

航空航天概论

杨 莉 沈海军 主编

航空工业出版社
北京

内 容 提 要

航空航天技术是现代科学技术中最有影响的高新技术之一。近年来发展迅速,对世界各国的政治、经济、军事以及人类生活各方面影响巨大。本书作为航空航天院校低年级学生的入门教材,使学生初步了解航空航天领域所涉及学科的基本知识、基本原理及其发展概况,了解航空航天技术对社会产生的作用和影响,了解自己所学专业与航空航天技术之间的相互关系,为今后各专业课的学习打下基础。本书叙述由浅入深、简明扼要、内容丰富、图文并茂。

本书是航空航天院校低年级教材,也可供相关专业教学参考及航空航天爱好者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

航空航天概论/杨莉,沈海军主编. --北京:航空工业出版社,2011.8

ISBN 978-7-80243-792-0

I. ①航… II. ①杨… ②沈… III. ①航空—高等学校—教材 ②航天—高等学校—教材 IV. ①V2②V4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第143967号

航空航天概论

Hangkong Hangtian Gailun

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话:010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2011年8月第1版

2011年8月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:13.75

字数:283千字

印数:1-2000

定价:30.00元

前 言

航空航天技术是一门高度综合的科学技术，经过 100 多年的发展，对世界各国的政治、经济、军事以及人类生活各方面都产生了广泛而深远的影响。中国 3 次太空载人飞行获得了圆满成功，“嫦娥工程”第一阶段的对月探索，增强了我国对更加广阔的空间领域展开前瞻性的研究。为满足当今国际、国内航空航天形势的快速发展需要，编写本教材。

全书共分 7 章。第 1 章简要介绍人类的飞行梦想，从古代的飞行之梦到现代自由翱翔太空，人类经历了艰难的探索历程；第 2 章介绍了飞行器的概况，主要包括飞行器的分类、主要性能和数据；第 3 章介绍了飞行原理，主要包括飞行环境、飞机的飞行原理、直升机的飞行原理和航天器的飞行原理；第 4 章介绍了飞行器的基本结构，主要包括飞机、直升机和航天器的基本结构；第 5 章介绍了飞行器的动力系统，主要包括活塞式发动机、空气喷气发动机和火箭发动机的原理及其构成部分；第 6 章介绍了飞行系统，主要包括飞机飞行操纵系统、飞行控制系统、飞机液压系统、飞机燃油系统和生命保障系统；第 7 章介绍了飞行器机载设备，主要包括飞行仪表、导航设备、通信设备和雷达系统。

在本书编写过程中，得到同济大学航空航天与力学学院的领导及许多同事的大力支持，李军老师参与了部分章节的编写，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中不当之处，敬请读者不吝赐正，提出宝贵意见，以便改进提高。

编者

2011 年 3 月



目 录

第1章 飞行梦想	(1)
1.1 上古传说	(1)
1.1.1 嫦娥奔月	(1)
1.1.2 舜	(1)
1.1.3 王莽飞人	(2)
1.1.4 敦煌飞天	(2)
1.1.5 伊卡洛斯	(3)
1.2 神奇的古中国飞行器械	(3)
1.2.1 奇肱飞车	(3)
1.2.2 木鸟	(4)
1.2.3 风筝	(5)
1.2.4 竹蜻蜓	(5)
1.2.5 松脂灯	(5)
1.2.6 火箭	(6)
1.3 艰难探索	(7)
1.3.1 仿鸟飞行	(7)
1.3.2 飘飞升空	(8)
1.3.3 等待破晓	(10)
1.3.4 梦想成真	(13)
1.4 飞向太空	(16)
1.4.1 现代火箭的诞生	(16)
1.4.2 卫星升空	(18)
1.4.3 遨游太空	(18)
1.4.4 成功登月	(19)
1.4.5 “神舟”载人	(19)
1.4.6 “嫦娥工程”	(21)
习题	(22)

第2章 飞行器的概况	(23)
2.1 飞行器的分类	(23)
2.1.1 航空器	(23)
2.1.2 航天器	(26)
2.1.3 近空间飞行器	(29)
2.1.4 火箭和导弹	(35)
2.2 飞机的分类	(37)
2.2.1 按用途分类	(37)
2.2.2 按构造分类	(52)
2.2.3 按重量分类	(52)
2.3 飞机的飞行性能	(53)
2.3.1 飞机的基本飞行性能	(53)
2.3.2 飞机的起飞和着陆性能	(56)
2.3.3 飞机的机动飞行性能	(59)
2.4 飞机的主要数据	(61)
2.4.1 飞机的主要尺寸数据	(61)
2.4.2 飞机的重量数据	(62)
习题	(63)
第3章 飞行器飞行原理	(64)
3.1 飞行环境	(64)
3.1.1 大气飞行环境	(64)
3.1.2 空间飞行环境	(66)
3.1.3 近空间飞行环境	(68)
3.2 气体流动的基本规律	(69)
3.2.1 相对运动原理	(69)
3.2.2 气体流动的连续性原理	(70)
3.2.3 伯努利定理	(71)
3.2.4 低速、高速气流的流动特点	(72)
3.3 飞机的飞行原理	(73)
3.3.1 机翼的外形参数	(74)
3.3.2 飞机的升力	(77)
3.3.3 飞机的阻力	(82)
3.3.4 升力和阻力之间的关系	(87)
3.3.5 高速飞行的特点	(90)
3.3.6 飞机的平衡、稳定和操纵	(100)

3.4 直升机的飞行原理	(109)
3.5 航天器的飞行原理	(111)
3.5.1 开普勒定律	(112)
3.5.2 宇宙速度	(113)
3.5.3 惯性坐标系及轨道的概念	(115)
3.5.4 特殊轨道	(116)
习题	(117)
第4章 飞行器的基本结构	(119)
4.1 飞机的基本结构	(119)
4.1.1 机翼的基本构造	(120)
4.1.2 机身的基本构造	(123)
4.1.3 尾翼的基本构造	(125)
4.1.4 起落装置的基本构造	(126)
4.2 直升机的基本结构	(128)
4.2.1 机身	(129)
4.2.2 旋翼	(130)
4.2.3 动力装置	(130)
4.2.4 起落装置	(130)
4.2.5 操纵系统	(130)
4.2.6 尾桨	(131)
4.3 航天器的基本结构	(131)
4.3.1 卫星结构	(131)
4.3.2 载人飞船的基本结构	(132)
4.3.3 航天飞机的基本结构	(134)
4.3.4 空间站	(136)
习题	(139)
第5章 飞行器的动力系统	(141)
5.1 发动机的分类	(141)
5.1.1 按发动机是否吸入空气进行工作分类	(141)
5.1.2 按产生推进动力的原理分类	(142)
5.2 活塞式航空发动机	(142)
5.2.1 活塞式航空发动机的主要构件	(142)
5.2.2 活塞式航空发动机的工作原理	(144)
5.2.3 螺旋桨	(145)

