DOI：10.13973/j.cnki.robot.210258

火星车沉陷机理与脱困策略研究

潘 冬[1]，陈 朕[2]，袁宝峰[1]，王 瑞[1]，陈百超[1]，邹 猛[2]

（1. 北京空间飞行器总体设计部，北京 100094； 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室，吉林 长春 130022）

摘 要：以“祝融号”火星车为研究对象，基于车辆地面力学理论分析了火星车发生沉陷的机理，基于滑转率、电流、沉陷深度等给出沉陷判别方法，制定了不同条件下“祝融号”火星车的沉陷判别准则及脱困策略。验证试验结果表明：临界沉陷时滑转率为 61.25%、驱动电流为 1.90 A，达到沉陷临界值后“祝融号”火星车将无法直接驶离，而“祝融号”火星车主动悬架的蠕动是实现脱困的有效方法。研究成果可为“祝融号”火星车在轨使用策略提供试验数据和参考。

关键词：火星车；车轮；沉陷；脱困方法

中图分类号：V423.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1002-0446(2022)-01-0002-07

Sinkage Mechanism and Extrication Strategy of Mars Rover

PAN Dong[1]，CHEN Zhen[2]，YUAN Baofeng[1]，WANG Rui[1]，CHEN Baichao[1]，ZOU Meng[2]

(1. *Institute of Spacecraft System Engineering*, *CAST*, *Beijing* 100094, *China*;
2. *Key Lab for Bionics Engineering of Education Ministry*, *Jilin University*, *Changchun* 130022, *China*)

Abstract: Taking ZhuRong Mars rover as the research object, the sinkage mechanism of the Mars rover is analyzed based on the theory of vehicle terrainmechanism, and a sinkage determination method is presented based on the slippage ratio, current, sinkage depth and so on. The sinkage determination criteria in different conditions are formulated and the corresponding extrication strategies are proposed for ZhuRong Mars rover. The verification test results show that the slippage ratio is 61.25% and the driving current is 1.9 A in the case of critical sinkage. The rover can't drive away directly when reaching the critical sinkage value, but ZhuRong Mars rover can effectively extricate itself through peristalsis of its active suspension. The research results can provide test data and reference for the in-orbit usage strategy of ZhuRong Mars rover.

Keywords: Mars rover; wheel; sinkage; extrication method

1 引言（Introduction）

21 世纪是人类全面开展深空探测和开发的新时代，火星与地球的构造、环境具有相似性，更是成为世界各国探测的重点[1-3]。2020 年是火星探测的超级年，阿联酋发射“希望号”火星探测器并成功实现环火探测；美国国家航空航天局（NASA）发射“毅力号”火星探测器实现火星表面巡视探测[4-5]；中国发射的“天问一号”火星探测器也已成功实现火星环绕和着陆，目前“祝融号”火星车已成功驶离着陆平台至火星表面，并开展了火星表面巡视探测。

迄今为止，成功实现火星表面巡视探测的火星车有美国的“索杰纳”“勇气号”“机遇号”“好奇号”“毅力号”以及刚刚登陆火星的中国“祝融号”。由于火星表面部分区域土壤松软，且部分区域环境较为恶劣，因此火星车在执行火星探测任务的过程中，其不确定性较高[6]。其中，“勇气号”多次在松软地面上出现沉陷过大的情况，且脱困难度大，只能采用车轮前后移动以及转向辅助的方式进行脱困，耗时过长。“机遇号”在 2006 年 5 月探测过程中，后轮陷入了松散的火星表面土壤中，其移动能力下降了 95% 左右，导致其不能正常行驶[7]。因此，火星车沉陷机理以及脱困策略已经成为现如今火星车移动系统研制中的关键技术之一[8]。

部分学者通过仿真分析的方法来模拟火星表面可能出现的异常情况。其中，Iagnemma[9] 通过多刚体动力学软件模拟了火星车在火星表面松软环境下的运动情况，开发了一种将遥测技术与轨道卫星观测数据相结合的技术，该技术可用于预测火星车在火星表面开阔区域的行驶路径。此外，该方

基金项目：国家自然科学基金（51775233，52075217）；TW 火星探测专项（5010120200656）；吉林大学研究生创新基金（101832020CX163）.
通信作者：邹猛，zoumeng@jlu.edu.cn 收稿/录用/修回：2021-06-15/2021-10-11/2021-10-13

