

流体的基本属性和流体静力学基础

本章关键词

压缩性 (compressibility)

连续介质 (continuous medium)

膨胀性 (expansion)

粘性 (viscosity)

欧拉静平衡方程 (Euler equation of static equilibrium)

导热性 (thermal conductivity)

本章主要介绍流体的基本属性,包括流体的力学特性、连续介质的概念以及压缩性、膨胀性、粘性等流体的重要特性。在解决流体力学问题时必须考虑到流体的这些属性并恰当地处理它们对实际问题的影响。在了解这些特性的基础上研究流体处于静止状态时的平衡规律和其中的压强分布规律。

由于流体和固体的力学特性不同,流体力学的研究方法也和固体力学的不同,流体静力学的分析方法在流体力学中具有一定程度的普遍意义,也是研究流体动力学的基础。

空气动力学的基本任务是为飞行器的设计提供重要的理论依据,空气动力学的基本理论,更是指导飞行实践必不可少的理论依据。空气动力学是流体力学的组成部分,而流体力学又是物理学的一个分支。流体力学又分为流体静力学和流体动力学两大组成部分。前者研究的是流体静止时其作用力产生和变化的规律,后者研究的是流体运动时的运动规律及其作用力产生和变化的规律。很显然,流体力学的基本理论都适用于空气。

1.1 流体的力学特性和连续介质模型

1. 流体的力学特性

物质有三种状态,分别是气态、液态和固态,对应的物质一般称为气体、液体和固体。根据其是否能流动,将液体和气体分作一类,称之为**流体**。

流体与固体相比,其分子与分子之间的吸引力很小,分子热运动较剧烈,因而分子排列较为松散,本身不能保持一定的形状。

从力学性质来说,固体能够抵抗压力、拉力和剪切力,在一定的的外力作用下会产生一定的变形,如果再施加更大的作用力则会破坏固体本身的形状或结构。可是,在一般情况下,流体只能承受压力,而不能承受拉力,在一定的剪切力的作用下,流体会产生连续的变形,因



此静止流体不能承受剪切力。这就是流体和固体在力学性质上的明显区别。

液体和气体具有流体的共同特性,但其各自也有不同的特性。

液体分子与分子之间的间距和分子的有效直径差不多相等,也就是分子与分子之间的距离相对较近。因而,对液体施加压力的时候,液体分子与分子之间的间距稍有缩小,分子与分子之间就会产生很大的斥力来抵抗压力,液体分子之间的间距很难再缩小,表现出来就是液体不易压缩。由于液体分子之间的间距相对较小,因此分子之间的吸引力较大,液体有表面积收缩到最小的特性,所以一定质量的液体具有一定的体积,在容器中会形成液面与空气分界的自由分界面。

与液体相比,气体分子之间的距离要大得多,例如在常温常压下,空气分子之间的平均距离约为 $3 \times 10^{-9} \text{ m}$,而分子的有效直径为 10^{-10} m 。分子之间的距离比分子有效直径大得多。正因为如此,当气体受到压力压缩时,只有当分子之间的距离缩小很多时,才会明显地表现出分子与分子之间的斥力。所以,对气体加压时,其体积很容易被压缩。也正因为气体分子与分子的间距较大,其表现出来的引力也很小,相对于液体具有较强的分子引力来说,气体的分子热运动对气体特性起着决定性作用。这就是气体和液体的不同之处,一定质量的气体没有一定的体积。总的来说,气体既没有一定的形状也没有一定的体积。一定量的气体进入较大容器后,由于分子的无规则热运动,气体很快就充满整个容器,而不能形成自由表面。