5.2.4	活塞式航空发动机的主要性能参数	(146)
5.3	空气喷气发动机	(147)
5.3.1	喷气发动机的原理	(147)
5.3.2	涡喷发动机	(147)
5.3.3	涡桨发动机	(154)
5.3.4	涡扇发动机	(155)
5.3.5	涡轴发动机	(157)
5.3.6	涡轮桨扇发动机与推力矢量技术	(157)
5.3.7	冲压喷气式发动机与脉动喷气式发动机	(159)
5.4	火箭发动机	(160)
5.4.1	固体火箭发动机	(160)
5.4.2	液体火箭发动机	(161)
5.4.3	其他能源的火箭发动机	(163)
	习题	(165)
第6章	飞行系统简介	(166)
6.1	飞行操纵系统	(166)
6.1.1	中央操纵机构	(166)
6.1.2	传动系统	(167)
6.1.3	辅助操纵系统	(170)
6.2	飞行控制系统	(170)
6.2.1	自动驾驶仪	(171)
6.2.2	电传操纵	(171)
6.3	飞机液压系统	(172)
6.3.1	液压传动原理	(173)
6.3.2	液压系统的组成	(173)
6.4	飞机燃油系统	(176)
6.4.1	燃油系统的组成	(176)
6.4.2	加油与放油	(177)
6.5	生命保障系统	(178)
6.5.1	座舱环境控制系统	(178)
6.5.2	应急救援系统	(182)
	习题	(187)
第7章	飞行器机载设备	(189)
7.1	飞行器仪表	(189)

7.1.1 气压式高度表	(189)
7.1.2 速度表	(190)
7.1.3 大气数据系统	(191)
7.1.4 航空地平仪	(192)
7.1.5 航向陀螺仪	(193)
7.1.6 电子飞行仪表系统	(193)
7.1.7 发动机指示与机组告警系统	(196)
7.2 导航设备	(196)
7.2.1 无线电导航系统	(196)
7.2.2 惯性导航系统	(199)
7.2.3 卫星导航系统	(199)
7.3 通信系统	(201)
7.3.1 甚高频通信系统	(201)
7.3.2 高频通信系统	(201)
7.3.3 选择呼叫系统	(202)
7.3.4 声频综合系统	(202)
7.3.5 卫星通信系统	(203)
7.4 雷达系统	(204)
习题	(205)
参考文献	(207)

第1章

飞行梦想

天，深远莫测，令人神往。世界上几乎所有的地方都流传着关于天的传说，记载着对天的遐想，憧憬着一个个飞行之梦。然而，人类的飞天梦想却经历了漫长的历程才得以实现。从远古的梦幻到中国西汉末年的风筝，其间经历了数千载；从风筝到18世纪热气球载人升空，岁月流逝了18个世纪；从热气球再到20世纪初莱特兄弟造出第一架有动力、可操纵、能持续飞行的飞机，时光流过了120个春秋；从飞机到遨游太空的宇宙飞船，又经过了58个寒暑……

日复一日，年复一年，朝朝暮暮了，世世代代，人类锲而不舍的追求、不屈不挠的奋争，终于为自己插上了智慧的翅膀，赢得了在蓝天翱翔的自由。

1.1 上古传说

古往今来，遥望星空，人类做了多少飞天之梦。我们的祖先凭着丰富的想象力，编织了一个又一个美丽的传说和神话。

1.1.1 嫦娥奔月

西汉刘安的《淮南子·览冥训》和晋朝干宝的《搜神记》里说，后羿从西王母处求得“不死之药”，两人分吃，可以长生不老；一人独吃，可以升空飞天。谁知后羿的妻子嫦娥偷着一人独吃了药，结果她就不由自主地飞升起来，一直飞到月宫才停下来。从此她就在冷冷清清的广寒宫里，苦守了几千年，再也不能回到人间。这就是广为流传的嫦娥奔月的神话。

1.1.2 舜

在4000多年以前，相传舜当过39年的全国领袖。舜又叫大舜、虞舜。舜的父亲瞽叟不喜欢舜，常常想暗害他。舜年轻的时候，在家里务农。有一天，瞽叟叫舜爬到一个很高的粮仓顶上去干活，等舜上去之后，瞽叟抽去梯子，又在粮仓下偷偷放了一把火，想把他烧死。舜正在干活，忽然发现了浓烟，又见火苗蹿了



图 1-1 嫦娥奔月

上来。他想从高处往下跳，因为太高，怕被摔死，但是如果不跳，准会烧死。他在心慌意乱之中，顺手抓了两个放在旁边的大斗笠，一闭眼睛，就跳了下来。奇迹发生了，舜竟然平安着地，一点儿也没有摔伤。这个故事在司马迁的《史记·五帝本纪第一》上有记载：“使舜上涂廩，瞽叟从下纵火焚廩。舜乃以两笠自杆而下，去得不死。”



图 1-2 舜

1.1.3 王莽飞人

相传西汉末年的王莽时代（公元 9 ~ 23 年），王莽当了皇帝，想加强武力，去扩大疆土，就招募有本事的能人。有一个人自己说能够飞行，一日千里。王莽叫他当众试验。他在自己身上用大鸟翎做成两个翅膀，又在身上粘了一身鸟毛，并且还装了机关。他飞行了几百步才掉下来。这是东汉班固在《前汉书·王莽传》中记载的：“……取大鸟翮为两翼，头与身皆著毛，通引环纽，飞数百步堕……”



图 1-3 王莽飞人

1.1.4 敦煌飞天

甘肃敦煌莫高窟，是我国的艺术宝库。在石窟的壁画里，画着很多灵活生动的“飞天”，如图 1-4 所示。还有隋朝的壁画，画着长了翅膀的“羽人”。这些都是古人升空愿望在艺术上的反映。

1.1.5 伊卡洛斯

像鸟一样在天空翱翔是人类共同的理想，古代各国都曾流传过类似的传说和神话。在古希腊神话中，建筑师代达洛斯与儿子伊卡洛斯，为了逃出米诺斯国王在克里特岛上所设的迷宫，用蜡和羽毛为自己制作了能飞翔的翅膀。能够像鸟和神一样自由飞翔使年轻的伊卡洛斯欣喜若狂，他忘记了父亲的劝告，越飞越高，竟然梦见驾着马车奔行于天空的太阳神正在向他微笑，如图1-5所示。最终因蜡被太阳所熔化，父子俩不幸摔死在汪洋中。



图1-4 敦煌飞天



图1-5 伊卡洛斯

此外，在中国的传说中，还有羲和驭日、鹊桥相会；肖史和弄玉乘龙驾凤双双成仙飞上天穹；《西游记》中一个筋斗可飞十万八千里的孙悟空；《封神演义》中两肋生肉翅，在空中飞行有风雷之声的雷震子以及脚踏风火轮的哪吒；等等。古希腊神话中墨丘利带翅的凉鞋；古代斯堪的纳维亚传说中韦兰铁匠的飞行马甲；阿拉伯神话中的波斯飞毯；等等。关于飞行的神话、传说不胜枚举。

1.2 神奇的古中国飞行器械

中国是世界文明的发源地之一，古代的中国人民为了实现飞上蓝天的梦想，凭着他们的勤劳和智慧，发明了风筝、火箭、孔明灯、竹蜻蜓等能飞的器械。而这些能飞的器械就是现代飞行器的始祖或雏形。

1.2.1 奇肱飞车

黄帝以后，著名的帝王有尧、舜、禹，随后的朝代是夏、商、周。商朝（公元前1711~公元前1066年）第一个君主是汤，又叫商汤或成汤。商汤在位的时候，中国西面有一个奇肱国。这国里的人，虽然只有一只胳膊，可是心灵手巧，

