



航天科技图书出版基金资助出版

航天器 着陆缓冲机构

杨建中 著



 中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

航天器着陆缓冲机构

杨建中 著



中国宇航出版社

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

航天器着陆缓冲机构 / 杨建中著. --北京:中国
宇航出版社, 2015. 5

ISBN 978-7-5159-0915-8

I. ①航… II. ①杨… III. ①航天器着陆—缓冲装置
IV. ①V448.233

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 071570 号



责任编辑 马 航

责任校对 祝延萍

封面设计 文道思

出 版
发 行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号
(010)68768548

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900
(010)68768541

(010)88530478(传真)

(010)68767294(传真)

零售店 读者服务部
(010)68371105

北京宇航文苑

(010)62529336

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2015 年 5 月第 1 版

2015 年 5 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230

开 本 1/32

印 张 8

字 数 230 千字

书 号 ISBN 978-7-5159-0915-8

定 价 68.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

序

深空探测活动是人类走出地球，进一步了解宇宙、认识太阳系、探索地球与生命起源及其演化规律的重要手段，它的开展能够有效促进地球与行星科学、空间天文学、空间物理学、空间材料科学、空间环境科学等基础学科的交叉渗透与创新发 展，促进空间资源的开发和利用。我国开展深空探测活动，必将为国民经济的可持续发展注入新的活力，为实现中国梦增添正能量。

深空探测技术是国家综合国力与科技水平的集中体现，也是各航天强国竞相角逐的航天技术的新高地。在深空探测领域，地外天体软着陆探测已经成为最重要的探测方式之一，而着陆缓冲机构是实施软着陆探测的一种常用缓冲装置，其性能是否可靠直接关系到软着陆探测的成败。我国“嫦娥三号”探测器在月面软着陆探测任务的圆满成功，充分体现了近年来我国深空探测技术的快速发展，展示了我国在航天领域所取得的突出成就。而着陆缓冲机构技术的突破、发展及应用，为“嫦娥三号”月面着陆探测任务的圆满成功奠定了坚实的基础。

航天器着陆缓冲机构主要用于缓冲航天器着陆时的冲击，防止着陆过程中由于冲击过大而导致人员的伤害或仪器设备的损毁。除此之外，它一般还应具有压紧收拢、展开锁定、长期支撑、着陆指示等多种功能，是一种典型的、复杂的多功能航天器机构。它的研究一般涉及到机构构型综合、运动学、动力学、材料学、摩擦学、土壤力学、传感器与测量等多个学科，属于典型的综合性交叉学科领域，具有较大的理论与技术难度。

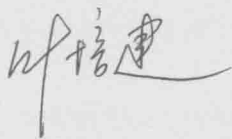
该书是作者及其团队十余年研究成果的结晶，是我国第一部全

面、系统、深入地介绍航天器着陆缓冲机构的专著。书中概述了航天器的着陆方式、着陆特点以及着陆缓冲机构的基本研究内容，指出了当前技术发展中所存在的问题及未来技术发展的主要方向，并重点介绍了着陆缓冲方法、着陆缓冲机构设计方法与制造过程、地面验证方法、着陆过程仿真分析方法等内容。可为未来新型着陆缓冲机构的研究与工程研制提供有力指导。

作者长期工作在第一线，通过在实践中发现问题、解决问题、总结提高，而写成此书。因此，该书既有一定的理论水平，又有着很强的工程实用性，是一部值得肯定和阅读的专著。该书的出版将对我国航天器着陆缓冲技术的稳健发展起到有力的支撑和促进作用，同时也将为我国载人航天和深空探测技术的进一步发展奠定坚实的理论与技术基础。

作为一名老航天人、作者的同事，我很愿意看到这样的专著出版。这不仅体现了近年来我国航天技术的持续、健康发展，也从一个侧面标志着又一代航天人从成长走向成熟。他们不仅能出科研成果，也能出学术著作。我相信在今后我国航天技术更快、更好的发展历程中，更加年轻的一代航天人又将快速成长起来。

