0254-6124/2026/46(5)-0001-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZOU Hong, ZHONG Weiying, HAO Yongqiang. Review of the Development of the In-Satellite Particle Detector for the China-Brazil Earth Resources Satellite-1 (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1–8. CSTR:32142.14.cjss.2025–0164. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0164

中巴资源一号卫星星内粒子探测器研制回顾*

邹 鸿[1] 仲维英[1] 郝永强[2]

1(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

2(中山大学大气科学学院 珠海 519082)

摘 要 中巴资源一号 01 卫星星内粒子探测器是北京大学项目组研制的第一个空间粒子辐射探测载荷. 该载荷的主要功能是对卫星内部高能电子和质子的辐射环境进行监测. 本文详细介绍了星内粒子探测器的研制过程、发射和在轨运行、数据处理以及基于载荷数据发表的研究成果. 对观测结果的分析和研究表明, 星内粒子辐射探测器在轨工作正常, 性能指标满足要求, 观测结果符合预期. 中巴资源一号 01 卫星星内粒子探测器的成功研制开创了中国高校研制星载粒子辐射探测载荷的先河, 为北京大学空间探测载荷研制能力的提升和承担后续研制任务奠定了坚实的基础.

关键词 中巴资源一号卫星, 星内粒子探测器, 空间探测技术, 高能粒子

中图分类号 P356

Review of the Development of the In-Satellite Particle Detector for the China-Brazil Earth Resources Satellite-1

ZOU Hong[1] ZHONG Weiying[1] HAO Yongqiang[2]

1(*School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871)

2(*School of Atmospheric Sciences, SUN YAT-SEN University, Zhuhai* 519082)

Abstract The In-Satellite Particle Detector onboard the China-Brazil Earth Resources Satellite-1 (CBERS-1) was the first space particle radiation detection payload developed by the project team at Peking University. The main objective of this payload was to monitor the high-energy electron and proton radiation environment inside the satellite. The payload probe consists of an electron probe and a proton probe. The electron probe is a ΔE-E telescope composed of a 100 um-thick silicon surface barrier detector and a 5000 μm-thick lithium drift detector, capable of measuring electrons ranging from 0.5 to 2.0 MeV and above 2.0 MeV, while eliminating proton contamination. The proton probe is a telescope consisting of two silicon surface barrier detectors with thicknesses of 100 μm and 450 μm respectively, ca-

* 国家自然科学基金面上项目资助 (42274225)

2025-09-19 收到原稿, 2025-11-19 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

pable of measuring protons ranging from 5 to 30 MeV and 30 to 60 MeV. From the task assignment in 1987 to the delivery of the flight-mode payload in 1998, the development process underwent four stages: principle-mode, electrical-mode, qualification-mode, and flight-mode, spanning over 11 years. On October 14, 1999, the CBERS-1/01 satellite was successfully launched. The In-Satellite Particle Detector was powered on three days later and successfully transmitted data, and then operated normally in orbit until the end of the satellite's lifespan. After preprocessing the payload's data and matching it with satellite orbit information, the data suitable for scientific research was obtained. The data analysis proved that the In-Satellite Particle Detector performs well in orbit, and its observations are in accord with expectations. Based on the payload's data, several papers on radiation belt research have been published. The successful development of the In-Satellite Particle Detector onboard CBERS-1 marks a milestone in the development of space particle detectors by Chinese universities, and lays a solid foundation for the subsequent development of space detection payloads at Peking University.

Key words China-Brazil Earth Resources Satellite, In-Satellite Particle Detector, Space detection technology, Energetic particles

0 引言

20 世纪 90 年代, 中国星载空间高能粒子探测载荷研发尚处于起步阶段. 北京大学研制了中巴资源一号卫星 (China-Brazil Earth Resources Satellite-1, CBERS-1) 星内粒子探测器, 开创了中国高校作为承研单位研制星载空间环境探测载荷的先河. 本文系统梳理了 CBERS-1 星内粒子探测器的任务来源、研制过程、发射与在轨运行情况, 介绍了数据处理方法, 并总结了基于观测数据开展的相关科学研究工作. 该探测器的成功研制, 提升了北京大学空间探测载荷研制能力, 也为承担后续空间探测任务奠定了坚实基础.