造出了飞车，能顺风飞得很远，可以一日万里。有一年，一奇肱人乘着西风，驾飞车飞到中国的豫州。商汤知道了，就派人把奇肱人好好地招待供养，另外怕老百姓见到飞车，就把飞车破坏了。过了10年，商汤派人按照飞车的原样，另外造了一架飞车，乘着东风，让奇肱人驾着飞车飞回去了。

《山海经·海外西经》里有一段奇肱飞车的记载：“其人，善为机巧，以取百禽能作飞车，从风远行……”

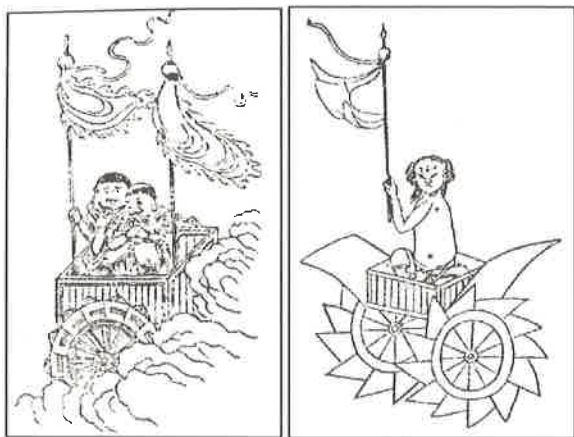


图1-6 奇肱飞车

1.2.2 木鸟

中国古人在很早的时候就开始制作木鸟，古书中称木鸟为木鸢、鹊、鹄等名。据古书记载，战国时期，公输班、墨子曾用木材和竹子制成木鸟，纵飞上天。《韩非子·外储说左上》上有“墨子为木鸢，三年而成，蜚一日而败。弟子曰：‘先生之巧，至能使木鸢飞’”。《墨子·鲁问》上称“公输子削竹木为鹊，成而飞之，三日不下。公输子自以为至巧。墨子谓公输子曰：‘子之为鹊也，不如匠之为车辖。’”此外，还有东汉科学家张衡制作木鸟的事，南朝宋范晔在《后汉书·张衡传》记载有“木雕犹能独飞”。宋朝李坊等人编的《太平御览》中还有“《文士传》曰：张衡尝作木鸟，假以羽翮，腹中施机，能飞数里”。唐代苏鄂的《杜阳杂编》有“飞龙卫士韩志和，本倭国人也。善雕木作鸢、鹤、鸭、鹊之状，饮啄动静与真无异。以关戾置于腹内，发之，则凌云奋飞，可高三丈，至一二百步外，方始却下”。



图1-7 木鸟

1.2.3 风筝

美国国家航空航天博物馆中陈列着世界上最早的飞行器——中国的风筝和火箭。

风筝又名风鸢、纸鸢或鹞子，是一种极普通的玩具。相传公元前 202 年，汉楚相争时期，韩信曾做风筝，让张良乘坐而“楚歌云上”，楚军因思乡厌战而亡。唐朝赵昕的《息灯鹞文》说“我闻淮阴巧制，事启汉邦。楚歌云上，或曰子房。”说的就是这事。而宋朝高承的《事物纪原》说韩信曾利用风筝测量距离，是风筝最早用来为军事服务的记载。明代的《古今事物考》中也记载了韩信用风筝测量未央宫距离一事，在西方《世界航空史话》中亦有记载。可见风筝早在公元纪年之前就已经在中国出现。7 世纪风筝开始传入朝鲜，8 世纪传入日本，14 世纪传入欧洲，以后又传入美洲和世界其他地方。中国是风筝的故乡，每年大量的风筝爱好者携带风筝到中国来参加风筝比赛。

1.2.4 竹蜻蜓

用竹或木削成带扭曲状的薄片，在中间装一根立轴，用双手急搓能使其快速旋转而飞升，这便是中国民间广泛流传的玩具竹蜻蜓，如图 1-8 所示。如果把它横放便是螺旋桨。竹蜻蜓大约在 18 世纪传入欧洲，被称为“中国陀螺”。西欧和俄国学者曾加以研究和试验，竹蜻蜓旋转而飞升的原理与现代直升机相同，因此，竹蜻蜓被认为是直升机的雏形。

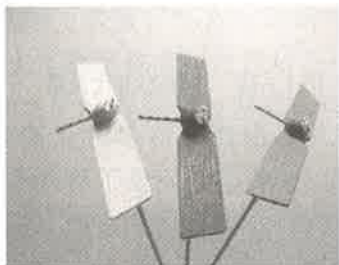


图 1-8 风筝和竹蜻蜓

1.2.5 松脂灯

相传在五代时，莘七娘随夫人闽作战，曾以竹篾制成长方形灯架，外蒙以纸，底盘上燃以松脂油，当灯内充满热气即扶摇直上，用作军中信号，这就是松脂灯。后人为了纪念七娘，又名七娘灯。七娘的故事在《全闽诗话》中有记载。松脂灯靠热气浮升的原理，与航空热气球升空原理完全相同，但比世界上公认的第一个热空气球——法国蒙哥尔费热气球要早 800 多年。



图 1-9 莘七娘松脂灯

1.2.6 火箭

火药是中国最伟大的发明之一，首先用火药制成火箭并用于战争的也是中国。三国时期，诸葛亮伐魏“一出岐山”攻打陈仓时，陈仓守将郝昭就曾用弓箭射出的火箭，反击蜀兵攻城用的云梯，使诸葛亮不能取胜。南宋末年（公元1279年以前）出现了利用反作用力原理喷气推进的火箭；元朝（1271~1368年）火箭已广泛用于战争；明朝（1368~1644年）时火箭的威力和品种已有很大发展，明朝名将戚继光所使用的火箭“可去三百步，中者人马皆倒，不独穿而已”，使倭寇闻风丧胆。



图 1-10 中国的古代火箭

明朝，火药武器迅速发展，出现了许多种火箭武器。茅元仪在天启元年（1621年）写成的《武备志》一书里，记录了种类繁多性能各异的火箭武器，其中类似喷气飞机的“神火飞鸦”、有两级推进的“火龙出水”和能自控返回的“飞空砂筒”最为典型。三四百年前的这些武器当然可以认为是现代飞弹和航天器的始祖。



图 1-11 “神火飞鸦”、“火龙出水”和“飞空砂筒”

1.3 艰难探索

人类虽然并未生就一双翅膀，但为实现飞上蓝天这一崇高的理想，凭着智慧和执著的追求，付出了艰辛的努力，经历了从幻想到实施飞行漫长的探索过程，最终完成了自由飞行。

1.3.1 仿鸟飞行

古人向往飞行，认为只有长了翅膀的东西才能飞行。人要想飞，就应该学习鸟的样子，长出两只翅膀。也正因为有了这种想法，各国才产生出许多人长翅膀会飞的童话和传说来。

而人身上是长不出翅膀来的。要向鸟类学习飞行，只有在人身上装一对人造的翅膀，或是人为造出一个会飞的鸟来。公输班、墨子、张衡制造木鸟和王莽时代装上大翅膀的飞行都是为了实现这一理想而向鸟类学习的结果。

