

# 空气动力学及飞行力学

606教研室 黄彭年 编

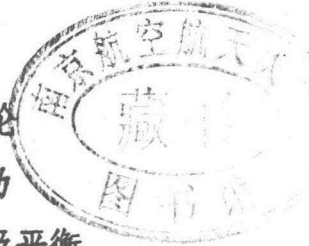
南京航空学院

1984.12.

V211/1039-1

V211/1039-1

第七章 飞机的曲线飞行		
§ 7—1	常用坐标轴系及其特点	7—1
§ 7—2	作用在飞机上的外力及过负荷的概念	7—4
§ 7—3	限制过负荷的各种因素	7—16
§ 7—4	几种曲线飞行	7—19
第八章 飞机的纵向平衡与静稳定		
§ 8—1	平衡与稳定性的一般讨论	8—2
§ 8—2	作为刚体来看的飞机运动	8—4
§ 8—3	飞机的纵向力矩的组成及平衡	8—5
§ 8—4	飞机的稳定性及纵向静稳定性	8—10
§ 8—5	影响纵向静稳定性的因素	8—14
第九章 飞机的横航向平衡及静稳定		
§ 9—1	飞机的横航向静稳定性	9—2
§ 9—2	侧滑时产生的空气动力	9—4
§ 9—3	影响 $m_x^\beta$ 及 $m_y^\beta$ 的各种因素	9—9
§ 9—4	付翼和方向舵偏转产生的横航向力矩	9—12
§ 9—5	操纵面的铰链力矩	9—16
§ 9—6	定常直线侧滑飞行的平衡和操纵	9—19
§ 9—7	横航向阻尼导数 $m_x^{\omega_x}$ 、 $m_y^{\omega_y}$ 及交叉 导数 $m_x^{\omega_y}$ 、 $m_y^{\omega_x}$	9—22
§ 9—8	正常盘旋时飞机的平衡	9—25
第十章 飞机的运动方程式		
§ 10—1	飞机质心运动方程	10—1
§ 10—2	飞机绕质心转动的动力学方程	10—4



30895034

§ 10—3	飞机的运动学方程	10—9
§ 10—4	运动方程组的线性化	10—11
§ 10—5	运动方程式的分组	10—15
第十一章	飞机的纵向动稳定性	
§ 11—1	飞机的纵向运动方程	11—1
§ 11—2	飞机在俯仰扰动运动中的力矩	11—6
§ 11—3	纵向小扰动运动方程的求解过程	11—14
§ 11—4	实例分析 两种典型模态及其物理景象	11—26
§ 11—5	纵向运动的传递函数	11—31
§ 11—6	纵向扰动运动的简化处理	11—35
第十二章	飞机的横航向动稳定性	
§ 12—1	横航向扰动运动方程及其解	12—1
§ 12—2	实例分析 三种典型模态及其物理景象	12—4
§ 12—3	横航向典型模态的简化处理	12—12
§ 12—4	横航向运动的传递函数	12—16
第十三章	飞机的大扰动运动	
§ 13—1	惯性交感力矩的产生	13—1
§ 13—2	飞机的急滚稳定性	13—3
§ 13—3	飞机的尾旋	13—8
第十四章	飞机的操纵特性	
§ 14—1	铰链力矩和驾驶杆力的一般概念	14—2
§ 14—2	带液压助力器的操纵系统	14—4
§ 14—3	力臂调节器的作用原理	14—8
§ 14—4	升降舵阶跃输入引起的飞机反应	14—12

## 第一章 空气的基本性质

包围着地球的空气层，叫做大气。飞机是在大气中飞行的。飞机和大气之间的作用和反作用，就决定了飞机在运动过程中受到的空气动力。因此，在设计任一飞行器时，就必须考虑大气对飞行器的作用。

在叙述空气性质的时候，也象其他工程学科一样，要牵涉到测量和计算，因此要把所采用的基本单位规定下来，即：长度一米，力一公斤；时间一秒。

### § 1-1 空气的基本参数

空气是几种气体的混合物，其中含有氮78%，氧21%和大约1%的其他气体；此外，空气中还含有水蒸汽。空气的密度、温度和压强，是确定空气状态的三个主要参数。飞机在飞行中，所受到的空气动力大小和飞行性能的好坏，都与这些参数有关。

