

文章编号: 1005-5630(2006) 01-0054-05

# 光源相关色温算法的比较研究<sup>\*</sup>

张 浩, 徐海松

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 基于色温的基本理论, 对三角垂足插值法、黑体轨迹的 Chebyshev 法、模拟黑体轨迹弧线法和 McCamy 近似公式法等四种相关色温计算方法进行了比较分析。从理论和实验两方面分别讨论了各种算法的预测精度和应用特点, 并给出了综合比较结果。

**关键词:** 色温; 相关色温; 三角垂足插值法; 黑体轨迹的 Chebyshev 法; 模拟黑体轨迹弧线法; McCamy 近似公式法

中图分类号: O 432 .2

文献标识码: A

## Comparative study of correlated color temperature algorithm for lighting sources

ZHANG Hao, XU Hai-song

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Based on the principle of color temperature, four typical algorithms were studied for calculating correlated color temperature (CCT), triangle perpendicular interpolative method, plank locus Chebyshev method, plank locus arc simulating method, and McCamy's approximate formula. The CCT prediction accuracies and application properties of all these algorithms were discussed theoretically and experimentally in detail, and give the result.

**Key words:** color temperature; correlated color temperature (CCT); triangle perpendicular interpolative method; plank locus Chebyshev method; plank locus arc simulating method; McCamy's approximate formula

## 1 引 言

色温是描述光源或发光体特性的一个基本参数, 在颜色测量中有重要意义。光源的色温定义为与光源辐射颜色相同时的黑体温度, 但实际光源光谱功率分布不可能与黑体完全一致, 这就延伸出相关色温的概念。在 CIE 1960 UCS 图中, 与光源色坐标最靠近的黑体色坐标点所对应的黑体温度称为光源的相关色温。相关色温的系统化算法始于 1968 年的 Robertson 方法<sup>[1]</sup>, 该方法在  $uv$  坐标系中绘出不同温度下的黑体等温线, 再通过查找相应的等温线来计算相关色温。Robertson 方法在当时得到了广泛的应用, 但是也有明显的缺陷, 如计算程序不够简单、计算速度不够快、计算前必须输入大量的原始数据等。随着颜色科学和计算机技术的飞速发展, 相关色温的计算方法在各个方面获得了改进和创新, 其中比较典型并得到广泛应用的主要有三角垂足插值法、黑体轨迹的 Chebyshev 法、模拟黑体轨迹弧线法和 McCamy 近似公式法等。

\* 收稿日期: 2005-04-29

基金项目: 国家教育部基金资助项目

作者简介: 张 浩 (1978-), 男, 河北固安人, 硕士研究生, 主要从事光辐射测量及颜色科学方面的研究。

现从理论和实验两方面分别讨论这几种典型算法的色温预测精度和应用特点,并得出综合对比分析的结论。

2 相关色温算法原理

2.1 三角垂足插值法

在某一特定温度  $T$  下,黑体的光谱功率分布可由普朗克公式<sup>[2]</sup>获得,即:

$$S(\lambda) = c_1 / \lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]$$
 (1)

因而根据黑体的温度就可以由色度学理论<sup>[2]</sup>计算出它的色坐标  $(x, y)$ ,当色温大于 5000K 时,CIE 推荐用日光轨迹代替黑体轨迹,而日光轨迹的色品坐标为<sup>[3]</sup>

$$\begin{cases} x_D = \begin{cases} -4.607 \times 10^9 / T^3 + 2967800 / T^2 + 99.11 / T + 0.244063 & (4000\text{K} < T < 7000\text{K}) \\ -2.0064 \times 10^9 / T^3 + 1901800 / T^2 + 247.48 / T + 0.23704 & (T \geq 7000\text{K}) \end{cases} \\ y_D = -3x_D^2 + 2.87x_D - 0.275 \end{cases}$$
 (2)