谁都知道，鸟类飞行时，必须上下扇动两只翅膀。这种飞行叫扑翼飞行，能作扑翼飞行的人造机械叫做扑翼机。对扑翼飞行表现最为显著的要算中世纪欧洲的飞行先驱。

意大利文艺复兴巨匠达·芬奇，他是画家、学者，也是航空科学先驱。1487年，达·芬奇应用解剖学和数理方面的知识观察分析鸟类翅膀的运动，推论出是空气流过鸟的翅膀才能产生升力，体现了气流与物体发生相对运动而产生升力的思想，而且他发现气流流过的速度越快，产生的升力也就越大。达·芬奇的著作有《论鸟的飞行》，并绘制了大量有关飞行研究的草图，许多图符合空气动力学原理，反映出他认识到空气密度和重心位置对飞行器的重要影响。但他的研究成果并未公诸于世，直到19世纪后期才发现，对航空的发展未能起到应有的推动作用。

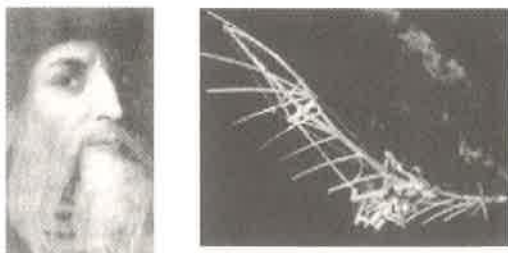


图1-12 达·芬奇和他的扑翼机

1503年，意大利学者丹蒂在佩鲁贾试图用自制的翼飞行，他雄心勃勃地计划飞往法国，结果坠地摔断了腿骨。

17世纪，土耳其人赫扎芬·塞莱也做了一双翅膀，从波斯普鲁斯海岸加拉

塔的一座塔上跳下来，据说飞了好几千米，最后安全地降落在附近的司库台市的市场上。这是有记载的最好飞行成绩。



图 1-13 塞莱扑翼飞行

1673 年，法国的一个锁匠贝尼埃，巧妙地制造了一个飞行十字架的“体力扑翼机”的飞行器，进行了飞行试验，他的设想比过去的“插翅而飞”又前进了一步。

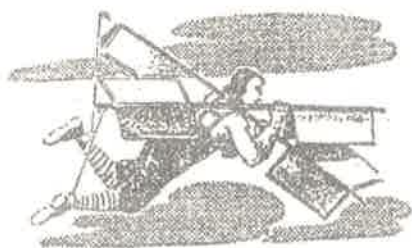


图 1-14 贝尼埃飞行十字架



图 1-15 20 世纪初的扑翼飞行

1789 年，日本有一个名叫幸吉的裱糊匠，按照鸽子的体重和羽翼长度的比例，为自己制造了一套翅膀，套在胸前，靠体力扇动飞行。

1860 年，意大利人博雷利在《运动的动物》一书中阐明了人体机能的局限性，指出人离开机器的帮助不可能支持自己的体重，此后人力扑翼的飞行尝试逐渐减少。

1.3.2 飘飞升空

由于扑翼飞行的失败，人们开始转向轻于空气的飞行器的研究，出现了气球和飞艇等飞行器。

1.3.2.1 热气球

中国早在五代时期就使用过原始的热气球——松脂灯，历史上还出现过各种轻于空气飞行器的其他设想和尝试，但世界公认首次制造成功轻于空气的航空器——气球的是法国人蒙哥尔费兄弟。

1783 年 9 月 19 日，蒙哥尔费兄弟在巴黎作表演，气球载着鸡、鸭、羊各一只，在空中飘行 8min，被公认为世界上第一个热气球。1783 年 10 月 15 日，法国的罗齐尔乘蒙哥尔费兄弟发明的热气球上升到 26m，飞行约 4.5min，是公认的人类第一次升空，但这一次是系留气球升空。1783 年 11 月 21 日，罗齐尔和达尔

朗德又在巴黎做了一次自由飞行，上升到 300m 的高度，在 8km 以外平安降落，共飞行了 25min。这是人类乘航空器进行的第一次空中自由航行。同年 12 月 1 日，法国物理学家查尔斯和助手罗伯特首次乘自制的氢气球升空，飘行 50km，留空时间超过 2h，实现氢气球载人飞行。

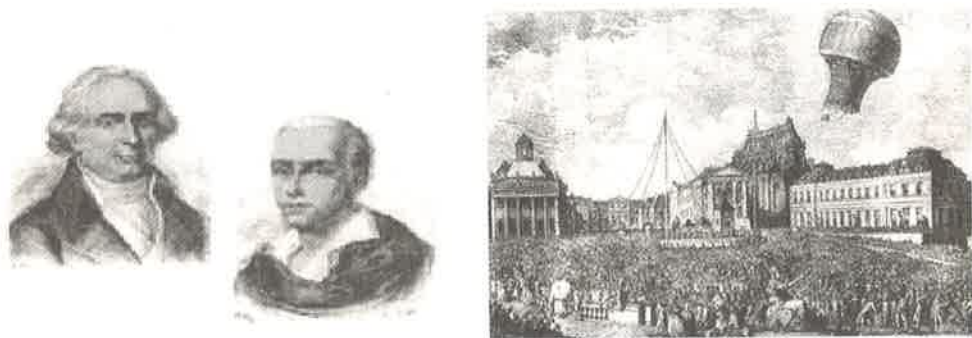


图 1-16 蒙哥尔费兄弟和热气球

气球的出现激起了人们对乘气球飞行的热情，1785 年 1 月 7 日，法国人布朗夏尔和美国人杰弗里斯乘氢气球首次飞越英吉利海峡。1785 年 6 月 15 日，法国的罗齐尔和罗曼乘氢气和热气的混合气球在飞越英吉利海峡时，气球着火爆炸，二人成为航空事故的牺牲者。

1.3.2.2 飞艇

由于气球只能在空中随风飘浮，而不能控制前进的方向，于是带有动力并可以操纵的气球——飞艇应运而生。飞艇上装有发动机和螺旋桨、安定面和操纵面以及装载人或物的吊舱，飞行路线可以控制。

1852 年 9 月 24 日，法国的亨利·吉法尔驾驶自己研制的第一艘可操纵动力软式飞艇试飞成功，从巴黎飞到特拉普，航程 28km。1900 年 7 月 2 日，第一艘硬式飞艇，长 128m、容积 111300m^3 、巡航速度为 60km/h 的德国齐伯林 LZ-1 号首次在博登湖上空试飞成功。1909 年齐伯林创办了第一家民用航空公司——德国航空运输有限公司，1910 年 6 月 22 日开始用 LZ-7 号飞艇在法兰克福—巴登—杜塞尔多夫之间作载客定期飞行，能载客 20 人，这是最早的空中定期航线。1915 年 5 月 31 日，德国的齐伯林 LZ-38 号飞艇首次夜袭伦敦。第一次世界大战后，齐伯林又建造了两艘巨型飞艇，在欧洲到南美和美国的商业航线上飞行。这种飞艇长 245m，容积 200000m^3 ，速度 130km/h ，载客 75 名。1929 年 8 月 8~29 日，德国的“齐伯林伯爵”号飞艇载运着 16 名旅客和 37 名机组人员从美国新泽西州出发环球飞行成功，航程 35200km，历时 21 天 5 小时 26 分钟。然而 1937 年 5 月 6 日，德国的“兴登堡”号在新泽西州着陆时从尾部开始起火，艇上 97 人中 35 人和一名地勤人员共 36 人罹难，从而导致了飞艇的衰落。