法可协助工程师制定火星车相关在轨运行策略，同时该结果也被应用到“勇气号”火星车的在轨运行当中。Johnson 等[10] 通过离散元方法研究了高滑转情况下火星车沉陷以及挂钩牵引力的情况，可对火星车路径规划起到指导作用。NASA 通过火星车试验对滑转率进行了标定，并对滑转率阈值进行了定义，但在火星车实际工作当中，滑转率情况难以进行实时测量[11]。

本文以“祝融号”火星车为研究对象，通过理论分析与试验验证相结合的方式对火星车沉陷机理、沉陷判别准则以及沉陷后脱困策略展开研究，可为“祝融号”火星车在轨使用提供参考。

2　沉陷机理分析与判别准则（Mechanism analysis and determination criterion of sinkage）

2.1　火星车移动系统简介

“祝融号”火星车采用六轮驱动主副摇臂悬架形式，且为主动悬架形式，相较被动悬架增加夹角调整机构和离合器机构，如图 1 所示。移动系统机构主要包括 6 套车轮驱动机构、6 套车轮转向机构、2 套夹角调整机构、2 套离合器机构和 1 套差动机构，以及由 2 套主摇臂、2 套副摇臂、6 套转向臂组成的悬架结构。移动系统的 17 套机构中除差动机构为被动机构外，其余 16 套机构均为主动机构。

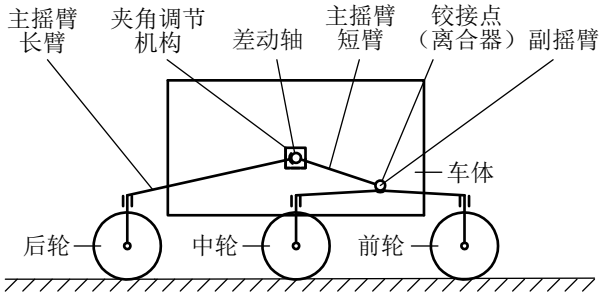


图 1　主动悬架简图

Fig.1　Diagram of the active suspension

“祝融号”火星车由于使用主动悬架的形式，因此与传统火星车相比具有一些优势。首先，其车厢高度可调，可在运输过程中收紧车体，节省一定空间；在着陆后可将车体升回指定位置，继而进行正常探测。其次，该种设计增加了一种特殊的行走方式（蠕动行走），为“祝融号”火星车移动策略提供了新选择；第三，祝融号可通过改变其质心位置，减小轮压，从而使其可以更好地面对异常路况；同时，主动悬架可在“祝融号”6 个轮子的某一轮发生故障时，单独将该轮抬起，其余车轮正常行驶，继续完成火星探测任务。

2.2　沉陷机理分析

火星车车轮是火星车直接与火壤接触的部分。研究火星车沉陷机理，首先要对车轮与火壤间的相互作用进行分析。正常行驶时，其轮/壤作用关系如图 2 所示，其中：$\boldsymbol{v}$ 代表火星车前进方向，$\boldsymbol{T}$ 代表车轮所受扭矩及扭矩方向，W 为车轮所受纵向载荷，F_{P} 为车轮所受水平向后作用力，D 为车轮直径，h_{gr} 为轮刺高度，z 为车轮沉陷深度。

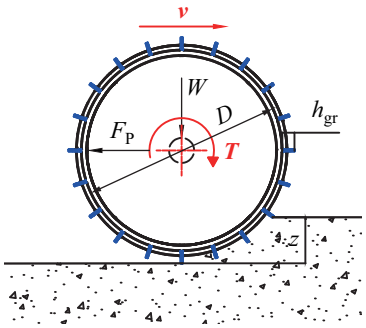


图 2　火星车车轮运动情况

Fig.2　Wheel movement of Mars rover

当火星车正常行驶时，其沉陷深度应小于火星车设计时所规定的临界沉陷量，图 2 所示即为火星车正常行驶时的车轮沉陷情况。当其沉陷量大于火星车设计时所规定的临界沉陷量时，可认为火星车出现沉陷异常的状况，如图 3 所示。

