



国防特色学术专著·航空宇航科学与技术



陕西出版资金精品项目

National Defense Monograph



# 航天器返回与进入的轨道设计

北京空间机电研究所 组织编写

李颐黎 著

西北工业大学出版社



国防特色学术专著·航空宇航科学与技术



陕西出版资金精品项目

# 航天器返回与进入的 轨道设计

北京空间机电研究所 组织编写

李颐黎 著

西北工业大学出版社

## 内 容 提 要

本书是密切结合返回与进入式航天器研制工程的一本学术专著。本书对国内和国外航天器(重点是返回式人造卫星和载人飞船)的进入与返回的轨道设计作了较全面的论述,其中包括著者多年来在中国返回式卫星和神舟号载人飞船返回的轨道设计领域所做出的创新性成果。本书在飞行器设计和航天器飞行力学领域具有较高的学术价值,并具有较高的工程实用性。

全书共 10 章。内容包括概论、航天器进入轨道的近似理论与初步分析、弹道式再入航天器的返回轨道设计、载人飞船的返回轨道设计、载人飞船的救生轨道设计、航天飞机的返回轨道设计、在航天器尾流区中的分离动力学设计、航天器回收轨道设计、可控翼伞系统归航轨道设计和航天器下降到无大气层天体的轨道设计。

本书适用于从事返回与进入式航天器研究、设计、生产、试验和应用的工程技术人员阅读,也可作为高等院校有关专业的教学参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

航天器返回与进入的轨道设计/李颐黎著. —西安:西北工业大学出版社,2014.12  
ISBN 978-7-5612-4203-2

I. ①航… II. ①李… III. ①航天器轨道—设计 IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 280056 号

## 航天器返回与进入的轨道设计

李颐黎 著

责任编辑 孙倩

\*

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844 传真:029-88491147

<http://www.nwpup.com> E-mail: fxb@nwpup.com

陕西向阳印务有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:15.75 彩插:4 字数:378千字

2015年2月第1版 2015年2月第1次印刷

ISBN 978-7-5612-4203-2 定价:45.00元

## 作者简介

**李颐黎** 1935年11月生，辽宁省沈阳市人，现任北京空间机电研究所研究员、北京航空航天大学兼职教授、哈尔滨工业大学兼职教授。1991年荣获“航空航天部有突出贡献专家”称号，1992年起享受国务院颁发的政府特殊津贴，1985—2004年先后获得部级科技进步奖二等奖10项，2004年荣获国家科学技术进步奖特等奖。



李颐黎

1958年毕业于北京大学数学力学系力学专业，一直从事火箭和航天器系统的研究和设计工作。1963—1964年在钱学森教授的指导下进修星际航行技术。1965—1967年在七机部第八设计院担任工程组长，从事长征1号运载火箭和返回式卫星设计工作。1974—1978年担任工程组副组长，从事我国返回式卫星回收系统的研制。1979—1984年先后担任研究室副主任、主任，主持运载火箭总体设计。1986—1992年任所高技术组副组长、组长，从事中国载人航天技术发展途径研究和多用途飞船概念研究。1992—2002年担任神舟号飞船总体副主任设计师兼应急救援分系统主任设计师、研究员。2002—2003年任神舟号飞船主任设计师顾问、研究员。2004—2006年任研究员、飞船工程专家组成员。2007—2014年任研究员、所技术专家委员会委员、神舟7号飞船专家组成员、探月工程三期“再入返回”专家组成员等。

出版有《航天器进入与返回技术》《载人航天器技术》等著作，李颐黎任副主编。2011年出版有《巡天神舟——揭秘载人航天器》，2013年出版有《中国载人航天技术发展途径研究与多用途飞船概念研究文集（1986年至1991年）》，李颐黎任主编。



▲ 1999年12月3日，北京大学召开庆祝神舟号飞船首飞成功报告会，聘请李颐黎研究员作报告。图为报告会后李颐黎（左）与北京大学教授、中国科学院院士王仁（右）握手致意。