1 载荷研制过程

1.1 项目起源

北京大学空间物理专业成立于 1959 年, 旨在为中国航天事业和空间科学发展培养人才. 早期北大空间物理专业的工作主要以教学、基础理论研究和实验设备研制为主. 随着中外学术交流日益频繁, 该专业科研工作逐步与国际接轨, 部分老师开始获取国外空间探测数据, 并依托数据开展相关科研工作.

20 世纪 70 年代, 肖佐老师赴英国进修, 回国后逐步开展电离层相关探测设备的研制与试验工作. 至 1985 年肖佐老师与邹积清老师、张树理老师等工程技术人员合作完成电离层 SID 连续监测仪、电离层高频多普勒效应探测设备等多套电离层探测装置的研制. 课题组依托上述设备开展长期电离层观测, 并发表多篇研究论文, 相关成果在国内具备较大影响力. 由此课题组在 1993 年 9 月获得了北京大学第四届科学技术成果奖的二等奖, 获奖的成果名称为“某些电离层突然扰动的监测及形态研究”. 系列地面探测装置的研制经历, 为本团队后续承接星载探测载荷研发积累了工程实践经验.

中国星载空间粒子辐射探测技术发展相对较晚. 1971 年 3 月 3 日发射的中国首颗科学实验卫星实践一号上搭载了盖格–米勒计数器和铍窗积分电离室, 用于探测宇宙线粒子和太阳 X 射线辐射, 开创了中国空间探测的先河. 随后, 中国陆续在实践系列卫星上开展了空间物理参数探测实验 (包括地磁场、地球辐射带等)[1].

中国早期星载空间探测载荷的承研单位主要是航天部等相关单位, 高校单位没有参与空间探测载荷的研制工作. 1987 年北京大学空间物理专业 (肖佐教授时任专业主任) 受中国空间技术研究院 501 部九室委托研制卫星内部环境监测设备, 开创了北京大学作为承研单位研制星载空间环境探测载荷的先河.

1.2 模样机研制

根据项目任务书需求, 北大承接研制的卫星内部环境监测设备 (简称星内粒子探测器) 主要包括高能粒子辐射探测器单机、单粒子翻转效应监测器单机以及卫星内表面带电监测仪单机. 按照规划, 这些仪器完成研制后拟搭载中巴资源一号卫星 (CBERS-1) 与东方红-3 号卫星. 北大研制团队由肖佐统筹领导, 参

与人员包括仲维英、沈长寿 (阶段性参与) 以及北大重离子所相关人员. 根据研制计划, 设备研制分为四个阶段: 原理样机 (模样机)、初样电性件、初样鉴定件和正样件研制.

项目研制初期技术推进存在难点. 1992 年项目团队完成人员调整, 邹积清担任技术负责人加入研制团队. 技术层面上将模样机系统划分为五大组成部分: 数据处理单元 (Data Processing Unit, DPU)、高压电源、探头及放大器、符合与反符合电路以及总体 (包括机壳、接插件、探头屏蔽、总装、总调). 各模块研制分工如下: DPU 由空间物理专业研究生赵卫负责; 高压电源由仲维英负责; 探头及放大器、符合与反符合电路由北大重离子所团队负责; 技术负责人统筹整机各模块进度管控、整机总装总调测试, 同时负责 501 部开展上下协调对接.

DPU 即数据处理单元是该仪器的基础. 仪器功能控制、数据传送以及上位机的连通均依托 DPU 实现. 该单元由赵卫负责研制, 开发阶段未产生颠覆性技术问题. 项目组依托 PZ80 单板机实验箱完成前期开发工作. 模样机阶段载荷数据初始采用传输方案, 实际测试中实用性不足; 经研讨, 整个分系统统一调整为异步串行传输方式, 简化了单机检测与分系统的通信测试流程. 星内粒子探测器的 DPU 基础软件版本在模样机阶段完成定型, 方案稳定性较好, 初样、正样研制阶段未做大的调整. 高压电源模块部分功能相对单调, 电路相对简单, 经攻关, 高压电源模块很快完成研发. 探头及放大器分为电子探头和质子探头, 分别对应一块放大器电路板. 符合与反符合电路板的功能为区分电子和质子信号: 对于电子信号通道, 反符合电路用于剔除其中混杂的质子信号; 对于质子信号通道, 符合电路用于排除电子信号的干扰. 探头及放大器调试阶段存在寄生震荡问题, 经邹积清优化电路设计后, 故障得到解决.

