纺织厰空气调节

（5～7章）

第五章　流体流动及管边设计原理

前面所讲的空气与水都是流体，加热用的蒸汽亦是流体，而这些流体常需流经管边，然而如何能最经济合理地输送与分配这些流体，以及如何去测量其流速、流量等，就必须研究一下流体的物理性质，流体在管边内流动时的基本原理，以及其变化规律。

第一节　流体的性质

流体各质点之间的内聚力很小，它不能保持自己固定的形状，而是随它注入的容口形状而定，当流体受到极小的剪力时，会发生很大的变形，这种特性叫做流动性，这也就是流体区别于固体的基本特性。

流体根据它的压缩性质的不同又可以分为两类，一类是不可压缩的流体，如水及其他液体，这类流体当受到压力作用时，实际上很少改变其体积，专门研究这类流体的力学问题的有水力学。另一类是可以压缩的流体，如空气及其他气体，这类流体在所受压力变化时，极易膨胀或收缩而改变其体积，气体力学就是专门研究这类流体的。

一、重度及密度　流体每单位体积所具有的重量称为流体的重度，用字母γ来表示。

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{公斤/米}^3 \qquad (5-1)$$

式中：G —— 流体的重量　　公斤

V —— 流体的体积　　米^3

在温度20°C，$\varphi = 50\%$，在标准大气压力下时空气的$\gamma = 1.2$公斤/米^3，在一般室温时空气的γ通常即采用此值。

流体每单位体积所具有的质量称为流体的密度用字母ρ来表示

$$\rho = \frac{m}{V} \text{公斤·秒}^2\text{/米}^4 \qquad (5-2)$$

式中：m —— 流体的质量　　公斤、秒^2/米；

V —— 流体的体积　　米^3。

由物理学知道，物体的重量G是物体质量m和重力加速度g的乘积。

$$G = mg$$

因此重度γ和密度ρ之间的关系可写成公式

$$\gamma = \rho g \quad \text{或} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \qquad (5-3)$$

二、粘滞性　　流体抵抗切应力或剪力的性质称为流体的粘滞性，它是流体流动时产生内摩擦力，产生阻力的基本原因。

粘滞性主要是由于流体内部分子之间作不规则的热运动，和由于分子之间存在着引力，以及流体与固体壁之间存在着附着力的结果。因此流体在管道内流动时形成速度梯度 $\frac{dv}{dy}$，在管道中心流速最大，越近管壁处流速越小。流体在圆管中流动时的速度分布如图（5—1）所示，流体各层之间存在着不同的速度，也就发生相对位移，因而流体各层之间产生内摩擦力，造成了流体在流动时的摩擦阻力。流体的粘滞性常用绝对粘性系数μ或运动粘性系数ν来表示。

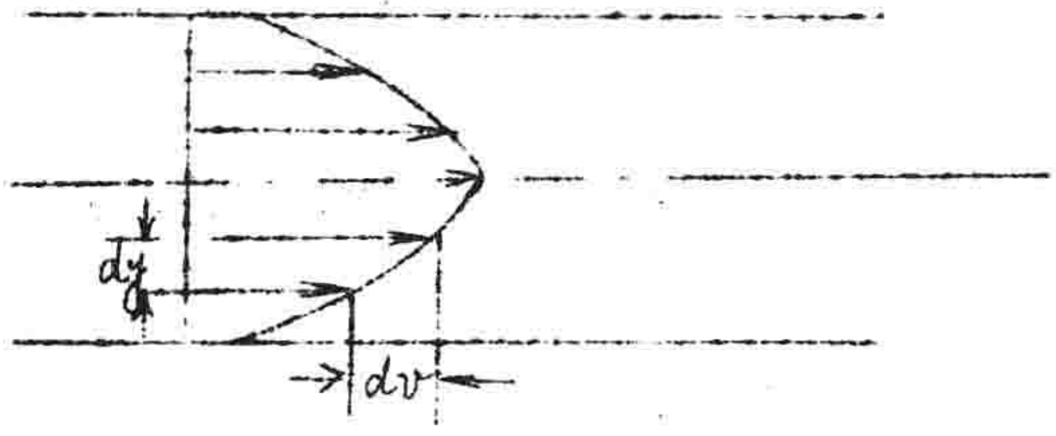

图 5－1

在15°时，空气的 $\mu = 1.8\times10^{-6}$ 公斤·秒／米²

水的 $\mu = 118\times10^{-6}$ 公斤·秒／米²

在管道计算中，大都采用运动粘性系数ν，其定义为：$\nu = \frac{\mu}{\rho}$

(5—4)

在15℃时，空气的 $\nu = 14.4\times10^{-6}$ 米²／秒＝14.4厘沲

水的 $\nu = 1.15\times10^{-6}$ 米²／秒＝1.15厘沲

在50℃时10号机械油（锭子油2）$\nu = 7\sim13\times10^{-6}$ 米²／秒＝7～13厘沲

20号机械油（锭子油3）$\nu = 17\sim23\times10^{-6}$ 米²／秒＝17～23厘沲

由此可知，空气比水的绝对粘度要小得多，而运动粘度则相反。

三、理想流体与实际流体

毛主席教导我们说："研究任何过程，如果是存在着两个以上矛盾的复杂过程的话，就要用全力找出它的主要矛盾。找住了这个主要矛盾、一切问题就迎刃而解了。"流体在运动时的情况复杂，因此在研究时，就要把一些次要因素作一些假定，暂时忽略，而把流体的主要特征表达出来。因此把不可压缩的和没有粘滞性的流体，通称为理想流体。这是一种假想的流体，是为了便于对流体进行研究。在这些假想条件下所研究的结果，可将流体的某些特征明显地表示出来。

实际流体都是可压缩的和有粘滞性的，但水的可压缩性很小，可以认为它是不可压缩的；至于空气，虽然它的可压缩性很大，但在通风管道内流动时，由于整个管道内阻力很小，一般约 30～100 毫米水柱，因此风道前后压力变动很小，与空气在大气压力下已受到 10000 毫米左右水柱的压力相比较，是可忽略不计的，故空气在通风管道内流动，亦可视作为不可压缩的流体。此外，空气或水的粘滞性虽然较小，但不能视作为无粘性，因为流体在管道内流动时的阻力，在一定条件下都是由于实际流体的粘滞性所造成的。

