

# 航空航天概论

南京航空航天大学翻印

一九九八年十二月

## 前 言

### 第一章 绪 论

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第一节 航空与航天的基本内涵 ..... | (1) |
| 第二节 飞行器的分类 .....     | (1) |
| 一、航空器 .....          | (2) |
| 二、航天器 .....          | (2) |
| 三、火箭和导弹 .....        | (3) |
| 第三节 航空航天发展简史 .....   | (3) |
| 一、航空发展简史 .....       | (3) |
| 二、火箭、导弹发展简史 .....    | (6) |
| 三、航天发展简史 .....       | (6) |
| 第四节 飞行环境 .....       | (7) |
| 一、大气飞行环境 .....       | (7) |
| 二、空间飞行环境 .....       | (8) |
| 三、标准大气 .....         | (8) |

### 第二章 飞行器飞行原理

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 第一节 流体流动的基本知识 .....       | (9)  |
| 一、流体流动的基本概念 .....         | (9)  |
| 二、流体流动的基本规律 .....         | (16) |
| 三、空气动力学的实验设备——风洞 .....    | (26) |
| 第二节 作用在飞机上的空气动力 .....     | (30) |
| 一、飞机的几何外形和参数 .....        | (30) |
| 二、低、亚声速时飞机上的空气动力 .....    | (32) |
| 三、跨声速时飞机上的空气动力 .....      | (52) |
| 四、超声速时飞机上的空气动力 .....      | (58) |
| 第三节 飞机的飞行性能,稳定性和操纵性 ..... | (66) |
| 一、飞机的飞行性能 .....           | (66) |
| 二、飞机的稳定性与操纵性 .....        | (72) |
| 第四节 直升机的飞行原理 .....        | (76) |
| 一、直升机概况 .....             | (76) |
| 二、直升机旋翼的工作原理 .....        | (77) |
| 第五节 航天器飞行原理 .....         | (78) |
| 一、Kepler 轨道的性质和轨道要素 ..... | (78) |
| 二、轨道摄动 .....              | (83) |
| 三、几种特殊的轨道 .....           | (85) |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 四、星下点和星下点轨迹 .....        | (87)  |
| 五、航空器姿态的稳定和控制 .....      | (88)  |
| 思考题 .....                | (91)  |
| <b>第三章 飞行器的动力系统</b>      |       |
| 第一节 概 述 .....            | (94)  |
| 第二节 发动机分类 .....          | (95)  |
| 第三节 活塞式航空发动机 .....       | (95)  |
| 一、发动机主要机件和工作原理 .....     | (95)  |
| 二、发动机辅助系统 .....          | (96)  |
| 三、航空活塞式发动机主要性能参数 .....   | (97)  |
| 第四节 空气喷气发动机 .....        | (97)  |
| 一、涡轮喷气发动机 .....          | (97)  |
| 二、其他类型的燃气涡轮发动机 .....     | (117) |
| 三、无压气机的空气喷气发动机 .....     | (122) |
| 第五节 火箭发动机 .....          | (123) |
| 一、发动机主要性能参数 .....        | (123) |
| 二、液体火箭发动机 .....          | (124) |
| 三、固体火箭发动机 .....          | (127) |
| 四、固-液混合火箭发动机 .....       | (129) |
| 第六节 组合式和特殊发动机 .....      | (130) |
| 一、火箭发动机与冲压发动机组合 .....    | (130) |
| 二、涡轮喷气发动机与冲压发动机组合 .....  | (131) |
| 三、特殊发动机 .....            | (131) |
| 思考题 .....                | (133) |
| <b>第四章 飞行器机载设备</b>       |       |
| 第一节 飞行器仪表、传感器与显示系统 ..... | (135) |
| 一、发动机工作状态参数测量 .....      | (135) |
| 二、飞行状态参数测量 .....         | (137) |
| 三、电子综合显示器 .....          | (147) |
| 第二节 飞行器的导航技术 .....       | (153) |
| 一、无线电导航 .....            | (154) |
| 二、卫星导航系统 .....           | (159) |
| 三、惯性导航 .....             | (161) |
| 四、图像匹配导航(制导)技术 .....     | (163) |
| 五、天文导航 .....             | (167) |
| 六、组合导航 .....             | (169) |
| 第三节 飞行器自动控制 .....        | (170) |
| 一、自动驾驶仪 .....            | (170) |
| 二、飞行轨迹控制 .....           | (171) |
| 三、自动着陆系统与设备 .....        | (174) |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 四、电传操纵 .....                   | (177) |
| 五、空中交通管理 .....                 | (178) |
| 第四节 其他机载设备 .....               | (180) |
| 一、电气设备 .....                   | (180) |
| 二、通信设备 .....                   | (182) |
| 三、雷达设备 .....                   | (183) |
| 四、高空防护救生设备 .....               | (185) |
| 思考题 .....                      | (187) |
| <b>第五章 飞行器构造和发展概况</b>          |       |
| 第一节 对飞行器结构的一般要求和所采用的主要材料 ..... | (189) |
| 一、对飞行器结构的一般要求 .....            | (189) |
| 二、飞行器结构所采用的主要材料 .....          | (190) |
| 第二节 飞机和直升机构造 .....             | (191) |
| 一、飞机的基本构造 .....                | (191) |
| 二、军用飞机的构造特点和发展概况 .....         | (203) |
| 三、民用飞机的构造特点和发展概况 .....         | (208) |
| 四、特殊飞机 .....                   | (210) |
| 五、直升机 .....                    | (213) |
| 第三节 导 弹 .....                  | (218) |
| 一、有翼导弹 .....                   | (218) |
| 二、弹道导弹 .....                   | (226) |
| 三、反弹道导弹导弹系统 .....              | (234) |
| 第四节 航天器 .....                  | (236) |
| 一、航天器的基本系统 .....               | (236) |
| 二、卫星结构 .....                   | (237) |
| 三、空间探测器结构 .....                | (238) |
| 四、载人飞船 .....                   | (238) |
| 五、空间站 .....                    | (238) |
| 第五节 火 箭 .....                  | (240) |
| 一、探空火箭 .....                   | (240) |
| 二、运载火箭 .....                   | (240) |
| 第六节 航天飞机和空天飞机 .....            | (245) |
| 一、航天飞机 .....                   | (245) |
| 二、空天飞机 .....                   | (248) |
| 思考题 .....                      | (249) |
| <b>第六章 地面设施和保障系统</b>           |       |
| 第一节 机场及地面保障设施 .....            | (250) |
| 一、机 场 .....                    | (250) |
| 二、地面保障系统 .....                 | (250) |
| 第二节 导弹的发射装置和地面设备 .....         | (252) |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 一、组成和功用 .....            | (252) |
| 二、战略弹道导弹的发射方式 .....      | (252) |
| 三、战略弹道导弹的发射装置和地面设备 ..... | (252) |
| 第三节 运载火箭的地面设备与保障系统 ..... | (254) |
| 一、航天基地 .....             | (254) |
| 二、航天器发射场 .....           | (254) |
| 三、中国的航天器发射场和测控中心 .....   | (255) |
| 四、发射窗口 .....             | (255) |
| 思考题 .....                | (256) |
| 参考文献 .....               | (257) |

