

X射线脉冲星导航探测器研究进展

王晓鲲

上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2023年9月6日; 录用日期: 2023年10月10日; 发布日期: 2023年10月20日

摘要

X射线脉冲星导航作为新兴的航天器自主导航技术, 具有抗干扰能力强、自主性强、导航误差小等优势, 被多个国家规划为重要的发展项目。脉冲星探测存在X射线辐射流量微弱、空间本底噪声大、X射线易散射等问题, 因此高灵敏度、高精度的X射线探测器系统的研制具有极其重要的意义。本文介绍了X射线脉冲星导航的基本流程和X射线脉冲星探测的发展历程, 重点介绍了几种常用X射线探测器和X射线探测器系统, 并对X射线探测技术的未来发展进行了展望。

关键词

脉冲星, X射线脉冲星导航, X射线探测器

Research Progress of X-Ray Pulsar Navigation Detector

Xiaokun Wang

School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Sep. 6th, 2023; accepted: Oct. 10th, 2023; published: Oct. 20th, 2023

Abstract

As an emerging autonomous navigation technology for spacecraft, X-ray pulsar navigation has the advantages of strong anti-interference ability, strong autonomy and small navigation error, and has been planned as an important development project by many countries. There are some problems in Pulsar detection, such as weak X-ray radiation flow, large space background noise, and easy scattering of X-rays. Therefore, the development of a high-sensitivity and high-precision X-ray detector system is of great significance. In this paper, the basic process of X-ray pulsar navigation and the development of X-ray pulsar detection are introduced, with emphasis on several commonly used X-ray detectors and X-ray detector systems, and the future development of X-ray

detection technology is prospected.

Keywords

Pulsar, X-Ray Pulsar Navigation, X-Ray Detector

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

脉冲星起始于大质量恒星在生命末期引起的超新星爆发，是一种超强引力场、超高温、超强电磁场、超高速旋转和超强稳定性的中子星[1]，其自转模型如图1所示[2]。脉冲星的自转轴和磁轴存在一定的偏移角度，磁极在空间中会发出电磁辐射束，其中包括X射线、光电、射电和伽马射线等。脉冲星旋转时电磁辐射束会扫过四周，通过探测器就可以接收到空间中的周期性电磁辐射，该过程与灯塔发出周期性信号供观测者参考极其相似，因此脉冲星的自转模型也被称为“灯塔模型”[3]。脉冲星的自转周期从1.6 ms到8.5 s不等，具有极强的周期稳定性，其中毫秒脉冲星每秒的波动范围仅有 $10^{-19} \sim 10^{-21}$ s，稳定程度优于原子钟，是目前自然界已知最稳定的频率源。

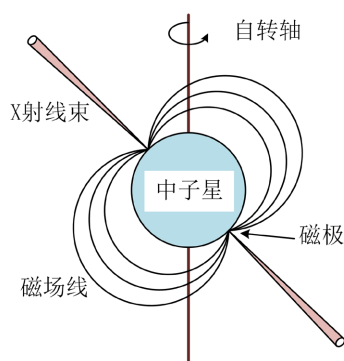


Figure 1. Model diagram of pulsar rotation [2]

图1. 脉冲星自转模型图[2]

脉冲星磁轴上的电磁辐射束包含很多频段的信号，每个频段的信号都有其特征，接下来从脉冲星导航的角度对不同信号进行分析。首先，射频段、可见光等信号需要大口径天线进行探测，且空间中该波段的干扰太大，需要长时间积分来提高待测信号的信噪比，无法满足实际导航应用中的便携性和时效性。其次，伽马射线频段对应的脉冲星数量稀缺，没有足够的脉冲星源可供导航选择使用，无法满足实际导航应用中探测目标的可观测性。最后，X射线频段可使用小型星载探测器进行探测，可以极大缩减航天器的负载功率和运行成本；包含X射线频段的脉冲星数量多、分布广，尤其是软X射线频段，具有周期稳定性强、辐射流量相对较大、自转周期可预测等优点[4] [5]。基于以上因素，脉冲星X射线被认定适用于导航任务，X射线探测器作为空间探测的眼睛在整个导航应用工程中发挥着不可或缺的作用。本篇综述中，主要介绍了X射线脉冲星导航的基本流程、X射线脉冲星探测的历史进程、X射线探测器和探

测器系统的基本原理结构, 并对未来 X 射线脉冲星探测的发展提出了展望。

2. X 射线脉冲星导航

X 射线脉冲星导航与传统的卫星导航相比具有一些独特的优势[6]。X 射线脉冲星导航的自主性强, 无需借助地面信息支持即可实现完全自主导航; 其安全性高, 脉冲星作为宇宙中的恒定天体, 信号源不易受到人为干扰, 非常适用于军事领域; 其定位精度高, 脉冲星辐射的信号周期稳定性极强, 可以被当作最精准的时钟; 其适用范围广, 可应用于深空探测、近地轨道和无大气层天体表面的自主导航。此外, X 射线在通讯方面具有很大潜力, 该波段信号兼具大信道容量和高通信带宽, 因此 X 射线脉冲星导航的研究也会促进 X 射线通信的发展。X 射线脉冲星导航的实现有两个难点, 分别是信号探测和数据处理。在信号探测方面, 脉冲星辐射的信号流量小、探测难度大, 需要探测器具备高信噪比、高灵敏度以及快响应时间等特点, 同时需要较长的信号积分时间才能还原出适用于导航的周期脉冲信号。在数据处理方面, 脉冲星的脉冲到达时间(Time of Arrival, TOA)测量模型很复杂, 需要繁杂的算法对 TOA 的相位进行解算[7]。

X 射线脉冲星导航原理图如图 2 所示[8], 航天器搭载的 X 射线探测器接收来自于脉冲星的 X 射线信号, 利用星载原子钟记录光子到达探测器的时间序列, 再推算出光子到达太阳系质心(Solar System Barycenter, SSB)的时间序列[9]。在 X 射线脉冲星模型数据库的支持下, 通过一系列的光子到达时间推算出脉冲 TOA, 最后根据导航算法得到航天器的位置、速度等信息, 这些定位信息会对计算光子到达时间的算法进行反馈, 形成一个闭环从而提升算法的精确度[10]。

