

通風管道計算

張 劍 編

科技衛生出版社

通风管道計算

張 劍 編

科技卫生出版社

內 容 提 要

本書以苏联馬克西莫夫教授所著“通风风道計算法”一書为基础补充公式的推导,理論的闡述,例題的詳解,并改正了原書中的一些錯誤計算以便初学。計分空气在风道中的流动,摩擦阻力,局部阻力,通风管網的設計,特殊风道計算,特性曲綫和通风机,支管流量变更的风道計算等七章,另附計算用图表。

通 风 管 道 計 算

編 者 張 劍

*

科 技 卫 生 出 版 社 出 版

(上海南京西路 2004 号)

上海市書刊出版业营业許可証出 093 号

科學出版社上海印刷廠 新華書店上海發行所总經售

*

統一書号:15119·846

开本 850×1168 1/32·印張5.6/16插頁5·字數 133,000

1958 年 9 月第 1 版

1958 年 9 月第 1 次印刷·印數 1—4,000

定價:(10) 1.10 元

前 言

目前在國內有关通风管道計算方面的書籍已有兩本，一本是苏联馬克西莫夫教授著的“通风风道計算法”的中譯本，一本是李文堯同志編著的“通风管道設計”。就內容而論，二者基本上是一致的。在“通风风道計算法”一書中，著者馬克西莫夫教授為讀者編入了許多寶貴的通风管道計算所需的資料，而且介紹了這方面理論和計算公式等。但是在理論的闡述上是不夠詳盡的，而對於公式的推演過程更是過於簡單，這可能是由於在苏联有关這方面的書籍比較多的緣故。可是針對我國目前情況來看，由於有关書籍還很少，這就不可能不使讀者在閱讀時感到困難。又由於在該書的許多例題中往往發生數字上的錯誤，而這些數據的推演過程又沒有列出，就很容易使讀者鬧不清是自己對計算過程理解不夠呢，還是書上的錯誤。這樣對於初學的同志就更其困難了。至於“通风管道設計”一書存在的錯誤和缺點是比較更多一些，在此處就不一一詳述了。正由於上述原因促使本人編寫本書，就其內容來說與“通风风道計算法”基本上是相同的，這是由於該書所介紹的內容仍是無可非難的，而且在风道計算方面不通過實驗和研究是不可能提出什麼新的理論和公式，因而在內容上本書不可能作較大的修改。但是在公式的推導和舉例方面都作了比較詳盡的補充，以便讀者作實際工作時參考。

最後應該聲明的就是由於本人水平所限，本書中可能存在許多錯誤和缺點，希望讀者提出寶貴的意見。

張 劍 於 1958 年 1 月

目 录

第一章 空气在风道中的流动	1
1-1 流体在管道中流动时的能量损失	1
1-2 空气在风道中流动时的特征	3
第二章 摩擦阻力	8
2-1 圆形光滑管风道中摩擦阻力的计算	8
2-2 圆形粗糙管风道中摩擦阻力的计算	9
2-3 矩形风道中摩擦阻力之计算	11
2-4 在简单管网中的压力分布	15
第三章 局部阻力	19
3-1 弯管与扩大管等的局部阻力	19
3-2 分岔管的局部阻力	30
3-3 减少局部阻力的方法	40
第四章 通风管网的設計	45
4-1 在通风管网中的压力分布	45
4-2 通风管网的設計步骤与方法	50
4-3 带有侧孔的风管及侧孔的计算	63
第五章 几种具有特殊条件之风道的计算	85
5-1 等量分送的分流管之基本公式	85
5-2 干管截面不变的分流管	89
5-3 各支管截面相等的分流管	102
第六章 通风管道的特性曲线与通风机的选择	112
6-1 通风管道的特性曲线	112
6-2 通风机的特性曲线与工作点	113
6-3 通风机的并联与串联	118
6-4 通风机的调整	121
第七章 支管流量变更的风道计算	123
附录 通风管道计算用之各种图表	142

