

第五节 尼古拉兹实验

沿程阻力系数及其影响因素的分析

- Re

- 管壁粗糙

- 尼古拉兹粗糙

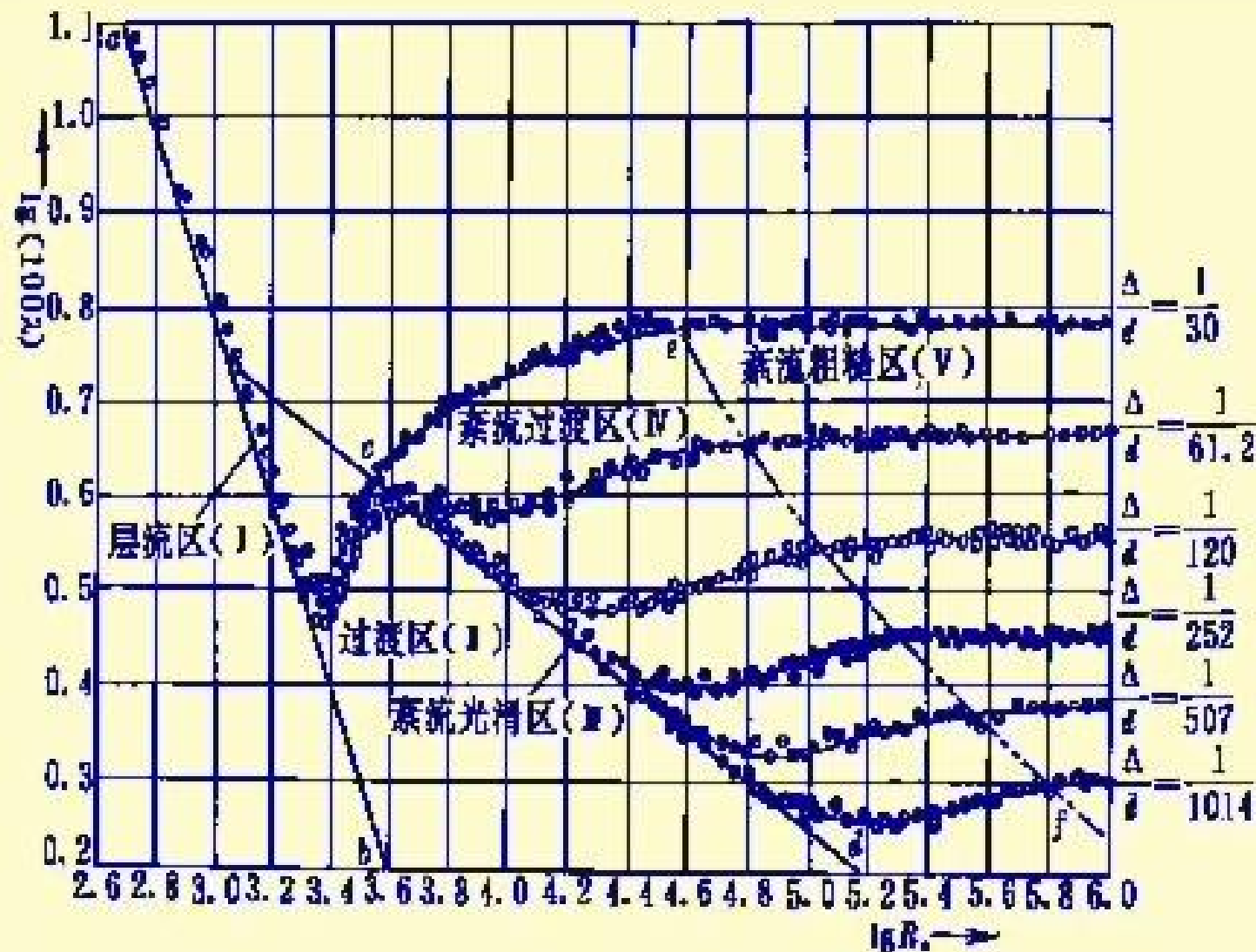


- 绝对粗糙度

- 相对粗糙度

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{K}{d}\right)$$

沿程阻力系数的测定和阻力分区图



 层流区 $\lambda = f_1(\text{Re})$

 临界过渡区 $\lambda = f_2(\text{Re})$

 紊流光滑区 $\lambda = f_3(\text{Re})$

 紊流过渡区 $\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{K}{d}\right)$

 紊流粗糙区
(阻力平方区) $\lambda = f\left(\frac{K}{d}\right)$

★紊流光滑区

★紊流过渡区

★紊流粗糙区

★水力光滑管

★水力粗糙管

不仅与绝对粗糙度有关，还与雷诺数和层流底层的厚度有关

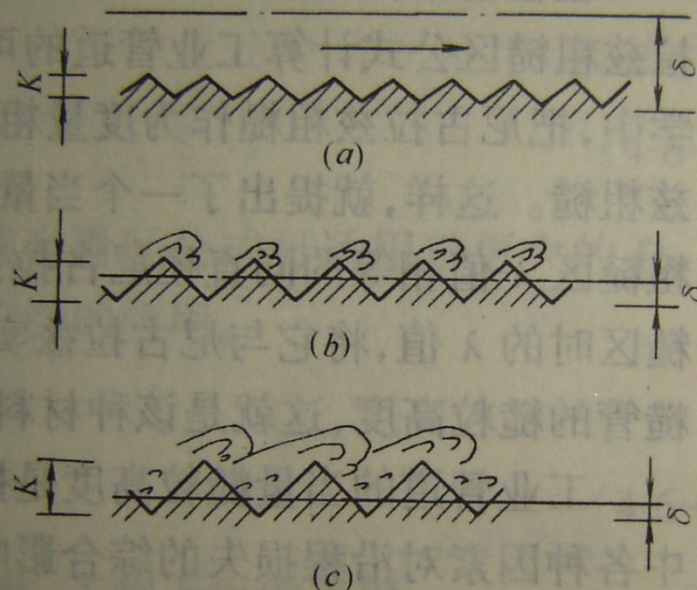


图 4-12 层流底层与管壁粗糙的作用
(a)光滑区;(b)过渡区;(c)粗糙区

粗糙管壁附近的流动

层流

湍流



(a)



