

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.2)

§3.4 质量评价标准和光学系统象差的公差

光学系统的质量评价标准,这里主要是指光学系统的成象质量标准。低对比分辨能力、能量集中度和光学传递函数就是一般可以作为光学系统成象质量标准的三个可能的量。但是应该注意到这种一般的标准并不会在任何情况下都适用。严格说来,质量指标应考虑到被观察的对象或被接收的信号的特征后才能确定。例如我们只要求观察到某一定频率一定对比的信号,那么我们的光学系统和接收器除了对这一频率的传递函数大小外,其他频率的传递函数值对我们的目的都是毫无意义的。低对比分辨能力,实际上是光学传递函数中的调制传递函数在某一频率下的数值,它不是人们经常说的分辨力。通常人们说的分辨力是指高对比情况下的分辨力,高对比的分辨力是不能表征光学系统成象质量的,它只可看作是通光孔径 $2h$ 或孔径 u 的标志。能量集中度与调制传递函数是密切相关的,能量越集中则光学系统的象质越好,也就是光学系统的调制传递函数越高。光学系统的质量评价标准是什么呢?回答应该很明确,是用光学传递函数

作为质量评价标准。在具体的应用过程中还要作一些技术处理:在各类物镜、目镜设计过程中,用几何象差进行校正和平衡,最后用光学传递函数进行质量评价(包括成品的检测)。在各类望远系统设计过程中,用全系统的光线出射象差角量进行校正和平衡,最后用象差角量进行评价,系统的检测可用光学传递函数或传统的星点和分辨力评价。当然,对于小象差系统,可以用波象差来评价光学系统的设计结果,提出波面和参考球面的最大差别不超过 $\lambda/4$ 时,此波面可看作是无缺陷的。从能量的观点看,这种只提缺陷的深度,而不管缺陷的面积占总面积的比重,这种判断是不能接受的。因此,下面对光学传递函数和几何象差的评价作较为详细的介绍。

§3.4.1 用光学传递函数作为质量评价标准

(一) 概述

以前我们用来评价光学系统质量的指标是几何象差或波象差,这两种质量指标都有缺点,因为它们和光学系统的实际成象质量之间并无直接的数量关系。例如在光学仪器生产中,长期以来用分辨力作为系统质量的指标,一般说来象差越小分辨力越高,但是它们之间并没有简单的数量

对应关系,因此光学系统设计完成以后,必须经过试制和实际试验才能最后决定成象质量是否满足要求,如果不能满足要求就要重新修改设计,把象差校正得更好,再进行试制,直到获得满意的象质为止。

经过长期的生产实践,对常用的光学仪器,例如目视光学仪器,人们已经总结出一些比较可靠的经验数据,作为光学设计中象差公差的标准。但是随着科学技术的发展,光学仪器的使用范围日益扩大,种类不断增加,作为光学系统的接收器,已不限于人眼,例如各种不同性能的感光乳胶,光电成象器件的阴极面,和各种类型的光敏元件等。在这些不同类型的仪器中,光学系统的实际工作性能和象差之间,更没有直接的数量对应关系,仍然只能通过试制和实际试验来解决。

怎样在系统的设计阶段,就能比较确切的知道系统的实际工作性能呢?这个问题一直是光学设计领域中长期研究的课题,直到二十世纪四十年代把傅里叶分析的方法应用到光学领域以后,才找出了一条解决问题的正确途径,这就是所谓的光学传递函数,这就是我们本节研究的主要内容。在阐述中,我们认为读者已经具备了付里叶级数和付里叶变换的基本知识,不少公式和结论均直接引用。着重说明它们应用于光学领域的物理意义。

(二) 图像的分解和合成——付里叶级数和付里叶变换

光学系统成象,就是把物平面上光强度的分布图形,转变成象平面上的光强度分布图形,如图 3.16 所示。理想的情况应该是这两个图形几何形状完全相似,并且

对应点的强度成比例,这种关系可以用下列数学形式表示。

设物平面的光强度分布函数为 $I(y, z)$, 象平面的光强度分布函数为 $I'(y', z')$, 如果系统理想成象, 则应满足以下关系。

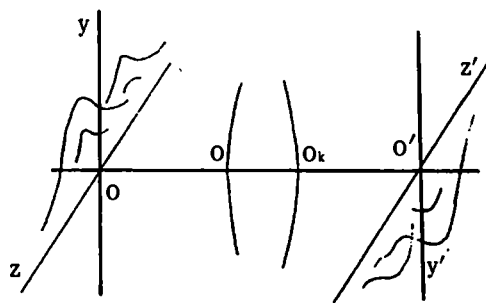


图 3.16

$I'(y', z') = C \cdot I(y, z), y' = \beta y, z' = \beta z$ 公式中 C 为比例常数, β 为物象平面之间的放大率。为了简化,今后我们都以一维的情况作为例子进行说明,并假定 $\beta = 1$, 如果实际系统 $\beta \neq 1$, 相当于象面坐标比例尺的改变,对讨论结果并无影响。这样上面的关系可以简化为:

$$I'(y') = CI(y)$$

实际光学系统不可能完全满足上述要求,为了了解系统的实际成象质量,就要根据物平面的强度分布 $I(y, z)$, 求出象平面的强度分布 $I'(y', z')$ 。由于 $I(y, z)$ 随着景物不同而改变,知道了一种景物通过系统以后的物、象平面强度分布关系,别的景物仍然无法知道,怎样才能把各种景物的成象特性全面地表示出来呢?人们从付里叶分析的方法在其他领域中的应用想到,无论连续或不连续,周期或非周期的函数,都能把它分解为不同频率和不同振幅的余弦和正弦函数之和,那么任意的空间图像

也可以把它分解为各种正弦的空间强度分布之和。

首先讨论周期函数,假定 $I(y)$ 为一个以 P 为周期的周期函数,可以把它分解成由正弦函数和余弦函数组成的付里叶级数。

$$I(y) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi\mu ny + b_n \sin 2\pi\mu ny)$$

$$= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos[2\pi\mu ny + \theta_n] \quad \dots(3.17)$$

$$a_n = \frac{2}{P} \int_{-\frac{P}{2}}^{\frac{P}{2}} I(y) \cos 2\pi\mu ny \, dy$$

$$= \frac{2}{P} \int_0^P I(y) \cos 2\pi\mu ny \, dy \quad \dots\dots\dots(3.18)$$

$$b_n = \frac{2}{P} \int_{-\frac{P}{2}}^{\frac{P}{2}} I(y) \sin 2\pi\mu ny \, dy$$

$$= \frac{2}{P} \int_0^P I(y) \sin 2\pi\mu ny \, dy$$

$$\dots\dots\dots(3.19)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \theta_n = \tan^{-1}(-\frac{b_n}{a_n}) \dots$$

$$\dots\dots\dots(3.20)$$

$$\mu = \frac{1}{P}, n = 0, 1, 2 \dots\dots$$

$n\mu$ 为正弦和余弦函数的频率,不过这里周期 P 不代表时间,而代表空间距离,所以 μ 称为“空间频率”。 A_n 代表不同频率的余弦函数的振幅, θ_n 为初位相。

为了运算方便,通常把上述付里叶级数用复数形式表示。

$$I(y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \theta^{i2\pi\mu ny} \quad \dots\dots\dots(3.21)$$

$$C_n = \frac{1}{P} \int_{-\frac{P}{2}}^{\frac{P}{2}} I(y) e^{-i2\pi\mu ny} \, dy$$

$$= \frac{1}{P} \int_0^P I(y) e^{-i2\pi\mu ny} \, dy \quad \dots\dots(3.22)$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

C_n 称为复振幅,它同时表示了振幅 A_n 和初位相 θ_n ,它们之间存在以下关系。

$$\left. \begin{aligned} n \geq 0, C_n &= \frac{1}{2} A_n \theta^{i\theta_n} \\ n < 0, C_n &= \frac{1}{2} A_n \theta^{-i\theta_n} \end{aligned} \right\} \dots\dots(3.23)$$

利用上述公式,我们可以把一个周期函数分解为无穷多个频率按函数本身的频率 $\mu = \frac{1}{P}$ 的整数倍上升的余弦函数和正弦函数之和,不同频率具有不同的振幅 A_n 和初位相 θ_n 。我们把 A_n 称为周期函数 $I(y)$ 的振幅频谱,而把 θ_n 称为位相频谱。如果已知 $I(y)$ 可以用公式(3.18)、(3.19)、(3.20)或(3.22)求出该函数的频谱;也就相当于把函数 $I(y)$ 进行分解。反之如果知道了函数 $I(y)$ 的频谱 A_n 和 θ_n ,就可以用公式(3.17)、(3.21)合成 $I(y)$ 。

