(\lambda) \cdot \bar{m}(\lambda) d\lambda \\ S = K_S \int P(\lambda) \cdot \bar{s}(\lambda) d\lambda \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $K_L, K_M, K_S$  是用于归一化三刺激值的比例因子。基于配色函数计算得到的三刺激值  $X, Y, Z$  只需 1 个比例因子, 而此处需要 3 个, 这是因为  $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$  的峰值都已经被调整为 1<sup>[18-19]</sup>。

虽然基于  $L, M, S$  定义的均匀色品坐标空间计算光源的 CCT 正在探索中<sup>[17]</sup>, 但是可以类比基于配色函数计算的三刺激值 XYZ 空间<sup>[1,4-7]</sup>来定义色品坐标空间。因此, 此处可定义与 (2)~(4) 式中  $(x, y), (u, v)$  和  $(u', v')$  色品坐标类似的坐标, 分别记为  $(x_c, y_c), (u_c, v_c)$  和  $(u'_c, v'_c)$ 。

同样, 根据 CIE 文件<sup>[18]</sup>, 可采用 MacLeod-Boynton  $(l, s)$  色品坐标空间, 其中坐标  $l$  和  $s$  的表达式为

$$\begin{cases} l = \frac{L}{L+M} \\ s = \frac{S}{L+M} \end{cases}. \quad (8)$$

当计算  $(l, s)$  色品坐标时, 采用比例因子

$$\begin{cases} K_L = 0.6899 \\ K_M = 0.3483, \\ K_S = 0.0372 \end{cases}, \quad (9)$$

计算三刺激值  $L, M, S$ 。色品坐标  $(x_c, y_c), (u_c, v_c)$  和  $(u'_c, v'_c)$  也可通过 (9) 式所示的比例因子来计算。由于比例因子的选取会影响色品坐标  $(x_c, y_c), (u_c, v_c)$  和  $(u'_c, v'_c)$ , 故尝试另外一组常用的比例因子, 使等能白光源的视锥感光响应三刺激值相等。常用比例因子的表达式为

$$\begin{cases} K_{L,1} = \frac{100}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_n} \bar{l}(\lambda) d\lambda} \\ K_{M,1} = \frac{100}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_n} \bar{m}(\lambda) d\lambda}, \\ K_{S,1} = \frac{100}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_n} \bar{s}(\lambda) d\lambda} \end{cases}, \quad (10)$$

式中:  $\lambda_0 = 380 \text{ nm}$  和  $\lambda_n = 780 \text{ nm}$  表示光谱波长的最大值和最小值。

根据 CIE 文件<sup>[18-19]</sup>可知, CIE 2015 2° 视角视锥

感光响应光谱曲线  $\bar{l}(\lambda)$ ,  $\bar{m}(\lambda)$ ,  $\bar{s}(\lambda)$  和基于视锥感光响应光谱曲线的配色函数  $\bar{x}_F(\lambda)$ ,  $\bar{y}_F(\lambda)$ ,  $\bar{z}_F(\lambda)$  满足

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_F(\lambda) \\ \bar{y}_F(\lambda) \\ \bar{z}_F(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.9474 & -1.4145 & 0.3648 \\ 0.6899 & 0.3483 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{l}(\lambda) \\ \bar{m}(\lambda) \\ \bar{s}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (11)$$

如果选取

$$K_L = K_M = K_S = 1, \quad (12)$$

可通过(7)式计算  $L, M, S$ , 也可通过(11)式将  $LMS$  空间转换到基于配色函数的三刺激值空间  $X_F Y_F Z_F$ 。虽然配色函数  $\bar{x}_F(\lambda)$ ,  $\bar{y}_F(\lambda)$ ,  $\bar{z}_F(\lambda)$  不同于 CIE 1931 配色函数  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ , 但是仍可定义与(2)~(4)式中  $(x, y)$ ,  $(u, v)$  和  $(u', v')$  色品坐标类似的坐标, 分别记为  $(x_F, y_F)$ ,  $(u_F, v_F)$  和  $(u'_F, v'_F)$ , 可利用  $X_F, Y_F, Z_F$  替换(2)~(4)式中  $X, Y, Z$  计算得到。