经过调试, 1992 年 12 月项目组相继完成了 DPU 模块、高压电源模块和探头与放大器模块的调试和验收, 以及随后的整机装配. 1993 年 1 月底完成了星内粒子探测器的整机测试, 各项功能达到要求. 1993 年 2 月项目组顺利完成了设备与整星的联试, 并获得通过.

1.3 初样件研制

自 1993 年 5 月开始, 项目组总结模样机调试过程的经验后, 对初样机的总体结构、印刷线路板进行了调整. 整机不设母板, 各板间的电性连接采用直接连线. 电子放大器板与符合与反符合电路中的一部分合并为一块板, 质子放大器与符合与反符合电路中的一部分合并为一块板, 撤销了模样机中的符合与反符合电路板, 初样机总印刷线路板由模样机的 5 块减为 4 块. 根据载荷机箱尺寸统一规定印刷电路板的规格与形状, 之后项目组重新完成了印刷电路板的布局布线. 北大重离子所负责设计印刷电路板, 由 529 厂生产; 空间物理专业组负责设计印刷电路板, 由沧州印制板厂生产. 随后按图纸要求采购各类电子元器件, 清查整理各类元器件, 并进行分别包装统计和电装前准备. 重离子所负责的印刷电路板焊接由 529 厂负责, 空间物理专业组负责的印刷电路板焊接由技术负责人负责. 1993 年 9 月开始初样机电装, 10 月中旬开始单板调试, 12 月初开始整机组装调试. 截至 1994 年 1 月中旬, 项目组共完成了两台初样机的研制. 其中一台初样机用于鉴定级环模试验, 另一台用于验收级环模试验. 在整个初样机的研制过程中, 项目组层层把关, 1994 年 8 月完成两台初样机的环模试验后, 项目组最终完成了初样机向卫星总体的交付.

1.4 正样件研制

1.4.1 元器件准备

1994 年底 CBERS-1 卫星星内粒子探测器正样件研制任务正式下达, 并签署了研制合同. 根据合同要求, 北京大学项目组要在 1997 年 12 月前完成两套星内粒子探测器正样件的研制. 项目组迅速启动研制任务. 首先从 1995 年 1 月开始与各元器件供货方签订订货合同, 确保 1995 年 8 月以前元器件必须备齐, 然后送五院可靠性中心进行各种元器件测试、筛选, 并获取合格证明. 在采购和筛选元器件期间, 对正样机的印刷线路板做进一步复查. 在初样机研制阶段, 项目组工作精准且充分, 从初样到正样阶段设备未做任何调整. 1995 年目录内还未有七专无感电容, 经批准后, 项目组自主采购并自行完成器件的老化、筛选和测试, 并送五院可靠性中心备案. 正样件的所有印刷电路板均委托太极计算机公司进行制作, 出厂前经检验质量合格, 并开具合格证. 机箱组装需要的钛螺钉从 529 厂购买. 不同型号的接插件均严格按照要求从指定厂购买. 根据计划进度要求, 1995 年底前正样机的所有元器件均完成筛选和测试. 所有集成电路均

先安装在可插拔的实验板上进行功能检测, 检测通过后方可用于电装.

