

HXMT 准直器方案的优化设计*

金颖康^{1;1)} 吴枚² 金永杰¹ 庄人遴¹

1 (清华大学工程物理系, 天体物理中心 北京 100084)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 空间硬X射线调制望远镜(HXMT)的性能与探测器的总灵敏面积紧密相关. 利用蒙特卡罗工具对仪器的本底和点扩展函数进行计算分析, 提出了一种优化的准直器构造方案, 能减少探测单元总质量80多千克, 相当于至少5套新探测单元质量. 在同样的卫星载荷质量限制下, 新方案可以增加探测单元, 达到增大总探测灵敏面积, 提升HXMT灵敏度和角分辨率等性能的目的.

关键词 HXMT 准直器 本底 点扩展函数 蒙特卡罗模拟

1 引言

在 高能天体物理中, 数十 keV 到几百 keV 能段的电磁辐射被称为硬 X 射线. 硬 X 射线能区是研究天体高能过程, 解决天体物理中若干基本问题的关键波段. 但是由于成像技术方面的困难, 对这一能段的高灵敏度高分辨率成像观测还处于起步阶段. 目前运行在太空中的具有在硬 X 射线能段成像能力的卫星主要有欧洲的 Integral 和美国的 Swift. 这两颗卫星使用编码孔径望远镜进行硬 X 射线成像, 这类望远镜对探测器要求高(需使用位置灵敏探测器), 体积庞大, 而且不易屏蔽、本底复杂等缺点. 我国正在研制中的空间硬 X 射线调制望远镜(HXMT)^[1] 采用准直调制型探测器进行对 X 射线的探测, 硬件要求相对简单, 不存在编码孔径望远镜的固有缺点; 利用直接解调方法^[2] 成像, 可以突破仪器的内禀分辨率. HXMT 计划于 2010 年前后发射, 有望实现世界上最高灵敏度和空间分辨能力的硬 X 射线成像.

HXMT 卫星的有效载荷主要由 18 套探测单元组成, 沿两个同心圆环分布, 内环 6 套, 外环 12 套. 每套探测单元由准直器、探测器、光电倍增管构成, 参见图 1. 空间中的硬 X 射线经准直器准直调制后被探测器收集到并通过光电倍增管形成信号, 通过卫星的扫描和直接解调方法, 可以对所扫描的天区进行成

像. 探测器本底越小, 探测器灵敏面积越大, 成像效果越好.

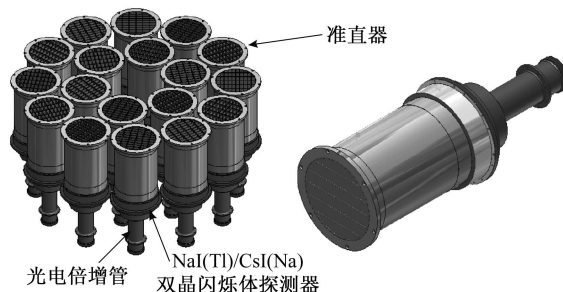


图 1 HXMT 有效载荷示意图

准直器是 HXMT 有效载荷的一项关键技术, 其构造不仅直接决定准直调制度, 而且会影响到探测器的本底水平和探测器灵敏面积. 同时, 由于准直器主要由铅钨等重物质组成, 其质量在有效载荷中占据了很大的份额. 因此, 准直器方案的优化对提升 HXMT 性能和科学产出有重要的意义.

本文利用蒙特卡罗模拟的方法对准直器方案进行优化, 提出了一种新的准直器构型, 能在不影响准直器性能的前提下显著减小准直器的质量. 在卫星总质量一定的约束下, 采用新的准直器构型可以增加探测单元数目, 增大探测器的灵敏面积, 进而达到提升 HXMT 的性能和科学产出的目的. 文中所使用的蒙特卡罗软件包是由 CERN 开发的 Geant4^[3].

2006 - 11 - 02 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077600)和国家自然科学基金(10327301, 10473011)资助

1) E-mail: jinyk03@mails.tsinghua.edu.cn

2 现有方案的讨论

2.1 现有方案设计考虑

图2是现有准直器方案的示意图. 准直器由准直筒和准直栅板组成. 在现有方案中, 准直筒由外层的铝筒和内层的铅铋合金筒组成, 高30cm, 内半径9.4cm, 外半径10.3cm. 其中铅铋合金筒从准直筒顶部往下20cm为等厚度(2mm)的空心圆柱体, 再往下为空心圆台体, 上截面厚度2mm, 下截面(即与探测器接触面)厚度4mm. 准直筒内是沿两个相互正交方向排列的准直栅板, 包括纵向5根横向1根铅铋合金栅板和横向100多根等间距的钽栅板, 这些准直栅板形成的准直孔决定了准直器纵横两个方向的视场. 准直器的下面是NaI(Tl)/CsI(Na)双晶闪烁体探测器.