综合上述, 基于视锥感光响应三刺激值  $L, M, S$  可以定义多个色品坐标空间, 如表 1 所示。本文主要探讨表 1 中不同色品空间以及不同比例因子计算的 401 个 SPD 的 CCT, 并与在  $u-v$  空间计算得到的标准 CCT 进行比较。

由于本文不是讨论计算色温的新方法, 而是探讨色品坐标空间的变化对色温的影响, 因此对给定测试集中的任何一个光谱, 可以计算出相应的 CIE 1960 均匀空间色品坐标  $(u, v)$ 。然后, 采用牛顿法<sup>[15]</sup>可计算出标准的 CCT。同样对给定的光谱, 也可计算出表 1 中任何一个空间的色品坐标, 例如  $(x_c, y_c)$ , 在此空间中可计算出对应的 CCT ( $T_p$ )。采用查找表法来计算  $T_p$ , 首先在色温从 500 K ~ 1 MK 范围内每间隔 1 K 处取点  $T_j$ , 然后计算出黑体轨迹在此空间的色品坐标, 例如  $[x_c(T_j), y_c(T_j)]$ 。由于  $T_p$  是  $(x_c, y_c)$  到  $[x_c(T_j), y_c(T_j)]$  间最短距离对应的色温, 因此  $T_p$  的预测误差不超过 1 K。

表 1 不同比例因子集下基于  $L, M, S$  的色品坐标

Table 1 Chromaticity coordinates based on  $L, M$  and  $S$  under different sets of scale factors

Chromaticity coordinate	Scale factor
$(x_c, y_c), (u_c, v_c), (u'_c, v'_c)$	Formula (9)
$(x_c, y_c), (u_c, v_c), (u'_c, v'_c)$	Formula (10)
$(x_c, y_c), (u_c, v_c), (u'_c, v'_c)$	Formula (12)
$(l, s)$	Formula (9)
$(x_F, y_F), (u_F, v_F), (u'_F, v'_F)$	Formula (12)

### 3 分析与讨论

为了测试不同色品空间以及不同比例因子与  $u-v$  空间标准 CCT 间的差别, 从表 1 中提到的 13 个色品坐标空间中的任何一个空间, 都可计算出 401 个 SPD 的色品坐标, 进而得到 CCT。图 2 为在 3 组不同比例因子下, 401 个 SPD 的色品坐标在  $u_c-v_c$  空间的分布示意图(圆点)。图 2(a)~(c)分别由(9)、(10)、(12)式的比例因子得到, 其中标注 spectrum locus 的曲线为视锥感光响应曲线  $\bar{l}(\lambda)$ ,  $\bar{m}(\lambda)$ ,  $\bar{s}(\lambda)$  在  $u_c-v_c$  空间中的光谱轨迹。由图 2 可知, 不管采用哪种比例因子, 光源的色品坐标分布都靠近黑体轨迹。从光源光谱色度坐标分布的部分放大图中, 可以看出大部分点都分布在黑体轨迹上。

图 3 是基于  $u_c-v_c$  空间计算得到的 CCT(纵轴)和基于  $u-v$  空间计算得到的 CCT(横轴)的比较示意图。图 3(a)~(c)与图 2(a)~(c)的情况相对应。其中, 虚线为 45°线, 若所有点都在 45°线上, 说明空间的变化不影响色温的计算结果。由图 3 可知, 对于低色温的光源, 通过  $u_c-v_c$  空间计算得到的 CCT 与  $u-v$  空间计算得到的 CCT 相差不大。当光源色温变大时, 两个空间计算得到的 CCT 相差较大。当采用(9)式的比例因子计算  $L, M, S$  时, 计算得到的 CCT 比标准 CCT 大。当采用(10)式的比例因子计算  $L, M, S$  时, 计算得到的 CCT 比标准 CCT 小。采用(12)式的比例因子计算得到的 CCT 更接近标准 CCT。

图 4(a)和(b)分别给出 401 个光源在  $x_F-y_F$  空间和  $u_F-v_F$  空间中的分布情况。图 4(a)中标注 spectrum locus 的曲线为视锥感光响应曲线  $\bar{l}(\lambda)$ ,  $\bar{m}(\lambda)$ ,  $\bar{s}(\lambda)$  在  $x_F-y_F$  空间中的光谱轨迹。图 4(b)中标注 spectrum locus 的曲线为视锥感光响应曲线  $\bar{l}(\lambda)$ ,  $\bar{m}(\lambda)$ ,  $\bar{s}(\lambda)$  在  $u_F-v_F$  空间中的光谱轨迹。

