

文章编号: 1000-8349(2007)02-0114-18

# 欧空局“火星登陆器”和“火星 电离层和测地实验”计划

黄乘利

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** 该文全面介绍了欧洲空间局的“火星登陆器 (NetLander)”及其“火星电离层和测地实验 (NEIGE)”项目。具体叙述了项目的科学目标与内容、实现途径、组织机构、工程技术方面的框架, 以及目前最新的进展状况。希望借此能为我国开展相关工作提供参考与借鉴。

**关键词:** 空间天文学; 火星; 综述; 大地测量; 电离层; 章动; NetLander; NEIGE

**中图分类号:** P185.3; V476.4 **文献标识码:** A

## 1 引 言

火星是距我们最近的行星之一。它与地球有许多相似之处, 也是人类最感兴趣、对其进行探测活动最多的行星。火星的平均半径约为 3 398 km, 总质量约  $6.42 \times 10^{23}$  kg (约为地球质量的 1/10), 平均密度约  $3.93 \text{ g/cm}^3$  (约为地球的 7/10), 其表面的平均重力加速度约为  $3.7 \text{ m/s}^2$  (约为地球的 2/5)。其绕太阳公转的平均轨道半径约为 1.524 天文单位 (约 2.28 亿千米), 其轨道与地球公转轨道面非常密近 (近似共面), 其赤道与轨道面夹角约  $25.19^\circ$ , 偏心率很小 (0.093, 地球为 0.017), 公转周期 (即火星年) 约为 687 地球日, 其自转周期 (即火星日) 约为 24 h 39 min 35 s<sup>[1]</sup>。

火星在物理、化学等性质上还有许多让人们感兴趣的与地球相似之处, 如火星的外壳是可供人类着陆的固体表面, 也有一个稀薄的大气层, 在岩石中可能存在水 (至少以前曾有过), 大气中也存在微量的水等。

由于离太阳较远, 火星接收到的太阳能比地球少; 由于大气稀薄 (相当于地球上大气密度的 1%), 其温室效应也不明显, 但也足够支持包括云和风在内的气候系统。火星的表面温度变化很大, 在两极区冬季可低至  $-125^\circ\text{C}$ , 而在赤道区中午可达  $20^\circ\text{C}$ , 由于大气稀薄又没有海洋, 昼夜的温差很大。其年平均温度很低, 只有大约  $-53^\circ\text{C}$ 。

---

收稿日期: 2006-06-15; 修回日期: 2006-08-14

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (10373021)

火星大气的一个重要特征是与极盖的质量交换。极盖的中心部分是水冰，被一层  $\text{CO}_2$  覆盖。极盖的大小随季节而显著变化。在冬季，由于空气中的  $\text{CO}_2$  冷凝而使  $\text{CO}_2$  覆盖层变厚，夏季则反之。

全球性磁场的存在通常被认为是与液态铁核的存在及其运动相联系的。火星的冷却过程及其化学成分决定了其核是流体还是固体状态。但目前尚未发现火星存在与地球类似的全球性磁场，只是如 NASA 的“火星环球勘测者号” (MGS) 等探测器在火星上的部分地方发现了局部磁场的存在。

自 1962 年前苏联发射第一个火星探测器后，人类对火星的探测已成为空间探测的一大热点。前苏联、美国、日本及欧洲各国都对火星进行过探测<sup>[2]</sup>。

NASA 在 1965 年成功发射了探测火星的第一个飞行器：“水手四号” (Mariner 4)。前苏联的“火星二号” (Mars 2) 于 1971 年 5 月 19 日发射并成为第一个登陆火星的飞行器。其后 NASA 于 1975 年 8、9 月先后发射的“海盗 (Viking) 号火星探测器” I、II 号也在 1976 年 6、8 月先后进入火星轨道并分别于 7、9 月在火星上成功着陆。

沉寂近 20 年后，1996 年 12 月 4 日，NASA 发射了低成本的“火星探路者号” (Mars Pathfinder) 探测器 (又叫“火星环境调查号”，MESUR)，两个着陆器于 1997 年 7 月 4 日成功登上火星表面 (一个固定位置，另一个可漫游)，由此又掀起了一股以美国 NASA 为主角的火星探测热潮。2003 年 6 月 10 日和 7 月 7 日先后发射了“火星探险漫游者” (Mars Exploration Rovers)，其着陆器“勇气 (Spirit)” 号和“机遇 (Opportunity)” 号火星车于 2004 年 1 月 3 日和 1 月 24 日先后登陆火星并正常行进和工作，发回了大量珍贵的地理资料和照片。于 1996 年 11 月 7 日发射，1997 年 9 月 12 日入轨并开始工作的 MGS 已于 2001 年 1 月 31 日完成使命，但至今仍超计划正常工作。“火星奥德赛号” (Mars Odyssey) 于 2001 年 4 月 7 日发射，至今也已工作了 5 年。“火星勘察轨道器” (Mars Reconnaissance Orbiter) 于 2005 年 8 月发射后经过 7 个月的巡航飞行，目前正处在为期 6 个月的制动飞行过程中。

欧洲空间局 (ESA) 的“火星快车号” (Mars Express) 于 2003 年 6 月 2 日发射，同年 12 月入轨，并释放了“猎犬 2 号” (Beagle 2) 登陆器。原计划工作 1 火星年，现在也是超期服役 (计划再工作 2 火星年)。

日本于 1998 年 7 月 3 日发射了 Nozomi 号，未能按计划在 1999 年 10 月进入火星轨道，只好修改计划：让其进入日心轨道并停留 4 年，于 2003 年 12 月 14 日飞过火星，再在日心轨道上停留 2 年，然后进入 1 个高偏心率的火星轨道。该轨道的近拱点距火星地表 300 km，远拱点距约为火星半径的 15 倍，与黄道倾角  $170^\circ$ 。计划工作 1 火星年并希望延长 3~5 年，但最终未获成功而不得不放弃。

火星登陆器 (NetLander) 计划是欧空局的探测与研究火星的系列计划之一 (该计划部分与美国 NASA 和其他国家合作)，详见文献 [31]。它由法国空间研究中心 (CNES) 提出，欧空局其他成员国机构 (芬兰 IFMI、德国 DLR、比利时 SSTC、瑞士 PRODEX) 和美国 JPL 参加。原计划于 2009 年由 Ariane 5 号火箭发射，2010 年到达火星轨道。

在 NetLander 计划中，将发射 1 个火星轨道舱和 4 个火星登陆器，每个登陆器上面都搭载九套仪器：磁强计、电场计、地震记录仪、气象仪器、地面穿透雷达、声音记录仪、照相机、用于收集火星表面参数的微型探头组件及 NEIGE 的 Doppler 射电信号发送和测量系

统。NEIGE 是在 NetLander 计划中最为核心的研究内容之一, 实际上是电离层和测地实验 (Netlander Ionosphere and Geodesy Experiment) 的简称, NEIGE 在法语含义为“冰”或“雪”。该研究专注于火星的电离层和大地测量(或“大火测量”)即火星的自转参数测量, 从而研究火星的大气层和火星内部的物理分层结构。

本文主要是根据搜集到的有关该项目组的计划书、官方网站、正式发表的文章等再进行编译、整理而成。下面将分别介绍 NetLander 项目的科学目标、有效载荷、NEIGE 子项目的科学目标和研究内容、策略、相关的数值模拟、技术方面和组织机构等。在我国的嫦娥登月计划正如火如荼地进行、并将火星探测做为下一步空间探测的目标的今天, 作者希望借此向我国有关同行提供相应的参考和借鉴。

