

隧道通风与运营设施

卢斌，朱广河，范宇昊主编



四川大学出版社



目 录

第一章 隧道通风	(1)
第一节 空气的物理状态参数	(1)
第二节 理想气体的状态方程	(12)
第三节 隧道内空气流动的基本方程	(15)
第四节 通风阻力	(20)
第五节 隧道内的空气、气候与通风要求	(29)
第六节 隧道内需风量的计算	(35)
第七节 自然风及自然风对隧道通风的影响	(41)
第八节 车辆活塞风的计算	(48)
第九节 隧道通风方式	(54)
第十节 隧道纵向通风计算	(63)
第十一节 风道、风井与风机房	(67)
第十二节 通风机与风机控制方式	(77)
第十三节 交通隧道通风设计实例	(80)
第二章 隧道的供电系统	(85)
第一节 供电系统的组成	(85)
第二节 交通隧道供电系统	(89)
第三节 地铁供电系统设计	(92)
第四节 变配电系统	(105)
第五节 电力监控 (SCADA) 系统	(109)
第六节 车站人防电气设计	(112)
第七节 地铁供电主要设备与要求	(113)
第八节 杂散电流	(117)
第四章 隧道消防设施	(152)
第一节 概述	(152)
第二节 隧道防火设施的组成和各种设施的功用	(158)
第三节 火灾事故的通风	(166)
第五章 隧道给排水系统	(169)
第一节 给水系统	(169)
第二节 排水	(189)

第一章 隧道通风

第一节 空气的物理状态参数

正确理解和掌握空气的主要物理性质是学习隧道通风的基础。与隧道通风密切相关的空气物理性质有：温度、压力（压强）、密度、比容、粘性、湿度、焓等。

一、压力

（一）压力的概念

气流压强在隧道通风中习惯称为压力。它是空气分子热运动对器壁碰撞的宏观表现，其大小取决于在重力场中的位置（相对高度）、空气温度、湿度（相对湿度）和气体成分等参数。根据物理学的分子运动理论，空气的压力可用下式表示；

$$P = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) \quad (1-1-1)$$

式中 n ——单位体积内的空气分子数，

$\frac{1}{2} m v^2$ ——分子平移运动的平均动能。

上式阐述了气体压力的本质，是气体分子运动的基本公式之一。由式可知，空气的压力是单位体积内空气分子不规则热运动产生的总动能的三分之二转化为能对外做功的机械能。因此，空气压力的大小可以用仪表测定。

压力的国际单位为 Pa（帕斯卡， $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ），压力较大时可采用 kPa（ $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$ ）、MPa（ $1 \text{ MPa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^6 \text{ Pa}$ ）。其他压力单位及相互换算关系参见表 1-1。

表 1-1-1 空气压力单位及相互换算关系

Pa	atm	mmHg	mmH ₂ O	at
1	0.99×10^{-3}	0.0075	0.102	1.02×10^{-5}
101325	1	760	10332	1.033
133.32	0.00132	1	13.6	0.00136
9.807	0.9678×10^{-4}	0.0736	1	0.0001
98067	0.9678	735.6	10^4	1

1. 静压能与静压

(1) 静压能与静压的概念

空气的分子无时无刻不在作无秩序的热运动。这种由分子热运动产生的分子动能的一部分转化的能够对外作功的机械能叫静压能，

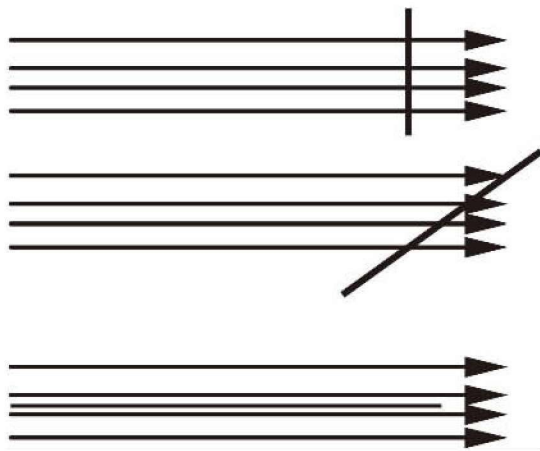
在隧道通风中，压力的概念与物理学中的压强相同，即单位面积上受到的垂直作用力。静压也可称为是静压能。

(2) 静压特点

① 无论静止的空气还是流动的空气都具有静压力；

② 风流中任一点的静压各向同值，且垂直于作用面；

③ 风流静压的大小（可以用仪表测量）反映了单位体积风流所具有的能够对外作功的静压能的多少。如说风流的压力为 Pa，则指风流 1 m³ 具有 101332J 的静压能。



