

航空高等院校教材

# 导弹飞行力学

陈士橹 吕学富 等合编



航空专业教材编审组

V/A  
100

# 导弹飞行力学

陈士橹 吕学富等 合编



30268423

1.10元

航空专业教材编审组

489606

## 内 容 简 介

全书共七章。内容有空气动力学基础、运动方程组及其简化研究、方案飞行、导引弹道以及导弹的操纵性和稳定性分析等。

本书主要作为导弹类非飞行力学专业，如导弹设计、导弹控制等专业本科生的教材，也可供导弹科技工作者学习飞行力学时参考。

主审稿人 赵震炎 肖业伦

责任编辑 王振兴



## 导 弹 飞 行 力 学

陈士椿 吕学富等编  
航空专业教材编审室

\*

西北工业大学印刷厂印装 内部发行

\*

787×1092 1/16 印张 10.5 259.2 千字

1983年12月第一版 1983年12月第一次印刷 印数 0001—1300 册

统一书号：21137 j 定价 1.10 元

1.10元

## 前 言

本教材是供非飞行力学专业，如导弹设计、导弹控制等专业的学生用的。全书共分七章。第一、二章介绍空气动力学方面的基础知识。对于列举的两个专业和相近专业的学生来说，应了解空气动力的一些基本物理现象和对导弹运动的影响。这两章的内容就是基于这个想法选材的。第三章介绍了导弹在不同情况下运动的数学模型，是解算弹道的一些理论基础。第四章着重介绍了过载的概念。第五、六章分别叙述了方案飞行和导引飞行的运动学弹道问题。最后，在第七章中介绍了导弹稳定性、操纵性以及倾斜稳定的概念。为了便于复习，每章后列出了若干思考题。书后还附有标准大气表。

全书内容可按 60 学时讲授，其中的某些章节，根据不同专业，可有所侧重。

本书首次编写于 1974 年，后经几次修订，这次又予重写。参加本书编写工作的有陈士槽、吕学富、陆毓峰、霍秀芳、姚炳元诸同志。在编写过程中，得到本教研室很多同志的帮助；北航赵震炎教授、肖业伦副教授在审稿过程中，提出了不少宝贵意见，在此一并致谢。但是，书中仍可能有不少缺点和错误，热诚欢迎读者指正。

编 者

1982.10.

## 绪 论

飞行力学是研究飞行器运动规律的一门学科，系飞行的理论基础。就学科所属而言，它是一般力学的一个分支。

这门学科是随着人类飞行实践的不断深入而逐渐发展起来的，作为一个专业出现在航空界，只是近二十来年的事。我们知道，人类很早就向往着飞行。自古以来，许多民族都流传着各自关于飞向天空的美好神话，例如在我国，就有“嫦娥奔月”这样的神话广为流传。相传在二千多年前，公输般制造过能飞的木鹊；王莽时代（公元9至22年），有人以大鸟的羽毛为翅膀，仿鸟飞行数百步。直至1903年，人类终于设计、制造、试飞了重于空气的飞行器，这就是莱特兄弟<sup>①</sup>的第一架有人驾驶的飞机。过了若干年后他们才领悟到，这第一架飞机是不易驾驶的，甚至是难以保证安全的。用目前的术语来说，这是架稳定性较差的鸭式气动布局的飞机。可是，当时还没有形成飞行力学中关于操纵性、稳定性方面的理论。

从航空发展史上看，各国航空界经历了许许多多多次试验，其中包括无数次失败所付出的惨重代价，飞行力学学科才得以发展、总结成当今这个状况。通常，在近地面飞行的航空范畴内，我们可以按不同的对象把飞行力学分为飞机飞行力学、直升机飞行力学、导弹飞行力学等。这里都存在着大气介质对飞行器的作用问题。超出大气层在太阳系内的飞行通常称为航天，再往外去，超出太阳系飞向宇宙空间，我们称之为宇宙航行。这种场合，不存在大气介质对飞行器的作用，但要研究天体对飞行器的引力等问题。我们把航天、航宇中有关飞行器运动规律的问题概括成星际航行力学。

导弹，从第二次世界大战后期被使用以来，现在，世界上有十几个国家在生产着，有八、九十个国家装备了各种型号，其品种达一百多个。可以说，那里有武装力量，那里就有导弹。我国的导弹事业已成为国防现代化的一个不可忽视的重要组成部分。

