

用于深空粒子探测系统的自动标定装置研制



孙志朋^{1,2}, 千 奕¹, 孔 洁¹, 杨海波¹, 余乾顺¹, 赵红赞^{1*}, 苏 弘¹,
余玉洪¹, 唐述文¹, 张永杰^{1,2}, 方 芳¹, 蒲天磊¹, 颜俊伟^{1,2}, 柯凌云^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所 兰州 730000; 2. 中国科学院大学核科学与技术学院 北京 石景山区 100049)

【摘要】该文研制了一种基于现场可编程逻辑阵列 (FPGA) 的自动标定装置, 用于对深空粒子探测系统的自动校准和刻度。该标定装置主要包括标准脉冲产生单元、高速模数转换单元和控制与数据处理单元。其控制与数据处理单元基于 FPGA 实现, 采用模块化的设计完成对外围电路控制及数据在线处理。通过各项实验验证, 该装置可在复杂环境下实现对系统的基线稳定性、线性、能量分辨等特性的自动标定, 具有高集成度、高可靠性、高自动化程度和灵活配置等特点, 为深空探测器飞行中的在板标定和自动测试提供手段。

关 键 词 标定装置; 深空探测; 探测器系统; 现场可编程逻辑阵列

中图分类号 TL82 **文献标志码** A **doi:**10.12178/1001-0548.2020240

Development of an Automatic Calibration Circuit for a Particle Detection System Used in Deep Space

SUN Zhi-peng^{1,2}, QIAN Yi¹, KONG Jie¹, YANG Hai-bo¹, SHE Qian-shun¹, ZHAO Hong-yun^{1*}, SU Hong¹,
YU Yu-hong¹, TANG Shu-wen¹, ZHANG Yong-jie^{1,2}, FANG Fang¹, PU Tian-lei¹,
YAN Jun-wei^{1,2}, and KE Ling-yun^{1,2}

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences Lanzhou 730000;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences Shijingshan Beijing 100049)

Abstract An automatic calibration circuit based on field programmable gate array (FPGA) is developed for automatic calibration of deep space particle detection system. The circuit is mainly composed of a standard pulse generator unit, a high-speed Analog-to-Digital converter unit and a control and data processing unit. The control and data processing unit complete the control of peripheral circuits and online data processing, which is implemented based on FPGA. It provides a tool for in-flight calibration and automatic test of the deep space probe system and is verified through various experiments, which shows that the designed circuit can automatically calibrate the system important features of baseline stability, linearity and energy resolution and has the characteristics of high automation, high reliability, high flexibility and high integration.

Key words calibration circuit; deep space exploration; detector system; FPGA

火星是太阳系中距离地球最近的类地行星, 了解火星的演化对于了解地球的未来, 更好预知地球的未来演化有着非常重要的意义, 因此, 火星探测成为继月球探测之后深空探测的最大热点^[1-3]。我国计划于 2020 年开展首次火星探测任务。火星能量粒子探测器是火星环绕器的一个重要科学载荷, 由探测器单元和读出电子学单元组成, 主要用于开展地火转移轨道及环火星轨道上的能量粒子分布情况的探测^[4-5]。深空环境下巨大的昼夜温差、长期不间

断运行的要求和强烈的空间粒子辐射会不可避免地造成电子学单元的性能改变、器件老化甚至永久性损伤^[6-7]。为了及时评估探测器系统的噪声基线、电子学单元的通道一致性、线性、能量分辨等性能, 为离线数据分析以及在轨工作参数的修正提供依据, 本文设计了一款可以应用于深空探测的自动标定装置。该装置由 FPGA 和少量外围电路构成, 结构紧凑, 可直接搭载于火星能量粒子探测器系统的电子学单元上。

收稿日期: 2020-05-27; 修回日期: 2020-09-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (11975293, 11775285); 国家自然科学基金 (11605266, 11705257)

