

中国载人航天空间环境监测系统的发展

徐颖,王世金,朱光武,梁金宝,秦国泰,王月,杨晓超

中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100190

摘要 空间环境是航天器的运行环境,直接关系到航天员和航天器的安全。监测、研究和预报空间环境,是保障航天员、航天器安全的一项重要手段。国内外载人航天工程逐步开展了辐射剂量、带电粒子、轨道大气、等离子体、空间碎片等空间环境参数探测。结合中国载人航天工程发展历程和阶段,着重介绍了中国神舟飞船、目标飞行器的空间环境探测研究情况,提出了后续空间站空间环境探测研究的建议。

关键词 载人航天;空间环境;空间探测

中图分类号 V476.1

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)08-0110-06

Development of Space Environmental Monitors on Chinese Manned Spacecraft

XU Ying, WANG Shijin, ZHU Guangwu, LIANG Jinbao, QIN Guotai, WANG Yue, YANG Xiaochao

Center for Space Science and Applied Research, China Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Around the manned spacecraft's orbits in 300 to 500km altitude, there are all kinds of charged particles, neutral atmosphere, the electromagnetic fields, space debris etc. The space environment fluctuations in a manned spacecraft's orbit can significantly affect the safety of astronauts and spacecraft. The charged particles can cause SEU, SEL and the discharge of spacecraft's surface, even threaten the astronauts' safety. The retarded effects of neutral atmosphere make the spacecraft's orbit to descend. Oxygen denudation and oxygen contaminations of atmosphere also affect the solar cell's efficiency and the normal work of thermoregulation materials. To ensure astronauts' safety and normal operations of manned spacecraft, Space Environmental Monitors (SEMs) have been or will be mounted on Chinese manned spacecraft. Detection of SEMs enables us to understand better the space environment in the manned spacecraft's orbit, and to provide a good space environment service for astronauts and spacecraft. In addition, from the data of SEMs, we will conduct various scientific researches. The development of Chinese manned spacecraft is divided into 3 steps, and SEMs are used in each step. Space environmental detection in the first step is to have a preliminary understanding of space environment of manned spacecraft's orbits, and to provide the ensuring service for the formal manned flight. The second step considers Chinese feature. The two instruments installed can realize an integrated detection of charged particles and atmospheric environment. The first detector can detect multi-direction particles, multi-energy spectrum, radiation dose and LET spectrum. The second detector can monitor atmospheric density, composition and contamination. The following step of space environmental detection pays attention to the safety of astronauts and spacecraft, as well as the new areas of detecting plasma, neutrals, cosmic rays and debris.

Keywords manned spacecraft; space environment; space detection

0 引言

载人航天是航天技术发展的必然产物,其技术的高度复杂性和综合性,体现了一个国家的综合实力,因而具有很强

的政治意义和社会影响力。前苏联、美国从20世纪60年代开始了载人航天进程,经历了前苏联的礼炮、和平号空间站,美国的天空实验室、航天飞机,发展到目前的国际空间站^[1-2]。中国

收稿日期:2010-02-31

作者简介:徐颖,硕士研究生,研究方向为空间环境探测,电子信箱:xuying@cssar.ac.cn;王世金(通信作者,中国科协所属全国学会个人会员登记号:S090200211M),研究员,研究方向为空间环境探测,电子信箱:wsj@cssar.ac.cn

从 20 世纪 90 年代开始载人航天工程研制,成功完成了 4 次无人飞行和 3 次载人飞行^[3]。

一般地球空间载人航天器运行轨道高度在 300~500km 之间,处于热层大气和电离层区域,主要经历中性大气、粒子辐射、等离子体、电磁场、空间碎片等空间环境。载人航天轨道空间环境对运行其中的航天员和航天器的安全产生着重要影响。如美国天空实验室 1979 年 7 月 11 日比预期寿命提前 7 年坠落,主要原因是运行期间太阳活动频繁,造成轨道大气密度增加,导致轨道衰变速率加大^[4]。1989 年 10 月 19 日的太阳质子事件期间,美国 STS Atlantis 号航天飞机的航天员看到了高能粒子在视网膜上引起的闪光,表明航天员受到了粒子辐照^[5]。美国发现者号航天飞机在执行第 STS-114 次飞行任务后,发现机体共有 41 个撞击坑,其中舷窗上有 14 个,最大的坑在 4 号舷窗,大小为 6.6×5.8mm^[6]。因此,研究载人航天轨道空间环境及其影响,对载人航天工程的防护设计、在轨规避和故障分析具有重要意义。