# 第一章 绪 论

## 第一节 航空与航天的基本内涵

航空航天技术是 20 世纪人类在认识自然和改造自然的过程中最活跃、发展最迅速、对人类社会生活最有影响的科学技术领域之一,也是表征一个国家科学技术先进性的重要标志。

航空是指在地面稠密大气层内的航行活动。航天是指在大气层之外的近地空间、行星际空间、行星附近以及恒星际空间的航行活动。但是,在地面发射航天飞行器或者当航天飞行器返回地面时,都要经过大气层;特别水平起降的航天飞机,虽然主要活动在大气层之外的空间中,但其起飞和降落过程与飞机极为相似,就兼有航空和航天的特点。所以从科学技术上看,航空与航天不仅是紧密联系的,有时甚至是难以区别的。航空航天一词,既指进行航空航天活动所涉及的科学技术,又指研制航空航天飞行器所涉及的科学技术。

航空航天技术是高度综合的现代科学技术,它们综合运用了基础科学和应用科学的最新成就,应用了工程技术的最新成果。力学、热力学、材料学、电子技术、自动控制理论和技术、计算机技术、喷气推进技术以及制造工艺等科学技术的进步都对航空航天科技的进步和发展,发挥了重要作用。上述科学技术在航空航天领域的应用中相互交叉、渗透,产生了一些新的学科;航空航天技术发展中提出的新要求,又促进这些学科的发展。

航空航天技术的发展与军事应用密切相关,而其巨大进展对国民经济和社会生活都产生了重大影响。航空航天技术用于军事,使军事装备和军事技术发生了根本性的变化,使战争从平面向立体转化,战争的格局发生巨大变化。飞机在战争中执行拦截、侦察、轰炸、攻击、预警、反潜、电子干扰以及运输、空降等任务。民用航空的发展,改变了交通运输的结构,为人们提供了一种快速、方便、舒适、安全的交通运输工具。飞机和直升机还广泛用于农业作业、森林防火、大地测绘、地质勘探以及在高空进行各种科学研究工作。

航天技术和其他科学技术相结合,开拓了许多新的技术领域。卫星通信成为现代传递信息的重要手段。卫星广播可以对广大地区的公众直接进行电视广播。卫星导航引起了导航技术的重大变化,实现了全球、全天候、高精度的导航定位。气象卫星、地球资源卫星给人类带来的益处更是显著的。环绕地球运行的航天站(空间站)、航天飞机、行星际和行星探测器等,是人类认识自然、改造自然的先进工具。

## 第二节 飞行器的分类

在地球大气层内或大气层之外的空间(含环地球空间、行星和行星际空间)飞行的器械通称飞行器。通常,飞行器可分为三大类:航空器、航天器、火箭和导弹。在大气层内飞行的飞行器,称为航空器;主要在大气层之外的空间飞行的飞行器,称为航天器;依靠制导系统控制其飞行轨迹的飞行武器,称为导弹;靠火箭发动机提供推进力的飞行器,称为火箭。

## 一、航空器

任何航空器都需要产生升力克服自身重力才能升空飞行。按照产生升力的基本原理,可将航空器分为两大类,即靠空气静浮力升空飞行的航空器(习惯上称为轻于空气的航空器)和靠航空器与空气相对运动产生空气动力升空飞行的航空器(习惯上称为重于空气的航空器)。

### 1. 轻于空气的航空器

轻于空气的航空器包括气球和飞艇,主体是一个气囊,其中充以密度小于外界空气密度的气体(如热空气、氦或氩),由于气球所排开的空气重量大于气球本身的重量,故静浮力使气球升空。气球没有动力装置,升空后只能随风飘动或被系留在固定位置上。飞艇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。

### 2. 重于空气的航空器

重于空气的航空器是靠自身与空气相对运动产生的升力升空飞行的。这种航空器主要有两类:固定翼航空器和旋翼航空器。前者包括飞机和滑翔机,后者包括直升机和旋翼机。除了上述两种航空器之外,还有一种为许多工程师和航空爱好者在探索研究而至今尚未成功的、模拟鸟类飞行的扑翼机。

滑翔机在飞行原理与构造形式上与飞机基本相同,只是它没有动力装置和推进装置,一般由弹射或拖曳升空,然后靠有利的气流(如上升气流)或降低高度(位能转变为动能)继续飞行。旋翼机与直升机的区别是,前者的旋翼没有动力直接驱动,而靠自身前进时(前进的动力由动力装置提供)相对气流吹动旋翼转动产生升力。

航空器的分类如图 1.1 所示。

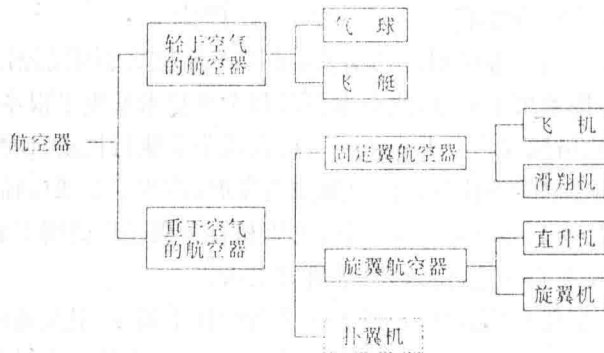


图 1.1 航空器分类

## 二、航天器

航天器是在稠密大气层之外环绕地球,或在行星际空间、恒星际空间,基本上按照天体力学规律运行的各种飞行器,又称空间飞行器。与自然天体不同的是,航天器可以按照人的意志,改变其运行轨道。

