



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——· 中文核心期刊 中国科技核心期刊

宇宙尘埃轨迹探测器信号提取方法及反演精度影响因素分析

冯桃君 焦子龙 姜利祥 郑慧奇 姜海富 刘宇明 王鹏 刘学超 李涛

Method for information extraction of a cosmic dust trajectory sensor and analysis of influencing factors on inversion process

FENG Taojun, JIAO Zilong, JIANG Lixiang, ZHENG Huiqi, JIANG Haifu, LIU Yuming, WANG Peng, LIU Xuechao, LI Tao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星载天线反射面型面热变形影响因素分析

Analysis of influencing factors on thermal deformation of satellite onboard antenna reflector

航天器环境工程. 2021, 38(2): 130–137 <https://doi.org/10.12126/see.2021.02.003>

一种航天器空间环境效应仿真分析软件架构

An architecture of software for simulation analysis of space environmental effects on spacecraft

航天器环境工程. 2021, 38(5): 555–562 <https://doi.org/10.12126/see.2021.05.010>

空间站空空支架天线热设计与仿真分析

Thermal design and simulation analysis of space frame antenna used on China's space station

航天器环境工程. 2021, 38(6): 625–631 <https://doi.org/10.12126/see.2021.06.003>

10 kV太空电子枪的光学系统设计及仿真研究

Design and simulation of the optical system of 10 kV space electron gun

航天器环境工程. 2021, 38(2): 148–152 <https://doi.org/10.12126/see.2021.02.005>

航天器微振动工装动力学特性仿真分析与试验验证

Simulation and experimental verification of dynamic characteristics of spacecraft micro-vibration test fixture

航天器环境工程. 2019, 36(3): 252–256 <https://doi.org/10.12126/see.2019.03.009>

GaAs太阳能电池空间质子辐射损伤的分子动力学研究

Molecular dynamics simulation on radiation damages of GaAs solar cells caused by spatial protons

航天器环境工程. 2017, 34(3): 247–251 <https://doi.org/10.12126/see.2017.03.004>

宇宙尘埃轨迹探测器信号提取方法及反演精度影响因素分析

冯桃君¹, 焦子龙^{1,2}, 姜利祥^{1,2}, 郑慧奇¹, 姜海富^{1,2}, 刘宇明^{1,2}, 王鹏³, 刘学超³, 李涛⁴

(1. 北京卫星环境工程研究所; 2. 可靠性与环境工程技术重点实验室;

3. 航天东方红卫星有限公司; 北京 100094; 4. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048)

摘要: 利用基于多层金属丝栅网的尘埃轨迹探测器(DTS)可获得宇宙尘埃粒子的速度及电荷信息,对确定粒子起源、揭示带电尘埃粒子与行星际空间环境的相互作用具有重要意义。文章针对利用DTS探测信号提取尘埃粒子速度和电荷信息的方法进行研究,并仿真分析反演精度的影响因素。结果表明,尘埃粒子电荷量和速度大小的探测误差随尘埃粒子速度的增大而增大,随探测器电荷噪声比(QNR)的增大而减小,不受尘埃粒子入射角 θ_v 和尘埃带电量的影响;当QNR大于10时,对尘埃粒子的电荷量、速度和运动方向的反演精度分别优于1.5%、0.8%和0.6°。以上结果可为DTS设计及其后续空间应用提供参考。

关键词: 宇宙尘埃; 尘埃轨迹探测器; 多层金属丝栅网; 诱导电荷; 仿真分析

中图分类号: V242.2; V423.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2023)06-0692-10

DOI: [10.12126/see.2023024](https://doi.org/10.12126/see.2023024)

Method for information extraction of a cosmic dust trajectory sensor and analysis of influencing factors on inversion process

FENG Taojun¹, JIAO Zilong^{1,2}, JIANG Lixiang^{1,2}, ZHENG Huiqi¹, JIANG Haifu^{1,2},
LIU Yuming^{1,2}, WANG Peng³, LIU Xuechao³, LI Tao⁴

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering; 3. DFH Satellite Co., Ltd.: Beijing 100094, China;

4. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: The velocity and charge information of cosmic dust particles can be obtained by dust trajectory sensor (DTS) based on the multi-layer metal wire grids, which is of great significance for determining the origin of dust particles and revealing the interactions between charged dust particles and interplanetary space environment. In this paper, the method of extracting information of cosmic dust particle velocity and charge from the detected signals by DTS was studied, and the factors affecting the detection precision were simulated and analyzed. The results indicate that, the detection error of dust charge and velocity increases with the increasing dust particle velocity, and decreases with the increasing charge to noise ratio (QNR) of the detector, while are independent of the impact of dust particle incidence angle and dust particle charge. When the QNR is larger than 10, the detection precision of charge, velocity and motion direction for dust particles are better than 1.5%, 0.8% and 0.6°, respectively. The simulation can be used as a reference for DTS design and its follow-up space applications.

Keywords: cosmic dust; dust trajectory sensor; multi-layer metal wire grid; induced charge; simulation analysis

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2023-11-20

基金项目: 中国航天科技集团有限公司自主研发项目

引用格式: 冯桃君, 焦子龙, 姜利祥, 等. 宇宙尘埃轨迹探测器信号提取方法及反演精度影响因素分析[J]. 航天器环境工程, 2023, 40(6): 692-701

FENG T J, JIAO Z L, JIANG L X, et al. Method for information extraction of a cosmic dust trajectory sensor and analysis of influencing factors on inversion precision[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(6): 692-701

0 引言

微米和亚微米级的宇宙尘埃粒子通常来自彗星、小行星、月球、星体间的碰撞碎片和行星际物质^[1-2]。宇宙尘埃暴露在等离子体、太阳紫外辐射、高能粒子、电磁场等组成的复杂空间环境中,运动过程中会携带电荷,因此尘埃轨迹是行星和星际磁场、太阳和行星引力、等离子体阻力及辐射压力等因素共同作用的结果^[3-4]。Xie 等^[5]综述并研究宇宙尘埃的运动方式发现:小行星尘埃由于 Poynting-Robertson 效应会以螺旋的方式缓慢接近太阳; β -流星体主要受到太阳辐射压的作用,以双曲线轨迹逃逸出太阳系;Ulysses 号航天器上的尘埃探测器发现木星尘埃粒子受到磁层电场的加速并以大于 100 km/s 的速度逃逸出木星。并且指出,宇宙尘埃的轨迹和电荷信息有助于确定粒子起源,辨别不同起源的粒子,揭示带电尘埃粒子与行星际空间环境的相互作用。