图 5(a)是基于  $x_F-y_F$  空间计算得到的 CCT(纵轴)和基于  $u-v$  空间计算得到的 CCT(横轴)的比较示意图。图 5(b)是基于  $u_F-v_F$  空间计算得到的 CCT(纵轴)和基于  $u-v$  空间计算得到的 CCT(横轴)的比较示意图。图中虚线同样是 45°线。可以发现, 图 5(b)的效果最好, 401 个 SPD 几乎都贴近 45°线。

对表 1 中每个空间预测的 401 个 SPD 的 CCT 与相对应的标准 CCT 进行比较, 可获得各个空间预测的 CCT 误差。表 2 为直接利用  $L, M, S$  计算出的各个空间下的平均 CCT 绝对误差 ( $M_{\text{mean}, 1}$ ), 中值

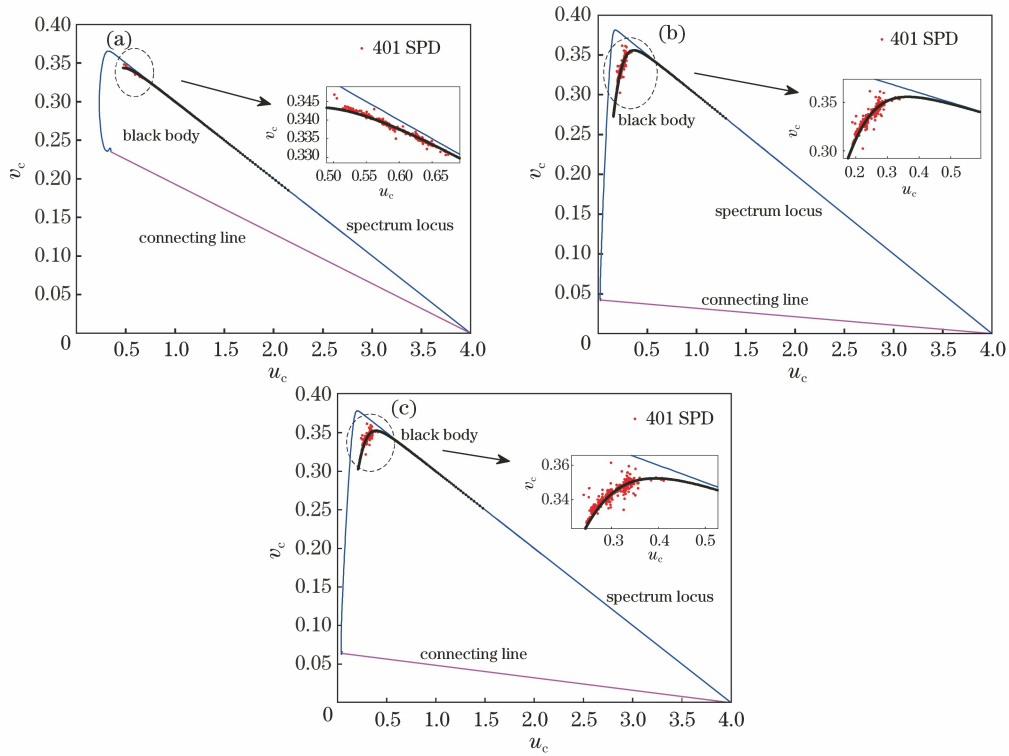


图 2 在不同比例因子下,401 个 SPD 的色品坐标在  $u_c-v_c$  空间内的分布。(a) (9)式提供的比例因子;  
(b) (10)式提供的比例因子;(c) (12)式提供的比例因子

Fig. 2 Distribution of chromaticity coordinates of 401 SPDs in  $u_c-v_c$  space under different scale factors. (a) Scale factor provided by formula (9); (b) scale factor provided by formula (10); (c) scale factor provided by formula (12)