作者简介: 孙志朋 (1993-), 男, 博士生, 主要从事核电子学及数据获取等方面的研究

通信作者: 赵红赞, E-mail: zhaohy_06@impcas.ac.cn

1 标定装置结构及功能

标定装置主要用于对探测器系统 (探测器+电子学) 功能、性能和运行状态的检测与评估^[8]。

1.1 标定装置结构

图 1 所示为标定系统结构框图, 包括被标定模块和标定装置。其中被标定模块由探测器单元和基于 ASIC 芯片的前端电子学单元构成。标定装置由标准脉冲产生单元、高速模数转换单元和控制与数据处理单元构成。标准脉冲产生单元由高精度模数转换器 (DAC) 和高速电子开关构成, 产生标准脉冲

信号作为被标定模块的输入信号。高速模拟数字转换单元由高精度 ADC 及其外围电路构成, 完成对被标定模块输出信号的采样和数字化。控制与数据处理单元是基于 FPGA 的固件代码, 该单元根据上位机的指令, 设置标定参数; 产生包括 ADC、DAC、高速电子开关和被标定模块在内的各模块的控制信号; 接收 ADC 输出的数据, 并对数据进行一系列处理后上传给上位机。上位机 (载荷管理器或是星载计算机) 用于接收上传的数据和下发配置指令, 对标定系统的标定参数进行灵活多样的配置。

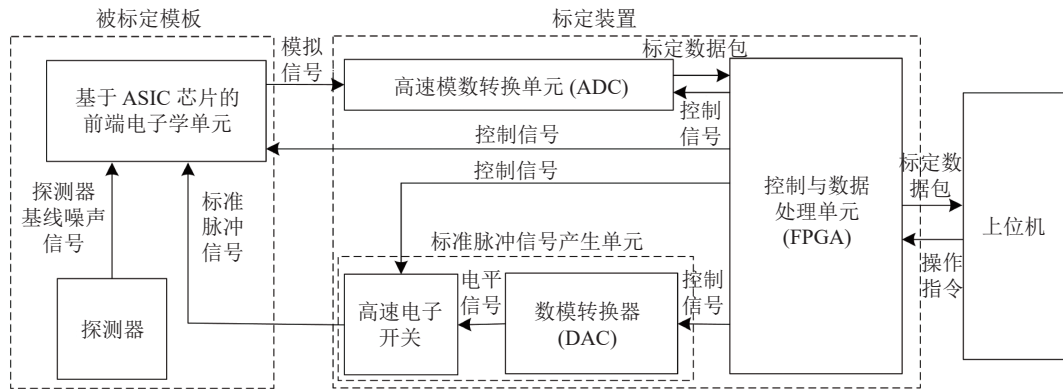


图 1 标定系统结构框图

1.2 标定装置功能

利用该装置可实现对长期工作后的探测器系统进行基线噪声的稳定性测试与评估; 实现对前端电子学单元的线性、通道一致性等性能的测试与刻度。

如图 1 所示, 对探测器系统进行噪声基线测试时, 前端电子学单元直接采集来自探测器的本底噪声信号, 噪声信号经过采样及模数转换后, 送入 FPGA 进行缓存并最终将数据打包上传。同时, 利用式 (1) 将标定所得数据求均值, 在电子学单元性能标定和探测器实际工作过程中, 作为当前探测器系统基线值, 对采集到的数据进行基线扣除, 如式 (2) 所示:

$$B_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i \quad (1)$$

$$V_{act} = V_{raw} - B_{ave} \quad (2)$$

式中, B_i 代表第 i 次采样得到的数据; N 表示采样总次数; B_{ave} 表示基线的平均值; V_{raw} 表示实际采样得到的幅度值; V_{act} 即为基线恢复之后的幅度值。

对电子学单元进行性能刻度时, FPGA 逻辑控制标准脉冲产生电路产生一系列等间隔、特定幅度的标准脉冲信号作为前端电子学单元的输入信号。

探测器系统噪声基线标定和电子学单元性能标定通过指令控制, 可分别独立进行, 亦可由标定系统自动进行切换, 联合进行。为了应对深空条件下指令传输带宽受限^[9-11], 标定指令无法及时发送的情况, 本装置设计了自启动功能, 可依照默认的标定参数定时启动标定过程, 在不需要人工干预的情况下实现探测器系统的全自动标定, 自动标定重复时间间隔可以由上位机进行配置。

