

# 光学传递函数(OTF)标准化进展情况

非相干成象系统的光学传递函数(OTF)描写了衍射和除畸变以外的各种象差对成象的影响。OTF的测量已被普遍认为是检验光学系统成象质量的主要项目。根据OTF制订的质量指标已经开始应用于照相物镜,电视、电影摄影物镜、航摄物镜等各类成象光学系统,评价设计结果,控制产品质量。光学传递函数理论从40年代开始提出,经过十几年时间,到50年代,在非相干成象方面,已经比较成熟。60年代大量出现各类测量装置和由系统参数计算OTF的各种方法。但是,一方面由于各实验室对同一镜头测定和计算的OTF结果很不一致,另一方面,由于开始建立的各种装置大多属于实验装置,比较复杂,不切实际,不便推广。因此在相当长一段时间里,OTF未能得到普遍应用。60年代末,各国开始注意到这方面的问题,组织了专门的小组从事于OTF标准化和OTF实际应用方面的工作。经过几年努力,取得了一些成果。现在认为已经有了比较可靠的计算程序和便于实际应用的测定装置,对各类系统也开始提出明确的OTF评价标准。当然在OTF的理论和实际中还有许多问题要进一步研究。

英国、西德、日本、美国等先后成立了从事于OTF标准化问题的研究组织。参加的成员,除了光学研究所以外,还有主要光学工厂的代表,政府有关部门的代表。他们主要的研究内容是:

- 1) OTF的符号,定义和基本数学关系,OTF计算与测定结果的标准表示方法;
- 2) OTF测定装置精度检验方法和设备,规定OTF测定应满足的各项技术条件;
- 3) OTF计算程序的精度分析,建立

适用于各类系统的标准计算程序;

- 4) 提出各类系统的OTF象质指标;
- 5) 设计各种实用的OTF装置,包括标准设备,产品检验设备,生产线质量控制设备。

以下对进展情况分别作概要的介绍。

## 1. OTF 测定精度

为使OTF实际应用于光学系统检验和用作质量评价指标,OTF的测量必须达到一定精度,使得各单位的测定结果可以互相比较并与计算结果一致。从68年以来,一些国家对OTF测定精度作了研究。美国的罗彻斯特大学,对一个焦距3英寸,  $f/4.5$  10组元广角镜头,用七台OTF装置作了测量。图1是这个镜头的结构示意。轴上点测定值的分散较少,但40对线/毫米以上也达0.1;轴外点则分散很大,例如 $30^\circ$ 视场,20~40对线/毫米之间,分散达0.4以上<sup>[1]</sup>。参加比较测定的装置,有的用光学或光电付里叶分析法,有的用刀口扫描数字付里叶分析法,还有的用干涉法测定波差,然后用自相关法计算出OTF。其中有的直接分析空间象,有的则用显微物镜转象(所用显微物镜从 $20\times NA=0.4$ 到 $100\times NA=0.95$ )。

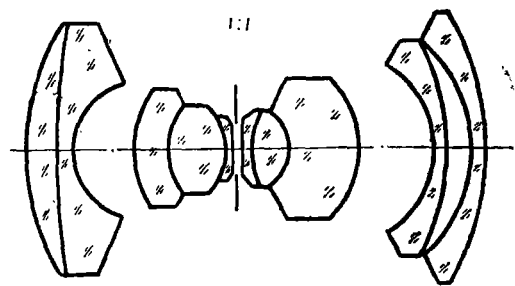


图1 10组元3英寸  $f/4.5$  镜头

英国的SIRA小组前几年曾将一个焦距6吋f/5.6的航摄物镜在欧洲的几个实验室作了OTF测量比较。图2是这个镜头的结构示意。最近又将这同一镜头送到英、德、法国的八个实验室，包括六种完全不同的装置，先后测定了16套数据。包括轴上， $\pm 10^\circ$ ， $\pm 20^\circ$ ， $\pm 30^\circ$ 和 $\pm 40^\circ$ 视场子午和弧矢的调制传递函数(MTF)值。轴上分散较小，50对线/mm以内，不超过 $\pm 0.05$ ，但是轴外却仍然有较大的分散。即使将个别差得较多的结果除外，最大分散仍达到 $\pm 0.14$ 。对产生误差的主要因素作了分析并设法加以消除和修正后，各实验室MTF测定结果的最大分散是 $\pm 0.07$ ，一般不超过 $\pm 0.03$ <sup>[2]</sup>。