▲2003年10月14日，李颐黎（右一）在北京航天飞行控制中心参加神舟5号载人飞船的飞控任务。



▲2003年10月15日，李颐黎（左）与神舟号飞船系统总设计师、中国工程院院士戚发轫在一起。



▲2003年10月15日，李颀黎（左）与中国载人航天工程总设计师王永志院士（右）在北京航天飞行控制中心的指挥大厅。

▶2003年10月16日6时23分，神舟5号载人飞船返回舱安全着陆，航天员杨利伟自主出舱，实现了中国人的千年飞天梦想。当晚，北京航空航天大学举办神舟5号功臣、北航校友与师生见面会，戚发轫、施金苗、李颀黎应邀参加会议。图为李颀黎（站立者）讲话。



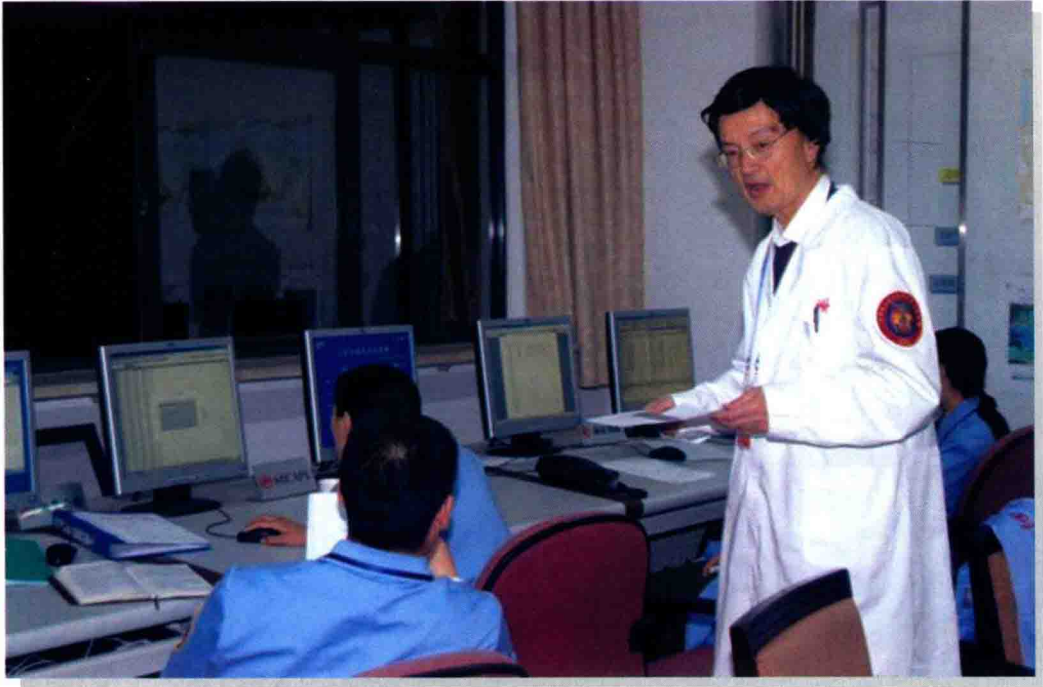




▲ 2004年12月3日在北京航天医学工程研究所召开的迎新航天人座谈会上（自左至右：聂海胜、杨利伟、翟志刚、陈善广、李颀黎）。

▶ 2005年10月，在神舟6号载人飞船在轨飞行控制期间，李颀黎（右）向北京航天飞行控制中心气象组了解着陆场气象状况。

▶ 2008年9月，在神舟7号载人飞船飞行控制工作期间，中国空间技术研究院院长杨保华（右）亲切看望神舟7号飞船专家组成员李颀黎（左）。





▲ 2011年9月29日晚，李颐黎（中）、马惠廷（右）做客中国航天网联合搜狐新闻，畅谈长征2号F T1运载火箭发射天宫1号目标飞行器。

# 序

2015年11月29日是我国第一颗返回式遥感卫星按预定时间返回我国大地,取得了预定的遥感试验资料40周年的日子,2015年10月16日是我国第一艘载有首飞航天员杨利伟的神舟5号载人飞船安全返回12周年的日子,2015年8月21日是北京空间机电研究所成立57周年的纪念日,以庆祝这三个重要的纪念日为契机,北京空间机电研究所李颐黎研究员经多年来呕心沥血,潜心钻研所著的《航天器返回与进入的轨道设计》一书现在公开出版了!对此,我表示衷心的祝贺!

