

文章编号: 0253-2239(2009)10-2791-04

## 二分法优化计算 LED 光源相关色温

林 岳 叶烈武 刘文杰 吕毅军

(厦门大学物理系, 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要** 色温和相关色温是 LED 光源的重要参量。从原始光谱数据到色品坐标  $(u, v)$  再到色温和相关色温的计算过程相当复杂, 需要一种优化算法来简化计算量。因此, 从色温的色度学定义出发, 简要分析了直接内插法、逐点法和函数曲线拟合法三种色温计算的经典算法, 并分别指出了它们的优缺点, 在此基础上提出了二分法这种新的色温优化算法。详细介绍了二分法的基本思想、程序流程等。利用软件编程实现这几种算法, 通过普朗克黑体辐射公式计算得到一系列色温的理论光谱和白光 LED 仪器实际测试光谱, 对比二分法和各种经典算法的速度和结果, 证明了二分法是一种适合于计算机程序化实现的高精度高速度的色温算法。

**关键词** 光谱学; 二分法; 色温计算方法; 发光二极管; 相关色温

**中图分类号** O432.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092910.2791

## Optimization Algorithm of Correlated Color Temperature for LED Light Sources by Dichotomy

Lin Yue Ye Liewu Liu Wenjie Lü Yijun

(Fujian Engineering Research Center for Solid-State Lighting, Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract** Color temperature and correlated color temperature (CCT) are important parameters of the LED light sources. The procedure for calculating colorimetric parameters, such as color coordinates  $(u, v)$  and CCT from spectra data, is rather complicated. An advanced algorithm is necessary to simplify the computation. Based on the definition of chromaticity, the advantages and disadvantages of three classical CCT algorithms are analyzed, respectively, and a new dichotomy optimization algorithm is proposed, whose principle and procedure are illustrated in detail. By comparing the results of dichotomy with the other classical algorithms by Planck formula and actual white LEDs spectra, it is proved that the dichotomy is a CCT algorithm with higher accuracy and faster speed.

**Key words** spectroscopy; dichotomy; color temperature algorithm; LED; correlated color temperature (CCT)

### 1 引 言

黑体辐射光源的色温是黑体的绝对温度。当光源的光色与某一温度下黑体辐射光源光色最为接近时, 后者的色温即为光源的相关色温<sup>[1]</sup>。光源的色温是影响照明质量的重要因素之一, 不同色温的光源给人们带来的生理和心理的影响是不同的。因此, 在居室照明设计, 光源设计以及摄影等行业色温

这一概念都起着举足轻重的作用<sup>[2,3]</sup>。在 LED 色度学软件中, 计算 LED 光源色温是一个必不可少的程序。而传统的色温算法存在着很多缺陷<sup>[4]</sup>, 譬如精度低<sup>[5]</sup>, 计算量大等。因此, 设计开发一种优化算法十分必要, 能有效提高色温计算的精度和速度。传统的方法一般都是利用解析近似的方法求得色温, 这些方法虽然计算量少, 但是误差也是很明显的, 而

收稿日期: 2008-10-22; 收到修改稿日期: 2009-02-17

基金项目: 国家 863 计划重大专项 (2006AA03A175), 福建省重大专项 (2006H0092), 福建省自然科学基金 (2008J0030) 和厦门市重大项目 (3502Z20061004) 项目资助。

作者简介: 林 岳 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体照明检测方面的研究。E-mail: linseuphy@yahoo.com.cn

导师简介: 吕毅军 (1973—), 男, 副教授, 主要从事半导体材料光学性质和半导体照明检测方面研究。

E-mail: yjlu@xmu.edu.cn (通信联系人)

最为精确的逐点查表找最小距离的方法却有巨大的计算量。因此,在色温计算中计算量和精确度是互相牵制的两个因素。二分法是一个广泛应用的计算方法,本文利用二分法很好地在这两个因素之间找到了一个平衡点,即利用很少的计算量,获得了逐点法的精确度。

## 2 色温(相关色温)经典算法

### 2.1 内插法

内插法<sup>[6,7]</sup>的思想是:试图寻求距离被测光源的色坐标点最近的两条等色温线,利用几何作图法估算出该色坐标点的相关色温。

由于在 CIE 1960UCS 色度图中,如图 1 所示,所有等色温线均为垂直于黑体轨迹的直线,其斜率  $k$ ,是随着相关色温  $T$  变化的, $k = -1/l$ ,其中  $l$  为黑体色轨迹与该等温线交点(垂足)处的切线的斜率。