航天器可以分为无人航天器和载人航天器。前者可以按照是否环绕地球运行分为人造地球卫星和空间探测器;后者又可分为载人飞船、航天站(又称空间站)和航天飞机。

### 1. 无人航天器

(1) 人造地球卫星,简称人造卫星,是由运载火箭发射到一定高度,获得必要的速度,沿一

定轨道环绕地球,基本上按天体力学规律运行的一种航天器。按其用途又可分为:用于科学研究的科学卫星,直接为国民经济和军事服务的应用卫星和进行航天技术试验的技术试验卫星等。它们又可按用途再加以细分,例如,应用卫星可分为通信卫星、气象卫星、侦察卫星等。

(2) 空间探测器,又称深空探测器,是对月球、行星和行星际空间进行探测的航天器。目前,已发展到探测太阳系之外宇宙空间的探测器。

## 2. 载人航天器

载人航天器按照飞行和工作情况可分为载人飞船、航天站(空间站)和航天飞机。

(1) 载人飞船有卫星式载人飞船和登月载人飞船。它们提供航天员在外层空间生活和和工作条件,并能安全返回地面。载人飞船可以独立进行航天活动,也可以作为往返于地面和航天站(或月球)之间的“渡船”。

(2) 航天站是可供多名航天员长期生活的航天器。它的运行原理与环绕地球卫星式载人飞船类似,其主要区别是,后者运行时间很短,一般仅能一次使用后返回地面。

(3) 航天飞机是可以重复使用,往返于地面和近地轨道之间运送有效载荷或在轨道上完成规定活动的航天器。一般可设计成飞机形式,由运载火箭送入轨道,返回地面时可像飞机那样着陆。目前正在探索像飞机那样水平起飞、水平着陆的航天飞机(又称空天飞机)。

航天器的分类如图 1.2 所示。

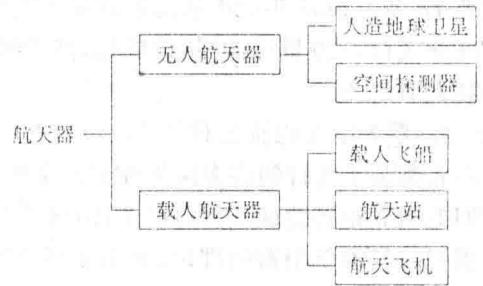


图 1.2 航天器分类

## 三、火箭和导弹

在许多文献中,“火箭”一词有时既指火箭发动机又指以火箭发动机为动力的飞行器。如指前者,可按能源分为化学火箭、核火箭、电火箭;如指后者,可按用途分为无控火箭弹、探空火箭、运载火箭等。导弹是由制导系统控制其飞行轨迹的飞行武器,其特点是带有战斗部。按导弹飞行特点可分为弹道式导弹、巡航导弹和可作高机动飞行的导弹(如地空导弹、空空导弹等)三大类。导弹的动力装置可以是火箭发动机,也可以是涡轮喷气发动机或冲压发动机。每类导弹都可以按用途或射程大小再予以细分。

## 第三节 航空航天发展简史

自古以来,人类就怀有飞行的愿望,这可以由许多关于腾云驾雾的神话和传说中表达出来。但是在社会生产力低下的年代,这种愿望是难以实现的。不过,许多先驱人物的勇敢探索,却为人类实现飞行提供了有益的经验教训。

18 世纪产业革命推动了科学技术的发展,从而为人类实现飞行提供了条件。

### 一、航空发展简史

#### 1. 轻于空气的航空器

利用空气静浮力升空,在技术上是较易实现的。中国在 10 世纪初期就有类似于热气球的

“孔明灯”出现，升入空中作为战争中的联络信号。18世纪末期，法国蒙哥尔费兄弟的热气球载上一些动物升空飞行了8 min后安全降落。1783年10月15日F P 罗奇埃乘热气球上升到26 m高度，飞行4.5 min。同年11月21日，罗奇埃和达尔朗德又乘热气球在约1 000 m高度用12 min飞行了约12 km。这是人类乘航空器首次飞行。随后，法国的物理学家查理制成了以丝绸作气囊充以氢气的气球，升空915 m，飘行了约25 km后降落。后来他又制造了一只更大的气球，下系可以载人的吊篮。他和一位同伴乘这只气球在空中飘行50 km，留空时间超过2 h。

气球的出现激起了人们对乘气球飞行的热情，并有人致力于飞艇的研究。经过多年的探索和试验，制成了带动力、可操纵的飞艇，并升空飞行。1900年，德国的齐柏林制成了长128 m，容积11 300 m<sup>3</sup>的硬式飞艇，巡航速度为60 km/h，并于1910年开辟了载客的定期航线。第一次世界大战期间，德国曾用这种飞艇轰炸伦敦。第一次世界大战后，齐柏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245 m，容积200 000 m<sup>3</sup>，速度130 km/h，载客75名。1937年一次从德国到美国的飞行中突然起火爆炸，旅客全部遇难，从此结束了飞艇商业飞行。20世纪70年代以后，许多国家又应用新材料新技术研制新的飞艇，用以巡逻和吊装大型设备。

## 2. 重于空气的航空器

人类关于飞行的许多探索和试验是从模仿鸟类的飞行开始的。中外历史文献中都记载着用羽毛制成翅膀尝试飞行的记录，但这些尝试都没有获得成功。19世纪初，英国的G 凯利提出了重于空气的航空器的理论，阐明了利用固定机翼产生升力及利用不同翼面控制飞机的设计概念。他制造了第一架滑翔机进行试飞，以验证其理论的有效性，确立了现代飞机的基本构形。他的重要著作《关于空中的航行》为后来航空器的研制提供了重要理论基础和经验。

为了使飞机能够成功地飞行，必须解决升力、动力和稳定操纵问题。有些人利用蒸汽机作为动力装置进行了探索。1893年汽油内燃机（活塞发动机）问世。20世纪初，美国科学家兰利制造了安装活塞发动机的飞机，1903年的两次试飞均未成功，主要原因是未能解决飞机的稳定、操纵问题。

