

# 象 质 判 据

**摘要** 图象质量至少与三个因素有关：影调再现，锐度和颗粒度。实验表明，当目视检查再现时，重要的因素不是客观影调再现，而是主观影调再现。当用良好的主观影调再现时，在颗粒度不明显的情况下观察，以系统和视觉的 MTF 加权乘积度量的锐度是与像质有密切关系的。当颗粒度明显时，建立在信噪比基础上的判据与像质有密切的关系。

## 影调再现

### 客观影调再现：

图 1 中用虚线表示了客观影调再现曲线，它是一条以再现密度作为不同景物单元对数发光强度的函数曲线。每个景物单元的发光强度是用该单元射到相机或人眼的单位立体角内光量来度量。与人眼有相同的相对光谱灵敏度的光电光度计可精确测量发光强度。最初假定最佳复印照片所需要的客观影调再现应该用虚线表示，其斜率为 1。因此，原景物的发光强度将正比于再现的密度值。然而，实验表明，当目视检查再现时，重要的因素不是客观影调再现，而是主观影

调再现。

### 主观影调再现：

“主观影调再现”一词是指初始景物亮度的再现。亮度是光引起的主观视觉感觉的大小，而发光强度是光的大小或总量。照片上不同单元亮度对相应的景物单元的亮度之间关系曲线称为主观影调再现。亮度不能用仪器直接测量，但能用心理学度量方法确定。显然，亮度与发光强度不是线性关系。这种非线性是很明显的，因为观察再现时使用的发光强度与周围的发光强度通常是与原景物的强度不同。例如，日照景物的发光强度大约是电影院里放映的屏幕像的 500 倍，大约比普通室内光照下反射型印刷图像发光强度高 100 倍。因为再现系统的目的是产生

热能。靠结构缺陷的吸收中心进行能量积累。除此，在缺陷的地方削弱结构的连结并在那里开始破坏物质。因此，对提高光强有两种方法。第一种方法采用耐熔氧化物，第二种方法一提高薄膜的整体性。现在我们合成熔化温度为 2000—3000℃ 的物质。希望合成熔化温度为 4000—5000℃ 物质。

**镀膜工艺：**在大多数国家用真空方法镀膜。在美国和西德还是采用化学方法。它们之中每种方法有它自己的优点，而且它们是相互补充。完全可以采用合成物质的基本原理—从溶液与气相中制备。同时从溶体中可以制备高纯的物质。很遗憾在最近几年化学方法很少引起注意。

不论涂镀的方法下列的问题是工艺方面

的首要问题：

1. 在由吸湿材料作成的大另件上的镀膜。这个问题的顺利解决可以通过离子抛光与真空方法的结合和通过用拉伸方法从溶体中涂镀薄膜。

2. 在复杂结构的产品上镀膜。用阴极溅射与拉伸方法最合理地解决这方面的问题。

3. 装置与设备。为制备具有所需的光谱特性的薄膜需要有精度为 0.01% 测量反射的分光光度计，测量复杂表面反射的仪器，能使离子抛光与喷镀相结合的混合真空装置。

译自“Оптико-механическая Промышленность” №10, 1977 стр.43.

〔施评治 译 林开华 校〕

一幅由观察者看来与观察原景物有同样主观效果的图像，显然优先选择的客观影调再现是不同于图1虚线所示的。

对于要求产生最好主观影调再现的客观影调再现的类型问题已经有了多年的丰富经验。例如，背景的发光强度对采用的客观影调再现的影响相当大。图1中的实线A和B表示在亮和暗背景中得到最好的主观影调再现所要求的客观影调再现曲线。曲线A是为在暗室里的屏幕上观看电影和幻灯这样的再现采用的客观影调的再现曲线，而曲线B是在很亮的房间里观看再现时所采用的客观再现曲线。若我们假设观察者认为再现具有原来景物的主观呈现，根据人眼视觉系统的亮度对发光强度的曲线就可预示曲线A和曲线B同理想客观影调再现的虚线之间存在相当大的区别。大致上两种再现，一个是用暗背景观察所得到的，另一个是用亮背景观察所得到的，那末它们应提供相同的主观感觉。