## 2 NetLander 的科学目标

尽管从 20 世纪 60 年代以来, 人类对火星已开展了相当多的实际探测活动, 以前都是通过其重力场变化(主要通过其引起的轨道器轨道变化)、自转(精度很差)和在地球上找到的来自火星的陨石的化学成分来进行研究。对火星的全球尺度的动力学、大气循环、火星内部(包括表层、岩石层、壳、幔和核)的结构及相关动力学(如自转、地震、电磁场)等方面知之甚少。要对这些进行研究就需要建立一个观测网络, 而不是仅依靠单一的轨道器或位于火星表面某一固定点的单个登陆器就能胜任的。为适应这一需要, 欧空局在 21 世纪初就提出了一个网络观测计划 NetLander。其核心思想是, 在火星表面上放置 4 个完全一样的登陆器, 其分布既能满足对火星自转观测的高敏感度, 又能满足较好的同时可见性; 而在火星上空同时保留一个中继轨道舱, 既可作为 4 个登陆器与地球上工作人员的中继联系(接收来自地球的指令并发给登陆器, 收集观测资料并发回地球), 又可通过 Doppler 方法观测火星上空大气中电离层的分布及性质(主要是 TEC)。整个观测计划持续 1 火星年。每个登陆器上都装载有 9 架仪器, 使这样一个全球尺度的观测网络用于以下科学目标的研究: 火星的深内部结构; 火星的自转及其变化; 火星下表面结构, 主要是富水层及其以下(在千米尺度上); 火星大气层内的全球环流和与表面大气的相互作用即边界层现象; 4 个登陆点附近包括矿物学在内的地理情况; 表面的电磁场环境; 电离层活动情况等。

## 3 NetLander 登陆器上的 9 个有效载荷

### 3.1 磁场计 (MagNet)

4 个登陆器上安装的磁场计组成了 MagNet 实验的网络, 可以连续地记录火星表面上 4 个地点的磁场的变化。其科学目标主要有两个: 1) 根据电导率调查火星内部的径向结构(可至几百 km 深度); 2) 研究火星环境的电动力学的特征。对火星的电磁学参数结构的估计主要是通过电磁测量技术在频率域中获得的磁感应资料的分析而获得, 这种感应可以通过在火星表面上的 3 个(或多于 3 个)磁场计同时记录而得到, 这 3 个磁场计构成 1 个三角形的网络。磁场瞬变的高频谱可以提供火星浅表(千米量级)的电阻抗信息, 可据此推测在其永久冻土层

下面是否存在液态水。而磁场瞬变的低频谱则反映火星幔壳中(可达几百 km 深)电阻抗是否存在急剧变化,从而可用以研究火星上地幔内的热动力学情况。

和地球上的情形类似,不同的等离子体过程可能导致在磁层内不同的对流现象,因而导致行星表面不同的磁场特征。通过在火星表面分布的磁场计网络,同时记录它们所处磁场的瞬变就可以提供火星磁层内部对流的一些约束信息(如边界条件)。

### 3.2 电场探测器 (ARES)

电场探测器与大气传感器及其他仪器一起装在一个栅栏形长臂杆上。它可以测量火星上电场的 DC(直流)和 AC(交流)的垂直分量(最高至 10 kHz)和空气的电导率。其主要目的是搜寻准直流电场的周日和季节性变化以及它们与气象现象的关系、其所在周围环境中的电磁辐射(特别是量子放电现象)和可能的与尘暴有关的电击穿现象。

### 3.3 短周期地震 (SEIS SP) 和宽频段地震仪 (SEIS VBB)

地震测量是了解行星内部物质特性和内部结构的最成熟和最有效的方法之一。在地球上,板块运动是引发地震活动的主要来源。与地球不同的是,火星上的地震事件可能是由于热力学变化、陨星的冲击或大气的变化等引起。而以前对火星的探测计划中均没有任何试图检测板块活动的观测,SEIS 的科学目标是确定火星上地震事件的强度和分布并由此导出火星内部结构。

### 3.4 气象站 (ATMIS)

由数种探测器集成,可用于记录火星地表的一些气象参数,包括压强、温度、湿度、风速与方向、光学深度、空气中尘埃密度等。特别是在这 4 个登陆器着陆过程中所经过的路线的气象数据都能连续地被记录下来,从而可研究火星大气的垂直结构(从 140 km 高空至火星地表)的特征、近火星地表的气象及边界层过程与一个火星日中的时刻、季节和位置的关系等。

### 3.5 全景照相机 (PANCAM)

该照相机可以工作在 5 个频谱通道中以便提供全景和立体的图像,从而可提供具有深度的视觉。它将被安装在金属臂的顶端,距火星地面约高 1 m,并可以 360° 旋转。PANCAM 的科学目标主要是:为着陆点精确定位,从而支持其他仪器的科学目标;开展着陆点附近的地理调查和地图绘制;协助研究大气性质和与气象相关的现象(如光学深度)等。

### 3.6 地面穿透雷达 (GPR)

地面穿透雷达可用于确定深地层回声的方向,能用于侦测是否存在地下水和确定土壤的密度。该 GPR 的科学目标是确定地表以下各层的特性、各层间的关系,判断是否存在冰层或液态水、探测低电离层、测量土壤的介电常数。

### 3.7 测量地面性质的微型探头组件 (SPICE)

这组微型仪器主要用于搜集与土壤性质有关的数据(如温度等)、测量最上层土壤层的热力学和力学性质。

### 3.8 用于大地测量实验的射电系统 (NEIGE)

NEIGE 测量的是 4 个登陆器与轨道舱、轨道舱与地球之间传送的射电信号的频率变化即所谓多普勒频移,它是由于信号源与接收者之间的相对运动而造成的。利用测量到的频漂,就可以获得火星自转变化和火星电离层的信息。从火星自转变化的数据可以用于确定火星内部核的密度、大小、物理状态(固态或液态)等一些性质,及大气质量和压强的变化。后者与

火星极区冰盖的季节性升华和冷凝过程密切相关。

NEIGE 的另一个科学目标是研究火星电离层,特别是太阳风对火星电离层的效应(包括太阳风对火星磁场的作用、对等离子体的逃逸的作用等)。为了实现这个目标,固定在火星地表的 4 个登陆器组成一个火星参考架,它们的位置将由登陆器与轨道舱之间及轨道舱与地球之间的射电信号的多普勒频移决定,而由射电信号的多普勒频移也可以导出火星的自转参数(自转速度的变化、章动等)。由于这些射电信号的传输和多普勒频移也受电离层的干扰,可采用双频技术求出这些干扰。一方面通过扣除这些干扰可获得这 4 个登陆器的更准确的位置;另一方面,通过研究这些干扰也有利于研究电离层。有关内容将在第 5 章重点介绍。

### 3.9 麦克风 (MIC)

用来记录来自火星大气(如风、暴或电子活动等)等自然源的声音,同时也可以检查仪器工作是否正常,了解包括登陆器在进入大气层、下降和着陆过程中的有关事件的有关情况。

## 4 NEIGE 的科学目标与内容

从比较行星学来说,火星是除金星外离我们最近的类地行星,种种迹象表明,它的形成和演化过程与地球有许多相似的地方。尽管它的半径大约只有地球的一半,但其化学和矿物学成分与地球类似,也存在壳、幔和铁核的圈层结构。因此在形成早期,火星与地球应该非常相似,但现在这 2 个相邻的行星已表现出许多不同。例如,火星的大气层非常稀薄,几乎没有氧;表面非常干燥,没有液态水(但它很久以前存在过)。火星上几乎没有活跃的火山和地震,这表明 2 个行星的内部也不同:地球是一个动力学行星,在其内部,核、幔和壳中存在大尺度的运动;而火星是一个平静的“死”行星。人们非常感兴趣的是,火星是怎样及为什么与地球不同?例如,火星虽然有一个主要由铁组成的核,但其大小和精确成分仍是一个谜。尽管目前已有的火星测量资料已基本支持火星有一个液态核的观点,但仍缺乏其他肯定性的证据支持。NEIGE 的主要科学目的之一便是要回答这个问题。

### 4.1 火星内部演化和结构

我们对火星内部结构的现有知识主要基于:对重力数据的解析、从 Viking 和 Pathfinder 和 MGS 等计划中获得的火星岁差常数观测值  $(-7''.576 \pm 0''.035/a)^{[3]}$ 、陨星样本的分析,然后将地球的内部结构外延推广到火星内部。将 MGS、Pathfinder 和 Viking 登陆器的火星测地资料综合起来得到火星重力场模型的具体情况可参见文献 [4]。

类地行星的潮汐形变可以用 Love 数  $k_2$  表示,它与核的大小、幔的弹性结构密切相关,并间接地与幔的化学成分和热力学结构有关。一般认为如果  $k_2$  小于 0.10 就可以认为核是固态的。Smith 等人<sup>[5]</sup>从 MGS 的射电跟踪资料得出火星的  $k_2 \approx 0.055 \pm 0.008$ ,从而显示火星的核是固态的。然而,Yoder 等人<sup>[6,7]</sup>从 MGS 的射电跟踪资料却得出火星的太阳潮汐形变  $k_2 \approx 0.153 \pm 0.017$ ;扣除大气潮汐和非弹性的贡献后,“纯弹性”部分  $k_2 \approx 0.145 \pm 0.015$ 。如此大的  $k_2$ ,基本上可以排除存在固态铁核的可能性,或者至少表示其外核部分是流体态的。

