

火星进入轨迹优化 与制导方法

李 爽 刘 旭 江秀强 彭玉明 著



北京理工大学出版社

火星进入轨迹优化 与制导方法

李 强 周 强 王 强 王 强 著



北京理工大学出版社

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

火星进入轨迹优化与制导方法 / 李爽等著. -- 北京:
北京理工大学出版社, 2023. 1

ISBN 978 - 7 - 5763 - 2097 - 8

I. ①火… II. ①李… III. ①火星探测 - 航天器着陆
- 研究 IV. ①V476.4

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 028217 号

责任编辑: 李炳泉

文案编辑: 李炳泉

责任校对: 周瑞红

责任印制: 李志强

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市丰台区四合庄路 6 号

邮 编 / 100070

电 话 / (010) 68944439 (学术售后服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

版 印 次 / 2023 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

印 刷 / 三河市天利华印刷装订有限公司

开 本 / 710 mm × 1000 mm 1/16

印 张 / 26.75

字 数 / 405 千字

定 价 / 132.00 元

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 负责调换

前 言

火星进入、下降和着陆过程是火星着陆探测、采样返回和载人登陆任务的核心环节之一，直接影响探测器在火星大气层内飞行的安全和最终的着陆精度。由于火星大气和引力场等环境参数存在较大的不确定性，加上探测器长期运行导致自身物理参数存在偏差，因此，火星进入段的飞行任务受到各种随机干扰和误差的影响非常大。

早期的弹道式火星进入方案由于没有采用制导算法控制火星进入轨迹，导致着陆误差较大。近期的火星探测器（包括火星科学实验室和天问一号）均采用弹道升力式进入方案，通过进入终点控制算法调整火星进入轨迹，从而提高飞行任务的安全性和最终的着陆精度。但现有的火星进入制导方法依赖发射前装订在探测器上的参考轨迹，对火星进入段不确定因素的鲁棒性有限。同时，随着未来载人火星登陆任务对着陆精度要求的提高，现有制导算法不仅需要提高制导精度，还需要能够与新型火星探测器的制导控制模式相匹配。因此，有必要对火星进入轨迹优化和制导算法开展研究，从而提高算法的鲁棒性、适应性和精确性。

本书以火星着陆探测为工程背景，研究火星进入过程中的轨迹优化和制导问题，基于最优控制理论、凸优化理论、不确定性量化理论、鲁棒优化理论发展了相应的轨迹优化和制导算法，从而较为完整和系统地回答了确定性环境下、不确定性环境下如何获得火星进入最优轨迹和制导指令的问题。本书所提出的火星进入轨迹优化和制导算法较为全面地梳理了这一领域所涉及的理论和方法，同时结合了不确定性量化、凸优化、计算制导等近期比较新的理论和概念，为后续火星

进入任务的轨迹优化和制导算法设计提供了新思路，将为我国火星采样返回、载人登陆任务提供一定的技术储备。

本书从确定性优化方法、不确定性优化方法和鲁棒最优制导方法三方面入手，较为全面地整理了作者团队近年来在火星进入轨迹优化和制导领域的研究进展。全书的章节内容概述如下。

第1章回顾了历史上成功的无人火星着陆任务和正在开展的载人火星登陆计划，同时较为详细地阐述了火星进入轨迹优化和制导领域的研究进展。

第2章则对火星进入问题建模以及相关的基础理论进行介绍，便于读者深入阅读后续章节所涉及的方法。

第3章到第7章分别介绍了五类确定性优化方法，用于实现火星进入轨迹优化。其中，改进 Gauss 伪谱法以启发式算法的优化结果为初始猜测值，兼具启发式算法优化速度快、伪谱法收敛精度高的优势，在求解火星进入轨迹优化问题方面具有优势；改进序列凸优化方法则从火星进入动力学建模和凸优化离散方式两方面入手，对经典序列凸优化方法进行了改进，求解得到的火星进入高度最大化轨迹精度与自适应伪谱法相当；伪谱模型预测凸优化方法引入误差动力学系统来表述火星进入动力学，相比采用状态空间的传统方法，有效提高了求解火星进入轨迹优化问题的计算效率；间接序列凸优化方法结合了间接法和凸优化方法，可以得到火星进入轨迹优化问题的协态变量信息；协同优化方法解决了未来数十吨量级载人火星探测器的进入和着陆轨迹协同优化问题。

第8章到第10章阐述了三类火星进入轨迹不确定性优化方法，分别提出了基于灵敏度优化理论、不确定性量化理论和鲁棒优化理论的火星进入轨迹优化方法，降低了火星未知环境和探测器系统参数偏差对参考轨迹的影响，从而提高火星进入轨迹的鲁棒性。

