

ASO-S 卫星 HXI 调制定标装置设计与验证*

陈灯意^{1,2} 张哲^{1,2,3} 江贤恺^{1,2,3} 胡一鸣^{1,2,3}

1(中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

2(中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210023)

3(中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 先进天基太阳天文台卫星 (ASO-S) 是中国首颗综合性太阳观测任务, 太阳硬 X 射线成像仪 (HXI) 是 ASO-S 卫星三大载荷之一, 主要负责太阳耀斑观测。HXI 采用阵列空间调制间接成像方法, 包含 91 个子准直器单元。发射前, 在地面对 HXI 进行调制参数定标非常必要, 但由于没有平行的 X 射线源而十分困难。本文根据 HXI 的基本原理与设计方案, 提出了基于地面调制功能定标的设备与 HXI 调制定标的需求。根据所述需求, 介绍了研制的 X 射线束流调制定标装置; 利用该装置对 HXI 飞行件上所有子准直器完成地面调制功能定标。标定试验结果与预期相符, 充分证明了准直器与 X 射线束流定标装置性能优良, 该装置还可用于后续类似载荷的定标。

关键词 HXI 载荷, 准直器, 调制, 束流定标, 装置

中图分类号 P172.2X

Development of an X-ray Modulation Characterization System for HXI Payload Onboard ASO-S Mission

CHEN Dengyi^{1,2} ZHANG Zhe^{1,2,3} JIANG Xiankai^{1,2,3} HU Yiming^{1,2,3}

1(Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

2(Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

3(School of Astronomy and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract The Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S) was sent to space on 9 October 2022. As the first comprehensive satellite for solar concentrated observations of China, the ASO-S carries three payloads: the Hard X-ray Imager (HXI), the Full-disk solar vector MagnetoGraph (FMG) and the Lyman-alpha Solar Telescope (LST), respectively. The ASO-S dedicates to measuring the solar mag-

* 中国科学院科研仪器设备研制项目 (YJKYYQ20200077), 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA15320104) 和中国科学院青促会项目 (2021317, Y2021087) 共同资助

2022-04-29 收到原稿, 2022-11-25 收到修定稿

E-mail: dychen@pmo.ac.cn. 通信作者 胡一鸣, E-mail: huyiming@pmo.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

netic field, and observing CMEs and solar flares. As a key instrument onboard, HXI aims at imaging solar flares in hard X-rays from 30 to 200 keV with angular resolution up to $3.2''$, field of view of $40.3'$, energy resolution better than 24% at 32 keV and time cadence up to 0.125 s. Spatial modulation technique similar to YOHKOH/HXT of Japan is adopted as equipping 91 Fourier units, or tungsten grid pairs in the front and rear plates of collimator of HXI at 1190 mm distance. It is of great value to characterize modulating parameters by beam calibration before launch due to X-ray modulation relation of grid pairs are the basis of modulation imaging. For a long time, the lack of appropriate laboratory conditions has made it difficult to perform such kind of calibration test in the development of similar instrument abroad. However, we developed a practical and efficient set of X-ray Modulation Characterization System (XMCS) for the test of HXI. Firstly, the basic principle and design of HXI is introduced briefly. Secondly, ground calibration facility as well as modulation calibration requirements of HXI are presented. Detailed design and integration of XMCS were described subsequently. The modulation characterization test of the flight model of HXI has been successfully carried out to directly calibrate the modulation relation on the XMCS. Only part of the excellent calibration results are discussed here to verify the performance of XMCS, which shows great value and potential for the upcoming similar X-ray payloads calibration on ground.

Key words HXI instrument, Collimator, Modulation, X-ray beam characterization, Facility

0 引言

中国科学院空间科学先导专项自启动以来,已成功发射“悟空”、“墨子”与“慧眼”等多颗性能优异的科学卫星,取得了一系列重大创新成果^[1]。卫星在轨运行后,需要根据科学目标要求,利用搭载的科学仪器开展相应的科学观测活动。在科学载荷研制和后续在轨观测过程中,如何深入了解设备观测的特性和能力,对于实现科学目标最大化具有重要意义。

对于空间高能探测器而言,实际获得的测量信号是探测器接收到的空间辐射和探测器响应函数的卷积,定义 $F=R*f$, 其中 F 为探测器对天体辐射量 f 的测量结果, R 为探测器响应函数。为获得准确的 f , 必须提前得到精确的探测器响应函数 R 。通过对探测器各项参数进行有计划的定标测试,可以确定并完善探测器响应函数 R , 确保从观测数据到目标信号反演的可靠性,这也是开展定标测试活动的原因之一。

先进天基太阳天文台(ASO-S)是中国首颗综合太阳科学观测卫星,计划于2022年10月发射,旨在太阳第25活动峰年探究对太阳磁场、太阳耀斑与日冕物质抛射三者之间的因果关系。为此,ASO-S携带三台载荷,即全日面矢量磁像仪(FMG)、莱曼阿尔

法太阳望远镜(LST)以及太阳硬X射线成像仪(HXI)^[2-4]。

作为三大核心载荷之一, HXI 主要用于对太阳耀斑爆发活动中高能粒子加速产生的非热辐射进行成像和能谱观测。HXI 包含准直器、量能器与电控箱三部分, 分别完成 X 射线空间调制、探测接收和仪器供电与控制等功能^[5,6]。为获得准确的探测器响应, HXI 在发射前需完成的地面定标包含探测单元能量响应^[6,7]、探测效率^[7]以及探测器调制功能定标。作为中国第一台太阳硬 X 射线成像望远镜, HXI 在研制过程中攻克了多项技术难点, 为了更好地掌握 HXI 调制成像的性能, 同时降低技术风险, 研制了一套地面调制功能定标装置。

本文根据 HXI 基本工作原理与方案设计, 论述了地面调制功能定标原理, 结合项目初样阶段研制的样机总结了地面标定对设备的具体需求; 根据需求对调制成像定标装置开展了详细设计。利用研制完成的地面成像定标装置完成 HXI 飞行件调制成像定标测试, 测试结果显示, 研制的定标系统性能优良, 准直器调制功能测试结果完全达到预期。该设备未来可以用作其他类似载荷的定标测试。