美国、俄罗斯、欧洲、日本等在启动载人航天工程的早期就开展了大量的空间环境探测研究,并随着航天技术的发展和空间环境认识的深入,空间环境探测研究内容逐步扩展和加深。如天空实验室、和平号空间站、航天飞机、国际空间站等均装载了空间环境及其效应的探测设备,涉及带电粒子和中子辐射、辐射剂量、大气密度,到原子氧剥蚀、气体污染、等离子体、空间碎片等。

中国载人航天工程在立项时就十分重视空间环境保障工作,在应用系统中设置了空间环境在轨监测和地面预报保障系统。从神舟二号飞船开始了空间环境及其效应的在轨探测研究工作。本文结合中国载人航天发展历程和阶段,介绍中国神舟飞船、目标飞行器的空间环境探测研究情况。

1 载人航天的空间环境探测

20 世纪 50 年代末期,伴随人造卫星的发射,地球辐射带被发现,在载人航天工程启动早期,即十分重视空间粒子辐射对航天员的影响。例如前苏联的联盟系列、礼炮系列及和平号空间站,以及美国的双子星座、天空实验室等,均开展了大量的辐射剂量监测^[7-9]。而后逐渐开展了宇宙线粒子、辐射带粒子、X 射线、 γ 射线、中子等粒子辐射的探测,使粒子辐射探测更加细致、完整^[10]。

轨道中性大气也是载人航天十分关心的环境要素,早期通过航天器轨道衰变和实地测量获取轨道大气密度数据,逐步发展到大气成分、原子氧、污染气体、污染质量等探测。如美国航天飞机多次开展了污染气体成分和材料污染质量测量。载人航天器周围的空间等离子体使航天器表面带电,不同电位的航天器对接将会产生放电危险,而高压电池阵的使用使等离子体弧光放电的危害不容忽视。因此,载人航天轨道等离子体探测研究和电位控制也是载人航天器的探测一个方向。空间站体积较大且运行时间长,空间碎片的危害将

比其他航天器更为严重。因此空间碎片和微流星的监测研究得到广泛重视。

国际空间站是一项大型的载人航天国际计划,由美国、俄罗斯、欧洲、日本、加拿大等国家和机构制造的舱段组装而成^[10-11]。美国在舱外开展了原子氧剥蚀效应研究,验证了多种新型太阳能电池片的环境适应性^[12];欧洲空间局的哥伦布舱开展了微流星和轨道碎片、原子氧、等离子体放电、太阳 EUV 和 UV 辐射探测^[13];俄罗斯的服务舱开展了银河宇宙线、中子流量、 γ 射线、高能带电粒子、电离层探针、电离层参数和等离子体波特性监测^[14];日本试验舱开展了中子、重离子成分、等离子体、剂量、原子氧的监测和电子元器件评估^[15]。为确保航天员和航天器的安全,国际空间站开展了多方向空间环境探测,已获得了大量环境监测数据,并广泛应用于航天工程、科学研究。

中国是继前苏联、美国之后世界上第三个自主发展载人航天技术的国家。中国载人航天工程计划“三步走”：“一步”包括 6 艘飞船,现已成功完成了航天员出舱、返回舱定位返回等标志性工作;“二步”实现航天员出舱行走、航天器交汇对接两大目标,现已开展研制工作;“三步”建造更大的长期有人照料的空间站^[16]。与国外载人航天发展思路一样,从中国载人航天工程启动早期,就开展了空间环境探测,初步掌握了载人航天轨道空间环境的基本情况,为正式载人飞行提供了保障服务^[17-18]。在“二步”阶段的空间环境探测中,装载 2 台各 2.5kg 探测仪器,能实现辐射带粒子多方向、多能谱探测,组织等效、器件等效 LET 谱探测,及轨道大气密度、成分、污染质量的综合探测。在后续的载人航天工程中,空间环境仍以保障航天员、航天器安全为核心,除继续开展粒子辐射、轨道大气环境探测外,还应填补中国载人航天轨道空间等离子体、中子、宇宙线、空间碎片探测的空白。