2 装置主要模块设计与实现

如前所述, 标定装置主要由标准脉冲产生单元、高速模拟数字转换单元 (ADC)、控制与数据处理单元 (FPGA 固件模块) 3 大模块构成。

2.1 标准脉冲产生单元

如图 2 所示, 标准脉冲产生单元主要由 12 bit 高精度数字模拟转换器 (DAC) 芯片 TLV5638、高速电子开关芯片 ADG201 和外围脉冲成形电路构成。FPGA 控制 DAC 产生一系列精准的电平信号

并送入驱动模块增加信号的带负载能力,同时控制高速电子开关完成高速通/断切换,配合外围脉冲成形电路的工作,形成一系列标准脉冲信号。电平信号的幅度可通过 FPGA 输出码值设置,转换关系如式 (3) 所示:

$$U_o = \frac{U_{\text{ref}}}{2^N} D_n \quad (3)$$

式中, N 为 DAC 位宽; U_{ref} 为 DAC 参考电压; D_n 为 DAC 的输入码值; U_o 为 DAC 输出电压 (即标准脉冲信号的幅度值)。

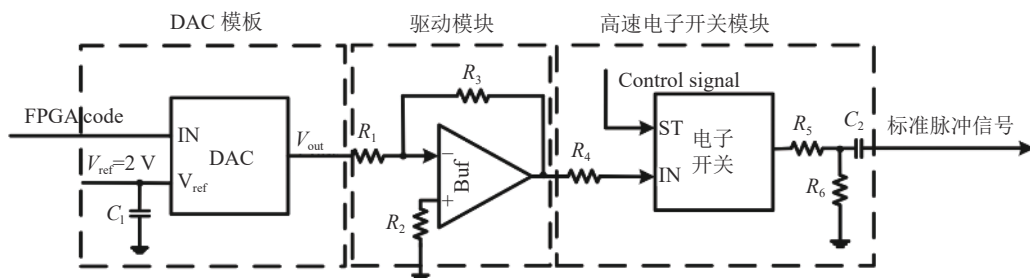


图 2 标准脉冲产生单元结构图

标准脉冲波形产生过程如图 3 所示。在电子学性能标定过程中,该单元从设定的起始值开始,输出等间隔、特定幅度的标准脉冲信号给前端电路,当输出的脉冲信号个数达到预设的特定数量后,输出幅度在原有基础上增加一个步进值,继续输出特定数量标准脉冲信号,直到输出幅度等于预设的终止幅度,结束电子学性能标定。

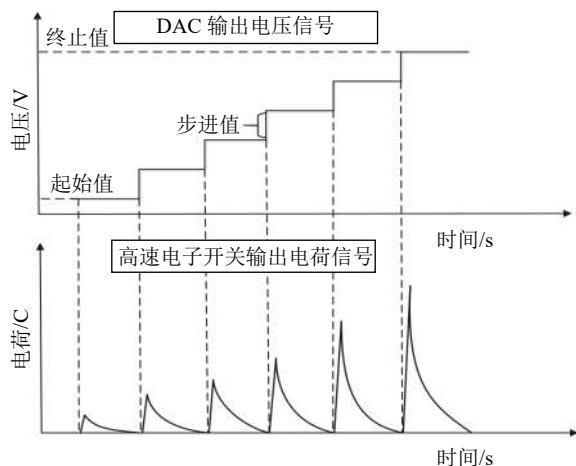


图 3 标准脉冲产生过程

2.2 高速模拟数字转换单元

如图 4 所示,高速模数转换单元包括信号调理电路和一片 14 bit 高精度 ADC 芯片 B9243。前端电子学单元的模拟信号会以差分的形式输出,为了提高信号质量,在信号进入 ADC 前使用信号调理电路进行预处理,提高信噪比并对信号进行放大以匹配 ADC 输入量程;增强信号驱动能力并进行差分-单端转换以匹配 ADC 输入端口。在实际设计中,取 $R_3=R_5$, $R_1=R_6$, $R_2=R_7$, 得到该信号调理电路的输入输出关系如式 (4), 通过调整 R_4 阻值,可

