



中华人民共和国国家标准

GB/T 44436—2024

软 X 射线-极紫外波段空间成像仪器 实验室检测与定标方法

Laboratory testing and calibration methods for soft X-ray to extreme
ultraviolet band space imaging instrument

2024-09-29 发布

2024-09-29 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 试验环境	2
4.1 总体要求	2
4.2 大气下试验环境要求	2
4.3 真空下试验环境要求	2
5 试验设备	2
5.1 试验光源	2
5.2 远场目标模拟装置	3
5.3 星点目标	4
5.4 真空系统	4
5.5 标准传递探测器	4
5.6 运动平台	4
6 检测项目及试验方法	4
6.1 检测项目	4
6.2 视场范围及像元角分辨率检测	5
6.3 系统角分辨率测试	6
6.4 光谱响应分布、有效面积	7
7 定标项目及方法	9
7.1 定标项目	9
7.2 几何定标	9
7.3 暗噪声定标	10
7.4 辐射定标	11
参考文献	16

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。

本文件由全国空间科学及其应用标准化技术委员会(SAC/TC 312)提出并归口。

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、国家卫星气象中心、中国科学院高能物理研究所、中国科学院国家空间科学中心、中国科学院国家天文台。

本文件主要起草人：何玲平、陈波、卢岩、王海峰、丁广兴、张宏吉、张效信、宗位国、敦金平、王于仁、韦飞、白先勇、刘树虎。



软 X 射线-极紫外波段空间成像仪器 实验室检测与定标方法

1 范围

本文件描述了工作在 0.1 nm~121 nm 波段的软 X 射线-极紫外空间成像仪器的实验室检测与定标试验项目及试验方法,规定了试验环境和试验设备的要求。

本文件适用于软 X 射线-极紫外光谱范围内的空间成像仪器的实验室检测与定标。

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 8979 纯氮、高纯氮和超纯氮

GB/T 13962 光学仪器术语

GB/T 14950 摄影测量与遥感术语

GB/T 37835 太阳辐照度确定过程一般要求

ISO 14644-1:2015 洁净室及相关受控环境 第 1 部分:按粒子浓度划分空气洁净度等级(Clean-rooms and associated controlled environments—Part 1:Classification of air cleanliness by particle concentration)

3 术语和定义

GB/T 8979、GB/T 13962、GB/T 14950、GB/T 37835、ISO 14644-1:2015 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

软 X 射线 **soft X-rays**

0.1 nm~10 nm 波长范围内电磁辐射。

3.2

极紫外光 **extreme ultraviolet**

10 nm~121 nm 波长范围内电磁辐射。

3.3

像元角分辨率 **pixel angular resolution**

成像仪器像面探测器单个像元所对应的张角。

3.4

系统角分辨率 **system angular resolution**

成像仪器能够分辨的最小空间目标所对应的张角。

3.5

有效面积 **effective area**

成像仪器入瞳面积与工作波段辐射响应效率的乘积。

3.6

光谱响应分布 spectral response distribution

成像仪器对不同波长辐射响应效率的分布。

3.7

平场定标 flat-field calibration

成像仪器像面各像元之间辐射响应系数非均匀性的标定。

3.8

几何定标 geometric calibration

成像仪器焦距、视场中心以及畸变系数等参数的标定。

4 试验环境

4.1 总体要求

软 X 射线-极紫外波段空间成像仪器的实验室检测与定标试验项目包括视场范围、像元角分辨率、几何定标、系统角分辨率、光谱响应分布、有效面积、平场定标、暗噪声定标及辐射定标。其中，视场范围、像元角分辨率及几何定标等试验宜在大气环境下开展，系统角分辨率、光谱响应分布、有效面积、平场定标、暗噪声定标及辐射定标等试验应在真空环境下开展。

4.2 大气下试验环境要求

大气下开展试验的环境满足以下要求。

- a) 仪器整机内部具备充洁净高纯氮气条件时应满足：
 - 1) 试验环境洁净度达到 ISO 14644-1:2015 中规定的 7 级；
 - 2) 洁净氮气纯度不低于 99.999 9%；
 - 3) 如使用的氮气不满足 99.999 9% 纯度要求，采用额外洁净装置对氮气进一步进化过滤，确保油气浓度不大于 0.02 mg/m³；
 - 4) 仪器内部保持对外正压。
- b) 仪器内部不具备充洁净高纯氮气条件时，试验环境洁净度应达到 ISO 14644-1:2015 中规定的 5 级。
- c) 试验环境温度应维持在 20 °C ± 5 °C 范围内。
- d) 试验环境相对湿度应维持在 (45 ± 15)% 范围内。

4.3 真空下试验环境要求

真空下开展试验的环境满足以下要求：

- a) 真空系统内部气压应低于 6.0×10^{-4} Pa；
- b) 真空系统内部洁净度应达到 ISO 14644-1:2015 中规定的 5 级；
- c) 真空系统应是无油系统，一般情况下要求有机污染物 24 h 内沉积率不大于 1.0×10^{-8} g/cm²，对有特殊污染控制要求的，应根据仪器的具体污染控制指标控制有机污染物沉积率和试验时长；
- d) 真空系统提供温度可降至 ≤ -150 °C 的热沉温度条件。

5 试验设备

5.1 试验光源

根据成像仪器具体工作波段，选择多靶软 X 射线源、空心阴极光源或同步辐射束线等合适试验光

源,确保能够覆盖被测仪器成像波段范围,并通过滤光片系统或单色系统抑制光源带外辐射所占比例。

5.2 远场目标模拟装置

5.2.1 软 X 射线波段远场目标模拟装置

在软 X 射线波段可采用沃尔特型(Wolter 型)掠入射平行光管和长距离真空管道光源两种方式来模拟远场目标,用于待测成像仪器在该波段的系统角分辨率测试和整机级辐射定标。