2. 动能与动压

(1) 动能与动压的概念

当空气流动时，除了位能和静压能外，还有空气定向运动的动能，用 E_v 表示，J/m³；其动能所转化显现的压力叫动压或称速压，用符号 h_v 表示，单位 Pa。

(2) 动压的计算

单位体积空气所具有的动能为：

$$E_{v_i} = \frac{\rho v^2}{2} \quad (1-1-2)$$

式中： ρ_i ——I 点的空气密度，Kg/m³；

v ——I 点的空气流速，m/s。

E_{v_i} 对外所呈现的动压 h_{v_i} ，其值相同。

(3) 动压的特点

① 只有作定向流动的空气才具有动压，因此动压具有方向性。

② 动压总是大于零。垂直流动方向的作用面所承受的动压最大（即流动方向上的动压真值）；当作用面与流动方向有夹角时，其感受到的动压值将小于动压真值。

③ 在同一流动断面上，由于风速分布的不均匀性，各点的风速不相等，所以其动压

值不等。

④某断面动压即为该断面平均风速计算值。

3. 压力的两种测算基准（表示方法）

根据压力的测算基准不同，压力可分为：绝对压力和相对压力。

(1) 绝对压力：以真空为测算零点（比较基准）而测得的压力称之为绝对压力，用 P 表示。

(2) 相对压力：以当地当时同标高的大气压力为测算基准（零点）测得的压力称之为相对压力，即通常所说的表压力，用 h 表示。

风流的绝对压力 (P_i)、相对压力 (h) 和与其对应的大气压 (P_0) 三者之间的关系如下式所示： $h_i = P_i - P_0$

P_i 与 h_i 比较：

- ①绝对静压总是为正，而相对静压有正负之分；
- ②同一断面上各点风流流的绝对静压随高度的变化而变化，而相对静压与高度无关。
- ③ P_i 可能大于、等于或小于与该点同标高的大气压 (P_{0i})。

4. 全压

隧道中任一点风流，在其流动方向上同时存在静压和动压，两者之和称之为该点风流的全压，即：全压=静压+动压。

由于静压有绝对和相对之分，故全压也有绝对和相对之分。

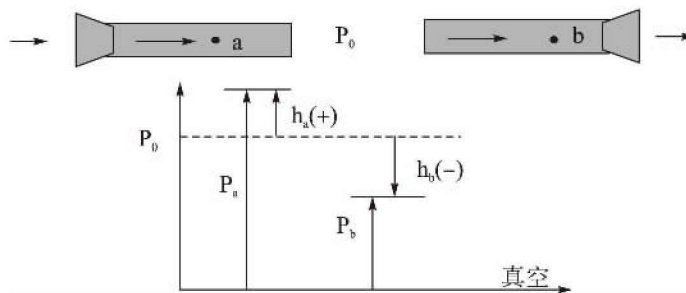


图 1-1-2 压力的两种测算基准

(1) 绝对全压 (P_{ti})

$$P_{ti} = P_i + h_{vi} \quad (1-1-3)$$

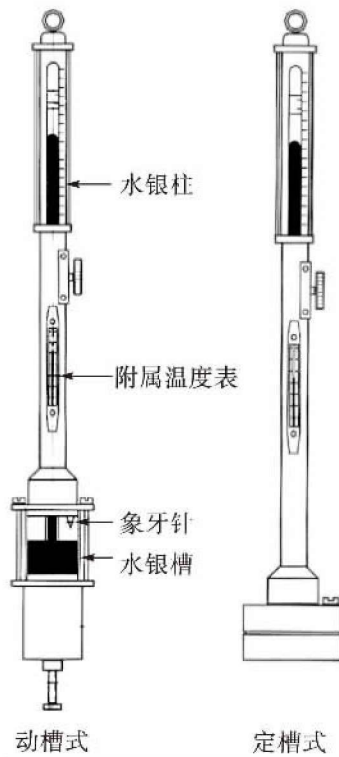


图 1-1-3 水银气压计

(2) 相对全压 (h_{ti})

$$h_{ti} = h_i + h_{vi} = P_{ti} - P_{oi} \quad (1-1-4)$$

说明：A. 相对全压有正负之分；

B. 无论正压通还是负压通风， $P_{ti} > P_i$ $h_{ti} > h_i$ 。

(二) 压力的量测

1. 空气绝对压力测定

绝对压力的测定，通常使用水银气压计和空盒气压计。

(1) 水银气压计

水银气压计于 1644 年发明，如图 1-1-3 所示，它主要由一个水银盛槽与一根玻璃管构成。玻璃管上端封闭，下端插入水银盛槽中，管内上端形成绝对真空，下部充满水银。当盛器里的水银表面受到空气压力时，管内水银柱高度随着空气压力而变化。这时管中水银面与盛器里水银面的高差就是所测空气的绝对压力。水银气压计属于固定式装置，一般置于室内壁上，用于测量大气压力或用于校对其它压力计。

水银气压计又分为定槽水银气压计和动槽水银气压计，两者在调节读数时有所不同，使用中应加以注意。水银气压计的感应部分由水银、玻璃内管、水银槽组成；刻度部分由标尺、游标尺、象牙针组成；附属部分为附属温度计。

动槽式水银气压表是法国人福丁 (J. Fortin) 于 1810 年发明制造的，故称福丁式水银气压表。它的主要特点是标尺上有一个固定的零点。每次读数时，须将水银槽的表