1.4.2 单板电装与调试

1996 年 3 月项目组在中国科学院空间科学与应用研究中心进行了载荷正样印刷电路板电装. 根据要求, 按航天设备的规定进行单机单板电装 (共两台), 编号分别为 SN1 和 SN2. 载荷研制进度要求: 1996 年 5 月底前完成单板电装, 然后进行单板调试与测试. 两台载荷的探头放大器板与 DPU 板调试进行较顺利, 但后续电路板调试时出现了一些问题. 其一, 给第二块高压电源板加电后, 输出高压不稳定, 几分钟后输出直流高压变为 0 V. 经检查, 故障源于 ICM7555 MTV 时基电路, 更换新的 ICM7555 MTV 电路, 电源板功能恢复正常. 其二, 1997 年 4 月 21 日在调试质子板放大器过程中, 前置放大器的场效应管 2 N4393 的栅极被静电感应击穿损坏. 更换新器件后, 电路恢复正常. 1997 年 4 月底完成正样机单板调试工作后, 1997 年 6 月中旬完成正样件整机总装测试. 1997 年 7 月上旬开始正样机的通电老化工作, 每台机器分别连续通电 10 天, 期间观察机器各种功能及数据是否正常. 1997 年 7 月 19 日第一台正样机 SN1 通电时发现电子 (加放射源) 的计数大量减少. 经过实验检查验证, 故障源于锂漂移探测器. 将探头拆下后送至北京核子仪器厂检测, 最终鉴定为锂漂移探测器退漂导致电子计数大量减少. 探头更换新锂漂移探测器后, 对电子路重新标定, SN1 机各项功能恢复正常. 随后, 两台正样件进行了长时间的通电老化实验, 均通过检验.

1.4.3 地面环模试验

星内粒子探测器的两台正样件设备 SN1 和 SN2 于 1997 年 9 月 10−13 日在 511 所分别完成了振动试验与热循环试验, 两台设备均运行正常. 之后, 两台设备在 511 所用同一个真空罐做热真空试验. 合罐后两台仪器同时进行检测, 发现 SN1 无数据输出, SN2 数据正常. 经检测鉴定为真空罐系统与被测设备的地线连接不佳, 导致 SN1 的 DPU 板输出端接口芯片 DG181 被静电击穿损坏. 更换新 DG181 后, SN1 工作恢复正常. 随后, 两套正样件设备顺利完成热真空试验, 标志所有地面环模试验均合格.

1.4.4 正样件交付

星内粒子探测器正样件两套仪器共交付了 44 份文件, 主要包括测试大纲、测试细则、测试报告及数据单、IDS 表 (数据接口表)、产品证明书、产品履历书、技术说明书 (评审数据包)、使用说明书、研制过程质量报告、产品质量评审报告、电子设备老炼报告、可靠性分析报告、入库材料 (元件) 检查报告、材料 (元件) 合格证明、验收试验报告及试验数据单 (地面环境试验报告)、软件需求报告、软件使用报告、软件检测报告以及给巴西的英文报告. 技术文档涵盖了设备研制的质量控制过程.

在完成设备验收检测和文件交付后, 项目组研制的 CBERS-1/01 卫星星内粒子辐射探测器正样件于 1998 年 10 月正式交付卫星总体. 图 1 为星内粒子探测器地面验收测试照片. 表 1 列出了 CBERS-1/01 卫星星内粒子辐射探测器主要性能指标.

1.5 载荷的成功发射和运行

1999 年 8 月 7 日 CBERS-1/01 星项目所有参加测试人员和设备, 均聚集在太原卫星发射中心的发射基地——苛岚 (专门用于卫星总装和测试的厂房). 卫星的总装和测试分为以下 4 个步骤.

步骤 1 总装工作人员按规定和要求将要上天的仪器分别放入两个舱内, 分别测试仪器的工作状态是

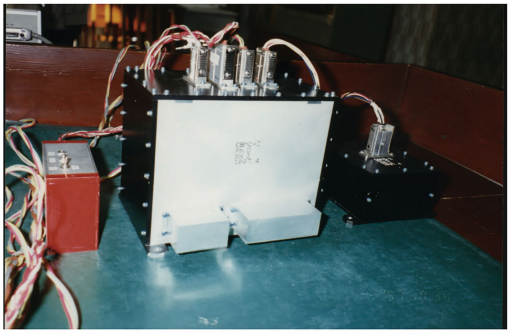


图 1 星内粒子探测器地面测试

Fig. 1 Ground test of the In-Satellite Particle Detector

表 1 CBERS-1/01 星星内粒子探测器主要性能指标

Table 1 Performance of the In-Satellite Particle Detector in CBERS-1/01

性能指标	需求
电子能量范围/MeV	0.5～2.0 >2.0
质子能量范围/MeV	5～3030～60
采样间隔/s	24(一次采样)

否符合要求.

