



中华人民共和国国家标准

GB/T 44783—2024

大口径空间天文望远镜光学成像质量 地面评价方法

Ground-based evaluation method for optical imaging quality of large-aperture
space astronomical telescope

2024-10-26 发布



2025-02-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 评价目的	1
5 评价项目	2
6 评价条件	2
6.1 环境	2
6.2 设备	2
7 望远镜光学系统光学成像质量测试方法	3
7.1 点扩散函数能量集中度、角分辨率、调制传递函数和点扩散函数椭圆率测试	3
7.2 畸变测试	6
7.3 点源透过率测试	8
8 望远镜整机光学成像质量测试方法	10
8.1 点扩散函数能量集中度、角分辨率和点扩散函数椭圆率测试	10
8.2 实验室动态角分辨率测试	11
8.3 畸变测试	13
8.4 光谱范围测试	14
9 综合评价	15
附录 A (资料性) 星点矩阵板	17
附录 B (资料性) “dither”超分辨率重构算法	18
附录 C (资料性) 评价项目的参考值	19

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国科学院提出。

本文件由全国空间科学及其应用标准化技术委员会(SAC/TC 312)归口。

本文件起草单位：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院空间应用工程与技术中心、中国科学院国家天文台。

本文件主要起草人：曹智睿、卢岩、董吉洪、汉鹏武、王栋、曹莉、詹虎、李新峰、何煦、罗敬。

大口径空间天文望远镜光学成像质量 地面评价方法

1 范围

本文件描述了大口径空间天文望远镜光学成像质量的地面评价方法。

本文件适用于可见光及近红外谱段($0.38\ \mu\text{m}\sim 2.5\ \mu\text{m}$)大口径空间天文望远镜(以下简称望远镜)光学成像质量的地面实验室评价,其他望远镜光学成像质量的地面实验室评价参考使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 13962 光学仪器术语

GB/T 30111 星敏感器通用规范

GB/T 30114.3 空间科学及其应用术语 第3部分:空间天文

GB/T 35126 天文望远镜术语

GB 50611 电子工程防静电设计规范

3 术语和定义

GB/T 13962、GB/T 30111、GB/T 30114.3 和 GB/T 35126 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

大口径空间天文望远镜 large-aperture space astronomical telescope

专门为观测天体目标设计的,有效通光口径 ϕ 大于1 m,且工作在太空环境的望远仪器。

3.2

点扩散函数椭率 ellipticity of point spread function

定量表征点扩散函数非对称分布程度的数学量。

3.3

实验室动态角分辨率 laboratory dynamic angular resolution

望远镜在开启稳像功能的情况下测得的角分辨率。

3.4

光谱范围 spectral range

望远镜能够响应的起始波长和终止波长所覆盖的范围。

4 评价目的

根据望远镜各评价项目的实验室测试结果,对望远镜光学成像质量进行评价,为望远镜过程质量控

制和验收等提供依据。望远镜光学成像质量的地面评价不能替代在轨测试与评价。

5 评价项目

望远镜光学成像质量地面评价可分为望远镜光学系统和望远镜整机两部分,具体评价项目见表 1。

表 1 望远镜光学成像质量地面评价项目

序号	评价对象	评价项目	备注
1	望远镜光学系统	点扩散函数能量集中度	—
2		角分辨率	—
3		调制传递函数	—
4		点扩散函数椭率	视专用技术文件要求选评
5		畸变	—
6		点源透过率	—
7	望远镜整机	点扩散函数能量集中度	—
8		角分辨率	—
9		实验室动态角分辨率	—
10		点扩散函数椭率	视专用技术文件要求选评
11		畸变	—
12		光谱范围	—

6 评价条件

6.1 环境

环境条件应根据望远镜的工作环境确定。除特殊要求外,环境条件如下:

- a) 温度:20℃±2℃;
- b) 相对湿度:40%~60%;
- c) 空气洁净度:优于 ISO 8 级;
- d) 气压:若常压环境下的测试重复性无法满足测量精度要求,则采用真空环境(小于 10⁻³ Pa);
- e) 暗室:测试时屏蔽测试光源之外的其他照明光源,点源透过率测试实验室墙面和地面均应喷涂消光涂料,涂料反射率应小于 10%;
- f) 振动:无影响测量光路稳定的机械振动;
- g) 防静电:防静电工作区符合 GB 50611 的相关规定,参试人员穿着防静电服和防静电鞋,操作人员佩戴防静电腕带。

6.2 设备

设备应满足如下要求:

- a) 所有测试设备检定合格且在有效期内;
- b) 面光源:输出光谱范围覆盖望远镜的工作谱段,输出辐亮度调节范围覆盖望远镜的动态范围,输出辐亮度的面均匀性和角均匀性优于 98%,工作时间内输出辐亮度的不稳定性小

于 1%；

- c) 聚光光源:输出光谱范围覆盖望远镜的工作谱段,输出辐亮度调节范围覆盖望远镜的动态范围,工作时间内输出辐亮度的不稳定性小于 1%；
- d) 平行光管:焦距通常大于望远镜焦距的 2 倍(条件允许时,选用望远镜焦距的 3 倍~5 倍最佳),通光口径大于望远镜的通光口径,系统波像差优于 $\lambda/20$ (均方误差 RMS, $\lambda=632.8\text{ nm}$)；
- e) 星点板:允许的最大星点直径按照公式(1)计算；

$$d_{\max} = \frac{0.61\lambda}{D} \times f_c \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中：

