



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 754—2005

光学传递函数测量装置

Measuring Equipment for Optical Transfer Function

2005 - 09 - 05 发布

2006 - 03 - 05 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

光学传递函数 测量装置检定规程

**Verification Regulation of Measuring
Equipment for Optical Transfer Function**

JJG 754—2005
代替 JJG 754—1991

本检定规程经国家质量监督检验检疫总局于 2005 年 9 月 5 日批准，并自 2006 年 3 月 5 日起施行。

归 口 单 位：全国光学计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：中国兵器工业第二零五所

本规程委托全国光学计量技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

陈 燕 （中国计量科学研究院）

王莉茹 （中国计量科学研究院）

参加起草人：

杨 红 （中国兵器工业第二零五所）

杨朋利 （中国兵器工业第二零五所）

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 术语	(1)
3.1 最佳像面	(1)
3.2 基准像面	(1)
4 概述	(1)
4.1 物方和像方均处于有限远	(1)
4.2 物方处于无限远	(2)
4.3 物方和像方均处于无限远	(2)
5 计量性能要求	(3)
5.1 MTF 示值	(3)
5.2 PTF 示值	(3)
6 通用技术要求	(4)
7 计量器具控制	(5)
7.1 检定条件	(5)
7.2 检定项目	(7)
7.3 检定方法	(8)
7.4 红外波段光学传递函数测量装置 MTF 示值的校准	(9)
7.5 检定结果的处理	(10)
7.6 检定周期	(10)
附录 A 光学传递函数测量装置检定证书、检定结果通知书内页格式	(11)
附录 B 光学传递函数测量装置检定记录格式	(12)
附录 C 红外光学传递函数测量装置的校准	(13)
附录 D 光学传递函数测量结果不确定度的评定	(15)

光学传递函数测量装置检定规程

1 范围

本规程适用于各种原理的、基于可见光波段的光学传递函数测量装置（以下简称传函测量装置）的首次检定、后续检定和使用中检验。

注：基于红外波段的光学传递函数测量装置的校准可参照本规程附录 C 进行。

2 引用文献

JJF 1059—1999 《测量不确定度评定与表示》

GB 4315.1—1984 《光学传递函数 术语、符号》

CJB/J 5227—2003 《红外光学传递函数测量装置检定规程》

ISO 9335—1995 《光学和光学仪器—光学传递函数—原理和测量过程》

使用本规程时，应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 术语

3.1 最佳像面 Optimum Focal Plane

在轴上某一特定孔径和空间频率下取得调制传递函数最大峰值的像面。

3.2 基准像面 Datum Focal Plane

对最佳像面进行离焦（向靠近样品一方）后得到峰值 50% 的像面。

4 概述

传函测量装置用于对在等晕区内满足线性条件的照相物镜、望远系统、复印机用镜头、电视和电影摄像镜头、航测镜头、红外成像镜头、人工晶体、视觉矫正镜片等各类光学系统的成像质量进行评价和测量。光学传递函数（以下简称 OTF）是一个复函数，它由调制传递函数（以下简称 MTF）和相位传递函数（以下简称 PTF）两部分组成。

