

光学系统彩色成象性能的研究

周武元

(淮南师范专科学校物理系)

本文从多色光的点扩散函数出发,以彩色电视系统为典型例子,介绍了用彩色光学传递函数(彩色 OTF)评价光学系统彩色成象性能的一些关键性问题。

用光学传递函数(Optical Transfer Function, 简称为 OTF)来全面评价象质,可将光学系统的分析工作提高到信息论的水平^[1,2]。它是鉴别率法和星点法的进一步发展,可以看作是对星点法的定量说明,因而更加科学和实用。光学传递函数已经在光学镜头的评价、光学自动设计过程的控制、光学仪器的制造和使用、彩色摄影和光学信息处理等方面得到了普遍的应用,前景十分美好。

一、彩色 OTF

通常所说的 OTF,都是指单色光的。然而,许多光学仪器都是在白光下使用的,例如拍摄外景的摄影机和野外观察的目视仪器等。除了白色光外,我们还要使用多色光这个术语,它的含义比白色光更广泛,因为只要光谱成分多于一个波长的光,无论是连续光谱(包括白光或显出彩色的光)或线光谱,甚至只有几根谱线,都称为多色光。在多色光下使用的光学仪器,它的象质显然要用多色光的光学传递函数来评价。对三刺激值求三个多色光的 OTF,并以三个为一组,称为彩色 OTF。

二、光学串

成象过程一般是要经过许多环节的。例如,为了得到一张放大的摄影照片,需经过摄影物镜成象,照相底片感光、显影,放大机物镜成象,放大纸感光、显影。这些环节中的每一个都会

影响象的质量。由成象过程的一连串独立环节所构成的复合系统,称为光学串。

对于线性系统,光学串的 OTF 是每一个独立环节的 OTF 的乘积,这个法则叫相乘律。若光学串由 k 个独立环节组成,则

$$\tilde{H}(s, t) = \tilde{H}_1(s, t) \cdot \tilde{H}_2(s, t) \cdots \tilde{H}_k(s, t), \quad (1)$$

其中 s, t 是空间频率数, $\tilde{H}(s, t)$ 是光学串的 OTF, $\tilde{H}_1(s, t), \tilde{H}_2(s, t) \cdots \tilde{H}_k(s, t)$ 分别是每一个独立环节的 OTF。由于

$$\tilde{H}(s, t) = \tilde{M}(s, t) e^{i\tilde{\phi}(s, t)}, \quad (2)$$

因而可以得到

$$\begin{cases} \tilde{M}(s, t) = \tilde{M}_1(s, t) \cdot \tilde{M}_2(s, t) \cdots \tilde{M}_k(s, t), \\ \tilde{\phi}(s, t) = \tilde{\phi}_1(s, t) + \tilde{\phi}_2(s, t) + \cdots \\ + \tilde{\phi}_k(s, t). \end{cases} \quad (3)$$

各独立环节的相位移动,由于正负号不同,可以相互补偿;而 $\tilde{M}(s, t)$ 值,除零频外,均小于 1。各个独立环节的 $\tilde{M}(s, t)$ 都会使光学串的 $\tilde{M}(s, t)$ 值降低,不可能有补偿作用。可见光学串的 $\tilde{M}(s, t)$ 值比任何一个独立环节的 $\tilde{M}(s, t)$ 值都低。所以在应用时,应使每个独立环节的 $\tilde{M}(s, t)$ 都尽量好。

三、电视摄影机的三个多色光点扩散函数

在彩色电视摄影机中,对被摄体成象时,三原色的量按比例产生三个信号。这些信号的产生、传递和再生过程的模型如图 1 所示^[3]。产生信号的部分(电视摄影机)是由光学系统(镜头和分光光学系统)和摄象管三个摄象系统组