亮度和发光强度之间的关系是很复杂的，还没有完全弄清楚。但是，可以借助于一族曲线适当地表示，这些曲线可以确定在视觉中自动发生的至少两种不同变化的效应：直接适应和横向适应。发光强度和亮度之间关系作为图象平均发光强度和周围背景发光强度的函数有许多研究结果用图2a和2b曲线表示。每条曲线边上的数字是那条曲线的所对应的图象发光强度。直接适应是造成图2的2a和2b实线的横位移的原因。这种适应是比较缓慢或迟钝的并且主要是由前10秒或更长时间内直接观察范围的平均发光强度所决定。

#### 直接适应：

直接适应可认为是一种自动增益控制，是从直接观察区域来的平均光量减少时人眼灵敏度慢慢增大和相反情况下人眼灵敏度慢慢地降低。例如，当亮度水平从太阳光变成月光时，即减弱200,000倍，灵敏度要增加大于一千倍的因子；也就是响应曲线向左

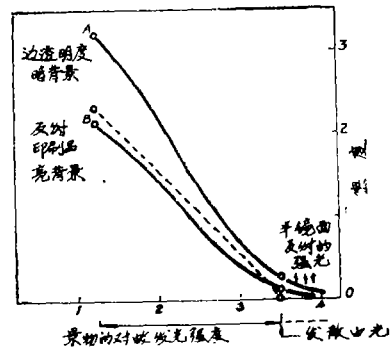
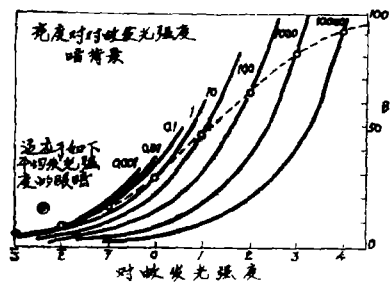
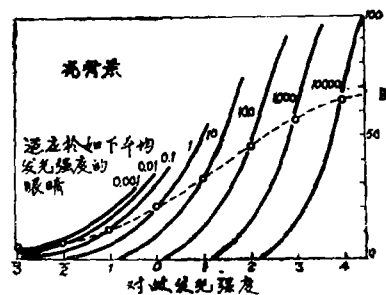


图1 所需照片的客观影调再现曲线。曲线A：在暗背景观察幻灯片和电影。曲线B：在亮背景观察幻灯片和反射型照片。参考虚线的梯度是1.00。

(图2b) 移动，大于3.0个对数发光强度单位。眼瞳尺寸的改变会引起灵敏度的少许增大或减少。灵敏度的变化主要是由于在亮光下视网膜的中心和其它区域的感光色素的局



(a)



(b)

图2 (a) 在暗背景观察具有可变发光强度的小的均匀光点时，亮度和对数发光强度之间的关系。若允许几分钟用来直接适应每个发光强度的话，采用虚线。(b) 当周围的发光强度高并可连续调整到等于每个直接适应的发光强度时，亮度和对数发光强度之间的关系。

部漂白和这些色素在弱光下的再生造成的，或者是由于视觉系统中其它部分产生的某种适应变化造成的。

### 横向适应：

横向适应是一个比较快的过程，通常是在光改变后的几分之一秒内完成的。它是由包围观察者瞬时观看的小视场的很宽视场中发光强度控制的。

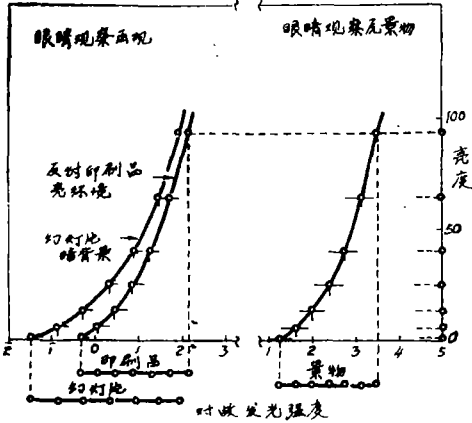


图3 三种不同条件下用眼睛观察时亮度对于对数发光强度的函数：(a)在暗背景观察幻灯片。(b)在亮背景观察反射型印刷品。(c)观察原太阳光下的景物。由图下方的小圆孔推导出来的正确亮度再现所需要的再现密度。