步骤 2　将卫星上下两舱组装在一起, 用星上电缆互相连通, 用检测信号测试所有仪器的工作是否正常.

步骤 3　卫星整体加盖, 分别用有线、无线测试均正常后, 去掉自检信号、探头保护罩等, 并对信号插座进行屏蔽、固定.

步骤 4　给卫星外壳贴上保护层, 然后将整星运往发射场.

将卫星固定在火箭上部 (此时火箭尚未加注燃料), 再进行发射前的各项测试及飞行模式测试, 均无问题后进入等待发射阶段. 在发射前准备阶段要准确预报天气, 以便确定发射日期. 发射日期决定后, 专门的气象服务组再做精确预报, 最后确定发射时刻. 图 2 为 CBERS-1/01 星搭载的长征四号乙运载火箭在太原发射场等待发射的状态.

CBERS-1/01 卫星于 1999 年 10 月 14 日上午 09:30 LT 发射, 随后卫星顺利入轨. 10 月 17 日星内粒子辐射探测器成功开机并下传数据.

1.6　数据处理

CBERS-1/01 卫星星内粒子辐射探测器数据处理工作于 1996 年开始, 在仪器正样 SN1、SN2 研制中期, 工作进展并不顺利, 直到 1998 年数据处理软件仍未完成研发. 1998 年 9 月邹鸿进入北京大学空间探测载荷研制团队, 团队人员共同协作才完成了星内粒子辐射探测器数据处理程序的编写, 并在 1998 年底对星内粒子辐射探测器地面模拟数据进行了几次预处理, 获得较为满意的结果, 为后续的数据处理工作打下了坚实基础.



图 2　CBERS-1/01 星搭载的长征四号乙运载火箭在太原发射场等待发射

Fig. 2　CZ-4 B rocket carrying the CBERS-1/01 satellite at Taiyuan launching site

CBERS-1/01 卫星下传数据的接收工作由中国西安卫星测控中心负责. 中国西安卫星测控中心在全国拥有地面固定站和活动站, 使用超短波频率接收后, 将数据汇总至北京. 星内粒子辐射探测器顺利开机后, 很快对数据进行了处理与分析. 结果证明, 星内粒子辐射探测器工作正常, 获取的高能粒子通量分布数据符合空间物理规律, 至此该耗时近 11 年的项目圆满成功.

2　基于载荷数据发表的成果

关于 CBERS-1/01 卫星星内粒子探测器的成果论文于 2003 年 5 月发表在《北京大学学报 (自然科学版)》上, 详细介绍了载荷研制的重要意义、载荷的基本组成、性能参数和初步的观测结果[2,3]. 截至文章投稿前已获得的两年半观测数据, 根据这些数据得出以下结论.

(1) 观测数据符合已有的空间高能粒子环境规律, 说明星内粒子探测器获得的数据资料可靠, 探测器设计合理, 是监测卫星舱内高能粒子辐射环境的有效工具.

(2) 卫星舱内高能粒子辐射不可忽视, 尤其对于低高度的极轨卫星而言, 当轨道穿越南大西洋异常区中心区域以及高纬地区时, 长期存在通量较高的高能带电粒子. 在日地空间出现剧烈扰动期间, 高能带电粒子通量可能显著增加, 设计卫星时应该特别注意星内高能粒子辐射对仪器、材料、电子线路、计算机芯片、种子和生物实验等的效应问题.

(3) 星内辐射环境与星外空间环境有很强的相关性,因此该探测器成为空间辐射环境监测的重要手段, 观测数据也成为辐射带环境形态和模式研究的重要资料.