通过在 Wolter 型掠入射平行光管的焦平面安装成像目标和相应波段滤光片,可模拟软 X 射线无穷远目标;成像仪器对该无穷远目标成像,可实现工作波段的成像性能检测,如图 1 所示。平行光管与待测仪器焦距比 N 应在 3~5 之间;平行光管在目标空间频率 F_{imager}/N (F_{imager} 为待测仪器系统分辨率在像面的对应空间频率)处的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)应不小于 0.8。

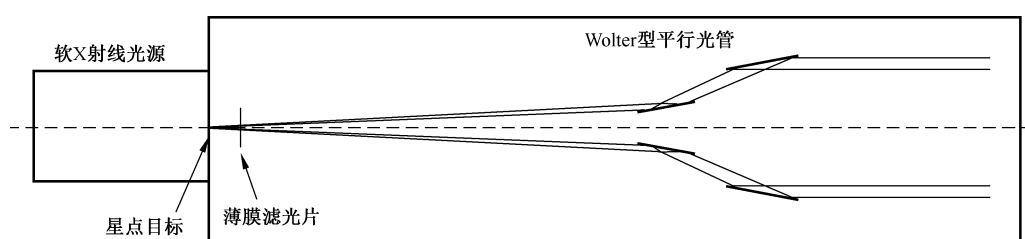


图 1 软 X 射线掠入射平行光管示意图

基于长距离真空管道、光阑、多靶和多滤片的软 X 射线源建立的软 X 射线远场目标模拟装置,是软 X 射线成像和定标的另一种高可信装置,如图 2 所示。多靶多滤片软 X 射线产生的软 X 射线经过真空管道传播后,形成准平行的光锥光斑,光斑口径覆盖待测量软 X 射线光学组件口径;在真空管道长度超过 75 m 后,掠入射光入射角度与无穷远目标入射光线角度的偏差影响甚微,因此可模拟无穷远软 X 射线目标,用于该波段成像系统的成像性能测试和定标。标定远场模拟装置出射的准平行光的发散角,用于后续分辨率评估时的数据修正,修正后出射光束的发散角应小于待测成像仪器的系统角分辨率的 1/4。

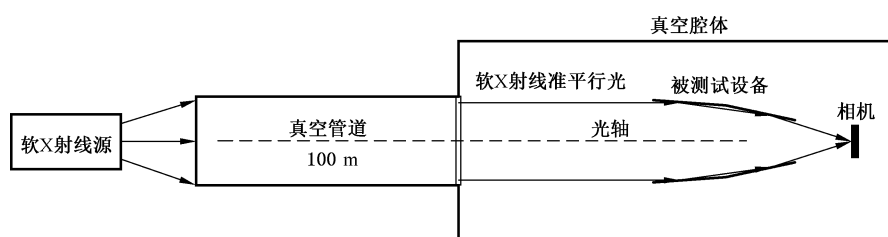


图 2 真空管道准平行光管示意图

使用软 X 射线波段远场目标模拟装置进行辐射定标时,装置出射光束应覆盖待测仪器入瞳,且光束非均匀性应不高于定标精度要求的一半;如非均匀性不满足,定标前应标定光束的非均匀性,并在数据处理时进行修正,降低光束非均匀性对辐射定标的影响。

5.2.2 极紫外波段远场目标模拟装置

采用极紫外正入射平行光管模拟该波段无穷远目标,用于待测成像仪器的视场范围、像元分辨率、系统角分辨率测试和整机级辐射定标。将极紫外正入射平行光管、极紫外光源和真空系统组合成一套极紫外成像性能试验装置,并在平行光管焦面安装成像目标,模拟无穷远极紫外波段目标;待测仪器对

该目标成像,即可评估在工作波段的成像性能,如图 3 所示。平行光管与待测仪器焦距比 N 应在 3~5 之间,平行光管在 F_{imager}/N 处的 MTF 应不小于 0.8。

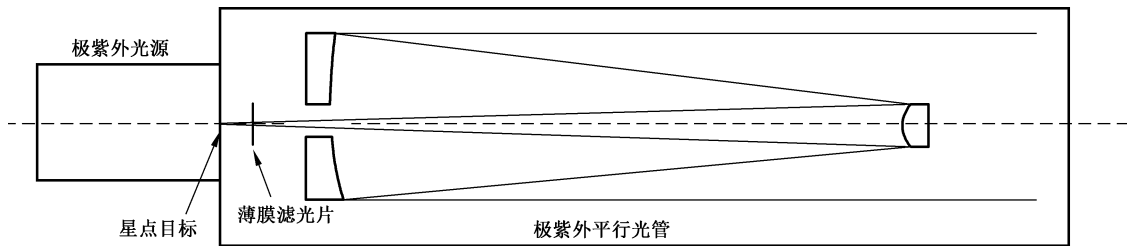


图 3 极紫外正入射平行光管示意图

使用极紫外波段远场目标模拟装置进行辐射定标时,装置出射光束应覆盖待测仪器入瞳,且光束非均匀性应不高于定标精度要求的一半;如非均匀性不满足,定标前应标定光束的非均匀性,并在数据处理时进行修正,降低光束非均匀性对辐射定标的影响。

5.3 星点目标

使用平行光管模拟无穷远目标时,需要在平行光管焦平面安装星点目标,要求星点目标尺寸小于 $d \cdot N/4$,其中 d 为待测仪器系统分辨率要求在像面的几何尺寸, N 为平行光管与待测仪器的焦距比。