日本也曾用一个焦距50mm f/2.8的照相物镜对十台六种OTF测定装置的测定结果作了比较，重点是40对线/mm以内。发现其中五台C-4型装置(采用光电付里叶分析法)分散在0.05以内，不同类型装置之间的分散则还要大得多<sup>[3]</sup>。

为了鉴定OTF装置的精度，研究误差的来源和对OTF装置作日常检验，各国设计制造了一批标准镜头。根据设计数据计算出来的OTF作为比较标准。由于被测系统的多样性，标准镜头也有多种规格。表1所列是英国科学仪器研究协会象度评价(SIRA)小组已建立和正在建立的标准镜头，其中包括推荐使用的一种广角航摄镜头，它是在现有产品中挑选得来<sup>[8]</sup>。

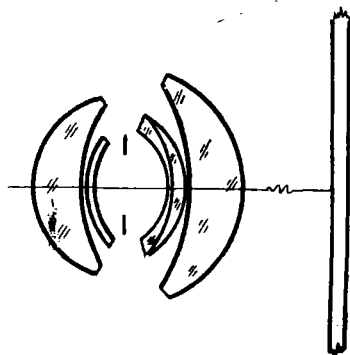


图2 焦距6吋f/5.6航摄物镜

表1 SIRA小组提出的标准镜头

镜头类型	焦距(mm)	孔径范围	共轭距	半视场	光谱范围	最高空间频率(对线/毫米)	现状
平凸(标准)	50	f/4~f/11	一端 $\infty$ 10:1 2:1	6°	单色	100	已建立 市场出售
平凸(标准)	8	f/2.8~f/8	一端 $\infty$	0°	"	400	"
双胶合(标准)	200	f/4~f/11	一端 $\infty$	3°	多色	100	"
Petzval(标准)	50	f/1.6~f/8	"	6°	"	400	已设计构造好
装在平衡环中的双片(标准)	200	f/4~f/8	"	40°	"	100	已完全建立
三片型(标准)	100	f/4	"	25°	"	50	原型待设计
Topogon(标准)	150	f/15	"	40°	"	50	已完成评价
广角航摄(买品)	150	f/5.6~f/8	"	40°	"	50	内部
广角(标准)	150	f/5.6	"	45°	"	30	处于设计阶段
远焦(标准)	—	7×50	$\infty$	18°	"	20周/度	提出建议
复印或中继物镜(标准)?	—	f/2?	1:1	10°?	"	10?	提出建议

西德建立的两个标准镜头规格是：

546nm，空间频率0~400对线/mm。

№1(结构如图3): f/3.2, f=100mm, 九片, 无限共轭距成象,  $\omega = \pm 12.9^\circ$ ,  $\lambda =$

№2(结构如图4): f/5.6, f=90mm, 10片, 无限共轭距成象,  $\omega = \pm 45.1^\circ$ ,  $\lambda =$

