

低地球轨道空间环境与效应集成化 监测装置设计

向树红, 沈自才, 丁义刚, 刘业楠, 刘宇明, 于 钱, 马子良
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 低地球轨道 (LEO) 空间环境与效应给低轨航天器带来严重威胁, 因此需要对 LEO 空间环境和效应进行监测。文章提出 LEO 空间环境与效应集成化监测的设计思路, 从电子电路设计、监测载荷设计和结构总体设计 3 方面给出了针对电子、质子、原子氧、温度、总剂量、表面电位、污染等环境与效应的监测方法以及集成化设计方法, 可以实现瞬时参数 (通量、剂量率、污染沉积率) 和累积参数 (注量、累积通量、总剂量、总污染量) 的监测。

关键词: 低地球轨道; 空间环境; 空间环境效应; 监测装置; 集成化设计

中图分类号: TL817⁺.1; V447⁺.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2020)06-0617-07

DOI: [10.12126/see.2020.06.013](https://doi.org/10.12126/see.2020.06.013)

Method for integrated monitoring of LEO space environment and their effects

XIANG Shuhong, SHEN Zicai, DING Yigang, LIU Yenan, LIU Yuming, YU Qian, MA Ziliang
(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The space environments and their effects in the low Earth orbit (LEO) pose a serious threat to the LEO spacecraft, therefore, it is necessary to monitor the related environments and their effects. This paper proposes an integrated design of the environmental monitoring device onboard the LEO spacecraft. The design is explained from the aspects of the electronic circuit integration, the corresponding payload design, and the structural optimization, in view of its capability of monitoring the electron & proton irradiation, the atomic oxygen, the local temperature, the surface potential, the total dosage, and the contamination. The instantaneous parameters (flux, dose rate, contamination deposition rate) as well as the cumulative parameters (fluence, total dosage, total contamination level) can be monitored simultaneously.

Keywords: LEO; space environment; space environmental effects; monitoring device; integrated design

收稿日期: 2020-09-04; 修回日期: 2020-12-02

基金项目: 国家国防科工局技术基础环境试验与观测项目 (编号: JSHS2016203A001)

引用格式: 向树红, 沈自才, 丁义刚, 等. 低地球轨道空间环境与效应集成化监测装置设计[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(6): 617-623

XIANG S H, SHEN Z C, DING Y G, et al. Method for integrated monitoring of LEO space environment and their effects[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(6): 617-623

0 引言

航天器在轨运行过程中将遭受多重空间环境的作用,包括各种粒子(电子、质子、重离子等)辐射、电磁辐射、原子氧、空间碎片以及诱发的污染环境等,可引发单粒子效应、电离总剂量效应、原子氧侵蚀效应、空间碎片撞击效应、污染效应、表面充放电效应及内带电效应等,将导致航天器在轨故障甚至失效,严重影响航天器的在轨安全和可靠性^[1]。

国外航天大国和机构利用以 LDEF^[2]、POSA^[3]和 MISSE^[4] 等为代表的探测装置在低地球轨道(LEO)开展了大量的空间环境与效应探测,在单个空间环境或效应探测及数据获取的基础上,已经实现空间环境与效应的集成化探测及在轨批量搭载^[5-6]。我国自 1971 年 3 月发射“实践一号”科学试验卫星开始空间辐射环境天基探测以来,以星船搭载方式或发射专门的探测卫星,针对 LEO 空间辐射环境及效应开展了若干飞行试验,尤其是“实践”系列卫星和“神舟”飞船等开展的搭载探测^[7-10],获得了宝贵数据,促进了对空间辐射环境及其效应的了解。

然而我国的空间环境及效应监测器功能相对单一,在轨探测与观测缺乏系统性,已开展的空间环境与效应探测获得的数据有待加强工程应用,空间环境及效应数据与航天器在轨故障分析之间的关联性有待进一步探究。

