



上海市空间智能控制技术重点实验室
Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology

• 侯建文 阳光 周杰 贺亮 等编著
刘付成 主审

深空探测

— 火星探测

Deepspace Exploration
— Mars Exploration



国防工业出版社
National Defense Industry Press

本书获得国家国际科技合作专项(2012DFR80540)资助

• 侯建文 阳光 周杰 贺亮 等编著
刘付成 主审

深空探测

— 火星探测

Deepspace Exploration
— Mars Exploration

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地描述了全球各航天大国和组织从20世纪60年代开始至今实施的历次火星探测任务,重点介绍了各次任务的背景和目的、有效载荷、探测器系统、任务过程和探测成果,最后梳理了世界各国未来的火星探测规划。全书共8章:火星探测概述;美国的火星探测任务;俄罗斯(苏联)的火星探测任务;欧洲的火星探测任务;日本的火星探测任务;印度的火星探测任务;中国的火星探测任务;未来火星探测规划。本书辅以大量图片和表格,展现了人类探索火星跌宕起伏的历程,并呈现了各国火星探测工程中大量宝贵的技术细节。

本书可供从事深空探测研究的科研人员、工程技术人员、航天工业管理者以及广大航天爱好者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

深空探测:火星探测 / 侯建文等编著. —北京:
国防工业出版社, 2016.7
ISBN 978-7-118-10002-0

I. ①深… II. ①侯… III. ①火星探测器 IV.
① V476.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 092421 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)
国防工业出版社印刷厂印刷
新华书店经售

*

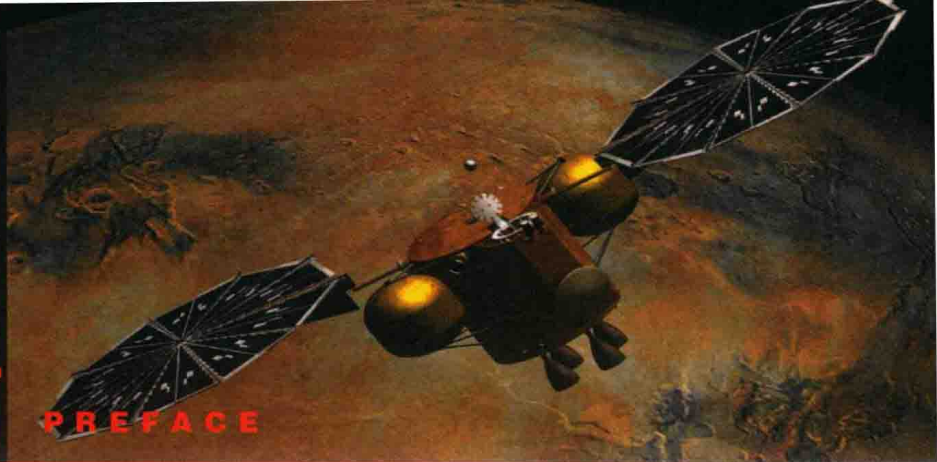
开本 710×1000 1/16 印张 34 $\frac{3}{4}$ 字数 696 千字
2016年7月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 136.00元

(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

PREFACE



德国哲学家康德在《实践理性批判》中说过：世界上有两件东西能够深深震撼人们的心灵，一件是我们心中崇高的道德准则，另一件是我们头顶上灿烂的星空。的确，每当仰望星空，灿烂的群星总是以无比的深邃和静谧向人类展示着神秘而和谐的宇宙的图景。可以说，探索宇宙是人类与生俱来的永恒的欲望。

在茫茫星空中，我们的祖先发现有五颗星星与众不同，它们不但时而明亮，时而昏暗，而且在天空中的位置不是固定不动的。这与众不同的五个天体，古希腊人将它们称为行星（Planet 即为古希腊文漫游者的意思）。而其中有一颗红色的星球格外引人注目。在古代，血红的颜色代表了战争、暴乱和破坏。希腊人用战神阿瑞斯（Ares）为这颗行星命名，罗马人则继承了这个说法，使用了相应的罗马名字马尔斯（Mars——火星）沿用至今。中国古代祖先称这颗行星为“荧惑”，因其荧荧像火，而且亮度常有变化，顺行逆行情形复杂，有眩惑之意。

