0254-6124/2023/43(1)-0129-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHENG Xiangzhi, ZHANG Aibing, KONG Linggao, WIESER Martin, KALLA Leif, QIU Tongsheng, WANG Wenjing, TIAN Zheng. Data Compression Algorithm of the Ion and Neutral Particle Analyzer for the First Chinese Mars Mission (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(1): 129–136. DOI:10.11728/cjss2023.01.210409047

自主火星离子与中性粒子分析仪数据压缩算法设计*

郑香脂[1,2] 张爱兵[1,2,3] 孔令高[1,2] WIESER Martin[4]
KALLA Leif[4] 仇通胜[1,2] 王文静[1,2] 田 峥[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

4(Swedish Institute of Space Physics, Kiruna 98192)

摘 要 火星离子与中性粒子分析仪共设计 10 种在轨探测模式，不同探测模式下数据率不同，多种探测模式下数据量远超出最大下行数据率的限制。为降低数据率，利用仪器内部 FPGA 有限的资源对压缩处理方法进行了详细设计。通过分析仪器数据特点，火星离子与中性粒子分析仪压缩算法采用合并处理、对数压缩和无损压缩三种压缩算法组合。对于每种探测模式，FPGA 程序可根据压缩标志选择相应压缩算法，实现三种压缩算法串行使用，或选择其中一种或两种算法。并且压缩标志可通过注入指令改写，实现在轨时根据需求灵活配置。合并处理压缩比为 2 或 4，对数压缩的压缩比为 2，无损压缩效率与样本数据间的相关性有关。在此基础上，利用等离子体定标测试系统完成了地面测试。测试结果表明，各探测模式下科学数据经过压缩后数据率满足任务指标要求。

关键词 火星探测，离子，中性粒子，数据合并，对数压缩，无损压缩

中图分类号 P352.7

Data Compression Algorithm of the Ion and Neutral Particle Analyzer for the First Chinese Mars Mission

ZHENG Xiangzhi[1,2] ZHANG Aibing[1,2,3] KONG Linggao[1,2] WIESER Martin[4]
KALLA Leif[4] QIU Tongsheng[1,2] WANG Wenjing[1,2] TIAN Zheng[1,2]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing* 100190)

* 自主火星探测计划项目（MARSY601-1-H）和中国科学院重点部署项目（ZDRW-KT-2019-1-01）共同资助

2021-04-08 收到原稿，2022-07-12 收到修定稿

E-mail：zxz@nssc.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

3(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

4(*Swedish Institute of Space Physics*, *Kiruna* 98192)

Abstract An integrated ion and neutral particle analyzer is built for the first Chinese Mars exploration project, which has ten detecting modes. Most detecting modes of the analyzer produce data far more than data capability of the Mars project. A special data-processing method is presented, including data merging, logarithmic compression and lossless compression. By setting symbols in FPGA, all the three compression algorithms can be used serially, or only requisite algorithms are selected, making data-processing flexible. The compression ratio of data merging is 2 or 4, and logarithmic compression is 2. The compression ratio of lossless compression is necessarily related to data characteristic in different detecting mode. Furthermore, the experiment results show that the data-processing method has good performances and the data rate fulfills the requirements for the project.

Key words Mars exploration, Ion, Neutral particle, Data merging, Logarithmic compression, Lossless compression

0 引言

火星探测对于了解地球的起源和演变以及进一步开发地外空间资源具有重要意义[1]。火星已成为深空探测的重要目标之一，登陆火星并在火星生存是探测火星的终极目标[2]。从早期的 Mariner 系列、Mars 系列、Viking 系列、Phobos-2 到近期的 Mars Global Surveyor(MGS)，Mars Express 和 MAVEN，利用飞越、环绕以及着陆的方式，对火星空间环境进行了不同程度的探测[3–8]。