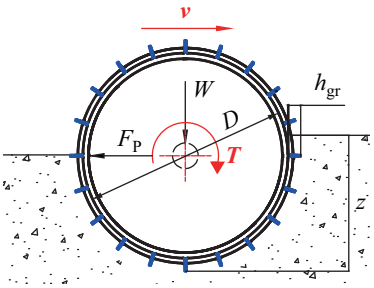


图 3　火星车车轮沉陷异常

Fig.3　Abnormal sinkage of Mars rover wheels

火星车的异常沉陷主要由两部分组成，一部分是车轮所受纵向载荷 W 产生的静态沉陷 z_0，产生的原因主要是 W 造成的土壤压实变形。静态沉陷的表达式为

$$z_0=\left[\frac{3W}{b\left(k_{\mathrm{c}}/b+k_{\psi}\right)\sqrt{D}(3-n)}\right]^{\frac{2}{2n+1}} \tag{1}$$

其中 W 为车轮所受纵向载荷（N），b 为车轮宽度（mm），k_{c} 为土壤内聚模量（kN/m^{n+1}），k_{ψ} 为土壤摩擦模量（kN/m^{n+2}），D 为车轮直径（mm），n 为

土壤变形系数。由式 (1) 可知，影响静态沉陷的主要因素为火星车自重、模拟火壤本身性质以及车轮尺寸。松软火壤及密实火壤的力学参数值见表 1。

表 1 不同类型土壤力学参数值

Tab.1 Mechanical parameter values of different types of soil

土壤类型	k_c /(kN/m^{n+1})	k_ψ /(kN/m^{n+2})	n
松软火壤	1.4	700	0.8
密实火壤	0.99	1528	0.75

由表 1 可知，密实火壤的摩擦模量 k_ψ 以及土壤变形系数 n 大于松软火壤。同时根据式 (1) 可知，火星车在松软火壤上行驶时的静态沉陷量大于在密实火壤上行驶时的沉陷量[12-13]。

根据表 1 中数据、式 (1) 以及“祝融号”火星车车轮及载荷参数可知，在不同土壤状态下其静态沉陷情况如表 2 所示。

表 2 不同土壤环境下“祝融号”火星车的静态沉陷量

Tab.2 Static sinkage of ZhuRong Mars rover in different soil environments

土壤类型	静态沉陷量 z_0 /mm
松软火壤	10.39
密实火壤	4.60

除静态沉陷外，另一部分沉陷是由于火星车在火星表面行驶时，火星车车轮对模拟火壤具有一定的切削作用从而产生的车轮滑转沉陷 z_s。其表达式为[12,14-15]

$$z_s = \frac{h_{gr} \times s}{1 - s} \tag{2}$$

其中 h_{gr} 为火星车轮刺高度（mm），s 为火星车滑转率。由式 (2) 可知，影响滑转沉陷的因素为火星车轮刺高度以及车轮滑转率。当火星车行驶在火星表面时，滑转沉陷会随着滑转率的增大而增大。其中火星车车轮外径为 300 mm，车轮宽度为 200 mm，轮刺高度为 5 mm。

综上可得火星车在松软环境下总沉陷如下：

$$z = z_0 + z_s \tag{3}$$

另外，可从轮/壤作用关系的角度来分析产生沉陷的原因。由图 4(a) 可知，对于火星车来说，当其匀速正常行驶时，轮部纵向载荷 W 与火壤对其施加的竖直方向的力相平衡，而这部分力主要由正应力 σ 提供。轮部扭矩 T 使车轮旋转，从而产生火壤对车轮的推力，该推力由火壤切应力 τ 提供。

根据 Bekker 和 Janosi 等的地面力学理论[16-17]可知，当土壤种类一定时，正应力和切应力随着沉陷深度的增加而逐渐增大。因此，当火星车行驶在松软火壤表面时，为了平衡车轮所受纵向载荷，火星车沉陷深度会大大增加，如图 4(b) 所示。同时，当沉陷过大时火星车所受切向阻力也随之增大，因此火星车车轮上所施加的扭矩 T 也需要增大才可使其正常行驶，当其所需扭矩大于火星车的最大设计扭矩时，火星车无法正常运动。故可以看出，火星表面土壤的松软程度是造成火星车出现沉陷异常从而无法正常行驶的原因之一。