λ ——光源波长(白光照明时取平均波长),单位为毫米(mm)；

D ——望远镜入瞳直径,单位为毫米(mm)；

f_c ——平行光管焦距,单位为毫米(mm)。

- f) 星点矩阵板:星点矩阵板式样见附录 A,其中星点数量通常大于或等于 10×10 ,星点允许的最大直径满足公式(1)要求,星点直径的设计值相同,星点直径、圆度和中心位置的加工误差不大于 0.001 mm(若星点直径的设计值小于 0.01 mm,星点直径和圆度的加工误差通常小于星点直径的 10%)；
- g) 网格板:网格线线宽介于 0.03 mm~0.05 mm 之间,网格线间距经过精密标定,标定精度优于 $2\ \mu\text{m}$,网格节点数量依据测试需求而定(单一维度通常不少于 10 个),网格节点分布范围均匀覆盖望远镜全视场；
- h) 动态星模拟器:星点矩阵板图案见附录 A,星点矩阵板图案的运动频率和幅值模拟望远镜工作状态；
- i) 显微成像系统:数值孔径大于望远镜的像方孔径角,放大倍率保证能辨别星点衍射像的第一、第二衍射亮环,成像质量不影响测试结果；
- j) 显微镜:具有十字分划线用于瞄准网格板刻线,放大倍率保证网格板刻线在显微镜像面处的线宽大于显微镜十字分划线的线宽 5 倍以上(此时网格刻线与分划线对准误差通常不大于网格刻线宽度的 $1/20$)，成像质量不影响测试结果；
- k) 光电探测器:在所使用的测量范围内,光电探测器保持线性响应,符合点源透过率测试所要求的准确度,且在点源透过率测试的整个周期内,光电探测器灵敏度的变化小于 2%；
- l) 挡光屏、双圆柱罐和光陷阱:对背景光辐射噪声的抑制性能满足测试要求；
- m) 多维调整台:调整维度、行程和分辨率视测试需求而定；
- n) 转台:测角精度优于 $0.5''$ ；
- o) 单色仪:输出光谱范围覆盖望远镜的工作谱段,输出波长准确度和波长重复性小于光谱定标峰波长允许偏差的 $1/3$ ；
- p) 光谱辐射计:光谱测量范围覆盖望远镜的工作谱段,光谱辐亮度测量误差小于 5%。

7 望远镜光学系统光学成像质量测试方法

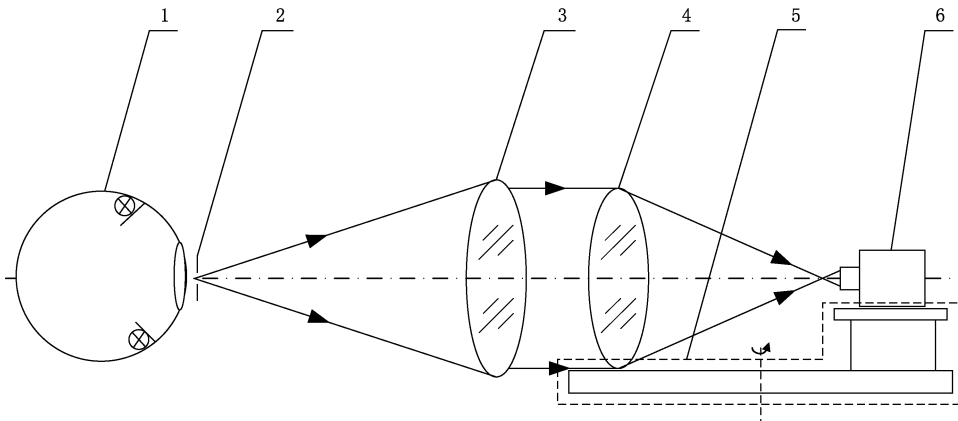
7.1 点扩散函数能量集中度、角分辨率、调制传递函数和点扩散函数率测试

7.1.1 原理

根据星点在望远镜像面所形成的衍射像光强分布(即点扩散函数),计算望远镜的点扩散函数能量集中度、角分辨率、调制传递函数和点扩散函数率。

7.1.2 系统组成

地面测试系统由面光源、星点板、平行光管、多维调整台、显微成像系统和望远镜光学系统(待测设备)等组成,如图 1 所示。其中,面光源、星点板和平行光管用于模拟无穷远的星点目标;多维调整台用于测试光路的对准和测试视场的切换;显微成像系统用于望远镜光学系统像面处星点像的放大观察与图像采集。



标引序号说明:

- 1——面光源;
- 2——星点板;
- 3——平行光管;
- 4——望远镜光学系统;
- 5——多维调整台;
- 6——显微成像系统。

图 1 望远镜光学系统点扩散函数测试系统组成

7.1.3 测试步骤

测试步骤如下:

- a) 按照图 1 所示搭建测试光路,调整望远镜光轴与平行光管光轴平行,望远镜口径位于平行光管口径之内;
- b) 通过面光源照明平行光管焦面处的星点板,显微成像系统在其最佳焦面位置采集望远镜中心视场的星点图像;
- c) 关闭面光源,显微成像系统在其最佳焦面位置采集多幅背景图像,采集背景图像的曝光时间与采集星点图像的曝光时间相同;
- d) 打开面光源,调整望远镜与平行光管的相对角度关系,显微成像系统在其最佳焦面位置采集 ± 0.3 视场、 ± 0.7 视场和 ± 1 视场等不同视场区域的星点图像;
- e) 计算望远镜不同视场区域的点扩散函数。

7.1.4 数据处理

7.1.4.1 点扩散函数

点扩散函数的数据处理方法如下。

- a) 以星点弥散斑灰度最大值为中心选取采样区域,采样区域需涵盖星点图像 84% 以上的能量。

- b) 以采样区域内多幅背景图像的灰度平均值作为图像背景噪声。
- c) 对采样区域内的星点图像降噪处理,即星点图像的灰度值减去背景噪声。
- d) 根据公式(2)和公式(3)计算显微成像系统像面采样区域内星点弥散斑中心位置坐标 x'_0 和 y'_0 。

$$x'_0 = \frac{\sum_{x'_i=1}^M [x'_i \times g(x'_i, y'_i)]}{\sum_{x'_i=1}^M \sum_{y'_i=1}^N g(x'_i, y'_i)} \dots\dots\dots (2)$$

$$y'_0 = \frac{\sum_{y'_i=1}^N [y'_i \times g(x'_i, y'_i)]}{\sum_{x'_i=1}^M \sum_{y'_i=1}^N g(x'_i, y'_i)} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

x'_i, y'_i ——显微成像系统像面采样区域内各像元中心位置坐标,单位为毫米(mm);

$g(x'_i, y'_i)$ ——显微成像系统像面采样区域 (x'_i, y'_i) 处的图像灰度值;

