火星车绝对定位方法选择

彭松, 贾阳, 陈百超

(北京空间飞行器总体设计部,北京100094)

摘 要: 针对火星巡视探测任务,提出3种火星车绝对定位方法:无线电测控定位、图像匹配定位、位置圆定位。无 线电测控方法首先确定环绕器的轨道,然后利用环绕器和火星车的器间通信定位确定火星车的绝对位置;图像匹配方法利 用着陆过程中的降落图像与带地理信息的着陆区地形图进行匹配,实现火星车的位置确定;位置圆方法通过敏感器在多个 时刻测量阳光矢量方向和重力矢量方向,结合星历信息求解火星车的位置。对3种方法进行分析比较,根据定位精度、使用 约束等因素,给出在轨使用建议:位置圆定位为基本方法,无线电测控定位作为校验手段,图像匹配定位作为修正手段, 以满足火星车快速、高精度的定位需求。

关键词:火星车;绝对定位;无线电测控;图像匹配;位置圆

中图分类号: V11 文献标识码: A 文章编号: 2095-7777(2016)02-0140-05

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2016.02.007

引用格式: 彭松, 贾阳, 陈百超. 火星车绝对定位方法选择[J]. 深空探测学报, 2016, 3 (2): 140-144.

Reference format: Peng S, Jia Y, Chen B C. Selection of absolute positioning methods for Mars rover [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3 (2) : 140-144.

0 引 言

在火星巡视探测任务中,火星车着陆后初始位置 的确定,即绝对定位,具有十分重要的意义,是建立 火星表面工作坐标系基准、开展火星车定姿以及定向 天线指向等工作的前提。特别对于窄波束的定向天 线,绝对定位精度直接关系到其能否指向地球,为了 实现对地指向,经初步分析要求绝对定位精度在十几 千米量级;同时火星车着陆后,需将相关遥测传回地 球以辅助地面人员判断着陆状态,定向天线对地指向 是一项比较迫切的工作,在此之前必须完成火星车的 绝对定位。

为满足任务需求,依据探测器的配置以及现有的 技术手段,提出了不同的火星车绝对定位方法,对不 同方法进行比较分析,在轨时组合使用以实现初始位 置的精确确定。

1 任务背景简述

对于火星巡视探测任务,火星车首先跟随着陆装 置经过进入、下降和着陆(entry descent landing, EDL)过程到达火星表面,然后开始巡视探测。

为了进行定姿,火星车上通常配置太阳敏感器、 惯性测量单元等敏感器,可以测量太阳方向矢量和火

收稿日期: 2016-03-01; 修回日期: 2016-04-15

星重力方向矢量,敏感器的测量数据可用于确定火星 车的位置。

在EDL过程中,为了进行着陆点的选择以及着陆 控制,通常着陆装置底部安装降落相机,在着落过程 中连续拍图¹¹,该图像可用于确定着陆位置。

另外,为了提高对地通信能力,通常会安排环绕 器作为通信中继,支持火星车的对地通信,利用通信 链路也可确定火星车的位置。

2 绝对定位方法

2.1 基于无线电测控的定位

无线电测控定位是卫星定位的基本方法之一,应 用非常广泛,目前主要研究工作集中在如何提高远距 离飞行条件下的定位精度。在巡视探测任务中,为优 化资源配置,一般巡视器上不配置大孔径和高发射功 率的天线,借助中继探测器(环绕器或着陆器)实现 巡视器的位置确定。美国MER任务中,借助火星轨道 器,实现了火星车数百米量级的定位精度^[2]。在"嫦娥 3号"任务中,利用中国深空网与中国VLBI网对着陆器 进行了定位,长弧段跟踪条件下定位精度达到10米量 级^[3-4];着陆器和月球车之间的相对定位可通过两器之 间的UHF通信链路进行^[5]。 在火星探测任务中,无线电测控定位也作为一种 基本手段。对于火星车而言,考虑到车上天线的配 置,地面不具备直接对其测控定位的能力,其初始位 置的确定包括如下步骤:

1)地面站对环绕器进行测定轨,确定环绕器在惯
 性参考系下的空间位置(方程);

2)环绕器和火星车之间通过多组信号的多普勒测量,以此确定火星车和环绕器的相对位置;

3)依据1)和2),计算火星车在惯性参考系下的 位置;

4)进行坐标转换,得到火星固连坐标系下的位置 表示,即火星车所在位置的经纬度。

基于我国当前的技术水平,对无线电测控定位精 度进行初步分析。对于环绕器定位精度:深空站和 VLBI站的测距误差在米级,即径向误差在米级;通过 长弧段跟踪,使用单站测距、多站测距数据、测距融 合VLBI数据以及不同数据组合等,可以实现20 nrad的 测角精度,对于距离地球3~4 亿km的环绕器,切向误 差为6~8 km;所以环绕器的定位精度优于8 km。对于 环绕器和火星车的相对定位精度:二者使用UHF通信 链路进行相对定位时,径向误差在米级;角度误差约 为2 mrad,考虑环绕器和火星车相距数百千米,切向 误差不超过2 km,所以相对定位精度优于2 km。星历 计算和坐标转换的误差较小,可忽略不计。综上使用 无线电测控对火星车定位时,精度优于10 km。