从对火星自转极的长期岁差观测可以得到火星的极惯性矩  $C$ ,到目前为止,这方面观测还主要是从 Pathfinder 和 Viking 的跟踪资料得到,岁差速率  $d\Psi/dt \approx [-7\ 606'' \times 10^3/a + (d\Psi/dt)_p] + (d\Psi/dt)_g^{[8,9]}$ ,其中木星的贡献  $d\Psi/dt_p \approx -0''.2 \times 10^3/a$ ,相对论性测地岁差

$(d\Psi/dt)_g \approx +6''.7 \times 10^3 / a$ 。文献 [6] 由此得出  $C/MR_e^2 \approx 0.365 0 \pm 0.001 2$  (其中火星赤道半径  $R_e \approx 3 394.2 \text{ km}$ ,  $M$  是火星总质量), 它主要与火星的几个主要圈层 (壳、幔、核) 的厚度和密度密切相关。由此结果再加上火星的非球型重力场 (也是来自 MGS 轨道跟踪资料) 和火星地表地形资料, 文献 [10,11] 估计火星地壳厚度为  $50 \sim 100 \text{ km}$ , 但此前的各个模型都基本上认为在  $10 \text{ km}$  之内。

目前火星的  $J_2$  的估值约为  $1.985 683(3) \times 10^{-3}$ , 由于受大气循环和南北两极冰盖的周期性变化的影响而表现出明显的周年和半年变化。早期用 Viking 登陆器的气压变化资料导出的  $J_2$  的季节性变化  $\delta J_2 \approx 1.8 \times 10^{-9} \sin(l' + 22^\circ) + 1.5 \times 10^{-9} \cos(2l' + 2^\circ)$  [8]; Smith 等人 [5] 从 MGS 的射电跟踪资料得出火星南极和北极的冰盖体积的最大值都约是  $3 \times 10^{15} \text{ m}^3$ 、密度约  $910 \text{ kg/m}^3$ ; 还得到  $J_2$  变化的半年项  $\delta J_2(0.5a) \approx (2.2 \pm 0.8) \times 10^{-9} \cos(2l' - 20^\circ)$ ; 而 Yoder 等人 [6] 同样利用 MGS 资料给出  $\delta J_2 \approx (1.81 \pm 1.02) \times 10^{-9} \sin(l' + 12^\circ) + (2.32 \pm 0.94) \times 10^{-9} \cos(2l' - 3^\circ)$ 。

确定火星内部深处的矿相 (从而确定密度分布) 和温度结构对研究火星以至其他类地行星的成长过程和热力学演化至关重要 [12]。其中确定核的大小、矿相和热力学状态是最关键因素。从其内部的化学组成来看, 与地球地幔富含橄榄石不同, 火星地幔更富含铁质, 而火星铁核内也含有较多的硫。在固体内核结晶形成过程中, 硫集中于流体外核, 从而可降低 Fe-FeS 系统的熔点 [13]。由此也有人认为火星核也可能完全是流体, 没有固体内核。由此出发, 从热力学演化的理论计算结果给出的火星外核半径在  $1 550 \sim 1 850 \text{ km}$  的范围内 (火星的平均半径约为  $3 390 \text{ km}$ ), 而由火星岁差常数导出的火星外核半径在  $1 300 \sim 1 700 \text{ km}$  之间, 两者符合得较好。但到目前为止, 还没有肯定的证据可以完全排除火星存在固体内核的可能性, 其核的物理形态仍需进一步研究。

如果核是液态并且近似地具有绝热温度梯度, 则下面 4 个量就可描述核的物理性质: 液核的大小、温度、密度和绝热体积模量, 假定液核的剪切模量为 0 即为理想流体。而其他的参数 (如各种矿物成分的密度和绝热体积模量关于温度和压力的偏导数) 可以从实验室中的高压模拟实验中较为精确地得到, 因此, 对核的矿物学和温度确定与对上述 4 个独立参数的确定可以认为是等价的, 而后者可以通过对火星的大地测量和地震学测量而实现。

利用 NetLander 的 4 个登陆器组成的网络, 进行大地测量、地震学和磁场观测, 可以研究火星的内部物理状况。研究中存在的最大问题是确定其核的大小、状态 (固或液态) 和幔的结构 (如它们的密度结构)。

假设火星只有 1 个均匀的核和 1 个均匀的幔, 如果总的半径和密度精确地知道, 即其误差为 0, 再假设核的半径  $r_c$  约为火星总半径的一半。设核、幔的密度分别为  $\rho_c$  和  $\rho_m$ , 则在核幔边界处的密度跳变为  $\Delta\rho = \rho_c - \rho_m$ 。如果总的惯性矩  $I$  的测量误差为  $\delta I$ , 则在由  $I$  反推  $r_c$  及  $\Delta\rho$  时得到的误差  $\delta r_c$  及  $\delta(\Delta\rho)$  与  $\delta I$  有下述关系:

$$\frac{\delta(\Delta\rho)}{\rho_m} = \frac{\rho_c}{\rho_m} \frac{\delta(\Delta\rho)}{\rho_c} \approx -\frac{7}{3} \frac{\Delta\rho}{\rho_m} \frac{\delta(r_c)}{r_c} - \frac{32}{3} \frac{\delta I}{I}$$

如果假定核与幔的密度的比值  $\rho_c/\rho_m \approx 2/3$ , 则  $\Delta\rho/\rho_m \approx 1/2$ 。即使核的半径  $r_c$  没有误差, 即  $\delta r_c = 0$ , 惯性矩的误差  $\delta I$  的影响也会被放大约 10 倍。如果进一步假设火星核幔边界的典型温度值为  $2 000 \text{ K}$ , 典型膨胀系数  $\alpha$  约为  $5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , 密度的误差与温度的误差有近似关系:

$\delta T/T \approx (1/\alpha T)(\delta \rho_c/\rho_c) \approx -10(\delta \rho_c/\rho_c)$ 。即使核的半径没有误差,但目前从 Pathfinder 测得的火星惯性矩 ( $I$ ) 还不够精确,若误差  $\delta I/I \approx \pm 0.5\%$ ,将会导致核密度的误差  $\delta \rho_c/\rho_c \approx \pm 3.3\%$ ,因而  $\delta T/T \approx \pm 33\%$ ,这比目前已发表各火星温度模型之间的误差还大。这就使得对核的矿相和温度的研究没有多大的实际意义。即使利用 NetLander 中的地震实验精确地确定出了火星的核幔边界,也难以获得上述多个参数。可见已有的 Pathfinder 关于火星惯性矩的测定结果的误差太大 ( $\pm 0.5\%$ ),不能提供任何关于火星核的矿物学和温度等有用的约束信息。如果 NEIGE 实验通过对火星岁差的观测将火星的惯性矩的测定精度提高 5 倍,就须将火星核密度的误差下降至  $0.6\%$ ,核温度的误差降至  $5\%$ ,才能为有关的矿物学和热力学提供一个有意义的约束信息。如仍采用上述的简单模型,能以  $40 \text{ km}$  的精度(即  $3\%$  的相对误差)推出核的半径。但仍不能同时解出核的密度和半径,还需要其他资料如 NetLander 中的地震学测量或 NEIGE 的其他测量资料。然而通过测量类地行星的章动的方法可以更好地确定类地行星的核大小和流变学性质。

## 4.2 火星的章动

火星的自转及其变化的情形与地球有十分相似之处。由于太阳及火星的 2 个自然卫星(Phobos 火卫一, Deimos 火卫二)的引力作用,火星也必然存在潮汐和章动,使火星的自转轴随时间不断变化。由于火星赤道隆起,太阳的引力总是倾向于将火星的赤道平面拉向其公转轨道平面。自转的火星对这种力的响应与陀螺类似,其自转轴围绕其公转轨道面的极轴形成一个圆锥。这种受迫运动就是岁差。由于太阳、火星及其 2 个自然卫星的相对位置不断变化,上述受迫运动还存在周期性的变化,即章动。由太阳引起的火星章动幅度约为  $1''$ ,相当于在火星地表上引起的位移约为  $16 \text{ m}$ 。

