

eXTP卫星PFA载荷 焦平面相机电子学研制进展

刘小桦¹,姜维春¹,杨生¹,刘晓静¹,杜园园¹, 孙亮¹,蒋杰臣¹,杨家卫¹,徐玉朋¹,何会林¹

1. 中国科学院高能物理研究所

2023-8-10

目录

1、项目背景

2、PFA电子学

- 2.1 概述
 - 原理、组成、方案

2.2 研制情况

- 工程样机硬件设计、软件设计、地测设备、工程样机组装

2.3 测试结果

- 高压电源、温控电路、热真空试验、束线试验

3、小结

1、项目背景

增强型X射线时变与偏振探测(enhanced X-ray Timing and Polarimetry,简称eXTP)空间天文台, 其科学目标是研究黑洞附近和中子星内部以及表面的极 端物理过程,即"一奇(黑洞)、二星(中子星和夸克 星)、三极端(极端引力、密度和磁场)"。

偏振测量X射线聚焦望远镜阵列(简称PFA)是eXTP的四 个科学载荷中唯一具备成像能力和偏振测量能力的载荷。 PFA利用聚焦镜实现X射线聚焦,利用气体像素探测器 (GPD)实现对2-8keV能量范围内X射线的成像偏振观测。



2.1 PFA电子学概述- 原理

PFA采用气体像素探测器(GPD)实现对2-8keV能量范围内的X射线的成像偏振观测。

GPD组成结构:包含最上层的铍窗(兼作漂移电极)、中间层的气体电子倍增器(GEM)和底层的二维 像素读出ASIC。

GPD工作原理: X光子入射到漂移区与气体介质发生光电效应并发射光电子,测量光电子径迹在平行于 探测器平面内的二维投影图像,进而得到入射光束的偏振信息。



GPD探测器的原理示意图

2.1 PFA电子学概述 - 组成

PFA焦平面相机由焦平面探测器机箱(PFC)和PFA电子学机箱(PFE)两部分组成。 PFA电子学包含数采电子学、高压电源、低压电源、热控电子学和软件。



2.1 PFA电子学概述-需求

PFA电子学功能需求:

- ① 遥控指令接收功能;
- ② 遥测数据产生功能;
- ③ 科学数据传输功能;
- ④ 电子学自检功能;
- ⑤ 低能X射线偏振和能谱测量。

PFA电子学主要性能指标要求

参数	指标要求	
像素数	105k	
能量范围 (keV)	2-8keV	
X射线能量分辨	≤ 1.8keV@ 6keV 或≤ 30%@ 6keV	
偏振调制因子	≥50% @ 6keV	



2.1 PFA电子学概述-方案

采用堆叠式结构,包含电路板组件如下:

- GPD探测器板:安装GPD,输入电源,输出信号,刚柔结合PCB;
- 高压电源板:产生GPD所需的三路高压电源,有主备份两块板;
- 数采电源板: 对ASIC模拟信号AD变换, 产生ASIC所需电源, 产生FPGA所需电源;
- 数采FPGA板:对ASIC进行时序控制采集数据,控制其他电路板,与卫星平台进行通讯;
- 热控板: 驱动加热片实现GPD温度控制;
- 二次电源板:产生机箱内各低压电源,有DCDC板和继电器板两块板。



GPD探测器板

高压电源板 数采电源板 数采FPGA板 热控板 二次电源板

PFA电子学方案设计示意图

2.2 PFA电子学研制情况-工程样机硬件设计-GPD探测器板



GPD探测器板





GPD探测器板安装在铝板上



GPD安装在探测器机箱中

铍窗厚度100um, 17mm X 17mm。GEM膜微孔直径50um,间距100um。ASIC具有105k像素,像素间距50µm,

2023-8-10

NED2023

2.2 PFA电子学研制情况-工程样机硬件设计-高压电源

PFA高压电源:

• 三路独立可调输出,分别给GEM的Bottom层和Top层,GPD 的漂移电极提供高压

Bottom: 0~600 V

Top: 0~1500 V

Drift: 0~3700 V





高压电源板的实物图

2.2 PFA电子学研制情况-工程样机硬件设计-数采电源板和FPGA板

数采板由数采电源板和数采FPGA板两块电路板组成,

- 1) GPD ASIC参数配置、时序控制。
- 2) GPD高压电源控制;
- 3) GPD温度监控和热控算法;
- 4) GPD ASIC模拟信号采样率10MSPS,采样精度14bit;
- 5) 科学数据和遥测数据采集处理;
- 6) 与卫星平台的LVDS数据通讯接口(传输速率80Mbps);
- 7)与电控箱RS422指令接口(波特率115200bps)。