对宇宙尘埃粒子进行探测的方法很多是利用尘埃探测器的原位测量^[6-8],高速粒子在探测器内部发生碰撞电离,可通过电离产生的总电荷量和电脉冲信号的上升时间分别推算出粒子质量和碰撞速度;并通过对粒子飞行时间的分析得出粒子的化学成分。该项技术已在 Vega、Wind、Cassini、STEREO 等航天器上用于探测尘埃的质量、成分和速度大小^[9-11],但速度方向只能通过统计数据得到,要求探测器进行全方位扫描,限制了碰撞探测器的应用。Grün 等^[12]提出了尘埃天文学概念,涉及宇宙尘埃粒子的起源以及粒子化学成分、电荷、速度、轨迹的测量。尘埃轨迹探测器(dust trajectory sensor, DTS)是尘埃天文学的关键探测组件,当带电粒子穿过 DTS 内部的金属丝阵列时,会产生诱导电荷,可通过分析金属丝输出的电信号提取粒子的电荷量和轨迹信息^[1,13]。DTS 与不同的仪器结合可构成尘埃望远镜^[14]、离子质量分析器^[15]和静电质量探测器^[1]等,适用于不同速度、不同尺寸的尘埃颗粒探测。

DTS 在几十年前就已被提出^[5],其几何构型已经过不断优化。Auer 等^[1-2]利用 COULOMB 软件对不同几何构型的 DTS 进行数值仿真,分析金属

丝的几何参数、间距及数量等对电荷分布、信号灵敏度的影响,获得了适用于速度在 2~5 km/s 的微米级尘埃探测的 DTS 结构参数;并得出 DTS 的电荷噪声比(charge to noise ratio, QNR) ≥ 6.25 才能从背景噪声中探测到尘埃信号。Xie 等^[5]同样利用 COULOMB 软件,发现探测器的 QNR 越小电荷量探测误差分布范围越大,当 QNR=10 时,尘埃电荷量探测误差为-1.5%~5%。为提高仪器对尘埃电荷量的探测灵敏度, Li 等^[16]提出了分段式低电容金属丝阵列结构,使尘埃电荷量探测阈值降至 0.2 fC。Voronov 等^[17]介绍了一种基于网格面和金属丝阵列面交替的 DTS 设计,不仅可以测量带电微流星体的电荷量、轨迹,还能计算微流星体的质量。

宇宙尘埃大都分布在亚微米到厘米量级,速度在每秒几千米到几十千米不等, DTS 的探测精度也因尘埃性质不同而显示差异。本文基于典型的 DTS 结构,针对尘埃轨迹和电荷量的测量建立 DTS 数值仿真模型,研究从 DTS 金属丝信号提取尘埃粒子速度矢量和电荷量的方法,重点分析尘埃速度、带电量 and 入射方向对算法精度的影响,有助于探索适用于 DTS 探测的尘埃范围。

1 DTS 结构及工作原理

DTS 一般由中间 4 个金属丝阵列面和分别位于顶部和底部的 2 个屏蔽栅网组成,每个金属丝阵列面包含 7~16 条相互平行的金属丝,两相邻平面的金属丝方向正交。如图 1^[5]所示,两屏蔽栅网接地;每条金属丝都独自与一个电荷灵敏放大器(charge sensitive amplifier, CSA)连接, CSA 通道的输出信号被瞬态记录器以一定频率采集。当带电尘埃粒子穿过 DTS 时,会产生诱导电荷。根据同一平面金属丝信号特性可确定粒子穿过当前平面的一维坐标(x_1, y_2, x_3, y_4),如图 2^[5]所示,进而可推导出尘埃粒子的速度矢量和电荷量^[1,5]。

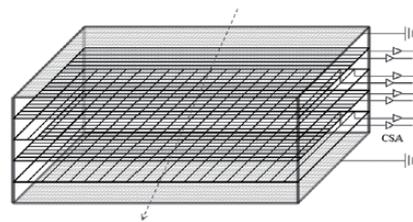


图 1 DTS 结构示意图^[5]

Fig. 1 Structure schematic of DTS^[5]

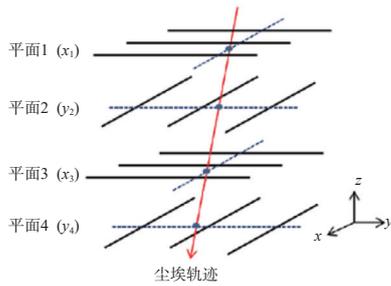


图2 带电尘埃粒子在DTS中的穿越轨迹示意^[5]

Fig. 2 Trajectory schematic of charged particles travelling in DTS^[5]

本文研究所用DTS模型含4个平行于 xy 平面的金属丝阵列面,每个平面包含7条金属丝,相邻平面间隔40 mm,金属丝直径0.4 mm,长140 mm,间隔20 mm;DTS的整体尺寸为160 mm×160 mm×200 mm(长×宽×高),如图3所示。平面编号从上到下依次增加,平面1、3的金属丝平行于 y 轴,平面2、4的金属丝平行于 x 轴。模型坐标原点位于结构的几何中心,图中以红点标记。

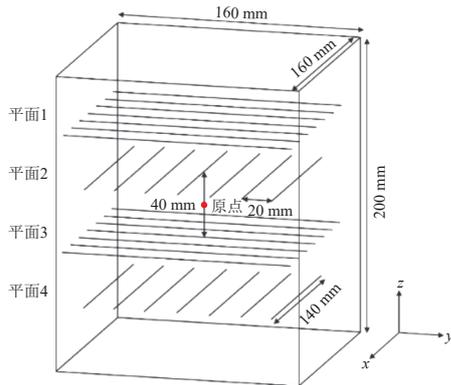


图3 DTS数值模型

Fig. 3 Numerical model of DTS

探测器金属丝的诱导电荷量与尘埃粒子的入射位置、角度、探测器尺寸和构型有关。Auer等^[1]给出了当带电量为 Q 的球形尘埃颗粒穿过DTS时,金属丝 i 的诱导电荷 q_i 的近似表达式

$$q_i = \frac{-Q/r_i}{\sum_j (1/r_j)}, \quad (1)$$

式中: r_i 为尘埃到金属丝 i 的垂直距离; $\sum_j (1/r_j)$ 代表求和遍历了DTS所有的金属丝。尘埃的位置 (x_p, y_p, z_p) 随时间变化,因此尘埃到金属丝的距离和金属丝的诱导电荷均为时间的函数。尘埃电荷量可由所有金属丝诱导电荷相加近似得到。