如同地球一样,火星的章动也与其内部结构密切相关。如果存在核,且核是液态的,其自转轴与火星地幔自转轴不重合,则存在一个本征模即自由核章动(FCN)。FCN 周期与核幔边界的几何扁率及其形变密切相关(当然还有密度的变化),计算表明,按照目前现有的火星内部流体静平衡态模型(主要由 Pathfinder 计划导出),核幔边界的半径在  $1300 \sim 1700 \text{ km}$  之间(取平均值约为  $1500 \text{ km}$ ),则其相应的 FCN 周期在  $230 \sim 280 \text{ d}$  之间。而与 FCN 频率相近的章动项由于受 FCN 的共振作用而显著放大,共振效应可望在几十 mas 量级,对应的火星地面形变约为几十 cm<sup>[14]</sup>。如果这种放大效应能从 NEIGE 的大“火”测量数据中检测到,即通过观测在 FCN 频率附近的章动幅度就可推断是否存在 FCN 及其频率,并能推导出有关的参数,从而确认火星是否存在液态核并可推算出该核的大小、核的主转动惯量、核的密度、核的扁率等信息。

将有或者无内核的火星模型的章动转换函数与刚体火星的章动序列卷积后,可以发现不仅仅是在 FCN 附近的章动受到共振影响,频率离 FCN 较远振幅很大的章动项也受到影响,顺向半年项就是如此。如果核是流体的,与 FCN 共振有关的参数值的变化对共振放大效应的影响不大;但是否是流体(即是否有 FCN)的差别可以使共振的幅度之差至少超出 NEIGE 的精度水平  $5 \text{ mas}$ (约  $8 \text{ cm}$ )。因此通过观测火星的章动可以确定核的状态<sup>[15]</sup>。

到目前为止,尽管已有几个火星探测计划成功实施,但人们还不能确定火星是否存在内核。因为火星内部磁场对外部磁场没有(或几乎没有)贡献,因此其核如果不是完全流体(即无固体内核且处于稳定分层状态),就是完全固体即无流体核。但是一个几乎完全是流体的外

核加上一个很小的固体内核或者一个几乎完全是固体的外核也是可能的。

如果在液态外核中还存在固态内核，而两部分的自转轴又不重合，则也可能存在所谓的自由内核章动 (FICN)，并因此对其频率周围的章动项产生共振。模拟计算表明，内核的半径对 FCN 的周期及其对章动共振的影响也是重要的，特别是当内核较大时影响尤甚<sup>[16]</sup>。由此可见，通过关于火星章动的大量观测有可能提供有关内核的信息以确认火星是否存在固态内核；若有，其大小如何。另外，由于 Tharsis 高地的存在，火星的三轴性 (tri-axiality，即 2 个赤道惯性矩  $A$  与  $B$  的相对差别) 约  $8 \times 10^{-4}$ ，远远大于地球 (地球的约  $2 \times 10^{-5}$ )，它对火星的 Chandler 摆动 (CW) 周期、FCN 周期及章动转换函数也都将有明显影响。另外，冰帽和大气由于升华 / 冷凝过程而产生风和质量的变化或交换，从而可能影响章动，巴黎的气象动力学实验室研究了气象动力学模型，结果表明它对章动的影响很小，可忽略。

综上所述，通过对顺向半年章动的观测可以知道核是液态或固态的。如果在逆向章动谱中 FCN 的共振效应也能观测到，则还可提供其他有关的信息，如：核的主惯量矩、核的大小和密度、核的扁率、以及内核的存在性等。以上这些参数特别是 FCN 频率的确定，可以了解火星内部的物理信息 (如核幔边界 CMB 的信息、非流体静平衡态对初始状态的 CMB 扁率的贡献、弹性 / 非弹性参数等)。如果 FICN 的章动共振效应也能观测到，那么还可以提供关于 ICB 处的密度跳变、内核的大小等信息。

### 4.3 火星极移

火星极移是火星自转轴在与火星固连在一起的火固参考架中的运动，其幅度为 0.5~1 m。主要有两种成分：1) 季节性项，幅度大约为 30 cm，是主要与风和质量重新分布有关的受迫摆动，后者由大气和冰盖的升华 / 冷凝过程产生；2) 与地球极移类似的 Chandler 摆动，这是非刚体火星的自由摆动。

根据对火星表面压力变化的观测，得到火星的 CW 分量大约为 10~80 cm<sup>[8]</sup>，其周期约为 200 火星日，它与火星的全球动力学扁率和 Love 数  $k$  直接相关。同时，液核、地幔的弹性 / 非弹性也会影响最终观测到的 CW 周期<sup>[17]</sup>，其示意图见图 1。

由于风和质量重新分布导致了季节性极移，其中周年项振幅约 12 mas (20 cm)、半年项约 4 mas (6 cm)，这两项均大于 NEIGE 的期望精度 (对这两项都是约 2 mas)，而来自火星内部因素的不确定性对这两项的影响只在其百分之几的量级上，因而可望观测到，从而得到有关火星大气质量交换的信息。

### 4.4 火星日长 (LOD) 变化

火星日长变化主要是由冰的升华 / 冷凝过程、风和太阳潮汐引起<sup>[18]</sup>，其中冰盖和大气的效应是主要的。冰盖和大气的效应对火星日长的贡献主要有周年和半年变化项，其波动幅度分别约 0.22 ms 和 0.38 ms 量级<sup>[18]</sup> (与此对应的 UT 的变化幅度分别约 36 ms 和 25 ms，在赤道上分别相当于约 9 m 和 6 m)；而 Yoder 和 Standish<sup>[8]</sup> 根据 Viking 的资料得到其波动幅度分别为 0.29 ms 和 0.25 ms。风的贡献在全部效应中约占 1/3；而太阳潮汐的贡献大约为 30 cm (周年项) 和 15 cm (半年项)。潮汐对周年和半年 LOD 变化的贡献都在 0.01 ms 量级，

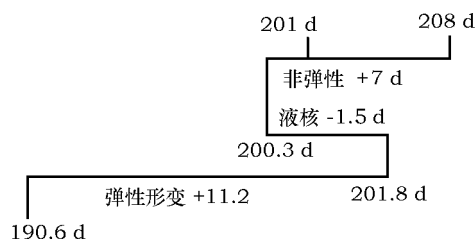


图 1 各种因素对 CW 周期的影响图



相当于对 UT 的影响为 1 ms(周年项) 或 0.5 ms(半年项)。NEIGE 对 LOD 变化的观测精度预期会好于 0.004 ms, 相当于在赤道上 12 cm(周年项) 或 6 cm(半年项)。上述影响都远大于 NEIGE 的观测精度, 因此可以通过观测火星的日长变化, 并扣除掉太阳潮汐作用, 得到冰盖的质量交换信息。

火星内部物理参数的不确定性对 LOD 变化中的周年、半年项值的影响只有其百分之几的量级。例如, 核的状态(液态或固态)的差别将使上述值差约 3%, 刚好大于 NEIGE 的精度, 应该可以检测出来, 但其前提是假设已预先知道核的大小并且其他影响 LOD 变化的因素也能在 1% 的水平内扣除掉。若就为了推断核的流变学状态这一目的而言, 则对章动的观测容易得多。

总之, 通过对火星 LOD 变化的观测如能扣除潮汐效应, 就有可能得到冰盖和大气的激发函数。但这也依赖于火星大气动力学模型, 这正是 NetLander 计划中气象实验的目标之一。

#### 4.5 NEIGE 的科学价值

基于以上分析, 通过 NEIGE 实验, 可以确定火星的核目前是固态的还是液态的, 还可以得到其他有关火星内部(如幔的弹性)和热力学演化的详细信息; 可以为火星内部结构(核、幔)、核的温度和矿相, 以及火星的增长过程等提供有价值的信息和约束; 可以通过对火星的岁差和倾斜率的确定, 导出关于火星过去的气候历史, 这对理解火星极区的层叠状地形和冰盖结构也很重要, 后者还可以通过综合 NEIGE 实验与 Mars Express 的高分辨率照相机和雷达测量的观测资料进行研究。NetLander 项目中的地震学数据(SEIS)或许可以提供更多关于其内部物理性质(包括组成壳、幔和核的物质的密度、弹性参数)的信息。而其内部的电导率资料可以由磁场计(MagNet)资料补充得到。