火星空间环境探测与研究是火星探测任务的重要目标之一。为实现小型化和轻量化设计，火星离子与中性粒子分析仪将离子和中性粒子的探测功能集成于一台载荷，最大限度地节省资源的需求[9]。本文分析了离子与中性粒子分析仪科学数据的组成，对压缩算法进行了详细设计。在保证实现探测目标的前提下，对原始科学数据进行合并处理，采用对数压缩，进而对数据包进行无损压缩的方式。在轨时可根据需求对三种压缩算法灵活配置。

1 分析仪

表 1 给出了火星离子和中性粒子分析仪与国际上同类仪器的指标对比，其外形如图 1 所示，包括传感器系统和电子学系统。电子学系统内部采用 FPGA(RT3 PE3000 L)完成对传感器的控制、科学数据和工程参数的采集和处理，以及与载荷控制器数据交互等功能。

受链路传输限制，要求离子与中性粒子分析仪平均数据率小于 13 kbit·s^{-1}，而该载荷在大部分探测模式下数据率将远大于该指标，因此需要对原始科学数据进行压缩。为保证数据的完整性和载荷科学目标的实现，原始科学数据尽量采用无损压缩，如果采用有损压缩，应对解码后的数据误差进行分析，保证科学目标的实现。此外，由于功耗和体积限制，该算法同时采用电子学系统中 FPGA(RT3 PE3000 L)实现，且资源占用不能超过该 FPGA 的 20%。

空间数据系统咨询委员会(CCSDS)制定了一套无损数据压缩推荐标准，将 RICE 算法作为核心算法。该算法简单，稳定性好，易于硬件实现，适合星载数据的压缩处理，但是压缩比不能满足该载荷所有探测模式压缩需求，还需采用其他压缩方法[10–16]。

2 科学数据组成

2.1 探测模式设计

为满足在轨不同探测需求，离子和中性粒子分析仪在轨设计有 10 种探测模式。如表 2 所示，不同模式下能道、质量组、方位角和俯仰角(离子)的配置信息不一样，时间分辨率也不同。

2.2 科学数据组成

原始科学数据由离子数据和中性粒子数据组成，

表 1 火星离子和中性粒子分析仪与国际上同类仪器的指标对比

Table 1 Performance comparison of the ion and neutral particle analyzer with similar international instruments

探测对象	参数	离子和中性粒子分析仪	Mars express	MAVEN
离子	能量范围/keV	0.0028～25.9	0.010～30	0.001～30
	能量分辨/(%)	12.1	7	15
	质量范围/amu	1～70	1, 2, 4, 8(16,32,44)	1～70
	质量分辨/amu	21%@O^+	区分1, 2, 4, 8(16, 32, 44)	25%
	视场/(°)	90×360	90×360	90×360
	角分辨率/(°)	5.6×22.5	4.5×22.5	6×22.5
	时间分辨率/s	4(可调)	196(可调)	4(可调)
中性粒子	能量范围/keV	0.050～3	0.100～10	—
	能量分辨	83.3%@H, 58.4%@O	50%	—
	质量范围/amu	1～32	1, 16	—
	质量分辨	H, He, O	H, O	—
	视场/(°)	15×360	9×180	—
	角分辨率/(°)	9.7×22.5	5×40	—
	时间分辨率/s	4(可调)	32(可调)	—

图 1 火星离子与中性粒子分析仪实物

Fig. 1 Picture of the ion and neutral particle analyzer

如图 2 所示。其中, 离子数据包含 4 路总计数和离子数据处理结果, 离子数据处理结果包括能道 1、能道 2、……、能道 L, 共 L 个能道数据; 每个能道包含俯仰角 1、俯仰角 2、……、俯仰角 M, 共 M 个俯仰角数据。同理, 每个俯仰角数据中有 N 个方位角数据, 每个方位角包括 P 个质量组数据, 每个质量组数据包括一个 2 Byte 的离子计数。中性粒子数据的组成与离子数据的组成相比, 除了没有俯仰角数据外, 其余数据与离子一致。