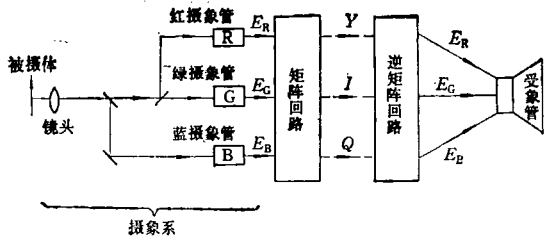


图1 彩色电视系的模型

成。镜头和分色光学系统一起组成成像系统，把被摄体的象成在各摄象管的感光面上，使得各摄象系统分光感光特性(摄象特性)与由电视表色系决定的三刺激值光谱曲线相重合，于是从各摄象管出来的 E_R 、 E_G 和 E_B 信号变成与被摄体三原色的量成比例了。从摄象管出来的三个信号不是原封不动地传送的，而是在送象一侧的矩阵回路中，作如(4)式的演算，转换成 Y 、 I 和 Q 三个传送信号：

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.59 & 0.11 \\ 0.60 & -0.28 & -0.32 \\ 0.21 & -0.52 & -0.31 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_R \\ E_G \\ E_B \end{bmatrix}. \quad (4)$$

当被摄体是多色光的点光源时，用电视摄影机观察它的象，多色光点扩散函数可以认为是单色光的点扩散函数的叠加。把单色光点扩散函数的最大值规格化为 1.0，单色光点扩散函数可写成 $h_i(x - \Delta x_i, y - \Delta y_i)$ ，其中 x 和 y 表示象面上的直角坐标， Δx_i 和 Δy_i 表示由于波长不同引起成像位置的偏离。设光源的分光组成为 $E(\lambda)$ ，三个摄象管的摄象特性为 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $g(\lambda)$ 和 $\bar{b}(\lambda)$ ，则各摄象管接收多色光点扩散函数的强度分布为

$$\begin{cases} h_R(x, y) = \int E(\lambda) \bar{r}(\lambda) h_i(x - \Delta x_i, y - \Delta y_i) d\lambda, \\ h_G(x, y) = \int E(\lambda) g(\lambda) h_i(x - \Delta x_i, y - \Delta y_i) d\lambda, \\ h_B(x, y) = \int E(\lambda) \bar{b}(\lambda) h_i(x - \Delta x_i, y - \Delta y_i) d\lambda. \end{cases} \quad (5)$$

$h_R(x, y)$ 、 $h_G(x, y)$ 和 $h_B(x, y)$ 作为时系列信号取出，就是 E_R 、 E_G 和 E_B 信号，它们可以表

物理

示点扩散函数 (x, y) 位置的彩色。因为三个摄象特性与三刺激值光谱曲线是重合的， h_R 、 h_G 和 h_B 是三刺激值，如果把它变换到 CIE 标准表色系上，就能在色度图上表示点扩散函数在各位置的彩色。同时， $h_R(x, y)$ 、 $h_G(x, y)$ 和 $h_B(x, y)$ 也能表示在 (x, y) 位置的 R(红)、G(绿)和 B(蓝)的原色量。也就是说，把多色光的点扩散函数分解成三原色点扩散函数时，(5)式表示各原色量。

四、各摄象系的 OTF^[4,5]

为了把彩色图象正确地再生在阴极射线管上，光学系统的成象性能和电气系统的信号传递特性都必须良好。电气系统作为三信号的传送电路，它们的传递特性(频率特性)是可以评价的。而光学系统对应 Y 、 I 和 Q 信号的三个 OTF，它的特性也应该能够评价。所谓“对应 Y 、 I 和 Q 的 OTF”，意思是“与 Y 、 I 和 Q 摄象特性相同的、用分光特性测定仪测定的 OTF”。如果知道了对应于 E_R 、 E_G 和 E_B 信号的 OTF (也就是说，如果知道了各摄象系的 OTF)，那么就可以用(4)式具体计算。

