

天基微小空间碎片探测研究^{*}

袁庆智^{1,2} 孙越强¹ 王世金¹ 王 晶¹

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

²(中国科学院研究生院)

摘 要 随着空间碎片数量的不断增多, 天基微小空间碎片探测已经成为一个热点. 首先介绍了空间碎片在低地球轨道上的分布情况以及它对于航天器的危害, 然后介绍了国外微小碎片探测器的基本情况, 并在这些探测结果的基础上提出了一个探测器方案. 这种探测器的传感器采用了新型的压电材料聚偏二氟乙稀 (PVDF), 使用了飞行时间法 (TOF) 准确测定空间碎片的飞行速度, 以及快脉冲分析系统分析碎片的质量.

关键词 空间碎片; 宇宙尘; PVDF; 天基直接探测器

中图分类号 P 41

Research of Micro-Space-Debris Detection

YUAN Qingzhi^{1,2} SUN Yueqiang¹ WANG Shijin¹ WANG Jing¹

¹(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract The continuing growth of the orbital debris population is now recognized world-wide as an environmental issue which must be better defined and addressed now to preserve near-Earth space for future generation. The distribution of the space debris in the LEO and the threaten of debris to the spacecrafts are introduced. Over the last decades, a number of technologies have been developed by the scientists for detection and measurement of the physical, chemical, and dynamical characteristics of dust and debris including (1) impact-plasma detection utilizing thick and ultra-thin targets; (2) charge induction in wires; (3) impact-induced discharge in a Metal-Oxide-Silicon (MOS) capacitor. In this report, A new methods was introduced, which employed a Polarized PolyVinyliDene Fluoride (PVDF) polymer film and fast electronic pulse techniques. The detector is intended to provide direct observations of space debris and interplanetary dust in the space, returning time resolved impact data, with approximate mass and velocity information. The advantages of ruggedness, no bias requirement, ease of large area sensor construction, and space reliability inherent in the PVDF dust sensors are well suited for a variety of dust and debris studies in space. The output of the fast electronic pulse techniques are used to analyze the mass of debris. Two sensors are placed in a Time-Of-Flight (TOF) telescope, which is used to measure the speed of the debris.

Key words Space debris, Interplanetary dust, PVDF, Space direct detector

* 中国科学院空间科学与应用研究中心创新基金项目资助

2004-09-30 收到原稿, 2005-03-04 收到修订稿

1 引言

碎片是指在空间轨道上运行的人造物体, 是人类 50 多年空间活动的产物. 微流星是指运行在地球周围空间的自然天体, 它和空间碎片以及人类航天器分享地球轨道空间. 近年来由于碎片数量的不断增多, 它已成为影响(威胁)人类航天活动安全的一个重要因素. 因此, 了解碎片及微流星的分布进而进行碎片环境的演化过程研究成为目前空间碎片工作的重点.

探测是模式研究的基础, 探测结果是建立模式的最主要根据, 因此探测是空间碎片研究中一项至关重要的工作. 尺寸较大碎片探测数据的取得主要依靠地面观测, 包括光学系统探测和雷达探测. 在碎片中尤以微小碎片(直径小于 1 mm)的探测最为困难, 目前主要探测手段有飞行器采样分析、空间搭载红外仪器和雷达探测、轨道传感器探测, 其中最有效的手段就是轨道传感器探测, 由于我国还没有开展这方面的探测, 没有任何第一手探测数据. 我们所研制的探测器就是为了填补国家在这种探测器方面的空白、取得第一手低轨道微小碎片数据而进行的, 它是可以广泛应用在低轨道卫星上的碎片直接探测器, 具有质量轻、功耗小、探测面积大等优点.