5.4 真空系统

真空系统内部洁净度应达到 5 级;真空系统应为无油系统,24 h 内有机物污染物沉积应不大于 $1.0 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2$;试验时,真空系统内部气压应低于 $6.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。

5.5 标准传递探测器

在辐射定标、探测器光电转换效率测量试验过程中,需要使用标准传递探测器对入射光束的照度进行标定。标准传递探测器的辐射响应度应通过具备该波段溯源能力的机构的标定;探测器被标定波段范围应覆盖待测仪器的波段范围,并给出不同波长的响应系数及不确定度。

5.6 运动平台

光谱响应分布检测、几何定标等试验过程中需通过运动平台进行移动或指向调整。该运动平台应具备方位-俯仰两维转动和水平-垂直两维平移功能;运动平台指向角度调整精度应不低于成像仪器像元角分辨率,平移位置精度应不低于像面探测器的像元尺寸;运动平台的调整误差应在使用前进行标定,并可通过光栅尺等方式实时反馈当前所在位置。运动平台需使用洁净传动系统,其运动对真空系统的影响不高于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。

6 检测项目及试验方法

6.1 检测项目

软 X 射线-极紫外波段空间成像仪器的检测项目包括视场范围、像元角分辨率、系统角分辨率、光谱响应分布及有效面积。

6.2 视场范围及像元角分辨率检测

6.2.1 试验设备

本项检测项目试验使用远场目标模拟装置、星点目标、运动平台、真空系统。

6.2.2 试验程序

软 X 射线-极紫外波段空间成像仪器光学系统一般由反射式光学系统、薄膜滤光片和像面探测器等组成,其中薄膜滤光片厚度极薄,不影响成像视场。在大气条件下、安装滤光片前,对紫外星点目标扫描成像,测量仪器的视场范围;为提高测量精度,视场边缘时应降低扫描步长。对于方形视场,测量方位、俯仰以及对角线等不少于四个方向视场张角;对于旋转对称圆视场,以中心视场为起点,每间隔 45° 测量一组径向视场。由测定的视场张角和所对应的像元数量,可计算得到像元角分辨率。具体测试示意如图 4 所示。

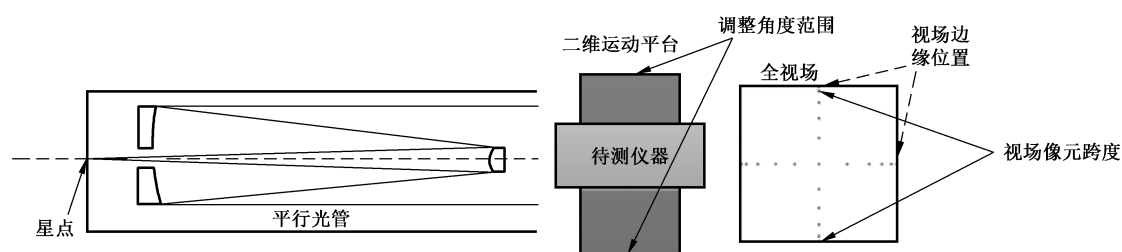


图 4 视场范围及像元分辨率测试示意图

具体试验程序如下:

- 待测仪器如果安装有前置或后置滤光片,将其取下或转动至通光孔位置;
- 仪器安装于运动平台,调整位置使其入光口中心与平行光管出射光束中心对齐;
- 调整运动平台,使星点目标在仪器视场一个方向的不同位置成像,找到该视场方向的两端边缘并成像;
- 记录星点目标像从视场一侧边缘移动至另一侧边缘过程中平台转动角度,以及星点目标像移动像元距离;
- 计算该视场方向的覆盖范围及像元角分辨率;
- 重复 c)~e),测量不同视场方向的覆盖范围和对应的像元角分辨率。

对于软 X 射线成像仪器,其光学系统由掠入射光学组件、薄膜滤光片、磁偏转组件及像面探测器等组成。由于其视场较小、角分辨率高,需百米级软 X 射线无穷远模拟装置或软 X 射线平行光管完成其视场扫描和像元角分辨测量。通过精密的俯仰和旋转运动扫描成像来测量软 X 射线视场范围;在视场边缘时应降低扫描步长,精确确定视场。具体步骤与上述描述相同。

6.2.3 数据处理

以水平和垂直方向视场为例说明处理方法。读取星点图像从视场一端边缘运动至另一端边缘时运动平台指向调整角度,得到成像仪器在一个方向的视场角 φ ;读取该方向边缘星点目标的图像像元位置 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ,得到水平方向视场角度对应的像元跨度 ΔX ,由视场角、视场像元跨度 ΔX ,计算得到单个像元的水平方向物方空间张角,即可得到系统的像元角分辨率 $\Delta\varphi$,如公式(1)所示。测试示意图如图 5 所示。

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi}{x_1 - x_2} = \frac{\varphi}{\Delta X} \dots\dots\dots(1)$$

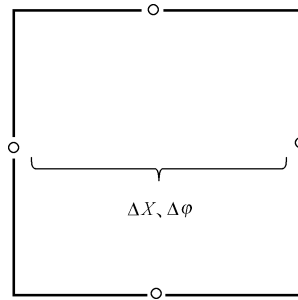


图 5 视场测试示意图

同理,采用同样的数据处理方法得到垂直视场方向的视场角和像元角分辨率检测结果。

6.3 系统角分辨率测试

6.3.1 试验设备

本项检测项目试验使用远场目标模拟装置、星点目标、运动平台和真空系统。

6.3.2 试验程序

使用远场目标模拟装置和星点目标,采用整机点扩散函数(Point Spread Function,PSF)和能量包围函数(Enclosed Energy Function,EEF)的测试方法,对软 X 射线-极紫外波段空间成像仪器的系统角分辨率进行检测。

