

光学系统成像质量的主观评价

李剑白

(江西省科学院)

摘要: 本文对目前的像质主观评价方法加以评述, 并提出了开展这方面研究的一些建议。

一、前 言

近年来光学技术有了迅速的发展, 但评价光学系统成像质量的最终分析手段绝大多数仍然是人眼。这个事实说明, 用现代有效的光学方法分析和测量人眼观察图像的主观作用是光学技术中重要的课题之一。

过去研究人眼的作用是把人眼当作一个物理的光学系统, 研究它的 MTF , 再与成像系统合成。现在证明此种方法是不合适的^[1]。因为人眼观察图像有两种作用: 一是人眼瞳晶体作为一个光学系统, 在视网膜上形成一个被观察景物的像; 二是视觉细胞感知这个像, 经由视神经传输到大脑, 并处理形成图像的概念。前者是一个纯物理学问题, 完全可以用光电方法来测量, 客观地评价。而后者却是一个物理心理过程, 无法用客观的方法测量, 只能用心理物理学方法评价, 这就是光学系统成像质量主观评价方法的意义之所在。

成像质量主观评价的研究, 在英、美、日本、荷兰等国已进行了多年, 但在国内刚刚起步, 仅有少数单位进行了一些探索性工作^[2]。对大量的目视光学系统, 摄影系统, 有噪音的图片制作及观察系统, 电视摄像及观察系统等, 像质的主观评价工作基本上还没开展。为了推动国内像质主观评价研究工作, 使多年研究的光学传递函数评价方法更深入一步, 笔者做了一些主观评价课题的前期工作, 针对不同的使用目的, 对各种流行的主观评价方法进行筛选, 提出以下的看法, 供有兴趣从事像质主观评价的人员参考。

二、目视仪器的主观评价

目视仪器是指通常的显微镜类和望远镜类仪器。关于此类仪器成像质量的主观评价方法, 笔者倾向于用目视阈值对比 C_{th} 或其倒数——人眼视觉对比灵敏度 (*Visual Contrast Sensitivity*) 实验测定方法^{[2][3]}。其要点是:

(1) 把人眼作为目视仪器系统的一部分, 而不是将人眼与仪器分开研究。即用人眼作接收器, 通过目视仪器观察标准图样, 从而测定 C_{th} 值或 VCS 值。

(2) 目视阈值对比或人眼视觉灵敏度测定都是阈值对比的测定, 即人眼刚能分辨的极限对比值的测定, 它与光学传递函数测定是完全不同的两个概念。 OTF 或 MTF 测定是一种阈上值测定。目标的对比经过系统后被衰减了, 像的对比小于物的对比, 但并不为零, 这样测出像的对比就是不为零的对比测定, 即所谓阈上值测定。对人眼来说阈值观察和阈上值观察

是有区别的。

(3) 实验装置如图 1^[3]。右路双单色仪的
单色光照明变透过率正弦板 T ，正弦板的调制
度（对比） M 可通过左路双单色仪照明改变。
两路通过半反射半透射板 H 合成，并通过目
视仪器或人造瞳孔观察测定。

目视阈值对比 C_{iA} 的定义是：受试者观察
各种不同空间频率的光栅状物体时，刚能分辨
的光栅最小对比值。

$$C_{iA} = \frac{L_0 - L_b}{L_0} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}}$$

其中 L_0 (I_{max}) 和 L_b (I_{min}) 分别为背景和光栅刚能分辨时的亮度。

在加入左路背景亮度 L_b 后，对比变化为

$$C = C_0 \frac{L_b}{L_b + L_0}$$

C_0 为光栅的原对比， C 为加均匀背景后的对比。

而 $VCS = \frac{1}{C_{iA}}$

其测量方法与上述类似。文献^[2]运用上述方法，对装置图 1 作了改进，用以测量各种显微镜头的 VCS 值，并与传统的星点检验方法相对照。认为用 VCS 测定可以定量，又包括了人眼的主观因素在内，比星点法更优越，更符合使用的实际情况。

