

第一章

绪 论

“我知道地球是圆的，因为我看见了圆形；然后，又看到它还是立体的。当我往下看时，……看到印度洋上船舶拖着尾波前进，非洲一些地方出现灌木林火，一场雷电交加的暴风雨席卷了澳大利亚 1 000 英里的地区，呈现出大自然的一幅立体风景画。”

这是航天员在谈到从航天飞机上看地球的情景时的一段描述。

1.1 世界航天技术发展的概况

航天技术发展是当今世界上最引人注目的事业之一，它推动着人类科学技术的进步，使人类活动的领域由大气层内扩展到宇宙空间。航天技术是现代科学技术的结晶，是基础科学和技术科学的集成，力学、热力学、材料学、医学、电子技术、光电子技术、自动控制、计算机、真空技术、低温技术、半导体技术、喷气推进、制造工艺学等学科，以及这些科学技术在航天应用中相互交叉、渗透而产生的大量新学科，都对航天技术的发展起了重要作用。所以，航天技术是一个国家科学技术水平的重要标志。

航天技术是一门综合性的工程技术，主要包括：制导与控制技术，热控制技术，喷气推进技术，能源技术，空间通信技术，遥测遥控技术，生活保障技术，航天环境工程技术，火箭及航天器的设计、制造和试验技术，航天器的发射、返回和在轨技术等。由多种技术融于一体的航天系统是现代高技术的复杂大系统，不仅规模庞大，技术高新、尖端，而且人力、物力耗费巨大，工程周期长。时至今日，航天技术已被广泛应用到政治、军事、经济和科学探测等领域，已成为一个国家综合国力的象征。

1.1.1 人类的早期航天探索

人类很早就有遨游太空、征服宇宙的理想。宇宙的星球对人类一直充满着吸引力和神秘感，许多美丽的神话和传说，反映了人类对宇宙的向往和探索空间奥秘的心情。《嫦娥奔月》、《牛郎织女》，以及孙悟空腾云驾雾、一个筋斗十万八千里等，这些古老的神话与传说，是在生产力与科学技术水平极度低下的古代，人类幻想利用与征服天空的愿望。人类为了实现腾空飞行的理想，经历了一段相当艰难曲折的过程。很早以前，人类就做过种种飞行的尝试与探索。

在中国的西汉时期、欧洲的中世纪都有人模拟鸟类进行过飞行活动的尝试。

然而，真正航天飞行的历史是从火箭技术的历史开始的，没有火箭也就没有航天飞行。追溯源头，中国是最早发明火箭的国家。“火箭”这个词在三国时代（公元 220~280 年）就出现了。不过那时的火箭只是在箭杆前端绑有易燃物，点燃后由弩弓射出，故亦称为“燃烧箭”。随着中国古代四大发明之一的火药出现，火药便取代了易燃物，使火箭迅速应用到军事中。公元 10 世纪唐末宋初就已经有了火药用于火箭的文字记载，这时的火箭虽然使用了火药，但仍须由弩弓射出。真正靠火药喷气推进而非弩弓射出的火箭的外形被记载于明代茅元仪编著的《武备志》中见图 1.1 这种原始火箭虽然没有现代火箭那样复杂，但已经具有了战斗部（箭头）推进系统（火药筒）、稳定系统（尾部羽毛）和箭体结构（箭杆）完全可以认为是现代火箭的雏形。

中华民族不但发明了火箭，而且还最早应用了串联（多级）和并联（捆绑）技术以提高火箭的运载能力。明代史记中记载的“神火飞鸦”就是并联技术的体现；“火龙出水”就是串、并联综合技术的具体运用，如图 1.2 所示。

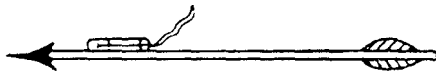


图 1.1 中国古代火箭

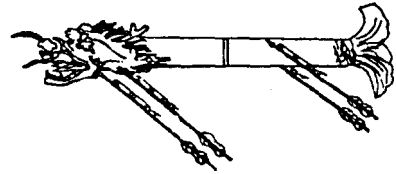


图 1.2 火龙出水

世界上第一个试图乘坐火箭上天的“航天员”也出现在中国。相传在 14 世纪末期，中国有位称为“万户”的人，两手各持一大风筝，请他人把自己绑在一把特制的座椅上，座椅背后装有 47 支当时最大的火箭（又称“起火”）。他试图借助火箭的推力和风筝的气动升力来实现“升空”的理想。“万户”的勇敢尝试虽遭失败并献出了生命，但他仍是世界上第一个想利用火箭的力量进行飞行的人。今天，为了纪念这位传奇式的人物，国际上将月球表面东方海附近的一个环形山以“万户”命名。

虽然我们的祖先发明了火药、火箭，但由于长期的封建统治，致使中华民族的聪明才智得不到充分发挥，科学技术因而停滞不前。尽管欧洲人在中国发明火箭的几百年后才学会使用火箭，然而现代火箭技术还是首先在欧洲得到迅速发展。

13~14 世纪，中国的火箭技术与其他火药兵器一同传到阿拉伯国家和印度，后又传入欧洲。至 18 世纪后期，印度军队在抗击英国和法国军队的多次战争中就大量使用火药火箭并取得了成功结果，由此推动了欧洲火箭技术的发展。曾在印度作战的英国人康格里夫（William Congreve）在 19 世纪初对印度火箭作了改进，他确定了黑火药的多种配方，改善了制造方法并使火箭系列化，最大射程可达 3 km。19 世纪 70 年代以后，火炮技术在使用性能方面有了新的突破，火箭终于被准确度很高的火炮所代替。虽然如此，这些初期火箭的原理都成为了近代火箭技术的最初基础。

1.1.2 近代航天技术的发展

19世纪末20世纪初,火箭才又重新蓬勃地发展起来。近代的火箭技术和航天飞行的发展,涌现出许多勇于探索的航天先驱者,其中代表人物有 К. З. 齐奥尔科夫斯基 (Константин Заурдович Циолковский), R. 戈达德 (Robert Goddard), H. 奥伯特 Hermann Oberth)。

前苏联科学家齐奥尔科夫斯基一生从事利用火箭技术进行航天飞行的研究。在他的经典著作中,对火箭飞行的思想进行了深刻的论证,最早从理论上证明了用多级火箭可以克服地心引力进入太空的论点。他建立了火箭运动的基本数学方程,奠定航天学的基础。他首先肯定了液体火箭发动机是航天器最适宜的动力装置,论述了关于液氢-液氧作为推进剂用于火箭的可能性,为运载器的发展指出了方向,这些观点仅仅几十年就成为了现实。他还指出过用新的燃料(原子核分解的能量)来作火箭的动力;并具体地阐明了用火箭进行航天飞行的条件,火箭由地面起飞的条件,以及实现飞向其他行星所必须设置中间站的设想。他还提出过许多的技术建议,如他建议使用燃气舵来控制火箭,用泵来强制输送推进剂到燃烧室中,以及用仪器来自动控制火箭等,都对现代火箭和航天飞行的发展起了巨大的作用。