2. 连续介质模型

对于流体,无论是液体还是气体,其本质都是由大量不断运动的分子组成。而且无论是分子与分子之间的间距大小如何,从微观的角度来看,分子与分子之间总是存在间隙的。从数学的角度来说,流体的质量在空间上其实是不连续的。同时,由于分子的随机运动,又会导致在任一空间点上的流体物理量对于时间是不连续的。要研究这样的微观运动是极其困难的。流体在微观上确实是不连续的,但人们日常生活中观察到的或者用仪器测量到的流体宏观结构和宏观运动又明显地表现出连续性和确定性。空气动力学所研究的正是空气这种流体的宏观运动。

空气实际上是由大量微小的空气分子组成的;空气分子之间存在间隙,每个空气分子都在不断地作无规则的热运动。在分子热运动过程中,空气分子两次碰撞之间所走过的平均路程,叫空气分子的平均自由程。分析分子运动的最基本方法是对每一个分子运用运动定律,分析每一个分子的运动规律,然后用统计学方法求得大量分子微观量的平均值。这种研究方法,通常被称为统计力学方法,相对来说较为严谨,不过它的计算过于繁琐,实际应用受到了一定限制。

1753年,欧拉首先采用了“连续介质”作为宏观流体模型,将流体看成是由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质,这个模型称为连续介质模型。

目前,一般飞机活动的高度范围主要在大气与地面最近的对流层,而这个范围内的空气十分稠密,所包含的空气质量几乎占整个大气质量的 $3/4$ 。在标准大气(标准大气状态参数随高度的变化见 3.2.2 节)状况下,海平面的大气,空气的分子密度约为 $2.7 \times 10^{19} \text{ 个/mm}^3$,空气分子的平均自由程只有约 10^{-8} mm 。所以在目前一般飞机飞行的高度范围内,空气分子的平均自由程与飞机的特征长度(表示飞机尺寸大小的有代表性的长度,如飞机两翼尖之间的距离或机翼弦长)相比,是极其微小的。在这样的条件下,空气作用在物体表面的力,是大量空气分子连续不断地撞击物体表面的宏观效果,空气动力是大量空气分子共同作用的



统计平均结果,不是由个别分子的具体运动决定的。而空气动力学的任务是研究空气和飞机的相互作用,研究的是空气的宏观运动规律。所以在空气动力学领域,一般都抛开无规则分子运动特点,也不考虑实际空气的微观结构,而是另用一种简化的模型来代替空气的真实微观结构,只从宏观上研究空气微团对飞机的作用力。

所谓空气微团,是指含有很多空气分子的很微小的一团空气,它与飞行器特征尺寸大小相比是微不足道的,同时它还要包含足够多的空气分子数目,要使空气密度的统计平均值有确切的意义。空气微团所表现出来的特性不是每个分子的行为,而是整个空气的总体属性。需要说明的是,本书所讲的空气的运动速度就是指空气微团质心的宏观运动速度,有别于空气分子的热运动速度概念;而空间某一点的密度则是指质心与该点重合的空气微团的密度。

有了空气微团的概念,就可以把空气看成是由空气微团组成的没有间隙的连续体,这就是连续介质假设。由连续介质假设所带来的最大简化是:我们不必研究大量分子的瞬间状态,而只要研究描述空气宏观状态的物理量,如压强 p 、密度 ρ 、温度 T 、体积 V 等就行了。有了这个假设,我们就可以把空气的 p, ρ, T, V 等状态参数看作是空间坐标及时间的连续函数,因而在分析研究空气动力学问题时,就可以广泛地应用数学上有关连续函数的解析方法。

1.2 流体的密度、温度、压强及气体状态方程

流体的密度、温度、压强是描述流体基本属性的物理量。

1. 流体的密度

单位体积中流体的质量叫做流体的密度,记作 ρ ,它表示流体的稠密程度。质量为 m 的流体,如果体积为 V ,则平均密度为 $\rho = \frac{m}{V}$ 。根据连续介质的概念,密度的数学定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1)$$