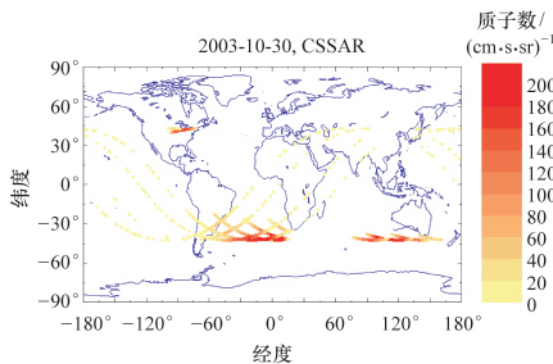
2 中国载人航天工程已开展的空间环境监测及结果

载人航天工程“一步”阶段包括 6 艘飞船,在神舟二、三、四、五号飞船上均放置了空间环境探测器。其中,神舟二号和三号飞船的轨道舱附加段放置了大气密度探测器、大气成分探测器,在返回舱放置了固体径迹探测器。重点对轨道大气及其变化,以及进入返回舱的重离子辐射情况进行探测,目的是掌握飞船轨道的变化和返回舱内的辐射情况,为后续飞船的控制、设计等服务。在神舟四号轨道舱放置了高能质子重离子探测器、高能电子探测器、单粒子事件探测器、低能粒子探测器、2 台飞船表面电位探测器、大气密度探测器和大气成分探测器,返回舱放置有 3 台固体径迹探测器^[19]。重点对带电粒子及其效应,高层大气进行探测,在正式载人飞行前,对空间环境及其效应进行全面系统地探测,为正式载人飞行摸清“空间天气”的状况。空间中的高能带电粒子辐射是直接威胁航天员生命、影响飞船正常工作的重要因素之一,为此神舟五号飞船在轨道舱附加段设置了 2 台空间环境探测仪

器——高能电子探测器、高能质子重离子探测器,监测飞船轨道空间高能电子、质子和重离子的辐射环境,警报灾难性辐射事件,为五号飞船及航天员的安全保障服务^[20]。

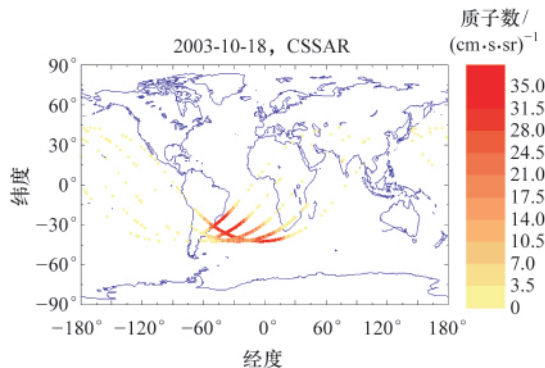
空间环境监测系统共包括 7 种有源空间环境探测器和 1 种无源探测器。系列飞船的空间环境探测任务均圆满成功,为中国获得了载人航天轨道的电子、质子等带电粒子辐射、飞船表面充电电位、单粒子效应、高层大气等一大批探测成果。典型探测结果如下。

飞船轨道空间的高能带电粒子主要集中在南大西洋辐射带异常区。高能电子、高能质子随能量增加,其通量迅速减少。在太阳质子事件和地磁暴期间,在北美洲、澳大利亚西南海域等高磁纬上空也有大量的带电粒子沉降。在太阳质子事件和地磁暴之后,辐射带的带电粒子强度、通量有显著地,并可持续几十天。高能带电粒子还明显具有方向性,特别是高能电子的方向性更加明显。大量粒子垂直磁力线分布^[21]。图 1 给出了高能带电粒子在空间环境宁静期和扰动期的空间分布情况,由中国科学院空间科学与应用研究中心(CSSAR)探测。