1 HXI 载荷原理与设计

1.1 基本原理与设计

太阳硬 X 射线由于能量较高,通常采用准直成像技术。HXI 载荷采用准直器间接成像的方法(傅里叶变换合成成像技术),其基本原理如图 1 所示^[8,9]。傅里叶变换合成成像通常可以分为阵列空间调制和旋转时间调制。阵列空间调制整个调制系统在空间位置上相对不动,通过阵列足够多且摆放角度及节距均不同的子准直器,获得足够多的傅里叶分量,重建除耀斑源图,实现成像探测过程,例如日本 YOHKOH 卫星的 HXT 载荷^[10]、欧空局 Solar Orbiter 卫星的 STIX 载荷^[11],这里的载荷 HXI 也属于该类型。旋转时间调制方法中,整个调制系统阵列的子准直器不区分摆放角度,只有节距不同,因此需要通过绕一定轴旋转准直系统获得具有不同角度的傅里叶分量,例如美国的 RHESSI 卫星^[8]。上述载荷均以太阳耀斑观测为主要目标,其主要科学性性能指标对比列于表 1^[12]。

HXI 载荷由相互远离的双光栅准直器组成,后端配置探测器,通过对入射光子进行调制,记录 X 射线经双准直器后随时间或空间的变化,测量源分布的特定傅里叶成分即可得到源图。HXI 载荷组成如图 2 所示。

准直器上配置 91 对包括 10 种节距并摆放数十种角度的光栅子准直器,对入射 X 射线光子流进行空间调制,根据光子流方向的不同得到相应的傅里叶成分振幅;量能器位于准直器后端,配置的探测单元由溴化镧晶体耦合光电倍增管组成,与前端子准直器一一对应,用于记录调制后的 X 射线光子信息^[10]。HXI 调制成像原理如图 3 所示。

1.2 X 射线地面定标设备

对于 X 射线探测器地面定标,通常有三类设备可使用,即放射源、同步辐射 X 射线源与 X 射线系统。三类设备各自特点列于表 2,具体分析如下。

(1)放射源。放射源标定是高能粒子探测器研制标定过程中的常用手段,其通过释放衰变的粒子或特定能量的光子,模拟探测器在空间环境测量的对象,通过比较其所释放粒子的信息与探测器测量获得的响应信号,可以确定代表探测器的实际性能参数。放射源标定的主要优点在于,其释放出的粒子种类确定,粒子能量已知,方便对研制的探测器进行绝对定标。该优点同时也是放射源标定的劣势,即射线的流量与能量均无法调节,也无法通过准直获得平行 X 射线,因而无法用于地面调制功能定标。

(2)同步辐射 X 射线源。可以根据需要获得不同能量及流强的人射粒子,可以较为方便地测量探测器



图 1 时间调制傅里叶与空间调制傅里叶的成像原理

Fig. 1 Basic principle of rotational modulation (a) and spatial modulation (b)

表 1 主要同类载荷性能对比

Table 1 Comparison on main characteristics of similar X-ray detectors

	HXT/YOHKOH	RHESSI	STIX/Solar Orbiter	HXI/ASO-S
发射时间	1991	2002	2020	2022.10
子准直器数量	64	9	32	91
光栅节距/ μm	Finest 105	34~2750	38~1000	36~1224
成像方式	SMC	RMC	SMC	SMC
空间角分辨	7.7"	2.3"	7"	3.2"
探测器	NaI (Tl)	Ge	CdTe	LaBr ₃
能量范围/keV	20~100	3~17000	4~150	30~200
时间分辨(最快)/s	0.5	2	0.1	0.125

的探测效率、能量响应等特性。中国的同步辐射 X 射线源主要有北京光源、上海光源和合肥光源三处。然而,同步辐射光源属于大科学装置,依赖于同步加速器的运行,其可供标定的时间非常有限,且需要提前足够长的时间预约。空间科学载荷研制进度受制于部件级测试、总装集成、空间环境模拟测试等多个方面,时间上无法精确预估;另外,空间科学载荷标定较为复杂,标定设备较多,一般需要长时间定标,通常在 1~2 个月,GECAM 卫星的载荷标定持续时间长达半年以上,这也是同步辐射光源无法满足的。

(3)X 射线系统。X 射线系统是基于 X 光机开发的束流标定装置。X 射线系统主要包括三部分,即 X 光机、束流管道和调整平台。其中 X 光机利用电子束轰击阳极靶材,产生连续的韧致辐射能谱叠加特

征 X 射线,经过单色化和平行化,获得满足标定需求的 X 射线束流;束流管道主要是对 X 光机中产生的 X 射线进行初步准直,形成平行 X 射线束流;调整平台主要用于待标定探测器的固定支撑和指向调节,通过该平台的精密指向调整,实现待标定探测器与 X 射线束流之间的精确位置关系。

1.3 HXI 调制定标需求

由于来自太阳的 X 射线会被大气吸收,不能到达地面,而在地面很难在 X 射线波段模拟太阳光的空间分布,因此直接对日试观测定标是不可行的。根据 HXI 载荷调制成像的基本原理,每一个傅里叶成分即每一个子准直器对应的调制关系都相互独立,在地面上如果具有平行的稳定 X 射线光子入射,通过测试各子准直器对来自不同方向光子的调制响应关系,同样能够证明探测器调制特性和成像功能。然而建立满足平行度要求的束流装置和测试系统非常困难;在此