美国的火箭专家、物理学家和现代航天学奠基人之一戈达德博士在1910年开始进行近代火箭的研究工作,他在1919年发表的《达到极大高度的方法》的论文中,阐述了火箭飞行的数学原理,指出火箭必须具有7.9 km/s的速度才能克服地球的引力,并研究了利用火箭把有效载荷送至月球的几种可能方案。戈达德博士认识到液体推进剂火箭具有极大的潜力,他从1921年开始研制液体火箭。1926年3月16日,他进行了人类首次液体火箭飞行试验并获得成功。火箭长3.04 m,飞行2.5 s达到12 m高,56 m远,速度103 km/h。这使得他成为液体火箭的实际创始人。1932年他首次用陀螺控制的燃气舵操纵火箭飞行,1935年他试验的火箭实现了超音速飞行,最大射程达20 km。

德国的奥伯特教授在他1923年出版的《飞向星际空间的火箭》一书中不仅确立了火箭在宇宙空间真空中工作的基本原理,而且还说明火箭只要能产生足够的推力,便能绕地球轨道飞行。同齐奥尔科夫斯基和戈达德一样,他也对许多推进剂的组合进行了广泛的研究。

真正的近代火箭的出现是在第二次世界大战时的法西斯德国。早在1932年德国就发射A2火箭,飞行高度达到3 km。1942年10月3日,德国首次成功地发射了人类历史上第一枚弹道导弹——V-2(A4型),并于1944年9月6日首次投入作战使用。第二次世界大战期间先后大约有4300多枚V-2导弹袭击了英国、荷兰安特卫普港和其他目标,破坏严重。V-2是单级液体火箭,全长14 m,质量为13 t,箭体直径1.65 m,最大射程320 km,发动机熄火高度96 km,飞行时间约320 s,命中精度圆公算偏差5 km,有效载荷约1 t。

V-2的成功在工程上实现了19世纪末、20世纪初航天技术先驱者的技术设想,并培养和造就了一大批有实践经验的火箭专家,对现代大型火箭的发展起到了继往开来的作用。V-2的设计虽不尽完善,但它却是人类拥有的第一件向地球引力挑战的工具,成为航天技术发展史上的一个重要里程碑。

第二次世界大战后,美、苏两国分别接收了参与V-2研制的部分专家、设备及资料,为这两个国家在第二次世界大战后迅速发展火箭和导弹技术创造了有利的条件。40年代末至50年代末,在V-2的基础上,以美国和前苏联为主研制的火箭武器得到了迅速发展,各种类型的导弹武器相继问世,并形成了一个完整的导弹武器系统。

通过各种型号导弹的研制，人们积累了研制现代火箭系统的经验并建立了初具规模的配套工业设施。至此，不少科学家意识到，人类已经初步掌握了进入空间的基本技能，冲出大气层向宇宙空间进军指日可待。

1.1.3 现代航天的里程碑

1957年10月4日，前苏联用“卫星”号运载火箭把世界上第一颗人造地球卫星送入太空，卫星呈球形，外径0.58 m，外伸4根条形天线，质量83.6 kg，卫星在天上正常工作了3个月。按照今天的标准衡量，前苏联的第一颗卫星只不过是一个伸展开发射机天线的圆球，但它却是世界上第一个人造天体，把人类几千年的梦想变成了现实，为人类开创了航天新纪元，标志着人类活动范围的又一飞跃。

1959年9月12日，前苏联发射了月球探测器“月球2号”，第一次击中月球。同年10月4日发射的“月球3号”第一次成功地拍下了月球背面的照片。

1960年3月11日，美国发射了“先驱者5号”探测器，它成为人类第一个深空探测器，从 3.65×10^7 km远处发回了探测数据。

1961年2月21日，前苏联发射了“金星1号”探测器，开始了人类对太阳系行星的探测。

1961年4月12日，前苏联成功地发射了第一艘“东方号”载人飞船，尤里·加加林成为人类第一位航天员，揭开了人类进入太空的序幕，开始了世界载人航天的新时代。

1962年8月27日，美国发射的“水手2号”探测器第一次成功飞越金星。

1964年11月28日，美国发射的“水手4号”探测器第一次成功飞越火星。

1965年3月，前苏联航天员从“上升号”载人飞船上走出舱外，实现了人类第一次太空行走。

1966年1月，前苏联两艘“联盟号”飞船第一次在轨道上成功交会对接，并实现了两位航天员从一艘飞船向另一艘飞船的转移。

1969年7月20日，美国N.A.阿姆斯特朗和E.E.奥尔德林乘坐“阿波罗11号”飞船登月成功，在月球静海西南角着陆，成为涉足地球之外另一天体的首批人员。他们在月球上安放了科学实验装置，拍摄了月面照片，搜集了22 kg月球岩石与土壤样品，然后自月面起飞，与指挥舱会合，返回地球。首次实现了人类登上月球的理想。

1971年4月19日，前苏联“礼炮1号”空间站入轨成功，其质量约18 t，总长14 m，轨道高度200~250 km，轨道倾角 51.6° ，成为人类第一个空间站，完成了有关天体物理学、航天、医学、生物学等方面的科研计划，考察地球资源和进行长期失重条件下的技术实验。

1972年3月2日，美国发射了木星和深远空间探测器“先驱者10号”。它携有表明人类信息的镀金铝板，经过11年飞行，于1983年6月越过海王星轨道，而后成为飞离太阳系的第一个人造天体。

1975年6月8日，前苏联发射了“金星9号”探测器，实现了在金星表面着陆。

1975年7月18日，美国“阿波罗号”飞船与前苏联“联盟19号”飞船在大西洋上空对接成功。

1975年8月20日，美国发射了“海盗1号”探测器，第一次在火星表面着陆成功。

1977年9月，美国发射了“旅行者2号”探测器，对天王星、海王星进行探测。

1981年4月，世界上第一架垂直起飞、水平着陆、可重复使用的美国航天飞机“哥伦比亚

号”试飞成功，标志着航天运载器由一次性使用的运载火箭转向重复使用的航天运载器的新阶段，是航天史上一个重要的里程碑，标志着人类在空间时代又上了一层楼，进入了航天飞机时代。至 2000 年 10 月 航天飞机已成功飞行 100 次。

1986 年 2 月，前苏联“和平号”轨道空间站发射成功，它成为目前人类发射的在轨运行时间最长的载人航天器，在轨运行超过 15 年。2001 年 3 月 23 日“和平号”轨道空间站被引入大气层销毁，完成了其辉煌的历史使命。