以调整电路的放大倍数。通过调整参考电压 V_{ref} , 可以调整电路输出信号的基线电平,以匹配后续 ADC 电路的基准电压。ADC 芯片在 FPGA 固件控制下,对信号调理电路输出的 V_{out} 数字化,并输出数据到 FPGA。

$$V_{\text{out}} = (V_{\text{in}+} - V_{\text{in}-}) \left(1 + \frac{2R_3}{R_4} \right) \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (4)$$

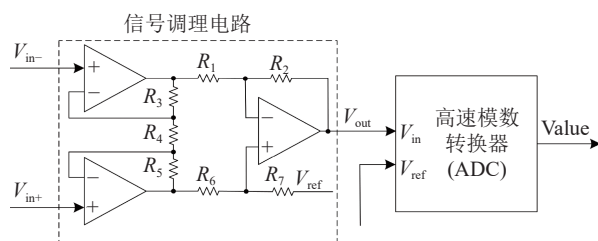


图 4 模拟数字转换单元结构框图

2.3 控制与数据处理单元

如图 5 所示,控制与数据处理单元主要由 7 个 FPGA 固件模块构成,分别为:指令接收、解析模块;自守时模块;触发产生模块;标准脉冲产生单元控制模块;前端电子学单元控制模块;模数转换单元控制模块;数据缓存、打包、传输模块。本单元是标定装置实现各项功能的核心控制单元。

指令接收、解析模块实现和上位机之间的通信,根据上位机下发的指令完成装置工作模式切换、标定参数配置以及启动其他子模块等功能;自守时模块用于完成自启动功能,该模块在系统运行到预设时刻后,自动启动标定过程,在不需要人为干预的情况下完成所有标定流程;触发产生模块在标定期间输出定量的触发信号,驱动相应模块完成信号采集;标准脉冲产生单元控制模块控制外部标

准脉冲产生单元输出标准脉冲信号; 前端电路控制模块控制基于 ASIC 芯片的前端电路工作, 采集来自探测器的噪声基线信号或标准脉冲产生单元的脉冲信号; 模数转换单元控制模块控制 ADC 电路,

将前端电子学单元输出的模拟信号进行模-数转换, 并将转换后的数据送入数据缓存、打包、传输模块; 数据缓存、打包、传输模块完成数据的校验、打包与上传。

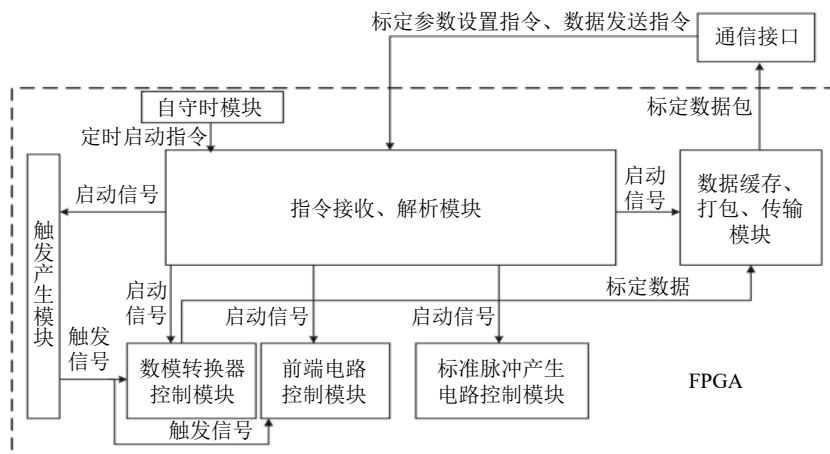


图 5 FPGA 固件模块与构成

深空探测中, 探测器系统一般由多种探测器组合构成, 根据探测器输出信号的特征, 每种探测器都需要有对应的读出电子学通道。为了满足多通道、大动态范围的读出电子学刻度需求, 标定装置设计了参数重配置功能, 标定信号幅度的起始值、步进值、终止值、频率等参数均灵活可调。

为了应对深空探测过程中复杂的辐照环境^[12-13], 在 FPGA 固件设计中对关键模块进行了 3 模冗余加固, 并在数据打包时加入时间戳、CRC 校验码等校验信息以提高系统在数据传输过程中的可靠性。

