0254-6124/2009/29(5)-449–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wu Ji, Zhu Guangwu, Zhao Hua, Wang Chi, Li Lei, Sun Yueqiang, Guo Wei, Huang Chengli. Overview of scientific objectives of China-Russia Joint Mars exploration program YH-1. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(5): 449-455

萤火一号火星探测计划的科学目标*

吴 季 朱光武 赵 华 王 赤
李 磊 孙越强 郭 伟

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

黄乘利

(中国科学院上海天文台)

摘 要 与其他行星相比火星是与地球最为相似, 也是最有可能在其上发现地球以外生命现象的一颗行星, 因此特别受到人类的关注. 近年来, 有国家已经发射了火星探测器, 并启动了载人火星探测研究计划. 中国是世界上第五个具备自主发射人造卫星的国家, 也是世界上第三个具备自主开展载人航天活动的国家. 但是中国在深空探测领域才刚刚起步. 2007 年中俄两国签署了联合探测火星计划, 俄罗斯负责将中国研制的一颗微小卫星 —— 萤火一号发送至火星轨道. 萤火一号将开展自主探测, 并与俄罗斯的火卫一探测器开展联合探测. 本文综述了萤火一号任务提出的科学背景及科学目标, 简要介绍了为实现科学目标配置的有效载荷, 以及入轨后的主要探测任务, 并对其科学探测结果进行了初步的展望.

关键词 火星探测; 空间环境; 太阳风; 磁层; 电离层

中图法分类号 P 35

Overview of Scientific Objectives of China-Russia Joint Mars Exploration Program YH-1

WU Ji ZHU Guangwu ZHAO Hua WANG Chi LI Lei
SUN Yueqiang GUO Wei

(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

HUANG Chengli

(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract Mars has been one of the most interesting planets in the solar system for human beings due to its orbit characteristics and its geology, and the main attraction is the possibility to find life on it. Since the 1990s, many exploration missions have been sent to Mars. From the beginning of this century, many space power countries have announced their manned Mars program strategy. China was the fifth country in the world to launch its artificial satellite on its own, and the third country to have the ability to carry out independent manned space program. However, China is not a power at all

* 国家重大项目资助

2009-06-03 收到原稿

E-mail: wuji@cssar.ac.cn

in deep space exploration. To catch up, China and Russia have signed an agreement on a joint Mars exploration program by sending a Chinese microsatellite Yinghuo-1 (YH-1) with Russian's Phobos-Grunt mission. Once YH-1 is in orbit, it will not only carry out its own exploration mission but also conduct joint measurement with Russian Phobos-Grunt spacecraft. In this paper, the scientific background is reviewed, the scientific objectives of YH-1 are given, and the scientific payloads and operation considerations are also briefly described.

Key words Mars exploration, Space environment, Solar wind, Magnetosphere, Ionosphere

1 引言

人类对火星的探索经历了地球上的目视观测, 望远镜观测, 利用航天器上的望远镜观测, 以及发射火星探测器的轨道环绕观测和着陆就地探测几个阶段. 目前从地面上用望远镜观测的主要任务是, 连续观测或准连续观测火星表面变化的现象, 如大气的变化, 包括沙尘暴的形成和传播, 以及极区冰盖的变化等.

进入太空时代以来, 人类已经向火星发射了三十多个探测器, 其中有大约一半进入了火星轨道. 针对人类对火星最关注的问题, 也就是火星上是否存在生命的问题, 几乎所有探测器的探测目标都指向火星表面物理和化学特性, 以及火星上是否存在水. 经过近期几个探测计划的探测，例如 MGS, Mars Express 等, 火星上曾经大量存在液态水的证据已经找到, 甚至可以断定仍然存在地下水. 因此大部分正在规划的火星探测器已经把目标集中于挖掘探测并试图发现生命迹象上.