本文提出一种针对 LEO 空间环境与效应监测的集成化设计思路,从电子电路、载荷以及结构布局 3 个维度给出 LEO 空间环境与效应监测的集成化方法。

1 LEO 空间环境与效应监测对象

LEO 空间环境与效应十分复杂,严重影响 LEO 航天器的在轨安全和可靠性(见图 1^[11])。

除空间碎片引起的物理撞击外,需要重点关注的 LEO 空间环境与效应有:原子氧环境及其变化;带电粒子中的主要成分(即电子和质子);与带电效应密切相关的表面充电电位;与长期在轨相关的电离总剂量及剂量变化;与探测参数相关的温度;与真空出气相关的污染沉积量等。

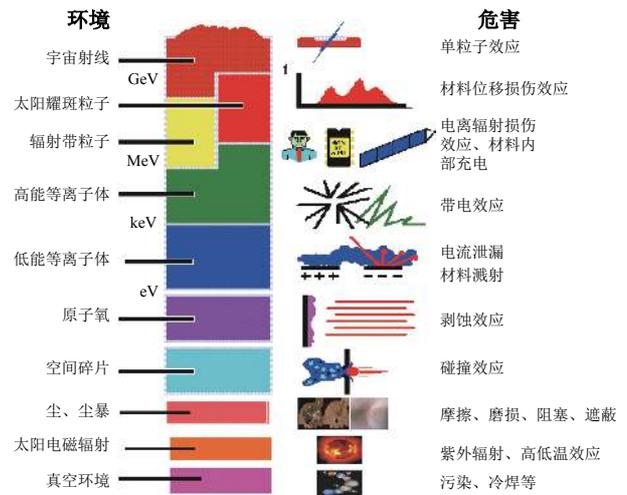


图 1 LEO 空间环境对航天器的影响

Fig. 1 Influence of LEO space environments on spacecraft

2 LEO 空间环境与效应监测的设计思路

2.1 监测装置功能

基于 LEO 空间环境及其对航天器的效应,开展 LEO 空间环境与效应监测装置设计的目的是实现对不同空间环境与效应关键参数的探测与监测,见表 1。

表 1 载荷分系统及功能

Table 1 Function of the payload subsystems

| 载荷分系统 | 监测对象 |
|---------|----------------------|
| 电子传感器 | 空间电子环境的通量和能谱分布 |
| 质子传感器 | 空间质子环境的通量和能谱分布 |
| 表面电位监测器 | 典型介质材料的表面电位 |
| 总剂量监测器 | 空间辐射环境引起的电离总剂量 |
| 原子氧监测器 | 空间原子氧的通量和累积通量 |
| 污染监测器 | 污染物的沉积量及沉积速率 |
| 温度传感器 | 总剂量监测器、污染监测器等载荷单元的温度 |

2.2 设计思路

为实现同一套装置对多个空间环境与效应的探测与监测,主要从以下角度开展监测装置设计:

1)继承性。继承已有的成熟的空间环境与效应的探测与监测方法。

2)集成化。将不同监测载荷之功能相似的部分进行集成,如对监测电路按照不同的功能进行相似功能集成。

3)小型化。在对监测电路进行相似功能集成的基础上,对各传感器根据其基本功能进行空间布局,统筹规划每种监测载荷的安装位置,以实现监测装置的整体小型化。

3 LEO 空间环境与效应监测的集成化设计方法

3.1 电子电路设计

LEO 空间环境与效应监测装置中的探测器部分主要由电子传感器、质子传感器、原子氧监测器、污染监测器(石英晶体微量天平)、温度传感器、总剂量监测器、表面电位监测器等组成。不同的探测器均包含电源、电路控制、信号处理与采集模块。因此,可以将其通用部分进行技术整合,将电路部分分别设计为电源板、控制板以及信号处理和采集板,如图 2 所示。