此外, 为实现能谱测量的完整和连续, 探测中性粒子时仪器能道个数设置为 16; 同理, 为实现离子俯仰角测量的连续性, 俯仰角个数配置为 16。

通过计算可知, 离子与中性粒子分析仪不同探测模式下数据率不一样。高时间分辨工作模式下数据率约 293.2 kbit·s^{-1}, 默认模式下数据率约为 122.8 kbit·s^{-1}, 太阳风模式下数据率约 96.4 kbit·s^{-1}, 而在中性粒子探测模式下数据率只有约 2.67 kbit·s^{-1}。因此, 在满足仪器探测需求的前提下, 该仪器需要针对数据特征选择合理的压缩方案以满足下行数据率要求。

3 数据压缩算法设计

综合以上分析可知, 该载荷原始数据量大, CCSDS 无损压缩无法满足压缩需求。且载荷内部硬件资源有限, 无法选用其他复杂的无损压缩算法。本文对载荷数据特点和探测需求进行分析, 通过研究多种数据压缩方法相结合的方案, 满足在轨压缩需求。

3.1 合并处理

合并处理包括俯仰角合并和能道合并。仪器在探测中性粒子时, 为实现能谱探测的完整性和连续性, 中性粒子能道探测个数设为 16。由表 2 可知, 不同探测模式下, 中性粒子只需分辨 8 个能道。因此, 通过能道的合理划分, 可将相邻 2 个能道的数据合并, 最终将 16 个能道数据合并成 8 个能道输出。中性粒子能道合并时, 将相邻能道中相应的方位角及其质量组数据一一累加处理, 使得数据量降至原来的

表 2 离子和中性粒子探测模式设计

Table 2 Detecting modes of the ion and neutral particle analyzer

序号	模式名称	参数设置	时间分辨率/s	备注
1	默认	离子: 40 E×8 M×16 A×4 D	16	开机后默认工作模式, 可在全轨道采用
		中性: 8 E×3 M×16 A×1 D	8	
2	高能量分辨	离子: 64 E×8 M×16 A×4 D	16	高能量分辨要求下的太阳风或磁鞘区探测
		中性: 8 E×3 M×8 A×1 D	8	
3	磁尾	离子: 64 E×8 M×16 A×4 D	12	远火点前后开启
		中性: 8 E×3 M×8 A×1 D	6	
4	低能离子	离子: 64 E×8 M×16 A×4 D	12	重点测量离子时采用
5	高时间分辨	离子: 64 E×8 M×16 A×4 D	12	部分轨道段采用
		中性: 8 E×1 M×16 A×1 D	6	
6	全分辨	离子: 64 E×16 M×16 A×16 D	232	最全分辨率的探测, 可在全轨道采用
		中性: 8 E×3 M×16 A×1 D	116	
7	太阳风	离子: 64 E×1 M×16 A×16 D	8	主要在奔火阶段使用
8	电离层	离子: 48 E×32 M×1 A×1 D	2	<800 km使用
9	中性粒子	中性: 8 E×3 M×16 A×1 D	8	重点测量中性粒子时采用
10	自诊断	离子: 32 E×1 M×16 A×6 D	8	仪器自检测
		中性: 8 E×1 M×16 A×1 D	4	

注 E表示能道(例如40 E表示分辨40个能道, 64 E表示分辨64个能道, 以此类推), M表示质量组, A表示方位角, D表示俯仰角。

1/2。探测离子时, 不进行能道合并。

同理, 为实现俯仰角测量的完整性和连续性, 离子俯仰角探测个数设为 16, 而在默认模式、高能量分辨模式、磁尾模式、低能离子模式和高时间分辨模式下只需分辨 4 个俯仰角。因此, 可将相邻 4 个俯角中相应的方位角及其质量组数据一一相加输出, 使得数据量降低至原来的 1/4。对于全分辨率和太阳风模式, 在轨时需分辨 16 个俯仰角, 为保证分辨率不进行离子俯仰角数据合并。不同探测模式下合并处理实现的压缩比列于表 3。

