



星球车行走系统

Planetary rover locomotion system

■ 李春明 苏波 江磊 等编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

星球车行走系统

李春明 苏波 江磊 等编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

星球车是星球探测活动中十分重要的探测工具,其行走系统是决定星球车能否在未知环境下可靠行走的关键系统之一。本书的主要内容包括:土壤特性及外星球土壤模拟、星球车与土壤的相互作用、星球车的行走方式、星球车行走系统运动学、星球车行走的控制、星球车行走性能评估、缩比模型的低重力试验。本书是作者及其研究团队将嫦娥工程月面巡视探测器研究工作中的基础理论、试验研究及试验数据总结而成的。

本书可供高等院校车辆工程专业学生及从事星球车、机器人等研究的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

星球车行走系统/李春明等编著. —北京:国防工业出版社,2015.6

ISBN 978-7-118-09862-4

I. ①星... II. ①李... III. ①航天探测器—基本知识 IV. ①V476.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 115030 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 9¼ 字数 162 千字

2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 60.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前言

探索遥远的星球和在未知的环境中自由漫步是一个充满了神奇和冒险的科技梦想。

在星球探测中,星球车是主要的移动探测工具,已有的经验和理论表明:星球车和地面车辆在行走技术上既存在相似关系,又有其特殊的一面。

星球车所处的环境可能是一个未知或不完全可知的危险环境,既有岩石,又有坑洼,地形崎岖不平,而且也可能是松软地形。在这种环境下行走,环境的复杂性给星球车的牵引—附着性能和可通过性能带来不利影响,星球车可能发生滑移、侧翻和沉陷,使得其无法完成预定任务,甚至造成损坏。

迄今,美国、俄罗斯和中国都已成功研制了星球车。本书的编著者们有幸参与了中国嫦娥工程“玉兔号”月球车行走系统的研制工作,期间开展了大量基础理论和试验研究,积累了一批数据。本书旨在从这些基础理论和数据出发,尝试对星球车行走技术进行系统的研究,对行走系统关注轮—壤作用、行走构型、行走控制、行走试验和性能评估等问题进行分析,以期为研究人员开展新型星球车行走系统研究提供帮助。

本书通过集体合作完成,李春明、苏波、江磊作为本书的主编著者,对全书的结构和重点进行了综合考虑,参加本书编著的作者有:

第1章 李春明、苏波;

第2章 江磊、刘兴杰;

第3章 江磊、蒋云峰、刘兴杰、卢国轩;

第4章 苏波、江磊、卢玉传、蔡文斌;

第5章 冯石柱、姚其昌、毛宁;

第6章 苏波、何亚丽、许大浦、蓝伟、杨树岭;

第7章 李春明、苏波、卢玉传;

第8章 李春明、江磊。

车辆地面力学专家张克健教授审阅了书稿,并提出了宝贵建议。

中国北方车辆研究所月球车团队的张振宇、韩宇石、龙振新、尹顺良、施睿、段国柱、魏来生、赵洪雷、兰小平、罗建勤、房加志、王军、焦娜、师雪、王志刚、王珊等为本书的编写提供了技术帮助,书中引用了他们的研究成果,大量试验也是在

以上人员的参与下完成的。

航天五院的贾阳总师、航天八院的张玉花副总师和他们带领的团队对相关研究工作给予了重要的指导和帮助,本书间接引用了他们的成果。

石家庄北方建筑勘察院王长克、贾文华等从 2009 年开始与项目团队一起开展模拟月壤的研究,并成功配置出了低重力模拟月壤,本书也引用了该研究的主要成果和试验数据。吉林大学的李剑桥老师对模拟月壤的配置和检测提供了帮助,本书间接引用了他的部分成果。

中国北方车辆研究所的刘川研究员承担了书稿校对工作,并对本书的出版给予了大力帮助。

由于编著者们水平有限和实际工作的局限,书中的不足和错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者
2014 年 8 月