使用远场目标模拟装置时,光源侧光阑应安装薄膜滤光片,滤除来自光源的紫外、可见光等非工作波段辐射。待测仪器安装于无油真空系统中运动平台上,入瞳对准光管出射光束,对模拟的工作波段无穷远星点目标成像,测量得到系统的 PSF 或 EEF。使用 PSF 评估时,读取星点目标图像的 PSF 灰度分布的半高全宽(Full Width at Half Maximum,FWHM),FWHM 像元数乘以像元角分辨率,即可得到系统角分辨率;使用 EEF 评估时,读取星点目标图像的 50%能量范围直径(W50),该直径(像元数)乘以像元角分辨率,得到系统角分辨率。

具体试验程序如下:

- a) 在平行光管焦面安装星点目标和薄膜滤光片;
- b) 仪器安装于运动平台,调整位置使其入光口中心与平行光管出射光束中心对齐;
- c) 真空系统抽真空至内部气压低于 6.0×10^{-4} Pa;
- d) 将待像面探测器制冷至工作温度;
- e) 仪器对无穷远模拟星点目标成像,在拍摄工作波段星点目标图像;
- f) 读取采集的星点目标图像灰度分布并做亚像元拟合,计算星点目标图像灰度分布的半高全宽(像元数),或者计算星点图像 50%灰度区域直径(像元数);
- g) 将半高全宽或 50%灰度区域直径乘以像元角分辨率,得到工作波段下系统角分辨率。

6.3.3 数据处理

星点目标图像 PSF 灰度分布的 FWHM 计算方法如图 6 所示。

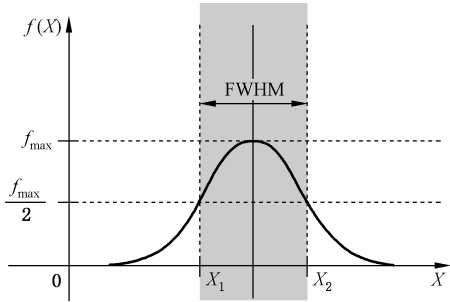


图 6 星点目标 PSF 分布及其 FWHM 计算方法示意图

读取成像仪器工作波段下星点目标在水平方向图像灰度分布,并对图像中 PSF 灰度随像元分布做亚像元高斯拟合处理,得到亚像元精度的 PSF 分布曲线。读取拟合 PSF 分布曲线中灰度峰值以及左右半峰的像元位置,计算星点的半高全宽 Δd ,计算方法如公式(2)所示。

$$\Delta d = X_1 - X_2 \dots\dots\dots (2)$$

式中:

X_1 ——左侧半峰值高度对应 X 轴坐标;

X_2 ——右侧半峰值高度对应 X 轴坐标。

将 FWHM 乘以像元角分辨率,得到系统角分辨率。同理,读取成像仪器工作波段下星点目标的垂直方向的图像灰度分布,采用上述处理方法计算星点目标在垂直方向 PSF 的 FWHM 和系统角分辨率。

也可采用 EEF 的评估方法对软 X 射线仪器的系统分辨率进行评估,如图 7 所示。

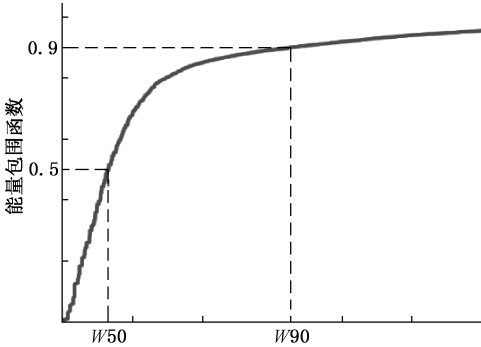


图 7 W50、W90 能量包围计算方法示意图

选定 100%光斑能量成像区域,拟合得出中心点,围绕中心位置计算 50%能量包围直径(W50)及 90%能量包围直径(W90),将 W50 和 W90 乘以像元角分辨率,即得到对应判据下的系统分辨率。