光学传递函数表示为：

$$OTF(r, s) = MTF(r, s) \exp[-iPTF(r, s)] \quad (1)$$

传函测量装置按工作原理又分为光电傅立叶分析法和数字法等。

传函测量装置一般由光学工作台（或导轨）、测试目标、被测样品夹持器、像分析器、辅助成像系统等几部分组成。

根据被测样品的不同特性要求，传函测量装置的测试目标一般有圆孔、狭缝、刀口、光栅或自发光系统等几种不同的方式。

像分析器一般采用狭缝、刀口或光栅作为分析元件。

传函测量装置的光学布局 and 物像关系一般分为以下三种。

4.1 物方和像方均处于有限远

如图 1 所示：当被测样品被固定后，通常是将测试目标和像分析器沿着两个相互平

行、并与参考轴垂直的导轨反向移动，进行轴外测量。

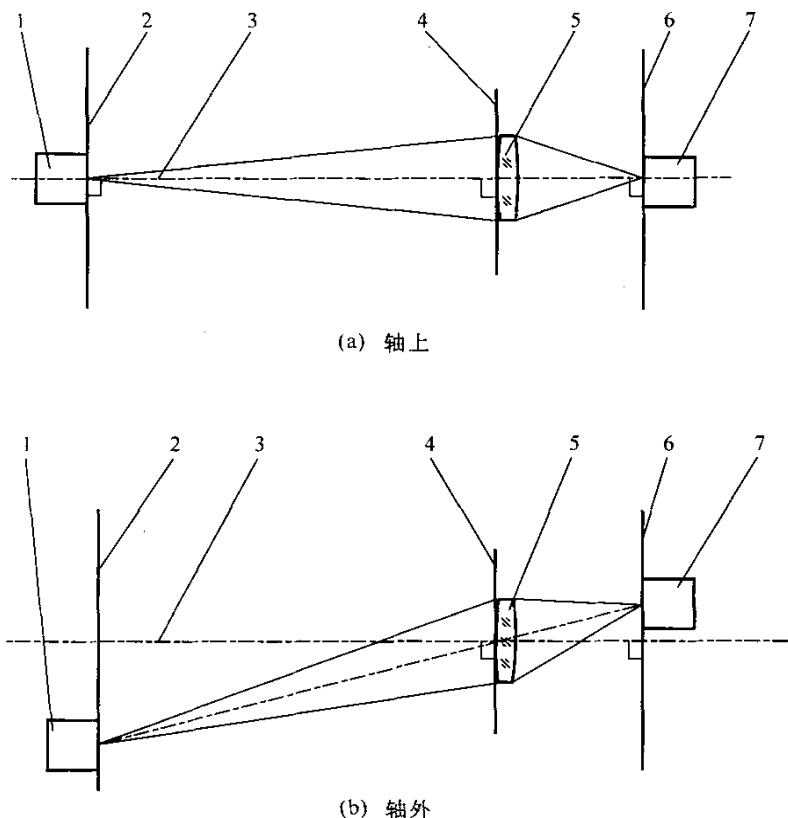


图1 物像有限远测量布局示意图

1—测试目标； 2—物方视场导轨； 3—参考轴； 4—被测样品夹持器；
5—被测样品； 6—像方视场导轨； 7—像分析器

4.2 物方处于无限远

如图2所示：当进行轴外测量时，将准直物镜连同测试目标一起围绕被测样品的入瞳中心且垂直于子午面的轴线旋转 ω 角；反之，也可将准直物镜固定，使被测样品与像分析器一起围绕入瞳中心旋转。为此，要求被测样品的夹持器和像分析器导轨必须被刚性固定在同一个转动基座上。

如果光路中不放置准直物镜，而是将测试目标放在有限远距离来代替无限远目标时，则应视被测样品的相对孔径来决定物方距离。建议该距离至少应在被测样品焦距的30倍以上。

4.3 物方和像方均处于无限远

如图3所示：当进行轴外测量时，物方准直物镜必须同测试目标一起围绕一个既通过被测样品的入瞳中心、又垂直于子午面的轴线旋转 ω 角。像方准直物镜连同像分析器需围绕一个既通过出瞳中心，又垂直于子午面的轴线旋转 ω 角。

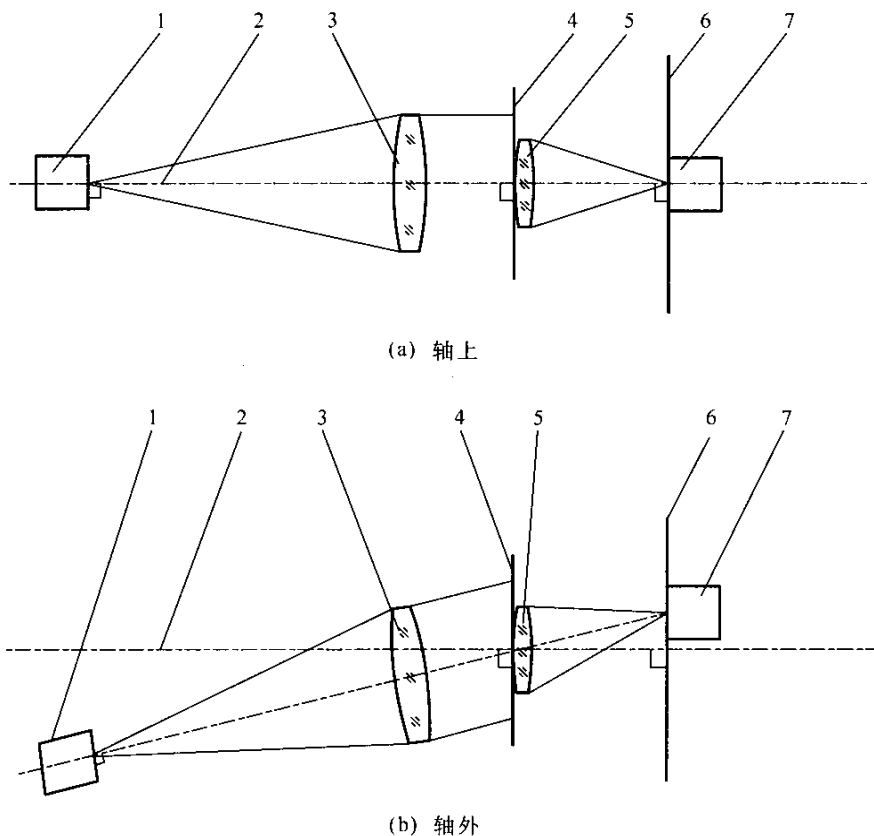


图2 物方无限远测量布局示意图

1—测试目标； 2—参考轴； 3—准直物镜； 4—被测样品夹持器；
5—被测样品； 6—像方视场导轨； 7—像分析器

5 计量性能要求

用 OTF 标准镜头对传函测量装置进行检定时，其 MTF 测量值与标准值之间的偏差应包含对轴外左右视场对称性的比较。

5.1 MTF 示值

5.1.1 一级传函测量装置对平凸 50 mm 标准镜头的 MTF 测量值与标准值之间的偏差不得超过 0.05；二级传函测量装置对该镜头的 MTF 测量值与标准值之间的偏差不得超过 0.10。

5.1.2 一级传函测量装置对双胶合 200 mm 标准镜头的 MTF 测量值与标准值之间的偏差不得超过 0.08。二级传函测量装置对该镜头的 MTF 测量值与标准值之间的偏差不得超过 0.12。