目前，更大规模的国际空间站在美国、俄罗斯、加拿大、日本、意大利和欧洲空间局的合作下，正在进行在轨组装建设……

人类就是以如此快速的步伐冲击着宇宙大门！

不难看出 从公元 10 世纪的中国火箭到第二次世界大战的 V-2 导弹，人类是出于军事需求发展了火箭技术，而这恰恰为航天技术的发展奠定了坚实的基础。自 20 世纪 40 年代至今，航天技术以惊人的速度发展着并日臻完善。我们可以坚信，随着科学技术的进步和工业基础的不断增强，航天技术将会有更大的突破并更趋完善。

1.1.4 现代航天技术的应用

航天技术从 20 世纪 50 年代末期的研究试验阶段到 70 年代中期，发展到了广泛实际应用阶段。其中 60 年代以来，为科学研究、国民经济和军事服务的各种科学卫星与应用卫星得到了很大发展。至 70 年代，军、民用卫星已全面进入应用阶段。一方面向侦察、通信、导航、预警、气象、测地、海洋、天文观测和地球资源等专门化的方向发展，同时另一方面，各类卫星亦向多用途、长寿命、高可靠性和低成本的方向发展。这两种趋势相互补充，取得了显著的效益。80 年代中后期，基于模块化和集成化设计思想的新型微、小卫星崛起，成为航天技术发展中的一个新动向。这类卫星重量轻、成本低、研制周期短、见效快，已逐渐成为今后应用卫星的一支生力军。

回顾近 50 年来航天技术应用的历程，具有代表性的大事列举如下：

1958 年 12 月 美国发射了世界上第一颗通信卫星“斯科尔号”；

1960 年 4 月，美国先后发射了世界上第一颗气象卫星“泰罗斯 1 号”和导航卫星“子午仪 1B 号”；

1963 年 7 月，美国发射了世界上第一颗地球同步轨道通信卫星；

1964 年 8 月，美国发射了世界上第一颗地球静止轨道通信卫星；

1965 年 4 月，美国成功地发射了世界上第一颗商用通信卫星“国际通信卫星 1 号”，正式为北美与欧洲之间提供通信业务，它标志着通信卫星进入了实用阶段；

1972 年 7 月，美国发射了世界上第一颗地球资源卫星“陆地卫星 1 号”；

1982 年 11 月，美国航天飞机开始商业性飞行；1984 年 11 月，美国航天飞机成功地施放了两颗卫星并回收了两颗失效的通信卫星，第一次实现了双向运载任务；

1983 年 4 月，美国发射了世界上第一颗跟踪和数据中继卫星；

1999 年由 66 颗小型卫星组网形成的美国“铱”星全球电话通讯系统建成并投入使用。

目前美国的 GPS 系统和俄罗斯的卫星导航系统已成为全世界各领域普遍应用的定位导航系统 发挥着巨大的作用。

……

在我国，继 1970 年 4 月 24 日首颗卫星“东方红一号”发射成功以来，航天技术的发展和应
用也取得了巨大的成就：

1975 年 11 月，我国第一颗返回式遥感卫星发射成功，并顺利回收；

1984 年 4 月，我国第一颗静止轨道试验通信卫星发射成功；

1986 年 2 月，我国第一颗静止轨道实用通信卫星发射成功；

1988 年 9 月，我国第一颗气象卫星“风云一号”发射成功；

至 2000 年 10 月我国“长征”系列运载火箭已成功发射 62 次。

进入 20 世纪 90 年代，我国航天技术应用的步伐进一步加快，大容量通信卫星“东方红三
号”、气象卫星“风云一号”和“风云二号”以及资源卫星先后发射成功。1999 年 11 月 20 日我
国成功发射了第一艘试验飞船“神舟号”，在载人航天领域迈出了坚实的一步……

综上所述，从 1957 年世界上第一颗人造地球卫星发射成功算起，迄今仅 40 余年 航天技
术取得了如此巨大的成就是前所未有的，产生了巨大的社会效益与经济效益。由于通信卫星
通信距离远、容量大、质量高、灵活可靠，因而已成为现代通信的重要手段。80 年代初期，国际
卫星通信网已承担了 2/3 的洲际电信业务和几乎全部电视传输业务。对幅员辽阔的国家，利
用卫星是最经济、最有效的通信和广播手段。有人估计全世界在空间活动的投资总额大约为
4 000 多亿美元，仅从通信广播卫星取得的经济效益就完全可以使这笔巨大投资得到补偿。
至于军事卫星所取得的成就和效益就更难于用经济代价来衡量。卫星导航实现了全天候、全
球、高精度的导航定位。利用卫星进行资源调查是最迅速、最有效、最经济的手段。一颗地球
资源卫星全年的效益约为其研制发射费用的十几倍。

总之，随着航天技术应用的发展，航天活动已越来越显示出其巨大的军事意义和经济效
益，已成为国民经济和国防建设的一个重要组成部分。反过来，这种社会和经济效益又进一步
推动着航天技术日新月异的发展。

1.2 航天器的分类与系统组成

航天技术是一门研究和实现如何把航天器送入空间，并在那里进行活动的工程技术。它
主要包括航天器、运载工具和地面测控三大部分。为了便于了解，我们首先对航天器进行
分类。

同一个航天器可兼有数种任务，故机械地、绝对地分类，是不可能的。同一类航天器，往往
包括了几种系列，而每一系列又可分成数种不同的卫星系统或型号。

1.2.1 按载人与否分类

航天器可分为无人航天器与载人航天器两大类。无人航天器按是否绕地球运行又可分为
人造地球卫星和宇宙探测器两类。它们又可以进一步按用途分类，如图 1.3 所示。

1. 人造地球卫星

简称人造卫星，是数量最多的航天器（占 90% 以上）。它们的轨道长度由 100 多公里到几
十万公里。按用途它们又可分为：

(1) 科学卫星：发展科学卫星的主要目的是：① 研究近地空间环境和日地关系，为载人飞
船、应用卫星和战略武器的发展提供资料；② 进行天文观测；③ 对地球科学，例如地球磁场、

电离层与磁层的关系、地壳力学、海洋动力学等方面进行研究。

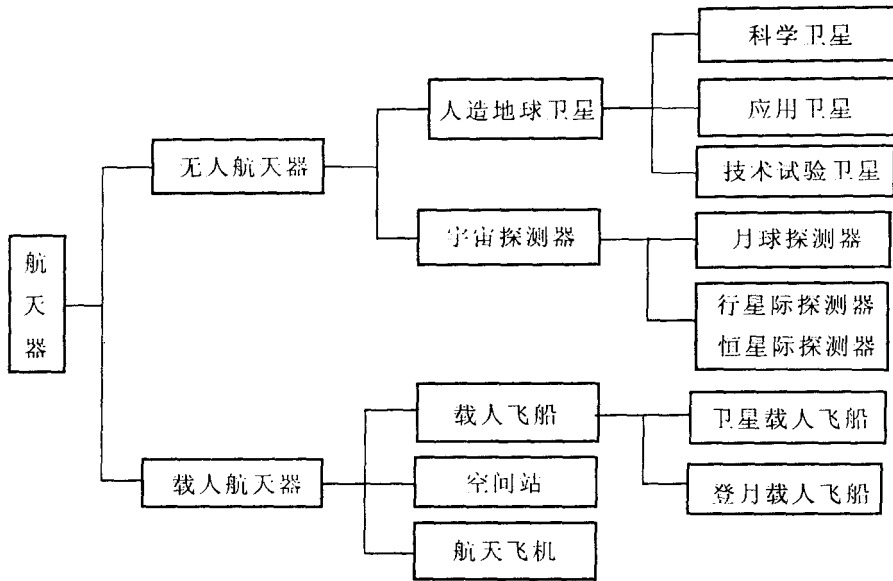


图 1.3 航天器的分类

(2) 应用卫星：利用星载仪器设备，以应用为目的，在轨道上完成某种任务的卫星，称为应用卫星。它们直接为国民经济和军事服务，如通信卫星、气象卫星、侦察卫星、导航卫星、测地卫星、地球资源卫星等。