如何综合利用 SEIS、NEIGE 和 MagNet 的资料联合研究火星内部是一个研究课题。目前已有综合利用上述三种实验模拟资料研究火星内部矿物学和温度剖面的工作<sup>[19]</sup>。

## 5 火星大气层和电离层 TEC

太阳风与火星所处的行星空间环境之间的相互作用机制与过程在过去一直存在着争论。直到最近, Trotignon 等人<sup>[20]</sup>才叙述了拦截太阳风的原理。MGS 上搭载的磁场计和电子反射计实验观测揭示, 主要是火星的大气中性层和电离层(而不是火星本身的固有磁场)参与了同太阳风的作用<sup>[21]</sup>, 其过程与结果同在金星上观测到的事实类似。但在有限的空间范围内的磁壳异常可以局部地修正这种状况。

从实验角度来看, 在火星白天区的相互作用区内, 在下至 850 km 的高度处的场和粒子都已被俄罗斯的 Phobos-2 计划观测到。而在火星磁层顶(太阳风与电离层的边界)以下的电离层, 人们目前的知识仅局限于: 1) Viking 号飞行器在白日区轨道下降过程中对有关主要参数实地测量到密度和温度的 2 个垂直剖面<sup>[22]</sup>; 2) 其他不同的轨道器进行的一系列射电掩星测量反演获得的一系列电子密度剖面。

对火星的等离子体目前还知之甚少, 这与金星的情形不同, Pioneer 号金星轨道器获得了很多这方面的有关资料<sup>[23]</sup>。当然, 由于这 2 个行星之间的有关参数(太阳风、压强、重力)存在的差异, 不宜对两者进行直接比较。等离子体的逃逸过程在火星大气层的长期演化过程中起着重要的作用。在存在高动力学压强的时期主要是由于太阳风导致磁层顶的消蚀<sup>[24]</sup>。

在火星的白日区, 电离来自于 XUV 辐射与大气中  $\text{CO}_2$  分子的相互作用, 电子密度的峰值在白天可达  $10^5/\text{cm}^3$ , 位于约 130 km 高的上空。关于电子和离子密度及温度的垂直剖面模型已有多 [25]。这些模型中的关键物理量是从电离层顶往下的垂直热通量。磁场主要由太阳风和大气层相互作用引起, 但也局部地来源于火星外壳异常区域。在火星电离层中, 磁场限制了其垂直平均自由程进而影响其传导系数。

在火星的夜区, 等离子体沿着感应磁尾的磁力线蒸发 (逃逸), 从而在电离层形成电子密度“空洞”区。典型的最大电子密度值约为  $5 \times 10^3/\text{cm}^3$ 。夜区的电离层可以部分地通过两种机制来维持, 一是来自于从白日区的水平传输, 二是沿着感应磁场磁尾的磁力线降落的粒子。后者可能显著地依赖于当地的磁化状态和磁场的方向。这中间需要一个由太阳主导的调制过程。密度剖面变化也非常显著, 甚至电子会全部逃逸掉。

Mariner 9 号射电掩星实验资料显示火星电离层电子密度峰值所在的高度与掩星点的火星表面高度密切相关, 表明火星地表地形对电离层的影响是直接的 [26]。而 MGS 的大量射电掩星实验资料显示火星电离层电子密度峰值的高度呈现波形结构 [27], 不但直接受太阳辐射的影响而发生变化 [28], 也明显受低层大气的季节性变化影响 [29]。

总电子数 (TEC) 是电子密度沿着垂直路径的一个积分, 它可以通过沿介于登陆器与轨道舱之间的传播路径的相位测量而获得。NEIGE 实验可以实现该测量。由于有登陆器网络, 可以允许对不同地区和路径的 TEC 进行同时测量, 加上轨道舱的运动, 还可以给出 TEC 的水平方向的变化。而这些 TEC 的水平梯度对研究前面的电离层空洞和水平传输是很有用的。由 NEIGE 测量的 TEC 与由火星地面穿透雷达 GPR 测量的电离层底层垂直剖面两者可以互补, 同时, 在 Mars Express 轨道舱上进行的火星射电掩星实验与前面两者也可相互支持; 还可能进行三者之间的交叉校正。

与金星的情形类似, 火星的电离层也存在小尺度的异常体 (如不同类型的等离子波和不稳定性), 它们可能来自于太阳风与电离层的相互作用, 或者来自大气层与电离层的相互作用。前者包括啸声波 (一种电磁波)、等离子云以及在过高密集的太阳风压时期发生的与磁力线穿透有关的现象; 后者则包括可能由强烈的大气风产生的引力波。这些异常体有可能是引起在电离层传播的射电波闪烁的原因。如同在地球上的做法, 通过测量在轨道舱与登陆器之间射电信号的幅度与相位波动, 可检验以上特征。通过比较实验数据与等离子扰动的理论模型, 可以得到关于电离层的磁化状态的信息。

因此, 通过对这些 TEC 及其水平变化等的测量, 可以开展以下几个方面的研究 [30]:

1) 火星的全球电子密度分布。它随太阳的高度角及太阳风情况而变化。通过测量电离层中最大电子密度值及用地面穿透雷达 (GPR) 测量电离层底部的密度剖面, 可以对 TEC 实验结果做绝对校正。NEIGE 原计划还准备与火星快车号上的射电实验部分结果做相关分析。

2) 电离的水平传输及其在维持夜区电离层中的作用。一般认为在晨昏交界区的电离的水平传输是导致等离子体分布的水平梯度的最重要因素。因此, 通过测量 TEC 的梯度包括水平梯度可以研究空洞的发生、位置和大小。

3) 在大气逃逸的各种机制中等离子体逃逸的相对重要性。在夜区, 等离子体的蒸发可能沿着感应磁层的磁力线进行, 也可能发生在等离子体分布的空洞区。通过研究这些空洞, 可以估计这些等离子体的减少。在白天区, 闪烁实验可以检测在电离层顶的密度异常, 而电离层顶

的密度异常与等离子体的逃逸有关。

4) 在磁异常区上空的等离子结构。已证实磁压力在压力平衡中非常关键,它能够抬升电离层顶的高度。相反地,在磁异常区之外,只有等离子体压力参与对太阳风压力的平衡。通过研究在电离层顶磁尖角(cusp)的形成和局域化的磁重联(介于异常体的磁场与行星际磁场之间),可以研究太阳风等离子体,并进而修改其下部电离层等离子体的空间分布结构。

5) 区分磁场的内外源场。与地球上的情形类似,导电的电离层可以支持由于太阳风相互作用导致的变化电流。NEIGE 计划中一个探索性的目标就是将 TEC 测量与由于这些电流而产生的磁场变化联系起来,后者将可由磁场计记录。但由于缺乏一个全球性的火星固有磁场模型,使得上述目标(由磁场波动导出电流体系)比在地球上更难实现。

## 6 NEIGE 的策略

为了达到 NEIGE 在大地测量方面的科学目标,其基本理念是在火星表面上建立一个小台站网络(当时设计为 4 个),相互之间距离几千 km,组成一个与火星地壳固连在一起的参考架,通过监测这个框架相对于地球参考架的位置指向,从而测定火星在空间惯性参考架中的自转及其变化。

由于登陆器的质量不能太大(小于 20 kg),它很难与地球直接通讯,因此需要一个信号中继转发器。将 4 个登陆器全部释放后仍绕火星转动的轨道舱就可以担此重任,其平均寿命至少为一个火星年。同时它的轨道也可以作为火星参考架与地球参考架的中间参考架。但是由于测量和理论模拟该轨道舱存在一定的困难,这个轨道中间参考架必然会引入额外的误差,这可以通过在轨道舱与地球之间的射电联络信号的多普勒频移资料重构轨道舱的位置。MGS 和 Pathfinder 计划已证明 0.1 mm/s 的测定精度是可以达到的,因此在 NEIGE 计划中也采用该精度指标。在轨道舱与地球之间采用 X 波段(8 GHz)(在项目计划的初始阶段曾计划采用 S 波段的 2.4 GHz)的双向连接,参考频标由地球上的一个氢脉泽、轨道舱上的一个相干应答器和一个高增益的抛物线型的可控天线来实现。曾计划能由 Ariane 空间备用载荷中的微通讯卫星实现上述的功能从而省掉轨道舱部分:一颗卫星在 2003 年发射,为近似赤道型轨道;在 2005 年再发射 2 颗,其中一颗也是近似赤道型轨道,另一颗为近似极轨道。