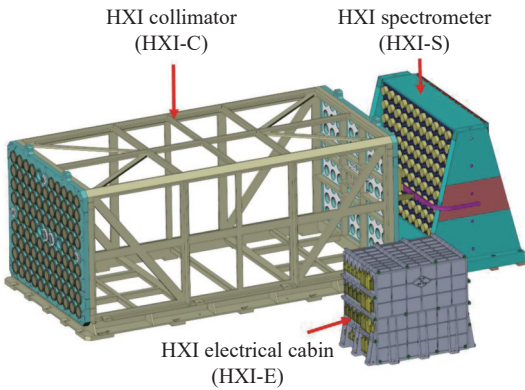


图 2 HXI 载荷组成
Fig. 2 Scheme of HXI

表 2 地面定标设备对比
Table 2 Comparison of different ground calibration facilities

设备	放射源	同步辐射X射线源	X射线系统
能量	单能	可调	可调
流强	固定,无法调整	根据需要调整	根据需要可调
平行度	无法保证	通过长管道保证准直	通过长管道配合光阑准直
稳定性	稳定	稳定	稳定
应用方便性	随时可用	需要提前申请应用时间受限	定制,随时可用

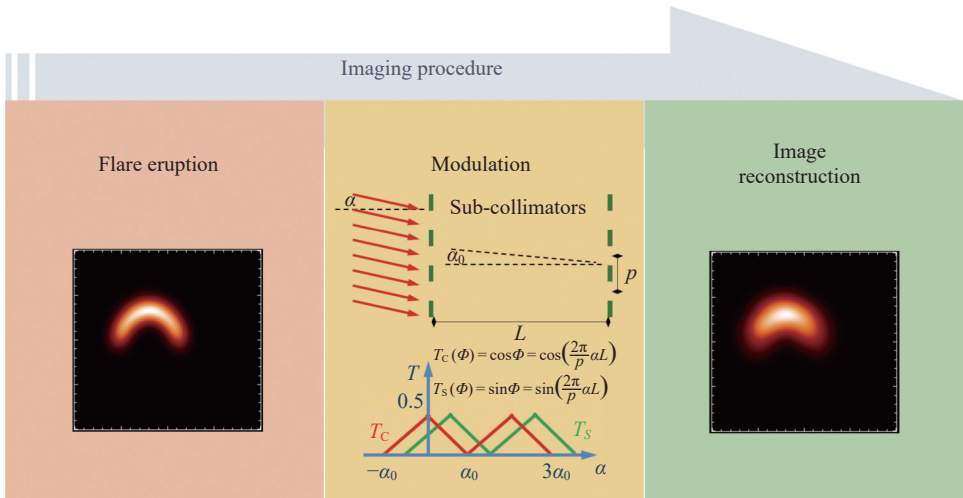


图 3 HXI 调制成像基本原理
Fig. 3 Basic imaging theory for HXI

之前,国外同类载荷,例如 YOHKOH/HXT, RHESI 及 Solar Orbiter/STIX 均未开展过全尺寸束流调制定标试验。

HXI 地面定标依赖于双光栅准直器对入射光透过率的方向周期调制关系或者说调制模式,如图 4 所示^[13]。调制模式与光栅本身加工的特征,如节距(周期)、缝宽等直接相关。保持 X 射线束流的入射方向不变,通过旋转准直器的角度,即可获得准直器随角度变化的调制关系。如果准确获得了每一对子准直器调制关系曲线,在轨后基于调制关系对获得的科学数据即可进行相应的图像重建,进而获得图像,这就是地面定标的基本原理。

调制关系的周期 T 正比于准直器所用光栅的节距尺寸 p , $T=p/L/\sin\theta$, L 为前后光栅间距, θ 为光栅摆放角。因此,利用准直后的 X 射线束流,模拟实际的观测光,开展 X 射线束流测试,可以获取探测器对不同角度入射光子的响应函数,通过测量其周期验证光栅调制模式和 X 射线响应条件下的光栅节距参数。正样阶段配置的光栅节距参数详见文献^[14],其

中最小节距为 $36\text{ }\mu\text{m}$ (对应的摆放角包含 25° , 70° , 115° , 160°),而前后光栅间距为定值 1190 mm ,因此最小调制周期为 0.0018° 。结合 HXI 载荷初样定标的实际情况,并通过模拟分析^[14],对 HXI 飞行件开展地面 X 射线调制定标对设备的主要需求见表 3 和表 4,具体分析如下。

(1)流强稳定性由管道末端出射粒子计数表征。

(2)对于束流试验,其可行性主要由调制曲线的调制深度等决定,其与束流的流强、平行度依赖复杂的函数关系,详见文献^[15]。试验中根据理论计算和工程实际约束进行优化调整,不同节距的光栅都不相同, $36\text{ }\mu\text{m}$ 节距光栅空间角分辨最高,调制曲线最精密,标定测试难度最大;根据文献^[15],光阑直径需小于 5 mm ,且所选择的调制因子应处于极值上,确保具有一定的调制深度;另外,光阑直径选择还应满足不小于 100 倍节距即 $D\geq 100\text{ }p$,保证在测试过程中至少覆盖 100 条光栅缝,具备一定的效率。试验中定义平行度为 D/L ,这里 D 为光阑直径, L 为束流管道长度,减小光阑直径 D ,增加管道长度 L ,自 X 光机出射的

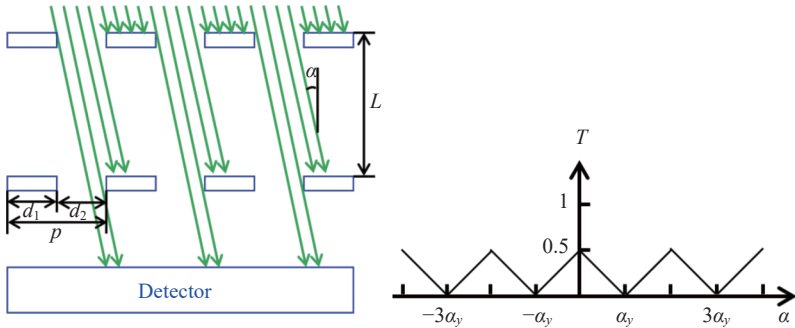


图 4 HXI 地面定标基本原理

Fig. 4 Basic principle of ground calibration HXI

表 3 HXI 地面调制功能定标装置之 X 光机与束流管道需求

Table 3 Modulation characterization requirements of X-ray generator and beam tube for HXI