2 微流星与空间碎片环境分析

微流星体环境模型主要有 Cours-Palais 和 NASA SSP-30425; 空间碎片环境模型主要有美国的 NASA91, ORDEM96, ORDEM2000, 俄罗斯的 SDPA, 欧空局的 MASTER 和英国的 IDES 等. 这些模型由各种雷达、深空探测望远镜等观测手段获得的数据, 以及 LDEF, SOLAR MAX 卫星等空间实验及返回航天器获得的分析数据, 通过建模分析得到^[1]. 它们给出了微流星体环境通量模型、不同轨道参数空间碎片的通量模型和速度模型等. 空间碎片模型主要是基于圆轨道运行的假定以及跟踪观测登记造册空间碎片的轨道倾角分布, 同时考虑了未来航天器发射数量以及航天器、末级火箭爆炸的数量和特点. 微流星体大多运行于行星轨道中, 微流星体同轨道航天器的最大相对撞击速度可达 70 km/s, 平均相对撞击速度为 19 km/s, 质量小于 10^{-6} g 的微流星体的平均密度为 2 g/cm^3 , 10^{-6} — 0.01 g 的微流星体密度为 1 g/cm^3 , 质量大于 0.01 g 的微流星体

密度为 0.5 g/cm^3 . 空间碎片主要运行在圆轨道上, 具有与同样轨道高度航天器一样的轨道速度, 平均相对撞击速度接近 9 km/s, 最大相对撞击速度可达近 17 km/s; 在椭圆轨道的空间碎片尺寸比较小且轨道倾角比较小, 对航天器的相对碰撞速度比较低, 平均撞击速度为 4.5 km/s, 直径小于 1 cm 的空间碎片的平均密度为 2.8 g/cm^3 .

微小碎片全部是与飞行任务有关的物体(例如, 从固体火箭发动机中排放的氧化铝颗粒)或分裂的碎片(破碎或者表面退化的产物). 一般认为固体火箭发动机排放的氧化铝颗粒近似为球形, 最大直径约为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 这些颗粒最初以大约 1.5—3.5 km/s 的速度从箭体中喷出. 这些颗粒中的大部分快速再入大气层, 而其余的(较大的颗粒)一般被送入各种椭圆轨道继续飞行. 涂料碎屑和类似的退化产物通常比氧化铝颗粒大得多, 直径平均为数百微米. 还有一类非常重要的微小碎片是卫星表面的脱落物质, 例如油漆等. 微流星主要是彗星以及小行星的破碎产物, 主要物质为冰和金属颗粒^[2].

2.1 微流星及空间碎片威胁方向

微流星体是各向同性的空间粒子, 而空间碎片因人类活动不同造成不同高度、不同轨道倾角的分布具有较高的方向性. 航天器的运行轨道及坐标系的定义, X 轴指向航天器的飞行速度方向, Y 轴垂直于轨道平面, Z 轴指向天顶, 如图 1 所示. 微流星及空间碎片威胁方向的定性描述如图 2 所示, 空间碎片仅在与航天器等高的各个圆轨道上与其发生碰撞, 而微流星体从各个方向撞击航天器^[3].