2.2 基于图像匹配的绝对定位

利用卫星图像作为底图,将工作过程中的正射图 像匹配在底图上可以确定着陆点的位置。美国MER任 务中,用火星车图像产生的正射影像同高分辨率底图 叠加对比来确定火星车的位置,定位精度优于卫星图 像一个像素^[2];在"嫦娥3号"任务中,利用sift特征匹 配、基于地面相对水平假设的仿射变换和图像镶嵌的 方法实现了降落影像序列(近似正射影像)与"嫦娥 2号"获取的月理地形图的精配准,如图1所示,匹配 精度达到底图的亚像素级,实现了月球车初始位置的 精确确定^[6]。

基于图像匹配的定位方法步骤如下:

1)准备底图(底图上含有地理位置信息);

2)获取工作过程中图像,对图像进行预处理,生
 成正射图像(正射图像上含有探测器位置信息);

3)特征匹配,在正射图像和底图上选取相同的特征点,为提高匹配的准确度,常需要人工参与;

4)完成特征匹配后,将正射图像镶嵌在底图上, 利用图上包含的位置信息输出定位结果。



图 1 "嫦娥3号"图像匹配定位示意图 Fig. 1 Image matching of Chang'E-3

图像匹配方法处理数据量大,自动化流程实现困 难,若在器上处理资源消耗大,主要由地面进行操 作。图像匹配可实现底图亚像素级的定位,一般情况 下底图的分辨率在米级,所以图像匹配方法的定位精 度可达米级。

2.3 基于位置圆的绝对定位

无线电测控定位需要环绕器的支持,图像匹配定 位需要地面的支持,均有一定的约束条件,所以有必 要提出一种火星车自主绝对定位方法。

位置圆方法主要是通过测定自然界中的天体位置 求解位置圆方程来确定绝对位置^[7-8],通过合理地配置 敏感器可在火星车上自主完成。

依据火星车上配置的太阳敏感器和惯性测量单 元,可给出基于位置圆的定位方法,如图 2所示,太 阳在火星表面的投影点记为S点,假设火星车在天体表 面的P点。使用太阳敏感器可以得出阳光方向矢量在火 星车本体系的表示,记为r_s;使用惯性测量单元(具体 使用其中的加速度计)可以得出火星表面重力方向矢 量在火星车本体系下的表示,记为r_g;然后可以求出 r_s和r_g的夹角,注意该角为钝角,取其补角记为γ(称 作顶距,阳光方向和重力方向的夹角),则γ的余角即 为P点当地水平面的太阳高度角,记为θ。

某一时刻在天体球面上,存在一个位置圆(以 O点为顶点、以OS为中心、以γ为锥角的圆锥和球面的 交线),其上所有点的当地水平面的太阳高度角为均 为θ,火星车必定位于该位置圆上。特殊情况当 θ=90°时,位置圆缩为1个点,即S点。

火星车在天体表面固定不动时,在2个不同的时刻 进行测量,得到2个不同位置圆,火星车必位于2圆的 交点上(最多有2个解)。数学上3圆相交可以确定唯 一交点,若火星车初始位置完全未知,可以使用3圆相 交法求出位置;在实际工程任务中,火星车的粗略着



图 2 位置圆示意图 Fig. 2 Diagram of position circle

陆位置一般是已知的,所以可以使用2圆相交的方法, 然后根据粗略的位置初值剔除假解。

下面介绍2圆相交法的求解过程。

在时刻 t_1 ,太阳投影点 S_1 在火星表面的经纬度为 (λ_1 , φ_1),该值可由星历计算得出,作为已知量; 同时根据太阳敏感器和加计测量结果计算 γ_1 。

$$\cos \gamma_1 = -\boldsymbol{r}_{s1} \cdot \boldsymbol{r}_{g1}^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

在时刻 t_2 ,太阳投影点 S_2 点在火星表面的经纬度为 (λ_2 , φ_2),该值也可由星历计算得出,作为已知 量;同时根据太阳敏感器和加计测量计算 γ_2 。

$$\cos \gamma_2 = -\boldsymbol{r}_{s2} \cdot \boldsymbol{r}_{g2}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

工程实施时注意时刻 t_1 和时刻 t_2 时间间隔的选取, 以 OS_1 和 OS_2 的夹角等于 γ_1 为宜,若 OS_1 和 OS_2 的夹角大 于 $2\gamma_1$,则2个时刻的位置圆不相交。