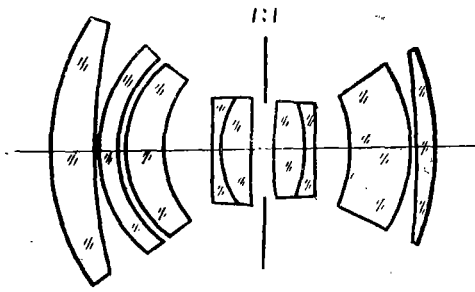


图3 镜头 №1

导轨是否平行③象面导轨与装置的光轴是否垂直。日本计划在74年用这三个镜头将日本所有的 OTF 装置检查一遍<sup>[5]</sup>。

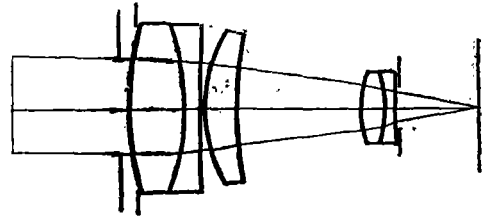


图5 日本标准镜头 I 的结构示意

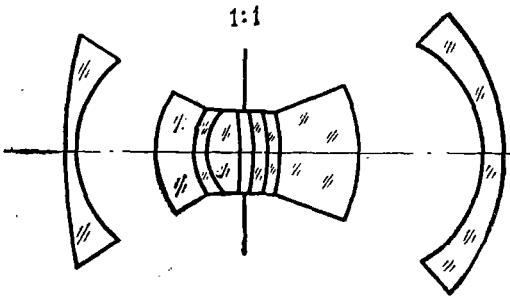


图4 镜头 №2

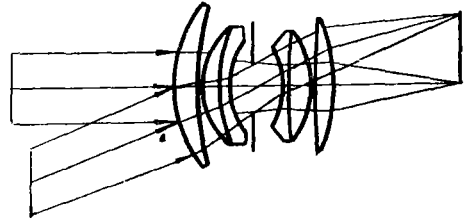


图6 日本标准镜头 III 的结构示意

546nm, 空间频率 0~80 对线/mm。

№1 镜头曾在法国和英国的几个实验室用七台装置测定 MTF (包括英国 SIRA 的 EROS IV 型装置) 分散一般在 0.07 以内, 最大达 0.10 (150 对线/mm, 弧矢), №2 镜头曾在四个实验室作过比较测量, 最大分散达 0.15 (35.1° 视场, 15~20 对线/mm), 一般不超过 0.07<sup>[4]</sup>。

日本光学技术研究协会 (JOERA) 建立了三个标准镜头, 规格如下:

标准镜头 I:  $f/50\text{mm}$ , 平凸单片, 与 SIRA 的相似;

标准镜头 II:  $f/1.25$ , 匹兹伐尔型, 结构如图 5。主要用来检查孔径照明均匀性和高频部分的测量精度。因此设计 requirements 是①用于轴上, ②球差小③F 数小④校正色差并且 e 线处最小值位置。

标准镜头 III:  $f/2.8$ ,  $\omega = \pm 25^\circ$  结构如图 6。主要用于轴外, 检查 OTF 测定装置下列机械性能: ①被测镜头机械靠面与装置的光轴是否垂直②被测镜头机械靠面与象面

经过用标准镜头测试等手段的检查, 现在一般认为 OTF 测定装置的误差有以下三方面来源:

1) 来源于基本测量系统, 即目标发生器, 象分析器和有关电路的误差。包括目标板, 狭缝刀口, 中继光学系统 (准光物镜, 显微物镜, 照明系统) 的不适当, 电学系统的非线性, 空间频率误差, 零频规范化误差等等。

2) 来源于机械部分的误差。包括象面和物面导轨平直性不好, 物镜安装平面失调, 节点架或丁字尺机械失调等等。

3) 来源于测量条件不严格。包括测量象面位置不精确。被测镜头取向不一致, 系统的光谱特性不完全符合规定等等。究竟那些误差来源是主要的, 这一方面和测定装置的特点有关, 和被测镜头的特点有关, 例如对于大相对孔径中小视场物镜, 孔径照明的均匀性, 象面导轨的平直性等项可能是主要的, 而对于象  $f/150\text{mm}$   $f/5.6$   $\omega = \pm 45^\circ$  这样的广角物镜, 则象面位置精度, 空间频率的标定和象平面对于测定装置的光轴的倾