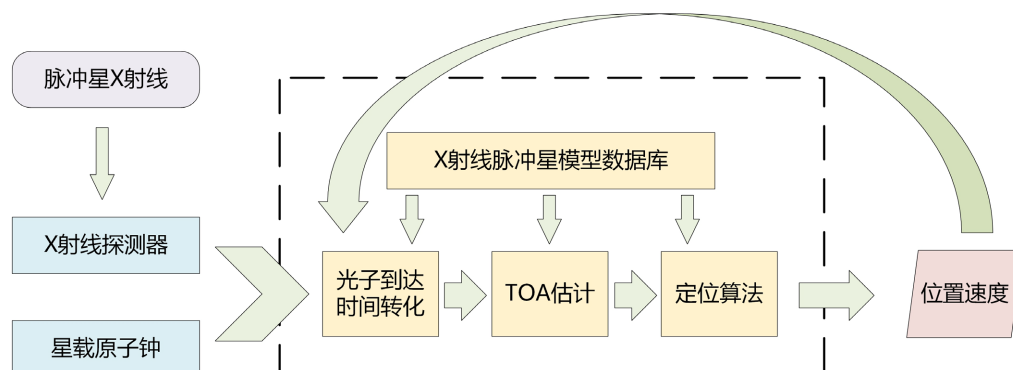


Figure 2. Schematic diagram of X-ray pulsar navigation [8]

图 2. X 射线脉冲星导航原理图[8]

3. X 射线脉冲星探测发展历程

1967 年, 剑桥大学的学生使用大型射电天文望远镜观察星际介质不规则闪烁时偶然发现了第一颗射电脉冲星, 首次叩开脉冲星领域的大门[11]。1974 年, Downs, G. S.首次提出基于脉冲射电源的行星间导航, 使用具有显著特征的脉冲星作为星际空间中导航的信标, 开创了脉冲星导航技术的先河[12]。1981 年, 美国国家航空航天局提出使用 X 射线作为脉冲星导航的探测信号, X 射线探测器的小体积、轻量化使得飞行器导航成为可能[13]。1999 年 2 月 23 日, 先进研究和全球观测卫星 ARGOS 发射, 其中的 USA 实验实现了长期观察 X 射线脉冲星体, 并具备大面积探测能力以及微秒量级的高时间分辨率, 验证了 X 射线脉冲星导航技术的可实施性[14]。2011 年, 欧洲空间局(European Space Agency, ESA)选中大型 X 射线定时观测站 LOFT 作为宇宙视野计划的四个中型任务之一, LOFT 将在 X 射线波段对致密天体进行高时间分辨率的光谱观测, 尤其是研究脉冲星和黑洞等的性质, 其探测面积很大, 具有前所未有的数据吞

吐量[15]。2012年6月13日,美国发射搭载核光谱望远镜阵列(NuSTAR)的卫星, NuSTAR 是轨道上第一个聚焦光学高能 X 射线望远镜,其工作波段为 3~79 keV, 远超先前 X 射线卫星探测器所达到的 10 keV 截止值,填补了 X 射线能量范围的观测空白[16]。同样在 2012 年,美国发射了一种采用龙虾眼光学系统的宽视场软 X 射线成像仪,这是首次将鞘状传输观测仪类型的光学仪器发送到太空[17]。2015 年印度首次发射天文观测卫星 Astrosat [18],其所携带的一系列仪器能够在广泛的波长范围里同时进行观测,包括可见光、紫外线、软 X 射线到硬 X 射线。

我国的 X 射线脉冲星导航研究进展同国际相比起步较晚。2016 年 11 月 10 日,我国发射首颗脉冲星试验卫星 XPNV-1 [19],该星搭载了掠入射聚焦型 X 射线探测器和准直型探测器[20],并完成了对 Crab 脉冲星(PSR B0531 + 21)的观测,并获得大量的在轨观测数据[21]。该任务首次实现我国脉冲星探测器“看得见”的目标,验证了我国脉冲星在轨探测技术的可行性。2017 年 6 月 15 日,中国首颗大型天文卫星“慧眼”发射,其采用硬 X 射线调制望远镜实现宽波段 X 射线成像,该卫星数据的 X 射线脉冲星导航精度约为 10 km,同美国 NICER 探测器在国际空间站获得的脉冲星导航试验精度相当[22]。

4. X 射线探测器研究现状

X 射线探测器是 X 射线脉冲星导航的眼睛[23],其基本原理是通过测量 X 射线和探测器模块相互作用产生的次级粒子从而间接测量 X 射线。不同探测器有不同的适用背景,本节将会介绍不同种类的 X 射线探测器,并分析其特点,然后进一步介绍脉冲星 X 射线探测器系统。

4.1. X 射线探测器

根据探测器与 X 射线的作用物质不同,可将 X 射线探测器分为充气正比计数器(Proportional Gas Counter, PGC)、闪烁体探测器(Scintillation Detector, SD)、微通道板(Micro Channel Plate, MCP)、电荷耦合探测器(Charge Coupled Device, CCD)、硅漂移探测器(Silicon Drift Detector, SDD)等[24] [25] [26],表 1 整理了一些 X 射线探测器的特性。

Table 1. Comparison of X-ray detector characteristics

表 1. X 射线探测器特性对比

探测器	能谱范围	时间分辨率	能量分辨率	特点
PGC	1~50 keV	us 量级	/	需要充气,寿命短、可靠性低
SD	20~2000 keV	us 量级	高	能谱范围宽,技术相对不成熟
MCP	0.1~20 keV	ns 量级	低	分辨率高,探测效率低
CCD	0.3~12 keV	us 量级	高	探测效率高,死区时间大
SDD	0.3~100 keV	us 量级	高	探测效率高,制作工艺要求高

4.1.1. 充气正比计数器(PCG)

PCG 又叫气体探测器[27],被广泛应用于粒子物理、高能物理的实验中。当光子经过气体室与气体相互作用产生电离子对,在电场作用下电离子会在漂移中再次电离,且距离阳极越近电离概率越大。PCG 是正比模式的气体探测器,如图 3 所示,阳极部分是结构中心的阳极丝,阴极部分是圆柱筒状外壳,气体室中充入一定压强的惰性气体氙气。当 X 射线通过入射窗口与惰性气体发生作用时,所产生的带电离子在高压电场的作用下向气体室两端电极位移,相关信息被传输到后端电子学进行采集。

