

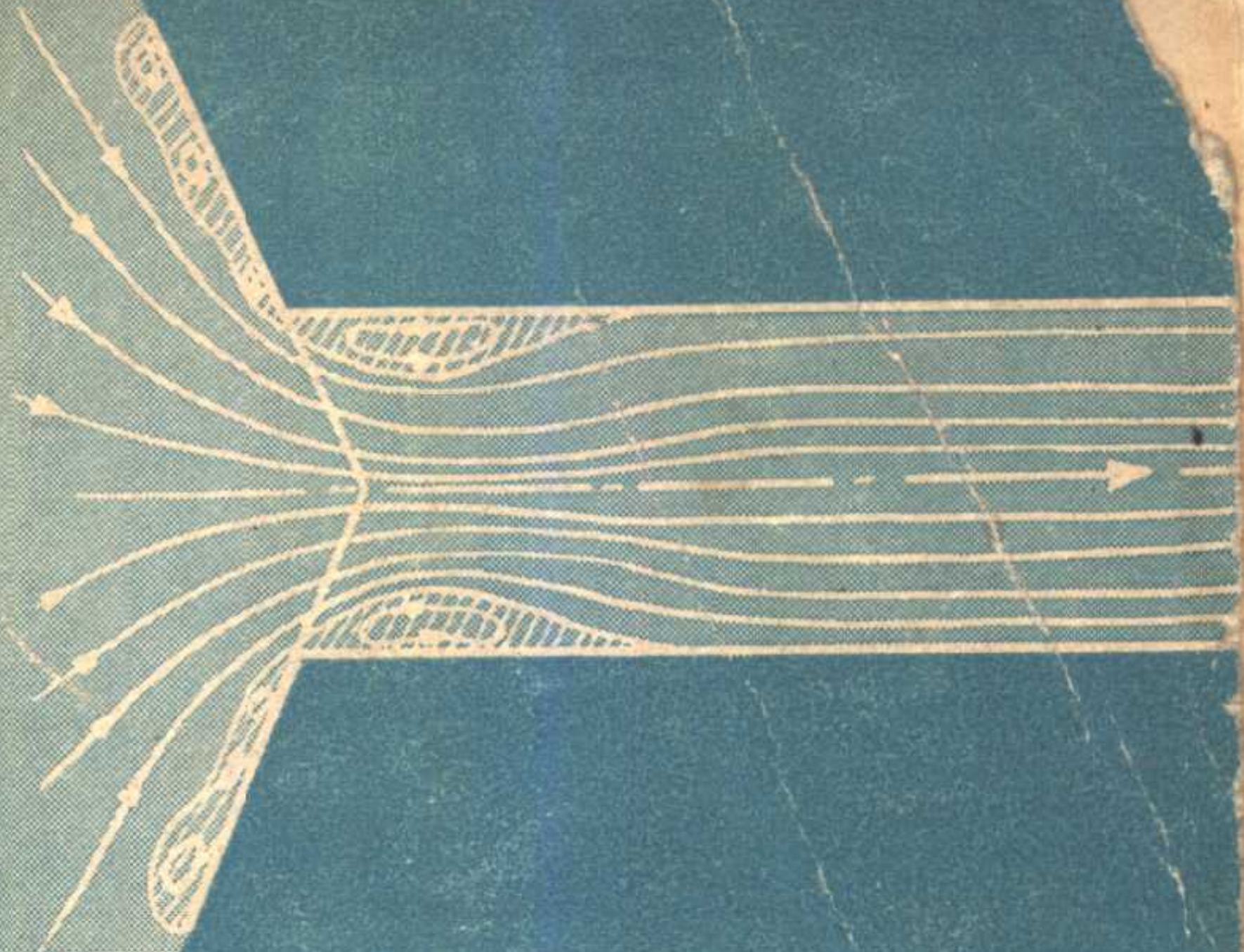
941/93

〔苏联〕B. H. 洛巴耶夫 著

王赵赵

天恩先

富卿智 译



风道算法

中国工业出版社

通风、压缩空气和 气力输送设备的 风道算法

〔苏〕Б·Н·洛巴耶夫 著

王天富 赵恩卿 赵先智 译

西亚庚 校

18772

中国工业出版社

本书叙述了通风系统以及压缩空气和气力输送设备管道的水力计算和技术经济计算。

作者阐明了在上述设备中能量和材料消耗最少的条件下，计算风道系统和输送管道所得到的经验公式和在实际上应用比较方便的计算方法。

本书可供工程技术人员在计算和设计通风和物料气力输送系统时参考，也可供大专学校师生阅读参考。

Б. Н. Лобаев

РАСЧЕТ ВОЗДУХОПРОВОДОВ

ГОССТРОЙИЗДАТ СССР

КИЕВ—1959

* * *

**通风、压缩空气和气力输送设备的
风道计算法**

王天富 赵恩卿 赵先智 译

西亚 庚 校

*

建筑工程部编辑部编辑（北京西郊百万庄）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $6\frac{3}{8}$ ·插页8·字数164,000