X光机				X束流管道	
管电流	高压范围	流强稳定性/计数	光斑直径	光阑直径	激光瞄准精度
$\geq 10\text{ mA}$	$\geq 100\text{ kV}$	5 h内优于5‰	$\leq 0.5\text{ mm}$, 越小越好	$100\text{ }p \leq D \leq 5$	位置精度优于10 mm

表 4 HXI 地面调制功能定标装置之精密指向调整平台需求

Table 4 Modulation characterization requirements of high-accuracy adjusting platform for HXI

位移测量精度	竖直行程	平移行程	角分辨率	最低台面高度	承重	平台稳定性
优于0.05 mm	$\geq 500\text{ mm}$	$\geq 600\text{ mm}$	优于0.05"	不大于500 mm	$\geq 1000\text{ kg}$	位置变化 $\leq 0.2\text{ mm}/12\text{ h}$

光能够较好准直进而提高束流平行度,降低试验难度,更有利于光栅调制定标。实际试验过程中,选择 3.6 mm 直径供 36 节距光栅测试使用,根据束流场地限制实际使用了 26 m 长度的束流管道。

(3) X 束流管道对准精度是利用激光在管道前端瞄准,在管道后端中心位置能够得到入射光子即可。

(4) 调整平台的研制,需要考虑较高的通用性,体现为承重、位移行程等,实际设计值均高于指标需求。

(5) 地面调制功能定标最主要的指标需求是系统稳定性, X 光机流强稳定,即管电流不变,这样能够实现小节距光栅 2 个调制周期(一个调制周期测试,若管电流设置为 10 mA 则需要约 4 h)的测试过程中保持束流强度不变;需要平台稳定,即平台在设定的位置不变,且位置重复精度优于 0.2 mm,保证测量光栅的区域一致。

2 调制功能定标装置的设计

通过中国科学院科研仪器设备研制项目的支持,结合空间高能粒子探测器研制的特点,针对性地研制出调制功能定标装置。相对于已有的 X 射线系统,新研制的定标装置在束流强度、束流稳定性、测试兼容性以及指向精度等方面,既可以快速顺利地完 HXI 调制功能定标,又能较广泛地满足空间高能粒子探测器的地面定标需求。新研制的调制功能定标装置由 X 射线光机、束流管道及精密指向调整平台三

部分组成,如图 5 所示。

2.1 X 射线光机

X 射线光机主要由 X 光管、电源以及控制电路等组成,用于提供 X 射线源。其中, X 光管包含阴极灯丝、阳极靶材与真空管。电源分为高压电源和灯丝电源两部分。灯丝电源用于加热发射电子,高压电源则分别固定在阴极灯丝与阳极靶材两端,提供强大的高压电场,使得灯丝上活跃的电子向阳极靶运动,从而形成电子束,轰击靶材表面,经韧致辐射获得 X 射线。

X 光机属于较为成熟的设备,通过调研,最终选择直接采购 YXLON 公司的 MGI 225 型号 X 光机。该光机采用水冷模式,具有流强稳定、管电流和管电压可以大范围连续调节等特点^[14]。MGI 225 型号 X 射线光机的主要指标列于表 5。

X 光机包含高压发生器、水冷装置、屏蔽铅房与内部调整装置, X 光机的设计主要考虑外围屏蔽铅房及内部升降调整装置,也包括与管道之间的法兰连接。考虑到操作空间有限,内部升降调整装置设计为手动机构;自研过渡管道 1 件(32 mm 内径, 5 mm 壁厚, 592 mm 长度),一端与 X 光机相连,一端与 X 束流管道上的波纹管相连;屏蔽铅房设置报警器和辐射剂量监测装置,用于对光机的辐射防护。X 光机实物如图 6 所示。

2.2 X 射线束流管道

束流管道用于对 X 射线光机出射的 X 射线进行

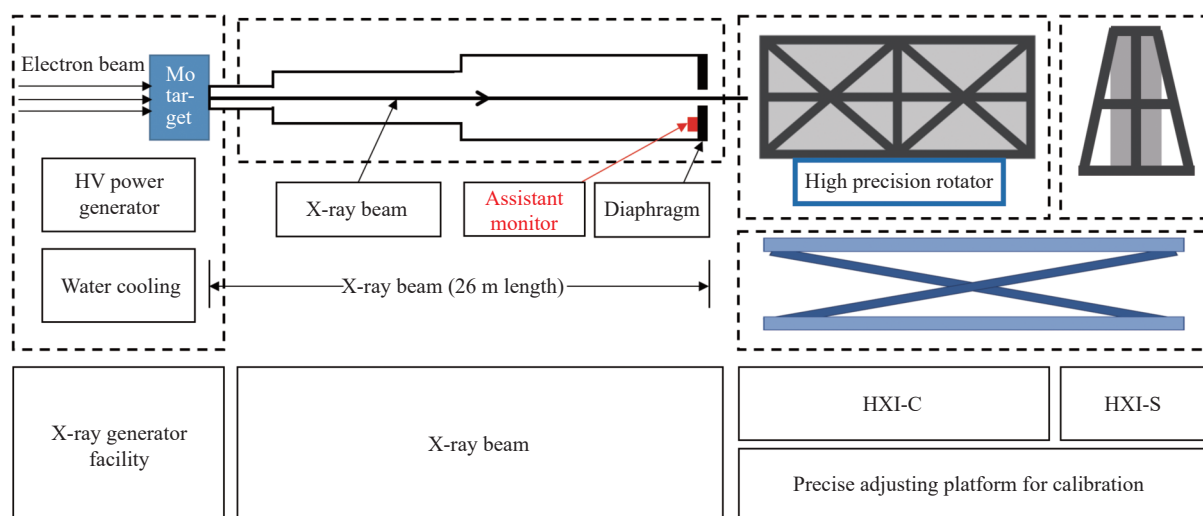


图 5 调制功能定标装置

Fig. 5 Diagram of X-ray modulation characterization facility

初步准直,获得尽量平行的 X 射线束流。在一定范围内, X 束流管道的长度越长,口径越细,在管道末端获得的 X 射线束流的平行度越好。在实际应用中,束流管道的长度往往受限于试验场地大小,需要通过减小管道口径进一步对 X 射线束流进行约束。与此同时,管道口径受到管道直线度及管道末端测试工位的限制,不能无限制地缩小。这里设计的 X 束流管道如图 7 所示。

