

# 光学系统设计技巧

郑保康

(云南北方光学电子集团有限公司 650114)

(续 2003.No.3)

## §3.4.1 用光学传递函数作为质量评价标准

### (六) 波象差和瞳函数的计算

用物理光学方法计算的光学传递函数称为物理传递函数,它的计算要比几何传递函数复杂得多,计算的大体步骤是首先求出由物点发出的球面波通过光学系统以后的出射波面,即求出光学系统的波象差和瞳函数,然后根据惠更斯原理用衍射积分的方法计算象面的点扩散函数,再对点扩散函数进行付里叶交换,得到系统的光学传递函数。这一节首先讲波象差和瞳函数的计算。

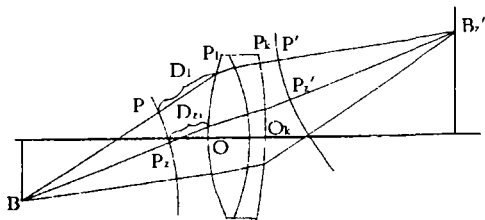


图 3.22

如图 3.22 所示,由物点 B 发出的球面波  $PP_2$  经过光学系统后的出射波面为  $P'P'_2$ ,一般我们以主光线和理想象面的交点  $B_2'$  作为理想波面的球心,则任意一条光线  $BPP'$  的波象差为:

$$W = [PP'] - [P_2P'_2]$$

我们假定主光线在第  $i$  种介质中的光路长为  $D_{zi}$ ,任意一条光线在该介质中的光路长为  $D_i$ ,则该光线的波象差为:

$$W = \sum_1^{K+1} n_i D_i - \sum_1^{K+1} n_i D_{zi} = \sum_1^{K+1} n_i (D_i - D_{zi})$$

.....(3.45)

公式中的  $D_i$  和  $D_{zi}$  就是光路向量计算公式中的  $D$ ,其中  $D_1$  为由入射波面上  $P$  到第一面的投射点  $P_1$  的距离  $PP_1$ ,  $D_{K+1}$  为  $P_K$  到理想波面上  $P'$  的距离  $P_KP'$ 。

首先计算主光线,求出  $D_{z1} \cdots D_{zK+1}$ ,然后每计算一条光线求出  $D_1 \cdots D_{K+1}$  即可按公式(3.45) 求出该光线的波象差。光路计算的精度,一般要求达到十位有效数字,因为通常  $D_i$  小于 100mm,所以  $D_i$  可以精确到小数后第七位。对应误差为  $10^{-7}$ mm,不大于  $\frac{\lambda}{1000}$ 。

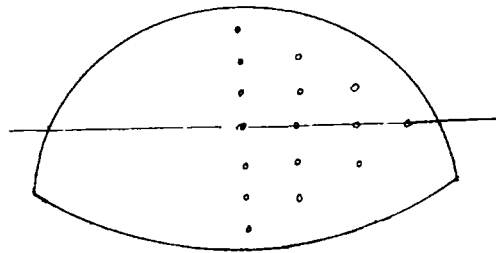


图 3.23

一般在整个瞳面上计算若干条光线的

波象差,如图 3.23 所示。

由于共轴系统对子午面对称,所以只要计算一半光瞳就可以了,然后用待定系数的方法求出波差函数的级数表示式,通常把波象差表示成出瞳坐标的幂级数,下面首先讨论这个幂级数的一般形式。

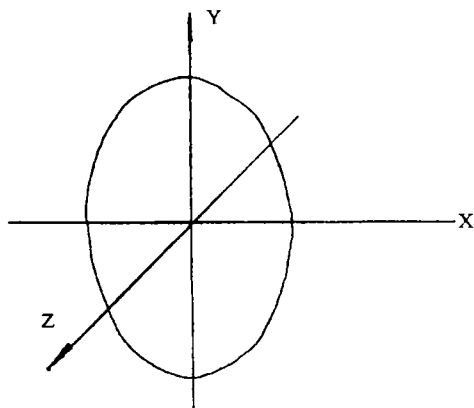


图 3.24

如图 3.24 所示,  $Yz$  坐标面为光学系统的出瞳面,  $X$  轴和系统的光轴重合,由于共轴系统的对称性,所以在幂级数中应不出现  $z$  的奇次项,级数中的各项应由  $(Y^2 + z^2)$  和  $Y$  来构成,这样我们得到波差函数级数展开式的一般形式如下:

$$W = A_{10}(Y^2 + z^2) + A_{01}Y + A_{20}(Y^2 + z^2)^2 + A_{11}(Y^2 + z^2)Y + A_{02}Y^2 + A_{30}(Y^2 + z^2)^3 + A_{21}(Y^2 + z^2)^2Y + A_{12}(Y^2 + z^2)Y^2 + A_{03}Y^3 + A_{40}(Y^2 + z^2)^4 + A_{31}(Y^2 + z^2)^3Y + A_{22}(Y^2 + z^2)^2Y^2 + A_{13}(Y^2 + z^2)Y^3 + A_{04}Y^4 + \dots \quad (3.46)$$