同时,在 4 个登陆器与轨道舱之间,采用 UHF 波段(400 MHz)的双向相干连接,并且由登陆器向轨道舱发射单向的相干 X 波段(同样在初始时曾计划采用 S 波段的 2.4 GHz)纯载波信号。由于登陆器的小质量限制,必须采用创新的设计:在登陆器和轨道舱两端都装有全方位的天线。在登陆器与轨道舱之间这些射电联结要求在轨道舱上的时间标准稳定,在平均 20 s 时间内的稳定度要达到  $10^{-11}$ 。

通过在登陆器与轨道舱之间同时进行多普勒测量(UHF 和 X 载波)和距离测量(UHF 调制码),可以监测电离层的 TEC,并进而修正它对多普勒速度测量的干扰。在一段为时 20 s 的多普勒计数窗口内,多普勒测量的精度可以达到 0.1 mm/s。轨道舱上安装有一个数字处理单元(DPU),它可以对信号的幅度和相位的波动进行分析,还可进行闪烁研究。

每个登陆器每周至少要求做一次(相对于轨道舱的轨道在一个可见的弧段内)大地测量和电离层方面的测量,如果能做到每周两次甚至每天一次当然更好。

从地球上对轨道舱的跟踪尽可能做到长期连续地进行, 以保证对其轨道能很好地模拟, 以提供一个重要的中间连接参考架。若纯粹从参考架连接方面来说, 如果在 NetLander 计划运行期间, 有另一个计划也提供另一个轨道舱, 则通过对 2 个轨道舱的同时跟踪, 由 2 个轨道舱测量的差分, 可以几乎全部地将沿着射电波方向相同路径的星际等离子体效应扣除掉, 从而可以得到更好的火星自转的结果, 而不需要登陆器对这第二个轨道舱进行观测。虽然这样做可以改善火星自转的观测精度, 但模拟研究表明, 对 NEIGE 实验本身来说并不需要 2 个轨道舱。

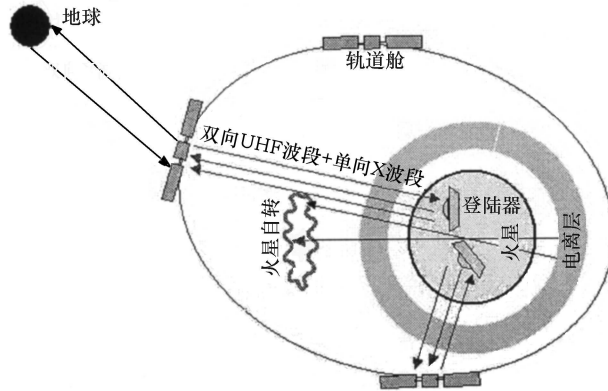


图 2 NetLander 架构及通讯示意图

NEIGE 中的电离层研究主要是确定火星电离层的 TEC。它通过测量在轨道舱与各登陆器之间发射的信号相位而实现。因为信号在电离层中的折射率依赖于电离层电子密度和信号的频率, 从而对信号的相位延迟和多普勒速度产生影响。假设信号频率足够高以至于可以考虑其为直线传播, 则发射相位与接收相位之间有如下关系:

$$\Phi_{\text{接收}}(t) = \Phi_{\text{发射}}(t) - \frac{\omega}{c} [D_0(t) + \Delta_{\text{TEC}}^{ph}].$$

这里假设电子线路产生的相位延迟已被修正;  $D_0$  是发射器和接收机之间的距离;  $\Delta_{\text{TEC}}^{ph}$  是由于电离层的存在而造成的额外距离。假设电离层是未被磁化的等离子体, 则有:

$$\Delta_{\text{TEC}}^{ph} = -\frac{40.3}{f^2 \cos \theta} \text{TEC},$$

其中  $\text{TEC} = \int_{\perp} N_e(z) dz$  是电子密度  $N_e(z)$  沿垂直路径的积分。垂直 TEC 的典型白天值为  $3.5 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ , 其引起的相位延迟相当于在 S 波段 (2.4 GHz) 上 2.5 cm、X 波段 (8 GHz) 0.2 cm、或在 UHF 波段 (400 MHz) 0.9 m 的距离。 $D_0$  本身及其变化率都很大, 约是电离层贡献 ( $\Delta_{\text{TEC}}^{ph}$ ) 的  $10^6$  倍。为了消除它的不确定性所带来的影响, 可采用双频观测进行相位组合:

$$\Phi = \Phi_{f_1} - (f_1/f_2)\Phi_{f_2}.$$

组合后的值直接正比于电离层的影响。选择 UHF 和 X 两波段是为了尽可能利用与频率的平方反比关系, 通过组合后提取电离层信息或消除电离层的影响。由上述相位组合后

给出的 TEC 随时间的变化可以解释为空间变化,由此可以获得 TEC 的水平梯度。TEC 的绝对值可以通过解相位模糊度而获得,但需注意的是,经上述相位组合后的模糊度不再是  $2\pi$  的整数倍,但可以通过另外的方法得到:要么将其中一路(高频或低频)链接信号编码,要么将其中一路链接信号改为两个相近的频率,使两种可能的相位组合方法之间的相位差能控制在  $2\pi$  之内(但大于相位的确定精度)。

## 7 NEIGE 数值模拟:精度指标的要求

项目组做过详细的关于 NEIGE 实验的计算机数值模拟<sup>[30]</sup>,结果表明 NEIGE 计划可大大改变以前人们从 Viking、Pathfinder 和 MGS 等得到的对火星的认识。

理论上说,当轨道舱(特别是在轨道舱的轨道远拱点附近)进入各登陆器的可视范围内(最低高度角大于  $20^\circ$ )时,登陆器可以同时跟踪观测 1 h 的弧段,但当测量是在其近拱点附近进行时,由于速度较快,多普勒信号可能会发生较大的变化,就可能达不到这样的要求。在轨道的近拱点附近,由于信号较强,从地球进行的多普勒跟踪可以更高精度地确定轨道舱的位置。因此,在该 NEIGE 的数值模拟中,尽可能地将登陆器轨道舱观测弧段安排在轨道舱的近拱点附近,但这样一来,对各登陆器的跟踪就很难同时进行了。

由于同时对各登陆器跟踪能将某些共同的测量误差源互相抵消。但对于一个轨道舱跟踪多个登陆器来说,主要的测量误差来源于仪器和钟的效应,然后才是由于电离层和靠近登陆器的对流层的效应。因此同时跟踪对消除前者主要的误差源贡献不大。只要各个登陆器跟踪轨道舱的各弧段之间的轨道精确度高,同时跟踪对 NEIGE 实验并没有太大贡献。而且,从地球跟踪轨道舱也并不需要同时对各登陆器也跟踪。

轨道舱在空间惯性系中的位置主要是通过从地球上对轨道舱的多普勒跟踪来确定。如果轨道舱所受的各种力能很好地用模型来描述,而只需求解六个轨道根数,则从地球上进行多普勒跟踪确定的轨道舱位置精度可达几米的量级。但轨道舱所受的力很难都能够被模型化,特别是火星重力场的不确定性正是目前火星计划(如 MGS)常规导航中的主要误差源。等到 Mars Sample Return 计划的实施时,才可能期望火星重力场的精度有显著的改进。

根据以往对地球上的各卫星轨道求解的经验,为了得到最自洽的轨道,处理每个飞行器的轨道时都需要有针对性地对重力场做某些适当的“调整”。项目组在做模拟时,考虑了两种动力学模型:

1) 假设轨道舱的受力,或者说动力学状况,可以完全模型化,因此在每个一天的跟踪弧段内只需求解六个轨道根数,因此这是一种最理想的状况;

2) 对每个跟踪轨道都重新估算一次 6 阶  $\times$  6 级的重力场,其先验误差假设与 MGS 的导航精度相当。在实际 NEIGE 实验时,是对整个数据(而不是每一个轨道)只确定并同时使用同一个  $100 \times 100$  的重力场。但如此高的阶数的模拟使计算变得很困难。为此在一个火星年内模拟产生了 97 个跟踪弧段,对其中每弧段解算出一个  $6 \times 6$  的重力场与只解一个很高阶数的重力场所涉及的参数个数差不多,可以认为这第 2 种模拟方法是对实际的 NEIGE 实验的合理近似。

