

我所经历的慧眼卫星 研制过程

卢方军

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1993年2月,我从北京师范大学天文系硕士毕业后进入高能所,跟随李惕碛老师攻读博士学位。当时正值20周年所庆,不觉间,很快就要迎来50周年所庆。30年间,我有幸见证、参与了慧眼卫星提出、论证、研制、发射以及观测研究的整个历程。在本文中,我将介绍自己经历或了解的一些场景,谈点自己的感想。需要指出的是,我并不试图,也不可能全面呈现卫星论证和研制的全过程。

一、与硬X射线调制望远镜卫星结缘

到高能所后的头半年,李老师让我跟随马宇蓓老师分析欧洲伽马射线天文卫星COS-B的数据,主要是熟悉高能天体物理数据的特点和处理方法,同时看能不能有所发现。第二个半年,我和来自中科院其他研究所的博士研究生一起在研究生院集中学习英语。记得英语学习临结束前的一个晚上,同学们一起聚餐,喝了点酒,我带着几分醉意回到天体楼二楼的办公室,晕晕乎乎间,我一向惧怕的李老师过来找到我,询问我的工作进展情况,并拿给我英国莱切斯特大学Andrew John Norton的博士论文《Galactic X-ray Astronomy with EXOSTA》。EXOSAT是“欧洲X射线天文卫星”的英文缩写,论文的第5章介绍了EXOSAT上的准直型中能X射线望远镜ME对银道面的扫描观测以及利用交叉相关分析方法得到的银道面X射线图像。李老师让我用直接解调方法重新分析EXOSAT/ME扫描观测数据。

1970年代末,在李老师、顾逸东老师等的带领下,中国开始用高空科学气球搭载硬X射线探测器进行天文观测。直接解调方法是李老师和吴枚老师在分析气球观测数据和国外天文卫星观测数据的过程中,为解决传统分析方法分辨率低的问题而提出的。1993年3月,李老师、吴老师和陆柱国老师等人发表文章,提出“调制成像 γ 射线望远镜”概念,建议用准直型望远镜和扫描观测,通过对观测数据进行直接解调成像,获得天空20-1000keV能区的高灵敏度的图像。当年夏天,中国天文学会和中国科学院数学学部向全国征集大型天文项目提案,李老师和北京天文台时任台长李启斌联合提出基于直接解调成像方法的“硬X射线调制望远镜”(Hard X-ray Modulation Telescope,简称HXMT)。该提案被遴选进入第二轮,获得少量经费继续开展论证和预先研究,其中直接解调方法是论证的内容之一。虽然,在1993年9月25日的HAPI-4球载飞行实验中,直接解调方法和使用准直型望远镜扫描观测获得高分辨率X射线图像的可行性已经得到验证,但李老师希望我用直接解调方法分析EXOSAT/ME银道面扫描观测数据,并通过和国外的分析结果直接比较,进一步验证HXMT方案的可行性和成像方法的有效性。

在李老师和吴老师的指导以及孙学军等的帮助下,我的工作进展顺利,到1994年中,主要结果就出来了。与传统的交叉相关分析结果相比,直接解调成像的结果明显具有更高的分辨率和灵敏度,后

来被多次应用到HXMT卫星的项目建议书和可行性论证报告中,我也因此和HXMT卫星结缘。

二、早期技术方案和预研

在1993年提出的HXMT卫星最初方案中,有效载荷包括 5400 cm^2 的 NaI(Tl)/CsI(Na) 复合晶体探测器、 1120 cm^2 的多丝正比计数器以及伽马射线暴监视器。

1995年5月,陆柱国老师和航天总公司501设计部吴开林执笔,501设计部刘兵和高能所王建中、林宝军、吴伯冰等参与,李老师审定,完成《空间高能X射线望远镜方案可行性论证报告》,英文简称仍是HXMT。经过了一年多的论证,此时HXMT的载荷方案被简化,只保留 5400 cm^2 的复合晶体探测器(也称为高能X射线望远镜)阵列,主要是为了降低卫星的重量和造价,提高项目的可行性。

