

上篇

空气动力学基础



包围地球并随地球一起运转的空气层被称为大气层,简称为大气。飞机、直升机等航空器都在大气层中飞行,大气在与之有相对运动的航空器上产生空气动力,大气的状况又直接影响航空器发动机的工作性能和航空器中飞行人员的生活条件。因此,飞机、直升机等航空器的飞行是与大气层密切相关的。

1.1 大气的重要物理参数

大气是由多种气体混合而成,主要成分是氮气和氧气。按体积计算,氮气约占 78%,氧气约占 21%。余下 1%是氩、二氧化碳、氖、氦、氙、氢等其他气体。除了气体之外,大气中还含有水蒸气和尘埃颗粒。

组成大气的各种气体分子都在不停地、无规则地(以不同的运动方向和运动速度)运动着,并产生相互碰撞。大气分子运动的动能以压力和热能的形式表现出来。

表示大气物理状态的物理参数主要是密度、温度和压力。另外,与航空器飞行有关的物理参数还有黏性、压缩性、湿度和声速等。

1.1.1 大气密度

大气密度是指单位体积内的空气质量,简单说就是空气稠密的程度。质量为 m 的空气,如果其体积为 V ,则密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

在国际单位制中,密度的单位是 kg/m^3 。空气的密度大,说明单位体积内的空气分子多,比较稠密;空气的密度小,说明单位体积内的空气分子少,比较稀薄。

由于地球引力的作用,大气的密度随高度的增加而减小,近似按指数曲线变化。在 22 000ft(6 700m)高度,大气密度仅为海平面大气密度的 1/2(见图 1-1)。

1.1.2 大气温度

大气温度是指大气层内空气的冷热程度。温度的高低表明了空气分子不规则热运动平均速度的大小。分子运动速度大,即分子的平均动能大,则大气的温度高;分子运动速度小,即分子的平均动能小,则大气的温度低。

度量温度的单位有:摄氏温度($^{\circ}\text{C}$)、华氏温度($^{\circ}\text{F}$)和热力学温度(K),见表 1-1。摄氏

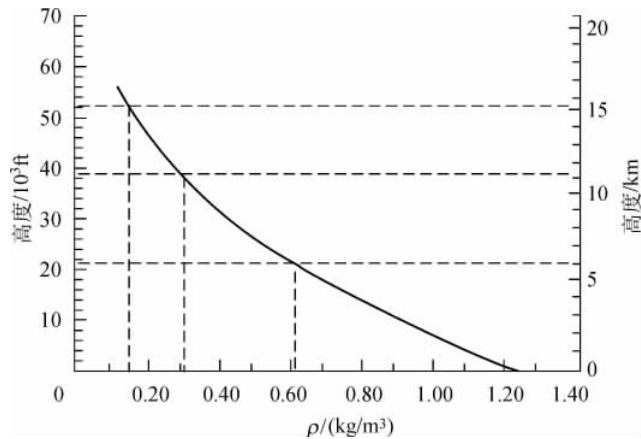


图 1-1 大气的密度随高度的变化

温度将一个标准大气压下纯水的冰点定为 0°C ，并将纯水的冰点和沸点之间等分为 100 格。华氏温度将一个标准大气压下纯水的冰点定为 32°F ，并将纯水的冰点和沸点之间等分为 180 格。热力学温度是将气体分子停止不规则热运动时，即分子运动速度为零时的温度作为零度，温度间隔也是将一个标准大气压下纯水的冰点和沸点之间等分为 100 格。科学研究表明，热力学温度的 0K 相当于摄氏 -273°C （见图 1-2）。这三种温度单位的换算关系可表示为

$$\begin{cases} T_{\text{C}} = (T_{\text{F}} - 32) \times 5/9 \\ T_{\text{K}} = T_{\text{C}} + 273.15 \end{cases} \quad (1-2)$$