横向适应对亮度和发光强度之间关系的重大影响可通过图2a和图2b的曲线进行对比来估价。显然亮背景的影响就是全部降低每条亮度对对数发光强度的曲线。从图2a每条曲线中减去亮度，结果得到图2b曲线的近似，就象独立研究神经细胞的抑制一样。因为亮度不能成为负的，所以每条曲线的大部分低梯度部分由亮环境的抑制效应割掉，这两个图中的虚线表示当允许几分钟时间经过直接适应使人眼对每个新发光强度水平达到完全适应时的亮度响应。而每条实线表示的响应，是当眼睛迅速地扫描景物或照片，或者是眼睛已适应相当实线和虚线交点处横座标的那个发光强度时的响应。主观对比就是曲线的斜率。看起来当用眼睛很快地扫描发光强度时（实线）的曲线斜率要比发光强度

缓慢改变时（虚线）的曲线斜率大得多。

通过直接实验得到了需要的图象，即图1中的曲线A和B。若可从亮度和发光强度之间的关系导出图1里的这些曲线将是有趣的。从图2a和2b抽出适当的眼睛的亮度和对数发光强度关系曲线并示于图3。当左边后一条曲线用来观察完全照明房间里的再现，左边前一条曲线用来观察暗背景里的印刷图片。眼睛观察原景物的曲线示于右边。景物中的七个不同点的亮度在纵坐标比例尺上，并且也在三条亮度对对数发光强度关系曲线上，用小圆表示。若再现时需要的对数发光强度或光学密度是提供所期望的亮度值，则由沿着横座标分别记有幻灯片和印刷图片的水平线上的小圆可求出它们的值。把在特定照度下给出这些发光强度所需要的对数发光强度或相应的光学密度对景物的对数发光强度（用标记景物的横座标上的小圆圈表示）作图，就获得正确亮度再现所需要的客观影调的再现特性，如图4所示。

## 反射印刷图片

图4中的曲线A看来很象图1里的曲线A，适合于暗背景，需要约1.6的中等影调梯度，并在所有密度下梯度都大大地高于1。然而，新的曲线B与图1中的曲线B比较时，出现很大差别。图4中的曲线B在强光区具有较高的梯度，需要低于零的密度。这种明显的要求可作如下解释。在普通室光下观察一反射型图片时，表示景物半镜面反射强光的图片发光强度，如水上的波纹，眼睛的聚光，头发，珠宝工艺品和许多其它有趣的物体都应该有大于图片上景物的散射白强光的发光强度。专业摄影师有时称作闪光的这种重大要求在幻灯片中能得到，由图1里的曲线A表示，从而景物亮度精确再现。众所周知，与相同景物的幻灯片比较，反射型图片常常看起来是模糊的。其主要原因是投影幻灯片周围的较暗区域许可眼睛增大其亮

度响应，使之足以允许使用整个影调等级的最佳梯度，包括用低于散射强光选择的密度再现半镜面反射强光的强光区。

为了克服反射型再现的这种不足，花费了许多心血和气力。用所有密度都高于曲线B表示的密度制成印刷图片，就有可能提供所需要的强光梯度增大，但这种图片通常没人要，因为它们看起来太暗。使用较低的中等影调和阴影梯度也容许强光梯度增大，但常常也没人喜欢，因太平淡，即主观对比太低。原理上有希望，但实际上只有很小改进的补救办法就是在再现中使用发荧光的物质。

很成功的但麻烦的解决强光问题的方法是在致密的反射型图片上使用特殊的照明，这种照片在强光区梯度达到1，在中等影调和阴影区密度比图1曲线B表示的约大0.3。观察这些致密图片所需要的特殊照明可借助于点光来获得，它照亮图象地区并提供至少比室内一般照度大2至3倍的照度。当然，重要的是，照明严格地限于图象地区并且图片无白色边框。用黑布包围着无边框的再现比较是有效。周围的物体或室内的墙壁应比较暗。以这种方法拍摄，并在这些条件下观察的反射照片和幻灯片区分不出。

## 图 象 质 量

正如所示，影调再现是图象质量的一个非常重要方面。然而，图象质量的评价常常不是基于影调再现的这种宏观性能而是基于是否再现好的细节的微观性能。对于能产生具有良好色调再现的所有成像系统都应该在质量评价中注重良好细节。在检查不同的图象质量的判据中，常假设再现系统会满足影调再现判据的，并且假定不同系统之间的差别用再现的锐度和颗粒度表示。