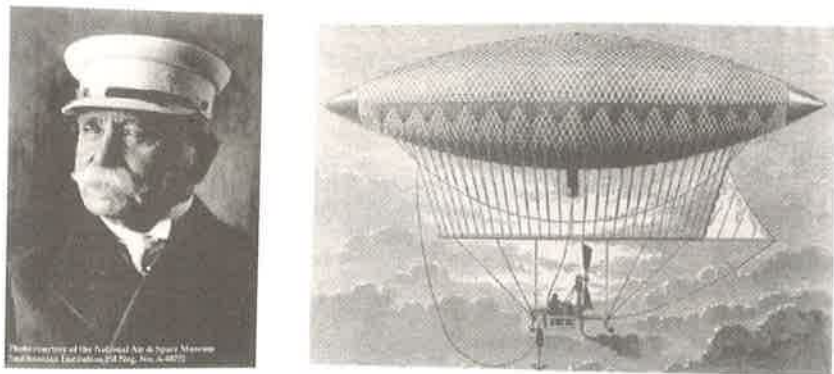


图 1-17 吉法尔和他的软式飞艇

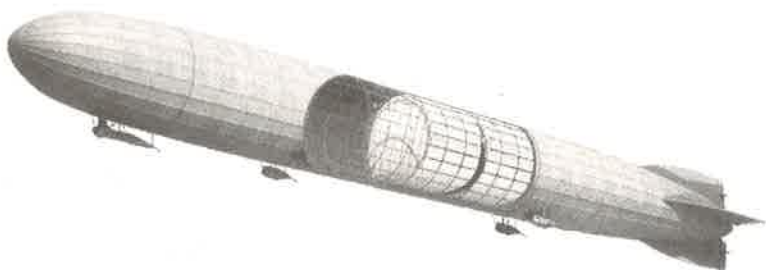


图 1-18 齐伯林硬式飞艇

1919 年，美国的 ZR1 号硬式飞艇，被认为是世界上第一艘充氦气的飞艇。然而早期的充氦飞艇并不稳定，多次在飞行中发生故障。直到 20 世纪 70 年代以后，飞艇重新得到重视，许多国家才应用新材料新技术研制了安全稳定的新型飞艇，用以巡逻和吊装大型设备。

1.3.3 等待破晓

欧洲 18 世纪的产业革命推动了科学技术的迅猛发展，从而为人类实现飞行提供了条件。

1.3.3.1 乔治·凯利的贡献

英国乔治·凯利爵士被称为航空之父。风筝在 14 世纪传入欧洲后，他通过研究风筝的飞行能力，发现了风筝翅膀与风的角度关系，利用这个发现，1809 年他制成第一架滑翔机。1849 年起，凯利设计的滑翔机先后将一名 10 岁男孩和他的马车夫带上了天空。

乔治·凯利爵士对航空最重要的贡献在于理论研究方面，1809 ~ 1810 年，凯利发表了重要著作《关于空中航行》，加上他的滑翔机的载人试飞，确立了现代飞机的基本飞行原理和基本组成部分、布局、要求，并给重于空气飞行器的机械飞行下了明确的定义。他剖析了飞机稳定性、操纵性的重要性；首次提出了上反角的概念，指出其适用于侧向稳定；提出在飞机尾部安装水平尾翼（简称平尾）可保证纵向稳定；提出在尾翼上安装可转动的垂直尾翼（简称垂尾）可保

证飞机良好的操纵性；并提出多翼机的构想，兼顾较大机翼面积和重量^①轻、强度高的要求。

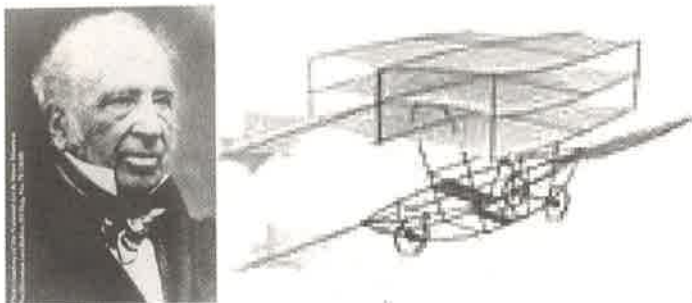


图 1-19 凯利和他的滑翔机

1.3.3.2 亨森的“空中蒸汽汽车”

1843年，英国人亨森在其友人斯特林费洛的协助下，设计完成“空中蒸汽汽车”，并取得专利。亨森是沿着凯利确定的固定翼面的思路，设计了一架单翼飞行器，用斯特林费洛提供的一台30hp^②的蒸汽机作为动力装置。“空中蒸汽汽车”的机翼具有双弯度，平尾和垂尾翼面可以操纵。机翼构造包括翼梁、翼肋，外覆以蒙布，起落架为三点式，这些都和现代飞机很接近，但由于当时没有重量轻而功率大的内燃机作为动力装置，蒸汽机很笨重，不能使飞行器飞起来，所以亨森的设计只能停留在图样阶段，未能制造出来。

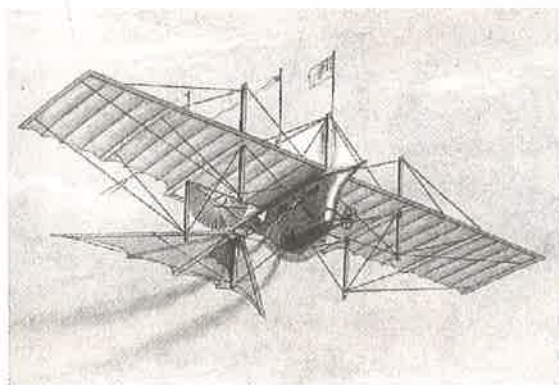


图 1-20 亨森的“空中蒸汽汽车”

1.3.3.3 莫扎伊斯基的单翼机

1884年，俄国海军军官莫扎伊斯基设计制造了一架单翼机，并做过试飞。早年的莫扎伊斯基曾对鸟类和船用螺旋桨进行过仔细研究，萌发了发明载人飞行

① 本书所提“重量”即为“质量”概念，单位为t、kg等。

② 1hp = 745.7W。

器的念头。他设计的单翼机具有机身、尾翼、四轮起落架，2台英国制造的蒸汽发动机和3副螺旋桨，载一名驾驶员的同时还可以载几名旅客。莫扎伊斯基的单翼机获得专利权，并在彼得堡附近的红村做过试飞，但只能跃飞20~30m的距离，不能持续飞行。

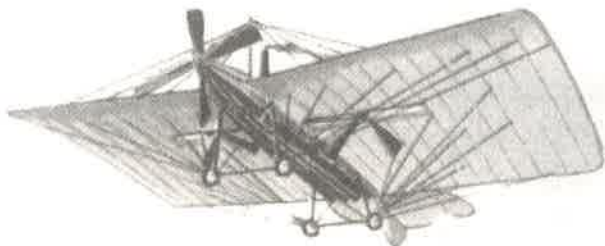


图1-21 莫扎伊斯基的单翼机

1.3.3.4 阿代尔的蝙蝠飞机

1890年，法国电气工程师阿代尔设计制造了一架蝙蝠式飞机——“风神”，当年10月9日在阿美韦里斯从平地起飞高度约20cm，飞越距离约50m，然后摔下。1897年，阿代尔又设计制造了“飞机”号飞机，与“风神”号外形相似，“飞机”号也做了几次短暂的跳跃飞行，未能持续飞行。阿代尔的飞机机翼上没有操纵面，未解决操纵稳定性问题，并且发动机重量太大，采用蝙蝠翼扑动的形式，所以没有得到公认。