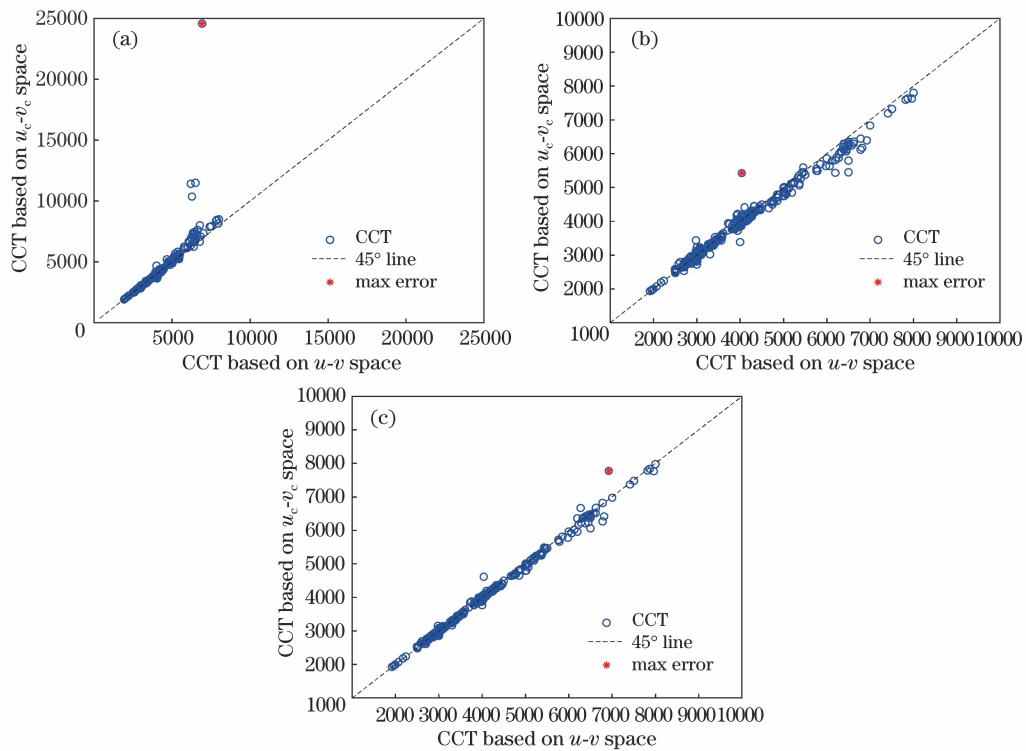


图 3 不同比例因子下的 CCT 映射。(a) (9)式提供的比例因子;(b) (10)式提供的比例因子;(c) (12)式提供的比例因子

Fig. 3 CCT mapping under different scale factors. (a) Scale factor provided by formula (9);  
(b) scale factor provided by formula (10); (c) scale factor provided by formula (12)

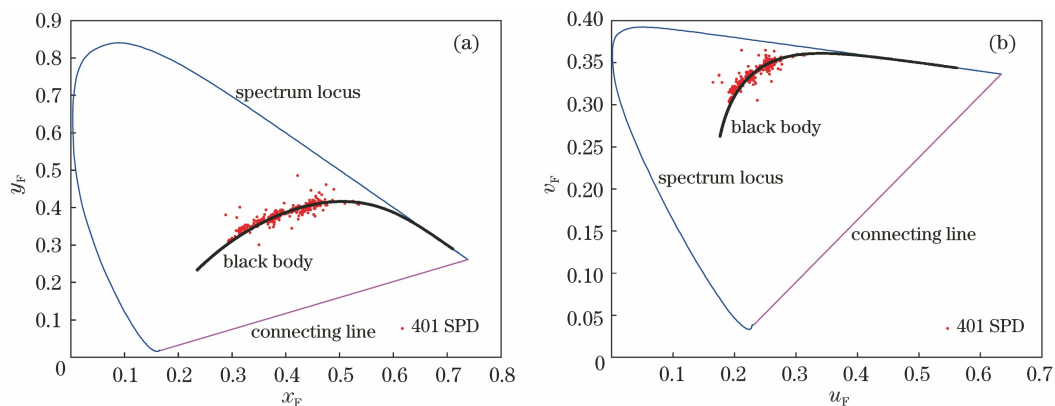


图 4 在不同坐标空间下,401 个 SPD 的色品坐标分布。(a)  $x_F$ - $y_F$  空间; (b)  $u_F$ - $v_F$  空间  
Fig. 4 Distribution of chromaticity coordinates of 401 SPDs in different coordinate spaces.  
(a)  $x_F$ - $y_F$  space; (b)  $u_F$ - $v_F$  space