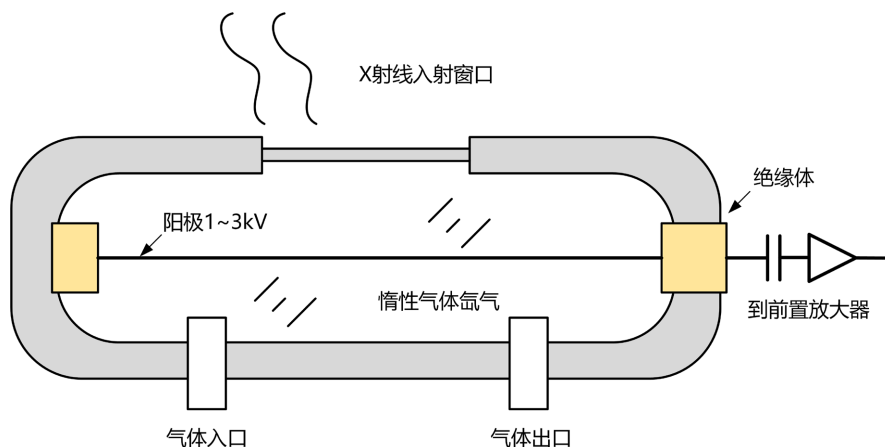


Figure 3. Schematic diagram of PCG operation [28]
图 3. PCG 工作原理图[28]

响应速度取决于气体室的尺寸以及电离后电子的漂移时间，产生脉冲信号的幅值和 X 射线能量成正比。PCG 的能谱范围为 1~50 keV，时间分辨率可以达到微秒量级，技术十分成熟。然而电离室内的气体存在损耗和泄露的问题，使用寿命短且可靠性差，无法满足导航应用中航天器长时间在轨的工作要求。PCG 主要用于光子到达时间的测量，在 Astrosat、RXTE 等卫星上均有搭载[29] [30]。

4.1.2. 闪烁体探测器(SD)

SD 主要是由闪烁体材料、光收集模块 PMT (Photo Multiplier)以及光电转换器件构成，其中 PMT 包括光电阴极、阳极、倍增电极和高压部分。工作原理如图 4 所示，当粒子照射到闪烁体时，一部分能量会转移到原子使其进入激发态，受激原子会很快进入基态并释放出光电子，利用 PMT 将光电子收集并最终转换为电流脉冲信号传输到后端电子学。

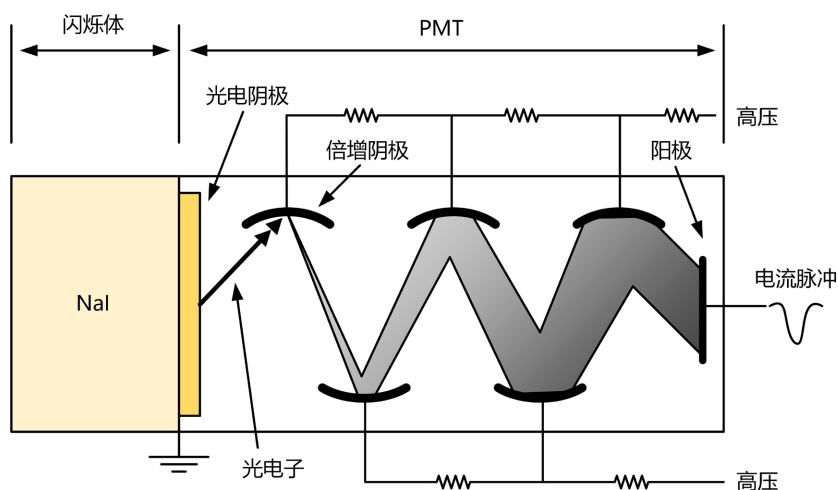


Figure 4. Schematic diagram of SD operation [28]
图 4. SD 工作原理图[28]

SD 的探测能谱范围很宽，为 20~2000 keV，时间分辨率可以达到微秒量级。SD 采用各种闪烁体和光电探测组合的方式，可用于探测不同种类的信号，例如硬 X 射线、高能粒子等。该类型探测器在 RXTE、

HERO-1 等卫星上均有装载[31] [32]。

4.1.3. 微通道板(MCP)

MCP 是由大量孔径极细的微通道组成的探测器[33]，如图 5 所示，当粒子撞击到通道内壁后会产生大量的电子，在高压电场的作用下，电子会再次撞击通道内壁产生更多次级电子，最后经阳极收集产生电信号。

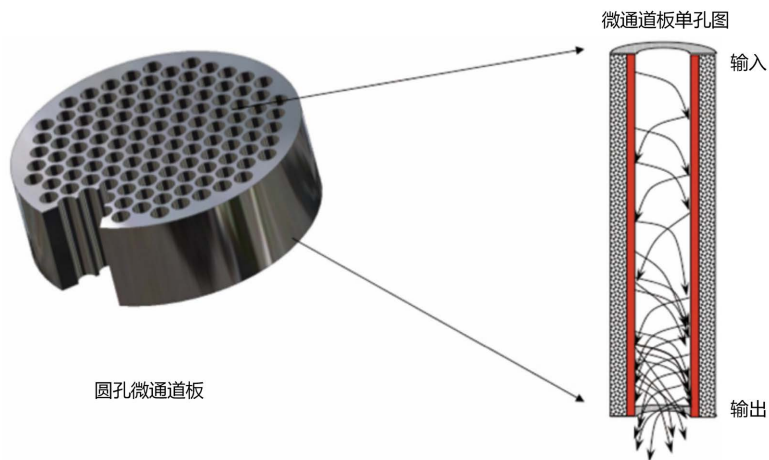


Figure 5. Schematic diagram of MCP operation [34]
图 5. MCP 工作原理图[34]

MCP 探测器的优点是：时间测量精度很高，可达 1 ns 量级；且具有高增益的特点，在多级倍增情况下增益可达 $10^6 \sim 10^8$ ；成像空间分辨率高且结构简单。但是其能量分辨率差，探测效率低，背景噪声大且研发难度较大。MCP 探测器已在国内外多个卫星上使用，例如美国的 Chandra [35]和我国的首颗脉冲星试验卫星 XPNAV-1。

4.1.4. 电荷耦合探测器(CCD)

CCD 属于半导体探测器，主要应用于太空探索，其抗环境干扰能力很强，性能可靠稳定，是一种大规模集成电路器件。如图 6 所示，CDD 的结构是由多个金属氧化物场效应管(Metal Oxide Semiconductor, MOS)组成的阵列，每个 MOS 单元都可以通过光电效应对光子进行探测，并转换为电信号进行存储，累积的电子被转换为电压信号传送到后续电路模块进行放大和数字化处理[36] [37]。