尽管探测火星表面、水和生命已成为热点, 人类对火星的大气环境还不够了解, 特别是对其高层大气和电离层就更不了解. 片断的大气和电离层剖面探测数据大多是着陆器降落过程中在局部地点上空获取的. 还有一部分探测数据, 特别是电离层的探测数据是通过火星轨道器向地球发送遥测信号时, 利用掩星机会, 分析和反演信号在大气与电离层中的折射率得到的. 由于大部分观测火星表面特征的轨道器都运行于围绕火星的极轨圆轨道, 只能探测几百公里某一高度的数据, 对分析火星大气和电离层的全球特征意义不大. 由此可见, 人类对火星高层大气和电离层的了解十分有限.

近年来, 火星高层大气和电离层, 以及火星高层大气与太阳风相互作用的过渡区域特性逐渐受到人们的关注. 这是因为, 太阳作为向太阳系当中各个行星提供能量的源头, 其任何变化都会影响到行星的环境. 火星与地球有所不同, 火星没有很强的固有磁场, 因此没有像地球一样的磁层保护. 火星表面一些局部较强的磁场异常区域, 使得火星周围的磁场分布非常复杂. 一旦出现太阳爆发事件, 大量的空间高能粒子将轰击火星表面, 特别是那些表面磁场较弱的地区. 这将为人类未来登陆火星带来严重的威胁. 另外, 研究火星大气成分以及大气的逃逸机制, 对分析研究火星的演化非常重要. 火星表面的液态水是如何消失的？其机制是什么？也许可以从火星大气成分当中找到答案.

在中俄航天领域合作的框架下, 我们提出了中俄联合探测火星计划萤火一号 (YH-1). 萤火一号是一颗 115 kg 重的微小卫星. 它将与俄罗斯 Phobos-Grunt 探测器一同飞往火星. 在进入火星引力场之后, 萤火一号将与 Phobos-Grunt 分离, 进入一个围绕火星旋转的大椭圆轨道. 其远火点约 80 000 km, 近火点约 800 km, 轨道倾角小于 5°, 轨道周期约 72 h. 此后, 萤火一号将在这个轨道上运行一年, 开展对火星高层大气和空间环境的探测, 为人类全面了解火星空间环境特征和火星大气逃逸机制做出贡献.

2 人类已知的火星空间环境概述

通过飞越火星的航天器、环绕火星的轨道器和火星表面着陆器对火星的探测, 40 年来人类对火星的空间环境取得了一些片断的知识和初步的认识 [1].

在前苏联经历了数次失败之后, 美国利用 1964 年 11 月的窗口发射了水手 3 号和水手 4 号 (Mariner 3, 4) 两颗探测器, 试图近距离飞越火星. 其中水手 3 号失败, 而水手 4 号成为人类第一次近距离获得火星照片和大气特征的火星探测器. 水手 4 号于 1965 年 7 月 14 日在距离火星表面 9920 km 处飞过火星,

发回了 22 幅火星照片, 揭示了有大量撞击坑的火星表面特征. 探测结果还表明, 火星周围存在大气, 其主要成分是 CO_2. 这些大气在火星表面的压力范围为 500~1000 Pa. 水手 4 号还探测到了火星存在少量的磁场特征.

水手 9 号 (Mariner 9) 于 1971 年 11 月入轨, 成为人类第一个成功环绕火星飞行的轨道器. 在长达近两年的运行中, 获得了大量关于火星的信息, 对大气成分和压力的测量比水手 4 号更为精确. 最为重要的是, 它通过星-地掩星第一次获得了火星电离层的剖面分布数据 (见图 1).

海盗 1 号和 2 号着陆器 (Viking 1, 2) 有更重要的发现. 它们分别于 1976 年 7 月和 9 月在火星表面着陆. 在降落的过程中, 测量了火星大气随高度的剖面 (见图 2).