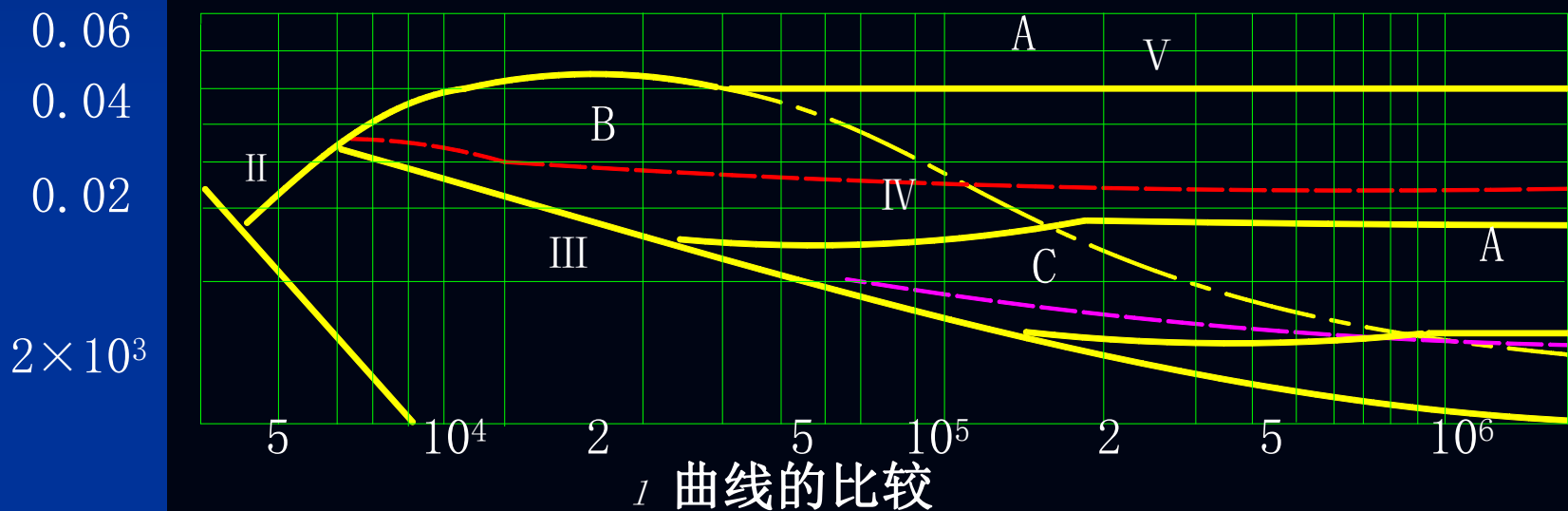
(b)



(c)

第六节 工业管道紊流阻力系数的计算公式

🔔 尼古拉兹实验是对人工均匀粗糙管进行的，而工业管道的实际粗糙与均匀粗糙有很大不同，因此，不能将尼古拉兹实验结果直接用于工业管道。



A:尼古拉兹曲线 B:2英寸镀锌钢管 C: 5英寸新焊接钢管

🔔 在光滑区工业管道的实验曲线和尼古拉兹曲线是重叠的，因此，流动位于阻力光滑区时，工业管道 λ 的计算可以采用尼古拉兹的实验结果。

在粗糙区，工业管道和尼古拉兹的实验曲线都是与横坐标轴平行。这就存在用尼古拉兹粗糙区公式计算工业管道的可能性。问题在于如何确定工业管道的K值。

 **当量糙粒高度**：和工业管道粗糙区 λ 值相等的同直径尼古拉兹粗糙管的糙粒高度。

工业管道当量糙粒高度

表 4-1

管道材料	K (mm)	管道材料	K (mm)
钢板制风管	0.15(引自全国通用通风管道计算表)	竹风道	0.8~1.2
塑料板制风管	0.01(引自全国通用通风管道计算表)	铅管、铜管、玻璃管	0.01 光滑(以下引自莫迪当量粗糙图)
矿渣石膏板风管	1.0(以下引自采暖通风设计手册)	镀锌钢管	0.15
表面光滑砖风道	4.0	钢管	0.046
矿渣混凝土板风道	1.5	涂沥青铸铁管	0.12
铁丝网抹灰风道	10~15	铸铁管	0.25
胶合板风道	1.0	混凝土管	0.3~3.0
地面沿墙砌造风道	3~6	木条拼合圆管	0.18~0.9
墙内砌砖风道	5~10		

λ 计算公式

★紊流光滑区： $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\lg(\text{Re}\sqrt{f}) - 0.8$

(尼古拉兹
光滑区公式)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\lg \frac{\text{Re}\sqrt{f}}{2.51}$$

$$f = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}$$

(布拉修斯公式)

★紊流粗糙区： $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\lg \frac{r_0}{K} + 1.74$

(尼古拉兹
粗糙区公式)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\lg \frac{3.7d}{K}$$

$$f = 0.11 \left(\frac{K}{d}\right)^{0.25}$$

(希弗林松公式)