(3) 技术试验卫星：技术试验卫星是针对某些航天器（如应用卫星或飞船等）的特殊新工艺或某项新的系统技术而设计的，其目的是进行预先的飞行试验。在航天技术发展中，技术试验卫星曾发挥了它的作用，世界各国相当重视这种卫星的研制。

2. 载人航天器

目前的载人航天器只在近地轨道飞行和从地球到月球的登月飞行。今后将出现可以到达各种星球的载人飞船，以及供人类长期在空间生活和工作的永久性空间站。载人航天器按飞行和工作方式可分为：

(1) 载人飞船：能保障航天员在外层空间生活和工作，以执行航天任务并能返回地面的航天器；

(2) 空间站：可供多名航天员巡访、长期工作和居住的载人航天器；

(3) 航天飞机：可以重复使用的，往返于地面和高度在 1 000 km 以下的近地轨道之间，运送有效载荷的航天器。

3. 宇宙探测器

飞出地球轨道的探测器，有行星际探测器和恒星际（飞出太阳系）探测器两种。其中行星际探测器按探测目标又可分为月球和行星（金星、火星、水星、木星、土星等）探测器。如 20 世纪 60~70 年代前苏联发射的“月球”、“金星”、“火星”、“水星”等系列探测器，美国发射的“水手”、“海盗”、“先驱者”、“旅行者”等系列探测器。

1.2.2 人造地球卫星的功能分类

按航天器在轨道上的功能来进行分类，就人造地球卫星而言，可分为观测站、中继站、基准站和轨道武器四类。每一类又包括了各种不同用途的航天器。

1. 观测站

卫星处在轨道上，对地球来说，它站得高，看得远（视场大），用它来观察地球是非常有利的。此外，由于卫星在地球大气层以外不受大气的各种干扰和影响，所以用它来进行天文观测也比地面天文观测站更加有利。属于这种功能的卫星有下列几种典型的用途。

(1) 侦察卫星：在各类应用卫星中侦察卫星发射得最早（1959年发射），发射的数量也最多。侦察卫星有照相侦察和电子侦察卫星两种。

照相侦察卫星是用光学设备对地面目标进行拍照的卫星。20世纪70年代以来，前苏联和美国每年发射的军用卫星中，约有1/3的卫星用于各种形式的照相侦察，它们在200 km的近地轨道上进行普查和详查。

电子侦察卫星利用星载电子设备截获空间传播的电磁波，并转发到地面，通过分析和破译，获得敌方的情报。电子侦察的目的是确定他方的飞机、雷达等系统的位置和特征参数，窃听他方的无线电和微波通信。电子侦察卫星以无线电探测和记录设备完成这些使命。

总之，无论对军事战略侦察，还是对军事战术侦察，侦察卫星所提供的情报信息，起着不可忽视的作用，曾为美国和前苏联政策的制定和军事行动提供了依据。据报道，美国和前苏联将近70%的军事情报来源于侦察卫星。

目前，在美、俄两国的军用卫星中，50%以上都是侦察卫星。美国已研制了六代侦察卫星，可见光照相分辨率为0.3 m，工作寿命200 d以上；无线电传输型相机分辨率为0.3~3 m，卫星工作寿命两年多。俄罗斯的侦察卫星工作寿命从几天到几个月。美国通过延长卫星工作寿命，大大减少发射数量，俄罗斯则通过增加卫星发射数量以保证全年有侦察卫星在天上工作。

(2) 气象卫星：气象卫星利用所携带的各种气象遥感器，接收和测量来自地球、海洋和大气的可见光辐射、红外线辐射和微波辐射信息，再将它们转换成电信号传送给地面接收站。气象人员根据收集的信息，经过处理，得出全球大气温度、湿度、风等气象要素资料。几小时就可得到全球气象资料，从而作出中期和长期天气预报，确定台风中心位置和变化，预报台风和其他风暴。气象卫星对于保证航海和航空的安全，保证农业、渔业和畜牧业生产，都有很大作用。

气象卫星已由单纯的气象试验，发展到多学科和多领域的综合应用；由低轨道系统，发展到高轨道系统，形成了全球气象卫星观测网。气象卫星在军事活动中的应用也日益加强，有的国家已建立了全球性的军事气象资料的收集系统，向军事单位提供实时的或非实时的气象资料。

随着航天技术的进一步发展，气象遥感器将向多样化、高精度方向发展，大大丰富气象预报的内容和提高预报精度。同时气象卫星提供的云图也将由静态云图向动态云图方向发展，这将会引起气象卫星发展的一次重大突破。

(3) 地球资源卫星：资源卫星是在侦察卫星和气象卫星的基础上发展而来的。利用星上装载的多光谱遥感器获取地面目标辐射和反射的多种波段的电磁波，然后把它传送到地面，再经过处理，变成关于地球资源的有用资料。它们包括地面的和地下的，陆地的和海洋的等等。

地球资源卫星可广泛用于：地下矿藏、海洋资源和地下水源调查；土地资源调查，土地利

用, 区域规划; 调查农业、林业、畜牧业和水利资源合理规划管理; 预报农作物长势和收成; 研究自然植物的生成和地貌; 考查和监视各种自然灾害如病虫害、森林火灾、洪水等; 环境污染、海洋污染 测量水源 雪源 铁路 公路选线 港口建设 海岸利用和管理 城市规划。

地球资源卫星具有重大的经济价值和潜在的军事用途。

(4) 海洋卫星: 海洋是生命的摇篮和风雨的故乡, 海洋与人类的密切关系正逐渐被认识。海洋控制着自然界中水的循环和大气运动, 主导调节大陆的气候, 提供廉价的运输条件和高质量的水产食物。海洋中蕴藏着巨大的能源和矿物资源。

对海洋、海岸线的调查、研究、利用和开发, 虽然可以利用气象卫星、地球资源卫星获得一些资料和数据, 但不解决根本问题, 例如资源卫星遥感器波段主要在可见光和近红外波段, 而海洋遥感器波段主要在红外和微波波段。我国既是一个大陆国家(9 600 000 km² 土地) 又是一个海洋国家(海岸线 18 000 km 拥有 4 700 000 km² 海域, 多于 4 000 000 km² 的经济开发区), 发展海洋卫星是国民经济和军事部门之必需。