第一章 空气在风道中的流动

1-1 流体在管道中流动时的能量损失

当流体沿管道运动时,流体的能量发生变化,其中一部分是由于位能的改变,另一部分是用以克服各种阻力。这些阻力基本上可以分为两种:一种是由于流体与管壁间的摩擦而产生的,称为“摩擦阻力”。另一种是由于流体经过管网的某些构件时而产生的,称为“局部阻力”。

根据流体力学的研究,我们知道如果管道在全长中的截面不变,而且流体的流量也不变,则由于摩擦阻力而产生的压力损失 ΔH_{mp} (公斤/公尺² 或公厘水柱) 可按下列式计算:

$$\Delta H_{mp} = \frac{\lambda}{4R} \frac{w^2 \gamma}{2g} l \quad (\text{公厘水柱}) \quad (1-1)$$

式中: λ ——摩擦阻力系数(无因次);

w ——流体平均速度(公尺/秒);

l ——管道长度(公尺);

γ ——流体重度(公斤/公尺³);

$g=9.81$ ——重力加速度(公尺/秒²);

$R = \frac{F}{P}$ 水力半径(公尺);

F ——管道截面积(公尺²);

P ——湿周,即流体与管壁接触到的周长;对于风道即全部周边(公尺)。

由于局部阻力而产生的压力损失 ΔH_{mc} 可按下列式计算:

$$\Delta H_{mc} = \zeta \frac{w^2 \gamma}{2g} \text{ (公厘水柱)} \quad (1-2)$$

式中: ζ —局部阻力系数(由实验决定)(无因次);

$$\frac{w^2 \gamma}{2g} = H_d \text{—动压(公厘水柱)}。$$

每立方公尺不可压缩的流体①沿管道作稳定流动②时,所产生的总能量损失可以根据伯诺里方程式决定。对于任意二个垂直于流线轴③的截面1及2,此方程式可表示如下:

$$H = (H_{cm1} - H_{cm2}) + (H_{d1} - H_{d2}) + (Z_1 - Z_2) \gamma \text{ (公厘水柱)} \quad (1-3)$$

式中: H_{cm} —静压(公厘水柱);

H_d —动压(公厘水柱);

$(Z_1 - Z_2) \gamma$ —一立方公尺流体由截面1流达截面2时位能的改变(公厘水柱);

Z —截面1及2对于任意选定的平面相距的高度(公尺)。

下标1及2是与截面1与2相对应的。

由前所述:

$$H = \Delta H_{mp} + \Delta H_{mc} + (Z_1 - Z_2) \gamma \text{ (公厘水柱)} \quad (1-4)$$

上述的公式(1-1)(1-2)(1-3)及(1-4)适用于水道,蒸汽管道及风道。

但在每个个别情况下,往往都有其特殊的计算方法。

对于室外水道而言,一般地说,管道较长而构件较少,因而摩擦阻力是主要的,而局部阻力只略占10%,因而也就时常以附加

① 不可压缩的流体是一种假想的流体,它在流动过程中体积没有变化,对于空气在流过风道的条件下,由于压力变化而对其体积的改变是很小的。因而可以看成是不可压缩的。

② 稳定流动系指流动时流动情况不随时间而改变,详见有关流体力学的书籍。

③ 流线系流体质点运动的轨迹,流线轴是所有流线的总合。

的方式归并在摩擦阻力的计算中去。

对于蒸汽管道,尤其是高压蒸汽管道不仅是局部阻力较大,而且必须考虑到压力变化时蒸汽重度的改变。因而它的计算是比较复杂一些。

1-2 空气在风道中流动时的特征

对于风道,局部阻力占着极其主要的部分,在大多数的情况下由于摩擦阻力而产生的压力损失比起由于局部阻力而产生的压力损失要小得多。同时管网上构件的稍许改变往往都可以使空气流过时的局部阻力发生很大的出入。因而在风道计算中局部阻力部分是占着很大比重的,又因为局部阻力的计算是比较困难的,因而风道计算是比较麻烦的。