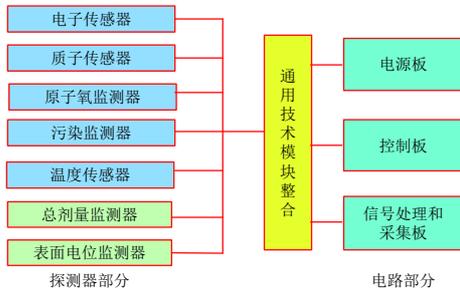


图 2 监测装置组成

Fig. 2 Block diagram of the monitoring device

电源板将一次电源(即航天器提供的母线电压)经过不同的变压处理后,获得不同电压值的二次电源,分别向具有不同供电要求的传感器供电。

信号处理和采集板主要对传感器的前端信号进行处理,给出合理的模拟信号,再经过模/数(A/D)转换进行采集。其中信号处理方面主要针对电子/质子传感器——电子传感器或质子传感器分别由多个不同的半导体监测器构成,对所有这些监测器的信号进行前置放大、主放大(极零调节和基线恢复等),并用峰保电路对主放大器给出的模拟信号的峰值进行保持。

控制板主要完成数据采集、控制、通信功能。FPGA(现场可编程门阵列)控制 ADC(模/数转换器)对信号处理板给出的信号进行 A/D 转换,完成数据采集,并实现与外部的通信等。其中,采集模块采集传感器探测的科学数据和仪器的工程参数;控制模块将采集模块得到的科学数据和工程参数加入同步标识、时间码、信号分类等信息,进行数据的打包和存储,完成对仪器各种工作模式的控制。通信模块主要实现与卫星数据管理系统的通信。

不同传感器的电子学功能集成原理如图 3 所

示。将需要经过前放和主放之后进行比较的数据用比较器进行统一集成,将需要经过放大、跟随的数据利用 ADC 进行集成,最终统一利用 FPGA 进行集成。

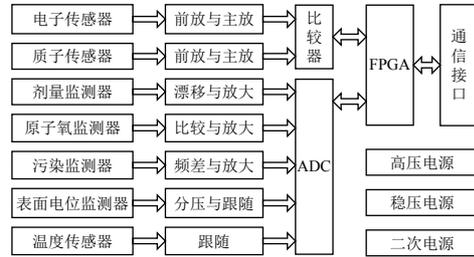


图 3 不同传感器的电子学功能集成原理框图

Fig. 3 Principle of functional integration of electronics for different sensors

3.2 监测方法设计

分别对 LEO 带电粒子(电子和质子)、原子氧、温度、总剂量(和剂量率)、表面电位、污染等不同空间环境与效应的监测方法进行阐述。

3.2.1 带电粒子监测方法

带电粒子的监测方法有半导体望远镜测量法、电场加速和飞行时间法、排除法、磁偏转法、微波传输带法以及成像谱仪等。其中,基于半导体传感器的望远镜测量法是目前较为常用的一种高能带电粒子探测技术,具有较高的能量分辨率,非常适合于带电粒子的探测。

半导体望远镜测量带电粒子的原理是:当高能粒子通过准直器射入传感器时,在各半导体传感器内沉积能量,以电离方式产生相应的电子-空穴对;这些电子-空穴对在高压电场的作用下,汇集到输出端并产生电荷脉冲,该电荷脉冲幅度与粒子在该半导体监测器中沉积的能量成正比;根据半导体传感器的脉冲幅度,对信号进行鉴别阈分析和符合/反符合处理,即可得到粒子能谱信息。

电子/质子能谱测量由探测粒子的望远镜系统和信号处理电路 2 部分组成,望远镜系统用于探测粒子,信号处理电路对望远镜系统产生的脉冲信号进行处理、分析和计数。

半导体能谱望远镜主要由 3 片(或多片)半导体传感器、准直器和挡光膜等组成,分别构成一定角度的视场角,用于测量高能电子能谱和质子及重离子能谱,如图 4 所示。

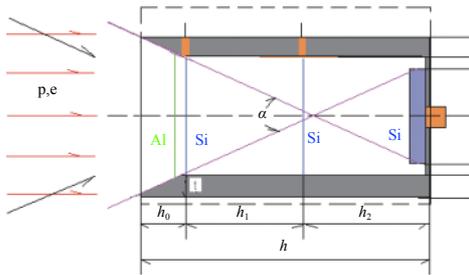


图 4 半导体能谱望远镜结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of energy spectrum probe for monitoring energetic particles