Auer等^[1]在地面试验中采集到的随时间变化的DTS输出信号如图4所示,图中信号来自两金属丝阵列平面,每阵列包含16条金属丝。输出信

号的形状反映金属丝与尘埃粒子的距离,信号强度反映金属丝带电量,信号峰值表明尘埃粒子近距离地从某金属丝旁穿过该金属丝所在平面。

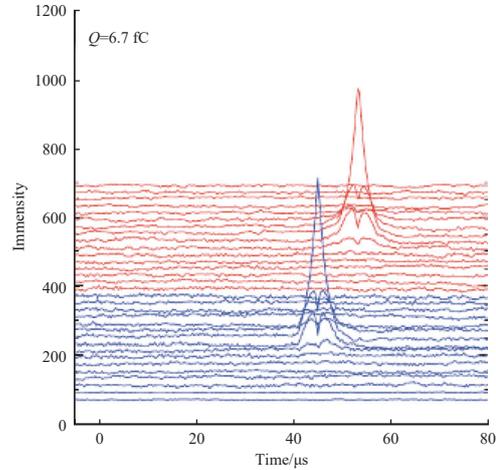


图4 Auer在尘埃实验室记录到的DTS信号^[1]

Fig. 4 DTS signals recorded in the dust laboratory by Auer^[1]

假设高速尘埃粒子在DTS内的轨迹为一条直线,由尘埃粒子进、出DTS的时间 (t_{in}, t_{out}) 和位置坐标 $(x_{in}, y_{in}, z_{in}), (x_{out}, y_{out}, z_{out})$ 可以确定尘埃粒子的速度和方向。通过式(2)可由4个一维坐标确定尘埃粒子进、出DTS的坐标 $(x_{in}, y_{in}), (x_{out}, y_{out})$ ^[5]:

$$\begin{cases} x_{in} = \frac{3}{2}x_1 - \frac{1}{2}x_3 \\ x_{out} = 2x_3 - x_1 \\ y_{in} = 2y_2 - y_4 \\ y_{out} = \frac{3}{2}y_4 - \frac{1}{2}y_2 \end{cases}. \quad (2)$$

粒子速度的大小为^[5]

$$v = \frac{\sqrt{(x_{out} - x_{in})^2 + (y_{out} - y_{in})^2 + (z_{out} - z_{in})^2}}{t_{out} - t_{in}}. \quad (3)$$

粒子入射角为^[5]

$$\begin{cases} \theta_x = \arctan\left(\frac{x_{out} - x_{in}}{z_{out} - z_{in}}\right) \\ \theta_y = \arctan\left(\frac{y_{out} - y_{in}}{z_{out} - z_{in}}\right) \end{cases}, \quad (4)$$

其中, θ_x, θ_y 分别为尘埃轨迹在 xz, yz 平面的投影与 z 轴的夹角。

2 尘埃参数提取方法

2.1 计算流程

为提取尘埃粒子的速度矢量和电荷量,在已知探测器几何构型的前提下,表征尘埃轨迹和电荷量需要7个独立参量:尘埃电荷量(Q);尘埃进、出

DTS 的时刻(t_{in} 、 t_{out})；尘埃穿过 4 个金属丝阵列平面的一维坐标(x_1 、 y_2 、 x_3 、 y_4)，故设参数矢量为 $\mathbf{P}=(Q, t_{in}, t_{out}, x_1, y_2, x_3, y_4)$ 。文献 [5] 提出了一种基于探测数据与仿真数据拟合的参数提取方法，其反演流程如图 5 所示。

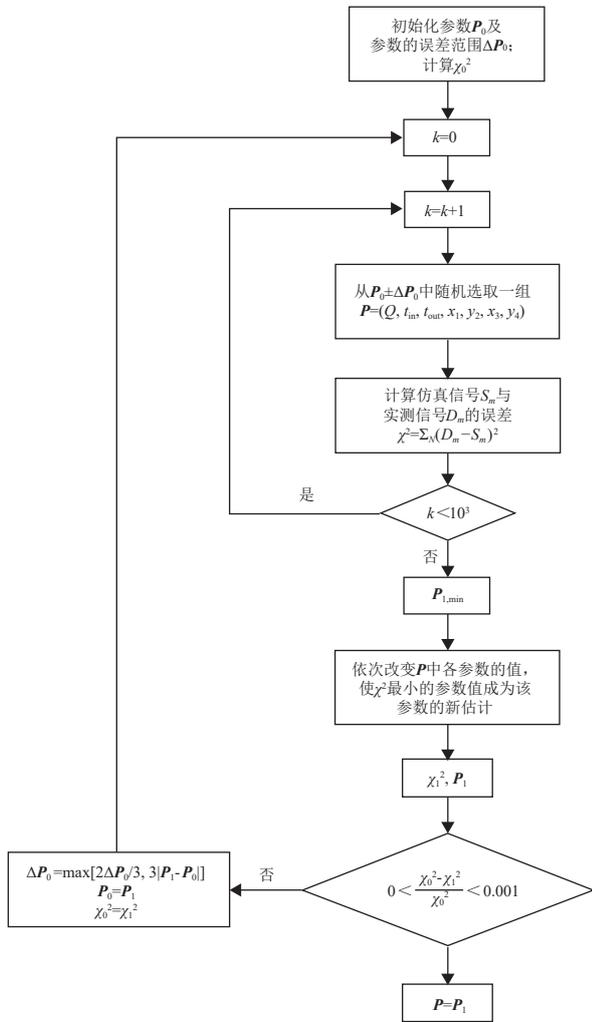


图 5 参数提取反演流程

Fig. 5 Inversion process for parameter extraction

参数提取的具体步骤为：

1) 初始化参数矢量 \mathbf{P}_0 。尘埃初始电荷量 Q 可设置为 DTS 所有金属丝电荷量之和； x_1 、 y_2 、 x_3 、 y_4 根据式 (1) 估算得到。文献 [5] 中并未介绍 t_{in} 和 t_{out} 的取值方法，本文设 DTS 的采样频率为 r (单位为 MS/s，即 10^6 sample/s)，对应的信号采样个数为 n ，并将第 1 个采样信号的时刻 t_1 设置为 0 作为参考，则 $t_{in} \in [-1/r, 0]$ 、 $t_{out} \in [(n-1)/r, n/r]$ ，单位为 μs ， t_{in} 和 t_{out} 的初值在各自范围内均匀随机取值。