(a) 地磁宁静时质子分布

(a) Proton distribution during quiet period



(b) 地磁扰动时质子分布

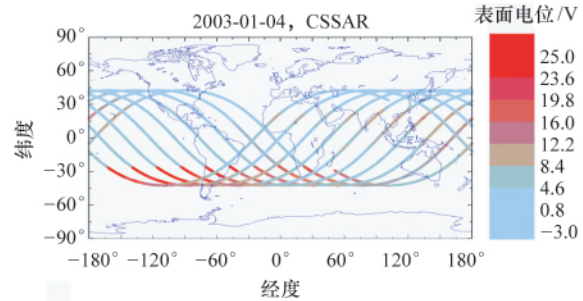
(b) Proton distribution during disturbance

图 1 高能带电粒子的空间分布

Fig. 1 Space distribution of high-energy charged particle

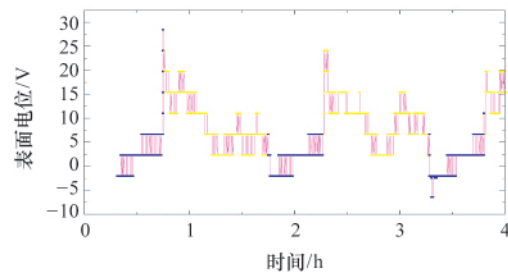
在宁静期飞船表面充电电位并不高,主要与光照和空间等离子体相关。飞船进入太阳光照区时,因光电效应,打出光

电子,飞船表面迅速带正电,最高达+35V;随后逐步放电,进入阴影后,电位迅速降低,最低达-12V(图 2)。飞船在轨运行期间,未遇到大的空间环境扰动,但在中小空间环境扰动时,飞船表面电位变化不显著。



(a) 表面电位空间分布

(a) Space distribution of surface potential



(b) 表面电位时间分布

(b) Time distribution of surface potential

图 2 飞船表面电位的空间分布和时间分布

Fig. 2 Space and time distribution of manned spacecraft's potential

在宁静期,飞船轨道的重离子和高能质子数量不多,因此单粒子效应相对其他卫星轨道不严重。实测结果为空间环境宁静期中小规模 SRAM 在该轨道的单粒子翻转概率为 0.0065/d·Mb。

轨道大气密度、成分与太阳活动相关。宁静期,大气密度的主要变化是日照和阴影区之间的涨落变化(图 3)。地磁扰动期间,全球热层大气密度均存在着显著的上涨性响应变化,大气密度的最大涨幅约为 60%^[21-23]。大气密度响应变化要滞后地磁扰动 6~7h。这种短时间的大气密度剧增变化,会严重影响飞船在轨运行状况,导致飞船运行高度下降达数百米。

在宁静期,大气成分已原子氧为主。在中、低强度地磁扰动时,轨道大气主要成分 O 和 N₂ 数密度存在增变现象,在高纬地区同时出现 O 数密度降变和 N₂ 增变异常现象(图 4)^[24]。这种异常变化,可能与地磁扰动期间大量能量粒子在高纬地区沉降有关。沉降注入过程中不断耗散能量使该区域大尺度范围内热层大气被加热,加热后的膨胀,促成大尺度的上升流,把较低高度的大气推向较高高度,引起大气成分的变化。

