

# 光学传递函数在全面评价像质中的应用

周武元

(安徽淮南师范专科学校物理系)

## 摘 要

以往在物理学中,是用瑞利判据来评价光学系统的像质,但这种方法有许多局限性。而光学传递函数(OTF)对像质的评价是用频谱之比,故能正确测定实际光学系统的像质。本文提出了用 OTF 对光学系统的像质进行评价的各种方法,它将有利的全面正确地掌握光学系统的性能,这对于新产品的试制或对光学系统性能要作出全面评价而需要进行多方面测量时,更为必要。另外,文中还对瑞利判据和 OTF 这两种评价像质的方法进行了分析比较,说明后者的优点十分明显,因而具有广泛的应用前景。

在过去的物理学中,都是用瑞利判断来确定光学系统所能达到的极限分辨率,并以此来评价光学系统像质的标准,实际上,这种评价方法具有许多局限性。最近几年出现的用光学传递函数评价光学系统像质的方法,具有许多优越性。本文通过对这两种评价方法的分析比较,说明后一种评价方法具有广泛的应用前景。

## 一、瑞利(Rayleigh)判断

瑞利认为<sup>[1]</sup>,两物点在像面上所呈的两个衍射图像,当甲的中央最大值与乙的第一极小值重合时,作为光学系统的最小分辨能力,若用最小分辨角  $\theta$  表示,有

$$\theta = \frac{0.61\lambda}{a},$$

其中  $\lambda$  为光的波长,  $a$  为系统的通光孔径的半径。此时两衍射图像中心之间的光强度约为中央最大光强度的 80%。在望远镜和照相物镜中,最小分辨角  $\theta$  可表示为

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D},$$

其中  $D$  为通光直径,光学系统最小分辨率  $n$  (线对/mm) 可表示为

$$n = \frac{1}{f\theta} = \frac{D}{1.22\lambda f},$$

其中  $f$  为焦距,  $D/f$  叫相对孔径,其倒数叫  $f$  数或  $f/\#$ ,后者应理解为一个单一的符号,即

$$f/\# = \frac{f}{D},$$

瑞利判断的应用局限于无像差系统或像差小于衍射圆的光学系统,并局限于对比度为 1 的物方点光源。它只能反映出光学系统可能达到的最小分辨率。而实际光学系统具有相当大的像差,物方既不是点光源,对比度也不为 1,因而瑞利判断不能反映实际光学系统的像质,或者说不能反映有像差系统在各种对比度时的各种分辨率<sup>[2]</sup>。

以上公式仅是轴上点的最小分辨率,轴外最小分辨率应用下面两式进行计算:

$$\text{在子午像面内的最小分辨率} = \frac{D \cos^3 \omega}{1.22\lambda f},$$

$$\text{在弧矢像面内的最小分辨率} = \frac{D \cos \omega}{1.22\lambda f},$$

其中  $\omega$  为半视场角。

对于小像差系统,用显微镜作目视测量测得的最小分辨率,接近于瑞利判断的最小分辨率。对于大像差系统,用显微镜作目视测量测得的最小分辨率,是这个光学系统实际具有的最小分辨率。

## 二、光学传递函数 OTF (Optical Transfer Function)

OTF 就是光学系统线扩散函数的傅里叶变换,用  $H(N)$  表示. 在一维情况下,

$$H(N) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\delta) e^{-i2\pi N\delta} d\delta \\ = T(N) e^{-i\theta(N)},$$

其中  $T(N)$  为调制度(或说对比度、反衬度)传递因子,  $\theta(N)$  为位相传递因子, 它们与空间频率  $N$  的关系函数分别称为调制传递函数(简记为 MTF) 和位相传递函数(简记为 PTF). 由此可见,用 OTF 来评价像质,可使光学系统的分析工作提高到信息论的水平.

物的对比度  $M_0$  和像的对比度  $M_i$  有如下关系:

$$M_i = T(N)M_0,$$

此时,像的对比度降低  $T(N)$  倍. 然而,对比度  $M$  是描述图像清晰程度的一个重要物理量,它由最大光强度  $I_{\max}$  和最小光强度  $I_{\min}$  之差与其和的比值来确定:

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}.$$

因此,  $T(N)$  描述的是各种空间频率下对比度的衰减,所以通常是用 MTF 曲线对光学系统的分辨率和对比度两个方面来同时作出判断. 若被摄体是黑白相间的线条(从黑到白,光强度按正弦分布),通过光学系统成像后,线条的对比度降低了,MTF 就表示像-物对比度的比值. 通常把这种单位长度内黑白相间的线对称为空间频率. 在图 1 中,横轴为空间频率,纵轴为 MTF 值,这条曲线就是 MTF 曲线.

与分辨率相比,MTF 有如下许多优点<sup>[3]</sup>:

(1) 因为 MTF 能表示对比度的减小程度,因而 MTF 值能与实际性能很好地对应起来. 特别是空间频率在低频时(10—30 条/mm)的 MTF 值与画面的成像清晰度经常能很好地对应.