前五项相当于我们前面讨论过的五种初级象差,第三行的四项为二级象差,第四行为三级象差,依次类推。对一般光学系统来说,取到二级象差共九项就能满足要求,有时为了适应大孔径系统的需要,也可以再

增加一项  $A_{40}(Y^2 + z^2)^4$ 。当然如果要求提高精度也可以取更多的项。

为了确定展开式中的各个系数,计算波差的光线数,至少应等于展开式的项数,一般都大于展开式的项数。根据每一条光线在出瞳面上的坐标  $Y, z$  和它的波差  $W$ ,代入展开式(3.46)得到一个以展开式中各个系数为未知数的线性方程式。如果展开式取  $n$  项,计算  $m$  条光线的波差,构成一个有  $n$  个未知数  $m$  个方程式的线性方程组,其中  $m > n$ 。假定未知数用列向量  $A(n)$  表示,方程组的系数矩阵用  $B(m, n)$  表示,波差用列向量  $W(m)$  表示,则方程组可以表示为:

$$B \times A = W \quad \dots \dots \dots (3.47)$$

用最小二乘法求解上述方程组,确定各个系数  $A(n)$ :

$$A = (B^T B)^{-1} B^T W \quad \dots \dots \dots (3.48)$$

求得波差方程之后,可把出射波面用下列复数形式表示:

$$A(Y, z) = a(Y, z) e^{i \frac{2\pi}{\lambda} W(Y, z)} \quad \dots \dots \dots (3.49)$$

$A(Y, z)$  称为瞳函数,  $a(Y, z)$  为波面的振幅分布,  $e^{i \frac{2\pi}{\lambda} W(Y, z)}$  为波面的相位分布,在光学设计中一般认为瞳面上光强度均匀分布,并假定  $a(Y, z) \equiv 1$ 。瞳函数变为:

$$A(Y, z) = e^{i \frac{2\pi}{\lambda} W(Y, z)} \quad \dots \dots \dots (3.50)$$

有了瞳函数,就可以用衍射积分计算象面的点扩散函数,进一步计算光学传递函数。

(七) 用两次付里叶变换法计算光学传递函数

根据惠更斯原理,在远场近似的条件下,即由出瞳平面至象面的距离比出瞳直径大得多的情形,瞳函数为  $A(Y, z)$  的波面,在象面

上形成的振幅分布为:

$$U(y', z') = \iint A e^{-i\frac{2\pi}{\lambda R}(y^2 + z'^2)} dy dz \dots\dots\dots(3.51)$$

公式中各个符号的意义和坐标选取如图 3.25 所示。Yz 为瞳面坐标, y'z' 为象面坐标, R 为理想球面波半径。

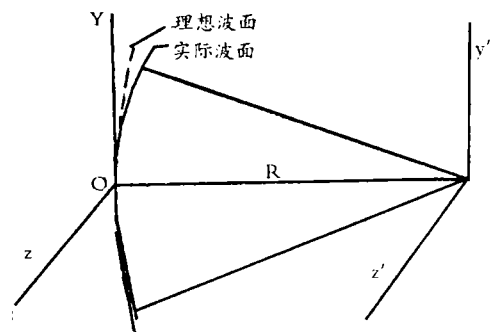


图 3.25

上式相当于瞳函数  $A(Y, z)$  的二维付里叶变换, 所以象面的振幅分布等于瞳函数的付里叶变换。光强度正比于振幅的平方, 所以点扩散函数为:

$$I(y', z') = |U(y', z')|^2 = U(y', z') \cdot U^*(y', z') \dots\dots\dots(3.52)$$

公式中  $U^*(y', z')$  为  $U(y', z')$  的共轭复数。求得点扩散函数以后, 进行付里叶变换就可以得到系统的光学传递函数。所以这种计算光学传递函数的方法称为两次付里叶变换法。

$$OTF(\mu, \nu) = \iint I(y', z') e^{-i2\pi(\mu y' + \nu z')} dy' dz' \dots\dots\dots(3.53)$$