合并处理占用载荷内部 FPGA 资源约为 2.48%, 既能满足载荷能道和俯仰角探测的需求, 降低数据量, 又不引入新的误差。

3.2 对数压缩算法设计

经过合并处理后的科学数据可根据标志位选择进行对数压缩, 将两字节的计数压缩为一个字节。也可选择不进行对数压缩, 直接将合并后数据进行打包。

本文设计的对数压缩算法, 压缩前与解压后的数据对比见表 4。该对数压缩算法采用查表法实现, 占用 FPGA 资源少(约 0.28%), 处理速度快, 压缩前后的数值关系曲线如图 3 所示。

此外, 该对数压缩算法的量化噪声如图 4 所示。在输入为 0～63 时, 压缩后的数据与原始数据相同, 误差为 0; 输入在 64～255 内, 最大误差为 2% 左右; 输入在 256～65535 内, 最大误差为 6% 左右。

3.3 无损压缩算法设计

综合考虑性能和复杂度, 无损压缩算法采用 CCSDS 无损数据压缩算法。该算法由预处理器和自适应熵编码器两部分组成。其中预处理模块包括两部分, 即预测器和映射器[17–18]。预测器是对当前输入值 x_i 进行预测, 并输出一个预测值 $\tilde{x}_i$。在本设计中, 预测器采用的是单位时延预测, 采用图 5 所示算法程序结构实现预处理。其中输入数据位宽为 8 bit; 初始时刻, x_0 作为参考数据直接输出。

设计实现的无损压缩算法中, 映射函数为

$$\delta_i = \begin{cases} 2\Delta_i, & \theta_i - \Delta_i \geqslant 0; \\ \theta_i + \Delta_i, & \theta_i - \Delta_i < 0;\ \Delta_i \geqslant 0. \end{cases} \tag{1}$$

$$\delta_i = \begin{cases} 2\left|\Delta_i\right| - 1, & \theta_i + \Delta_i \geqslant 0; \\ \theta_i + \left|\Delta_i\right|, & \theta_i + \Delta_i < 0;\ \Delta_i < 0. \end{cases} \tag{2}$$