(2) 可用光学、机械学和电学的实验手段

物理

测量 MTF 值. 重复测量精度相当高,误差在 1—3% 以下.

(3) 对于一个成像物镜,可用 MTF 法测得很多数据,通过分析这些数据,可以正确判断这个物镜的性能.

## 三、MTF 在全面评价像质中的应用

MTF 值随着评价条件的变化而不同,评价条件包括被摄物体的距离、对焦位置、孔径值、光源性质、像高、像的方位、物镜焦距和各种空间频率等. 根据这些评价条件的变化,相应的 MTF 值也随之变化<sup>[2-4]</sup>.

图 1 是 MTF 的基本曲线,它表示在某个特定的评价条件下,不同空间频率的 MTF 值. 在理想的情况下,从被摄物体上一点出发的光线,通过物镜后,全部会聚在像面上的某一点. 实际上,光线不能会聚在一点,会分散得很宽. 这种分散程度越严重,低频部分的 MTF 值就降低,像面上的对比度就变差,甚至完全成了杂光.

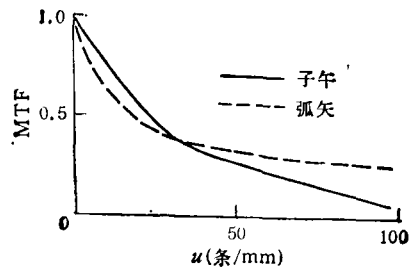


图 1 空间频率对 MTF 的影响

图 2 表示 A, B, C, D 四种物镜的 MTF 值曲线. 当然,这是在特定的评价条件下,像面上某点的 MTF 曲线. 仅用这几条曲线,要想决定物镜的优劣,是不够的,但是,对于在这个特定条件下的某点,这几个不同物镜的清晰度已可以比较了. A 是分辨率和对比度都优良的物镜, B 是对比度优良、分辨率低的物镜, C 是分辨率高、对比度低的物镜, D 是对比度和分辨率都低的物镜.

一种有效的图示方法见图 3. 图 3 是取横

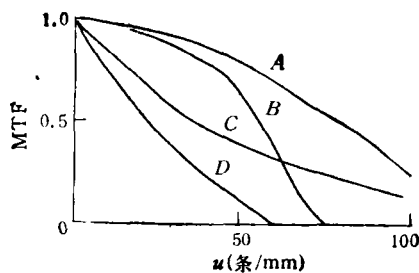


图2 四种镜头(A, B, C, D)的MTF曲线

轴为像高,纵轴为某一特定空间频率时的MTF值,观察所描绘的曲线,能迅速弄清整个画面的MTF值,可方便地作出像质评价。

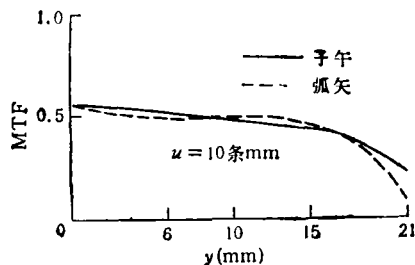


图3 像高对MTF的影响

在一般情况下,画面中心部分的成像清晰度比画面边缘部分要好。图3中的曲线表示,随着像高的增大,MTF值降低,曲线的右端向下弯曲,画面边缘像质降低。但对于优良的物镜,曲线应尽量与横轴平行,同时,子午曲线与弧矢曲线之差也希望尽量小。

实际上,由于物镜有制造误差,透镜和镜框间有间隙,使透镜偏心,从而引起像的模糊。在同一像高和画面的不同方位上,MTF值也会不一样。图3是在某一方位,由对应不同像高时测得的MTF值而描绘成的曲线。图4是对应不同像高在不同方位上测得的MTF值取平均值后描绘成的曲线。在图中用记号标出了MTF的最大值和最小值。这样一来,整个画面的MTF值就可以估计出来了。在同一像高的不同方位上,如果MTF值的变化越大,这就意味着因偏心而引起的模糊越大。

图5可以更明确地表示整个画面的MTF值。它是用 $u = 30$ 条/mm的MTF等值线来

表示。但是,为了描这个图,需要测量许多个点,因而很麻烦。一般用图4就够了。

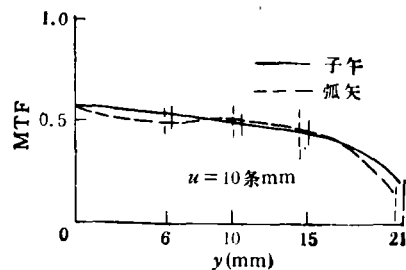


图4 像高对MTF的影响  
(其中包含偏心镜片引起的模糊)