高能电子/质子望远镜谱仪的信号处理电路如图 5 所示。半导体传感器测量到由粒子能量沉积而产生的电荷，经电荷灵敏前置放大器放大得到一个

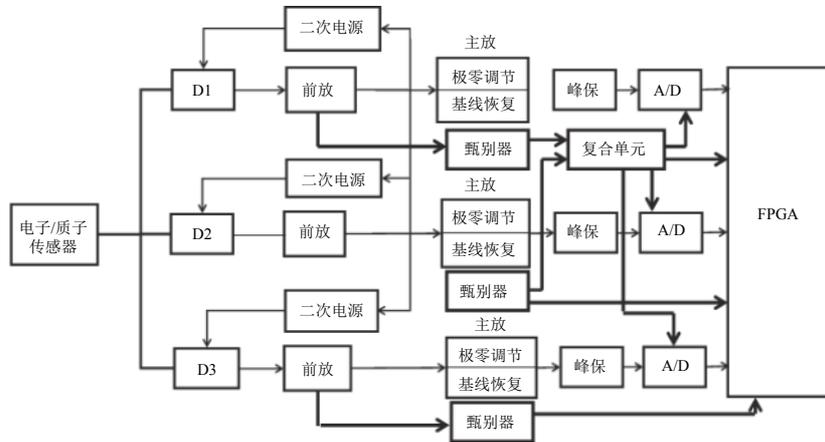


图 5 望远镜谱仪信号处理电路框图

Fig. 5 Circuit diagram of signal processing for telescope spectrometer

3.2.2 原子氧监测方法

目前，对原子氧密度的测量有多种方法，如质谱仪测量、实物样品法、石英晶体微量天平法、曝光表法、接触反应监测器、化学发光法、气辉研究、共振荧光法、共振吸收法、电子轰击激励法、反射率或传导率研究等。其中电阻型曝光表是通过测量暴露在原子氧下的介质的阻抗变化来测量原子氧密度，具有时间分辨率高、采样周期短、实时响应性好等优点。电阻型原子氧密度探测的原理是：将对原子氧敏感的金属/介质膜淀积到绝缘基底上形成电阻膜，电阻膜暴露在原子氧环境下将受到氧化剥蚀不断变薄，电阻值随之增大，通过电阻值的变化可以算出膜的厚度损失；利用电阻膜所选用金属的原子氧反应率即可算出采样周期内原子氧通量的平均值和通量随时间的变化情况。

电阻传感器单元主要由电阻传感器片组成。原子氧环境监测器电子学电路负责电阻值采集、温度

电压脉冲信号；此脉冲信号经过成形放大器处理成为具有一定形状的脉冲信号，可用于进一步分析处理。对于望远镜能谱仪系统，经过成形的 D1、D2 和 D3 慢信号分别进入峰保电路，以保持脉冲峰值电压；经过峰保电路的信号送入 ADC。在此之前，由各自的前放产生 2 路快信号进行符合，符合电路输出的信号作为 ADC 的开门信号，门信号宽度代表不同沉积能量，可以测量不同传感器的能谱。经过甄别和符合后的信号送入 FPGA 单元，由存储器控制部件控制存入一定的存储区域，由中央处理器（CPU）根据这些数据判定和记录各个逻辑格子（即各能段粒子）的事件。

值采集、信号放大及数据传输等。温度传感器安装在电阻传感器片上，用于监测传感器片的温度。温度数据与传感器电阻变化值同时传回地面，用于对传感器片电阻值在标准温度下的数据修订处理。

为检测传感器电阻值变化量，在电阻传感器上施加电流偏置，传感器上的电阻值变化将导致其两端电位差发生相应变化。检测出这一电位差的变化，即可表征传感器电阻值的变化，从而得到轨道原子氧的通量密度。

膜电阻原子氧监测器采样前的电阻值为

$$R_0 = \rho L / \tau_0 \delta, \tag{1}$$

1 次采样周期后膜电阻的变化值为

$$\Delta R = R_0 (\Delta \tau / \tau_1). \tag{2}$$

式中： ρ 为膜电阻率，钨膜的电阻率为 $8.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ； L 为膜电阻的长度，m； τ_0 为采样前膜厚度，m； δ 为膜宽度，m； τ_1 为采样后膜厚度，m； $\Delta \tau$ 为 1 次采样后