M, N ——显微成像系统像面采样区域内 x'_i 和 y'_i 方向的像元数。

- e) 通常,采用多项式或高斯函数拟合得到显微成像系统像面采样区域内位置坐标与图像灰度之间的函数关系。
- f) 将显微成像系统像面采样区域内位置坐标与图像灰度之间的函数关系转换为望远镜像面内位置坐标与图像灰度之间的函数关系,其中,望远镜像面内位置坐标 x_i 和 y_i 按照公式(4)和公式(5)计算。

$$x_i = \frac{x'_i - x'_0}{\Gamma} \dots\dots\dots (4)$$

$$y_i = \frac{y'_i - y'_0}{\Gamma} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

Γ ——显微成像系统放大率。

- g) 按照公式(6)将望远镜像面位置坐标与图像灰度之间的函数关系进行能量归一化处理,得到望远镜的点扩散函数 $PSF(x_i, y_i)$ 。

$$PSF(x_i, y_i) = \frac{g(x_i, y_i)}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x_i, y_i) dx_i dy_i} \dots\dots\dots (6)$$

7.1.4.2 点扩散函数能量集中度

按照公式(7)计算点扩散函数能量集中度 EE。

$$EE = \int_{x_a}^{x_b} \int_{y_a}^{y_b} PSF(x_i, y_i) dx_i dy_i \dots\dots\dots (7)$$

式中:

x_a, x_b, y_a, y_b ——积分区域上下限,单位为毫米(mm)。



7.1.4.3 角分辨率

按照公式(8)计算角分辨率 α 。

$$\alpha = \frac{r}{f} \times 206\ 265'' \dots\dots\dots (8)$$

式中:

r ——点扩散函数第一衍射暗环半径(或指定点扩散函数能量集中度所覆盖的半径),单位为毫米(mm);

f ——望远镜主距,单位为毫米(mm)。

7.1.4.4 调制传递函数

按照公式(9)计算光学传递函数 $OTF(u, v)$;然后,按照公式(10)计算光学传递函数的模,即为调制传递函数 $MTF(u, v)$ 。

$$OTF(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x_i, y_i) \exp[-2\pi j(u \times x_i + v \times y_i)] dx_i dy_i \dots\dots\dots (9)$$

$$MTF(u, v) = |OTF(u, v)| \dots\dots\dots (10)$$

式中:

u, v ——频域中沿 x, y 方向的空间频率,单位为线对每毫米(lp/mm)。

7.1.4.5 点扩散函数椭率

按照公式(11)~公式(14)计算点扩散函数椭率 e 。

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2} \dots\dots\dots (11)$$

$$\begin{cases} e_1 = \frac{Q_{xx} - Q_{yy}}{Q_{xx} + Q_{yy}} \\ e_2 = \frac{2Q_{xy}}{Q_{xx} + Q_{yy}} \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

$$\begin{cases} Q_{xx} = \iint PSF(x_i, y_i) (x_i - \bar{x}_i)^2 dx_i dy_i \\ Q_{yy} = \iint PSF(x_i, y_i) (y_i - \bar{y}_i)^2 dx_i dy_i \\ Q_{xy} = \iint PSF(x_i, y_i) (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i) dx_i dy_i \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\iint PSF(x_i, y_i) x_i dx_i dy_i}{\iint PSF(x_i, y_i) dx_i dy_i} \\ \bar{y} = \frac{\iint PSF(x_i, y_i) y_i dx_i dy_i}{\iint PSF(x_i, y_i) dx_i dy_i} \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

7.2 畸变测试

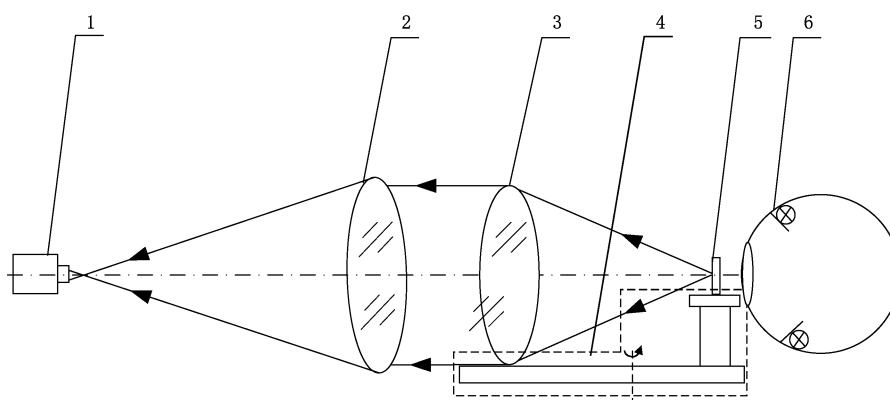
7.2.1 原理

根据望远镜像面处一系列已知像高所对应的视场角计算望远镜的畸变。

7.2.2 系统组成

地面测试系统由显微镜、平行光管、多维调整台、转台、网格板、面光源和望远镜光学系统(待测设

备)等组成,如图2所示。其中,显微镜用于观察网格板在平行光管焦面处所成的像,并指引显微镜的十字分划线与网格板刻线像居中对齐;平行光管和望远镜光学系统用于构建对网格板的成像光路;多维调整台用于测试光路的对准;转台用于测试视场的切换和视场角测量;网格板用于提供各测点实际像高数据;面光源用于网格板的照明。



标引序号说明:

- 1——显微镜;
- 2——平行光管;
- 3——望远镜光学系统;
- 4——多维调整台和转台;
- 5——网格板;
- 6——面光源。

图2 望远镜光学系统畸变测试系统组成

7.2.3 测试步骤

测试步骤如下:

- a) 按照图2所示搭建测试光路,调整望远镜光轴与平行光管光轴平行,望远镜口径位于平行光管口径之内,望远镜的入瞳位置与转轴重合;
- b) 调整网格板刻划面与望远镜的像面重合(重合误差不应超过望远镜焦深的1/4),网格板刻划面中心与望远镜光轴重合;
- c) 通过显微镜观察网格板在平行光管焦面处所成的像,分别沿子午和弧矢两个方向转动转台,使显微镜的十字分划线与网格板上每个测点的刻线像居中对齐,并记录各测点所对应的方位角和俯仰角,测点应均匀覆盖望远镜的全视场范围;
- d) 重复上述测试步骤3次。