但是,因为没有足够的经费支持,项目推进不如人意,加之其他各种原因,多位技术骨干相继离开HXMT项目。王建中博士毕业后不久去了美国;林宝军因为载人航天工程任务的需要,调往中科院空间科学与应用研究中心工作;而令人悲痛的是,陆老师在1995年秋赴意大利开会并与俄、意等讨论HXMT合作的路途中,因脑溢血病逝于莫斯科。

在李老师等人的努力下,2000年,以HXMT预研为主要内容的科技部973项目“天体高能辐射的空间观测与研究”立项,这对HXMT项目来说是一个重要的转折点。李老师担任该项目的首席科学家并兼任课题二的组长,宋黎明、吴枚、尚仁成、顾逸东、尤政分别担任其他5个课题的组长。2002年项目中期评估之后,增加张双南任首席科学家助理;此外,在项目执行过程中,庄人遴、王焕玉、姜鲁华、吴伯冰等也先后担任过硬件的负责人。

在这个973项目中,我担任课题二“天体高能辐射过程研究”的副组长,协助李老师工作。2001年初,我申请前往美国做博士后。正是需要人手的时候,

李老师虽然心里勉强,但为我个人发展考虑,还是同意了我的申请。这是我至今心存感激又颇为内疚的一件事。2002年8月,我在麻省大学做了15个月的博士后研究后,回到国内,从此将主要的工作精力投入到HXMT卫星项目之中。

973项目经费近2000万元,加上匹配的中科院知识创新工程项目和清华大学985项目经费,合计共4000万元,这在当年是一大笔钱。在此支持下,至2005年9月项目结题时,HXMT卫星的关键技术研究取得显著成果,包括完成卫星总体方案,研制成功主探测器、准直器和荷电粒子屏蔽探测器工程样机,建成HXMT望远镜1:1地面样机(图1),并通过样机的放射源扫描成像实验证实了用HXMT实现高分辨成像的可行性。



图1 HXMT望远镜1:1地面样机,现存于国家博物馆

三、背景型号研究与载荷方案改进

2005年4月24日,陈勇在参加“深空探测与空间科学系统论证研讨会”时获悉,主管国家民用航天的国防科工委即将启动“十一五”空间科学发展

规划项目的公开遴选。陈勇回来一通报,大家马上认识到这对HXMT来说是一次难得的机会,我也因此将原计划5-7月赴美国麻省大学的访问推迟一个月,利用这一个月的时间主笔基本完成了项目建议书的编写。我6月初赴美之后,吴伯冰接手完成了建议书编写的后续工作。

8月,国防科工委在函评的基础上筛选出候选项目,并就候选项目召开专家咨询会,在候选项目进行面对面的竞争和答辩后,评审专家各自具名提交了评议意见。9月初,第二届高能所-清华大学研究生天体物理研讨会在辽宁葫芦岛市举行,我们空间高能天文组的大部分人都去参加会议。7日傍晚,在返京的大巴上,接到了HXMT被遴选为“十一五”民用航天空间科学卫星项目的消息。师生们一路歌声不断……

考虑到前期预研主要侧重于探测技术,国防科工委决定在正式立项之前进行一年的背景型号研究,并在10月9日组织了背景型号任务书的评审。由于对背景型号研究的目标和任务定义不够清楚,当天未能获得孙家栋、王希季等专家组成的评审组对任务书的认可;在调整任务书内容和研究方案之后,10月18日,补充评审通过。在补充评审会上,王希季先生提了五条建议,其中第一条就是要求承担卫星总体的航天五院将高能所带入航天。我笔记本上的记录是:“高能所是做核的,这是头一次做主载荷上卫星,在这次才真正进入航天领域,总体有责任使高能所顺利进入航天。这里的工作相当重,要加以强调!规矩、规范都得变。”这些话,既反映了老一辈科学家对高能所初入航天的担心,更反映了他们那种通力协做的大局观和确保万无一失的高度责任感。后来李老师曾在不同场合多次提到王先生的讲话,以提醒高能所从事空间工程的管理和技术人员按规范行事。