北京空间机电研究所成立于1958年8月21日,是我国最早从事空间技术研究的单位之一,目前隶属于中国空间技术研究院。从建所之初的中国科学院1001设计院到上海机电设计院,从七机部八院到北京空间机电研究所,尽管其隶属关系、领导体制、名称、地点、研制任务和专业发展几经调整,但研究所发展航天、富国强军的历史使命没有变,立志航天、进军太空的决心没有变,敢想敢为,争创一流的创新精神没有变。在中央领导的亲切关怀和上级的正确领导下,研究所紧跟时代步伐,开拓进取、顽强拼搏,取得了举世瞩目的成就。1960年2月,研究所研制的我国第1枚液体探空火箭T-7M成功地飞上蓝天,揭开了我国空间探测活动的序幕。毛泽东主席视察时称赞它的发射成功是一项“了不起”的成就。至1987年,研究所共研制发射了3代16种型号近200枚探空火箭。1965年至1967年研究所创造性地将探空火箭技术和导弹技术结合起来,提出了我国第1枚卫星运载火箭长征1号的技术方案并完成了初样研制,为长征1号首次发射成功奠定了坚实的基础;我国第1颗卫星东方红1号遨游太空,由研究所研制的卫星观测裙实现了中央领导提出来的“看得见”的要求。研究所还提出了我国返回式卫星的技术方案,承担并圆满完成了返回式卫星回收着陆分系统的研制,使我国成为世界上第3个掌握卫星回收着陆技术的国家。研究所从1967年开始承担空间光学遥感器的研制任务。1975年研究所研制的我国第一代胶片型航天光学遥感相机随返回式卫星作轨道飞行,获取了有价值的空间遥感资料,这一成果使我国成为世界上第3个掌握空间遥感技术的国家。研究所在1979年至1985年进行了运载火箭的研制,取得了阶段性的成果。当1986年3月我国启动国家863计划航天领域项目研究时,研究所勇敢、主动地承担了我国载人航天技术发展途径研究和多用途飞船概念研究工作,成立了直属所领导的高技术组,1986年到1990年该组成为我国航天界中国载人航天技术发展途径研究的主力军之一,成为由863计划航天领域专家委员会和其专家组资助的从事多用途飞船概念研究的唯一单位。

颐黎完成了《有风情况下半弹道式再入载人飞船返回轨道计算方法》一文,该文是神舟号飞船系统关键技术攻关项目中的一个课题。

在航天器回收着陆段的飞行动力学方面,李颐黎是我国航天器回收着陆系统动力学分析领域的奠基者和开拓者之一。1974年李颐黎首次完成了详细的返回式卫星回地轨道和回收控制的研究,该项研究科学地给出了使我国返回式卫星为在卫星返回舱弹射底盖时满足弹盖条件而设计的回地轨道,并科学地确定了回收控制方法。1974年至1978年以李颐黎为主开展了《返回式卫星再入舱底盖分离动力学研究》。这项研究是首次在我国回收技术中考虑在高速运动物体尾流中分离体的动力学特性,取得了满意的成果。李颐黎是飞船定点着陆技术研究的奠基者之一。1988年起他开始了滑翔伞系统轨道计算和定点着陆研究,为国家高技术航天领域专家委员会提供了重要的研究成果。

1995年李颐黎主持并参与完成了神舟飞船系统关键技术项目“飞船应急救援轨道与接口分析”的攻关工作,他编写了《飞船应急救援轨道与接口分析》技术报告,解决了我国神舟号飞船应急救援返回轨道设计中的难题。