#### 一、空气的密度

密度是指单位体积空气的质量。质量为 $M$ （单位为公斤·秒<sup>2</sup>/米）的空气，如果其体积为 $V$ （单位为米<sup>3</sup>），则密度

$$\rho = \frac{M}{V}$$

将上述 $M$ 和 $V$ 的单位代入，可知 $\rho$ 的单位是公斤·秒<sup>2</sup>/米<sup>3</sup>。

空气和其他物质一样，是由分子组成的。空气的密度大，说明单位体积内的空气分子多，即比较稠密；空气的密度小，说明单位体积内的空气分子少，即比较稀薄。为了对单位体积的空气分子数目有个概念，我们举个例子来说明，例如气温为0℃，气压为760毫米水银柱的条件下，每一立方厘米空气的分子数为 $2.69 \times 10^{21}$ 。在

这种情况下，分子数目这样多，空气这样稠密，我们可以将空气看作是分子之间没有空隙的连续介质；但是，如果到了高空，空气极度稀薄，分子与分子间的间距很大，这时就不能把空气看作是连续介质而只能叫做稀薄气体了，处理稀薄气体的方法将是另外一种，不属于本课程所讨论的范围。

在标准状况下，即气温为  $15^{\circ}\text{C}$ ，气压为  $760$  毫米水银柱时，空气的密度  $\rho = 0.125$  公斤·秒<sup>2</sup>/米<sup>3</sup>。

对于连续介质，可以讨论气体内部某一点  $P$  的密度。就  $P$  点的周围划取一块微小的空间，这块空间的容积设为  $\Delta\tau$ ，其内部所包的气体质量为  $\Delta m$ ，则  $P$  点的气体密度  $\rho_P$  指的是当  $\Delta\tau$  无限缩小时的  $\Delta m / \Delta\tau$  值：

$$\rho_P = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta\tau} = \frac{dm}{d\tau}$$

在流动气体里，某点的密度是很重要的概念。因为在流动中各点气体的密度可能不相同，以后会看到各点的密度值对计算结果的作用。

### 三 空气的温度（气温）

空气温度表示空气的冷热程度。空气的冷热程度，实质上是空气分子不规则运动的一种表现。分子运动的速度愈快，其动能愈大，则温度愈高。反之，分子运动的速度愈慢，其动能愈小，则温度愈低。

气温的高低，可用温度表来测量。我国和大多数国家常用摄氏温度表来测量气温，单位是摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。

在理论计算中，常使用绝对温度的概念，绝对温度一度与摄氏温度一度相等。所不同的是把摄氏零下  $273.15$  度作为零度。故绝对温度  $T$  和摄氏温度  $t$  可用下式换算：

$$T = t + 273.15^{\circ}$$

其单位是开氏度 ( $^{\circ}\text{K}$ )

### 三、空气的压强

物理学上的压强的意义是：物体单位面积上受到的垂直于表面的力，列成数学方程式就是：

$$p (\text{压强}) = \frac{P (\text{垂直于表面的力})}{S (\text{受力面积})}$$

此中垂直于表面的力  $P$ ，叫做总压力，不能和压强混淆。总压力和面积的关系，可以写为：

$$P = p \cdot S$$

为了理解空气本身所具有的压强，我们取图 1-1 来分析。

图中表示的为空气内部的一块微团体积（很小的体积），现取为立方体，这块微团气体的四周原来都有其他的气体存在的，现在为了保持它的受力情形和原来处于整个气体中一样，我们就用这块气体上下、左右、前后各个面上的作用力来表示其他气体对于这块气体的作用。对于静止气体来说，这些作用力是垂直于受力面的。

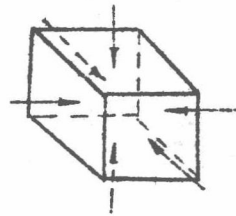


图 1-1

由于空气分子是布满在整个空间的，因此这微团气体的每个面上都布满了这样的作用力。这种力不是集中的，必须用作用在单位面积上的大小来衡量，其计算单位为公斤/米<sup>2</sup>，这就是空气所具有的压强。