假设火星车所在P点的经纬度为(λ_p , φ_p)。在火星固连坐标系下,有

$$\overrightarrow{OP} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_p \cdot \cos \lambda_p \\ \cos \varphi_p \cdot \sin \lambda_p \\ \sin \varphi_p \end{bmatrix}$$
(3)

同理

$$\overrightarrow{OS_1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 \cdot \cos \lambda_1 \\ \cos \varphi_1 \cdot \sin \lambda_1 \\ \sin \varphi_1 \end{bmatrix}$$
(4)

$$\overrightarrow{OS_2} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 \cdot \cos \lambda_2 \\ \cos \varphi_2 \cdot \sin \lambda_2 \\ \sin \varphi_2 \end{bmatrix}$$
(5)

根据几何关系有

$$\overrightarrow{OP} \cdot \overrightarrow{OS}_{1}^{\mathrm{T}} = \cos \gamma_{1}$$

$$\overrightarrow{OP} \cdot \overrightarrow{OS}_{2}^{\mathrm{T}} = \cos \gamma_{2}$$
(6)

将式 (3) ~ (5) 代入式 (6) , 联立方程即可求 得 λ_p 、和 q_n 。

由上面推导过程可以看出,位置圆定位的本质是 2次双矢量定姿,求解的是火星车本体系到火星固连坐 标系的转换矩阵,进而得出火星车在火面的经度和纬 度。计算过程中,星历模型误差可以忽略不计,所以 定位精度的主要影响因素是敏感器测量误差。记太阳 敏感器对阳光矢量的测量误差为 δ_s ,惯性测量单元中 加速度计对重力方向的测量误差为 δ_a ,则绝对定位误 差不超过2($\delta_s+\delta_a$)。依据目前敏感器技术, $\delta_s+\delta_a$ 能 够控制在0.1°,则定位精度不超过0.2°,火星半径取 3 400 km^[9],反映到距离上定位精度约为12 km。

3. 不同绝对定位方法分析与使用选择

基于无线电测控的绝对定位方法较为传统,火星 车上配置测控设备即可实现,无需配置特定的敏感 器,目前主要的研究工作集中在提高定位精度上,初 步分析定位精度优于10 km。对于火星巡视探测任务, 为了支持EDL过程和火星车火星表面工作,环绕器通 常需运行在不同的轨道上。火星车着陆后环绕器首先 进行变轨操作,需要数10 h后才能稳定运行在新轨道 上,若要实现精确测定轨还需要长弧段跟踪观测,在 此之前无法准确进行环绕器和火星车的器间定位,所 以该方法无法满足时效性的要求。

基于图像匹配的绝对定位方法主要由地面遥操作 人员实现,可以实现亚像素级匹配,但存在两个限制 条件:一是需要事先获取着陆区域的底图(含有地理 位置信息),底图的分辨率决定定位精度;二是获取 器上拍摄的图像。对于火星巡视探测任务,火星车着 陆后,受限于通信带宽下传着陆图像可能需要数小时 至数天的时间,所以该方法无法满足时效性的要求; 同时底图数据的获取也存在不确定性。

基于位置圆的绝对定位方法主要由火星车自主实现,其配置的敏感器也可用于车体定姿,最大程度实现了功能复用。火星车着陆后,开启敏感器在数小时内可完成着陆位置的确定。依据敏感器的测量误差,定位精度约为12 km。

三种定位方法的比较详见表1。

综上,从精度角度来说3种定位方法均能满足要 求,同时结合时效性以及使用约束,建议将基于位置 圆的绝对定位作为基本方法,在着陆后首先使用该方 法确定着陆点的经纬度,据此完成后续的火星表面工 作坐标系基准建立、火星车定姿以及天线指向等工 作;后续当环绕器稳定运行后,使用基于无线电测控

Table 1 Compare of three absolute positioning methods					
方法	精度	时效性	使用约束		
无线电测控	优于10 km	数天	环绕器稳定运行,和火星车建立通信链路后才能定位		
图像匹配	底图1个像素(米级)	数天	事先获取着陆区底图;降落图像下传后才能定位		
位置周	約12km (粉小时	_		

表1 三种定位方法比较

的绝对定位方法校验前期的定位结果;由于着陆区底 图数据的获取具有不确定性,所以基于图像匹配的绝 对定位方法作为一种备份手段,后续若获取了高精度 的着陆区地形图,可采取该方法修正前期定位结果, 进一步提高定位定姿精度以及天线指向精度。

结 论 4

针对火星巡视探测任务中的火星车,提出了无线 电测控定位、图像匹配定位、位置圆定位3种定位方 法,针对每种方法的特点和使用约束,确定位置圆定 位为基本方法,无线电测控定位作为校验手段,图像 匹配定位作为修正手段,以满足快速、高精度的定位 需求。对于位置圆定位, 增加测量次数, 对多个结果 进行拟合分析,有可能进一步提高定位精度,后续将 在该方面继续进行研究。

紶 老 文 献

[1] 崔平远,高艾,于正湜.火星着陆自主导航方案研究进展[J]. 深空探 测学报, 2014, 1 (1): 18-27. Cui P Y, Gao A, Yu Z S. Research progress of autonomous navigation

scheme for Mars landing[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1 (1) : 18-27.

