

彩色测温方法中物体辐射色域的界定和划分

王安全, 程晓舫, 陆少松

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 230026)

[摘要] 介绍了彩色测温方法的基本原理, 并基于可见光波段内光谱发射率的线性模型给出物体辐射颜色色品的表述; 明确了一个色品最多只能求解出两个温度; 解决了彩色测温方法中物体辐射色域的界定问题, 并将辐射色域划分为温度单解域和双解域。

[关键词] 辐射测温; 彩色测温; 色域; 发射率

[中图分类号] O432 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)08-0054-04

引言

辐射测温方法通过测量物体的辐射来反演温度, 具有接触式测量方法所不具备的诸多优点, 因此一直是温度测量方法研究的一个热点。其中, 彩色测温方法通过测量物体在可见光波段内的辐射信息——颜色来反演温度。由生活经验可知热致发光的颜色不会囊括自然界中所有颜色。那么如何界定物体辐射颜色在色品图中所占据的区域呢? 另外, 自然界中还存在“同色不同温”的现象, 即同一颜色可能对应着不同温度, 这时可能出现多个温度解, 那么能否确定某一颜色所对应的温度解的个数呢? 如果可以确定, 那么温度解个数在整个辐射色域内又是如何分布的呢? 作者将在文中讨论并解答这些问题。

1 彩色测温方法原理

物体发射光谱的颜色可以用三系数方程^[1]定量描述,

$$\begin{cases} R = \int_{0.38\mu\text{m}}^{0.78\mu\text{m}} \bar{r}(\lambda) E(\lambda, T) d\lambda \\ G = \int_{0.38\mu\text{m}}^{0.78\mu\text{m}} \bar{g}(\lambda) E(\lambda, T) d\lambda \\ B = \int_{0.38\mu\text{m}}^{0.78\mu\text{m}} \bar{b}(\lambda) E(\lambda, T) d\lambda. \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 和 $\bar{b}(\lambda)$ 是 CIE- RGB 系统标准色度观察者光谱三刺激值。(1) 式给出了物体的颜色和其热辐射之间的关系。为了建立温度和颜色之间的定量关系, 还需要对物体的发射率给出描述。

对于具有连续辐射性质的物体, 其发射率虽然在全波长或宽波段内随波长的变化关系复杂, 但在仅有 $0.4\mu\text{m}$ 宽的可见光波段内, 则可近似地看成一条直线,

$$\epsilon(\lambda, T) = a(T) - c(T) \left(\frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) = a(T) - c(T)\Lambda, \quad (2)$$

其中 $\lambda = 0.38\mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.78\mu\text{m}$ 。

注意到 $0 < \epsilon(\lambda, T) \leq 1$, (1) 式可进一步简写为:

$$\epsilon(\lambda, T) = a(T)[1 - m(T)\Lambda], m = c/a \quad \text{且 } a > 0, -\infty < m \leq 1. \quad (3)$$

于是, 可见光波段内物体的光谱发射功率可以表述为:

$$E(\lambda, T) = a(T)[E_b(\lambda, T) - m(T)E_1(\lambda, T)]. \quad (4)$$

其中 $E_b(\lambda, T)$ 是黑体的光谱发射功率; $E_1(\lambda, T) = \Lambda E_b(\lambda, T)$, 称之为色核体的光谱发射功率, 与 $E_b(\lambda, T)$ 一样, $E_1(\lambda, T)$

[收稿日期] 2002-02-06

[基金项目] 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(97035821); 安徽省教育厅重点科研计划资助项目(2001kj2652d)

[作者简介] 王安全(1976-), 男, 江苏丰县人, 中国科技大学博士研究生

仅是波长和温度的函数。

将 (4) 式代入 (1) 式就可得到物体的颜色和温度的定量关系式, 其中含有 $a(T)$, $c(T)$ 和 T 3 个待定参数, R 、 G 和 B 3 个色系数测量值, 因此构成数学求解封闭条件。

实际上, 很多情况下使用三色系数的绝对值进行温度测量有着诸多不便。通常使用三色系数各自在 $(R+G+B)$ 总量中的相对比例,

$$r = \frac{R}{R+G+B} = \frac{R}{\Sigma}, g = \frac{G}{R+G+B} = \frac{G}{\Sigma},$$

$$b = \frac{B}{R+G+B} = \frac{B}{\Sigma}. \quad (5)$$

称 r 、 g 和 b 为某一颜色的色品坐标, 简称色坐标。由于 $r+g+b=1$, 所以只用其中任意两个参数对 (通常选择 r 和 g) 就可表示一个颜色。这时的待定参数为 $m(T)$, T , 颜色值 (r, g) 为测量值。以上就是温度的彩色测量原理^[2]。

