



国家“十一五”出版规划重点图书
空间飞行器设计专业系列教材
航天一线专家学术专著

航天器总体设计

THE SYSTEM DESIGN OF SPACECRAFT

彭成荣 编著



中国科学技术出版社

- 国家“十一五”出版规划重点图书
- 空间飞行器设计专业系列教材
- 航天一线专家学术专著

航天器总体设计

THE SYSTEM DESIGN OF SPACECRAFT

彭成荣 编著

中国科学技术出版社
· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航天器总体设计/彭成荣编著. —北京:中国科学技术出版社,2010.11

(空间飞行器设计专业系列教材)

ISBN 978-7-5046-5730-5

I. ①航… II. ①彭… III. ①航天器-设计-高等学校-教材 IV. ①V423

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第208831号

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版

中国科学技术出版社
北京市海淀区中关村南大街16号 邮政编码:100081
电话:010-62173865 传真:010-62179148
<http://www.kjpbbooks.com.cn>
科学普及出版社发行部发行
北京国防印刷厂印刷

*

开本:787毫米×960毫米 1/16 印张:44.5 字数:800千字
2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷
定价:90.00元
ISBN 978-7-5046-5730-5/V·54

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

作者简介

彭成荣 1936年生,研究员,1960年毕业于北京航空学院飞机制造专业,毕业初曾从事火箭总装设计,1967年以来一直从事卫星总体设计。曾任总体组组长、总体室主任、总体设计部主任、某卫星副总设计师、中国空间技术研究院科技委副主任。现任院科技委特邀技术顾问、总体设计部科技委顾问、某卫星任务工程副总设计师。

责任编辑 崔 玲
封面设计 中文天地
正文设计 孙 俐
责任校对 赵丽英 韩 玲 凌红霞
责任印制 安利平

内 容 提 要

本书介绍航天器总体设计基本内容和方法,包括航天任务工程系统、系统工程与方法论、航天器环境分析、总体设计概述、总体方案设计、航天任务空间几何分析、姿态动力学基础、轨道动力学基础、轨道和星座设计、有效载荷概论、遥感参数分析、通信链路概要分析、电源总体设计、航天器返回设计、总体参数预算、构型设计、总体综合设计和可靠性设计等。

本书的目标是使读者通过本课程学习和作业训练能够掌握航天器总体方案设计与总体详细设计的基本内容和初步设计方法,并且能够在任务分析的基础上编写航天器总体方案设想。本书是飞行器设计专业研究生的教材,也可供从事航天器研制技术人员参考。

总 序

我国航天技术走过了40多年的光荣历程,正面临着21世纪更加蓬勃发展的形势,需要人才,需要知识。

空间飞行器即航天器,包括卫星、飞船、空间站、深空探测器等等。空间飞行器设计专业是航天技术领域的一门主要学科,它所涵盖的知识面很宽,涉及光、机、电、热和系统工程等,是一门多学科交叉综合和工程性很强的新型学科。

本丛书是根据空间飞行器设计专业培养研究生的课程教学需求,同时考虑到空间技术领域的在职中、高级技术人员研究生水平进修的需要而编写的。因此,本丛书全面讲授空间飞行器设计专业领域的基础理论和系统的专门知识,在内容上具有足够的纵深度和宽广度、前沿性和前瞻性。本丛书的作者都是从事了几十年航天工程的高级设计师和研究员,他们把自己丰富的知识和经验很好地融入到这套丛书中,理论与实践密切结合,使本丛书具有很高的学术水平和工程实用价值。

本丛书将陆续出版。它的出版是非常值得祝贺的,相信它不仅是一套不错的研究生教材,能够为培养高级航天技术人才服务;同时又是一套优秀的学术专著,将对我国航天科学与技术的发展做出贡献。

阎桂荣

2001年9月

前 言

航天器系统是一个复杂的系统,它是由多个功能和性能不同的分系统组合而成。而这些分系统一般是由不同专业队伍设计的。如何使不同专业队伍设计的各个分系统的功能和性能,能够保证整个航天器满足用户特定任务要求,就必须要有—支总体设计队伍,通过总体设计来实现。总体设计的任务,不仅如此,而且要使所设计的分系统是合理的、可行的、经济的,从而是优化的。