在国际单位制中,密度单位是 kg/m^3 。

在标准大气条件(15℃,一个标准大气压)下,空气的密度为

$$\rho_0 = 1.225 \text{kg}/\text{m}^3$$

高度增加,空气密度减小,在 22 000ft(6 500m)的高空,空气密度大约降为海平面密度的一半,如图 1-1 所示。

2. 流体的温度

温度是表示物体冷热程度的参数,它反映分子无规则运动平均动能的大小。

温度的高低通常用温度表来测量。大多数国家(包括我国)都使用摄氏温度 t ,摄氏温度以水的冰点为 0°C ,以水的沸点为 100°C 。而有的国家和地区,如美国,则使用华氏温度 t_F ,在华氏温度中,水的冰点为 32°F ,水的沸点为 212°F 。

这两种温度的换算关系为

$$t_F = \frac{9}{5}t + 32 \quad \text{或} \quad t = \frac{5}{9}(t_F - 32)$$

在热力学计算中,常用的是绝对温度。把空气分子的运动速度为零,即空气分子停止做

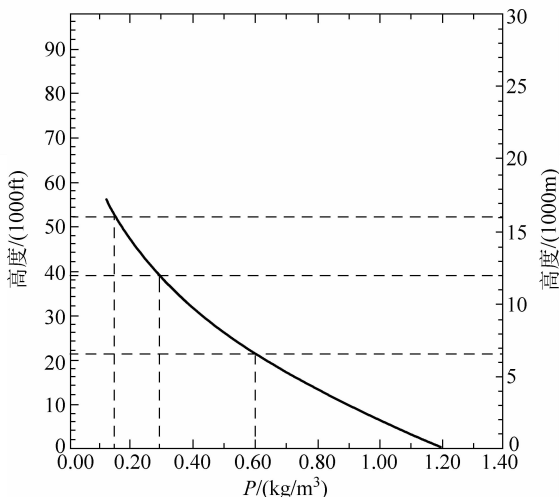


图 1-1 大气密度随高度变化的曲线

不规则热运动时的温度,作为绝对温度的零度。绝对温度有两种单位,如果其刻度增量与摄氏温度相同,则称为开氏温度 T ; 如果其刻度增量与华氏温度相同,则称为兰氏温度 t_R 。一般使用开氏温度 T 居多。

开氏温度 T 和摄氏温度 t 的换算关系为

$$T = t + 273.15$$

摄氏温度 t 、华氏温度 t_F 、开氏温度 T 的换算也可用图 1-2 表示。

3. 流体的压强

垂直作用在流体单位面积上的作用力叫做流体的压强,记作

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta S} \tag{1.2}$$

式中: ΔS 为微元面积; ΔN 为气体对 ΔS 的垂直(法向)作用力(见图 1-3)。

T/K	$t/^\circ C$	$t_F/^\circ F$
373	100	212
363	90	194
353	80	176
343	70	158
333	60	140
323	50	122
313	40	104
303	30	86
293	20	68
283	10	50
273	0	32

图 1-2 温度换算表

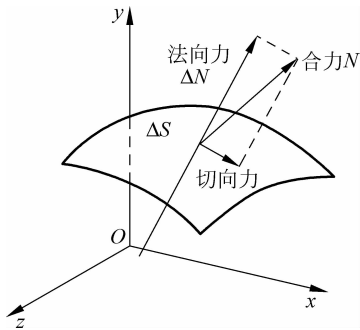


图 1-3 流体的压强



本书后面常提到的压力,实际上是指压强,因为我们研究的受力范围通常取单位面积。

在国际单位制中,压强的单位为 Pa(帕斯卡),即 N/m^2 。航空界常用的压强单位还有百帕(hPa)、毫米汞柱(mmHg)、大气压(atm)、巴(bar)、毫巴(mbar)、PSI(lbf/in²)等。各常用压强单位之间的换算见表 1-1。