调制传递函数。

近几年来提出了若干种测量象质的判据，它们都是基于调制传递函数 (MTF) 及

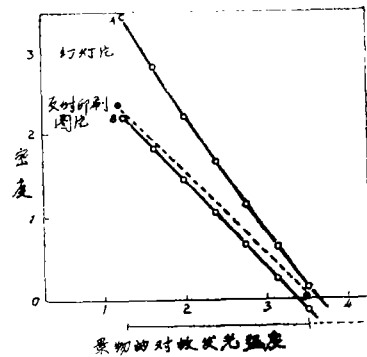


图 4 太阳光照的景物的亮度准确再现所需要的客观影调再现特性曲线。A：在暗背景观察的幻灯片。B：在亮背景观察的幻灯片或反射型图片。

这些调制传递函数和再现质量的关系。如图5所示，调制传递函数是通过把已知的输入光的调制  $m'$ ，加到被检验的再现系统上。如A，B和C所示，通常对不同的频率取同样的调制  $m'_0 = a'/b'$ 。再现中的透过率作为频率函数，由中间一行标记  $T$  的曲线表示。显然，由于光散射和其它因素，调制随着频率的增大而降低，如A，B，和C所示。输出调制是  $m'_0 = a'/b'$ 。下图表示的调制传递函数  $m$  是输出调制对输入调制的比， $M = m'_0/m'_i$ 。在这一例中，假设系统的梯度或  $r$  值是1。当  $r$  值不等于1时，就进行校正。

分辨本领，

把分辨本领做为度量再现系统质量的一个因素已有多年的历史。然而，实验说明它并非总和像质相关，并且在一些情况下使人迷惑不解。

倘若两个系统的调制传递函数类似于图6上部图所示，则产生分辨本领和图象质量之间关系的矛盾现象。正如中间曲线  $V$  所示的人视觉系统的调制传递函数，在图象A的调制传递函数大于B的空间频率范围内，具有其峰值。下面的曲线表示系统a和b的MTF和眼睛的MTF的乘积  $MXV$ 。显然，对于中间曲线表示的人眼MTF的观察条件，尽管系统A的分辨本领  $RP$  低于系统B的  $RP$ 。

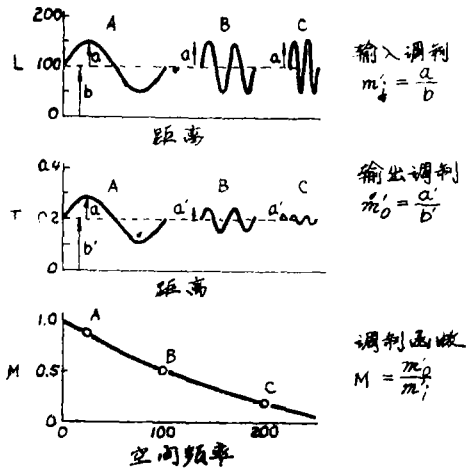


图5 调制传递函数的说明

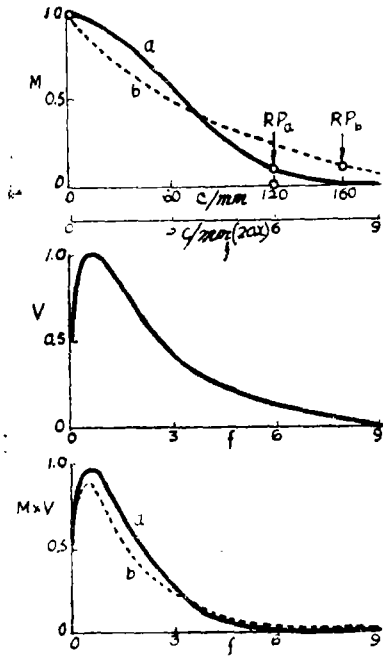


图6 胶片系统用的调制传递函数，以及用人视觉系统的调制传递函数说明的评价。分辨本领和图象锐度之间相关的不足。

图象A要比B更清晰。

人视觉的 MTF 作为平均发光强度的函数稍微有些变化，并且由于适应的原故实际上是一族曲线。然而，如果选择的函数适于被观察图象的平均发光强度，那末使用单个的视觉 MTF 曲线就能得到有预定的象锐度

的良好结果。必须注意，当 MTF 曲线的横坐标是再现的周期/毫米数的绝对值，视网膜上的每毫米周期数就取决于观察条件。正如在下图的 MTF 横座标上标记的，当再现是以20X观察，在照片上60, 120和160周期/毫米就变成被观察的图象上的3.6和8周期/毫米。中间曲线V眼睛的 MTF 的横坐标值，很明显依赖于倍率。当观察倍率增大时，眼睛可看到再现中愈来愈高的频率。