3 测试与验证

为了验证和评估标定装置的功能与性能, 本文将标定电路与火星能量粒子探测器集成为一体, 并搭建了地面模拟检测系统(简称地检系统), 结合深空探测应用需求, 对探测器系统共计 11 个前端通道的基线稳定性、电子学通道线性和通道能量分辨等性能开展了相应测试, 标定测试所得数据, 可以对探测器及读出电子学性能的评估与优化提供依据。

3.1 大温度范围内系统非线性及能量分辨测试

在深空探测中, 昼夜温差较大^[14], 为了验证系统及标定装置在大温度范围内的性能, 使用 ETOMA 公司的 NT408 型高低温干燥试验箱进行了温度范围为 $-40^{\circ}\sim+50^{\circ}$ 的循环实验, 以 10° 为单位步进, 在每个温度点进行 2 h 温度平衡后再进行电子学线性和能量分辨标定。给定的标定参数为: 起始值为 0 V, 终止值为 2 V, 步进值为 100 mV, 频率为 1 kHz, 能量分辨标定采用 500 mV 标准脉冲信号作为输入。

表 1 给出硅探测器对应读出电子学通道的数据拟合分析结果, 该通道非线性好于 1.86%, 能量分辨 σ 好于 1.91 个 ADC 道 (0.125 mV/道)。整个系统所有探测器对应的电子学通道在各个温度点下非线性性能均优于 2%, 且同一通道全温度范围内变化小于 1%。系统所有探测器对应电子学通道在各个温度点下能量分辨性能优于 3.3 个 ADC 道, 且同一通道全温度范围内变化小于 0.5 个 ADC 道。该项测试表明系统在大温度范围内有着良好的能量分辨和线性性能, 从而验证了探测器系统和标定装置在恶劣环境下的工作的性能。根据测试结果中各通道输出达到饱和时的输入值, 得到了相应通道的线性输入范围, 以判定电子学通道是否满足对应探测器读出需求。

表 1 不同温度下通道非线性及能量分辨统计表

温度/ $^{\circ}\text{C}$	非线性/%	通道能量分辨 σ (ADC道)
-40	1.60	1.62
-30	1.47	1.68
-20	1.29	1.72
-10	1.86	1.75
0	1.64	1.63
10	1.49	1.74
20	1.46	1.91
30	1.31	1.74
40	1.13	1.86
50	1.69	1.80

3.2 系统长期稳定性测试

为了验证系统及标定装置在复杂条件下长时间工作后的性能, 于 2018 年 10 月-2019 年 10 月

开展了力学实验、EMC 电磁兼容实验、超过 1000 h 的高低温老练实验等一系列性能实验。期间,于 2018 年的 12 月 8 日-10 日进行了束流实验,将整个探测器系统置于高强度的重离子束流辐照环境下,模拟深空辐射环境。在性能试验开始前和结束后,分别对整个探测器系统在相同条件(恒温 20°,有屏蔽)下进行相同配置的噪声基线测试、线性标定(起始值为 0 V,终止值为 2 V,步进值为 100 mV,频率为 1 kHz)和能量分辨标定(500 mV 标准脉冲信号作为输入)。对实验前后的标定数据进行对比,选取碘化铯探测器对应读出电子学通道的结果进行展示。如图 6 所示,实验后噪声基线稳定度依然良好,满足设计指标要求。该通道实验前后线性标定结果如图 7 所示,实验前通道非线性为 1.41%,实验后通道非线性为 1.46%。残差分布如图 8 所示,在通道非饱和范围内(<14000 道),实验前后残差分布范围均小于 200 道(0.125 mV/道)且分布规律相似,线性拟合的斜率变化小于 0.05,该项测试说明在经过性能实验后,该通道线性以及增益几乎没有变化,经过分析,系统所有探测器对应的电子学通道实验前后线性变化均小于 0.5%,增益变化小于 0.5%,满足设计指标要求。该通道能量分辨测试结果如图 9 所示,实验前能量分辨(ADC 道)为 3.140 46,实验后能量分辨(ADC 道)为 3.322 11。实验前后能量分辨变化小于 0.2 道,中心道值在输出幅度超过 4400 道的情况下,变化小于 20 道(小于 0.5%),经过分析,系统所有探测器对应电子学通道的能量分辨在实验前后变化小于 0.4 道,且所有通道仍优于 3.3 道,同一输入对应输出的中心道值变化小于 0.5%,满足设计指标要求。通过以上性能测试,验证了系统在经过长期稳定性实验后,仍满足各项设计指标的要求,从而表明了标定装置与整个探测器系统具有较好的工作可靠性,具备在复杂环境下长期工作的能力。