所以,航天器总体设计的任务是设计一个能满足用户特定任务要求的、优化的航天器系统和其空间轨道或星座。

由于航天器总体设计是航天器设计的顶层设计,是创造性的设计,是系统性的设计,是综合性的设计,所以它是定方向、定大局、定航天器系统功能和性能的设计。因此,航天器总体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。

总体设计内容包括总体方案设计和总体详细设计两部分。全书共分18章。第1章绪论,第2章系统工程与总体设计方法概论,第3章航天器环境分析,第4章总体设计概述,第5章总体方案设计,第6章航天任务空间几何分析,第7章姿态动力学基础,第8章轨道动力学基础,第9章轨道和星座设计,第10章航天器有效载荷,第11章遥感参数分析,第12章通信链路概要分析,第13章电源总体设计,第14章航天器返回设计,第15章总体参数预算,第16章航天器构型设计,第17章总体综合设计和第18章可靠性设计。

由于航天器总体设计涉及较多专业,而且目前各学校

尚无航天器总体设计专业课程,考虑到学生和读者原来没有相关专业知识,因此在有些章节安排了基础知识,如球面三角、矩阵、矢量等基础知识。另外,再考虑航天器总体设计内容较多,所以各章也只介绍最基本的内容,深入细致的内容还需要在工作实践中去学习和积累。

由于作者水平有限,难免有错误和不当之处,请读者给予指正。

作者在航天领域工作50年,从事航天器总体设计课程教学7年,所取得的各项业绩都是与各级领导和同事们的帮助分不开的。本书的编写和出版是在中国空间技术研究院研究生部和教育委员会的大力支持下完成的。教育委员会谭维炽主任、曲广吉研究员和张照炎研究员对本书做了审校,飞行器设计专业教研组的老教授和同事们也给予了许多鼓励和支持,在此一并深表谢意!

作者
2010年10月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 人类航天工程的开端	1
1.2 航天器飞行基本原理	3
1.3 中国航天器工程的发展	6
1.4 航天任务工程系统	8
1.5 航天器工程	13
1.6 发展航天器工程的重要意义	24
第2章 系统工程与总体设计方法概论	30
2.1 系统的定义、分类和基本特性	30
2.2 系统工程	35
2.3 总体设计思维的基本观念	38
2.4 总体设计的基本方法	44
第3章 航天器环境分析	68
3.1 近地空间环境	68
3.2 空间环境效应	85
3.3 运载火箭的力学环境	96
3.4 力学环境效应	99
3.5 航天器设计的特殊要求	99
3.6 航天器设计要求的综述	103
第4章 总体设计概述	106
4.1 航天器总体设计概念	106
4.2 航天器研制阶段	114
4.3 总体设计反馈与评审	119
4.4 总体方案各阶段设计内容	123
4.5 关键技术分析	133
4.6 总体设计基本原则	135
第5章 总体方案设计	140
5.1 任务分析	140
5.2 分系统方案类型和要求	149

5.3	分系统方案论证	158
5.4	总体(本体)方案构成择优与评价	164
5.5	航天器基本构型论证	171
5.6	总体性能指标分析和综合	175
5.7	研制技术流程制定	177
5.8	分系统研制要求	180
5.9	确定总体方案过程(步骤)	186
第6章	航天任务空间几何分析	196
6.1	球面三角基础知识	196
6.2	定向天线波束覆盖计算	204
6.3	地面站跟踪弧段计算	208
6.4	太阳角计算	213
6.5	地影时间计算	214
6.6	发射窗口分析	215
第7章	姿态动力学基础	221
7.1	矩阵和矢量基础知识	221
7.2	航天器常用坐标系	225
7.3	姿态坐标变换	227
7.4	姿态动力学基本方程	232
7.5	引力梯度稳定	237
7.6	自旋稳定	242
7.7	三轴稳定	251
第8章	轨道动力学基础	258
8.1	二体问题的航天器运动	258
8.2	航天器轨道根数公式应用	266
8.3	航天器轨道摄动	272
8.4	地球非球形引力势函数	280
8.5	地球非球形引力的摄动	289
8.6	其他扰动力的摄动	298
第9章	轨道与星座设计	304
9.1	航天器轨道设计	304
9.2	轨道摄动的应用	307