如果上面所取的小立方体是一块安放在空气中的物体，那么，周

围空气对于这块小立方体在各个面上的作用，就是空气对于物体的压强。

过去有些书上，也有把压强称为压力的，其意义不如压强来得确切，不过我们应知道压力也是一个常与压强混用的名词。

空气压强是怎样产生的？这是因为空气分子数目很多，不规则运动的速度又很大，所以这些空气分子是连续的，不断地相互撞击，这种连续不断的撞击作用，就是气体内压强的表现。如果空气分子撞击物体，该物体就象前面所取的那块气体的小立方体一样，那么空气分子撞击物体的各个表面，就表现为气体对于物体的压强。又由于在每一团空气中，空气分子都是向四面八方作不规则运动的，所以，对于空气内部一点来说，压强也是向四面八方作用的，而且其大小也是在各个方向相等的。

为了加深对此观点的理解，现简要证明压强是不随受压的面的方位不同而变化。

我们要讨论的是P点的压强。由图1-2，取一坐标系  $oxyz$ ，

在P点的四周取一个微小的

四面体，把P点包在中间。

这个四面体的三条棱线沿三

个坐标轴取为  $OA = dx$ ，

$OB = dy$ ， $OC = dz$ 。

说作用在BOC面上的压强

为  $p_x$ ，AOC面上的为  $p_y$ ，

AOB面上的为  $p_z$ 。作用在

斜面ABC上的压强为  $p$ 。我

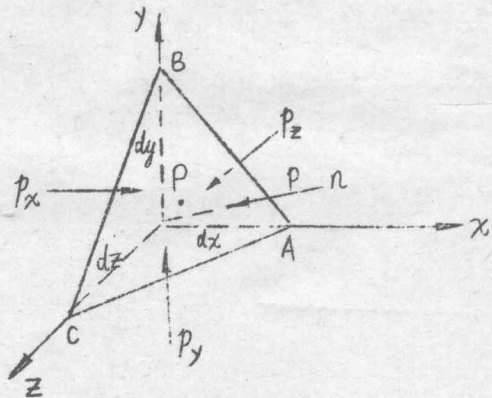


图 1-2

们来建立  $x$ ,  $y$ ,  $z$  三个方向的力的平衡关系式。作用在任何一个面上的压力必定垂直于该平面。就  $x$  方向来看, 有两个压力是有作用的, 一个是作用在  $BOC$  面上的压力, 其值为  $p_x (\frac{1}{2} dy dz)$ , 指向正  $x$ 。另一个是作用在  $ABC$  面上的压力, 其值是  $p (ds)$ ,  $ds$  代表  $ABC$  的面积, 这个力在  $x$  方向的分力是  $p (ds) \cos(n, x)$ , 此分力指向负  $x$  方向。在运动的流体中, 这一块微元流体是可能有加速度的, 加速度乘质量等于惯性力, 而质量等于该微元流体的体积

$\frac{1}{6} dx dy dz$  乘密度, 所以这个惯性力和那两个压力比较起来是高

一阶的微量。我们可以列出  $x$  向的力的平衡方程

$$\frac{1}{2} p_x dy dz - p \cos(n, x) ds = \text{微量三次方的项}$$

令  $dx, dy, dz \rightarrow 0$ , 等式右侧的高次微量可以略去, 得

$$\frac{1}{2} p_x dy dz - p \cos(n, x) ds = 0$$

$ds$  在  $x$  方向的投影就是  $\frac{1}{2} dy dz$ , 因此可得

$$p_x = p$$

同理, 从  $y$  向和  $z$  向的压力平衡关系得:

$$p_y = p, \quad p_z = p$$

即

$$p_x = p_y = p_z = p$$

因为图 1-2 中的坐标系方位是任意取定的, 因此上式表明, 在不考虑粘性时, 流体内部任一点的压强, 其值与压力的方向无关, 无论流体是静止的还是流动的, 这个结论都是成立的。