2) 初始化参数的误差范围 $\Delta\mathbf{P}_0$ 。 ΔQ 为 $\pm 10\%$ ， Δt 为 $\pm 1/r$ ， Δx 或 Δy 为 ± 10 mm。

3) 数据拟合。从 $\mathbf{P}_0 \pm \Delta\mathbf{P}_0$ 的范围中随机选取一组 $\mathbf{P}=(Q, t_{in}, t_{out}, x_1, y_2, x_3, y_4)$ ，根据式 (1) 以及 DTS 采样频率仿真计算 DTS 各金属丝的采样信号，然后计算仿真信号相对实测信号的误差，

$$\chi^2 = \sum_N (D_m - S_m)^2. \quad (5)$$

式中： χ^2 为仿真信号误差； N 为数据总个数； D_m 为第 m 个实测数据； S_m 为第 m 个仿真数据。

重复上述随机选取参数 \mathbf{P} 即 χ^2 计算 10^3 次， χ^2 值随 \mathbf{P} 变化， χ^2 最小值对应的参数集为 $\mathbf{P}_{1, \min}$ 。

4) 优化参数矢量 \mathbf{P}_1 。由于 χ^2 也是单一参数的函数，依次改变 $\mathbf{P}_{1, \min}$ 中第 l ($l=1, 2, \dots, 7$) 个参数 $\mathbf{P}(l)$ 的值，使 χ^2 最小的参数值成为该参数的新估计值 $\mathbf{P}_1(l)$ 。

5) 缩小参数的误差范围 $\Delta\mathbf{P}_1$ 。 $\Delta\mathbf{P}_1$ 取 $2\Delta\mathbf{P}_0/3$ 和 $3|\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_0|$ 中的大者。

6) 重复步骤 3)~5)，直到 χ^2 的变化小于 0.1%。

2.2 数值仿真与结果分析

为验证 2.1 节尘埃参数提取方法的有效性，针对典型算例进行计算分析。尘埃预设轨迹为入射点坐标 (13, -22, 100)、出射点坐标 (-7, 38, -100)，入射角 $\theta_x = -5.7^\circ$ 、 $\theta_y = 16.7^\circ$ ， z 方向速度分量 $v_z = 5$ km/s，尘埃穿过各金属丝平面的一维坐标为 $x_1 = 9$ mm， $y_2 = 2$ mm， $x_3 = 1$ mm， $y_4 = 26$ mm，涵盖了尘埃与金属丝之间的近距离、中等距离和远距离。另外，金属丝输出信号用诱导电荷与尘埃电荷之比表示，设尘埃电荷为 1 C。设置 QNR=10，采样频率为 $r=10$ MS/s，尘埃穿过 DTS 的时间为 $t=40$ μs ，因此每个金属丝有 $n=400$ 个采样信号。设尘埃进入 DTS 的时间 $t_{in}=0$ ，则 $t_{out}=40$ μs ，参数真值 $\mathbf{P}_{true}=(1, 0, 40, 9, 2, 1, 26)$ ，本文用下标“opt”和“true”分别表示参数的最优估计值和真值。离尘埃近的金属丝将聚集大部分诱导电荷，因此在信号分析中，为节省计算时间只对每个平面中离尘埃最近的 2 条金属丝的信号进行拟合，这样用于拟合的信号一共有 3200 个。实际的观测信号包含了电荷灵敏放大器产生的随机噪声，为模拟真实信号，在式 (1) 计算出的电荷信号中添加正态分布的随机噪声，其均值为 $\mu=0$ ，标准差 $\sigma=1/QNR$ 。根据上述仿真条件，随尘埃位置 z_p 变化的无噪声金属丝模拟信号如图 6(a) 所示，图中虚线表示各平面对应的 z 轴坐标，顶端数字为平面序

号。从图中可看出,当尘埃穿过平面时与金属丝距离很近(如 $y_2=2\text{ mm}$, $x_3=1\text{ mm}$),该金属丝信号幅值骤升,随后下降;与此同时,尘埃另一侧相距较远的金属丝信号出现下凹。当尘埃穿过平面时与两侧金属丝距离相差不大(如 $x_1=9\text{ mm}$),两金属丝信号形状相似。图 6(b) 所示是叠加噪声后的金属丝信号,用于模拟 DTS 的实测信号。

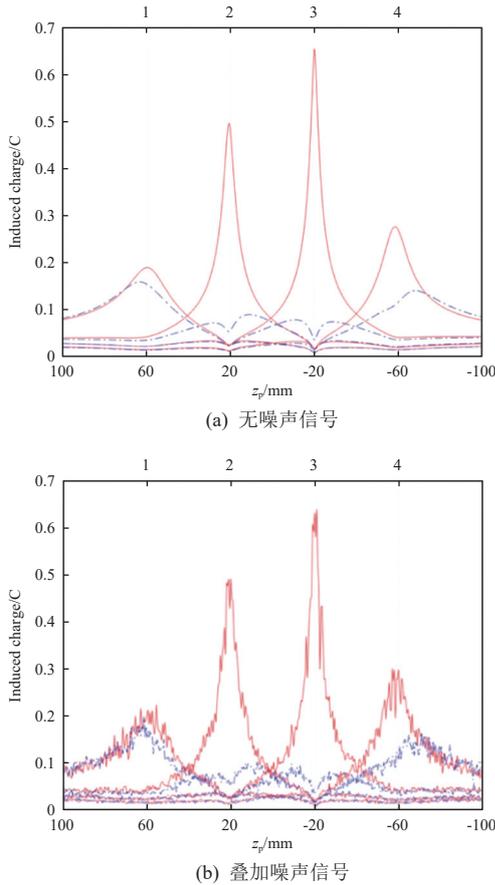


图 6 尘埃粒子从 (13, -22, 100) 到 (-7, 38, -100) 穿越 DTS 的模拟信号

Fig. 6 Simulated signals generated by dust particles travelling from (13, -22, 100) to (-7, 38, -100) through DTS