在圆形轨道上运行的空间碎片主要以与航天器运行轨道平面成一定角度来撞击航天器, 而从航天

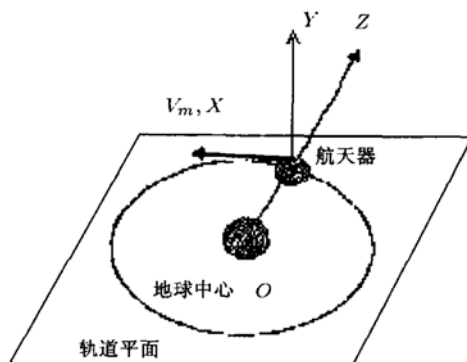


图 1 航天器运行轨道及坐标系

Fig.1 Spacecraft's orbit and the coordinate

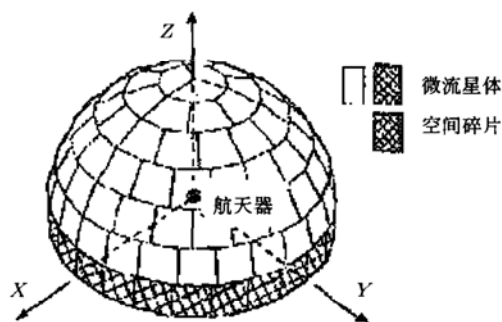


图2 微流星及空间碎片的威胁方向

Fig.2 The threaten direction of meteoroid and debris

器指向地球的方向, 以及从航天器背离地球的方向撞击航天器的可能性是很小的, 即空间碎片速度矢量的 Z 分量为零。总之, 几乎所有具有威胁性的空间碎片在接近航天器时, 都与航天器轨道等高, 但倾角可在任意的轨道平面内。对于微流星体, 它的速度分布与相对撞击角度无关。

2.2 微流星及空间碎片在地球空间的分布情况

目前, 对于空间微小碎片和微流星的了解还比较有限, 只能依靠工程模式计算微小碎片在各个轨道上的分布情况。由于数据源非常有限, 所以各个模型在微小碎片的预测差别非常大。据监视和分析估计, 目前可跟踪的大于 10 cm 的碎片约有 8600 个, 估计大于 1 cm 的碎片有不少于 3.6×10^5 个, 大于 1 mm 的碎片约有 1.8×10^8 个, 大于 0.1 mm 的碎片

约有 1.2×10^{11} 个, 而尺寸小于 0.1 mm 的碎片数量众多, 可能达到 2×10^{13} 个。所有这些碎片, 大部分集中在近地轨道和地球静止轨道上。

一些模型预示, 由于大气阻力的影响减少, 在至少 1000 km 以内, 小于 1 mm 的碎片的空间密度将随高度而增加。表 1 和表 2 分别是 630 km 轨道上和 350 km 轨道上微小碎片与航天器发生碰撞的概率情况统计。

表 1 630 km 轨道上的碎片分布情况
Table 1 Distribution of the space debris at the orbit 630 km

碎片直径 /cm	个数 / $\text{m}^2 \cdot \text{a}$
0.01	2.66
0.03	9.43×10^{-3}
0.05	3.12×10^{-2}
0.1	3.8×10^{-3}
0.5	1.6×10^{-5}
1	1.82×10^{-6}

图 3 为采用 ORDEM2000 模式计算的碎片分布。ORDEM2000 是由 NASA 开发的描述在低地轨道 200—2000 km 高度轨道碎片环境的工程环境模型。可以发现 $10 \mu\text{m}$ 以上的空间碎片在太阳同步轨道上存在一个明显的峰值, 在整个轨道高度上分布比较均匀, 通量比较稳定。