下面我们举一个实际例子,假定 $I(y)$ 为一个以 P 为周期的函数,它的函数值如图 3.17(a) 所示。要求把它分解成付里叶级数。

由于 $I(y)$ 对纵坐标对称, y 和 $(-y)$ 有相同的函数值,因此展开式(3.17)中 $b_n = 0$,级数中只剩下余弦项,只需要计算 a_n 即可。由函数图形 3.17

根据公式(3.18)得到:

$$a_n = \frac{2}{P} \int_{-\frac{P}{4}}^{\frac{P}{4}} (\frac{\pi}{2}) \cos 2\pi \frac{n}{P} y \, dy$$

$$= \frac{1}{2n} \sin \frac{2\pi n}{P} y \Big|_{-\frac{P}{4}}^{\frac{P}{4}}$$

$$= \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{2}$$

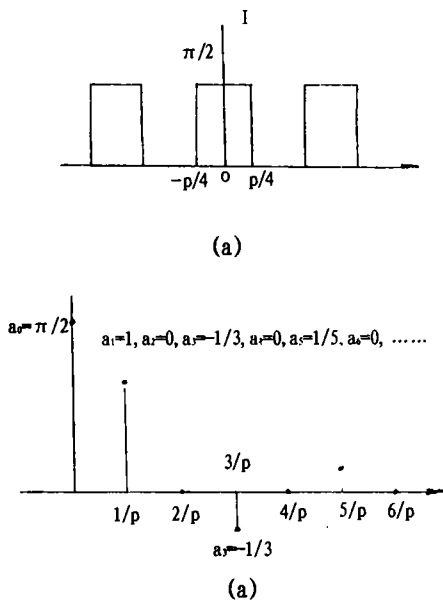


图 3.17

将 n 值代入上式得:

$$a_0 = \frac{\pi}{2}, a_1 = 1, a_2 = 0, a_3 = -\frac{1}{3}, a_4 = 0,$$

$$a_5 = \frac{1}{5}, a_6 = 0, a_7 = -\frac{1}{7}, a_8 = 0 \dots\dots$$

由此得到 $I(y)$ 的展开式如下:

$$I(y) = \frac{\pi}{4} + \cos\omega y - \frac{1}{3}\cos3\omega y + \frac{1}{5}\cos5\omega y - \frac{1}{7}\cos7\omega y + \dots\dots\dots$$

以上公式中 $\omega = 2\pi\mu$, 称为圆频率。上述函数的振幅频谱如图 3.17(b) 所示, 位相频谱 $\theta_n = 0$ 。

上面这个函数实际就是光学象质检验中使用的分辨力图形的光强度分布函数。由上述结果, 这样的分辨力图形可以分解成一个均匀背景加上不同频率的余弦分布的图形之和。例如一个空间频率为 10 线对/mm 的分辨力图形, 可以分解成一个均匀背景加空间频率为 10、30、50……线对/mm 的具有不同振幅的余弦强度分布

之和。

下面讨论非周期函数, 一个非周期函数可以设想成周期 P 趋于无限大而频率趋于无限小量 du 的周期函数, 这样公式 (3.22) 变为:

$$C_n = du \int_{-\infty}^{\infty} I(y) e^{-i2\pi nduy} dy$$

将 C_n 代入公式 (3.21) 得:

$$I(y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} I(y) e^{-i2\pi nduy} dy \right] e^{i2\pi nduy} du$$

当 n 由 $-\infty$ 变到 $+\infty$ 时, 对应着函数频谱的整个频率范围, 即相当于频率 $\mu = ndu$ 由 $-\infty$ 变到 $+\infty$, 所以上面公式中的 ndu 可以用 u 代替, 和式对无限多个微量 $d\mu$ 求和, 也就是对 $d\mu$ 求积分, 因此上式变为:

$$I(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} I(y) e^{-i2\pi\mu y} dy \right] e^{i2\pi\mu y} d\mu$$

$$\text{令: } \vartheta(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} I(y) e^{-i2\pi\mu y} dy \dots\dots\dots(3.24)$$

则代入上式得:

$$I(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \vartheta(\mu) e^{i2\pi\mu y} d\mu \dots\dots\dots(3.25)$$