7.2.4 数据处理

按照公式(15)计算望远镜主距 f ,以3次测试结果的平均值作为最终测试结果。

$$f = \frac{f_x + f_y}{2} \dots\dots\dots (15)$$

式中:

f_x ——由俯仰角为 0° 的各测点计算得到的望远镜主距,单位为毫米(mm);

f_y ——由方位角为 0° 的各测点计算得到的望远镜主距,单位为毫米(mm)。

按照公式(16)和公式(17)分别计算 f_x 和 f_y 。

$$f_x = \frac{\sum (hx'_{i0} \tan A_{i0})}{\sum \tan^2 A_{i0}} \dots\dots\dots (16)$$

$$f_y = \frac{\sum (hy'_{0j} \tan B_{0j})}{\sum \tan^2 B_{0j}} \dots\dots\dots (17)$$

式中：

hx'_{i0} ——俯仰角为 0° 的各测点的实测像高,单位为毫米(mm)；

A_{i0} ——俯仰角为 0° 的各测点的方位角,单位为度($^\circ$)；

hy'_{i0} ——方位角为 0° 的各测点的实测像高,单位为毫米(mm)；

B_{i0} ——方位角为 0° 的各测点的俯仰角,单位为度($^\circ$)。

按照公式(18)和公式(19)计算望远镜子午方向的绝对畸变 δx_{ij} 和相对畸变 qx_{ij} ,以 3 次测试结果的平均值作为最终测试结果。

$$\delta x_{ij} = hx'_{ij} - f \times \tan A_{ij} \dots\dots\dots (18)$$

$$qx_{ij} = \frac{\delta x_{ij}}{f \times \tan A_{ij}} \times 100\% \dots\dots\dots (19)$$

式中：

hx'_{ij} ——测点 (i, j) 对应子午方向实测像高,单位为毫米(mm)；

A_{ij} ——测点 (i, j) 对应的方位角,单位为度($^\circ$)。

按照公式(20)和公式(21)计算望远镜弧矢方向的绝对畸变 δy_{ij} 和相对畸变 qy_{ij} ,以 3 次测试结果的平均值作为最终测试结果。

$$\delta y_{ij} = hy'_{ij} - f \times (\tan B_{ij} / \cos A_{ij}) \dots\dots\dots (20)$$

$$qy_{ij} = \frac{\delta y_{ij}}{f \times (\tan B_{ij} / \cos A_{ij})} \times 100\% \dots\dots\dots (21)$$

式中：

hy'_{ij} ——测点 (i, j) 对应弧矢方向实测像高,单位为毫米(mm)；

B_{ij} ——测点 (i, j) 对应的俯仰角,单位为度($^\circ$)。

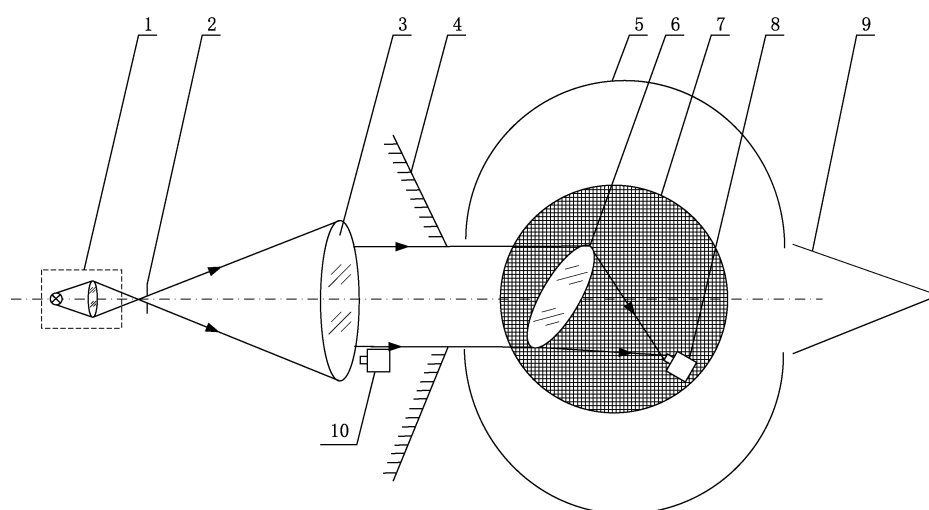
7.3 点源透过率测试

7.3.1 原理

根据望远镜轴外视场点在其像面和入瞳位置所引起的辐照度分布计算望远镜的点源透过率。

7.3.2 系统组成

地面测试系统由聚光光源、星点板、平行光管、挡光屏、双圆柱罐、多维调整台和转台、光电探测器 I、光陷阱、光电探测器 II 和望远镜光学系统(待测设备)等组成,如图 3 所示。其中,聚光光源、星点板和 平行光管用于模拟望远镜视场外的无穷远杂散光源;挡光屏用于调节平行光管出射光束的口径;光电探测器 I 和光电探测器 II 分别用于测量望远镜像面位置和入瞳位置的辐照度;多维调整台和转台用于测试光路的对准和测试视场的切换;双圆柱罐和光陷阱用于抑制测试环境内的背景光辐射噪声。



标引序号说明：

- 1 —— 聚光光源；
- 2 —— 星点板；
- 3 —— 平行光管；
- 4 —— 挡光屏；
- 5 —— 双圆柱罐；
- 6 —— 望远镜光学系统；
- 7 —— 多维调整台和转台；
- 8 —— 光电探测器 I；
- 9 —— 光陷阱；
- 10 —— 光电探测器 II。

图 3 望远镜光学系统点源透过率测试系统组成

7.3.3 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 按照图 3 所示搭建测试光路,调整平行光管光轴垂直于双圆柱罐的入射窗口,平行光管口径中心与双圆柱罐入射窗口中心大致对齐,将望远镜固定在多维调整台和转台上,放置在双圆柱罐内的中间位置,调整望远镜与平行光管的光轴夹角与测试视场角度一致,望远镜口径位于平行光管口径之内,调整挡光屏位置和形状,使平行光管出射光束刚好充满望远镜口径；
- b) 打开聚光光源,测试望远镜像面位置和入瞳位置的辐照度；
- c) 重复上述测试步骤 3 次。