中国科学院院士



“嫦娥一号”月球探测器总指挥、总设计师

2015年1月1日

前 言

航天器着陆缓冲机构是一种重要的航天器机构，它是在载人航天及深空探测技术的带动下逐渐发展起来的，主要用于缓冲航天器返回地面或在地外星体表面着陆时的冲击载荷，保证人员及相关仪器设备的安全着陆。本书介绍了航天器着陆缓冲机构的类别和特点，总结了国内外相关研究成果，指出了当前技术发展中所存在的问题及未来技术发展的主要方向，在此基础上重点介绍了着陆缓冲方法、着陆缓冲机构设计方法与制造过程、地面验证方法、着陆过程仿真分析方法等内容，力求使读者系统地了解、把握着陆缓冲机构的研究内容、研究方法和研制过程。

本书共分5章。第1章“绪论”，概述航天器的着陆特点、着陆缓冲机构的研究现状、研究内容、目前存在的问题以及发展趋势等。

第2章“着陆缓冲方法”，介绍着陆缓冲方法的主要类别、特点及其工程应用中应注意的问题，并介绍了缓冲方法的综合评价与缓冲力测试、验证方法等。

第3章“设计方法与制造过程”，介绍着陆缓冲机构的功能、组成及其工作原理，并介绍了基于能量法的着陆缓冲机构设计方法、常见组件的结构形式以及生产过程中的重点控制环节等。

第4章“地面验证试验”，系统介绍着陆缓冲机构地面验证试验的项目、目的、方法及注意事项等，并介绍了基于小子样理论的地面可靠性验证与评估方法以及典型试验的结果等。

第5章“着陆过程仿真分析”，介绍着陆过程动力学仿真分析参数化建模应考虑的主要因素以及建模与分析过程，并介绍了基于蒙特卡洛法的着陆稳定性仿真分析方法和着陆缓冲机构数字化集成方

法等。

本书承蒙南京航空航天大学聂宏教授审阅，并提出了许多宝贵意见。“嫦娥一号”月球探测器总指挥、总设计师叶培建院士在百忙之中为本书作序。作者对两位专家为本书出版所付出的辛勤劳动表示衷心的感谢。

北京航空航天大学王春洁教授和宋顺广博士为本书第5章提供了十分宝贵的资料，并对该章的内容提出了宝贵意见。中国空间技术研究院曾福明高级工程师、满剑锋高级工程师、吴琼博士、朱汪工程师、罗敏高级工程师、徐青华高级工程师，南京航空航天大学陈金宝副教授等对本书的相关内容提出了宝贵意见。研究生汪健、张朴真为本书文字、图表的编辑及校对做了大量工作。本书的出版还得到了中国空间技术研究院总体部林益明研究员、王永富研究员以及“嫦娥三号”月球探测器两总系统的大力支持，在此一并表示衷心感谢。

本书是在吸收前人研究成果的基础上，结合我们研究团队在航天器着陆缓冲领域十余年的研究成果撰写而成的。本书的问世离不开着陆缓冲研究团队全体成员的艰苦奋斗和忘我工作，离不开协作单位的通力合作与大力支持。在此谨向对本书研究成果做出贡献的每一位成员致以诚挚的谢意！

本书适合从事航天器着陆缓冲、航空器着陆缓冲及地面碰撞缓冲研究的工程技术人员、学者及相关专业的研究生参考。

由于作者知识和水平有限，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正。

杨建中

2015年1月

于北京航天城

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 深空软着陆探测技术的发展	1
1.2 航天器着陆的特点及类别	3
1.2.1 着陆准备及着陆特点	3
1.2.2 航天器的着陆类别	4
1.3 着陆缓冲机构的特点及类别	6
1.3.1 着陆缓冲机构的特点	6
1.3.2 着陆缓冲机构的类别	7
1.4 着陆缓冲机构研究的理论基础	11
1.4.1 常用运动副的种类及表示方法	11
1.4.2 机构的自由度分析	14
1.5 着陆缓冲机构研究的主要内容	15
1.5.1 缓冲方法研究	15
1.5.2 布局研究与结构设计	16
1.5.3 加工工艺研究	16
1.5.4 地面试验验证	17
1.5.5 着陆过程仿真	17
1.5.6 其他相关研究	17
1.6 目前研究存在的问题及发展展望	18
1.6.1 着陆缓冲机构研究存在的问题	18
1.6.2 着陆缓冲机构研究发展展望	19
参考文献	21