前面说过, 在实际应用中一般只计算子午传递函数和弧矢传递函数。令上式中  $\nu = 0$ , 即得到子午传递函数的公式:

$$OTF_t(\mu) = \iint I(y', z') e^{-i2\pi\mu y'} dy' dz'$$

$$= \int I_t(y') e^{-i2\pi\mu y'} dy' \dots(3.54)$$

$$I_t(y') = \int I(y', z') dz' \dots(3.55)$$

以上  $I_t(y')$  为子午线扩散函数。同理如果令公式(3.53)中  $\mu = 0$ , 即得到弧矢传递函数为:

$$OTF_s(\nu) = \iint I(y', z') e^{-i2\pi\nu z'} dy' dz' = \int I_s(z') e^{-i2\pi\nu z'} dz' \dots(3.56)$$

$$I_s(z') = \int I(y', z') dy' \dots\dots\dots(3.57)$$

$I_s(z')$  为弧矢方向的线扩散函数。在实际计算中我们可以直接由瞳函数  $A(y, z)$  计算线扩散函数  $I_t$  和  $I_s$ , 而不经  $I(y', z')$ 。它们的计算公式如下:

$$I_t(y') = \lambda R \int \left| \int A(y, z) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda R} y y'} dy \right|^2 dz \dots\dots\dots(3.58)$$

$$I_s(z') = \lambda R \int \left| \int A(y, z) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda R} z z'} dz \right|^2 dy \dots\dots\dots(3.59)$$

将  $I_t, I_s$  分别代入公式(3.54)、(3.56)即可计算子午和弧矢传递函数。在使用两次付里叶变换法计算光学传递函数时, 一般都要使用快速付里叶变换技术, 所以两次付里叶变换法, 也称为快速付里叶变换法。

(八) 用自相关法计算光学传递函数

计算物理传递函数的另一种方法称为自相关法, 这个方法的特点是, 它不计算点扩散函数, 直接由瞳函数计算某一指定空间频率的传递函数值。

设光学系统的瞳函数为:

$$A(Y, z) = e^{i\frac{2\pi}{\lambda} W(Y, z)}$$

则系统的传递函数为瞳函数的自相关函数

$$OTF(\mu, \nu) = \iint A(Y, z) \cdot A^*(Y +$$

$$\lambda\mu R, z + \lambda\nu R) dydz \dots\dots\dots(3.60)$$

$A^*$  代表瞳函数  $A$  的共轭复数。由于瞳函数在系统的通光面积以外等于零,所以积分区域只限于光瞳内部,我们设想把通光面在  $Y$  和  $z$  轴方向分别位移  $\lambda\mu R$  和  $\lambda\nu R$ ,如图 3.26 所示,实际积分区域仅限于两通光面的重合部分,即图中打有斜线的部分,除此之外,  $A(Y, z) \cdot A^*(Y + \lambda\mu R, z + \lambda\nu R)$  均为零。把  $A(Y, z)$  和  $A^*(Y + \lambda\mu R, z + \lambda\nu R)$  代入公式(3.60)得:

$$OTF(\mu, \nu) = \iint e^{i\frac{2\pi}{\lambda}[W(Y, z) - W(Y + \lambda\mu R, z + \lambda\nu R)]} dydz \dots\dots\dots(3.61)$$

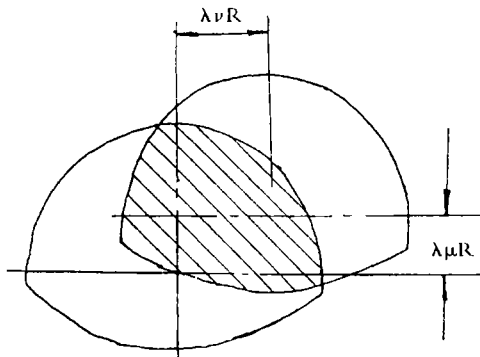


图 3.26

积分区域  $A'$  为上述两通光面的重叠区域。一般把  $OTF(O, O)$  规范化为 1,由上式可以得到:

$$OTF(O, O) = S$$

$S$  为光瞳的实际通光面积,因此规范化以后的  $OTF$  公式为:

$$OTF(\mu, \nu) = \frac{1}{S} \iint_{A'} e^{i\frac{2\pi}{\lambda}[W(Y, z) - W(Y + \lambda\mu R, z + \lambda\nu R)]} dydz \dots\dots\dots(3.62)$$

