

文章编号: 0253-2239(2005)04-547-6

## 颜色温度和相关色温的不确定度评定方法

代彩红<sup>1</sup> 于家琳<sup>1</sup> 于靖<sup>1</sup> 殷纯永<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国计量科学研究院光学处, 北京 100013  
<sup>2</sup> 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要:** 颜色温度和相关色温是光源的重要参量。从色品坐标( $u, v$ )到颜色温度和相关色温的计算过程比较复杂, 很难依据国际标准化组织推荐的不确定度评定方法进行分析。介绍了从光谱辐射功率和色品坐标( $u, v$ )的不确定度出发, 按照国际标准化组织的推荐方法, 得到更为科学合理的颜色温度和相关色温的不确定度评定方法。针对新的国家颜色温度副基准, 分别采用基于数学模型的精确方法、近似方法和几何方法对其不确定度进行了评价, 并与传统方法进行了比较。采用传统方法得到的计算结果偏高, 这是因为传统的计算方法很大程度上基于实验和经验估计, 没有将颜色温度的不确定度与光谱辐射功率和色品坐标( $u, v$ )的不确定度之间建立明确的数学关联, 在分析过程中存在对某一不确定度源进行重复计算的可能。所述的数学推导方法相对传统方法更为科学合理。

**关键词:** 光谱学; 颜色温度; 相关色温; 不确定度; 数值分析

中图分类号: O432.3; O433.1; TB96 文献标识码: A

## Uncertainty Analysis of the Colour Temperature and the Correlated Colour Temperature

Dai Caihong<sup>1</sup> Yu Jialin<sup>1</sup> Yu Jing<sup>1</sup> Yin Chunyong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Optical Division, National Institute of Metrology, Beijing 100013  
<sup>2</sup> Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** The colour temperature and the correlated colour temperature are important parameters of the sources. Because of the complex calculation process between the colour temperature, the correlated colour temperature and the chromatic coordinate ( $u, v$ ), it is difficult to analyze the expression of uncertainty according to the international organization for standardization (ISO) guide. Based on the ISO guide to the expression of uncertainty, correlated colour temperature uncertainty is derived from the analytical equation between the chromatic coordinate ( $u, v$ ) and the colour temperature. Accurate analytical method, approximate calculation, geometrical projection method and traditional method are discussed and compared, which are used to evaluate the uncertainty of the new national secondary standard of colour temperature at National Institute of Metrology (NIM). Traditional uncertainty analysis is mostly based on experimental statistic and experience estimation, and no mathematical relation is found between the colour temperature uncertainty and the spectral irradiance values. The analytical methods described in this paper are more accurate and reasonable.

**Key words:** spectroscopy; colour temperature; correlated colour temperature; uncertainty; numerical analysis

### 1 引言

颜色温度和相关色温是根据 CIE1960 UCS 均匀色品图的色品坐标( $u, v$ )计算出来的。从色品坐标( $u, v$ )到颜色温度和相关色温的计算过程比较复杂, 很难用一个清晰、简单的数学表达式来描述<sup>[1~6]</sup>。色品坐标( $u, v$ )的计算一般基于实验测量的光谱辐射功

率分布, 因此  $u, v$  之间存在相关性。虽然国际标准化组织(ISO)推荐了计算测量不确定度的通用方法, 由于上述复杂性, 很难运用国际标准化组织推荐的方法对颜色温度和相关色温的不确定度进行评定<sup>[7~10]</sup>。

本文介绍了从光谱辐射功率和色品坐标( $u, v$ )的不确定度出发, 按照国际标准化组织的推荐方法,

作者简介: 代彩红(1974~), 女, 河南人, 助理研究员, 清华大学博士研究生, 主要从事基于高温黑体的光谱辐射亮度和光谱辐射照度、颜色温度和分布温度、紫外辐射测量等方面的理论和实验研究。E-mail: daicaihong@nim.ac.cn。

收稿日期: 2004-05-19; 收到修改稿日期: 2004-09-20

得到更为科学合理的颜色温度和相关色温的不确定度评定方法。应用于新的国家颜色温度基准,分别对 2353 K 和 2856 K 颜色温度副基准灯的测量不确定度进行了评定,并与我国传统采用的方法进行了比较讨论。