第 2 章 着陆缓冲方法	24
2.1 概述	24
2.2 多胞材料变形法	25
2.2.1 泡沫铝及其缓冲力特点	25
2.2.2 铝蜂窝及其缓冲力特点	27
2.3 薄壁金属管变形法	35
2.3.1 轴向压溃变形法	35
2.3.2 扩径变形法	39
2.3.3 翻转变形法	42
2.4 金属切削法	44
2.5 金属杆拉伸变形法	45
2.6 复合材料破碎法	47
2.7 其他缓冲方法	48
2.7.1 气液阻尼法	48
2.7.2 电磁阻尼法	50
2.7.3 磁流变液法	51
2.7.4 摩擦阻尼法	53
2.7.5 局部结构变形法	54
2.8 缓冲方法的综合评价	56
2.9 缓冲方法的选取与组合	58
2.10 缓冲力特性验证	60
参考文献	63
第 3 章 设计方法与制造过程	66
3.1 概述	66
3.2 设计应注意的基本问题	68
3.3 技术要求及任务分析	69
3.3.1 技术要求分析	69
3.3.2 任务分析	71
3.4 功能及组成分析	72

3.4.1	着陆缓冲机构功能分析	72
3.4.2	着陆缓冲机构组成分析	73
3.5	环境影响分析及对策	74
3.6	关键几何参数分析	77
3.6.1	安装布局与构型分析	77
3.6.2	关键几何参数分析与估算	78
3.7	缓冲能力分析 with 确定	81
3.8	着陆缓冲机构方案设计	83
3.8.1	组成确定	83
3.8.2	常用材料分析与选择	84
3.8.3	主缓冲器方案设计	87
3.8.4	辅助缓冲器方案设计	89
3.8.5	足垫方案设计	92
3.8.6	润滑设计	94
3.8.7	热设计	95
3.8.8	可靠性设计	96
3.8.9	其他设计内容	97
3.9	着陆缓冲机构方案分析	97
3.9.1	自由度分析	98
3.9.2	接头载荷分析	99
3.9.3	静力分析	102
3.9.4	模态分析	107
3.9.5	展开动力学分析	109
3.9.6	着陆过程分析	111
3.9.7	缓冲性能综合评价	113
3.10	座椅缓冲机构方案设计	115
3.10.1	座椅缓冲机构的功能及组成	115
3.10.2	人—椅系统的运动关系	117
3.10.3	平均缓冲力确定	119
3.10.4	缓冲组件设计	119

3.10.5 缓冲性能评价	121
3.11 着陆缓冲机构制造	123
参考文献	127
第4章 地面验证试验	129
4.1 概述	129
4.2 缓冲摩擦力测试	130
4.2.1 测试目的及测试方案	130
4.2.2 测试过程分析与结果处理	132
4.3 展开摩擦力测试	135
4.3.1 测试目的和测试方案	135
4.3.2 测试过程分析与结果处理	137
4.4 主缓冲器缓冲性能试验	139
4.5 足垫承载及缓冲能力试验	141
4.6 压紧释放装置试验	143
4.7 整机展开性能试验	146
4.7.1 试验目的及试验方案	146
4.7.2 试验过程及结果分析	146
4.8 整机缓冲性能试验	149
4.8.1 试验目的和试验方案	149
4.8.2 试验过程及结果分析	152
4.9 整机环境试验	154
4.9.1 力学环境试验	154
4.9.2 真空热试验	156
4.10 多机联合性能试验	157
4.10.1 着陆缓冲能力试验	157
4.10.2 着陆稳定性试验	162
4.11 可靠性鉴定试验	164
4.11.1 释放可靠性鉴定试验	165
4.11.2 展开可靠性鉴定试验	172