半经验公式

纯经验公式

紊流过渡区

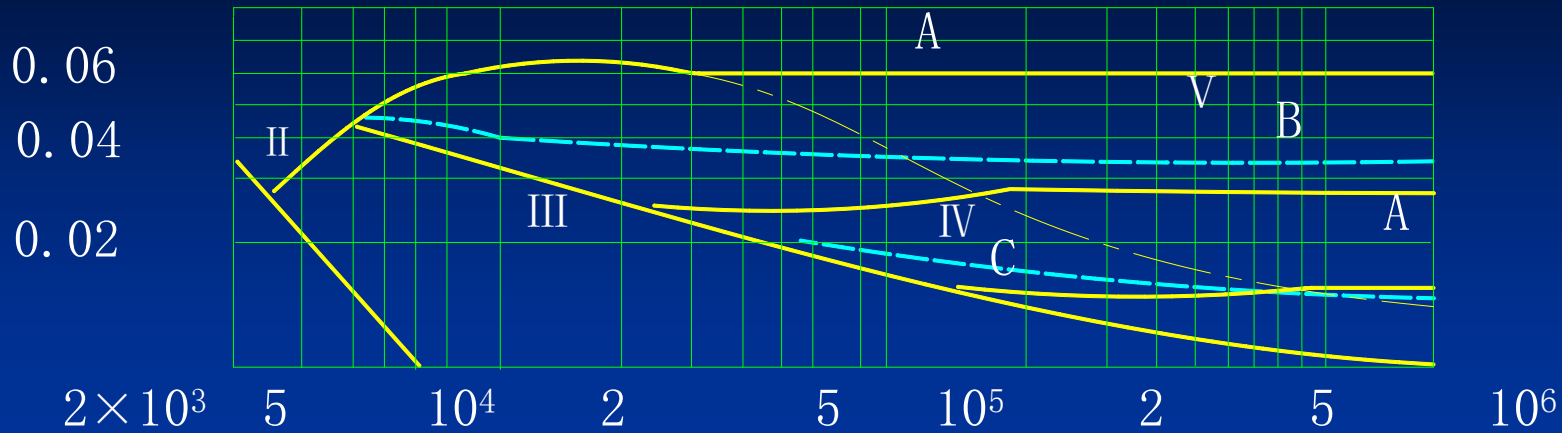


图4-13 λ 曲线的比较

A:尼古拉兹曲线 B:2英寸镀锌钢管 C: 5英寸新焊接钢管
在过渡区，工业管道实验曲线和尼古拉兹曲线存在较大差异。表现为：

- 🔔 在工业管道实验曲线的过渡区曲线在较小的 Re 下就偏离光滑曲线。
- 🔔 随 Re 的增加平滑下降，而尼古拉兹曲线则存在上升部分。

柯列勃洛克公式
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{K}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right)$$

它是尼古拉兹光滑区和粗糙区公式的结合。

它不仅可适用于紊流过渡区，而且可以适用于整个紊流的三个阻力区，也可称其为紊流的综合公式。

如何确定流动处在哪个紊流阻力区？

 紊流光滑区：
$$2000 < Re < 0.32 \left(\frac{d}{K} \right)^{1.28}$$

 紊流过渡区：
$$0.32 \left(\frac{d}{K} \right)^{1.28} < Re < 1000 \left(\frac{d}{K} \right)$$

 紊流粗糙区：
$$Re > 1000 \left(\frac{d}{K} \right)$$

在柯式公式的基础上又提出了一些简化公式

🌸 莫迪公式: $\lambda = 0.0055 \left[1 + \left(20000 \frac{K}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right]$

在 $Re = 4000 \rightarrow 10^7$, $\frac{K}{d} < 0.01$, $\lambda < 0.05$ 时和柯氏公式比较, 误差不超过5%。

🌸 阿里特苏里公式:

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{K}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}$$



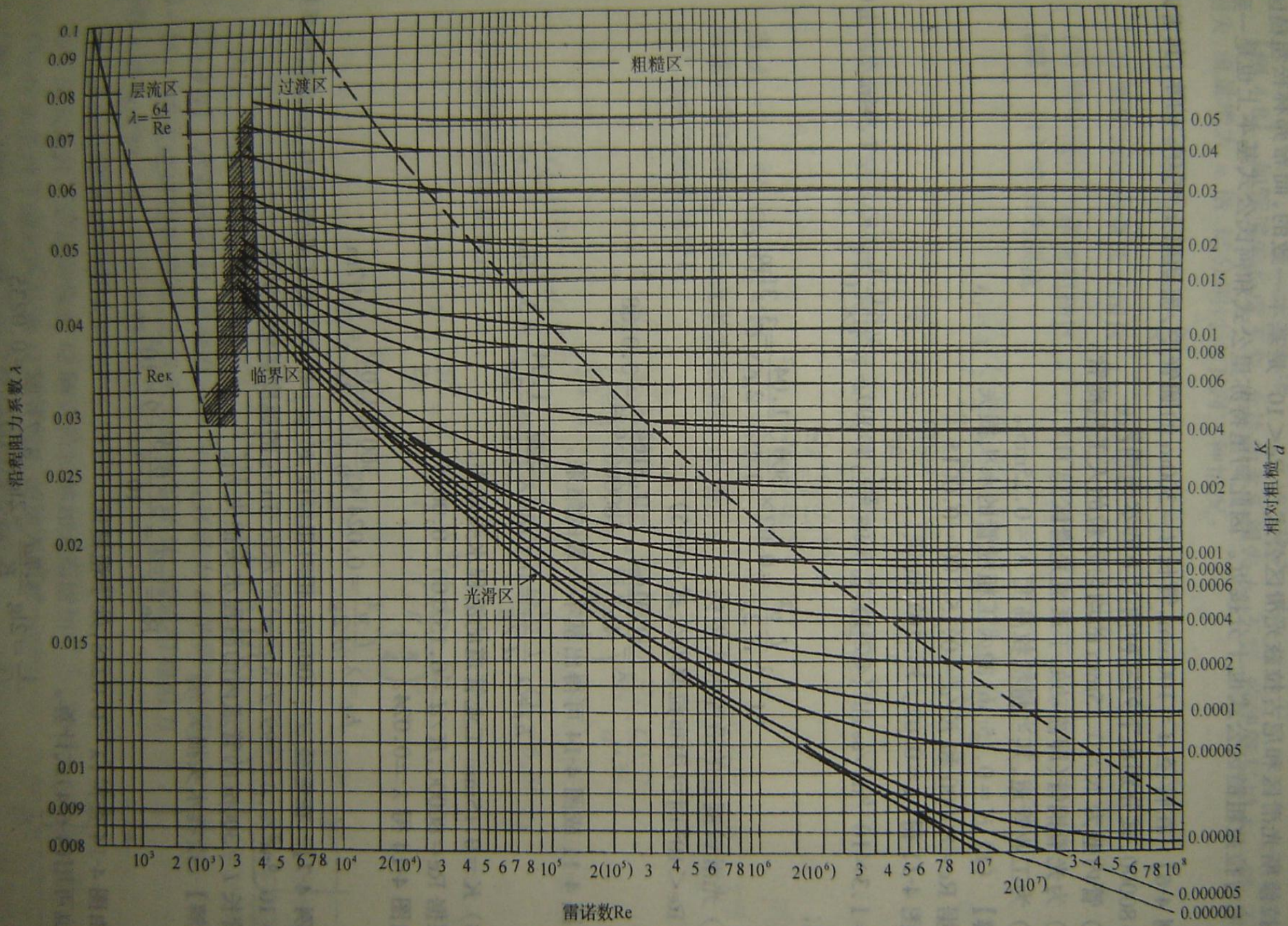
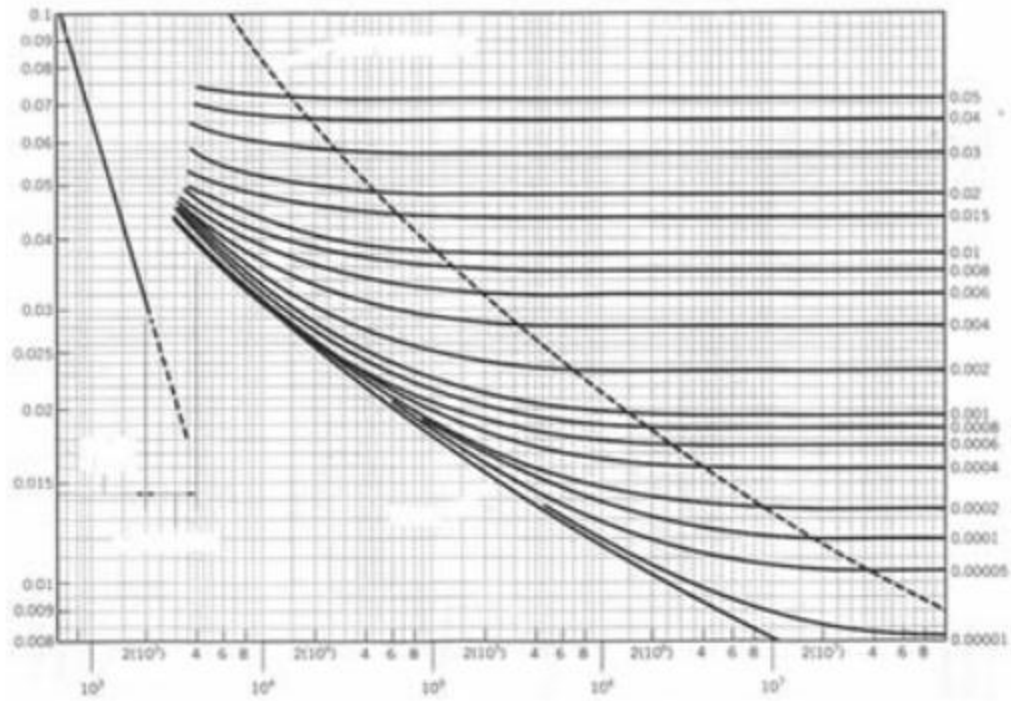