## 2 颜色温度和相关色温不确定度的数学推导

光源的颜色温度和相关色温  $T$  是色品坐标  $(u, v)$  的函数,其不确定度  $u_c(T)$  可表示为<sup>[7~9]</sup>

$$u_c^2(T) = \left(\frac{\partial T}{\partial u}\right)^2 u_c^2(u) + \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)^2 u_c^2(v) + 2r_{uv} \frac{\partial T}{\partial u} \frac{\partial T}{\partial v} u_c(u) u_c(v). \quad (1)$$

### 2.1 色品坐标 $u, v$ 的不确定度

通过光谱辐射计获得光源的相对光谱功率分布  $E(\lambda)$  后,先计算出光源的三刺激值  $X, Y, Z$ ,再得到

光源在 CIE 1960 UCS 均匀色品图中的色品坐标  $(u, v)$  值,从而计算光源的颜色温度或相关色温<sup>[1~3]</sup>。用  $E_i, \bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$  代替  $E(\lambda), \bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  则三刺激值  $X, Y, Z$  可表示为

$$\begin{cases} X = \sum_{i=380}^{780} E_i \bar{x}_i, \\ Y = \sum_{i=380}^{780} E_i \bar{y}_i, \\ Z = \sum_{i=380}^{780} E_i \bar{z}_i, \end{cases} \quad (2)$$

色品坐标  $(u, v)$  定义为

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

根据国际标准化组织推荐的不确定度评定方法,由(3)式得  $u$  的不确定度  $u_c(u)$  的表达式<sup>[7~9]</sup>的表达式类似<sup>[7~9]</sup>:

$$u_c^2(u) = \left(\frac{\partial u}{\partial X}\right)^2 u_c^2(X) + \left(\frac{\partial u}{\partial Y}\right)^2 u_c^2(Y) + \left(\frac{\partial u}{\partial Z}\right)^2 u_c^2(Z) + 2r_{XY} \frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial u}{\partial Y} u_c(X) u_c(Y) + 2r_{XZ} \frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial u}{\partial Z} u_c(X) u_c(Z) + 2r_{YZ} \frac{\partial u}{\partial Y} \frac{\partial u}{\partial Z} u_c(Y) u_c(Z), \quad (4)$$

其中相关系数  $r_{XY}$  表示为( $r_{XZ}, r_{YZ}$  表达式类似)<sup>[7~9]</sup>:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=380}^{780} \bar{x}_i \bar{y}_i u_c^2(E_i)}{\left[ \sqrt{\sum_{i=380}^{780} \bar{x}_i^2 u_c^2(E_i)} \sqrt{\sum_{i=380}^{780} \bar{y}_i^2 u_c^2(E_i)} \right]}, \quad (5)$$

其中  $u_c(E_i)$  为光谱辐射照度的不确定度,它是随波长变化的。设  $\alpha_i$  是在每一个波长上的光谱辐射照度的相对标准不确定度,则  $u_c(E_i)$  可表示为

$$u_c(E_i) = \alpha_i E_i, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{由(3)式得: } \frac{\partial u}{\partial X} &= \frac{4-u}{X+15Y+3Z}, & \frac{\partial u}{\partial Y} &= \frac{-15u}{X+15Y+3Z}, & \frac{\partial u}{\partial Z} &= \frac{-3u}{X+15Y+3Z}, \\ \frac{\partial v}{\partial X} &= \frac{-v}{X+15Y+3Z}, & \frac{\partial v}{\partial Y} &= \frac{6-15v}{X+15Y+3Z}, & \frac{\partial v}{\partial Z} &= \frac{-3v}{X+15Y+3Z}, \end{aligned} \quad (7)$$

(4) 式中  $X, Y, Z$  的不确定度表示为

$$u_c^2(X) = \sum_{i=380}^{780} u_c^2(E_i) \bar{x}_i^2; \quad u_c^2(Y) = \sum_{i=380}^{780} u_c^2(E_i) \bar{y}_i^2; \quad u_c^2(Z) = \sum_{i=380}^{780} u_c^2(E_i) \bar{z}_i^2, \quad (8)$$