设计的 HXI 束流管道包含 10 m 粗管道与 15 m 细管道两部分,总长 25.20 m。粗管道外径 325 mm,管道壁厚 6 mm;细管道外径 108 mm,管道壁厚 6 mm。管道长度主要受限于试验场地的大小;管道壁厚主要考虑 100 kV 高压条件下 X 射线泄漏的水平;管道粗细主要考虑在 25 m 长度下管道调节对准的难易程度。尤其说明的是,束流管道的两端均使用标准刀口法兰,法兰上安装无氧铜垫圈,作为与真空

管连接的预留设计。管道端面设计两个通孔,一个用于监测束流流量,衡量束流稳定性,另一个用作束流出口。

为了使得 X 光管的出射束流能够顺利通过束流管道,需要对管道的安装准直进行调节。调节过程包括以下两步。

步骤 1 利用激光标线仪测量,调节管道支撑脚,将整个管道粗调水平。

步骤 2 通过一个简单的激光测量系统进行测量反馈,调节安装 X 光管的波纹管方向:假定 X 光管的出光主方向垂直于光管安装面,在安装光管前,在安装位置架设一个带 5 维位置调节的激光器,在安装面上粘贴反射镜,同时在管道出口观测光斑位置,反复迭代,调节激光器和波纹管,保证激光与安装面垂直的同时,使出射光线到达管道出口中心位置,完成调节。

完成精密装校后, X 射线束流管道总长达到

表 5 X 射线光机主要性能指标
Table 5 Major characteristic of X-ray generator (MGI 225)

特性	高压范围/kV	高压调整步距/kV	管电流范围/mA	管电流调整步距/mA	焦斑直径/mm	靶材	功率/kW
参数	10~225	0.1	0~15	0.01	0.4/1.0可选	钨	2.25

注 稳定性测试结果为 8 h 内优于 2‰。该数据为利用自研的溴化铜探测单元,在 26 m 距离处监测出射粒子计数所得。

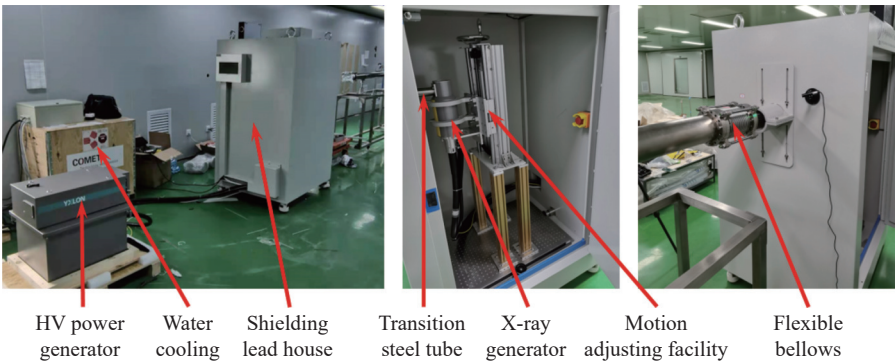


图 6 X 光机实物

Fig. 6 Photos of the X-ray generator system

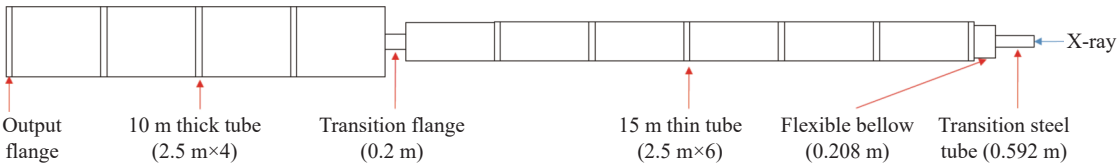


图 7 X 射线束流管道

Fig. 7 Structure diagram of X-ray beam tube

26.0 m(包含 0.592 m 长度过渡转接管道与 0.208 m 长度波纹管);配备了多种直径的光阑,最小光阑直径 3.6 mm;激光瞄准测量管道位置精度约 5 mm。

2.3 精密指向调整平台

精密指向调整平台作为探测器的支撑装置,需要考虑位移行程范围、承重、稳定性以及便携移动等。为了使得平台具有较高的通用性,重点考虑了暗物质卫星 BGO 量能器(单机质量达到 1045 kg),HXI 载荷(安装尺寸达到 1 m 以上,位移精度要求达到 0.05 mm 以上,角分辨率达到 5"),同时还参考了嫦娥工程以及 HXMT 等众多 X 射线探测器的需求。

精密指向调整平台采取模块化设计方案,包含升降机构、水平机构、旋转机构、竖直调整机构以及测量系统五部分。精密指向调整平台的设计方案如图 8 所示,具体如下。

(1)该平台可以完全坐落于地面,有助于尽可能降低台面高度,能够更广泛地应用于具有较低束流中心的工况。

(2)该平台的竖直位移由竖直调整机构(即四角升降电机)与升降机构(即剪式升降机构)共同组成。该设计思路既能够实现大范围升降,又能兼容不同中心高度的束流管道,具有较大的调节范围;另外,竖直调整机构的四角升降电机还能够相互独立工作,适应不同实验室地面条件,方便调整平台的水平度。