图4-14 莫迪图



Start

C3. 6. 3 摩迪图

例4-6:在管径100mm, 管长300m的圆管中, 流动着10℃的水, 其雷诺数为80000, , 求下列三种情况的水头损失. 1. 内壁为K=0.15mm的均匀沙粒的人工粗糙管. 2. 为光滑铜管(流动处于紊流光滑区). 3. 为工业管道, 当量糙粒高度K=0.0015m.

解:

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g}$$

1. 图4-11, 尼古拉兹粗糙管沿程阻力系数

$$Re = 80000$$

$$\frac{K}{d} = \frac{0.15}{100} = 0.0015$$



$$\lambda = 0.02$$

温度为10°C $\mu=1.3*10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$Re = \frac{vd}{\nu} = 80000 \rightarrow v=1.04\text{m/s}$$

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = 0.02 \times \frac{300}{0.1} \times \frac{1.04^2}{2g} = 3.31 \text{ m}$$

2. (1) $Re < 10^5$ 公式, 利用布拉修斯公式

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} = 0.0188$$

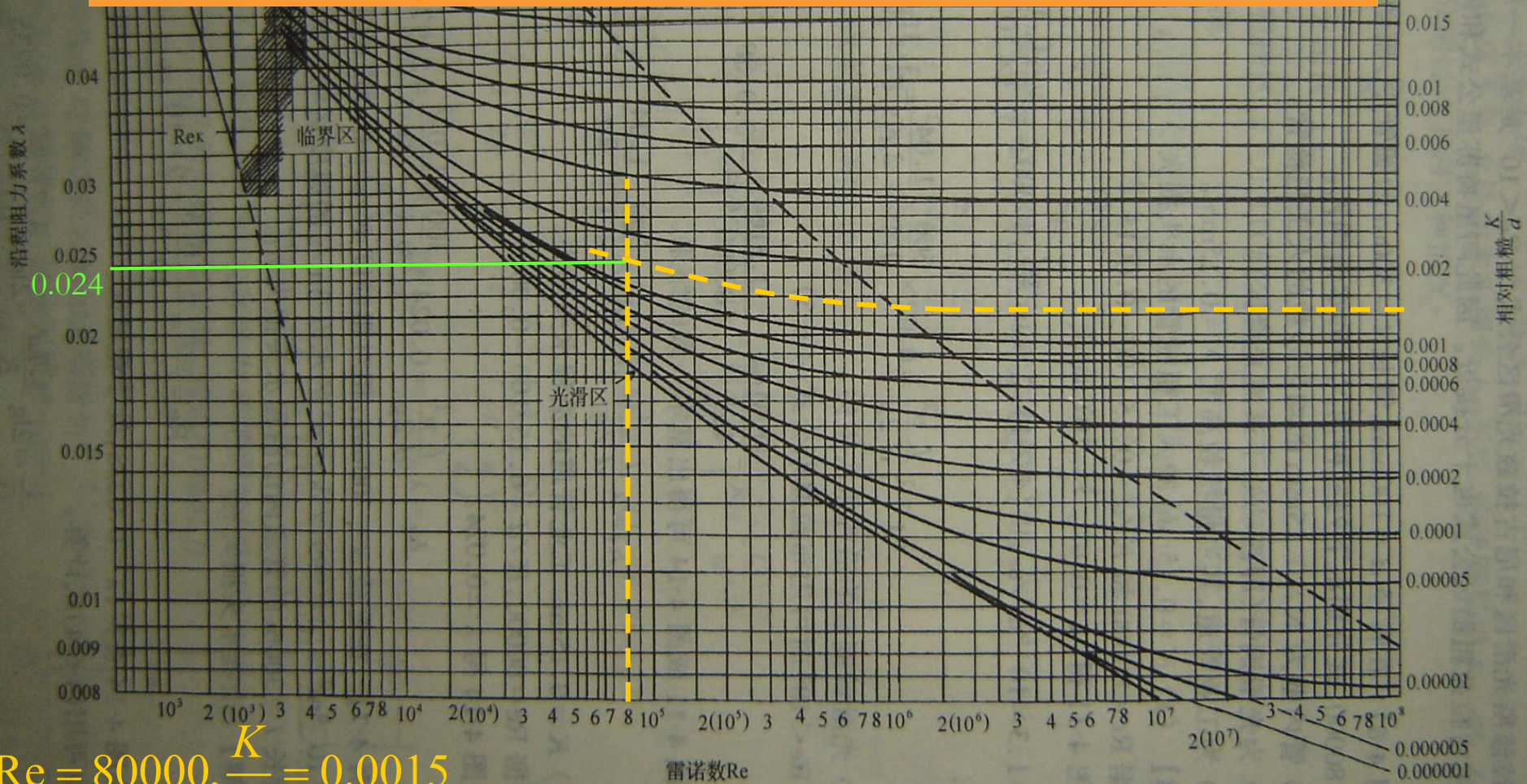
(2) 图4-11, 尼古拉兹粗糙管沿程阻力系数

(3) 图4-14, 莫迪图

$$h_f = \lambda \frac{l v^2}{d 2g} = 0.0188 \times \frac{300}{0.1} \times \frac{1.04^2}{2g} = 3.12 \text{ m}$$

3. 图4-14, 莫迪图

$$h_f = \lambda \frac{l v^2}{d 2g} = 0.024 \times \frac{300}{0.1} \times \frac{1.04^2}{2g} = 3.97 \text{ m}$$



$$Re = 80000, \frac{K}{d} = 0.0015$$

图4-14 莫迪图

例4-7: 管径300mm, $K/d=0.002$ 工业管道, 运动粘滞系数 $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$, 密度 $999.23\text{kg}/\text{m}^3$, 流速 $3\text{m}/\text{s}$, 求管长300m的沿程水头损失.

解: 1、
$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu} = \frac{3 \times 0.3}{10^{-6}} = 9 \times 10^5$$

查莫迪图 $\lambda = 0.0238$ 粗糙区

2、
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 21g \frac{K}{3.7d}$$

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} = 0.0238 \times \frac{300}{0.3} \times \frac{3^2}{2g} = 10.8\text{m}$$