北京大学项目组与中国科学院高能物理研究所

合作, 对 CBERS-1/01 卫星星内粒子探测器和神舟二号飞船空间 X 射线探测器的观测结果进行了联合分析, 研究和评估了外辐射带内边缘和异常区的高能电子分布情况及其对 X 射线探测的影响. 神舟二号飞船于 2001 年 1 月 10 日成功发射, 中国科学院高能物理研究所研制的空间 X 射线探测器 (简称 SZ2/XD) 是其科学与应用系统中的一台重要载荷. SZ2/XD 的主要功能是观测宇宙 γ 暴和太阳耀斑 X 射线. 神舟二号飞船的轨道倾角为 42°, 轨道高度约为 400 km, 因此 SZ2/XD 可以避开在两极极光带 (纬度范围 40°～70°) 出现的地球外辐射带高能电子, 这些带电粒子可能对设备观测的 γ 暴和 X 射线结果造成污染. 除此之外, 在低纬靠近巴西的南大西洋区域, 由于地磁场强度异常偏低, 被地球磁场捕获的内辐射带带电粒子 (主要是质子、重离子和电子) 可以沿着磁力线降低至更低高度 (最低可以低于 200 km), 从而形成辐射带南大西洋异常区 (Southern Atlantic Anomaly, SAA). 航天器在穿越 SAA 时, 可能会遭受高通量带电粒子辐射, 导致各种辐射损伤. SZ2/XD 专门设置了异常区关机模式, 当神舟二号飞船进入用地球辐射带模型计算的带电粒子通量高的异常区后, 自动关闭设备电源, 从而尽量减小带电粒子对探测器系统造成的辐射损伤. 然而实际的 SAA 高能带电粒子分布范围与模型预测的数值和位置有一定差异. 利用 CBERS-1/01 卫星星内粒子探测器和神舟二号 X 射线探测器的数据可以更精确地获得 400～800 km 的南大西洋异常区高能粒子分布边界以及两极极光带靠低纬区域的分布特征, 相关结果发表在 2004 年出版的《地球物理学报》上[4,5].

CBERS-1/02 星于 2003 年 10 月 19 日成功发射, 其上部署了星内粒子探测器的第二套正样件. 利用 CBERS-1/01,02 卫星星内粒子探测器的长期观测结果, Zou 等[6,7,9] 和 Hao 等[8] 系统研究了星内粒子探测器在 800 km 高度的低地球轨道观测的高能粒子在空间环境平静和扰动时期的分布特征, 与辐射带模型进行了对比, 并用地磁场分布异常以及太阳高能粒子暴等空间环境源头扰动进行解释. 图 3 显示了 CBERS-1/01,02 卫星星内粒子探测器观测到的 0.5～2.0 MeV 高能电子随时间和 L 值的分布以及与 Dst 指数的相关关系, 黑色曲线为等离子体层顶[10]. 从图 3 可以看出, CBERS-1/01,02 卫星星内粒子探测器的观测结果反映了地球外辐射带高能电子剧烈的动态变化, 而高能电子通量剧烈的增加与地球磁暴的发生 (Dst 指数明显减小) 密切相关. 图 3(a) 中的黑色曲线是模型计算的地球等离子体层顶[11], 而星内粒子探测器观测到的外辐射带内边界与模型计算的等离子体层顶完全一致, 即等离子体层顶存在的大量波动导致的波粒子相互作用造成辐射带捕获电子投掷角散射, 进而导致捕获电子的大量损失, 从而形成槽区. 这些结果再次证明了 CBERS-1/01,02 卫星星内粒子探测器的性能

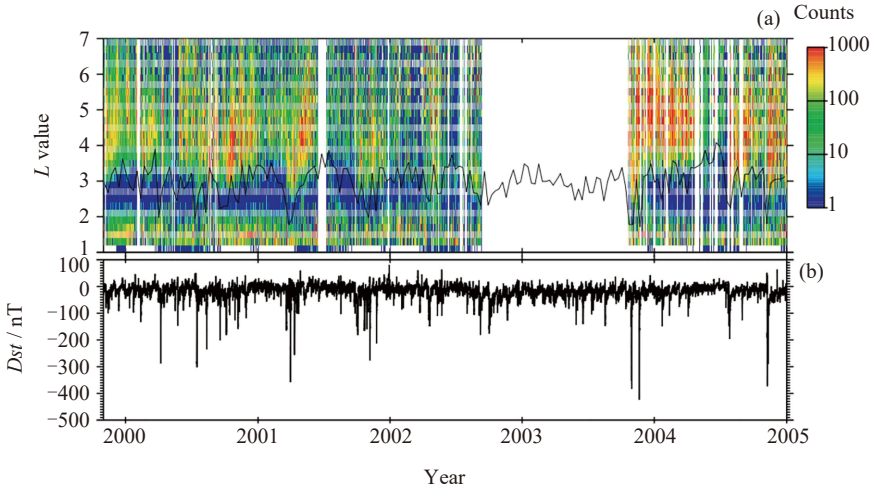


图 3 CBERS-1/01,02 卫星星内粒子探测器观测到的 0.5～2.0 MeV 高能电子随时间和 L 值的分布以及与 Dst 指数的相关关系[10]