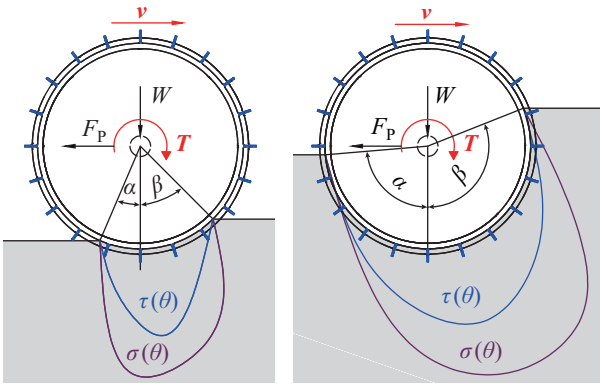


图 4 火星车车轮受力

Fig.4 Forces on the wheels of Mars rover

2.3 沉陷判别准则

由上文分析可知，当火星车行驶在火星表面时，由于各种原因，其车轮可能出现不同的沉陷情况。“祝融号”火星车的轮部接地压强临界值设计为 5 kPa。其压强计算公式为

$$p = \frac{F}{S} \tag{4}$$

其中 p 为轮部压强（kPa），F 为轮部载荷（kN），S 为轮/壤接触截面积（m^2）。

根据式 (4) 以及车轮尺寸计算可知，当接地压强为 5 kPa 时，其车轮沉陷深度为 20.15 mm。综上可知“祝融号”火星车的临界沉陷量设计为 20.15 mm。在此，对不同沉陷情况加以定义，如表 3 所示。

表 3 沉陷种类及判定方法

Tab.3 Types of sinkage and its determination methods

沉陷种类	判断依据
普通沉陷	$z < 20.15$ mm
临界沉陷	$z = 20.15$ mm
极端沉陷	$z > 20.15$ mm

普通沉陷对“祝融号”火星车正常巡视不会造成过大影响；当沉陷量达到临界沉陷值时，则认定“祝融号”火星车达到沉陷临界点；超出该点则进

入极端沉陷状态，“祝融号”火星车需通过更改运动方式进行脱困。

由表 2 中数据、临界沉陷量以及式 (3) 可知，“祝融号”火星车在松软火壤环境下的最大滑转沉陷 z_s 为 9.76 mm，在密实火壤环境下的最大滑转沉陷 z_s 为 15.55 mm。为了“祝融号”火星车行驶安全性考虑，这里选择滑转沉陷 z_s 为 9.76 mm 作为滑转沉陷临界值。

由于静态沉陷为定值，因此判别“祝融号”火星车是否超过临界沉陷量的主要判据为其滑转沉陷量。由式 (3) 可知，对于“祝融号”火星车来说，当其滑转沉陷量大于 9.76 mm 时，总的沉陷量大于所设计的临界沉陷量 20.15 mm，可判断此时“祝融号”火星车沉陷量大于临界沉陷量。此外，由式 (2) 可知火星车滑转沉陷量主要与火星车在行驶时的车轮滑转率有关，将滑转沉陷临界值以及“祝融号”火星车轮刺高度代入式 (2) 可知，当滑转率大于 66.1% 时，其滑转沉陷值大于 9.76 mm，总沉陷大于“祝融号”火星车临界沉陷值。此时，可判断“祝融号”火星车陷入极端沉陷情况。

2.4　沉陷判别依据

滑转率的大小可以作为判断“祝融号”火星车是否出现极端沉陷的重要判定依据。通过上文的理论分析可知，当行驶过程中滑转率大于 66.1% 时，则可认为滑转沉陷大于 9.76 mm，总沉陷量大于 20.15 mm。此时，沉陷状态为极端沉陷，超出火星车设计范围，需更改运动方式。

但对于火星车来说，由于其信号传输时间较长，若通过这种方式进行测量，则易出现火星车极端沉陷值过大、无法脱困的情况。因而需要提出与滑转率相关的判断方式，使其可以更快作出判断。

在此，提出另一种运动异常状态判断方式，即通过驱动电流进行判别。当火星车陷入不同深度的火壤时，其前进所需驱动电流会随着下陷深度的变化而产生一定的变化。故可通过监测不同下陷深度下驱动电流的峰值，对其下陷深度进行判断。当驱动电流超过相应沉陷条件的峰值时，则可认为“祝融号”火星车出现沉陷量大于临界沉陷的情况，需更改运动方式。

2.5　脱困策略分析

对于“祝融号”火星车来说，其脱困方法主要有 2 种。第 1 种方法通过增大驱动电流来增大轮部驱动力，从而克服由于沉陷等情况所产生的阻力。但当滑转率过大时，单纯增加驱动能力也无法实现脱困。