主要符号表

a_n	土壤的多次通过系数
b	车轮宽度
c_0	单位面积的土壤内聚力
B	轮距
C_u	粒径分布不均匀系数
F_D	车轮牵引力
F_s	侧向推土阻力
F_f	车轮滚动阻力
F_{DP}	车轮挂钩牵引力
F_u	剪切侧向力
C_c	粒径分布曲率系数
D_{motor}	电机动力因数
D_t	土壤动力因数
Q_w	车体施加在车轮上的法向载荷
F_y	车轮所受侧向力
F_{yl}	左侧车轮所受侧向力
F_{yr}	右侧车轮所受侧向力
F_{ai}	悬架上第 i 个阻尼器受到的力
F_{pi}	悬架上第 i 根弹簧受到的力
F_z	车轮所受垂向力
T_f	车轮直驶时的土壤阻力矩
T_k	车轮直驶时的驱动力矩
β	车轮侧向滑转角
ω_k	车轮角速度
ω_l	步行机构驱动杠杆角速度
ω_g	车轮模型中外轮的旋转角速度
ω_w	车轮模型中内轮的旋转角速度

V_k	整车移动速度
V_x	车轮轴心沿前进方向的实际速度
V_y	车轮侧向速度
τ	近似静推应力
$\tau_{\max}$	最大剪应力
τ_y	车轮—土壤接触区域内任一接触点在 y 轴方向的剪切应力
τ_x	车轮—土壤接触区域内任一接触点在 x 轴方向的剪切应力
p	承载压力
φ_b	土壤内摩擦角
φ_c	附着系数
ψ	行驶总阻力系数
f	车轮滚动阻力系数
g	地球重力加速度
h_t	车轮抓地爪尺高
K_{DP}	车轮挂钩牵引力系数
l	车轮接地长度
l_s	步行机构驱动杠杆长度
L_V	车辆外轮廓长度
L_b	轴距
L	前后轴距
L_B	星球表面石块横向尺寸
W_V	车辆外轮廓宽度
H_V	车辆外轮廓高度
H_Δ	阶梯障碍高度
h_g	静态离地间隙
h_k	动态离地间隙
h_q	质心离地高度
P_{Zi}	第 i 轮轴垂直载荷
s	滑转率
k_c	Bekker 土壤内聚变形模量
k'_c	Reece 土壤内聚变形模量
k_φ	Bekker 土壤摩擦变形模量
k'_φ	Reece 土壤摩擦变形模量
k	Bekker 土壤无弹性变形模量

$k_{c,c}$	步行时跟随运动的行走系数
K_h	车轮前后沉陷量的比率
n	土壤变形指数
N_B	星球表面 10^6 m^2 面积上石块的数量
N_p	星球表面 10^6 m^2 面积上陨石坑的数量
N_f	车轮直驶时消耗的阻力功率
N_{eT}	车轮转向时的驱动功率
N_η	星球车从静止加速到稳定速度的功率消耗
D_p	陨石坑直径
i_p	减速器传动比
μ	车轮转向时的附着系数
G_s	土壤比重
G_γ	土壤容重
K_w	土壤含水饱和系数
K_M	车轮转向力矩系数
K_L	轴距系数
M_c	土壤含水量
M'_c	土壤总可含水量
M_T	车轮转向牵引力矩
M_f	车轮转向阻力矩
X_i	粒径小于 i 的颗粒质量百分数
R	车轮半径
T	星球车动能
M	星球车总质量
Π	星球车势能
Φ	星球车能量耗散函数
Q_i	系统广义力
q_i	系统广义坐标
R_C	压实阻力
σ	车轮—土壤接触区域内任一接触点的法向应力
α_B	接近角
α_C	离去角
θ_m	地面法线与车轮最大法向应力点处的法向应力作用线之间的夹角