事实上,在实际处理观测资料时,肯定还会将其他有用的信息和资料(如更多的跟踪弧

段、MGS 和其他火星轨道器的资料) 包括进来, NEIGE 实验的实际结果应该会优于采用第 2 种动力学模型的模拟结果。

该模拟所采用的轨道周期为 5.7 h, 近拱点 300 km, 远拱点 8 300 km, 倾角  $122^\circ$ 。模拟结果将会与 2005 年的极轨型微型通讯轨道器的结果非常相似。表 1 给出了模拟中 3 个登陆器的位置。表 2 给出了两种情况下火星自转参数的精度, 事先精度是基于从 ViKing 和 Pathfinder 项目获得的结果。假设每个登陆器到轨道舱的双路多普勒链接是每周 1h, 从地球到轨道舱的双路多普勒链接的精度为 0.1 mm/s, 这在 MGS 和 Pathfinder 中是可行的, 方案一和二分别对应于上述两种动力学模型。

表 1 NEIGE 数值模拟时采取的 3 个登陆器的位置<sup>[30]</sup>

登陆器	位置 5	位置 6	位置 7
经度	84.9E	94.8E	118.3E
纬度	16.0	-12.1	35.1

表 2 从模拟的 NEIGE 实验确定的火星自转参数的精度<sup>[30]</sup>

	事先精度	方案一	方案二
UT1 周年项幅度 /mas	100	3	7
UT1 半年项幅度 /mas	100	1	14
极移周年项幅度 /mas	100	2	4
极移半年项幅度 /mas	100	2	4
惯性矩 $I$ / 火星的总惯性矩 $I$ (%)	0.5	0.1	0.2
核惯性矩 $I_c$ / 火星的总惯性矩 $I$ (%)	100	17	34

该模拟结果表明, 在火星自转动力学方面, NEIGE 计划可以显著地提高测定精度。由此检测液核的可行性非常高。相比于 Pathfinder 的非常微弱信息, 自转的季节性项的精度可提高 1~2 个数量级, 极移分量的精度可提高约 1.5 个量级, 从而可以首次真正地检测出极移, 这可以大大地促进人们对火星内部情况及火星表面与大气相互作用的了解。

## 8 NEIGE 的技术方面和组织管理

该实验主要是在 2 个频段 (UHF 和 X) 上同时进行精确的多普勒频移测量, 而 UHF 波段还支持下述的 TT&C 功能。双向收发的技术措施可以削弱 NetLander 硬件对通讯系统的影响, 但也意味着轨道舱需要增加相应的功能。

### 8.1 登陆器架构

登陆器通讯系统包含以下组件:

1) TT&C 射电部分。包括: UHF(脉冲) 信号发送一应答器; UHF 双工器 (装在天线端的输入 / 输出分离滤波器); UHF 天线 (可展开的四叶螺旋状天线)。

2) NEIGE 射电组。包括: X 波段的发射器、X 波段天线板。

表 3 是有关登陆器的资料, 表 4 是 NetLander 通讯系统有关参数。

表 3 有关登陆器的资料<sup>[31]</sup>

参 数	取值
前端保护性外壳的直径 / cm	90
气囊直径 / cm	110
折叠而尚未伸展开的仪器站的直径 / cm	47
照相机外伸臂长度 / cm	70
在 Ariane 5 号火箭上的总载荷 / kg	210
弹射离开轨道器时的质量 / kg	47.5
着陆后吹掉气囊后的净质量 / kg	17.5
有效载荷质量 / kg	4.5

表 4 NetLander 通讯系统参数<sup>[30]</sup>

	机 械 参 数	电 子 或 环 境 参 数
UHF 信号发送 - 应答器 (SMART)	600 g; 12cm×12 cm×3.5 cm	6.5 W 输出 (RF); 2 W 接收 (DC); 20 W 总能量 (DC)
UHF 双工器	200 g; 12 cm×6 cm×2 cm	-50 ~ 50° C(电子盒)
UHF 天线	250 g; $\phi=80$ mm; 展开前后的高度 分别为 4 mm 和 250 mm	-130 ~ 60° C(外部)
X 波段的发射器	250 g; 12 cm×12 cm×2 cm	2 W 输出 (RF); 20 W 总能量 (DC)
X 波段天线	100 g	-130 ~ 60° C(外部)

## 8.2 轨道舱架构

NEIGE 的轨道舱部分包括:

1) 一个兼容型的 UHF 接收机。它的多普勒测量精度非常高 (0.1 mm/s), 其技术要求也比前面的 TT&C 接收机高得多。为了研究火星电离层中通常频率相对较低 (小于 100 Hz) 的闪烁现象, 它还需要以 200 Hz 频率对信号的相位和幅度同时取样。

2) 一个 X 波段的纯载波接收机。它的多普勒测量精度也很高, 在上述的 UHF 接收机的配合下可帮助将其频率自动锁定。同样也需要对信号和幅度以 200 Hz 取样。

3) 一个 X 波段天线。

4) 一个参考振荡器。因为轨道舱作为中继, 既要支持通讯 (指令和数据), 又要进行 NEIGE 高精度的双通道多普勒测量, 双向链接时需要在轨道舱上有一个在短时间内比较稳定的晶振器, 既产生发射的 UHF 信号频率, 又产生用于多普勒计数的频率, 要求其在 20 s 多普勒窗口内的稳定度好于  $10^{-11}$ 。

由于载荷质量的限制, 需要将 NEIGE 射电组件和 TT/C 设备集成在一起, 成为 UHF 组件包。这也意味着 UHF 接收机也可以保证高精度的多普勒测量。UHF 组件包设备主要由 JPL 负责, 随着项目的中断, 其技术细节不得而知。

## 8.3 多普勒测量

多普勒测量采用了一种称为“quatant”的专利方法<sup>[32]</sup>(美国专利号 6882908, 欧洲专利号 EP0805988), 它具有 0.1 mm/s 的径向速度误差, 这相当于在 UHF 波段的 0.3 mHz 的

频率误差、或在 X 波段的 5.6 mHz 的频率误差 (双程)。多普勒测量的误差主要来自相互独立的 3 个方面, 即: 热噪声、晶振器的稳定性限制、计量误差。它们的量级如表 5 所示。

表 5 400 km 的圆型中继轨道的多普勒测量的主要误差<sup>[30]</sup>

			mHz
	UHF	X	条 件
热噪声	$\leq 0.2$	$\leq 3$	多普勒窗口 $\geq 20$ s; 信噪比, UHF: $\leq 35$ dB; X: $\leq 11.5$ dB
晶振器的稳定性限制	$\leq 0.2$	$\leq 3$	晶振的稳定性好于 $2 \times 10^{-11}$
计量误差	$\leq 0.1$	$\leq 1.3$	计数量 / 窗口频率: UHF: $\geq 300$ ; X: $\geq 18$
总计 (平方和)	$\leq 0.3$	$\leq 4.5$	

#### 8.4 NEIGE 的组织管理架构和经费预算

NEIGE 是 ESA 下 NetLander 计划中的一个子项目, 其总负责人是位于法国航天基地 Toulouse 的 Midi-Pyrenees 天文台的 Barriot 博士, 3 个联合负责人分别是: Dehant 博士 (比利时皇家天文台 (ROB), 负责火星定向参数测量与火星内部物理的研究)、Folkner 博士 (美国 JPL, 负责工程技术部分) 和 Cerisier 博士 (法国地球与行星环境中心 (CETP), 负责火星电离层的总电子计数 TEC 和电离层闪烁的测量及其相关研究)。参加的单位还有: 法国的巴黎地球物理所气象动力学实验室、巴黎天文台、物理和化学环境实验室、行星实验室 (Grenoble) 和法国空间局 (CNES); 德国的 Lohrmann 天文台、地球物理和气象所和 Max Planck 高层大气所; 意大利的米兰大学和空间大地测量中心; 加拿大的 McGill 大学和 British Columbia 大学; 波兰的空间研究中心以及日本国立天文台 (水泽)。