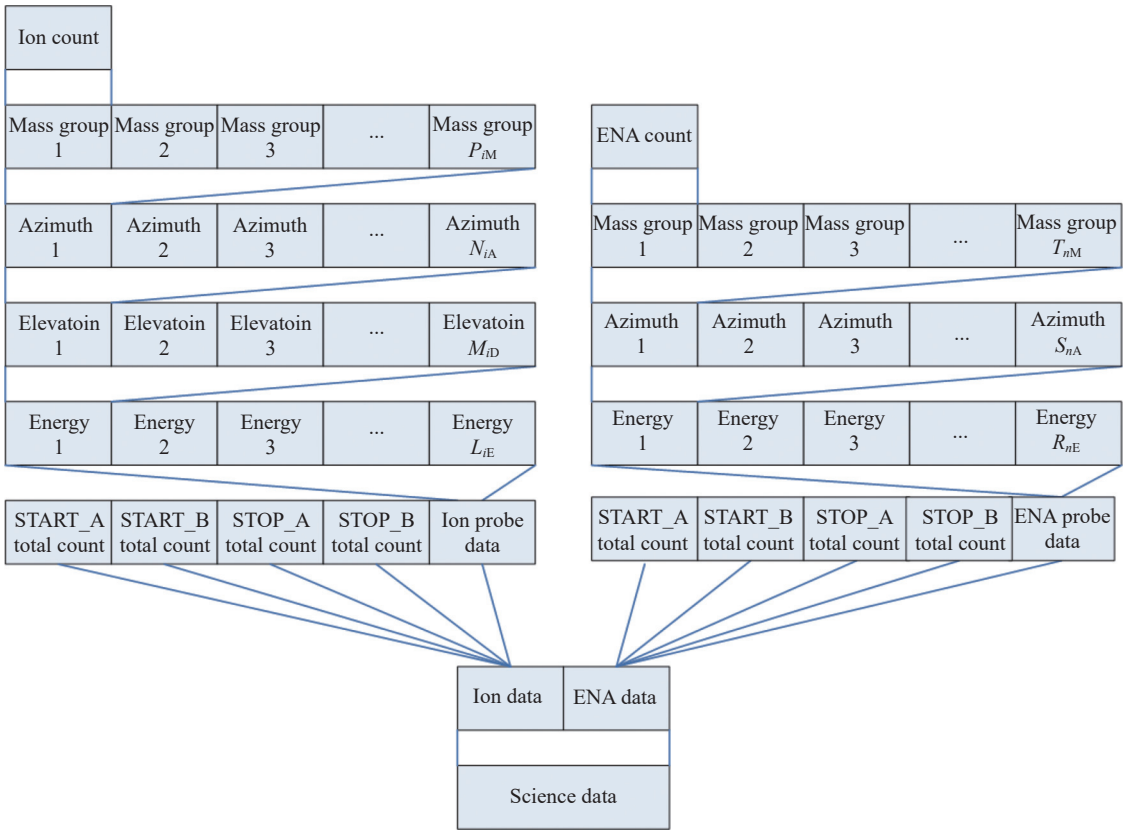

图 2　原始科学数据组成

Fig. 2　Composition of science data

表 3　不同探测模式下合并处理实现的压缩比

Table 3　Compression ratios of data merging in different detecting modes

序号	模式名称	压缩比
1	默认	4
2	高能量分辨	4
3	磁尾	4
4	低能离子	4
5	高时间分辨	4
6	全分辨	—
7	太阳风	—
8	电离层	4
9	中性粒子	2
10	自诊断	—

式中,

$$\theta_i=\begin{cases}\tilde{x}_i, & \tilde{x}_i\leqslant 128;\\ 255-\tilde{x}_i, & \tilde{x}_i>128;\end{cases}\quad \Delta_i=x_i-\tilde{x}_i.$$

式(1)和式(2)对标准映射函数的 FPGA 实现进行了适应性修改。

将 8 个字节输入数据作为一组进行压缩, RICE 自适应熵编码 FPGA 如图 6 所示。根据 8 个映射器输出值δ_i进行编码选择, 再将编码后的数据拼接后按字输出。

预处理和编码过程采用流水设计, 数据处理实时性高, 完成一个完整数据包压缩的时间少于 10 ms, 满足探测需求, 并且占用 FPGA 资源少(约 16.13%)。

RICE 压缩算法的压缩效率与样本数据之间的相关性有关, 邻近数据变化越小, 压缩比越大。图 2 中原始科学数据排列时, 充分考虑了相邻数据的相关性, 以提高压缩性能。

3.4　在轨组合配置

通过对数据特点和探测需求进行分析, 离子与中性粒子分析仪的数据压缩处理方法设计中包括合并处理、对数压缩和无损压缩三种压缩算法的组合。不同压缩算法间为串行关系, 即合并处理后的数据进行对数压缩, 最后再选择无损压缩。FPGA 程序可根据压缩标志位, 选择是否采用压缩, 以及采取哪一种或

表 4 16 bit 到 8 bit 压缩前后数据对比

Table 4 Compressed code and decompressed code of 16 bit to 8 bit logarithmic compression

Linnear input code (16 bit)	Compressed code	Decompressed code
00000000 000 tuvwx	0 00 tuvwx	00000000 000 tuvwx
00000000 001 uvwxy	0 01 uvwxy	00000000 001 uvwxy
00000000 01 u vwxya	0 10 uvwxy	00000000 01 u vwxy0
00000000 1 uv wxyab	0 11 uvwxy	00000000 1 uv wxy00
00000001 uvwx abcd	1 000 uvwx	00000001 uvwx 000
0000001 u vwxa bcde	1 001 uvwx	0000001 u vwx0 0000
000001 uv wxab cdef	1 010 uvwx	000001 uv wx00 0000
00001 uvw xabc defg	1 011 uvwx	00001 uvw x000 0000
0001 uvwx abcd efgh	1 100 uvwx	0001 uvwx 0000 0000
001 uvwxa bcde fghi	1 101 uvwx	001 uvwx0 0000 0000
01 uvwxab cdef ghij	1 110 uvwx	01 uvwx00 0000 0000
1 uvwxabc defg hijk	1 111 uvwx	1 uvwx000 0000 0000