至此,万事俱备,只欠东风。

但是,东风却没有如期到达。在即将正式开始背景型号研究的时候,有专家对HXMT卫星的科学

目标和数据分析方法提出质疑,影响了机关决策。这段时间对项目组是艰难的,除了项目前景不明,还面临着部分科学目标可能被国外抢先实现,经费严重缺乏,以及部分技术骨干转移到其他工程任务上等等困难。

在这种情况下项目组没有死等,一方面抓紧推进正式工程立项,另一方面着力进一步提升卫星的探测能力。

2005年8月,在国防科工委组织项目遴选的时候,陈勇就建议增加软X射线探测器,拓展HXMT卫星在低能段的探测能力,同时进行脉冲星导航试验。2006年1月,在海南召开HXMT国际学术讨论会,会上陈勇做报告,介绍了使用扫式电荷器件(SCD)阵列的HXMT低能X射线望远镜方案。但与会的英国科学家认为,这一低能X射线望远镜方案可以实现的技术指标过低,而且造价过高,建议在HXMT卫星上增加一台基于Si-PIN探测器的中能X射线望远镜,由英国负责研制。

因为HXMT没有正式立项,加之国际合作的复杂性,英国研制中能X射线望远镜的方案没有落实。但在HXMT有了高能和低能X射线望远镜的基础上,再增加一台中能X射线望远镜的想法却引起了我们的兴趣。2006年夏季,刚刚博士毕业的曹学蕾找到我,提出使用自研的Si-PIN探测器来建造中能X射线望远镜。当时,项目组内不少人对自研探测器的性能、可靠性和技术成熟度都信心不足,作为备份,与Si-PIN方案同步推进的还有清华同方负责的CZT方案。

经过了大半年的时间,质疑得到澄清,中国科学院正式致函科工委,表示对HXMT项目的支持。2006年10月18日,国防科工委系统一司组织了HXMT背景型号研究任务书的再审查,孙家栋、王希季等再次与会。我在会上做了关于有效载荷和地面应用关键技术研究任务书的报告,包括高能X射线望远镜、中能X射线望远镜和低能X射线望远镜的有效载荷方案在会上获得通过,但专家们同时

也表示非常担心中能和低能X射线望远镜的技术成熟度。

这次会上,王希季先生再次强调航天五院卫星总体要帮助高能所进入航天,他说:“(前一段)总体不得力,把高能所当作协作单位,一切(关键技术)让高能所解决,你(总体)舒服了!”,“高能所适应航天工程的一点一滴程序,如结构、温控,总体都应该承担”,“卫星说没有关键技术……把整个规范传给高能所,就是关键技术!”

前不久,在网上看到王希季先生过101岁生日的报道,我不由得又想起他当时讲话的情景。

后来又几经周折,在李老师的不懈努力和多位院士专家特别是何泽慧先生、卢炬甫教授等的呼吁下,HXMT项目得到了温家宝总理的关怀。2011年3月,项目提出18年之后,国家国防科技工业局和财政部联合下达关于HXMT卫星工程立项的批复,要求用40个月左右完成HXMT卫星的研制,择机发射。有效载荷研制的部分经费由国家民用航天科研经费承担,部分经费由中国科学院空间科学先导专项承担。

此时,虽然HXMT原计划的部分科学目标已经被欧美抢先实现,但HXMT方案也从原来只有高能

X射线望远镜演化为拥有高、中、低能X射线望远镜,宽波段、大面积、高时间分辨率和能量分辨率,既能对重要天体进行高精度定点观测又可以进行大天区扫描观测的空间X射线天文台(图2)。

四、一路坎坷的工程研制

如果说卫星立项论证和预研的18年道路曲折,那么随后的卫星工程研制则可以用坎坷甚至艰难来形容。

2011年,完成了卫星系统(含有效载荷)的人员队伍组织、方案设计和转初样等工作;2012年底,完成了有效载荷初样电性件研制、验收并交付卫星总体,参加整星电性星测试,同时,结构热控件和准鉴定件参加整星热平衡试验。由于有较长时间的工作积累,而且工作的特点和以往进行的地面实验研究类似,虽遇到了一些小的问题,进度延后几个月,但总的来说还比较顺利。