当时，有一些人沿着另一条道路对飞行进行探索：用滑翔机试验飞行，解决滑翔机的飞行稳定、操纵问题；然后再加上动力，作动力飞行。德国的李林达尔是先驱者。他仔细研究了鸟类的飞行，制成弓形翼剖面的滑翔机，于1891年至1896年期间，进行了2 000多次滑翔飞行试验，解决了滑翔机飞行稳定和操纵问题，积累了大量数据。他准备在滑翔机上装上发动机作动力飞行试验，但不幸在一次滑翔飞行中失事牺牲，这一愿望未能实现。美国的莱特兄弟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；又自己设计制造了风洞，在风洞中试验不同的机翼模型，测定空气动力数据，根据实验结果，改进了滑翔机。1902年秋季，他们进行了近千次滑翔飞行，取得了完全成功。1903年他们制造了“飞行者”1号飞机，装上8.8 kW的水冷4缸活塞发动机和螺旋桨，飞机总质量约340 kg。1903年11月17日，莱特兄弟驾驶“飞行者”1号飞行了4次，第4次飞行最远，约260 m，留空59 s。这是人类最早的持续动力飞行。

20世纪初，欧洲也有人从事飞机的研究工作。法国的桑托-杜蒙于1906年，法国的布莱里奥于1909年都成功地飞行了他们自己设计的飞机。布莱里奥驾驶“布莱里奥”XI号单翼机于1909年首次飞越了英吉利海峡，全程40 km，飞行时间37 min。

1914年爆发了第一次世界大战，飞机开始用于军事目的，各国拥有的飞机已达数百架。飞

机起初主要用于侦察和照相；后来由于战争的需要，又出现了带武器的“驱逐机”，其目的是“控制天空”；接下来又出现了轰炸机和强击机。

第一次世界大战肯定了飞机在战争中的作用，促进了航空科学技术和航空工业的发展。战后，许多国家举办民用航空运输，以继续发展航空工业。1919年开始，已有几条定期国际航线。为了改进飞机性能，空气动力学理论获得飞速发展。飞机结构、航空发动机都取得重大进展。这些科学技术成果很快反映到飞机设计上。20世纪20年代初，双翼机逐渐向单翼机过渡，到30年代初期，双翼机已趋于被淘汰。同时出现了起落架可以收放、驾驶舱封闭、发动机加整流罩等一系列提高空气动力效率的构造形式。飞机材料也由木材、层板、亚麻布等逐渐改用铝合金，提高了结构强度，降低了飞行阻力。科学技术新成就大量应用于飞机设计中，飞机性能有了很大提高。1937年苏联的“安特25”从莫斯科直飞美国，1938年飞机升限纪录为17 094 m，1939年创755.09 km/h的飞行速度纪录。

第二次世界大战中，飞机得到广泛的应用，飞机性能迅速提高，参战飞机数量大，种类多，出现了总质量62.5 t的轰炸机和速度达784 km/h的战斗机。1944年盟军对德国的轰炸中，曾一天出动过1 000架轰炸机和900架护航战斗机。当时所用的飞机，几乎全是用活塞式发动机和螺旋桨推进的，最大速度700 km/h以上，可说已接近活塞式发动机飞机的速度极限。当飞机速度接近声速时，出现了气动阻力急剧增大，活塞式发动机和螺旋桨已难以提供足够的推力（或拉力）；同时，由于机翼上气动压力中心的变化，引起飞机稳定性和操纵性方面的一些新问题，从而为进一步提高飞行速度带来了障碍，当时人们称之为“音障”。突破“音障”首先要发动机提供足够的推进力以克服急剧增加的阻力，活塞发动机和螺旋桨已无能为力。涡轮喷气发动机的出现，解决了这一问题。1939年第一架装有涡轮喷气发动机的飞机——德国的He-178试飞成功。随后，美、英、苏联都先后发展了装有喷气发动机的战斗机和轰炸机。第二次世界大战后，军用飞机基本喷气化。通过空气动力学对跨声速、超声速流动特点的研究和气动弹性力学的研究，解决了超声速飞机设计的一系列问题。在20世纪50年代初期出现了超声速的军用飞机，到60年代，有些战斗机的最大速度已达声速的3倍左右。这时，又遇到所谓“热障”问题，即由于长时间高速飞行产生的气动加热而导致结构材料性能下降的问题。解决的途径主要是研制质量轻、耐高温的新材料和新型结构。

民航飞机使用喷气发动机较晚。1952年第一架装涡轮喷气发动机的民航飞机“慧星”号投入航线运行，但由于在结构设计时未考虑疲劳断裂问题，在1953年至1954年之间连续三次失事。吸取了“慧星”号失事的教训，改进了结构设计之后，20世纪50年代末期出现了多种型号的喷气式旅客机。1968年底，苏联首先试飞了超声速旅客机图-144；1969年初，英法合作研制的“协和”号客机试飞，并于1976年用于航线飞行。上述两种超声速飞机的最大速度略大于声速的两倍。但是超声速客机噪声大，耗油率高，超声速飞行时产生“声爆”，对地面有不利影响，限制了它的应用和发展。

直升机的飞行稳定问题和操纵问题比较复杂，所以直到1936年才成功地试飞了第一架载人直升机。直升机具有灵活、方便和不需要固定机场设施等优点，在民用航空运输、军事和救护等方面得到广泛的应用，在第二次世界大战后得到了较快的发展。20世纪50年代直升机速度大约为100 km/h~200 km/h，目前已提高到400 km/h~500 km/h。

## 二、火箭、导弹发展简史

火箭是中国发明的。在10世纪,中国的文献中已有火药用于火箭的记载,12世纪已出现以火药为能源利用反作用推进的火箭雏形。

近代火箭和导弹是在第二次世界大战后期才出现的。1942年纳粹德国研制成功V-2火箭,发射了世界上第一个以火箭发动机为动力的弹道导弹,其弹头(战斗部)质量为1t,导弹总质量约13t,最大射程320km。战后火箭(发动机)技术得到了飞速发展,成为各类导弹的主要动力源(也有一些导弹以其他发动机,如涡轮喷气发动机,涡轮风扇发动机为动力源的)。火箭也是科学研究的有力工具。1945年美国研制了专门用于大气探测的探空火箭。美国和苏联还利用缴获的V-2火箭,发射了一批探空火箭。1957年~1958年国际地球物理年活动,推动了探空火箭的发展,许多国家都研制了自己的探空火箭。我国从1958年开始,也成功地发射了几种探空火箭。