例4-8:如管道长度不变,允许的水头损失不变,若管径增大一倍,不计局部损失,问三种情况下流量增大多少倍?

1. 流动为层流 $h_f = \lambda \frac{l v^2}{d 2g} = \frac{64 l v^2}{\text{Re} d 2g} = \frac{128nl}{pg} \frac{Q}{d^4}$

2. 流动为紊流光滑区 $\lambda = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}$

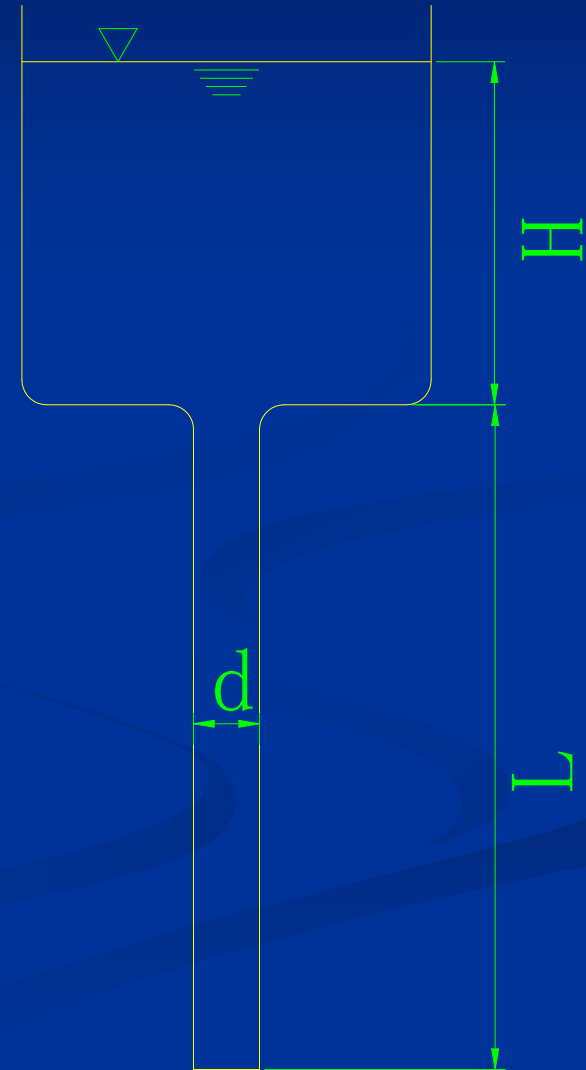
$$h_f = \lambda \frac{l v^2}{d 2g} = \frac{0.3164 v^{0.25} l}{2g \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1.75}} \cdot \frac{Q^{1.75}}{d^{4.75}}$$

3. 流动为紊流粗糙区 $\lambda = 0.11 \left(\frac{K}{d}\right)^{0.25}$

$$h_f = \lambda \frac{l v^2}{d 2g} = 0.11 \frac{K^{0.25} l}{2g \left(\frac{\pi}{4}\right)^2} \cdot \frac{Q^2}{d^{5.25}}$$

例4-9:如图,水箱底部接一水管,不计进口损失, λ 为常数,若 H, d, l 给定, 问什么条件下

1. Q 不随 L 而变?
2. Q 随 L 加大而增加?
3. Q 随 L 加大而减小?



$$H + L = \left(1 + \lambda \frac{L}{d}\right) \frac{v^2}{2g}$$

$$v = \frac{\sqrt{2g(H + L)}}{\sqrt{1 + \frac{\lambda L}{d}}}$$

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} v = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2g(H + L)}{1 + \frac{\lambda L}{d}}} \quad \frac{dQ}{dL}$$

$$\frac{dQ}{dL} = 0$$

$$\frac{\pi d^2}{4} \frac{1}{\sqrt{\frac{2g(H+L)}{1 + \frac{\lambda L}{d}}}} \frac{\left(1 + \lambda \frac{L}{d}\right) 2g + 2g(H+L) \frac{\lambda}{d}}{\left(1 + \frac{\lambda L}{d}\right)^2} = 0$$

$$1 - H \frac{\lambda}{d} = 0$$

$$H = \frac{d}{\lambda}$$

管长与流量无关

$$\frac{dQ}{dL} > 0 \quad 1 - H \frac{d}{\lambda} > 0 \quad H < \frac{d}{\lambda}$$

$$\frac{dQ}{dL} < 0 \quad 1 - H \frac{d}{\lambda} < 0 \quad H > \frac{d}{\lambda}$$