λ	车轮接地长度与接地宽度之比
z	总沉陷量
z_d	动态沉陷量
z_s	静态沉陷量
j	剪切位移
j_0	土壤剪切变形模量
γ_p	步行机构的工作节奏
γ_e	步行机构的行走有效系数
γ_1	车辆接近角
γ_2	车辆离去角
z_0	步行机构的支撑腿数量
n_0	步行机构的总数
K_n	步行时的累积重叠系数
S_0	步行时的步距
S_M	一个周期内步行机构通过的距离
A_Γ	土壤中步行时的能量损耗
S_a	支撑腿的接地面积
S_s	步行时滑移量
K_B	步行时一周支撑的最大反力和额定反力的比值
ϕ_{xi}	绕 x 轴姿态角
ϕ_{yi}	绕 y 轴姿态角
ϕ_{zi}	绕 z 轴姿态角
P_k	车轮转向功率
P_n	电机极对数
D_k	车轮直径
P_x	纵向撞击力
C_K	“障碍物—车轮—星球车”系统的径向刚度
C_{Pi}	第 i 个车轮悬挂装置的刚度
b_i	第 i 个阻尼器的阻尼系数
Δ_{CTi}	第 i 个悬挂装置的静态变形量
l_i	从质心到第 i 个车轮中心之间的距离在纵向轴的投影
P_{yj}	作用在横向的惯性力
P_{xj}	作用在纵向的惯性力
P_{zj}	作用在垂向的惯性力

M_j	作用在横向的惯性力矩
P_{zl}	土壤作用在左侧车轮的法向力
P_{zr}	土壤作用在右侧车轮的法向力
δ_0	旋转质量换算系数
J_{oy}	经过质心横向轴的转动惯量

目 录

主要符号表

第1章 绪论	1
1.1 星球车行走系统的定义与功能	1
1.1.1 无人驾驶星球车行走系统	1
1.1.2 载人星球车行走系统	2
1.2 星球车行走系统的基本构成	2
1.2.1 动力系统	3
1.2.2 驱动系统	3
1.2.3 悬架系统	4
1.2.4 转向系统	5
1.2.5 制动系统	6
1.2.6 承载和连接	6
1.2.7 控制系统	7
1.2.8 操控系统	7
1.3 星球车行走系统的性能及关联因素	7
1.3.1 星球车总体约束条件	7
1.3.2 星球环境影响	8
1.4 星球车行走系统研究的基础理论和方法	9
1.4.1 车辆地面力学理论	9
1.4.2 星球车行走系统的研究方法	9
1.5 星球车行走系统研究的几个重点方向	12
1.5.1 行走系统与土壤作用关系	12
1.5.2 行走方式及行走系统构型	12
1.5.3 自主行走的能力	12
1.5.4 行走性能的预测及模拟外星球试验	12
第2章 土壤特性及外星球土壤模拟	13
2.1 土壤可行驶性的定义	13

2.2	土壤的质地分类及其可行驶性曲线	14
2.3	土壤的物理特性	15
2.3.1	颗粒形态	15
2.3.2	粒径分布	16
2.3.3	比重和容重	17
2.3.4	含水量及饱和系数	18
2.4	土壤的力学特性	18
2.4.1	承压特性	18
2.4.2	剪切特性	20
2.5	星球土壤的模拟	20
2.5.1	月壤的力学特性	21
2.5.2	月壤模拟材料	21
2.5.3	月壤模拟的添加物质	23
2.5.4	模拟月壤的制备方法	25
2.6	星球土壤行驶性的测试	25
2.6.1	实验室测试设备——贝氏仪	26
2.6.2	现场测试设备	28
第3章	星球车与土壤的相互作用	30
3.1	车轮与土壤作用的机理	30
3.2	星球车的轮—壤作用模型	31
3.2.1	滑转率和滑转角	31
3.2.2	沉陷量	32
3.2.3	接触角	35
3.2.4	法向应力	36
3.2.5	剪切应力	37
3.3	轮—壤力和力矩的计算	39
3.3.1	挂钩牵引力	39
3.3.2	侧向力	39
3.3.3	垂向力	40
3.3.4	阻力矩	40
3.4	轮—壤的重复通过性	40
3.5	轮—壤作用试验系统	41
3.5.1	试验系统的设计要求	42