图1-22 阿代尔和他的蝙蝠飞机

1.3.3.5 李林达尔的滑翔机

德国的李林达尔是近代最著名的滑翔飞行家，他在1891~1896年这6年间，平均每天进行1.14次滑翔飞行试验，共进行了2500多次试验，设计了18种不同形式的滑翔机。李林达尔根据飞行试验的数据，出版了《鸟类飞行——航空的基础》和《飞翔中的实际试验》等专著，着重指出人造飞行器的翼面也要像鸟那样具有弓形剖面才能获得更大的升力。在1896年8月9日的一次飞行时，李林达尔不幸失事罹难，临终前他说必须有人做出牺牲。图1-23为李林达尔和他陈列在博物馆中的蝙蝠形滑翔机。



图 1-23 李林达尔和他的滑翔机

1.3.3.6 兰利的成就

兰利，自学成才的美国物理学家、天文学家和航空科学家。1891年出版了《空气动力学实验》一书，并提出了倾斜平板产生升力的公式： $F = kA\rho V^2 \sin\alpha$ 。对航空，他倡导遵循科学的研究方法。

1903年10月7日，美国人曼利驾驶兰利设计的“空中旅行者”号在船上的弹射装置上进行了两次飞行试验，虽未能成功，但几十年后著名飞机设计师霍克将其打捞上来后略作修整，再次试飞即获成功。兰利的“空中旅行者”号是莱特兄弟前最接近载人动力飞机飞行成功的探索者，证明了重于空气的飞行器不仅在理论上而且在技术上是可行的。



图 1-24 兰利

1.3.4 梦想成真

想象是人类智慧的萌芽，而幻想却是创造的母亲。一代又一代先哲用学识、智慧去寻找打开人类飞行奥妙的金钥匙，一批又一批勇士，用汗水、鲜血去接起通往蓝天的桥梁。尽管他们中间的绝大多数都以失败告终，但无数次的试验、无数次血的代价，使得人类在通往飞行之梦的道路上摸索前进，终于从无数错综复杂的岔道中，找到了正确的方向，实现了飞上蓝天、飞向太空的理想！

1.3.4.1 艰难起飞

1903年12月17日，美国的威尔伯·莱特和奥维尔·莱特兄弟俩设计制造的“飞行者”号在美国北卡罗莱纳州的基蒂霍克试飞成功，这是世界公认的最早的可操纵动力持续飞行。17日这一天，兄弟俩共飞行了4次。第一次由弟弟奥维尔·莱特驾驶，飞行距离36m，留空时间12s；最后一次由哥哥威尔伯·莱特驾驶，飞行距离260m，留空59s。“飞行者”号被公认为世界上第一架动力飞机，它开创了现代航空的新纪元。

莱特兄弟是在李林达尔滑翔飞行活动的鼓舞下，对航空产生了浓厚的兴趣。他们制造滑翔机进行飞行操纵试验；首次设计制造了风洞用于试验不同的机翼模型。他

们制造的“飞行者”号飞机为双翼鸭式布局木制飞机，上翼为弯拱形翼型，下翼为平凸形翼型，起飞重量 340kg，动力装置为一台 12hp 的水冷 4 缸活塞式发动机。

“飞行者”号在飞行的时候，人俯卧在机翼的木托架上，右手推动手柄操纵升降舵，控制飞机的俯仰，左手左右摇动手柄牵拉钢索，使机翼两端后缘分别上下扭曲，以控制飞机的横向动作，前后推拉手柄可改变垂尾的角度，控制飞机的航向，如图 1-25 所示。



图 1-25 莱特兄弟和他们的第一架飞机

1.3.4.2 航空救国

第一架飞机问世之后，各国都出现了研制飞机的热潮。旅居海外的中国青年，以高度的敏感和智慧，也投入到航空这一新兴的技术，并取得了震惊世界的成就。旅美爱国华侨冯如，广东恩平人，少年赴美打工，苦学英文、电学和机械，立志航空救国。1903 年莱特飞机问世，次年日俄战火在我国东北燃烧，同胞遭难，冯如预感到飞机才是救国的利器，决心研制飞机，报效祖国，并发誓“飞机不成，誓不回国”。1908 年，冯如即在旧金山设厂制造飞机，他博采诸长，别具一格，终于自行研制出我国第一架飞机，并于 1909 年 9 月 21 日亲自试飞上天，飞行 800m，轰动了美国，当地报纸称誉他为“东方的莱特”，惊呼“中国的航空技术超过了西方”。1911 年 12 月，冯如携机回国参加革命，1912 年 8 月 25 日在飞行表演中失事牺牲，年仅 29 岁。冯如殉职后，被迫授少将军衔，葬于广州黄花岗烈士陵园，竖碑为“中国始创飞行大家”。孙中山先生为他亲笔题词“航空报国”。

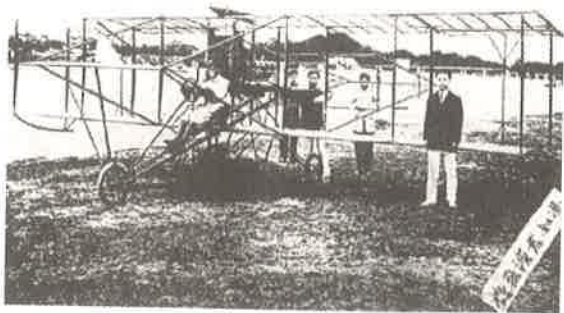


图 1-26 冯如和中国第一架飞机

此外,还有谭根、厉汝燕、刘佐成、王助等爱国华侨等对世界航空做出了卓越的贡献。

1.3.4.3 水上飞机

法国的亨利·法布尔率先在飞机上装了浮筒,使之能在水面起飞着陆,把飞机的使用范围扩大到江河湖海广大水域。

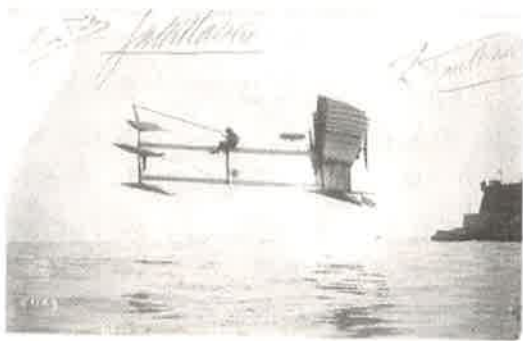


图1-27 法布尔的水上飞机

法布尔于1910年3月28日在马赛附近的拉米德港进行首次水上飞机试飞,速度达到60km/h,飞行距离500m,安全降落水面,宣告成功。该机装有3个浮筒,1个装在机头下面,2个分别装在左右机翼下面,机头下的浮筒可由驾驶员操纵,使飞机能在水面转弯滑行,全部浮筒使用弹性层板制成,能经受水面滑行和溅落时受到的冲击,并能起到缓冲作用。

美国的格林·寇蒂斯进一步发展了水上飞机技术,他将浮筒式水上飞机改进为船身式;又经过人们的努力,诞生了原始的航空母舰,这就孕育了后来以航空母舰为核心的远洋舰队和海军航空兵。