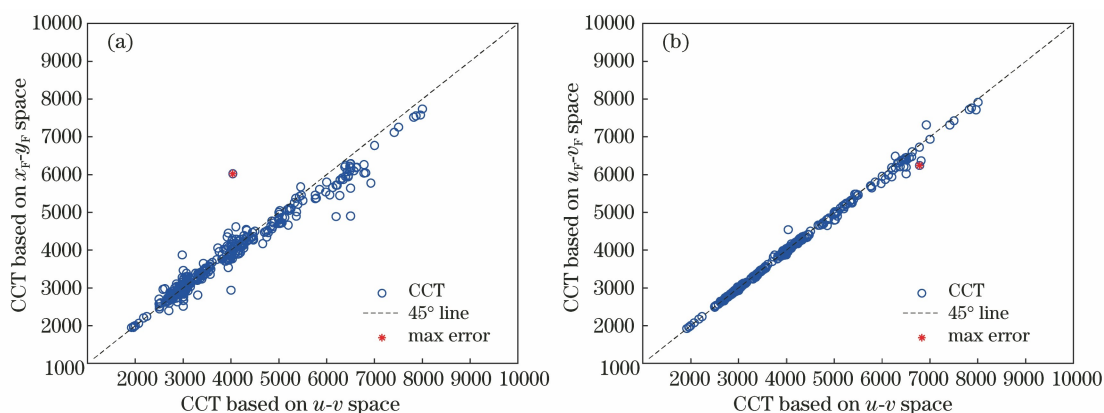


图 5 不同坐标空间下的 CCT 映射。(a)  $x_F$ - $y_F$  空间; (b)  $u_F$ - $v_F$  空间  
Fig. 5 CCT mapping under different coordinate spaces. (a)  $x_F$ - $y_F$  space; (b)  $u_F$ - $v_F$  space

CCT 绝对误差 ( $M_{median,1}$ ) 和最大 CCT 绝对误差 ( $M_{max,1}$ )。表 3 为将  $L, M, S$  转换到  $X_F, Y_F, Z_F$  后计算出的各个空间下的平均 CCT 误差 ( $M_{mean,2}$ ), 中值 CCT 误差 ( $M_{median,2}$ ) 和最大 CCT 误差 ( $M_{max,2}$ )。从表 2 中可以看出, 当使用 (9) 式的比例因子时, 由于对应的中值绝对误差最小, 最大绝对误差最大, 故对应的平均绝对误差也较大。当使用 (12) 式的比例因子时, 对应的最大绝对误差最小, 总体来说使用 (12) 式的比例因子的效果要优于使用 (9) 式和 (10) 式的比例因子。综合而言, 基于  $u_c-v_c$  空间且使用 (12) 式的比例因子时效果最好, 平均绝对误差为 48 K, 中值绝对误差为 31 K, 最大绝对误差为 851 K。从表 3 中可以看出, 基于  $u_F-v_F$  空间计算得到的 CCT 最好, 平均误差为 42 K, 中值误差为 21 K, 最大误差为 540 K。

表 2 视锥感光空间 CCT 汇总

Table 2 Summary of CCT of cone fundamental space

Chromaticity coordinate space	Scale factor	$M_{mean,1}$	$M_{median,1}$	$M_{max,1}$
$x_c-y_c$	Formula (9)	122	26	8698
	Formula (10)	195	110	2649
	Formula (12)	149	85	2060
$u_c-v_c$	Formula (9)	174	36	17652
	Formula (10)	102	62	1387
	Formula (12)	48	31	851
$u'_c-v'_c$	Formula (9)	175	36	17759
	Formula (10)	140	79	2082
	Formula (12)	68	43	936
$l_c-s_c$	Formula (9)	86	25	4023

表 3 视锥感光空间转换到 XYZ 空间后 CCT 汇总  
Table 3 Summary of CCT after cone fundamental space transformed to XYZ space