以上公式中令  $\nu = 0$  或令  $\mu = 0$  分别得到子午和弧矢传递函数的公式。如果我们只

要求计算某一特定空间频率的传递函数时,使用自相关法比两次付里叶变换法来得方便,如果要计算整个传递函数曲线则应用两次付里叶变换法比较方便。

(九) 用光学传递函数作为质量评价标准

光学传递函数能全面地表示一个光学系统的成像质量,它使我们在设计阶段就能比较具体地了解光学系统的实际性能,但是由于它的计算量比较大,而且它和系统之间的关系比较复杂,因此在设计开始阶段往往不采用,仍然使用几何象差。只是在设计的最后阶段才用它来评价象质。这里将叙述几个典型的光学系统的质量评价标准。

1、照相物镜的评价

照相物镜不仅广泛应用于新闻、艺术部门,在军事、科学、技术领域中也有着广泛的应用。所谓照相物镜,就是指那些把空间物体投影成像在感光底片上的光学系统。照相物镜的种类繁多,根据国内使用的情况看,135 照相机较为普遍。下面就以 135 相机的物镜为例进行讨论。

135 相机的物镜的特征频率应该选多少呢?从以下几方面来考虑:(1) 人们经常观察的观察物的特性;(2) 人眼的特性与人们对照相技术的要求;(3) 现阶段的底片情况;(4) 国外的评价情况。

人们生活在大自然中,接触的面是很广的,观察的景物星罗棋布,内容万千。但是,生活在现代社会里打交道、接触最多的还是人物。在日常的生活和工作中,人物的表情和特征在 3 - 5 米的距离上是能看清的。表征人物特征、表情的主要是人物的头部。头部主要由耳、鼻、嘴、眼睛、眉、头发、

脸部等几个部分组成。头发的粗细约 0.1 ~ 0.02mm; 耳朵的粗略轮廓线条约 2 ~ 4mm; 眉宽不一, 约 5 ~ 10mm; 黑眼珠大小为 8 ~ 12mm; 人物随着年龄的增大, 脸上的皱纹逐渐增多, 皱纹线条逐渐变细, 皱纹的宽度一般为 1 ~ 5mm。虽然人物细节部分的线条粗细十分不一, 但是能表征人物表情和特征的特征线条大部分在 2mm 左右。因而我们取细节部分的线条宽为 2mm, 即线对宽为 4mm。人们总希望眼睛看清的景物, 在相同的距离上, 用照相机拍摄的底片, 经过洗印、放大成照片也能看清, 看起来也有亲临其境的感觉。但是, 底片上的景物象的大小与拍摄的照相物境的焦距有关, 与拍摄的距离有关, 随着焦距的增大而增大, 随着物距的增大而减小, 最常用的照相物镜是标准物镜, 即  $f' 50$ 、 $f' 58$  的两种物镜。因而我们取物镜的焦距  $f' = 58$ , 取物距为 4 米。如图 3.27 所示, 可得:

$$\alpha = \frac{b}{s} = \frac{4}{4000} = 0.001, x = \alpha \cdot f' = 0.001 \times 58 = 0.058$$

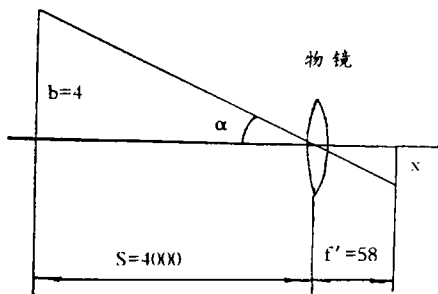


图 3.27

在底片上每毫米的线对数为:

$$n = \frac{1}{0.058} = 17 \text{ 线对/mm}$$

从这里的计算告诉我们, 从观察物的特性考虑, 要求照相物镜的特征频率为 17

线对/mm。

从人眼的观察特性考虑, 白天人们观看自然景物和照片, 它的亮度一般在 10 ~ 100 尼特。从第一章的图 1.11 中可知, 在较高亮度下观察, 观察物的对比度提高到 0.2 时, 空间频率上限提高到 40 周/度。这个数值是极限值, 是实验室条件下试验得到的数据。考虑一般的观察情况, 我们取 0 ~ 40 周/度中较佳的一个频率, 也就是曲线的最低点。从图 1.11 可知空间频率从 2 ~ 10 周/度这段曲线较低, 而且比较平坦。我们取 8 周/度的这个频率作为计算的依据。人眼的观察最佳空间频率 8 周/度即为人眼的最佳分辨角  $\alpha = \frac{60}{8} = 7.5'$ 。