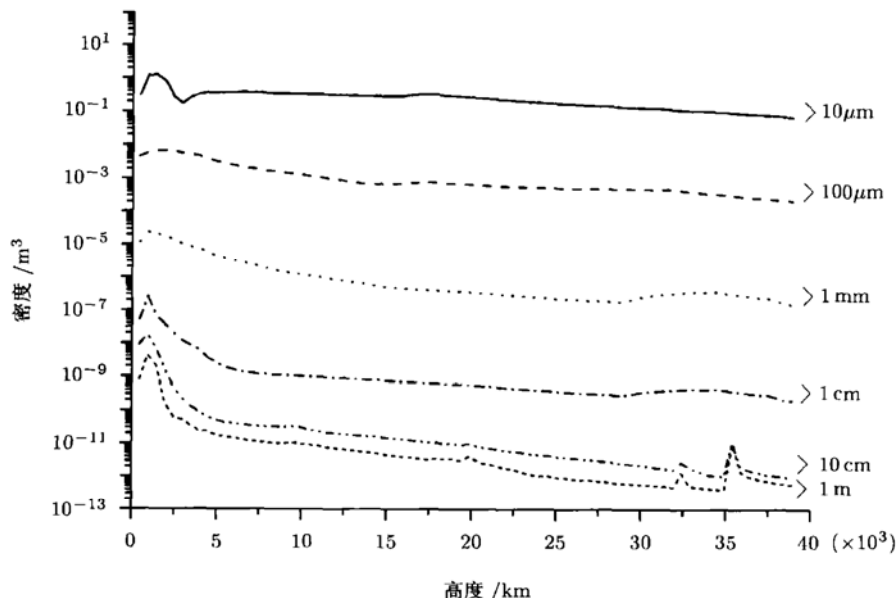


图3 ORDEM2000 计算得到的各个轨道上的不同尺寸的碎片密度分布

Fig.3 Different size and density of the different orbit calculated by ORDEM2000

表 2 350 km 轨道上碎片的分布情况
Table 2 Distribution of the space debris at the orbit 350 km

碎片直径 /cm	个数 /m ² ·a
0.005	5.2
0.01	4.5188
0.05	0.10296
0.1	0.0884
0.5	4.992 × 10 ⁻⁵
1	4.576 × 10 ⁻⁶

3 国内外探测器现状

空间碎片天基探测在国外一直受到广泛重视，无论是美国 NASA、欧空局 ESA、俄罗斯国家空间局和日本空间局都对空间碎片的探测十分重视，先后研制成功了数台多种天基空间碎片探测仪器。这些仪器主要可以归于 3 个系列。

第一个系列产品是以欧空局的 GORID 为代表的碰撞等离子体空间碎片探测器 [4],[5]，如图 4 所示，它的基本原理是碎片进入探测器与纯金的半球形靶体发生碰撞，碰撞会产生大量等离子体，再运用相应技术测量等离子体，从而确定空间碎片的质量、速度等指标。它可以测量的碎片指标为：电荷量、质量、速度、成分等。它的优点是测量的空间碎片的指标很多，测量精度很高而且还可以对碎片化学成分进行能谱分析，它的缺点是探测面积有限、探测角度比较小、探测器的结构比较复杂。

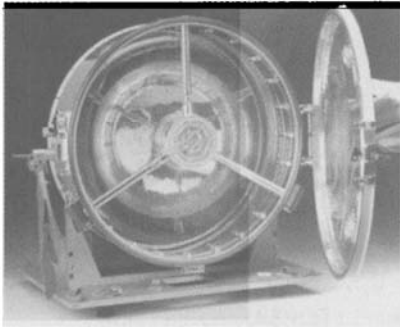


图 4 GORID 探测器
Fig.4 GORID detector

第二个系列产品是以美国 NASA 研制的 OMDC 为代表的半导体空间碎片探测器，如图 5 所示，这种探测器的传感器制造工艺是首先使晶体硅氧化得到一层很薄的 SiO₂，然后在 SiO₂ 层上镀

一层 Al 电极。这样就由 Si、SiO₂ 和 Al 构成电容式探测器。传感器工作时在电容上加适当电压，当碎片与传感器发生碰撞时就会使电容放电产生电流，再对电流进行测量，最后得到空间碎片的信息。它的特点是线路比较简单，用分离的多个探头和一个电子学箱构成探测器，这样可以扩大探测面积而且可以了解卫星各个方向的碎片通量状况。它曾经是 人类最成功的空间碎片探测手段，曾经获得了大量有用数据。但是它也有很多缺点，首先半导体探测器的抗辐照能力有限，决定了它的寿命很短；第二它所测的指标比较有限，只能对碎片的动量信息进行大概的了解。