20世纪50年代初,世界上兴起了一股发展弹道导弹的热潮。当时曾有人认为远程弹道导弹最终将会代替远程轰炸机。美国和苏联都发展了不同型号的中程、远程或洲际弹道导弹。根据当时的技术水平,远程或洲际导弹都采用了多级火箭的形式,并且以液体火箭为主。我国从50年代中期开始,也发展了自己的弹道导弹和用于发射航天器的运载火箭。

带有核弹头的弹道导弹是一种破坏力巨大的进攻性武器。为了提高其在战争中反应的灵活性、机动性、突防能力和命中精度并对付反导弹系统的拦击,60年代以后,发展了可贮存液体推进剂、固体推进剂弹道导弹;发展了多弹头分导、地下井发射、机动发射等技术。

能作大过载、高机动飞行的有翼战术导弹,如地空导弹、空空导弹等,是从50年代初开始发展的,60年代至70年代是大发展时期。它们大约经历了三个阶段。50年代发展的第一代地空导弹,主要是针对高空远程轰炸机,一般比较笨重。随着空袭方式的转变(由高空转向中低空),中低空或超低空地空导弹得到发展,并采用雷达、红外、激光等多种制导体制,导弹趋于固体化、小型化。70年代中期以后的地空导弹则向多用途、多层次防空和提高制导精度的方向发展。第一代空空导弹多为近距离、中空、尾后攻击型;第二代是中距拦射和全天候型;第三代则为远距拦射和近距离格斗型,向提高制导系统精度、有多目标攻击能力和上射下射能力的方向发展。

巡航导弹是一种飞行轨迹类似于飞机的导弹。最早的巡航导弹是纳粹德国研制的装脉冲发动机的V-1导弹。第二次世界大战后,发展了许多舰载和机载巡航导弹,但都较笨重,制导精度也不高。70年代以后,由于高效率小型涡轮风扇发动机出现,中制导、末制导技术及核弹头小型化等方面的进展,一批空中发射、潜艇发射、陆地发射的巡航导弹相继问世。由于此类导弹具有低空、超低空突防能力和较高的命中精度,近年来得到了较快的发展。

## 三、航天发展简史

19世纪末到20世纪初,涌现出许多富于探索精神的航天先驱者。俄国的齐奥尔科夫斯基从理论上证明了利用多级火箭可以克服地球引力而进入太空。他建立了火箭运动的基本数学方程,并肯定了液体火箭发动机是航天器最适宜的动力装置。美国的戈达德提出火箭飞行的飞行原理,并导出脱离地球引力所需的 $7.9\text{ km/s}$ 的第一宇宙速度。他以很大的精力研制液体火箭发动机,并于1926年作了首次飞行试验。德国的奥伯特研究火箭飞行的数学理论,提出了许多关于火箭构造和飞行的新概念。这些先驱者的工作为航天技术的发展奠定了基础。

第二次世界大战结束后,苏联和美国都通过仿制 V-2 火箭积累了研制现代火箭系统的经验,并预见到在此基础上有可能发射人造地球卫星。他们在研制大型远程弹道导弹的同时,解决了发射人造地球卫星的一系列技术问题。1957 年 10 月 4 日苏联把世界上第一颗人造地球卫星送上太空,开创了人类航天的新纪元。随后,美国于 1958 年 1 月 31 日发射了一颗只有 4.8 kg 的人造卫星。此外,法国、日本、中国、英国等也先后用自己研制的运载火箭成功地发射了自己的第一颗人造卫星。

卫星发射成功之后,人类转向对空间更广泛的探测。第一个探测的目标是地球的天然卫星——月球。从 1959 年开始,美、苏发射了许多月球探测器,并以绕月飞行、硬着陆、软着陆等方式对月球进行了科学考察;1969 年 7 月 16 日美国航天员首次登上月球,随后又进行了多次登月活动。对太阳系内行星的探测是 20 世纪 60 年代初期开始的,美、苏都发射了许多空间探测器,分别对金星、火星、水星、木星、土星以及行星际空间和慧星进行探测。其中美国发射的“先驱者”10 号于 1973 年 12 月飞近木星,行程 10 亿 km,向地球发回 300 幅木星和木星卫星的照片。它利用木星引力场加速飞向土星,又借助土星引力场加速,于 1986 年 6 月飞越冥王星平均轨道,成为第一个飞出太阳系的航天器。

第一个载人航天站是苏联于 1971 年 4 月发射的“礼炮号”。1973 年美国发射近地轨道的“天空实验室”。可以重复使用的航天飞机于 1981 年试飞成功,1982 年 11 月开始商业性飞行。1984 年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。航天飞机成为人类可以往返近地空间的工具。

## 第四节 飞行环境

### 一、大气飞行环境

包围地球的空气层(大气)是航空器唯一的飞行活动环境,也是导弹和航天器的飞行活动环境。大气层没有明显的上限,它的各种特性沿铅垂方向上的差异非常显著,例如空气密度和压强都随高度增加而减小。在 10 km 高度,空气密度只相当于海平面空气密度的 1/3,压强约为海平面压强的 1/4;在 100 km 高空,空气密度只是地面密度的  $4 \times 10^{-5}\%$ (百万分之零点四),压强只是地面的  $3 \times 10^{-5}\%$ (百万分之零点三)。

以大气中温度随高度的分布为主要依据,可将大气层划分为对流层、平流层、中间层、热层和散逸层等 5 个层次。航空器的飞行环境是对流层和平流层。

#### 1. 对流层

大气中最低的一层为对流层,其中气温随高度增加而降低,空气对流运动极为明显。对流层的厚度随纬度和季节而变化,低纬度地区平均为 16 km~18 km,中纬度地区平均为 10 km~12 km,高纬度地区平均为 8 km~9 km。对流层集中了全部大气质量的约 3/4 和几乎全部的水气,是天气变化最复杂的层次,飞行中所遇到的各种重要天气变化几乎都出现在这一层中。

#### 2. 平流层

平流层位于对流层之上,顶界扩展到 50 km~55 km。在平流层内,随着高度的增加,起初气温保持不变(为 190 K)或者略有升高;到 20 km~30 km 以上,气温升高很快;到了平流层顶,气温升至 270 K~290 K。平流层的这种气温分布特征同它受地面影响较小和存在大量臭氧有关。过去常称这一层为“同温层”,实际上指的是平流层的下部。平流层中空气沿铅垂方向