则  $u, v$  的不确定度  $u_c(u), u_c(v)$  为

$$\begin{aligned} u_c(u) &= \left\{ (u-4)^2 \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{x}_i^2 + u^2 \left[ 225 \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{y}_i^2 + 9 \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{z}_i^2 \right] + 30u(u-4) \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{x}_i \bar{y}_i + \right. \\ &\quad \left. 6u(u-4) \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{x}_i \bar{z}_i + 90u^2 \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{y}_i \bar{z}_i \right\}^{1/2} / (X + 15Y + 3Z), \\ u_c(v) &= \left\{ 9(5v-2)^2 \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{y}_i^2 + v^2 \left[ \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{x}_i^2 + 9 \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{z}_i^2 \right] + 6v(5v-2) \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{x}_i \bar{y}_i + \right. \\ &\quad \left. 6v^2 \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{x}_i \bar{z}_i + 18v(5v-2) \sum_{i=380}^{780} \alpha_i^2 E_i^2 \bar{y}_i \bar{z}_i \right\}^{1/2} / (X + 15Y + 3Z). \end{aligned} \quad (9)$$

## 2.2 相关系数 $r_w$ 的确定<sup>[7~9]</sup>

(1)式中  $r_w$  是色坐标  $(u, v)$  的相关系数,表示为

$$r_w = \frac{\sum_{i=380}^{780} \frac{\partial u}{\partial E_i} \frac{\partial v}{\partial E_i} u_c^2(E_i)}{\left[ \sqrt{\sum_{i=380}^{780} \left( \frac{\partial u}{\partial E_i} \right)^2 u_c^2(E_i)} \sqrt{\sum_{i=380}^{780} \left( \frac{\partial v}{\partial E_i} \right)^2 u_c^2(E_i)} \right]}, \quad (10)$$

其中 
$$\frac{\partial u}{\partial E_i} = \frac{4\bar{x}_i - u(\bar{x}_i + 15\bar{y}_i + 3\bar{z}_i)}{\sum_{i=380}^{780} E_i(\bar{x}_i + 15\bar{y}_i + 3\bar{z}_i)}, \quad \frac{\partial v}{\partial E_i} = \frac{6\bar{y}_i - v(\bar{x}_i + 15\bar{y}_i + 3\bar{z}_i)}{\sum_{i=380}^{780} E_i(\bar{x}_i + 15\bar{y}_i + 3\bar{z}_i)}$$

## 2.3 求 $\partial T/\partial u$ 和 $\partial T/\partial v$ <sup>[7~10]</sup>

设光源色坐标点  $(u, v)$  到黑体轨迹的距离为  $d$ , 而  $(u_T, v_T)$  是黑体轨迹上的一点, 则  $d$  表示为

$$d = [(u - u_T)^2 + (v - v_T)^2]^{1/2}. \quad (12)$$

当光源色坐标点  $(u, v)$  与黑体轨迹的距离  $d$  趋近于最小时, 则过  $(u_T, v_T)$  点的等色温线所对应的温度趋于光源的颜色温度或相关色温  $T$ , 即

$$\frac{\partial d}{\partial T} = \left\{ -\frac{\partial u_T}{\partial T}[u - u_T] - \frac{\partial v_T}{\partial T}[v - v_T] \right\} / d = 0, \quad (13)$$

令

$$F = \frac{\partial u_T}{\partial T}[u - u_T] + \frac{\partial v_T}{\partial T}[v - v_T] = 0, \quad (14)$$

则  $(\partial T/\partial v)$  的表达式类似)