面调到这个零点处，然后读出水银柱顶的刻度。

动槽式水银气压表读数要比定槽水银气压计的复杂些，读数顺序为：先读温度计，再调水银面与象牙针相切，再调游标尺与水银柱顶相切，最后读数。读数结束后，将象牙针与水银面断开。

从理论上说，任意一种液体都可以用来制造气压表，但是水银有其独特的优点：

- ①水银密度大。在标准条件下，在通常大气压力下，它的液柱高度适合人的观测。
- ②水银的蒸汽压小。在温度 60℃ 以下，在管顶内的水银蒸汽附加压力对读数准确度的影响可忽略不计。
- ③水银的性能稳定。易于提炼纯净的水银。
- ④水银不沾湿玻璃，管内水银面形成凸起的弯月面，容易判断水银柱顶的准确位置。

定槽式水银气压表也称寇乌（kew）式水银气压表。定槽式与动槽式区别在水银槽部。它的水银槽是一个固定容积的铁槽，没有皮囊、水银面调节螺钉以及象牙针。

当气压变化时，水银柱在玻璃管内上升或下降所增加或减少的水银量，必将引起水银槽内的水银减少或增加，使槽内的水银面向下或向上变动。即正个气压表的基点随水银柱顶的高度变动。

(2) 空盒气压计

空盒气压计（也称为无液气压计）如图 1-4 和 1-5 所示，它由一个被抽成真空的皱纹状金属盒与联接在盒上带指针的传动机构所组成。

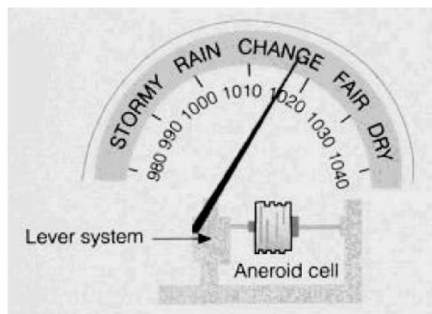


图 1-1-4 空盒气压计

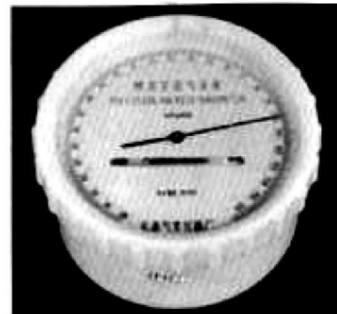


图 1-1-5 空盒气压计

空盒气压计的感应元件是一组具有弹性的、抽成真空的（或残留少量空气）空盒组成的。其结构组成包括：感应部分、传动放大部分、显示部分。将空盒底部固定，顶部可自由移动，用以操作指示读数的机械系统。

空盒气压计的测压原理是：由于盒内抽成真空（实际还有少量余压），当大气压力作用于盒面上时，盒面被压缩，并带动传动杠杆使指针转动，根据指针转动的幅度即可读得大气压力数值。

空盒气压计的测压原理是：由于盒内抽成真空（实际还有少量余压），当大气压力作用于盒面上时，盒面被压缩，并带动传动杠杆使指针转动，根据指针转动的幅度即可读得大气压力数值。

空盒气压计实物见图 1-5 所示，它是一种携带式测压仪表，一般用于固定地点大气压力的测量。其测量精度较差，使用前必须经水银气压计的校正。读数要求如下：

- ① 测量时将盒面水平放置在被测地点，停留 10~20 分钟时间，待指针稳定后再读数；
- ② 读数时视线应该垂直于盒面。
- ③ 读表的附温，准确到 0.1℃；
- ④ 轻敲盒面，克服机械摩擦；
- ⑤ 待指针平稳后，读气压数，精确到 0.1 mmHg；
- ⑥ 复读一次。

根据用途及要求不同，空盒气压计分有标准型和精密型，根据适用的条件不同，分有平原型和高原型。在使用时，应根据具体用途和条件来选用合适类型的空盒气压计。

2. 空气相对压力测定

相对压力的测定，常用的有 U 形压力计、单管倾斜压力计和补偿微压计。它们都必须与皮托管配合来测量风流的静压、动压和全压。

(1) 皮托管

在测定风流的相对静压、动压和全压时，U 形、单管倾斜和补偿压力计均须与皮托管连接才能进行。皮托管是接受与传递风流压力的装置，它由两根金属小圆管构成，内管和外管同心套结成一体，但互不相通。内管前端开一小孔与“+”脚管相通，小孔正对风流时，内管接受测点风流的全压。外管在离前端不远的侧面开有数个小孔。这些小孔接受测点风流的 1 静压并与“-”脚管相通。测定时，根据所要测定的参数（相对静压、动压和全压），把皮托管与压力计连好，把皮托管前端正对着风流即可测定（如图 1-1-6 所示。）。