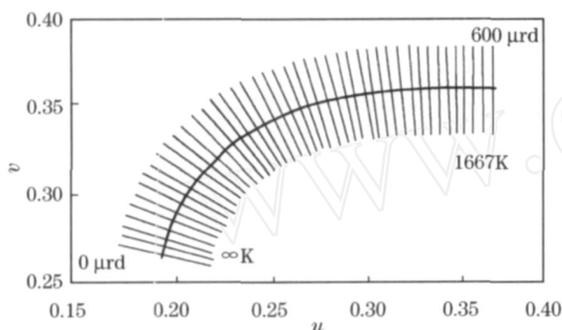


图 1 CIE 1960UCS 色度图中的黑体轨迹和等色温线<sup>[6]</sup>  
Fig. 1 Blackbody locus and Isotherms in CIE 1960UCS chromaticity coordinates<sup>[6]</sup>

当找到距离被测光源色坐标点  $(u, v)$  的最近的两条等温线后,就可以利用公式求出近似相关色温  $T_c$ 。该方法的精度依赖于分区数量,分区越多,则内插的精度就越高,但是同时计算量也相应增大。本文对黑体轨迹均匀地分了 30 个区,即 31 条等温线。

### 2.2 逐点法

根据定义,得到  $(u, v)$  色坐标后,逐点比较其与黑体轨迹点的距离,取最小值点对应色温即为相关色温值。该方法优点是精确度高,缺点是计算量极其庞大,由于黑体轨迹色温是从 1000 K 到 25000 K,每一个色温对应一个色坐标点,因此需要计算 24000 多个距离。

### 2.3 曲线拟合法

曲线拟合法<sup>[8-10]</sup>的主要思路是,利用解析函数拟合色温计算中的一些变量和自变量,解析函数式可以方便地使用牛顿迭代法等算法得到最小距离点

等结果,从而避免了逐点查找比较带来的计算量的增大,也不失为一种好的算法。比如 J. L. Gardner 的 7 阶多项式曲线拟合<sup>[8]</sup>,该作者利用 7 阶多项式,拟合了黑体温度 1000-10000 K 之间的辐射轨迹和色温  $T$  与色坐标  $u$  的函数关系,便于牛顿迭代法的使用和程序的实现。

这种方法的优点是计算量小,一般只需 3-4 步迭代就可得出结果。但是由于解析函数曲线的拟合度无法重现黑体辐射轨迹,尤其在高温部分,所以缺点是结果误差偏大,曲线拟合范围只局限于 1000-10000 K 之间,超出 10000 K 则误差迅速增加。

## 3 二分法优化色温算法

综合 2 节中几种算法发现,计算色温的数学模型就是寻找 CIE 1960UCS 色度图中黑体辐射轨迹上与被测色坐标点的最近距离点,提高算法速度的关键,归根结底就是利用一种筛选算法能迅速去除黑体辐射轨迹的最小距离点以外的区域,而利用二分法就能很好地解决这一问题。整个程序的流程图如图 2 所示。设待测光源的色坐标为  $(u_r, v_r)$ 。

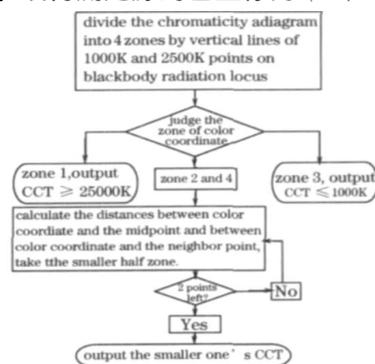


图 2 程序流程框图

Fig. 2 Flow chart of the program

第一步:判断色坐标点所在分区。实验证明,一般光源色温落在 1000-25000 K 之间,对 LED 而言,色温一般落在 2000-10000 K 之间。由于等温线垂直于黑体轨迹,按照这个思想,可以将色度图分为四个区,如图 3 所示。1 区中色温归为 25000 K,3 区中色温归为 1000 K,其中两条分界线分别垂直于黑体轨迹中 1000 K 和 25000 K 的色温坐标。当光源的色坐标点落在 1 区和 3 区时,可直接给出相应的结果。(色温大于等于 25000 K 和小于等于 1000 K)算法的关键是计算落在 2 区和 4 区的色坐标的色温值。

第二步:计算距离。取黑体轨迹上中点的色坐标  $(u, v_1)$ ,则此点将整个黑体轨迹曲线分为两部

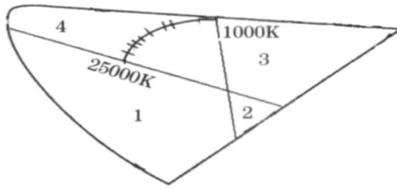


图 3 二分法分区图

Fig. 3 Diagram of space-division of dichotomy

分,设色温大的一侧为 A 段,色温小的一侧为 B 段。如图 4 所示。计算  $(u_r, v_r)$  与  $(u_l, v_l)$  的距离  $D_1$  :