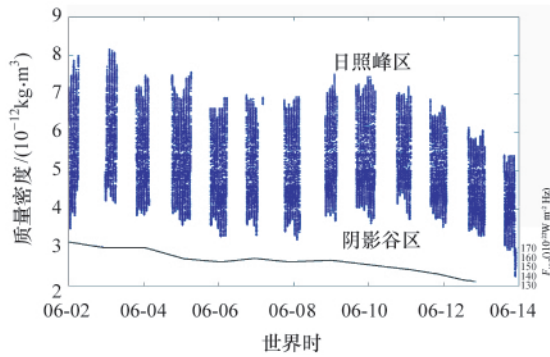


图3 日照和阴影区大气密度的明显涨落
Fig. 3 Density fluctuation during sunlit and shaded periods

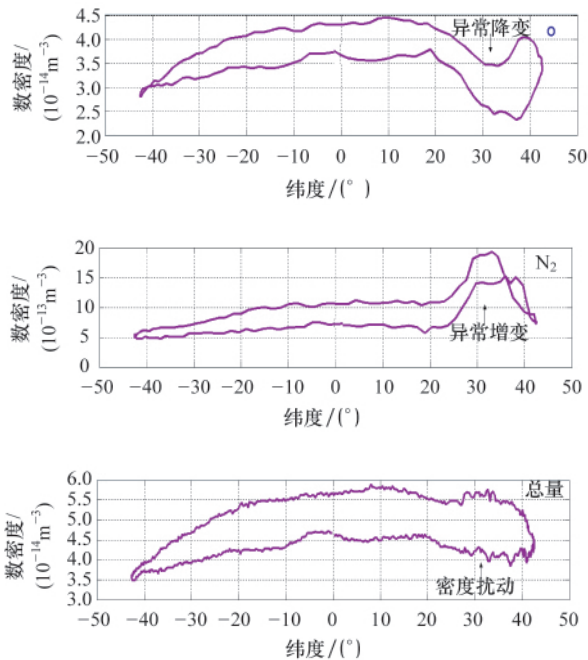


图4 地磁扰动期间大气成分数密度变化
Fig. 4 Density fluctuation during disturbance

“一步”阶段空间环境监测系统虽在轨运行状态良好,但因种种原因探测开机工作时间很短,获得数据有限,只是初步了解载人航天轨道空间环境及其效应。要彻底摸清空间环境,为航天器和航天员提供实时安全保障服务,除开展新探测领域外,还要求数据能够实时下行。这要求在“二步”、“三步”实现。

3 中国载人航天工程现阶段的空间环境监测工作

载人航天工程的“二步”工作于2004年底正式启动^[1]。“二步”的主要任务是实现交会对接和出舱行走,空间环境监测系统工作是针对该阶段主要任务而设置的。航天器交汇对接对轨道高度要求很高,而轨道空间大气密度变化会直接改变航天器运行轨道高度,实时监测轨道大气密度变化,可为

姿轨控系统提供轨道环境数据。另外,空间粒子辐射是威胁航天员特别是舱外航天员安全的重要环境因素。一次大的太阳活动事件产生的辐射总剂量远超航天员的危险剂量甚至死亡剂量。根据“二步”任务需要,空间环境监测系统配置了1台轨道大气环境探测器和1台全向带电粒子辐射探测器,用于准实时监测轨道空间大气密度、成分分布及其时空变化、原子氧剥蚀及气体污染效应及获得轨道空间全方向带电粒子强度、能谱和LET谱等。

轨道大气环境探测器是1台具有创新性、集成性、小型化的综合探测器,其将大气密度探测的电离计和大气成分探测的质谱计集成为一种新型电离质谱计,并开发微杆质谱技术,大幅压缩传感器体积,使大气环境探测的质量和体积只有原来的数分之一(图5)。该探测器实现了轨道大气密度、大气成分(含原子氧等)和气体污染的综合监测,为交会对接、轨道保持、飞船返回提供重要环境数据,并通过监测目标飞行器气体污染和原子氧剥蚀效应,与轨道大气原子氧进行比对。其中,大气密度探测测量范围为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ Pa;大气成分可测He、N、O、H₂O、N₂、O₂、CO₂等,质量数范围2~50u(含污染气体);微质谱计感测质量范围 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ g,质量灵敏度为 10^{-8} g。