斜等项可能是主要误差来源。

由比较测量得出的结论是：现在，已经可以测定 MTF 准确到百分之几。因而认为 MTF 已经可以作为工业上应用的技术。MTF 或由它导出的指标可以用来表示光学系统的质量，进行标准化和作为产品验收依据<sup>[4]</sup>。

目前英国科学仪器研究协会 (SIRA) 的 EROS IV 型装置被认为是英国的标准设备。日本的 Nippon 厂按日本照相机和光学仪器检查协会 (JCII) 1973 年的规定建立了一台用光电付里叶分析法测定 OTF 的装置，特别注意了光学台和机械零件的精度，合理的电路处理，用 X-Y 记录仪记录。现在被认为是日本的标准设备。

对于位相传递函数 (PTF) 的测定精度问题，因为能测 PTF 的装置比较少，PTF 实际应用也比较少，因此研究得还很少。

## 2. OTF 计算精度

用标准镜头检查鉴定 OTF 测定装置精度，首先要能准确地计算出它的 OTF。同时，为了在设计阶段可靠地评价设计结果，OTF 计算也必须有一定精度。欧洲和日本的十个实验室对一个（结构如图 2）焦距 6 吋， $f/5.6$ ， $\omega = \pm 45^\circ$  的航空侦察摄影物镜作了 OTF 计算，互相进行比较，以检查 OTF 的计算精度。对参加比较计算的单位提供了曲率半径，沿轴间隔，折射率，多面净孔径，光栏位置和直径。象面选为轴上 30 对线/mm MTF 最高的象面。要求计算 0~50 对线/mm， $0^\circ$ ， $20^\circ$ ， $30^\circ$ ， $40^\circ$  弧矢和子午的 MTF 值。

所有这十个程序都是按衍射成像理论由波差计算 OTF 的。其中有的用自相关积分法，有的用快速付里叶变换 (FFT) 法。

比较结果是：

1) 轴上相当一致，0~50 对线/mm 分散为  $\pm 0.01$ 。轴外则随视场增大，分散也越

来越大。

2) 这个镜头轴外子午 MTF 起伏比较利害，计算结果的分散也比较大。 $40^\circ$  子午的分散最大达  $\pm 0.06$ 。

3) 其中有两个程序计算的如果和其余八个差得较多，检查原因是波差算得不对。另有三个程序算得曲线形状相似，但具体数值差得较多。当对空间频率座标作适当缩放以后就和其他几个程序所得结果一致了。

由这一比较计算得出的结论是：中等视场系统的 MTF 计算问题较少。广角系统也可以进行比较准确的 MTF 计算，但是在把所用方法列成公式和编成程序时，要十分注意许多具体问题的处理方法是否正确，适当。例如波差的确定，光镜形状的描写方法和规化空间频率的计算方法，它们常常是误差的来源<sup>[6]</sup>。

前几年美国罗彻斯特大学也曾对一个五组元，24 吋  $f/6$  镜头，用七个单位的八个不同程序作了 OTF 比较计算。结果最大相差 0.07（半视场  $14.7^\circ$ ）。又用一个 10 组元，3 吋， $f/4.5$  广角镜头比较了该大学的两个 OTF 计算程序。发现轴上很一致，但是半视场  $30^\circ$  就已经有了明显差别，两个程序的计算结果相差达 0.2。据认为，计算结果不一致的主要原因是多个程序计算渐晕孔形状的方法不同，计算出来的光瞳函数不同以及主光线的入射角取法不同<sup>[1]</sup>。