6.4 光谱响应分布、有效面积

6.4.1 试验设备

本项检测项目试验使用软 X 射线-极紫外波段单色仪、真空系统、标准传递探测器、千分尺。

6.4.2 试验程序

光谱响应曲线由滤光片、反射镜及面阵探测器等光电元件的光谱特性决定。测量待测系统中各光学元器件的效率-波长分布曲线并相乘,得到系统的光谱响应-波长分布曲线。

将仪器系统光谱响应系数与入瞳面积的相乘,可得到系统的有效面积。

具体试验程序如下。

- a) 滤光片透过率测量：
 - 1) 滤光片安装在真空测试系统样品台上,抽真空使真空系统内部气压低于 6.0×10^{-4} Pa;
 - 2) 信号测量单元对入射光束进行信号强度寻峰,测量入射信号;
 - 3) 单色仪波长扫描,测量入射光束不同波长位置的光强信号;
 - 4) 移动运动平台使滤光片进入测试光路;
 - 5) 单色仪波长扫描,测量透射光束在不同波长位置的透射光强信号;
 - 6) 比对透射光强信号和入射光强信号,得到滤光片透过率-波长曲线;
 - 7) 测量滤光片上不少于 5 个区域的透过率,计算平均值作为测试结果。
- b) 反射镜反射率测量：
 - 1) 反射镜样品固定于真空测试系统样品室内,真空系统内部气压低于 6.0×10^{-4} Pa;
 - 2) 信号测量单元对光束强度寻峰,测量入射光束信号;
 - 3) 单色仪波长扫描,测量入射光束在不同波长位置的光强信号;
 - 4) 移动运动平台使反射镜进入测试光路,信号测量单元对反射光束强度寻峰,测量反射光束信号;
 - 5) 单色仪波长扫描,测量反射光束在不同波长位置的光强信号;
 - 6) 比对反射光强信号和入射光强信号,得到反射镜反射率-波长曲线;
 - 7) 测试反射镜不少于 5 个不同区域的反射率,计算平均值作为测试结果。
- c) 探测器光电转换效率测量：
 - 1) 面阵探测器和标准传递探测器固定于真空系统样品室内,内部气压低于 6.0×10^{-4} Pa;
 - 2) 标准探测器对入射光束强度寻峰,测量入射光束信号;
 - 3) 单色仪进行波长扫描,标准传递探测器标定不同波长下入射光束的照度;
 - 4) 移动运动平台使面阵探测器进入测试光路;
 - 5) 单色仪波长扫描,面阵探测器在不同波长下对入射光束成像;
 - 6) 读取面阵探测器对光束成像的灰度,根据探测器增益转换系数等计算探测器响应的光子数;
 - 7) 比对面阵探测器响应光子数和光束照度,处理数据得到面阵探测器光电转换效率-波长曲线;
 - 8) 测试探测器不少于 5 个不同区域的光电转换效率,计算平均值作为测试结果。
- d) 入瞳面积测量：
 - 1) 采用千分尺测量成像系统孔径光阑几何参数;
 - 2) 计算孔径光阑面积;
 - 3) 根据孔径光阑与入瞳的放大关系,由孔径光阑几何面积计算入瞳面积。

6.4.3 数据处理

测量系统中所有光学元器件的效率-波长曲线,按公式(3)将它们相乘。

$$R = \rho(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- R —— 整机的光谱响应率-波长分布,以电子数每光子(e/photon)表示;
- $\rho(\lambda)$ —— 反射元件反射率-波长分布;
- $\tau(\lambda)$ —— 透射元件透过率-波长分布;
- $\eta(\lambda)$ —— 探测器光电转换效率-波长分布,以电子数每光子(e/photon)表示。

由光谱响应率-波长分布曲线和入瞳面积,按公式(4)计算得到有效面积。

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{en}} \cdot \rho(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \eta(\lambda) \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

A_{en} ——仪器入瞳面积,单位为平方厘米(cm^2);

A_{eff} ——有效面积,以平方厘米电子数每光子($\text{cm}^2 \cdot \text{e}/\text{photon}$)表示。

7 定标项目及方法

7.1 定标项目

定标项目包括几何定标、暗噪声定标和辐射定标。

7.2 几何定标

7.2.1 定标设备

几何定标试验使用远场目标模拟装置、星点目标、运动平台。

7.2.2 定标程序

几何定标目的是标定成像仪器的焦距、视场中心坐标以及畸变系数等参数。这些参数与视场一样,主要与光机结构相关,而与波长无关,可在大气下进行。

采用测角法对成像仪器开展几何定标:待定标仪器以不同视场位置对星点目标成像;提取星点目标像元位置,并与成像的视场角度一一对应;由星点目标像元位置与视场角度之间关系建立非线性方程组,求解该方程组,可得到焦距、视场中心坐标以及畸变系数等参数。示意图如图8所示,图中 (α_i, β_i) 、 (x_i, y_i) 分别为物方视场角和目标像元位置。

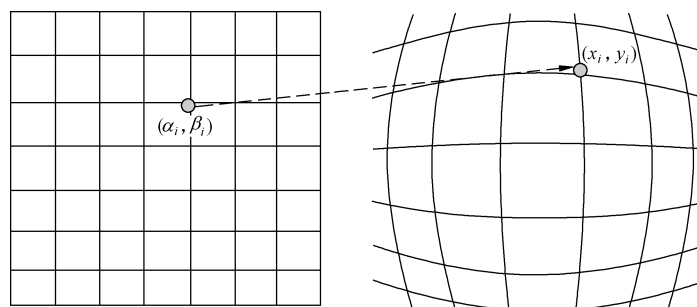


图8 几何定标方法示意图

具体定标程序如下:

- 平行光管标定焦面位置,在焦面安装星点目标;
- 成像仪器安装于运动平台上,调整器位置使其入光口与平行光管光束中心一致;
- 成像仪器在对星点目标成像,记录星点目标像元位置与运动平台二维指向角度信息;
- 运动平台调整指向,星点目标像等角度间隔成像于不同视场位置;
- 记录定标过程中每组星点目标像元位置 (x_i, y_i) 与物方视场角 (α_i, β_i) ;
- 由星点目标像元位置与角度建立表征两者关系的非线性方程组;
- 使用最小二乘法求解非线性方程组,得到系统的焦距、视场中心及畸变量。

7.2.3 数据处理

利用物方视场角 (α_i, β_i) 和星点目标像元位置 (x_i, y_i) 的数据,基于视场中心、焦距、物方视场角和星点目标像元位置的相互关系,建立一组方程组,见公式(5)。

$$\begin{cases} x_i = x_0 + f_x \cdot \tan \alpha_i \\ y_i = y_0 + f_y \cdot \tan \beta_i \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- x_0 ——视场中心水平方向像元位置;
- y_0 ——视场中心垂直方向像元位置;
- x_i ——第 i 个星点目标像水平方向像元位置;
- y_i ——第 i 个星点目标像垂直方向像元位置;
- α_i ——第 i 个星点目标像对应的水平方向物方视场角,单位为度($^\circ$);
- β_i ——第 i 个星点目标像对应的垂直方向物方视场角,单位为度($^\circ$);
- f_x ——水平方向焦距,以像元数表示;
- f_y ——垂直方向焦距,以像元数表示。