膜厚度的变化值, m 。

由式 (2) 可以看出, 1 次采样周期后膜电阻的变化量 ΔR 与采样前的膜电阻 R_0 及采样后的膜厚度变化值 $\Delta \tau$ 成正比, 而为了能比较容易地测量出 ΔR , 希望它越大越好。由式 (1) 可知, 若要通过提高 R_0 值来增大 ΔR , 应该增加电阻膜的长度, 减小其宽度和厚度, 这可以通过在一定尺寸的电阻膜上刻成电阻线来实现。

3.2.3 温度监测方法

目前星上使用成熟的温度传感器是热敏电阻, 其温度测量计算式为

$$R = R_0 \exp[B(1/T - 1/T_0)], \quad (3)$$

其中 R_0 、 B 、 T_0 的值根据不同热敏电阻的实际标值确定。

可以采用桥式测温电路或恒流源式测温电路: 桥式测温由基准源、电阻及热敏电阻构成测温电桥, 温度变化引起的电桥不平衡输出压差信号, 放大后经 A/D 转换传给 FPGA, 对各测点温度进行监测。恒流源式测温电路则由恒定电流流过热敏电阻产生压降, 经放大后给出的信号直接进行 A/D 转换, 传给 FPGA。

3.2.4 总剂量监测方法

工程上常采用 PMOS 场效应晶体管进行总剂量监测, 其基本原理是利用辐射敏感 PMOS 场效应晶体管的阈电压漂移为辐射总剂量的敏感参量——当 PMOS 场效应晶体管受空间带电粒子辐照后, 在其敏感区—栅氧化层和 Si/SiO₂ 界面感生氧化物电荷和界面电荷, 从而引起 PMOSFET 的阈电压漂移, 这一阈电压的变化能够通过简单的电路进行实时测量, 因此基于 PMOS 场效应晶体管的总剂量监测具备可实时的特点; 同时, 由于 MOS 的低功耗、尺寸微小等特征, PMOS 剂量计又具备低能耗和可近似点测的特点。由多个 PMOS 探头、电源、控制开关电路、恒流源电路、输出阈电压处理电路可组成星用多点 PMOS 剂量计。

根据 PMOS 剂量计的测量原理, 随着辐射剂量的增加, 其开断电压变化量 ΔV 和辐照剂量 D 近似符合 $\Delta V = a \times D^b$, ($b < 1$) 的关系。

为了实现辐射总剂量的测量, 需要通过恒流源实现对传感器阻抗的测量, 而传感器的电阻值往往较大, 故测量通常需要采用高压方式实现——输

出电压在 4~250 V 之间, 因此需采用逆变电源的方式实现高压电源供电。

3.2.5 表面电位监测方法

表面电位监测系统组成如图 6 所示, 其基本功能是测量航天器结构与表面材料之间的不等量充电电位。其中, 表面电位探头由传感器和分压网络组成——由传感器输出的表面电位经过分压网络将电压信号输送给信号采集处理系统, 如图 7 所示。