第11章到第13章结合模型参考自适应控制、神经网络、模型预测控制、二次约束二次规划等方法给出了几类鲁棒最优制导策略，包括跟踪制导、预测校正制导和计算制导方法，从而克服各类不确定性因素，实现高精度火星进入。

本书由南京航空航天大学航天学院李爽、刘旭、江秀强和彭玉明撰写。其中，第1章和第2章由李爽、刘旭和江秀强撰写；第3章、第7章、第9章和第10章由李爽、江秀强撰写；第4章、第5章、第6章、第13章由李爽、刘旭撰

写；第8章、第11章、第12章由李爽、彭玉明撰写；李爽负责全书统稿和审校。

本书的研究内容得到了国家自然科学基金的支持，在此表示感谢！

本书在编写过程中参考和引用了大量国内外文献，本书的完成离不开这些文献作者的开创性工作，在此对他们表示深深的谢意。限于作者水平及能力，书中难免有诸多不妥和疏漏之处，敬请广大读者不吝批评、指正。

李爽

目 录

第一部分 基础知识

第 1 章 绪论	3
1.1 火星着陆任务概述	4
1.1.1 无人火星着陆任务	4
1.1.2 载人火星登陆计划	11
1.2 火星进入轨迹优化方法研究进展	18
1.2.1 启发式方法	18
1.2.2 直接法	19
1.2.3 间接法	20
1.2.4 不确定性优化方法	21
1.3 火星进入制导方法研究进展	22
1.3.1 参考轨迹跟踪制导	23
1.3.2 预测校正制导	25
1.4 小结	27
第 2 章 相关理论基础	30
2.1 火星进入动力学模型	30
2.1.1 火星环境模型	30
2.1.2 坐标系定义及其关系	33

2 ■ 火星进入轨迹优化与制导方法

2.1.3	火星进入器模型	37
2.1.4	动力学模型	37
2.1.5	约束条件	43
2.1.6	进入几何	43
2.2	最优控制理论概述	46
2.3	伪谱法概述	48
2.3.1	Legendre 伪谱法	49
2.3.2	Chebyshev 伪谱法	52
2.4	凸优化理论概述	52
2.4.1	二阶锥规划	54
2.4.2	二次约束二次规划	55
2.5	不确定性理论概述	56
2.5.1	不确定性的定义与分类	56
2.5.2	不确定性建模的数学基础	60
2.5.3	不确定性量化的基本方法	63
2.6	鲁棒优化理论概述	64
2.6.1	鲁棒优化的基本概念	64
2.6.2	鲁棒优化的基本方法	68
2.7	小结	70

第二部分 确定性优化方法

第3章	火星进入轨迹的改进 Gauss 伪谱优化方法	73
3.1	火星进入轨迹优化问题描述	73
3.1.1	火星进入动力学方程	73
3.1.2	约束条件	74
3.1.3	目标函数	75
3.1.4	优化问题描述	75
3.2	粒子群算法	76
3.3	Gauss 伪谱法	77

3.4	混合优化策略	79
3.5	仿真分析	80
3.6	小结	84
第4章	火星进入轨迹的改进序列凸优化方法	85
4.1	基于航程角的火星进入动力学模型	85
4.2	改进序列凸优化方法	86
4.2.1	问题描述	87
4.2.2	问题凸化	87
4.2.3	问题离散	91
4.2.4	算法流程	93
4.2.5	仿真分析	93
4.3	LGL 伪谱序列凸优化方法	107
4.3.1	问题描述	108
4.3.2	问题凸化	108
4.3.3	问题离散	109
4.3.4	算法流程	111
4.3.5	仿真分析	112
4.4	小结	117
第5章	火星进入轨迹的伪谱模型预测凸优化方法	119
5.1	模型预测凸优化方法	119
5.2	Legendre 伪谱模型预测凸优化方法	122
5.2.1	伪谱灵敏度关系	122
5.2.2	参考轨迹更新	126
5.2.3	算法流程	128
5.2.4	仿真分析	130
5.3	映射 Chebyshev 模型预测凸优化方法	142
5.3.1	Chebyshev 伪谱法	142
5.3.2	重心 Lagrange 插值	143
5.3.3	算法原理	144