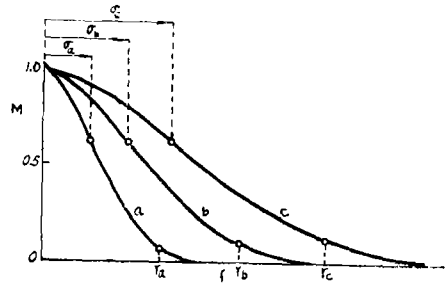


图7 锐度的系统调制传递对数锐度 (acutance) 判据和质量。

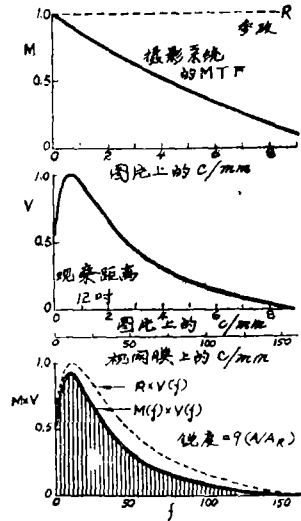


图8 级联的调制传递对数锐度判据

基于 MTF 的象质判据。

根据系统 MTF 来评价象质的方法之一是系统调制传递的对数锐度 (acutance) 判据，它是 E.M.Crane 博士于1964年建议采用的。虽然作者明显地声明应用范围应限于具有几乎是高斯形的 MTF 的系统，但有时

还用于非高斯的 MTF。图 7 里的三条曲线几乎都是高斯形的。这种函数下的面积与高斯分布的  $\sigma^2 (\sigma^2)$  成正比。线扩散函数的  $\sigma$  与 MTF 的  $\sigma$  的倒数成正比。可把系统单元的扩散函数（包括视觉扩散函数）的  $\sigma$  平方值加到一起得到整个系统的扩散函数的  $\sigma$  平方值。于是就把 SMT 对数锐度定义为系统线扩散函数的  $\sigma$  的对数函数。SMT 对数锐度 =  $K + k \log (\sigma_R / \sigma)$ ，式中  $\sigma_R$  是一个参考值或是人眼确定的极限  $\sigma$ 。

用 MTF 评价象质的另一系统是 Gendron 于 1973 年推荐的 CMT Acutance 或级联调制传递对数锐度。在图 8 说明了这一系统。上图所示的摄影系统 MTF,  $MT_s$ ，是用单元 MTF 串联计算的，每级的放大率都考虑了。然后，这个系统 MTF 与视觉 MTF,  $MT_v$  级联，横座标的刻度与观察条件相适应。整个系统的 MTF，包括眼睛，为  $MT_s \times MT_v$ ，在图 8 下部表示。它有一个用计算机能很快算出的面积 A。CMT 对数锐度定义为  $A/A_r$  的对数函数，当再现系统的 MTF 象图上部的虚参考线所示的那样平坦时， $A_r$  是级联 MTF 曲线的面积。CMT 对数锐度 =  $K + k \log A/A_r$ 。

另一判据是由 Otto Schade 博士于 1955 年根据噪音等效带宽的概念提出的。除了 MTF 纵坐标被用来计算级联 MTF 的相关面积之前是平方的这一点外，它和 CMT Acutance 一样。

图 9 仍表示基于系统 MTF 的另一质量判据。其特殊特征是调制传递因数是参照对数频率作图的。因此给予较高频率的权重比低频少。在两个级联曲线（系统和视觉 MTF）下的面积再次作为锐度的度量，横坐标为对数值。于是锐度判据就是常数乘上面积  $B$ ，比实系统的面积  $B_s$ ， $B_s$  是在所有频率 MTF 都为 100% 的参考系统的面积。