Chromaticity coordinate space	Scale factor	$M_{\text{mean},2}$	$M_{\text{median},2}$	$M_{\text{max},2}$
$x_F-y_F$	Formula (12)	158	94	1985
$u_F-v_F$	Formula (12)	42	21	540
$u'_F-v'_F$	Formula (12)	100	52	1553

最后,对每个空间产生的最大色温误差的光谱形状进行了研究,如图 6 所示。可以发现,数据分别集中在 376 号,377 号和 241 号 SPD。376 号和 377 号 SPD 属于高强放电灯,241 号 SPD 是理论 LED 混合型 SPD。从图 6 中可以看出,它们的共同特点是主要辐射能量集中在几个窄波范围,尤其是 377 号光谱。此外,研究还发现,比例因子的选取也会影响色温误差。当采用(9)式的比例因子时,376 号光谱在表 2 对应的所有空间都产生最大色温误差。当采用(10)式的比例因子时,377 号光谱在表 2 中对应的 3 个空间中产生最大色温误差。当采用(12)式的比例因子时,在表 2 和表 3 对应的 6 个空间中,376 号光谱在  $u_c-v_c$  空间中产生最大色温误差;241 号光谱在  $u_F-v_F$  空间产生最大色温误差;377 号光谱在  $x_c-y_c, u'_c-v'_c, x_F-y_F, u'_F-v'_F$  空间产生最大色温误差。

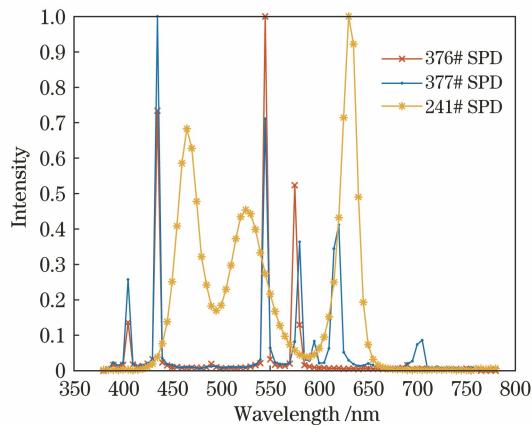


图 6 产生最大色温误差的光谱的形状

Fig. 6 Shape of spectra that produce the maximum color temperature error

## 4 结 论

研究了基于视锥响应三刺激值  $L, M, S$  导出的不同色品坐标空间和不同比例因子对 CCT 的影响,并比较了不同色品坐标空间和不同比例因子情况下的 CCT 与标准 CCT 的差异,共包含 3 种比例因子

和 13 个不同的色品坐标空间。13 个不同的色品坐标空间包括可从  $L, M, S$  直接导出的 10 个色品坐标空间和通过  $L, M, S$  转换到  $X_F, Y_F, Z_F$  导出的 3 个色品坐标空间。将包含 401 个 SPD 的光谱集作为测试数据集,该数据集包含所有传统光源光谱并涉及新型 LED 光源光谱。利用光源光谱集对不同色品坐标空间的 CCT 进行预测,并与在标准  $u-v$  空间下计算出的 CCT 进行比较,统计出平均 CCT 绝对误差、中值 CCT 绝对误差和最大 CCT 绝对误差。

从  $L, M, S$  直接导出的 10 个色品坐标空间的比较结果表明,比例因子的选取对计算 CCT 有较大影响。基于由(9)式定义的比例因子计算的色品坐标空间得到的 CCT 中值绝对误差较小,最大绝对误差较大,因此对应的平均绝对误差也较大。基于由(12)式定义的比例因子计算的色品坐标空间得到的 CCT 对应的最大绝对误差较小,总体来说使用(12)式定义的比例因子的效果要优于使用(9)式和(10)式定义的比例因子。因此,基于  $u_c-v_c$  空间且使用(12)式定义的比例因子时效果最好,平均绝对误差为 48 K,中值绝对误差为 31 K,最大绝对误差为 851 K。 $L, M, S$  转换到  $X_F, Y_F, Z_F$  导出的 3 个色品坐标空间的比较结果表明, $u_F-v_F$  空间的计算结果最好,平均误差为 42 K,中值误差为 21 K,最大误差为 540 K。研究结果为 CIE 确定计算光源 CCT 的标准色品坐标空间及计算三刺激值  $L, M, S$  的比例因子提供了重要的参考信息。