4 ■ 火星进入轨迹优化与制导方法

5.3.4 仿真分析	147
5.4 小结	152
第6章 火星进入轨迹的间接序列凸优化方法	153
6.1 归一三角化方法	154
6.1.1 问题描述	154
6.1.2 算法原理	155
6.2 改进归一三角化方法	158
6.2.1 算法原理	158
6.2.2 仿真分析	162
6.3 间接序列凸优化方法	166
6.4 仿真分析	170
6.4.1 末端时间自由问题	170
6.4.2 末端时间固定问题	175
6.5 小结	179
第7章 火星进入和着陆轨迹的协同优化方法	180
7.1 最优问题描述	180
7.2 协同最优化设计	185
7.3 强化学习求解策略	188
7.4 仿真分析	190
7.5 小结	201

第三部分 不确定性优化方法

第8章 火星进入轨迹的灵敏度最优化方法	205
8.1 直接配点法	205
8.2 灵敏度最优控制方法	207
8.2.1 优化目标	208
8.2.2 约束条件	208
8.2.3 状态灵敏度计算	210
8.2.4 仿真分析	211

8.3 小结	214
第9章 火星进入轨迹不确定性量化方法	216
9.1 火星进入轨迹不确定性量化问题描述	216
9.2 基于自适应广义混沌多项式的不确定性量化方法	220
9.2.1 广义多项式混沌	221
9.2.2 自适应谱分解	223
9.2.3 随机空间的自适应分解	226
9.2.4 在火星进入轨迹不确定性量化问题中的应用	232
9.3 基于敏感度配点的非侵入式多项式的不确定性量化方法	238
9.3.1 非侵入式多项式混沌	239
9.3.2 基于敏感度的配点	241
9.3.3 确定性变量的求解	243
9.4 仿真分析	246
9.4.1 仿真设置	246
9.4.2 算例1: 均匀不确定性	247
9.4.3 算例2: 高斯不确定性	261
9.4.4 算例3: 混合不确定性	275
9.4.5 分析与讨论	278
9.5 小结	280
第10章 火星进入轨迹鲁棒优化方法	281
10.1 火星进入轨迹鲁棒优化问题	281
10.1.1 火星进入动力学方程	281
10.1.2 火星进入段不确定性建模	282
10.1.3 约束条件	283
10.1.4 目标函数	283
10.1.5 优化问题描述	284
10.2 自适应伪谱法	286
10.3 鲁棒性和可靠性评估	288
10.4 仿真分析	289

6 ■ 火星进入轨迹优化与制导方法

10.4.1	仿真设置	290
10.4.2	算例 1: 末端高度最大化	292
10.4.3	算例 2: 末端偏差最小化	295
10.4.4	分析与讨论	298
10.5	小结	299

第四部分 鲁棒最优制导方法

第 11 章	火星进入自适应跟踪制导方法	303
11.1	直接模型参考自适应跟踪制导方法	303
11.1.1	基于 CGT 的直接自适应控制方法	303
11.1.2	自适应制导律设计	304
11.1.3	闭环稳定性分析	307
11.1.4	侧向制导律	309
11.1.5	标称轨迹	310
11.1.6	仿真分析	311
11.2	基于 RBF 神经网络的二阶滑模自适应跟踪制导方法	314
11.2.1	纵向制导律设计	315
11.2.2	火星进入鲁棒跟踪制导仿真	321
11.3	小结	330
第 12 章	火星进入预测校正制导方法	331
12.1	预测校正制导方法	331
12.1.1	纵向制导	332
12.1.2	横向制导	333
12.1.3	仿真分析	334
12.2	ETPC 制导	338
12.2.1	预测航程误差	339
12.2.2	计算控制修正	340
12.2.3	横向制导	342
12.2.4	仿真分析	343

12.3 小结	346
第 13 章 火星进入计算制导方法	347
13.1 标准模型预测控制	348
13.2 最优反馈跟踪制导	349
13.2.1 QCQP 问题	349
13.2.2 算法流程	352
13.3 最优计算制导	353
13.3.1 改进策略	353
13.3.2 算法流程	354
13.4 仿真分析	356
13.4.1 无偏工况仿真	358
13.4.2 蒙特卡洛仿真	361
13.5 小结	369
参考文献	370
索引	402

第一部分

基础知识



第 1 章

绪 论

火星是太阳系第四颗行星，具有和地球相近的自然环境，是人类探索宇宙生命起源和行星环境演化规律的首选^[1]。如图 1.1 所示，自 1960 年以来，人类已经开展了数十次火星探测任务，探测形式从早期的飞跃和环绕探测逐步发展为当前的着陆探测，未来还计划实施无人火星采样返回和载人火星登陆任务^[2]。