海洋卫星的任务是海洋环境预报, 包括远洋船舶的最佳航线选择, 海洋渔群分析, 近海与沿岸海洋资源调查, 沿岸与近海海洋环境监测和监视, 灾害性海况预报和预警, 海洋环境保护和执法管理, 海洋科学研究, 以及海洋浮标、台站、船舶数据传输, 海上军事活动等。

当然, 作为观测站的卫星远不止以上几种, 预警卫星、核爆炸探测卫星、天文预测卫星(如美国的“哈勃”太空望远镜)等均属于这一类。虽然它们的功能各有侧重, 但基本观测原理都是相似的。

2. 中继站

中继站是一种在轨道上对信息进行放大和转发的卫星。具体分为两类: 一类用于传输地面上相隔很远的地点之间的电话、电报、电视和数据; 另一类用于传输卫星与地面之间的电视和数据。这种卫星有下列几种:

(1) 通信卫星: 利用卫星进行通信和平常的地面通信相比较, 具有下列优点: ① 通信容量大; ② 覆盖面积广; ③ 通信距离远; ④ 可靠性高; ⑤ 灵活性好; ⑥ 成本低。通信卫星一般采用地球静止轨道, 相当于静止在天空上。若有 3 颗地球静止轨道卫星, 彼此相隔 120° 就可实现除地球两极部分地区外的全球通信。

通信卫星已用于国际、国内和军事通信业务, 同时开展了区域性通信和卫星对卫星的通信。卫星通信技术已赋有很浓的军事色彩, 它在战略通信和战术通信中占有绝对的优势。目前, 各国已有的国际、国内卫星通信系统都承担着军事通信任务。

通信卫星已进入相当成熟的实际应用阶段, 特别是随着地球静止轨道卫星通信技术的发展, 它的应用日益广泛。它可用于传输电话、电报、电视、报纸、图文传真、语音广播、时标、数据、视频会议等。

(2) 广播卫星: 广播卫星是一种主要用于电视广播的通信卫星。这种广播卫星不需要经过任何中转就可向地面转播或发射电视广播节目, 供公众团体或者个人直接接收, 因此又称为直播卫星。目前普通的家庭电视机配一架直径不到 1 m 的天线就可以直接接收直播卫星的电视广播节目。

(3) 跟踪和数据中继卫星: 跟踪和数据中继卫星是通信卫星技术的一个重大发展。它是利用卫星来跟踪与测量另一颗卫星的位置, 其基本思想是把地球上的测控站搬到地球同步轨道上, 形成星地测控系统网。这样, 可大大增加对近地轨道卫星, 如气象卫星、侦察卫星、资源

卫星、海洋卫星、通信卫星等的跟踪测轨弧段，提高测轨精度，减少地面站的设置数量。换句话说，跟踪和数据中继卫星就是利用地球同步轨道卫星实现地面测控中心对低轨道卫星的跟踪和数据中继。

发展跟踪和数据中继卫星将改变目前航天活动对地面测控的过分依赖性，同时也可以克服在国外无法设置地面站的困难，所以受到了世界各航天大国的普遍重视。我国目前也在积极地发展这种卫星技术。

除上述各中继站卫星系统外，各国还研制和发射了其他类型的专用通信卫星和无线电业余爱好者卫星，如海事卫星，卫星商业系统、搜索和营救系统……

3. 基准站

这种卫星是轨道上的测量基准点，所以要求它测轨非常准确。属于这种功能的卫星有：

(1) 导航卫星：这种卫星发出一对频率非常稳定的无线电波，海上船只、水下的潜艇和陆地上的运动体等都可以通过接收卫星发射的电波信号来确定自己的位置。利用导航卫星进行导航是航天史上的一次重大技术突破，卫星可以覆盖全球进行全天候导航，而且导航精度高。

卫星导航定位有三种类型 ① 双频多普勒测速定位系统，如美国的“子午仪”导航卫星系统。该类卫星为二维导航定位系统，只能用于水中舰船，定位精度为 30~50 m。“子午仪”卫星研制始于 1958 年，1964 年开始投入使用，起初是为水下核潜艇定位服务的，目前已停止使用。② 导航卫星全球定位系统 (GPS)。采用伪随机码测距，系统能进行全天候、全天时、实时三维导航定位，定位精度 10 m 以下，用于舰船、飞机和陆上活动目标等。该系统需要 18~24 颗卫星组网。俄罗斯亦有类似于美国的两代导航卫星系统。③ 区域性导航定位系统，3 颗星（静止轨道）提供三维位置。若发射两颗星则只能提供二维位置，如果用户能够提供自身的高程，则可以算出三维位置。该系统特点是同时能为百万用户服务，互不干扰，保密性好。

(2) 测地卫星：卫星测地的原理与卫星导航的原理相似。由于地面上的测量站是固定的，所以测量精度比对舰船导航定位的精度高。卫星测地目前达到的精度比常规大地测量的精度高几十倍以上。

测地卫星可完成大地测量、地形测定、地图测绘、地球形状测量，以及重力和地磁场测定。卫星测地在军事、科学研究和民用方面受到重视，许多国家研制和发射了测地卫星系统。利用卫星进行测地，为测绘工作提供了现代化手段，工作周期短，测量精度高，大大节省了人力、物力和财力。特别是要建立精确的全球性地理坐标系或三维地图，利用卫星测地是惟一可行的测量手段。随着科技水平的不断提高，测地卫星的应用也日益广泛，如人们利用测地卫星测量地壳移动从而监视和预报地震等。

测地卫星有主动和被动之分，可采用三角测量、激光测距、多普勒系统等多种手段达到测地目的。

4. 轨道武器

这是一种积极进攻的航天器，具有空间防御和空间攻击的职能。它主要包括：

(1) 拦截卫星：卫星作为一种武器在轨道上接近，识别并摧毁敌方空间系统，这种卫星被称为反卫星卫星。反卫星卫星的拦截方式可以有多种，主要有：使拦截卫星在空间与目标卫星相遇，然后自爆以摧毁目标；从拦截卫星上发射反卫星武器，如激光、粒子和微波等定向高能束武器；拦截卫星用自身携带的小型火箭助推器加速，与目标卫星相碰撞；设法使目标卫星失去工作能力，如利用核辐射击毁目标卫星的电路与结构，向目标卫星相机镜头上喷射物质，

等等。

早在 20 世纪 50 年代末期，美国和前苏联就开始研究拦截卫星。目前，俄罗斯已经掌握了 1 000 km 以下拦截卫星的技术，美国也在 90 年代成功地进行了在轨反卫星试验。

(2) 轨道轰炸系统：轨道轰炸系统是一种空间对地的进攻型武器。其任务是将武器部署在地球轨道上，当它绕地球运行到指定位置时，用反推减速火箭使其减慢速度，降低轨道，按地面指令射向目标。