1964年11月北京第一版·1964年11月北京第一次印刷

印数0001—4,710·定价（科七）1.40元

*

统一书号：15165·2845（建工-354）

譯 者 的 話

本書是繼Г. А. 馬克西莫夫的“通風管道計算法”之後又一本專門論述“風道計算法”的著作。原書作者Б. Н. 洛巴耶夫教授，在整理ВТИ實驗資料的基礎上提出了決定過渡區摩擦阻力系數的簡化公式，並論證了在機械通風的情況下，鋼制風道內的气流都處於紊流運動的過渡區。這個理論比較以往採用的光滑管區理論更為切合實際和準確。

在風道系統的計算方法方面，作者對實踐中採用過的每米管長壓力損失法、當量孔口法、動壓法、當量長度法、單位體積流動法和特性法等都作了扼要的介紹，指出了它們的缺點和存在的問題，並根據他自己的研究結果，提出了當量阻力法。這種方法採用了最精確的過渡區摩阻系數公式，既可用作設計計算，也可用作現成管網的計算。這種方法象其它方法一樣，需要利用專門的綫解圖進行計算，在運用時不僅能達到較高的計算準確度，而且也很簡便。例如，風道計算表只需7欄就夠了，然而用其它方法約需15~20欄。因此可以預見，當量阻力法將會得到廣大設計工作者的重視和採用。

此外，作者還較系統地介紹了風道系統技術經濟計算理論、氣力輸送裝置的管道計算和物料懸浮速度的計算方法，這些大部分都是作者本人的研究成果，而在以前的著作中很少見到。為了便於讀者使用，書中編有計算例題並提供了許多綫解圖。

綜上所述，我們認為這是一本具有相當科學水平的著作。由於譯者中外文和業務水平的限制，譯文中難免有欠妥，甚至錯誤之處，尚請國內專家和讀者提出批評意見。

譯 者

1963年8月

序 言

风道和输送管道的水力计算，在计算通风和物料气力输送系统时，工作量是很大的。

一般常用的分支风道系统的水力计算方法，在实际应用中相当复杂，不方便，精确度也不高，而且往往缺少技术经济的计算方法。因此，设计工作者不得不任意地采取初始的计算速度值或压力损失值，这样就会造成能量和材料的过度消耗。

气力输送设备的管道计算，是以不够准确的经验公式为基础的。这样，实际上难于选择阻力系数值和决定输送管道中的实际压力损失。

本书阐述了通风和气力输送设备管道的理论和实际计算问题。提出了新的较准确的用于紊流运动过渡区风道内的摩擦阻力系数公式，在不同的管壁粗糙度下计算矩形截面风道的较简便的方法，以及较完善的和实际上较方便的风道管网的水力计算方法。

阐述了各种风道管网的技术经济计算方法，利用这种方法可以节省能量和初次投资。

叙述了压缩空气和稀薄空气管道在大压力降下最准确的计算方法。在不同容重、尺寸、形状、各种空气温度和压力的条件下，书中给出了决定固体悬浮速度的公式和便于实际应用的方法。

综合了许多研究者所做的有关各种物料气力输送的大量实验，作者认为这些实验在计算输送管道中都有一定缺点，因而提出了一些较准确的气力输送设备的计算公式和方法。

书中介绍了确定最佳的和经济的空气速度和混合物流量浓度数值的方法，这些方法为输送管道的最小能量消耗和降低造价提供了可能条件。对于管道的实际计算，已按照所推荐的新的方法在书中列出了图表和线解图。

对于无分支管道的均匀送风和均匀吸风等问题，已在П.Н.卡明涅夫、Г.А.马克西莫夫和В.Н.塔利耶夫著作中作了充分地阐述，故本书不再作研究。书中所述许多问题的解决方法还是第一次提出，因而对其中某些问题尚需要作进一步的科学研究。