第二节　流体流动方式

由于流体有粘滞性，因而实际流体在管道内流动时有阻力损耗，其阻力变化的规律与流体的流动方式有关，经过劳动人民的长期实践证明，流体在管道内作层流流动（各层流体质点互不干扰）时，其阻力与流速的一次方式成正比，在作紊流流动（流体质点间有横向流动，相互干扰）时，其阻力近似与流速的二次方成正比。流体属层流还是紊流流动，可由旧名雷诺数（Re）进行判别，雷诺数（流体流动时的惯性力与内摩擦力相比的无因次准则数）是由下列诸值组成。

$$Re = \frac{vd}{\nu} \qquad (5-5)$$

式中：v——流速，米/秒

d——管道的几何尺寸，米

ν——流体运动粘性系数 米²/秒

对于圆形管道的几何尺寸，用内径d代入即可，对于非圆形管道，则用水力半径R的四倍作为其几何尺寸叫作当量直径。水力半径R为管道的断面积F和湿润周界u的比值，即

$$R=\frac{F}{u}\text{ 米}$$

因此圆管的水力半径 $R=\dfrac{\frac{\pi d^2}{4}}{\pi d}=\dfrac{d}{4}$

$\therefore$ 圆的半径 $d=4R$ （5—6）

对于矩形管道的水力半径

$$R=\frac{ab}{2(a+b)}\text{米} \quad (5\text{—}7)$$

式中：a与b各为矩形管道的宽和高，米

矩形管道的当量直径 $d=4R=4\times\dfrac{ab}{2(a+b)}=\dfrac{2ab}{a+b}$ （5—8）

实践与理论证明，不同流体在不同直径的管道中流动，尽管流速亦不同，只要雷诺数相同（反映了力学上的相似），则流动方式相似，故可用雷诺数Re来判断流动方式。流动方式从层流转变到紊流时的雷诺数称为临界雷诺数，此时的速度称为临界速度。由实验求得临界雷诺数为2320，因此当Re<2320时，流体属层流流动，当Re>2320时，流体属紊流流动。在通风及采暖管道中一般均属紊流流动。

第三节　流体流动方程式

一、连续方程式

伟大领袖毛主席教导我们说："普遍性即存在于特殊性之中，所以，当着我们研究一定事物的时候，就应当去发现这两方百及其互相联结，发现一事物内卩的特殊性和普遍性的两方百及其互相联结，发现一事物和它以外的许多事物的互相联结。"物质不灭定律就是具有普遍性的共同规律，它在各门科学领域内，都有它的特定形式表达出来。它在流体力学内所表现出的特殊形式，即为连续方程式。根据物质不灭定律，流体在周界密闭的管辺内作秋定流动时，如图（5—2）所示，从管辺一端流入的质量等于另一端流出的质量，即单位时间内流过管辺每一截百的流体质量是一常数。此即称为连续原理，用连续方程式表示，即 $\rho_1 v_1 F_1 = \rho_2 v_2 F_2$ ＝常数　（5—9）