三角垂足插值法<sup>[4]</sup>首先按一定的温度间隔(如 50K)由以上公式产生各种温度下的黑体轨迹坐标列表,然后找到与待评价的色品坐标点  $C(u_c, v_c)$  距离最近的两个黑体轨迹点  $A(u_j, v_j)$  和  $B(u_{j+1}, v_{j+1})$ ,如图 1 所示,最后以直线  $AB$  模拟代表黑体轨迹的弧线方程:

$$\frac{v - v_j}{u - u_j} = \frac{v_{j+1} - v_j}{u_{j+1} - u_j}$$
 (3)

过  $C$  点作  $AB$  的垂线,解得垂足  $E(u_0, v_0)$ ,则此点色品坐标的微倒度值可通过线性插值得到,即

$$mired_0 = mired_j + \frac{d_1}{d_1 + d_2}(mired_{j+1} - mired_j)$$
 (4)

式中  $d_1$ 、 $d_2$  分别为垂足  $E$  到  $A$  和  $B$  点的距离,而  $mired_0$ 、 $mired_j$ 、 $mired_{j+1}$  分别代表点  $E$ 、 $A$ 、 $B$  坐标的微倒度值。显然, $E$  点对应的色温( $10^6 / mired_0$ )即为所求。

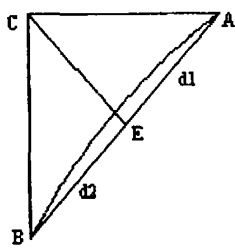


图 1 三角垂足插值法

2.2 黑体轨迹的 Chebyshev 法

由黑体公式表述的轨迹太复杂,难以直接用于相关色温的实际计算,因而出现了 Chebyshev 近似计算方法<sup>[5]</sup>。设温度为  $T$  的黑体在 CIE 1960 UCS 图中的色品坐标为  $[u(T), v(T)]$ ,则  $u(T)$  和  $v(T)$  均应满足下式:

$$\min \left[ \max_{T_i \leq T \leq T_f} \left| c(T) - \frac{P(T)}{Q(T)} \right| \right]$$
 (5)

式中的  $c(T)$  代表  $u(T)$  或  $v(T)$ 。可见,该方法的关键是必须找到式(6)表示的两个多项式  $P(T)$  和  $Q(T)$ ,即:

$$\begin{cases} P(T) = \sum_{k=0}^n a_k T^k \\ Q(T) = \sum_{k=0}^m b_k T^k \end{cases}$$
 (6)

使式(5)中的绝对值误差在区间  $(T_i \leq T \leq T_f)$  内为最小。现通过 Remes 的计算方法<sup>[6]</sup>,从而得到在区间  $(1000\text{K} \leq T \leq 15000\text{K})$  内的结果为:

$$\begin{cases} -u(T) = \frac{0.860117757 + 1.54118254 \times 10^{-4}T + 1.28641212 \times 10^{-7}T^2}{1 + 8.42420235 \times 10^{-4}T + 7.08145163 \times 10^{-7}T^2} \\ -v(T) = \frac{0.317398726 + 4.22806245 \times 10^{-5}T + 4.20481691 \times 10^{-8}T^2}{1 - 2.89741816 \times 10^{-5}T + 1.61456053 \times 10^{-7}T^2} \end{cases} \quad (7)$$

进一步,根据等温线垂直于黑体轨迹,可得:

$$\frac{u(T_c) - u_c}{v(T_c) - v_c} = - \frac{dv(T_c)}{du(T_c)} \quad (8)$$

式中 $(u_c, v_c)$  是待求相关色温  $T_c$  的色品坐标。引入函数  $F$ :

$$F(u_c, v_c, T_c) = \frac{du(T_c)}{dT_c} |u(T_c) - u_c| + \frac{dv(T_c)}{dT_c} |v(T_c) - v_c| \quad (9)$$