$$D_1 = \sqrt{(u_r - u_l)^2 + (v_r - v_l)^2} \quad (1)$$

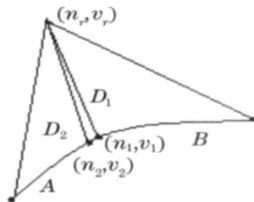


图 4 二分法分区比较长度图示

Fig. 4 Distance comparison of dichotomy space-division

再取与  $(u_l, v_l)$  相邻(即色温相差一度)的点的色坐标,设为  $(u_2, v_2)$ ,并计算其与待测光源的色坐标的距离  $D_2$ 。(此处取色温比大 1 K 的点)

$$D_2 = \sqrt{(u_r - u_2)^2 + (v_r - v_2)^2} \quad (2)$$

表 1 几种算法结果比较(黑体辐射)

Table 1 Comparison among Results of some algorithms(blackbody radiation)

NO.	$u$	$v$	$T_b$ / K	$T_c$ / K	$T_l$ / K	$T_n$ / K	$T_2$ / K
1 #	0.2722	0.3541	2500	2500	2500	2501	2500
2 #	0.2357	0.3408	3500	3500	3502	3490	3500
3 #	0.2160	0.3274	4600	4600	4596	4594	4600
4 #	0.2086	0.3202	5300	5299	5297	5296	5299
5 #	0.2033	0.3141	6000	5999	6000	5980	5999
6 #	0.1981	0.3071	7000	6998	7005	6972	6998
7 #	0.1946	0.2969	8000	7996	8006	7985	7996
8 #	0.1921	0.2933	9000	8994	8995	8970	8994
9 #	0.1903	0.2933	10000	9992	9969	9992	9992
S				4	11	17	4

从表 1 我们可以得到结论:精确度方面,曲线拟合法与逐点法比在不同色温段都有一定误差,最大达到 8 K 左右(7005 K),而且到了 10000 K 以上色温误差迅速上升达到几十 K。内插法误差始终有十几 K 的误差。二分法始终和作为标准的逐点法一致。比较各种算法的标准差,可以发现二分法和逐点法最小,而曲线拟合法和内插法要大得多。计算量方面,逐点法计算量最大,要计算 21000 个距离。而曲线拟合法由于使用了牛顿迭代法,故计算量最

第三步:确定区间段。比较  $D_1$  与  $D_2$  的大小:若  $D_1 < D_2$ ,则舍掉 A 段的所有色坐标;反之则舍掉 B 段的色坐标,剩下的段为新的区间段。

第四步:判断并迭代。确定新区间段的中点并再次运用第二步中的比较距离法,逐渐缩小范围直至剩余最后两个点,则可以直接比较此两点与待测光源坐标的距离从而确定色温。由于本算法的核心是比较均匀色度图上的距离,按照此方法理论上可将误差缩小至 1 K。

## 4 二分法与传统方法的比较

### 4.1 黑体辐射理论光谱测量

利用黑体辐射公式  $P(d, T) = \alpha d^5 (e^{2.2} T - 1)^{-1}$  得出了一系列不同色温的光谱,波长范围从 380 nm 到 780 nm,利用 MATLAB R2008a 编程实现上述几种算法并分别计算色温,结果如表 1 所示。其中:  $T_c$  为逐点法;  $T_l$  为曲线拟合法;  $T_n$  为内插法;  $T_2$  为二分法; S 为标准差。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^b (T_{xn} - T_{0n})^2}{9}}$$

结果取整。  $T_{xn}$  为某一种算法第  $n$  次结果,  $T_{0n}$  为第  $n$  个理论色温值  $T_b$ 。

少,4-5 次迭代。内插法的计算量取决于分区的多少,在本程序中要计算 30 次。二分法的计算量只和黑体轨迹的总点数有关,为  $N = 2 \times \lg 221000 \approx 30$  次。乘以两倍是因为每次判断下一个二分分区方向时候需要多计算一个相邻点的距离。

### 4.2 实际 LED 光谱测试

选用了几个不同色温段的大功率白光 LED 光源,使用德国 Instrument Systems 公司的 LED 测试系统进行测试,10 # -13 # LED 为厦门华联电子有

限公司提供,14#-18# LED 为台湾亿光电子有限公司提供。所有数据均是在正向电流 350 mA,热沉温度 25 条件下测得。同时,我们导出仪器测试的光谱数据,利用二分法以及本文提及的其他方法再次计算色温,将数据列表进行评测,如表 2 所示。其中  $T_c$  为仪器检测值; $T_e$  为逐点法; $T_1$  为曲线拟