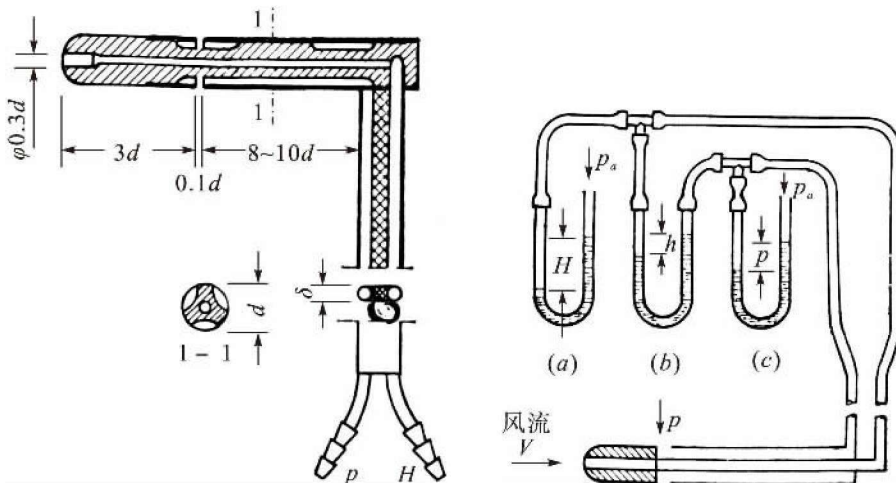


图 1-1-6 皮托管测定风流

将压差计与测压管用胶皮管连接起来，并将测压管安设在需要进行测量的断面位置上，便组成了隧道通风管网中的压力测量系统。图 1-1-6 是通风管网测量压力时布置示意图。测压管的头部迎着风流，中心管传导的是全压 H （如图 a）平行于风流的环状

凹槽所传导的是静压 P (如图 c), 如果将测压管的 P 与 H 两端分别连到压差计的两端, 则压差计量出的数值表示动压 h (如图 b)。

(2) U 形压力计

U 形压力计 (也称为 U 形水柱计), 有垂直和倾斜两种类型, 它们都是由一内径相同、装有蒸馏水或酒精的 U 形玻璃管与刻度尺所构成。它的测压原理是: U 形管两侧液面承受相同压力时, 液面处于同一水平; 当两侧液面压力不同时, 压力大的一侧液面下降, 另一侧液面上升, 从中间的标尺即可读出压差。

(3) 单管倾斜压力计

对于垂直 U 形水柱计来说, 两水面的高差 L (mm) 就是两侧压力差 H (mmH₂O)。垂直 U 形压力计的精度较低, 多用于测量较大的压力。为了提高测量精度, 可采用倾斜 U 形压力计。设倾斜 U 形压力计的倾斜角度为 α , 两侧液面差为 L (mm), 则所测压力差为 H (mmH₂O), 即所测压力 P (Pa) 为:

$$P = \rho g H = \rho g L \sin \alpha \quad (1-1-4)$$

式中: ρ ——U 形管中液体的密度 (kg/m³);

P ——所测压力, Pa;

g ——重力加速度, m/s²。

单管倾斜压力计原理如图 1-7 所示, 它由一个较大断面的容器 A 与一个小断面的倾斜管 B 相互连通而构成。A 与 B 断面积的比例 F_1/F_2 一般为 250~300, 其中充有适量的酒精。为便于读数, 酒精中注入微量的硫酸和甲基橙使之染色。

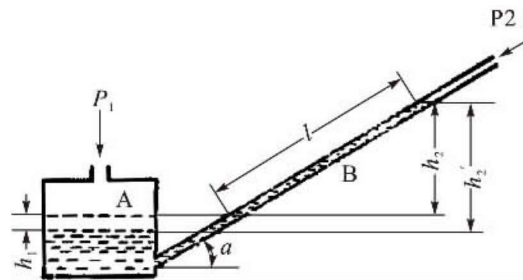


图 1-1-7 单管倾斜压力计原理如图

它的测压原理与 U 形压力计基本相同。当 A 中液面承受比 B 液面较大的压力时, A 液面下降 h_1 , B 液面相应上升 h_2 。由于 F_1 远大于 F_2 , 根据 $h_1 \cdot F_1 = h_2 \cdot F_2$ 等式可知, h_1 远小于 h_2 。所测压力按下式计算:

$$P = \rho g (h_1 + h_2) = \rho g (1 + F_2/F_1) h_2 = \rho g (1 + F_2/F_1) L \cdot \sin \alpha = K \rho g L \quad (1-1-5)$$

式中 K ——仪器校正系数, 由仪器上读得;

L ——倾斜管的始末读数差, mm。

单管倾斜压力计除容器 A 和倾斜管 B 外, 还有控制阀门、液面零位调节锤、酒精注入口 (带密盖) 以及斜管定位弧形架。使用时, 先将斜管置于所需的倾角或 K 值处; 把较大压力的胶管接通容器 A, 小压力胶管接通倾斜管 B; 在非工作位置调整水平和零