式中：ρ_1、ρ_2——截百1与2处的流体密度　公斤·秒^2/米^4

F_1、F_2——截百1与2处的横截百积，米^2

v_1、v_2——截百1与2的平均速度，米/秒

如果流体是不可压缩的，即 $\rho_1 = \rho_2$ 连续方程式可简化为

$v_1 F_1 = v_2 F_2$ ＝常数　（5—10）

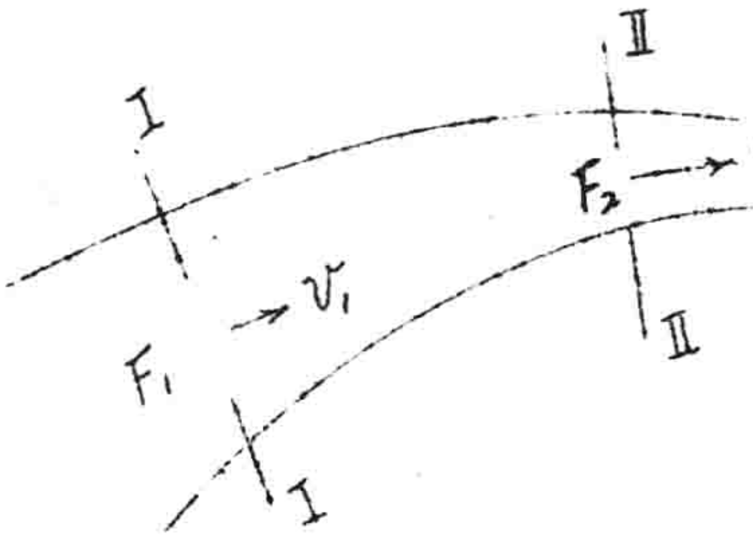

图5—2

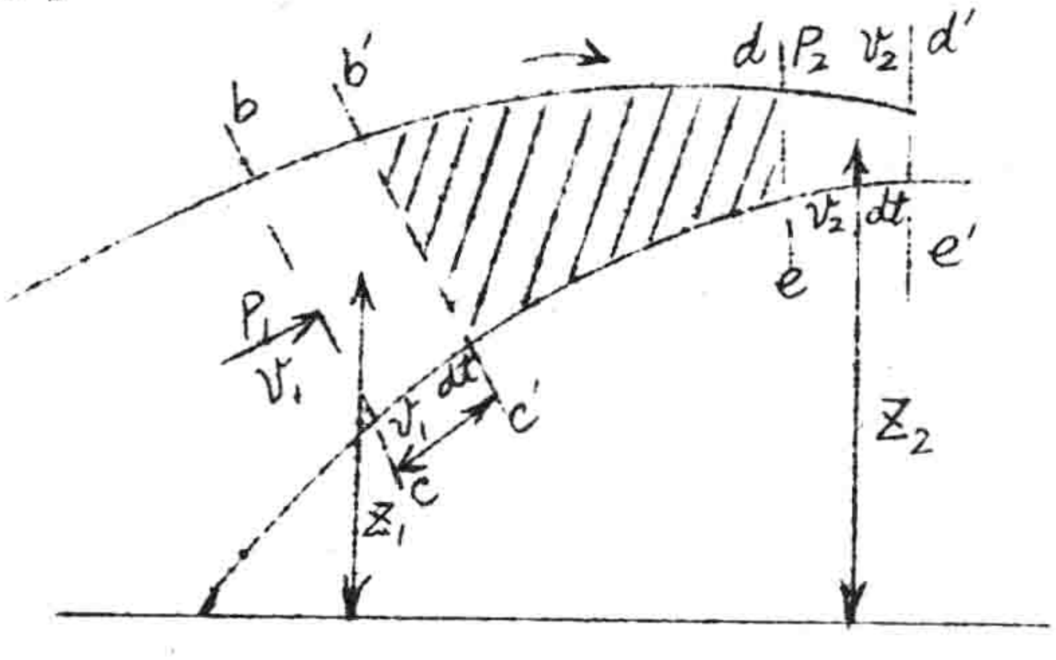

图5—3

二、流体的能量守恒与转化方程式（旧名柏诺理方程式）：

此方程式是能量守恒与转化定律在流体力学方百的应用，能量守恒与转化定律具有普遍指导忌义的定律。无产阶级的革命导师恩格斯曾誉为十九世纪的三大发现之一，柏诺理方程式就是以不可压缩的无粘滞性的理想流体，根据能量守恒定律，导出了压能、位能、动能三者能量关

系式 $$\frac{P_1}{\gamma}+Z_1+\frac{v_1^2}{2g}=\frac{P_2}{\gamma}+Z_2+\frac{v_2^2}{2g}=\text{常数} \qquad (5-11)$$

现用一般功能原理分析推导，见图（5—3）。在稳定流动的理想流体管辺内，截取bcde一段流体为脱离体，作用在其上的压力分别为P_1、P_2，流速为v_1、v_2，截面积大小为A_1、A_2。位置高度为Z_1、Z_2，流动方向如图所示。经过时间dt后，该块流体流至b'c'd'e'。因此须要作功，功＝力×距离。在bc截面上所受到的力P_1A_1因其与流动方向一致，故为正值。在de截面上所受到的力为P_2A_2因其与流动方向相反，故为负值。bc截面在经过dt时间后移动至bc截面，移动距离为v_1dt，须作功的数值为$P_1A_1v_1dt$为正值，de截面在经过dt时间后移动至bc截面，移动距离为v_1dt，须作功的数值为$P_1A_1v_1dt$为正值，de截面在经过dt时间后移动至d'e'截面，移动距离为v_2dt，作功数值为$P_2A_2v_2dt$为负值。因此由压力P_1、P_2作用在bcde段流体流至b'c'd'e'所做的净功值为：

$$P_1A_1v_1dt-P_2A_2v_2dt=P_1V-P_2V$$

由流体流动时的连续原理知辺$A_1v_1dt=A_2v_2dt=V$（体积），又从能量守恒与转化定律知辺，流体由压力所给的功，应当全部转化为流体位能的变化和动能的变化值。从能量的角度上看，这种变化，可看作为bcde（有阴形的部分）不动，而把bbcc这块流体搬至ddee，（其体积都等于V），比较这两块流体上的位能和动能的变化就可以得到结果，位能的变化为$\gamma VZ_2-\gamma VZ_1$，而动能的变化为 $\frac{\gamma}{2g}Vv_2^2-\frac{\gamma}{2g}Vv_1^2$

根据能量守恒与转化定律可知

$$P_1V-P_2V=\gamma VZ_2-\gamma VZ_1+\frac{\gamma}{2g}Vv_2^2-\frac{\gamma}{2g}Vv_1^2$$

消去V，移项即得柏诺理方程式为

$$\frac{P_1}{\gamma}+Z_1+\frac{v_1^2}{2g}=\frac{P_2}{\gamma}+Z_2+\frac{v_2^2}{2g} \qquad (5-12)$$

式中：　γ —— 流体的重度　公斤／米³，

$\frac{P}{\gamma}$ —— 流体的压能或叫压头，又名静压（米）；

静压能量在同一点上各个方向具有相同值。

Z —— 流体的位能或叫位头（米），离地面越高，位能越大。

$\frac{V^2}{2g}$ —— 流体的动能或叫速度头，（米），又名动压、速压，速压具有方向性，即速度的方向。

把（5－12）式乘 γ 后，即可化为

$$P_1+Z_1\gamma+\frac{V_1}{2g}\gamma=P_2+Z_2\gamma+\frac{V_2^2}{2g}\gamma \qquad (5-13)$$

此式内每项单位均为压力单位，公斤／米²，亦即毫米水柱值。

对于水平管道，由于二点位能相等而相消，故式内位能不必列入，可写成

$$P_1+\frac{V_1^2}{2g}\gamma=P_2+\frac{V_2^2}{2g}\gamma \qquad (5-14)$$

以上所述的，无论是压能、动能或位能，均可以互相转化的，流体在截面不变的水平管道内流动时，流速不变，阻力只能由压能来克服。

第四节　流体静压、总压、动压的测定

一、静压的测定：当需要测定风管内空气的静压时，只需垂直于管壁开一小孔，然后用橡皮管接通至u形管微压计上、如图（5－4）所示，风道内的空气静压若大于当地物理大气压力，则将使u形管微压计通大气的另一端水柱升高 $h_{静}$，即为所需测的空气静压（毫米水柱）。

二、总压的测定：当需要测定风管内空气的总压力，对于水平管道来说，只须用一个两端开口的直角弯管伸入风管内，其一端针对着气流运动的方向，另一端则用橡皮管接至u形管微压计上，如图（5－5）所示，则空气的速压与静压均起着影响，使u形管微压计的另一端水柱升高，直至与压力平衡为止，此时水柱升高值 $h_{总}$，即为空