多色光的 OTF，就是多色光的点扩散函数作傅里叶变换。电视摄影机三个摄象系统的 OTF，可以用各摄象管在对点光源摄象时，输出信号所给出的点扩散函数强度分布，也就是(5)式作傅里叶变换：

$$\begin{cases} H_R(s, t) = \int E(\lambda) \bar{r}(\lambda) A(\lambda) H_i(s, t) \times e^{-i2\pi(\Delta x_i s + \Delta y_i t)} d\lambda, \\ H_G(s, t) = \int E(\lambda) g(\lambda) A(\lambda) H_i(s, t) \times e^{-i2\pi(\Delta x_i s + \Delta y_i t)} d\lambda, \\ H_B(s, t) = \int E(\lambda) \bar{b}(\lambda) A(\lambda) H_i(s, t) \times e^{-i2\pi(\Delta x_i s + \Delta y_i t)} d\lambda. \end{cases} \quad (6)$$

其中 H_R 、 H_G 和 H_B 分别是 h_R 、 h_G 和 h_B 的傅里叶变换， H_i 和 $A(\lambda)$ 是单色光的 OTF 和全部光量：

$$\begin{cases} H_\lambda(s, t) = \iint h_\lambda(x, y) e^{-i2\pi(sx+yt)} dx dy / A(\lambda), \\ A(\lambda) = \iint h_\lambda(x, y) dx dy. \end{cases} \quad (7)$$

在 $s = t = 0$ 时, 进入各摄象管的全部光量是 H_R, H_G 和 H_B . 经整理后, 得

$$\begin{cases} W_R = H_R(0, 0) = \int E(\lambda) \bar{r}(\lambda) A(\lambda) d\lambda, \\ W_G = H_G(0, 0) = \int E(\lambda) \bar{g}(\lambda) A(\lambda) d\lambda, \\ W_B = H_B(0, 0) = \int E(\lambda) \bar{b}(\lambda) A(\lambda) d\lambda. \end{cases} \quad (8)$$

三个摄象系统规格化后的多色光 OTF, 经过整理后, 变成

$$\begin{cases} \tilde{H}_R(s, t) = H_R(s, t) / W_R, \\ \tilde{H}_G(s, t) = H_G(s, t) / W_G, \\ \tilde{H}_B(s, t) = H_B(s, t) / W_B. \end{cases} \quad (9)$$

(9)式表示的三个多色光 OTF, 就是与三刺激值光谱曲线作相同分布的三个分光特性进行测定的 OTF 值, 而这三个 OTF 作为一组, 称为彩色 OTF.

五、彩色 OTF 对镜头的评价

下面, 我们考察一下彩色 OTF 具有何种意义. 首先, 把(6)式变成下式:

$$\begin{cases} H_R(s, t) = W_R \cdot \tilde{M}_R(s, t) e^{i\tilde{\phi}_R(s, t)}, \\ H_G(s, t) = W_G \cdot \tilde{M}_G(s, t) e^{i\tilde{\phi}_G(s, t)}, \\ H_B(s, t) = W_B \cdot \tilde{M}_B(s, t) e^{i\tilde{\phi}_B(s, t)}. \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\tilde{M}_R(s, t)$ 和 $\tilde{\phi}_R(s, t)$ 是规格化的 OTF \tilde{H}_R 的绝对值和相位. $\tilde{M}_R(s, t)$ 和 $\tilde{\phi}_R(s, t)$ 是 E_R 信号的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, 简称为 MTF) 和相位传递函数 (Phase Transfer Function, 简称为 PTF); 对于 E_G 和 E_B 信号, 讨论也是同样的. MTF 表示对正弦波光栅成象时象的对比度 (或说调制度、反衬度) 的降低, PTF 表示正弦波光栅象的横向偏离. 图 2 所示的是某光学系统单色光的 OTF 曲线, 两条曲线分别表示 MTF 和 PTF 与空间频率数的关系. 由此可见, 在多色光的