[2] 邸凯昌. 勇气号和机遇号火星车定位方法评述[J]. 航天器工程, 2009, 18 (5) : 1-5.

Di K C. A review of spi rit and opportunity rover localization methods[J]. Space Engineering, 2009, 18 (5): 1-5.

[3] 唐歌实,曹建峰,韩松涛,等.基于CE-3的无线电测月研究[J].深 空探测学报, 2014, 1 (3): 236-240.

Tang G S, Cao J F, Han S T, et al. Research on lunar radio measurement on Chang'e-3[J]. Journal of Deep Space Exploration,

2014, 1 (3) : 236-240.

- [4] 曹建峰, 胡松杰, 张宇, 等. 嫦娥三号着陆器统计定位精度分析[J]. 飞行器测控学报,2014,33(3):244-249. Cao J F, Hu S J, Zhang Y, et al. Analysis of the accuracy Chang'e-3 of statistical positioning for lunar lander[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2014, 33 (3) : 244-249. [5] 李雪,徐勇,王策,利用月面链路的月球车定位体制[J].北京航空航
- 天大学学报, 2008, 34 (2): 183-187. Li X, Xu Y, Wang C. Position of rover by UHF communication link on lunar surface[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34 (2) : 183-187.
- [6] 贾阳,张建利,李群智,等. 嫦娥三号巡视器遥操作系统设计与实 现[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, (44): 470-482. Jia Y, Zhang J L, Li Q Z, et al. Design and realization for teleoperation system of the Chang'E-3 rover[J]. Sci Sin Tech, 2014 (44) : 470-482
- [7] 宁晓琳,房建成.一种基于UPF的月球车自主天文导航方法[J]. 宇航 学报, 2006, 27 (4): 648-653, 663. Ning X L, Fang J C. A new method of autonomous celestial navigation for lunar rover and analysis of precision[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27 (4) : 648-653, 663.
- [8] 李建国. 月球车位姿确定技术研究[D]. 北京:北京工业大学, 2007. Li J G. Study on localization & pose determination of lunar rover[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [9] 欧阳自远,肖福根.火星及其环境[J]. 航天器环境工程,2012, 29 (6) : 591-601.

Ouyang Z Y, Xiao F G. The Mars and its environment[J]. Spacecraft Environment engineering, 2012, 29 (6) : 591-601.

作者简介: **彭松**(1986-),男,工程师,主要研究方向:深空探测器总体技 术,系统设计、仿真和试验。 通信地址:北京市5142信箱373分箱(100094) 电话: (010) 68745775 E-mail: pengsong20@163.com

Selection of Absolute Positioning Methods for Mars Rover

PENG Song, JIA Yang, CHEN Baichao

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: According to Mars moving detection mission, three absolute positioning methods for Mars rover are proposed: wireless TT&C, image matching, position circling. For the wireless TT&C positioning, the orbit determination is first done, then the rover position relative to the orbit is determined by wireless communicating between two detectors, at last the absolute position of the rover is calculated. For the image matching positioning, the absolute position of the rover is calculated by matching the images during the landing process to the map of the landing zone with geographic information. For the position circling, the orientation of the sun and Mars gravity is measured by sensors at discrete moments, then with these measured results and ephemeris the absolute position of the rover is calculated. The three methods are analyzed and compared, and using advice is given according to factors such as precision, constraints, etc. To get the rover absolute position rapidly and accurately, position circling acts as the primary method to get the position, wireless TT&C method verifies the position, and image matching method revises the position.

Key words: Mars rover; absolute positioning; wireless TT&C; image matching; position circling

[责任编辑:杨晓燕]

(上接第133页)

Analysis on Physical and Mechanical Properties of Martian Soil

DANG Zhaolong, CHEN Baichao

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Martian soil is one of the major factors in the Mars surface exploration which have to be considered during the development of Martian probes. The physical and mechanical properties of Martian soil influence directly the design of landing-pad of Martian lander and the wheels of Martian rover. During the field tests of Martian probes, the proving ground for Martian surface environments must be simulated. The exploration results about the Martian soil and its simulant are analyzed in this paper. The ranges of parameters for physical and mechanical properties of Martian soil are summarized. The results can be used for the development of China's Martian probes.

Key words: Martian soil; physical properties; mechanical properties; Martian soil simulant

[责任编辑: 宋宏]