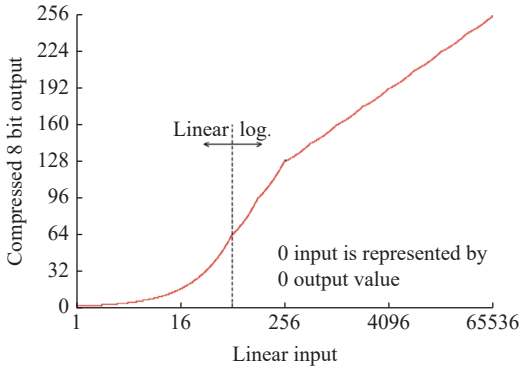

图 3 对数压缩的输入与输出关系曲线

Fig. 3 Input-output characteristic curve of logarithmic compression

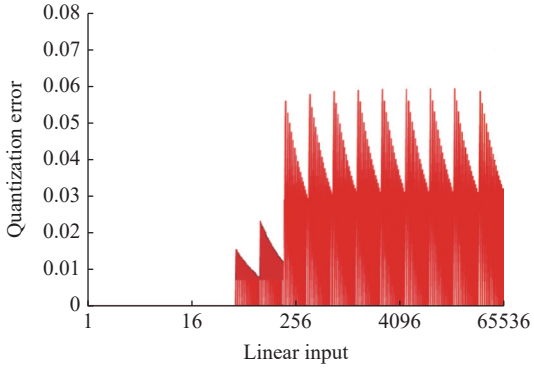

图 4 对数压缩算法量化误差

Fig. 4 Quantization error of logarithmic compression

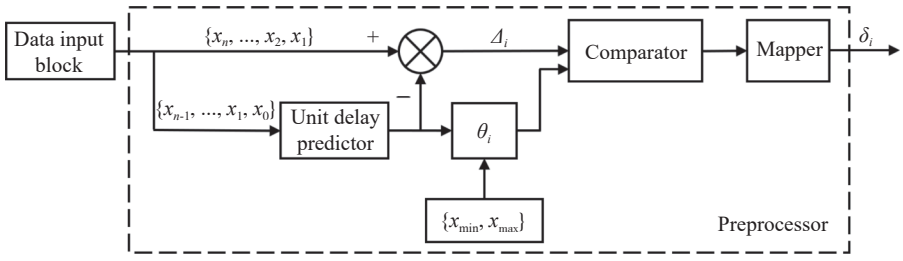

图 5 预处理器结构

Fig. 5 Diagram of preprocessor

哪几种压缩方式。压缩标志位可通过注入指令改写，实现在轨时根据不同的探测需求和仪器数据特征灵活配置。

当三种压缩算法都被选用时，在数据包产生过程中，根据仪器探测模式先进行俯仰角与能道的合并处理；对合并后的数据进行对数压缩；周期工作结束时，

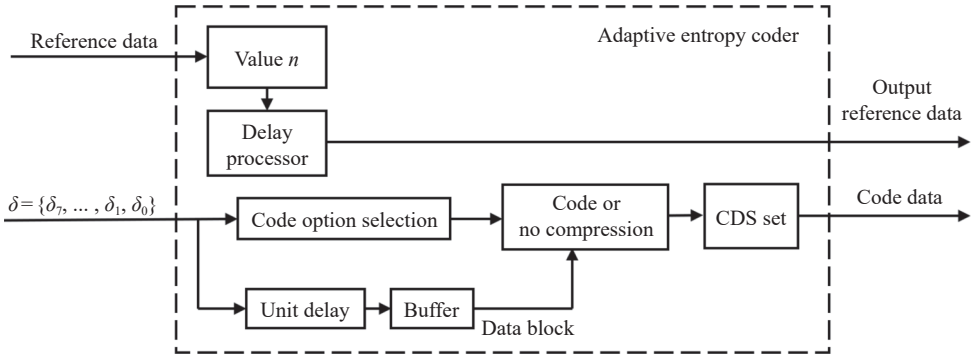

图 6 自适应熵编码器结构

Fig. 6 Diagram of the adaptive entropy coder

表 5 不同探测模式下的数据率(单位 kbit·s^{-1})