135 相机由于结构紧凑, 外形尺寸小, 携带方便, 美观大方, 广大的照相爱好者都喜欢使用它, 专业的新闻摄影、艺术摄影工作者也都离不开它。根据用户反映, 135 相机的底片画幅尺寸 24 × 36 太小了一点, 不放大不方便于观赏, 一般需将底片放大 2 ~ 3 倍印成相片。在艺术摄影中, 印成相片的倍数还要大一些, 例如明信片的尺寸为 100 毫米 × 150 毫米, 考虑取材, 要放大 5 倍左右。按放大 5 倍考虑, 假定人眼在明视距离 250 毫米下观察放大的相片, 并取人眼视察相片时的最佳分辨角为 7.5', 则得人眼的分辨间距为 (如图 3.28 所示):

$$b' = 0.0003 \times 7.5 \times 250 = 0.56$$

根据相片的要求, 可知底片的分辨间距为:

$$b = \frac{0.56}{5} = 0.112$$

此间距下每毫米的线对数为:

$n = \frac{1}{b} = \frac{1}{0.112} = 9 \text{ 线对/mm}$ 。若经常使用情况下放大按 3 倍考虑, 则可得:

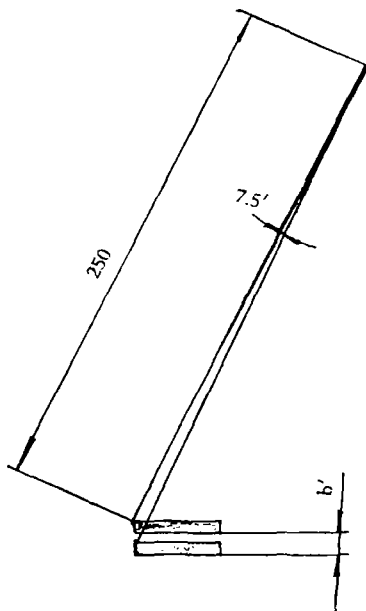


图 3.28 人眼的观察情况

$$b = \frac{0.56}{3} = 0.178, n = \frac{1}{b} = \frac{1}{0.178} =$$

5.6 线对/mm。

从这里可以看出,放大成相片的放大倍数越大,对相机物镜的要求就越高,或者说要求物镜分辨细节的能力越高。从人们对照相技术的要求看,目前情况下要求物镜的特征频率取 9 线对/mm。

照相物镜把物体成象在感光胶片上,因而胶片的感光特性直接影响成象质量。在五十年代,佐柳提出采用信息容量,得出各种胶片如下表所示的特征频率。其公式为:

$$N = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma} \dots\dots\dots(3.63)$$

式中  $\sigma$  为胶片的灰零度。

近年来胶片工业的发展,使胶片的性能有所提高,其基本性能按此分析,认为还是适用的。加上目前手头没有胶片感光特性方面的详细资料,只能这样来考虑和分

析问题。

胶片尺寸	弥散园直径	$\sigma$ ( $\mu$ )	N(线对/mm)
60 × 50	0.05	28.0	8.05
24 × 36	0.035	19.6	11.50
35mm 电影胶片	0.03	16.8	13.40
16mm 电影胶片	0.025	14.0	16.10
8mm 电影胶片	0.013	7.3	31.00

从国外对相机物镜评价情况看,日本是世界照相工业发展较快的一个国家,日本对 135 照相物镜的 MTF 检验,原来采用的频率为 15 线对/mm 和 30 线对/mm 两个空间频率。从它的 MTF 值看,特征频率取在 15 线对/mm,30 线对/mm 是次要的,可见其 MTF 值已经比较低。近藤对 135 相机物镜约 100 种进行了 MTF 的测定,提出了 135 相机物镜的简易测定法和评价标准,他把 MTF 的空间频率选在 10 线对/mm 和 30 线对/mm 上。从 MTF 值的大小看,他选定的频率中,10 线对/mm 是主要的。