5.2 PTF 示值

一级和二级传函测量装置对平凸 50 mm 标准镜头的 PTF 测量值与标准值之间的偏差均不得超过 12°。

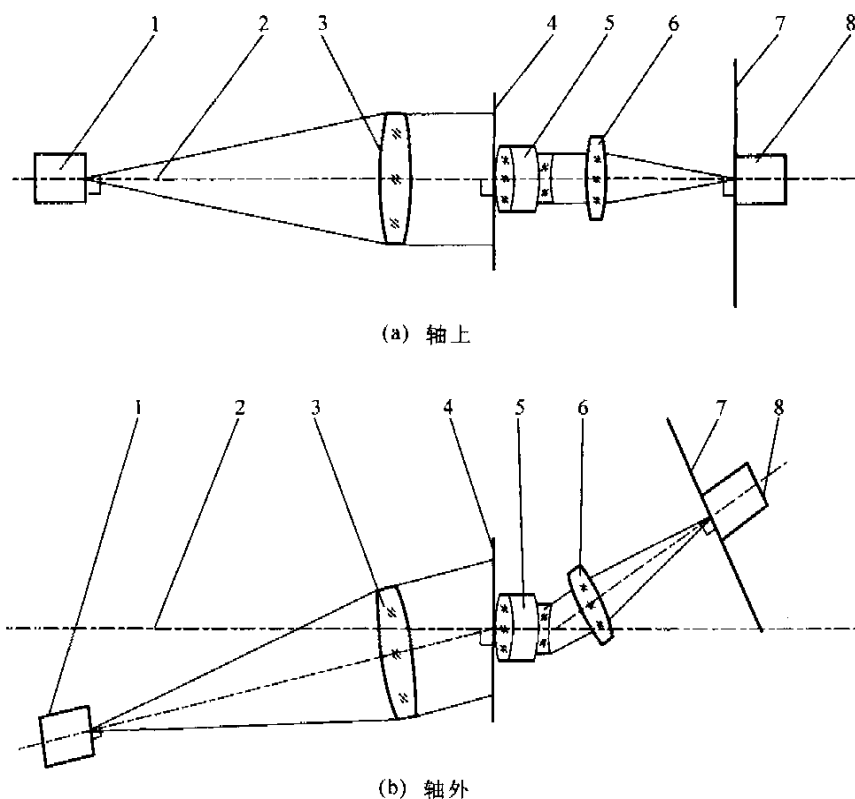


图3 物像无限远测量布局示意图

1—测试目标； 2—参考轴； 3—准直物镜； 4—被测样品夹持器；
5—被测样品； 6—像方准直物镜； 7—像方视场导轨； 8—像分析器

6 通用技术要求

6.1 应有厂名、商标、型号、编号和制造日期等标识。

6.2 光学工作台（或导轨）的表面应平整、均匀，不应有划痕、斑迹等缺陷。

6.3 光学零件的表面不应有霉蚀、脱膜、麻点和划痕等缺陷。

6.4 各活动单元在规定的范围内均应能平稳地移动或转动，不应有卡滞和跳动现象。锁紧单元应止动可靠、无松动。

6.5 测量中对空间频率的显示一般为连续显示或抽样显示两种。如采用抽样显示时，其频率间隔至少应等于或小于 10 mm^{-1} 。

6.6 样品夹持器

如图4所示：使用夹持器装夹样品时，应确保被测样品能在垂直于参考轴的平面上相对测试目标发生旋转，并具有较高的平行度和同心度。使用接口连接时，应防止被测样品与夹持器的安装面之间出现对MTF测量结果产生较大影响的 θ 角。

6.7 辅助成像系统

辅助成像系统通常包括准直物镜、显微物镜以及其他辅助元件，其在F线到g线的

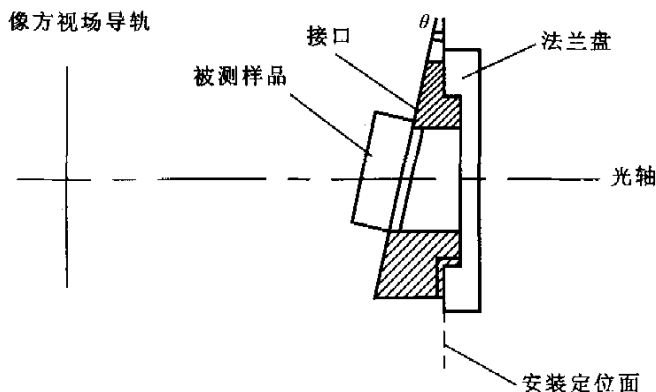


图4 接口安装误差示意图

波像差一般应不大于被测样品波像差的 $1/5$ 。准直物镜的口径应不限制被测样品的入瞳和出瞳，其焦距至少应在被测样品焦距的 5 倍以上。采用显微物镜放大目标像时，应避免产生轴上和轴外测量时的渐晕。

6.8 像质评价系统的分析区域

分析区域的大小取决于被测样品的成像质量以及对 MTF 测量精度的要求。分析区域过小时，会产生截断误差，或使被测样品的 MTF 测量值虚假增高，导致像质评价的误判断。分析区域过大时，则可能引入其他误差。