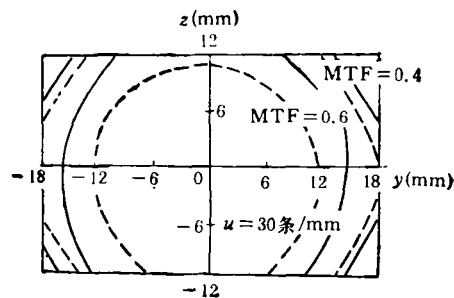


图5 MTF的等值线图

如要从MTF值反过来求出过去习惯上常用的分辨率,其方法是从某一特定条件下的MTF曲线上,寻找对比度下降到已不能判读的那个频率数。图6表示假定判读极限取在

$$MTF = 0.2$$

时,对应各像高所描出的空间频率数的曲线。但是,把这种空间频率数作为分辨率条数,一般会有较大的误差。

为了更好地与分辨率对应起来,可以采取图7所示的方法,即在以MTF和空间频率数为坐标的图象上,再画上感光胶片的极限调制曲线,使MTF曲线和极限调制曲线相交,取交点所对应的空间频率数为分辨率条数。所谓胶片的极限调制曲线,就是对对应某空间频率使胶片对比度变得不能识别的值所联成的曲线。根据这条曲线,可以看出,空间频率数越高,物镜的MTF值越小,在胶片上就越不易分辨。用这种方法确定的分辨率当然与摄影分辨率有所

不同,但对于特别重视分辨率的场合,却很有使用价值。

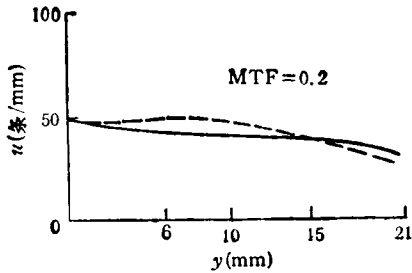


图6 对应像高的空间频率

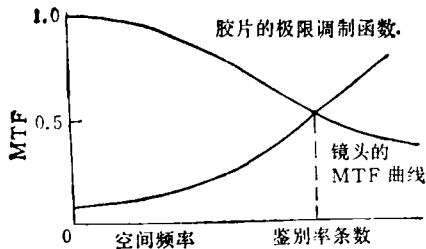


图7 镜头的 MTF 曲线和胶片的极限调制函数所得的鉴别率系数

在评价像质时,一个重要的评价项目是对焦精度。孔径越大,因散焦引起的像质变坏也就越敏感。MTF 值的变化可定量地知道散焦情况。图8是对应特定像高( $y=0$ ,  $y=15\text{mm}$ )画出的因散焦引起 MTF 值变化的曲线图。一般情况下,由于存在散焦,MTF 值会下降得很迅速。孔径越大,这条下降曲线越陡。因散焦引起的像面三维 MTF 值变化情况如图9所示。

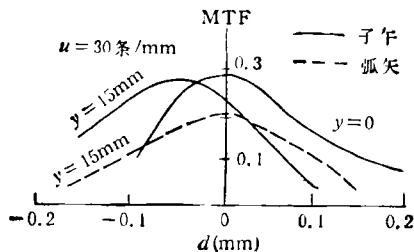


图8 对应工作距的 MTF 的变化

图10表示在准确的对焦位置时像高对 MTF 的影响。图11表示偏离准确的对焦位置

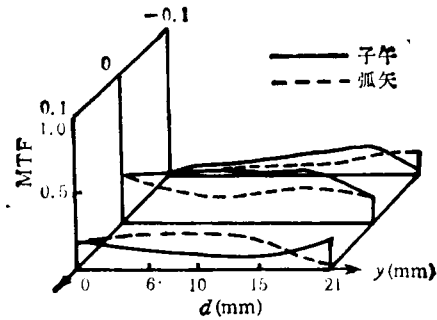


图9 像高、工作距和 MTF 的三维图

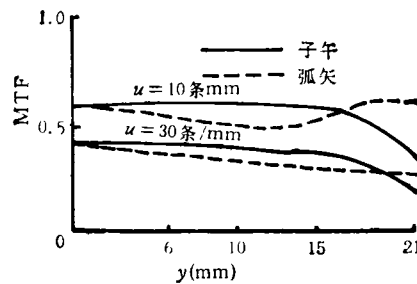


图10 在准确的对焦位置时,像高对 MTF 的影响

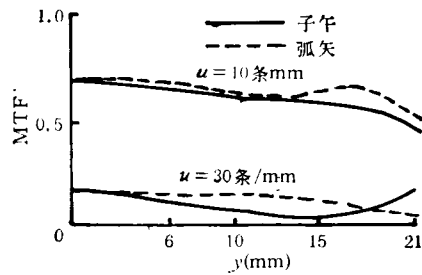


图11 偏离准确的对焦位置 0.15mm 时,像高对 MTF 的影响

0.15mm 时像高对 MTF 的影响。从图11可以看出,偏离对焦位置 0.15mm 时像质已变得很差。

MTF 的应用除上述外,在像质评价方面还有各种应用,总之,用 MTF 评价光学系统像质是很全面的。

#### 四、有待继续研究的方面

用 MTF 评价像质还存在以下几个问题:

(下转第 583 页)