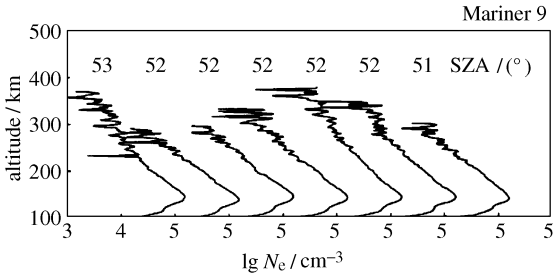


图 1　水手 9 号通过星-地掩星获得的火星电离层电子密度随高度的分布

Fig. 1　Martian ionosphere profile measured by satellite-ground occultation from Mariner 9

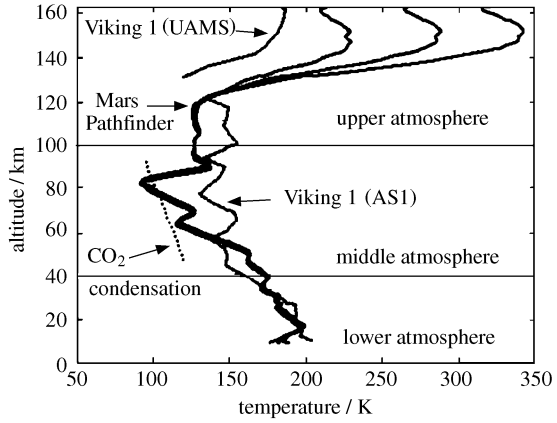


图 2　海盗 1 号和火星探路者着陆器在降落过程中获得的火星降落地点上空的大气剖面

Fig. 2　Martian atmosphere profile measured during the descending of Viking 1 and Mars Pathfinder

探测数据显示, 火星的大气分为三层, 低层、中层和高层. 高层大气从大约 110 km 向上, 也称为热层. 热层的温度来自于太阳紫外线的加热. 热层从 120 km 左右向上开始被电离, 也就是火星的电离层, 如图 1 所示. 电离层中的电子主要由 CO_2 贡献. 由于其能量主要来自于太阳紫外线的照射, 因此其电子密度随太阳活动变化而变化. 根据其产生机理可以推断, 电离层电子密度最大的区域应该在向阳面正午地区的上空. 这有待观测数据验证. 在背阳面子夜地区上空是否还存在电离层, 目前尚不得而知.

美国于 1996 年发射, 1997 年 9 月入轨的火星全球观测者轨道器 (Mars Global Surveyor, MGS) 是一个非常成功的探测计划. 其至 2006 年 11 月在火星轨道上运行了 10 年. MGS 获得了火星全球的磁场分布图 (见图 3).

可见, 火星不存在如同地球一样的内禀磁场, 其磁场分布主要取决于岩石携带的剩磁, 部分区域磁场较强, 可达 1600 nT. 这样复杂的磁场结构可能强烈地影响火星电离层的全球结构及其动力学过程. 因此, 火星可能具有所有行星中最复杂的电离层结构. 火星剩磁在相当程度上改变了电离层的结构. 火星电离层等离子体、表面剩磁磁场、太阳风感应磁场之间可能存在相互作用. 同时, 火星较快的自旋使得磁场的结构更为复杂 [2−3].

1988 年 7 月发射, 1989 年 3 月入轨的 Phobos 2 探测器 [4−5] 是前苏联最成功的火星探测计划. 由于其上搭载了较为完善的磁场、粒子和电子探测器, 在其仅有三个月的寿命中, Phobos 2 探测器获得了一

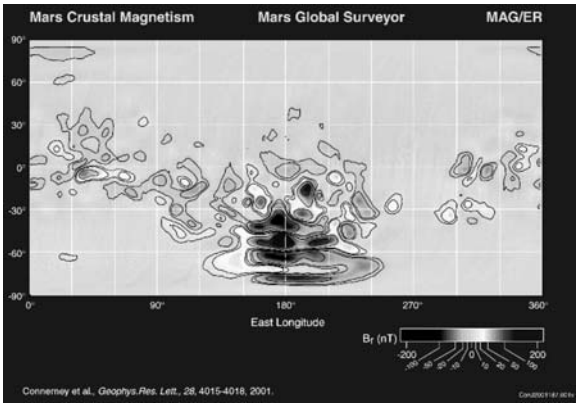


图 3　火星全球观测者轨道器获得的火星全球磁场分布

Fig. 3　Martian global magnetic distribution measured by Mars Global Surveyor (MGS)

些重要发现. 根据 Phobos 2 的观测数据, 粗略估算火星磁尾内氧离子的平均逃逸率可能达到 $2\times10^{25}\,\mathrm{s}^{-1}$, 即 0.5 kg/s. 如果再有其他成分的逃逸, 总的离子逃逸率至少为 1 kg/s. 按此速度, 在短于 10^8 年内, 火星大气中所有的氧将逃逸, 在 4.5×10^9 年内火星全球可以损失 1 m 深的水.