公式 (3.24) 称为付里叶变换, 而公式 (3.25) 称为付里叶逆变换。这里 $\vartheta(\mu)$ 在频率空间已不象 C_n 那样只是不连续点, 而是整个频率空间的连续函数了, 我们同样把 $\vartheta(\mu)$ 称为非周期函数 $I(y)$ 的频谱。因此非周期函数的付里叶变换就是该函数的频谱, 而一个函数的频谱的付里叶逆变换就得到函数本身。和前面周期函数展开成付里叶级数相似, 非周期函数的付里叶变换和逆变换的过程也就相当于函数的分解和合成过程, 我们可以理解为 $I(y)$ 是由无穷多个复振幅为 $\vartheta(\mu) d\mu$ 的正弦和余弦函数合成的。

下面我们同样举一个例子, 假定函数

$I(y)$ 的值如图 3.18(a) 所示, 求它的频谱函数。

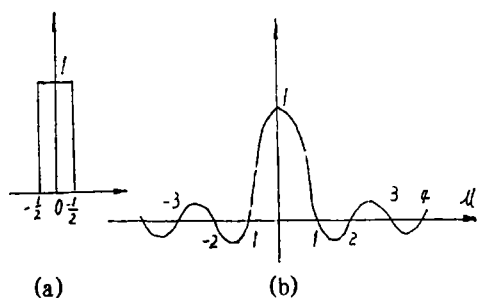


图 3.18

根据公式(3.24)和 $I'(y)$ 的函数图形可以得到:

$$\begin{aligned}\vartheta(\mu) &= \int_{-1/2}^{1/2} e^{-i2\pi\mu y} dy \\ &= \frac{-1}{i2\pi\mu} \int_{-1/2}^{1/2} e^{-i2\pi\mu y} d(-i2\pi\mu y) \\ &= \frac{-1}{i2\pi\mu} e^{-i2\pi\mu y} \Big|_{-1/2}^{1/2} \\ &= \frac{-1}{i2\pi\mu} [e^{-i\pi\mu} - e^{i\pi\mu}]\end{aligned}$$

利用欧拉公式将指数函数变成三角函数得到

$$\vartheta(\mu) = \frac{\sin\pi\mu}{\pi\mu}$$

频谱函数 $\vartheta(\mu)$ 的曲线图形如图 3.18(b) 所示, 由于 $\vartheta(\mu)$ 为实函数所以 $\theta(\mu) \equiv 0$ 。

(三) 什么是光学传递函数

利用上节给出的公式, 我们能够把物面图形的强度分布, 分解为一系列正弦或余弦的强度分布。作这样的分解是否有实际意义呢? 这取决于光学系统的性质。如果把每一个正弦或余弦分布的图形, 分别通过光学系统成象, 把这些象合成以后就能得到物面的象, 那末作这样的分解才有意义, 满足这个要求的系统称为线性系统。线

性系统的定义如下:

如果系统有一个输入 $f_i(x)$, 相应有一个输出 $f'_i(x)$ 表示为:

$$f_i(x) \rightarrow f'_i(x)$$

则线性系统必须满足以下关系

$$\Sigma a_j f_i(x) \rightarrow \Sigma a_j f'_i(x)$$

另外还要求系统满足空间不变性, 也就是要求系统的成象性质不随物平面上图形位置的改变而改变, 物平面上的图形移动一个距离, 象平面上的图形也只是相应的移动一个距离, 而图形本身不变。

$$f_i(x) \rightarrow f'_i(x)$$

空间不变性系统必须满足

$$f_i(x+a) \rightarrow f'_i(x+a)$$

满足上面这两个条件的系统称为空间不变的线性系统, 这样的系统具有一系列特点, 我们将在下面讨论。

实际光学系统是否满足这两个条件呢? 一般说来, 并不能完全满足, 但是如果光学系统使用非相干的单色光照明, 近似为一线性系统。另外对大部分成象系统来说, 成象质量随象高的变化是比较缓慢的, 在一定范围内, 可以近似看作是空间不变的。在本节中我们都把光学系统作为空间不变线性系统来讨论。

空间不变线性系统在成象性质上有些什么特点呢? 首先是对这样的系统研究它的成象性质时, 可以把图象进行分解和合成。另外一个十分重要的特点是一个强度按余弦(或正弦)分布的物, 所成的象仍然是一个相同频率的余弦(或正弦)分布, 只是它的振幅和位相可能发生变化, (这里仍假定 $\beta = 1$, 所以物象图形的频率相同, 如果 $\beta \neq 1$, 则象方频率等于物方频率除 β)。