(3)为了提高起升承载能力,在升降平台位移最低处配置 4 个弹簧,能够有效降低对电机的驱动力矩,进一步提升初始状态起升质量。

(4)配备高精度测量系统(具备测量与反馈的光栅尺装置),即使在大行程条件下,其精度依然可以达到 0.05 mm 以内。

(5)平台的稳定性是重点考虑之处:一方面加强结构设计,平台均采用钢管结构,其表面为 10 mm 不锈钢板,保证平台具有较高的刚度与强度;另一方面,通过伺服电机与丝杆设计,且经过大减速比的设计,尽管降低了平台的位移速度,但是能够有效提升平台

稳定性。

(6)旋转台的集成。考虑到不同项目对旋转精度需求不同,高精度旋转需求配备实验室原有转台,同时为较低精度需求(例如 30"以上)配备新的转台。

设计完成后,对本平台进行验收测试,结果显示:平台升降系统最大位移可达 550 mm,竖直位移机构最大可升降 270 mm,竖行程最大可达 820 mm。详细的技术指标与测试结果列于表 6,其中角分辨率测试结果为实验室原有高精度转台(AEROTECH ALAR-250-SP-3);新配置大承重转台(北京江云 Y100 RA350),分辨率最高达到 2.7",二者可以任意选择使用,也可以同时集成于平台表面。地面调制功能定标系统建造实物如图 9 所示。

3 束流试验验证

ASO-S 卫星 HXI 载荷研制过程中尝试开展了多次地面调制功能定标测试,例如 2020 年 7 月利用航天 513 所 X 束流装置对 HXI 鉴定件进行测试,2021 年 3 月利用中国科学院紫金山天文台自研的 X 射线系统对鉴定件进行补充测试,以及 2021 年 9—10 月对 HXI 飞行件进行测试。HXI 飞行件的测试是国际首次同类载荷全系统端到端地面调制功能

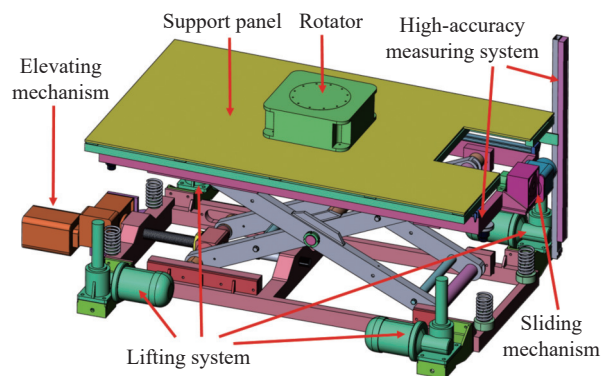


图 8 精密指向调整平台设计

Fig. 8 Layout of the high-accuracy adjusting platform

表 6 精密指向调整平台主要技术指标测试结果

Table 6 Major results of the high-accuracy adjusting platform

指标	位移测量精度/mm	竖行程/mm	平移行程/mm	角分辨率/(")	最低台面高度/mm	承重/kg	稳定性
设计值	优于 0.05	≥500	≥600	优于 0.05	不大于 500	≥1000	位置变化 ≤0.2 mm/8 h
实测结果	优于 0.02	≥820	≥720	优于 0.05	最低可至 460	≥1500	优于 0.1 mm/12 h

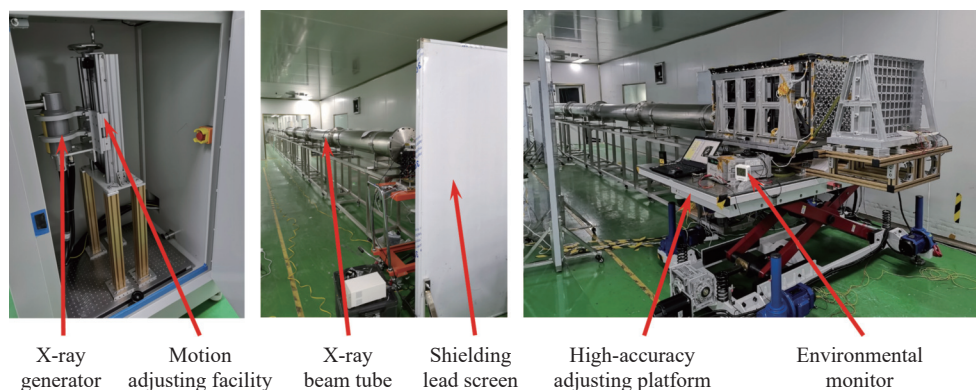


图9 HXI 准直器标定用 X 射线束流系统

Fig. 9 X-ray beam characterization system for HXI collimator

试验,此次测试包含全部 91 对子准直器,相对而言,此次测试具有周期长(前后历经近 50 天)、难度大($100\ \mu\text{m}$ 以下节距光栅的调制周期较小因而测量难度大)等特点。HXI 正样阶段束流测试装置如图 10 所示。

测试获得了所有子准直器光栅的调制曲线,试验过程和结果与预期相符^[14]。图 11 显示了利用不同装置获得的 $36\ \mu\text{m}$ 和 $76\ \mu\text{m}$ 节距光栅的调制曲线。结果显示, HXI 飞行件测试获得的结果最好,调制功能定标的试验数据统计性好,调制曲线拟合精度高。测试结果确认了 HXI 符合设计指标要求,也确认了调制功能定标装置的良好状态。

测试期间,通过辅助监测探测器(溴化镭探测单元)的计数,可以验证束流的稳定性。其统计结果如图 12 所示。可以看到,在连续监测超过 8.5 h 条件下(对于 $36\ \mu\text{m}$ 节距光栅测量 51 个点,每个点测量 5 min,图中显示连续 2 个 $36\ \mu\text{m}$ 节距光栅的测量结果),探测器计数变化为 1.69%,满足系统要求的 5 h 内稳定性优于 5% 的指标。

另外,试验过程中还选取同一位置的光栅在间隔较长时间后进行重复测量。例如 $108\ \mu\text{m}$ 节距光栅测试结果如图 13 所示,在时间间隔 1 个月且该过程中束流试验未停歇的前提下,设定相同的测试条件,获得的两组调制曲线趋势相符,拟合获得的节距等参数在误差范围内。