Fig. 3 Distribution of 0.5～2.0 MeV high-energy electrons observed by the in-satellite particle detectors onboard CBERS-1/01,02 versus time and L value, and their correlation with the Dst index [10]

及数据的长期稳定性.

2004 年 3 月北京大学项目组获得北京市科学技术奖二等奖, 获奖题目为“卫星舱内高能粒子监测和空间辐射环境研究”.

3　载荷研制的意义

在 CBERS-1/01,02 星星内粒子探测器研制的年代 (20 世纪 90 年代), 其性能指标并不一定代表国内外空间粒子探测载荷的最高水平, 但是该仪器的研制对于北京大学具有十分重要的意义.

(1) CBERS-1/01 卫星星内粒子探测器的研制是北京大学参与中国空间探测任务的一个里程碑. 虽然北京大学有一些参加“两弹一星”工程的功勋科学家, 但之后北京大学主要聚焦于人才培养, 并未参与中国开展的星载空间探测载荷研制工作, CBERS-1/01 卫星星内粒子探测器的研制标志着北京大学正式参与中国空间探测工程研制领域.

(2) CBERS-1/01 卫星星内粒子探测器的成功发射和在轨运行使北京大学成为首批成功研制空间粒子辐射探测载荷的中国高校之一. 中国的空间探测工程是脱胎于“两弹一星”研制体系, 因此早期的空间探测载荷研制方主要是中国科学院等科研院所和航天五院、八院等航天系统内单位. 虽然很多高校单位也曾参与到中国卫星工程研制中, 但在 20 世纪 90 年代还未有中国高校作为主承研单位承担空间粒子探测载荷研制工作的先例. CBERS-1/01 卫星星内粒子探测器的研制成功是中国高校参与空间粒子探测相关空间探测工程项目的一个良好开端. 目前中国已有多所高校单位作为空间粒子探测载荷的承研单位参与了中国的空间探测事业.

(3) CBERS-1/01 卫星星内粒子探测器的成功研制为北京大学后续的空间探测载荷研制奠定了坚实的基础. 该载荷的研制也为后续研究培养了人才, 如陈鸿飞老师带领团队继续完成了 CBERS-1 卫星 03/04 卫星高能粒子探测器的研制, 其中 CBERS-1/04 卫星于 2014 年 12 月 7 日发射, 其携带的高能粒子探测器已在轨正常运行超过 10 年, 目前仍能正常获取科学数据. 后续发展的探测器型号陆续搭载于北斗卫星、风云卫星、澳门科学一号卫星等, 达到了国际先进水平[12–17].

致谢　本文作者撰写此文, 以纪念肖佐老师、邹积清老师. 肖佐教授和邹积清高工虽已离世, 他们献身空间探测事业、严谨求实、不懈求索的治学品格持续激励着我们不断前行. 同时向一代代深耕航天领域的老一辈科研工作者致以崇高敬意.

医学伦理　研究不涉及人体或动物实验.

Ethical Approval　This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突.

Conflict of Interests　The authors declare that there is no conflict of interests.