2 彩色测温方法中涉及的色域

2.1 物体的辐射颜色

为方便书写, 定义两个函数运算符号 F_b [] 和 F_1 [] 分别为,

$$F_b[f] = \int_{0.38\mu\text{m}}^{0.78\mu\text{m}} fE_b(\lambda, T)d\lambda,$$

$$F_1[f] = \int_{0.38\mu\text{m}}^{0.78\mu\text{m}} fE_1(\lambda, T)d\lambda.$$

按 (4) 式形式改写 (1) 式可得色坐标 (r, g) ,

$$r = \frac{R}{\Sigma} = \frac{R_0 - mR_1}{\Sigma_0 - m\Sigma_1} = \frac{1}{1 - m\Delta_1}(r_0 - m\Delta_1 r_1)$$

$$g = \frac{G}{\Sigma} = \frac{G_0 - mG_1}{\Sigma_0 - m\Sigma_1} = \frac{1}{1 - m\Delta_1}(g_0 - m\Delta_1 g_1). \quad (6)$$

其中,

$$r_0 = \frac{R_0}{\Sigma_0} = \frac{F_b[\bar{r}(\lambda)]}{F_b[\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)]},$$

$$g_0 = \frac{G_0}{\Sigma_0} = \frac{F_b[\bar{g}(\lambda)]}{F_b[\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)]},$$

$$r_1 = \frac{R_1}{\Sigma_1} = \frac{F_1[\bar{r}(\lambda)]}{F_1[\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)]},$$

$$g_1 = \frac{G_1}{\Sigma_1} = \frac{F_1[\bar{g}(\lambda)]}{F_1[\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)]},$$

$$0 < \Delta_1 = \frac{\Sigma_1}{\Sigma_0} \leq 1.$$

(r_1, g_1) 称为色核体色坐标, (r_0, g_0) 、 $(r_1,$

$g_1)$ 和 Δ_1 都仅仅是温度的函数。显然, 物体的辐射颜色是黑体辐射颜色和色核体辐射颜色的加权效果。

在 (6) 式中, 令 $m \rightarrow -\infty$, 则可发现: $(r, g) \rightarrow (r_1, g_1)$ 。这意味着色核体颜色是实际物体颜色在 $m \rightarrow -\infty$ 时的极限。

(6) 式不仅给出了通过色坐标求解温度的基本方程, 同时也是研究色域的基本出发点。根据 (6) 式我们可以得到特定温度下特定物体的辐射颜色在色品图上对应的颜色点。

2.2 物体的辐射颜色轨迹

(6) 式给出了特定 (m, T) 下的辐射颜色在色品图上的坐标 (r, g) 。更进一步, 只限定 m 或 T 的取值可分别得到色品图上的等 m 辐射颜色轨迹 (简称等 m 线) 或等温辐射颜色轨迹 (简称等温线)。这里着重讨论一下等温线。

2.2.1 等温线

在 (6) 式中消去 m 可得等温线方程:

$$F_T(r, g, T) =$$

$$(g_0 - g_1)r - (r_0 - r_1)g + (r_0g_1 - r_1g_0) = 0. \quad (7)$$

取温度为某一定值, (7) 式便是标准的直线方程。

变换 (6) 式,

$$m = \frac{1}{\Delta_1} \frac{r - r_0}{r - r_1} = \frac{1}{\Delta_1} \frac{g - g_0}{g - g_1}. \quad (8)$$

对 (8) 式分别求 r 和 g 的偏导,

$$\frac{\partial m}{\partial r} = \frac{1}{\Delta_1} \frac{r_0 - r_1}{(r - r_1)^2}, \quad \frac{\partial m}{\partial g} = \frac{1}{\Delta_1} \frac{g_0 - g_1}{(g - g_1)^2}. \quad (9)$$

(9) 式表明在等温线上 m 值随 r 或 g 呈单调变化, 反之亦然。

于是, 将 (3) 式给出的 m 值的上限 ($m = 1.0$) 和下限 ($m \rightarrow -\infty$) 代入 (6) 式, 就限定了由 (7) 式描述的直线的长度。该直线的两个端点坐标分别为 $(\frac{r_0 - \Delta_1 r_1}{1 - \Delta_1}, \frac{g_0 - \Delta_1 g_1}{1 - \Delta_1})$ 和 (r_1, g_1) 。