按气动外形不同，可把导弹分成有翼的和无翼的两大类；按用途分，导弹又可分为战略的、战术的两种。导弹飞行力学不局限于研究具体的型号，而是研究各种类型导弹运动规律的共性。其内容大体上可分为两类：一类为研究导弹可能的或（某种意义上）最佳的弹道。此时，把导弹视为一个可控的质点，着眼于控制结果导致的航迹（弹道）、飞行速度、高度等参数的变化规律，而不在于控制的过程如何。另一类为研究沿某条弹道运动的控制过程（操纵性）和运动稳定性，即导弹保持和改变飞行状态的能力。此时，把导弹视为可控的刚体或弹性体。解的结果应回答按第一类问题所确定的某条质点弹道来飞行是否可能，以及飞行过程中的品质如何等等。

学习导弹飞行力学以高等数学、理论力学、计算方法、空气动力学以及自动控制原理等课程为先修课。对于从事导弹设计和导弹控制系统设计专业的科技人员来说，飞行力学是一门重要的专业基础课。

<sup>①</sup> 莱特兄弟（Wilbur Wright, 1867-1912; Orville Wright, 1871-1948），美国人。

就学科性质来说，飞行力学是一门理工结合的学科，学科本身涉及大量理论工作。但是，尽管如此，它仍然有许多实验方面的工作要做，诸如自由飞，飞行模拟，靶场试验，等等。这对研制新的型号，改进现有型号的性能都是很重要的，都是整个研究工作中不可缺少的一环。因此，飞行力学的实验研究和理论研究是互相促进，互相补充的两个方面，都是不可缺的。

# 目 录

绪 论	( 1 )
第一章 导弹空气动力学基础	( 3 )
§ 1-1 气体的主要物理属性及空气-流体力学基本概念	( 3 )
§ 1-2 标准大气	( 7 )
§ 1-3 低速流动特性	( 8 )
§ 1-4 高速流动特性	( 17 )
§ 1-5 空气动力学实验研究	( 24 )
第二章 作用在导弹上的气动力及力矩	( 27 )
§ 2-1 导弹的气动外形	( 27 )
§ 2-2 升力	( 28 )
§ 2-3 阻力	( 34 )
§ 2-4 作用在导弹上的力矩、压力中心和焦点	( 36 )
§ 2-5 俯仰力矩 $M_z$	( 39 )
§ 2-6 偏航力矩 $M_y$	( 44 )
§ 2-7 滚动力矩 $M_x$	( 45 )
§ 2-8 铰链力矩 $M_j$	( 48 )
第三章 导弹运动方程组	( 50 )
§ 3-1 常用坐标系	( 50 )
§ 3-2 各坐标系间的相互关系及坐标变换	( 52 )
§ 3-3 作用在导弹上的重力和推力	( 59 )
§ 3-4 导弹的运动方程组	( 61 )
§ 3-5 导弹的操纵飞行	( 64 )
§ 3-6 导弹的纵向和侧向运动	( 68 )
§ 3-7 导弹重心的运动	( 71 )
§ 3-8 导弹的平面运动	( 73 )
第四章 导弹的机动性能	( 80 )
§ 4-1 机动性和过载	( 80 )
§ 4-2 运动与过载	( 82 )

§ 4-3 导弹设计与过载	( 84 )
§ 4-4 空-空导弹的攻击区	( 88 )
<b>第五章 方案飞行与弹道</b>	<b>( 92 )</b>
§ 5-1 方案飞行的实际意义	( 92 )
§ 5-2 按给定俯仰角或迎角的方案飞行	( 93 )
§ 5-3 按给定弹道倾角的方案飞行	( 97 )
<b>第六章 导引飞行与弹道</b>	<b>( 100 )</b>
§ 6-1 导引飞行的特点	( 100 )
§ 6-2 平行接近法	( 104 )
§ 6-3 比例接近法	( 107 )
§ 6-4 三点法导引	( 114 )
§ 6-5 角度法	( 120 )
§ 6-6 选择导引方法的一般原则	( 123 )
<b>第七章 导弹的动态特性</b>	<b>( 125 )</b>
§ 7-1 扰动运动	( 125 )
§ 7-2 导弹运动方程的线性化	( 126 )
§ 7-3 导弹的纵向自由扰动运动	( 131 )
§ 7-4 导弹纵向运动稳定性	( 136 )
§ 7-5 导弹纵向操纵性	( 139 )
§ 7-6 导弹航向动态特性	( 147 )
§ 7-7 导弹倾斜动态特性	( 147 )
<b>附录: 标准大气表</b>	<b>( 153 )</b>
<b>参考书目</b>	<b>( 162 )</b>