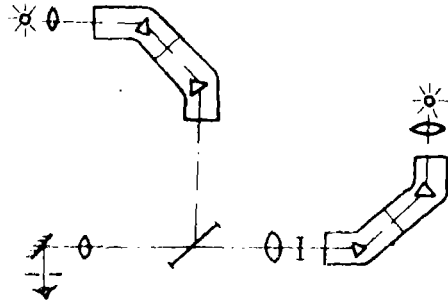
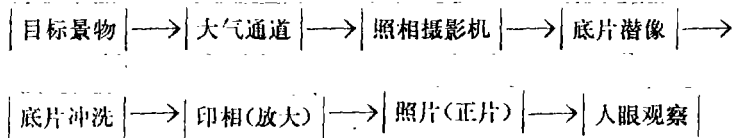


图 1

三、摄影系统

摄影包括照相、电影、翻拍、复印、空间摄影、显微照相等各种形式，它的全过程应包含如下环节：



从景物到照片有三次成像，都可以用客观像质评价方法评价，但人眼观察照片（或正片）却是包含主观过程。因此整个摄影的全过程，在用人眼判读时，都应用成像质量主观评价方法评价。

摄影过程的主观评价方法很多，笔者倾向于用 Gendron 1973 年推荐的级联调制传递锐度 CMT Acutance 指标^[1]。图 2 表示了这个指标计算过程。上图是摄影系统的 MTF ，包括各单元的前三次成像串联结果，并考虑了相应的放大率。中图是人眼观察的视觉 MTF ，下图为两者级联。包括人眼在内的总的 $MTF_{总} = M_{(v)} \times V_{(v)}$ 。用计算机能很快算出曲线下的面积

$$A = \int M_{(v)} \times V_{(v)} d\tau$$

级联调制传递锐度定义为

$$CMT_{Acutance} = K + k \log \frac{A}{A_R}$$

A_R 是当系统 $MTF = 1.0$, 即取图中上部参考线 R 时, 级联的 MTF 曲线下的面积, 相当于仅考虑人眼的 MTF 。

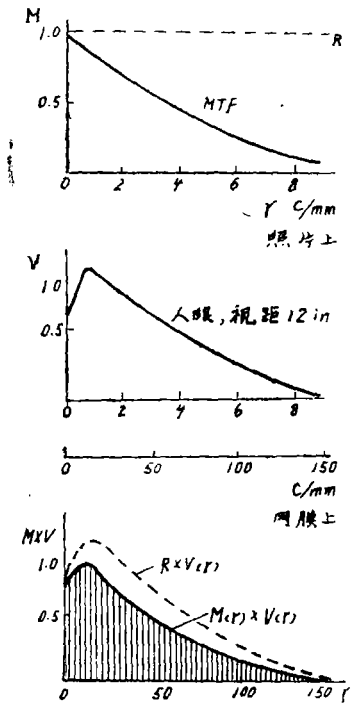


图2

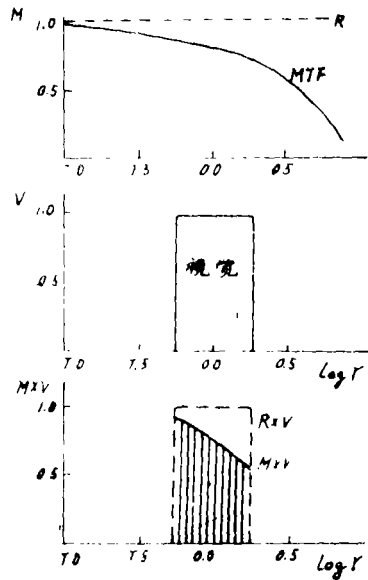


图3

Granger 和 Cupery 提出了一种对数频率坐标的简略型式级联调制传递锐度指标—— SQF , 又称主观质量因子^[5]。其定义为:

$$SQF = \frac{B}{B_R} = \frac{\int M(\log r) V(\log r) d(\log r)}{\int R \cdot V(\log r) d(\log r)}$$

其中 $V(\log r)$ 是对数频率坐标中人眼的 MTF 值, 如图 3 所示, $V(\log r)$ 用一带通滤波器代替人眼的 MTF , 形成一种便于计算的简略型式。在半对数坐标纸上只要用一矩形框即可标出 SQF 值, 具有工程上的方便性。

用人眼观察评判各种 MTF 系统得到的许多照片, 与 SQF 、 $CMT_{Acutance}$ 预测值相比较, 证明, 除少数怪状 MTF 曲线 (为严格实验专门提供的), 观察结果与预测结果两者符合得很好。说明以上指标的可靠性。