7.3.4 数据处理

按照公式(22)计算特定视场角处的点源透过率 $PST(\omega)$,以 3 次测试结果的平均值作为最终测试结果。

$$PST(\omega) = E_{ip}(\omega) / E_{ep} \quad \dots \dots \dots (22)$$

式中：

- $E_{ip}(\omega)$ —— 望远镜在视场角 ω 处像面位置的辐照度,单位为瓦特每平方米(W/m^2)；
- E_{ep} —— 望远镜入瞳位置的辐照度,单位为瓦特每平方米(W/m^2)。

8 望远镜整机光学成像质量测试方法

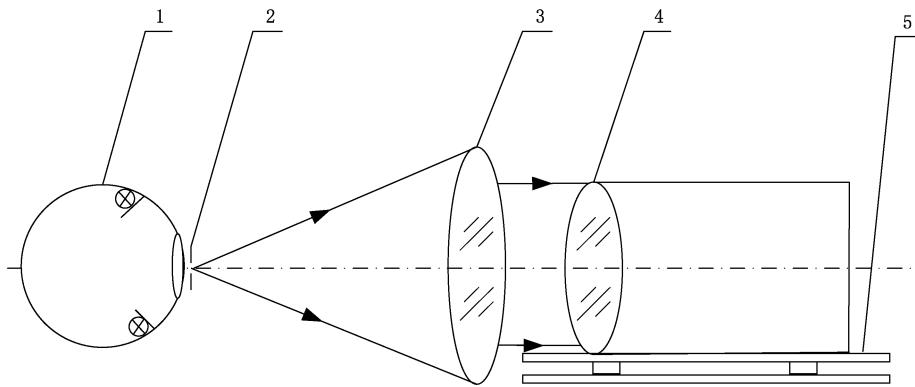
8.1 点扩散函数能量集中度、角分辨率和点扩散函数椭率测试

8.1.1 原理

同 7.1.1。

8.1.2 系统组成

地面测试系统由面光源、星点矩阵板、平行光管、多维调整台和望远镜整机(待测设备)组成,如图 4 所示。其中,面光源、星点矩阵板和平行光管用于模拟无穷远的星点目标;多维调整台用于测试光路的对准和测试视场的切换。



标引序号说明:

- 1——面光源;
- 2——星点矩阵板;
- 3——平行光管;
- 4——望远镜整机;
- 5——多维调整台。

图 4 望远镜整机点扩散函数测试系统组成

8.1.3 测试步骤

测试步骤如下:

- a) 按照图 4 所示搭建测试光路,调整望远镜光轴与平行光管光轴平行,望远镜口径位于平行光管口径之内;
- b) 设置望远镜的积分时间、增益等成像参数;
- c) 开启面光源,望远镜在其最佳焦面位置采集 0 视场星点图像;
- d) 关闭面光源,保持望远镜积分时间、增益等成像参数不变,望远镜在其最佳焦面位置采集多幅背景图像;
- e) 调整望远镜与平行光管的相对角度关系至望远镜的 ± 0.3 视场、 ± 0.7 视场和 ± 1 视场等不同视场区域,并在望远镜最佳焦面位置采集星点图像和背景图像。

8.1.4 数据处理

数据处理方法如下。

- a) 以每个星点弥散斑灰度最大值为中心选取相同尺寸的采样区域,采样区域需涵盖星点图像84%以上的能量。
- b) 以每个采样区域内多幅背景图像的灰度平均值作为该采样区域内图像背景噪声。
- c) 对每个采样区域内的星点图像降噪处理,即星点图像的灰度值减去背景噪声。
- d) 为了提高数据采样密度,通常需对测试视场附近的多个星点图像进行超分辨率重构,具体方法见附录B。
- e) 根据公式(23)和公式(24)计算重构星点图像中星点弥散斑中心位置坐标 x_0'' 和 y_0'' 。

$$x_0'' = \frac{\sum_{x_i''=1}^M [x_i'' \times g(x_i'', y_i'')] }{\sum_{x_i''=1}^M \sum_{y_i''=1}^N g(x_i'', y_i'')} \dots\dots\dots(23)$$

$$y_0'' = \frac{\sum_{y_i''=1}^N [y_i'' \times g(x_i'', y_i'')] }{\sum_{x_i''=1}^M \sum_{y_i''=1}^N g(x_i'', y_i'')} \dots\dots\dots(24)$$

式中:

- x_i'', y_i'' ——重构星点图像中位置坐标,单位为毫米(mm);
- $g(x_i'', y_i'')$ ——重构星点图像中,坐标为 (x_i'', y_i'') 处的图像灰度值;
- M, N ——重构星点图像中,沿 x 和 y 方向的像元数。

- f) 通常,采用多项式或高斯函数拟合得到重构星点图像中位置坐标与图像灰度之间的函数关系。
- g) 按照公式(25)将重构星点图像中位置坐标与图像灰度之间的函数关系进行能量归一化处理,得到点扩散函数 $PSF(x_i'', y_i'')$ 。

$$PSF(x_i'', y_i'') = \frac{g(x_i'', y_i'')} {\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x_i'', y_i'') dx_i'' dy_i''} \dots\dots\dots(25)$$