现在我们根据图 1-1 来研究空气在风道中位能的变化,在图 1-1 中通风机设备将 V 公尺³/小时的空气举高 $(Z_2 - Z_1)$ 时,同时必定有等量的空气沿相反的方向移动(如图中虚线所示),也就是相应地有 V 公尺³/小时的空气降低了 $(Z_2 - Z_1)$,因而产生了一个经过管外大气的独立循环网道。

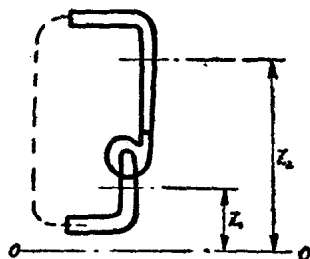


图 1-1 经过管外大气的独立风道管网

这就说明了这里不能形成由于一定量的空气提高到一定高度而产生的位能。

因此对于风道来说,公式(1-3)及(1-4)应表示如下:

$$H = (H_{cm1} - H_{cm2}) + (H_{o1} - H_{o2}) \quad (\text{公厘水柱}) \quad (1-5)$$

$$H = \Delta H_{mp} + \Delta H_{mc} \quad (\text{公厘水柱}) \quad (1-6)$$

也就是当空气流过风道时其总能量的改变只包括两部分,一部分是静压的改变;一部分是动压的改变,用来克服摩擦阻力与局部阻力。

流体在管道中流动时的情况可以是“层流”或者是“紊流”。

所謂“层流”是指流体呈显互不混杂的流綫而运动。而“紊流”的流綫束是互相混杂的,也就是流体的运动其軌迹是不稳定的。

为了确定流体是作那一种流动,我們可以利用雷諾数 Re 来加以确定。

对于任意形狀截面之管道:

$$Re = \frac{4 R \cdot w}{\nu} \text{ (无因次)} \quad (1-7)$$

对于圓形截面之管道:

$$Re = \frac{d \cdot w}{\nu} \text{ (无因次)} \quad (1-8)$$

式中: w —空气速度(公尺/秒);

d —风道直徑(公尺);

R —水力半徑(公尺);

ν —动力粘滯系数(公尺²/秒)。

空气的动力粘滯系数之数值,根据苏联阿舍教授編著之課本上資料,載于表 1-1 中

表 1-1

空 气 温 度 (°C)	动 力 粘 滯 系 数 ν (公尺 ² /秒)
-20	0.0000113
-10	0.0000121
0	0.0000130
10	0.0000139
20	0.0000157
40	0.0000170
60	0.0000193

由此可將上述各值代入公式(2-7)或(2-8)即可求得流体在該情况下的雷諾数。而对于圓形截面的风道,当空气温度在 $+11^{\circ}\text{C}$

左右时 Re 可由附录中附图 1 查得。

根据流体力学可知当 $Re < 2300$ 时, 流体的流动一定是层流。而当 $Re > 2300$ 时, 即会发生紊流情况, 而只是在个别的特殊情况下 Re 增达 8000 时仍能保持层流, 但这种情况是极不稳定的。因此我们仍以 $Re = 2300$ 作为分界的条件。

雷诺数的大小不仅决定流动的一般性质, 而且它本身又能确定风道截面上各点的速度分布情况(即速度场)。

在图 1-2 中表示出在圆管中对于各种不同雷诺数之速度分布图。图中横坐标表示流束中各个点对管壁距离与风道半径之比 $\left(\frac{S}{R_0}\right)$ ^①, 纵坐标表示流束中各点速度与最大速度(发生在风管中心)之比 $\left(\frac{w_i}{w_{最大}}\right)$ 。