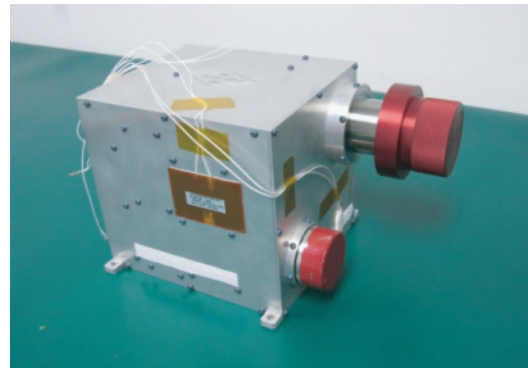


图5 轨道大气环境探测器
Fig. 5 A detector on atmospheric environment

全向粒子辐射探测器用16组传感器的扇形探测来获得全向空间的粒子分布,并将2个能谱望远镜、16组方向望远镜、2种LET谱传感器高度集成在一起,尽可能共用电子线路,最终用2.5kg质量完成了通常需要多种探测器近30kg的质量才能完成的探测任务(图6)。该探测器将实现2个空间粒子能谱监测、16个方向监测和2种LET谱(硅等效和人体组织等效)监测,以获得较为全面的空间粒子辐射及其效应信息。其中,空间粒子能谱监测包括0.2~4MeV电子能谱、1.5~300MeV质子能谱,每种粒子能谱各分8个能道,探测张角为30°;粒子辐射方向监测利用小型化的16个半导体探测器探测朝天南北向扇面内16个方向的粒子辐射,探测视场 $180^\circ \times 15^\circ$,方向角分辨率 11.25° 。通过扇面监测和地磁场模型可给出全向空间的粒子辐射方向分布,并能区分 ≥ 100 KeV电子、1.5~200MeV质子、 ≥ 10.0 MeV α 粒子和其他重离子;LET谱和辐射剂量监测包括0.3~15000 keV/ μ m器件LET谱、0.01~

500keV/ μm 组织 LET 谱及辐射剂量测量。组织等效 LET 谱可测量各种带电粒子、 γ 粒子和中子的剂量贡献,为航天员和生物辐射安全评估和防护服务。器件等效 LET 谱为器件材料异常分析和防护提供了重要依据。

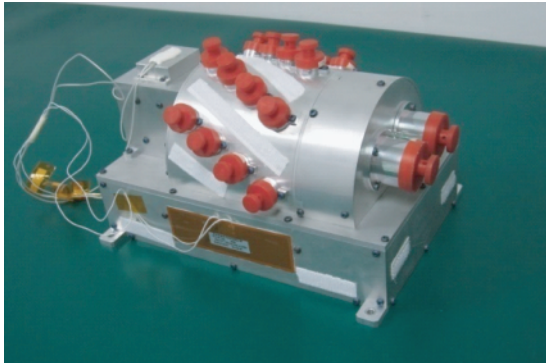


图 6 全向粒子辐射探测器

Fig. 6 A detector for full direction charged particles

载人航天工程“二步”阶段配置的轨道大气环境探测器和全向粒子辐射探测器,能为交会对接、航天员出舱行走提供空间环境保障服务。

4 中国载人航天工程后续的空间环境监测工作

中国载人航天工程空间环境监测系统的后续任务包括空间环境保障监测、空间物理研究探测两个方向。

1) 空间环境保障监测。除继续开展空间粒子辐射综合监测、轨道大气环境综合监测外,因微小空间碎片和微小流星体由于速度大也会威胁舱外航天员的安全,目前国际上各种空间碎片模式对载人航天轨道的微小空间碎片的密度估算仅有数量级的差别,空间环境保障将放置空间碎片探测器来监测微小空间碎片和微小流星体的碰撞概率,为航天员、目标飞行器的安全和空间碎片模式研究服务。航天器采用了高压电池阵技术,空间等离子体扰动会导致高压电池阵的弧光放电,干扰设备工作和影响电池寿命。等离子体还使航天器表面带电,并在周围形成等离子体鞘层,也会干扰部分设备的工作。后续任务中还需放置朗缪尔探针探测器,测量空间等离子体和部分鞘层,为研究载人航天轨道的等离子体环境及其影响服务。