## 绪 论

飞行力学是研究飞行器运动规律的一门学科，系飞行的理论基础。就学科所属而言，它是一般力学的一个分支。

这门学科是随着人类飞行实践的不断深入而逐渐发展起来的，作为一个专业出现在航空界，只是近二十来年的事。我们知道，人类很早就向往着飞行。自古以来，许多民族都流传着各自关于飞向天空的美好神话，例如在我国，就有“嫦娥奔月”这样的神话广为流传。相传在二千多年前，公输般制造过能飞的木鹊；王莽时代（公元9至22年），有人以大鸟的羽毛为翅膀，仿鸟飞行数百步。直至1903年，人类终于设计、制造、试飞了重于空气的飞行器，这就是莱特兄弟<sup>①</sup>的第一架有人驾驶的飞机。过了若干年后他们才领悟到，这第一架飞机是不易驾驶的，甚至是难以保证安全的。用目前的术语来说，这是架稳定性较差的鸭式气动布局的飞机。可是，当时还没有形成飞行力学中关于操纵性、稳定性方面的理论。

从航空发展史上看，各国航空界经历了许许多多多次试验，其中包括无数次失败所付出的惨重代价，飞行力学学科才得以发展、总结成当今这个状况。通常，在近地面飞行的航空范畴内，我们可以按不同的对象把飞行力学分为飞机飞行力学、直升机飞行力学、导弹飞行力学等。这里都存在着大气介质对飞行器的作用问题。超出大气层在太阳系内的飞行通常称为航天，再往外去，越出太阳系飞向宇宙空间，我们称之为宇宙航行。这种场合，不存在大气介质对飞行器的作用，但要研究天体对飞行器的引力等问题。我们把航天、航宇中有关飞行器运动规律的问题概括成星际航行力学。

导弹，从第二次世界大战后期被使用以来，现在，世界上有十几个国家在生产着，有八、九十个国家装备了各种型号，其品种达一百多个。可以说，那里有武装力量，那里就有导弹。我国的导弹事业已成为国防现代化的一个不可忽视的重要组成部分。

按气动外形不同，可把导弹分成有翼的和无翼的两大类；按用途分，导弹又可分为战略的、战术的两种。导弹飞行力学不局限于研究具体的型号，而是研究各种类型导弹运动规律的共性。其内容大体上可分为两类：一类为研究导弹可能的或（某种意义上）最佳的弹道。此时，把导弹视为一个可控的质点，着眼于控制结果导致的航迹（弹道）、飞行速度、高度等参数的变化规律，而不在于控制的过程如何。另一类为研究沿某条弹道运动的控制过程（操纵性）和运动稳定性，即导弹保持和改变飞行状态的能力。此时，把导弹视为可控的刚体或弹性体。解的结果应回答按第一类问题所确定的某条质点弹道来飞行是否可能，以及飞行过程中的品质如何等等。

学习导弹飞行力学以高等数学、理论力学、计算方法、空气动力学以及自动控制原理等课程为先修课。对于从事导弹设计和导弹控制系统设计专业的科技人员来说，飞行力学是一门重要的专业基础课。

<sup>①</sup> 莱特兄弟（Wilbur Wright, 1867-1912; Orville Wright, 1871-1948），美国人。

就学科性质来说，飞行力学是一门理工结合的学科，学科本身涉及大量理论工作。但是，尽管如此，它仍然有许多实验方面的工作要做，诸如自由飞，飞行模拟，靶场试验，等等。这对研制新的型号，改进现有型号的性能都是很重要的，都是整个研究工作中不可缺少的一环。因此，飞行力学的实验研究和理论研究是互相促进，互相补充的两个方面，都是必不可缺的。

# 第一章 导弹空气动力学基础

地球表面被一层厚厚的大气层包围着。

有翼式战术导弹的运动是在大气层内进行的。无翼式战略导弹的运动也不免要和介质——大气——发生关系。为了弄清楚飞行中作用在导弹上的空气动力以及它与导弹运动规律之间的关系，我们先来研究一下空气的状态和它的各种状态之间的关系。

## § 1-1 气体的主要物理属性及空气-流体力学基本概念

### 一、气体状态及完全气态方程

实验表明，对一定质量的给定气体的状态可以用它的体积 $V$ 、压强 $p$ 和温度 $T$ 这三个物理量来表征。这些物理量统称为气体的状态参数，是可以直接测量得出的。

气体的体积 $V$ ，反映了气体分子运动所能充斥的空间，即装贮气体的容器的容积。当然，这并不是指气体分子本身体积的总和，而后者比起气体的体积来说是微不足道的。体积 $V$ 的度量单位常用[米<sup>3</sup>]、[厘米<sup>3</sup>]或[升]来表示。