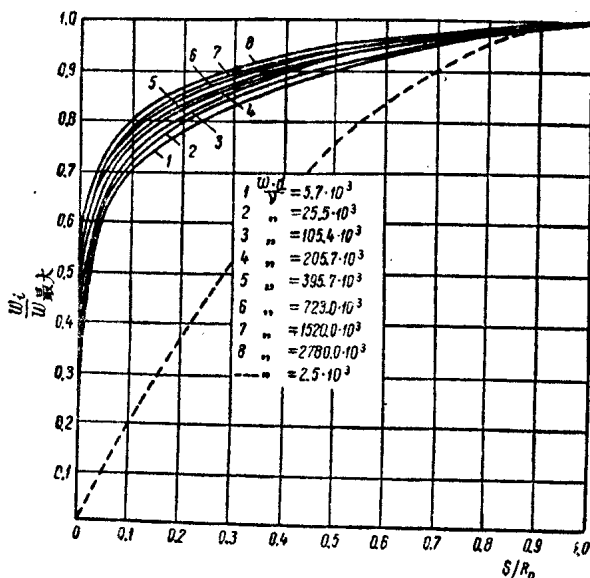


图 1-2 圆形风道中速度场的分布图

① 在马克西莫夫教授所著“通风风道计算法”中, 图 1-2 中横坐标表示流束中各点与管轴的距离, 以半径的比 $\frac{R}{R_0}$ 表示之, 本书作者疑代号有错误故修改为 $\frac{S}{R_0}$ 。

运动于风道中的空气流量可按下式求得:

$$V = 3600 w F \text{ (公尺}^3\text{/小时)} \quad (1-9)$$

式中: w ——风道横截面中的平均速度(公尺/秒);

F ——风道横截面的面积(公尺²)。

最大速度与平均速度之比值 $\frac{w_{\text{最大}}}{w}$ 也决定于雷诺数 Re , 其关系表示于图 1-3 中

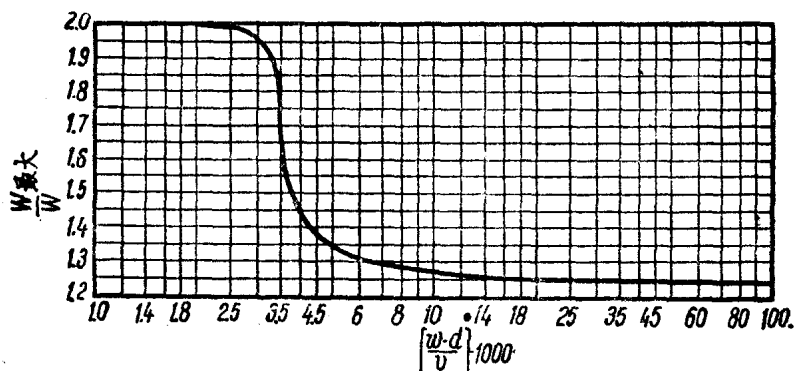


图 1-3 $\frac{w_{\text{最大}}}{w}$ 与 Re 之关系图

根据流体力学方面一系列的实验与研究的結果, 可以知道公式 (2-1) 中的摩擦阻力系数 λ , 主要也决定于流体运动的特性(即 Re 数)与管壁的粗糙程度。

绝对粗糙度 k (见图 1-4) 是指管壁表面上各个小凸出的粗糙部分的平均高度(沿半径方向并以公厘为單位)。绝对粗糙度与管道直径(以公厘为單位)之比值称相对粗糙系数 n 。