$$\frac{\partial T}{\partial u} = -\frac{\partial F}{\partial u} / \frac{\partial F}{\partial T} = -\left( \frac{\partial u_T}{\partial T} \right) / \left[ (u - u_T) \frac{\partial^2 u_T}{\partial T^2} - \left( \frac{\partial u_T}{\partial T} \right)^2 + (v - v_T) \frac{\partial^2 v_T}{\partial T^2} - \left( \frac{\partial v_T}{\partial T} \right)^2 \right], \quad (15)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u_T}{\partial T} &= 4(X_T + 15Y_T + 3Z_T)^{-2} [(15Y_T + 3Z_T)X'_T - 15X_T Y'_T - 3X_T Z'_T], \\ \frac{\partial^2 u_T}{\partial T^2} &= 4(X_T + 15Y_T + 3Z_T)^{-3} \{ -2(X'_T + 15Y'_T + 3Z'_T) [(15Y_T + 3Z_T)X'_T - 15X_T Y'_T - 3X_T Z'_T] + \\ &\quad (X_T + 15Y_T + 3Z_T) [X''_T (15Y_T + 3Z_T) - 15X_T Y''_T - 3X_T Z''_T] \}, \\ \frac{\partial v_T}{\partial T} &= 6(X_T + 15Y_T + 3Z_T)^{-2} [-Y_T X'_T + (X_T + 3Z_T)Y'_T - 3Y_T Z'_T], \\ \frac{\partial^2 v_T}{\partial T^2} &= 6(X_T + 15Y_T + 3Z_T)^{-3} \{ -2(X'_T + 15Y'_T + 3Z'_T) [-Y_T X'_T + (X_T + 3Z_T)Y'_T - 3Y_T Z'_T] + \\ &\quad (X_T + 15Y_T + 3Z_T) [-Y_T X''_T + (X_T + 3Z_T)Y''_T - 3Y_T Z''_T] \}, \end{aligned} \right. \quad (16)$$

(16) 式中  $X'_T, Y'_T, Z'_T, X''_T, Y''_T, Z''_T$  分别是  $X, Y, Z$  对  $T$  的一阶和二阶导数。 $X'_T$  和  $X''_T$  表示为  $(Y'_T, Z'_T, Y''_T, Z''_T)$  的表达式类似):

$$X'_T = \frac{\partial X_T}{\partial T} = \sum_{i=380}^{780} \frac{\partial E(\lambda, T)}{\partial T} \bar{x}_i \Delta i, \quad X''_T = \frac{\partial^2 X_T}{\partial T^2} = \sum_{i=380}^{780} \frac{\partial^2 E(\lambda, T)}{\partial T^2} \bar{x}_i \Delta i, \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(\lambda, T)}{\partial T} &= C_1 C_2 \lambda^{-6} T^{-2} \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-2}, \\ \frac{\partial^2 E(\lambda, T)}{\partial T^2} &= C_1 C_2 \lambda^{-6} T^{-3} \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-2} \times \\ &\quad \left\{ -2 - C_2 \lambda^{-1} T^{-1} + 2C_2 \lambda^{-1} T^{-1} \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

## 2.4 颜色温度和相关色温的不确定度 $u_c(T)$

将(9)式, (10)式, (15)式代入(1)式, 可计算出光源的颜色温度和相关色温的不确定度  $u_c(T)$ 。

## 3 求 $\partial T/\partial u$ 和 $\partial T/\partial v$ 的近似方法

在 2.3 中, 求  $\partial T/\partial u, \partial T/\partial v$  的过程比较复杂, 为了简化计算,  $\partial T/\partial u, \partial T/\partial v$  可用五次和三次多项式来近

似<sup>[9]</sup>(仅适用于 1000~10000 K 颜色温度范围):

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial u} = & -5918.47 + 9.69941T - 0.00958899T^2 + \\ & 1.88114 \times 10^{-6} T^3 - 1.67343 \times 10^{-10} T^4 + \\ & 5.42081 \times 10^{-15} T^5, \quad (19) \\ \frac{\partial T}{\partial v} = & -3851.70 + 8.40689T - \\ & 0.00362952T^2 + 3.71034 \times 10^{-8} T^3. \end{aligned}$$

### 4 求颜色温度和相关色温不确定度的几何方法<sup>[8]</sup>

几何方法求颜色温度和相关色温的不确定度示意图如图 1。光源在 1960 色空间的色坐标为  $(u, v)$ ，经过该点的等(相关)色温线为  $T$ 。设色坐标  $(u, v)$  的不确定度分别为  $u_c(u), u_c(v)$ ，形成不确定度椭圆，分别求椭圆切线(与黑体色轨迹垂直)所对应的色温  $T_1, T_2$ 。即颜色温度不确定度的上下限。