2) 空间物理研究探测。载人航天轨道处于日地耦合链的底层,且是国际上开展研究不多的中低纬区域^[25]。太阳暴、行星际扰动、地球磁层暴(磁暴、亚暴等)通常直接耦合到中高纬电离层/大气层。而中低纬区域的粒子直接沉降、中高纬电离层/大气层扰动向低纬赤道区的扩散和传播等构成了中低纬区域特殊的物理过程和耦合机制。探测中低纬电离层/大气层中的粒子沉降、原子氧气辉及等离子体电子密度温度、中性大气密度成分和高能粒子事件等,研究地球中低纬近地空间整体变化规律,有望给出一批创新发现。空间物理探测除

与空间环境共享空间高能粒子、轨道大气、等离子体的探测数据外,还放置了沉降粒子探测器和原子氧气辉探测器。中低纬沉降粒子是特殊的物理现象,它与太阳粒子事件、行星际磁场和磁暴等密切相关,直接影响电离层和大气层。沉降粒子特性及其产生和沉降机制目前还不清楚。原子氧是高层大气的主要成分,探测原子氧气辉能直接反映高层大气的垂直结构,甚至推算电子密度分布,是研究电离层、大气层的结构和扰动耦合过程的重要手段。

建议空间环境监测系统的仪器配置如下:空间环境保障监测包括全向粒子辐射探测器、轨道大气环境探测器、空间碎片探测器、朗缪尔探针等仪器;空间物理研究方向包括沉降粒子探测器、多波段沉降粒子激发成像仪、低频波探测器、磁通门磁强计、全向低能粒子探测器、轨道大气风场监测仪等仪器。

5 结论

从神舟二号开始,中国载人航天工程陆续配置了空间环境监测仪器,开展空间粒子、轨道大气环境、航天器表面电位等探测。神舟飞船虽已取得了许多空间环境探测成果,但在探测内容和探测时间上,离需求还存在差距。为保障载人航天工程安全,特别是交会对接、航天员出舱的安全,需针对影响航天员、航天器安全的主要空间环境因素进行详细探测,以较为准确地回答航天员及飞行器实际遭受的空间环境状况,警报危险空间环境扰动事件,分析和评估空间环境影响,并为载人航天轨道的空间环境研究和建模提供准确数据。载人航天器上装载的空间环境监测仪器占用航天器资源虽小,但其将为载人航天工程提供监测保障、事后的异常分析和后续的工程设计服务。另外,300~500km 高度是日地耦合链的底层,该轨道开展中低纬粒子沉降和效应探测具有重要的科学意义和应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 何宇, 杨宏, 白明生. 空间实验室技术综述及发展战略 [J]. 载人航天, 2009(3): 10-18.
He Yu, Yang Hong, Bei Mingsheng. *Manned Spacecraft*, 2009(3): 10-18.
- [2] 田莉, 宋智. 国外载人航天发展综述[J]. 国际太空, 2000(3): 10-12.
Tian Li, Song Zhi. *International Space*, 2000(3): 10-12.
- [3] 戚发轫, 朱仁璋, 李颐黎. 载人航天器技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
Qi Faren, Zhu Renzhang, Li Yili, et al. *Manned spacecrafts' technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [4] King-Hele D G. Satellite orbits in an atmosphere, theory and applications [M]. London: Blackie and Son Ltd, 1987.
- [5] 叶宗海. 空间环境对航天活动的影响[J]. 载人航空, 1997(1): 52-60.
Ye Zonghai. *Manned Spacecraft*, 1997(1): 52-60.
- [6] 韩剑锋. 与空间碎片有关的外空法若干问题思考——基于美俄卫星相撞事件[J]. 空间碎片研究与应用, 2009, 9(3): 30-47.
Han Jianfeng. *Research and Application about Space Debris*, 2009, 9(3): 30-47.
- [7] Akopova A B, Manaseryan M M, Melkonyan A A, et al. Radiation