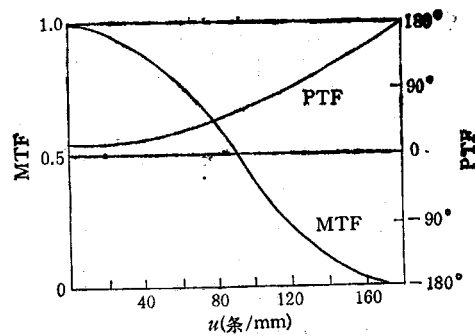


图 2 空间频率数对 MTF 和 PTF 的影响

情况下, 各原色的正弦波光栅象可以写成

$$\begin{cases} C_R(x', y', s, t) = W_R \{ 1 + \tilde{M}_R(s, t) \\ \quad \times \cos[2\pi(sx' + yt) - \tilde{\phi}_R(s, t)] \}, \\ C_G(x', y', s, t) = W_G \{ 1 + \tilde{M}_G(s, t) \\ \quad \times \cos[2\pi(sx' + yt) - \tilde{\phi}_G(s, t)] \}, \\ C_B(x', y', s, t) = W_B \{ 1 + \tilde{M}_B(s, t) \\ \quad \times \cos[2\pi(sx' + yt) - \tilde{\phi}_B(s, t)] \}, \end{cases} \quad (11)$$

C_R, C_G 和 C_B 表示把多色光的点扩散函数分解成多色光的正弦波光栅时, 光栅色的三刺激值. 也就是说, 可以把 $E(\lambda)$ 分光组成的点光源象分解成多色光的空间频率数成分, 这个频率数的正弦波光栅的彩色可以用彩色 OTF 来决定.

或者也可以作如下考虑. 若被摄体是对比度为 1.0 的有一定色的多色光正弦波光栅, 则用彩色电视镜头把它成象时, 象也是正弦波光栅; 但是, 光栅的色就不是一定的了, 在某个地方 (x', y') 的三原色量可由(11)式给出.

上述内容可用图 3 形象地来描述. 图 3(a) 表示用电视摄影机把 $E(\lambda)$ 分光组成的点光源拍摄下来. 图 3(b) 表示各摄象管把多色光点扩散函数分解成三原色点扩散函数. 把这三原色点扩散函数作傅里叶变换, 求出如图 3(c) 所示的彩色 OTF. 这个 OTF 可以分解为绝对值 $\tilde{M}(s, t)$ 和相位 $\tilde{\phi}(s, t)$ 两个部分. 于是, 就决定了对应于各空间频率数 s, t 的三刺激值, 如图 3(e) 所示. 这个三刺激值如能按图 3(d) 把多色光的点扩散函数分解成多色光的正弦波光栅, 就能决定这个多色光的正弦波光栅的彩色分布. 由图 3(e) 可知, 因为三刺激值是