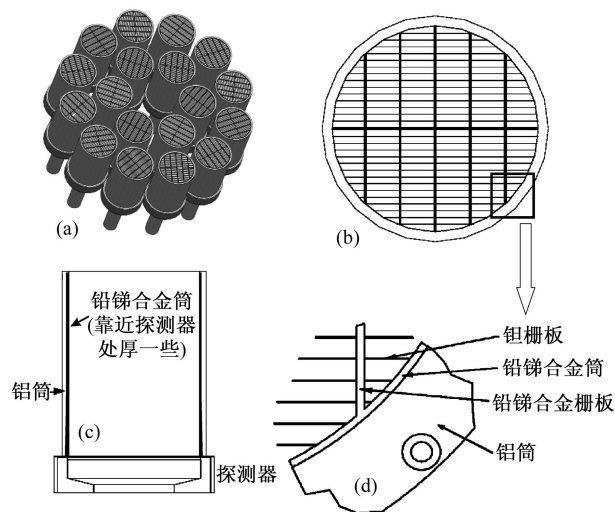


图2 现有方案示意图

(a) 18个探测单元整体模型示意图; (b) 一个准直器俯视图, 其中圆环状为准直筒, 较粗的栅板为铅铋合金板, 较细的栅板为钽板; (c) 准直筒剖面示意图(准直栅板未画出), 准直筒外圈为铝筒, 内圈为铅铋合金筒, 铅铋合金筒为上下不等厚的圆台, 靠近探测器处更厚; (d) 俯视图局部放大示意图.

对于理想的准直器, 探测器上能接收到的光子将完全来自于准直孔中, 即打在准直筒和准直板上的光子能完全被阻挡住. 实际上总会有光子穿透准直物质或与准直物质发生作用后产生次级粒子并在探测器上产生计数, 这些计数都是探测器本底成分的重要组成部分. 铅铋合金筒的作用就是尽可能屏蔽从侧面入射的光子. 现有方案的设计中, 这部分铅铋合金比较厚, 并设计为上下不等厚的圆台, 使得离探测器较近处的屏蔽层更厚, 这些都是为了尽可能多的屏蔽从侧面入射的光子. 对于一个探测单体来说, 这样的设计考虑

是有道理的. 但是, 卫星的有效载荷由18个探测单体组成, 现有方案没有充分考虑到这些单体彼此之间相互如何影响. 下面通过对现有方案探测器本底的蒙特卡罗模拟来定量分析18个探测单体之间的相互影响. 首先介绍模拟使用的输入谱.

2.2 用于模拟计算比较的输入谱

探测器上接收到的本底是影响HXMT性能和科学产出的重要因素. 在轨的HXMT接收到的本底成分可以分为瞬时成分和延时成分. 后者由整个卫星在轨期间产生的放射性核素的衰变引起, 这部分本底大致正比于卫星的质量, 因此旨在减小质量的新方案在延时本底成分上不会高于原方案. 前者主要由光子本底、电子本底和质子本底组成. 由于HXMT使用了塑料闪烁体进行反符合屏蔽, 电子和质子这类带电粒子产生的瞬时本底可以被很好的抑制; 光子本底由宇宙弥漫光子本底和大气光子本底组成, 其中主要是宇宙弥漫光子本底. 综合以上考虑, 本文在进行本底模拟时, 输入成分取宇宙弥漫光子谱. 其能谱可以描述为^[4] (单位 $\text{ph}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MeV}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$)

$$\frac{dI}{dE} = \begin{cases} 0.54 \times 10^{-1.40}, & 10 < E < 20\text{keV}, \\ 0.0117 \times 10^{-2.38}, & 20 < E < 100\text{keV}, \\ 0.014 \times 10^{-2.30}, & 0.1 < E < 10\text{keV}, \end{cases}$$

这一辐射是各向同性的, 但是被地球遮挡的一部分方向内没有弥漫光子本底, 在模拟计算中要把这部分除掉.

需要指出, 真实的光子本底是非常复杂的^[5], 但在本文中为了比较两种方案, 可以使用这一能谱作为统一的输入谱.