按上述尘埃轨迹与电荷信号的分析方法,经过 6 次迭代得到各参数的最优估计 $\mathbf{P}_{\text{opt}}=(0.99, -0.05, 41.27, 9.04, 2.06, 0.92, 26.07)$, χ^2 随迭代次数的变化如图 7 所示。参数估计偏差 $\Delta\mathbf{P}=\mathbf{P}_{\text{opt}}-\mathbf{P}_{\text{true}}=(-0.01, -0.05, 1.27, 0.04, 0.06, -0.08, 0.07)$, 尘埃电荷和轨迹的反演结果如表 1 所示。其中,速度的反演结果误差最大,被低估了 7.63%,其原因可能是在独立参数的估计中算法能获得精度较高的尘埃位置,但尘埃穿过 DTS 的时间估值偏差较大(1.32 μs),导致反演的尘埃速度减小。

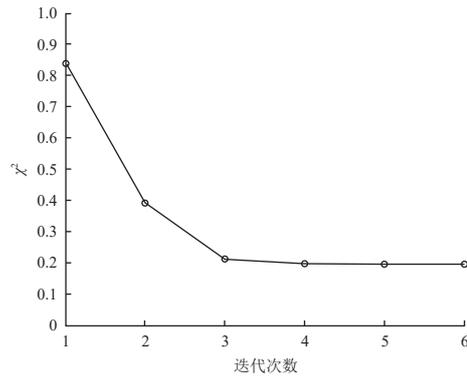


图 7 χ^2 随迭代次数的变化
Fig. 7 Variation of χ^2 with iteration steps

表 1 尘埃电荷与轨迹的反演结果
Table 1 Inversion results of the dust charge and trajectory

参数	真值	反演值	绝对误差	相对误差/%
Q/C	1.00	0.99	-0.01	-1.00
$v/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	5.24	4.84	-0.40	-7.63
$\theta_x/(\text{°})$	5.71	5.80	0.09	1.58
$\theta_y/(\text{°})$	-16.70	-16.71	-0.01	-0.06

参数初值 \mathbf{P}_0 与最优估计 \mathbf{P}_{opt} 对应的金属丝信号分别如图 8(a) 和 (b) 所示。

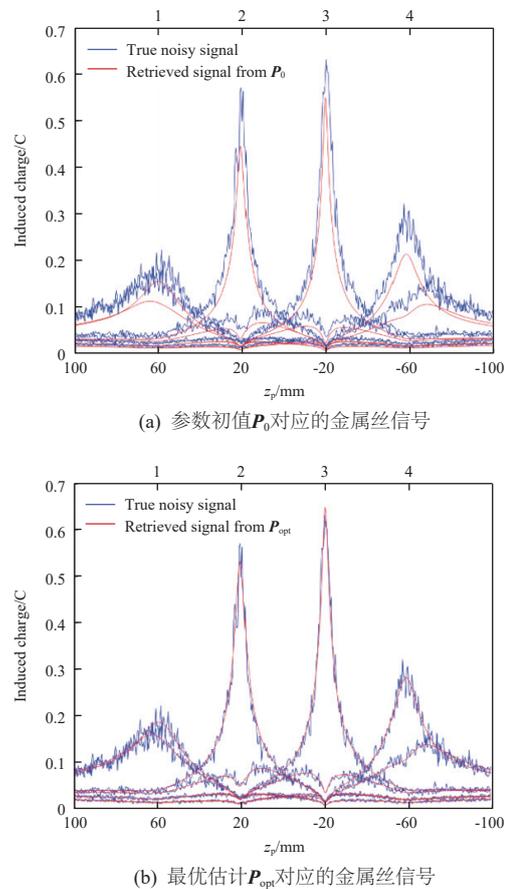


图 8 不同参数估计对应的金属丝信号
Fig. 8 Metal wire signals corresponding to different parameter estimates

图中蓝色表示模拟的实际观测数据，红色表示根据 P_0 和 P_{opt} 反演出的金属丝信号。可以看到，经过 6 次迭代后， P_{opt} 能复现实际的观测信号，说明时间估计的误差只影响尘埃速度大小的反演结果，对尘埃速度方向及 DTS 金属丝信号的反演结果没有影响。

3 反演精度的影响因素分析

分别改变用于仿真的尘埃速度分量 v_z 、入射角度 θ_y 、尘埃电荷量 Q 和探测器电荷噪声比 QNR，分析它们对反演精度的影响。各参数取值如表 2 所示，当改变其中 1 个参量时，其他 3 个参量按表 2 中粗体数字取值。根据采用的 DTS 结构，尘埃穿过 DTS 的最大入射角为 38.6° ，仿真设置 $\theta_x=0^\circ$ ， θ_y 在 $0^\circ\sim 30^\circ$ 范围内变化，表 3 列出了与表 2 中 θ_y 对应的预设尘埃轨迹(进、出 DTS 的位置坐标)。

表 2 各控制变量的取值
Table 2 Values for control variables

控制变量	取值
$v_z/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	2.5、 5.0 、10.0、20.0、40.0、80.0
$\theta_y/(\text{°})$	0、 10 、20、30
Q/C	1 、2、3、4、5
QNR	10 、20、30、40、50、60、70、80

表 3 不同 θ_y 对应的尘埃轨迹
Table 3 Dust trajectories for different values of θ_y

$\theta_y/(\text{°})$	$x_{in}, y_{in}, z_{in}/\text{mm}$	$x_{out}, y_{out}, z_{out}/\text{mm}$
0	10.0, 16.0, 100.0	10.0, 16.0, -100.0
10	10.0, 30.1, 100.0	10.0, -5.2, -100.0
20	10.0, 45.1, 100.0	10.0, -27.7, -100.0
30	10.0, 62.2, 100.0	10.0, -53.3, -100.0

按表 2 依次改变各控制变量数值，针对每一组控制变量(v_z 、 θ_y 、 Q 、QNR)，重复图 5 的反演流程 100 次，每次的模拟信号叠加不同的噪声，会反演得到 100 组不同的尘埃电荷量(Q)及轨迹参数(v_z 、 θ_y 、 θ_x)。尘埃入射角度的反演误差 $\Delta\theta$ 为反演最优值与真值之差，即

$$\Delta\theta = \theta_{opt} - \theta_{true}; \quad (6)$$

电荷量和速度大小的反演误差 Δa 以相对误差表征，即

$$\Delta a = \frac{a_{opt} - a_{true}}{a_{true}} \times 100\%; \quad (7)$$

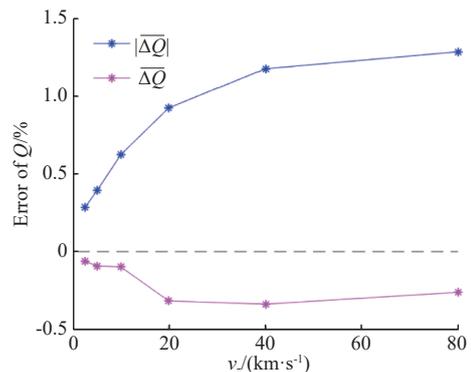
其中符号 a 代表参数 Q 或 v 。

计算得到 100 组反演结果的反演误差后，分析这 100 组反演误差的均值及误差绝对值的均值随表 2 中各控制变量的变化，结果如图 9~图 12 所示。其中，误差绝对值的均值(图中蓝线)反映反演结果相对“真”值的整体偏离幅度，误差均值(图中粉线)反映反演结果相对“真”值的整体偏离方向(被高估或被低估)。

