

光 学 传 递 函 数

(西德标准58185) 符号、概念、数学关系式

1. 一般说明

光学传递函数(缩写为OTF)是光学系统成象特性的定量说明。它可以用不同的测量方法来确定,或者从光学系统的设计数据算得。

为了对光学系统作完善的说明,有必要分别按照系统的类别,了解其他的特性,诸如光谱透过率,渐晕,杂散光,畸变。

本标准所述的光学传递函数仅适用于象场的等晕区域,并且成象过程能以所需的精度满足空间非相干性和线性条件。光学传递函数也还适用于可见光波长范围以外的成象系统。

到目前为止,成象系统的性能是用象分

辨率这样一些不充分的概念,诸如锐度,清晰度等来说明的,因为它们和特定的目标,诸如刃边、狭缝、直线和点等的再现有着明显的联系。光学传递函数则是说明成象特性(尽管它也可以用其他的方式说明)的最佳形式。

光学传递函数用从物理上加以定义并且可以进行测量的量(数值)代替了上述这些数据。

如果很多成象系统构成一个光学串,在该光学串中,前一个系统的象是后一个系统的物。只要每一个这样的物可以看作是非相干发光的,这个光学串的光学传递函数就等于各个成象系统的光学传递函数的乘积。

2. 物理量,符号和单位

物 理 量	符 号	单 位
调制度	M	—
径向空间频率	R	mm ⁻¹ , mrad ⁻¹
切向空间频率	S	mm ⁻¹ , mrad ⁻¹
光学传递函数(OTF)	D(R), D(S) (R, S)	—
光学传递函数绝对值 =	T(R), T(S)	—
调制传递函数(MTF)	T(R, S)	—
位相传递函数(PTF)	θ(R)θ(S) θ(R, S)	—
象面坐标	u, v	mm
光瞳坐标	x, y	mm
点象函数	B(u, v)	—
线象函数	L(u)	—

物 理 量	符 号	单 位
刃边函数	$K(u)$	—
光瞳函数	$P(x, y)$	—
波象差	$W(x, y)$	mm
出射光瞳振幅	$\Lambda(x, y)$	
波长	λ	mm
从象点到出瞳的理 想参考球面半径	r	mm
出瞳面积	S	mm ²
出瞳中心分别移到($+\frac{\lambda R r}{2} + \frac{\lambda S r}{2}$) 和($-\frac{\lambda R r}{2} - \frac{\lambda S r}{2}$)时的重叠区域	G	mm ²
点象中的光振动 (相对复数振幅分布)	$F(u, v)$	—
相对照度分布	$E(u, v)$	—

3. 概念和数学关系式

下文所列方程式均为物理量之间的关系式，象空间折射率假设为1。以下概念适用于单色光照明物体的情况，但除了3.9到3.11节外，它们也适用于非单色光照明的情况。

3.1 空间频率

空间频率 R 是单位长度中正弦形分布的周期数。空间频率也可以是单位角度中正弦分布的周期数，当参考面位于无限远的时候，这就格外必要。变数 R 在以下的一维说明中，表示任意方向的空间频率。

3.2 栅格及其他结构

栅格是指一个周期结构。所有实际的结构，按照付立叶定理，都可以由正弦栅格构成。

3.3 调制度

一个辐射量 I 的调制度 M （以前也称为反差）定义为：

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

这里的 I 是光线密度或辐射强度。

3.4 调制传递因子

对于物是空间频率为 R 的正弦形光密度

分布的特殊情况，调制传递因子 T 就是象的调制度与物的调制度之比。

3.5 调制传递函数(MTF)

调制传递因子作为空间频率 R 的函数，就是调制传递函数 $T(R)$ ，空间频率为0时，调制传递函数值为1。

3.6 位相移动

特定空间频率 R 的位相移动，系该空间频率的正弦栅格象相对于象面参考点的移动。当空间频率趋于极限值时，位相移动为0。

3.7 位相传递函数(PTF)

位相传递值与空间频率 R 的函数关系就是位相传递函数 $\theta(R)$ 。

注：位相传递函数可以包括空间频率的线性项，它与象点的位置误差（畸变）对应。

3.8 光学传递函数(OTF)