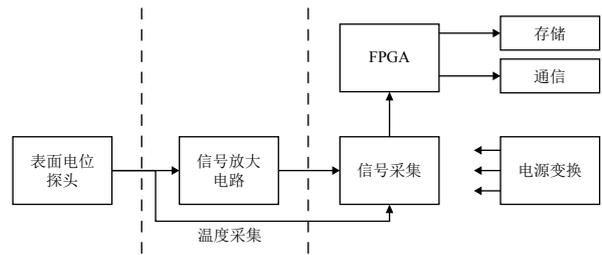


图 6 表面电位监测系统组成框图
Fig. 6 Design of the surface potential monitoring system

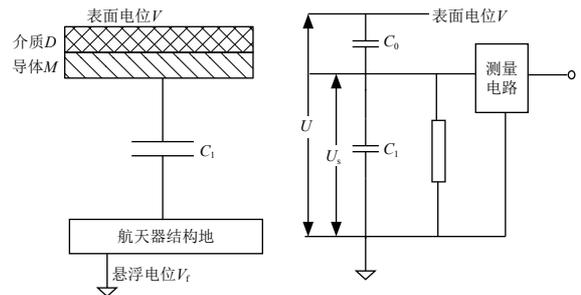


图 7 表面电位探头工作原理示意
Fig. 7 Schematic diagram of the surface potential probe

该探测方法采集和测量一定能量阈值之上的电子形成的表面充电电流及电位, 推测航天器遭遇的高能电子的能量、通量、注量及可能导致的表面充电的程度。空间中表面充电电流为 pA 量级, 采用电流放大器将电流信号转换成电压信号, 并进行 A/D 转换后, 送给 FPGA。利用测量电路来判断收集板上的充电电位, 根据充电电位大小推断空间中介质材料的表面充电程度。

3.2.6 污染监测方法

污染量的监测通常使用石英晶体微量天平传感器, 其原理是基于石英晶体压电效应——石英晶体振荡频率与石英晶体自身因数及沉积在其表面上的物质质量有关。通过暴露于污染物中的传感晶体和参考晶体之间的差频可以实现污染沉积量的测量。

监测器频率变化与沉积质量之间的关系可以表述为

$$\Delta m/A = -C_f \Delta f, \quad (4)$$

式中: Δf 为监测器频率变化, Hz; Δm 为监测器表面沉积质量的变化, g; A 为监测器的沉积表面面积, cm^2 ; C_f 为一仅与石英晶体的基本物理特性相关的常数,

$$C_f = \rho_q c / 2f^2, \quad (5)$$

其中, ρ_q 为石英晶体的密度, g/cm^3 ; c 为石英晶体的剪切波速, cm/s ; f 为石英晶体的基频, Hz。

污染监测器组成如图8所示, 主要包括传感晶片、参考晶片、振荡激励电路、混差频电路和测温热敏电阻, 并分为前舱和后舱2部分: 前舱内依次排列传感晶片、测温热敏电阻和参考晶片; 后舱主要由传感晶片振荡激励电路、参考晶片振荡激励电路和混差频电路组成的线路板。

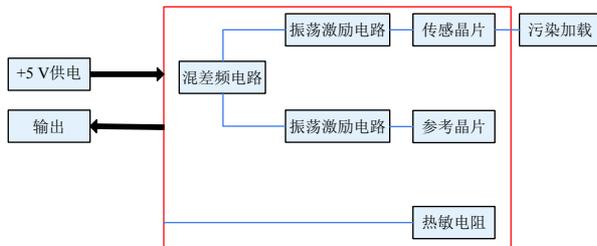


图8 污染监测器组成框图

Fig. 8 Block diagram of the contamination sensor

3.3 结构设计

LEO 空间环境与效应监测装置主要结构为电子线路板(电源板、控制板以及信号处理和采集板)和不同功能的探头(电子传感器、质子传感器、表面电位监测器、污染监测器、原子氧监测器、总剂量监测器和温度传感器), 其中, 总剂量监测器和部分温度传感器可以与电子线路板制作在一起。总体结构规划遵从以下原则:

1) 电源板放到最底部并与结构体导热连接。

2) 根据传感器的功能进行空间布局。其中, 表面电位监测器放在迎风面或者向阳面, 原子氧监测器放在迎风面, 电子传感器和质子传感器根据设计需求可以放在3个方向(指向阳面、迎风面和侧面)或其中1个方向上, 总剂量监测器、原子氧监测器和石英晶体微量天平平均需要有温度传感器配合, 总剂量监测器可以放置在电子线路板上或根据设计需要放在装置外表面上。