气体的压强 $p$ ，就是气体作用于容器内壁单位面积上的正压力。大气的压强，是指大气垂直地作用于物体表面单位面积上的力。气体的分子数目很大，它们始终以很高的速度作不规则的撞击运动，这种撞击既发生在气体分子与分子之间，也发生在气体分子与物体表面之间。气体分子对物体表面的撞击就统计上来说是均等的，它的宏观表现就是气体的压强。由于气体分子的运动是向着四面八方的，所以压强也作用在物体的所有表面。压强的度量单位在SI单位制<sup>①</sup>中为[帕]（帕，即[牛顿/米<sup>2</sup>]），在CGS单位制中<sup>②</sup>为[达因/厘米<sup>2</sup>]；此外，还有[标准大气压]（简称[大气压]），[工程大气压]与[巴]等单位。这些单位可以通过下列关系换算<sup>③</sup>。

$$1 \text{ 巴(bar)} = 10^5 \text{ 帕(Pa)}$$

$$1 \text{ 标准大气压(atm)} = 101325 \text{ Pa} = 760 \text{ 毫米汞柱高}$$

$$1 \text{ 工程大气压(kgf/cm}^2\text{)} = 9.80665 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ 毫米汞柱(mmHg)} = 133.3224 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ 毫米水柱(mmH}_2\text{O)} = 9.806375 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ 达因/厘米}^2\text{(dyn/cm}^2\text{)} = 0.1 \text{ Pa}$$

① SI是国际单位制 *Système International d'Unités* 的简称。力学中SI的基本单位为长度[米]、质量[千克]、时间[秒]，导出单位有力[牛顿]等。国务院规定，我国逐步推行SI单位制。

② CGS是厘米、克、秒制，*centimeter-gram-second system of units* 的缩写。力学中CGS的基本单位是长度[厘米]、质量[克]、时间[秒]，力的单位用[达因]，常见于一些物理书刊。

③ 摘自《中华人民共和国计量单位名称与符号方案》，第一版，1981-03-31。

气体的温度  $T$  表征气体冷热程度，是与气体分子运动密切相关的。温度的度量单位常用摄氏温标 (Centigrade or Celsius)  $t^{\circ}\text{C}$  和绝对温标 (Kelvin)  $T^{\circ}\text{K}$  来表示，两个温标之间的关系可用下式换算：

$$T = 273.15 + t^{\circ}\text{C} \quad (1-1)$$

这就是说，绝对温标是以摄氏温标的  $-273.15^{\circ}\text{C}$  作为零点 ( $0^{\circ}\text{K}$ ) 的。这时，理想气体的分子的热运动就终止了。

大量实验证实，一定质量的给定气体，从一个平衡状态变化到另一平衡状态时，压强与体积的乘积除以温度，其值不变。如以脚注  $1, 2, \dots, i$  分别表示给定气体的不同的平衡状态，则上述规律可用公式表示如下：

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \dots = \frac{p_i V_i}{T_i} = \frac{m}{\mu} R_0 = \text{恒量}, \quad (1-2)$$

式中， $m$ —气体质量，

$\mu$ —气体的摩尔质量，

$R_0$ —气体普适恒量， $R_0 = 8.314$  焦耳/摩尔·开。

不同的气体， $\mu$  值也不同。对于地面的干燥空气， $\mu$  值常取  $28.966$  克/摩尔。公式 (1-2) 在物理学或热力学中称为理想气体状态方程式。在空气动力学中，理想气体是指无粘性的气体。为了区别起见，人们就把满足公式 (1-2) 的气体称为完全气体，(1-2) 式就称为完全气体状态方程式。事实上，气体的压强和温度在相当大的范围内变化时，实际气体的状态参数基本上遵循由 (1-2) 式描述的规律。也就是说，实际气体是很接近完全气体的。只是在很大的压强之下或者在接近凝点的条件下，实际气体与完全气体的差别才变得显著起来。

我们用  $\rho$  来表示气体的质量密度：

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V},$$

再用  $R$  表示气体恒量， $R = R_0/\mu$ ，把公式 (1-2) 改写一下，有：

$$p = \rho RT \quad (1-3)$$

这里的  $R$  值将随气体不同而异，而  $R_0$  值对各种气体都是相同的。公式 (1-3) 表明，把一定质量的气体置于密闭容器中，其压强与温度成正比。

## 二、空气-流体力学的一些基本概念

研究空气-流体力学时，人们根据所研究对象的特点，总结了一些基本方法。下面我们介绍几个主要概念。

(一)、连续性假设 当研究流体的流动以及物体与介质的相互作用时，不去观察流体的每一个分子，略去其分子结构，也不考虑介质分子的不规则运动，而是用宏观的方法，认为介质是连续地、无间隙地布满所研究的流动空间。这个假设称为介质的连续性假设，被广泛地应用于空气-流体力学的研究中。