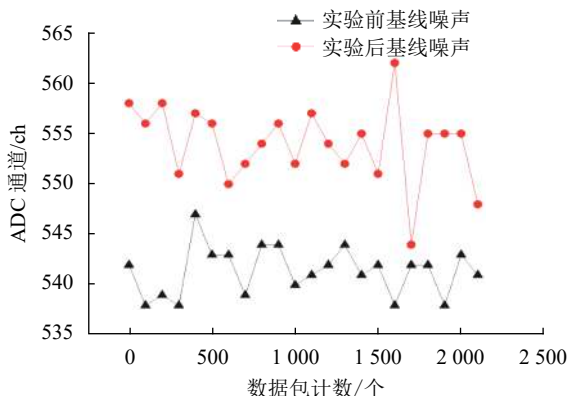


图 6 性能实验前后系统基线稳定性测试结果对比

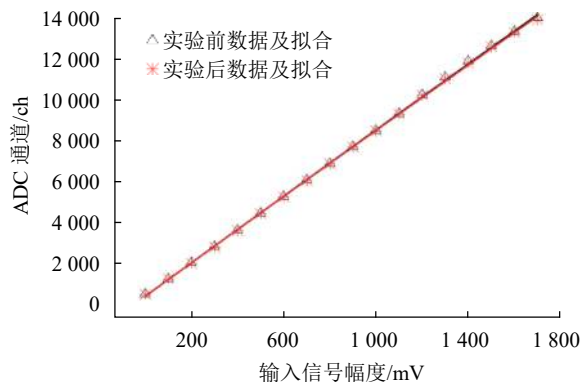


图 7 可靠性实验前后单通道线性标定结果对比

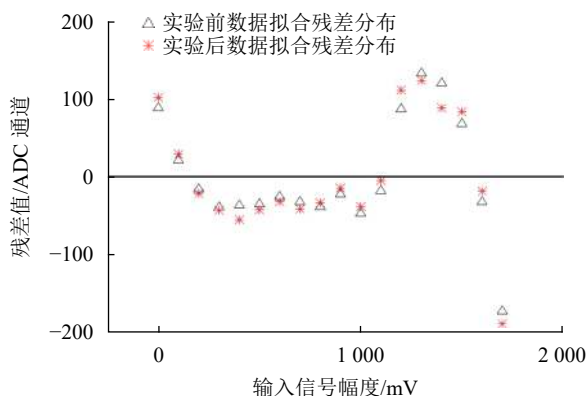


图 8 可靠性实验前后单通道拟合残差分布对比

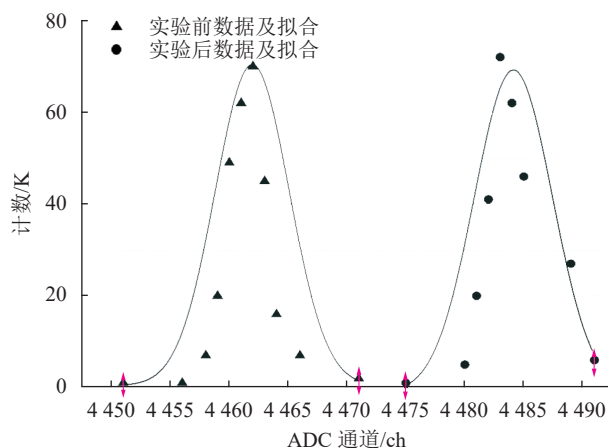


图 9 性能实验前后单通道能量分辨标定结果对比

4 结束语

本文针对深空探测的应用设计了一款基于 FPGA 的标定装置,目前该标定装置已经成功应用于我国首颗火星探测卫星的有效载荷-火星能量粒子探测器,为未来空间飞行中的在板标定和自动测试提供手段。在研发阶段,利用该装置多次对系统进行标定以验证设计是否满足指标要求。该标定装