- measurement on the International Space Station [J]. *Radiation Measurements*, 2005, 39(2): 225-228.
- [8] Tverskaya L V, Panasyuk M I, Reizman S Y, *et al.* The features of radiation dose variations onboard ISS and Mir space station: comparative study[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(6): 1424-1428.
- [9] Dachev T P, Spurny F, Reitz G, *et al.* Simultaneous investigation of galactic cosmic rays on aircrafts and on International Space Station[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(9): 1665-1670.
- [10] Harm D L. Research in space: Facilities on the International Space Station[M]. Washington DC: NASA, 2008.
- [11] International Space Station [R/OL]. http://www.nasa.gov/mission_pages/station/science/.
- [12] MISSE: Testing materials in space [R/OL]. <http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/MISSE.html>.
- [13] International Space Station: Human spaceflight and exploration[R/OL]. <http://www.esa.int/esaHS/iss.html>.
- [14] SP Korolev rocket and space corporation "Energia"[R/OL]. <http://www.energia.ru/english/index.html>.
- [15] Space environment data acquisition equipment — Attached Payload (SEDA-AP) [R/OL]. 2010-02-19. http://www.nasa.gov/mission_pages/station/science/experiments/SEDA-AP.html.
- [16] 吴国兴. 我国载人航天发展简史[J]. 国际太空, 2005(11): 7-11.
Wu Xingguo. *International Space*, 2005(11): 7-11.
- [17] Xu Ying, Zhu Guangwu, Wang Shijin, *et al.* The space environment monitors of Shenzhou Manned Spacecrafts [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004, 24(Suppl): 32-38.
- [18] 徐颖, 朱光武, 王世金, 等. 神舟飞船空间环境监测系统 [J]. 航天器工程, 2004, 13(1): 141-148.
Xu Ying, Zhu Guangwu, Wang Shijin, *et al.* *Spacecraft Engineering*,

- 2004, 13(1): 141-148.
- [19] 叶宗海. “神舟”四号中的空间环境研究[J]. 物理, 2004, 33(1): 40-48.
Ye Zonghai. *Physics*, 2004, 33(1): 40-48.
- [20] 刘四清, 刘静, 师立勤, 等. “神舟”五号的空间环境保障 [J]. 物理, 2004, 33(5): 359-366.
Liu Siqing, Liu Jing, Shi Liqin, *et al.* *Physics*, 2004, 33(5): 359-366.
- [21] 杨晓超, 王世金, 王月. 载人航天轨道高能电子分布情况分析[C]//中国空间科学学会空间探测专业委员会第十六次学术会议文集. 北京: 中国空间科学学会, 2003.
Yang Xiaochao, Wang Shijin, Wang Yue. High energy electron distribution at manned spacecraft orbit [C]//Proceedings of the 16th Conference of the Chinese Society of Space Research, Beijing: Chinese Society of Space Research, 2003.
- [22] 秦国泰, 邱时彦, 贺爱卿, 等. “神舟二号”大气密度探测器的探测结果 II. 在太阳和地磁扰动期间高层大气密度的变化 [J]. 空间科学学报, 2003, 23(2): 135-140.
Qin Guotai, Qiu Shiyen, He Aiqing, *et al.* *Chinese Journal of Space Science*, 2003, 23(2): 135-140.
- [23] 秦国泰, 邱时彦, 贺爱卿, 等. “神舟 3 号”运行高度上大气密度的变化[J]. 空间科学学报, 2004, 24(4): 269-274.
Qin Guotai, Qiu Shiyen, He Aiqing, *et al.* *Chinese Journal of Space Science*, 2004, 24(4): 269-274.
- [24] 秦国泰, 邱时彦, 叶海华, 等. 神舟 4 号大气成分探测的新结果[J]. 空间科学学报, 2004, 24(6): 448-454.
Qin Guotai, Qiu Shiyen, Ye Haihua, *et al.* *Chinese Journal of Space Science*, 2004, 24(6): 448-454.
- [25] Voels S A, Eppler D B. The International Space Station as a platform for space science[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(3): 594-599.

(责任编辑 朱宇)



中国宇航学会、国际宇航联合会联合主办

2010年世界月球会议 Global Lunar Conference

时间: 2010年5月31日—6月3日
地点: 北京

联系电话: 010-68193081
传 真: 010-68768624
电子信箱: csa_gluc2010@yahoo.cn
会议网站: <http://www.gluc2010.org/>