量度压强的单位很多, 除了上面所说的单位面积上的作用力 (公斤/米<sup>2</sup>) 以外, 通常还有用液柱高度来表示的。这二种压强的单位可以互相转换, 可用下例来说明:



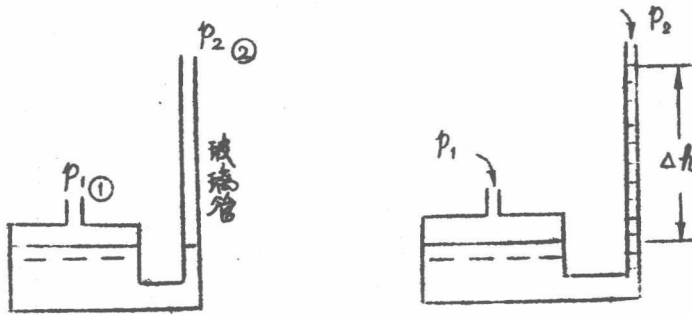


图 1-3

图1-3为一液体测压计，液壶与玻璃管象一个U形管一样组成一个连通器，当液壶进气口①处的压强 $p_1$ 与玻璃管上端进气口②处的压强 $p_2$ 相等时，即 $p_1 = p_2$ ，两者中的液面在同一高度上，而当压强 $p_1 > p_2$ 时，则会引起壶中液面下降，玻璃管中液面上升的现象。设此时两液面的差为 $\Delta h$ （米），液柱高 $\Delta h$ 就表示了压强 $p_1$ 和 $p_2$ 的差值。

要计算 $p_1$ 和 $p_2$ 的差值，只要算出这块液柱的重量，除以液柱的截面积就行了。

设该液体的比重为 $\gamma$ （公斤/米<sup>3</sup>），液柱截面积为 $S$ （米<sup>2</sup>），则液柱的重量为 $\gamma \cdot \Delta h \cdot S$ ，故压强差（ $\Delta p$ ）

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\gamma \cdot \Delta h \cdot S}{S} = \gamma \cdot \Delta h \text{ (公斤/米}^2\text{)}$$

从上式可得出结论，把测压计的液柱高度 $\Delta h$ ，乘以该液体的比重，就得到了压强差的数值，就是说压强差可以用液柱差高来表示。

同理，已知任意压强 $p$ 也可用上式来表示，只要我们设想这时 $p = p_1$ ，

而 $p_2 = 0$ 为真空，相当于玻璃管上端封口抽成真空的情况，所以有

$$p = \gamma \cdot \Delta h$$

因为不同液体的  $\gamma$  是不同的, 故对于同一个压强, 用不同液体的液柱来表示时, 高度是不同的, 在空气动力学中常用的液体有酒精和水银, 在温度为  $0^\circ\text{C}$  的条件下,

$$\gamma_{\text{酒精}} = 800 \text{ 公斤/米}^3, \quad \gamma_{\text{水银}} = 13596 \text{ 公斤/米}^3$$

例: 如设压强  $p = 10333 \text{ 公斤/米}^2$ , 问在  $0^\circ\text{C}$  的条件下, 用水银柱来表示时高度为若干?

解: 由  $p = \gamma \cdot \Delta h$  得

$$\Delta h_{\text{水银}} = \frac{p}{\gamma} = \frac{10333 \text{ 公斤/米}^2}{13596 \text{ 公斤/米}^3} = 760 \text{ 毫米}$$

#### 四 空气的密度、温度和压强三者间的关系

从物理学可知, 完全气体的压强, 密度和温度三者之间的变化关系, 可用气体的状态方程式表示为:

$$p = \rho g R T$$

式中  $\rho$ : 空气密度 (公斤秒<sup>2</sup>/米<sup>4</sup>)

$g$ : 重力加速度, 其值为  $9.8$  (米/秒<sup>2</sup>)

$R$ : 气体常数, 空气为  $29.27$  (公斤米/公斤<sup>0</sup>K)

$T$ : 空气的绝对温度 ( $^\circ\text{K}$ )

例一 现有  $2000 \text{ 米}^3$  储气罐, 其中贮存压强为  $8 \text{ 公斤/厘米}^2$  的空气, 空气温度为  $52^\circ\text{C}$ , 问储气罐中总空气重量为若干公斤?