进入鉴定件研制和试验阶段后,问题来了。在整个初样阶段,共发生技术归零的质量问题25个,其中高能、中能和低能X射线望远镜分别有8个、7个和9个,还有一个与高能和中能均有关的高压模

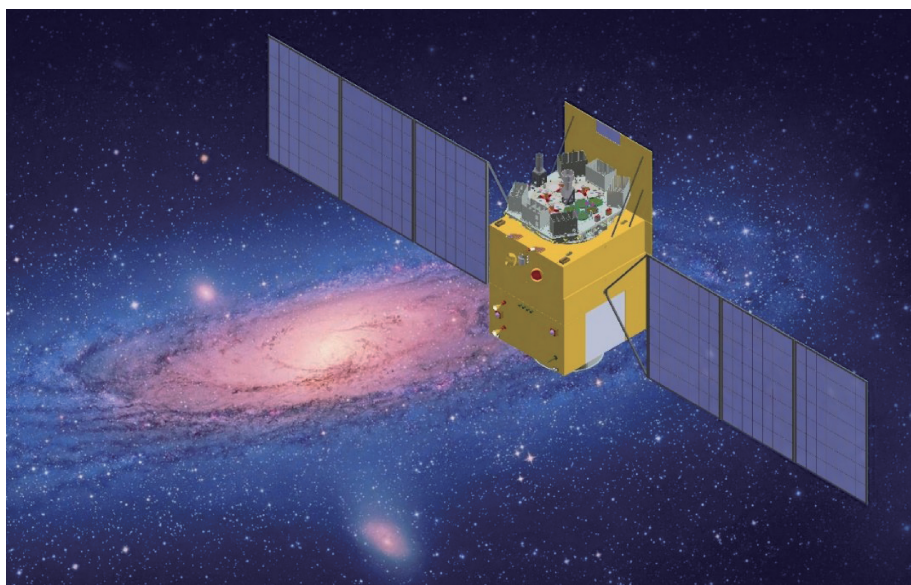


图2 HXMT设计示意图

块问题。这些问题大部分都发生在初样鉴定件阶段。每个问题出现后,都要按照“定位准确、机理清楚、问题复现、措施有效、举一反三”这五条标准把相关工作做完整,过程非常艰辛,但确实大大提高了技术人员分析和解决问题的能力。

这些归零工作中,让人记忆最深刻的是高压模块问题的归零过程。

高压模块是从意大利某公司采购的,标称工作温度为 -55°C 至 125°C ,在国内外很多实验中使用。HXMT有效载荷飞行产品要使用57只高压模块,此前这种模块在初样电性件和鉴定件中表现良好。但是,2014年5月1日发现,刚经过热循环筛选试验的107只高压模块有4只功能失效。拆开出现问题的高压模块,发现电阻管脚和电路板之间的焊点开裂,致使接触不良;即使是试验后性能正常的高压模块,拆开后发现电阻的管脚和电路板之间的焊点也存在较小的裂缝,只是依然可以导通,尚未影响到性能,但是存在很大的安全隐患。

正样的关键元器件出现问题,引起了卫星总体和中科院空间科学先导专项总体的高度关注,要求尽快彻底解决问题。

经过分析和试验,以及与厂家沟通,确认焊点开裂的原因是高压模块中灌注的绝缘胶在筛选试验的高低温循环过程中热胀冷缩,使焊点频繁受力,疲劳开裂。专家们建议将电阻管脚和电路板之间的硬连接改为用软导线连接,降低绝缘胶膨胀对焊点的拉力,同时加大焊点的焊锡量,使焊点更加牢固。这一修改方案通过了热循环试验的验证。

由于元器件采购周期等原因,意大利厂家无法在短期内再为HXMT生产一批高压模块,而国内的厂家因为对高压模块本身不够熟悉,也不敢承担维修任务。在此情况下,只能将这些受损的高压模块返回意大利原厂家维修。7月7日,有效载荷总指挥王焕玉和我抵达比萨,与厂家协商达成了在10月份完成120只产品维修的协议。