然而，并不是在任何场合都可以采用连续性假设的。我们把处于热动平衡下的气态介质的一个分子在两次碰撞之间所走过的平均距离称为分子的平均自由路程，记作  $l_z$ 。只有当

介质分子的平均自由路程长度  $l_z$  比起运动于其中的物体的长度要小得多，分子不规则运动引起的动力学效应可以略去不计时，采用连续性假设才是适宜的。空气分子的  $l_z$  值随高度增加而迅速加大。例如，在海平面处，空气分子的  $l_z$  值为  $6.3 \times 10^{-6}$  厘米，而在 130 公里高度处，其值将大于 3.5 米。

(二)、运动转换 按照运动的相对性原理，若将一个任意等速直线运动加到某一物理系统中的一切运动上去，则系统内部各个物体之间的相对运动仍保持原有关系而不会受到破坏。这样，如果有一个物体在静止的空气中以速度  $V$  作等速直线运动，则可给该系统（包括空气和物体）加上一个大小相等方向相反的速度。于是，就得到这样的运动转换：物体静止不动，而气流从无限远处以  $V$  的大小流向物体，这时气流速度的方向刚好和物体原来的运动方向相反。采用运动转换的概念来研究物体相对于空气的运动，在上述两种情况中是等价的。在空气-流体力学的实验研究中，常把模型安装在支架上，使人工气流或水流流向模型，形成模型与流体介质之间的相对运动，以研究它们之间的相互作用。

(三)、流体微团的轨迹与流线 在满足连续性假设的前提下，研究流体运动，实际上是指研究流体微团的运动情况，这时，对流体微团运动情况的描述可以有两种不同的方法。

一种方法把着眼点放在流体微团上，研究每一流体微团的空间位置随时间而变化的情况。为此，必须跟踪每一微团，历经一定的时间间隔，求得它的运动轨迹。然后把每一微团的轨迹加以综合，得出所研究对象的运动全貌。

另一种方法把着眼点放在流场空间的每一个点上，研究每一瞬时各点上所产生的现象。把同一瞬时各点上微团的运动趋向逐一与相邻点上的运动趋向联系起来，就可得到一条流线。这种方法比上一种方法方便得多，所以被广泛地采用。

如果流场空间任一点处的流体的压强、密度、速度等参数不随时间而变化，这种情况就称为定常流动。流体在定常流动中微团运动的轨迹，就是流场中的流线。这时，流线图是不随时间而改变的。它好像是这样一种电影：从开始到终了只有同一个画面。与定常流动不同的另一种情况称为非定常流动，这时，流体在流场空间任一点处的参数将随时间而变化。

### 三、粘性

流体在其一部分与另一部分之间发生相对运动，同时产生阻力来抵抗这种相对运动的属性，称为流体的粘性。粘性是流体分子之间一种互相作用的宏观表现，它要在流体有相对运动时才表现出来。例如，蘸在手指上的胶水，当用手指头捻一捻（使之有相对运动）时，才反映出它的粘性来。

粘性是流体重要的物理属性之一，它与物体在介质中的运动密切相关。下面，我们来研究一下粘性导致的流体的内摩擦力。

设想在两块长度和宽度都足够大的平行平板之间充满着某种流体介质，其纵剖面如图 1-1 所示。

假设下面一块平板固定不动，在上面的平板上施加一向右的平行力，使其以速

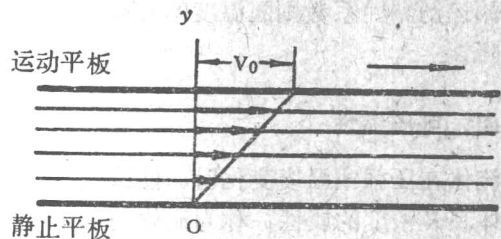


图 1-1 平行平板之间流体运动的速度分布

度  $V_0$  向右运动。如果加的力很小，则  $V_0$  值也不大。这时，平板之间的流体将一层一层地平行运动。最上面一层流体薄层像粘在上层平面上一样，随其以速度  $V_0$  向右运动，而最下层的则静止不动。中间各层的速度值从 0 到  $V_0$ ，呈一定规律分布，这种速度分布规律，称速度型。速度型的成因，就是因为流体有粘性的缘故。我们知道，流体微团在运动时，流体分子除了有序的向前运动（其速度等于微团的流动速度）外，还有分子的不规则的运动，即分子的热运动。由于后者，当上层流体向右运动时，一部分分子会跑到下层去，带动下层流体也向右运动；同时，下层的一部分分子也会跑到上层去。这种交换从统计上说是相等的。交换的结果，由于上层的带有较大的动量，使得下层的动量增大，同时使上层的动量减小。从宏观上来说，相当于上下层的交界面上存在着—对大小相等方向相反的切力，上层作用在下层的切力使下层加速，而下层对上层的作用，则使之减速。这种切力，就是流体的内摩擦力。