因此, 等温线是一条有限长度的直线段。由此解释了同温度下的物体有不同颜色表现的物理现象。

2.2.2 等温线簇的包络线

由温度不同的等温线组成的等温线簇, 在色品图上又形成了一条新的轨迹——等温线簇的包络线, 其参数方程为^[3]:

$$\begin{cases} F_T(r, g, T) = 0 \\ \partial F_T(r, g, T) / \partial T = 0' \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} (g_0 - g_1)r - (r_0 - r_1)g + (r_0g_1 - r_1g_0) = 0 \\ (g'_0 - g'_1)r - (r'_0 - r'_1)g + \\ (r_0g'_1 + r'_0g_1 - r_1g'_0 - r'_1g_0) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中 r'_0 、 g'_0 、 r'_1 和 g'_1 分别为 r_0 、 g_0 、 r_1 和 g_1 对参数 T 的偏导。

包络线和任意等温线相切，包络线也是由所有切点组成的轨迹。将温度 T 代入 (10) 式可得到包络线上一点的色坐标，该点即是等温线 T 和包络线的切点。

图 1 以温度范围 [4 000 K, 8 000 K] 为例，说明色度图上的等温线簇。所有实线构成了等温线簇所覆盖面积的边界，其中曲线 c 即是其包络线，曲线 a 和 b 分别是 m 等于 1 和 $-\infty$ 的等 m 线，曲线 b 即是色核体颜色轨迹（所有温度下的色核体颜色 (r_1, g_1) 在色品图上形成的颜色轨迹）的一部分。

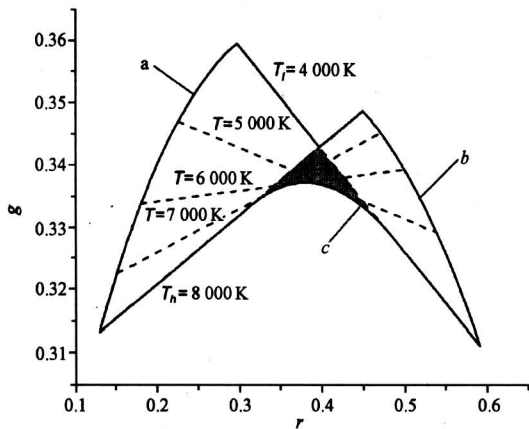


图 1 等温线簇示例

Fig.1 An example of isotherm cluster

2.3 色域的界定

现在我们已经明确了等温辐射颜色被限定在等温线这一有限长度的直线段上。那么再进一步取消等温这一限制，可得到在温度范围 $[T_L, T_H]$ 内的物体辐射颜色在色品图上占据的整个区域。显然这一区域是由 $[T_L, T_H]$ 内所有等温线组成的等温线簇所覆盖的区域。例如，我们所关心的温度范围为 $[800 \text{ K}, \infty]$ ，整个辐射色域为图 2 中实线所围得区域，它是由 5 条颜色轨迹所能围成的最大面

积。这 5 条轨迹分别是：上限和下限等温线 $T = 800 \text{ K}$ （直线段 $DGEF$ ）和 $T = \infty$ （直线段 ABC ）、上限和下限等 m 线， $m = 1.0$ （曲线段 AD ，曲线 a ）和 $m = -\infty$ （曲线段 CGF ，曲线 b ，即为色核体颜色轨迹），以及等温线簇的包络线（曲线段 BE ，曲线 c ）。

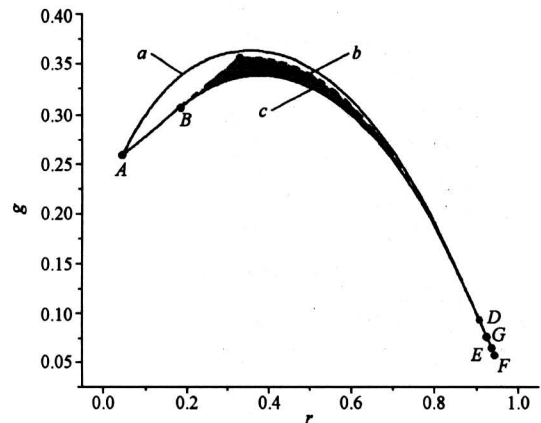


图 2 物体辐射色域

Fig.2 Radiative color gamut of real bodies

事实上，图 1 中由实线围成的区域就是温度范围 [4 000 K, 8 000 K] 的色域。它同样是由温度范围上下限所对应的两条等温线、上下限等 m 线以及包络线这 5 条颜色轨迹所围成的最大区域。这一点适用于任意温度范围的色域。