解: 气罐中空气比重可由下式求得,

$$p = \rho g R T = \gamma R T$$

$$\begin{aligned} \gamma &= p / R T = 8 \times 10000 / (29.27 \cdot 325) \\ &= 8.4 \text{ 公斤/米}^3 \end{aligned}$$

$$\text{得 } G = V \gamma = 2000 \times 8.4 = 16.8 \text{ 吨}$$

例二 如果从上面的储气罐中，放出高压空气，使气罐中压强由 8 公斤/厘米<sup>2</sup> 下降到 2 公斤/厘米<sup>2</sup>，又若温度下降到 12 °C，问放出了多少公斤的空气？

解：储气罐中放出高压空气后，压强，温度、密度、比重均有所变化，我们先求剩下的空气的比重，令剩下的空气比重为  $\gamma'$

$$\gamma' = p / RT = 2 \times 10000 / (29.27 \cdot 285)$$

则储气罐中剩下的空气重量为  $G'$

$$\begin{aligned} G' &= V \cdot \gamma' = 2000 \times 20000 / (29.27 \cdot 285) \\ &= 4800 \text{ 公斤} \end{aligned}$$

故放出之空气重量为

$$\Delta G = G - G' = 12000 \text{ 公斤} = 12 \text{ 吨}$$

## § 1-2 大气分层

包围地球的大气，它的底界很明显，就是地面，而顶界则不是很明显的。因为在包围着地球的空气层之外，还有极其稀薄的星际气体，而这两者之间，并不存在一个截然的自然界限，如果以空气密度接近于星际气体密度的高度，作为大气的顶界，则根据近年来，人造地球卫星探测到的资料推算，这一高度约为 2000~3000 公里。

根据不同的气象条件和气温变化等特征，可以把大气分成若干层。如以气温变化为基准，则可将整个大气层分为对流层、平流层、中间大气层、高温层和外层大气五层。

现代军用飞机所能达到的大气层，是对流层和平流层。

1. 对流层 对流层是最底下的与地面接触的一层，其高度在赤道约为 17~18 公里；在中纬度地区平均为 10~12 公里；在南

北极地区平均为8~9公里(例如在我国广州附近,对流层顶平均高约16公里,而在东北地区则降为10公里左右),就季节而言对流层顶夏季高于冬季。

对流层的主要特点是:

- i) 对流层里面所包含的空气质量几乎占整个大气质量的3/4
- ii) 有强烈的上下对流现象,这是因为由于地面情况不同,受日光照射而引起温度的变异,使空气在垂直方向造成上升或下降的气流,在水平方向造成各个方向的风。
- iii) 由于空气中水蒸汽分子及其他微粒的存在,对流层中有云,雾,雨,雪,雹及风暴等现象。
- iv) 空气温度随高度的增加而减低,平均每增高100米,气温降低 $0.65^{\circ}\text{C}$
- v) 大气压力随高度增加而降低

为什么对流层中高度越高,离太阳越近,气温反而下降?这是因为:对流层中,空气受热的直接来源不是太阳而是地面。太阳放射出的热,大部分被地面所吸收,空气是被太阳晒热的地面烤热的。靠近地面的空气受热多而远离地面的空气受热少,所以,高度越高,气温愈低。

对流层空气的特性,给飞行带来很大的影响。例如,在高空飞行时,气温低容易引起飞机结冰。温度变化还会引起飞机各金属部分伸缩,改变机件间隙甚至影响其正常工作。风能影响飞行方向,或使飞机所能飞行的距离发生变化。上下对流的空气会迫使飞机颠簸,既不便于操纵,又要使飞机承受的力增大,在有云、雨、雾或雷的天气中飞行能见度变低,甚至被迫进行仪表飞行。