气的总压力（毫米水柱）。如用秭式表示。即运用（5—14）式

$$P_1+\frac{v_1^2}{2g}\gamma = P_2+\frac{v_2^2}{2g}\gamma$$

因为点2是在弯管内，故流速 $v_2=0$，则上式可简化为

$$P_2 = P_1+\frac{v_1^2}{2g}\gamma \qquad (5-15)$$

由式（5—15）可知，点2处的静压力，是点1处的静压力和速压压力的总和，也就是点1处的总压力。而点2处的静压力，即为平衡水柱 $h_{总}$ 的高度值，所以秭式内的 $P_2=h_{总}$。

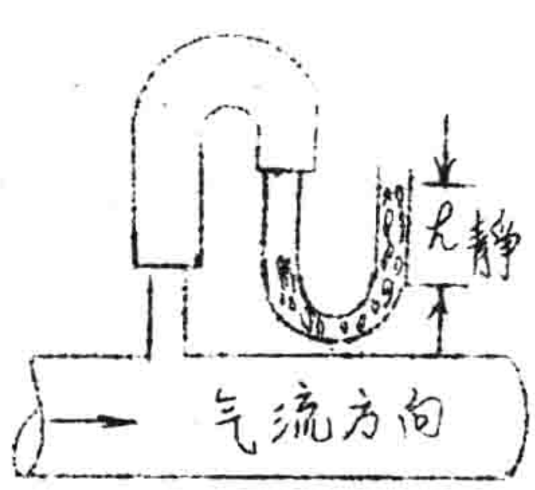

图5—4

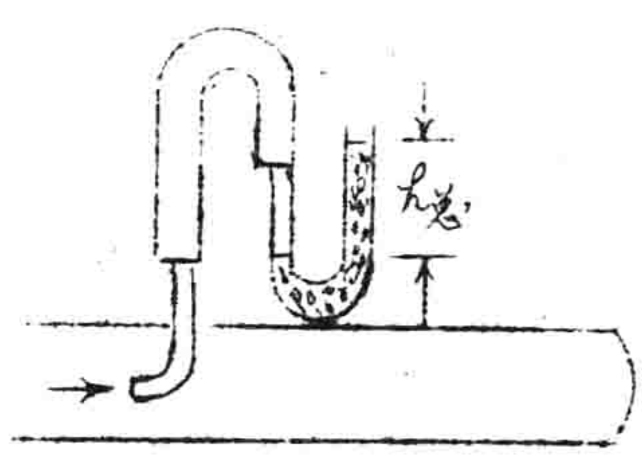

图5—5

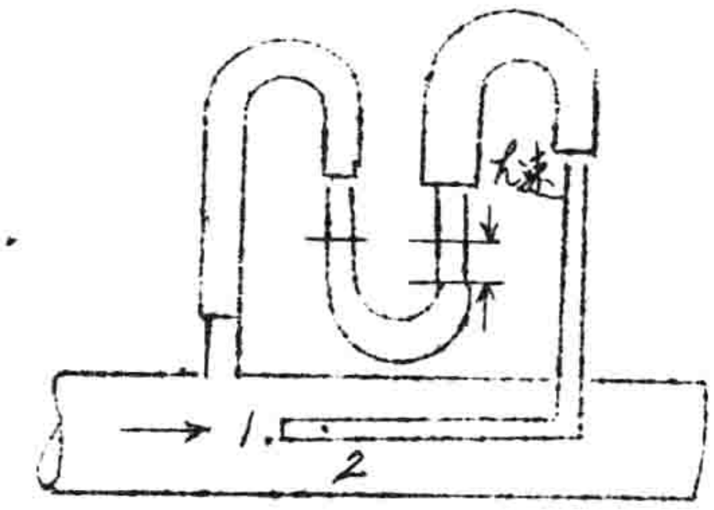

图5—6

三、动压（速压）的测定：当需要测定速压时，则根据前百二种压力测定方法的综合，在水平管辺内，位能不须考虑。则可用下式尻理，总压力＝静压力＋速压力，移项即得

速压＝总压－静压

因此只须用u形管微压计的一端与测定总压力的直角弯管相连接；而另一端与测定静压力的管壁孔口相连接，则u形管微压计内的水柱向一端升高 $h_{速}$，见图5—6，此即所要测定的速压力水柱高度（毫米水柱），如用秭式表示

$$h_{速}=P_2-P_1=\frac{v_1^2}{2g}=\frac{v^2}{2g}\gamma$$

$$v_1=\sqrt{2g\frac{P_2-P_1}{\gamma}}=\sqrt{2g\frac{h_{速}}{\gamma}}\ 米/秒 \qquad (5-16)$$

气压管（旧名比德管）即利用上式原理制成。如图5－7所示。弯管由内外二管组成。内管为测定流体总压，外管壁上有孔，用以测定流体静压（在测定时为了防止速压的影响，故须平行流速方向），把内外二管的尾下，分别用橡皮管引出，接至u形管微压计的两端即可测得流体的速压，再由（5－16）式求得流速。

四、倾斜式微压计：用气压管来测定管中风速时，往往由于其速压太小，用u形管来测定，读数不易准确，产生误差较大，故用倾斜式微压计，如图（5－8）所示，作用原理与u形管相同，只是把u形管一端做成倾斜的玻璃管2，是用来放大测量液柱高度h，而成为l长的刻度，以提高测量的准确性，以α表示管子的倾角，根据三角学上的原理便可求得液百的垂直移动高度：

$$h = l\sin\alpha \qquad (5-17)$$

由上式可见，对于一定的h值，α越小则l越大，微压计的读数就更精确。见表（5－1）

表5－1

倾斜度 α	2°52′	3°49′	4°47′	5°44′	6°22′	7°10′	8°18′	9°36′	11°30′	30
放大倍数 $\frac{l}{h}$	20	15	12	10	9	8	7	6	5	2