位；然后在工作位置上进行测定。

二、密度、比容和容重

空气和其他物质一样具有质量。单位体积空气所具有的质量称为空气的密度，用符号 ρ 表示。空气可以看作是均质流体，故：

$$\rho = M/V \quad (\text{kg} / \text{m}^3) \quad (1-1-6)$$

式中： ρ ——空气的密度， kg/m^3

M ——空气的质量， kg

V ——空气的体积， m^3 。

一般地说，当空气的温度和压力改变时，其体积会发生变化。所以空气的密度是随温度、压力而变化的。从而可以得出空气的密度是空间点坐标和时间的函数。如在大气压 P_0 为 101 325 Pa、气温为 0C (273. 15 K) 时，干空气的密度 ρ_0 为 1. 293 kg/m^3 。

湿空气的密度是 1 m^3 空气中所含干空气质量和水蒸气质量之和：

$$\rho = \rho_d + \rho_v \quad (1-1-7)$$

式中： ρ_d ——一立方空气中干空气的质量， kg

ρ_v ——一立方空气中水蒸气的质量， kg

由气体状态方程和道尔顿分压定律可以得出湿空气的密度计算公式：

$$\rho = 0. 003484 \frac{P}{273 + t} \left(1 - \frac{0. 378 \varphi P_s}{P} \right) \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1-1-8)$$

式中： P ——大气压，单位：Pa；

φ ——为相对湿度；

t ——为空气温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

P_s ——温度为 t 时饱和水蒸汽的分压，单位：Pa；

空气的比容是指单位质量空气所占有的体积。用符号 v (m^3/kg)，表示，比容和密度互为倒数，它们是一个状态参数的两种表达方式。则：

$$v = V / M \quad (\text{m}^3/\text{kg}) = 1/\rho \quad (1-1-9)$$

在隧道通风中，空气流经复杂的隧道通风网络时，其温度和压力将会发生一系列的变化，这些变化都将引起空气密度的变化。在不同的隧道通风系统其变化规律是不同的。在实际应用中，应考虑什么情况下可以忽略密度的这种变化，而在什么条件下又是不可忽略的。

空气的容重是指单位容积物体所具有的重力：

$$\text{即：} \gamma = \rho g = G/V \quad (\text{N} / \text{m}^3) \quad (1-1-10)$$

三、湿度

(一) 湿度的概念：

湿度是表示空气中所含水蒸汽量的多少或潮湿程度。

空气湿度的表示方法有两种：一种叫绝对湿度，另一种叫做相对湿度。

1. 绝对湿度：每立方米空气中所含水蒸汽的质量叫空气的绝对湿度。其单位与密

度单位相同 (Kg/m^3), 其值等于水蒸汽在其分压力与温度下的密度。

$$\rho_v = M_v/V \quad (1-1-11)$$

饱和空气: 在一定的温度和压力下, 单位体积空气所能容纳水蒸汽量是有极限的, 超过这一极限值, 多余的水蒸汽就会凝结出来。这种含有极限值水蒸汽的湿空气叫饱和空气, 这时水蒸汽分压力叫饱和水蒸分压力: P_s , 其所含的水蒸汽量叫饱和湿度 ρ_s 。

2. 相对湿度: 单位体积空气中实际含有的水蒸汽量 (ρ_v) 与其同温度下的饱和水蒸汽含量 (ρ_s) 之比称为空气的相对湿度

$$\varphi = \rho_v/\rho_s \quad (1-1-12)$$

反映空气中所含水蒸汽量接近饱和的程度。

φ 愈小, 空气表明愈干燥, φ 愈大, 则表示空气愈潮湿; 当 $\varphi=0$ 时为干空气; 若 $\varphi=1$ 为饱和空气。

将不饱和空气的相对相对湿度随着温度下降, 其相对湿度逐渐增大, 当冷却达到 100% 时 (即 $\varphi=1$ 时) 此时的温度称为露点。

(二) 湿度的测量

图 1-1-8 为干—湿球温度计示意图, 湿温度计 (B) 与干温度计 (A) 的不同是在温度计的球形部分包有湿布, 当固定干 (A), 湿 (B) 两温度计的木板绕手柄 C 旋转时, 空气自由吹过 B 的球部, 湿布上水分蒸发, B 球温度下降, 从而湿温度计读数低于干温度计, 用 t 表示干温度计读数, 即干温度, Δt 表示干、湿温度计读数差。 Δt 与湿布上的水分蒸发速度即空气吸收水分的能力 Φ 有关。另外, 前面已经讲过, 空气的相对湿度与温度 t 有关, 所以有 $\Phi = \Phi(\Delta t, t)$; 可见, 通过干—湿球温度计测量 Δt 和 t , 可以得到空气的相对湿度。