第 2 种方法通过改变运动方式进行脱困，主要指将正常轮式行驶方式改为蠕动式行驶进行脱困。其运动方式示意图如图 5 所示。

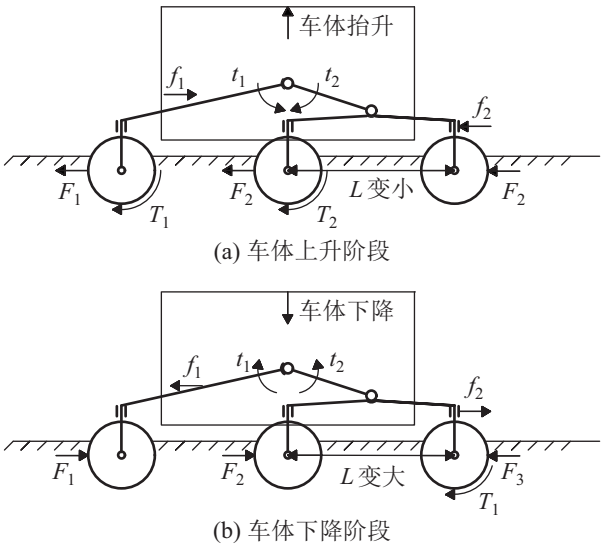


图 5　蠕动行驶示意图

Fig.5　Schematic diagram of peristaltic driving

在进行蠕动脱困时，其运动过程分为车体抬升以及车体下降 2 个阶段。在车体抬升阶段，火星车通过主副摇臂主动向上运动，使车前轮与中后轮轮间距变小，其中中轮和后轮通过电机驱动同步向前转动，前轮锁死不动。在车体下降阶段，火星车主副摇臂主动运动，导致火星车车体向下运动，此时中后轮锁死不动，前轮通过电机驱动向前转动，导致前轮与中后轮的轮间距变大。当中轮以及后轮锁死时，车轮受力 F_1、F_2 的方向与火星车运动方向相同，从而可以保证当摇臂向下运动时火星车不会出现后滑现象；同时，在前轮以及夹角调整机构同步运动过程中产生 f_2 力及车轮驱动力，用以克服车轮所受阻力 F_3，从而使火星车脱困。该种方式相对于传统运动方式来说，主要通过摇臂所施加的推动力来提供车轮向前行驶的驱动力，所需驱动电流较小。但使用该种方法运动时，火星车前进速度较慢。

3　试验验证（Experimental verification）

3.1　试验环境

为了验证“祝融号”火星车沉陷机理与其脱困策略，进行了火星车沉陷及脱困试验。为了模拟火星表面的环境，在土槽中铺设模拟火壤。其中松软火壤为火星表面的飘浮物和沉积沙丘，该部分为火壤最松软状态，强度最小，粒径最细，是火星车最难通过的松软路面。因此，依据飘浮物火壤的参

数，确定细粒径的中值粒径为 40 μm，内聚强度为 0.5 kPa，内摩擦角为 18°，承压参数如表 1 所示。

密实火壤中值粒径为 200 μm，该中值粒径为火壤的平均值，能代表火星上大部分的松软沙地，其力学参数强于浮沙；内摩擦角（35°）和内聚强度（0.24 kPa）采用火壤的平均值，承压参数如表 1 所示。

被试车为“祝融号”火星车初样鉴定件，其系统质量为 90 kg。其结构增加主动悬架，使其具有蠕动脱困模式，蠕动模式是轮步复合式运动模式，可有效解决大滑转率情况下轮式移动无法通过的问题。试验环境及试验车如图 6 所示。



图 6 试验环境及火星车系统

Fig.6 Experimental environment and Mars rover

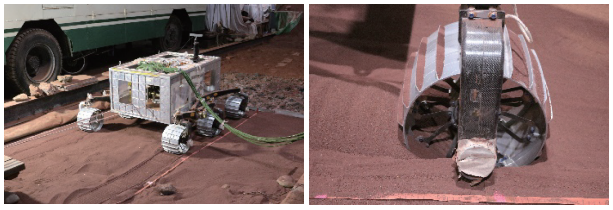
3.2 试验方法

在试验过程中，通过在“祝融号”火星车后施加一定的挂钩牵引力来使火星车在行驶过程中出现沉陷，通过改变挂钩牵引力数值来改变火星车沉陷量。首先，通过直接行驶的方式前进，当沉陷小于 15 mm 时则认定其脱困成功。若沉陷不变或沉陷继续增加则认定脱困失败。当直接行驶脱困失败时，则采用蠕动方式进行脱困，观察能否脱困成功。在试验过程中，记录火星车滑转率、沉陷深度、电流等数据。