4.11.3 缓冲可靠性鉴定试验	175
4.11.4 着陆稳定性鉴定试验	178
4.11.5 触发指示可靠性鉴定试验	181
4.11.6 全任务阶段的可靠性评估方法	183
参考文献	185
第5章 着陆过程仿真分析	186
5.1 概述	186
5.2 着陆缓冲机构参数化建模	187
5.3 着陆缓冲机构动力学分析方法	188
5.3.1 柔性多体动力学建模方法	188
5.3.2 接触碰撞力学建模	198
5.3.3 着陆器着陆过程动力学建模	201
5.4 着陆缓冲试验预分析	209
5.4.1 单机缓冲试验预分析	209
5.4.2 组合缓冲试验预分析	210
5.5 着陆稳定性仿真分析	212
5.5.1 着陆稳定性判据	212
5.5.2 初始着陆工况	213
5.5.3 着陆极限工况及稳定性边界	215
5.5.4 极限适应能力分析	217
5.6 着陆缓冲机构可靠性仿真分析	218
5.6.1 蒙特卡洛法	219
5.6.2 着陆缓冲机构可靠性分析	222
5.7 着陆过程仿真模型修正	231
5.8 着陆缓冲机构数字化集成方法	233
5.8.1 数字化集成方法与平台框架	233
5.8.2 设计分析数据管理及流程集成	235
5.8.3 着陆缓冲机构设计分析系统	237
参考文献	241

第1章 绪论

1.1 深空软着陆探测技术的发展

到目前为止，人类主要开展了三个方面的航天活动，即发射人造地球卫星、实施载人航天及开展深空探测。随着航天技术的发展，后两方面的活动有时融为一体，从而形成载人深空探测。航天活动的深度、广度和技术成熟度是一个国家科技水平和综合国力的集中体现，其中的深空探测具有探索性更强、涉及技术领域更广、技术难度更大、实施风险更高等特点，同时对相关科学发现、技术和产业发展的影响也更加深远，因此，目前许多国家都努力通过该项活动向世人展现日益强盛的综合国力和持续提高的科技水平。

俄罗斯（前苏联）、美国、欧空局、日本、中国、印度等国家或组织均开展了月球探测活动。以美国为首的航天发达国家还对太阳系中的多颗行星及其部分卫星、一些彗星和小行星进行了探测。探测方式包括从目标星体旁飞过、环绕目标星体飞行，获取初步的遥感和探测信息；撞击目标星体、在目标星体表面软着陆，对着陆点附近进行较为深入的探测；在目标星体表面软着陆，并采集样品返回地球，对相关样品做全面深入的研究等^[1-2]。这几种探测方式相互支持，相互补充，相互印证。其中软着陆探测的深度和精确度一般远优于遥感探测方式，且该方式还可以为未来实施载人深空着陆探测、建立永久性探测基地、开发深空资源、实施星际移民等活动奠定技术基础，因此，实施软着陆探测具有深远的科学意义及重大的工程价值。

实施深空探测的航天器一般称为探测器，其中着陆的部分常称

为着陆器。除了上述深空探测活动中的软着陆外，还有一种十分重要的软着陆，即载人飞船或返回式卫星返回地面时的软着陆。这两种软着陆方式的动力学特性具有一定的相似性，为了陈述方便，统称其为航天器软着陆。在航天器软着陆过程中，一般需要通过着陆缓冲装置产生不可恢复或可控恢复的变形，将航天器所具有的成千上万焦耳的初始动能吸收掉，使航天器由运动变为静止，同时延长冲击载荷的作用时间，降低作用到航天员或仪器设备上的冲击载荷的幅值，从而保证航天员或仪器设备的安全。如果缓冲装置选择不当，那么着陆过程中航天员或仪器设备可能会受到严重的伤害或损伤，因此，着陆缓冲装置的性能是否可靠直接关系到整个软着陆探测计划的成败，它的研制是软着陆航天器研制中最为关键的内容之一。

航天器着陆冲击的缓冲思路与汽车碰撞的防护思路是相似的，但由于空间环境与地面环境等约束条件的不同，二者的具体实现方法往往具有很大的差异，而且前者的可靠性要求远比后者高。

与航天器的全寿命周期相比，软着陆过程是非常短暂的，但也是非常危险的。其危险性体现在对着陆星体表面的环境条件，如大气压力、环境温度、地形、地貌等把握不足，从而可能导致着陆器过热、仪器设备因极端温度而损坏、着陆点偏离目标位置、着陆器降落至尖锐的岩石之上或深坑之中、着陆器翻倒而偏离预期的姿态等结果，进而导致科学仪器无法正常开展探测活动。因此，对于软着陆航天器的研制，除了要考虑一般航天器研制所要考虑的所有问题外，还必须充分考虑着陆时的冲击、着陆区地形地貌、着陆区土壤力学特性等问题，有的还要考虑气动力、气动热等因素的影响。正是这些问题的存在及其复杂性，使得软着陆航天器及着陆缓冲装置的研制难度大大增加。