综上所述,135 相机物镜的特征频率应取在 9 - 17 线对/mm 之间为宜。究竟取这中间的哪个值呢?我们认为人们对照相技术的要求是随着照相技术的发展而变化的,可能逐步地提出更高的要求。关于照相底片的特性,也是随着科学技术的发展,感光材料的发展而改变的。因而这两方面的分析仅作为特征频率选取的参考。而人们经常观察的观察物的特性,则是基本固定不变的,所以用此项分析作为选取特征频率的主要依据,再考虑到国外目前广泛选用的特征频率为 15 线对/mm,因而 135 相机用标准物镜的特征频率也选取为 15 线对/mm。

照相物镜在特征频率处的 MTF 值应该是多少呢?照相物镜的作用是把物空间

的各种调制度的物体成象在感光底片上。景物的某一调制度(或说对比度)经照相物镜传递,把降低了的调制度传给感光底片,并由感光底片接收。由此可见,某一景物的某一调制度,能否被感光底片接收,决定于景物调制度的高低、物镜的调制传递能力及感光底片的分辨能力。

照相底片测量密度分 21 级,最大密度差为 3。每一级的对比是能分辨的。设每一级的透过率差为  $x$ , 则

$$x^{21} = 10^3, x = 1.39$$

因而底片的调制度为:

$$M = \frac{1.39 - 1}{1.39 + 1} = 0.163$$

低对比目标的调制度应该取多少呢?照相拍摄的景物有高对比的,有中对比的,也有低对比的,有的景物细节对比度太低,是不可能被感光底片所分辨的。照相物镜的检验中也经常用八级灰板的测试卡来检查物镜的成象质量,因此我们也用八级灰板来作为计算的依据。这种八级灰板分为 8 级,其密度差为 2.1, 设每级的透过率差为  $x$ , 则

$$x^8 = 10^{2.1}, x = 1.83$$

从而得八级灰板的调制度为:

$$M = \frac{1.83 - 1}{1.83 + 1} = 0.29$$

目标是八级灰板,经过物镜成象,能被照相底片分辨。在此情况下,物镜应具有调制传递函数为:

$$MTF = \frac{M_{象}}{M_{物}} = \frac{0.163}{0.29} = 0.55$$

上面计算的数值是视场中央的 MTF 值,视场边缘区的 MTF 值不可能同中央区一样,根据使用实际,选  $0.7y'$  处作为视场的要求。其理由是照相物镜的象面是长方

形的,如 135 相机的底片尺寸是  $24 \times 36$ ,  $0.7y'$  处已经处于长方形画面的边角上,  $0.7y'$  以内的视场面积占总面积的四分之三,  $0.7y'$  以外的视场仅占总面积的四分之一,而且是底片的四角部分。若轴上至  $0.7y'$  处均有较高的 MTF 值,则这个物镜的成象质量就是好的。

$0.7y'$  处的 MTF 值允许降到多少呢?轴上点用八级灰板的调制度  $M = 0.29$  进行计算,得到物镜的轴上的调制传递函数  $MTF = 0.55$ 。从现实生活的实际出发,一般人物的头发与脸部,穿着衣服的格子深浅、花色的深浅,人物的受光面与背光面的明暗差,其调制度(或叫对比度)是千差万别的。但是,在大多情况下,能把调制度  $M = 0.5$  的景物反映出来的相片,其真实感和体视感基本上是可以的,不会感到图象死板单调,因而取景物的调制度  $M = 0.5$  作为  $0.7y'$  处的 MTF 值计算依据。此时,在  $0.7y'$  处物镜应该具有的调制传递函数为:

$$MTF = \frac{0.163}{0.5} = 0.326$$

综上所述,提出 135 相机的标准物镜的 MTF 检验指标为:

MTF 位置	频率	15 线对 /mm
轴上		55%
	$0.7y'$	33%

考虑到透镜的加工误差,物镜的装配误差等因素的影响,设计的指标应比检验指标高 10% 左右。因而提出 135 照相机标准物镜的设计指标为:

MTF 位置	频率	15 线对 /mm
轴上		65%
	$0.7y'$	43%

前面提出的检验指标是否符合实际

呢?我们先看一下几种照相物镜的 MTF 实测数据。

西德 Leitz 照相物镜,  $f' = 50, 1:2$  白光传函

位置	MTF 频率	
	10 线对 /mm	20 线对 /mm
轴上	70.5%	55.5%
0.7y'	52%	38%

日本 Nikon 照相物镜,  $f' = 55, 1:1.2$ , 白光传函

位置	MTF 频率	
	10 线对 /mm	20 线对 /mm
轴上	54.5%	36%
0.7y'	40%	19%

莱卡广角照相物镜  $f' = 35, 1:1.4$ , 多色光传函

位置	MTF 频率	
	10 线对 /mm	20 线对 /mm
轴上	71%	57%
0.7y'	58%	34%

莱卡标准照相物镜  $f' = 50, 1:1.4$ , 多色光传函

位置	MTF 频率	
	10 线对 /mm	20 线对 /mm
轴上	87%	68%
0.7y'	57%	38%

莱卡照相物镜  $f' = 90, 1:2$ , 多色光传函

位置	MTF 频率	
	10 线对 /mm	20 线对 /mm
轴上	84%	63%
0.7y'	74.5%	66%

哈萨勃兰特照相物镜  $f' = 80, 1:2.8$  多色光传函

位置	MTF 频率	
	10 线对 /mm	20 线对 /mm
轴上	76%	58%

0.7y'	77%	61%
-------	-----	-----

日本在 JCII 光学传递函数测量仪上, 在白光条件下, 全孔径下测得的照相物镜 MTF 的平均值为:

位置	MTF 频率		
	15 线对 /mm	30 线对 /mm	
广角物镜	轴上	68%	49%
	0.7y'	43%	21%
标准物镜	轴上	62%	41%
	0.7y'	47%	27%
远摄物镜	轴上	59%	38%
	0.7y'	51%	28%

我厂生产的  $2\times$  变焦照相物镜  $f' = 45 \sim 90, 1:3.5$ , 白光传函

位置	MTF 频率	
	10 线对 /mm	
长焦	轴上	70%
	0.7y'	50%
短焦	轴上	60%
	0.7y'	33%

从前面几组实测数据可知, 照相物镜取特征频率为 15 线对 /mm 是合理而可行的。但是, 变焦距照相物镜由于光学设计的难度大, 象差校正状况要比定焦距物镜差一些。由前面的分析可知, 从人眼的特性、胶片的特性考虑, 物镜的特征频率应取 10 线对 /mm 左右。因而, 变焦距照相物镜的特征频率根据生产实际考虑取 10 线对 /mm。

## 2、电影摄影物镜的评价

电影摄影物镜是拍摄电影用的物镜, 它把拍摄的景物成象在感光胶片上, 经过一套复杂的洗印, 最后印成放映用的电影拷贝, 在电影院里放映出来, 供观众观赏。它的成象质量直接影响电影的艺术效果。电影摄影物镜的考虑出发点与照相物镜相

仿,被接受的信息都是外界的景物,最后的接受器都是人眼。

电影摄影物镜的特征频率从以下几个方面去考虑:(1)人们经常观察的观察物的特性;(2)人眼的特性;(3)电影胶片的特征。

人们生活在社会上,生活在大自然中,接触最多的是人物。电影反映社会生活,很大一部分是以人物为主题的。为了看清人物的表情、特征,正如前面所分析的,要求细节的线对宽取4mm。电影摄影的最常用物镜为 $f' 40$ 、 $f' 50$ 。我们取物镜的焦距 $f' = 50$ ,取常用的物距为4米。由图3.29可得

$$\alpha = \frac{b}{s} = \frac{4}{4000} = 0.001,$$

$$x = \alpha \cdot f' = 0.001 \times 50 = 0.05$$

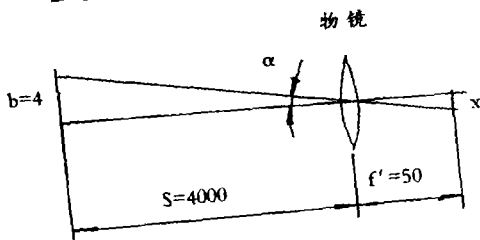


图 3.29

在底片上每毫米的线对数为:

$$n = \frac{1}{0.05} = 20 \text{ 线对/mm.}$$

计算告诉我们,要求电影摄影物镜的特征频率取20线对/mm。

人眼的观察特性,前面已作了分析,人眼观察最佳空间频率为8周/度,即人眼的最佳观察分辨角为 $7.5'$ 。看电影的观察条件要比白天室内观看相片的条件差一些,最佳空间频率还会略低一些。这里还是以 $7.5'$ 来分析,假设35毫米电影放映物镜焦距 $f' = 100$ 毫米,放映距离 $D = 28$ 米,则银