4 结果与分析（Results and analysis）

4.1 不同沉陷深度下脱困方式分析

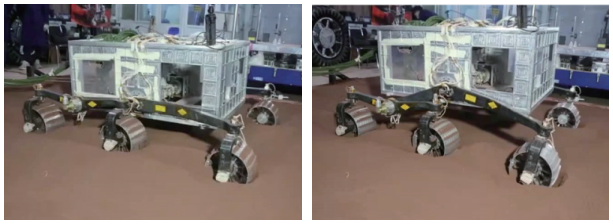
为研究沉陷深度对脱困方式的影响，对车轮在不同沉陷深度情况下进行了试验，试验过程如图 7 所示。图 8 所示为沉陷深度为 20 mm 时，脱困前后的对比图。试验时，对不同沉陷深度下火星车脱困时间进行记录，得到不同沉陷情况下的脱困所需时间，如表 4 所示。



(a) 整车情况 (b) 火星车沉陷情况

图 7 试验过程

Fig.7 Experimental procedure



(a) 沉陷 (b) 蠕动

图 8 沉陷及蠕动行驶

Fig.8 Sinkage and peristaltic driving

表 4 火星车不同脱困方式所需时间

Tab.4 Time required for Mars rover extrication in different manners

沉陷量 /mm	直接脱困			蠕动脱困		
	时间 /s	脱困前进距离 /mm	脱困速度 /(mm/s)	时间 /s	脱困前进距离 /mm	脱困速度 /(mm/s)
13	119	610	5.13	364	186	0.51
14	132	590	4.47	540	250	0.46
15	105	382	3.62	720	280	0.39
21	脱困失败			480	140	0.29
23	脱困失败			540	130	0.24
28	脱困失败			1080	180	0.17
30	脱困失败			780	130	0.16

由表 4 可知，普通沉陷情况下，直接方式与蠕动方式均可使火星车成功脱困。其中直接方式脱困所需的时间远小于蠕动方式。同时发现，随着沉陷深度的增加，直接方式的脱困速度逐渐降低，这是由于随着沉陷深度的增加，火星车所受火壤阻力增大，导致其脱困速度降低。当沉陷量大于临界沉陷

量时，使用直接方式无法使火星车成功脱困。通过分析发现，此时车轮所提供的驱动力无法克服火壤对车轮所施加的阻力，若继续增大驱动力则可能导致驱动电机烧毁，因此需改变运动方式进行脱困。由表 4 可知，选用蠕动方式可使火星车在沉陷过大的情况下顺利脱困。此外，与直接脱困大体相同，随着沉陷深度的增加，其脱困效率也逐渐降低。

4.2　沉陷异常判据分析

4.2.1　滑转率判据

在试验过程中分别记录不同沉陷深度条件下火星车在运动过程中的滑转率，绘制沉陷深度与滑转率之间的关系，如图 9 所示。

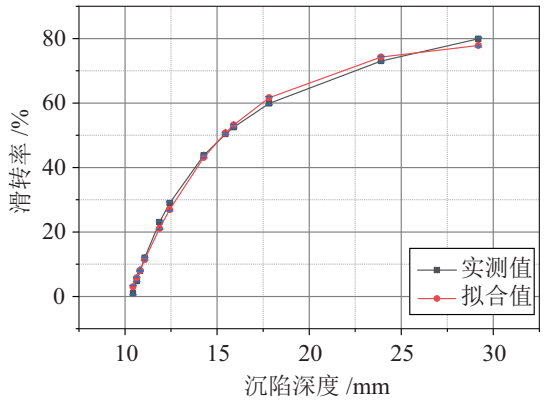


图 9　沉陷深度与滑转率关系

Fig.9　Relationship between sinkage depth and slippage ratio

由图 9，随着沉陷深度的增加，滑转率逐渐增大，且沉陷深度与滑转率呈现一定的函数关系。通过曲线拟合，可得沉陷深度与滑转率的关系：

$$s = 88.86 - \frac{722.99}{\sqrt{2\pi}z}\mathrm{e}^{\frac{\ln^2\frac{z}{6.4}}{2}} \tag{5}$$

其中 s 为火星车滑转率（%），z 为火星车沉陷量（mm）。经数据分析可知，实测值与拟合值最大误差为 8.9%，属于正常误差范围，试验过程中所产生的误差并未对试验结果产生明显影响。当沉陷深度为 20.21 mm 时，滑转率为 61.25%，与上文中理论分析值接近。此时，实际值与拟合值误差为 3%，证明试验受非线性误差影响小，试验结果可靠性较高。因此，当滑转率大于 61.25% 时，可认为“祝融号”火星车在运动过程中出现极端沉陷情况。