在大约 11km 高度以下的大气层内，随着高度的增加，大气温度下降，近似按线性变化。

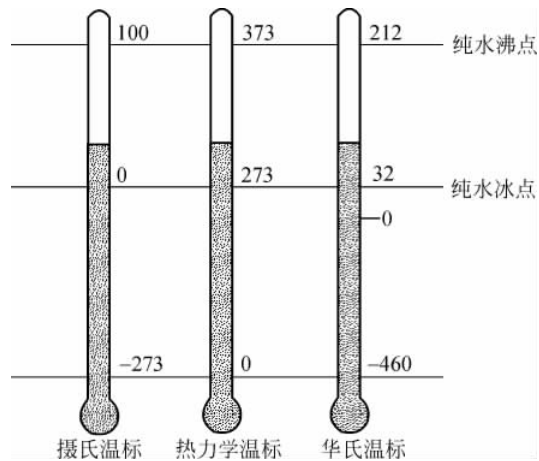


图 1-2 度量大气温度的温标

表 1-1 温度单位

	摄氏温标/ $^{\circ}\text{C}$	华氏温标/ $^{\circ}\text{F}$	热力学温标/K
在标准大气压下,纯水的沸点	100	212	373
在标准大气压下,纯水的冰点	0	32	273

1.1.3 大气压力

大气压力是指大气层内空气的压强,即物体单位面积上承受的空气的垂直作用力。空气对物体表面产生压力的原因有两个:一个是上层空气的重力对下层空气造成了压力,例如某一高度上,空气的压力就是这高度以上的空气柱重力作用的结果,所以在垂直方向上,越向上空气柱越短,空气压力就越低;另一个原因是空气分子不规则的热运动。由于空气分子不规则的热运动使空气分子彼此间互相碰撞,或对容器壁碰撞而产生压力,所以在同一个高度上,由于空气温度不同,空气的压力也是不均匀的。

度量大气压力的单位有: mmHg(毫米汞柱)、Pa(N/m^2)(帕)、psi(pound/ in^2 ,磅每平方英寸)、 kgf/cm^2 (千克力每平方厘米)等。其中,Pa(帕)为压强的国际计量单位,其他为非法定计量单位。

因为大气压力随高度和温度变化,所以规定在海平面,温度为 15°C 时的大气压力为一个标准大气压,表示为: 29.92inHg、760mmHg、1 013.25hPa、14.695 9psi、1.033 23 kgf/cm^2 。大气压力随高度的变化如图 1-3 所示。

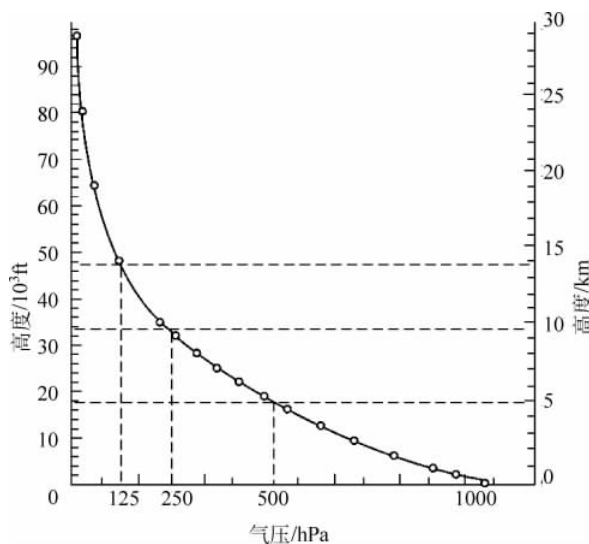


图 1-3 大气压力随高度的变化

1.1.4 黏性

黏性是流体固有的属性。当流体内两相邻流层的流速不同时,或流体与物体间发生相对运动时,两个流体接触面上或流体和物体接触面上便产生相互黏滞和相互牵扯的力,这种特性就是流体的黏性。