分析区域的大小应在初始检定时事先设定，检定过程中不应任意改变。

传函测量装置的制造厂商应提供设定分析区域的方法和参考值。

当采用刀口扩散函数 (ESF) 时，可根据 ESF 是否是以直线（通常是水平线）起始和终止来检查分析区域的大小是否合适。

7 计量器具控制

计量器具控制包括首次检定、后续检定和使用中检验。

7.1 检定条件

7.1.1 检定设备

7.1.1.1 平凸 50 mm 标准镜头

平凸 50 mm 标准镜头（以下简称平凸镜头）是对传函测量装置进行计量检定的基础计量标准器具，带有 MTF 的理论计算值和标准值。MTF 标准值由 3 个平凸镜头的实测均值组成，标准值与理论计算值的偏差不得超过 0.05。

1) 技术条件

平凸镜头的技术条件见表 1。

2) 标准可换光阑

平凸镜头带有 4 个标准可换光阑，测量 MTF 时应将光阑逐一置于镜头后方 (1.0 ± 0.1) mm 处。标准可换光阑的尺寸见表 2。

表 1 平凸镜头的技术条件

镜头材料	参考波长 /nm	焦距标称值 /mm	视场角	光 阑	有效通光口径 /mm
K ₉ 光学玻璃	546.1	50	± 3°, ± 6°	F/4, F/5.6, F/8, F/11	30 ± 0.1

表 2 平凸镜头的标准可换光阑 mm

可换光阑	F/4	F/5.6	F/8	F/11
直径	10.60 ± 0.1	7.58 ± 0.025	5.30 ± 0.025	3.85 ± 0.05

3) 标准相位光阑

平凸镜头还带有一个直径为 (6.25 ± 0.025) mm 的标准相位光阑，测量 PTF 时应将相位光阑的光阑面置于镜头前方 (12.5 ± 0.2) mm 处。

4) 平凸镜头的安装

平凸镜头的安装参见图 5，要求镜头的凸面指向无限远一方。安装时需配做内螺纹为 M50 × 1 的接口，对安装方位无特殊要求。

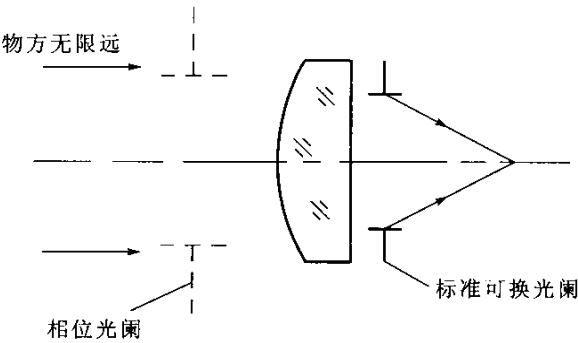


图 5 平凸镜头测量光路示意图

7.1.1.2 双胶合 200 mm 标准镜头

双胶合 200 mm 标准镜头（以下简称双胶合镜头）是对以大口径、长焦距的准直物镜提供无限远目标的传函测量装置进行检定的专用计量标准器具，带有 MTF 的理论计算值和标准值。MTF 标准值由 3 个双胶合镜头的实测均值组成，标准值与理论计算值的偏差不得超过 0.08。

1) 技术条件

双胶合镜头凹面镜的材料为 F₆ 光学玻璃，凸面镜的材料为 BaK₈ 光学玻璃，胶合材料的折射率在 1.40 ~ 1.65 之间，参考波长为 546.1 nm。双胶合镜头的焦距标称值为 200 mm，直径（全口径）为 (56 ± 0.1) mm。

2) 标准可换光阑

双胶合镜头带有四个标准可换光阑，测量 MTF 时应将光阑逐一置于镜头后方（ 1.0 ± 0.2 ）mm 处。标准可换光阑的尺寸见表 3。

表 3 双胶合镜头标准可换光阑 mm

可换光阑	$F/4$	$F/5.6$	$F/8$	$F/11$
直径	47.7 ± 0.1	34.0 ± 0.1	23.8 ± 0.1	17.3 ± 0.1

3) 双胶合镜头的安装

双胶合镜头的安装如图 6 所示，镜头的凸面应指向无限远一方。安装镜头时需配做内螺纹为 M80×1 的接口，对安装方位无特殊要求。

7.1.1.3 滤光片

对传函测量装置进行计量检定应使用干涉滤光片。干涉滤光片的中心波长应在 546 nm 处，或位于 534 nm～558 nm 之间。滤光片的半宽度不应超过 12 nm，其中心波长透射比的 10% 处的带宽应不超过 25 nm。在 600 nm～700 nm 波长范围内的透射比不应超过其中心波长透射比的 0.5%，在 700 nm～1 000 nm 波长范围内的透射比不应超过其中心波长透射比的 0.05%。