4.2.2　电流判据

在试验过程中分别记录不同下陷深度条件下火星车运动过程中的峰值电流情况，绘制下陷深度与电流之间的关系图，如图 10 所示。

由图 10 可知，随着下陷深度的增加，“祝融号”火星车前进所需驱动电流也逐渐增大，且二者呈现一定的函数关系。通过曲线拟合可得驱动电流峰值与火星车沉陷深度之间的关系式：

$$I = 2.1 - \frac{28.57}{z}\mathrm{e}^{\ln^2\frac{z}{10.5}} \tag{6}$$

其中 z 为火星车沉陷量（mm），I 为驱动电流峰值（A）。经过数据分析可知，实测值与拟合值的误差最大为 3.9%，在正常误差范围内，说明试验造成的非线性误差对试验结果影响较小。对应上文中沉陷判定依据可知，当火星车达到临界沉陷值时，驱动电流峰值为 1.9 A，此时拟合值与实测值误差为 2%，在正常范围内，证明试验结果较为准确，受非线性误差影响较小。因此，当驱动电流的峰值大于 1.9 A 时，可认为火星车陷入极端沉陷情况，需更换运动方式进行脱困。

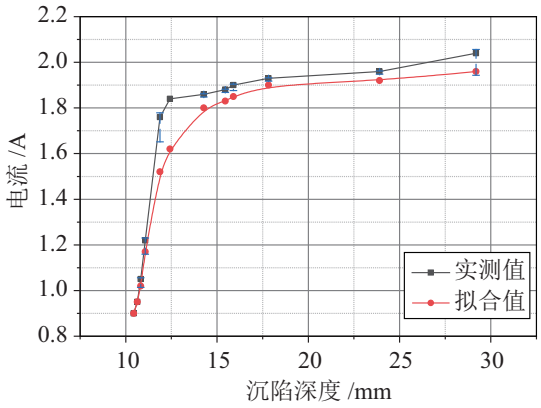


图 10　下陷深度与电流关系

Fig.10　Relationship between sinkage depth and current

4.3　火星车沉陷及脱困判别准则

通过上文试验以及分析可制定“祝融号”火星车沉陷的判别标准。当火星车达到临界沉陷量 20.15 mm 时，则认为其无法正常前进。

基于试验结果，由拟合公式 (5)(6) 可知，当“祝融号”火星车陷入极端沉陷情况时，对应的临界滑转率以及峰值电流分别大于 61.25% 和 1.9 A。

综上所述，可给出“祝融号”火星车脱困策略：在其行驶过程中，下陷深度、滑转率和峰值电流任一指标超过表 5 中所列阈值时，需采用蠕动方式使其继续前进；当全部指标小于阈值且下陷深度小于 15 mm 时，可认定火星车脱离极端沉陷状态，可采用正常行驶方式前进。

另外，“祝融号”火星车的一个蠕动行驶周期为 140 s，前进距离为 318 mm。以此作为参考标准，当行驶时间为 140 s 且前进距离小于 318 mm 时，可认为火星车出现极端沉陷情况，需要采取蠕动方式脱困。此外，为了火星车安全性考虑，当上述条件

同时发生时，即在表 6 中序号 5 情况下，火星车不宜继续前进，应选择后退或转向。

表 5 火星车极端沉陷临界判别准则

Tab.5 Critical criteria for judging the extreme sinkage of Mars rover

下陷深度/mm	滑转率/%	峰值电流/A	运动方式
< 20.15	< 61.25	< 1.90	直接前进/蠕动前进
$\geqslant 20.15$	$\geqslant 61.25$	$\geqslant 1.90$	蠕动前进

表 6 火星车一般沉陷脱困判别准则

Tab.6 Criteria for judging the general sinkage and extrication of Mars rover

序号	滑转率/%	时间/s	平均电流/A	对应措施
1	$s < 61.25\%$	$t < 140$	$I < 1.90$	直接行驶
2	$s < 61.25\%$	$t < 140$	$I \geqslant 1.90$	直接行驶
3	$s \geqslant 61.25\%$	$t \geqslant 140$	$I < 1.90$	蠕动行驶
4	$s \geqslant 61.25\%$	$t < 140$	$I \geqslant 1.90$	蠕动行驶
5	$s \geqslant 61.25\%$	$t \geqslant 140$	$I \geqslant 1.90$	后退或转向