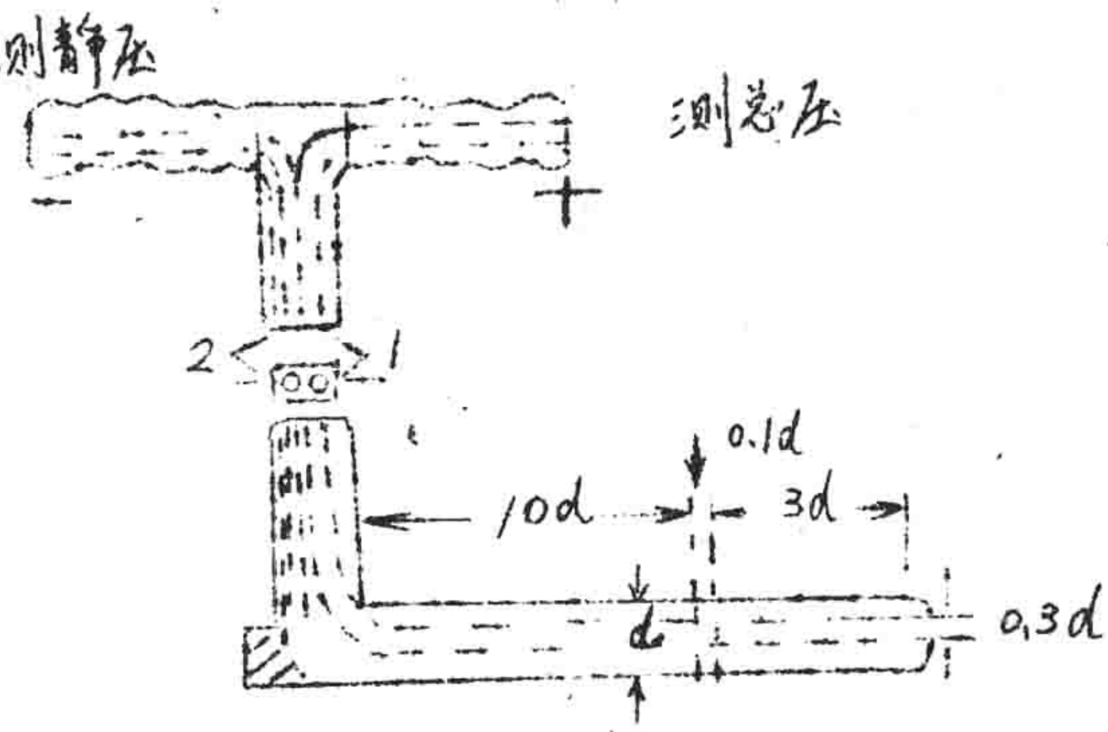

图5－7

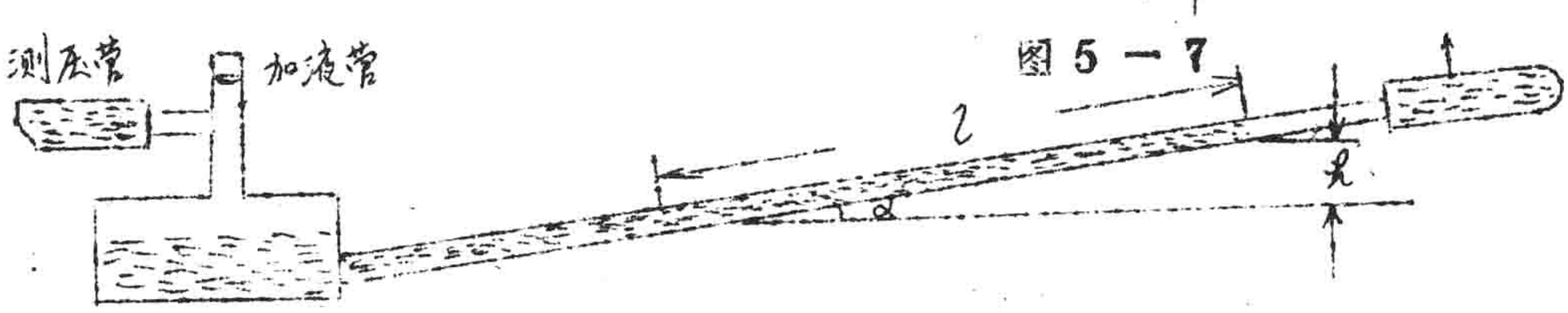

图5－8

u形管另一端以粗大容皿1代替，见图5－8，由于容皿1的横截百积比倾斜管2的断百积大许多倍，因此其中水位之上下变动可以忽略不计。

用u形管进行测量时，u形管径不宜小于6毫米，以减少毛细管现象的形响。

用倾斜式微压计进行测量时，由于斜管用的管径较细，故往往用氿精代替水进行测量，由于氿精与玻璃管附着力小，毛细管现象大为减少，故测定较准确，氿精在管内移动迅速，另外由于氿精重度小，$\gamma_{氿精}=810$公斤／米^{3}故也起到放大读数作用，但应注忌用氿精测得的压力高度$h_{氿精}$须折祘为毫米水柱。有的仪表则往往制成氿精读数直接为毫米水柱数，此可由仪表说明书上知道。