由于快速付里叶变换算法的出现，由光瞳函数作两次付里叶变换求出 OTF 的方法迅速发展。这种计算方法的特点是可以一下子得出两维的 OTF 图形，并且以点扩散函数为中间结果，它也是很有用处的。但是这种方法需要有速度高容量大的电子计算机，使用受到一定限制。此外，从理论上讲，它要求下列关系成立：

$$\begin{cases} \frac{\delta w(\eta, \xi, y_0, z_0)}{\delta y} = k_y \eta \\ \frac{\delta w(\eta, \xi, y_0, z_0)}{\delta z} = k_z \xi \end{cases}$$

其中 $w$ 是系统的波差,  $\eta, \zeta$ 是光瞳坐标,  $y, z$ ,是象面坐标,  $k_y, k_z$ 是常数。这也就是要求波差的微小改变与象点的微小改变 $\delta y, \delta z$ 成正比, 并且比例常数分别与 $\eta, \zeta$ 无关。而上列关系只在一定条件下成立, 因此用快速付里叶变换法计算 OTF 的精度, 从理论上来说决定于上式成立的精度。

由于光瞳函数与扩散函数之间的付里叶变换关系只是基尔霍夫积分的一个近似, 因此对于大孔径大视场情况, 无论自相关积分法或是快速付里叶变换计算 OTF 的精度问题都还需要进一步加以研究。

早先因为电子计算机的应用还不如现在这样普遍, 所以发展了多种由点列图计算 OTF 的近似方法。根据我们的经验, 按日本的 Kenro Miyamoto 提出的混合近似法<sup>[7]</sup>由点列图计算 OTF, 用于低频部分, 仍然是很实用的方法。公式, 简单明确, 计算速度快, 容易获得比较一致的计算结果。因为这是一种近似计算方法, 要注意它适用的范围。

### 3. OTF 评价指标

OTF 是多参数函数。除了空间频率以外, 视场, 象面位置, 相对孔径, 空间频率取向等都是参变数。描写一个系统的 OTF 特性的曲线常常会多至数百条, 这为实际应用 OTF 带来了困难。为此必须考虑 OTF 数据的合理的简化表示和如何用 OTF 构造单个评价指标, 以便用于系统的象质评价和产品质量控制。现在对于照相物镜, 电影和电视物镜, 航摄物镜望远镜和大炮瞄准镜等类系统都倾向于用一两个有代表性的低频的 MTF 值作为评价指标。

例如日本 JCII 根据对一批各厂自检合格的 35mm 照相物镜测定 15 对线/mm 和 30 对线/mm MTF 的结果, 提出下列照相物镜(包括变焦距物镜)评价指标和相应的简化检验条件<sup>[8]</sup>:

表 2 35mm 照相物镜标准 MTF(提案)

孔 径	画面上位置	空 间 频 率	
		15对线/mm	30对线/mm
全 开	轴 上	0.55	0.30
	0.7 $\omega$	0.25	0.15
f/5.6	轴 上	0.70	0.40
	0.7 $\omega$	0.35	0.20

表 3 简化检验条件

孔 径	全孔径和 f/5.6
物 距	无限远
空间频率	15 对线/mm 和 30 对线/mm
焦 面	轴上 30 对线/mm MTF 最高象面
照 明	白光(石英碘钨灯)
视 场	轴上和 0.7 视场对称 4 位置子午和弧矢

英国 SIRA 小组提出了航摄制图物镜的 OTF 标准(1972年): 全孔径, 15 对线/mm 的 MTF 值, 对如图 7 的光谱分布, 要求有下表所列的值。这是对同一象面的要求, 但对这个象面的位置不加限定<sup>[9]</sup>。