3) 结构在满足力、热等空间环境可靠性设计要

求的前提下, 应尽量做得紧凑、质量小。

以放在航天器顶部向阳面和开展3个方向的带电粒子探测为例, LEO 空间环境与效应集成化监测装置结构布局如图9所示。

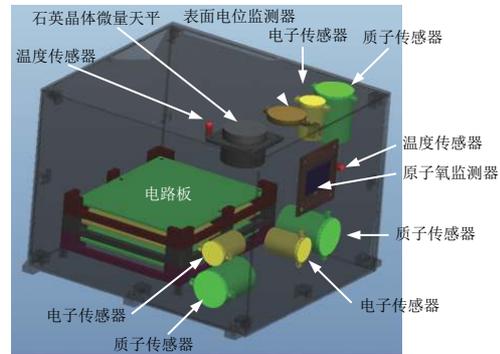


图9 监测装置结构布局示意

Fig. 9 Schematic diagram of the monitoring device

4 结束语

本文给出了LEO空间环境与效应集成化监测装置的设计思路和设计方法, 可以实现LEO电子通量与注量、质子通量与注量、原子氧通量与累积通量、温度、总剂量与剂量率、表面电位、污染总量与污染沉积速率的监测。通过将不同传感器或载荷的相似功能的电子学系统进行集成, 以及根据不同环境及效应的监测需求设计专用载荷, 并对装置整体结构布局进行优化, 可以实现不同空间环境与效应监测的一体化集成。

利用研制的通用轻小型集成化空间环境效应监测装置, 通过在轨航天器的批量搭载采集数据, 进行探测数据开发与利用研究, 实现航天器在轨环境及效应的实时同步观测与监测具有重要意义: 一是获取航天器在轨环境与效应的关联数据, 可作为航天器设计与研制的重要参考; 二是可为航天器在轨故障诊断提供第一手的资料和支持, 是航天器的“黑匣子”; 三是可为空间环境模型改进和建立空间环境动态模型提供基础数据; 四是对地面模拟试验方法的改进具有重要参考价值; 五是利用空间飞行试验数据, 可建立航天器空间环境效应的性能演化模型, 进行长寿命性能退化预示。

参考文献 (References)

- [1] 沈自才. 空间辐射环境工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013: 135-159
- [2] CLARK L G, KINARD W H, CARTER D J Jr, et al. The

- long duration exposure facility(LDEF): NASA SP-473[R], 1984
- [3] HUMMER L. System report for the optical properties monitor (OPM) experiment: NASA/CR-2001-210882[R], 2001: 1-154
- [4] DE GROH K K, BANKS B A. NASA Glenn Research Center's Materials International Space Station Experiment (MISSE 1-7): NASA/TM-2008-215482[R], 2008: 1-39
- [5] TAYLOR B, UNDERWOOD C I, EVANS H D R, et al. Results from the Galileo Giove-A radiation monitors and comparison with existing radiation belt models[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54(4): 1076-1081
- [6] RYDEN K A, MORRIS P A, RODGERS D J, et al. Flight results from the Merlin space weather monitor on Giove-A[C]//3rd European Space Weather Week. Brussels, 2006
- [7] 龚建村, 刘四清, 师立勤, 等. 空间环境天基探测现状与需求分析[J]. 空间科学学报, 2009, 29(3): 346-352
- GONG J C, LIU S Q, SHI L Q, et al. Status and demand analysis of space-based observation of space environment[J]. Chinese Journal of Space Science, 2009, 29(3): 346-352
- [8] 马兴瑞, 张永维, 白照广. 实践五号卫星及其飞行成果[J]. 中国航天, 1999(11): 3-8
- MA X R, ZHANG Y W, BAI Z G. SJ-5 satellite and its flight achievements[J]. Chinese Aerospace, 1999(11): 3-8
- [9] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号[J]. 气象学报, 2009, 67(4): 501-509
- YANG J, DONG C H, LU N M, et al. FY-3A: the new generation polar-orbiting meteorological satellite of China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 67(4): 501-509
- [10] 徐颖, 王世金, 朱光武. 中国载人航空气象环境监测系统的发展[J]. 科技导报, 2010, 28(8): 110-115
- XU Y, WANG S J, ZHU G W. Development of space environmental monitors on Chinese manned spacecraft[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(8): 110-115
- [11] 沈自才, 欧阳晓平, 高鸿, 等. 航天材料工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 110-112

(编辑: 闫德葵)