3.5.2	典型轮—壤作用试验系统	42
3.5.3	月球车轮—壤作用试验及分析	44
第4章	星球车的行走方式	47
4.1	行走方式的分类及特点	47
4.2	轮式滚动行走方式	49
4.2.1	爬坡性能	50
4.2.2	斜坡横向移动能力	51
4.2.3	断面通过性能	52
4.2.4	轮式行走的主要通过性能	53
4.3	腿式跨步行走方式	53
4.3.1	跨步行走的原理	53
4.3.2	跨步行走的动力学模型	56
4.3.3	跨步行走的通过性能	58
4.3.4	跨步行走的优点和不足	59
4.4	轮—步式复合行走方式	59
4.4.1	轮—步式行走的原理	60
4.4.2	轮—步式移动的动力学模型	61
4.4.3	轮—步式移动的通过性能	63
第5章	星球车行走系统运动学	65
5.1	运动学基础理论	65
5.2	坐标系及变换	67
5.2.1	车体坐标系	67
5.2.2	轮地接触点坐标系	68
5.2.3	运动坐标系	69
5.3	姿态分析与定位	69
5.3.1	位姿正运动学方程	69
5.3.2	关节角变化与车姿的关系	70
5.4	转向逆运动学	71
5.4.1	转向角	72
5.4.2	车轮转速	74
5.4.3	逆运动学解析解	76
5.5	基于运动学的航位推算	77

第 6 章 星球车行走的控制	79
6.1 单轮驱动控制	80
6.1.1 车轮牵引驱动控制	80
6.1.2 车轮转向驱动控制	82
6.1.3 牵引和转向电机的选型	83
6.2 多轮运动协调控制	84
6.2.1 基于转速闭环的运动协调	84
6.2.2 基于转矩闭环的运动协调	85
6.2.3 基于滑转率闭环的运动协调	85
6.2.4 行走系统动态稳定性	87
6.3 遥控及自主行走控制	88
6.3.1 外部环境信息获取	88
6.3.2 基于几何通过性的行走控制	89
6.3.3 基于支撑通过性的行走控制	91
第 7 章 星球车行走性能评估	92
7.1 行走性能评估准则	92
7.1.1 通过性评估准则	92
7.1.2 稳定性评估准则	96
7.1.3 行走效率评估准则	98
7.2 星球环境建模	98
7.2.1 环境的定性模型	99
7.2.2 环境的定量模型	100
7.3 通过性评估模型	101
7.3.1 直线行驶性能评估	101
7.3.2 转向性能评估	103
7.3.3 越障性能评估	104
7.4 稳定性评估模型	108
7.4.1 静态稳定性	108
7.4.2 动态稳定性	109
7.5 功率消耗的评估模型	117
第 8 章 缩比模型的低重力试验	119
8.1 低重力对星球车行走性能的影响	119

8.1.1	低重力对土壤力学性能的影响	119
8.1.2	低重力对“牵引-附着”性能的影响	120
8.2	相似理论及其在低重力模拟中的应用	121
8.3	模型试验理论基础	123
8.4	星球车牵引特性的低重力缩比模型	125
8.4.1	牵引特性的无因次全组	125
8.4.2	模型试验比例因数	127
8.5	星球车低重力缩比模型试验	128
8.5.1	模型比例在低重力模拟月壤中的应用	128
8.5.2	模型比例在牵引性能试验的应用	129
参考文献		131

第1章 绪 论

1.1 星球车行走系统的定义与功能

星球车是能够在外星球表面行驶的各类航天探测器的总称,包括月球车、火星车,以及未来的土星、金星等其他星球探测车等。它主要执行移动探测、采样和运输任务,是人类探索其他星球时获取星球表面科学信息的重要工具。

星球车行走系统是实现星球车在外星球表面漫游、巡视,以及物资(包括采样标本)或人员运输的任务系统,它直接与星球表面土壤或岩石接触做功产生动力,推动星球车运动。星球车行走系统的主要功能可概括为陌生环境下无路面的行走和运输,包括承载科学探测仪器、航天员,运输标本和物资等。