自人类发明望远镜之后，人们对火星的兴趣不断增大。天文学家通过望远镜可以观测到火星表面的变化，不由让人联想这是火星上植被季节更替的表现。一些观测者认为他们找到了这颗红色星球的表面水流和河道存在的证据，这一发现激发了公众对邻近外星生命的兴趣，包括对地球以外智能生命的期待。

随着太空时代的来临，人们对火星的认识进一步得到了加深。1965年7月14日，美国“水手”4号探测器从距离火星不到1万米处飞越火星，成为第一

个近距离飞越火星的人造物体,开辟了人类探测火星的新纪元。1976年7月20日,“海盗”1号探测器在火星表面着陆,开启了一个对火星探索热情空前高涨的时代。自20世纪90年代以后,有越来越多的国家和组织加入了火星探测的行列。截至2016年7月,人类已经实施了44次火星探测任务,其中成功或部分成功22次,失败21次,有一颗探测器正在飞往火星途中。

火星探测的意义,一方面在于探索宇宙奥秘,研究诸如火星上是否存在生命的科学问题,使人类能够更好地认识大自然,最终为人类永久生存和保护地球家园贡献力量。另一方面,火星探测作为一项庞大的系统工程,也是一个国家科技实力和创新能力的体现。通过实施火星探测工程,可以突破一批具有自主知识产权的核心与关键技术,获得科技创新成果,带动一个国家基础科学和应用科学若干领域的深入发展,促进众多技术学科的交叉与融合。同时对于提升民族自信心和凝聚力,激发爱国热情具有十分重要的意义。

中国第一个火星探测器“萤火”1号于2011年11月9日由俄罗斯的“福布斯-土壤”探测器搭载,在哈萨克斯坦拜克努尔航天发射中心发射升空。然而由于俄方探测器发生故障,“萤火”1号未能脱离地球引力飞向火星。虽然中国第一次火星探测任务以失败告终,但是在研制“萤火”1号探测器中积累的宝贵经验,可以为后续中国自主火星探测器研制提供很好的借鉴作用。2016年4月22日,中国国家航天局局长许达哲宣布中国首次自主火星探测任务已正式立项,按照计划,中国火星探测器将使用“绕、落、巡”一体的设计,将在2020年7月发射,并于2021年抵达火星。

《孙子兵法》云:知己知彼,百战不殆。参与火星探测工程的管理者、设计师和相关研究人员,很有必要深入了解全球火星探测的过去、现在和未来,学习别人的长处,借鉴他人的经验,可以帮助我们开阔眼界,少走弯路,更快地到达胜利的彼岸。正是鉴于这样的想法,笔者决定编写本书。

本书共分8章。第1章是火星探测概述,简要介绍了火星的概括、火星探测的意义和火星探测的历史。第2章介绍了美国的火星探测任务,是本书的重点。美国是当今全球火星探测的头号强国,本章从任务概述、科学载荷、探测器系统、任务过程和探测成果等方面对美国实施的历次火星任务做了详细介绍。第3章介绍了俄罗斯(苏联)已经实施的火星探测任务。第4章介绍了欧洲已经实施的火星探测任务。第5章介绍了日本已经实施的火星探测任务。第6章介绍了印度已经实施的火星探测任务。第7章介绍了中国已经实施的

火星探测任务。第8章介绍了未来全球将要开展的火星探测计划,包括近几年夺人眼球的私人火星探测计划。最后是结束语。本书通过大量的数据和图片,客观展现了人类探索火星跌宕起伏的历程,并呈现了各国火星探测工程中大量宝贵的技术细节。本书可供从事深空探测研究的科研人员、工程技术人员、航天工业管理者和高校相关专业师生参考,对于广大航天爱好者也是一本必备手册。

本书第3、4、5章和结束语由侯建文编写;第1、6章由阳光编写;第2、8章由周杰编写;第7、9章由贺亮编写;全书由刘付成主审。本书从构思到初稿完成历时将近一年,期间查阅了大量公开发表的文献、资料和书籍,从各大航天机构官方网站下载了大量图片,在这里要对这些作者和机构表示衷心的感谢。