3 彩色测温方法中色域的划分

3.1 等温线单双解段的划分

由于等温线的斜率由温度决定，所以不同的等温线（或其延长线）必然相交。

包络线是凸曲线，并且等温线和包络线相切，而过任一点最多只能有 2 条直线和凸曲线相切，所以过任一点最多存在 2 条等温线相交于该点。因此在温度求解的过程中，可能并且最多存在 2 个解。如果等温线相交于某一点，则意味着该点对应温度的双解，此时出现“同色不同温”的物理现象。

由于等温线是有限直线段，所以对于特定的等温线 T_0 ，并不能和其它所有的等温线均相交，而是存在一个温度范围 $[T_l, T_h]$ 且 $T_l < T_0 < T_h$ ，温度大于 T_h 或小于 T_l 的等温线与它没有交点。如图 3 所示，对于 $T_0 = 2 500 \text{ K}$ ， T_h 和 T_l 分别等于 $5 128 \text{ K}$ 和 $1 681 \text{ K}$ 。 $[T_l, T_h]$ 称为等温线 T_0 的相交温度范围，或双解范围。

在图 3 所示的等温线 T_0 上，没有其它等温线

与之相交于 AB 段，因此 AB 段上的颜色只有 1 个温度解，称这一段为单解段。相交温度范围内的等温线 T_0 和等温线相交于 BD 段，且 BD 段上的点和相交温度范围内的温度是一一映射，根据这一段上的颜色求解温度时，除 T_0 外会有第 2 个温度解，因此称这一段为双解段。 B 点是单双解段的分界，我们称之为等温线 T_0 的分界点。分界点的位置可以通过如下事实来求解：等温线 T_0 的分界点是等温线 T_h 的 $m = -\infty$ 的端点，也是等温线 T_0 和色核体轨迹 b 的两个交点中非端点的那个交点。这一事实意味着色核体轨迹也是各等温线的分界点形成的轨迹。

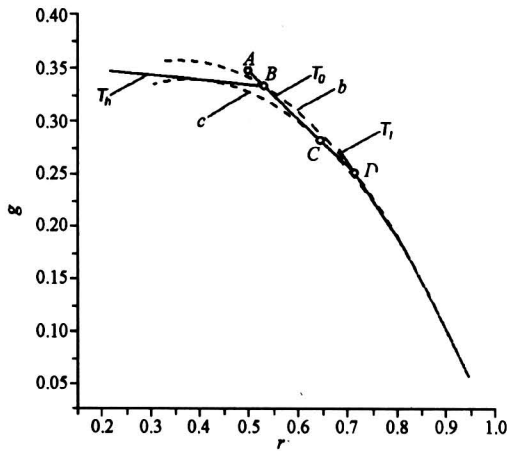


图 3 等温线 (实线)、包络线和色核体轨迹
Fig.3 Isotherms (solid lines), envelope line and color-kernel body locus

在双解段 BD 上有个特殊点 C ，它是等温线和包络线 c 的切点，所以这一点上求解出的第 2 个温度解也为 T_0 ，因此可以说 C 点是一个单解点；另外 C 点还有一个特殊意义：在 BC 段，求解出的第 2 个温度解均大于 T_0 ，我们称这一段为正双解段；在 CD 段，求解出的第 2 个温度解均小于 T_0 ，我们称这一段为负双解段。因此 C 点是正负双解段的分界，称该点为等温线 T_0 的转折点。

需要指出的是，这里等温线单双解段的讨论是基于这样一个事实：等温线簇的温度范围 $[T_L, T_H]$ 完全包含所讨论等温线的相交温度范围 $[T_l, T_h]$ 。如若不然，就会造成图 1 的情形。例如对于等温线 5 000 K，温度范围为 $[4 000 K, 8 000 K]$ 的等温线簇只能与其相交于双解段中的一部分。

3.2 色域中单双解域的划分

3.1 小节说明了等温线可划分为单解段和双解

段，而色域由等温线簇覆盖。因此我们自然而然地想到色域的单解域能否由所有等温线的单解段相加得到，双解域能否由所有等温线的双解段相加得到。要回答这个问题，首先要弄清楚某等温线的单解段能否和其它等温线的双解段相交。如果相交，则双解端相加得到的区域将和单解段相加得到的区域有重叠。而这个问题的答案是显然的：等温线的单解段不会和任何其它等温线相交，否则就不成其为单解段了。