表 4 航摄制图物镜的 MTF 要求

视 场	MTF 值	
	弧 矢	子 午
0°	0.82	0.82
2°	0.48	0.54
30°	0.33	0.48
40°	0.44	0.24

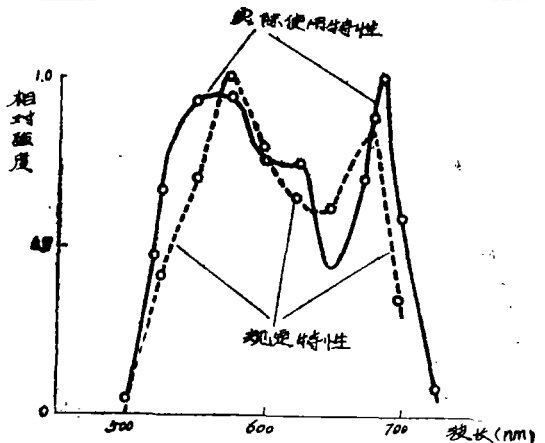


图 7 对测量航测镜头 OTF 的系统规定的光谱特性

上列指标是根据经过实际使用证明满足使用要求的航摄制图物镜的 MTF 特性制订的。同时还提出了按 MTF 验收产品的标准如下：

当系统具有图 7 的光谱特性时，要求全孔径 15 对线/mm 的 MTF 值不低于表 5 的值。这是对同一象面的要求，这个象面应平行于镜头的安装定位面，并且位于轴上 15 对线/mm MTF 降为最大值的 80% 的两个象面中间。

表 5 航摄制图物镜产品验收的 MTF 标准

象建位置	所有取向中最小的 MTF 值
轴 上	0.70
0.5 视场	0.30 在同一视场中取等间隔三点测定

对于 35mm 电影摄物镜，蒋鸣球同志根据使用要求和实测数据的分析，提出下列评价指标<sup>[10]</sup>：

0.5 视场以内：

MTF = 0.5 的空间频率：40~60 对线/mm，

MTF = 0.15 的空间频率：70~100 对线/mm，

0.7 视场以内：

MTF = 0.5 的空间频率：30~50 对/mm，

MTF = 0.15 的空间频率：50~80 对线/mm，

其中 MTF = 0.5 的空间频率为主要指标，MTF = 0.5 的频率为参考指标。

对于广播电视摄象物镜，根据所用摄象管型，发射和接收系统的频带宽度，扫描线数等确定用多少对线/mm 的 MTF 值评定镜头的质量。例如使用  $1\frac{1}{4}$  吋氧化铅管的彩色电视频镜头用 18~20 对线/mm，使用 1 吋氧化铅管的用 12.5~15 对线/mm 的 MTF 作指标。

对于望远镜和瞄准镜，有人提出用 5 对线/度~10 对线/度的 MTF 值作为象质指标。

用低频 MTF 值作为评价指标的理由和

好处主要是：①它与象质的主观评价一致；②低频的 PTF 很小，一般可以忽略，因此只用 MTF 就可以。

#### 4. MTF 数据的图示方法

因为 OTF 是多参数函数，OTF 数据的图示方法就可以有多种多样。究竟那几种方法比较实用，值得推广，以便将 OTF 数据的图示方法统一起来，日本 JOERA 作了一些调研工作。1964 年 JOERA 曾推荐五种图示方法，并在日本推广。以后作过几次查询，最近（72 年）的一次查询结果如表 9 所列，实际使用最多的是 R-u-(D) 表示方法。(R 是 MTF 值或 PTF 值 u 是空间频率，(D) 表示以离焦量为参数) 值得注意的是等高图是这个小组按顺序推荐的第二种图示法，但实际使用却最少，因为它需要很多数据作等高图。由于现在对许多类型的系统都倾向于用某个有代表性的低频的 MTF 值作评价指标，看来 R-D( $\omega$ )-类的图示法将会得到广泛应用。表中符号的意义除 R·u·D 以外  $\omega$  是视场，V 是空间频率取向，F 是 F 数。

表 9 OTF 的表示法

使用多少的顺序	表 示 法	推荐顺序
1	R-u-(D)	5
2	R- $\omega$ -(u, $\theta$ )	1
3	R-u-(F)	4
4	u- $\omega$ -(R, $\theta$ )	3
5	R-u-( $\omega$ )	
6	$\omega$ -D-(F, $\theta$ )	2