由于在管辺内流动流体速度各点不相等，如图（5—1）所示，因此要求出管辺内平均流速，需各点测定后取其平均值，一般对于u形管来说，须把风管截百分成几个相等的百积如图（5—9a）所示。在每个小百积上测出空气速度v_n，然后再通过下式求平均速度。

$$v_{均}=\frac{\sum_{1}^{n} v_n}{n} \qquad (5-18)$$

在矩形风管内分配百积时，应遵守以下原则：1．各小截百的形状应尽可能近于正方形；2．各小截百的百积不大于0.05米^2；3．小截百的数目不得小于9个。

对于圆形风管，是把圆形风管截百分成为几个百积相等的同心圆圆环，每个圆环测四点，如图（5－9b），各圆环测点距中心的距离可按下式计祘。

$$R_n=R\sqrt{\frac{2n-1}{2m}} \qquad (5-19)$$

式中：R —— 风管半径；

R_n —— 从风管中心到第n测点的距离；

n —— 从风管中心祘起的测点顺序（即圆环顺序）号；

m —— 划分的圆环数。

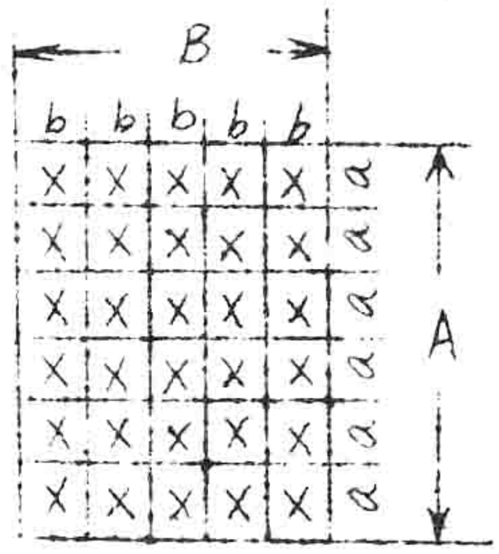

图5－9a

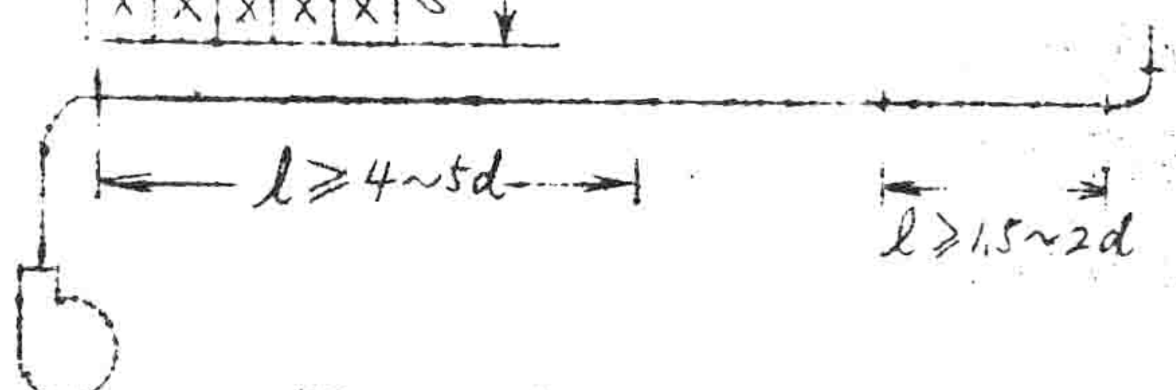

图5－9c

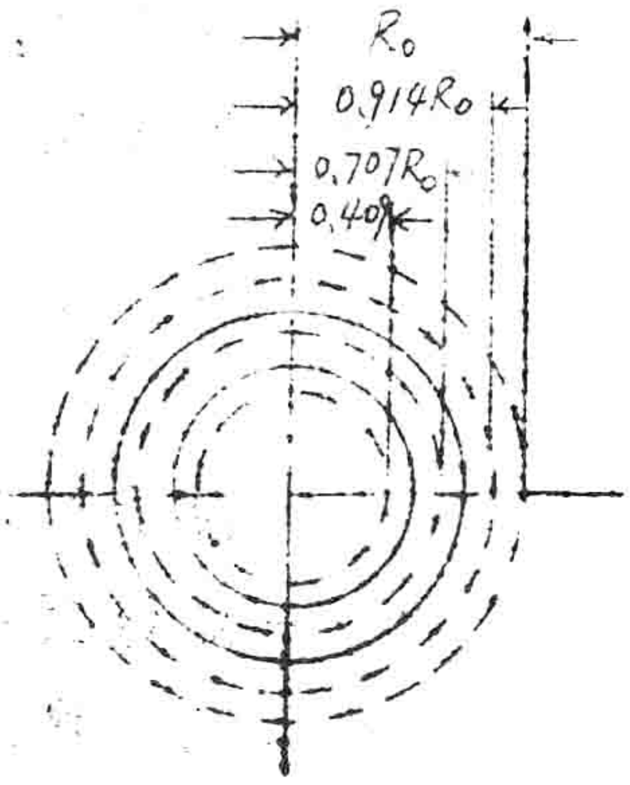

图5－9b

截百所划分的圆环数，决定于风管直径的大小，可按下表(5－2)选用

表5－2

圆形风管直径（毫米）	200以下	200～400	400～700	700以上
圆环个数（个）	3	4	5	5～6

用气压管和微压计来测定风辺内的风量时，应选择合适的测定位置，该处气流均匀而秋定，即应在直管段上，如在测定断百之前（按气流方向）有产生涡流的局卩构件（三通、弯头等），则测定断百应离局卩构件处4～5倍风管直径；如在测定断百之后有局卩构件，则测定断百应距局卩构件1.5～2倍风管直径。如图5－9c。

风辺内空气流动速度的测量还可采用叶轮风速仪和转杯风速仪。

五、叶轮风速仪是用翼轮和计沶机构等组成。翼轮由若干轻的铝翼片制成，测量时使翼轮的旋转百垂直于气流的方向，并注忌转动方向，翼轮的转数通过机械传动方式连接到计数机构上，见图（5－10）。

仪叫的计沶机构有二种：1．内卩自带计时装置，可以直接读出风速（米/秒或米/分）的，称自记叶轮风速仪；另一种是不带计时装置的，使用时须另备秒表的，称不自记叶轮风速仪。