$$n = \frac{k}{d} \text{ (无因次)} \quad (1-10)$$



图 1-4 风道管壁的绝对粗糙度

如果符合下式条件的,从流体力学的观点来看,便是光滑管。

$$n \leq \frac{30}{Re^{0.875}} \quad (1-11)$$

而符合下式条件的,则是粗糙管。

$$n > \frac{30}{Re^{0.875}} \quad (1-12)$$

图 1-5 表示了摩擦阻力系数 λ 与雷诺数 Re 及相对粗糙度 n 之间的关系

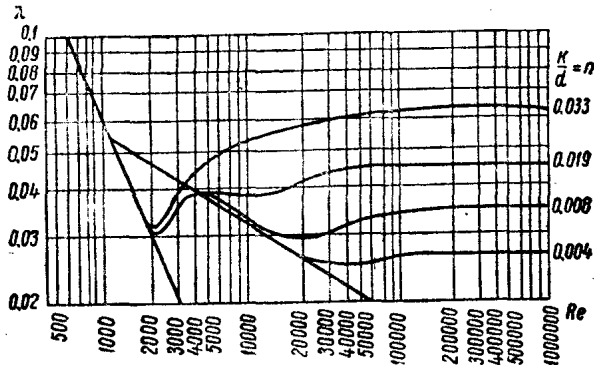


图 1-5 λ 与 Re 及 n 之关系

由图 1-5 中可见:

当流体运动是层流时 (即 $Re < 2300$):

摩擦阻力系数 λ 完全与管壁的粗糙度无关, 该时

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (\text{无因次}) \quad (1-13)$$

当 $Re < 100000$ 之光滑管其摩擦阻力系数 λ 可按下列经验公式计算:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (\text{无因次}) \quad (1-14)$$

对于粗糙管及 $Re > 100000$ 之光滑管, 摩擦阻力系数 λ 基本上只是与相对粗糙度有关, 而按照实际计算所能达到的准确范围之内, 可以采用苏联 Б. Л. Пифрикосо 教授的近似公式。

$$\lambda = 0.111 \left(\frac{k}{d} \right)^{0.25} \quad (\text{无因次}) \quad (1-15)$$

第二章 摩擦阻力

2-1 圓形光滑管風道中摩擦阻力的計算

由于風道制作上的簡易和材料的節省等原因，我們時常采用圓形截面的風道。為此我們首先按照下式求出圓形截面的水力半徑。

$$R = \frac{F}{P} = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{\pi d} = \frac{d}{4} \text{ (公尺)}$$

代入公式(1-1)即得：

$$\Delta H_{mp} = \frac{\lambda}{d} \frac{w^2 \gamma}{2g} l \text{ (公厘水柱)} \quad (2-1)$$

令

$$\frac{\lambda}{d} \frac{w^2 \gamma}{2g} = R_m \text{ (公厘水柱/公尺)} \quad (2-2)$$

則 R_m 數值即是圓形截面風道中每公尺長的摩擦阻力。

代入公式(2-1)可得：

$$\Delta H_{mp} = R_m l \text{ (公厘水柱)} \quad (2-3)$$

應該注意的是公式(2-1)及(2-3)只适用于下列情况，即在一定長度的風道中 λ 、 w 及 d 的數值保持不变。而这样一定長度的風道称为“管段”。其基本定义是在此全長中流經的空氣量及風道管壁的粗糙度均保持不变。

为了确定因摩擦阻力而产生的压力損失通常采用公式(2-3)。式中的 R_m 在实际的設計計算中通常不是用公式(2-2)計算的。而在根据該公式所繪制成的綫解图上查得。既然这种綫解图是根据

公式(2-2)繪制的,而公式(2-2)中包含有摩擦阻力系数 λ ,由前一章的分析我們已知 λ 是与风道的条件有关的。为此考虑到最常用鋼板制成的风道多属于光滑管,而且雷诺数大多不超过 100000。因而这种綫解图系对应公式(2-2)并根据公式(1-14)的条件而繪制的。所以这个綫解图直接只适用于圆形光滑管。如风道截面不是圆形,以及不是光滑管时,只能在经过必要的换算之后才能加以利用。

这个綫解图如附录中附图 2 所示。在这图中含有五条刻度綫: 刻度綫 I 列出了空气流量 V (公尺³/小时)。刻度綫 II 为空气速度 w (公尺/秒)及动压 H_0 (公厘水柱)。刻度綫 III 为风道直径 d (公厘),在这条刻度綫的左侧标有适用于整块鋼板制成的圆形风道的直径,以便在决定风道管径时的参考。刻度綫 IV 为每長一公尺风道的摩擦阻力 R_m (公厘水柱)。刻度綫 V 是为了將局部阻力转换为相当长度之摩擦阻力而用的等量长度(当局部阻力系数等于 1 时的公尺数)。

为了具体地说明运用該綫解图的方法,举例如下:

例 2-1 今有一鋼板制成之圆形风道其直径 $d=495$ 公厘,空气流量 $V=6000$ 公尺³/小时,問每公尺的摩擦阻力、速度、动压、局部阻力的等量长度各多少?