有关对本书的批评和意见请寄：基辅，弗拉基米尔街24号，乌克兰苏维埃社会主义共和国国立建筑书籍出版社。

目 录

譯者的話

序 言

第一章 风道的水力計算	1
风道中水力阻力的决定	5
空气溫度对压力損失的影响	11
空气溫度对能量消耗的影响	13
空气压力对管道阻力的影响	16
管壁粗糙度对风道阻力的影响	18
矩形截面风道的計算	22
风道中的局部阻力	30
第二章 风道系統的計算方法	38
每米管道压力損失不变法	39
当量孔口法	40
动压法	44
当量长度法	45
单位体积流动法	46
管道特性法	47
当量阻力法	48
第三章 风道系統的技术經濟計算	59
圓形截面的簡單风道	60
矩形截面的簡單风道	68
圓形截面的无分支风道	71
矩形截面的无分支风道	85
复杂分支的风道	87
第四章 压縮空气和稀薄空气管道的計算	105
主要公式的推导	105
計算压縮空气管网的线解图	109
在大压力降条件下空气管道的計算	113

第五章 悬浮速度的計算	117
决定阻力系数 C 的一些公式	118
决定悬浮速度的公式	121
决定悬浮速度的方法	123
在不同空气压力下悬浮速度的决定	133
在受限制条件下悬浮速度的計算	134
第六章 气力輸送設備管道的計算	136
輸送管道水力阻力的公式	136
水平管道的阻力	140
垂直管道的阻力	148
造成物料顆粒速度的压力損失	152
輸送管道弯管中的压力損失	157
物料气力輸送中能量消耗的决定	160
最佳速度和最佳浓度的决定	161
經濟速度和經濟浓度的决定	166
附录	171
参考文献	210

第一章 风道的水力计算

根据水力学的知识，我们知道，流体在管道和风道内流动的阻力，取决于流体的粘度、管壁的粗糙度、水力半径和气流速度。这些数值之间的相互关系，由下列公式求出：

$$H = \rho \frac{U}{F} \cdot \frac{v^2}{2g} \gamma l (\text{公斤/米}^2), \quad (1)$$

式中 ρ ——摩擦系数，无因次值；

U ——风道的湿周（米）；

F ——风道净截面（米²）；

v ——管道内的气流平均速度（米/秒）；

γ ——流体的容重（公斤/米³）；

l ——管长（米）；

g ——重力加速度（米/秒²）。

对于圆形截面的压力管道，其湿周与截面积之比等于

$$\frac{U}{F} = \frac{\pi D}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{4}{D}。$$

对于矩形截面风道

$$\frac{U}{F} = \frac{2(a+b)}{ab},$$

对于方形截面风道

$$\frac{U}{F} = \frac{4}{a},$$

式中 a 和 b ——矩形截面风道的边长（米）。

如以符号 $\frac{\lambda}{4}$ 表示 ρ ，并代入公式（1）中，则求出计算圆形管道阻力的公式；

$$H = \lambda \frac{v^2}{D} \cdot \frac{\gamma}{2g} l \text{ (公斤/米}^2\text{)}。 \quad (2)$$

对于矩形和方形截面的风道相应地求得：

$$H = \frac{\lambda}{\frac{2ab}{a+b}} \cdot \frac{v^2}{2g} \gamma l \text{ (公斤/米}^2\text{)}; \quad (3)$$

$$H = \frac{\lambda}{a} \cdot \frac{v^2}{2g} \gamma l \text{ (公斤/米}^2\text{)}。 \quad (4)$$

比較公式(2)和公式(3)，則得到計算所謂矩形截面风道当量直径的式子：

$$D_{\text{экв}} = \frac{2ab}{a+b}。 \quad (5)$$

对于方形截面的风道，由公式(2)和(4)可得：

$$D_{\text{экв}} = a, \quad (6)$$

也就是当方形截面风道和圓形管道內的速度相等时，当量直径等于风道的边长。

摩擦阻力系数 λ ，主要决定于雷諾数、管道特性和流体在管道內的流动状态。

試驗表明，管道內存在两种显著表示气流流动的状态：平行纖維流（层流）和涡流（紊流）。由平行纖維流运动过渡到涡流运动，是在一定的慣性力和流体內摩擦力的相互关系下发生的。决定着运动状况的准則是雷諾数

$$Re = \frac{Dv}{\nu} = \frac{Dv}{\mu g} \gamma, \quad (7)$$

式中 D ——管径（米）；

v ——运动速度（米/秒）；

ν ——运动粘滯系数（米²/秒）；

μ ——流体的絕對粘滯系数（公斤·秒/米²）。

气体的絕對粘滯系数和运动粘滯系数，随着气体溫度的升高而增长。气体压力增高时，絕對粘滯系数增大，而运动粘滯系数减小。压力对气体的絕對粘滯系数的影响，在 $P=10$ 計示大气压以