大气的黏性比较小,不容易被觉察,但对航空器飞行的影响却不能忽略。大气的黏性主要是由于大气中各种气体分子不规则运动造成的。气体分子的不规则运动使各层的气体分子可以互相交换,当相邻两层气体之间有相对运动时,这种交换会带来动量的交换,从而产生相互牵扯的作用力,这种作用力就是大气的黏性力,或称作大气的内摩擦力。

实验表明：流体的黏性力与相邻流层的速度差 $\Delta v = v_1 - v_2$ 、接触面的面积 ΔS 成正比，和相邻流层的距离 Δy 成反比(见图 1-4)，即

$$F = \mu(\Delta v / \Delta y) \cdot \Delta S \quad (1-3)$$

式中： F 是流体的黏性力； $\Delta v / \Delta y$ 是在流层的垂直方向上，每单位长度速度变化量，叫做横向速度梯度； ΔS 是接触面的面积； μ 是横向速度梯度为 1 时，在流层单位接触面上产生的黏性力，称为流体的黏性系数(动力黏性系数)，可作为度量流体黏性的指标，单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒)。

不同的流体具有不同的黏性系数，同一流体的黏性系数又随温度而变化：流体黏度随温度变化的特性称为流体的黏温特性。气体产生黏性的物理原因，主要是气体分子不规则运动造成各流层分子交换而带来的动量交换。温度升高时，气体分子不规则运动加剧，各流层之间交换的分子数量增加，造成交换的动量也增加。所以，气体的黏性系数随温度升高而增大；而液体产生黏性的物理原因，主要是各流层分子之间的内聚力。温度升高时，液体分子的不规则运动加剧，分子之间的距离加大，内聚力也随之减小。所以，液体的黏性系数随温度升高而减小。正因为气体和液体产生黏性的物理原因不同，气体和液体具有完全不同的黏温特性(见图 1-5)。

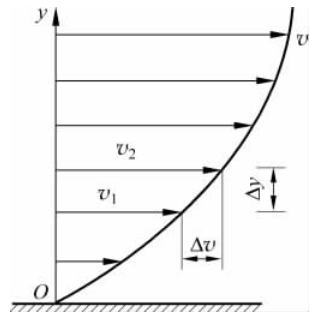


图 1-4 速度 v 的分布

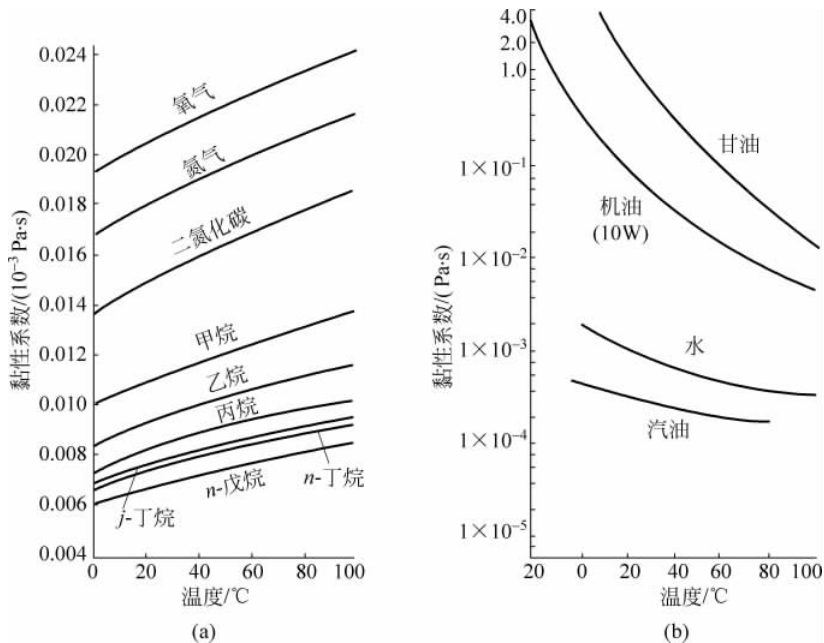


图 1-5 流体黏性系数随温度变化情况

(a) 气体；(b) 液体

当大气流过物体时，除了在具有较大横向速度梯度的区域或具有很大温度梯度的区域，如紧贴物体表面的流层内、物体后面存在大量旋涡的尾流区内、高速气流形成的激波区域内等，空气的黏性力比较大，空气的黏性表现得比较明显外，其他远离物体的外部区域，空气的黏性表现得很不明显，一般情况下可以忽略空气的黏性作用而使问题的研究大大简化。没