置采用 FPGA 作为核心控制器件, 外围电路少、结构简单、体积小且功耗低, 具有很强的可移植性, 便于在其他空间粒子探测系统中构建板上标定装置。

参 考 文 献

- [1] 于登云, 孙泽洲, 孟林智, 等. 火星探测发展历程与未来展望[J]. 深空探测学报, 2016, 3(2): 108-113.
YU Deng-yun, SUN Ze-zhou, MENG Lin-zhi, et al. The development process and prospects for Mars exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(2): 108-113.
- [2] 耿言, 周继时, 李莎, 等. 我国首次火星探测任务[J]. 深空探测学报, 2018, 5(5): 399-405.
GENG Yan, ZHOU Ji-shi, LI Sha, et al. Brief introduction of the first Mars exploration mission in China[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(5): 399-405.
- [3] 吴伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报, 2014, 1(1): 1-17.
WU Wei-ren, YU Deng-yun. Development of deep space exploration and its future key technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 1-17.
- [4] 李春来, 刘建军, 耿言, 等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置[J]. 深空探测学报, 2018, 5(5): 406-413.
LI Chun-lai, LIU Juan-jun, GENG Yan, et al. Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(5): 406-413.
- [5] 叶培建, 彭兢. 深空探测与我国深空探测展望[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 17-18.
YE Pei-Jian, PENG Jing. Deep space exploration and its prospect in China[J]. Engineering Science, 2006, 8(10): 17-18.
- [6] 秦熙. 空间等离子体探测中粒子谱仪读出电子学方法的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
QIN Xi. The research on the readout electronics for the Ion detectors of space plasma exploration[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [7] HASSLER D M, ZEITLIN C, WIMMER SCHWEIN-GRUBER R F, et al. Mars's surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover[J]. Science, 2014(343): 1244-1247.
- [8] 唐素秋, 于传松, 赵京伟, 等. 北京谱仪电子学系统性能的标定[J]. 核电子学与探测技术, 1991, 11(4): 208-213.
TANG Su-qiu, YU Chuan-song, ZHAO Jing-wei, et al. The calibration of performance of BES electronics[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1991, 11(4): 208-213.
- [9] 周凡琨, 张晓林, 李赞. 火星-地球中继通信链路预算分析[J]. 遥测遥控, 2018, 39(2): 48-56.
ZHOU Fan-kun, ZHANG Xiao-lin, LI Zan. Analysis of Mars-earth relay communication link[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(2): 48-56.
- [10] 杜艺颖, 姚秀娟, 范亚楠, 等. 火星信道衰落特性对通信链路预算的影响[J]. 空间科学学报, 2019, 39(5): 701-708.
DU Yi-ying, YAO Xiu-juan, FAN Ya-nan, et al. Influence of Mars channel fading characteristics on communication link budget[J]. Chin J Space Sci, 2019, 39(5): 701-708.
- [11] 吴桐, 闫毅, 李永成, 等. 太阳闪烁下深空信道建模与电波传播特性分析[J]. 电波科学学报, 2015, 30(3): 417-422.
WU Tong, YAN Yi, LI Yong-cheng, et al. Deep space channel modeling and the analysis of wave propagation environment characteristics under solar scintillation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(3): 417-422.
- [12] 李桃生, 陈军, 王志强. 空间辐射环境概述[J]. 辐射防护通讯, 2008, 28(2): 1-9.
LI Tao-sheng, CHEN Jun, WANG Zhi-qiang. Brief introduction to space radiation environment[J]. Radiation Protection Bulletin, 2008, 28(2): 1-9.
- [13] ATWELL W, REDDELL B, BOEDER P. A comparison of the radiation environments in deep space[J]. SAE International Journal of Engines, 2007, 116: 133-139.
- [14] 张庆祥, 王立. 行星际空间环境对探测器可靠性影响分析[J]. 航天器工程, 2007(6): 61-66.
ZHANG Qing-xiang, WANG Li. Extreme space environment and its effects on interplanetary exploration missions[J]. Spacecraft Engineering, 2007(6): 61-66.

编辑 刘飞阳