9.3	航天器对地面的覆盖	311
9.4	太阳同步轨道设计的基本方法	315
9.5	航天器星座设计的基本方法	319
9.6	航天器伴随运动	328
第 10 章	航天器有效载荷	337
10.1	概述	337
10.2	有效载荷分类	338
10.3	通信卫星有效载荷	342
10.4	对地遥感卫星有效载荷	351
10.5	导航卫星有效载荷	361
10.6	科学类有效载荷	364
10.7	武器类有效载荷	368
10.8	有效载荷总体设计	370
第 11 章	遥感参数分析	375
11.1	遥感理论基础	375
11.2	相机光学系统	382
11.3	CCD 相机光电特性	386
11.4	空间分辨率	390
11.5	调制传递函数 MTF	391
11.6	信噪比	399
11.7	像质预估和评价	401
11.8	空间相机总体设计要求	404
第 12 章	通信链路概要分析	414
12.1	概述	414
12.2	通信系统接收信号的功率	417
12.3	传输损耗	420
12.4	噪声与干扰	429
12.5	载波功率与噪声功率之比	436
12.6	测控分系统通信链路概要分析	442
12.7	通信链路参数设计优化	453
第 13 章	电源总体设计	455
13.1	概述	455

13.2	空间电源简介	459
13.3	太阳电池基本特性	467
13.4	蓄电池基本特性	471
13.5	一次电源总体设计	474
13.6	静止轨道的电源分系统总体设计	479
13.7	太阳同步轨道的电源分系统总体设计	482
第 14 章	航天器返回设计	489
14.1	概述	489
14.2	可能采用的返回方法	490
14.3	返回舱返回过程	493
14.4	返回舱返回方案设计	497
14.5	返回轨道设计	502
14.6	再入大气层时的气动力	511
14.7	返回舱外形和防热结构设计	519
14.8	安全着陆和回收	529
第 15 章	总体参数预算	536
15.1	概述	536
15.2	推进剂预算	537
15.3	质量预算	544
15.4	负载功率预算	547
15.5	寿命指标分配	550
15.6	可靠性指标分配	551
15.7	精度指标分配	553
15.8	其他参数分配	556
第 16 章	航天器构型设计	560
16.1	任务和要求	560
16.2	外形设计	568
16.3	外伸部件布局设计	573
16.4	主承力构件方案设计	577
16.5	内部仪器设备总体布局	580
16.6	质量特性计算	583
16.7	其他设计	585
16.8	分析和验证	588

第 17 章	总体综合设计	591
17.1	概述	591
17.2	总装设计	592
17.3	总体电路设计	605
17.4	航天器环境试验设计	611
17.5	系统(整个航天器)综合测试设计	631
第 18 章	可靠性设计	634
18.1	概述	634
18.2	可靠性相关概念	639
18.3	可靠性建模	647
18.4	航天器可靠性预计	656
18.5	航天器可靠性分配	669
18.6	航天器故障模式、影响及危害性分析	675
18.7	故障树分析	691

第1章 绪论

1.1 人类航天工程的开端

遨游太空、探索宇宙是人类自古以来就有的美好梦想。在古代,我国就流传着嫦娥奔月的美好传说,有着腾云驾雾的遐想。

众所周知,火药和火箭皆是我国所发明。早在唐朝,孙思邈所著《丹经》中,就给出了火药的具体配方。火药的发明,可使物质的化学能转化为机械能,进而转化为动力的重大突破,使火箭的问世成为可能。火药既可以做成火箭,又可以做成各种弹药火炮。

据史料记载,在宋朝开宝三年(公元970年),冯继升向朝廷敬献火箭法,进行了表演而得到赏赐。到咸平三年(公元1000年),唐福献应用火箭原理制成战争武器。这种武器是在弓箭上绑扎一个火箭,依靠火箭反作用力加速,用以加大弓箭的射程。传说在14世纪末,我国的万户在座椅上安装了47支火箭,万户被绑在座椅上,并用双手抓住大风筝,让人点燃火箭,试图利用火箭的推力和风筝的升力飞向天空。虽然这次尝试失败了,但是,他是世界上第一个试验利用火箭飞行的人。为纪念这位勇士,科学家把在月球表面上东方海附近的一个环形山命名为万户山。