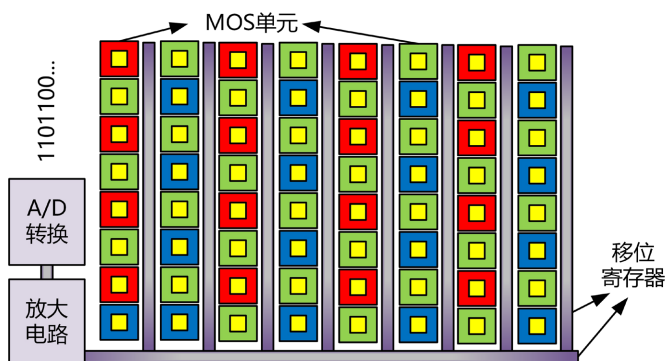


Figure 6. Schematic diagram of CCD operation
图 6. CCD 工作原理图

CCD 探测能谱范围为 0.3~12 keV，定时精度达微秒量级，便于小型化设计，具有低噪声、高探测效率的特点，但是其死区时间较大，每次读取需要进行深度清空操作，该操作会导致响应时间过长，从而丢失有效光子信号。该类型探测器在 Suzaku 和 Chandra 等卫星上有所应用[38]。

4.1.5. 硅漂移探测器(SDD)

SDD 是 20 世纪 80 迅速发展起来的 X 射线探测器，其原理是使用硅的半导体特性来对入射粒子的能量进行探测[39]。图 7 是 SDD 的工作原理图，X 射线会和硅原子作用产生电子 - 空穴对，由于漂移层内部电场的存在，空穴会沉积在衬底层，电子会被阳极收集并进行缓存放大，最后传输到后续电路进行电荷测量。X 射线的能量与对应产生的电荷成正比，通过对输出电荷的测量即可推算出 X 射线的能量[40][41]。

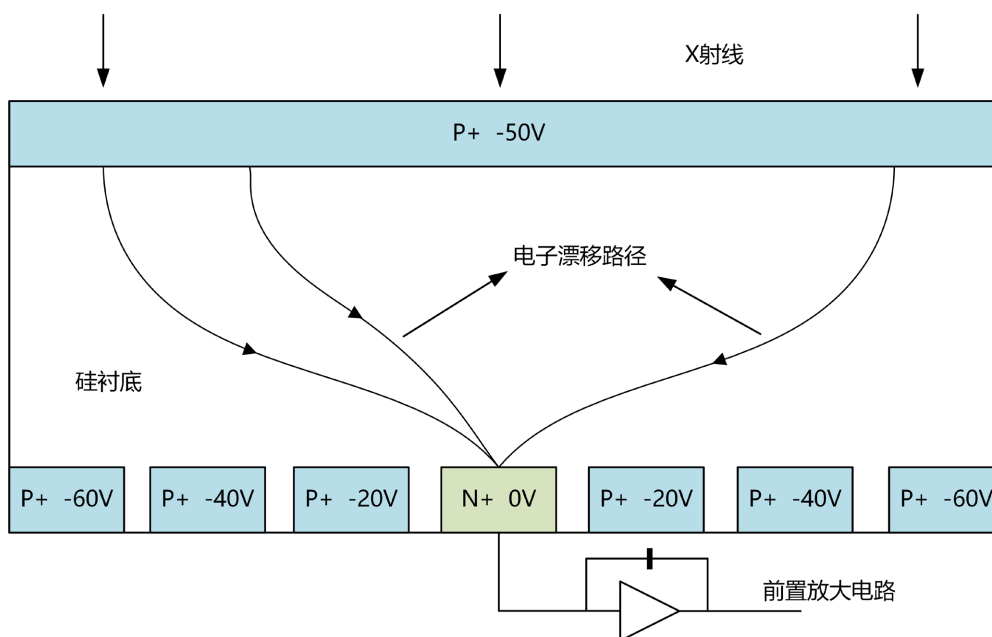


Figure 7. Schematic diagram of SDD operation
图 7. SDD 工作原理图

SDD 也属于半导体探测器，其电离与电荷收集的过程和气体电离室类似，因此也被称为固体电离室。SDD 探测能谱范围为 0.3~100 keV，其时间测量精度为微秒量级，且具有能量分辨力强、探测效率高、噪声低等特点，很适合 X 射线的能量探测。该类型探测器在 NICER [42]、XPNAV-1 等卫星上有所使用。

4.2. 探测器系统

随着 X 射线探测器的发展趋于成熟，探测器系统的研究和应用受到越来越多的关注。单个探测器观察视野有限，通过多个探测器组成探测器阵列来增大探测器系统的接收面积，就可以在同等时间采集更多的有效时间进而提升性能[43]。另外，宇宙中的 X 射线背景噪声很大，待测的 X 射线信号可能会被湮没，可以通过在探测器前端增加光学元件来滤除噪声进而提升系统性能。目前 X 射线脉冲星探测器系统主要分为三大类：准直型 X 射线探测器系统、聚焦型 X 射线探测器系统[44]、调制型 X 射线探测器系统，表 2 整理了三种探测器系统的特性。

Table 2. Comparison of X-ray detector system characteristics
表 2. X 射线探测器系统特性对比

探测器系统	技术情况	优点	缺点	未来趋势
准直型	非常成熟	结构简单、成本低、面积易做大	噪声本底大、功耗高、电子学规模大	空间探测的发展受限
聚焦型	非常成熟	探测面积大、背景噪声小、灵敏度高	焦距长、体积大	未来的主要发展趋势
调制型	初步发展	背景噪声小、体积小、重量轻	算法要求更高	未来的热点和趋势

4.2.1. 准直型探测器系统

准直型探测器系统的最主要特征是其探测器前端具备准直器，以“慧眼”卫星搭载的准直型探测器系统为例[34]，该系统主要包括光子探头、综合控制器和高压配电器，具体结构如图 8 所示。光子探头主要包括输入窗、准直器、光电阴极、微通道板以及收集阳极 5 个部分。输入窗可以屏蔽空间中可见光、紫外线、带电粒子等干扰源，使得 1~10 keV 软 X 射线具有较高的透过率；准直器保证探测器只接受来自特定方向的 X 射线光子，可以减小背景噪声；光电阴极的作用是将 X 射线光子信号转换为电子信号；微通道板可以将电子进行 $10^6\sim 10^7$ 倍增益，从而实现对微弱信号的高信噪比探测；阳极负责将电荷信号进行收集并传输到后续电路。综合控制器包括电子学电路、控制电路和接口电路 3 个部分：电子学电路负责采集探测信号，并对一些接收信号进行相关处理；控制电路负责控制信号通断和指令发送；接口电路作用是和高压配电器模块进行指令的收发。高压配电器包括接口电路、控制电路和供电电路三个部分：接口电路用来和综合控制器交互；控制电路用来控制高压驱动电路，同时负责遥测高压电源模块的反馈值；供电电路负责给探头提供高压。