下面我们对以上性质作简单的证明。

设输入函数 $I(y)$ 为一个余弦分布,用复数表示为 $I(y) = ae^{i\omega y}$,相应的输出函数 $I'(y)$ 我们用如下的形式表示。

$$I(y) = ae^{i\omega y} \rightarrow I'(y)$$

由于系统满足空间不变性,因此

$$\begin{aligned} I(y + y_1) &= ae^{i\omega(y+y_1)} \\ &= ae^{i\omega y} \cdot e^{i\omega y_1} \rightarrow I'(y + y_1) \end{aligned}$$

以上关系对任意的 y 和 y_1 场应成立,我们令 $y = 0$ 代入得:

$$I(y_1) = I(0)e^{i\omega y_1} \rightarrow I'(y_1)$$

根据系统符合线性的关系,同时把 $e^{i\omega y_1}$ 看作一个常数,则:

$$I(y_1) = I(0)e^{i\omega y_1} \rightarrow I'(y_1) = I'(0)e^{i\omega y_1}$$

$I'(0)$ 显然是一个常数,由于 y_1 是任意常数,因此我们也可以把 $I(y_1)$ 和 $I'(y_1)$ 看作是 y_1 的函数。前面假定 $I(y)$ 是 y 的余弦分布,则 $I(y_1)$ 显然也是 y_1 的余弦分布,根据上面的公式 $I'(y_1)$ 也是 y_1 的余弦分布,它们的频率相同,但振幅和位相可能改变。

根据上面的讨论,总起来说,一个空间不变线性系统的成象性质可以归纳如下:

物平面上任意的强度分布可以分解为不同频率的余弦分布,每个余弦分布通过系统成象,在象平面上仍为一余弦分布,它们的频率相同(假定 $\beta = 1$ 时),但振幅和位相可以改变。把象面上所有频率的余弦分布合成以后就得出象面图形。

因此一个空间不变线性系统的成象性质,可以用物、象平面上不同频率的余弦分布的振幅比,和位相差来表示。前者称为振幅传递函数(亦有称调制传递函数),用 $MTF(\mu)$ 表示,后者称为位相传递函数,用

$PTF(\mu)$ 表示。二者统称为光学传递函数,用 $OTF(\mu)$ 表示,它们之间的关系可以用复数的形式表示如下:

$$OTF(\mu) = MTF(\mu)e^{iPTF(\mu)} \dots\dots(3.26)$$

下面我们再结合具体例子加以说明,假定一个圆频率为 ω 的余弦分布函数为:

$$I(y) = 1 + a_\omega \cos \omega y \quad (a_\omega < 1)$$

所以要在余弦项 $a_\omega \cos \omega y$ 前面加 1,是因为光强度分布 $I(y)$ 不可能为负值,上述物分布相当于在一个 $\omega = 0$,强度为 1 的均匀背景上,用一个 $a_\omega \cos \omega y$ 的余弦函数进行调制,如图 3.19 中实线所示。根据空间不变线性系统的成象性质,这个均匀背景成象仍为一均匀背景,如果不考虑光学系统的光能损失,则强度不变仍为 1。

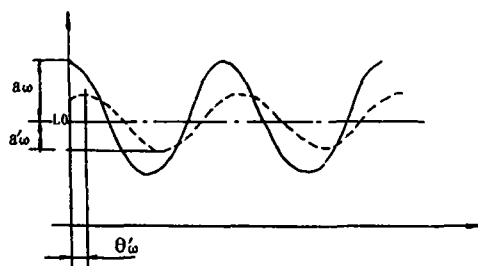


图 3.19

$a_\omega \cos \omega y$ 这个余弦分布通过光学系统以后,对应一个相同频率的余弦分布 $a'_\omega \cos(\omega y + \theta'_\omega)$,因此总的象面强度为:

如图 3.19 中虚线所示。根据定义:

$$MTF(\mu) = \frac{a'_\omega}{a_\omega}, PTF(\mu) = \theta'_\omega。$$

MTF 为两个余弦调制振幅之比,所以也称调制传递函数。在光学象质检验中,通常用“对比度”来表示成象的清晰度,对比度的定义如下:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \dots\dots\dots(3.27)$$

上述物分布对应的 $I_{\max} = 1 + a_{\omega}, I_{\min} = 1 - a_{\omega}$ 代入公式(3.27) 得:

$$K_{\omega} = a_{\omega}$$

同理可求得象的对比度为:

$$K'_{\omega} = a'_{\omega}$$

由此得到:

$$\text{MTF}(\mu) = \frac{a'_{\omega}}{a_{\omega}} = \frac{K'_{\omega}}{K_{\omega}} \dots\dots\dots(3.28)$$