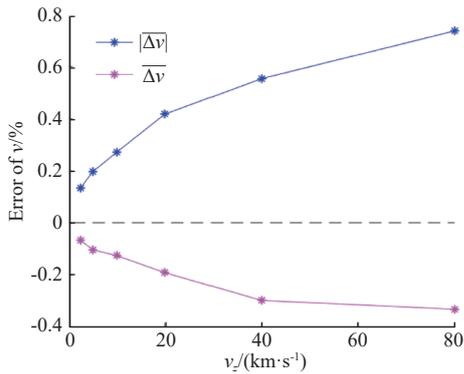
3.1 控制变量为 v_z 的情况

反演误差随 v_z 的变化如图 9 所示。

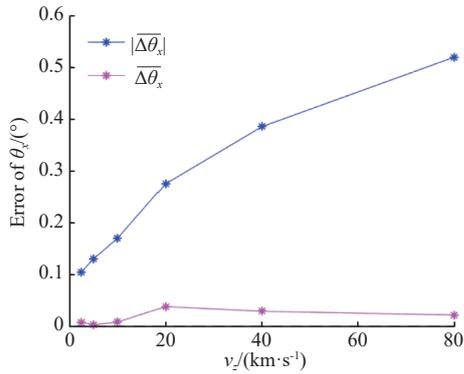
从图 9 可以看出，尘埃电荷量和轨迹的反演误差随尘埃速度的增大而增大(蓝线)，这是由于随着尘埃速度的增大，尘埃穿过 DTS 的时间缩短，导致探测器的采样信号数量减少。当尘埃速度小于 20 km/s 时，误差随速度的变化率较大；当尘埃速度超过 20 km/s 时，误差的增长变缓。随着尘埃速度从 2.5 km/s 增加到 80 km/s， $|\overline{\Delta Q}|$ 从 0.25% 增大到 1.25%， $|\overline{\Delta v}|$ 从 0.12% 增大到 0.74%， $|\overline{\Delta\theta_x}|$ 和 $|\overline{\Delta\theta_y}|$ 分别从 0.1° 增大到 0.52° 和 0.56° 。对于同一尘埃速度， $|\overline{\Delta Q}|$ 均比 $|\overline{\Delta v}|$ 大， $|\overline{\Delta\theta_x}|$ 与 $|\overline{\Delta\theta_y}|$ 大小相当。需要注意的是，虽然各参数的平均反演精度较高，但对于单次反演结果仍可能出现较大的误差。例如，表 1 中尘埃速度的反演误差达到 -7.63%。对于参数整体的偏离方向，尘埃电荷量和速度大小整体呈被低估的趋势(粉线)，且当尘埃速度 < 40 km/s 时，速度越大被低估得越多，电荷量和速度大小整体被低估的量不超过 0.4%。当尘埃速度 ≥ 10 km/s 时，尘埃轨迹倾角整体明显呈现被高估的趋势， θ_x 整体被高估的量不超过 0.05° ， θ_y 的不超过 0.12° 。



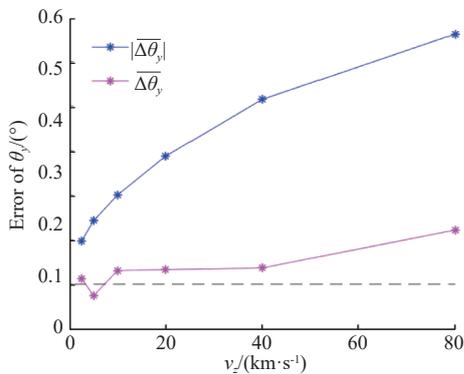
(a) 尘埃电荷量 Q 的反演误差



(b) 尘埃速度 v 的反演误差



(c) 尘埃轨迹方向 θ_x 的反演误差



(d) 尘埃轨迹方向 θ_y 的反演误差

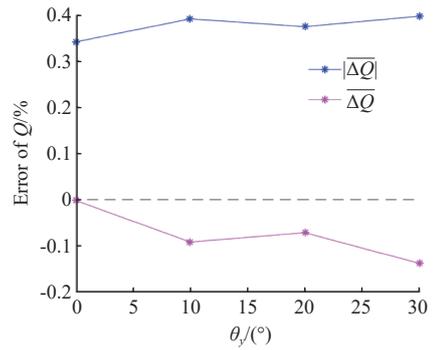
图9 反演误差均值及其绝对值均值随 v_z 的变化

Fig. 9 Variations of mean inversion error and mean absolute inversion error with v_z

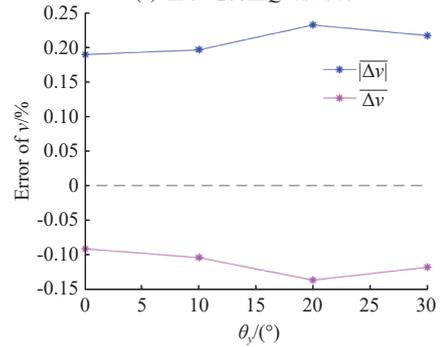
3.2 控制变量为轨迹倾角 θ_y 的情况

反演误差随 θ_y 的变化如图10所示。

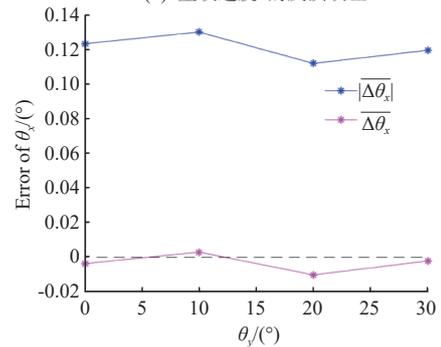
从图10可以看出,除了 $|\Delta\theta_y|$ 本身随着 θ_y 的增大而增大,轨迹倾角的变化对其他参数的反演误差没有显著影响。 $|\Delta Q|$ 在0.3%~0.4%之间, $|\Delta v|$ 在0.15%~0.25%之间, $|\Delta\theta_x|$ 和 $|\Delta\theta_y|$ 均在0.12°左右。在反演结果偏离方向上,同样是尘埃电荷量和速度大小被整体低估,低估量都在0.15%以内,而轨迹倾角相对于“真”值没有明显的偏移方向。