由于本书的涉及面较广,而笔者的水平有限,加之时间仓促,书中存在的缺点甚至错误难免,敬请广大读者批评指正。

编著者

2016年7月于上海

目录

Contents



第 1 章	火星探测概述	1
1.1	火星概况	1
1.1.1	火星的自转与公转	2
1.1.2	火星的物理特性	4
1.1.3	火星的空间环境	5
1.1.4	火星的地貌与地质	6
1.1.5	火星的大气与气候	14
1.1.6	火星的卫星	23
1.2	火星探测的意义	26
1.2.1	科学意义	26
1.2.2	工程意义	28
1.2.3	社会效益	28
1.3	火星探测的历史	29
1.3.1	太空时代之前的火星探测	29
1.3.2	太空时代的火星探测	33
第 2 章	美国的火星探测任务	38
2.1	“水手”3 号、4 号(1964 Mariner 3,4)	38
2.1.1	任务概述	39
2.1.2	科学载荷	42

2.1.3	探测器系统	43
2.1.4	任务过程	47
2.1.5	探测成果	52
2.2	“水手”6号、7号(1969 Mariner 6,7)	57
2.2.1	任务概述	57
2.2.2	科学载荷	59
2.2.3	探测器系统	61
2.2.4	任务过程	64
2.2.5	探测成果	69
2.3	“水手”8号、9号(1971 Mariner 8,9)	71
2.3.1	任务概述	72
2.3.2	科学载荷	73
2.3.3	探测器系统	76
2.3.4	任务过程	84
2.3.5	探测成果	89
2.4	“海盗”1号、2号(1975 Viking 1,2)	90
2.4.1	任务概述	92
2.4.2	科学载荷	93
2.4.3	探测器系统	97
2.4.4	任务过程	106
2.4.5	探测成果	114
2.5	火星观察者(1992 Mars Obverdser)	117
2.5.1	任务概述	118
2.5.2	科学载荷	120
2.5.3	探测器系统	123
2.5.4	任务过程	127
2.5.5	故障原因分析	133
2.6	火星全球勘探者(1996 Mars Global Surveyor)	134
2.6.1	任务概述	136
2.6.2	科学载荷	136
2.6.3	探测器系统	139
2.6.4	任务过程	142

2.6.5	探测成果	149
2.7	火星探路者	152
2.7.1	任务概述	154
2.7.2	科学载荷	156
2.7.3	探测器系统	158
2.7.4	任务过程	163
2.7.5	探测成果	170
2.8	火星气候轨道器(1998 Mars Climate Orbiter)	172
2.8.1	任务概述	173
2.8.2	科学载荷	175
2.8.3	探测器系统	176
2.8.4	任务过程	177
2.8.5	故障原因分析	185
2.9	火星极地着陆者(1998 Mars Polar Lander)	186
2.9.1	任务概述	187
2.9.2	科学载荷	189
2.9.3	探测器系统	192
2.9.4	任务过程	197
2.9.5	故障原因分析	207
2.10	火星奥德赛(2001 Mars Odyssey)	209
2.10.1	任务概述	210
2.10.2	科学载荷	212
2.10.3	探测器系统	215
2.10.4	任务过程	217
2.10.5	探测成果	231
2.11	火星探测漫游者(2003 Mars Exploration Rovers)	233
2.11.1	任务概述	234
2.11.2	科学载荷	237
2.11.3	探测器系统	240
2.11.4	任务过程	248
2.11.5	探测成果	272
2.12	火星勘测轨道器(2005 Mars Reconnaissance Orbiter)	274

2.12.1	任务概述	275
2.12.2	科学载荷	277
2.12.3	探测器系统	281
2.12.4	任务过程	289
2.12.5	探测成果	301
2.13	“凤凰”号(2007 Phoenix)	304
2.13.1	任务概述	305
2.13.2	科学载荷	309
2.13.3	探测器系统	313
2.13.4	任务过程	316
2.13.5	探测成果	330
2.14	火星科学实验室(2011 Mars Science Laboratory)	331
2.14.1	任务概述	332
2.14.2	科学载荷	335
2.14.3	探测器系统	339
2.14.4	任务过程	349
2.14.5	探测成果	382
2.15	火星大气和挥发演化任务(2013 MAVEN)	385
2.15.1	任务概述	386
2.15.2	科学载荷	387
2.15.3	探测器系统	389
2.15.4	任务过程	391