2 平流层 平流层位于对流层之上，又称为同温层，其顶界伸展到30~35公里的高度。此层中的空气约占整个大气质量的 $\frac{1}{4}$ 。

平流层的主要特点是：

i) 这层中空气离地面较远，地面对空气的加热作用基本消失，不存在温度随高度的变异及垂直方向上空气的对流，但却存在着速度较大的水平方向的风。

ii) 在一定高度范围内，温度保持不变，在20公里以下，高度升高，气温大致保持不变，平均温度为 $-56.5^{\circ}\text{C}$ 。高度超过20公里以后，气温随高度的升高而上升。在平流层顶，气温约升至 $-43\sim-33^{\circ}\text{C}$ ，这是由于存在着臭氧，能够直接吸收大量的太阳辐射热的缘故。

iii) 平流层中所含的水蒸汽非常少，因此没有云、雾、暴雨等现象。

iv) 大气压力随高度的增加而减低

平流层的这些特点，对飞行有较大影响。平流层中空气流动比较平稳，对飞机稳定飞行有利，但空气稀薄，所提供的空气动力较小，飞机的反应较迟顿，不宜于飞机作机动飞行。

随着航空科学技术的发展，飞机的飞行范围逐步扩大，在平流层飞行的飞机日益增多，有关平流层的研究也就日趋重要了。

### 3. 中间大气层

中间大气层的范围是由平流层的顶界到85公里高度左右。此层气温随高度变化的特点是：由平流层顶到50~60公里范围内，随着高度的升高，气温逐渐由 $-43\sim-33^{\circ}\text{C}$ 增到 $-3\sim17^{\circ}\text{C}$ ，超过此高度后，随着高度升高，气温又由 $-3\sim17^{\circ}\text{C}$ 逐渐下降为 $-83$

~ - 113 °C, 这一层空气质量只占全部大气质量的  $1/3000$ 。

4. 高温层 高温层位于 85~800 公里的高度范围内, 其主要特点是高度升高, 气温迅速上升。

5. 外层大气 在离地面 800 公里以上, 这是大气的外层, 该层内常有一些气体向星际空间散逸, 故又称为散逸层。这一层空气质量只占全部大气质量的  $10^{-11}$ 。

图 1-4 列出了对流层、平流层的近似图形

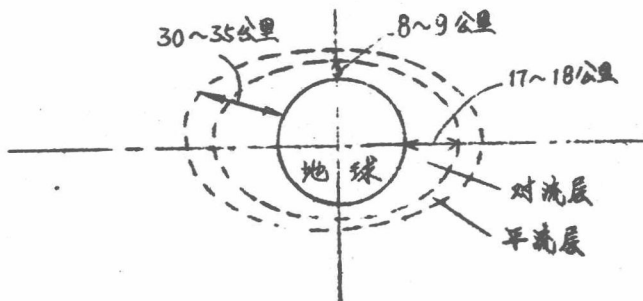


图 1-4

### § 1-3 标准大气

我们知道, 作用在飞机上的空气动力, 及安装在飞机上的发动机的推力, 在其他条件相同时, 主要取决于大气的密度, 压力、温度及其物理属性。因此, 在计算飞机飞行特性时, 必须知道大气参数随飞行高度(相对于地球表面)的变化规律。

大气的温度, 压力, 密度等参数会随所在地的经纬度不同而有所不同。即便同一经纬度, 也会因日夜季节而有所不同。因此, 同一飞机的飞行性能, 将因大气情况不同而不同, 每次飞行所得的数据也不一样。为了作设计计算时有一个统一的大气标准, 以及为了可以比较各种飞机或同一飞机在不同飞行中得出的飞行试验的结果, 通常都将

飞行试验的结果换算到同一种大气条件下。这种标准的大气参数，是与实验的时间及地点无关的，在所有情况都是一样的标准状态，称为国际标准大气。这时大气参数仅仅是飞行的几何高度的函数。

从原理上分析，大气层中的气体参数必须满足二个基本方程：

(1) 在地球表面上取出一空气柱(图1-5)。某个高度上的大气压强可以看作是截面积为1米<sup>2</sup>的一根上端无界的空气柱的重量压下来造成的。我们可以用静平衡的微分方程把压强随高度而下降的变化规律推导出来。在截面积为1的空气柱(图1-5)上取厚度为 $dH$ 的一片气体来看它的受力情况。可得