所以振幅传递函数 $\text{MFT}(\mu)$ 也称为对比传递函数。

上面我们详细介绍了光学传递函数的意义,如果知道了一个系统的光学传递函数,就很容易由物面频谱 $\vartheta(\mu)$ 求出象面频谱 $\vartheta'(\mu)$ 。

$$\vartheta'(\mu) = \vartheta(\mu) \cdot \text{OTF}(\mu) = \vartheta(\mu) \cdot \text{MTF}(\mu) \cdot e^{i\text{PTF}(\mu)} \dots\dots\dots(3.29)$$

从而可以由物面强度分布求出象面强度分布。

显然一个理想的光学系统应该是 $\text{OTF}(\mu) \equiv 1$,根据 $\text{OTF}(\mu)$ 的大小就可以说明系统质量的优劣。

(四) 怎样计算光学传递函数

我们已经了解了光学传递函数的意义,以及它和光学系统成象质量的关系。把它用来作为光学设计的质量指标,还必须解决根据系统的结构参数计算光学传递函数的问题。根据光学传递函数的定义,以及图象的分解和合成原理,如果我们把一个由各种频率成分的余弦分布合成的图形,通过系统成象,再把象面图形分解成对应频率的余弦分布,那末物象平面上相同频率的余弦分布的振幅之比即为振幅传递函数,位相之差即为位相传递函数。那末我们

究竟选一个什么样的图形呢?它应该满足两个要求,首先它必须包含各种频率成分,而且频谱函数应尽量简单,其次,它在象空间相应的强度分布比较容易计算。

最简单的频谱函数是所有频率的频谱等于常数,例如:

$$\vartheta(\mu) \equiv 1$$

根据公式(3.25) 可以求得其强度分布函数为:

$$I(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i2\pi\mu y} d\mu$$

上述积分函数称为 $\delta(y)$ 函数,它具有以下性质:

$$I(y) = \delta(y) = \begin{cases} \infty, & y = 0 \\ 0, & y \neq 0 \end{cases}$$

这个函数所代表的物面强度分布,实际上相当一个位于坐标原点的发光点。根据发光点的定义,它没有大小,只是一个几何点,但发射一定能量,因此它的能量密度(相当于物平面上的面发光度)等于无限大。除了这一个发光点之外,物面上其它位置强度均为零,和上述 $\delta(y)$ 函数的性质完全吻合。发光点通过系统后,在象面上形成的强度分布称为“点扩散函数”,用 $P(y)$ 表示,它的计算比其它物面图形方便得多,因此也符合前面提出的第二个要求。所以点光源是我们用来计算传递函数的最理想的物面图形。

有了 $P(y)$ 求系统的传递函数就比较方便了。只要把 $P(y)$ 进行付里叶变换,由于发光点的频谱恒等于1,因此 $P(y)$ 的振幅频谱就是系统的振幅传递函数 $\text{MTF}(\mu)$,它的位相频谱就是系统的位相传递函数 $\text{PTF}(\mu)$ 。由此得到:

$$OTF(\mu) = P(\mu) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(y) e^{i2\pi\mu y} dy \dots\dots\dots(3.20)$$

所以光学传递函数也可以定义为点扩散函数的付里叶变换,这是我们计算光学传递函数的基本出发点。实际应用过程中,还需要作某些具体规定。首先前面假定光学系统是空间不变线性系统,整个物平面上各点的成象质量完全相同,但实际上并不完全相同。和计算象差时采用的方式相似,我们在整个视场内取不同物高的若干物点,分别计算它们的传递函数,以此来表示整个象面的成象质量。

计算每一个象点的传递函数时,认为它们都符合空间不变线性系统的要求,即分别计算出每个象点的点扩散函数,进行付里叶变换得到各点的传递函数。对轴外点来说点扩散函数在不同方向上并不相同,因此同一象点在不同方向上的传递函数也不同。和计算象差的情况类似,通常只计算子午和弧矢两个方向的光学传递函数,以此来代表该象点的成象质量。

前面的讨论都只限于一维的情形,讨论系统对物平面的成象性质,应该是一个二维的问题。一维的点扩散函数相当于二维情况下的线扩散函数。把发光点用无限细的发光直线来代替,它通过系统所成的象,在它的垂直方向上的强度分布称线扩散函数,如图 3.20 所示。