Table 5 Data rate of different detecting modes (Unit kbit·s^{-1})

序号	模式名称	压缩前数据率	合并处理及对数压缩后的数据率	合并处理、对数压缩及无损压缩后的数据率
1	默认	122.8	16.05	3.16
2	高能量分辨	194.8	25.05	4.39
3	磁尾	259.6	33.26	5.64
4	低能离子	256.4	32.42	5.50
5	高时间分辨	293.2	37.69	6.32
6	全分辨	27.1	13.71	2.52
7	太阳风	96.4	48.42	8.09
8	电离层	72.4	9.42	2.05
9	中性粒子	2.67	0.98	0.76
10	自诊断	11.2	11.2	11.2

对当前周期数据包中的科学数据进行无损压缩。如果选择不进行合并处理,科学数据直接进行对数压缩,周期结束后再进行无损压缩。如果选择不进行对数压缩,合并处理后的数据直接打包,周期结束后再进行无损压缩。同理,如果选择不进行无损压缩,经合并处理和对数压缩后的数据可直接打包输出。此外,还可以根据需求,只选择一种压缩算法或不进行压缩处理,直接将原始数据打包输出。

4 地面测试结果分析

在中国科学院国家空间科学中心怀柔园区等离子体定标系统中,对火星离子与中性粒子分析仪的10种工作模式分别开展了有源状态下的实测。测试系统包括真空转台、离子束源、电子束源和地磁屏蔽线圈等,如图 7 所示。

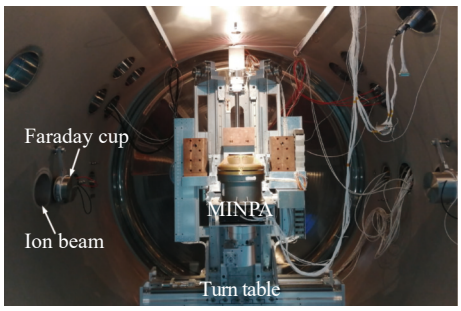

图 7 仪器定标系统

Fig. 7 Composition of calibration system

仪器定标系统的基本性能参数如下。

电子束能量范围: 0.10～30 keV。

离子束能量范围: 0.03～30 keV。

离子源成分: H^+, He^+, O^+, N^+, Ar^+等。

不同探测模式下压缩前后的数据率见表 5。测试

结果表明，各探测模式下科学数据经过三种压缩方法处理后的数据率均满足平均数据率小于 13 kbit·s^{-1}的要求。此外，对于中性粒子探测模式，在轨时可不进行压缩处理；对于默认模式、全分辨模式和电离层模式等，可根据在轨测试结果只采用合并处理和无损压缩。

5 结论

在满足仪器技术要求的条件下，离子与中性粒子分析仪的数据率远大于技术指标要求的 13 kbit·s^{-1}，因此需要进行数据压缩。通过对科学数据特点进行分析，采用了合并处理、对数压缩、无损压缩相结合的方法对科学数据进行压缩，并且在轨时可根据需求灵活调整。地面测试结果表明，压缩后仪器的数据率可以满足任务指标要求。

参考文献

[1] YAO Pengfei. Research on Deep-Space Channel Modeling for Mars Exploration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (姚朋飞. 面向火星探测的深空信道建模研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017)

[2] ZOU Hong, CHEN Hongfei, SHI Weihong, *et al.* Detection of Martian ionosphere[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, **31**(3): 323-329 (邹鸿, 陈鸿飞, 施伟红, 等. 火星电离层探测[J]. 空间科学学报, 2011, **31**(3): 323-329)

[3] NEUGEBAUER M, SNYDER C W. Solar plasma experiment[J]. *Science*, 1962, **138**(3545): 1095-1097

[4] FARMER C B, DAVIES D W, HOLLAND A L, *et al.* Mars: water vapor observations from THE Viking orbiters[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**(28): 4225-4248