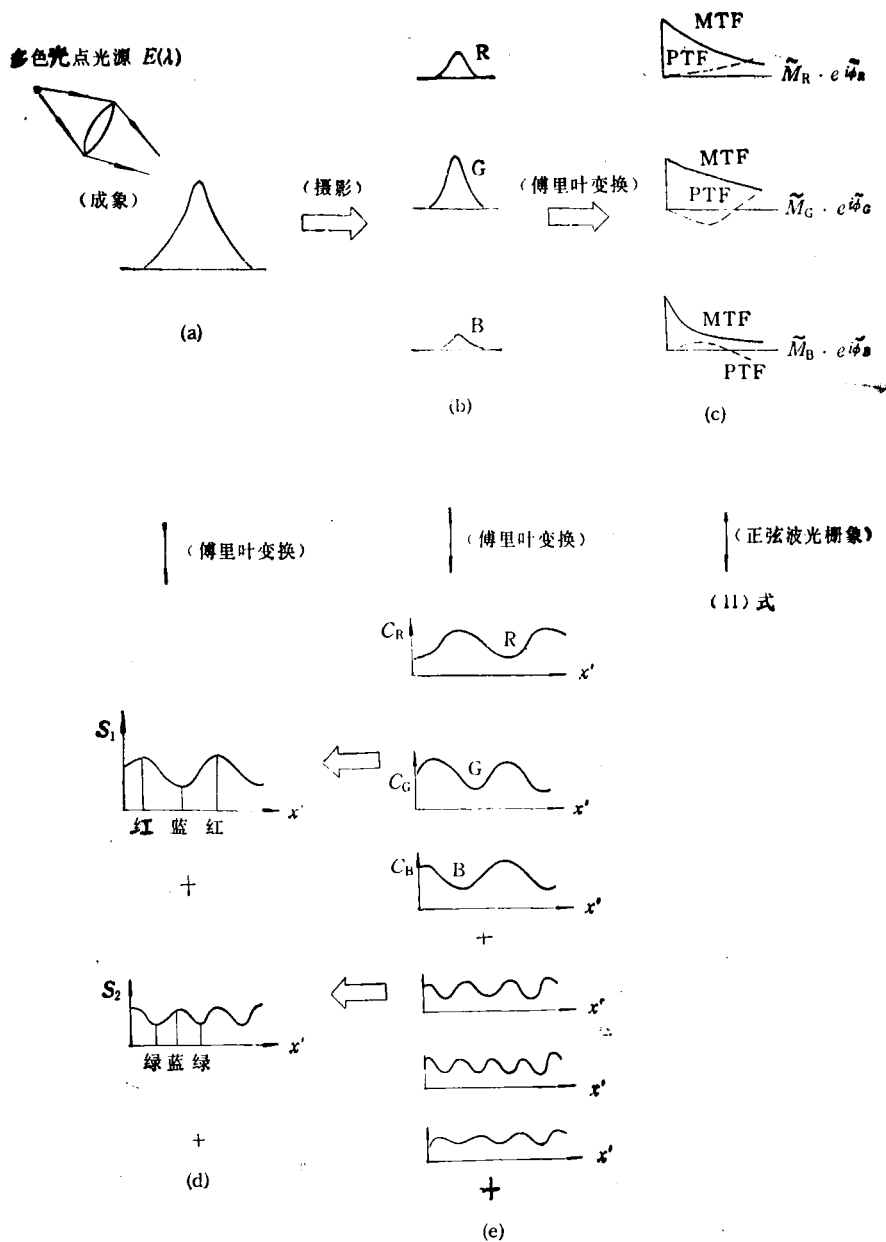


图 3
 (a) 多色光点扩散函数; (b) 三原色点扩散函数; (c) 彩色 OTF; (d) 多色光正弦波光栅成分; (e) 各三原色的正弦波光栅, 即 (d) 的三刺激值

周期函数, 所以如图 3(d) 那样, 多色光正弦波光栅的色在一个周期后又返回到原来的色。

如果镜头没有色差及单色光的点扩散函数强度分布不论对哪种波长又全相同, 那么彩色 OTF 也就都是相同的值, 于是表示多色光正弦波光栅色的三刺激值 C_R, C_G 和 C_B 三者之间有

$$C_R : C_G : C_B = W_R : W_G : W_B. \quad (12)$$

一定的比: 它与进入摄象系统的全部光量比相同, 与空间频率数和在光栅上的位置无关, 是个常数。这时, 多色光正弦波光栅象的色和光源的色完全相同。如果镜头有色差或各单色光的点扩散函

数强度分布不同,那么光栅象的彩色就会随空间频率数和在光栅上的位置按(11)式变化.如果把多色光正弦波光栅的彩色表示在色度图上,那么没有色差的镜头的情况如图4中A点所示,色度是常数;有色差后的情况,如B和C所示,其中B表示多色光正弦波光栅象的色度轨迹(50条/mm光栅在一个周期内色的变化),而C表示100条/mm光栅在一个周期内色的变化.光栅的一个周期,描出某一个轨迹,这个轨迹根据空间频率数的不同而有差异.