采用最小二乘法,求解得出焦距 f 在水平方向分量 f_x 和垂直方向分量 f_y 及视场中心的坐标 (x_0, y_0) ,见公式(6)和公式(7)。

$$\begin{cases} f_x = \frac{n \cdot \sum x_i \cdot \tan \alpha_i - \sum \tan \alpha_i \sum x_i}{n \cdot \sum (\tan \alpha_i)^2 - (\sum \tan \alpha_i)^2} \\ f_y = \frac{n \cdot \sum y_i \cdot \tan \beta_i - \sum \tan \beta_i \sum y_i}{n \cdot \sum (\tan \beta_i)^2 - (\sum \tan \beta_i)^2} \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum x_i - (\sum \tan \alpha_i) \cdot f_x}{n} \\ y_0 = \frac{\sum y_i - (\sum \tan \beta_i) \cdot f_y}{n} \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

n ——定标过程中星点目标成像位置的数量。

由 f_x, f_y 及视场中心的坐标 (x_0, y_0) ,可计算出焦距 f ,见公式(8)和公式(9)。

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \dots\dots\dots (8)$$

或者:

$$f = \sqrt{f_y^2 + x_0^2} \dots\dots\dots (9)$$

将焦距 f (以像元数表示)乘以像元尺寸(单位为毫米),即可得到以毫米为单位的焦距。

按公式(10)和公式(11)计算出不同视场角下的畸变量。

$$D_{xi} = x_i - (x_0 + f \cdot \tan \alpha_i) \dots\dots\dots (10)$$

$$D_{yi} = y_i - (y_0 + f \cdot \tan \beta_i) \dots\dots\dots (11)$$

式中:

D_{xi} ——在第 i 个星点目标位置存在的水平方向畸变量,以像元数表示;

D_{yi} ——在第 i 个星点目标位置存在的垂直方向畸变量,以像元数表示。

7.3 暗噪声定标

7.3.1 定标设备

暗噪声定标试验使用真空系统。真空系统窗口需遮挡、内部光源需关闭,确保内部处于从软 X 射

线到红外全谱段无光状态。

7.3.2 定标程序

暗噪声定标目的是标定像面探测器的固定噪声图像(Fixed-pattern Noise, FPN)、随机噪声图像和暗电流噪声图像。在真空条件下将探测器温度降低至工作温度,探测器拍摄多幅 0 s 曝光时间图像并求平均,得到 FPN 图像;统计所有图像中每个像元位置图像灰度的标准偏差,即可得到一幅表征各像元随机噪声图像;在标定随机噪声图像、FPN 图像的基础上标定暗电流噪声图像,得到工作温度下每个像元的暗电流。

具体定标程序如下:

- a) 探测器安装于真空系统中,并抽至内部气压满足要求;
- b) 探测器降温至工作温度;
- c) 将探测器曝光时间设置为 0 s,无光状态下拍摄超过 50 幅图像;
- d) 将采集的所有图像相加并求平均,即可得到 FPN 图像;
- e) 设定不少于 5 档不同时间间隔的曝光时间,在每个曝光时间下拍摄 50 幅以上无光图像;
- f) 计算每个曝光时间下的平均图像,将平均图像减去得到的 FPN 图像,得到暗电流噪声图像;
- g) 将暗电流噪声图像中每个像元的灰度转换为电子,并除以曝光时间,得到该曝光时间下每个像元的暗电流;
- h) 重复 f)、g),得到不同曝光时间下的暗电流噪声图像,在轨图像处理时按照对应的曝光时间选择对应的暗电流噪声标定数据进行处理。

7.3.3 数据处理

统计多幅 0 s 曝光无光图像中每个像元灰度标准偏差,得到随机噪声图像;计算多幅 0 s 曝光无光图像的平均值,得到 FPN 图像;将不同曝光时间下无光图像叠加求平均,再减去 FPN 图像,得到该曝光时间下的暗电流噪声图像;将不同曝光时间下暗电流噪声图像中像元灰度转换为电子并除以时间,得到探测器暗电流分布图像。

7.4 辐射定标

7.4.1 定标设备



辐射定标试验使用软 X 射线-极紫外光源、远场目标模拟装置、小孔目标、运动平台、真空系统。

7.4.2 定标程序

7.4.2.1 定标说明

由于软 X 射线-极紫外波段没有满足视场、入瞳均匀覆盖的扩展光源,该波段仪器不能一次性获取整机全视场的辐射响应系数,一般采用中心视场辐射亮度定标和全视场平场定标结合的方式获取全视场的辐射亮度响应系数。其中,中心视场的辐射亮度响应系数定标可采用部件级和整机级两种方式进行,全视场平场采用像面探测器平场定标和光机系统像面相对照度仿真结合的方式获取。

7.4.2.2 中心视场辐射亮度响应系数定标

7.4.2.2.1 部件级中心视场辐射亮度响应系数定标

成像仪器像元辐射响应系数为有效面积和像元立体角的乘积。有效面积在 6.4 中已经测量,而像元立体角可由像元张角直接计算得到。

具体定标程序如下：

- a) 计算成像系统的像元立体角；
- b) 读取 6.4 中测量的有效面积；
- c) 读取像面探测器的信号增益系数；
- d) 将有效面积、像元立体角和电子增益系数相乘，同时考虑将辐射亮度由光子数每平方厘米秒球面度 $[\text{photons}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr})]$ 转换为瑞利 $\{\text{Rayleigh} = \frac{10^6}{4\pi} [(\text{photons})/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr})]\}$ 表示，得到像元辐射亮度响应系数。