并由  $F(u_c, v_c, T_c) = 0$  即可求出色坐标 $(u_c, v_c)$  所对应的相关色温  $T_c$ 。

2.3 模拟黑体轨迹弧线法<sup>[7]</sup>

在  $uv$  色品图中,等温线都是基于黑体轨迹而定义的,而当延长这些等温线时,它们几乎都通过某点  $Q$ 。因此当计算范围在 40 微倒度~600 微倒度(对应色温为 1667K~25000K) 时,相关色温可表示为:

$$T = A + B \times d \quad (10)$$

式中,  $T$  的单位是微倒度;参数  $A$ 、 $B$  及  $Q$  点的色品坐标 $(u, v)$  与  $u$  轴负方向和直线  $PQ$  的夹角  $\theta$  有关,其取值如表 1 所示,其中  $P$  为被测点,  $d$  为  $PQ$  间的距离。

表 1 不同情况下色温公式的拟合参数

	$\theta > 62.82^\circ$	$\theta < 62.82^\circ$
$A$	$24476 - 1690.96 \theta + 44.7172 \theta^2 - 0.57152 \theta^3 +$ $3.5853 \times 10^{-3} \theta^4 - 8.89785 \times 10^{-6} \theta^5$	$4.437 + 2.84 \theta + 0.022643 \theta^2 + 4.039 \times 10^{-4} \theta^3 -$ $2.859 \times 10^{-6} \theta^4 - 3.799 \times 10^{-8} \theta^5$
$B$	$-91627.3 + 6372.45 \theta - 169.335 \theta^2 +$ $2.18036 \theta^3 - 0.0137504 \theta^4 + 3.4292 \times 10^{-5} \theta^5$	$-746.3 + 71.16 \theta - 2.5412 \theta^2 + 0.0474 \theta^3 -$ $5.128 \times 10^{-4} \theta^4 + 2.604 \times 10^{-6} \theta^5$
$Q$	$(0.328151, 0.1333451)$	$(0.2861884, 0.246725)$

2.4 McCamy 近似公式法

McCamy 于 1992 年提出了由色品坐标 $(x, y)$  直接求相关色温  $T$  的简便算法<sup>[8]</sup>,其计算公式为

$$T = -437n^3 + 3601n^2 - 6861n + 5514.31 \quad (11)$$

式中

$$n = (x - 0.3320) / (y - 0.1858) \quad (12)$$

3 色温计算实验与讨论

在 CIE 1931 标准色度系统下,利用波长间隔为 1nm 的各种 CIE 标准照明体和典型荧光灯相对光谱功率分布数据,进行色品坐标及相关色温的计算预测实验,结果数据列于表 2 中,对应于各种算法的误差比较如图 2、图 3 所示。

三角垂足插值法比较直观,但产生黑体标准数据比较复杂,计算中还要查表搜索,计算量大,运算速度较慢。此外,产生标准数据时用日光代替黑体轨迹将产生一定的理论误差。在计算低于 5000K 的色温时,对于照明体 A、B(黑体),标准数据由黑体公式产生,误差为零;色温在 4000K 以下的普通荧光灯 F3、F4 的预测误差是 4K 和 1K,而 4000K 以上的 F2、F6 的误差为 5K 和 8K,都满足一般色温测量的要求;对于高显色及三波长发光型荧光灯 F8~F12,误差都在 1K 以内,达到了很高的精度。当大于 5000K 时,几种标准 D 照明体的误差在 3K 之内,由于用日光模拟 C 照明体的光谱误差较大,因此其色温预测精度也不高;色温在 6000K 以上的 F1、F5 和 F7 由于其光谱为荧光光谱,与日光光谱差别较大,误差也就达到了 5K~10K,但它们的相对误差都在 0.3% 以内,在工业测量中应根据实际要求合理选用。另外,在测量 10000K 以上的色温时,该方法的误差也能保证在 0.5% 以内,并且误差分布比较平均,同时随着现代计算机性能