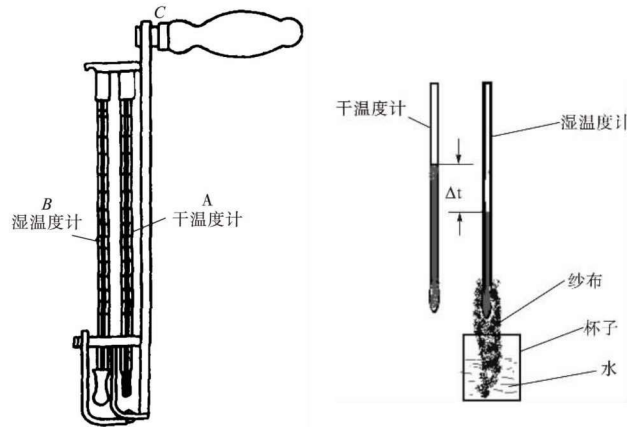


图 1-1-8 湿度的测量

Φ 与 Δt 、 t 的函数关系见下表，使用时只需直接查表表 1-1-1。

表 1-1-1 由干、湿温度计读数查相对湿度

干温度 计读数 ($^{\circ}\text{C}$)	干、湿温度计读数差 ($^{\circ}\text{C}$)								干温度 计读数 ($^{\circ}\text{C}$)	干、湿温度计读数差 ($^{\circ}\text{C}$)							
	0	1	2	3	4	5	6	7		0	1	2	3	4	5	6	7
	相对湿度 (%)									相对湿度 (%)							
0	100	81	63	46	28	12	—	—	18	100	90	80	72	63	55	48	41
5	100	86	71	55	43	31	17	4	19	100	91	91	72	64	57	50	41
6	100	96	72	59	46	33	21	8	20	100	91	81	73	65	58	50	42
7	100	87	74	60	48	36	24	14	22	100	91	82	74	66	58	50	44
8	100	87	74	62	50	39	27	16	23	100	91	82	74	66	58	51	45
9	100	88	75	63	52	41	30	19	24	100	91	93	75	67	59	52	46
10	100	88	77	64	53	43	32	22	25	100	91	83	75	67	59	53	47
11	100	88	79	65	55	45	35	25	26	100	92	84	76	68	60	54	48
12	100	89	79	67	57	47	37	27	27	100	92	84	76	69	62	55	50
13	100	89	79	68	58	49	39	30	28	100	92	84	77	69	62	56	51
14	100	89	79	69	59	50	41	32	29	100	92	94	77	70	64	57	52
15	100	90	80	70	61	51	43	34	29	100	92	95	78	71	65	58	53
16	100	90	80	70	61	53	45	37	30	100	92	95	79	72	66	59	53
17	100	90	80	71	62	55	47	40									

表 1-1-2 饱和空气表 (大气压力为 1000 毫巴)

干湿温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	水蒸汽分压 P_r (kg / m^3)		水蒸汽密度 ρ_{sat}	比湿 d_{sat} (g / kg)	比焓 j_{sat} (kg / tt)	汽化热 r (tJ / kg)
	(Pa)	(mmHg)				

续表

-1	562	4.22	4.50×10^{-3}	7.32	7.8	2834
0	611	4.58	4.84×10^{-3}	3.82	9.3	2300
1	656	4.92	3.19×10^{-3}	4.11	11.3	2498
2	705	5.29	5.56×10^{-3}	4.42	13.1	2496
3	757	6.68	0.00394	4.73	11.9	2493
4	813	6.10	0.00636	3.10	16.8	2491
5	872	6.54	0.00679	5.47	18.7	2489
6	933	7.01	0.00726	3.87	20.7	2486
7	1001	7.51	0.00773	6.29	22.8	2484
8	1072	8.04	0.00826	6.74	23.0	2481
9	1147	8.61	0.00826	7.22	27.2	2479
10	1227	9.21	0.00940	7.73	29.3	2477
11	1312	9.84	0.01001	8.27	31.9	24755
12	1101	10.51	0.01066	8.44	36.0	2472
13	1300	11.23	0.01134	9.45	37.0	2470
14	1597	11.98	0.01206	10.10	39.3	2468
15	1701	12.78	0.01282	10.78	62.3	2165
16	1701	12.78	0.01282	10.78	42.3	2465
17	1817	13.61	0.01363	11.51	45.2	2463
18	1936	14.53	0.01447	12.28	48.2	2460
19	2062	15.47	0.01336	13.10	31.3	2458
20	2196	16.47	0.01630	13.97	54.5	2456
21	2337	17.53	0.01729	14.88	37.9	2453
22	2485	18.65	0.01833	15.83	61.4	2431
23	2642	19.82	0.01912	16.88	63.0	2448
24	2808	21.07	0.02057	17.97	68.8	2446
25	2982	22.38	0.02177	19.12	72.8	7444
26	3167	23.75	0.02303	20.39	77.0	2441
27	3360	25.21	0.02437	21.67	81.3	2439
28	3564	26.74	0.02376	22.99	83.8	2437
29	3778	28.36	0.02723	21.42	90.5	2434
30	4004	30.04	0.02876	23.96	93.4	2432
31	4241	31.83	0.03037	27.52	100.3	2430
32	4491	33.70	0.0320	29.23	106.0	2427
33	4753	35.67	0.0338	31.07	311.7	2423
34	5029	37.73	0.0357	32.99	117.6	2422
35	5318	39.90	0.0376	31.94	123.7	2420
	5622	42.18	0.03962	37.03	130.2	2418