这种对数频率判据的简略型式是由 Granger 和 Cupery 于 1972 年提出的。如图 10 所示，这种简要型式使用带通滤波器代

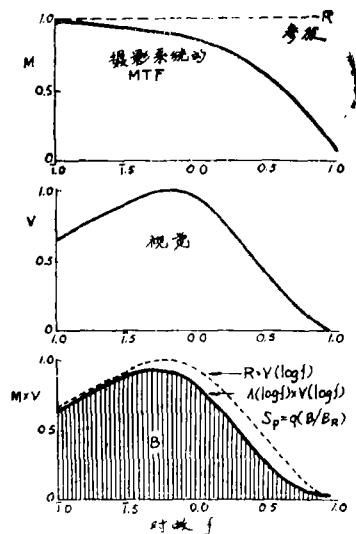


图 9 基于表示为对数空间频率函数的调制传递的锐度的判据

替眼睛的 MTF。用人眼的简略的带通滤波  $V$  乘摄影系统的 MTF，得到积  $M \times V$ 。实际系统的面积和每处频率都有 100% MTF 的系统的面积  $B_s$ ，之比就叫作主观质量因数， $SQF = (B/B_s)$ 。当限制在摄影实践中常碰到的 MTF 时，系统工作得很好。

评价象质的另一个系统是 1973 年 Nelson 提出的。它基于信噪比的概念，并涉及到 MTF 和颗粒度或系统组元的噪音谱。图 11 表示计算质量判据的过程。

假设输入谱具有此图顶部曲线表示的形式。注意到画屏景物的功率谱，不等间隔边缘的功率谱和单边缘的功率谱形状上特别相似，这是很有趣的。它们在低频时都具有比较高的功率和对比度，并且随着频率增大而对比度降低。高频时的低功率并不意味着高频信息不重要。只说明由于低功率，这种信息对于系统噪音来说特别弱并且易被噪音所淹没。

整个系统的调制传递函数  $M$  是相机的  $M_s$ ，底片  $M_d$ ，印相机或放大机的  $M_i$  和正片材料  $M_f$  的乘积。

粒度或 Wiener 谱  $W$  是由倍率平方  $m^2$ ，底片的 Wiener 谱  $W_d$ ， $\gamma$  值平方  $\gamma^2$ ，放大

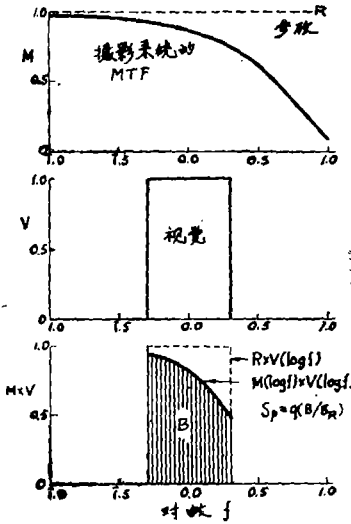


图10 基于系统 MTF 和视觉带通基础上的系统质量因数

机或印相机的 MTF 的平方  $M^2$  以及正片材料 MTF 的平方  $M^2$  及正片的 Wiener 谱  $W$ ，的乘积来计算。人视觉系统的 MTF 对  $\log$  作图，其中横坐标值与观察条件有关。

对数信噪比的计算如图示。输出信号是输入调制  $I(f)$ ， $\gamma$ ，系统调制  $M(f)$  和视觉调制传递  $V(f)$  的乘积。分母是系统的噪音，该系统的  $n$  是与眼睛噪音有关的一重要项，而  $b(f)$  是临界噪音带宽，中心在所说的那个频率范围内，系统的噪音约为一倍频宽。

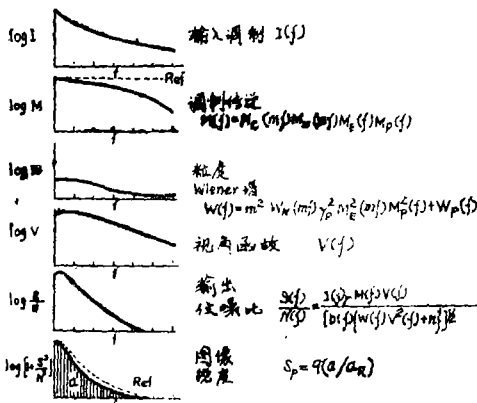


图11 图象锐度的信噪比判据

然后，以 1 加上信噪比平方的对数作为频率的函数作图。这个曲线下的面积  $a$  除以对于所有频率 MTF 都为 100% 的曲线下面积  $a_R$ ，就是图象质量的判据。预示的锐度是  $a/a_R$  的函数  $g$ 。