欧洲空间局火星快车 (Mars Express) 探测器上的等离子体探测包在探测太阳风驱动行星离子逃逸、场向电场加速离子、火星离子逃逸率等方面取得了显著的进展. 火星快车发现太阳风直接穿入到日下点高层大气的现象, 并将这种现象与火星表面磁异常联系起来 [6], 对现今火星离子逃逸率的测量显示, 火星上的水可能以冰的形式存在于地表以下 [7]. 火星快车对氧离子逃逸率有新的观测, 其得到的速率小于 Phobos 2 的结果.

由火星电离层向上, 延伸至与太阳风的相互作用区域, 比较地球和其他行星的空间环境特征, 以及目前掌握的片断探测结果, 可以得到火星空间环境的一个宏观尺度的大致概况. 首先, 火星逃逸大气的中性成分在太阳紫外辐射或高能沉降电子的作用下产生电离, 形成电离层. 由于火星全球性固有磁场很弱 (小于 5 nT), 火星电离层的热等离子体将与太阳风产生直接的相互作用. 导电的电离层处在运动着的太阳风磁场中, 电离层内产生电流, 电流又形成感应磁场. 这个磁场使得太阳风等离子体和磁场无法进入到火星表面附近几百公里的范围内. 太阳风遇到障碍后, 减速并产生方向偏转, 在火星的上游形成一个弓激波. 在弓激波和电离层之间形成的一个区域即为

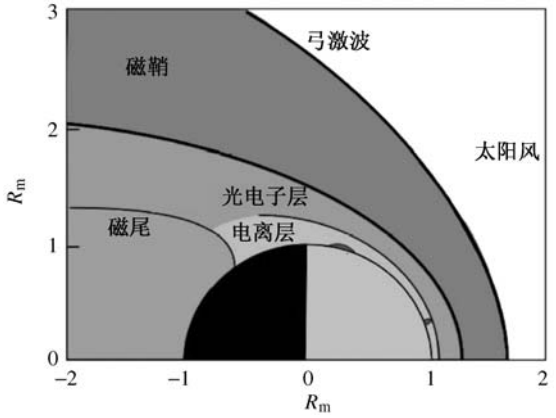


图 4 火星宏观尺度的空间环境

Fig. 4 Global scaled Martian space environment

磁鞘. 有限的观测发现, 火星对太阳风产生阻碍的位置很低, 在日下点, 弓激波的高度大约为 1700 km (约 0.5 个火星半径). 火星宏观尺度的空间环境如图 4 所示.

3 萤火一号的科学目标

针对人类对火星空间环境探测的不足, 充分利用萤火一号大椭圆轨道的优势, 萤火一号的科学目标确定如下.

3.1 探测火星空间磁场、电离层和粒子分布及其变化规律

利用磁强计探测火星空间磁场的分布、结构及其随太阳风变化的特性; 利用等离子体探测包 (其中包括电子分析器和离子分析器) 和磁强计探测火星弓激波、磁鞘、磁场堆积区、电离层的粒子分布特性及其对太阳风扰动的响应过程和变化规律.

利用俄罗斯 Phobos-Grunt 探测器上的发射信号, 与其开展火星电离层的星-星掩星探测, 同时利用萤火一号的测控下传信道, 开展星地掩星探测, 反演火星电离层电子密度分布, 特别是对火星正午附近太阳天顶角小于 43°, 和子夜附近太阳天顶角大于 138° 的电离层区域进行星-星掩星探测, 研究这些电离层极端区域的特性及背阳面电离层的产生机制. 利用星-地掩星实验长期稳定地获取火星晨昏侧附近赤道上空的电离层/大气层数据, 结合国际上其他电离层探测数据, 理解火星全球电离层的行为, 包括电离层的磁场、太阳活动、太阳风相互作用、沙尘暴等的效应. 同时参考俄罗斯 Phobos-Grunt 探测器上搭载的等离子体和磁场的探测数据, 形成对火星空间磁场和粒子分布的两点联合探测.