火药和火箭于13世纪中叶,由我国传到中亚,再由中亚传到欧洲。在18世纪,印度军队在抗击英国和法国军队的多次战争中曾经大量使用火箭武器,并取得良好的战果。曾在印度作战的英国人康格瑞夫(Willam Congreve)对印度军队使用的火箭做了改进。直到19世纪,火药在火箭和火炮上的应用是并驾齐驱的。到19世纪70年代以后,随着以硝化纤维素为基础的新型火药和螺旋线炮管的出现,使火炮的性能大大提高,作为射击武器的火箭逐渐被准确度高、威力大的火炮所淘汰。

但是,火箭的基本原理还是为近代火箭的发展奠定了基础。到20世纪初,火箭技术又有了新的突破。对近代火箭技术和航天飞行技术做出杰出贡献的先驱者们有三位,他们是俄国的齐奥尔科夫斯基(Циолковский. К. Э),美国的

戈达德(R. H. Goddard)和德国的奥伯特(H. Oberth)。

齐奥尔科夫斯基在1903年发表著作《利用火箭探测宇宙》，建立了著名的火箭运动的基本数学方程，提出了使用液体燃料实现星际航行的可能性，最早从理论上证明使用多级火箭可以克服地球引力进入太空。另外，他还在火箭工程实现上提出一些技术建议，例如用机械泵来提高推进剂的输送压力，用仪器来控制火箭自动飞行，用燃气舵来控制火箭发动机的推力方向等。

戈达德在1919年出版的《达到极大高度的方法》论文中提出了火箭飞行原理，指出火箭绕地球飞行需要 7.9km/s 的速度才可以不掉落回地球上。1926年，他设计并成功发射了世界上第一枚以液氧和煤油为推进剂的液体火箭，飞行距离达到 56km 。随后，他也提出了多级火箭的理论和飞往月球的设想。

奥伯特在1923年出版的《飞向星际空间的火箭》一书中指出，火箭在宇宙空间工作的基本原理，说明火箭只要能达到足够的速度，就能绕地球轨道飞行。他也对多种推进剂开展了广泛的研究。

到20世纪30年代，液体及固体火箭推进剂、高温材料、电子和控制等技术取得了很大的进展，给近代火箭的出现创造了技术条件。近代火箭武器——导弹在第二次世界大战末期开始出现。1942年10月法西斯德国成功研制和发射了V-2火箭，曾经给英国造成一定的恐慌。V-2火箭发射成功，标志着先驱者们的航天理论是可以实现的。

第二次世界大战之后，美苏两个超级大国都投入大量的人力和物力，争先恐后地发展自己的导弹和航天技术。1957年10月4日苏联首先把世界上第一颗人造地球卫星送入轨道，成为世界史上航天纪元的开端。1961年4月12日苏联又成功地用“东方一号”飞船将宇航员加加林送入太空，首次实现了人类遨游太空的幻想。苏联还是第一个向月球发射探测器、第一个发射无人探测器在月球着陆、第一个发射火星和金星探测器的国家。

美国在空间技术起步阶段落后于苏联，但很快就赶上并超过苏联。美国于1958年2月1日发射了第一颗卫星，于1969年7月16日用“阿波罗”飞船将宇航员送上了月球。后来，一共有六艘“阿波罗”飞船登月，有16人次将足迹留在月球表面。

此后，美国又于1981年4月12日首次发射并成功返回航天飞机。这段时间，苏联则致力于载人空间站的研究，于1971年4月19日把第一座空间站“礼炮号”送入轨道。

中国航天工程开始于20世纪50年代末期。从1970年4月24日第一颗卫星“东方红一号”上天到“神舟号”载人飞船和探月卫星发射已有40年时间。今

天,中国完全靠自己的力量和技术已初步建立起各类应用卫星系统,从而使中国成为举世瞩目的航天大国之一。

1.2 航天器飞行基本原理

1.2.1 宇宙速度

(1) 第一宇宙速度 V_1

一般抛射体在均匀重力场中将沿抛物线回到地面。当速度达到第一宇宙速度 V_1 时,该物体将成为一颗人造地球卫星,参见图 1-1。假设在地球“表面”发射航天器,使离心力等于地球引力,即有