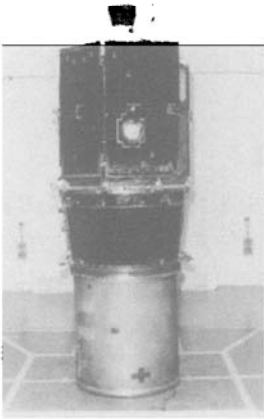


图 5 OMDC 探测器
Fig.5 OMDC detector

第三个系列产品是以美国 NASA 所研制的 SPADUS 为代表的压电效应空间碎片探测器，如图 6 所示，这种探测器采用高性能压电材料作为传感器，压电效应传感器的特点是物理化学特性稳定，非常适合空间应用，而且它的外围电路相对比较简单。当空间碎片与探测器发生碰撞后可以通过测量产生的电荷信号来测量空间碎片的质量、速度，同时在这种探测器中还采用了飞行时间法来测量碎片的速度。这种探测器的优点是结构比较简单，制造比较容易，传感器稳定性比较高，测量碎片的指标也比较全，它的缺点是解决探测器结构、温控等方面问题有一定难度。

天基空间碎片探测仪器总体趋势是功能越来越强、结构越来越复杂、探测范围从近地空间逐渐延伸至外太空。仪器还有很强的综合化趋势，国际合作也逐渐增多。我国要想在空间碎片和微流星探测领域跟上世界的步伐就必须加快探测仪器的研究。

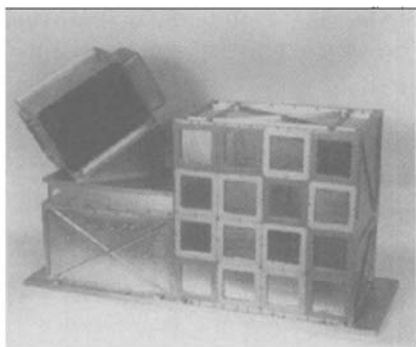


图6 SPADUS 探测器
Fig.6 SPADUS detector

4 天基空间碎片探测器

4.1 基本原理

探测器采用极化高分子材料 PVDF 压电薄膜作为传感器, 这种传感器在冲击力的探测方面有广泛应用. 在太空中飞行的微小空间碎片同样具有很大的能量, 它在与 PVDF 膜发生碰撞时会直接穿过膜, 同时压电膜产生出大量电荷. 实验证明^{[6],[7]}空间碎片在薄膜上沉积的能量主要与碎片质量和速度的乘积有关, 只要对碰撞产生的脉冲幅度进行分析, 就能获得碎片的动量信息. 我们又设计了双层 PVDF 薄膜的 TOF 系统来准确测量碎片的速度. 碎片与第一块 PVDF 薄膜碰撞会损失部分能量, 这个能量损失可以通过标定试验结果进行估计. 速度确定后就可以通过数据处理得到碎片的质量.

探测器在设计中采用了一种材料极化的聚偏二氟乙烯 (PVDF), 由日本人 Kawai 在 1969 年发明. 它作为一种高性能压电材料被广泛应用于各个领域. 它具有压电效率高、温度性能稳定、抗辐照能力强和频率响应范围宽等优点, 十分适合在空间探测中应用. 这种材料在国外很早就受到重视并在空间碎片探测方面得到了广泛应用^{[8],[9]}, 例如美国科学家利用它研制了空间碎片探测器 SPADUS.

如图 7 所示, 空间碎片与传感器发生碰撞会产生一个弹坑, 由于压电传感器的压电特性, 在膜的两个电极上就会产生电荷, 由脉冲幅度分析电路对该电荷进行分析, 可以得到空间碎片的信息. 碎片与传感器发生碰撞是一个非常复杂的过程, 为了研究的需要, 可以对传感器的各个组成部分进行严格