## 参 考 文 献

- [1] Xu H S. Color information engineering[M]. 2nd ed. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2015.  
徐海松. 颜色信息工程[M]. 2 版. 杭州: 浙江大学出版社, 2015.
- [2] Wang L Y, Liu X, Li G Q, et al. Research progress in the light source of color temperature tunable star simulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2100001.  
王凌云, 刘笑, 李光茜, 等. 色温可调星模拟器光源的研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2100001.
- [3] Sun M Y, Zhu J Y, Bi Y, et al. Colormatching and real-time color temperature control in laser display[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0704001.  
孙敏远, 朱建英, 毕勇, 等. 激光显示中颜色配比与实时色温控制研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0704001.
- [4] Wyszecki G, Stiles W S. Color science: concepts and

- method, quantitative data and formulae [M]. New York: Wiley-Interscience, 1982.
- [5] Schanda J. CIE colorimetry[M]//Colorimetry. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007: 25-78.
- [6] CIE. Guide for lighting exterior work areas: CIE 68-1986[S]. Vienna: Central Bureau of the CIE, 1986.
- [7] CIE. Colorimetry (fourth edition): CIE 15-2018[S]. Vienna: Central Bureau of the CIE, 2018.
- [8] Hernández-Andrés J, Lee R L, Romero J. Calculating correlated color temperatures across the entire gamut of daylight and skylight chromaticities [J]. Applied Optics, 1999, 38(27): 5703-5709.
- [9] Qiu X Z. Formulas for computing correlated color temperature[J]. Color Research & Application, 1987, 12(5): 285-287.
- [10] Robertson A R. Computation of correlated color temperature and distribution temperature[J]. Journal of the Optical Society of America, 1968, 58(11): 1528-1535.
- [11] Song X J, Feng X N, Hao Y R, et al. The fast calculation of light source CCT and  $D_{uv}$  based on piece-wise cubic Hermite interpolating polynomial [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2019, 30(2): 44-49, 102.  
宋喜佳, 冯学妮, 郝亚茹, 等. 基于分段三次 Hermite 插值的光源相关色温及色偏差的快速计算 [J]. 照明工程学报, 2019, 30(2): 44-49, 102.
- [12] Song X J, Feng X N. Calculation method and system of light source related color temperature and light source  $D_{uv}$ : CN107368461A[P]. 2017-07-11.  
宋喜佳, 冯学妮. 光源相关色温和光源  $D_{uv}$  的计算方法及系统: CN107368461A[P]. 2017-07-11.
- [13] Lin Y, Ye L W, Liu W J, et al. Optimization algorithm of correlated color temperature for LED light sources by dichotomy[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2791-2794.  
林岳, 叶烈武, 刘文杰, 等. 二分法优化计算 LED 光源相关色温[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2791-2794.
- [14] Zhang H, Xu H S. Comparative study of correlated color temperature algorithm for lighting sources[J]. Optical Instruments, 2006, 28(1): 54-58.  
张浩, 徐海松. 光源相关色温算法的比较研究[J]. 光学仪器, 2006, 28(1): 54-58.
- [15] Li C J, Cui G, Melgosa M, et al. Accurate method for computing correlated color temperature [J]. Optics Express, 2016, 24(13): 14066-14078.
- [16] Krystek M. An algorithm to calculate correlated colour temperature [J]. Color Research & Application, 1985, 10(1): 38-40.
- [17] CIE. Research Strategy (April 2020)-Topic 6[EB/OL]. [2021-06-20]. <https://cie.co.at/research-strategy>.
- [18] CIE. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes-part 2: spectral luminous efficiency functions and chromaticity diagrams: CIE 170-2: 2015[S]. Vienna: Central Bureau of the CIE, 2015.
- [19] CIE. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes-part 1: CIE 170-1: 2006 [S]. Vienna: Central Bureau of the CIE, 2006.
- [20] Wu Z F, Dai C H, Li L, et al. Evaluation of correlated color temperature uncertainty [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0212002.  
吴志峰, 代彩虹, 李玲, 等. 相关色温测量不确定度分析[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0212002.
- [21] Houser K W, Wei M, David A, et al. Review of measures for light-source color rendition and considerations for a two-measure system for characterizing color rendition[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 10393-10411.