3.2 探测火星大气离子的逃逸率

利用等离子体探测包探测火星大气离子的逃逸率, 结合磁场探测数据研究逃逸的物理过程和输运机制, 探索太阳风与火星大气相互作用对火星水体损失的影响.

火星电离层中存在由下至上的离子输运及火星离子的逃逸. 这与火星大气和水的损失直接相关. 研究太阳风对火星大气的加热和驱动作用, 对认识火星大气环境演化和损失具有重要的意义. 对逃逸离子的研究有助于认识火星地表环境在 45 亿年中的主要演化特征.

3.3　探测火星地形、地貌和沙尘暴

在萤火一号上搭载轻小型光学相机, 开展对火星大尺度地形、地貌和沙尘暴的探测, 获取中国第一批火星形貌和火星沙尘暴的观测数据, 研究火星不对称地貌形成和演化的驱动机制、火星表面地形地貌特征及其演化、火星起源和地质演化过程及对类地行星演化的启示, 以及火星尘暴的起因及对火星电离层和空间环境的影响.

3.4　探测火星重力场

现有的火星重力场模型主要来自 Mars Global Surveyor 及少量的 Mars Express 和 Mars Odyssey 的轨道和测高资料. 但由于它们都是极轨道卫星, 解得的重力场高阶带谐项与同为偶数或同为奇数的低阶带谐项系数夹杂在一起而难以分离, 即存在所谓的纠缠 (lumped) 现象. 而萤火一号是近似赤道 (倾角小于 5°)、大偏心率的轨道. 若能将萤火一号的轨道数据与其他具有不同轨道倾角、不同偏心率的探测器轨道数据结合起来分析, 利用其受不同带谐项组合所产生扰动不同的性质, 则可以将偶阶项和奇阶项、高阶项和低阶项较好地分离, 从而提高火星重力场的精度. 特别是对低阶项和赤道带附近的重力场, 萤火一号将发挥重要作用, 可得到火星的三个主转动惯量 (A, B, C) 及火星潮汐参数, 用以反演和研究火星内部物理结构模型. 经过在轨一整年的观测, 利用萤火一号的轨道数据还可以研究火星大气与冰盖之间的交换 (约 1/4 大气参与这个过程), 并对火星大气循环模型进行比较、检验和约束.

4　萤火一号有效载荷

萤火一号火星探测器的主要科学目标是探测研究火星的空间环境. 因此在有效载荷的选择上主要考虑火星空间环境磁场及等离子体能谱和质谱的探测. 其上的等离子体探测包是目前国际上先进的等离子体探测器之一, 适应自旋或三轴稳定卫星平台, 对空间等离子体角向分布、能谱和离子质量进行探测. 高精度磁通门磁强计探测精度为 0.01 nT, 达到国际磁通门磁强计的先进水平; 星-星掩星接收机与俄罗斯 FGSC 探测器配合, 主要探测火星正午和子夜电离层的电子密度, 有望填补火星电离层探测的空白. 轻小型光学成像仪将拍摄火星的中分辨率图像及火星全球图像. 为了实现以上科学目标, 上述 4 种科学探测有效载荷的主要参数及技术指标列于表 1. 下面将逐一讨论表 1 中所述的各探测载荷.