下可予以忽略。

在表 1 中,列出了压力为 1 公斤/厘米² 和温度从 -50到+1000°C时干空气的容重、绝对粘滞系数和运动粘滞系数⁽¹⁾。

表 1 压力为 1 公斤/厘米²时的干空气物理参数

温度 t (度)	容 重 γ (公斤/米 ³)	动力(绝对)粘度 μ · 10 ⁶ (公斤·秒/米 ²)	运 动 粘 度 ν ·10 ⁶ (米 ² /秒)
-50	1.534	1.49	9.5
-20	1.365	1.66	11.5
0	1.252	1.75	13.7
10	1.206	1.81	14.7
20	1.164	1.86	15.7
30	1.127	1.91	16.6
40	1.092	1.96	17.6
50	1.056	2.00	18.6
60	1.025	2.05	19.6
70	0.996	2.08	20.5
80	0.968	2.14	21.7
90	0.942	2.20	22.9
100	0.916	2.22	23.8
120	0.870	2.32	26.2
140	0.827	2.40	28.5
160	0.789	2.46	30.6
180	0.755	2.55	33.2
200	0.723	2.64	35.8
250	0.653	2.85	42.8
300	0.596	3.03	49.9
350	0.549	3.21	57.5
400	0.508	3.36	64.9
500	0.450	3.69	80.4
600	0.400	4.00	98.1
800	0.325	4.54	137.0
1000	0.268	5.05	185.0