解: 鋼板制成之风道可看为光滑管(膠合板制成的也可看成光滑管)又是圆形截面,因此可以直接运用附图 2。首先在刻度綫 I 上找出 $V=6000$ 公尺³/小时处一点,在刻度綫 III 上又找出 $d=495$ 公厘一点,过此两点引直綫并延長之,与刻度綫 IV 相交求得 $R_m=0.137$ 公厘水柱,与刻度綫 II 相交求得 $w=9.0$ 公尺/秒及 $\frac{w^2\gamma}{2g}=4.8$ 公厘水柱,与刻度綫 V 相交得 $l_s=35$ 公尺。

2-2 圆形粗糙管风道中摩擦阻力的計算

在上一节中我們已研究了圆形光滑管风道中摩擦阻力的計算

而且知道在具体計算时是可以利用綫解图。对于圓形粗糙管同样也可以利用这个綫解图的, 只須进行必要的換算, 換算的方法和原理我們可以由公式(2-3)推导如下; R_m 与 λ 的数值是正比的关系, 即:

$$\frac{R_{m\text{粗}}}{\lambda_{\text{粗}}} = \frac{R_{m\text{光}}}{\lambda_{\text{光}}}$$

$$\text{則} \quad R_{m\text{粗}} = \frac{\lambda_{\text{粗}}}{\lambda_{\text{光}}} R_{m\text{光}} \quad (2-4)$$

式中: 下标“粗”与“光”分别与粗糙管及光滑管相应。

用公式(1-14)及(1-15)代入比值 $\frac{\lambda_{\text{粗}}}{\lambda_{\text{光}}}$ 可得:

$$\frac{\lambda_{\text{粗}}}{\lambda_{\text{光}}} = \frac{0.111 \left(\frac{k}{d} \right)^{0.25}}{\frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}} \quad (2-5)$$

將 Re 所代表的数群 d 、 w 、 ν 代入上式, 并取 $\nu = 0.000015$ 公尺²/秒 (相当于空气温度为 15~20°C 时^①) 并注意到公式(1-15)中 $\frac{k}{d}$ 的單位是一致的, 其中绝对粗糙度 k 在习惯上是采用公厘为單位, 因而 d 的單位也应是公厘。但是为了化簡公式(2-5)則 d 的單位又必須与公式(2-5)中分母 Re 中 d 一致而采用公尺。因此为了在化簡后的公式中 k 值的單位仍取公厘則在代入公式(2-5)时必须先除以一干, 即得到:

① 如空气在风道运动时其温度超出 15 ~ 20°C 的范围时, 应根据空气重度的变化將摩擦阻力损失和局部阻力损失折算如下:

$$H = H_{m\frac{\gamma}{\gamma_m}} (\text{公厘水柱})$$

式中: H_m —为由綫解图上查得之阻力 (并加上計算求得之局部阻力), $\gamma_m = 1.2$, H 及 γ 是該温度下之阻力及空气重度

实际上温度变化不大时, 这项折算是可以忽略的。

$$\begin{aligned}
 \frac{\lambda_{\text{粗}}}{\lambda_{\text{光}}} &= \frac{0.111(0.001k)^{0.25} \text{Re}^{0.25}}{0.3164d^{0.25}} \\
 &= \frac{0.111(0.001)^{0.25} k^{0.25} d^{0.25} w^{0.25}}{0.3164d^{0.25} d^{0.25}} \\
 &= \frac{0.111(0.001)^{0.25} k^{0.25} w^{0.25}}{0.316(0.000015)^{0.25}} \\
 &= k^{0.25} w^{0.25} = (kw)^{0.25} \quad (2-6)
 \end{aligned}$$

$$\text{則} \quad R_{m\text{粗}} = (kw)^{0.25} R_{m\text{光}} \quad (\text{公厘水柱/公尺}) \quad (2-7)$$