不自记叶轮风速仪，在使用时，先关闭风速仪的开关并将风速仪（图5－10）指针的戽始读数记录下来，然后将风速仪放在选定的测

点上，使风速仪的表百垂直于气流的方向，转动数分钟后，当风速仪翼轮回转秋定时，同时打开风速仪的开关和秒表，经一定时间(约一分钟)后，再同时关闭，读得风速仪的读数和秒表所记的时间，即可计祘风速。

$$风速=\frac{测定后读数-孱始读数}{测定所用的时间}\ 米/分$$

由于仪口本身的惰性和机械摩披力等孱因，风速仪指指针读数不一定能反映出真实的空气流速，因此由上式求得空气流速还必须根据风速仪的校正曲线加以多正。

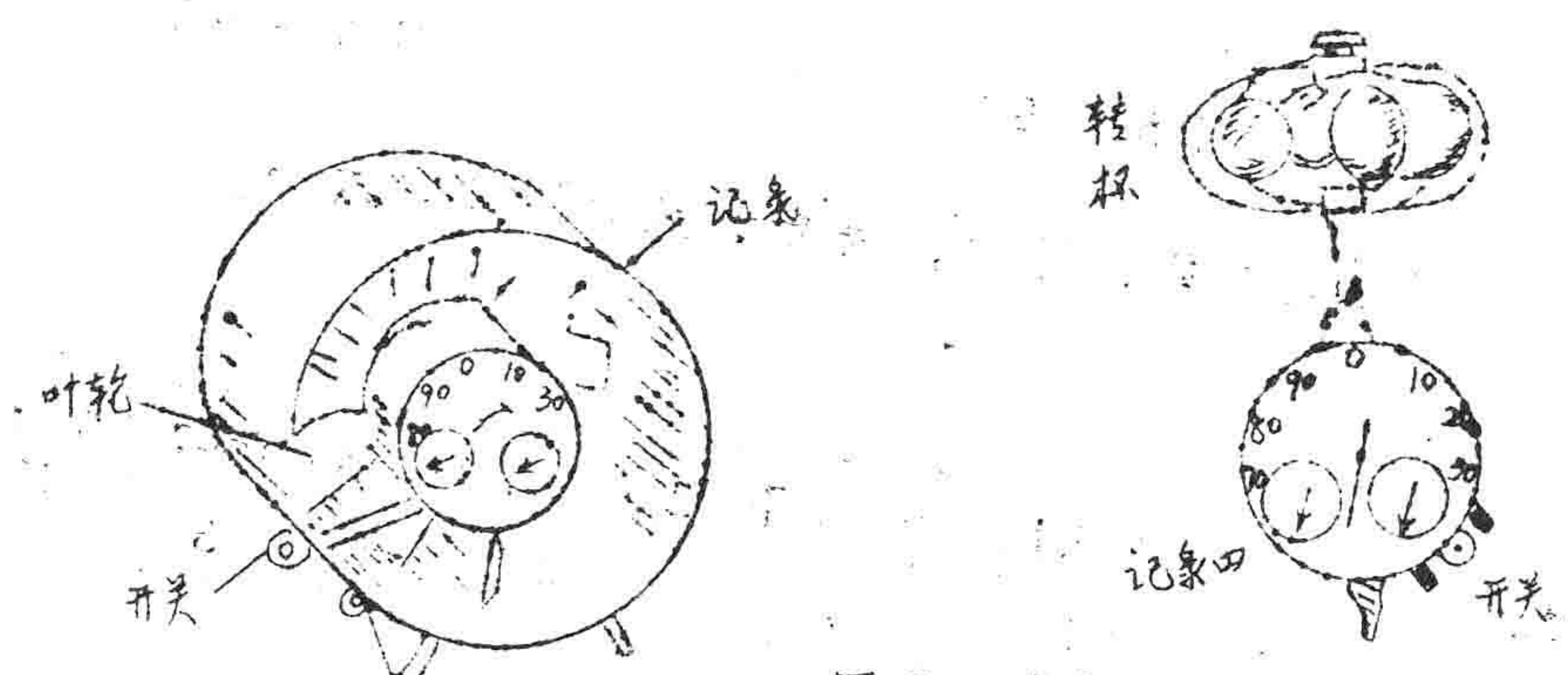

图5-10

叶轮风速仪，使用前须经风筒校正或和已校正过的叶轮风速仪互校。

一般叶轮风速仪的翼片容易弯曲，测量风速的范围为0.5～10米/秒。再精密一些的只适用于测量0.3～5.0米/秒范围内的风速。如果测量的风速较大，测翼片就要受损和弯曲。

六、转杯风速仪 其孱理与仪轮风速仪相似，只是它的翼轮具有四个(或三个)半圆球形的杯形叶片。它们的凹百朝向一方，装置在垂直于气流方向的轴上，并通过机械传动方式连接到计数机构上。见图(5—11)转杯风速仪使用方法与叶轮风速仪相同，由于它的结构较牢固，所以测量风速范围为1～20米/秒。

第五节 实际流体在管道内流动时的阻力计算

实际流体在管道内流动时，因受到阻力而损耗能量，这些阻力是1. 由于粘滞性和管壁粗糙度所引起的流体质点与管壁间的阻力，叫摩擦阻力；2. 在流体流动路线中遇到各种障碍物而产生的旋涡运动和分子间的碰撞所造成的阻力，叫局部阻力。下面分别阐述这二种阻力的计算方法：

1. 摩擦阻力的计算　流体在截面积与形状不变的管道内流动时，每单位长度的摩擦阻力R，可按（5—20）式进行计算：

$$R_{摩}=\frac{\lambda}{4R}\ \frac{v^2}{2g}\gamma=\frac{\lambda}{d}\ \frac{v^2}{2g}\gamma\quad 毫米水柱/米 \qquad (5-20)$$

式中：λ —— 摩擦阻力系数

v —— 平均流速　米/秒

g —— 重力加速度　米/秒^2

γ —— 流体的重度　公斤/米^3

R —— 水力半径　米

d —— 圆管直径、或矩形管的当量直径　米

式内摩擦阻力系数λ，是由旧名雷诺数和管壁的粗糙度所决定的。λ值可由实验求得，几种常用管道材料的绝对粗糙度K列于下表。

材料的绝对粗糙度K

材料名称	绝对粗糙度（毫米）
镀锌钢板，薄钢板	0.1
胶合板、木板、石棉板、石膏板	1
混凝土、炉渣混凝土	1.5
新钢管或带有法兰盘的铸铁管	0.1～0.2
旧熟铁管或铸铁管	0.5～2.0
表面光滑的砖风道	4