基于模拟仿真分析结果, HXI 地面调制功能定标测试前对各节距光栅的调制因子进行测量。以 $224\ \mu\text{m}$ 节距光栅为例,通过不断改变光阑大小,得到其调制因子测试结果,如图 14 所示,试验结果与理论分析

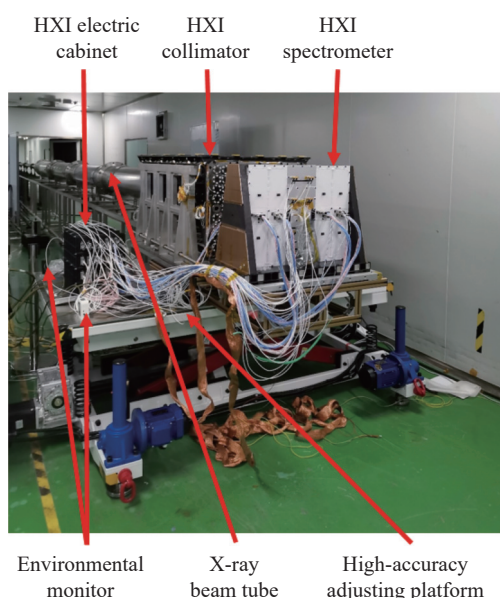


图 10 2021 年 9 月利用正样飞行件及新研 X 射线系统开展测试

Fig. 10 Beam test with a total new X-ray system for the flight model of HXI in September 2021

相符,仅在两个次高峰附近实测值低于理论值。经分析是由于实际使用的光源非绝对平行并且不是均匀分布而导致的。该测试结果说明束流试验系统参数准确,工作正常,获得的试验数据可靠。

以上所有测试结果均表明: HXI 飞行件测试过程中 X 光机焦斑直径小(试验过程中全部选用 $0.4\ \text{mm}$ 焦斑直径), X 射线束流稳定(溴化镭探测单元监测结果表明每次束流稳定性在 8 h 内变化率小于 2%),并且流强可调范围大(根据模拟的情况,选用了 $1.0\sim 13.5\ \text{mA}$ 的管电流),精密指向平台位移精度高且稳定性好。因此, HXI 飞行件顺利完成地面调制功能定

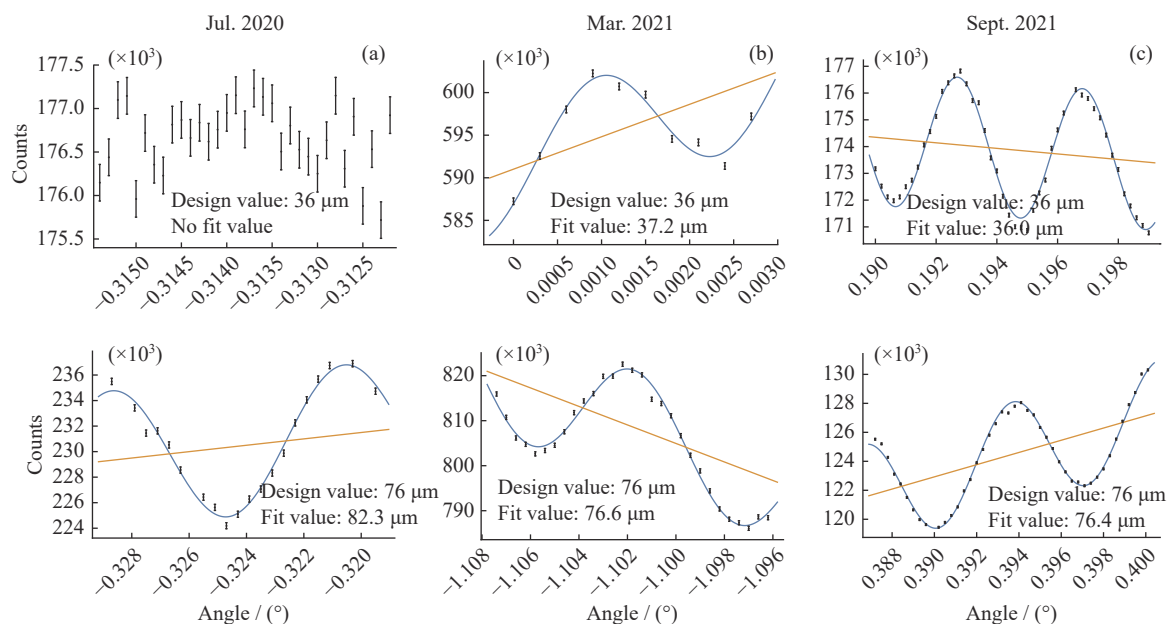


图 11 三次典型的束流测试结果对比。(a) 利用 513 所 X 射线系统对 HXI 鉴定件的测试结果；(b) 利用新采购的 X 光机对 HXI 鉴定件的重新测试结果；(c) 利用本调制功能定标装置对 HXI 飞行件的测试结果

Fig. 11 Comparison of three typical beam tests. Panel (a) shows results of HXI EQM with X-ray system of No. 513 Institute; panel (b) shows re-test results of HXI EQM with a new X-ray generator; panel (c) shows results of HXI FM with our new facility

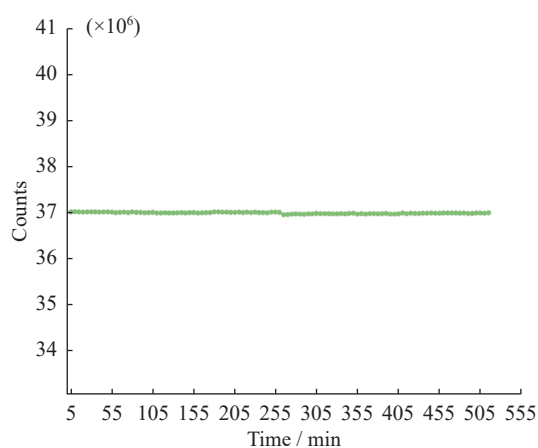


图 12 束流 (计数) 稳定性记录 (515 min 的结果, 每 5 min 记录一次辅助监测探测器的计数)

Fig. 12 X-ray beam (counts) stability record (This chart presents 515 minutes of X-ray beam.