4.1　等离子体探测包

根据 Phobos 2, Mars Express 等以往多个卫星

表 1　萤火一号有效载荷参数

Table 1　Engineering parameters of YH-1 scientific payloads

设备名称	设计重量/kg	本体尺寸/mm	功耗/W	技术指标及功能
等离子探测包	3.5 ± 0.5		12 ± 1.6	0.02∼10 keV, 火星空间环境粒子方向、能谱和成分测量, 等离子体分布, 离子逃逸
离子分析器 I	0.6 ± 0.1	$132 \times 72 \times 91$		
离子分析器 II	0.6 ± 0.1	$132 \times 72 \times 91$		
电子分析器	0.6 ± 0.1	$132 \times 72 \times 81$		
电子学箱	1.7 ± 0.2	$200 \times 200 \times 50$		
掩星接收机	$\leqslant 3.5$		$\leqslant 18$	火星正午、子夜电离层掩星探测, 电子密度分布
掩星接收机天线	$\leqslant 1.5$	$860 \times 560 \times 40$		
电子学箱	2.0 ± 0.2	$200 \times 180 \times 70$		
光学成像仪	<1.5	$100 \times 100 \times 150$	< 3	可见光火星成像、火星沙尘暴观测、空间分辨要求 < 500 m
磁强计	2.5 ± 0.1		7 ± 0.2	0.01 nT 分辨率, 三分量, 火星空间环境磁场测量, 空间磁场结构
磁强计电子学箱	2.0 ± 0.1	$270 \times 210 \times 60$		
磁强计探头 A, B	0.265, 0.235	$120 \times 60 \times 50$		
合计	11.3			

的观测数据, 火星磁层附近空间内的主要离子成分包括 H^+, O^+, O_2^+, CO_2^+ 等, 粒子的能量主要集中在几 eV 到几 keV 的量级 [6−7]. 为了实现上述科学目标, 等离子体探测包需要满足以下要求.

能量: $\leqslant 0.02\,\mathrm{keV}$, $\geqslant 10\,\mathrm{keV}$.

质量组: $\geqslant 6$ 个.

时间分辨: 8 s.

等离子体探测包由 4 部分组成: 离子分析器 I、离子分析器 II、电子分析器和电子学箱. 离子分析器 I 和离子分析器 II 对称安装在舱外, 实现离子的能量、角度和成分的探测. 电子分析器安装在舱外, 实现电子能量和角度的探测. 电子学箱位于卫星舱内, 由离子分析器数据处理单元板和电子分析器数据处理单元板两部分组成.

等离子体探测包的探测性能指标列于表 2.

4.2 磁通门磁强计

火星上有稀薄的大气, 当大气的中性成分在太阳极紫外辐射或高能沉降电子的作用下产生电离, 便形成了电离层. 观测表明, 火星全球性的固有磁场很小 (约小于 5 nT)[3]. 因此, 对于高速的太阳风等离子体, 火星就像一个导电的球体. 导电的电离层处在运动着的太阳风磁场中, 电离层内产生电流, 电流又形成感应磁场. 这个磁场使得太阳风等离子体和行星际磁场无法进入到火星表面附近几百公里的范围内. 太阳风遇到障碍后, 减速并产生方向偏转, 在行星的上游形成一个弓激波, 在激波和电离层之间形成一个区域, 即磁鞘. 由于火星全球性的固有磁场很小, 因此火星和太阳风的相互作用过程与地球和太阳风的相互作用有很大的不同. 火星与太阳风相互作用形成的感应磁层无论是从尺度或结构上都与地球磁层有着根本性的区别. 磁强计的组成及功能要求如下.

组成: 磁强计探头 A、磁强计探头 B、磁强计电子学箱.

功能: 测量火星空间环境中的磁场.

为提高测量精度, 降低卫星剩磁对传感器的干扰, 在卫星上安装两个三轴高精度磁强计探头 (磁强计探头 A, 磁强计探头 B), 利用传感器探头安装位置的差异, 通过数据处理消除卫星剩磁干扰.

三轴机械正交度: $\leqslant 2('')$.

1 Hz 点处频谱噪声水平: $\leqslant 0.01\,\mathrm{nT\cdot Hz^{-1/2}}$.

10 Hz 频带内总噪声: $\leqslant 0.1\,\mathrm{nT}$ (rms).

分辨率: $\leqslant 0.01\,\mathrm{nT}$.

磁通门磁强计是由三轴磁通门传感器和电子线路组成的. 传感器是由绕在磁芯上的初级绕组和包围磁芯的次级线圈组成的.

4.3 掩星接收机

火星电离层无线电掩星探测的原理是以俄罗斯 Phobos-Grunt 探测器上的甚高频信标信号 (833 MHz/416.5 MHz) 作为掩星探测的无线电源, 利用萤火一号上安装的接收机进行接收, 记录下被火星电离层遮掩信号的载波相位 L1, L2. 掩星接收机的主要指标要求如下.