根据这些干空气的物理参数(当 $P = 1$ 公斤/厘米²时), 在

图 1 上列出了干空气的容重、绝对粘度和运动粘度与温度的关系图表，以及由作者求得的下列经验公式：

容重 $\gamma = \frac{342}{273+t} (\text{公斤/米}^3); \quad (8)$

绝对粘度

$10^8 \mu = 175 + t^{0.85} (\text{公斤} \cdot \text{秒/米}^2); \quad (9)$

运动粘度

$10^8 \nu = 1370 + 4.6t^{1.17} (\text{米}^2/\text{秒}). \quad (10)$

空气温度在 -50 到 $+1000^\circ \text{C}$ 的范围内，公式 (8) 得出准确的结果。

公式 (9) 和 (10) 可随意地运用于空气温度从 -50 到 600°C 的范围内（准确度达 1%）。

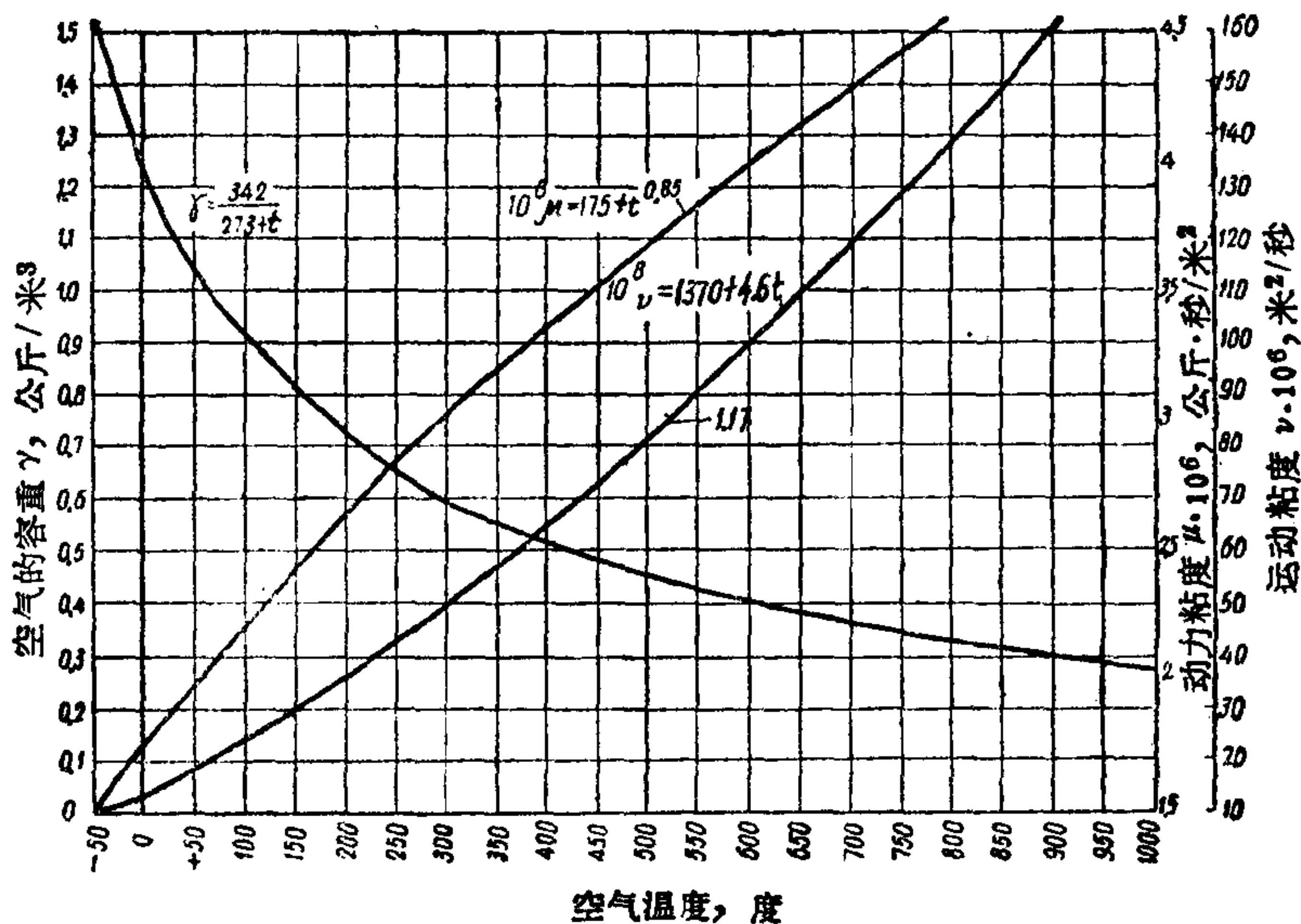


图 1 在 $P = 1$ 公斤/厘米² 时，空气的容重、绝对粘度和运动粘度与温度的关系图表

当雷诺数值 $Re < 2320$ 时，流体粘滞力胜过气流惯性力，因此

保持了平行纖維流的运动。当 $Re > 2320$ 时, 气流的慣性力超过粘滯力和产生紊流运动。

风道中水力阻力的决定

根据水力学理論, 层流的摩擦阻力系数由下面公式求出:

$$\lambda = \frac{64}{Re}。 \quad (11)$$

层流运动处于狭小的范围内, 并在实际上很少遇見。

在空气流动的实际情况下, 管道和风道内遇到的仅是紊流运动。根据管道和风道水力阻力特性, 紊流运动分为三个区域: 水力光滑管区、过渡区和粗糙管区。

流体在水力光滑管区内流动时, 直接貼近管壁(layer)的层流边界层的厚度, 大于管壁粗糙度凸出部分的数值。因此, 摩擦阻力系数与管道粗糙度无关, 可由Г. А. 穆林公式⁽²⁾求得

$$\lambda_{\text{с.г.}} = \frac{1.01}{(\lg Re)^{2.5}}。 \quad (12)$$

在过渡区中粗糙度凸出部分, 部分地伸出边界层并进入流核中。因此, 摩擦阻力系数取决于 Re 和 $\frac{D}{K}$, 对鋼管道來說可以按作者⁽³⁾的公式求得

$$\lambda_{\text{nep}} = \frac{1.42}{\left(\lg Re \frac{D}{K} \right)^2} \quad (13)$$

或

$$\lambda_{\text{nep}} = \frac{1.42}{\left(\lg 1.274 \frac{Q}{K\nu} \right)^2}, \quad (14)$$

式中 Q ——管道内的流量 (米³/秒);

K ——管壁粗糙度 (米);

ν ——运动粘度 (米²/秒)。

图 2 所示系在各种运动粘滯系数、粗糙度和流量的情况下,

用来确定过渡区中摩擦阻力系数的綫解图。

在粗糙管区中，边界层的厚度变得如此之小，以致粗糙度凸出部分陷入流核中。因此，摩擦阻力系数仅与相对粗糙度有关，并按如下公式計算：

$$\lambda_{wep} = \frac{1}{\left(1.74 + 2 \lg \frac{D}{2K}\right)^2} \quad (15)$$