[5] VERIGIN MI, GRINGAUZ K I, KOTOVA G A, *et al.* On the problem of the Martian atmosphere dissipation/ Phobos: 2 TAUS spectrometer results[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, **96**(A11): 19315-19320

[6] MITCHELL D L, LIN R P, MAZELLE C, *et al.* Probing Mars' crustal magnetic field and ionosphere with the MGS electron reflectormeter[J]. *Journal of Geophysical Research:Planets*, 2001, **106**(E10): 23419-23427

[7] BARABASH S, LUNDIN R, ANDERSSON H, *et al.* The analyzer of space plasmas and energetic atoms (ASPERA-3) for the Mars express mission[J]. *Space Science Reviews*, 2006, **126**(1-4): 113-164

[8] MCFADDEN J P, KORTMANN O, CURTIS D, *et al.* MAVEN suprathermal and thermal ion compostion (STATIC) Instrument[J]. *Space Science Reviews*, 2015, **195**(1-4): 199-256

[9] KONG Linggao, ZHANG Aibing, TIAN Zheng, *et al.* Integrated ion and neutral particle analyzer for Chinese Mars Mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, **6**(2): 142-149 (孔令高, 张爱兵, 田峥, 等. 自主火星探测高集成离子与中性粒子分析仪[J]. 深空探测学报, 2019, **6**(2): 142-149)

[10] ZHANG Xuequan. Implementation of Onboard Image Compression System Using FPGA[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research Chinese Academy of Sciences, 2009 (张学全. 基于FPGA的星载图像压缩系统实现方法研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2009)

[11] WU Wenbo, WANG Kun, CHEN Dayu, *et al.* Research on application of CCSDS in remote sensing image compression[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, **31**(2): 46-50 (武文波, 王琨, 陈大羽, 等. CCSDS在遥感图像压缩中的应用研究[J]. 航天返回与遥感, 2010, **31**(2): 46-50)

[12] SUN Jianwei, ZHANG Zhongwei, ZHENG Tie, *et al.* Design of lossless compression system for CCSDS on-board data based on FPGA[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2019, **39**(5): 694-700 (孙建伟, 张忠伟, 郑铁, 等. 基于FPGA的CCSDS星载数据无损压缩系统设计[J]. 空间科学学报, 2019, **39**(5): 694-700)

[13] ZHU Yunhua, WANG Fengyang, LIU Yong, *et al.* Implementation and application study of CCSDS lossless data compression algorithm[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2008(4): 40-46 (朱云华, 王凤阳, 刘泳, 等. CCSDS无损数据压缩算法的实现与应用研究[J]. 中国空间科学技术, 2008(4): 40-46)

[14] HUANG Jia, CAO Jin, CHEN Xia. Application and FPGA implementation of CCSDS lossless data compression in packet telemetry[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2014, **35**(2): 43-47 (黄佳, 曹金, 陈夏. CCSDS无损数据压缩算法在分包遥测中的应用及其FPGA实现[J]. 遥测遥控, 2014, **35**(2): 43-47)

[15] REN Yuli, DENG Jiaxian, WU Hao, *et al.* Lossless image compression of multispectral remote sensing image based on optimized RICE algorithm[J]. *Communications Technology*, 2012, **45**(9): 129-133 (任玉莉, 邓家先, 吴昊, 等. 基于RICE的遥感多光谱图像无损压缩算法[J]. 通信技术, 2012, **45**(9): 129-133)

[16] CHEN Yonghong, SHI Zelin, ZHAO Huaici, *et al.* Spatial-spectral associated prediction-based rice algorithm for hyperspectral image lossless compression[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(1): 105-110 (陈永红, 史泽林, 赵怀慈, 等. 空谱联合预测高光谱图像无损压缩rice算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(1): 105-110)

[17] Lossless Data Compression. CCSDS 121. 0-B-2 Recommendation for space data system standards[S]. Washington D C: CCSDS, 2012

[18] Lossless Data Compression. CCSDS 121. 0-G-3 Report concerning space data system standards[S]. Washington D C: CCSDS, 2012