子午方向线扩散函数的付里叶变换就是子午传递函数,用 OTF_t 表示,弧矢方向线扩散函数的付里叶变换就是弧矢传递函数用 OTF_s 表示。

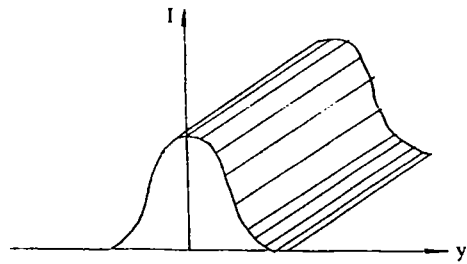


图 3.20

二维情形的点扩散函数,应该是一个二维的函数 $I_p(y, z)$ 在 y 和 z 方向的线扩散函数和点扩散函数之间满足以下关系:

$$I_L(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_p(y, z) dz \dots\dots(3.31)$$

$$I_L(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_p(y, z) dy \dots\dots(3.32)$$

所以在计算光学传递函数时,还必须由点扩散函数求线扩散函数,再进行付里叶变换,得到子午和弧矢的光学传递函数。

(五) 几何传递函数的计算

根据前面所说,要计算光学系统的传递函数首先要求出系统的点扩散函数,所谓点扩散函数就是象点图形的数学表示式。按几何光学的方法计算点扩散函数求出的传递函数称为几何传递函数;用物理光学的方法计算点扩散函数,求得的传递函数称为物理传递函数,这一节先介绍几何传递函数的计算。

我们把光学系统的人瞳面均匀划分成许多小的区域,如图 3.21(a) 所示,由物点通过每一个区中心计算一条光线,每条光线代表了一定的光能量。这些光线和象面交点所构成的图形就代表了象点的能量分布图形,如图 3.21(b) 所示。点的密度越大,表示能量越集中,这样的图形一般称为

点列图。根据点列图的尺寸,和点的密集程度,可以在一定程度上表示系统的成象质量,同时也可以作为系统进行星点检验时的参考,因此点列图本身也是一种表示成象质量的方法。

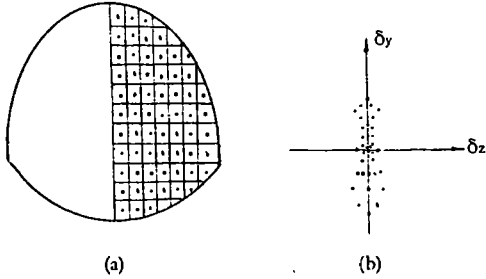


图 3.21

下面我们介绍如何根据点列图计算光学系统的几何传递函数。为了计算传递函数,首先要根据点列图求出点扩散函数。按照几何光学的观点,每一条光线和象面的交点,代表一定的光能量,可以用一个 δ 函数表示,假定全部光线的总光能量为 1,光线数 N ,每条光线和象面的交点可以用如下的 δ 函数表示:

$$\frac{1}{N}\delta(y - \delta y, z - \delta z)$$

它表示位在象面上 $(\delta y, \delta z)$ 这一点的电能,整个象点图形的点扩散函数,就是这些 δ 函数的集合,可以写成以下的形式

$$I_p(\delta y, \delta z) = \frac{1}{N} \sum_1^N \delta(y - \delta y, z - \delta z) \quad \dots\dots(3.33)$$

子午线扩散函数为:

$$I_u(\delta y) = \frac{1}{N} \sum_1^N \delta(y - \delta y) \quad \dots\dots(3.34)$$

弧矢线扩散函数为:

$$I_v(\delta z) = \frac{1}{N} \sum_1^N \delta(z - \delta z) \quad \dots\dots(3.35)$$

前面我们已经说过,位在坐标原点的 δ 函数的付里叶变换恒等于 1。根据付里叶变换的平移性质,如果 $F(y)$ 的付里叶变换为 $F(\mu)$ 则 $F(y - y_0)$ 的付里叶变换应等于 $F(\mu)e^{i2\pi y y_0}$ 。所以 $\delta(y - \delta y)$ 的付里叶变换应为 $e^{i2\pi \mu \delta y}$ 。同时根据付里叶变换的线性性质,若干函数和的付里叶变换,等于每个函数付里叶变换之和,所以上述子午和弧矢线扩散函数的付里叶变换为:

$$OTF_t(\mu) = \frac{1}{N} \sum_1^N e^{i2\pi \mu \delta y} \quad \dots\dots(3.36)$$

$$OTF_s(\mu) = \frac{1}{N} \sum_1^N e^{i2\pi \mu \delta z} \quad \dots\dots(3.37)$$