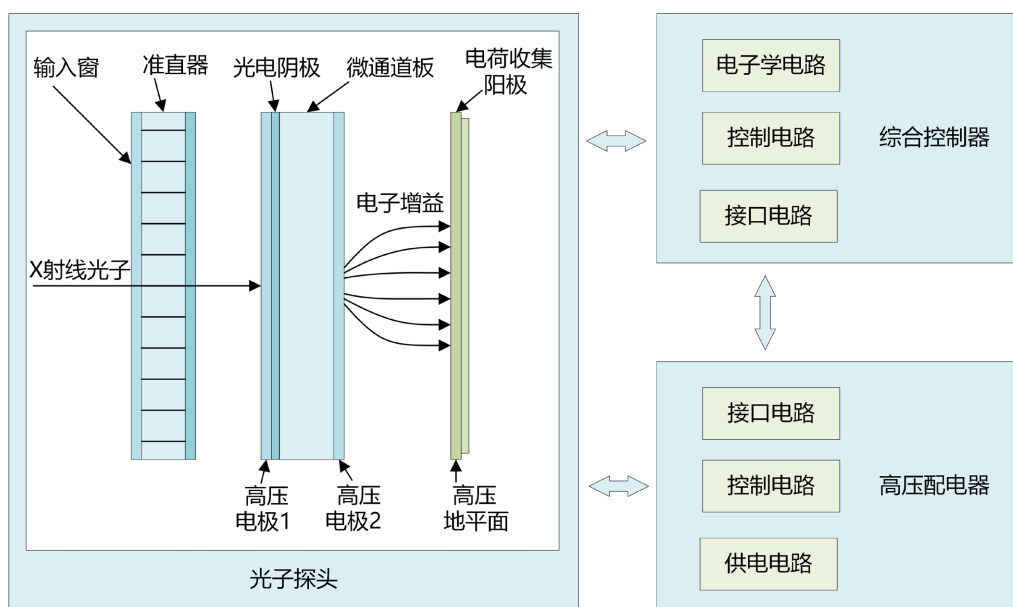


Figure 8. Structure diagram of collimating detector system [34]
图 8. 准直型探测器系统结构图[34]

X 射线准直器的作用是滤除非入射角的噪声粒子，降低背景辐射，提升探测器所测信号的信噪比。X 射线准直器的原理是通过限制视场角来降低背景辐射，通常使用物理或化学方法形成微小的孔，孔的直径和深度决定准直器的视场角，孔的直径和厚度决定准直器的光子透过率[45]。2005 年，日本的 HIRAGA 博士团队使用磷酸钡玻璃制备了准直器原型，其对高达 20 keV 的 X 射线具备精细准直能力[46]。2006 年，清华大学和中科院北京高能物理研究所优化了空间硬 X 射线望远镜准直器设计方案，通过探测单元整体屏蔽取代单独屏蔽，实现减少重量和降低噪声的效果[47]。2013 年，中科院紫金山天文台设计双层金属光栅型 X 射线准直器，成功制作空间硬 X 射线望远镜原型机，并实现 50~250 keV 的探测能谱范围[48]。由于 X 射线准直器的用途非常广泛，科学家们研制了多种 X 射线准直器，例如单圆孔、单狭缝、金属光栅型多狭缝等，使得制备 X 射线准直器的结构多样化，极大促进了 X 射线探测领域的发展[49]。准直型探测器具有结构简单、成本低、探测面积易做大等特点，但是其本身没有聚光能力，会导致本底噪声较大，而且电子学规模较大、功耗高等特点也限制了其在星载 X 射线探测的应用和发展。

4.2.2. 聚焦型探测器系统

聚焦型探测器系统的主要特征是探测器前端具有 X 射线聚焦镜头，以哈尔滨工业大学研制的聚焦型探测器系统为例[50]，该系统由 X 射线聚焦镜头、前端电子学和综合控制器三部分组成，图 9 为系统结构图。聚焦镜头负责将 X 射线光子汇聚并进行低通滤波，通过 SDD 阵列探测器进行光电转换并传输到后端电路。前端电子学的高压模块用以高压供电，温控模块用来控制探测器阵列的温度，慢成形放大电路和快成形放大电路分别用来传输能量信号和时间信号。综合控制器模块主要负责时间标识、能量分析、时间保持、数据传输及平台交互等功能。

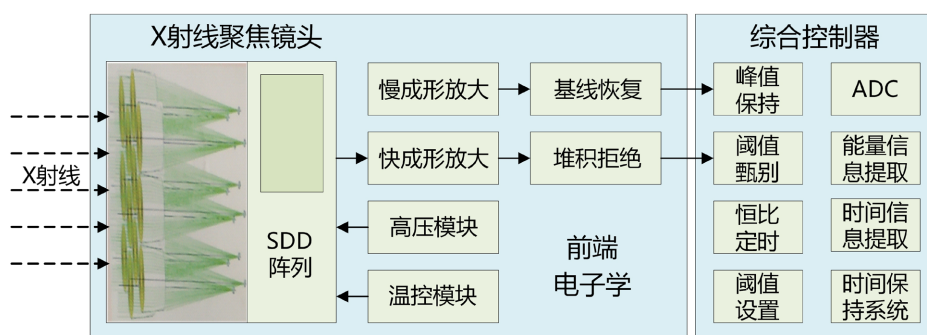


Figure 9. Structure diagram of focused detector system

图 9. 聚焦型探测器系统结构图

探测器的面积不能无限做大，因此科学家们通过 X 射线聚焦的方法来提高 X 射线的光子密度。X 射线聚焦利用的是 X 射线掠入射原理[51]，采用多层嵌套式结构将更大面积的 X 射线光子聚焦于探测器，从而提升信号的信噪比。1948 年，Kirkpatrick 和 Baez 首次进行了掠入射望远镜的设计，该光学系统被称为 K-B 聚焦反射镜，其由两组互相垂直的抛物面反射镜组成，X 射线通过镜面反射后进行聚焦[52]。1952 年，德国科学家 Wolter 提出了三种 X 射线掠入射聚焦光学系统[53] [54]，即 Wolter-I 型、Wolter-II 型和 Wolter-III 型，该系统的特点是同轴共焦，具有较高的成像分辨率。1979 年，Angel 模仿龙虾眼的结构特征提出了龙虾眼 X 射线天文望远镜，其不存在固定光轴的特点可用于实现宽视场探测[55]。1999 年，美国的 Chandra 空间天文台发射，其主载荷为 4 层嵌套的 Wolter-I 型 X 射线成像望远镜，焦距为 10 m，角分辨率为 0.5"，探测波段 0.2~10 keV，使用微晶玻璃作为镜面材料，表面镀金属铱[56]。2005 年，日本发射的 Suzaku 卫星搭载了 2 种 X 射线望远镜[57]，均为 Wolter-I 型的圆锥形结构，采用铝箔复制技术实