有黏性的流体称为理想流体,当不考虑黏性作用时,可以把空气当作理想流体来处理。

1.1.5 可压缩性

空气的可压缩性是指一定量的空气,在压力或温度变化时,其体积和密度发生变化的特性。

凡是物质都具有一定程度的可压缩性,但不同状态的物质可压缩性有着明显的差异。在相同的压力变化量(Δp)的作用下,密度的变化量($\Delta \rho$)越大的物质,可压缩性就越大。液体的密度变化量极小,可以看作是“不可压缩”的。而空气由于分子之间距离较大、分子之间吸引力较小,它的可压缩性表现得十分明显。

当大气流过飞行器表面时,在一些部位气流速度增加,气流的压力会减小,密度也会随之下降;在一些部位气流速度减小,气流的压力会增加,密度也会随之上升。这就是大气的可压缩性在流动中的表现。在低速($Ma \leq 0.3$)飞行时,大气的压力变化一般不大,密度的变化也很小,大气的可压缩性对飞行器的飞行影响很小,可以忽略大气的可压缩性,将大气看成不可压缩的流体,从而使问题的研究简单化。但在高速($Ma > 0.3$)飞行时,由于速度变化引起的压力和密度的变化比较大,大气的可压缩性对飞行器的飞行影响不可忽略,这时,就必须考虑大气的可压缩性。

1.1.6 湿度

大气的湿度是指大气的潮湿程度,通常用相对湿度来表示。相对湿度是指大气中所含水蒸气的量与同温度下大气中含有的水蒸气最大量之比。当相对湿度为100%时,说明大气中含有的水蒸气量已达到了最大值,水蒸气处于饱和状态。

不同温度下,大气所能含有的水蒸气最大量是不同的,温度越高,它能含有的水蒸气最大量越大。因此,在大气中含有水蒸气量不变的情况下,随着温度的降低,大气的相对湿度会增加。使大气的相对湿度达到100%时的温度称为露点温度。大气温度降到露点温度时,大气中的水蒸气达到了饱和状态并开始凝结。大气温度降到露点温度以下,是大气中水汽凝结的必要条件,大气中水汽的凝结会形成云、雾、降水等各种气象现象。这些现象都会对飞行器的飞行带来影响,所以露点温度对飞行器的飞行来说是十分重要的。

另外,水蒸气的密度约等于干空气的 $5/8$,含有水蒸气的空气比干空气密度小,重量轻。在同一温度下,空气的湿度越大,空气中含有的水蒸气越多,空气的密度越小,重量越轻。这对飞机的起飞性能也会产生影响。飞机在潮湿天气起飞时,跑道长度需要比干燥天气起飞的长。

1.1.7 声速

声速(旧称音速)是小扰动在介质中的传播速度,单位是 m/s 。物体的振动在介质中引起的小扰动会以介质不断被压缩(压力和密度增大)、膨胀(压力和密度减小)的形式向四周传播,形成介质疏密交替变化的小扰动波。受到扰动的介质和未受到扰动的介质之间的分界面称为波面,小扰动波的波面是以扰动源为中心的球面(见图1-6)。由于扰动造成的波面前后介质参数(p, ρ, T)的变化是非常小的,所以称为小扰动。有的小扰动波的频率在人的耳膜能感觉的范围之内,我们能听到声音,这种小扰动波也被称为声波。

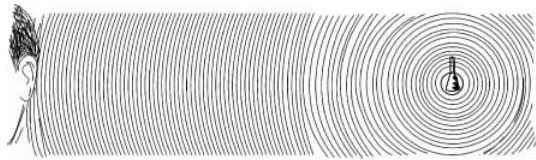


图 1-6 声波-疏密波(纵波)