或按作者⁽³⁾提出的下列簡化公式計算：

对于相对粗糙度 $\varepsilon = \frac{1}{40} \sim \frac{1}{500}$ 來說

$$\lambda_{wep} = 0.15 \left(\frac{K}{D} \right)^{0.3}; \quad (16)$$

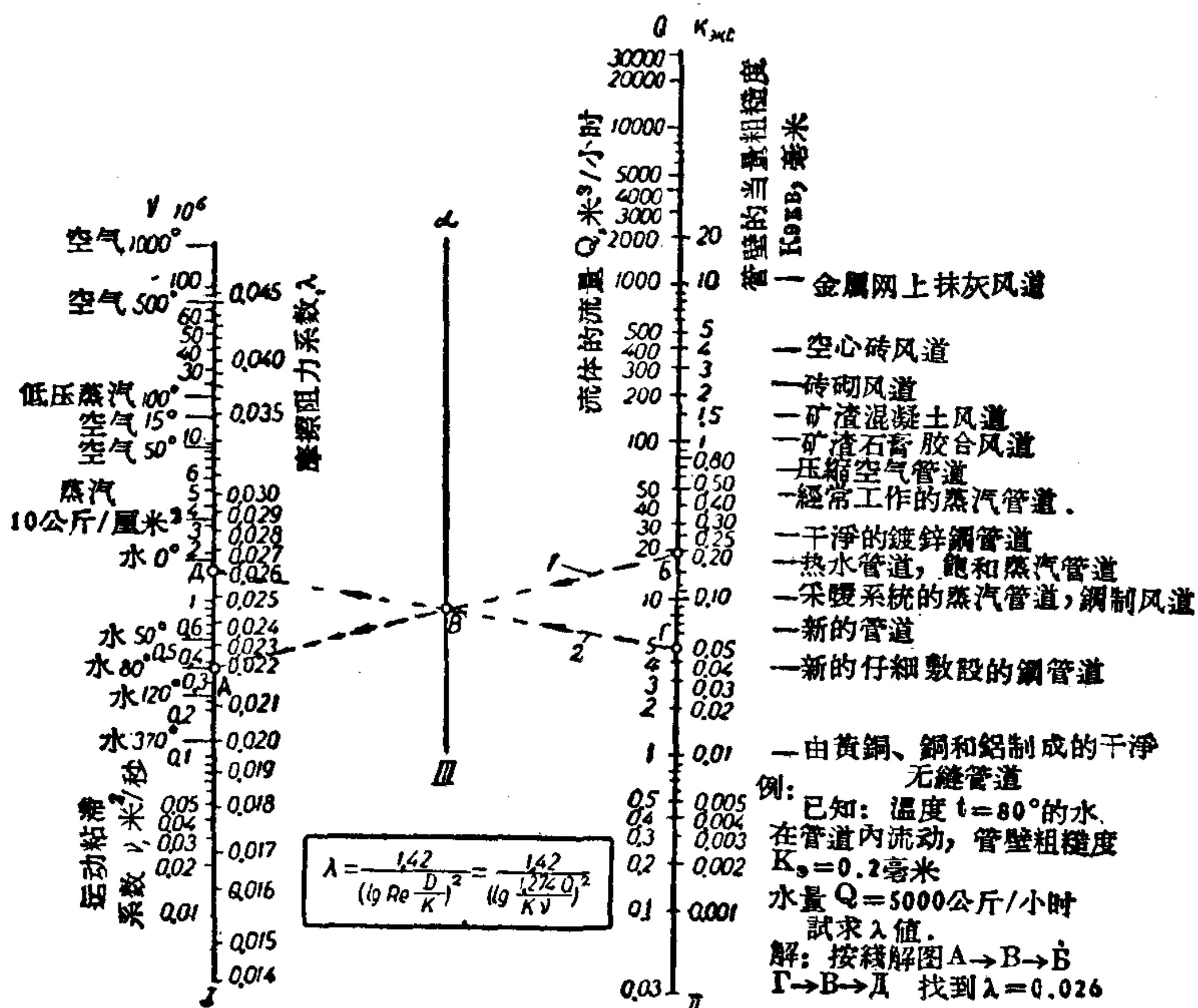


图 2 决定过渡区内摩擦阻力系数的綫解图

对于相对粗糙度 $\varepsilon = \frac{1}{500} \sim \frac{1}{10000}$ 来说

$$\lambda_{uep} = 0.076 \left(\frac{K}{D} \right)^{0.2} \quad (17)$$

对于鋼管道来说，光滑管区、过渡区和粗糙管区之间的界限，不难按作者⁽³⁾的简化公式求出。下限

$$Re_1 = 11 \frac{D}{K}, \quad (18)$$

或
$$v_1 = 11 \frac{v}{K} \quad (19)$$

上限
$$Re_2 = 445 \frac{D}{K}, \quad (20)$$

或
$$v_2 = 445 \frac{v}{K} \quad (21)$$

在已知 t 和 K 值的情况下，公式 (19) 和 (21) 是方便的，按这些公式不难求得各个区域间的界限气流速度。当管道内气流平均速度 $v_{cp} < v_1$ 和 $\frac{D}{K} > 600$ 时，气流运动处于光滑管区内；当 $v_1 < v_{cp} < v_2$ 时，气流处于过渡区内；当 $v_{cp} > v_2$ 时，气流处于粗糙管区内。

现在，让我们求出实际上最常遇见的风道计算情形的下限和上限速度的数值。

对于鋼制风道来说（当 $t = +20^\circ \text{C}$ 和 $K = 0.1$ 毫米时），由公式 (19) 和 (21) 求得：

$$v_1 = 11 \frac{15.7}{10^6 \cdot 0.0001} = 1.72 \text{ 米/秒},$$