1.3.4.4 喷气式飞机

第一次世界大战中,飞机显示了举足轻重的作用,成为可改变战争格局的重要军事力量。战争的需要促进飞机的发展,飞机性能迅速提高,飞机的速度从开始的每小时几十千米提高到每小时大于六七百千米,接近活塞式飞机的极限。1939年4月26日,德国梅塞施米特Me-109驱逐机以755km/h的速度创造了活塞式飞机的最高纪录。44年后,1983年7月30日,美国的P-51D“野马”战斗机以832km/h刷新了这一纪录。

由于活塞式发动机的功率小、重量大,飞机的性能受到限制,战争促使各国探索新的动力装置。和中国火箭“神火飞鸦”原理相同的喷气式推力发动机诞生了。它质量轻、推力大,可大大提高飞机的飞行速度。1939年8月27日,德国首先试飞成功了装有喷气发动机的He-178飞机,成为世界上第一架喷气式飞机。

1941年,英国研制成功了E28/39喷气飞机,此后,苏联、美国相继研制出

米格-15、F-80、F-86等喷气飞机。

今天，飞机已成为现代社会不可缺少的工具，作为运输设备，它使地球变得越来越“小”；作为军事装备，它是现代战争不可缺少的获胜法宝。我们相信，随着航空技术的不断创新，飞机必将推动人类社会的进一步发展。

1.4 飞向太空

“嫦娥奔月”不只是我国古代广为流传的一个美丽神话，更代表了人类遨游太空、探索宇宙的梦想。自从有了火箭，这个梦想就有了实现的可能。世界上第一个试图乘坐火箭上天的“航天员”就出现在中国。相传在14世纪末，明朝官员万户坐在装有47支当时最大的火箭的椅子上，双手各持一大风筝，试图借助火箭的推力和风筝的升力实现飞行的梦想。尽管这次试验失败了，万户献出了生命，但万户被公认是尝试利用火箭飞行的世界第一人。为了纪念万户，国际上将月球上的一座环形山以“万户”命名。

1.4.1 现代火箭的诞生

1.4.1.1 航天先驱

虽然我们的祖先发明了火药、火箭，但由于种种原因，现代火箭技术还是首先在欧洲得到迅速发展。19世纪末20世纪初，欧洲涌现出许多航天先驱者。

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。他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，奠定了航天学的基础。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。他的这些观点仅仅几十年就成为了现实。他还提出用新的燃料（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。他的技术设想，如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，于1910年开始对火箭进行研究。1919年，他发表了《达到极大高度的方法》，文中阐述了火箭飞行的数学原理，指出火箭必须具有7.9km/s的速度才能克服地球的引力，并提出了利用火箭把有效载荷送至月球的几种可能方案。戈达德博士认为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，他首次进行液体火箭飞行试验并获得成功。1932年他首次用陀螺控制的燃气舵操纵火箭飞行，1935年他的试验火箭实现了超声速飞行，最大射程达

20km。

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



图1-28 航天先驱齐奥尔科夫斯基、戈达德、奥伯特

1.4.1.2 V-2 导弹

实用的近代火箭出现于第二次世界大战时的德国。早在1932年德国就发射了A2火箭，飞行高度达到3km。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），1944年9月6日V-2导弹首次投入作战使用。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14m，质量为13t，箭体直径1.65m，最大射程320km，发动机熄火高度96km，飞行时间约320s，命中精度圆公算偏差5km，有效载荷约1t。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。



图1-29 V-2 导弹

第二次世界大战后，西方各国看到 V-2 导弹在战争中的威力，不同程度地开展了洲际导弹的研究计划。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，如奥博特与冯·布劳恩都离开德国到美国，为这两个国家在第二次世界大战后迅速发展火箭和航天技术创造了有利的条件，也在导弹和航天领域展开了激烈的竞争。

1.4.2 卫星升空

伴随着戈达德博士液体火箭的升空，人类揭开了航天时代的序幕。

苏联的谢尔盖·科罗廖夫将他主持设计的第一枚洲际弹道导弹 P-7 (SS-6) 改装成“卫星”号运载火箭，于 1957 年 10 月 4 日发射了第一颗人造地球卫星“宇宙一号”，并将其送入地球轨道，开创了人类航天的新纪元。

“宇宙一号”重量为 83.6kg，球形，伸出 4 根天线，如图 1-30 所示。

此后，美国奋起直追，终于在 1958 年 1 月 31 日也发射了其第一颗地球卫星“探险者一号”，重量为 8.3kg，形状为圆柱体。

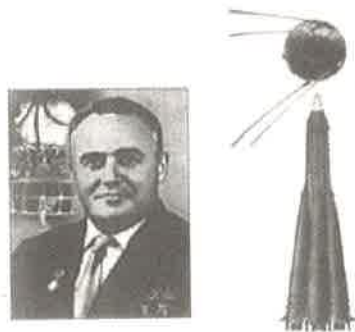


图 1-30 科罗廖夫和第一颗人造地球卫星

1.4.3 遨游太空

第一颗地球卫星发射后，当时世界上的两个超级大国开始在太空中展开一场激烈的角逐。谁都明白，这场角逐并不仅仅只是表现各自在太空中的绝招，更重要的是，卫星是用火箭推上太空的，而火箭是军事力量的重要象征，因为火箭可以装载卫星，当然也就可以装载导弹。火箭可以把卫星送上太空，也就意味着可以把导弹送到地球上的任何一个角落。

在这场太空竞赛之初，苏联占了优势。苏联不仅发射了人类历史上的第一颗人造地球卫星，而且用火箭把人类的第一个宇宙飞行员加加林送上了太空。

1961 年 4 月 12 日，尤里·加加林少校搭乘“东方”号宇宙飞船在苏联升空，成为世界上第一位进入太空的人，具有划时代的意义。

加加林环绕地球一周之后，重新进入大气层，在离他出发地点几百千米的萨拉托夫州捷尔诺夫卡区斯梅洛夫村着陆。加加林的第一次太空飞行，是在莫斯科时间上午 9 时 07 分发射的，于上午 10 时 55 分着陆，历时 1h48min。他回到莫斯科时，受到成千上万群众的夹道欢迎。赫鲁晓夫亲自授予加加林列宁勋章。加加林成为世界公认的“太空第一人”，是苏联的骄傲、世界的骄傲。



图 1-31 加加林和“东方”号宇宙飞船

1.4.4 成功登月

在激烈的美苏太空对抗中，起初美国处于劣势，美国当然不甘示弱。1960年11月8日，年轻的约翰逊·肯尼迪当选美国总统，他决心在“太空竞赛”上战胜苏联，实施了一系列的太空计划。1969年7月16日9时32分，“阿波罗十一号”飞船由“土星5号”火箭在肯尼迪航天中心发射；20日22时56分，航天员阿姆斯特朗走出月球车，成功踏上月球，寂静的月亮上，出现了人类的第一个脚印。