飞机飞行时会将碰到的空气微团推开并加以压缩,这种扰动也是一种以空气发生疏密交替变化的形式向外传播的小扰动,它的传播速度也是声速。

声速的大小与传播介质的可压缩性有关。声速与压力、密度变化的关系可以用下列公式表示:

$$a^2 = \Delta p / \Delta \rho \quad (1-4)$$

式中: a 是声速; Δp 是传播介质的压力变化量; $\Delta \rho$ 是传播介质的密度变化量。

从式(1-4)可以看到声速的平方等于介质压力变化量与密度变化量之比。在相同的压力变化量作用下,介质可压缩性越大,密度的变化量越大,声速就越小;反之,介质可压缩性越小,密度的变化量越小,声速就越大。液体几乎是不可压缩的,声波在液体中的传播速度要比在大气中的传播速度大得多。因此,可以把声速的大小看成是表示介质可压缩性大小的一个指标。

由于小扰动在介质中传播的速度较快,因此来不及与周围介质进行热量交换。另外,小扰动传播过程中,引起介质参数的变化非常小,可以看成是连续的变化,这个过程也就近似于可逆的过程。这样小扰动在介质中传播的过程可以看成是绝热可逆过程。根据绝热可逆过程中 p 和 ρ 的变化关系,可以导出

$$a^2 = \gamma RT \quad (1-5)$$

式中: γ 是绝热指数,即定压比热容与定容比热容之比; R 是气体常数; T 是介质的热力学温度。

γ 和 R 都是由介质性质决定的,由此可以看出声速与传播介质的性质有关。同一种介质中,声速的大小只随介质的温度而变化。

如果把大气中的空气分子看成只有质量没有体积的质点,并忽略分子之间的相互作用力,大气就可以被看成是完全气体(在空气动力学中,除了高超声速流动外,都可以把大气看成是完全气体)。对于完全气体 $\gamma=1.4, R=287.05\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 则

$$a = 20.05 \sqrt{T} \quad (1-6)$$

式中: T 是大气的热力学温度。大气层中,海平面大气的温度较高,声速也较大;从海平面向上,在一定高度内(对流层内),随着高度的增加,大气的温度下降,声速也随之降低。这表明高空的大气更容易被压缩。

1.2 大气层的构造

大气层分为五层:对流层、平流层(同温层)、中间层、电离层(热层)和散逸层。目前民用运输机的飞行范围仅限于对流层和平流层。

1. 对流层

对流层是贴近地球表面的一层,在地球中纬度地区,它的顶层距地面约为 11km,在地球赤道较高,约为 17km,在两极较低,约为 7~8km。由于地心引力的作用,大气全部质量的 3/4 和全部水蒸气都集中在这一层,所以对流层是天气变化最复杂的一层,有云、雨、雪、雹等现象。在此高度内存在空气的水平流动和垂直流动,形成水平方向和垂直方向的阵风;大气的物理参数(压强、密度、温度和声速)均随高度的增加而降低。

2. 平流层(同温层)

平流层位于对流层之上,顶层离地面约 50km。在平流层的下半部(大约 20km 以下),其温度不随高度而变化,常年平均值为 -56.5°C 。然后随高度的增加温度开始上升,直到顶部温度上升到 0°C 左右。平流层中的空气稀薄,水蒸气极少,通常没有云、雨、雪、雹等现象。没有空气上下对流引起的垂直方向的风,只有水平方向的风,而且风向稳定。这一层大气能见度好、气流平稳、空气阻力小,对飞行有利,现代喷气式客机多在 11~12km 的平流层底层飞行。