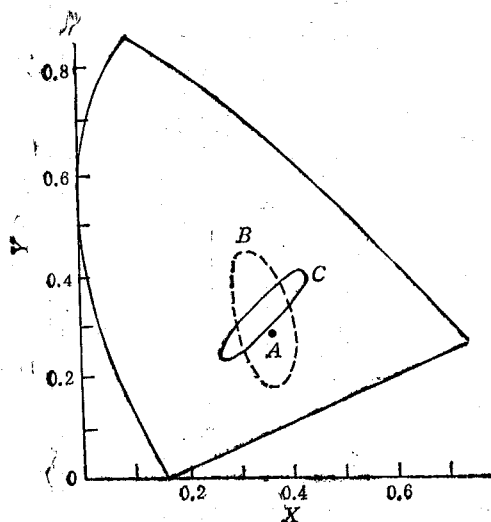


图4 多色光正弦波光栅的色度图

第五届全国等离子体科学和技术会议召开

第五届全国等离子体科学和技术会议于1989年10月21日至25日在大连召开.参加会议的代表来自全国17个省市的30所大学、27个研究所和13个工厂,共145人.会议由中国力学学会等离子体专业委员会主持,由大连理工大学主办.

本届会议不仅论文数量多(145篇),而且涉及面广,有等离子体理论,等离子体诊断,等离子体设备,电弧等离子体及其应用,低气压等离子体及其应用以及离子注入及其应用等,展示了近两年来我国低温等离子体科学和技术研究的新的进展.与前几届会议比较,本届会议的不少论文从不同角度较深入地进行了机理性研究,并取得满意的结果,从而为进一步的开发应用奠定基础.等离子体诊断的理论和技术研究,以及微波等离子体在材料表面改性中的作用得到人们极大的关注.

会上特邀吴承康教授介绍第九届国际等离子体化学会议(IUPAC).从IUPAC看,近几年来国外低温

因而,对于由某分光组成的光源,一旦知道了它的彩色OTF,就可知道与这光源有相同分光组成的被摄体的彩色还原性和各摄象系统成象的清晰程度.例如,已知人眼感觉亮度分布的OTF后,用(4)式就可以计算出对于Y信号(亮度信号)的OTF.

总之,对于光学系统彩色成象的评价,本来应对无穷多个波长求出单色光的OTF,但实际上是不可能的,因此必须采用某种简便的方法.此文提出的对应于三刺激值的OTF(彩色OTF),是比较简便而实用的.人们的色觉有三个要素:色调、明度和饱和度.人眼生理学的实验结果和彩色电视的经验表明,画面的象质主要决定于亮度,即色觉的明度,其余两个有色要素对象质的影响不大(除非在色差很大的情况下),所以用彩色OTF来评价象质是很合适的.

- [1] J. W. 顾德门著,詹达三等译,傅里叶光学导论,科学出版社,(1976),115.
- [2] 梁铨廷,物理光学,机械工业出版社,(1980),176.
- [3] 王明臣,彩色电视接收机原理,人民邮电出版社,(1983),14.
- [4] F. Abbott, *Optics Spectra*, No. 3(1970), 5.
- [5] G. B. Parrent and B. J. Thompson, *Soc. Photo-Opt. Instr. Engin.*, 3(1964), 36.

等离子体研究发展迅速,工业化进程加快,政府和企业的支持不断地增加,机理性研究和等离子体诊断研究日益得到重视和加强.

本届会议上还请了刘明哲、马腾才、王永瑜和陈杰教授分别作了《离子源和低温等离子体应用考察报告》,《低温等离子体物理进展:论我国离子注入的发展现状和建议》,以及《高分子等离子体化学进展》等报告.两位苏联专家到会介绍了有关电弧等离子体和分子动力学方面的研究近况.

会议内外,不同方面的专家相互交流经验,讨论协作和联合攻关.不少厂家也参加了会议,为开发应用研究成果创造了有利的条件.到会代表们认为,在当前科研经费比较紧缺的情况下,仍要千方百计地创造条件做出更高水平的工作,充分发挥低温等离子体在国民经济中的作用,为赶上国际先进水平作出贡献.

(胡建芳)