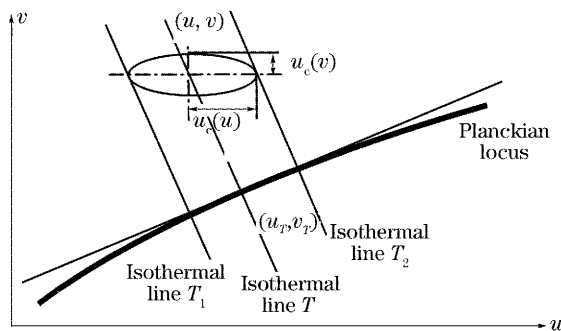


图 1 用几何方法求颜色温度和相关色温不确定度的示意图

Fig.1 Schematic of the geometrical estimation of the (correlated) colour temperature uncertainty

表 1 2353 K 国家颜色温度副基准灯的不确定度分析 ( $k=1$ )

Table 1 Uncertainty analysis of the national secondary standard lamps of 2353 K colour temperature ( $k=1$ )

Lamp No.	# 1263	# 995	# 1015	# 1001	# 990	# 165
Current /A	2.4358	2.5067	2.4719	2.4010	2.4567	2.3095
Colour temperature CCT /K	2345.6	2340.0	2336.7	2347.1	2347.8	2334.7
Chromaticity coordinate $u$	0.280819	0.281151	0.281343	0.280728	0.280680	0.281477
Chromaticity coordinate $v$	0.355892	0.355990	0.356048	0.355901	0.355938	0.356025
Uncertainty of $u, u_c(u)$	0.000097	0.000097	0.000097	0.000097	0.000097	0.000097
Uncertainty of $v, u_c(v)$	0.000019	0.000019	0.000019	0.000019	0.000019	0.000019
Correlation coefficient $r_{uv}$	-0.45961	-0.46334	-0.46623	-0.45966	-0.46019	-0.46466
Uncertainty of CCT(1) /K	1.5	1.5	1.5	1.6	1.6	1.5
Uncertainty of CCT(2) /K	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Uncertainty of CCT(3) /K	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6

### 5 实验分析

我国的颜色温度基准建于 1975 年,在 1999 年进行了技术改造。新基准采用高温黑体作为基准辐射源,采用光谱比较替代法,通过光谱辐射计得到颜色温度副基准灯的相对光谱辐射功率分布,再计算出颜色温度。在 380~780 nm 波长范围,颜色温度副基准灯的光谱辐射照度的相对标准不确定度见图 2。不确定度来源包括光谱辐射照度的测量重复性、高温黑体的温度测量、高温黑体的温度不均匀性、高温黑体的温度不稳定性、辐射源的尺寸效应、测量系统的非线性、电流测量及单色仪波长的准确度和重复性等。

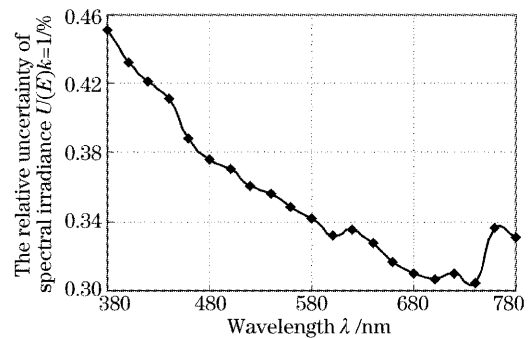


图 2 颜色温度副基准灯的光谱辐射照度测量不确定度 ( $k=1$ )

Fig.2 The relative standard uncertainty of spectral irradiance of the national secondary standard of colour temperature ( $k=1$ ) 将颜色温度副基准灯的光谱辐射照度的相对标准不确定度引入,采用本文介绍的算法分别计算 2353 K 和 2856 K 颜色温度副基准灯的不确定度<sup>[1,2]</sup>,结果见表 1 和表 2。其中“Uncertainty of CCT(1)、(2)、(3)”指分别采用本文所描述的精确方法、近似方法和几何方法计算的颜色温度的不确定度。

表 2 2856 K 国家颜色温度副基准灯的不确定度分析 ( $k=1$ )Table 2 Uncertainty analysis of the national secondary standard lamps of 2856 K colour temperature ( $k=1$ )