四、粘性

当流体层间发生相对运动时，在流体内部两个流体层的接触面上，便产生粘性阻力（内摩擦力）以阻止相对运动，流体具有的这一性质，称作流体的粘性。例如，空气在管道内作层流流动时，管壁附近的流速较小，向管道轴线方向流速逐渐增大（图 1-1-9）。在垂直流动方向上，设有厚度为 dy (m)，速度为 u (m/s)，速度增量为 du (m/s) 的分层，在流动方向上的速度梯度为 du/dy (s^{-1})，由牛顿内摩擦定律得：

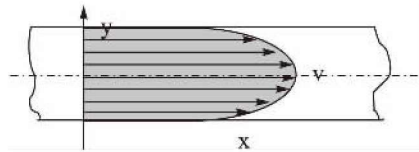


图 1-1-9

$$F = \mu S \frac{du}{dy} \quad (1-1-13)$$

式中：F——内摩擦力，N；

S——流层之间的接触面积， m^2 ，

μ ——动力粘度（或称绝对粘度），其国际单位：帕·秒，写作： $Pa \cdot s$ 。

由上式可知，当流体处于静止状态或流层间无相对运动时， $du/dy=0$ ，则 $F=0$ 。

在隧道通风中还常用运动粘度，用符号 ν (m^2/s) 表示：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-1-14)$$

温度是影响流体粘性的主要因素之一，但对气体和液体的影响不同。气体的粘性随温度的升高而增大，液体的粘性随温度的升高而减小。

在实际应用中，压力对流体的粘性影响很小，可以忽略。由式 (1-1-14) 可知，对可压缩流体，运动粘性，和密度 ρ 有关，即 ν 和压力有关，因此在考虑流体的可压缩性时常采用动力粘度 μ 而不用运动粘度 ν 。表 2-1-1 为几种有关流体的粘度。

表 1-1-3 几种流体的粘度 (0.1 MPa, $t=20^\circ C$)

流体名称	动力粘度 $\mu/Pa \cdot s$	运动粘度 $\nu/m^2 \cdot s^{-1}$
空气	1.808×10^{-5}	1.501×10^{-5}
氮气 (N_2)	1.76×10^{-5}	1.41×10^{-5}
氧气 (O_2)	2.04×10^{-5}	1.43×10^{-5}
甲烷 (CH_4)	1.08×10^{-5}	1.52×10^{-5}
水	1.005×10^{-6}	1.007×10^{-6}

第二节 理想气体的状态方程

一、理想气体的状态方程

气体的压力、温度和比容三个物理量，表示了气体的基本状态，所以它们被称为气体的基本状态参数。在气体压力较低，而温度又不太低的状况下研究气体时，可以不考虑气体分子之间的作用力及分子本身的大小，在热力学上，这种气体被看作理想气体。在隧道通风中所涉及的气体可以看成理想气体。

理想气体的三个基本状态参数之间存在一定的关系，这种关系用方程表示就是理想气体的状态方程。

1. 波义耳 (Boyle) 定律：单位质量的气体在温度一定时，其压力与比容的乘积为定值。

$$\text{即} \quad P_1 \cdot v_1 = P_2 \cdot v_2 = \text{const}$$

2. 盖·吕萨克 (Gay-Lussac) 定律：单位质量的气体在压力不变时，比容和绝对温度成正比。即：

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$$

3. 理想气体的状态方程

设气体的初始状态为 P_1 、 T_1 、 v_1 ，当 T_1 不变时，压力变为 P_2 ，比容变为 v_2 ，由波义耳定律得：

$$P_1 v_1 = P_2 v_2 \quad (1-2-1)$$

又设 P_2 一定，气体的状态由 P_2 、 T_1 、 v_2 变为 P_2 、 T_2 、 v_2 ，由盖吕萨克定律知：

$$\frac{v_2}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \quad (1-2-2)$$

(a)、(b) 两式相乘得：

$$\frac{P_1 v_2}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2} = \text{const}$$

或者

$$Pv = RT \quad (1-2-3)$$

式 (1-2-3) 称为理想气体状态方程。R 叫气体常数，它的单位是 $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ，它与气体的状态无关。必须注意：在式 (1-2-3) 中，若 P 是静压，则 T 为一般绝对温度，若 P 是全压时，T 应是滞止绝对温度。

式 (1-2-3) 还可作如下变化：若已知气体的质量为 M (kg)，则：

$$MPv = MRT$$

因 $Mv = V$

$$\text{所以} \quad PV = MRT \quad (1-2-3a)$$

若气体的质量为一摩尔，用 μ 表示，则：

$$\mu Pv = \mu RT \quad (1-2-3b)$$

由物理学知，当压力、温度相同时，一摩尔的各种理想气体的容积 μv 都相等，在标准状态 ($P_b = 101325 \text{ Pa}$, $T = 273 \text{ K}$) 下，各种气体的摩尔容积均等于 22.4 m^3 。把