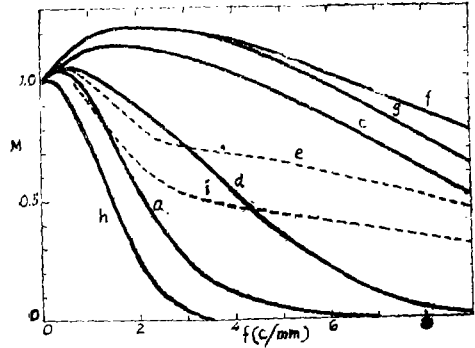


图12 用来检验各种判据的 8 张照片的调制传递函数

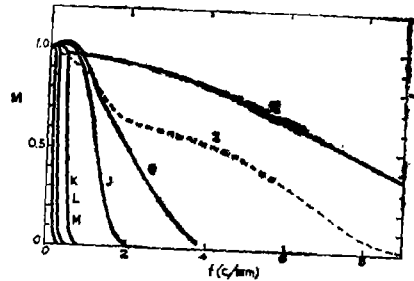


图3 在检验中使用的 7 张附加照片的调制传递函数

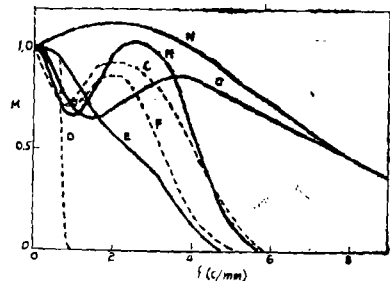


图14 在检验中使用的不同的一组七张照片的 MTF

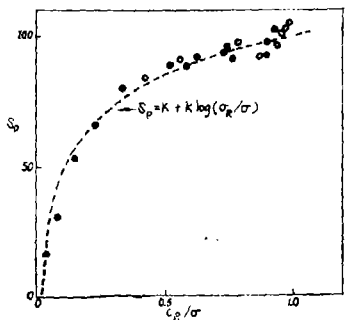


图15 SMT Acutance 判据给出的观察锐度值  $S_p$  和 Sigma 值的关系图

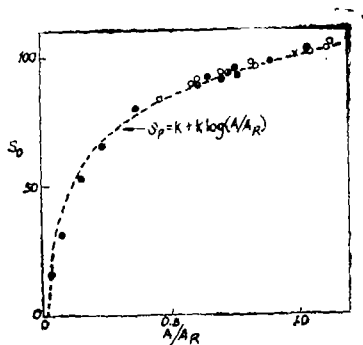


图16 CMT Acutance 判据给出的观察锐度值和 MTF 面积的关系图

### 象质判据的实验检测。

这几个判据每个都经预测值和主观评价的比较试验过，主观评价是由20个观察者采用适当的心理标定法做的。采用了4种不同的景物，每种图象尺寸均为  $10 \times 10\text{cm}$  ( $4 \times 4$  吋)，都是在  $38\text{cm}$  (15吋) 处观察的。图12, 13 和 14 表示制作图时使用的各种系统的 MTF。它们具有实际上不常遇到的形状，之所以包括进来为的是检验极端条件下系统的有效性。

图15里画出各种图象的锐度，作为基于 SMT Acutance 判据的预测值的函数。除了 MTF 明显地不同于高斯型外，其相关性是满意的。假若所有的 MTF 都是高斯型，那末所有的数据点大概都处于或很接近光滑的曲线上。这就意味着这种判据对于许多系统都很好，但一定要很细心地检查以 确 保

MTF 近于高斯型。

图16表示基于 CMT Acutance 判据的测量结果。观察的和预定的锐度值之间关系甚至于对于具有不平常的 MTF 系统也是良好的。图17表示基于  $(\text{MTF})^2$  级联的第三个判据。除了具有怪状的 MTF 外，这一判据是良好的。