- h) 按照公式(7)计算点扩散函数能量集中度。
- i) 按照公式(8)计算角分辨率。
- j) 按照公式(11)~公式(14)计算点扩散函数椭率。

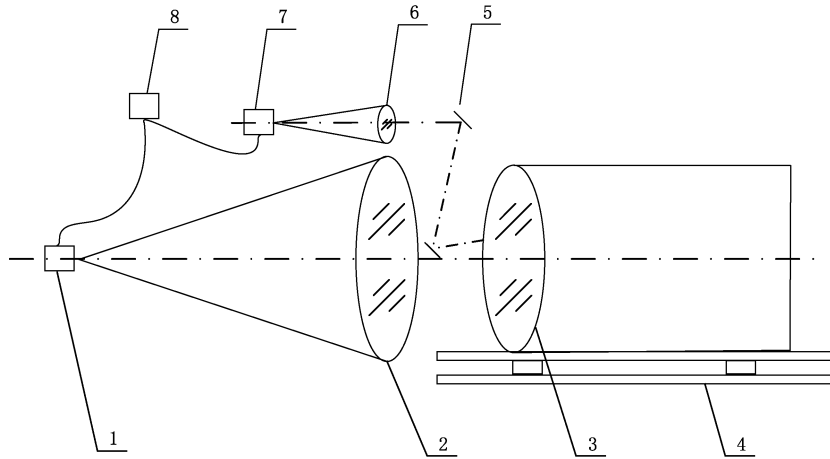
8.2 实验室动态角分辨率测试

8.2.1 原理

望远镜对相对运动的星点目标成像,根据星点在望远镜像面所形成的衍射像光强分布(即点扩散函数),计算望远镜的实验室动态角分辨率。

8.2.2 系统组成

测试系统由动态星模拟器、平行光管、平面反射镜组件、望远镜整机(待测设备)和多维调整台等组成,如图5所示。其中,动态星模拟器1和平行光管1为望远镜成像视场区域提供无穷远动态观测目标;动态星模拟器2、平行光管2和平面反射镜组件为望远镜导星视场区域提供无穷远动态观测目标;工控机用于控制两个动态星模拟器产生相同的动态星图,星图图案见附录A;多维调整台用于测试光路的对准和测试视场的切换。



标引序号说明：

- 1——动态星模拟器 1；
- 2——光管 1；
- 3——望远镜整机；
- 4——多维调整台；
- 5——平面反射镜组件；
- 6——平行光管 2；
- 7——动态星模拟器 2；
- 8——工控机。

图 5 望远镜整机实验室动态角分辨率测试系统组成

8.2.3 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 按照图 5 所示搭建测试光路，调整望远镜光轴和平行光管 1 光轴平行，望远镜口径位于平行光管 1 口径之内，调整平行光管 2 的出射光束经平面反射镜组件后达到望远镜的导星视场区域；
- b) 工控机控制两个动态星模拟器产生相同的动态星图；
- c) 设置望远镜的积分时间、增益等成像参数；
- d) 望远镜的导星仪采集平行光管 2 输出的动态星图，解算星图运动信息，并将数据传输给望远镜的稳像控制系统，完成稳像闭环控制；
- e) 望远镜的成像视场区域采集平行光管 1 输出的动态星图；
- f) 关闭动态星模拟器光源，保持望远镜积分时间、增益等成像参数不变，望远镜采集多幅背景图像；
- g) 调整望远镜与平行光管的相对角度关系至望远镜的 ± 0.3 视场、 ± 0.7 视场和 ± 1 视场等不同视场区域，重复 d)、e) 和 f) 操作步骤。

8.2.4 数据处理

同 8.1.4。

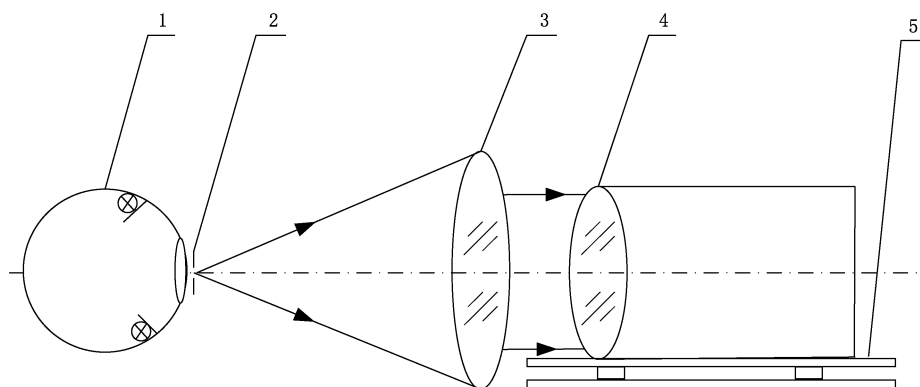
8.3 畸变测试

8.3.1 原理

同 7.2.1。

8.3.2 系统组成

地面测试系统由面光源、星点板、平行光管、多维调整台、转台和望远镜整机(待测设备)等组成,如图 6 所示。其中,面光源、星点板和平行光管用于模拟无穷远的星点目标;多维调整台用于测试光路的对准;转台用于测试视场的切换和视场角测量。



标引序号说明:

- 1——面光源;
- 2——星点板;
- 3——平行光管;
- 4——望远镜整机;
- 5——多维调整台和转台。

图 6 望远镜整机畸变测试系统组成

8.3.3 测试步骤

测试步骤如下:

- a) 按照图 6 所示搭建测试光路,将望远镜固定在多维调整台和转台上,调整望远镜的光轴与转台的转轴垂直,望远镜的入瞳位置与转轴重合,望远镜光轴与平行光管光轴平行,望远镜口径位于平行光管口径之内;
- b) 望远镜采集星点图像,测量星点弥散斑质心所在的像元坐标位置,将该位置确定为测试原点,此处的测试视场角设置为 $(0,0)$,像元坐标设置为 $(0,0)$;
- c) 沿水平方向调整望远镜与平行光管的相对角度关系,使测点均匀覆盖望远镜的全视场范围,记录转台转角,并测量相应视场角度下星点弥散斑质心所在的像元坐标;
- d) 调整望远镜与平行光管的相对角度关系,重新回到测试原点;
- e) 沿垂直方向调整望远镜与平行光管的相对角度关系,使测点均匀覆盖望远镜的全视场范围,记录转台转角,并测量相应视场角度下星点弥散斑质心所在的像元坐标;
- f) 重复上述测试步骤 3 次。

8.3.4 数据处理

数据处理方法同 7.2.4。其中,各测点的实测像高 hx'_{i0} 和 hy'_{i0} 按公式 (26) 和公式(27) 计算。

$$hx'_{i0} = x'_{i0} \times d_x \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$hy'_{i0} = y'_{i0} \times d_y \quad \dots\dots\dots (27)$$