李颐黎著的《航天器返回与进入的轨道设计》一书是一部密切结合工程实际的高水平的学术专著,体现了著者在结合我国返回式卫星和神舟号飞船返回轨道设计等技术方面取得的创新性成果。本书的出版将会促进我国航天器返回技术与航天器进入技术的发展。

最后,感谢“国防特色学术专著·航空宇航科学与技术”项目及“陕西出版资金精品项目”对本书出版的大力支持。



北京空间机电研究所所长 岳涛

2015年2月26日

# 前 言

本书是关于航天器进入与返回技术领域的一部学术专著。

航天器返回与进入的轨道设计,包括航天器的进入轨道设计和航天器的返回轨道设计。航天器的进入轨道设计包括航天器进入有大气层的行星(如地球、火星、金星等)的轨道设计,广义地说也包括在没有大气层的天体(如月球)上降落的轨道设计。航天器的返回轨道设计是指返回式航天器(如返回式卫星、卫星式载人飞船、载人登月飞船和航天飞机等)在完成预定任务后返回地球的轨道设计,广义地说,也包括应急救生轨道设计等。

航天器返回与进入的轨道设计是航天器总体和相关分系统的顶层设计,是创造性的设计,是综合性的设计。航天器返回与进入轨道设计的好坏将直接关系到航天器最终功能、性能、研制成本及周期是否满足用户要求,并且是否是最优的。

全书共分10章。第1章概论,第2章航天器进入轨道的近似理论与初步分析,第3章弹道式再入航天器的返回轨道设计,第4章载人飞船的返回轨道设计,第5章载人飞船的救生轨道设计,第6章航天飞机的返回轨道设计,第7章在航天器尾流区中的分离动力学设计,第8章航天器回收轨道设计,第9章可控翼伞系统归航轨道设计和第10章航天器下降到无大气层天体的轨道设计。

本书突出了工程实用性、系统性、完整性和先进性,全面论述了航天器返回与进入轨道的设计理论和设计方法,并且结合笔者多年来的工作实践与成果,以具体的航天器的返回与进入轨道设计为例作了详细的说明。

在本书写作和出版过程中,得到了北京空间机电研究所岳涛所长、刘兆军副所长、高树义副所长等所领导支持,北京空间机电研究所荣伟研究员、黄伟研究员对本书的编写提出了宝贵的意见,特向他们表示衷心的感谢!对本书出版做了大量工作的所科技委陈晓丽秘书长、朱晓杰副秘书长、郑凤仙女士等表示诚挚的谢意!

由于水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

著 者

2015年2月

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 航天器进入与返回 .....	1
1.2 进入式与返回式航天器的分类 .....	4
1.3 航天器的返回与进入轨道 .....	6
1.4 航天器返回与进入轨道设计的基础知识 .....	9
<b>第 2 章 航天器进入轨道的近似理论与初步分析</b> .....	31
2.1 进入轨道的基本运动方程.....	31
2.2 进入行星大气轨道的统一理论.....	36
2.3 进入走廊.....	42
<b>第 3 章 弹道式再入航天器的返回轨道设计</b> .....	46
3.1 不控制升力的弹道式再入航天器返回轨道设计方法.....	46
3.2 无升力弹道式再入航天器的返回轨道设计.....	98
<b>第 4 章 载人飞船的返回轨道设计</b> .....	100
4.1 对载人飞船系统总体设计的要求 .....	100
4.2 载人飞船返回轨道设计参数选择 .....	102
4.3 载人飞船返回轨道设计的理论 .....	106
4.4 以第二宇宙速度再入大气层的半弹道式再入航天器的返回轨道设计实例 .....	117
4.5 有风情况下载人飞船返回轨道的计算方法 .....	120
<b>第 5 章 载人飞船的救生轨道设计</b> .....	141
5.1 发射段大气层内救生轨道设计 .....	141
5.2 发射段大气层外救生轨道设计 .....	156
5.3 运行段应急救生方案 .....	157