为了验证维修工艺和质量,意大利厂家按照中

方的要求第一批进行了4只高压模块的维修,9月初返回中国进行筛选试验。试验的结果表明,焊点开裂的问题虽有改善,但依然存在。问题出现四个多月,仍没有得到圆满解决,上级领导极为担心,对高能所进行了严厉的批评。在此情况下,具体负责技术的有效载荷副总师徐玉朋飞到意大利,帮助厂家就软线缆的选择、焊点的要求等各个环节制订维修工艺文件,并且约定由高能所技术人员对每一个工艺环节的实施质量进行把关,从而彻底解决了维修质量问题。至2015年2月底,维修并二次筛选后的高压模块具备装机状态。此时,距离发现问题正好十个月。

经过2014年一整年的努力,完成了初样阶段全部技术问题的归零工作。2015年3月,在完成有效载荷正样技术状态再确认后,全面启动正样件生产。

但正样件的生产过程并不如预想的顺利,其中,中能X射线望远镜遇到的困难最大。

中能X射线望远镜分系统主任设计师曹学蕾在文章《不言放弃|写在“慧眼”运行一周年》中写道:“2015年于ME来说,是灾难的一年!在这之前,中能也是历经磨难,却总还是有些解决问题的时间和空间。而2015年,这本来是计划中的正样交付时间,我们却在第一个探测器机箱的加电测试中,看到了最不想看到的结果。”

7月15日,中能望远镜第一个探测器机箱正样送进天体楼一层的高低温试验箱做标定测试,预期降温一晚上后,第二天一早就可以得到测试结果,大家都很期待。次日早上6点半左右,我进到测试间,是杜园园在值班,问她情况,她说不太好,并说曹老师刚来过。一会儿,曹学蕾从办公室拿了记录本进来,心情紧张地对我说,情况很不好。稍后一统计,一个机箱576路探测器中,工作正常的只有46路,另有93路噪声过大,437路触发很少,基本没有有效信号。这种灾难性的情况,在电性件和鉴定件的研制中并没有碰到。用曹学蕾的话说:“统计完结果,整个人都是懵的。”

通过密集的开会讨论和试验验证,确定噪声过大的探测器通道是被不明气体污染了,而通道触发变少的原因则是ASIC遭到了静电损伤,导致触发功能模块受损。裸露的硅基X射线探测器对环境的要求之高以及读出ASIC芯片对静电如此敏感(在20多伏静电压下就会被损坏),是我们和航天工业界此前完全没有认识到的。五院的专家后来说,抗静电能力低于500伏的器件一般不允许在航天上使用。

为了满足产品可靠性和计划进度的双重要求,此后,我们一方面制订了一整套严格的工艺和环境控制措施,高能所技术人员全流程跟产,另一方面抓紧重新投产探测器。期间又是困难重重。11月13日晚上,我加班后回家,路上雾霾沉沉,灯光昏黄,联想到中能望远镜当时的状况,心情压抑,但又必须坚持。我在微信朋友圈贴了几张天气晴好时拍的照片,写道:“霾迷灯黄城昏,境困云愁意定,天高山远水澹,墙白叶红秋明”,既鼓励同事,也给自己打气。

直至2016年5月,中能X射线望远镜第三个

机箱完成标定后交付,随卫星开展后续环境试验(图3)。

2016年8月9日,有效载荷正样出厂报告通过评审。根据有效载荷出厂测试的最终结果,高能X射线望远镜的主要技术指标达到国际领先水平;中能X射线望远镜的技术指标中,除了面积(因为星上部分资源给了低能望远镜)是英国同行提出指标的一半以外,其他指标基本相同;低能X射线望远镜实现的探测面积、能量分辨率和时间分辨率相较十年前英国同行预计的指标则提高了5倍左右。十年艰难路,既说明专家们的担心是有道理的,同时也实现了提升卫星观测能力和显著提高实验室技术水平的双重目标,是值得的。

2016年9月1日,HXMT卫星系统通过航天五院组织的出厂评审,计划在当年11月底前使用长征四号乙运载火箭发射。但是,就在9月1日凌晨,一枚同系列火箭发射失利,出于安全性方面的考虑,HXMT卫星的发射再次延后,以对火箭相关技术的可靠性进行再验证。在经过半年多的分析论证和试验验证之后,2017年4月底,卫星运抵酒泉卫星