1.2.3 航天器的基本系统组成

不同类型的航天器，其系统的结构、外形和功能千差万别，但是它们的基本系统组成都是一致的。典型航天器都是由不同功能的若干分系统组成的，其基本系统一般分为有效载荷和保障系统两大类。

1. 有效载荷

用于直接完成特定的航天飞行任务的部件、仪器或分系统。

有效载荷种类很多，随着飞行任务即航天器功能的不同而异。例如，科学卫星上的粒子探测器，天文观测卫星上的天文望远镜，侦察卫星上的可见光相机、CCD 相机、红外探测器、无线电侦察接收机，气象卫星上的可见光和红外扫描辐射仪，地球资源卫星上的电视摄像机、CCD 摄像机、主题测绘仪、合成孔径雷达，通信卫星上的转发器和通信天线，生物科学卫星上的种子和培养基等，均属有效载荷。

单一用途的卫星装有一种类型的有效载荷，而多用途的卫星可以装有几种类型的有效载荷。

2. 保障系统

用于保障航天器从火箭起飞到工作寿命终止，星上所有分系统的正常工作。各种类型航天器的保障系统一般包括下列分系统：

(1) 结构系统：用于支承和固定航天器上各种仪器设备，使它们构成一个整体，以承受地面运输、运载器发射和空间运行时的各种力学环境（振动、过载、冲击、噪声）以及空间运行环境。对航天器结构的基本要求是重量轻、可靠性高、成本低等，因此航天器的结构大多采用铝、镁、钛等轻合金和碳纤维复合材料等制造。通常用结构质量比，即结构重量占航天器总重量的比例来衡量航天器结构设计和制造水平。

(2) 热控制系统：用来保障各种仪器设备在复杂的环境中处于允许的温度范围内。热控制分为被动热控制和主动热控制两类。热控制的措施主要有表面处理（抛光、镀金或喷刷热控涂层）包敷多层隔热材料、使用旋转盘、相变材料、百叶窗、热管和电加热器等。

(3) 电源系统：用来为航天器所有仪器设备提供所需的电能。现代航天器大多采用太阳能电池和蓄电池联合供电系统。

(4) 姿态控制系统：用来保持或改变航天器的运行姿态。常用的姿态控制方式有重力梯度稳定、自旋稳定和三轴稳定。

(5) 轨道控制系统：用来保持或改变航天器的运行轨道。轨道控制往往与姿态控制配合，它们构成航天器控制系统。

(6) 测控系统：包括遥测、遥控和跟踪三部分。遥测部分主要由传感器、调制器和发射机组成，用于测量并向地面发送航天器的各种仪器设备的工程参数（工作电压、电流、温度等）和

其他参数（环境参数和姿态参数等）。遥控部分一般由接收机和译码器组成，用于接收地面测控站发来的遥控指令，传送给有关系统执行。跟踪部分主要是信标机和应答机，它们不断发出信号，以便地球测控站跟踪航天器并测量其轨道位置和速度。

除了以上基本系统组成外，航天器根据其不同的飞行任务，往往还需要有一些不同功能的专用系统。例如，返回式卫星有回收系统，载人飞船有乘员系统、环境控制与生命保障系统、交会与对接系统，航天飞机有着陆系统等。

通常，航天器的各部分系统分别安装在不同的舱段中，一般航天器按舱段划分可以分为有效载荷舱和公用舱两部分，或者分为有效载荷舱、公用舱和推进舱三部分。有效载荷放置于有效载荷舱中，保障系统安装在公用舱和推进舱中。而对于返回式卫星和载人飞船一类返回式航天器而言，它们还必须包含一个相对独立的返回舱，放置需要再度返回的有效载荷（人员和物资）和相应的保障系统。

随着航天技术的发展，人们已逐渐开始将航天器的保障系统所在的公用舱和推进舱在结构和技术上相对固定下来，使之模块化，形成平台。将不同的有效载荷与相同的平台（也可称为公用平台）相组合便可得到不同功能的航天器，从而可以大大缩短研制周期，降低成本，甚至实现平台的小批量生产。

1.3 航天器控制的基本概念

一个刚体航天器的运动可以由它的位置、速度、姿态和姿态运动来描述。其中位置和速度描述航天器的质心运动，这属于航天器的轨道问题；姿态和姿态运动描述航天器绕质心的转动，属于姿态问题。从运动学的观点来说，一个航天器的运动具有 6 个自由度，其中 3 个位置自由度表示航天器的轨道运动，另外 3 个绕质心的转动自由度表示航天器的姿态运动。

航天器在轨道上运动将受到各种力和力矩的作用。从刚体力学的角度来说，力使航天器的轨道产生摄动，力矩使航天器姿态产生扰动。因此，航天器的控制可以分为两大类，即轨道控制和姿态控制。

对航天器的质心施以外力，以有目的地改变其运动轨迹的技术，称为轨道控制；对航天器绕质心施加力矩，以保持或按需要改变其在空间的定向的技术，称为姿态控制。

1. 轨道控制

轨道控制包括轨道确定和轨道控制两方面的内容。轨道确定的任务是研究如何确定航天器的位置和速度，有时也称为空间导航，简称导航；轨道控制是根据航天器现有位置、速度、飞行的最终目标，对质心施以控制力，以改变其运动轨迹的技术，有时也称为制导。

轨道控制按应用方式可分为四类。

(1) 轨道机动：指使航天器从一个自由飞行段轨道转移到另一个自由飞行段轨道的控制。例如，地球静止卫星发射过程中为进入地球静止轨道，在其转移轨道的远地点就须进行一次轨道机动。

(2) 轨道保持：指克服摄动影响，使航天器轨道的某些参数保持不变的的控制。例如，地球同步轨道卫星为精确保持其定点位置而定期进行的轨道修正；太阳同步轨道和回归轨道卫星为保持其倾角和周期所加的控制；有的低轨道卫星为克服大气阻力，延长轨道寿命所进行的控制。

(3) 轨道交会：指航天器能与另一个航天器在同一时间以相同速度达到空间同一位置而实施的控制过程。

(4) 再入返回控制：指使航天器脱离原来的轨道，返回进入大气层的控制。

2. 姿态控制

姿态控制也包括姿态确定和姿态控制两方面内容。姿态确定是研究航天器相对于某个基准的确定姿态方法。这个基准可以是惯性基准或者人们所感兴趣的某个基准，例如地球。姿态确定一般采用姿态敏感器和相应的数据处理方法，姿态确定的精度取决于数据处理方法和航天器敏感器所能达到的精度。姿态控制是航天器在规定或预先确定的方向（可称为参考方向）上定向的过程，它包括姿态稳定和姿态机动。姿态稳定是指使姿态保持在指定方向，而姿态机动是指航天器从一个姿态过渡到另一个姿态的再定向过程。