幕宽5.85米,最前排观众离银幕的距离为幕宽的1.5倍(即 $5.85 \text{ 米} \times 1.5 = 8.8 \text{ 米}$ ),能被第一排观众分辨的细节的线对粗度对人眼的张角应为 $7.5'$ ,此值对应应在银幕上的线对宽为

$$B = 8.8 \times 1000 \times 0.0003 \times 7.5 =$$

19.8mm,

将此值换算到放映胶片上,其线对宽为

$$b = B \frac{f'}{D} = \frac{19.8 \times 100}{28000} = 0.071 \text{ mm}$$

于是从人眼观察特性考虑,电影胶片上的每毫米线对数为:

$$n = \frac{1}{0.071} = 14.1 \text{ 线对/mm.}$$

从佐柳采用信息容量考虑,得到35mm

电影胶片的特征频率 $N = 13.4$ 线对/mm。

综上所述,35mm电影摄影物镜的特征频率应在13~20线对/mm范围内选取。主要考虑人们经常观察的观察物特性,其它两方面的分析仅供参考,而提出35mm电影摄影标准物镜的特征频率选为20线对/mm。

电影摄影物镜的MTF决定于景物的调制度,景物的调制度有高有低,以哪种调制度作为计算的依据呢?电影摄影物镜经常用八级灰板来检查成象质量的高低。这里也拿八级灰板作为计算的依据。从前面计算知,八级灰板的调制度 $M = 0.29$ ,经摄影物镜成象后,由电影胶片接收。从前面的计算知道底片的调制度为 $M = 0.163$ ,因而得物镜的调制传递函数为

$$M = \frac{0.163}{0.29} = 0.55$$

电影胶片的画面尺寸是 $16 \times 22$ ,它与135相机的画面尺寸是相似的, $0.7y'$ 以内的视场面积占四分之三,因而我们取 $0.7y'$ 处的点作为视场的检验点。 $0.7y'$ 处的MTF

值允许比轴上点低,按物体的调制度  $M = 0.5$  进行计算,得

$$MTF = \frac{0.163}{0.5} = 0.33。$$

综上所述,提出 35mm 电影摄影物镜的 MTF 检验指标:

位置	MTF 频率	20 线对 /mm
轴上		55%
	0.7y'	33%

考虑透镜的加工误差,物镜的装配误差,提出 35mm 电影摄影物镜的设计指标:

位置	MTF 频率	20 线对 /mm
轴上		65%
	0.7y'	43%

上述 35mm 电影摄影物镜的 MTF 检验指标,从下面的几组物镜的实测数据来看,证实数据是合适的。但是,考虑到变焦距物镜设计的难度大,透镜的片数多,带来的加工、装配误差大,把特征频率取低一点,取在 13.5 线对 /mm 处,这样考虑可能更为合理一些。

柯克电影摄影物镜  $f' 50, 1:2$ , 白光传函:

位置	MTF 频率	20 线对 /mm
轴上		52.5%
	0.7y'	38%

柯克电影摄影物镜  $f' 32, 1:2$ , 白光传函:

位置	MTF 频率	20 线对 /mm
轴上		80%
	0.7y'	52%

长城牌电影摄影物镜  $f' 20, 1:2$ , 白光

传函:

位置	MTF 频率	20 线对 /mm
轴上		74.5%
	0.7y'	33.5%

云南光学仪器厂  $10\times (f' 25 \sim 250)$  电影摄影物镜,  $1:3.2$ , 多色光传函:

位置	MTF 频率	10 线对 /mm	15 线对 /mm	20 线对 /mm	25 线对 /mm
长焦 ( $f' 250$ ) 轴上		63%	48%	37%	31%
中焦 轴上		—	—	—	—
短焦 ( $f' 25$ ) 轴上		93%	84%	73%	67%

北京六〇八厂  $5\times (f' 20 \sim 100)$  电影摄影物镜,  $1:2.8$ , 绿光传函:

位置	MTF 频率	12 线对 /mm	22 线对 /mm	30 线对 /mm
短焦 ( $f' 20$ ) 轴上		—	—	59%
中焦 ( $f' 50$ ) 轴上		65%	56%	48%
长焦 ( $f' 100$ ) 轴上		47%	32%	27%

柯克  $5\times (f' 20 \sim 100)$  电影摄影物镜,  $1:2.8$ , 绿光传函:

位置	MTF 频率	12 线对 /mm	22 线对 /mm	30 线对 /mm
短焦 ( $f' 20$ ) 轴上		—	—	64%
中焦 ( $f' 50$ ) 轴上		66%	63%	51%
长焦 ( $f' 100$ ) 轴上		72%	56%	45%

(未完待续)