的运动较弱,因而气流比较平稳,能见度较好。

### 3. 中间层

中间层从 50 km~55 km 伸展到 80 km~85 km 高度。这一层的特点是:随着高度增加,气温下降,空气有相当强烈的铅垂方向的运动。这一层顶部的气温可低至 160 K~190 K。

### 4. 热层

热层从中间层顶延伸到 800 km 高空。这一层的空气密度极小,声波已难以传播。热层的一个特征是气温随高度增加而上升,另一特征是空气处于高度电离状态。

### 5. 散逸层

散逸层又称外大气层,位于热层之上,是地球大气的最外层。此处空气极其稀薄,又远离地面,受地球引力较小,因而大气分子不断地向星际空间逃逸。

## 二、空间飞行环境

空间飞行环境包括自然环境和诱导环境。前者包括真空、电磁辐射、高能粒子辐射、等离子体、微流星体等;后者指航天器或其某些系统工作时诱发的环境,如失重、振动、冲击及感应磁场等。

### 1. 地球空间环境

地球空间环境包括地球高层大气、电离层和磁层。高层大气密度和压强随高度的增加按指数规律下降,在 1 000 km 处大气压强约为  $10^{-10}$  Pa~ $10^{-11}$  Pa,在 10 000 km 处约为  $10^{-14}$  Pa。此外,大气密度与压强还随季节和太阳活动程度等因素而变化,因而是极复杂多变的结构。电离层几乎全为电子和正离子,电子浓度随高度变化,还随昼夜、季节、纬度和太阳的活动而变化。从距地球表面 600 km~1 000 km 处开始向远处空间延伸,有一个磁层,其顶层距地面约为地球半径的 8 倍~11 倍。磁层中还存在着密集的高能带电粒子辐射带,又称“范爱伦辐射带”,可能引起航天器材料、器件和人体辐射损伤。

### 2. 行星际空间环境

行星际空间是一个广阔的极高真空度的环境,存在着太阳连续发射的电磁辐射、爆发性的高能粒子辐射和稳定的等离子体流(太阳风)。这里环境主要受太阳活动的影响,还受来自银河系的宇宙线和微流星等的影响。

## 三、标准大气

如上所述,大气物理性质(温度、密度、压强等)是随所在地理位置、季节和高度而变化的。为了在进行航空器设计、试验和分析时所用大气物理参数不因地而异,必须建立一个统一的标准,即所谓的标准大气。它是由权威机构颁布的一种“模式大气”。它依据实测资料,用简化方程近似地表示大气温度、密度、压强、声压等参数的平均铅垂分布。按照上述公式算出来的大气参数沿高度的变化,排列成表,即为标准大气表。由国际性组织(如国际民用航空组织,国际标准化组织)颁布的标准大气称国际标准大气,国家机构颁布的称国家标准大气。中国国家标准总局于 1980 年颁布了“中华人民共和国标准大气”(30 km 以下部分)。应当注意,各地的实际大气参数是与标准大气之间存在差别的。

## 第二章 飞行器飞行原理

### 第一节 流体流动的基本知识

#### 一、流体流动的基本概念

##### 1. 飞行相对运动原理

介绍飞行器,特别是飞机的飞行原理,最好从飞机在静止大气中(无风情况)作水平等速直线飞行的状态开始谈起。如果观察者乘坐坐在高空气球(固定在空气中的某一位置)上来描述这一飞行状态(见图2.1(a)),则飞机将以速度  $v_{\infty}$  向左飞行,并将扰动周围的空气使之产生运动。按照牛顿力学第三定律(力的作用与反作用原理),运动起来的空气同时将在飞机的外表面上产生空气动力。如果另一个观察者就乘坐坐在飞机上,观察到的将是另一个情景:远前方空气(连同前一个观察者及乘坐的气球)将以速度  $v_{\infty}$  流向静止不动的飞机,但方向相反,见图2.1(b)。远前方空气来流流过飞机外表面时,空气的流动速度  $v$ , 压力  $p$  等都将发生变化并产生空气动力。显然,作用在飞机上的空气动力不会因观察者的角度发生变化而变化。这称作飞行相对运动原理。利用这一原理,飞机以速度  $v_{\infty}$  作水平直线飞行时,作用在飞机上的空气动力大小与远前方空气以速度  $v_{\infty}$  流向静止不动的飞机时所产生的空气动力应完全相等。采用这种方法,无论从实验研究角度看或者从理论研究角度看都会带来很大的方便。所以,它广泛地被航空、航天以及航海部门、交通运输部门等所采用。

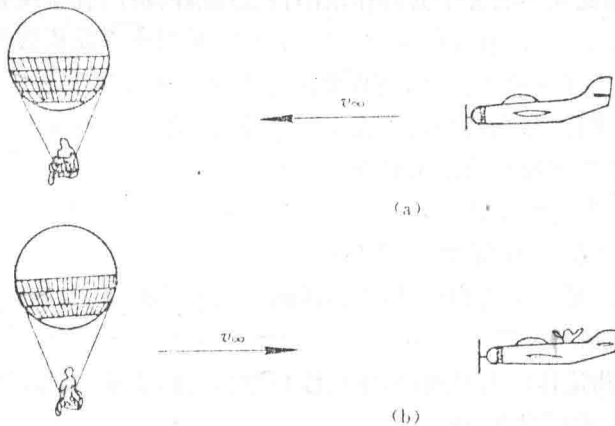


图 2.1 相对运动原理

(a) 观察者在气球上; (b) 观察者在飞机上

飞机之所以能在静止的大气中实现水平等速直线飞行,从飞机所受的力和力矩平衡条件看,应当满足:作用在飞机上的升力  $L$  (空气动力在垂直于飞行方向上的分量) 必须和飞机的重力  $G$  相平衡(图 2.2) 以维持飞行高度不变; 飞机喷气发动机产生的推力  $F$  必须和作用在飞机