$$mg_E = m \frac{V_1^2}{R_E}$$

$$V_1 = \sqrt{g_E R_E} \approx 7.91 \text{ km/s}$$

这就是第一宇宙速度 V_1 。式中, g_E 是地球表面重力加速度 (9.81 m/s^2), R_E 是地球平均半径 (6371 km), m 为抛射体质量。

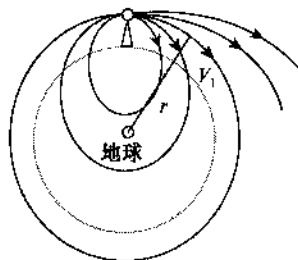


图 1-1 第一宇宙速度示意图

(2) 第二宇宙速度 V_2

第二宇宙速度 V_2 是指航天器从地球表面发射并能脱离地球引力场所需要的速度。根据能量守恒定理,其所需速度 V_2 应使航天器在地球表面的动能等于航天器从地球表面到无穷远克服引力场所做的功。地球表面的势能 A 和动能 E_E 分别为

$$A = - \int_{R_E}^{\infty} \frac{\mu m}{r^2} dr = - \frac{\mu m}{R_E} \quad E_E = \frac{1}{2} m V_2^2$$

则有

$$V_2 = \sqrt{\frac{2\mu}{R_E}} = \sqrt{2g_E R_E} = \sqrt{2} V_1 \approx 11.18 \text{ km/s}$$

式中, r 是地心距, μ 为地球引力常数, $\mu = 3.986 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$ 。

(3) 第三宇宙速度 V_3

第三宇宙速度 V_3 是指航天器从地球逃逸太阳系所需要的总速度。这需要两部分动能,一部分动能是脱离地球引力所需要的动能,另一部分动能是脱离太阳系所需要的动能。

脱离太阳系所需要的速度为

$$V'_3 = \sqrt{\frac{2\mu_s}{R_s}} \approx 42.12 \text{ km/s}$$

式中, R_s 是地球轨道平均半径, $R_s = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$, μ_s 为太阳引力常数, $\mu_s = 1.327 \times 10^{11} \text{ km}^3/\text{s}^2$ 。

由于地球的公转速度为 29.76 km/s 可以利用(使发射方向与公转方向相同), 所以, 脱离太阳系所需要的速度只需要 $V_3'' = 42.12 - 29.76 = 12.36 \text{ km/s}$ 。这样, 从地球逃逸太阳系所需要的总速度 V_3 为

$$V_3 = \sqrt{V_2^2 + (V_3'')^2} = \sqrt{11.18^2 + 12.36^2} = 16.67 \text{ km/s}$$

1.2.2 火箭发动机原理

由于要使航天器进入大气层外(170km 以上), 并获得第一宇宙速度, 使用航空发动机是不行的, 因为, 大气层外是没有空气(氧气)的。近代火箭技术和航天飞行研究先驱者们就根据中国古代发明的火药和火箭原理, 研究火箭发动机做动力。火箭喷气发动机推进的基本原理是利用化学燃料(包括燃烧剂和氧化剂)在燃烧室内燃烧产生高温高压气体, 通过发动机拉瓦尔喷管以高速喷出, 从而产生反作用推力。该反作用推力使火箭得到加速度向前加速飞行。

早期采用固体火箭发动机。由于发射火箭需要的控制仪器设备与发射的有效载荷不能承受较大的过载, 因此, 固体火箭发动机内火药必须逐渐燃烧, 以产生较小的推力(现在运载火箭设计的过载加速度一般不超过 $6g$), 其工作时间较长(一般有几十分钟)。这样, 一方面可获得较大的速度增量, 另一方面, 火箭发动机燃烧室的压力也较小, 从而发动机可做得轻些。

控制固体药剂燃烧速度方法是把药剂做成中间空心的圆柱形, 点火燃烧从中心开始, 逐渐往外烧蚀。这样, 未燃烧的药剂还起到绝热的作用。

由于装药越多, 发动机壳体就越重, 效率就越低。先驱者们就想出采用多级火箭的办法, 待第一级工作完了以后, 就将第一级火箭结构抛弃, 使效率大大提高。

由于固体火箭发动机药剂在燃烧室内燃烧的燃气温度、压力与喷出速度(可换算为比冲, 参见 1.2.4)较低, 较高的固体火箭发动机的比冲约为 285 秒。先驱者们就又研究用高比冲的液体火箭发动机。双组元液体火箭发动机使用的推进剂有酒精(燃烧剂)和液氧(氧化剂), 其比冲约为 376 秒; 有