式中: k ——绝对粗糙度(公厘);

w ——速度(公尺/秒)。

由公式(2-7)可知, 对于粗糙管我們可以先按光滑管計算出 $R_{m\text{光}}$ (也就是由附图2中查得之 R_m) 然后乘以修正数 $(kw)^{0.25}$ 即可。为了計算的方便在附图2的上方已附有 (kw) 与 $(kw)^{0.25}$ 的关系曲线以及常用的管道材料之绝对粗糙度 k 值。

例 2-2 一圆形矿渣混凝土制作之风道, 其他条件均与例题 2-1 相同。求其每公尺摩擦阻力。

解: 由例题 2-1 已求得 $R_{m\text{光}} = 0.137$ 公厘水柱/公尺 $w = 9.0$ 公尺/秒, 而矿渣混凝土制作之风道的绝对粗糙度由附图2上方图中查得 $k = 1.5$ 。

$$kw = 1.5 \times 9.0 = 13.5$$

由附图2上方图中查得 $(kw)^{0.25} = 1.9$

故 $R_{m\text{粗}} = (kw)^{0.25} R_{m\text{光}} = 1.9 \times 0.137 = 0.26$ 公厘水柱/公尺

2-3 矩形风道中摩擦阻力之計算

在上一节中我們已研究了圆形截面之风道中摩擦阻力可以利用附图2查得。而对于矩形截面的风道即使风道截面面积相等, 也由于截面长宽尺寸的不同(即湿周与截面面积之比不同)而有不同的水力半径, 这样摩擦阻力也就不同。因此我們不能直接在附图

2 上查得摩擦阻力,而須要引入“当量直徑”的概念,并通过它来求矩形风道的摩擦阻力。

当量直徑分“等速度当量直徑”与“等流量当量直徑”。

“等速度当量直徑”就是假定有一圓形风道,其中空气速度等于另一矩形风道中的空气速度,并当管長相等时两者的摩擦阻力也相等,則此假定的圓形风道之直徑就称为这个矩形风道的“等速度当量直徑”。

根据上述定义就可以求出矩形风道截面之長寬尺寸($a \times b$)与其等速度当量直徑 d_{sw} 之間的換算公式如下:

空气流經风道的摩擦阻力是按下式計算的

$$\Delta H_{mp} = \frac{\lambda}{4R} \frac{w^2 \gamma}{2g} l$$

今按照定义的条件,則 w 、 l 相等,同时对同一种管壁材料而又在速度相等时則 λ 也相等,因此为了得到相等的摩擦阻力 ΔH_{mp} ,由上式可知只要两者的水力半徑相等即可;即 $R_{圓} = R_{矩}$ 。

$$\text{而} \quad R_{圓} = \frac{d}{4}; \quad R_{矩} = \frac{ab}{2(a+b)}。$$

$$\text{則} \quad \frac{d}{4} = \frac{ab}{2(a+b)} \quad d = \frac{2ab}{a+b}$$

为了表明該直徑是矩形截面 $a \times b$ 的等速度当量直徑,因此將上式 d 加以下标 sw , 而得到:

$$d_{sw} = \frac{2ab}{a+b} \quad (2-8)$$

“等流量当量直徑”就是假定有一圓形风道,其中空气流量等于另一矩形风道的空气流量,并当管長相等时两者的摩擦阻力也相等,則此假定的圓形风道直徑就称为这个矩形风道的“等流量当量直徑”。

为此,矩形风道截面長寬尺寸与其等流量当量直徑 d_{sv} 之間