7.4.2.2.2 整机级中心视场辐射亮度响应系数定标

整机级中心视场辐射亮度响应系数定标方法如图 9 所示。在平行光管焦平面放置尺寸已知小孔目标和滤光片，采用软 X 射线或极紫外光源照明小孔目标，模拟无穷远成像目标；使用标准传递探测器标定出射光束的照度；由光管焦距、小孔目标尺寸和标定的工作波段照度，计算得到小孔目标的工作波段辐射亮度；待标定成像仪器对该目标成像，比对目标辐射亮度和目标输出图像灰度，得到仪器辐射亮度响应定标系数。

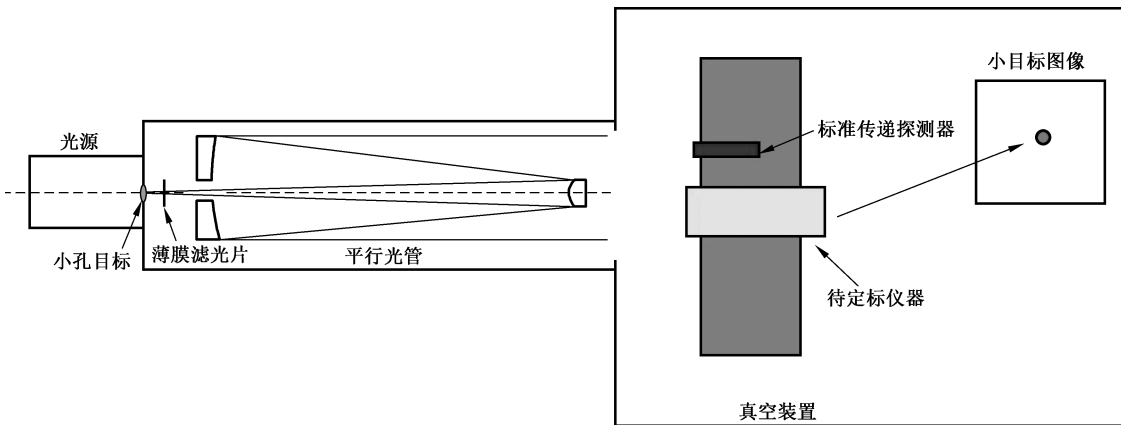


图 9 整机级中心区域辐射亮度定标方法示意图

具体定标程序如下：

- a) 定标仪器安装于真空系统内运动平台上；
- b) 真空系统抽真空至内部气压低于 $6.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ；
- c) 将待测仪器面阵探测器制冷至工作温度；
- d) 打开光源电源，调整工作电流至工作值；
- e) 调整运动平台，将传递标准探测器运动至平行光管出射光束 5 个不同位置，标定不同位置出射光束的照度，并计算光束平均照度；
- f) 综合小孔目标尺寸和并行光管焦距计算得到小孔目标辐射亮度；
- g) 调整成像仪器位置和指向角度，使其入光口与并行光管出射光束中心对齐，在视场中心拍摄小孔目标图像；
- h) 读取小孔目标灰度平均值，比对小孔目标辐射亮度，计算待测仪器的中心市场区域的辐射亮度响应系数。

7.4.2.3 探测器平场定标

探测器平场定标目的是标定探测器不同像元间的响应不均匀性。在软 X 射线-极紫外波段没有照

度均匀性满足要求的定标光源,探测器平场定标采用基于非均匀照明图像偏移(KLL)的方法(见参考文献[1])进行,该方法通过位置偏移的方式获取非均匀照明光束或物在像面上不同位置的一组图像,基于这些图像建立关于响应矩阵的数学求解模型,求解该模型得到响应矩阵,如图 10 所示。

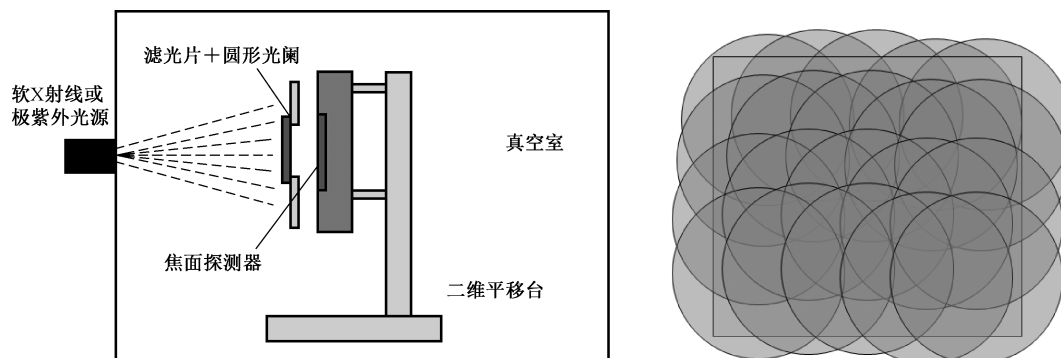


图 10 软 X 射线-极紫外探测器 KLL 工作波段平场定标示意图

具体定标程序如下:

- a) 按照图 10 中的示意安装光源、滤光片、光阑、探测器;
- b) 真空系统抽真空,直至内部气压低于 6.0×10^{-4} Pa;
- c) 探测器降温至工作温度;
- d) 驱动运动平台使探测器中心正对准圆形光阑中心;
- e) 探测器上电,对圆斑出射圆形光束成像;
- f) 驱动运动平台,使圆形光束照射在探测器不同区域,在不同区域拍摄多幅相互偏移交叠的圆形光束图像;
- g) 利用 KLL 算法求解探测器的平场定标图像,得到探测器工作波段的平场定标矩阵 A。