调制传递函数 $T(R) = |D(R)|$ ，位相传递函数 $\theta(R) = \arg D(R)$ 共同构成完整的光学传递函数 $D(R)$ ：

$$D(R) = T(R) \cdot e^{j\theta(R)}$$

3.9 光瞳函数

光瞳函数 $P(x, y)$ 描写光学系统对于被观察象点在出瞳处的有效波面。该波面是光

学系统对发出波长为 λ 的辐射物点所产生的。

$$P(x, y) = \begin{cases} \Lambda(x, y) e^{j \frac{2\pi}{\lambda} W(x, y)} & \text{在光瞳内} \\ 0 & \text{在光瞳外} \end{cases}$$

3.10 自相关积分 (注: 这种关系是近似的, 在大孔径和大视场的情况会出现偏差)

光学传递函数可以自由相关积分构成:

$$D(R, S) = \frac{\iint_G P(x + \frac{\lambda Rr}{2}, y + \frac{\lambda Sr}{2}) P(x - \frac{\lambda Rr}{2}, y - \frac{\lambda Sr}{2}) dx dy}{\iint_G |P|^2 dx dy}$$

对于与x方向垂直的栅格, 当出瞳振幅处相同为恒定值时, 自相关积分可以表示为:

$$D(R) = \frac{\iint_G e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \left[W(x + \frac{\lambda Rr}{2}, y) - W(x - \frac{\lambda Rr}{2}, y) \right]} dx dy}{\iint_G dx dy}$$

3.11 点象中的光振动 (复数振幅分布)

由光瞳函数 $P(x, y)$ 的付立叶变换得出点象振幅分布 $F(u, v)$:

$$F(u, v) = \iint_G P(x, y) e^{-j2\pi(xu + yv)} dx dy$$

由点象振幅得出点象中的相对照度分布 $E(u, v)$ 为:

$$E(u, v) = F(u, v) F^*(u, v)$$

$F^*(u, v)$ 是 $F(u, v)$ 的共轭复数。

3.12 点象函数 $B(u, v)$

点象函数描写照度在点象中的分布:

$$B(u, v) = \frac{E(u, v)}{\iint_G E(u, v) du dv}$$

光学传递函数 $D(R, S)$ 可以由点象函数 $B(u, v)$ 的付立叶变换构成:

$$D(R, S) = \iint_G B(u, v) e^{-j2\pi(uk + vs)} du dv$$

3.13 线象函数

线象函数 $L(u)$ 描写一个无限窄的狭缝形物体的象中照度的分布, 这个物体所发出的光是非相干的。

$$L(u) = \frac{E(u)}{\int_{-\infty}^{+\infty} E(u) du}$$

光学传递函数 $D(R)$ 可以由线象函数的付立叶变换构成:

$$D(R) = \int_{-\infty}^{+\infty} L(u) e^{-j2\pi uk} du$$

在线象函数与点象函数之间有下列关系:

$$L(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(u, v) dv$$

3.14 刃象函数

刃象函数 $K(u)$ 描写刃边象中的照度分布。刃象函数可由线象函数 $L(\zeta)$ 得出:

$$K(u) = \int_{-\infty}^u L(\zeta) d\zeta$$

仪 器 原 理

本标准设计的内容并不是拟定标准的最终归纳，所以还未正式使用。现将之提供给大家来分析与评论，以便使之按预定的要求得到改进与完善。

如果在经济交往中要采用该标准的话，应当在参与者之间，即提供者和使用者之间，取得统一意见。

对于本标准的要求和修改建议，请誊写双份寄给精密机械和光学专业标准委员会。

德国标准委员会

1. 目的和使用范围

本标准的目的在于为设计成象系统光学传递函数的测量仪器提供原则。其中详细叙述测量仪器及其安装场地所须满足的条件。这些说明仅适用于采用下列测量原理的仪器，它以象方强度分布的光电测量为基础。因为根据目前的技术水平，只有这种仪器在原型研究以及批量产品检验方面有广泛应用。

本标准适用于所有符合等晕区条件，空间非相干照明和线性成象条件的成象系统。属于这一类有透镜系统反射系统，象增强管，电视摄像管以及它们的组合，只要符合以上条件者均属此类。所列的技术条件，既适用于可见光谱范围，也适用于红外和紫外光谱范围。