第3章 俄罗斯(苏联)的火星探测任务 396

3.1	“火星”-19××(Mars-19××)系列	396
3.1.1	“火星”-1960A/“火星”-1960B	397
3.1.2	“火星”-1962A/“火星”-1962B	397
3.1.3	“火星”-1969A/“火星”-1969B	397
3.2	“火星”号系列	398
3.2.1	“火星”1号	399
3.2.2	“火星”2号、3号(Mars-2/3)	399
3.2.3	“火星”4号、5号(Mars-4/5)	400

3.2.4	“火星”6号、7号(Mars-6/7)	401
3.2.5	探测器(Zond)系列	402
3.2.6	探测器2号(Zond-2)	402
3.2.7	探测器3号(Zond-3)	402
3.3	“宇宙”(Cosmos)-419	403
3.4	“福布斯”(Phobos)系列	404
3.5	“火星”-96(Mars-96/Mars-8)	405
3.5.1	任务概述	405
3.5.2	探测器系统	406
3.5.3	计划飞行过程	408
3.5.4	实际飞行过程	409
3.6	福布斯-土壤(Phobos-Grunt)	410
3.6.1	任务概述	410
3.6.2	科学载荷	412
3.6.3	探测器系统	413
3.6.4	计划飞行过程	416
3.6.5	实际飞行过程	427

第4章 欧洲的火星探测任务 428

4.1	火星快车(Mars Express)	428
4.1.1	任务概述	428
4.1.2	科学载荷	429
4.1.3	探测器系统	433
4.1.4	任务过程	436
4.1.5	探测成果	441
4.2	“猎兔犬”-2	442
4.2.1	任务概述	442
4.2.2	科学载荷	444
4.2.3	探测器系统	445
4.2.4	任务过程	448
4.2.5	失败原因分析	449

第5章	日本的火星探测任务	450
5.1	“希望”号(Nozomi)	450
5.1.1	任务概况	450
5.1.2	科学载荷	451
5.1.3	探测器系统	451
5.1.4	任务过程	452
第6章	印度的火星探测任务	454
6.1	“曼加里安”号(Mangalyaan)	454
6.1.1	任务概况	454
6.1.2	科学载荷	456
6.1.3	探测器系统	457
6.1.4	任务过程	458
第7章	中国的火星探测任务	465
7.1	“萤火”1号(YH-1)	465
7.1.1	任务概述	465
7.1.2	科学载荷	467
7.1.3	探测器系统	467
7.1.4	计划飞行过程	474
7.1.5	实际飞行过程	475
第8章	未来火星探测规划	477
8.1	全球探索路线	477
8.2	美国火星探测计划	478
8.2.1	“洞察”号(InSight)任务	478
8.2.2	天体生物学野外实验室(Astrobiology Field Laboratory, AFL)任务	481
8.2.3	“火星2020漫游车”(Mars 2020 Rover)任务	482
8.2.4	火星取样返回(Mars Sample Return)任务	487
8.2.5	载人火星计划	495

8.3	俄罗斯火星探测计划	509
8.3.1	火星生物学(ExoMars)任务	509
8.3.2	“福布斯-土壤”2号	510
8.3.3	火星取样返回	510
8.3.4	载人火星任务	512
8.4	欧洲火星探测计划	513
8.4.1	火星生物学(ExoMars)任务	513
8.4.2	载人火星计划	522
8.5	日本火星探测计划	526
8.6	印度火星探测计划	527
8.7	阿联酋火星探测计划	527
8.8	中国火星探测计划	527
8.9	私人火星探测计划	530
8.9.1	灵感火星(Inspiration Mars)计划	530
8.9.2	Space X公司红龙(Red Dragon)计划	532
8.9.3	荷兰“火星”一号(Mars one)计划	534

结束语	535
------------	------------

附录 全球已执行火星探测任务汇总	536
-------------------------	------------

参考文献	538
-------------	------------

1

火星探测概述

1.1 火星概况

在很早以前,人们用肉眼发现天空中的绝大部分星星都是固定不动的,但是也有几颗星星会在天空中运动,人们就把这些运动的星星叫做行星(Planet)——字面意思就是“漫游者”,而火星(图 1-1)就是其中引人注目的一颗。天空中红色的火星很容易让古代的观天者与血红色的战争之神联系起来:希腊神话中的阿瑞斯(Ares)和罗马神话中的马尔斯(Mars)。火星在中国古称“荧惑星”,这是由于火