流体在层流流动时，其摩按阻力系数λ可用下式计标

$$\lambda = \frac{64}{Re} \tag{5-21}$$

流体在紊流流动时，其摩按阻力系数λ须分二种情况考虑：

(1) 当管坣在水力学上属于光滑管，即近坣层流层（通称边界层）的厚度大于管坣的绝对粗糙度，此时 $Re < 26.98(\frac{d}{k})^{8/7}$ 或用 $Re < 100000$ 则可用（5—22）式

$$\lambda_{光} = 0.3164Re^{-0.25} \tag{5-22}$$

(2) 当管坣在水力学上属于粗糙管，即边界层的厚度小于管坣的绝对粗糙度，此时

$$Re > 26.98(\frac{d}{k})^{8/7} \qquad 或用\ Re > 100000$$

则可用（5—23）式

$$\lambda_{粗} = 0.111(\frac{k}{d})^{0.25} \tag{5-23}$$

一般近似计标中，可采用 $\lambda = 0.02$。

在通风工程中，为了计标方便，有专门适用于计标空气管辺的列线图表，见表（5—3）。它是用（5—22）式的摩按阻力系数 $\lambda_{光}$ 代入（5—20）式摩按阻力公式内进行计标，绘制成图表的。

$$R_{摩} = \frac{\lambda}{d}\ \frac{v^2}{2g}\gamma = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}\ \frac{l}{d}\ \frac{v^2}{2g}\gamma$$

用 $Re = \frac{vd}{\nu}$ 代入得

$$R_{摩} = \frac{0.3164\nu^{0.25}\ v^{1.75}}{d^{1.25}\ 2g}\gamma \quad 毫米水柱/米$$

如以标准空气（$t = 20°C$ $P_{大} = 760$ 毫米水银柱 $\varphi = 50\%$）时的参数代入，即此时的空气重度 $\gamma = 1.2$ 公斤/米³，运动粘性系数 $\nu = 0.000015$ 米²/秒，得

$$R_{摩} = 6.78\frac{v^{1.75}}{d^{1.25}}$$

式中：d —— 管边的直径　毫米

　　　v —— 空气流速　米／秒。

上式是制订此列线图表的基本公式。从上百的推导可知，这幅列线图表是应用于空气在光滑管边内作紊流流动时的阻力图标表，如为粗糙管，则尚需乘一多正系数。由（5—20）式可知，光滑管与粗糙管摩按阻力的差异，仅在于摩按系数λ的不同，故这一多正系数 C_k 值可由下式确定：

$$C_k = \frac{\lambda_{粗}}{\lambda_{光}} = \frac{0.111\left(\frac{k}{d}\right)^{0.25}}{\frac{0.3164}{Re^{0.25}}} = 5.63\left(\frac{kv}{1000}\right)^{0.25}$$

$$= (kv)^{0.25}$$

$$\therefore \quad \lambda_{粗} = C_k\lambda_{光} = \lambda_{光}(kv)^{0.25}$$

同理　　$R_{粗} = R_{光}(kv)^{0.25}$　毫米水柱／米　　　（5—24）

式中：$R_{粗}$ —— 粗糙管边每单位长度的摩按阻力，毫米水柱／米；

　　　$R_{光}$ —— 光滑管每单位长度的摩按阻力，毫米水柱／米；

　　　k —— 绝对粗糙度　毫米；

　　　v —— 管边中的空气流速　米／秒。

对于矩形管边，公式（5—20）中的d，须用等风速当量直径，由式（5—8）可知，如矩形管边的宽度和高度为a和b，则其等风速当量直径为

$$d_{速} = \frac{2ab}{a+b}$$

在管边长 l 米时的摩按阻力 $h_{摩}$，可用下式计标：

$$h_{摩} = R_{摩} l = \lambda\frac{l}{d}\frac{v^2}{2g}\gamma \text{ 毫米水柱}$$

例：有一钢筋混凝土风边，长10米，横断百积为1米× 0.5米，通过风量为9000米³／时，求通过此风边的摩按阻力。

解：矩形风道的当量直径 $d = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2\times1\times0.5}{1+0.5} = 0.667$ 米

风道内空气流速 $v = \frac{9000}{3600\times0.5\times1} = 5$ 米/秒

求风道内空气流动的雷诺数 $Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{5\times0.667}{14.4\times10^{-6}}$

$= 231000$

远大于2320故属于紊流流动。同时管道内空气流动的Re=231000，远大于100000，所以属粗糙管。

由图表（5－3）的d标尺找出$d_{\text{运}}$ = 667毫米的点与v标尺上v = 5米/秒的点连接起来，并延长该线使与$R_{\text{光}}$的标尺相交得$R_{\text{光}}$= 0.0325毫米水柱／米。由于此风道为粗糙管故需用公式（5－24）。

$$R_{\text{粗}} = R_{\text{光}}(kv)^{0.25}$$

钢筋混凝土风道的绝对粗糙度k为1.5毫米。因此

$$kv=1.5\times5=7.5$$

由图表（5－3）可查得

$$(kv)^{0.25} = (7.5)^{0.25} = 1.65$$

因此，$R_{\text{粗}} = R_{\text{光}}(kv)^{0.25} = 0.0325\times1.65 = 0.054$ 毫米水柱/米。

风道全长l等于10米的摩擦阻力应为

$$h_{\text{摩}} = R_{\text{阻}}\cdot l = 0.054\times10 = 0.54 \text{ 毫米水柱}$$

2．局部阻力的计算　流体在管道内流动时，经过弯头，管道截面的突然改变，以及三通等特殊部件，由于涡旋运动和撞击等所产生的局部阻力，其数值可由下式计算：

$$h_{\text{局}} = \zeta\frac{v^2}{2g}\gamma \quad \text{毫米水柱或公斤／米}^2 \qquad (5-25)$$

式中：$h_{\text{局}}$——局部阻力，毫米水柱。

ζ——局部阻力系数。