合法; $T_n$  为内插法; $T_2$  为二分法; $S$  为标准差。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^b (T_{xn} - T_{0n})^2}{9}}, \text{结果取整。} T_{xn} \text{ 为某一种算法第 } n \text{ 次结果, } T_{0n} \text{ 为第 } n \text{ 号 LED 的仪器测得色温值 } T_c。$$

表二 几种算法结果比较(白光 LED)

Table 2 Comparison among Results of some algorithms(White LED)

NO.	$x$	$y$	$T_c$ / K	$T_e$ / K	$T_1$ / K	$T_n$ / K	$T_2$ / K
10 #	0.3550	0.3844	4788	4785	4779	4795	4785
11 #	0.3485	0.3770	4963	4962	4955	4992	4962
12 #	0.3580	0.3911	4721	4719	4714	4728	4719
13 #	0.3572	0.3906	4741	4743	4737	4753	4743
14 #	0.3204	0.3414	6051	6046	6043	6085	6046
15 #	0.3208	0.3397	6035	6034	6032	6061	6034
16 #	0.3214	0.3408	6007	6005	6002	6031	6005
17 #	0.3221	0.3416	5967	5967	5964	5989	5967
18 #	0.3210	0.3421	6019	6019	6016	6054	6019
$S$				2	6	24	2

从表 2 可以清楚地看出,和仪器检测值相比,二分法的误差大多数在  $\pm 2$  K 左右;曲线拟合法则大约在  $\pm 7$  K,个别管子(10#)的误差达到了近 9 K,这是由于局部色温段解析函数有较大拟合偏差造成的;内插法则始终存在十几 K 的误差。依次计算各种算法的标准差,二分法的标准差最小,曲线拟合法其次而内插法最大,因此相比另外两种算法二分法仍是最精确的算法。

## 5 结 论

二分法作为一种新的计算色温的算法,紧扣色温的标准定义,和以往的几种典型算法相比,在保持了逐点法的高精度的基础上,大大减少了计算量。在相同精度下,二分法的计算量是逐点法的 0.14%。它在精度和计算量上均超过了分区内插法。虽然它的计算量还是比曲线拟合法大,但是它的高精度性是曲线拟合法所不可比拟的。并且曲线拟合法仅拟合了 10000 K 以下的黑体轨迹曲线,10000 K 以上误差很大。

## 参 考 文 献

- Jin Qicheng, Jiao Shulan, Yu Bailin *et al.*. Chromaticity [M]. Beijing: Science Press, 1979: 220~226  
荆其诚,焦书兰,喻柏林等.色度学[M].北京:科学出版社,1979: 220~226
- Wang Yong, Xuhaisong. Colorimetric characterization for scanner based on polynomial regression models[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1135~1138  
王勇,徐海松.基于多项式回归模型的扫描仪色度特征化[J].光学学报,2007, **27**(6): 1135~1138

- Zhang Xiaobo, Wei Fuxiang, Liu Xiang *et al.*. Color-coordinate shift in white organic electroluminescent device based on CBP: BCzVB: Btp2Ir(acac) under large driving currents [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 487~493  
张晓波,委福祥,刘向等.基于CBP:BCzVB:Btp2Ir(acac)体系的白色有机电致发光器件色度漂移研究[J].光学学报,2007, **27**(3): 487~493
- Dai Caihong, Yu Jialin, Yu Jing *et al.*. Uncertainty analysis of the colour temperature and the correlated colour temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 547~552  
代彩红,于家琳,于靖等.颜色温度和和相关色温的不确定度评定方法[J].光学学报,2005, **25**(4): 547~552
- U. S. Council on optical radiation measurements, results of the intercomparison of correlated color temperature calculation, CORM CR3 meeting, Gaithersburg, Maryland, 3 May 1999
- Dai Caihong, Yu Jialin. Discussion on the calculating methods for color temperature of the source [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2000, **21**(3): 183~188  
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
- Zhang Hao, Xu Haisong. Comparative study of correlated color temperature algorithm for lighting sources[J]. *Opt. 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
- J. L. Gardner. Correlated colour temperature uncertainty and estimation [J]. *Metrologia*, 2000, **37**: 381~384
- Huang Zhiwei, Chen Jinkai, Zheng Wei *et al.*. Calculating empirical formula of source color temperature  $T_c$  by orthogonal polynomial regression combined with least-square fit [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1995, **15**(5): 107~113  
黄志伟,陈金铠,郑蔚等.正交多项式最小二乘曲线拟合法求光源色温的经验公式[J].光谱学与光谱分析,1995, **15**(5): 107~113
- Li Shihan, Chen Guoqi. Improving the calculation of relative colour temperature of light sources by the equation of curve-fitting[J]. *J. Electron Devices*, 1995, **15**(5): 106~111  
李世汉,陈国琦.用曲线拟合公式改进计算光源相关色温的方法[J].电子器件,1995, **15**(5): 106~111