姿态控制通常包括以下几个具体概念。

(1) 定向：指航天器的本体或附件（如太阳能电池阵、观测设备、天线等）以单轴或三轴按一定精度保持在给定的参考方向上。此参考方向可以是惯性的，如天文观测；也可以是转动的，如对地观测。由于定向需要克服各种空间干扰以保持参考方向上，因此需要通过控制加以保持。

(2) 再定向：指航天器本体从对一个参考方向的定向改变到对另一个新参考方向的定向。再定向过程是通过连续的姿态机动控制来实现的。

(3) 捕获：又称为初始对准，是指航天器由未知不确定姿态向已知定向姿态的机动控制过程。如航天器入轨时，星箭分离，航天器从旋转翻滚等不确定姿态进入对地对日定向姿态；又如航天器运行过程中因故障失去姿态后的重新定姿等。为了使控制系统设计更为合理，捕获一般分粗对准和精对准两个阶段进行。

(4) 粗对准：指初步对准，通常须用较大的控制力矩以缩短机动的的时间，但不要求很高的定向精度。

(5) 精对准：指粗对准或再定向后由于精度不够而进行的修正机动，以保证定向的精度要求。精对准一般用较小的控制力矩。

(6) 跟踪：指航天器本体或附件保持对活动目标的定向。

(7) 搜索：指航天器对活动目标的捕获。

从上述概念可知，定向属于姿态稳定问题，而再定向和捕获则属于姿态机动问题。姿态稳定要求控制系统在航天器的整个工作寿命中进行工作，这种控制一般是长期而持续的，所要求的控制力矩较小。姿态机动一般是一短暂过程，需要较大的控制力矩，使姿态在较短的时间内发生明显的改变。由于这两种姿态控制的目标有显著差别，所以这两种控制在工程上所基于的系统结构也往往不同。

总之，姿态控制是获取并保持航天器在空间定向的过程。例如，卫星对地进行通信或观测，天线或传感器要指向地面目标；卫星进行轨道控制时，发动机要对准所要求的推力方向；卫星再入大气层时，要求制动防热面对准迎面气流。这些都需要使星体建立和保持一定的姿态。

姿态稳定是保持已有姿态的控制，航天器姿态稳定方式按航天器姿态运动的形式可大致分为两类。

(1) 自旋稳定：卫星等航天器绕其一轴（自旋轴）旋转，依靠旋转动量矩保持自旋轴在惯性空间的指向。自旋稳定常辅以主动姿态控制，来修正自旋轴指向误差。

双自旋卫星由自旋体和消旋体两部分组成，相互间由消旋轴承连接。自旋体绕轴承轴（自旋轴）旋转而获得自旋轴定向；消旋体在自旋轴定向的基础上又受轴承轴上消旋电机控制而获得三轴稳定。有效载荷一般放在消旋体中。

(2) 三轴稳定：依靠主动姿态控制或利用环境力矩，保持航天器本体三条正交轴线在某一参考空间的方向。

3. 姿态控制与轨道控制的关系

航天器是一个比较复杂的控制对象，一般来说轨道控制与姿态控制密切相关。为实现轨道控制，航天器姿态必须符合要求。也就是说，当需要对航天器进行轨道控制时，同时也要求进行姿态控制。在某些具体情况或某些飞行过程中，可以把姿态控制和轨道控制分开来考虑。某些应用任务对航天器的轨道没有严格要求，而对航天器的姿态却有要求。例如，空间环境探测卫星绕地球的运行往往不需要轨道控制，卫星在开普勒轨道上运行就能满足对环境探测的要求。在这种情况下，航天器只有姿态控制。

航天器控制按控制力和力矩的来源可以分为两大类。

(1) 被动控制：其控制力或力矩由空间环境和航天器动力学特性提供，不需要消耗星上能源。例如利用气动力或力矩、太阳辐射压力、重力梯度力矩、磁力矩等实现轨道或姿态的被动控制，而不消耗工质或电能。

(2) 主动控制：包括测量航天器的姿态和轨道，处理测量数据，按照一定的控制规律产生控制指令，并执行指令产生对航天器的控制力或力矩。主动控制需要消耗电能或工质等星上能源，由星载或地面设备组成闭环系统来实现。

综上所述表 1.1 给出了航天器控制所包含的基本概念、内容和分类，以及相互之间的关系。

4. 主动控制系统的组成

航天器主动控制系统，无论是姿态控制系统还是轨道控制系统，都有两种组成方式。

(1) 星上自主控制：指不依赖于地面干预，完全由星载仪器实现的控制，其系统结构见图 1.4。例如双自旋卫星的消旋控制和三轴稳定卫星姿态控制，一般都采取自主控制方式。有的静止轨道卫星的东西位置保持轨道控制也采取自主控制。