第七节 非圆管的沿程损失

怎么把非圆管折合成圆管？

水力半径 \longrightarrow 当量直径

水力半径：过流断面面积和湿周之比。 $R = \frac{A}{c}$

对于圆管： $R = \frac{A}{c} = \frac{\frac{\rho}{4}d^2}{\rho d} = \frac{d}{4}$ $d_e = 4R$

对于矩形管： $R = \frac{A}{c} = \frac{ab}{2(a+b)}$ $d_e = \frac{2ab}{a+b}$

对于方形管： $R = \frac{A}{c} = \frac{a^2}{4a} = \frac{a}{4}$ $d_e = a$

- ✓ 非圆管流中的流态判断的临界雷诺数仍为2000。
- ✓ 应用当量直径计算非圆管的能量损失，并不适用于所有情况。

 对矩形、方形、三角形结果接近，但对长缝形和星形断面差别较大。

 应用于层流时，误差较大。

例4-10：断面面积为 0.48m^2 的正方形管道、宽为高的三倍的矩形管道和圆形管道，求

1. 湿周和水力半径

2. 正方形和矩形管道的当量直径

解：正方形管道、矩形管道、圆形管道的尺寸为：

$$\text{正方形 } a = \sqrt{0.48} = 0.692\text{m} \quad \text{圆形 } d = \sqrt{\frac{4 \times 0.48}{\pi}} = 0.78\text{m}$$

$$\text{矩形 } h = \sqrt{\frac{0.48}{3}} = 0.4\text{m} \quad b = 3 \times 0.4 = 1.2\text{m}$$

各当量直径分别为：

正方形

$$d_e = a = 0.692$$

矩形

$$d_e = \frac{2bh}{b+h} = 0.6\text{m}$$

圆形

$$d_e = d = 0.78\text{m}$$

计算结果说明：当流量和断面积等条件相同时，方形管道比矩形管道水头损失少，而圆形管道又比方形管道水头损失少。从减少水头损失的观点来看，圆形断面是最佳的。

例4-11: 钢板制风道, $400 \times 200\text{mm}$, 80m 长, 流速 10m/s , 20°C , 求压强损失.

$$d_e = \frac{2ab}{a+b} \longrightarrow \text{Re} = \frac{vd}{\nu}$$
$$\frac{K}{d_e} \longrightarrow \text{查莫迪图, 得}\lambda$$

$$p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2}$$



第八节 管道流动的局部损失

- 🔔 流体流过某些配件时, 由于边壁或流量的改变, 均匀流在这一局部地区遭到破坏, 引起了流速的大小, 方向或分布的变化. 由此产生的能量损失, 称为**局部损失**。
- 🔔 局部损失在某些工程的管道损失中占有很大比重。
- 🔔 局部损失种类繁多, 情况复杂, 其损失计算还不能从理论上解决。



2008 3 28



2008 3 28



2008 3 28

🌸 局部损失的计算公式为：
$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

ζ ：局部阻力系数

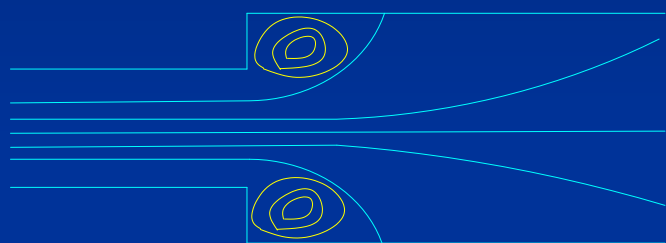
🌸 实验研究表明：局部损失和沿程损失一样，不同的流态遵循不同的规律。

如果流体以层流经过局部阻碍，而且受干扰后仍能保持层流的话，局部阻力系数为：

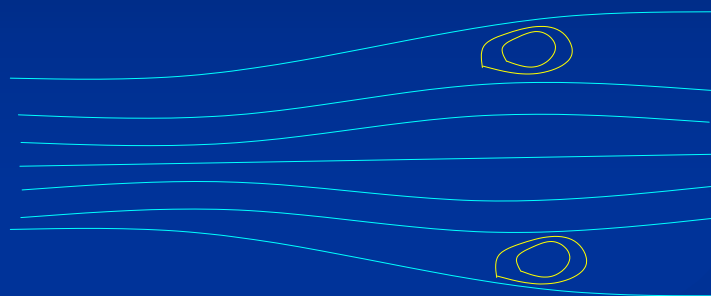
$$\zeta = \frac{B}{Re}$$

★ 要使局部阻碍处受边壁强烈干扰的流动仍能保持层流，只有当 Re 远小于2000才有可能。因此，以紊流的局部损失讨论为主。

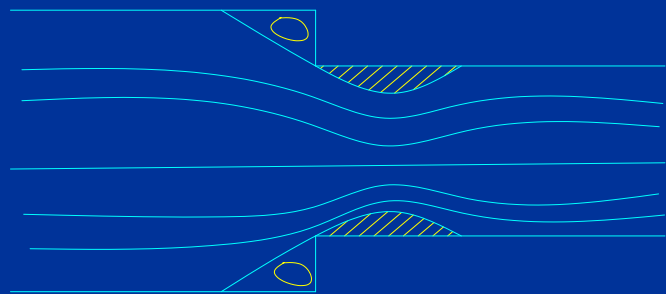
局部阻碍的种类很多，但按其流动特性来分，主要是过流断面的扩大或收缩、流动方向的改变、流量的合入与分出三种基本形式以及这几种形式的不同组合。



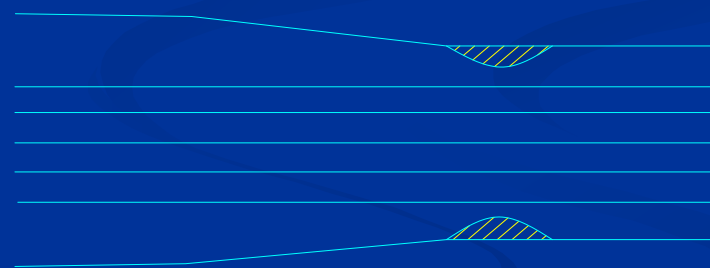
(a)