的不断提升,大量数据的处理对计算速度的影响已越来越小。

表 2 照明体相关色温计算数据

照明体	标准色温	三角垂足插值法	Chebyshev 法	黑体轨迹模拟法	McCamy 法
A	2856K	2856.00K	2854.25K	2854.31K	2853.86K
B	4874K	4874.00K	4874.27K	4871.19K	4869.60K
C	6774K	6783.00K	6771.24K	6772.21K	6772.85K
D50	5003K	5002.00K	5000.73K	4999.45K	4993.84K
D55	5503K	5506.00K	5503.17K	5502.83K	5498.81K
D65	6504K	6504.00K	6504.64K	6500.74K	6503.47K
D75	7504K	7507.00K	7512.94K	7503.47K	7509.42K
F1	6430K	6426.00K	6432.86K	6424.55K	6428.41K
F2	4230K	4225.00K	4221.44K	4221.19K	4218.36K
F3	3450K	3446.00K	3445.56K	3443.16K	3445.97K
F4	2940K	2948.00K	2946.53K	2947.01K	2947.53K
F5	6350K	6340.00K	6354.25K	6342.81K	6347.20K
F6	4150K	4149.00K	4146.24K	4146.33K	4138.89K
F7	6500K	6494.00K	6494.38K	6494.18K	6494.13K
F8	5000K	4999.50K	4997.31K	4995.71K	4990.08K
F9	4150K	4149.00K	4149.66K	4146.61K	4146.23K
F10	5000K	4999.50K	4997.31K	4996.93K	4990.97K
F11	4000K	3999.00K	3999.27K	3996.90K	3997.13K
F12	3000K	2999.50K	2997.80K	2998.26K	2999.16K

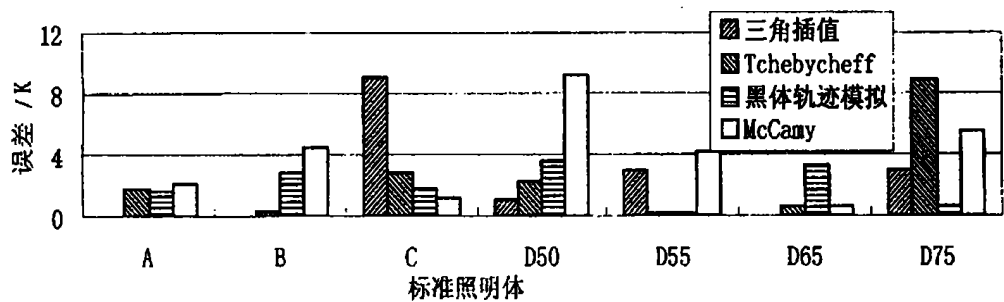


图 2 各种标准照明体相关色温四种算法的色温预测误差比较

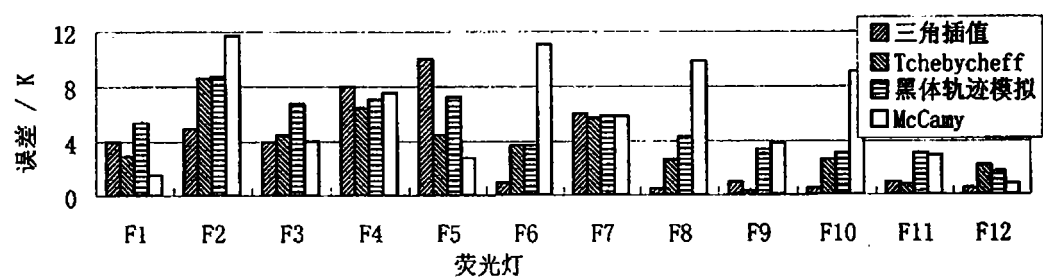


图 3 各种荧光灯相关色温四种算法的色温预测误差比较

Chebyshev 法思路清晰,先构造出函数,然后通过二分法求出方程的根,计算速度快,精度高。用这种方法模拟出的黑体坐标与实际黑体坐标之间的误差在  $10^{-4}$  左右,因而色温的理论误差非常小。当被测照明体色温在 5000K 以下时,照明体 A、B 的误差在 2K 以内,精度较高;色温为 4000K 以下的普通型荧光灯