<b>第 6 章 航天飞机的返回轨道设计</b> .....	163
6.1 航天飞机离轨段与过渡段的轨道设计 .....	163
6.2 航天飞机再入段的轨道设计 .....	164
6.3 航天飞机着陆段轨道设计 .....	175
<b>第 7 章 在航天器尾流区中的分离动力学设计</b> .....	182
7.1 回收舱与底盖在尾流区中的分离动力学 .....	182
7.2 在回收舱尾流中弹伞的分离动力学 .....	192
<b>第 8 章 航天器回收轨道设计</b> .....	203
8.1 术语、坐标系及符号的定义.....	203
8.2 航天器回收轨道计算的数学模型 .....	206
8.3 参数和初值选取 .....	209
8.4 卫星回收轨道的计算 .....	210
8.5 飞船回收轨道的计算 .....	210
8.6 返回式卫星回收系统的控制 .....	212
<b>第 9 章 可控翼伞系统归航轨道设计</b> .....	217
9.1 非比例归航控制翼伞系统的基本运动方程 .....	218
9.2 具有控制死区的非比例归航控制翼伞系统飞行轨道的计算方法 .....	226
9.3 飞船定点着陆方案概念研究 .....	229
<b>第 10 章 航天器下降到无大气层天体的轨道设计</b> .....	237
10.1 下降到月球的轨道的分段.....	237
10.2 下降轨道机动段.....	238
10.3 动力下降段.....	239
10.4 登月舱的着陆精度.....	241



# 第1章 概 论

## 1.1 航天器进入与返回

### 1.1.1 航天器的进入和返回技术

航天器沿其运行轨道直接到达,或者离开它原来的运行轨道沿转变后的轨道到达它要着陆的天体的大气层,安全通过大气层并利用大气减速最终安全着陆在天体上的过程,称为航天器进入天体大气层的过程,或简称进入过程。进入过程的实现涉及相当广的科学和技术领域,主要有航天动力学、空气动力学、耐热结构技术、制导导航与控制技术、火箭发动机技术、测控技术、回收和着陆技术等。研究进入过程的学科称为进入技术,是由上述学科和技术的有关部分组成的一门新兴的、综合性的边缘学科。

再入过程是进入过程的一种特殊情况,指的是航天器沿其运行轨道直接进入,或者离开其原运行轨道沿转变后的轨道进入地球大气层,并通过大气用大气减速等措施,安全降落到地球上的过程。研究再入过程的学科称为再入技术。从理论上讲,进入技术与再入技术没有本质区别,所不同的只是前者航天器要进入大气层的天体是有大气层的天体,而后者则专指地球。由于绝大多数的航天器都是从地球上发射到太空轨道的,这些航天器进入地球大气层并着陆到地球上,在地球上的人看来就是再次通过地球大气层。因此,把进入地球大气层的过程称为再入过程,把进入地球大气层称为再入大气层,把研究再入过程的学科和技术称为再入技术。

航天器返回技术是使航天器脱离原来的运行轨道进入地球大气层并在地面安全着陆的技术。它包括航天器离轨技术、再入技术和回收与着陆技术。

在人类还没有在地球以外的其他天体上建立起适合于自己生存和发展的社会以前,进入太空的人(航天员)终归是要回到地面上来的。具有载人返回地面功能的航天器是返回式航天器。载人航天器除利用返回技术实现人和航天器的安全进入大气层、安全减速、耐热和安全着陆之外,还要考虑如何尽可能地利用它作为应急救生系统的基础设备。后一要求是根据现阶段航天技术发展的有关特点提出的,主要有以下几点:

①迄今载人航天运载器和航天器在其全工作过程中,还不能达到很高的可靠性以确保航天员的安全,因此,载人航天器必须有在故障危及航天员生命时的应急救生措施。

②把航天员乘坐的具有返回功能的载人航天器,同时用作运送航天员进入空间的航天器,无论从技术上和经济上看都是最佳的选择。该航天器可兼作救生航天器使用。

从以上分析,可以看到载人航天器的返回技术与救生技术的密切关系。鉴于此,本书把航天救生轨道纳入讨论的范围,专列一章(第5章)讨论这个问题。

航天器从空间轨道上安全降落到没有大气层的天体上,例如降落到月球上,所经历的过程