参考文献

[1] ZHANG Yongwei. China's scientific and technological test satellites[J]. *Aerospace China*, 2001(7): 3-6 (张永维. 中国科学探测与技术试验卫星 [J]. 中国航天, 2001(7): 3-6)

[2] XIAO Zuo, ZOU Jiqing, ZOU Hong, *et al*. Energetic particle detector on board “ZY-1” satellite[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, **39**(3): 361-369 (肖佐, 邹积清, 邹鸿, 等. “资源一号”卫星星内高能粒子探测器 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2003, **39**(3): 361-369)

[3] ZOU Hong, XIAO Zuo, WU Zhongxiang, *et al*. Energetic particle event observed by a polar orbit satellite at 780km[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, **39**(3): 370-374 (邹鸿, 肖佐, 吴中祥, 等. 极轨卫星在 780km 高度上测得的高能粒子辐射事件 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2003, **39**(3): 370-374)

[4] ZOU Hong, XIAO Zuo, ZOU Jiqing, *et al*. A comparison between detections of energetic electron by ZY1/CBMC and SZ2/XD[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, **47**(4): 562-570 (邹鸿, 肖佐, 邹积清, 等. 资源一号卫星星内粒子探测器与神舟二号 X 射线探测器对高能电子探测的比较分析 [J]. 地球物理学报, 2004, **47**(4): 562-570)

[5] MA Yuqian, WANG Huanyu, ZHANG Chengmo, *et al*. A conjunctive study of solar flare 20010402 and related solar proton events by the observation of SZ2/XD and ZY1/CBMC[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, **47**(5): 737-742 (马宇倩, 王焕玉, 张承模, 等. 2001 年 4 月 2 日太阳耀斑及其太阳质子事件的观测结果研究 [J]. 地球物理学报, 2004, **47**(5): 737-742)

[6] ZOU Hong, XIAO Zuo, HAO Yongqiang, *et al*. Observation of the disturbed events by the particle detector inside “ZY-1” satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, **49**(3): 636-641 (邹鸿, 肖佐, 郝永强, 等. "资源一号"卫星星内粒子探测器对扰动事件的观测 [J]. 地球物理学报, 2006,

49(3): 636-641)

[7] ZOU H, XIAO Z, HAO Y Q, *et al*. Analysis of the observation of particle detector inside "CBERS-1" satellite under solar quiet conditions[J]. *Science in China Series E*, 2006, **49**(3): 342-357

[8] HAO Y Q, XIAO Z, ZOU H, *et al*. Energetic particle radiations measured by particle detector on board CBERS-1 satellite[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(5): 665-670

[9] ZOU Hong, CHEN Hongfei, ZOU Jiqing, *et al*. Comparison between the observation of the particle detector inside "ZY-1" Satellite and the model of the radiation belt[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, **50**(3): 678-683 (邹鸿, 陈鸿飞, 邹积清, 等. 星内粒子探测器观测结果与辐射带模型的比较 [J]. 地球物理学报, 2007, **50**(3): 678-683)

[10] ZONG Q G, HAO Y Q, WANG Y F. Ultra low frequency waves impact on radiation belt energetic particles[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, **52**(12): 3698-3708.

[11] O'BRIEN T P, MOLDWIN M B. Empirical plasmapause models from magnetic indices[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(4): 1152

[12] ZOU H, YE Y G, ZONG Q G, *et al*. Imaging energetic electron spectrometer onboard a Chinese navigation satellite in the inclined GEO orbit[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, **61**(12): 1845-1865

[13] YE Y G, ZOU H, ZONG Q G, *et al*. Energetic electron detection packages on board Chinese navigation satellites in MEO[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2021, **5**(2): 158-179.

[14] YE Y G, LI J W, HUANG C, *et al*. Medium-energy electron detector onboard the FY-3E satellite[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(3): e2022SW003241.

[15] YE Y G, LIU Y, ZOU H, *et al*. Medium-energy electron spectrometers on Macao Science Satellite-1[J]. *Sci China Tech Sci*, 2024, **67**: 3324-3343.

[16] YE Y G, LIU Y, ZOU H, *et al*. High-energy electron spectrometer on Macao Science Satellite-1[J]. *Science China Technological Sciences*, 2024, **67**(12): 3909-3924.

[17] YU X Q, HUANG C, XIAO C J, *et al*. AC vector magnetometer for space-based applications using low-resource magneto-impedance sensor[J]. *Science China Technological Sciences*, 2023, **66**(12): 3663-3670.

作者简介



邹　鸿（通信作者）　男，1975 年 11 月出生于北京市，现为北京大兴地球与空间科学学院研究员，博士生导师，主要研究方向为空间探测技术、地球辐射带和火星电离层研究等.

E-mail: hongzou@pku.edu.cn