7.4.2.4 像面相对照度分布

通过光学仿真软件根据具体系统的光机结构设计计算得到像面的相对照度分布矩阵 B。

7.4.2.5 全视场辐射定标系数

由中心视场辐射亮度响应系数 RR 、探测器的平场定标矩阵 A、光学系统像面相对照度分布矩阵 B 计算得到全视场辐射亮度定标系数。

7.4.3 数据处理

7.4.3.1 中心视场辐射亮度响应系数定标

7.4.3.1.1 部件级中心视场辐射亮度响应系数定标

6.4 中计算系统的有效面积代入公式(12),计算中心视场的像元辐射响应系数。

$$RR = A_{\text{eff}} \cdot \omega \cdot G \cdot \frac{10^6}{4\pi} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

RR ——像元辐射亮度响应系数,以灰度值每瑞利秒[DN/(Rayleigh · s)]表示;

ω ——像元立体角,单位为球面度(sr);

A_{eff} ——有效面积,以平方厘米电子数每光子($\text{cm}^2 \cdot \text{e}/\text{photon}$)表示;

G —— 探测器信号增益系数,以灰度值每电子(DN/e)表示;

7.4.3.1.2 整机级中心视场辐射亮度响应系数定标

使用标准传递探测器标定光束照度 E ,见公式(13)。

$$E = \frac{V}{\Omega \times R_d \times p \times A_{\text{det}}} \dots\dots\dots(13)$$

式中:

E —— 光束照度,以光子数每平方厘米秒[photons/(cm² · s)]表示;

V —— 标准探测器输出信号,单位为伏特(V);

Ω —— 探测器反馈电阻,单位为欧姆(Ω);

R_d —— 标准传递探测器的响应度,单位为安培每瓦特(A/W);

p —— 工作波段每个光子的能量,以焦耳每光子表示(J/photon);

A_{det} —— 标准传递探测器面积,单位为平方厘米(cm²)。

由成像目标的大小 d 及平行光管焦距 f 可计算小孔目标辐射亮度 L ,如公式(14)所示。

$$L = \frac{E}{\left(\frac{d}{f}\right)^2} = \frac{E \cdot f^2}{d^2} \dots\dots\dots(14)$$

式中:

L —— 小孔目标辐射亮度,以光子数每平方厘米秒球面度[photons/(cm² · s · sr)]表示;

E —— 光束照度,以光子数每平方厘米秒[photons/(cm² · s)]表示;

d —— 小孔目标大小,单位为毫米(mm);

f —— 系统焦距,单位为毫米(mm)。

定标空间相机对小孔目标进行成像,采集目标图像,读取单位时间内小孔目标像灰度总值 S ,即可计算相机的图像中像元灰度 S 与小孔目标辐射亮度 L 的关系,如公式(15)所示。

$$RR = \frac{S}{L \cdot t} \cdot \frac{4\pi}{10^6} \dots\dots\dots(15)$$

式中:

RR —— 像元辐射响应系数,以灰度值每瑞利秒[DN/(Rayleigh · s)]表示;

S —— 小孔目标像灰度总值,以灰度值每秒(DN/s)表示;

L —— 小孔目标辐射亮度,以光子数每平方厘米秒球面度[photons/(cm² · s · sr)]表示;

t —— 曝光时间,单位为秒(s)。

7.4.3.2 探测器平场定标

由采集的已知的像元偏移间隔的图像间的灰度相关性,得到一组超定方程组,见公式(16)。

$$\sum_{i < j, x} [D_i(x - a_i) - D_j(x - a_j) - R(x - a_i) + R(x - a_j)]^2 = 0 \dots\dots\dots(16)$$

式中:

$D_i(x - a_i)$ —— 第 i 幅图像像元 $(x - a_i)$ 的灰度;

$D_j(x - a_j)$ —— 第 j 幅图像像元 $(x - a_j)$ 的灰度;

$R(x - a_i)$ —— 探测器像元 $(x - a_i)$ 的响应系数;

$R(x - a_j)$ —— 探测器像元 $(x - a_j)$ 的响应系数。

对公式(16)关于 $R(x)$ 微分,得到公式(17)。

$$\sum_{i < j} [R(x) - R(x - a_i + a_j) - D_i(x) + D_j(x - a_i + a_j)] + \sum_{i < j} [R(x) - R(x - a_j + a_i) + D_i(x - a_j + a_i) - D_j(x)] = 0 \dots\dots\dots(17)$$

公式(17)的最小二乘法迭代解为公式(18)。

$$R^{k+1}(x) = m(x) + \frac{1}{n(x)} \sum_{i < j} [R^k(x - a_i + a_j) - R^k(x - a_j + a_i)] \quad \cdots \cdots (18)$$

式中:

$R^{k+1}(x)$ —— 探测器像元 x 响应系数的第 $k+1$ 次迭代解;

$R^k(x)$ —— 探测器像元 x 响应系数的第 k 次迭代解;

$m(x)$ —— 像素 x 在不同偏移图像中响应差的平均值,计算见公式(19)。

$$m(x) = \frac{1}{n(x)} \sum_{i < j} [D_i(x) - D_j(x - a_i + a_j)] + [D_j(x) - D_i(x - a_j + a_i)] \quad \cdots \cdots (19)$$

式中:

$n(x)$ —— 求和符号内多项式数量。

7.4.3.3 像面相对照度分布定标

成像系统像面相对照度分布主要由光机系统的几何特性决定,通过光学仿真软件对成像仪器光机系统的进行仿真,计算得到像面的相对照度分布矩阵 B 。

7.4.3.4 整机全视场辐射定标

将中心视场辐射亮度响应系数 RR 、探测器平场定标系数矩阵 A 、全像面相对照度分布定标系数矩阵 B 相乘,即可得到全视场辐射亮度定标系数矩阵。



参 考 文 献

[1] Kuhn J.R., Lin H., Loranz D. Gain Calibrating nonuniform image-array data using only the image data. Publications Astronomical Soc Pac (1991) 103:1097-1108.