2. 测量环境的状态与设备

测量环境应当不受气候条件，机械和电机干扰的影响，最好设在一所房屋的地下室中，室内不放可引起房间振动的机器。

测量时对恒温的要求，根据被测光学系统的类别，测量仪器以及所要求的精度而定。一般测量环境的温度恒定在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 较好。可能的话，可以要求恒温条件更好一些。

空气一定要保持清洁无尘。

注：因为空调装置可能引起机械振动，

所以要求使其隔离，并尽可能设置在离测量工作室较远的地方。

应当对测量时的温度作记录。

可以要求对测量工作室作电场屏蔽，尤其要注意变压器和导线的干扰影响。

空气的抖动和对流可能引起测量误差，应当设法避免（见 4.4 节）

3. 仪器的构造

仪器的组成包括一个结实的光学台（座或类似的东西），其上可以固定检测目标（诸如星点孔，狭缝，栅格，有时候是准直光管）的支架，并可根据所要求的精度相互定位。基座的振动应当通过适当的防振措施尽量减少。所要求的防震，根据机械振动的频谱（振幅和频率），测量方法，空间频率范围和要求达到的精度而定。正确的数值是由振动所引起的图象与扫描单元之间的位置变化，小于线象函数半宽度的 $1/20$ ，或者小于所测空间频率倒数的 $1/20$ 。对于导轨的直线性和平行平面（物面，象面和与被检件连接的法兰盘）的平行度应当提出高的要求。由于直线性不佳，平行度不够，照象装置（垫圈）的楔形误差等原因出现的象面位移（离焦）在整个象场范围所引起的调制传递函数的变化不允许大于允差或已知误差范围的 $1/3$ 。

与一定的调制传递函数变化对应的离焦量，是由波差的形式与大小、光学系统的孔

径、光的波长以及空间频率决定的。随着F数减小，空间频率增高和波差变小，一般情况下对仪器结构精度的要求就要提高。

3.1 成象关系

分别按照物与像的位置，区别以下三种情况：

- a) 物与像处于终端；
- b) 物或像处于非终端；
- c) 物与像处于非终端。

3.2 结构原理

每个测量仪器由三部分组成：测试图形，试样卡座与测量装置。

3.2.1 照相机类型

在照相机类型中，上述组体的两种相互平行并与参考轴成垂直移动。物场与像场滑轨装置与光轴成直角。图1示出这一原理。如果物与像处于终端，应特别推荐这种结构。

如果物或者像处在非终端位置，那么在对外轴象角 ω 的相机类型中，模拟非终端大截距的准直仪应当旋转角度为 ω ，这种结构见图2所示。

表 1

光栏数	空 间 频 率					
	mm^{-1}					
	1	5	10	20	50	100
	$\pm \Delta Z \mu\text{m}$					
1	54	11	5	2.5	1	0.5
1.4	76	15	8	4	1.5	0.8
2	108	22	11	5	2	1
4	216	44	22	11	4	3
8	432	88	44	22	12	13
16	864	176	88	44	50	410

从英国标准4779 (1971) 年的规定接收。

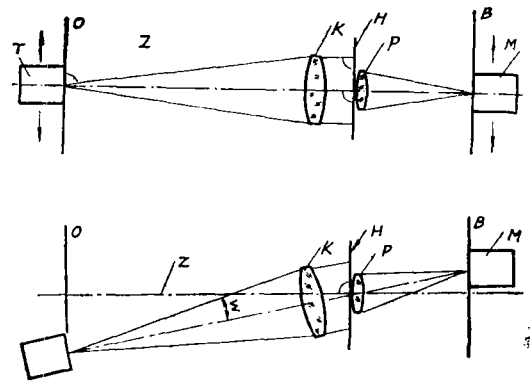
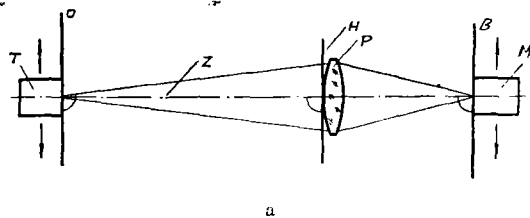
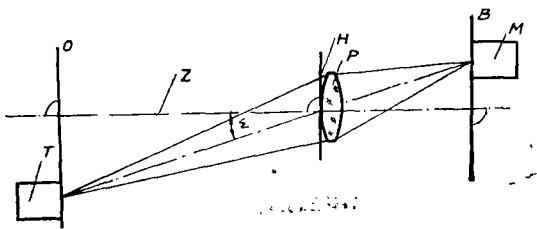