由于HXMT的探测能区为20—250keV, 因此本文中除非特殊说明, 本底均指20—250keV能区的本底. 另外为了方便比较, 本文中所提到的本底计数率均指平均到每个探测器上的计数率.

2.3 现有方案弥漫光子本底结果与讨论

利用Geant4软件包对现有方案的弥漫光子本底进行计算. 为了讨论18个探测单元之间的相互影响, 分别计算模型为只有1个探测单元(图1右图)和18个探测单元(图1左图)整体模型两种情况下的弥漫光子本底. 结果当模型为只有1个探测单元时, 本底为: 14.10counts/s; 当模型为18个探测单元时, 平均到每个探测器上的本底为: 3.87counts/s. 可见模型为18个探测单元时平均每个探测器上的本底比模型为1个探

测单元时的本底小很多。

下面分析这两种模型的弥漫光子本底差距的来源。弥漫光子本底可以分为两部分,一部分由准直器的孔中直接泄露造成,另一部分则是由能量较高的光子从准直器侧面穿透准直物质或与准直器物质作用后产生次级粒子并最终造成本底计数。对于第一部分本底,即泄露成分,可由探测器对准直器孔所张的几何因子计算得到,约1.03counts/s,这部分本底对于模型为1个探测单元和18个探测单元这两种情况是相同的。因此当模型为只有1个探测单元时,大部分本底是从侧面入射穿透准直物质或产生次级粒子后造成的,计数率约13.07counts/s,而当模型为18个探测单元时,侧面入射产生的本底降到了2.84counts/s(见表1)。

表1 现有方案本底模拟结果

	模拟使用的模型	
	1个探测单元	18个探测单元
弥漫光子总本底/(counts/s)	14.10	3.87
孔径泄露本底/(counts/s)	1.03	1.03
侧面入射本底/(counts/s)	13.07	2.84

可见,模型为18个探测单元时,侧面入射光子造成的本底远小于模型为1个探测单元的情况,从而造成了模型为18个探测单元时的总弥漫光子本底比模型为1个探测单元时小。这说明18个探测单元之间相互屏蔽作用的影响是很大的。

3 新方案设计

3.1 新方案构造

前面对本底成分的模拟计算和分析提示我们,18个探测单元之间的相互屏蔽可以大大降低侧面入射穿透准直器物质或产生次级粒子造成的本底。因此,原方案中设计的屏蔽侧面光子的铅铋合金筒可以改成非常薄的一层,达到减轻准直器质量的效果。这个相互屏蔽效应造成的影响是原方案设计时没有充分考虑到的。同时,在18个探测单元的外围加一些屏蔽材料,使得入射的高能光子在入射到探测器或准直器上之前就发生衰减,次级光子的能量和流强都将降低,这样就能更好的抑制侧面入射穿透准直器物质或产生次级粒子造成的本底。

由此,我们设计了新的准直器方案,相对原方案的改动如下(参见图3):

1) 在18个探测单元的外圈和内圈各加一层3mm厚的圆环状钽板,这两圈钽板除了屏蔽作用外还能起

到支撑件的作用;

2) 原方案中准直筒由外层的铝筒和内层的铅铋合金筒组成,在新方案中,铅铋合金筒将全部由铝代替,然后在铝筒内壁镀很薄的一层铅。基于镀铅工艺的考虑,这部分铅的厚度为0.1—0.2mm;

3) 原方案准直器有纵向5块和横向1块铅板,将横向的1块换成6段钽板,厚度与准直器中使用的钽板相同;将纵向的5块2mm厚的铅板换为2mm厚的钽板,然后在铝板的两侧镀铅,镀层的厚度与准直筒内壁相同。

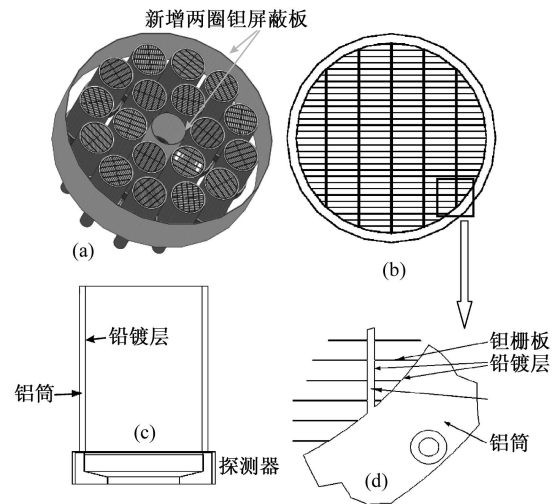


图3 新方案示意图

(a) 18个探测单元整体模型示意; (b) 一个准直器俯视图,其中圆环状为准直筒,较粗的栅板为铝板,两侧镀铅,较细的栅板为钽板; (c) 准直筒剖面示意图(准直栅板未画出),准直筒为铝筒,内层镀铅; (d) 俯视图局部放大示意图。