实际计算时,必须把复数函数变成三角函数的形式进行计算,公式(3.36)变为:

$$OTF_t(\mu) = \frac{1}{N} \sum_1^N \cos 2\pi \mu \delta y + \frac{1}{N} \sum_1^N \sin 2\pi \mu \delta y \quad \dots\dots(3.38)$$

$$\text{令: } a_t = \frac{1}{N} \sum_1^N \cos 2\pi \mu \delta y \quad \dots\dots(3.39)$$

$$b_t = \frac{1}{N} \sum_1^N \sin 2\pi \mu \delta y \quad \dots\dots(3.40)$$

$$\text{则: } MTF_t(\mu) = \sqrt{a_t^2 + b_t^2} \quad \dots\dots(3.41)$$

$$PTF_t(\mu) = \text{actg}\left(\frac{b_t}{a_t}\right) \quad \dots\dots(3.42)$$

由于点扩散函数对 y 轴对称,因此实际计算和式(3.39)和(3.40)时,只须对入瞳的一半进行计算即可。对于弧矢传递函数,由于入瞳两半部分的对应点 δz 值大小相等,符号相反,因此对整个瞳面来说,左右两半部正弦项相互抵消,因此 $b_s \equiv 0$,所以只须要计算余弦项,而且同样只须要计算入瞳的一半,因此:

$$MTF_s(\nu) = OTF_s(\nu) = \frac{1}{N} \sum_1^N \cos 2\pi \nu \delta z \quad \dots\dots(3.43)$$

$$PTF_s \equiv 0 \quad \dots\dots(3.44)$$

以上即为几何传递函数的计算公式。对象差比较大的系统,几何传递函数和物理传递函数差别很小,一般认为波象差大于 2λ 时几何传递函数和物理传递函数基本一

致。由于几何传函比物理传函方便得多,因此光学设计中应用较多。

(未完待续)

电镀溶液中铁杂质的危害与消除

罗海玲

(云南光电辅料有限公司 昆明 650114)

[摘要] 本文重点讲述了电镀溶液中主要杂质铁离子[二价铁离子(Fe^{2+})、三价铁离子(Fe^{3+})]对电镀溶液、镀层质量的影响,以及电镀液中铁杂质的来源及预防消除的方法。

[关键词] 铁杂质 电镀 危害 消除

一、电镀原理

根据电化学反应原理,在电解槽中,由于外加电场作用,阳极上金属单质失去电子,发生氧化反应,形成金属离子进入溶液,溶液中的阳离子向阴极移动,并在阴极得到电子发生还原反应,受镀金属离子在阴极还原成金属单质镀层,阴极挂件形成电镀制品。

化学反应如下:

阳极: $\text{M}(\text{金属单质}) - ne(n \text{ 个电子}) \rightarrow \text{M}^{n+}(\text{金属离子})$ [氧化反应]

阴极: $\text{M}^{n+} + ne \rightarrow \text{M}$ [还原反应]

由于溶液中存在多种阴阳离子,阴离子全部向电极的阳极移动,阳离子全部向阴极移动,分别在两极上发生氧化、还原反应。以镀镍为例:溶液中阳离子主要有 Ni^{2+} (镍离子)、 H^+ (氢离子),阴离子主要

有 OH^- (氢氧根离子)、 Cl^- (氯离子),两极反应如下:

阳极: $\text{Ni}(\text{金属镍}) + 2e \rightarrow \text{Ni}^{2+}$ ——主反应

$2\text{OH}^- - 2e \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{水}) + \text{O}_2 \uparrow(\text{氧气})$ ——副反应

$\text{Ni}^{2+} + [\text{O}](\text{原子氧}) \rightarrow \text{Ni}_2\text{O}_3(\text{三氧化二镍})$ ——副反应

阴极: $\text{Ni}^{2+} + 2e \rightarrow \text{Ni}(\text{镀镍})$ ——主反应

$2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2 \uparrow(\text{吸氢})$ ——副反应

在电镀过程中主反应是有效反应,副反应却是有害反应,应尽量避免。

二、电镀导电过程

电镀过程的整个电回路,以阴阳两电极表面为界限,可以划分为内电路和外电路两部分,阴阳两电极间的镀液为内电路,阴阳离子分别向电极的阳极和阴极移动,并通过离子移动导电;电解液以外的部分