3. 中间层

中间层位于平流层之上,顶层离地面约 80km。这一层的特点:空气十分稀薄,温度随高度的增加而下降,空气在垂直方向有强烈的运动。

4. 电离层

这一层在中间层之上,顶层离地面约 800km。电离层中的空气处于高度的电离状态,氮、氧分子电离成为离子和自由电子,带有很强的导电性,能吸收、反射和折射无线电波。所以这一层对无线电通信很重要。由于空气电离放出的热量,这一层的温度很高并随着高度的增加而上升,所以电离层也被称为暖层或热层。这一层的空气密度极小,声波已无法传播。

5. 散逸层

散逸层是大气的最外层,从电离层顶部到大气层的最外边缘。由于地心引力很小,大气分子不断向星际空间逃逸。

1.3 国际标准大气

1.3.1 国际标准大气的制定

飞行器在大气层中飞行时,其飞行性能与大气的物理性质密切相关。而大气的物理性质(密度、温度、压力等)都会随着地理位置、高度、季节、时间等不同而变化。同一架飞机在不同地点试飞会得出不同的飞行性能;在同一地点不同季节、时间试飞也会得出不同的结果。在设计、计算飞机飞行性能时也需要有一个标准的大气物理参数可以采用。为了便于飞机的设计、计算和整理,比较飞机的试飞结果并给出标准的飞机性能数据,必须有一个标准的大气状态作为基准,为此制定了国际标准大气(ISA)。

国际标准大气是由国际民航组织(ICAO)制定的,它是以北半球中纬度地区大气物理性质的平均值为依据,加以适当的修正建立的。

国际标准大气包括以下主要内容。

(1) 大气是静止的、相对湿度为零的、洁净的完全气体。大气的物理参数即密度、温度和压力的关系服从完全气体的状态方程,即

$$p = \rho RT \quad (1-7)$$

式中: p 是大气压力(Pa); ρ 是大气密度(kg/m^3); R 是气体常数($287.05\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); T 是大气热力学温度(K)。

如前所述,除了在高压高温情况下(比如高超声速飞行)外,我们都可以把空气看成是由只有质量没有体积、相互之间没有作用力的分子组成,也就是完全气体。从状态方程可以得出大气密度、温度和压力之间的关系:压力不变,密度和温度成反比;密度不变,压力和温度成正比;温度不变,密度和压力成正比。

(2) 以海平面作为计算高度的起点,即海平面处 $H=0$ 。在该处的大气物理参数: $p=760\text{mmHg}(1013.25\text{hPa})$; $T=15^\circ\text{C}(288.15\text{K})$; $\rho=1.225\text{kg}/\text{m}^3$; $a=340.29\text{m}/\text{s}$ 。

(3) 根据海平面大气物理参数值,计算出各个高度上标准大气的物理参数,见表 1-2。

表 1-2 国际标准大气

高度/m	大气温度/K	大气压力/hPa	大气密度/ (kg/m^3)	声速/ (m/s)
0	288.150	1013.25	1.2250	340.29
1000	281.651	898.76	1.1117	336.43
2000	275.154	795.01	1.0066	332.53
3000	268.659	701.21	0.9093	328.58
4000	262.166	616.60	0.8194	324.59
5000	255.676	540.48	0.7364	320.55
6000	249.187	472.17	0.6601	316.45
7000	242.700	411.05	0.5900	312.31
8000	236.215	356.51	0.5258	308.11
9000	229.733	308.00	0.4671	303.83
10000	223.252	264.99	0.4135	299.53
11000	216.774	226.99	0.3648	295.15
12000	216.650	193.39	0.3119	295.07
13000	216.650	165.79	0.2666	295.07
14000	216.650	141.70	0.2279	295.07
15000	216.650	121.11	0.1948	295.07
16000	216.650	103.52	0.1665	295.07
17000	216.650	88.497	0.1423	295.07
18000	216.650	75.652	0.1217	295.07
19000	216.650	64.674	0.1040	295.07
20000	216.650	55.293	0.0889	295.07
21000	217.581	47.289	0.0757	295.70
22000	218.574	40.475	0.0645	296.38
23000	219.567	34.668	0.0550	297.05