采用新方案之后,每个准直器的质量是10.308kg,相比较于原方案的每个准直器19.626kg减轻了约47.5%。扣除增加钽板造成的质量增加约80.000kg,整体方案比原方案减轻质量达87.734kg,相当于至少5套探测单元的质量。由于新方案中增加的钽板可能同时起到原方案中许多支撑件的作用,因此采用新方案可能会去掉原方案中的一些支撑件,实际能减小的重量应该更大。

3.2 新方案弥漫光子本底

利用Geant4软件包对新方案的弥漫光子本底进行模拟,得到平均到每个探测器上的本底计数率为:2.07counts/s,约为原方案本底计数率的53.5%,其中由侧面入射产生的光子本底从2.84counts/s降低到了1.04counts/s。

可见,采用新方案减轻探测单元质量之后,弥漫

光子本底不但没有变大,反而变得更小,这正是由于新方案中在18个探测单元之外增加了屏蔽层,使得弥漫背景光子在入射到探测单元上之前先经过一层屏蔽,这样使得能入射到探测单元上的背景光子的能量和流强都有一定程度的降低,从而减小了探测器上接收到的本底.这对于探测器的性能提升和卫星的科学产出都是有益的.

3.3 新方案点扩展函数的计算

新方案有效地降低了准直器的质量和探测器上的本底计数,但由于新方案将准直筒内壁的铅变薄,有可能会影响到准直器的调制性能.

衡量调制性能的物理量是整个探测器的点扩展函数(psf).对两种方案的点扩展函数进行模拟计算并进行比较.分别计算窄视场方向和宽视场方向的psf.在HXMT的探测能区内,光子能量越高穿透同样厚度材料的概率越大,为了使得改变屏蔽材料厚度造成的psf的变化更明显,取200keV的单能光子进行模拟计算,这样得到的psf是偏离理想psf较大的结果,如果这个结果能够接受,那么对于探测能区的大部分光子准直器的准直性能是可以接受的(能量高于200keV的光子计数比较少).

首先模拟出平行光子正对探测器入射产生的计数率,然后让入射光子方向沿窄视场方向变化,模拟出几个不同方向入射时探测器上的计数率,这样即可得到沿窄视场方向的psf.结果如图4所示.

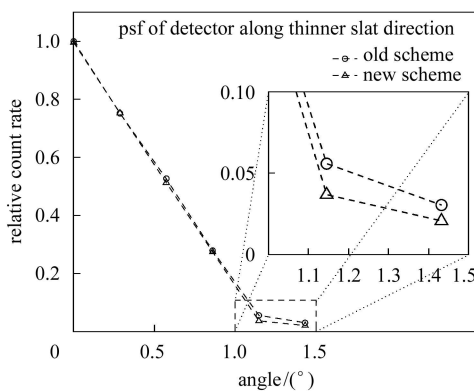


图4 窄视场方向psf

对于理想的准直器,其psf在入射光子方向偏离正中方向的角度超过视场的时候应该为0,但对于实际的准直器,光子总有一定的概率穿透准直板,因此实际的准直器的psf形状通常如图中所示.我们看到在窄方向上,准直筒屏蔽材料变薄对准直器的psf影响很小,这是由于窄方向上的准直板比较密(参看图2中准直板构造),因准直筒屏蔽材料变薄而可能透过的

斜向入射的光子,它们要在探测器上产生计数还面临着许多准直板的阻挡.

但是对于宽视场方向,准直板只有5块,比较稀疏,准直筒屏蔽层变薄可能对宽视场方向的psf产生比较大的影响.模拟得到的宽视场方向的psf结果如图5所示.