佐柳和男提出的相对信息容量评价方法^{[6][7]}作为摄影过程主观像质评价方法也是适宜的。在足够亮的照明条件下, 主观评定许多照片, 主观评价的信息容量指标为:

$$G = \log \gamma_M + \log \frac{\int M(r) V(r) dr}{\int V(r) dr} = G_1 + G_2$$

式中 γ_M 为客观影调再现梯度, 是照片上景物再现的 γ 值。指标分为梯度项 G_1 , 响应项 G_2 两部。计算和实际观察照片的结果均表明, G_1 与 G_2 对主观评价的影响权重为 2:1, 这就证实了一个事实: 在摄影术和印刷工艺中, 首先研究的是影调的再现。文献^[7]中列举了许多照片观察结果, 证明信息容量指标对摄影过程主观评价也是有效的。

四、有噪音斑点的图片成像系统

由于感光乳剂是呈颗粒状的，因此摄影底片和正片、照片上的像，严格地说都是有颗粒噪音的。但多数情况下，这种颗粒细到不为人眼所分辨，所以通常是不考虑摄影噪音的。在翻印底片，放大倍率十分大，或要对像的细部进行分析时，噪音的因素则不可忽略。而在印刷图像上，颗粒噪音是十分明显的，因为印刷图片都是由200点/in的小圆网点组成，由圆点的深浅和颜色组成不同的图像。这样，就相当于有8对线/mm的噪音。

1973年 Nelson 提出了一种有噪声图片的主观像质判据。它涉及到 MTF，颗粒度和系统组元的噪音谱^[4]。其计算像判据的全过程如图4。假设输入谱 $I_{(r)}$ ，具有此图顶部曲线表示的形式；整个系统的调制传递函数 $M_{(r)}$ ，是相机的 M_c ，底片的 M_s ，印相机或放大机的 M_p 和正片材料的 M_r 的乘积。颗粒度或 Wiener 谱为 W ，它是倍率的平方 m^2 ，底片的 Wiener 谱 W_s ， γ 值的平方 γ^2 ，放大机或印相机的 MTF 平方 M_p^2 ，正片材料的 M_r^2 ，以及正片的 Wiener 谱 W_r 的乘积。人视觉函数 V 是视觉系统 MTF 的对数。输出的信噪比为：

$$\frac{S_{(r)}}{N_{(r)}} = \frac{I_{(r)} \cdot \gamma \cdot M_{(r)} \cdot V_{(r)}}{[b_{(r)} \{W_{(r)} V_{(r)}^2 + n\}]^{1/2}}$$

其中 n 是与眼睛噪音有关的项， $b_{(r)}$ 是临界噪声带宽。

最后判据是以 $(1 + \frac{S^2}{N^2})$ 作图，曲线下的面积 a ，与系统 $MTF = 100\%$ 的参考线 R 构成的曲线下面积 a_s 之比的函数，即评价指标：

$$S_p = 100 \left(\frac{a}{a_s} \right)^{1/2}$$

相应的实验是用具有不同噪音的照片由观察者作判断，证明对噪音作了校正的上述判据预测效果良好，对噪音未作任何校正与实验结果则相关性很差。

英国航空公司 GW 分部 ($B. A. C. (GW)$) 多年来进行了有噪声系统的大量实验和理论分析，研究了儿种主观像质评价的数学模型，可上计算机计算。并列出了与实验实测值比较，可以在使用中参考^[8]。其要点如下：

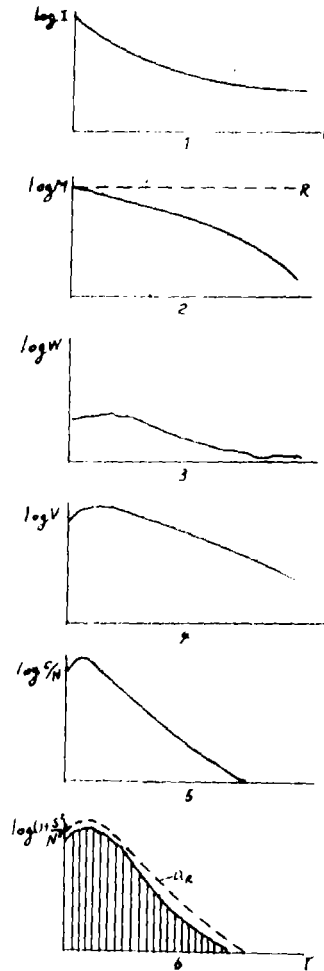


图 4

- 1—输入调制度 $I_{(r)}$
- 2—系统调制度 $M_{(r)}$
- 3—颗粒度维纳谱 $W_{(r)}$
- 4—视觉函数 $V_{(r)}$
- 5—输出信噪比 $\frac{S_{(r)}}{N_{(r)}}$
- 6—像的锐度 S_p