图 2 值得推荐的照相机式光学台，物处于无限远

图中 T-测试目标 O-物场导轨
K-准直光管 H-被测件支架
P-被测件 B-象场导轨
M-测量系统 Z-参考轴



a



b

图 1 可推荐的照相机类型结构，物与象处于终端位置

T-测试装置 Z-参考轴 P-试件
M-测量装置 O-物场滑轨 ω -象角
B-象场滑轨 H-测件架

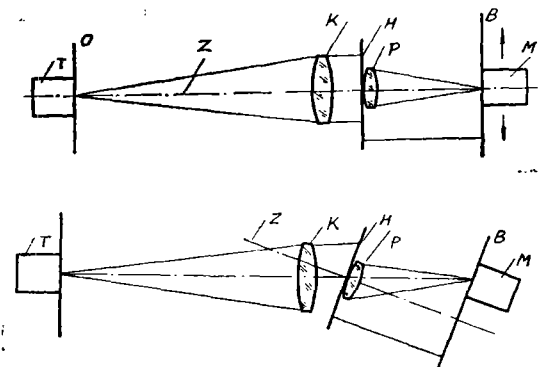


图 3 有推荐价值的转台式光学台，图中符号意义同图 2

3.2.2 转台式光学台

转台式光学台，为了改变视场角，将被测件围绕与参考轴垂直的转轴转动。由此而产生的象面移动，通过被测件或测量系统的平移得以补偿。物面或接收器面也必须转动相同的角度（见图3）

3.3 定位

测试目标的位置，被测件支架和测量系统的位置，都应当配备十分精确的测定手段（诸如刻尺、千分表和测微螺杆）。

4. 上部构件

基础之上安装的构件有三大类：测试目标，被测件支架和测量系统。

4.1 测试目标

测试目标由测试图形和照明设备构成。

4.1.1 测试图形

用作测试图形的有星点孔，狭缝、刃边，扩展的栅格和其他测试图形（也可以采用自身发光的测试图形，例如在红外光谱区可以用一条烧热的导线代替狭缝，但4.1.1和4.1.2节所规定的要求必须满足）。对于全部物点来说，测试图形的平面必须与选定的物面重合。当物方共轭距为无限远时，测试图形应当位于准直光管的焦面上，与准直光管轴垂直。为对各视场进行测量，将测试图形与准直光管一起旋转。使用轴外测试栅格时，必须进行频率校正，切向空间频率降低 $\cos^2\omega$ 倍，径向空间频率降低 $\cos\omega$ 倍。

测试图形必须能在其平面中旋转，至少能调到切向和径向。要加上适当的光栏，使测试图形视场减小，使得在各种情况下都满足等晕条件。等晕条件的满足可以在使用狭缝的过程中，通过改变狭缝长度加以控制。

当狭缝用作测试图形时，其宽度相对于有效长度是固定的，其边缘平行度的允差，依据其平均宽度和所测的空间频率确定，近似值为2%。

棱边的粗糙程度不允许超过狭缝宽度的十分之一。狭缝暗部的透射率，在所用的光

谱范围内不许超过 10^{-5} ，狭缝边缘透射率（由1变到 10^{-5} ）的过度区域宽度要在狭缝宽度的十分之一以内。

如果用栅格作测试图，它的透射率的变化必须每个周期都相同。如果不同空间频率，目标的调制度不同，就要进行修正。

注，用栅格作测试图形，有两种可能的做法：

a) 每种空间频率各用一种栅格，它只包含所要测定的空间频率。（例如用干涉方法产生的强度分布）。

b) 为了得到较多的空间频率，可以利用一种独特的栅格：许多相同的狭缝按间距 d 排列。它包含了所有 n/d 空间频率（ $n=1, 2, \dots$ ）。有电学滤波器滤出所需的频率。按原理可以应用任意一个具有理想空间频谱的栅格。允许各空间频率的调制度有差别。例如矩形栅格，它具有同样宽度的缝和间隔，周期长度为 d 。因而矩形栅格包含了所有奇次谐波 $(2n-1)/d$ ，它们的相对振幅是 $1/(2n-1)$ ，经过付立叶分析滤波，就可以对同时传递的各空间频率分别进行测定。