牛顿根据流体层流运动的实验观测结果，得出了流体内摩擦定律公式：

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy}, \quad (1-4)$$

式中： $\tau$ —两层流体之间的切应力，

$\frac{dV}{dy}$ —所研究流层的速度梯度，

$\mu$ —动力粘性系数。

其中  $\tau$  的量纲是 [牛顿/米<sup>2</sup>]， $\mu$  的量纲是 [牛顿·秒/米<sup>2</sup>]。在空气动力学中， $\mu$  常和密度  $\rho$  同时出现，我们引进一个新的符号  $\nu$ ：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (1-5)$$

叫做运动粘性系数，它的量纲是 [米<sup>2</sup>/秒]。对于干燥空气，在标准情况下，即  $t_0 = 15^\circ\text{C}$ ， $\rho_0 = 1.225$  千克/米<sup>3</sup> 时，其粘性系数值为：

$$\mu_0 = 1.7895 \times 10^{-5} \text{ 牛顿·秒/米}^2,$$

$$\nu_0 = 1.4607 \times 10^{-5} \text{ 米}^2/\text{秒}。$$

粘性系数是表征流体粘性大小的物理量。因为粘性与分子的热运动密切相关，所以，粘性系数值是随流体的压强和温度而变化的。图 1-2 表示空气和水的运动粘性系数随温度变化的曲线。由图可见，空气的内摩擦随温度升高而增大，但水（或油）的运动粘性系数则随温度的升高而迅速下降。

#### 四、可压缩性

流体在压强或温度变化时，能改变其原来体积及密度的属性，称为流体的可压缩性。

气体和液体的可压缩性的差别很大，液体几乎是不可压缩的。例如，水在 1000 个左右大

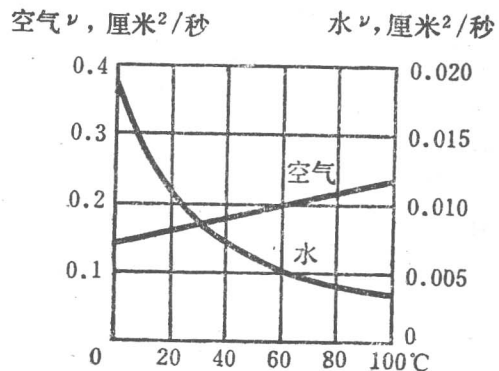


图 1-2 温度对粘性的影响

气压下的体积比起它在1个大气压下的体积来，只有5%的变化。而气体由于分子之间的吸引力很小，情况就与液体大不一样了。在压强稍有变动时，体积随即变化。在温度不变时，气体的体积和压强成反比。气体的密度是单位容积内气体分子数的宏观表现，从公式(1-3)可以看出，密度取决于气体所处条件，即温度和压强。

综上所述，实际气体是有粘性，也是可压缩的。实际气体的这种物理属性，使飞行器的气动力现象大为复杂化。工程上常在一定的条件下，采用一些简化假设，即在研究飞行器的运动时，只在近物体表面考虑空气粘性的影响，并在低速时忽略空气可压缩性的影响。

## § 1-2 标准大气

大气是地球周围整个空气层的统称。

飞行中作用在导弹上的空气动力和发动机推力特性，在其他条件相同的情况下，取决于介质（大气）的压强、温度及其他物理属性。在研究导弹运动时，必须弄清楚导弹运动于其中的介质的状况。而大气状况，诸如它的压强、密度、温度等参数在地球表面不同的几何高度上，在不同的纬度上，不同的季节，一天内不同的时间上是各不相同的。这样一来，同一飞行器在不同时间不同地点所进行的同一种飞行试验的结果也就不一致了。于是，这里就存在着如何用同一个标准来进行计算和比较的问题，也就是必须采用模型化了的标准大气表。