#### 5. OTF 标准化文件 编写出版情况

英国 1969 年出版了第 1 个有关 OTF 标准化的文件：BCS 0751。其中规定了 OTF 和 MTF 的定义等。71 年又补充修改出版了题为“关于光学系统光学传递函数测量的建议”，

的文件,编号是英国国家标准局文件BS4779:1971。这份文件还对一台特定的 OTF 测量装置详细规定了 OTF 测定精度检查标准,是一份十分有用的参考资料。

西德也发表了题为“光学传递函数”的国家标准局文件 DIN 58185。共包括四个部分:

第①部分:符号、定义、数学关系式。这一部分已出版。为了便于国际交流,尽量选用了英国标准局文件 BS 4779:1971 中规定的符号。

第②部分已印出作为试用标准。这一部分给出 OTF 测定装置(仅限于对象场进行光电测量的 OTF 装置)的设计指导,规定要满足的测量条件提出了机械结构的精度和保证空间非相干性的条件。

第③部分已写出草稿。计划在75年夏季付印作为试用标准。这一部分叙述 OTF 测量的条件和具体步骤,规定应测定的视场,测定结果应作的修正和选定焦面的判据等。

第④部分已写出草稿,这一部分规定结果的标准表示方法。将 MTF 表示为频率的函数而以视场为参数,也可以把 MTF 表示成视场的函数而以频率为参数。

日本 JOERA 74 年组成了一个小组,计划在 76 年制订出日本的 OTF 标准。包括下述内容:

- ① 应用的光学系统;
- ② OTF 和 MTF 的定义;
- ③ OTF 和 MTF 的标准图示法;
- ④ MTF 测定装置精度的检查标准。

### 参 考 文 献

1. R. E. Hopkims, D. Dutton; Interlaboratory comparison of MTF Measurement and Computations on a Large Wide-angle Lens, *Optica Acta*, Vol. 18, No. 2, 105—121, 1971.
2. A. C. Marchant, E. A. Ironside, J. F. Attryde; The Reproducibility of

MTF Measurements, *Optica Acta*, Vol. 22, No. 4, 249—264, 1975.

3. Y. Matsui, K. Murata; Comparison Lest of Several OTF Measuring Equipments in Japan, *Optica Acta*, Vol. 18, No. 2, 149—163, 1971.
4. Paul Kuttner; Interlaboratory Comparisons of MTF Measurements and Calculations, *Optica Acta*, Vol. 22, No. 4, 265—275, 1975.
5. Interlaboratory Comparisons of MTF Measurements and Calculations and OTF Standards in Germany, *J. SPIE*, Vol. 14, No. 2, 151—156, 1975.
6. TERUJI OSE, KAZUM MURATA; Standards of OTF in Japan, *J. SMPTE*, Vol. 14, No. 2, 161—165, 1975.
7. John Macdonald; Comparison of Results of Various OTF Calculation Programs, *J. SPTE*, Vol. 14, No. 2, 166—168, 1975.
8. KENRO MIYAMOTO; Geometrical Optical Approximation of Optical Transfer Function, *Proceepings of the Conference on Photographic and Spectroscopic Optics*, Tokyo and Kyoto, 1964.
9. HIDEKI KONDO, TOSHIO WATANABE and HUMIO YAMAOKA; Criteria for the Evaluation of photographic lenses, *Optica Acta*, Vol. 22, No. 4, 353—363, 1975.
10. G. C. Brock, A. C. Marchant and T. L. Williams; OTF Standards for Aerial Mapping Lenses, *Optica Acta*, Vol. 19, No. 12, 953—972.
11. 薛鸣球: 电影摄影物镜光学传递函数的质量指标 《电影光学》, 1973 年 第四期 29 页 北京 608 厂。

(蒋筑英编译)