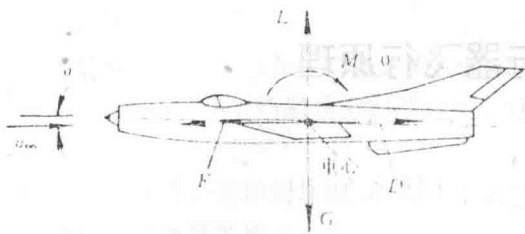


图 2.2 水平等速直线飞行中飞机受力图

上的阻力  $D$  (空气动力在平行于飞行反方向上的分量) 相平衡以维持飞机的平飞速度  $v_\infty$  不变; 此外, 为了保持住飞机的飞行姿态 (图上用飞机的迎角  $\alpha$  来表示), 绕飞机重心的俯仰力矩  $M$  还必须等于零。通常, 大型运输机的起飞重量可达 3 000 kN 左右, 难道升力真会有那么大? 是的。在一定的飞行高度上, 只要喷气发动机的推力足以克服飞机上的空气阻力, 达到维持平飞所需要的

飞行速度  $v_\infty$  和迎角  $\alpha$ , 升力和重力相平衡的条件都可以得到满足。没有飞行速度, 在飞机上不会产生空气动力。空气动力 (包括升力, 阻力和俯仰力矩等) 的产生是空气和飞机之间有了相对运动的结果。

## 2. 流体和连续性介质假设

流体是气体 (如空气) 和液体 (如水) 的统称。本章讲流体大多指空气。大家知道, 流体均由大量的分子组成; 每个分子都有自己的位置、速度和能量。由于分子间的碰撞, 分子进行着杂乱无章的或随机的运动。流体中, 尤其是在气体中, 分子之间的联系十分微弱, 以致于它们的形状都仅仅取决于盛装它们的容器形状 (充满该容器), 而没有自己固有的外形。

在分析远前方流体以速度  $v_\infty$  流过飞机产生的流动现象时, 飞机的尺寸远远大于空气分子间的平均自由行程 (指一个空气分子经一次碰撞后到下一次碰撞前平均走过的距离), 所以, 流体在飞机表面上产生的空气动力不是单个分子的行为, 而是大宗分子共同作用的结果。因此, 经常采用一个简化模型 (假说): 流体介质不是由分子所组成的, 而是由连续介质构成。换句话说讲, 在连续流体介质中, 任意取出一个微团 (尺寸可以很小, 直到缩小为一个质点), 其中必然仍包含着很多的分子, 如此众多的分子共同作用的特性 (统计特性) 就体现为微团的特性 (如微团的密度、压力、温度等), 内部没有任何空隙而连绵一片。采用连续介质假设后, 不仅给描述流体的物理属性和流动状态带来很大方便, 更重要的是为理论研究提供了采用强有力的数学工具的可能性。对于航天飞行器, 当其在高空大气层和外层空间中飞行时, 空气分子间的平均自由行程很大, 这时就不能当作连续介质来处理。

## 3. 流动流体的物理量和参数

### (1) 流体的状态参数, 可压缩性、声速和粘性

影响流体流动规律最重要的物理量, 有流体的密度  $\rho$ , 温度  $T$ , 压强  $p$  (又称压力) 以及流体的可压缩性、声速  $c$  和粘度  $\mu$  等。

流体的密度  $\rho$  是指流体所占空间内, 单位体积中包含的质量。如流体的质量为  $m$ , 占有的体积为  $V$ , 则  $\rho = m/V$ , 单位是  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

流体的温度  $T$ , 是流体分子运动剧烈程度的指标, 热力学单位是 K。以 K 为单位的  $T$  与以  $^\circ\text{C}$  为单位的摄氏温度  $t$  的关系是  $T/\text{K} = 273.15 + t/^\circ\text{C}$ ,  $1 \text{ K} = 1 ^\circ\text{C}$ 。

流体的压强  $p$ , 是指作用在单位面积上且方向垂直于此面积 (沿内法线方向) 的力, 俗称压力, 单位是 Pa。就空气来讲, 空气的压力是众多空气分子在一面积上不断撞击产生作用的结果。在飞机上产生的空气动力, 特别是升力大都是来自于飞机外表面上的空气压力的作用。

气体的  $\rho$ ,  $T$  和  $p$  三个参数称做气体的状态参数。通过实验, 它们之间有下列关系存在, 即

$$p = \rho RT \quad (2.1)$$

式中,  $R$  称为气体常数, 单位是  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。当  $p = 1.0132 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $T = 293.15 \text{ K}$  时, 空气的  $R = 286.8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。式(2.1)称为气体的状态方程。

从国际标准大气表知, 随着飞行高度  $h$  的增加, 由海平面 ( $h = 0 \text{ km}$ ) 到同温层 ( $h$  为  $11 \text{ km} \sim 21 \text{ km}$ ), 空气温度  $T$  由  $288.15 \text{ K}$  降到  $216.65 \text{ K}$  ( $-56.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 高度再增加, 温度又开始上升; 空气的压力  $p$  和密度  $\rho$  都是一直减小的。比如, 在高度  $21 \text{ km}$  处, 空气的压力和密度仅为海平面的  $4.7\%$  和  $6.2\%$ 。空气状态参数, 特别是空气密度随飞行高度的这种变化, 不仅对作用在飞机上的空气动力大小, 而且对飞机喷气发动机产生的推力大小都有很大的影响。

流体的可压缩性是当压力或温度变化时流体改变自己体积或密度的性质(也称弹性)。液体对这种变化的反应很小, 因此一般认为液体是不可压缩的, 即液体是  $\rho = \text{常数}$  的流体。气体对这种变化的反应却很大, 所以, 一般来讲气体是可压缩的流体。

声速(在航空界也俗称音速)  $c$  是指声波在流体中传播的速度, 单位是  $\text{m/s}$ 。声波是一个振动的声源(比如, 振动的鼓膜)产生的疏密波(压缩与膨胀相间的波)。飞机或物体在空气中飞行时将把行进中碰到的流体微团推开并把这些微团加以压紧。当物体向前运动挪开后, 被推开、压紧的微团将膨胀开来, 回到其原来的位置。因此, 飞机或物体在空气中运动时, 在围绕它的空气中也将一直产生着疏密波或称小扰动波。它的传播速度也是声速, 但不一定听得到, 因为人的耳膜所能感受到的声波有一定的振动频率范围。小扰动波或声波在静止流体中向所有方向以球面波形式传播开去。如果往平静的湖面投掷一块石头, 并观察在湖面上形成的水波, 多少可以得到关于声波传播过程的一些几何上的图形概念。