若使用其他波长的滤光片时应注明。

7.1.1.4 像方空间频率范围为（0～100）mm⁻¹。

7.1.1.5 可见光的光源色温在（2 800～3 300）K，探测器的光谱范围应与光源相匹配。

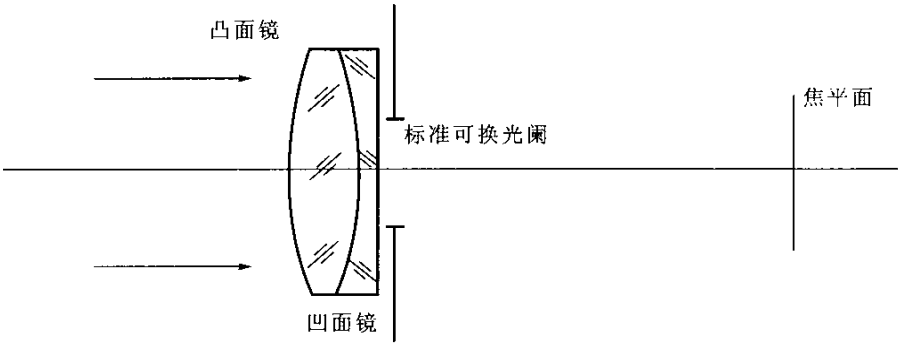


图 6 双胶合镜头测量光路示意图

7.1.2 环境条件

传函测量装置应放在不受气流、机械振动或电磁干扰影响的环境中。装置和室内应保持无灰尘、潮气和烟雾，室内应无杂散光干扰。传函测量装置电子处理系统应有良好的接地设施。

电源电压：（220±10）V

温度：（20±5）℃，其中温度变化量应控制在每小时不超过 ±1℃。

相对湿度：< 70%。

7.2 检定项目

见表 4。

表 4 检定项目

检定项目		首次检定	后续检定	使用中检定
通用技术要求		+	+	+
滤光片		+	-	-
MTF 示值误差	平凸镜头	+	+	+
	双胶合镜头	+	+	+
PTF 示值误差 (平凸镜头)		+	-	-
注：1. MTF 示值误差的检定至少应选取其中一种标准镜头，也可同时选取两种标准镜头。 2. 凡需检定的项目用“+”表示，不需检定的项目用“-”表示。				

7.3 检定方法

7.3.1 通用技术要求的检查

目视和手动相结合，其结果应符合 6.1 ~ 6.5 的规定。

7.3.2 MTF 示值的检定

MTF 实测值与标准镜头的标准值之间的偏差定义为 MTF 示值误差。

检定应在物方无限远、子午和弧矢两个方位进行。

7.3.2.1 平凸 50 mm 标准镜头

选择中心波长为 546 nm 的滤光片。测量顺序如下：

- $F/8$ 、轴上、弧矢方位、像方空间频率为 50 mm^{-1} 、调焦得到最佳像面；
- $F/8$ 、轴上、基准像面；
- $F/8$ 、 $\pm 3^\circ$ 、基准像面；
- $F/8$ 、 $\pm 6^\circ$ 、基准像面；
- $F/5.6$ 、轴上、基准像面；
- $F/5.6$ 、 $\pm 3^\circ$ 、基准像面；
- $F/4$ 和 $F/11$ 、轴上、基准像面；
- 回到 $F/8$ 、轴上、基准像面。

过程 h) 和过程 b) 在 50 mm^{-1} 处得到的 MTF 值之间的变化不应超过 ± 0.02 。否则，上述测量结果无效。应调整后再重复以上的测量过程。

其中，连续频率或间隔频率点的 MTF 实测值与标准值之间的偏差也应符合 5.1.1 的规定；在轴上子午和弧矢两个方位得到的 MTF 测量值应该重合；在轴外左、右对称视场得到的 MTF 测量值之间的偏差也应符合 5.1.1 的规定。

7.3.2.2 双胶合 200 mm 标准镜头

选择中心波长为 546 nm 的滤光片。测量顺序如下：

- $F/8$ 、轴上、弧矢方位、空间频率为 50 mm^{-1} 、调焦得到最佳像面；
- $F/8$ 、轴上、基准像面；

- c) $F/8$ 、 $\pm 2^\circ$ 、基准像面；
- d) $F/8$ 、 $\pm 3^\circ$ 、基准像面；
- e) 回到 $F/8$ 、轴上、基准像面；

过程 e) 和过程 b) 在 50 mm^{-1} 处得到的 MTF 值之间的变化不应超过 ± 0.02 。否则，上述测量结果无效。应调整后再重复以上的测量过程；

- f) $F/4$ 、轴上、最佳像面；
- g) $F/5.6$ 、轴上、最佳像面；
- h) $F/11$ 、轴上、最佳像面。

其中：连续频率或间隔频率点的 MTF 测量值与标准值之间的偏差也应符合 5.1.2 的规定；在轴上子午和弧矢两个方位得到的 MTF 值应该重合；在轴外左、右对称视场得到的 MTF 测量值之间的偏差也应符合 5.1.2 的规定。

7.3.3 PTF 示值的检定

PTF 实测值与标准镜头的标准值之间的偏差定义为 PTF 示值误差。

物方无限远，使用平凸 50 mm 标准镜头，将 $F/8$ 相位光阑置于镜头之前，选择中心波长为 546 nm 的滤光片，测量顺序如下：

- a) $F/8$ 、轴上、弧矢方位、空间频率为 50 mm^{-1} ，调焦得到最佳像面；
- b) $F/8$ 、 3° 、子午方位、像面同 a)；
- c) $F/8$ 、 4° 、子午方位、像面同 b)。