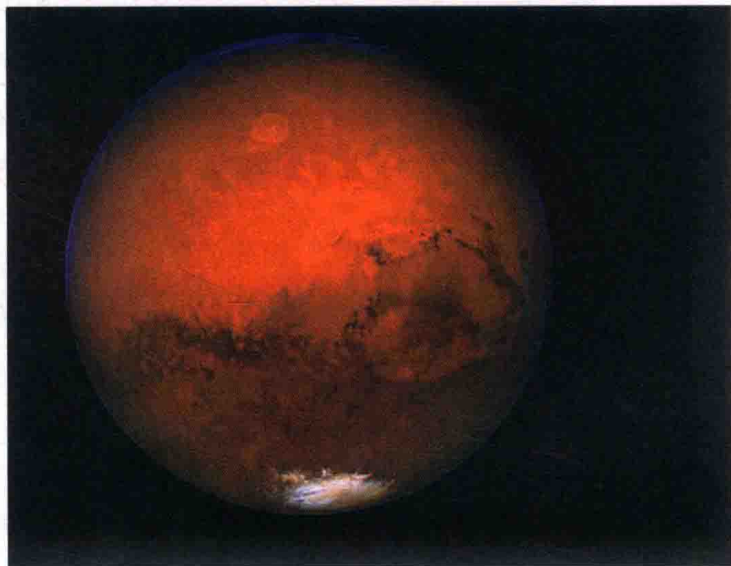


图 1-1 哈勃太空望远镜拍摄的火星照片(图片来源:NASA)

星呈红色,荧光像火,在五行中象征着火,它的亮度常有变化;而且在天空中运动,有时从西向东,有时又从东向西,情况复杂,令人迷惑,所以中国古代叫它“荧惑”,有“荧荧火光、离离乱惑”之意。

火星是离太阳第四近的行星,为四颗类地行星之一。火星半径约是地球的一半,体积为地球的15%,质量为地球的11%,表面积相当于地球陆地面积(图1-2),密度则比其他三颗类地行星(地球、金星、水星)还要小很多。以半径、质量、表面重力来说,火星约介于地球和月球中间:火星半径约为月球的两倍、地球的一半;质量约为月球9倍、地球的九分之一;表面重力约为月球的2.5倍、地球的40%。火星的物理性质和化学性质是太阳系中和地球最为相似的。火星在视觉上呈现为橘红色是由其地表所广泛分布的氧化铁造成的。



图1-2 地球和火星外形比较(图片来源:NASA)

1.1.1 火星的自转与公转

火星与太阳平均距离为1.52天文单位(AU),公转周期为687地球日,1.88地球年(以下称年),或668.6火星日。平均火星日为24小时39分钟35.244秒,或1.027491251地球日。

火星自转轴倾角为 25.19° ,和地球的相近,因此也有四季,只是季节长度约为地球的两倍。由于火星轨道(图1-3)偏心率大,为0.093(地球只有0.017),使各季节长度不一致,又因远日点接近北半球夏至,北半球春夏比秋冬各长约40天。

火星轨道和地球的一样,受太阳系其他天体影响而不断变动(表1-1)。轨道偏心率有两个变化周期,分别是9.6万年和2100万年,在0.002至0.12间变化;而地球的是10万年和41.3万年,在0.005至0.058间变化。目前火星与地球最短距离正慢慢减小。火星的自转轴倾角是 25.19° ,但可由 13° 至 40° 间变化,周期为1千多万年,不像地球稳定地处于 22.1° 和 24.5° 间,这是因为火星没有如月球般的巨大卫星来维持自转轴。也因没有大卫星的潮汐作用,火星自转周期变化小,