表 1-1 压强单位换算表

帕斯卡 (Pa(N/m^2))	大气压 (atm)	毫米汞柱 (mmHg)	毫巴 (mbar)	英寸汞柱 (inHg)	千克力/米 ² (kgf/m ²)	磅力/英寸 ² (lbf/in ²)
1.000	9.866×10^{-5}	7.500×10^{-3}	1.000×10^{-2}	2.953×10^{-4}	1.029×10^{-1}	1.450×10^{-4}
1.013×10^5	1.000	7.600×10^2	1.013×10^3	2.992×10	1.033×10^4	1.469×10
1.333×10^2	1.316×10^{-3}	1.000	1.333	3.937×10^{-2}	1.359×10	1.933×10^{-2}
1.000×10^2	9.870×10^{-4}	7.500×10^{-1}	1.000	2.953×10^{-2}	1.020×10	1.450×10^{-2}
3.386×10^3	3.342×10^{-2}	2.540×10	3.385×10	1.000	3.452×10^2	4.910×10^{-1}
9.800	9.670×10^{-5}	7.353×10^{-2}	9.800×10^{-2}	2.895×10^{-3}	1.000	1.42×10^{-3}
6.894×10^3	6.800×10^{-2}	5.171×10	6.896×10	2.036	7.031×10^2	1.000

在静止的大气中,大气压力就是物体单位面积上所承受的大气柱的重量。在标准海平面,大气的压强可达到 $14.7\text{lbf}/\text{in}^2$ 或 $101.325\text{kN}/\text{m}^2$ 。

随着高度的增加,空气压强减小,在 18 000ft 的高度上,空气压强约为海平面压强的一半,该高度的氧气含量也只有海平面的一半(见图 1-4)。因此在高空飞行,必须使用氧气设备和增压座舱,以满足人体正常生理活动的需要。

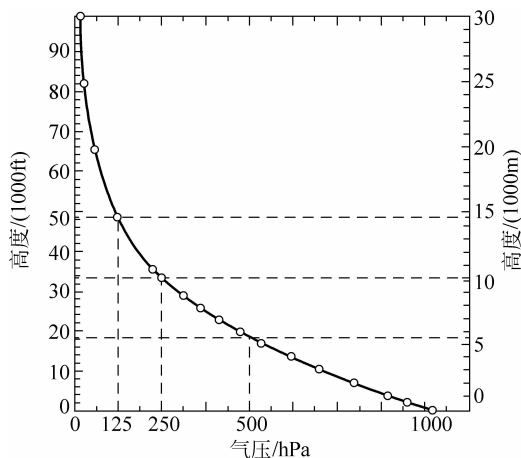


图 1-4 大气压强随高度变化的曲线

4. 理想气体的状态方程

凡遵循克拉贝龙状态方程的气体,称为完全气体。

对于不同物理量的气体,克拉贝龙方程有下列几种形式:

$$pv = RT \quad (\text{对 } 1\text{kg 气体}) \quad (1.3)$$

$$pV_m = R_m T \quad (\text{对 } 1\text{kmol 气体}) \quad (1.4)$$



$$pV = mRT = nR_m T \quad (\text{对 } m\text{kg 或 } n\text{kmol 气体}) \quad (1.5)$$

式中： p 为压强； v 为比体积； T 为开氏温度； V_m 为摩尔容积，在相同压力和温度下，各种气体的摩尔容积相同。在标准状态下，各种理想气体的 V_m 均相同，都是 $22.414\text{m}^3/\text{kmol}$ 。 R_m 为摩尔气体常数，不仅与气体所处的状态无关，而且还与气体种类无关，因此又称为通用气体常数。 R_m 值的大小可以根据标准状态参数由(1.2)式确定，也就是

$$R_m = \frac{1.01325 \times 10^5 \times 22.414}{273.15} = 8314\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

R 是气体常数，它与所处状态无关，但随气体种类不同而不同，气体常数和通用气体常数的关系是 $R_m = M \cdot R$ ，其中 M 为物质的摩尔质量。不同气体的 M 值不同，则 R 也不同。比如，氧气的摩尔质量 M 为 $32\text{kg}/\text{kmol}$ ，空气的摩尔质量 M 为 $28.97\text{kg}/\text{kmol}$ ，则氧气和空气的 R 分别为 $259.8\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 和 $287.1\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