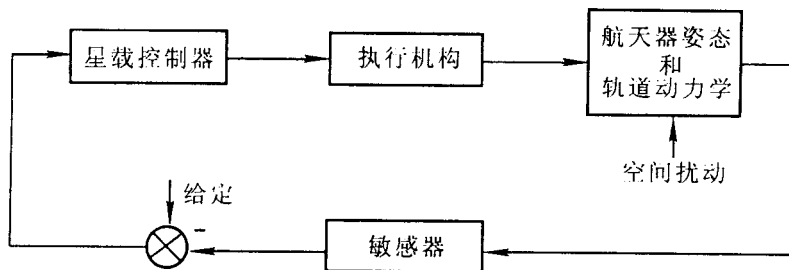
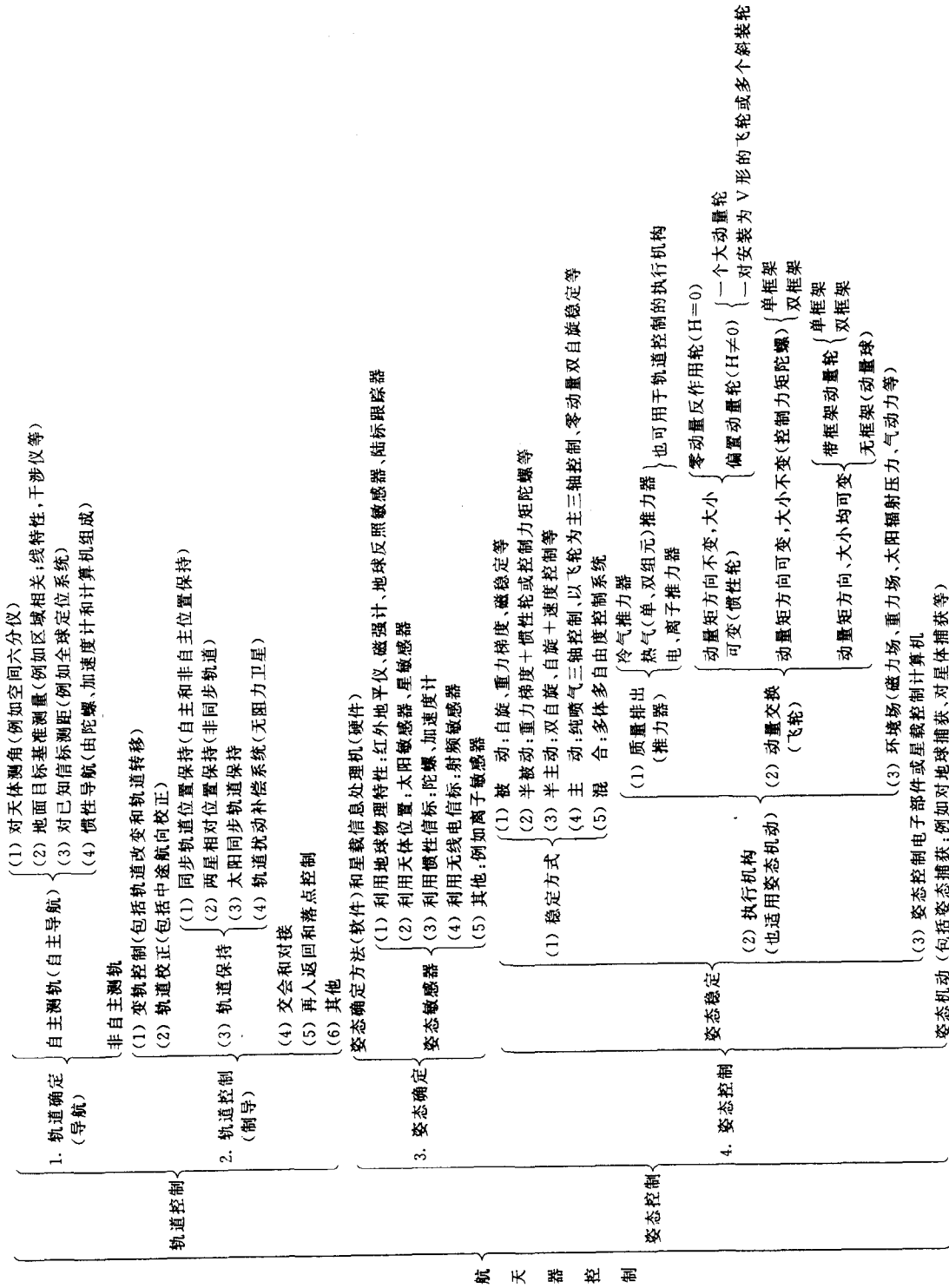


图 1.4 星上自主控制方框图

(2) 地面控制：或称星—地大回路控制，指依赖于地面干预，由星载仪器和地面设备联合实现的控制 其结构见图 1.5。例如，自旋和双自旋卫星的姿态机动和目前多数卫星的轨道控制均采用地面控制方式。

表 1.1 航天器控制基本内容和分类



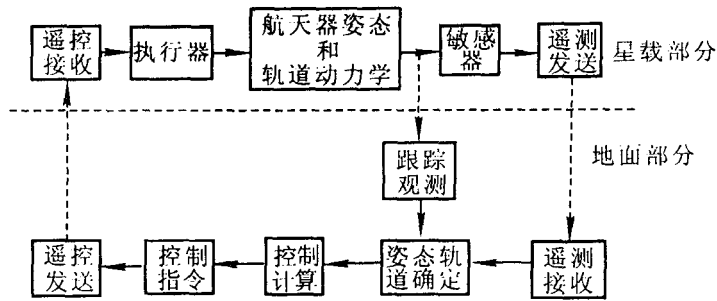


图 1.5 星一地大回路控制方框图

本书针对刚性航天器各种控制技术的基本原理、方法、模式、系统结构分别进行介绍和讨论。作为学习航天器控制原理的基础，首先介绍航天器的轨道和姿态的运动学与动力学。

需要指出的是，随着航天技术的发展，航天器的规模越来越大，大型挠性附件（如太阳能电池阵、天线等）振动、储箱内液体（液体燃料、生活用水等）晃动、多体结构刚挠性耦合等的影响已成为航天器控制，特别是姿态控制中重要而复杂的问题。但这些内容已超出本书的阐述范围，有兴趣的读者可以参阅有关的文献和书籍。

思 考 题

1.1 航天器按载人与否是如何分类的？各类航天器的作用和特点是什么？请举出你所知的各类航天器的国内外的例子。

1.2 人造地球卫星按功能分为哪几类？阐述每一类的特点，并各说出至少两种卫星及其相应的功能。

1.3 阐述航天器基本系统组成及各部分作用。

1.4 航天器轨道和姿态控制的概念、内容和相互关系各是什么？

1.5 阐述姿态稳定的各种方式，比较其异同。

1.6 主动控制与被动控制的主要区别是什么？画出星—地大回路控制的结构图。

第二章

航天器的轨道与轨道力学

“1642年圣诞节，在柯斯特沃斯河畔的沃尔索普庄园，诞生了一个非常瘦小的男孩。如同孩子的母亲后来告诉他的那样，出生时他小得几乎可以放进一只一夸脱的杯子里，瘦弱得必须用一个软垫围着脖子来支起他的头。这个不幸的孩子在教区记事录上登记的名字是‘伊萨克和汉纳·牛顿之子伊萨克’。虽然没有什么贤人哲士盛赞这一天的记录，然而这个孩子却将要改变全世界的思想和习惯。”

2.1 航天器轨道的基本定律

如果说1642年的圣诞节迎来了理性的时代，那么完全是由于有两个人为大约50年后牛顿最伟大的发现奠定了基础。一个是第谷·布拉赫，他几十年如一日，极为细致地收集和记录了行星精确位置的大量数据；另一个是约翰·开普勒，他以其极大的耐心和天赋的数学才能，揭示了隐藏在第谷的观测数据背后的秘密。这两人就是用肩膀托起牛顿的“巨人”。

2.1.1 开普勒定律

亚里士多德认为圆周运动是惟一合乎自然的完美运动，因此天体必定是作圆周运动。自他以后，天文学家总是假定行星在作圆周运动，或者是大圆周运动和小圆周运动的复合运动。然而，开普勒此时已有第谷的精确观察结果可供参照，他发现这种理论与观察到的事实极难调和。从1601到1606年，他尝试用各种几何曲线来拟合第谷对火星位置的观测数据。为了除去 $8'$ （角度）的偏差，他几乎奋斗了一年，尽管任何一个欠认真的人都可能会认为这一微小偏差可以忽略不计。最后他找到椭圆是个可能的解，结果很理想，发现了火星的轨道。1609年，开普勒又发表了行星运动的第一和第二定律，而第三定律则是在1619年才发表的。

具有划时代意义的开普勒三大定律如下所述。

1. 第一定律——椭圆律

每个行星沿椭圆轨道绕太阳运行，太阳位于椭圆的一个焦点上。

因此，行星在运行过程中，离太阳的距离是变化的，离太阳最近的一点为近日点，离太阳最远的一点为远日点，如图2.1所示。