Lamp No.	# 1263	# 995	# 1015	# 1001	# 990	# 165
Current /A	3.2339	3.3364	3.3013	3.1841	3.2572	3.0458
Colour temperature CCT/K	2857.5	2857.6	2864.8	2863.4	2860.8	2858.9
Chromaticity coordinate $u$	0.255826	0.255818	0.255497	0.255560	0.255662	0.255769
Chromaticity coordinate $v$	0.349688	0.349701	0.349715	0.349711	0.349740	0.349682
Uncertainty of $u$ $u_c(u)$	0.000093	0.000093	0.000093	0.000093	0.000093	0.000093
Uncertainty of $v$ $u_c(v)$	0.000027	0.000027	0.000027	0.000027	0.000027	0.000027
Correlation coefficient $r_{uv}$	-0.30725	-0.30748	-0.30770	-0.30756	-0.30779	-0.30706
Uncertainty of CCT(1)/K	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Uncertainty of CCT(2)/K	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
Uncertainty of CCT(3)/K	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1

从表 1 和表 2 能够看出,采用近似方法和几何方法求颜色温度的不确定度与精确的计算方法结果基本一致。新的国家颜色温度副基准的测量标准不确定度为: $T=2353$  K 时, $u_c=1.6$  K; $T=2856$  K 时, $u_c=2.1$  K。

## 6 我国传统的颜色温度和相关色温不确定度评定方法

在我国传统的颜色温度和相关色温的不确定度评定方法中,不确定度来源包括:颜色温度的测量重复性、高温黑体的温度测量、探测器的非线性、电测系统、波长、黑体发射率、颜色温度的计算方法等。采用传统方法得到的我国颜色温度副基准的测量标准不确定度为: $T=2353$  K 时, $u_c=2.8$  K; $T=2856$  K 时, $u_c=3.1$  K。

由于计算和推导的复杂性以及历史原因,长期以来,我国颜色温度基准的不确定度评定主要基于实验和经验估计,没有严格按照国际标准化组织推荐的不确定度评定方法进行。

采用传统方法与本文所描述的方法得到的不确定度结果差异较大。因为传统的不确定度评定方法不是基于颜色温度和相关色温计算的数学模型,而是很大程度上依据实验分析和经验估计,没有将颜色温度的不确定度与光谱辐射功率和色品坐标( $u, v$ )的不确定度之间建立明确的数学关联。因此在分析过程中存在对某一不确定度来源重复计算的可能,由于各影响因子之间关系的复杂性,很难在不确定度分析过程中将重复因子去除。例如:“颜色温度的测量重复性”是传统方法中的主要不确定度来源之一,根据贝塞尔公式计算出测量结果的标准偏差。然而该项不确定度不仅包含光谱辐射照度测量

的重复性,还包含颜色温度计算的不确定度。而后者又在“颜色温度的计算方法”不确定度源中被重新评估。此外,在 380~780 nm 波长范围,光谱辐射照度数据对颜色温度的影响关系,光谱辐射照度的测量不确定度对颜色温度的测量不确定度的影响关系在本文所描述的不确定度数值分析方法中得到充分体现,可用清晰的数学表达式表示。但是在传统的评价方法中关系模糊不清。图 3 和图 4 分别描述了不同波长的光谱辐射照度数据增加 1% 对颜色温度数值影响的权重关系,以及光谱辐射照度的测量不确定度增加 1% 对颜色温度的测量不确定度的影响。

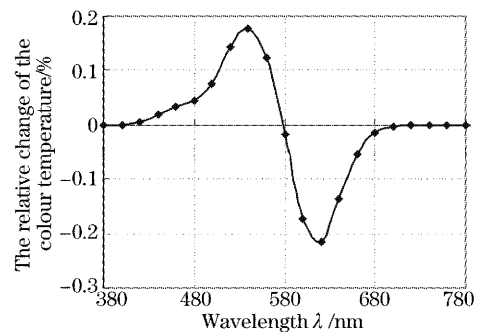


图 3 不同波长的光谱辐射照度数据增加 1% 对颜色温度的影响

Fig. 3 The relative change of colour temperature influenced by the 1% increase of spectral irradiance values at different wavelengths