(b)



(c)



(d)

 断面突然缩小时的水流图形

 断面突然扩大时的水流图形

 突缩与突扩的对比

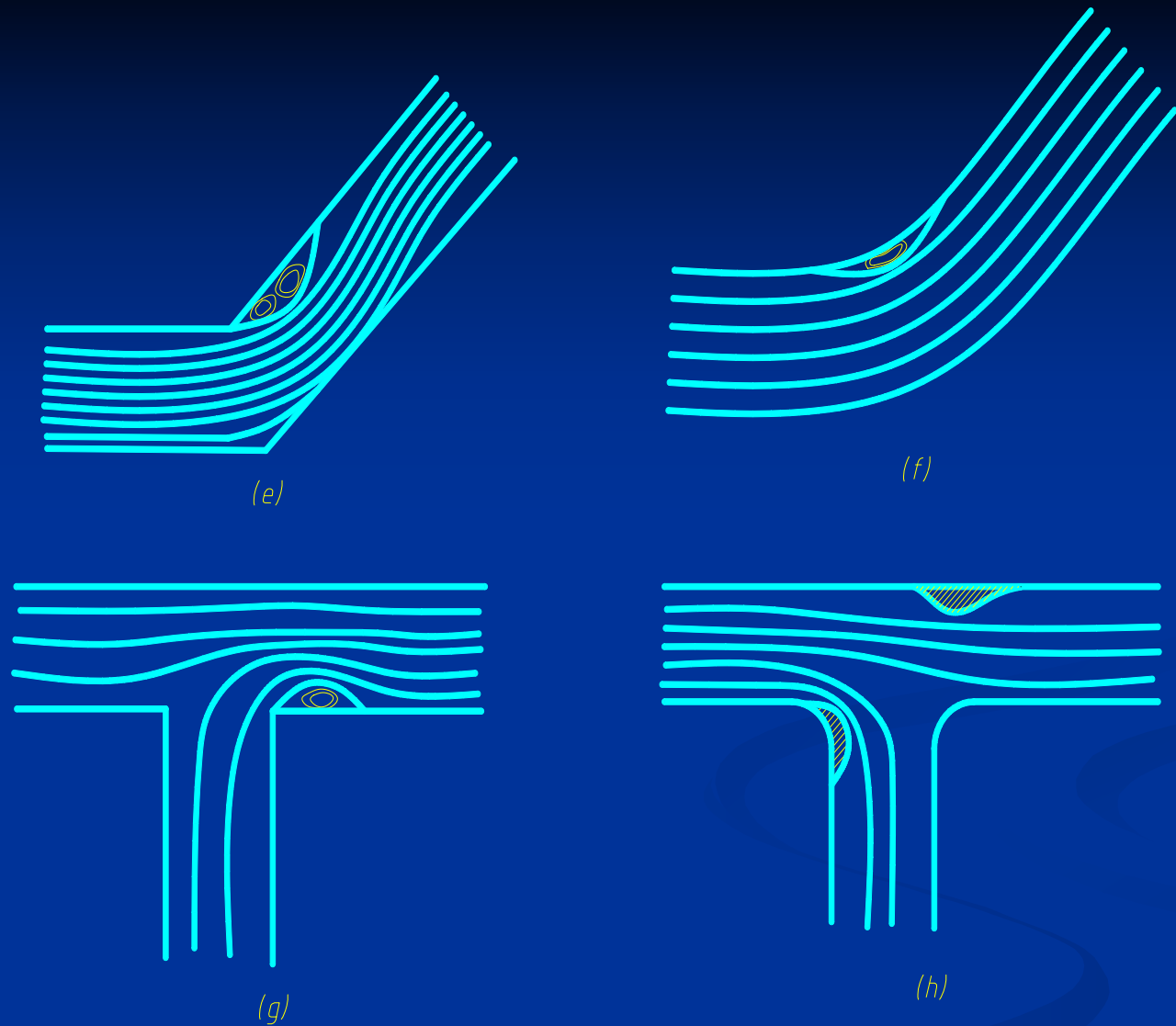





图4-17 几种典型的局部阻碍

 涡旋区内不断产生着涡旋, 其能量来自主流, 不断消耗主流的能量。

 在涡旋区及其附近, , 过流断面上的速度梯度加大, 使主流能量损失有所增加。

 在涡旋被不断带走并扩散的过程中, 加剧了下游一定范围内的紊流脉动, 从而加大了这段管长的能量损失。

 在局部阻碍范围损失的能量, 只占局部损失中的一部分, 另一部分是在局部阻碍下游一定长度的管段上损耗掉的, 这段长度称为局部阻碍的**影响长度**。

大量实验研究表明紊流的局部阻力系数取决于：

- 局部阻碍的的几何形状
- 固体壁面的相对粗糙度
- 雷诺数

其中，起主导作用的是：**局部阻碍的的几何形状**

- 相对粗糙的影响

- Re的影响

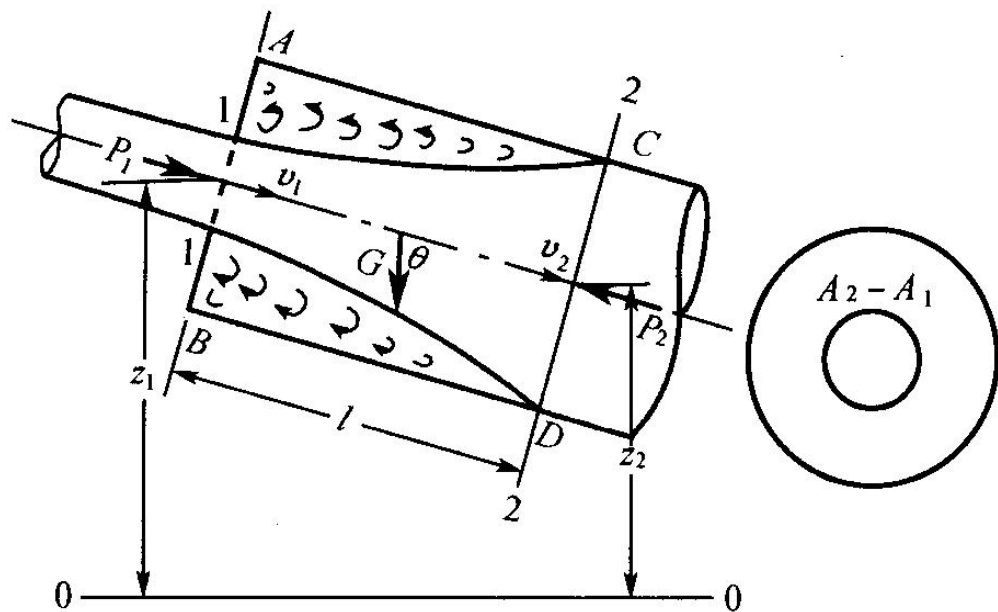
- 沿程损失和局部损失本质上都是由紊流掺混作用引起的惯性阻力和粘性阻力造成的。

突然扩大的局部损失

$$h_m = \left(Z_1 + \frac{p_1}{g} + \frac{a_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{g} + \frac{a_2 v_2^2}{2g} \right)$$