数采FPGA板

数采电源板



2.2 PFA电子学研制情况-工程样机硬件设计-热控板

热控板特性:

- 采用PWM电路和MOSFET驱动电路产生恒定电压输出;
- 可调恒压输出0~5V,最大电流1.5A;
- 温度控制算法采用FPGA实现,温度稳定度~0.1°C;
- 主备份,分别驱动主备份加热片。





热控板实物图

PFA主动热控设计原理框图

2.2 PFA电子学研制情况-工程样机硬件设计-二次电源

二次电源特性:

- 输入+43V, 输出两路+12V、一路+5V;
- 输入端采用熔断器进行保护;
- 输出端采用共模滤波电路降低共模噪声;
- 采用DCDC模块将43V转换为12V和5V输出。



二次电源DCDC板



二次电源继电器板



二次电源设计框图

2.2 PFA电子学研制 - 工程样机软件设计

(1) FPGA软件

- 与电控箱和卫星平台的数据通讯;
- 接收遥控指令;
- 采集遥测数据和科学数据;
- 电子学自检;
- 控制各组件实现X射线探测。



(2) 上位机测试控制软件

- 发送遥控指令;
- 采集分析遥测数据和科学数据。



上位机软件遥测与控制界面



上位机软件科学数据采集界面

2.2 PFA电子学研制情况-地测设备

- 研制了一套地测设备用于PFA电子学地面测试。
- 功能:1)输出一次电源给PFA电子学机箱;
 - 2) 产生定时信号给PFA电子学机箱;
 - 3)产生PFA电子学机箱的二次电源遥控指令;
 - 4) 采集PFA电子学机箱遥测数据和科学数据后通过USB3.0接口上传到上位机。



2.2 PFA电子学研制情况-工程样机组装



GPD安装在探测器机箱中



电子学机箱



PFA焦平面相机实物与设计效果图对比

探测器机箱与电子学机箱

2023-8-10

0

0.5

b) 温漂<20 ppm/℃@-35 to 65℃ — M 1 — M 2 80 60 -20 -40 20 30 40 50 Time[hour] 2.5 10 0 - Bottom - Top -3615-- Drift Voltage [V] -3618 -3619 50 60

c)长时间稳定性



d) 纹波 ≤40mVpp



NED2023

40

20 30 4 Time[hour]

10

0

60



- Bottom

Drift

1.5 2 Input Voltage[V]

Input Voltage[V]

2.5

3

线性偏差<2%

🔶 Тор

0.5

3000

2500

Output Voltage V

500

Deviation[%]

2.3 PFA电子学测试-高压性能

2.3 PFA电子学测试-主动温控电路



温控电路能使GPD温度升高约10℃



2.3 PFA电子学测试-热真空试验





PFA焦平面相机热真空试验设备

NED2023



PFA焦平面相机热真空试验设备连接示意图

2.3 PFA电子学测试-热真空试验









热真空试验结果:

环境温度-15~25℃内各项功能和性能满足要求。

参数	指标要求	测验结果	
X射线能量分辨	≤ 30%@5.9keV	(22.2 ± 0.2)%@5.9keV, -15 ℃	
		(21.9 ± 0.1)%@5.9keV, 25 ℃	
偏振调制因子	≥50% @5.9keV	6 @5.9keV (52.1±0.2)%@5.9keV, -15℃	
		(53.1±0.1)%@5.9keV, 25 ℃	









偏振放射源测试调制因子结果 调制因子=(53.1 ± 0.1)%@5.9keV

2.3 PFA电子学测试-束线试验



PFA焦平面相机束线试验现场

实验中X射线由百米外的点状X射线源射出,经 过100米管道的传播后,由聚焦镜聚焦,射入 PFA焦平面相机。



2023-8-10

2.3 PFA电子学测试-束流测试

• 能谱测量性能测试



特征线	能量 (keV)	能量分辨 (keV)	能量分辨率
Al-K	1.51	0.51	33.8%
Ag-L	2.98	0.86	28.9%
Ti-K	4.57	1.34	29.3%
Mn-K	6.10	1.37	22.5%







无偏Fe源的残余调制约为 μ= 0.0095 ± 0.0038 70%偏振度Fe源的调制约为 μ= 0.4100 ± 0.0044

因此可知,对于Fe55源调制因子约为0.586,符合设计预期

3 小结

- PFA焦平面相机是PFA载荷实现X射线成像偏振观测的关键设备之一。
- PFA焦平面相机工程样机的设计、组装等研制已基本完成。
- PFA焦平面相机工程样机的热真空试验、束线试验等试验结果表明工程样机功能性能符合设计预期。
- 将进行EMC试验等更多试验,继续优化工程样机,为下一步转阶段准备。