第四个判据是基于 MTF 级联，这里 MTF 是作各  $\log$  频率的函数，示于图18。这种判据也有涉及怪状 MTF 的烦恼。

图19表示的是采用基于作为对数频率的函数的 MTF 的判据的结果，这种判据使用

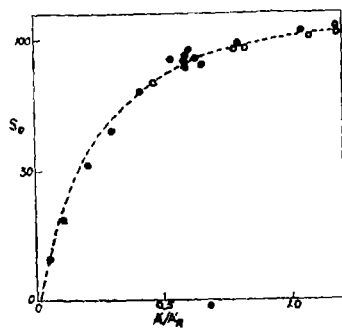


图17 基于  $(\text{MTF})^2$  的判据的实验

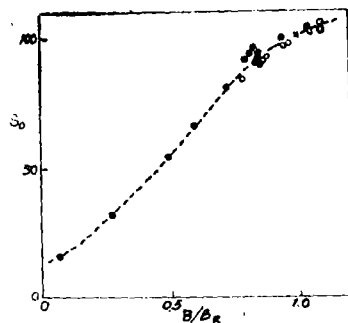


图18 基于调制传递和对数频率关系的判据的实验

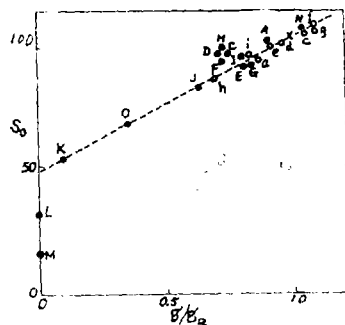


图19 SQF 判据的实验

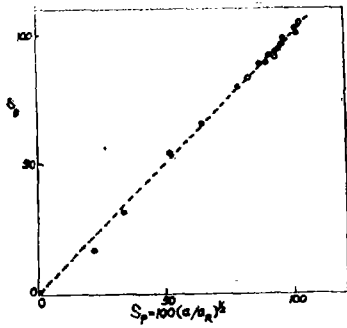


图20 信噪比判据的实验

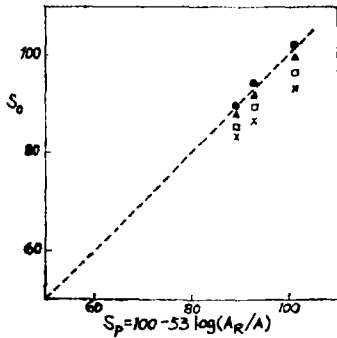


图21 带噪声图象的 CMT Acutance 判据的实验

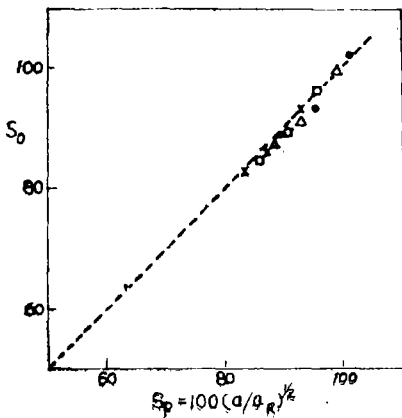


图22 带噪声图象的信噪比判据的实验

一带通滤光片代替完全的视觉函数。而且这一系统对 MTF 不是双峰的或不同系统的 MTF 交叉的情况工作得很好。正如所想象的那样，对于为提供严格实验所包括的那些怪状 MTF，该系统效果很差。如所知，这种方法对于要求快速测量具有工程上的先进性，并且若小心地检查所涉及的 MTF 和排

除那些具有坏影响的 MTF 形状，这种方法很有用。

图20表示使用基于输出信噪比系统的结果。这一系统甚至于在有怪状 MTF 的情况下也工作得很好。公式  $S = 100(a/a_R)^{1/2}$  给出预定的锐度值，其中  $a$  和  $a_R$  是按图11关系确定的面积。

根据通信理论，若图象的 MTF 保持不变，并且粒度或图象噪音增大，那末从图象里可抽出的信息量就会减少。信息的损耗大抵会改变图象的主观表现并且降低图象锐度。

为了检验粒度对图象质量的影响，做了一套 9 张图画，上面都引进了不规则的噪音。对于三种不同 MTF 形状，每种都引进三种不同的不规则噪音级。引进的杂乱噪音的标准偏差最低级是 0.12，中等级是 0.24，最高级是 0.36，单位是光学密度。

在图21中画出锐度判据的结果，它作为 MTF 曲线下面积的对数函数，对噪音未做任何校正。其相关性很差。然而，借助于信噪比判据同时考虑噪音和 MTF，相关性就大大改进，如图22所示。

## 结 论

这些研究推广说明，颗粒度和噪音对锐度的影响与颗粒度对象质的逆影响比较小。对于噪音图象，象质用下面公式试验性地表达：

$$Q = \frac{\text{锐度}}{K + \text{颗粒度}}$$

常数  $K$  取决于颗粒度采用的单位。

当再现具有良好影调，并且在颗粒状不明显的条件下被观察时，系统 MTF 和视觉 MTF 乘积下的面积和象质相关很好。当颗粒状明显时，图象的锐度可用图11中描述的信噪比判据来计算。

J. A. P. E. vol. 3, №2, p53, 1977

于和平译 李剑白校