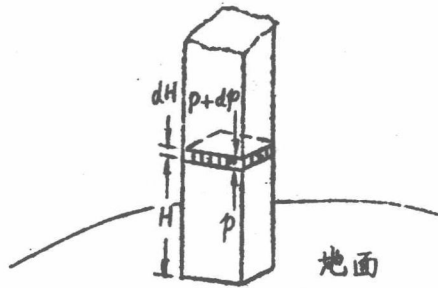


图 1-5

$$dp = -\rho g dH$$

或 
$$\frac{dp}{dH} = -\rho g \quad (1.1)$$

(2) 气体的状态方程 
$$p = \rho g R T \quad (1.2)$$

将上述二方程(1.1)及(1.2)联立，得

$$\frac{dp}{dH} = -\rho g = -\frac{p}{RT} \quad (1.3)$$

若已知大气温度与高度间的变化关系，从方程(1.3)便可求出大气压力随高度的变化规律，并可由状态方程求出空气密度和几何高度间的关系。

国际标准大气的具体规定为：

(1) 以海平面的高度为零。在海平面，空气的标准状态是

$$p_0 = 760 \text{ 毫米水银柱} = 1.03323 \text{ 公斤/厘米}^2$$

$$t_0 = 15^\circ\text{C} \text{ 或 } 288.15^\circ\text{K}$$

$$\rho_0 = 0.125 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^3$$

(2) 对流层顶的高度为 11000 米。在对流层中，每升高 1000 米，气温降低  $6.5^\circ\text{C}$  即  $T = 288.15^\circ - 0.0065 H$  (米)

据 (1.3) 有

$$\frac{dp}{p} = - \frac{dH}{R(288.15 - 0.0065H)}$$

积分可得

$$\begin{aligned} \frac{p}{p_0} &= \left( \frac{288.15 - 0.0065H}{288.15} \right)^{5.25588} \\ &= \left( \frac{T}{T_0} \right)^{5.25588} \end{aligned}$$

相应的密度比

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{4.25588}$$

(3) 在平流层内，到 20000 米为止， $T = 216.65^\circ\text{K}$  为一常数，用相同方法计算可得

$$\frac{dp}{p} = - \frac{dH}{RT}$$

$$\int_{p_{11}}^p \frac{dp}{p} = - \frac{1}{RT} \int_{11000}^H dH$$

得

$$\frac{p_H}{p_{11}} = \frac{\rho_H}{\rho_{11}} = e^{-\frac{H-11000}{6341.62}}$$

此中下标“11”代表  $H = 11000$  米处的参数， $p_{11} = 0.2308$  公斤/厘米<sup>2</sup>， $\rho_{11} = 0.0371$  公斤·秒<sup>2</sup>/米<sup>3</sup>



(4) 从 20000 米到 32000 米,  $T = 216.65 + 0.001(H - 20000)$ ,

类似可得 
$$\frac{p}{p_{20}} = \left( \frac{T_H}{216.65} \right)^{-34.1632}$$

$$\frac{\rho}{\rho_{20}} = \left( \frac{T_H}{216.65} \right)^{-35.1632}$$

式中  $p_{20} = 0.0558$  公斤/厘米<sup>2</sup>,

$\rho_{20} = 0.00898$  公斤·秒<sup>2</sup>/米<sup>3</sup>

这样计算出来的大气参数(压强、密度、温度等的总称)列成标准大气表(见表 1-1)。

表 1-1 标准大气简表

H(千米)	T(°K)	p(公斤/厘米 <sup>2</sup> )	ρ(公斤·秒 <sup>2</sup> /米 <sup>3</sup> )	q(米/秒)
0	288.15	1.0333	0.125	340.29
1	281.65	0.9165	0.113	336.43
2	275.15	0.8106	0.103	332.53
3	268.65	0.7149	0.0927	328.58
4	262.15	0.6286	0.0835	324.58
5	255.65	0.5509	0.0751	320.53
6	249.15	0.4811	0.0673	316.43
7	242.65	0.4187	0.0601	312.27
8	236.15	0.3630	0.0536	308.06
9	229.65	0.3135	0.0476	303.79
10	223.15	0.2696	0.0420	299.46