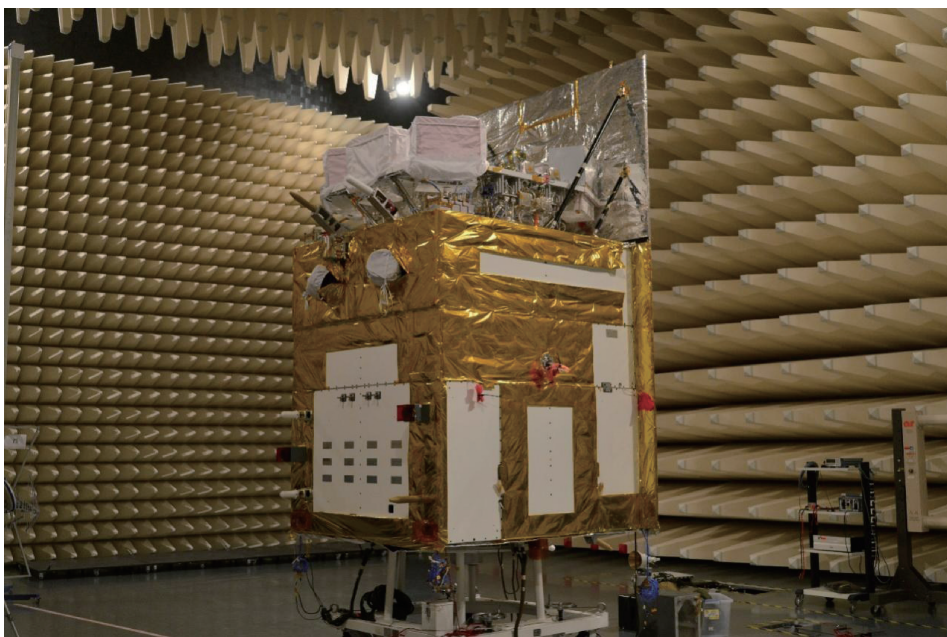


图3 HXMT卫星正样星电磁兼容性实验



图4 慧眼卫星有效载荷试验队诗词集

发射基地。

五、发射场的诗词大会

在发射场，一切顺利。几年奋战，临近完成工程任务，有效载荷试验队的队员们心情大好。诗歌是表达情感的最好方式，几乎每个队员，无论文学底子如何，这时候都诗兴大发。有效载荷总指挥王焕玉和高能X射线望远镜分系统主任设计师刘聪展是才子，他们觉得写诗还不过瘾，又带头写起了长短句。李旭芳、刘红薇等把这些诗词收集起来，编成了一本38页的《“慧眼”卫星有效载荷试验队诗词集》(图4)。

诗词集中，也有我写的几首(阙)，被人评价为“好懂”、“接地气”、“文字平实”等等。我知道，这是对打油诗的一种友好的说法。不过，有了心情舒畅和豪情万丈，文字真的不重要！

2017年6月15日上午11点整，HXMT卫星搭载长征四号乙运载火箭顺利升空。入轨后，HXMT卫星被命名为“慧眼”。这个由地面应用系统副总师张澍率先建议的名字，含义之一，就是纪念何泽慧先生对推动我国高能天体物理观测研究和HX-

MT卫星立项做出的贡献。

发射完成后，参与有效载荷在轨测试的技术人员即刻离开发射场赶往西安卫星测控中心。我中途在酒泉市停顿一天，参加关于“慧眼”及“慧眼”后续型号——增强型X射线时变与偏振空间天文台(eXTP)的一个小型国际研讨会，再飞往西安与他们汇合。受王焕玉和刘聪展的影响，在离开酒泉卫星发射中心的大巴上和抵达西安卫星测控中心望月楼宾馆后，我用最简单的格律，分别写了平生的第一和第二阙词，其中第二阙收录于《“慧眼”卫星有效载荷试验队诗词集》的最后。我改个别字放在下面，也作为本文的结尾。

清平乐·转战西安

才别慧眼，
又往西京赶；
漫漫征程人不倦，
为有思念无限。
路边几处坝声，
心中万般柔情；
仿佛悠悠往事，
还为宇宙而生。