组成: 掩星接收机天线, 掩星接收机电子学箱.

功能: 掩星接收机接收俄罗斯 Phobos-Grunt 探测器上两个频率的信号 (833 MHz/416.5 MHz), 测量这两个频率信号的幅度及载波相位. 通过地面后处理, 得到火星电离层的电子密度及总电子含量.

灵敏度: $\leqslant -145\,\mathrm{dBm}$.

载波相位测量精度: 1/100 周 (0.02 m).

采样率: 10 Hz.

天线极化: 线极化.

工作频率: 833 MHz, 416.5 MHz.

通过 VLBI 得到准确的萤火一号卫星的位置, 及俄罗斯 Phobos-Grunt 的精密轨道. 在地面根据上述

表 2 等离子体包性能指标

Table 2 Specifications of plasma package of YH-1

名称	电子	离子 I	离子 II
能量/keV	0.02∼10	0.02∼10	0.02∼10
能量分辨率/(%)	15	15	15
质量分辨/($M/\Delta M$)	不分辨	6 个质量组	6 个质量组
角分辨/(°)	9×15	15×360	15×360
视场范围/(°)	$9\times 90+9\times 90$	90×360	90×360
时间分辨/s	8	8	8

测量得到的两个频率载波相位 L1, L2, 可以得到沿电波传播的斜向电子总含量 (TEC), 由 TEC 得到弯曲角 α, 在由 Abel 变换得到折射指数, 由折射指数得到电子密度廓线.

4.4　光学成像仪

光学成像仪由光学成像仪镜头与电子学系统组成. 其功能是光学成像仪在火星探测器进入轨道后开始工作, 能够以多种工作模式拍摄双星分离及火星表面的图片, 并将图像数据上传至数管分系统. 光学成像仪的主要技术指标如下.

有效像素:　$\geqslant$ 400 万.

成像要求: 距离火星 10 000 km 时火星基本充满整个视场, 近火点时像元分辨率优于 0.5 km.

像机拍摄缓存: 10 幅及以上全分辨率照片.

系统信噪比: $\geqslant$ 30 dB.

光学成像仪是高性能及轻小型化的动态目标光学成像探测设备, 对此拟采用高分辨率成像器件, 光学、结构和电子学系统的一体化综合设计, 从而实现高分辨率图像获取及监视的科学目标.

5　结语

本文简要回顾了人类对火星空间环境的认识过程, 较为详细地描述了萤火一号探测器的科学目标以及有效载荷的配置, 介绍了 4 台科学探测有效载荷的主要功能和技术指标.

萤火一号是中国首个火星探测计划. 在中俄合作的框架下, 我们获得了在围绕火星的大椭圆赤道轨道上开展火星空间环境探测的机会, 并拟与俄罗斯 Phobos-Grunt 探测器开展联合探测. 根据人类探测火星的步伐, 目前对火星高层大气、电离层和空间环境的探测需求越来越迫切. 因此, 萤火一号的探测结果必将推动人类对火星的认识向前迈进.

参考文献

[1] Nagy A F, *et al.* The plasma environment of Mars [J]. *Space Sci. Rev.*, 2004, **111**:33-114

[2] Acuna M, *et al.* Magnetic field and plasma observations at Mars: Initial results of the Mars Global Surveyor mission [J]. *Science*, 1998, **279**:676-1670

[3] Acuna M, *et al.* Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment [J]. *Science*, 1999, **284**:790-793

[4] Sagdeev R Z, Zakharov A V S. Brief history of the Phobos mission [J]. *Nature*, 1989, **341**:581-585

[5] Zakharov A. Venus and Mars: Atmospheres, Inospheres, and Solar Wind Interactions//Geophysical Monograph: The Plasma Environment of Mars: Phobos Mission Results [G]. American Geophysical Union, 1992, **66**:327-344

[6] Lundin R, *et al.* Solar Wind-Induced Atmospheric Erosion at Mars: First Results from ASPERA-3 on Mars Express [J]. *Science*, 2004, **305**:1933-1938

[7] Barabash S, *et al.* Martian atmospheric erosion rates [J]. *Science*, 2007, **315**:501-505