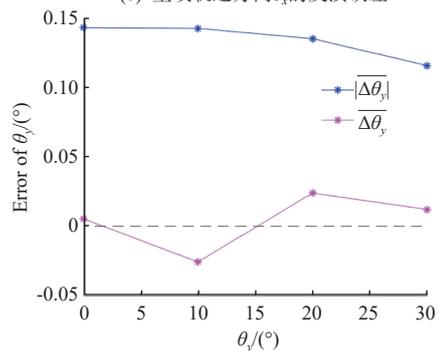
(a) 尘埃电荷量 Q 的反演误差



(b) 尘埃速度 v 的反演误差



(c) 尘埃轨迹方向 θ_x 的反演误差



(d) 尘埃轨迹方向 θ_y 的反演误差

图10 反演误差均值及其绝对值均值随 θ_y 的变化

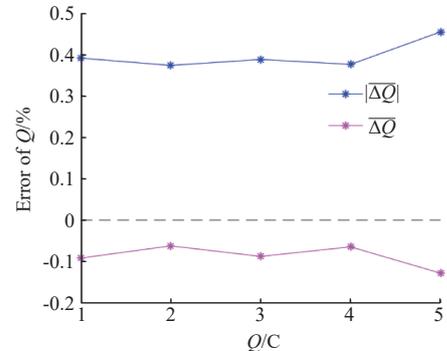
Fig. 10 Variations of mean inversion error and mean absolute inversion error with θ_y

3.3 控制变量为尘埃电荷量 Q 的情况

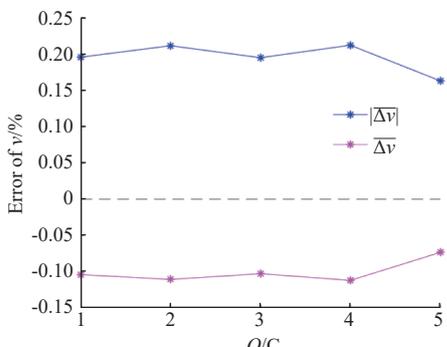
反演误差随 Q 的变化如图11所示。

从图11可以看出,尘埃电荷量的变化对各参数反演误差没有显著影响。 $|\Delta Q|$ 保持在0.4%左

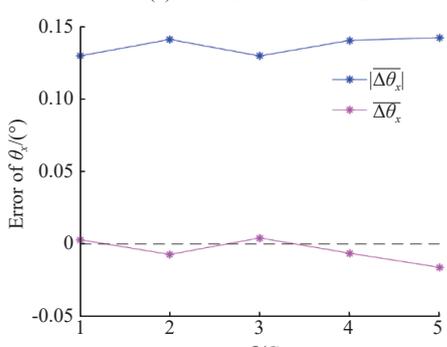
右, $|\Delta v|$ 在 0.2% 左右, $|\Delta\theta_x|$ 和 $|\Delta\theta_y|$ 接近 0.15° 。在反演结果偏离方向上, 尘埃电荷量和速度大小整体被低估 0.1% 左右, 轨迹倾角相对于“真”值同样没有明显的偏移方向。



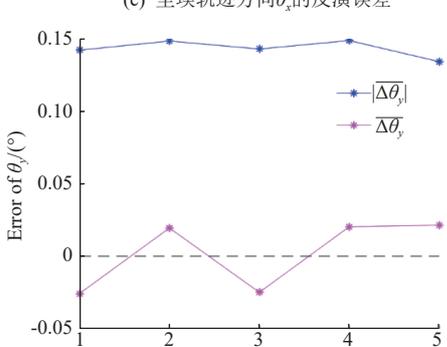
(a) 尘埃电荷量 Q 的反演误差



(b) 尘埃速度 v 的反演误差



(c) 尘埃轨迹方向 θ_x 的反演误差



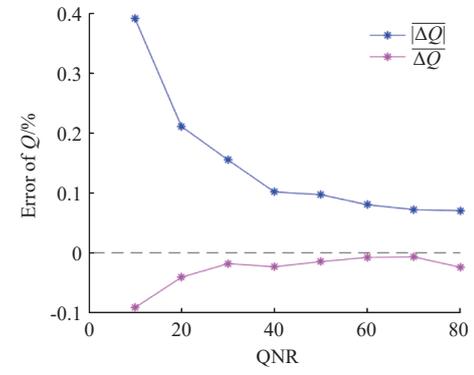
(d) 尘埃轨迹方向 θ_y 的反演误差

图 11 反演误差均值及其绝对值均值随 Q 的变化

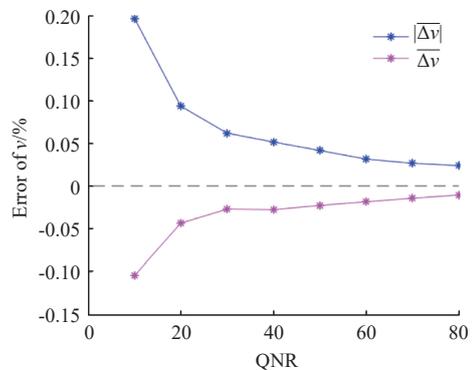
Fig. 11 Variations of mean inversion error and mean absolute inversion error with Q