(1) 以50%概率下的阈值对比 $C_{50\%}$ 作评价指标,这样实测时便于掌握。

(2) 认为人眼视觉是一个时空积分器,即视觉不仅与被观察物体的形状、位置、大小有关,而且与观察时间有关,是时间空间的积分效果。因此 $B. A. C.$ 设计的评价模型中有人眼观察的暂留时间项,人眼的松弛时间等因素。还有瞥见的次数。

(3) 关于物体的大小,模型中有“刺激的周长”项。在较复杂的图像观察中,人眼还有识别和辨清等更高级的观察任务。为了预测,就不能仅用简单刺激的闭合轮廓长度和强度计算,而是要用较复杂的目标开式轮廓长度和强度。

(4) 模型考虑了目视空间噪声和视网膜上的显示噪声。实验实测是在不同尺寸的目标、不同噪音、不同观察时间下进行的。结果证明, $B. A. C.$ 模型预测与实测值符合“很好”占总数的58%,符合“好”的占33%,只有不到9%的预测值与实测值相差1.5~2倍。

五、彩色图像的主观评价

近年来目视观察图像中,彩色图像占的比重越来越大,在评价这些获取彩色图像的光学系统时,要考虑整个系统的光谱响应。此地有两种情况应予以区别:

(1) 彩色电视系统

在我国彩电制式中,亮度信号与彩色信号所占的频带宽度是不同的,前者的带宽约为后者的5倍。因此彩电中亮度信号的像素和分辨本领均远高于彩色信号。决定彩电图像像质的主要因素即其亮度(黑白)信号^[9],像质评价也与黑白图像一样,可不考虑彩色信号或给以一个较小的系数就行了。

(2) 彩色摄影

彩色摄影是用不同感光层得到的不同颜色的潜像,经处理合成的,各种色彩对像质都有较大的影响。因此彩照的主观评价建议采用 SQF 引入光谱权因子。其光学系统像质评价函数为:

$$SQF_{\lambda} = k \int_{10^3}^{10^{17}} \int_0^{2\pi} \int_{000}^{1000} |M(lnr, Q, \lambda) \cdot S_{\lambda} \cdot V_{\lambda}| d\lambda dQ d(lnr)$$

这里, $M(lnr, Q, \lambda)$ 是极坐标形式的光谱 OTF ; S_{λ} 是照片或底片再现的白光光谱反射率或光谱透过率; V_{λ} 是人眼的光谱亮度响应,即视觉函数; r 是空间频率,单位 cpd 。这个评价指标同样具有工程上的方便性。其它评价黑白图像的主观像质指标,在引入光谱权因子后,原则上也是可以用于彩色摄影的。

参 考 文 献

- [1] 应用物理学会光学讨论会编辑(II);《生理光学》,杨雄里译,科学出版社,1980。
- [2] 钱振邦等;《中国光学学会1985年会论文摘要汇编》,441。或ICO-13 Conference Digest 80(1984 Sapporo)
- [3] F. L. Van Nes and M. A. Bouman; Jour. Opt. Soc. Am., 1967, 57, 401—407.
- [4] G. C. Higgins; Jour. Appl. photogr. Eng., 1977, 3, No. 2, 52—60.
- [5] E. M. Granger and K. N. Cupery; Photogr. Sci. Eng., 1972, 16, 221.
- [6] Y. Yasuda and Y. Emori; Oyobutsuri, 1972, 41, 27—36.
- [7] Y. Yasuda and Y. Emori; A Summary of the proceedings of an SPIE technical section Conference, 1977, Oct., 81—85.

- [8] I. Overington and A. G. Growther, *Proceedings of SPIE*, 1976, 98, 65—71.
[9] E. M. Granger, *Proceedings of SPIE*, 1974, 46, 86—92.

On Subjective Evaluative of the Image Quality of Optical Systems

Li Jianbai

Abstract

This paper represents a comment on subjective evaluation methods of image quality of optical systems and gives some proposals for the further research works related to this subject.