国际航空界根据多年观测北半球中等纬度区域内，各个高度上的大气压强、温度、密度等的年平均值的结果，将大气参数加以模型化，制订了标准大气表。如西欧诸国制订的有国际参考大气(CIRA)<sup>①</sup>；作为国家标准，苏联也制订了标准大气(CA)<sup>②</sup>。我国地处北纬3°~54°，黄河流域在北纬35°左右，和已订的标准大气表的地理条件相差不大。此外，还由于历史上的原因，我国有些书刊以前常采用苏联的标准大气表。1975年，我国航空界编制了我国的《标准大气表》<sup>③</sup>，供各单位试用。

标准大气表规定的大气诸参数不随地理纬度和时间而变化，它只是几何高度的函数。表中规定以海平面作为几何高度计算的起点，该处大气的温度、压强、密度值分别定为：

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= 288.15 \text{ }^\circ\text{K} \text{ 或 } t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}, \\ p_0 &= 1 \text{ 标准大气压} = 1.01325 \text{ 巴} = 101325 \text{ 牛顿/米}^2 = 10332.3 \text{ 千克力/米}^2, \\ \rho_0 &= 1.225 \text{ 千克/米}^3 = 0.12492 \text{ 千克力}\cdot\text{秒}^2/\text{米}^4. \end{aligned} \right\} (1-6)$$

式(1-6)表示了大气的标准零度状态。

按高度不同可以把大气分成若干层，接近地表的为对流层。这一层大气的厚度随纬度、季节而不同，根据观测的结果，规定高度在11公里以下的大气层作为对流层。这一层内大气的质量几乎占整个大气质量的3/4。在对流层内空气上下激烈地对流，各种天气现象如云、雨、雪、雹等，基本上都在这一层内发生和发展。对流层内的气温，随高度升高而降低，高度每升高1公里，气温下降6.5°C。

① CIRA 是 COSPAR International Reference Atmosphere (宇宙空间研究委员会国际标准大气)的缩写。

② CA 是 Стандартная Атмосфера (标准大气)的缩写。

③ 参见附录的标准大气表。

从 11 公里到 32 公里，这一层称为同温层或平流层。一般飞机和有翼导弹就是在对流层和同温层内飞行的。同温层内的大气温度，在 11 公里到 20 公里这一范围内，保持为  $216.65^{\circ}\text{K}$  不变。再往高去，温度略有升高，见图 1-3 之 *a*。

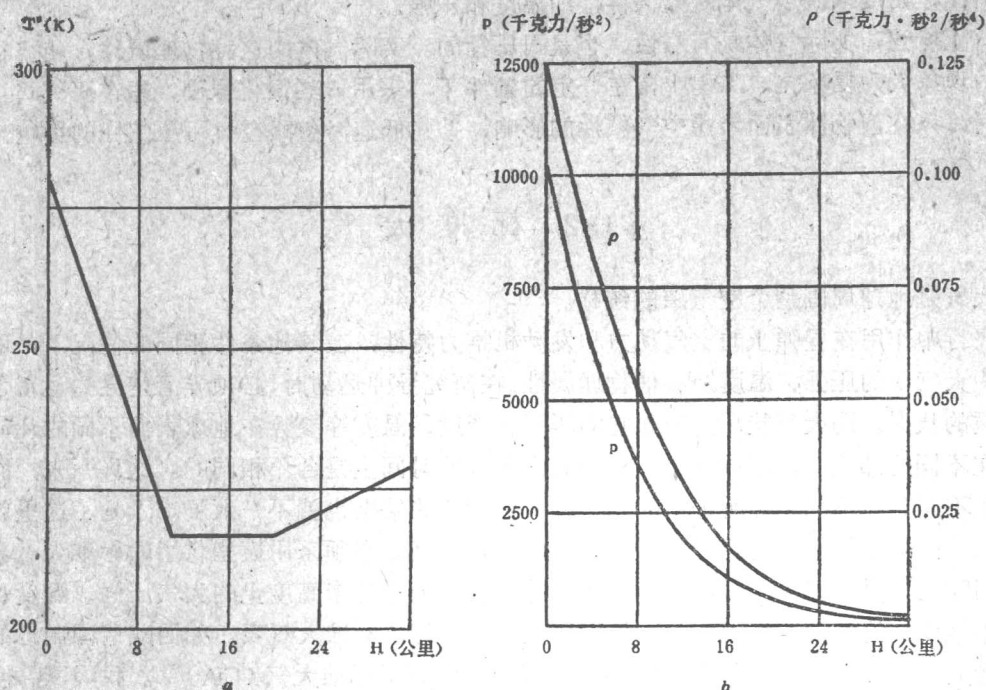


图 1-3 大气参数随高度的变化  
a. 温度 b. 压强及密度

大气的压强就是观测点处单位面积上所承受的上空大气柱的重量，高度越高，大气压强越低。例如，高度在 16 公里左右，压强降为标准大气压的 10%；而高度升到 31 公里处，压强几乎降至标准大气压的 1%。可以认为，在对流层内压强是高度的幂函数，再往高去，则按指数函数规律变化（图 1-3 之 *b*）。