上述测量过程得到的 PTF 测量值与标准值之间的偏差应符合 5.2 的规定。

7.3.4 物方有限远条件下 MTF 示值的检定（选择性）

使用平凸镜头，在子午和弧矢两个方位进行。其物像共轭比应为 10:1，由物方到像方的距离为 $(586 \pm 5) \text{ mm}$ 。测量顺序如下：

- a) $F/8$ 、轴上、弧矢方位、空间频率为 50 mm^{-1} ，调焦得到最佳像面；
- b) $F/8$ 、轴上、基准像面；
- c) $F/8$ 、 $\pm 2.817 \text{ mm}$ 线视场、基准像面；
- d) $F/8$ 、 $\pm 5.647 \text{ mm}$ 线视场、基准像面；
- e) $F/5.6$ 、轴上、基准像面；
- f) $F/5.6$ 、 $\pm 2.817 \text{ mm}$ 线视场、基准像面；
- g) $F/4$ 和 $F/11$ 、轴上、基准像面；
- h) 回到 $F/8$ 、轴上、基准像面。

过程 h) 和过程 b) 在 50 mm^{-1} 处得到的 MTF 值之间的变化不应超过 ± 0.02 。否则，上述测量结果无效。应调整后再重复以上的测量过程。

其中：连续频率或间隔频率点的 MTF 测量值与标准镜头的标准值之间的偏差也应符合 5.1.1 的规定。

7.4 红外波段光学传递函数测量装置 MTF 示值的校准

对红外波段的光学传递函数测量装置进行校准，可以使用附录 C 中推荐的红外校验镜头，或生产厂家自带的专用校验镜头进行自校准测量，其 MTF 测量值与校验镜头的校准值之间的偏差应与厂家明示的传函测量装置的测量准确度相符合。

7.5 检定结果的处理

根据 7.2 “检定项目”的规定逐条进行检定，把所得各项数据参照附录 B 中的表格记录下来，并计算结果。各项均符合本规程要求的判定为合格，否则为不合格。

合格的仪器发给检定证书（参照附录 A），不合格的发给检定结果通知书，并注明不合格项。

7.6 检定周期

光学传递函数测量装置的检定周期一般不超过 2 年。

附录 A

光学传递函数测量装置检定证书、检定结果通知书内页格式

A.1 检定证书（内页）格式

1) 检定条件

标准镜头_____

空间频率_____

视 场_____

波 长_____

共轭方式_____

检定孔径_____

最佳像面_____

基准像面_____

2) 检定结果

①MTF 示值误差

轴上_____

轴外_____

②PTF 示值误差

③其他

A.2 检定结果通知书内页格式

内容同上，应指出不合格项目。

附录 B

光学传递函数测量装置检定记录格式

仪器型号			仪器编号	
生产单位				
送检单位			送检日期	
检定依据		标准镜头		
证书编号		记录编号		
检定温度	℃	相对湿度	%	
检定波长		方 位		
共轭方式		空间频率范围		
检 定 结 果				
通用 要求				
计量性能： 1.MTF 示值误差 检定结果可用曲线图或表格的形式来表示。 根据所用的标准镜头的种类，给出的数据还应包括孔径、焦面、视场等必要信息。 2.PTF 示值误差：要求同上。				
备注：				
检定结论	准予该计量器具作_____使用。			
检 定 员		核 验 员		
检定日期	_____年_____月_____日		有效期至	_____年_____月_____日

附录 C

红外光学传递函数测量装置的校准

本附录适用于基于各种原理的、波段范围为 $(3 \sim 5) \mu\text{m}$ 和 $(8 \sim 12) \mu\text{m}$ 的红外光学传递函数测量装置（以下简称红外传函装置）的校准。本附录只给出了对红外传函装置进行校准所涉及的特殊要求，如校验镜头的技术条件、红外传函装置的计量性能要求、校准方法以及环境要求等。其他均参照本规程的要求执行。

C.1 红外校验镜头

红外校验镜头由 $(8 \sim 12) \mu\text{m}$ 单片式和 $(3 \sim 5) \mu\text{m}$ 单片式两种镜头组成。

校验镜头应分别带有理论计算值和实测均值（3 个一组）两套数据。其理论值的计算不确定度为 0.02，其实测均值与理论计算值之间的偏差不应大于 0.02。使用中，实测均值即作为校验镜头的校验值。

红外校验镜头的技术条件见表 1。

表 1 MTF 校验镜头参数

序号	镜头名称	镜头材料	参考波长/ μm	焦距标称值/mm	视场角	光阑	有效通光口径/mm
1	$(8 \sim 12) \mu\text{m}$ 单片式	单晶锗	10.0	200	$\pm 2^\circ$	$F/3.5$	57
2	$(3 \sim 5) \mu\text{m}$ 单片式	单晶硅	4.0	200	$\pm 2^\circ$	$F/3.5$	57

校准红外传函装置所使用的滤光片应经计量检定合格，并满足表 2 的要求。

表 2 滤光片性能指标

序号	光谱范围/ μm	中心波长/ μm	半宽度/ μm	峰值透射比/%
1	3 ~ 5	4.0 ± 0.2	≤ 0.30	> 60
2	8 ~ 12	10.0 ± 1.0	≤ 1.0	> 60