的一维近似, 近似得到的电荷信号 ΔQ 为

$$\Delta Q = \left[\frac{\epsilon l/L}{1 + (\epsilon - 1)l/L} \right] \frac{\pi}{4} D^2 P, \quad (1)$$

$$\Delta Q' = \frac{\pi}{4} (D')^2 P, \quad (2)$$

单位为电子数. 式 (1) 表示碎片没有穿透 PVDF 膜而留在了膜的内部 l 为碰撞产生弹坑深度; L 为 PVDF 压电传感器的厚度; D 为弹坑的直径; ϵ 为 PVDF 材料的介电常数, 一般认为 $\epsilon = 12$; P 为极化强度, 取中间值为 $5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. 式 (2) 为碎片穿透了 PVDF 压电膜, D' 为弹坑直径, 在上两式中 D 和 D' 的单位是 μm . 经过进一步化简得到

$$\Delta Q = 2.5 \times 10^5 \left[\frac{\epsilon l/L}{1 + (\epsilon - 1)l/L} \right] D^2, \quad (3)$$

$$\Delta Q' = 2.5 \times 10^5 (D')^2. \quad (4)$$

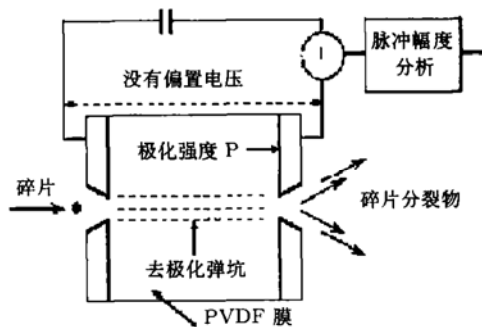


图7 碎片穿透 PVDF 碎片传感器的示意图
Fig.7 Schematic drawing of a polarized PVDF dust sensor

除了进行理论研究以外还进行了大量的实验, 图 8 是 $28 \mu\text{m}$ 的 PVDF 膜在德国慕尼黑技术大学进行的标定结果. 从结果中可以看出, 传感器产生的电荷量 N 与碎片的质量速度呈一定的函数关系, 其中 m 单位是 g , v 的单位是 km/s . $N = 6.94 \times 10^{14} m^{0.9} v^{1.05}$ 公式广泛应用在工程领域中.

仪器探头由前后两层 PVDF 膜组成飞行时间法 (TOF) 系统测量碎片速度, 碎片与两层 PVDF 膜发生碰撞, 在系统中记录碰撞的时间差, 根据两层膜的距离就可以算出碎片的飞行速度.

为了增加捕获碎片的概率, 仪器必须增加探测面积, 仪器设计为多个探头 (SU) 和一个电子学箱 (DPU) 的结构, SU 可以分别安装在飞船的不同表面, 这样可以探测到来自各个方向入射的碎片, 获得各个方向的空间碎片碰撞信息.

4.2 电路设计

探测器可以分为探头 (SU) 和电子学箱 (DPU)

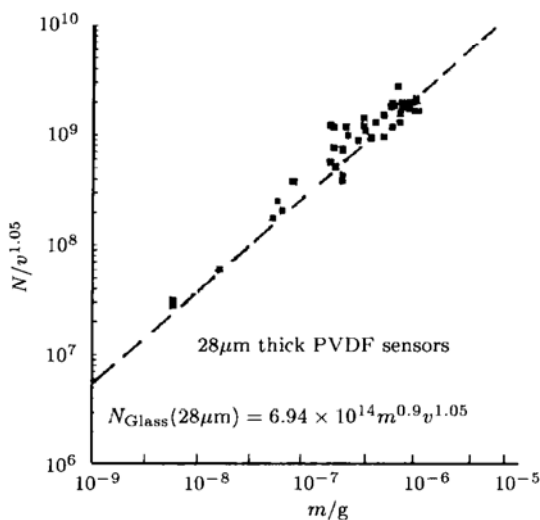


图8 电荷产生量与碎片质量、速度的关系

Fig.8 Sensor signal N vs. particle mass and velocity

两部分, 探头部分安装在飞船表面, 电子学箱位于飞船内部。多个探头可以安装在飞船表面区域上, 这样可以对飞船表面的碰撞情况进行全面了解。

仪器的原理如图9所示, 电子学线路包括前置放大器、主放大系统、脉冲幅度分析系统、计算机、通信电路、闭环温度控制系统和飞行时间法系统等。当碎片与传感器碰撞发生时, 传感器信号经过前放与主放大后送到脉冲幅度分析系统进行分析, 提取出幅度和时间信息, 同时信号送飞行时间法系统测量碰撞时间差。最后由计算机计算得到碎片速度和质量。