3.4 控制变量为 QNR 的情况

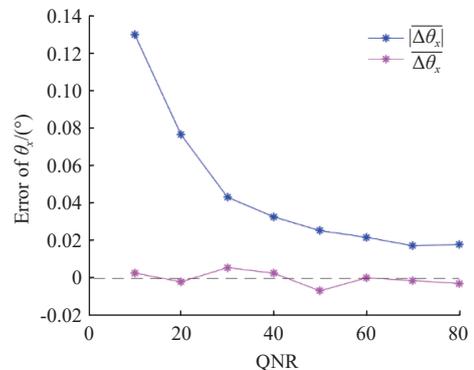
反演误差随 QNR 的变化如图 12 所示。



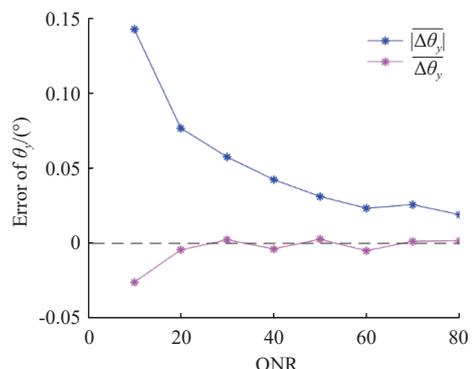
(a) 尘埃电荷量 Q 的反演误差



(b) 尘埃速度 v 的反演误差



(c) 尘埃轨迹方向 θ_x 的反演误差



(d) 尘埃轨迹方向 θ_y 的反演误差

图 12 反演误差均值及其绝对值均值随 QNR 的变化

Fig. 12 Variations of mean inversion error and mean absolute inversion error with QNR

从图12可以看出,尘埃电荷量和轨迹参数的反演误差随探测器QNR的增大而减小并逐渐趋于平缓, $|\Delta Q|$ 小于0.4%, $|\Delta v|$ 小于0.2%, $|\Delta \theta_x|$ 和 $|\Delta \theta_y|$ 均小于0.15°。在反演结果偏离方向上,同样是尘埃电荷量和速度大小被低估,但趋势随QNR的增大而减弱,低估量逐渐从0.1%附近变为接近于0,而轨迹倾角相对“真”值没有明显的偏移方向。

通过上述分析可知,本文所提出的方法在其考虑的参数范围内,对尘埃电荷量的平均反演精度优于1.5%,速度大小的平均反演精度优于0.8%,轨迹倾角的平均反演精度优于0.6°。

4 结束语

尘埃穿过DTS会诱导金属丝产生电信号,通过对观测信号和仿真信号进行拟合可提取尘埃的电荷量与轨迹信息。本文对DTS探测尘埃速度矢量进行了数值仿真,结果表明:

1)尘埃电荷量和轨迹的反演误差随尘埃速度 v_z 的增大而增大,随探测器QNR的增大而减小,基本不受轨迹倾角变化和尘埃带电量的影响。

2)尘埃电荷量反演精度优于1.5%,速度大小反演精度优于0.8%,速度方向反演精度优于0.6°。

本研究通过DTS探测获得了高精度的尘埃电荷量和轨迹信息,并对探测精度影响因素进行了仿真分析,可为DTS研制与科学探测提供参考。需要说明的是:由于反演过程需要7个独立参数,本文算法中通过随机计算 10^3 次来确定 χ^2 的最小值很大可能是局部最小而不是全局最小;本文用于仿真的DTS结构为较优结构,并未针对其他结构类型(如不同的栅网平面间距、金属丝间距等)进行研究;本文对尘埃颗粒形状进行了简化(以球形代替),且用于计算探测器信号的公式与实际情况间存在一定偏差。后续将重点开展金属丝诱导电荷信号的理论 and 试验研究,依据更符合实际情况的信号修正本文的计算方法,进一步开展反演精度分析。

参考文献 (References)

- [1] AUER S, GRÜN E, KEMPF S, et al. Characteristics of a dust trajectory sensor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79: 084501
- [2] AUER S, LAWRENCE G, GRÜN E, et al. A self-triggered dust trajectory sensor[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2010, A622: 74-82
- [3] MANN I, KIMURA H, BIESECHER D A, et al. Dust near the sun[J]. *Space Science Reviews*, 2004, 110: 269-305
- [4] KRÜGER H, STRUB P, SRAMA R, et al. Modelling DESTINY⁺ interplanetary and interstellar dust measurements en route to the active asteroid (3200) Phaethon[J]. *Planetary and Space Science*, 2019, 172: 22-42
- [5] XIE J, STERNOVSKY Z, GRÜN E, et al. Dust trajectory sensor: accuracy and data analysis[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82: 105104
- [6] 姜利祥, 焦子龙, 郑慧奇, 等. 地月平动点尘埃动力学特性原位探测方法研究[J]. *航天器环境工程*, 2022, 39(4): 413-418
JIANG L X, JIAO Z L, ZHENG H Q, et al. Method for in-situ detection of dynamical properties of dust cloud particles at Earth-Moon liberation point[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022, 39(4): 413-418
- [7] GRÜN E, GUSTAFSON B A S, DERMOTT S, et al. Interplanetary dust[M]. Berlin: Springer Verlag, 2001: 324-330
- [8] 焦子龙, 姜利祥, 李涛, 等. 宇宙尘星载原位探测技术研究[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(5): 72-78
JIAO Z L, JIANG L X, LI T, et al. Spaceborne in-situ detection technologies of cosmic dust[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(5): 72-78
- [9] KHALISI E, SRAMA R, GRÜN E. Counter data of the cosmic dust analyzer aboard the Cassini spacecraft and possible “dust cloud” at Saturn[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55: 303-310
- [10] MALASPINA D M, O'BRIEN L E, THAYER F, et al. Revisiting STEREO interplanetary and interstellar dust flux and mass estimates[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120: 6085-6100
- [11] WOOD S R, MALASPINA D M, ANDERSSON L, et al. Hypervelocity dust impacts on the Wind spacecraft: correlations between Ulysses and Wind interstellar dust detections[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120: 7121-7129
- [12] GRÜN E, SRAMA R, HELFERT S, et al. Prospects of dust astronomy missions[C]//Workshop on Dust in Planetary Systems (ESA SP-643). Kauai, HI, USA, 2005: 245-249
- [13] STERNOVSKY Z, GRÜN E, DRAKE K, et al. Novel instrument for dust astronomy: dust telescope[C]//IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA, 2011

- [14] SRAMA R, SROWIG A, RACHEV M, et al. Development of an advanced dust telescope[J]. *Earth, Moon, Planets*, 2005, 95: 211-220
- [15] STERNOVSKY Z, AMYX K, BANO G, et al. Large area mass analyzer instrument for the chemical analysis of interstellar dust particles[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78: 014501
- [16] LI Y W, KEMPF S, SIMOLKA J, et al. Instrument concept of a single channel dust trajectory detector[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(6): 1636-1641
- [17] VORONOV K E, TELEGIN A M, RYAZANOV D M. The concept of a grid-based instrument for measuring micrometeoroid parameters[J]. *Applied Physics*, 2021, 4: 73-80

(编辑: 武博涵)