$$v_2 = 445 \frac{15.7}{10^6 \cdot 0.0001} \approx 70 \text{ 米/秒}.$$

当管壁粗糙度 $K = 1$ 毫米和空气温度 $t = +20^\circ \text{C}$ 时，对应用于民用建筑通风上的矿渣石膏板和胶合板风道，得到：

$$v_1 = 11 \frac{15.7}{10^6 \cdot 0.001} = 0.172 \text{ 米/秒};$$

$$v_2 = 445 \frac{15.7}{10^6 \cdot 0.001} \approx 7 \text{ 米/秒}。$$

大家知道，在通风系统的钢制管道内，空气速度小于1.72米/秒和大于70米/秒，实际上是不采用的。在民用建筑的通风系统中，风道内空气速度小于0.172米/秒和大于7米/秒是不采用的。因而，在所有这些情况下，气流都处于紊流运动的过渡区内。

采用粗糙度 $K=1.5$ 毫米的矿渣混凝土板风道和 $K=4$ 毫米的砖风道，以及 $K=10$ 毫米的金属网上抹灰的风道时，气流可能处在完全粗糙管区内。

图3所示，为根据空气速度和风道壁面粗糙度来决定气流流动区域的图表。从图表看出，在管壁粗糙度相同的情况下，随着速度的增加，气流可能由过渡区演变到粗糙管区。在速度相同的情况下，随着壁面粗糙度的增大，气流同样地可能进入粗糙管区内。

例 已知 $v=10$ 米/秒和 $K=0.5$ 毫米。由图表查得，在这些条件下，气流将处于过渡区内。当 $K=0.5$ 毫米和 $v=20$ 米/秒时，气流进入粗糙管区内。

在进行通风计算时，实际上采用空气的重量是方便的，因为重量不随温度和压力而变，然而空气体积却是它的温度和压力的函数。因此，在以后的风道计算中，将采用空气的重量公斤/秒和公斤/时。

在工业通风和物料气力输送系统的管道内，在大多数情况下，不得不沿着钢管道输送温度为 $15 \sim 20^\circ \text{C}$ 的空气。如果采取 $P=1$ 公斤/厘米²， $K=0.1$ 毫米， $\gamma=1.164$ 公斤/米³ 和 $\nu=15.7 \times 10^{-6}$ 米²/秒 这些条件，并代入公式(14)中，化简后求得