为了便于定量评价着陆过程的成败，一般需要定义多种参数，如冲击响应的力学参数，包括着陆器上特征点的最大响应加速度及其作用时间，着陆器着陆后的姿态参数等。有时还要根据特殊设备

的要求,定义其他参数,如着陆器上的特征点到目标星体表面的距离等。

着陆探测任务成功的首要条件之一是稳定着陆。稳定着陆的可靠性受制于着陆瞬时着陆器相对着陆面的竖直速度、水平速度和姿态以及着陆区的地形地貌、表层土壤力学特性、重力加速度等因素,因此必须对这些因素进行深入、系统的分析与研究,以全面把握它们的综合影响。习惯上常把这些影响因素称为着陆初始条件。

1.2 航天器着陆的特点及类别

1.2.1 着陆准备及着陆特点

航天器在目标星体表面着陆前,一般都需要通过一段时间进行减速,常称这段时间为下降段。当目标星体表面无大气时,一般采用大推力发动机实现减速。在发动机羽流等的影响下,其周围仪器设备的温度会迅速升高,同时还会因发动机的工作引起相应的振动载荷。当目标星体表面有大气时,也可以采用降落伞实现减速,在降落伞打开前,航天器迎风面的部位常会因为气动热的作用,导致航天器的局部温度很高。为避免下降段的高温对相关仪器设备带来影响,需要采取严格的防热措施。另外,下降段一般还会伴有一系列的动作,如弹抛降落伞伞舱盖,以便打开降落伞;弹抛防热结构或推进剂储箱,以减少着陆质量,从而减轻着陆缓冲装置的工作压力。在减速的同时,还需要对航天器的姿态进行控制,以保证航天器以期望的姿态着陆。下降到一定高度后,还要根据对着陆区情况的识别结果,判断着陆器是否需要横向移动,以确保将着陆点的地形地貌条件控制在要求的范围内。这一系列动作的成败,都可能影响最终的安全着陆。

航天器的着陆过程具有以下两个显著特点:

第一,不确定因素多。与在目标星体旁飞过、绕目标星体飞行

等方式相比，航天器着陆过程中的不确定因素多，例如着陆区表面的地形地貌、土壤力学特性等影响因素，往往具有一定的随机性。另外着陆速度、着陆姿态等的精确控制也有一定的难度。这些不确定因素，大大增加了安全着陆的难度。

第二，主动控制难。从航天器与目标星体表面接触到与目标星体相对静止，一般只有数百毫秒的时间（特殊情况下着陆时间可能较长），这一过程中，一般难以实施主动控制，而只能按预定的程序执行相关的动作，从而使安全着陆的风险进一步升高。

1.2.2 航天器的着陆类别

按航天器着陆的目标星体不同，一般可以分为地球表面着陆、月球表面着陆、火星及其他大型行星表面着陆、彗星及小行星表面着陆等类型。不同星体表面的气体密度、风速、环境温度、地形地貌、土壤力学特性、重力加速度等条件不同，着陆时的速度和着陆器质量也往往不一样，所采取的着陆方式或缓冲方法也有所区别^[3-5]。

按航天器着陆瞬时的速度不同，一般可以分为硬着陆、软着陆。硬着陆时的初始速度一般为每秒数十米，着陆过程中的最大冲击响应加速度一般达数百 g （地面重力加速度， 9.8 m/s^2 ）乃至上万 g ，着陆目的—般是穿入目标星体表面一定距离，并测量穿入过程中的力学参数等。为此要求着陆器有足够的动能，所有着陆过程或着陆后需要工作的仪器设备都要能够承受这样的冲击载荷。软着陆时的速度一般为每秒数米或十余米，着陆过程中的最大冲击响应加速度一般为十几个 g 或几十个 g ，着陆目的—般是在目标星体表面进行较长时间的探测（特殊情况除外），包括表面土壤成分及颗粒组成分析、土壤力学参数测量、大气成分分析、着陆点周围地形地貌观测等。

按采用的着陆缓冲装置不同，可以分为降落伞着陆、缓冲气囊着陆、着陆缓冲机构着陆、制动发动机着陆等方式，上述情况下的