克拉贝龙方程描述的是同一状态下的理想气体 p, V, T 三个状态参数之间的关系。

对于克拉贝龙方程的应用，需要注意的是：

- (1) 方程中必须采用绝对压力，而对于直接测量得到的表压不能使用；
- (2) 方程中必须使用绝对温度，而不能使用摄氏、华氏温标；
- (3) p, V, V_m, T, M 等量的单位必须与通用气体常数 R_m 的单位一致。

克拉贝龙状态方程是描述理想气体的状态方程，是气体性质的一种近似描述。理想气体可看作是实际气体的 $p \rightarrow 0, v \rightarrow 0$ 的极限状态的气体。而实际气体分子本身具有体积，分子之间存在相互作用力，这对分子的运动状况会产生一定的影响。但当气体的密度比较低，也就是分子间的平均距离比较大时，分子本身所占的体积与气体的总容积相比很小，特别是 $p \rightarrow 0, v \rightarrow 0$ 时，分子本身所占的体积可以忽略不计，上述两种因素的作用趋近于 0。当气体密度很大时，各种气体的 p, V, T 将明显偏离该方程，即使在低密度条件下，两者也只是大致相符，只有当气体的压力趋近于 0，气体的体积趋近于无穷大时，气体的性质才能完全符合这一方程。

实验证明，实际气体的特性很接近完全气体，只有在很高的压强或者接近凝点的状态下（例如水蒸气），实际气体才与完全气体有差距。所以一般工程应用中，可采用克拉贝龙方程来描述实际气体的状态。

1.3 流体的压缩性和膨胀性

1.3.1 流体压缩性

由于流体相比固体来说，其分子与分子之间的间距更大，当作用在流体上的压强增大时，流体分子与分子之间的间距将会缩短，宏观上表现出流体体积的缩小，我们将流体随着压强增大而体积缩小的特性称为流体的压缩性。通常用压缩系数 β 来度量流体的压缩性，定义为：在一定温度下升高单位压强时，流体体积的相对缩小量，即

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1.6)$$

式中： V 表示体积； v 表示比容； p 表示压强； ρ 表示密度。

压缩系数的倒数称为**体积弹性模量** E ，它表示单位密度变化所需要的压强增量，即



$$E = \frac{1}{\beta} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1.7)$$

体积弹性模量越大,流体越不容易压缩。纯液体的体积弹性模量很大,比如,常温下水的弹性模量 $E=2.1 \times 10^9 \text{ Pa}$, 液压用油 $E=1.8 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。因此,如果研究液体运动时,通常可以认为液体的体积和密度变化不大,其变化可以忽略不计或者简单地认为其体积和密度不变。只有在高压领域、液压冲击等方面,才需要考虑液体的压缩性。

对于气体,同样有压缩系数和弹性模量,但和液体不同的是,气体的密度随压强的变化是和热力过程有关的。比如,对于等温的压缩过程, $dp/d\rho=p/\rho$, 这时的 $E=P$, 当 $p=10 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,空气的体积弹性模量 $E=1.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。可见,气体的体积弹性模量远小于液体。

虽然纯液体的体积弹性模量很大,但如果混有不溶解的气体时,其体积弹性模量将会降低很多。设体积为 V_m 混有气体的液体中,气体的体积为 V_g , 纯液体的体积 $V_l=V_m-V_g$; 当压强增加 Δp 时,混气液体的体积减小 ΔV_m , 气体体积减小 ΔV_g , 纯液体体积减小 ΔV_l , 则 $\Delta V_m=\Delta V_l+\Delta V_g$; 混气液体、气体和纯液体的体积弹性模量分别为

$$E_m = -\frac{V_m \Delta p}{\Delta V_m}, \quad E_g = -\frac{V_g \Delta p}{\Delta V_g}, \quad E_l = -\frac{V_l \Delta p}{\Delta V_l}$$