5 结束语

由于天基空间碎片探测器在国内为首次研制,

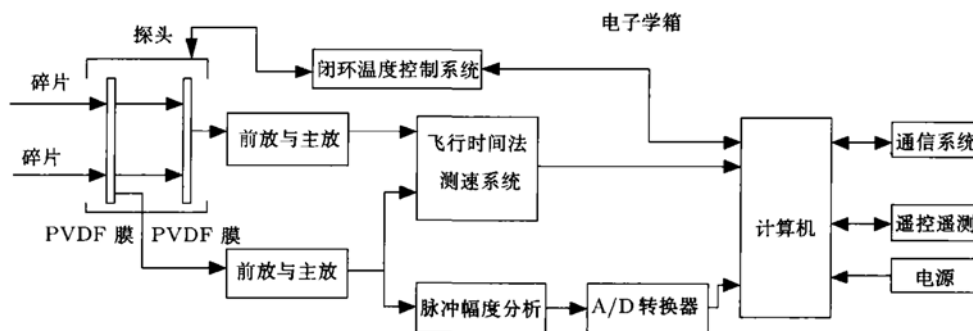


图9 仪器原理框图

Fig.9 Schematic of the instrument

所以还存在一些理论和技术问题。传感器能否在宇宙恶劣环境中长期保持稳定可靠工作, 仪器如何排除各种干扰分辨空间碎片和宇宙尘, 这些都是空间碎片探测器研制中所要克服的难题。本文介绍了国外天基空间碎片探测的一些成功经验, 对我国自主研制天基空间碎片探测器进行了探索, 提出了初步的探测器方案。天基空间碎片探测器的研制将为我国填补空间探测方面的空白, 为我国开发自主知识产权的空间碎片分布和演化模式提供科学数据。

参考文献

- [1] Du Heng *et al.* Manned space mission and space debris. *Aerospace China*, 2002, **2**:18—23. in Chinese (都亨等. 载人航天和空间碎片. 中国航天, 2002, **2**:18—23)
- [2] Li Chunlai *et al.* Space debris and space environment. *Quaternary Sci.*, 2002, **22**(6):540—551. in Chinese (李春来等. 空间碎片与空间环境. 第四纪研究, 2002, **22**(6):540—551)

- [3] Zhang Wei *et al.* Analysis of meteoroids and space debris environment and risk for spacecraft in LEO. *Chin. Space Sci. Tech.*, 2003, (6):58—64. in Chinese (张伟等. 航天器微流星体及空间碎片环境与风险分析. 中国空间科学技术, 2003, (6):58—64)
- [4] Grün E *et al.* The Galileo dust detector. *Space Sci.*, 1992, **60**:317—340
- [5] Bradley J G *et al.* The Cosmic Dust Analyzer for Cassini. *Proc. SPIE.*, 1996, **2803**:5—6
- [6] Simpson J A *et al.* Cosmic dust investigations: II. An instrument for measurement of particle trajectory, Velocity, Mass. *Nucl. Instr. Meth.*, 1989, **A279**:625—639
- [7] Tuzzolino A J. PVDF copolymer dust detectors: particle response and penetration characteristics. *Nucl. Instr. Meth.*, 1992, **A316**:223—237
- [8] Israelevich P L *et al.* Giotto/cometary dust interaction event near comet Halley ionopause. *Adv. Space Res.*, 1996, **17**:99—103
- [9] Perkins M A *et al.* A cometary and interplanetary dust experiment on the Vega spacecraft missions to Halley's comet. *Nucl. Instr. Meth.*, 1985, **A239**:310—323