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

F3、F4, 其预测精度在 5K 以内, 色温大于 4000K 的 F2、F6 误差与三角插值法相当; 对于高显色及三波长发光型荧光灯 F8~F12, 误差均在 3K 以内, 达到了较高的精度。当大于 5000K 时, 色温低于 6000K 的  $D_{50}$ 、 $D_{65}$  的误差分别为 2.27K 和 0.17K, 色温大于 6000K 的  $D_{65}$  其误差在 1K 以下, 而  $D_{75}$  则达到了 8K, 照明体 C 的误差在 3K 以内, 对于 F1、F5 和 F7 其误差在 6K 以内, 效果好于三角插值法, 因而该方法适用于高色温的荧光灯。当被测色温在 10000K 以上时, 误差也随之增加到 200K 以上。

黑体轨迹弧线模拟法思路清晰, 首先判断所测点的区间, 然后采用相应的公式就可求出此点的相关色温, 因此程序设计简单, 计算速度也快。这种方法是模拟实际黑体轨迹, 因而不存在理论误差。当计算低于 5000K 色温时, 照明体 A、B 的预测精度能够达到 3K 以内; 4000K 以下的 F3、F4 其误差都在 7K 左右, 大于 4000K 的 F2、F6 的计算误差和 Chebyshev 法相差不大; 对于 F8~F12, 误差都在 2K 以内, 已经达到了很高的测量精度, 因而可以合理地选择使用这种方法测量高显色及三波长发光型荧光灯。当大于 5000K 时, 预测计算标准 D 照明体的误差在 3K 左右, 照明体 C 的误差在 2K 以内, 但对于 F1、F5 和 F7 的预测精度不如其它方法, 所以该方法也可应用于中高色温的日光测量。在测量较低色温光源时, 其误差分布比较平均, 但当计算大于 10000K 色温时的误差比较大, 因此该算法不适合用于高色温的测量。

McCamy 近似公式法最简单, 将待测点的坐标直接代入公式即可求出相关色温, 因而该方法计算速度非常快。对于 5000K 以下较低色温, 照明体 A、B 的计算精度在 5K 以内; 色温低于 4000K 的 F3、F4 的预测误差分别为 4K 和 7.5K, 对大于 4000K 的 F2、F6 的预测误差达到了十几 K, 因而这种方法不适合测量普通荧光灯; F8、F9、F10 等荧光灯的预测误差明显大于其它方法, F11、F12 的误差与黑体轨迹模拟法差不多。当大于 5000K 时, 对 D 照明体的预测误差也都不如其它方法, 照明体 C 的误差在 2K 以内, 对于 F1、F5 和 F7 其误差分别为 1.5K、2.8K 和 5.9K, 精度优于其它方法, 建议测试高色温荧光灯时采用此方法。McCamy 近似公式法的最大优点是算法简洁, 对计算机的内存要求低, 非常适合于便携式仪器的色温测量。

## 4 结束语

实际的色温计算实验表明, 对于不同类型的照明体, 各种色温算法的预测精度也不一样, 同时在不同的测量范围内, 各种算法的计算误差也不尽相同。因而, 在测量光源的相关色温时, 应根据被测光源的类型和相关色温的范围来合理选择相应的预测算法, 充分发挥各种算法的色温预测性能, 从而保证色温测量的准确性和普遍适用性, 并有效地提高仪器设备和实验研究的工作效率。

## 5 参考文献

- [1] Robertson A R. Computation of correlated color temperature and distribution temperature[J]. *J Opt Soc Am*. 1968, 58 ( 11 ) :1528~1535.
- [2] 吴继宗, 叶关荣. 光辐射测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992. 271~272.
- [3] MacAdam D L. *Color Measurement*[M]. Berlin: Springer, 1985. 94~99.
- [4] 胡 超, 叶关荣. 对相关色温计算方法的探讨[J]. 计量学报, 1990, 11 ( 3 ) :222~227.
- [5] Krystek M. An algorithm to calculate correlated color temperature[J]. *Color Research and Application*, 1985, 10 ( 1 ) :38~40.
- [6] Werner H. *Vorlesung Über Approximationstheorie*[M]. Berlin: Springer, 1966.
- [7] Qiu X Z. Formulas for computing correlated color temperature[J]. *Color Research and Application*, 1987, 12 ( 5 ) :285~287.
- [8] McCamy C S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinate[J]. *Color Research and Application*, 1992, 17 ( 2 ) :142~144.