式中:

x'_{i0} ——俯仰角为 0° 的各测点像元横坐标;

d_x ——像元沿横坐标方向的尺寸,单位为毫米(mm);

y'_{i0} ——方位角为 0° 的各测点像元纵坐标;

d_y ——像元沿纵坐标方向的尺寸,单位为毫米(mm)。

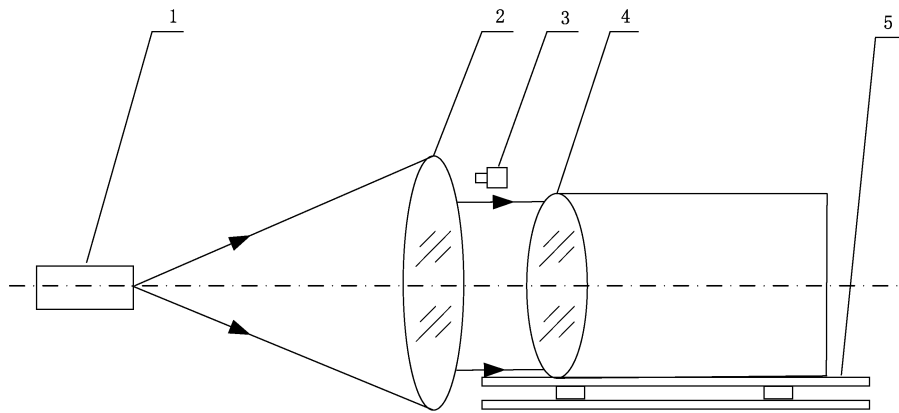
8.4 光谱范围测试

8.4.1 原理

通过测量望远镜的相对光谱响应确定望远镜的起始波长和终止波长,即望远镜的光谱范围。

8.4.2 系统组成

测试系统由单色仪、平行光管、光谱辐射计、多维调整台和望远镜整机(待测设备)等组成,如图 7 所示。其中,单色仪输出的单色光经平行光管转换为单色平行光束,再经望远镜成像于探测器上;光谱辐射计用于测量望远镜入瞳处的光谱辐亮度;多维调整台用于测试光路的对准和测试视场的切换。



标引序号说明:

- 1——单色仪;
- 2——平行光管;
- 3——光谱辐射计;
- 4——望远镜整机;
- 5——多维调整台。

图 7 望远镜整机光谱范围测试系统组成

8.4.3 测试步骤

测试步骤如下:

- a) 按照图 7 所示搭建测试光路,调整望远镜光轴与平行光管光轴平行,望远镜口径位于平行光管

口径之内；

- b) 设置望远镜的积分时间、增益等成像参数；
- c) 开启单色仪，在望远镜光谱范围内按照预设波长采样间隔输出单色光；
- d) 望远镜在不同波长的单色光输入时分别采集图像；选取望远镜采集图像灰度最大时的波长，并将单色仪重新调整至该波长位置；
- e) 调整单色仪的输出辐亮度，使望远镜采集图像的最大灰度处于饱和值的 $1/2 \sim 2/3$ ；
- f) 保持望远镜成像参数和面光源输出辐亮度不变；
- g) 控制单色仪在望远镜光谱范围内按照预设波长采样间隔输出单色光，望远镜在不同波长处分别采集图像，光谱辐射计在不同波长处测量望远镜入瞳处的光谱辐亮度；
- h) 关闭单色仪，望远镜重复采集图像不少于 50 次，光谱辐射计测量望远镜入瞳处的光谱辐亮度。

8.4.4 数据处理

按照公式(28)计算望远镜在不同波长处的光谱响应度 $R_0(\lambda_k)$ 。

$$R_0(\lambda_k) = \frac{DN(\lambda_k) - DN_0}{L(\lambda_k) - L_0} \quad \dots\dots\dots(28)$$

式中：

$DN(\lambda_k)$ ——望远镜在波长为 λ_k 的单色光输入时，采集的光斑区域灰度平均值；

DN_0 ——关闭单色仪时，望远镜重复采集图像中所有像元输出灰度的平均值；

$L(\lambda_k)$ ——波长 λ_k 时，望远镜入瞳处的光谱辐亮度，单位为瓦特每平方米球面度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)；

L_0 ——关闭单色仪时，望远镜入瞳处的光谱辐亮度，单位为瓦特每平方米球面度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)。

注：在望远镜采集的所有单色光斑图像中，选取单色光斑占用像元数最多的一幅图像，找出单色光斑的像元边界，再向外扩展 5 个像元，以此区域作为单色光斑灰度平均值的计算区域。

按照公式(29)计算望远镜在不同波长处的相对光谱响应度 $R(\lambda_k)$ 。

$$R(\lambda_k) = \frac{R_0(\lambda_k)}{R_0(\lambda_p)} \quad \dots\dots\dots(29)$$

式中：

$R_0(\lambda_p)$ ——望远镜在峰值波长 λ_p 处的光谱响应度，即由公式(28)计算得到光谱响应度中的最大值。

按照专用技术文件要求，将峰值波长两侧特定相对光谱响应度的波长定义为起始波长 (λ_1) 和终止波长 (λ_u)，则望远镜的光谱范围为 $[\lambda_1, \lambda_u]$ 。

9 综合评价

望远镜光学成像质量地面评价的基本要求如下。

- a) 望远镜光学成像质量地面评价应考虑重力影响，通常情况下，望远镜光学成像质量地面评价应在 $\pm 1g$ 重力作用状态（例如：望远镜光轴水平的初始状态和望远镜绕光轴旋转 180° 后的状态即为 $\pm 1g$ 重力作用状态）或重力卸载状态（即通过技术手段消除了望远镜主要重力形变的状态）下开展。
- b) 在某一测试状态下，望远镜光学系统光学成像质量的评价项目满足专用技术文件要求时，判定该评价项目合格；望远镜光学系统的点扩散函数能量集中度、角分辨率、调制传递函数、点扩散函数椭率（视专用技术文件要求选作）、畸变和点源透过率均合格时，判定望远镜光学系统光学