C.2 计量性能要求

C.2.1 红外传函装置对校验镜头的 MTF 实测值与校验值之间的偏差不应大于 0.07。

C.2.2 在轴上子午和弧矢两个方位得到的 MTF 测量值之间的偏差不应大于 0.02。

C.2.3 在轴外左、右对称视场得到的 MTF 测量值之间的偏差不应大于 0.05。

C.3 校准环境的特殊要求

校准时应无影响测量结果的辐射热源的干扰。

C.4 校准项目和校准方法

C.4.1 MTF 示值误差

C.4.1.1 使用 $(8 \sim 12) \mu\text{m}$ 单片式校验镜头

放入中心波长为 $10.0\ \mu\text{m}$ 的滤光片。测量在子午和弧矢两个方位进行，顺序如下：

- a) $F/3.5$ 、轴上、子午方位、空间频率为 $10\ \text{mm}^{-1}$ ，调焦得到最佳像面；
- b) $F/3.5$ 、轴上、基准像面；
- c) $F/3.5$ 、 $\pm 1^\circ$ 、基准像面；
- d) $F/3.5$ 、 $\pm 2^\circ$ 、基准像面；
- e) 回到 $F/3.5$ 、轴上、基准像面。

过程 e) 和过程 b) 在 $10\ \text{mm}^{-1}$ 处得到的 MTF 值之间的变化不应超过 ± 0.02 。否则，上述测量结果无效。应调整后再重复以上的测量过程。

C.4.1.2 使用 $(3 \sim 5)\ \mu\text{m}$ 单片式校验镜头

放入中心波长为 $4.0\ \mu\text{m}$ 的滤光片。测量在子午和弧矢两个方位进行，顺序如下：

- a) $F/3.5$ 、轴上、子午方位、空间频率为 $25\ \text{mm}^{-1}$ ，调焦得到最佳像面；
- b) $F/3.5$ 、轴上、基准像面；
- c) $F/3.5$ 、 $\pm 1^\circ$ 、基准像面；
- d) $F/3.5$ 、 $\pm 2^\circ$ 、基准像面；
- e) 回到 $F/3.5$ 、轴上、基准像面。

过程 e) 和过程 b) 在 $25\ \text{mm}^{-1}$ 处得到的 MTF 值之间的变化不应超过 ± 0.02 。否则，上述测量结果无效。应调整后再重复以上的测量过程。

按照第 C.4.1.2 和 第 C.4.1.2 得到的各个频率点的 MTF 测量值与该校验镜头的校验值之间的偏差应符合本附录 C.2.1 的规定。在轴上子午和弧矢两个方位得到的 MTF 测量值应符合本附录 C.2.2 的规定。在轴外左、右对称视场得到的 MTF 测量值之间的偏差应符合本附录 C.2.3 的规定。

附录 D

光学传递函数测量结果不确定度的评定

D.1 概述

光学传递函数测量结果的不确定度评定, 是对 MTF 实测值的综合评定。

对一个光学系统、或一个特定的光学镜头进行测量后所得到的 MTF 实测值, 往往是由若干条曲线、或若干个特定频率点的测量结果组成。这些测量值是在不同的方位、不同的孔径、轴上和轴外的不同视场以及不同的空间频率和不同的光源条件下得到的。对光学传递函数的测量结果进行不确定度评定时, 既要考虑测量装置本身的准确度对 MTF 实测值的影响, 同时还要考虑镜头的安装、各种物像关系的调整、环境温度、人员操作、像面定位等多种不确定因素的影响。除此之外, 针对不同测量对象对 MTF 测量条件的特殊要求满足与否也是不能忽视的因素。

本文以一个照相物镜为测量对象, 对一台经检定合格的一级传函测量装置测得的 MTF 测量结果进行不确定度评定。其中包括 A 类和 B 类评定与分析、合成标准不确定度以及扩展不确定度的计算等。

D.2 测量条件

D.2.1 被测样品

焦距: 60 mm;

最大孔径: $F/4$;

空间频率: $(0 \sim 100) \text{ mm}^{-1}$;

视场: 轴上, 轴外 $\pm 5 \text{ mm}$ 和 $\pm 10 \text{ mm}$;

测量波长: 546 nm;

共轭方式: 物方无限远;

方位: 子午和弧矢;

最佳像面: 空间频率 40 mm^{-1} 处, 轴上 MTF 最大。

D.2.2 测量装置

D.2.2.1 工作原理概述

该传函测量装置基于光电扫描法的傅立叶变换, 通过狭缝和矩形光栅的相对移动扫描后, 在物方狭缝上发出连续可变的、具有恒定对比度的空间频率图样作为测试目标的输入信号。目标在像平面上形成狭缝像后的光强分布通过光电探测器接收。该信号由测量装置的电子系统中的专用器件滤除其直流和高次谐波, 保留基频成分, 即得到一个正弦波, 其振幅代替空间频率的振幅, 从而得到 MTF 测量值。

D.2.2.2 主要参数

光谱范围: $(400 \sim 760) \text{ nm}$;

被测焦距: $(10 \sim 300) \text{ mm}$;

视场: $\pm 25^\circ$;

空间频率: $(0 \sim 1000) \text{ mm}^{-1}$;