于是有

$$\frac{V_m \Delta p}{E_m} = \frac{V_g \Delta p}{E_g} + \frac{V_l \Delta p}{E_l}$$

即

$$\frac{1}{E_m} = \frac{V_g}{V_m} \left(\frac{1}{E_g} \right) + \frac{V_l}{V_m} \left(\frac{1}{E_l} \right) = \frac{V_g}{V_m} \left(\frac{1}{E_g} \right) + \left(1 - \frac{V_g}{V_m} \right) \left(\frac{1}{E_l} \right)$$

按上式,可以算出 E_m , 比如液压用油中常混有一定气体, 液压用油的弹性模量为 $E=1.8 \times 10^9 \text{ Pa}$, 在温度不变的情况下, 若液压用油压强增至 10^7 Pa , 这时 $E_g=1.0 \times 10^7 \text{ Pa}$, 则混气油液的体积弹性模量可计算如下

$$\frac{1}{E_m} = \frac{V_g}{1.0 \times 10^7 V_m} + \frac{(1 - V_g/V_m)}{1.8 \times 10^9 \text{ Pa}} \quad (1.8)$$

由此式可以计算出混入不同气体量时液体的体积弹性模量, 如下表 1-2 所示:

表 1-2 混入气体后对液体体积弹性模量的影响

V_g/V_m	E_m/Pa	V_g/V_m	E_m/Pa
0.000	1.80×10^9	0.04	2.70×10^8
0.005	9.50×10^8	0.06	1.53×10^8
0.010	6.42×10^8	0.08	1.17×10^8
0.020	3.91×10^8	0.10	9.50×10^7

从上述表格可以看出,在一定的压强下,油液夹带 1% 的气体时,其体积弹性模量为纯油的 35.6%, 夹带 4% 气体时则仅为纯油液体积弹性模量的 15%。因此,在需要液压油大体积弹性模量的情况下,必须严格排除油液中夹带的气体。

一定质量的空气,当其压强或温度改变时,其密度(或体积)也会发生相应的变化。空气的这种物理性质,称为空气的可压缩性。



生活中的一些现象也告诉我们这一点。例如,用力压皮球,可以把它压瘪;有凹坑的乒乓球放在热水里,凹下去的部分会重新鼓起来。再如,在机翼前缘,气流受到阻挡,速度减慢,压力增大,空气密度会增大;在机翼上表面,流速加快,压力减小,密度会减小。低速气流空气密度变化不大,近似认为全流场密度是常数;高速气流流动过程中则必须考虑其密度变化。

空气动力学所讨论的空气的压缩性,是指空气在流动的过程中,由于气流的压力和温度发生变化而引起密度改变的特性。

1.3.2 温度对空气压缩性的影响

空气的弱压缩过程可以认为是一个可逆的绝热过程,满足等熵关系式,即

$$p = C\rho^k \quad (1.9)$$

由上式和气体状态方程 $p = \rho RT$ 可得

$$\frac{dp}{d\rho} = kC\rho^{k-1} = k \frac{p}{\rho} = kRT \quad (1.10)$$

式中: C 为常数; k 为绝热指数; R 为气体常数。空气的 $k=1.4$, $R=287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

式(1.10)表明,随着温度的升高, $dp/d\rho$ 增大,空气将变得难以压缩;反之,温度降低,空气将变得容易压缩。例如,体积和质量相同的两个皮球,一个被太阳晒过,温度较高;一个没有晒过,温度较低。用手在皮球上增加同样多的压力,就会发现:晒过的皮球不容易变形,体积减小得少,密度增加得少;没有晒过的皮球,容易变形,体积减小得多,密度增加得多。