$$\lambda = \frac{1.42}{(5.285 + \lg G)^2}, \quad (22)$$

式中 G —— 空气量 (公斤/时)。

由公式 (22) 看出, 摩擦阻力系数, 仅取决于空气量, 该值通常是原始计算数据。

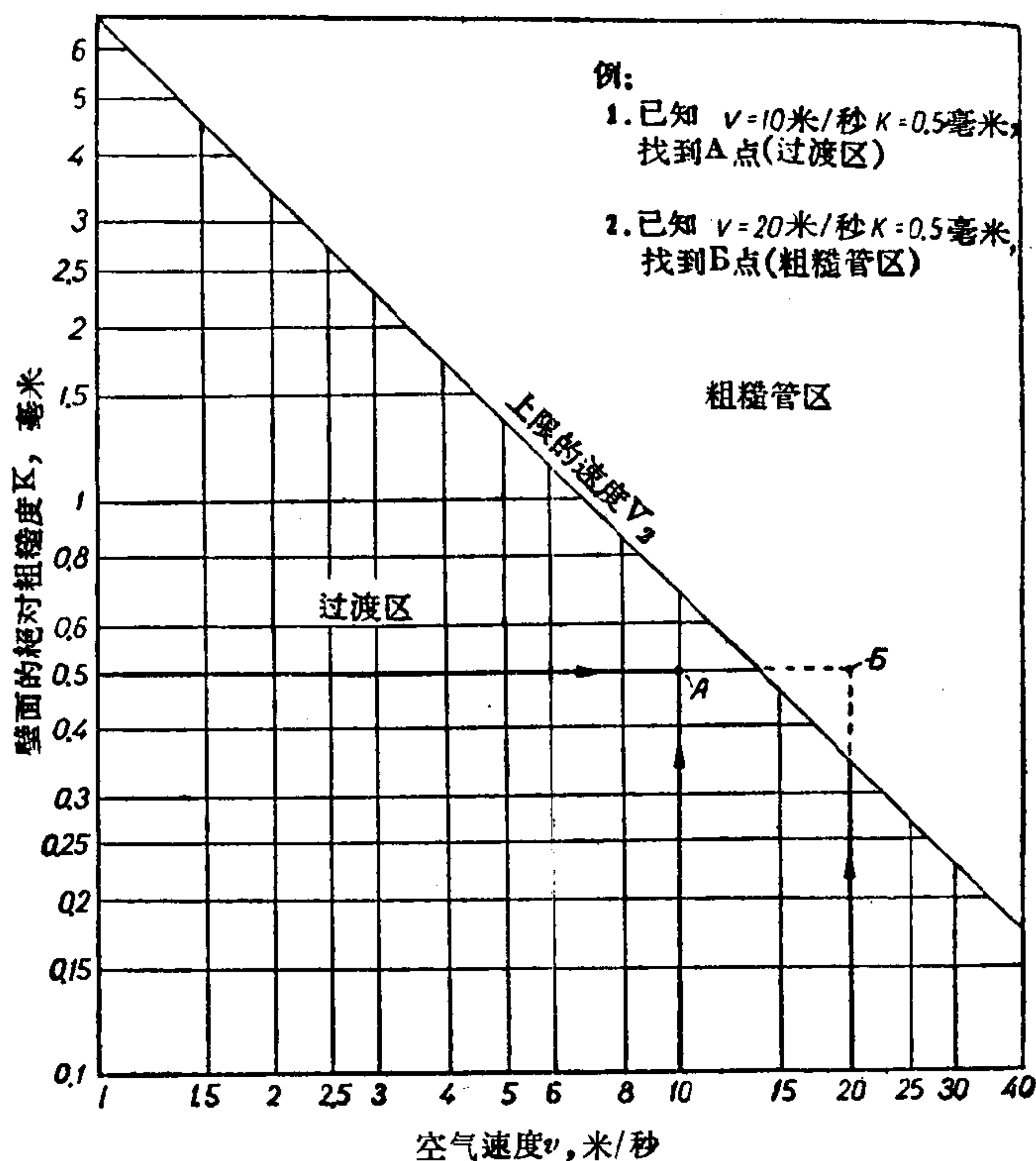


图 3 根据气流速度和风道壁面粗糙度来决定流动区域的图表

图 4 所示系 λ 与 G 的关系图表, 按照该图很容易地求出摩擦阻力系数。

对数公式 (22) 可以用较简单的幂函数公式来代换, 则

$$\lambda = 0.042 G^{-0.1}, \quad t = 20\% \quad (23)$$

当 $K=0.1$ 毫米, $\gamma=1.164$ 公斤/米³ 和 $\nu=15.7 \cdot 10^{-6}$ 米²/秒时, 对整个过渡区而言, 上面的公式将得出准确的结果。

由气流连续性公式的式子 ν 和公式 (23) 的 λ 代入公式 (2)