4.1.2 测试图形的照明。

光源的光谱辐射功率分布必须已知，而且在整个测量过程中，平均辐射功率应当保持恒定。

有时，使用的滤光片的任务是：一方面使测试图形避免热辐射，另一方面，改变用以照明试图形的光谱分布，使之适合测量需要。

测试图形的照明应当均匀。由测试图形发出的光应当是充分非相干的。如果照明孔径大于成象系统的孔径，情况就是如此。被测件入瞳的照明应当均匀。有时需要用散射玻璃片。

注：照明系统是否充分非相干，可以用下法检验：以纯相位目标代替测试图形，在象中看不到强度分布。另一种检查办法是：所用测试图形具有离散空间频谱，而象中不出现额外的频率。

4.2 被测件支座

被测件的支座应能旋转，使被测件可以绕自己的轴转动，因而能对不同的方位进行检测。旋转轴必须与物面和象面垂直。被测件怎样对着旋转轴放置，这要根据具体检测任务而定。标准的方式是用机械连接面定位，如果条件许可，可以按另外一个参考轴校准。

4.3 测量系统

测量系统的任务是对测试图象中的强度分布进行测量，测量系统由扫描单元，辐射接收器和评价仪器组成。

4.3.1 扫描单元

扫描单元通常是与测试图形相对地采用刃边，狭缝和栅格。通过扫描单元对图象的相对运动，实现对强度分布的扫描测量。在光学系统中，扫描单元和测试图形谁相对于谁运动，原理上无关紧要，然而，使象方扫描单元运动是较为有利的，因为这时对测量信号的评价和被测件的成象比例无关。检测包含有萤光屏的光电系统（如象增强器），应当使扫描单元运动，以消除余辉的影响。

扫描单元或是测试图形的定位及运动方向，必须彼此间相适应。

4.3.2 辐射接受器

必须事先知道辐射接收器的光谱灵敏度，并使之与测量问题相匹配。如果要用到电压电源或电流的话，应当根据希望达到的测量精度要求它们的稳定度。应当设法避免接收器面上可能出现的灵敏度不均匀的影响，一般情况下，应当用一个场镜将被测件的出射光瞳成象在接收器面上。假如辐射接收器工作于其特性曲线的非线性区域，则应当进行适当的修正。

4.3.3 评价仪器

评价仪器的种类要分别按照测试图形和扫描单元所依据的测量原理来定。由测试图形、扫描单元、辅助系统和评价仪器确定测量的空间频率。理论上要求用零频率的传递

函数进行规化（见DIN58185第一页），因为这一要求在技术上是不能实现的，所以规化只得对 $R_0 > 0$ 的空间频率进行。空间频率 R_0 的确定办法是根据检测任务，取调制传递函数等于0.5的空间频率的若干分之一。 R_0 的数值，在质量评价方面，决定了被测件的测量精度和使用价值。实践经验表明，空间频率 R_0 如果取为调制传递函数等于0.5的空间频率的1/20，则对于物镜的调制传递函数测量，误差一般不超过 ± 0.02 。利用狭缝作为测试图形时，它经被测透镜所成的象的强度中未被接收到的部分与上述误差相当，也就是说，上述情况整个光通量的0.98必须被接收到。

4.4 光路的屏蔽

如果测量时对光源未作时间调制，就要对光路加屏蔽，比如可以用皮老虎来解决。还应当通过对光路的屏蔽排除空气抖动和对流的影响。

5. 成象辅助系统

假如为了对较大物距和象距进行模拟而采用某种成象辅助系统，比如准直光管，那么辅助系统的波差在所利用的光谱范围内，就必须小于被测件的波差。前者不应大于后者的1/10，准直光管必须有足够大的净孔径（见4.1.2节）

如欲放大测试图形的象而采用显微物镜时，则须注意：其数值孔径要足够大，以免进行轴外测时发生渐晕。

关于这种显微物镜的波差量大小，要求与有关对准光管所述相同。

如果检测能将光的相干性破坏的光学系统时（如象增强器），利用测试图形成象的入射辅助系统和成象于扫描单元的出射辅助系统产生影响时，则掌握其光学传递函数足以可消除其影响。

〔大舟译〕

〔蒋筑英校〕