准确度等级: 经使用平凸 50 mm 标准镜头进行计量检定后, 其结果达到并满足本规

程给出的一级测量装置的要求。

D.2.3 环境

温度：\$(20 \pm 5)^\circ\text{C}\$，其中温度变化量控制在每小时不超过 \$\pm 1^\circ\text{C}\$。

相对湿度：\$< 70\%\$。

D.3 MTF 测量结果的不确定度评定

D.3.1

用一级传函测量装置对照相物镜进行测量时，其 MTF 测量结果的不确定度来源主要有以下几个方面。

- 1) 由测量重复性引入的标准不确定度 u_1 ；
- 2) 由被测样品本身像差导致调焦位置不准确引入的标准不确定度 u_2 ；
- 3) 由操作人员对被测样品进行安装和定位不准确引入的标准不确定度 u_3 ；
- 4) 由计量检定证书直接带入的标准不确定度 u_4 。

由此得到被测样品的 MTF 测量值的合成标准不确定度 u_c 如下：

$$u_c = (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2)^{1/2}$$

各分量的标准不确定度的分析如下。

D.3.2 分量标准不确定度分析

D.3.2.1 A 类评定

由随机效应导致的 MTF 示值的测量不确定度分量按不确定度 A 类评定，它包括：

1) 测量 MTF 时，通常需要将零空间频率归化为 1。由零频归化所引入的不确定度、以及空间频率读数的非线性或零位偏移都将对从零频到最大空间频率的 MTF 实测值产生影响。

2) 测量装置本身的噪音及漂移所引起的不确定度。

3) 由狭缝宽度调整所引入的不确定度通常会降低像面定位的灵敏性，甚至出现虚假分辨率。

4) 由室内杂光或气流扰动所引起的不确定度。

由以上随机效应引入的 MTF 的测量不确定度，可按测量重复性进行评定。实验数据表明，对于该被测样品，当在 $F/4$ 、 -10 mm 线视场、子午方位、空间频率为 70 mm^{-1} 时，MTF 的测量数据分散性最大。进行 8 次测量，MTF 的测量值分别为：0.54, 0.47, 0.48, 0.49, 0.52, 0.53, 0.51, 0.50。

利用贝塞尔公式计算单次测量的实验标准差 s ($n=8$)：

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.024$$

则

$$u_1 = s = 0.024$$

D.3.2.2 B 类评定

由系统效应导致的 MTF 的测量不确定度分量按不确定度 B 类评定，它包括：

1) 由被测样品本身像差导致调焦位置不准确将引入的不确定度分量。

当被测样品存在较大像差而造成像面定位不准确时，将会导致轴上子午和弧矢不重

合、以及轴外 MTF 测量的较大误差。实验数据表明，对照相物镜来说，当轴外线视场为 -10 mm 时，MTF 示值的变化量约在 ± 0.02 之内，按服从均匀分布计算，分布区间半宽 $a = 0.02$ ，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，故引入的标准不确定度为：

$$u_2 = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.011$$

2) 操作人员对被测样品进行安装和定位时通常使用接口连接，此时会在被测样品与夹持器的安装面之间产生倾角 θ ， θ 角是造成轴外左右视场 MTF 测量结果不对称的主要误差来源。实验数据表明，在一般调整状态下由 θ 角引起的 MTF 测量误差约在 0.03 ~ 0.10 左右，按服从均匀分布计算，分布区间半宽 $a = 0.10/2 = 0.05$ ，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，故引入的标准不确定度为：

$$u_3 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.017$$

3) 根据计量检定证书直接带入的不确定度分量

根据计量检定结果，该传函测量装置为一级。根据检定规程的规定，用不同的 OTF 标准镜头进行检定时，一级装置的 MTF 最大示值误差可为 0.05 ~ 0.08 ($k = 3$)。本分析取 0.05，则该项不确定度分量为：

$$u_4 = 0.05/3 = 0.017$$

D.3.3 合成标准不确定度

表 D.1 给出各标准不确定度分量的汇总表。

表 D.1 不确定度分量汇总表

标准不确定度分量 u	不确定度来源	标准不确定度	概率分布	灵敏系数 c_i	不确定度分量
u_1	测量重复性	0.024	正态	1	0.024
u_2	调焦误差	0.011	均匀	1	0.011
u_3	夹持器与安装面之间的倾角 θ	0.017	均匀	1	0.017
u_4	传函测量装置 MTF 的最大示值误差	0.017	正态	1	0.017

以上各分量之间彼此独立，故合成标准不确定度为：

$$\begin{aligned} u_c &= [u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2]^{1/2} \\ &= [0.024^2 + 0.011^2 + 0.017^2 + 0.017^2]^{1/2} = 0.036 \end{aligned}$$

D.3.4 扩展不确定度

扩展不确定度 U 应等于合成标准不确定度 u_c 与包含因子 k 的乘积，取 $k = 2$ ：

$$U = ku_c$$

则扩展不确定度为： $U = 2 \times 0.036 \approx 0.07$ ($k = 2$)。

D.4 结论

根据本检定规程的要求，一级传函测量装置 MTF 的最大示值误差为 0.08，用该装置对照相物镜进行测量所得到的 MTF 测量结果（含轴上和轴外）的扩展不确定度为 0.07（ $k=2$ ）。故检定方法可行。