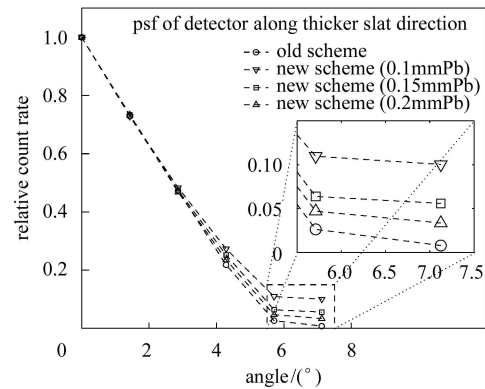


图5 宽视场方向psf

结果表明铅镀层太薄(0.1mm)的情况下准直器在宽视场方向的调制性能变得很差,镀层厚度取0.2mm比较合适.

下面估计调制度变化造成的灵敏度变化.由于调制度变差增加的计数率相当于增加了一些本底,当镀层厚度取为0.2mm时,计算可知在200keV处调制度变化相当于本底增加了4.35%,也就是相当于灵敏度变差了约2%(灵敏度反比于本底计数率的1/2次幂),影响是很小的.可见新方案(镀层厚度0.2mm)的调制度变化对灵敏度造成的变化是可以忽略的.这个估计比较粗略,严格的比较需要通过模拟成像来进行,但这个粗略的估计物理上更直观,也足够说明新方案的调制度变化对仪器灵敏度影响非常小.

4 总结与讨论

在高能天文仪器的设计和优化中,对一些定性分析难以得出确切结论的问题,蒙特卡罗模拟能给出定量的指导.本文利用蒙特卡罗模拟对HXMT的准直器方案进行了优化设计,给出了一个新的准直器方案.

在原方案的设计中,主要考虑一个探测单元的性能,没有充分考虑到多个探测单元之间的相互屏蔽作用(定性的分析无法精确知道这个作用能有多大的影响).深入的模拟计算表明这个作用的影响是很大的,多个探测单元之间的相互屏蔽极大的降低了从侧面入射产生的光子本底.在此基础上设计了新的准直器方

案. 对两种方案的本底和调制能力进行比较计算的结果表明, 新方案能减轻整体有效载荷的质量约 80 多千克, 相当于至少 5 套探测单元的质量, 降低探测器上接收到的本底计数为原方案的 53.5%, 同时几乎不影响准直器的调制性能. 在限定卫星载荷总质量的情况下, 采用新方案可以适当增加探测单元, 达到增加探测面积、优化整个仪器灵敏度和角分辨率的目的.

另外, 原方案的设计中, 越靠近探测器处的屏蔽材料越厚, 这个设计可能使得感生本底比较大, 因为感生本底是正比于质量的. 新方案中将屏蔽材料集中在探测单元之外, 靠近探测器处质量更少, 这样的设

计应该能很好的降低感生本底. 这里只是定性分析, 有待进一步的模拟计算验证.

本文提出的对准直器的优化方案的核心想法是充分利用多个探测单元之间的相互屏蔽作用, 用一个整体的屏蔽层来取代每个探测单元的屏蔽层, 达到减轻重量和降低本底的效果. 这一想法对其他类似结构的准直形探测器也有参考意义.

在成文过程中, 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心张澍副研究员给予了有益的指导, 张爱梅同志提供了相关图片资料, 特此致谢.

参考文献(References)

- 1 LI T P, ZHANG S N, LU F J. Chinese Journal of Space Science, 2006, **26**(Supplement): 30
- 2 LI T P, WU M. AP&SS, 1993, **206**: 91
- 3 Agostinellis, Allison J, Amako K et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A506**: 250—303
- 4 Dean A J, Bird A J, Diallo N et al. Space Science Reviews, 2003, **105**: 285—376
- 5 Peter K F Grieder. Cosmic Rays at Earth. Amsterdam: Elsevier Science, 2001

An Optimized Collimator Scheme of HXMT^{*}

JIN Ying-Kang^{1,1)} WU Mei² JIN Yong-Jie¹ ZHUANG Ren-Lin¹

¹ (Department of Engineering Physics and Center for Astrophysics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

² (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The performance of the Hard X-ray Modulation Telescope (HXMT) is significantly influenced by the collecting area. Based on the simulations of the background and the point spread function of the instrument, we propose a new collimator scheme in which the weight of the whole detectors can be decreased about 80kg. This is equal to the weight of 5 or more new detectors. We hope this new scheme will help to increase the number of detectors under the total loading mass limit, so that the collecting area will be larger and the performance of HXMT will be better.

Key words HXMT, collimator, background, point spread function, Monte Carlo simulation

Received 2 November 2006

^{*} Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077600) and NSFC (10327301, 10473011)

1) E-mail: jinyk03@mails.tsinghua.edu.cn