The assistant monitor detector records counts of incident X-rays every 5 minutes)

标, 获得了预期的调制曲线, 并得到相应的调制参数, 验证了 HXI 在轨调制成像的能力, 也为在轨后太阳耀斑图像重建提供了基础。

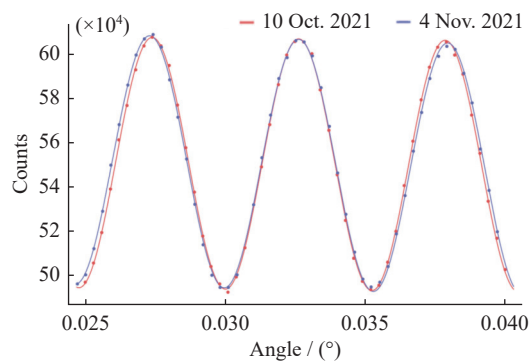
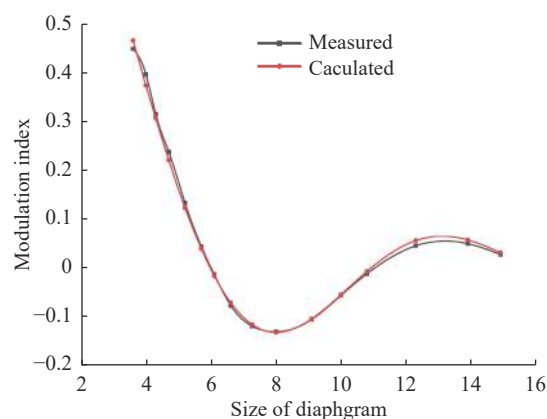


图 13 对 108 μm 节距光栅间隔一个月时间的重复测量结果 (红线拟合节距为 108.3 μm , 蓝线拟合节距为 110.1 μm)

Fig. 13 Repeated characterization for the same grid with pitch 108 μm after a month (Fitted value of the red line is 108.3 μm , and the blue line is 110.1 μm)

4 结论

HXI 调制功能定标装置的研制为 HXI 飞行件束流试验顺利开展提供了保证, 其各项性能指标稳定可靠, 束流试验按计划开展, 结果与预期一致, 证明了 HXI 成像观测性能完全满足在轨运行需求, 同时通过

图 14 224 μm 节距光栅调制因子曲线Fig. 14 Modulation index curve for the grid with pitch 224 μm

试验确定的调制参数也为 HXI 载荷在轨定标和观测数据图像重建等提供了有力支持。

随着越来越多的科学探测卫星和载荷研制蓬勃开展,随之对于地面定标测试提出了更多需求,这同样包括 X 射线探测成像特性的定标。HXI 成像定标装置良好的性能和状态可以继续服务更多的 X 射线探测项目定标工作,在不断提升已有各项性能的同时,将进一步扩展能量与时间等特性的定标能力。

参考文献

- [1] WANG Chi. To realize high-level scientific and technological self-reliance by constructing “Dream Team” of space science[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, **36**(S2): 36-43 (王赤. 打造空间科学“梦之队”努力实现高水平科技自立自强[J]. 中国科学院院刊, 2021, **36**(S2): 36-43)
- [2] GAN W Q, ZHU C, DENG Y Y, *et al.* Advanced space-based solar observatory (ASO-S): an overview[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, **19**(11): 156
- [3] GAN W Q, FENG L, SU Y. A Chinese solar observatory in space[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**: 165
- [4] GAN W Q. Status of the advanced space-based solar observatory[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(5): 704-706
- [5] ZHANG Z, CHEN D Y, WU J, *et al.* Hard X-ray Imager (HXI) onboard the ASO-S mission[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, **19**(11): 160
- [6] CHEN D Y, HU Y M, ZHANG Z, *et al.* Environmental tests of the HXI spectrometer for the ASO-S mission[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, **15**(10): T10008
- [7] LIU W, ZHANG Z, WU J, *et al.* Pre-launch characterization of the spectrometer of Hard X-ray Imager (HXI) onboard the ASO-S mission[J]. *Journal of Instrumentation*, 2022, **17**(5): P05045
- [8] LIN R P, DENNIS B R, HURFORD G J, *et al.* The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)[J]. *Solar Physics*, 2002, **210**(1/2): 3-32
- [9] KOSUGI T, MAKISHIMA K, MURAKAMI T, *et al.* The hard x-ray telescope (HXT) for the SOLAR-A mission[J]. *Solar Physics*, 1991, **136**(1): 17-36
- [10] SAKAO T. Characteristics of Solar Flare Hard X-ray Sources as Revealed with the Hard X-ray Telescope Aboard the Yohkoh Satellite[D]. Tokyo: University of Tokyo, 1994
- [11] BATTAGLIA A F, SAQRI J, MASSA P, *et al.* STIX X-ray microflare observations during the Solar Orbiter commissioning phase[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, **656**: A4
- [12] CHEN D Y, HU Y M, MA T, *et al.* Design and verification of the HXI collimator on the ASO-S mission[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, **21**(6): 136
- [13] TENG Teng, WU Jian, CHANG Jin. A simulation research on the solar hard X-ray imaging telescope[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2011, **52**(4): 339-351 (滕藤, 伍健, 常进. 太阳硬X射线成像望远镜模拟研究[J]. 天文学报, 2011, **52**(4): 339-351)
- [14] CHEN Dengyi. A Study of Mechanical and Thermal Design for the Hard X-Ray Imager on ASO-S[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021 (陈灯意. 星载太阳硬X射线成像仪的结构热稳定性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021)
- [15] JIANG X K, WU J, CHEN D Y, *et al.* Construction and validation of a geometry-based mathematical model for the hard X-ray imager[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, **23**(2): 025004