因此，可以通过取所有等温线的单解段的合集来得到色域的单解域，取所有等温线的双解段的合集来得到色域的双解域。另外，等温线的分界点是单双解段的分界，而分界点的轨迹是色核体轨迹，所以色核体轨迹是色域的单双解域的分界。

在图 2 中，阴影部分为色域的双解域。它由上下限等温线、色核体轨迹和包络线围成；具体边界为： BC （上限等温线 ABC 的一部分）、 CG （色核体轨迹 CGF 的一部分）、 GE （下限等温线 $DGEF$ 的一部分）和 BE （包络线）。色域中双解域之外的部分为单解域。

对于图 1 的情况，由于等温线簇的温度范围 $[T_L, T_H]$ 不能完全包含所讨论等温线的相交温度范围 $[T_l, T_h]$ ，所以不能按照上述方法得到单双解域的划分，而须具体作图得到。图 1 中的阴影部分为温度范围 $[4 000 K, 8 000 K]$ 色域的双解域，色域中的其余部分为单解域。

4 结论

在彩色测温方法中，具有连续辐射性质的物体在可见光波段内，光谱发射率可以近似成一条直线。从而可将物体的光谱发射功率的表述为 (4) 式，进而得出物体的辐射颜色的表述 (6) 式。引进了色核体的概念，同黑体类似，色核体也是理想物体，是实际物体的另一极限。实际物体的辐射颜色是黑体辐射颜色和色核体辐射颜色的加权效果。

等温辐射颜色轨迹为一条有限直线段，它又可划分为单解段和双解段，单解段上的颜色只能求解出 1 个温度，而双解段上的颜色可以求解出 2 个温度。1 个颜色最多只能求解出 2 个温度。温度区间所对应的色域由等温线簇所覆盖，其边界由 5 条颜色轨迹围成。与等温线相对应，色域也可划分为单解域和双解域，其分界是色核体辐射颜色轨迹。

(下转第 68 页)

Application of Wavelet Transform to Acoustic Radiation and Scattering

Wen Lihua, Ren Xingmin

(Dept of Civil Engineering & Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[Abstract] Traditional boundary element methods with a full matrix equation for acoustic problems, have been met by a challenge in large-scale scientific computation and numerical simulation in engineering. In this paper, the new wavelet approaches have been presented for solving acoustic radiation and scattering, and structural-acoustic coupling. The boundary quantities are expanded in terms of a basis of the orthogonal wavelets on the interval, and a wavelet spectral formulation for solving acoustic problems is derived. Then coupled wavelet spectral and finite element method is formulated for solving sound-structure interaction. The advantages of the new approaches include a highly sparse matrix system which can be solved rapidly by sparse solvers and accurate modeling of curve surface. In the new technique, the iterative technique of frequencies is established for evaluating frequency-response functions through expanding the integral kernel in Taylor series in integral equation. The new technique was employed to investigate the underwater acoustic radiation from a complicate structure which is composed of shells, stiffening ribs and plates. The comparisons of the results from the new technique with analytic solution show that it has high computational efficiency and good accuracy.

At the end of the paper, the prospects of the application of wavelet analysis to numerical computation in acoustic engineering are discussed.

[Key words] wavelet analysis; acoustic radiation and scattering; structural-acoustic coupling; frequency iteration

(上接第57页)

作者提供了确定和划分物体辐射色域的方法,明确了颜色的温度解的个数,为彩色测温方法求解过程中颜色的取舍和温度解的寻找次数提供了理论依据。

参考文献

- [1] 俞斯乐,等.电视原理[M].北京:国防工业出版社,1984.15~21,30
- [2] 程晓舫,周 洲.彩色三基色温度测量原理的研究[J].中国科学E辑,1997,27(4):343
- [3] 复旦大学数学系.曲线与曲面[M].北京:科学出版社,1977.137

Determination and Division of Radiative Color Gamut in Primary-Color Method for Temperature Measurement

Wang Anquan, Cheng Xiaofang, Lu Shaosong

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, USTC, Hefei 230026, China)

[Abstract] The principle of primary-color method for temperature measurement is firstly introduced in this article. Based on the lineal model of spectral emissivity in the range of visible spectrum, the formulation of radiative chrominance of real bodies is put forward. Afterwards, it's made clear that two temperature solutions can be derived from one specific chrominance at most. The radiative color gamut is determined and divided into two components, the single-solution gamut and the dual-solution gamut.

[Key words] temperature measurement; primary-color method; color gamut; emissivity