空气可压缩性的大小常用 Δp 与 $\Delta\rho$ 的比值 $\Delta p/\Delta\rho$ 来表示。显然改变单位密度所需的压强改变量越大, $\Delta p/\Delta\rho$ 越大,说明空气难压缩,空气的可压缩性小;反之, $\Delta p/\Delta\rho$ 小,说明空气易压缩,空气的可压缩大。

理论推导表明,气体中的声速 $c = \sqrt{\Delta p/\Delta\rho}$,因此,可用声速的大小来衡量空气的可压缩性。 c 大,表示空气难压缩,可压缩性小。 c 小,表示空气易压缩,可压缩性大。

压缩性对气体流动的影响通常用马赫数 Ma 来表示($Ma = v/c$, v 是气流速度),马赫数 Ma 越大,说明空气的压缩程度越大。 $Ma=0.3$ 通常作为空气可压缩性可忽略的上限,超过 0.3,则必须考虑空气可压缩性的影响。

关于声速 c 和马赫数 Ma 的详细内容将在第 5 章作进一步介绍。

1.3.3 流体的膨胀性

影响流体分子与分子之间的间距的,并不都是压强,还有可能是温度。当流体温度升高时,流体分子与分子之间的间距也会增加,这种流体温度升高时,流体体积增大的特性称为流体的膨胀性。通常用温度膨胀系数 a 来度量这种特性。 a 定义为在压强不变的条件温度升高 1°C 时流体体积的相对增加量,即

$$a = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = \frac{1}{v} \frac{dv}{dT} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1.11)$$

式中: T 为温度; V 表示体积; v 表示比容; p 表示压强; ρ 表示密度。



如表 1-3 所示,水的温度膨胀系数 α 随压强和温度变化的数值很小,同水一样,其他液体的 α 也很小,所以工程上一般不考虑它们的膨胀性,但当温度变化很大时,则需要考虑。

表 1-3 温度对流体膨胀性的影响(α 值)

压强/ 10^5 Pa	温度/K				
	274~283	283~293	313~323	333~343	363~373
0.981	0.14×10^{-4}	1.50×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.56×10^{-4}	7.19×10^{-4}
98.1	0.43×10^{-4}	1.65×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.48×10^{-4}	7.04×10^{-4}
198.2	0.72×10^{-4}	1.83×10^{-4}	4.26×10^{-4}	5.39×10^{-4}	

对于气体,利用气体状态方程 $pv=RT$,可以得到在压强不变时 $dv/v=dT/T$,从而有

$$\alpha = \frac{1}{T} \quad (1.12)$$

1.4 流体的粘性

1.4.1 流体粘性的概念

流体在静止时虽然不能承受剪切力,但在运动时,对相邻两层流体间的相对运动,即相对滑动却是有抵抗力的,这种抵抗力称为粘性力。如图 1-5 所示,两块平行平板之间充满流体,下板固定不动,当上板在外力作用下以速度 V_0 平行于下板运动时,由实验可知,附着在运动平板下的流体层具有与运动平板相同的速度 V_0 ,而越往下,流体速度越小,附着在固定不动的平板上的流层速度为 0。这一事实说明:每一运动较慢的流体层都是在运动较快的流体层带动下才运动的,换句话说,每一运动较快的流体层也受到运动较慢流体层的阻碍,也就是对相对滑动具有粘性力。在作相对运动的两流体层的接触面上,存在一对等值而反向的作用力来阻碍两相邻流体层作相对运动,流体的这种性质叫做**流体的粘性**,由此粘性产生的作用力也就是粘性力或者称做**粘性阻力**或**内摩擦力**。