现大面积、轻量化、多层嵌套的 X 射线聚焦型光学系统。2016 年，中国发射的 XPNV-1 所搭载的 X 射线聚焦望远镜采用的是电铸镍复制技术[58]，该技术由美国和意大利等公司联合研究，相比于玻璃和铝箔复制工艺具有更高的角分辨率，该技术在 20 世纪末发展成熟并投入到 X 射线探测器系统中，我国将在 2023 年年底发射的爱因斯坦探针卫星所搭载的后随 X 射线望远镜采用的也是这种工艺[59]。

聚焦型探测器系统具有探测面积大、背景噪声小、灵敏度高优点，但是其焦距长、体积大的特点也会给空间应用带来一些难题。随着研究的深入，科学家们从光学结构、制作工艺、镜头材料等方面取得了突破，总体来说，聚焦型探测器系统在未来很长一段时间里都会占据主体地位，是 X 射线脉冲星导航的主要发展趋势。

4.2.3. 调制型探测器系统

调制型探测器系统的主要特征是探测器前端使用编码孔径阵列，该系统由调制型探测器、综合控制器和导航计算机组成，图 10 为系统结构图[60]。滤光膜可以选择性地透过特定波段的光信号，同时屏蔽其他不需要的信号；编码孔径阵列可以对 X 射线信号进行高效编码；CMOS 阵列和优先读出电路组成像素型探测器用来读取光子的信息。综合控制器实现探头供电、数据采集、数据预处理、数据传输以及平台交互等功能。导航计算机接收到数据后会对其进行解析，并通过算法得到导航参数信息。

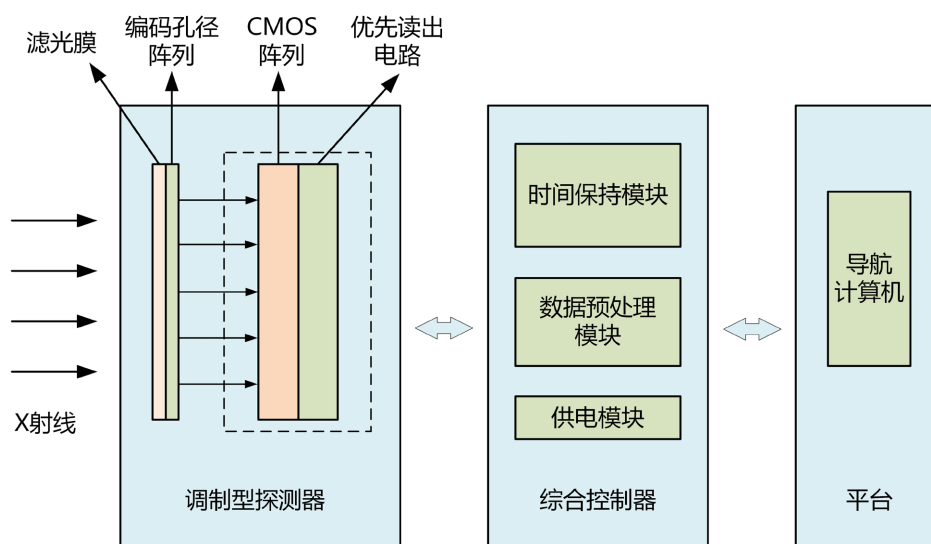


Figure 10. Structure diagram of modulation detector system
图 10. 调制型探测器系统结构图

光学编码孔径阵列可以对进入探测器的 X 射线进行调制和编码，通过特定孔径尺寸和排列方式，使得探测器只对特定位置或能量范围的 X 射线产生响应，减少非感兴趣信号的干扰，提高探测器的信噪比和灵敏度。使用编码孔径阵列代替 X 射线聚焦镜头，极大地减小了系统的质量和体积，从而形成很紧凑的成像系统[61]。不同于准直型和聚焦型探测器系统的技术成熟，调制型探测器系统的技术初步发展，其兼具准直型和聚焦型的特点，可抑制空间背景噪声，并能降低载荷的体积重量，是未来探测器研究的热点与趋势。

5. 总结和展望

X 射线脉冲星探测在航天器自主导航、X 射线通讯、脉冲星授时等多领域都显现出发展前景，未来

会在更多的领域展现其应用价值。美国的 SEXTANT 项目[62]、中国脉冲星导航试验卫星(XPNAV-01)和“慧眼”天文卫星均开展了近地空间脉冲星导航试验,并提出了基于在线计时的信号处理与定位快速计算方法,为 X 射线脉冲星导航的工程应用打下了基础。中国将在 2023 年年底发射爱因斯坦探针卫星开展宽谱段 X 射线观测与研究,同时搭载了后随聚焦 X 射线望远镜和大视场龙虾眼望远镜[63]。国际上还有许多开展 X 射线脉冲星探测的重大型号任务,随着科学研究的逐步深入和工程应用的顺利实施, X 射线脉冲星探测领域一定会取得更惊人的成果。

X 射线脉冲星导航的实现一定是融合电子学、物理学、天文学的综合性大工程,不仅需要高性能的 X 射线探测器,还需要高信噪比的电子学和运算效率更高的导航算法,同时新旧技术的应用也很关键,为此总结未来发展方向如下:

1) 研制高精度的探测器读出电子学。探测器读出功能的实现是 X 射线脉冲星导航探测器技术发展的基础,读出电子学主要是针对特定项目、特定环境下的探测器而专门设计的,其针对性较强。X 射线脉冲星导航探测不仅需要探测器具有较高的探测效率、很快的响应时间、良好的能量分辨、便于搭载的体积和功耗,更需要读出电子学具有高信噪比、高精度、高稳定度,这样才能将有效信号传输到计算机平台进行数据的算法处理。多通道探测器读出电子学的主控芯片常使用现场可编程逻辑门阵列(FPGA),其优势是可并行处理数据、灵活性高、实时性强,可灵活运用于 X 射线脉冲星导航探测的电子学系统中。当然,大力发展性能更好的探测器专用集成芯片也是提高读出电子学信噪比的手段之一。