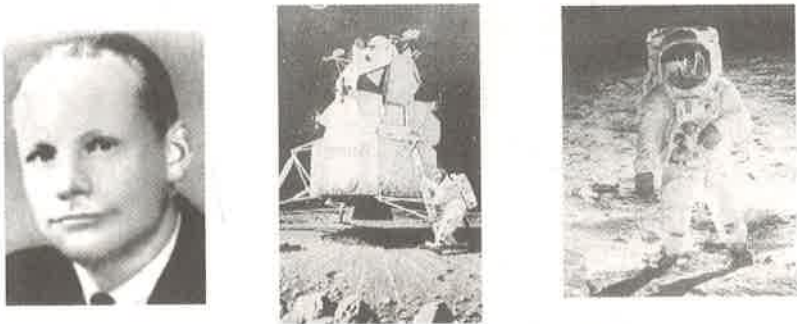


图 1-32 阿姆斯特朗和“阿波罗十一号”

1.4.5 “神舟”载人

美国与苏联是两个超级太空大国，与此同时，世界上许多国家也加入了向宇宙进军的队伍。1970年4月24日，中国“长征一号”运载火箭首次将我国的第一颗人造地球卫星“东方红一号”送入太空。

1992年，我国载人飞船正式列入国家研制计划，即后来命名的“神舟”号飞船载人航天工程，迄今在酒泉卫星发射中心共进行了7次发射：

- (1) 1999年11月20日，“长征二号”F运载火箭成功发射“神舟一号”无人试验飞船，21h后在内蒙古中部回收场成功着陆。
- (2) 2001年1月10日，“神舟二号”无人飞船发射升空。

(3) 2002年3月25日,“神舟三号”无人飞船成功发射。

(4) 2002年12月30日,“神舟四号”无人飞船成功发射。

(5) 2003年10月15日,杨利伟搭乘“神舟五号”载人飞船成功发射升空,标志着中国正式加入了载人航天的国家队伍,圆了中华民族几千年的飞天梦想。“神舟五号”先以远地点350km左右、近地点200km左右的椭圆形轨道运行,在运行几圈之后,调整为距地350km左右的圆形轨道。杨利伟在太空中生活了21h23min,绕地球飞行14圈后安全返回。38岁的杨利伟成为第431位进入太空的地球人。

(6) 2005年10月12日,“神舟六号”载人飞船发射升空。航天员费俊龙、聂海胜在太空飞行5天5夜,两人配合创造了中国航天史上的多项第一。返回舱于2005年10月17日凌晨4时33分在内蒙古四子王旗中部草原成功着陆,航天员平安返回。



图1-33 “长征一号”运载

火箭和“东方红一号”卫星



图1-34 杨利伟和“神舟五号”

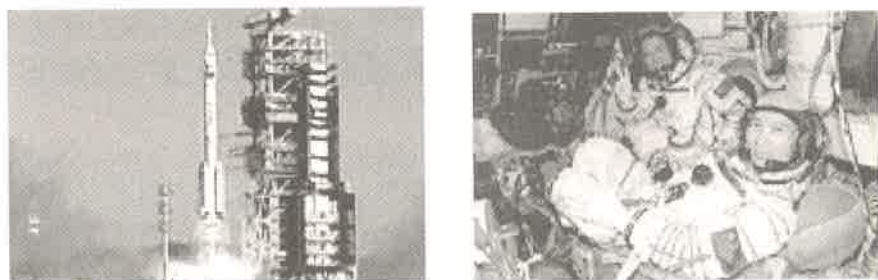


图1-35 费俊龙、聂海胜和“神舟六号”

(7) 2008年9月25日,“神舟七号”载人飞船发射升空,27日,航天员翟志刚成功实施空间出舱行走和空间科学试验,实现了我国空间技术发展的重大跨越。这一举世瞩目的伟大成就向世界宣告,中国已成为世界上第三个独立掌握空间出舱关键技术的国家。



图 1-36 翟志刚、刘伯明、景海鹏和“神舟七号”

1.4.6 “嫦娥工程”

2004年，中国启动了月球探测工程，并命名为“嫦娥工程”。我国的探月计划分为“绕、落、回”3个阶段：

第一步为“绕”，即发射我国第一颗月球探测卫星，突破至地外天体的飞行技术，实现卫星绕月飞行，通过遥感探测，获取月球表面三维影像，探测月球表面有用元素含量和物质类型，探测月壤特性，并在卫星奔月飞行过程中探测地月空间环境。第二步为“落”，即发射月球软着陆器，突破地外天体的着陆技术，并携带月球巡视勘察器，进行月球软着陆和自动巡视勘测，探测着陆区的地形地貌、地质构造、岩石的化学与矿物成分和月表的环境，进行月岩的现场探测和采样分析，进行日—地—月空间环境监测与月基天文观测。第三步为“回”，即发射月球软着陆器，突破自地外天体返回地球的技术，进行月球样品自动取样并返回地球，在地球上对取样进行分析研究，深化对地月系统的起源和演化的认识。只有完成了这3个阶段后，中国才有可能考虑和实施载人登月。

2007年10月24日，我国在西昌卫星发射中心成功发射了“嫦娥一号”卫星，并于11月20日开始传回了多幅月面图像，中国首幅月面图像如图1-37所示。

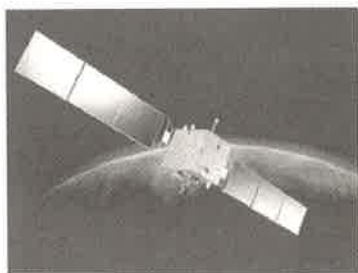


图 1-37 “嫦娥一号”与中国首幅月面图

2009年3月1日,“嫦娥一号”卫星在地面人员的精确控制下,成功实施“受控撞月”,准确落于月球东经 52.36° 、南纬 1.50° 的预定撞击点,为我国探月一期工程画上圆满句号。2010年10月1日,“嫦娥二号”探月卫星在西昌卫星中心成功发射,与“嫦娥一号”任务相比,“嫦娥二号”技术更新、难度更大、系统更复杂,并在地月转移轨道发射、X频段测控、近月捕获、环月飞行轨道控制、深空测控通信和高分辨率立体相机研制6个方面实现技术创新与突破。

习 题

1. _____年,法国人_____制成了第一只热空气自由气球。
2. _____年,法国人_____制成的世界上第一只氢气球飞行成功。
3. _____年,法国工程师_____制成了第一只可操纵气球——软式飞艇。
4. 1937年5月,大型飞艇_____在美国赫斯特湖附近着陆时爆炸起火,飞艇的盛世期随之结束。
5. _____年12月,_____成功地进行了世界公认的人类第一次用重于空气的有动力驱动的可操纵的飞行器进行的载人飞行。
6. _____被认为是中国的第一个飞机设计师。
7. _____年,_____国成功地制造出了世界上的第一架喷气式飞机——He-178。
8. _____年,_____国成功发射了世界上的第一颗人造地球卫星。
9. _____卫星是中国于_____年4月发射的第一颗人造地球卫星。
10. _____年10月,我国_____载人飞船成功发射,_____成为中国首位太空人。
11. 第一个载人空间站是苏联于_____年4月发射的_____。
12. _____年,美国人_____乘坐_____号飞船第一个踏上月球。
13. 1809~1810年,_____发表了重要著作《_____》,确立了现代飞机的基本飞行原理和基本组成部分。
14. 1891年,_____出版了《空气动力学实验》一书,提出了倾斜平板产生升力的公式。
15. 1919年,美国火箭_____发表了《_____》,阐述了火箭飞行的数学原理,指出火箭必须具有 7.9km/s 的速度才能克服地球的引力。