与地面车辆类似,不同用途的星球车也需要配备不同功能和特点的行走系统,通常无人驾驶星球车行走系统和载人星球车行走系统存在较大差别。

1.1.1 无人驾驶星球车行走系统

无人驾驶星球车一般携带固定质量的科学仪器,按照既定科学目标在外星球表面着陆(一般采用直接着陆或借助着陆器),选择性地在星球表面行走,开展矿物、生命等科学探测。此类星球车是星球探测初期不可缺少的重要工具,是航天员登陆星球的先驱者。此类星球车行走系统具有以下特性:

(1) 在复杂、未知环境行走能力。发射无人驾驶星球车,一般在星球探测初期,对星球表面环境信息认知并不充分,缺乏土壤承载力、密实度和地形、障碍等数据,因而,要求该类星球车行走系统具有较强的环境和地面适应能力以及必要的冗余功能。

(2) 自主或半自主行走能力。选择自主、半自主或遥控方式的行走系统,不仅仅取决于行走系统研制期间的智能化技术水平,更关键的是星球探测目标和被探测星球与地球之间的距离,当距离足够遥远,图像和指令传输的延迟已经对星球车行驶安全造成严重影响时,需要采用具备自主能力的行走系统。

(3) 体积小,质量轻。基于运载系统的能力和对一个陌生星球探测初期阶段的科学目标,无人驾驶星球车的体积和质量较小,探测任务相对单一,行走系统相应地也具有体积小和质量轻的特点。

(4) 低速行走。在无路面的星球表面巡视探测类的无人驾驶星球车不需要高速行驶,基于低速行驶时适应复杂地形的需要,被动悬架在此类星球车上应用

较多。

1.1.2 载人星球车行走系统

载人星球车的主要任务是承载航天员和科学仪器进行探测或采样、运输,与无人驾驶星球车相比体积、质量更大,车辆的特征也更加明显。此类星球车行走系统具有以下特点:

(1) 星球环境行走适应性强。与无人驾驶星球车不同,载人星球车行走系统除了适应特定星球的土壤、大气、温度等环境,确保行走系统本身适应性要求外,还需要考虑航天员驾驶星球车时对颠簸的承受能力,以及航天员上下车带来的载荷分布变化对行走稳定性的影响。

(2) 结构轻量化。受发射、运载、着陆等多个环节约束,此类星球车需要比地面车辆轻得多的构造,甚至考虑部分机构具有折叠功能,以减小运载过程中占用的空间。

(3) 驾驶操纵和自主性。此类星球车主要由航天员驾驶,需要特殊的操纵系统。由于航天员密闭在氧气舱中或者穿着厚重的航天服,驾驶操纵的感觉与地面车辆不同。同时,当航天员下车时,星球车仍保留自主行走的能力。

(4) 可维护、维修性。由于航天员的参与,此类星球车行走系统可考虑维护和维修的需求,当行走系统发生故障时,能够通过简单的更换或调整,恢复系统工作能力。

1.2 星球车行走系统的基本构成

各国和各个时期星球探测的目标不尽相同,与此对应的星球车行走系统的体系结构也不完全一样,星球探测的任务需求和研制阶段技术水平决定了星球车行走系统的结构特点。目前,已经出现的星球车行走系统基本结构及其作用关系如图 1-1 所示。

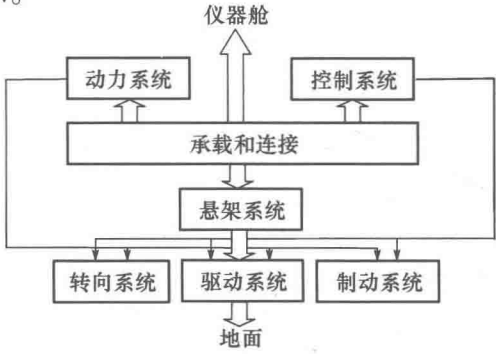


图 1-1 星球车行走系统结构图