实验表明, 在水中的声速大约为  $1440 \text{ m/s}$  (大约  $5200 \text{ km/h}$ ), 而在海平面标准状态下, 在空气中的声速仅为  $341 \text{ m/s}$  ( $1227 \text{ km/h}$ )。由于知道水的可压缩性很小, 而空气很容易被压缩, 所以可以推论: 流体的可压缩性越大, 声速越小; 流体的可压缩性越小, 声速越大。显然, 在不可压缩流体中, 声速将趋于无限大。

在大气中, 声速的计算公式为

$$c = 20 \sqrt{T} \quad (2.2)$$

式中,  $T$  是空气的热力学温度。随着飞行高度的增加, 空气的温度是变化的, 因而声速也将变化, 说明空气的可压缩性也是变化的。

流体的粘性是最后要介绍的一个重要物理属性。众所周知, 摩擦有两种: 外摩擦和内摩擦。一个固体在另一个固体上滑动时产生的摩擦叫外摩擦, 而同一种流体相邻流动层间产生滑动时产生的摩擦叫内摩擦, 也叫做流体的粘性。例如, 在水槽中的水面上撒些轻而薄的铝粉, 观察铝粉在水槽中的流动, 很容易发现水的粘性效应(内摩擦现象)。在水槽中心线上流速最大, 越靠近壁面, 流速越小, 紧靠壁面的一层水粘附在壁面上, 流速变为零, 见图 2.3。因此, 有速度差的相邻流动层间, 即使靠近壁面也是同一种流体(水)之间的摩擦, 即内摩擦。

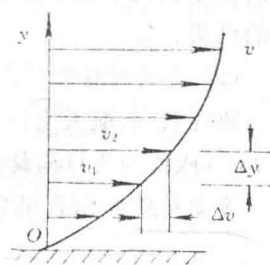


图 2.3 速度  $v$  的分布

根据实验, 内摩擦力  $F$  (也叫做流体粘性摩擦力) 与相邻流动层的速度差  $\Delta v = v_1 - v_2$  和接触面积  $\Delta S$  成正比例, 而与相邻两层的距离  $\Delta y$  成反比例, 即

$$F = \mu \frac{\Delta v}{\Delta y} \Delta S \quad (2.3a)$$

或

$$\tau = \frac{F}{\Delta S} = \mu \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad (2.3b)$$

式中,  $\mu$  是流体的内摩擦系数或称为流体的动力粘度系数, 单位是  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。比值  $\frac{\Delta v}{\Delta y}$  表示在流动层的垂直方向(横向)上, 每单位长度速度的变化量, 叫做横向速度梯度。 $\tau$  是单位接触面积上的内摩擦剪应力。假设  $\frac{\Delta v}{\Delta y} = 1 \text{ s}^{-1}$ , 则  $\tau = \mu$ , 即流体动力粘度系数在数值上等于横向速度梯度为  $1 \text{ s}^{-1}$  时, 作用在  $1 \text{ m}^2$  面积上的摩擦力。所以,  $\mu$  可作为量度流体粘性大小的尺度。

不同流体的  $\mu$  值各不相同。在常温下(比如  $20^\circ\text{C}$ ), 水的  $\mu = 1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 而空气的  $\mu = 1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 可见, 空气的动力粘度只是水的 1.81%; 同温度下甘油的  $\mu = 1.4939 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 是粘性相当大的流体了。由于空气的  $\mu$  值很小, 这也正是不易感觉到空气是有粘性的主要原因。但从式(2.3)知, 当速度梯度很大时, 正像飞机在空气中飞行时所遇到的情况, 作用在飞机外表面上所有摩擦力  $F$  的合力, 即空气动力粘性阻力可不是一个小量, 必须认真考虑。

应当提到, 随着流体温度的升高, 气体的  $\mu$  值将增加, 但液体的  $\mu$  值反而减小。对气体来讲, 相邻流动层相互滑动时产生摩擦的物理原因是气体分子有横向动量交换, 流动速度较快的一层气体中的分子, 跳入速度较慢的一层气体中时, 有拖快该层加速的作用; 反之, 流动速度较慢的一层气体中的分子跳入速度较快的一层气体中时, 则有拖慢该层减速的作用。因此在两滑动层间出现了相互牵动, 阻止相互滑动的作用, 这即是内摩擦力。温度升高, 分子间的这种横向动量交换也加剧, 故  $\mu$  值增大也就不难理解了。但是液体产生粘性的物理原因主要来自相邻流动层分子间的内聚力, 随着温度升高, 液体分子热运动加剧, 液体分子间距离变大, 分子间的内聚力将随之减小, 故  $\mu$  值减小。可见, 采用管道来运输液体(如石油)时, 对液体加温(特别是在寒冷地区的冬季)可以收到减小流动损失、节省能耗的效果。

不考虑粘性作用的流体, 称为理想流体或无粘流体, 即  $\mu$  值趋于零的流体。对于像空气  $\mu$  值这么小的流体, 当横向速度梯度  $\frac{\Delta v}{\Delta y}$  又不是很大的时候, 特别是流动雷诺数比较大的时候, 粘性的作用也就不会十分明显。此时, 可以采用理想流体模型来作理论分析, 获得了一些很有意义的结果。

## (2) 流动马赫数和雷诺数

研究航空、航天飞行器飞行原理时, 经常提到的有两个参数: 流动马赫数  $Ma_\infty$  和流动雷诺数  $Re_\infty$  (或称为飞行马赫数和飞行雷诺数)。

流动马赫数  $Ma_\infty$  的定义是:

$$Ma_\infty = v_\infty / c_\infty \quad (2.4)$$

式中,  $v_\infty$  是远前方来流的速度(即飞行速度),  $c_\infty$  是飞行高度上大气中的声速。 $Ma_\infty$  是两个速度之比, 为一个无量纲量。正如前述, 声速越大, 空气就越难压缩, 这是从空气本身的物理特性来说的。另外, 从飞机的飞行方面来看, 飞行速度越大, 飞机加给空气的压力就越大, 空气被压缩就越厉害。因此, 流动马赫数  $Ma_\infty$  的大小可作为判断空气受到压缩程度的指标。 $Ma_\infty$  越大, 飞行引起的空气受到压缩的程度就越大; 反之, 就越小。