5 结论（Conclusion）

1) 火星车在松软模拟火壤上产生的沉陷主要包括其自身载荷所产生的静态沉陷以及运动过程中滑转引起的滑转沉陷两部分。

2) 根据沉陷量的大小，可将火星车运行过程中所产生的沉陷分为普通沉陷、临界沉陷、极端沉陷 3 类。对于“祝融号”火星车，普通沉陷的沉陷量小于 20.15 mm，临界沉陷的沉陷量为 20.15 mm，极端沉陷的沉陷量大于 20.15 mm。

3) 通过试验验证理论分析的准确性，得出了具体判别准则。当沉陷深度超过临界沉陷、滑转率大于 61.25%、临界电流值大于 1.90 A 以及行驶 318 mm 时间大于 140 s 等 4 种情况发生任意一种时，应采取蠕动方式进行脱困。此外，为了保证“祝融号”火星车行驶安全，当上述条件同时发生时，应使“祝融号”火星车后退或转向。

参考文献（References）

[1] Poo M M. Mars exploration on the move[J]. National Science Review, 2020, 7(9): 1413.

[2] Biswal M M K, Das N B, Annavarapu R N. Orbital and planetary challenges for human Mars exploration[DB/OL]. (2021-01-12) [2021-06-01]. https://arxiv.org/abs/2101.04725.

[3] Chen Y S, Han J J, Fan Y, et al. Overview of the latest scientific results of China's lunar exploration program[J]. Chinese Journal of Space Science, 2020, 40(5): 626-642.

[4] 司马光. 灵活高效的玉兔号月球车[J]. 国际太空, 2013(12): 15-19.
Sima G. The flexible and efficient YuTu lunar rover[J]. International Space, 2013(12): 15-19.

[5] Sebastián E, Martínez G, Ramos M, et al. Thermal calibration of the MEDA-TIRS radiometer onboard NASA's Perseverance rover[J]. Acta Astronautica, 2021, 182: 144-159.

[6] 王琼，贾阳，陶灼，等. 火星移动智能体技术探讨[J]. 航天器工程，2015，24(4)：27-32.
Wang Q, Jia Y, Tao Z, et al. Discuss on Mars mobile agent technologies[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(4): 27-32.

[7] Ding L, Deng Z Q, Gao H B, et al. Planetary rovers' wheel-soil interaction mechanics: New challenges and applications for wheeled mobile robots[J]. Intelligent Service Robotics, 2011, 4(1): 17-38.

[8] 黄晗，李建桥，陈百超，等. 滑转条件下星球车坡面通过性评估试验[J]. 农业工程学报，2016，32(16)：40-44.
Huang H, Li J Q, Chen B C, et al. Experiment of slope trafficability assessment of planetary rover under slip condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(16): 40-44.

[9] Iagnemma K, Senatore C, Trease B P. Terramechanics modeling of Mars surface exploration rovers for simulation and parameter estimation[C]//ASME International Design Engineering Technical Conferences. New York, USA: ASME, 2011: 805-812.

[10] Johnson J B, Kulchitsky A V, Duvoy P, et al. Discrete element method simulations of Mars Exploration Rover wheel performance[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 62: 31-40.

[11] Heverly M, Matthews J, Lin J, et al. Traverse performance characterization for the Mars Science Laboratory rover[J]. Journal of Field Robotics, 2013, 30(6): 835-846.

[12] Meirion-Griffith G, Spenko M. A modified pressure-sinkage model for small, rigid wheels on deformable terrains[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(2): 149-155.

[13] Lyasko M. Slip sinkage effect in soil-vehicle mechanics[J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(1): 21-31.

[14] Huang H, Xu S C, Meng Z, et al. The sinkage characteristics and prediction of a planetary rover based on a similarity model experiment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(10): 3762-3774.

[15] Richter L, Ellery A, Gao Y, et al. A predictive wheel-soil interaction model for planetary rovers validated in testbeds and against MER Mars rover performance data[C]//European Planetary Science Congress. 2006.

[16] Bekker M G. Theory of land locomotion[M]. Ann Arbor, USA: University of Michigan Press, 1956.

[17] Wong J Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering: Terrain behaviour, off-road vehicle performance and design[M]. 2nd ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2009.

作者简介：

潘 冬（1984 –），男，博士，高级工程师。研究领域：空间机器人动力学与控制。

陈 朕（1996 –），男，博士生。研究领域：深空探测地面力学。