另外还专设了一个技术小组, 由法国 CNES 的信号处理部门负责仪器, 由比利时 ROB 负责 4 个登陆器的选址工作。

技术开发、设计、电子结构及实现均由 CNES 的信号处理部的 Ribes 和 Benoist 负责, 由 JPL 协助。CNES 的信号处理部在调制 / 解调技术、模拟和数字处理、通讯仿真等方面颇有经验, 他们曾经在 MGS 和 Mars 96 项目中负责火星中继收 / 发器的开发工作。

NEIGE 的登陆器部分由 CNES 实现集成并资助, 轨道舱部分由 CNES/JPL 提供。其中轨道舱部分的微型计划是关键的战略选择。

#### 8.5 发射过程

4 个登陆器会在 3 周内从轨道舱上先后分离并弹射向火星, 其前端有一个特殊的保护性外壳, 在其保护下, 登陆器以 6 km/s 的速度进入火星大气层, 然后被大气缓慢减速。在接近火星地面、速度减到一定值后, 还会先后释放出 2 个降落伞以进一步减速, 并在最后一段降落过程即将与火星地面相撞时, 再吹出一个气囊, 保护登陆器免受猛烈的撞击。撞击速度将在 70 km/h (即约 20 m/s) 左右, 与汽车的速度差不多。经过几次反弹 (第一次反弹将跳跃至少 50 m) 后, 登陆器终于停稳在火星表面, 然后其保护性气囊被吹走。登陆器伸出太阳能电池板、通讯天线, 然后调整各科学仪器至预设的位置。



## 9 结束语

目前关于火星测地部分(章动、极移和日长变化)的理论几乎全是照搬地球上的一套,但因火星的未知因素远较地球多,在利用观测数据推测结论时就会因缺少足够的可供校验和约束信息而难以得出唯一的结论。

在 NASA 后续的火星探测计划中<sup>[33]</sup>，“凤凰号”(Phoenix)也是一个低成本的飞行器,计划于 2007 年 8 月发射,2008 年 5 月 25 日到达,将利用 MGS 预设计好而未使用的一个登陆器。“火星科学实验室”(Mars Science Laboratory)计划于 2009 年秋季发射,2010 年 10 月入轨并登陆。NASA 还制定了未来长期的火星探测计划,如 2011 年的“侦察机”(Scout)计划利用航空工具,如小飞机、气球或小型登陆器作为调查平台;“火星样本返回”(Mars Sample Return)计划将于 21 世纪 20 年代实现。

由于美国削减 NASA 经费和项目时,NASA 与 NetLander 的合作计划被裁,原来计划由 JPL 负责的工程技术部分因此中断,项目也在 2003 年 5 月中断。当时作者正在比利时皇家天文台就火星章动研究进行合作访问,受邀参加了项目组的紧急工作会议商讨对策。该项目组仍在努力寻找同包括与中国、日本在内的国家合作的可能性。至作者起草该短文时得知 NetLander 可能要更名为“Net Worker”以更广泛地容纳有关的研究内容。可以说,NetLander 计划是第一个在地球外星体上进行的大地测量网络计划,我们期待着 NetLander 或类似的计划能早日实现。

**致谢** 感谢 Dehant 教授提供许多有关的资料和进展信息。

### 参考文献:

- [1] 李大耀. 航天返回与遥感, 2003, 24: 59
- [2] 代新宇. 航天返回与遥感, 1997, 18: 61
- [3] Folkner W M, Yoder C F, Yuan D N, et al. Science, 1997, 278: 1749
- [4] Yuan D N, Sjogren W L, Konopliv A S, et al. JGR, 2001, 106(E10): 23377
- [5] Smith D E, Zuber M T, Neumann G A. Science, 2001, 294: 2141
- [6] Yoder C F, Konopliv A S, Yuan D N, et al. Science, 2003, 300(11): 299
- [7] Yoder C F, Konopliv A S, Folkner W M. AGU Fall Meeting abstract, 2003: #G42C-04
- [8] Yoder C F, Standish E M. JGR, 1997, 102(E2): 4065
- [9] Folkner W M, Kahn R D, Preston R A, et al. JGR, 1997, 102(E2): 4057
- [10] Zuber M T, Solomon S C, Phillips R J, et al. Science, 2000, 287: 1788
- [11] Turcotte D L, Shcherbakov R, Malamud B D, et al. JGR, 2002, 107(E11): 5091
- [12] Bertka C M, Fei Y. Science, 1998, 281: 1838
- [13] Boehler R. Earth Planet. Sci. Lett., 1992, 111: 217
- [14] Dehant V, Defraigne P, Van Hoolst T, et al. Phys. Earth Planet. Inter., 2000, 117: 385
- [15] Huang C L, Dehant V. Report on the calculations of Mars nutation models, Belgium: Royal Observatory of Belgium, 2003 (unpublished)
- [16] Van Hoolst T, Dehant V, Defraigne P. Phys. Earth planet, Inter., 2000, 117: 397
- [17] Van Hoolst T, Dehant V, Defraigne P. Planet. Space Sc., 2000, 48: 1145
- [18] Defraigne P, de Viron O, Dehant V, et al. JGR, 2000, 105(E10): 24563
- [19] Rivoldini A. Ph.D dissertation, Brussels: Royal Observatory of Belgium, 2006

- [20] Trotignon J G, Parrot M, Cerisier J C, et al. *Planet. Space Science*, 2000, 48: 1181
- [21] Acuna M H, Connerney J E P, Wasilewski P, et al. *Science*, 1998, 279: 1676
- [22] Hanson W B, Sanatani S, Zuccaro D R. *JGR*, 1977: 82: 4351
- [23] Luhmann J G, Russel C T, Brace L H, et al. *Mars*, Kieffer H H, Jakosky B M, Snyder C W, et al. eds. Arizona: The University of Arizona Press, 1992: 1090
- [24] 史建魁, 张仲谋, 刘振兴, 等. *地球物理学进展*, 1997, 12: 98
- [25] Choi Y W, Kim J, Min K W, et al. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25: 2753
- [26] Wang J S, Nielsen E. *Planetary & Space Science*, 2004, 52(9): 881
- [27] Wang J S, Nielsen E. *JGR*, 2003, 108(E7): 5078
- [28] Zou H, Wang J S, Nielsen E. *JGR*, 2006, 111: A07305
- [29] Zou H, Wang J S, Nielsen E. *JGR*, 2005, 110: A09331
- [30] Barriot J P, Dehant V, Folkner W, et al. *Adv. Space Res.*, 2001, 28: 1237
- [31] <http://smc.cnes.fr/NETLANDER/index.htm>, 2006-05-16
- [32] Issler J L. *Techniques et technologies des vehicules spatiaux*, Cepadues Editions, 1994: 613
- [33] <http://mars.jpl.nasa.gov/missions/log>, 2006-05-16

## On the NetLander and its NEIGE Mission

HUANG Cheng-li

(*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*)

**Abstract:** The NetLander Project is an European mission to Mars. NetLander Ionosphere and Geodesy Experiment (NEIGE) is one of its main parts. First, the international missions to Mars in history are introduced briefly. An overall description of the NetLander's scientific objectives is given in section 2, and the nine payloads, such as ATMIS (Atmospheric sensors), ARES (Electric field), GPR (Ground Penetrating Radar), MAG (Magnetometer), NEIGE (NetLander Ionosphere & Geodesy Experiment), PanCam (Panoramic Camera), SEISM (Seismometer), SPICE (Soil Properties thermal Inertia and Cohesion Experiment) and MIC (Mars Microphone), are introduced one by one in section 3. After section 3, NEIGE is discussed in detail. Section 4 discusses the scientific objectives and the contents in geodesy part to be studied in NEIGE, including the Mars' internal evolution and physical, chemical and thermal-dynamical structure, the Mars' nutation, polar motion and length-of-day, while the expected experiment in Mars' atmosphere and ionosphere is discussed in section 5. In order to fulfill these objectives, the strategy of NEIGE is introduced in section 6, and some simulation studies for the requirement of the precision in geodetic measurement are reviewed in section 7. Moreover, the technical and managerial aspects in NEIGE are also reviewed in section 8, including the structures and technical properties of the landers and the orbiter, the noise sources and stability in the Doppler measurement, and the institutions and their responsibilities involved in NEIGE. Finally, the fate of this mission and its future are also introduced briefly.

**Key words:** space astronomy; Mars; review; geodesy; ionosphere; nutation; NetLander; NEIGE