成像质量在该测试状态下合格。

- c) 在某一测试状态下,望远镜整机光学成像质量的评价项目满足专用技术文件要求时,判定该评价项目合格,望远镜整机的点扩散函数能量集中度、角分辨率、实验室动态角分辨率、点扩散函数椭率(视专用技术文件要求选作)、畸变和光谱范围均合格时,判定望远镜整机光学成像质量在该测试状态下合格。
- d) 各评价项目的参考值见附录 C。
- e) 通常情况下,当望远镜光学成像质量在 $\pm 1g$ 重力作用状态下均合格时,可判定望远镜光学成像质量合格,当望远镜光学成像质量在重力卸载状态下合格时,也可判定望远镜光学成像质量合格;其他情况下,视专用技术文件要求进行判定。



附 录 A
(资料性)
星点矩阵板

A.1 图 A.1 是星点矩阵板式样,星点矩阵板上的星点数量通常大于或等于 10×10 。

A.2 每个星点允许的最大直径 d_{\max} 宜满足公式(A.1)。

$$d_{\max} = \frac{0.61\lambda}{D} \times f_c \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

λ ——光源波长(白光照明时取平均波长),单位为毫米(mm);

D ——望远镜入瞳直径,单位为毫米(mm);

f_c ——平行光管焦距,单位为毫米(mm)。

A.3 星点直径的设计值相同,星点直径、圆度和中心位置的加工误差通常不大于 0.001 mm(若星点直径的设计值小于 0.01 mm,星点直径和圆度的加工误差通常小于星点直径的 10%)。

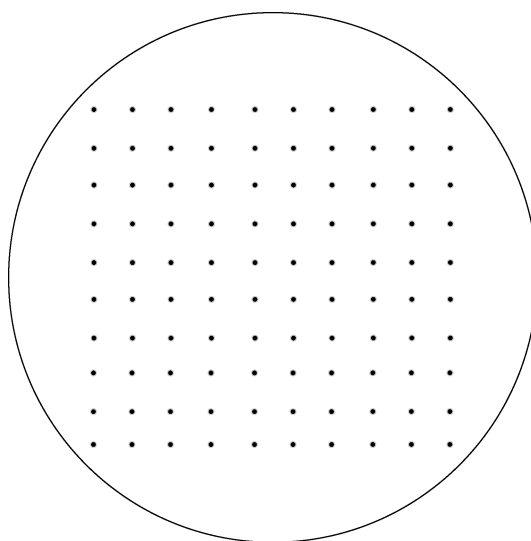


图 A.1 星点矩阵板式样



附录 B

(资料性)

“dither”超分辨率重构算法

采用“dither”超分辨率重构算法,将多幅相同尺寸的低分辨率星点图像重构为一个相同尺寸的高分辨率星点图像,超分辨率重构星点图像中,坐标为 (x_i, y_i) 处的图像灰度值 $g(x_i, y_i)$ 按照公式(B.1)计算,坐标为 (x'_i, y'_i) 的像元投射到坐标为 (x_i, y_i) 的像元时的权重系数 $w_K(x'_i, y'_i)$ 按照公式(B.2)计算。

$$g(x_i, y_i) = \frac{\sum_K [g_K(x'_i, y'_i) \times \alpha_K(x'_i, y'_i) \times w_K(x'_i, y'_i) \times \Gamma^2]}{\sum_K [\alpha_K(x'_i, y'_i) \times w_K(x'_i, y'_i)]} \dots\dots\dots (B.1)$$

$$w_K(x'_i, y'_i) = \frac{t^2}{[k(x'_i, y'_i) \times (\text{Noise1} + \text{Noise2})/\rho + \text{Noise3}^2 \times k(x'_i, y'_i)^2] \times d^4} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

- $g_K(x'_i, y'_i)$ ——第 K 个低分辨率星点图像中,坐标为 (x'_i, y'_i) 处的图像灰度值;
 - $\alpha_K(x'_i, y'_i)$ ——坐标为 (x'_i, y'_i) 的像元投射到坐标为 (x_i, y_i) 的像元时,两个像元面积的重叠率;
 - Γ ——超分辨率重构星点图像中像元尺寸与低分辨率星点图像中像元尺寸的比值;
 - $k(x'_i, y'_i)$ ——低分辨率星点图像中,坐标为 (x'_i, y'_i) 处的平场系数;
 - Noise1——望远镜的暗电流噪声;
 - Noise2——望远镜的背景噪声;
 - ρ ——望远镜的增益系数;
 - Noise3——望远镜的读出噪声;
 - d ——望远镜的像元尺寸,单位为毫米(mm)。
- (x'_i, y'_i) 和 (x_i, y_i) 的对应关系,由 Γ 和不同星点在望远镜像面上的坐标差值等综合决定。



附 录 C
(资料性)
评价项目的参考值

评价项目的参考值见表 C.1。

表 C.1 评价项目的参考值

序号	评价对象	评价项目	参考值
1	望远镜光学系统	点扩散函数能量集中度	在 5×5 像元尺寸范围内,能量集中度通常优于 80%
2		角分辨率	通常介于 $0.1'' \sim 3''$ 之间,入瞳直径 $\phi 2$ m 的望远镜的角分辨率可优于 $0.15''$
3		调制传递函数	望远镜奈奎斯特频率处的调制传递函数通常优于 0.3
4		点扩散函数椭率	望远镜全视场内,点扩散函数椭率最大值通常优于 0.15,平均值通常优于 0.05
5		畸变	全视场范围内的相对畸变通常优于 1%
6		点源透过率	当测试视场角大于或等于技术文件要求的抑制角时,点源透过率通常优于 10^{-7}
7	望远镜整机	点扩散函数能量集中度	在 5×5 像元尺寸范围内,能量集中度通常优于 80%
8		角分辨率	通常介于 $0.1'' \sim 3''$ 之间,入瞳直径 $\phi 2$ m 的望远镜的角分辨率可优于 $0.15''$
9		实验室动态角分辨率	在数值上通常小于角分辨率的 1.2 倍
10		点扩散函数椭率	望远镜全视场内,点扩散函数椭率最大值通常优于 0.15,平均值通常优于 0.05
11		畸变	全视场范围内的相对畸变通常优于 1%
12		光谱范围	可见光谱段:通常介于 $0.38 \mu\text{m} \sim 0.78 \mu\text{m}$ 之间; 近红外谱段:通常介于 $0.78 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$ 之间