$\mu v = 22.4 \text{ m}^3$, $P = 101325 \text{ Pa}$, $T = 273 \text{ K}$ 代入 (1-2-3b) 中得:

$$\mu R = 22.4 \times 101325 \div 273 = 8314 \text{ (J/mol} \cdot \text{k)}$$

μR 称为通用气体常数, 它与气体性质无关。以 μR 值代入式 (1-2-3b) 得:

$$\mu v P = 8314 T \quad (1-2-3c)$$

二、大气压沿海拔高度的变化规律

大气压强实质上是水平单位面积上的空气柱重量。因此, 在不同的海拔高度上气压不同。海拔愈高, 压在该处水平面上的空气柱愈短, 气压就愈低。为求出大气压沿海拔高度的变化规律, 可从大气中取出一个边长分别为 dx 、 dy 、 dz 的微小立方体, 如图 1-1 所示。当大气处于静止状态时, 作用在微小立方体侧面积上的压力互相平衡,

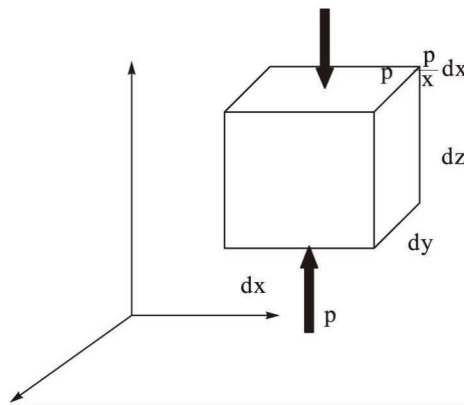


图 1-1-10 作用在微小立方体上的压力

即 $\Sigma F_x = 0$ 及 $\Sigma F_y = 0$

$$\text{由此得 } \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (a)$$

$$\text{及 } \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (b)$$

根据 z 方向的力的平衡条件得:

$$\Sigma F_z = p dx dy - (p + \frac{\partial p}{\partial z} dz) dx dy - \rho g dx dy dz = 0$$

$$\text{即: } \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (c)$$

(a) 式及 (b) 式表示静止大气的水平气压梯度为零, 于是 (c) 式可写为:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (d)$$

设 p_1 和 p_2 分别为 z_1 和 z_2 高度上的气压, 对 (e) 式积分

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = - \int_{z_1}^{z_2} \frac{g}{RT} dz \quad (e)$$

$$\text{得 } p_2 = p_1 e^{-\int_{z_1}^{z_2} \frac{g}{RT} dz} \quad (1-2-4)$$

式(1-1)中的重力加速度 g 和绝对温度 T 严格说都是海拔高度 z 的函数。现为计算方便起见,可取 T 为 z_1 至 z_2 间的空气柱的平均温度 T_m , 并以 $g=9.807$ 米/秒², $R=287$ 焦耳/公斤·开, 代入(1-1)式得:

$$z_2 - z_1 \approx 18400 \left(1 + \frac{t_m}{273.16}\right) \lg\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \text{ (米)} \quad (1-2-5)$$

式中 t_m —— z_1 高度至 z_2 高度之间的平均温度 (°C)。

式(1-2)在气象学上称为气压高度公式。

如海拔高度 z_1 和 z_2 相差不大, 则可认为在 $(z_2 - z_1)$ 的范围内空气的密度 ρ 为常量。于是由(d)式得

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g = -\gamma$$

$$\text{积分得: } p_2 - p_1 = -\gamma(z_2 - z_1) \quad (1-2-6)$$

式中 γ ——空气的容重, 可按式(0-3)计算。

[例 2-1] 某隧道低洞口处的大气压为 $p_1=740$ 毫米水银柱, 高洞口对低洞口的地形高差 $z_2 - z_1=30$ 米, 两洞口外平均气温 $t_m=100$ C. 试求空气静止不动时高洞口处的大气压 p_2 。

解 由式(1-2)得

$$\lg\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = \frac{z_2 - z_1}{18400 \left(1 + \frac{t_m}{273.16}\right)} = 0.001573$$

$$\text{或 } p_2 = \frac{p_1}{10^{0.001573}} = 737.32 \text{ 毫米水银柱}$$

第三节 隧道内空气流动的基本方程

一、气体的连续性方程

(一) 连续性假设

在标准状态下, 气体分子之间的平均距离为 3.4×10^{-7} 厘米, 虽然比液体分子之间的距离 3×10^{-8} 厘米大, 但与气体宏观运动的尺度相比, 气体分子的间隙仍然是非常微小。因此在研究气体宏观运动时, 可以假定气体是由无数无间隙的质点连续地组成, 而且气体质点的物理参数(如压强、速度、密度等等)是空间坐标和时间的连续函数。这一假设称为气体连续性模型。在通风工程领域中, 空气的密度和压强都比较大, 根据连续性假设来研究气体运动所得结果与实验相符。但是, 随着海拔高度的增加, 空气逐渐稀薄, 到了离地面 50 公里以上的高空, 空气分子运动自由程达到 10^{-2} 厘米。这时大气就不能再看作是连续介质而是非连续的稀薄气体。在通风工程技术中, 不涉及稀薄气体问题。

既然在一般情况下空气可认为是连续介质, 那么空气在运动过程中就应当保持质量