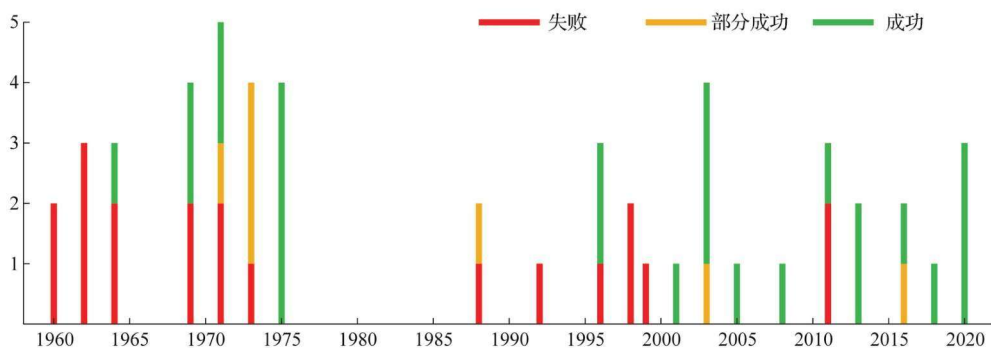


图 1.1 截至 2022 年全球火星探测任务统计

截至 2022 年，人类共执行 47 次火箭发射任务以开展火星探测，共发射飞跃器 11 颗、轨道器 28 颗、着陆器 16 颗（不含 2 颗火卫一着陆器）、火星车 8 辆（不含 1 辆火卫一火星车），但只有 22 次发射任务完全成功，任务失败率高达 53.2%^[3,4]。同时，在涉及火星着陆探测的 19 次发射任务中仅有 10 次完全成功，包括美国 9 次和中国 1 次，成功率不到 53%^[3]。在火星着陆探测任务中，火星进入、下降和着陆（Entry, Descent and Landing, EDL）过程是确保探测器从火星轨道安全转移到火星表面的关键^[5,6]，而火星进入阶段持续时间最长，因此有必要针对火星进入问题开展研究，从而保障火星着陆探测任务的顺利执行。

1.1 火星着陆任务概述

1.1.1 无人火星着陆任务

第一颗计划在火星着陆的探测器为苏联于 1962 年 11 月发射的 Mars 2 MV - 3 No. 1 (或称 Sputnik 24), 但火箭发射失败导致任务终止; 随后苏联于 1971 年 5 月发射的 Mars 2 是首颗到达火星表面的探测器, 但软着陆失败, 硬着陆在火星表面后坠毁; 其备份 Mars 3 成功软着陆火星表面, 仅发回部分图像后失联; 而 1973 年 8 月发射的 Mars 6 和 Mars 7 探测器均在火星 EDL 过程中失联。第一颗成功着陆火星的探测器是美国于 1975 年 8 月发射的 Viking 1, 着陆时间为 1976 年 7 月, 其备份 Viking 2 也于 1976 年 9 月成功着陆火星^[7,8]。此后, 美国成功发射多颗探测器到达火星表面, 包括搭载首辆火星车 Sojourner 的 Mars Pathfinder (MPF) 探测器^[9,10]、核动力探测器 Mars Exploration Rovers (MER - A, Spirit; MER - B, Opportunity)^[11,12]等。欧洲先后于 2003 年 6 月和 2016 年 3 月发射了 Mars Express^[13-15]和 ExoMars 2016^[16,17]探测器, 但其搭载的着陆器 Beagle 2 和 Schiaparelli 分别由于太阳能电池板故障和着陆事故导致任务失败。中国于 2020 年 7 月发射的天问一号是首颗一次性实现火星环绕、着陆和巡视的探测器, 创造了火星探测的历史^[18,19]。

在火星进入阶段, 探测器也被称为进入器, 其普遍采用气动减速的方式消耗绝大部分多余动能, 减速期间探测器的飞行高度从约 125 km 下降到 8 ~ 12 km、飞行速度从 4 ~ 7 km/s 降低到 1.6 ~ 2.2 Ma, 并依次经历峰值热流、动压和过载, 全过程持续 4 ~ 8 min, 是火星 EDL 全程中飞行距离最长、机动范围最大的阶段, 基本决定了火星着陆任务的精度^[5,6]。火星进入方式主要有两类: 一类以 Viking 1, 2^[7,8]、Phoenix^[20-22]和 InSight^[23-27]探测器为代表, 采用弹道式进入, 依次经历进入大气、打开降落伞、降落伞分离、重力转弯着陆等过程。而以 MPF 和 MER 为代表的探测器同样采用弹道式进入, 但在降落伞分离后通过气囊缓冲着陆实现着陆。这一类方案在火星进入过程中无制导环节。另一类是弹道升力式进入, 该方案在进入段通过制导算法主动调整升力, 从而控制航程以提高着陆精