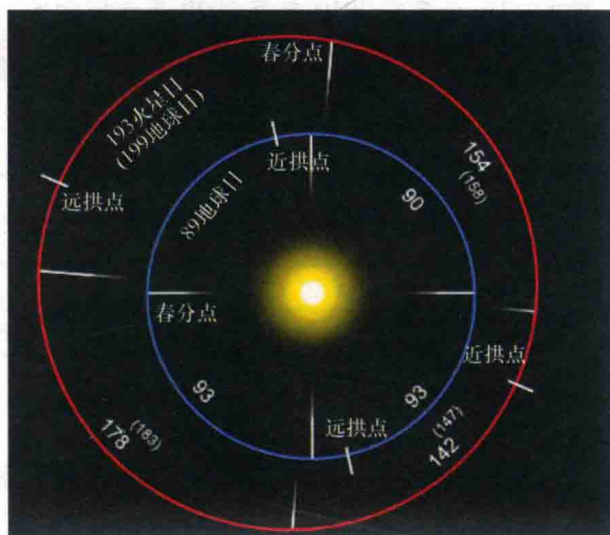


图 1-3 火星与地球的公转轨道示意图

不像地球会被慢慢拉长,因此现今两行星的自转周期相近只是暂时现象。

表 1-1 火星的轨道特性

参数	数值
远日点/km	249209300(1.665861AU)
近日点/km	206669000(1.381497 AU)
半长轴/km	227939100(1.523679 AU)
偏心率	0.093 315
公转周期/d	686.971
平均轨道速度/(km/s)	24.077
轨道倾角/(°)	1.850 61
升交点黄经/(°)	49.562
近日点幅角/(°)	286.537
自转周期	24h 37min 22s
自转轴与轨道面的倾角/(°)	25.19

火星与地球的会合周期为 779.94 个地球日,即每隔 2 年 50 天接近地球一次,称为“冲日”,因此发射火星探测器的发射窗口相隔约 26 个月。当火星过近日点前后冲日时离地球最近,称为“大冲”,这是从地球上观测火星的最佳时机,大约每 15 年或 17 年发生一次火星的“大冲”。火星在 2010 年至 2020 年间冲日发生时间如表 1-2 所列。

表 1-2 火星在 2010 年至 2020 年之间的冲

冲的日期	距离最近的日期	最近的距离/ 10^6 km	视直径/角秒
2010. 01. 29	01. 27	99. 3	14. 1
2012. 03. 03	03. 05	100. 8	13. 9
2014. 04. 08	04. 14	92. 4	15. 2
2016. 05. 22	05. 30	75. 3	18. 6
2018. 07. 27	07. 31	57. 6	24. 3
2020. 10. 13	10. 06	62. 2	22. 6

1.1.2 火星的物理特性

根据开普勒定律,在确定了火星与地球的距离之后,便可计算出火星的直径。通过计算可以得知,火星远比地球小。它的直径只有 6780km,或只有地球直径的一半。通过火星的直径即可推算出火星表面积为 1.45 亿 km^2 ,相当于地球的陆地面积。因此,尽管火星比地球小很多,其干燥的陆地面积不比地球少。

在 17 世纪 70 年代发现了火卫一和火卫二后,火星的质量才得以算出。根据开普勒定律,知道了火卫自转周期和与火星的距离,就能知道火星的质量,相当于地球质量的 10.74%。在知道了火星质量和直径以后,就很容易计算出火星的密度和火星表面引力。火星的平均密度是水的 3.9 倍。由此可见,火星的密度比地球小。火星表面的引力加速度大约 3.7m/s^2 ,只相当于地球的 38%。

火星没有像地球那样的全球磁场。但火星全球勘测者(Mars Global Surveyor)轨道器测得火星南半球一些区域地壳是高度磁化的,磁化情况跟地球海底的交替磁化带相当,因此有一种理论认为,这些磁化带是火星上以前的板块构造证据。显然,这应当是约 40 亿年前形成的火星壳保留下来的残存的磁场。估计火星的磁矩至少比地球磁矩弱 5000 倍,赤道处磁场强约 0.0004Gs (高斯)^①。如同金星磁层情况,太阳风与火星电离层作用,形成不大的磁层,产生弱的弓形激波及其他等离子体现象。表 1-3 总结了火星的基本物理特征。

表 1-3 火星基本物理特性与地球比较

参 数	地 球	火 星
直径/km	12756	6794
质量/kg	5.80×10^{24}	0.642×10^{24}
引力加速度/ (m/s^2)	9.81	3.73
距太阳的平均距离/km	149.6×10^6	227.9×10^6

① Gs(高斯)为非法定计量单位。 $1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$ (特[斯拉])。