2) 针对不同应用场景 X 射线探测器应具有不同的特点。用于脉冲星观测与科学研究的 X 射线望远镜以大面积、高探测效率、高角分辨率、高精度为主,重量、体积和功耗都是次要的指标。用以航天器自主导航的 X 射线探测器要以体积小、质量小、功耗小、稳定度高、精度高为主,探测面积和角分辨率只要满足一定需求即可。旧技术的运用和精进以及新技术的探索和科研对于 X 射线脉冲星探测的发展都具有很重要的意义,在众多的技术中选择最适用于应用场景的那一项,这对相关科研团队提出了更高的要求。

参考文献

- [1] 谢军, 贝晓敏, 张恒彬, 陈强, 冷晗阳, 岳鹏毅. 基于 X 射线光子强度关联的脉冲星角位置测量方法与地面验证[J/OL]. 中国空间科学技术, 2023: 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20230512.1812.004.html>, 2023-05-12.
- [2] 李连升, 梅志武, 谢军, 姜坤, 石永强, 曹振, 左富昌. X 射线聚焦光学在脉冲星探测领域的应用[J]. 航空学报, 2023, 44(3): 8-25+3.
- [3] 金东东, 李文彬, 连剑, 等. X 射线脉冲星光子聚焦技术发展研究[J]. 空间电子技术, 2016, 13(2): 67-73.
- [4] 宋佳凝, 徐国栋, 李鹏飞. 基于相位差测量的脉冲星时间相对导航方法[J]. 宇航学报, 2016, 37(11): 1304-1311.
- [5] 赵聪聪. X 射线脉冲星信号的 TOA 估计与辨识研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2019. <https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.001127>
- [6] 李连升, 梅志武, 吕政欣, 邓楼楼, 刘继红, 陈建武, 石永强, 左富昌. X 射线脉冲星导航探测技术发展综述[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(5): 1-9.
- [7] Wang, Y., Zheng, W., Zhang, S., et al. (2023) Review of X-Ray Pulsar Spacecraft Autonomous Navigation. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.03.002>
- [8] 郑伟, 王禹淞, 姜坤, 王奕迪. X 射线脉冲星导航方法研究综述[J]. 航空学报, 2023, 44(3): 26-42.
- [9] 李建勋, 柯熙政. 基于脉冲星定时模型的自主导航定位方法[J]. 中国科学(G 辑: 物理学力学天文学), 2009, 39(2): 311-317.
- [10] Rad, A.M. and Azari, L.V. (2014) Determining Attitude and Position in Deep Space Missions Using X Ray Pulsars. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 4, 628-648. <https://doi.org/10.4236/ijaa.2014.44058>
- [11] Hewish, A.R., Bell, S.J., Pilkington, J.D.H., et al. (1968) Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source. *Nature*,

- 217, 709-713. <https://doi.org/10.1038/217709a0>
- [12] Downs, G.S. (1974) Interplanetary Navigation Using Pulsating Radio Sources. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC.
- [13] Chester, T.J. and Butman, S.A. (1981) Navigation Using X-Ray Pulsars. TDA Progress Report 42-63. https://tmo.jpl.nasa.gov/progress_report/42-63/63F.PDF
- [14] Ray, P.S., Wood, K.S., Fritz, G., *et al.* (2001) The USA X-Ray Timing Experiment. *AIP Conference Proceedings*, **599**, 336-345. <https://doi.org/10.1063/1.1434646>
- [15] Bozzo, E. and Consortium, F. (2013) The Large Observatory for X-Ray Timing: LOFT. *Experimental Astronomy*, **34**, 415-444.
- [16] Harrison, F.A., Craig, W.W., Christensen, F.E., *et al.* (2013) The Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) High-Energy X-Ray Mission. *The Astrophysical Journal*, **770**, 103. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/770/2/103>
- [17] Collier, M.R., Porter, F.S., Sibeck, D.G., *et al.* (2015) First Flight in Space of a Wide-Field-of-View Soft X-Ray Imager Using Lobster-Eye Optics: Instrument Description and Initial Flight Results. *Review of Scientific Instruments*, **86**, 105-126. <https://doi.org/10.1063/1.4927259>
- [18] Singh, K.P., Tandon, S.N., Agrawal, P.C., *et al.* (2014) Astrosat Mission. In: Takahashi, T., den Herder, J.-W.A. and Bautz, M., Eds., *Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray*, SPIE, Montréal, 91441S. <https://doi.org/10.1117/12.2062667>
- [19] 薛力军, 丁强强, 何民, 郑靖. “脉冲星试验卫星”顺利升空[J]. 国际太空, 2016(11): 13-19.
- [20] Shi, Y., Mei, Z., He, Y., *et al.* (2020) Ground Calibration and In-Orbit Performance of the Time-Resolved Soft X-Ray Spectrometer on Board XPNAV-1. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **6**, Article ID: 034006. <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.6.3.034006>
- [21] 姜坤, 焦文海, 郝晓龙, 刘莹, 王奕迪, 张新源, 国际. 脉冲星试验 01 星科学试验与成果[J]. 航空学报, 2023, 44(3): 97-106.
- [22] 张大鹏, 呼延宗泊, 李恒年. 基于卫星实测数据的 X 射线脉冲星导航体制验证[J]. 航空学报, 2023, 44(3): 116-123.
- [23] 全林, 欧阳晓平. 脉冲星导航 X 射线探测技术综述[J]. 现代应用物理, 2014, 5(2): 98-103.
- [24] 宋凝芳, 张俊敏, 郑伊茜, 金靖, 潘雄. 基于脉冲星导航系统的 X 射线探测器[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(6): 682-686.
- [25] 郗晓雨, 郭思明, 郭锴悦, 等. 硅漂移探测器探测效率标定研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 49-54. <https://doi.org/10.13382/j.jemi.B2205413>
- [26] Fraser, G.W. (2009) X-Ray Detectors in Astronomy. Cambridge Astrophysics. Cambridge University Press, Cambridge.
- [27] 陶凯, 杜向阳, 邓长明, 等. 大面积闭气正比计数器的研究进展[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(8): 928-929. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2011.08.025>
- [28] 孙书坤. 基于 MCP 的 X 射线脉冲星导航探测器定时系统研制[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [29] Kowalski, M., Wood, D., Fritz, G., *et al.* (2001) The Unconventional Stellar Aspect (USA) Experiment on ARGOS. *AIAA Space Conference & Exposition*, Albuquerque, 28-30 August 2001, 1. <https://doi.org/10.2514/6.2001-4664>
- [30] 梁腾. 基于 RXTE 实测数据的 X 射线脉冲星信号特征研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [31] Pravdo, S.H., Angelini, L. and Harding, A.K. (1997) X-Ray Spectral Evolution of the Crab Pulse. *Astrophysical Journal*, **491**, 808-815. <https://doi.org/10.1086/304996>
- [32] Matteson, J. (1978) The UCSD/MIT Hard X-Ray and Low Energy Gamma-Ray Experiment for HEAO-1—Design and Early Results. *AIAA, Aerospace Sciences Meeting*, Huntsville, 16-18 January 1978. <https://doi.org/10.2514/6.1978-35>
- [33] 周庆勇, 盛立志, 魏子卿, 刘思伟, 陈琛, 姬剑锋, 任红飞, 马高峰, 张彩红, 孙鹏飞. 微通道板型 X 射线探测器的脉冲信号探测能力实验分析[J]. 光子学报, 2018, 47(9): 175-185.
- [34] 徐延庭, 宫超林, 胡慧君, 张玉兔, 邵思霖, 史钰峰, 宋娟, 宋晓林. 脉冲星 MCP 探测器设计与在轨验证[J]. 航天器工程, 2018, 27(5): 114-119.
- [35] 张鹏飞. 耀变体 3C 273 的 Chandra X 射线卫星数据处理[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2013.