与传统的颜色温度和相关色温的不确定度评定方法相比,本文描述的数学推导方法更加科学和严谨。

严格按照国际标准化组织推荐的不确定度评定方法,从光谱辐射功率和色品坐标( $u, v$ )的不确定度出发,得到颜色温度和相关色温的不确定度评定公式。

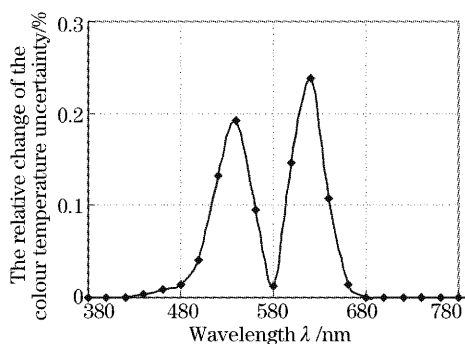


图 4 不同波长的光谱辐射照度不确定度增加 1% 对颜色温度不确定度影响

Fig. 4 The relative change of colour temperature uncertainty influenced by the 1% increase of spectral irradiance uncertainties at different wavelengths

## 7 结 论

本文采用基于数学模型的不确定度评定方法,应用于新的国家颜色温度基准,分别对颜色温度副基准灯在 2353 K 和 2856 K 的测量不确定度进行了评定和比较。所介绍的三种方法各具优缺点。第一种方法比较精确,整个推导没有任何近似;第二种方法采用了适当的近似,计算简单,但仅适用于 1000~10000 K 颜色温度和相关色温的计算;第三种方法由作图法得到,直观清晰但是误差较大。传统方法与上述三种方法之间的偏差较大。新的基于数学模型的颜色温度和相关色温的不确定度评定方法,将颜色温度的不确定度与光谱辐射功率和色品坐标( $u, v$ )的不确定度之间建立了明确的数学关联,更具科学性和合理性。

此外,颜色温度的计算方法也是一项不可忽略的不确定度来源,不同计算方法之间的差异有可能超出预想。国际计量组织在 1999 年 6 月举办了针对相关色温计算方法的国际比对,比对提供了七种常用光源的光谱功率分布数据,共有七个实验室和世界著名公司参加,分别采用不同的方法独立计算相关色温。结果表明:对高色温光源,颜色温度计算

方法的差异高达几 K 到十几 K。颜色温度的计算方法误差不容忽略,如果在建立颜色温度不确定度分析数学模型时能考虑到计算方法带来的误差,将更为严谨和完善。

致谢 衷心感谢中国计量科学研究院的杨臣铸研究员对本文提出了许多宝贵的意见和建议。

## 参 考 文 献

- 1 Dai Caihong, Yu Jialin. Discussion on the calculating methods for color temperature of the source[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2000, **21**(3): 183~188 (in Chinese)  
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
- 2 Dai Caihong, Yu Jialin, Yin Chunyong. Experiment analysis of correlated color temperature and distribution temperature of the source [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(3): 344~346 (in Chinese)  
代彩红,于家琳,殷纯永. 光源相关色温与分布温度的实验分析[J]. 光学技术, 2003, **29**(3): 344~346
- 3 Hu Chao, Ye Guanrong. On the calculation of correlated colour temperature[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1990, **11**(3): 222~227 (in Chinese)  
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
- 4 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 (in Chinese)  
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
- 5 A. R. Robertson. Computation of correlated color temperature and distribution temperature[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1968, **58**(11): 1528~1535
- 6 M. Krystek. An algorithm to calculate correlated colour temperature[J]. *Colour Research and Application*, 1985, **10**(1): 38~40
- 7 J. L. Gardner, R. B. Frenkel. Correlation coefficients for tristimulus response value uncertainties[J]. *Metrologia*, 1999, **36**(5): 477~480
- 8 J. Fontecha, J. Campos, A. Corrons *et al.*. An analytical method for estimating correlated colour temperature uncertainty [J]. *Metrologia*, 2002, **39**(6): 531~536
- 9 J. L. Gardner. Correlated colour temperature-uncertainty and estimation[J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5): 381~384
- 10 J. L. Gardner. Uncertainty estimation in colour measurement [J]. *Colour Research and Application*, 2000, **25**(5): 349~355