大气密度随高度的变化，在对流层内也是幂函数关系。在同温层的 11 至 20 公里高度范围内，密度变化规律与压强变化规律是相同的。在温度有变化的对流层中，密度随高度的变化比压强随高度的变化要稍为缓慢一些。例如，密度降至标准状态下的 10%，高度约为 18 公里；降至 1%，高度则为 32 公里左右。由此可以看出，大气压强和密度随高度的变化是很激烈的，在同温层的上界，两者都几乎降为海平面处标准状态值的 1% 了（图 1-3 之 *b*）。

从 32 公里以上，还把大气分成中间层、高温层、宇宙层等等，这里从略。

### § 1-3 低速流动特性

现在先来研究一元低速流动的情况。所谓一元流动是指流体微团的位移只要用一个参数来表示就可以了，如微团沿流线的运动，流体在管中的运动等都是一元流动的情况。一元流动虽然是简单的流动情况；但由此得出的一些结论仍有重要的普遍意义。



## 一、流动方程

我们取一个流管来研究其中的流动特性。流管是指其周界由流线所围成的一根“管子”，流管内外的流体被“流管壁”隔开而无交流。显然，流管是假想存在于流场中的，是虚构的。

设以  $V$  表示流管横截面上流体的平均速度（图 1-4）， $\rho$  为密度， $F$  为横截面积。由于流管内外不能通过管壁进行交流，所以根据质量不灭定律，单位时间内流过流管任意截面的流体质量  $\rho VF$  应是守恒的，即

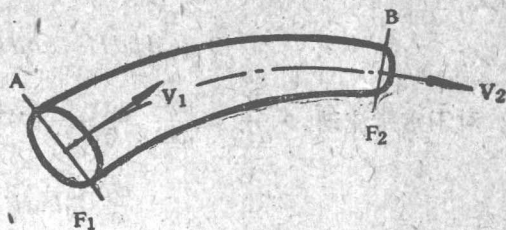


图 1-4 定常流动的流量守恒

$$\rho VF = \rho_1 V_1 F_1 = \rho_2 V_2 F_2 = \text{恒量}。 \quad (1-7)$$

方程式 (1-7) 表示在定常流动的情况下，流体的质量流量将保持不变，它被称为连续方程或流量方程。对于液体，一般可以认为它的  $\rho$  值是不变的，质量流量守恒就变成体积流量守恒，而 (1-7) 式也就变得更简单了，即流速与截面积之积保持为一恒量：

$$VF = V_1 F_1 = V_2 F_2 = \text{恒量}。 \quad (1-8)$$

自然界中有许多现象都是流量守恒的反映，例如从平原流至峡谷处的风速要加大，在落差不大的河道中，宽阔处比狭隘处的流速要低些等等。这里说的都是低速流动的例子，即在密度不变（或变化甚微）的情况下，流速与流动截面积成反比。然而，气体在高速流动时，由于压缩性的影响，我们就不能照此套用流速反比于流动截面积的结论。

## 二、能量方程

柏努利<sup>①</sup> 方程阐述沿流线各点处，流体的压力能、势能和动能之间的关系，它是空气-流体力学中最常用的公式之一。

我们考察流管中定常流动的情况，并且假定流体是无粘性的，没有热或功从外界传入流体或从流体传给外界。取流管的一个微元  $ds$ ，流体从端面  $A$  流向  $B$ ，用  $y$  表示微元离计算起点的高度（图 1-5）。作用在微元上的力有压力和重力。

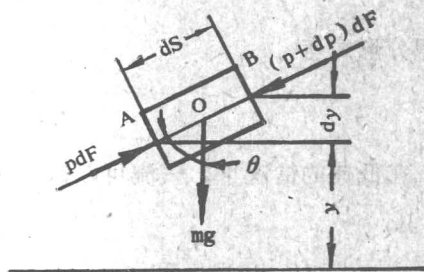


图 1-5 定常流动的能量守恒

在端面  $A$ ，压力值为  $pdF$ ，在端面  $B$  为  $(p+dp)dF$ ；微元受到的压力为此两力之代数和；

$$pdF - (p+dp)dF = -dpdF,$$

负号表示与流向反向。

<sup>①</sup> 柏努利 (Daniel Bernoulli, 1700-1784)。瑞士数学家、工程师，俄国彼得堡科学院院士。