- [36] 周红平. CCD 图像传感器原理[J]. 中国新技术新产品, 2009(20): 28-29.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9957.2009.20.022>
- [37] 熊平. CCD 与 CMOS 图像传感器特点比较[J]. 半导体光电, 2004, 25(1): 1-4, 42.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5868.2004.01.001>
- [38] Mitsuda, K., Bautz, M., Inoue, H., *et al.* (2007) The X-Ray Observatory Suzaku. *PASJ: Publications of the Astronomical Society of Japan*, **59**, S1-S7.
- [39] 孟祥承. 新型半导体探测器发展和应用[J]. 核电子学与探测技术, 2004, 24(1): 87-96.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2004.01.025>
- [40] 廖非易, 李高财, 雷林, 等. 硅辐射探测器的研究进展[J]. 云南化工, 2022, 49(5): 1-6.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-275X.2022.05.01>
- [41] Gatti, E. and Rehak, P. (1984) Semiconductor Drift Chamber—An Application of a Novel Charge Transport Scheme. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, **225**, 608-614. [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(84\)90113-3](https://doi.org/10.1016/0167-5087(84)90113-3)
- [42] Gendreau, K.C., Arzoumanian, Z. and Okajima, T. (2012) The Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER): An Explorer Mission of Opportunity for Soft X-Ray Timing Spectroscopy. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, **8443**, Article ID: 844313. <https://doi.org/10.1117/12.926396>
- [43] 乔黎, 刘建业, 郑广楼, 贺亮, 熊智. 基于 X 射线脉冲星导航系统探测器研究[J]. 传感器与微系统, 2008(1): 9-11+14. <https://doi.org/10.13873/j.1000-97872008.01.007>
- [44] 周庆勇, 魏子卿, 姜坤, 刘思伟, 郑伟, 史钰锋, 王奕迪, 杨彦佑, 胡慧君, 金东东, 宋娟, 孙鹏飞, 宋昊磊. 面向脉冲星导航的聚焦型 X 射线探测器测试标定方法研究[J]. 光子学报, 2020, 49(6): 27-39.
- [45] 宋娟. 基于脉冲星导航的 MCP 空间 X 射线探测器关键技术的研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2014.
- [46] Hiraga, J.S., *et al.* (2007) A Novel Multi-Collimator Using BP-1 Glass and an Application for X-Ray CCDs. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **573**, 236-239. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.10.391>
- [47] 金颖康, 吴枚, 金永杰, 等. HXMT 准直器方案的优化设计[J]. 高能物理与核物理, 2007(7): 612-616.
- [48] 郑春晓, 蔡明生, 胡一鸣, 等. 硬 X 射线成像望远镜系统初步研究[J]. 天文学报, 2014, 55(2): 154-169.
<https://doi.org/10.15940/j.cnki.0001-5245.2014.02.004>
- [49] 李艺杰, 肖君, 陈宜方, 等. 电子束直写大深宽比 Si₃N₄ 薄膜支撑的光栅 X 射线准直器[J]. 光学精密工程, 2022, 30(10): 1181-1188. <https://doi.org/10.37188/OPE.20223010.1181>
- [50] 李文彬. 龙虾眼 X 射线脉冲星导航探测器研制[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
<https://doi.org/10.7666/d.D01589907>
- [51] 强鹏飞, 盛立志, 李林森, 等. X 射线聚焦望远镜光学设计[J]. 物理学报, 2019, 68(16): 21-26.
<https://doi.org/10.7498/aps.68.20190709>
- [52] Kirkpatrick, P. and Baez, A.V. (1948) Formation of Optical Images by X-Rays. *Journal of the Optical Society of America*, **38**, 766-774. <https://doi.org/10.1364/JOSA.38.000766>
- [53] Raimondi, L. and Spiga, D. (2011) Point Spread Function of Real Wolter-I X-Ray Mirrors: Computation by Means of the Huygens-Fresnel Principle. *Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy V*, **8147**, 81470Z.
<https://doi.org/10.1117/12.895321>
- [54] 赵子健, 王于仁, 张留洋, 等. Wolter-I 型聚焦镜 X 射线光学实验与仿真[J]. 光学精密工程, 2019, 27(11): 2330-2336. <https://doi.org/10.3788/OPE.20192711.2330>
- [55] Angel, J.R.P. (1979) Lobster Eyes as X-Ray Telescopes. *The Astrophysical Journal*, **233**, 364-373.
<https://doi.org/10.1086/157397>
- [56] 吴耀军, 帅平. 美国“钱德拉 X 射线天文台”浅析[J]. 国际太空, 2013(10): 32-36.
- [57] Serlemitsos, P.J., Yang, S., Kai-Wing, C., *et al.* (2007) The X-Ray Telescope Onboard Suzaku. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **59**, 9-21.
- [58] 黎月明, 杨健, 左富昌, 等. X 射线反射镜 NiP 芯模超精密车削技术研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 380-386.
- [59] 祝宇轩. EP 卫星 FXT 聚焦镜研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2022.
<https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2022.000317>
- [60] 李蕾. X 射线像素探测器中低噪声前端电路的设计[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

- [61] 江劲波. 基于可分离编码孔径的压缩成像方法研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽大学, 2022.
<https://doi.org/10.26917/d.cnki.ganhu.2022.000395>
- [62] 丁陶伟, 帅平. 美国脉冲星导航空间飞行试验进展[J]. 国际太空, 2020(10): 7-14.
- [63] 祝宇轩, 陆景彬, 陈勇, 等. EP-FXT 聚焦镜真实表面状态的性能模拟方法[J]. 物理学报, 2022, 71(12): 16-26.