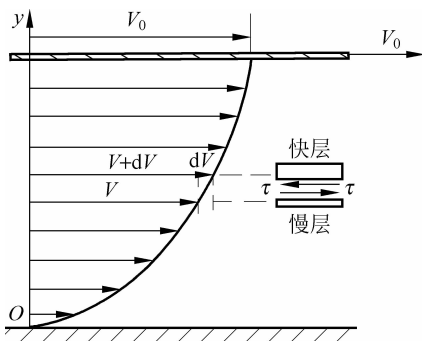


图 1-5 流体在两平板间的流动情况

流体粘性阻力产生的物理原因是由于存在分子不规则运动的动量交换和分子间的吸引力而造成的。

一是由于分子始终在作不规则运动,各流体层之间互有分子迁移掺混,在速度快的流体层有分子进入速度慢的流体层,给速度慢的流体层以向前的碰撞并交换动量,使速度慢的流体层加速,而速度慢的流体层迁移到速度快的流体层时,给速度快的流体层以向后的碰撞,形成阻力并使速度快的流体层减速。这就是分子不规则运动的动量交换形成的粘性阻力。

二是当相邻流体层相对运动时,在层和层交界的地方还存在分子和分子间的引力,速度快的流体层的分子在引力作用下拖动速度慢的流体层,而速度慢的流体层的引力又会阻滞



速度快的流体层,这是两层流体之间吸引力所形成的粘性阻力。

对于气体和液体,其粘性产生的主要原因并不相同。比如,对于气体来说,由于分子之间的距离很大,其分子与分子之间的引力很小,而分子的不规则运动则占主要地位,所以气体的粘性阻力主要取决于分子不规则运动的动量交换所形成的阻力。对于液体来说,由于其分子的不规则运动较微弱,所以其粘性主要取决于分子之间的吸引力。

空气有粘性,可以用图 1-6 的实验证明。实验模型有两个彼此靠近、但又不接触的圆盘,上圆盘由支杆悬挂,下盘装在电动机上。开动电动机使下盘转动一段时间后,上圆盘也会随之慢慢沿同一方向转动起来。这是因为下圆盘转动时,紧贴其表面的一层空气像被盘面“粘住”一样,随盘面一齐转动,这层转动的空气又会带动上层空气转动起来,以致上圆盘随之转动。这个现象表明空气是具有粘性的。

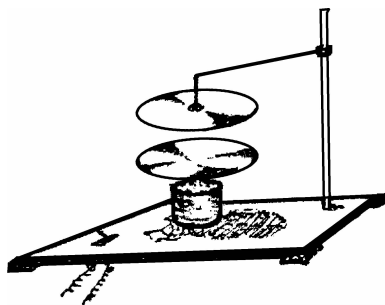


图 1-6 空气粘性实验

1.4.2 牛顿内摩擦定律

牛顿总结大量实验结果在 1686 年得出:相邻两层流体作相对运动所产生的摩擦力 F 与两层流体的速度梯度成正比;与两层流体的接触面积成正比;与流体的物理特性有关;与接触面上的压强无关。

速度梯度是相邻流体层的速度差 ΔV 与层间距离 Δy 的比值,见图 1-7。

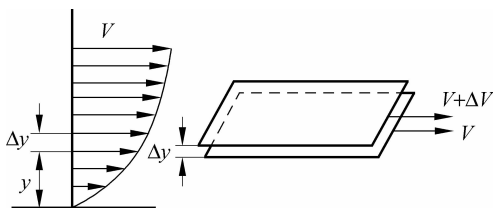


图 1-7 速度梯度

速度梯度大,表示相邻流体层的动量差别大,因而粘性力大;反之,速度梯度小,粘性力也小。

牛顿将其总结成如下表达式,称为**牛顿内摩擦定律**,即

$$F = \mu \frac{dV}{dy} S \quad (1.13)$$

或

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{dV}{dy} \quad (1.14)$$

式中: τ 表示单位面积上的摩擦力,即切应力,Pa; μ 是比例常数,与流体种类及温度有关,称为**动力粘性系数** μ , Pa·s。动力粘性系数一般简称**粘性系数**。

需要指出的是:

(1) 切应力 τ 是成对出现的,它的方向可以这样确定:当流体层被速度较快的流体层带动时, τ 的方向与运动方向一致,当流体层被速度较慢的流体层阻滞时, τ 的方向与运动方向