由动量方程：

$$\sum F = \frac{\gamma Q}{g} (\alpha_{02} v_2 - \alpha_{01} v_1)$$



作用在流体上的外力有：

🌸 作用在AB断面上的总压力： $P_1 = p_1 A_2$

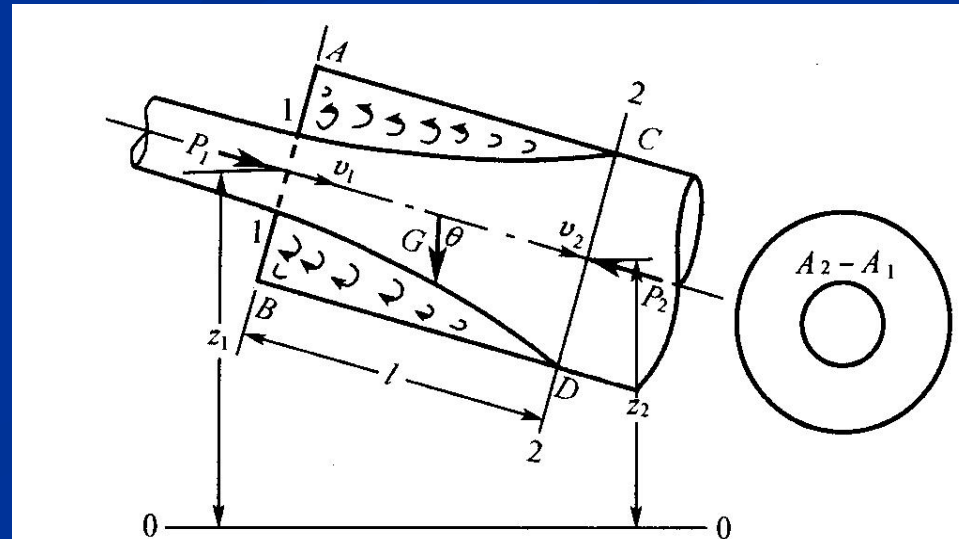
🌸 作用在CD断面上的总压力： $P_2 = p_2 A_2$

🌸 重力在管轴上的投影：

$$G \cos \theta = \rho g A_2 l \cos \theta$$

$$l \cos \theta = Z_1 - Z_2$$

$$\begin{aligned} G \cos \theta &= \rho g A_2 (Z_1 - Z_2) \\ &= \gamma A_2 (Z_1 - Z_2) \end{aligned}$$



$$p_1 A_2 - p_2 A_2 + \gamma A_2 (Z_1 - Z_2) = \frac{\gamma Q}{g} (a_{02} v_2 - a_{01} v_1)$$

$$Q = v_2 A_2$$

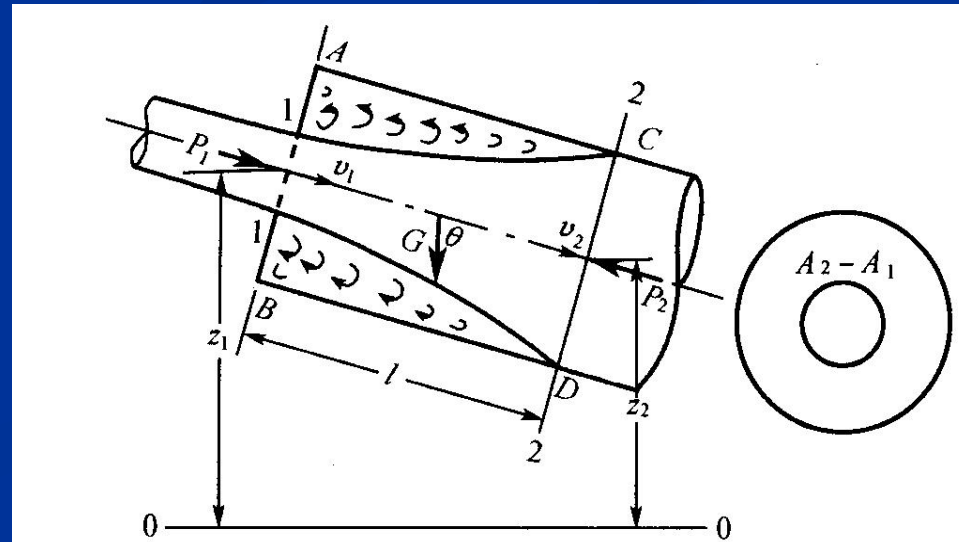
$$(Z_1 + \frac{p_1}{\gamma}) - (Z_2 + \frac{p_2}{\gamma}) = \frac{v_2}{g} (a_{02} v_2 - a_{01} v_1)$$

将上式代入能量方程

$$h_m = (Z_1 + \frac{p_1}{g} + \frac{a_1 v_1^2}{2g}) - (Z_2 + \frac{p_2}{g} + \frac{a_2 v_2^2}{2g})$$

$$h_m = \frac{a_1 v_1^2}{2g} - \frac{a_2 v_2^2}{2g}$$

$$+ \frac{v_2}{g} (a_{02} v_2 - a_{01} v_1)$$



$$h_m = \frac{a_1 v_1^2}{2g} - \frac{a_2 v_2^2}{2g} + \frac{v_2}{g} (a_{02} v_2 - a_{01} v_1)$$

(取动能、动量修正系数均为1)

$$h_m = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$



突然扩大的水头损失等于以平均流速差计算的流速水头。

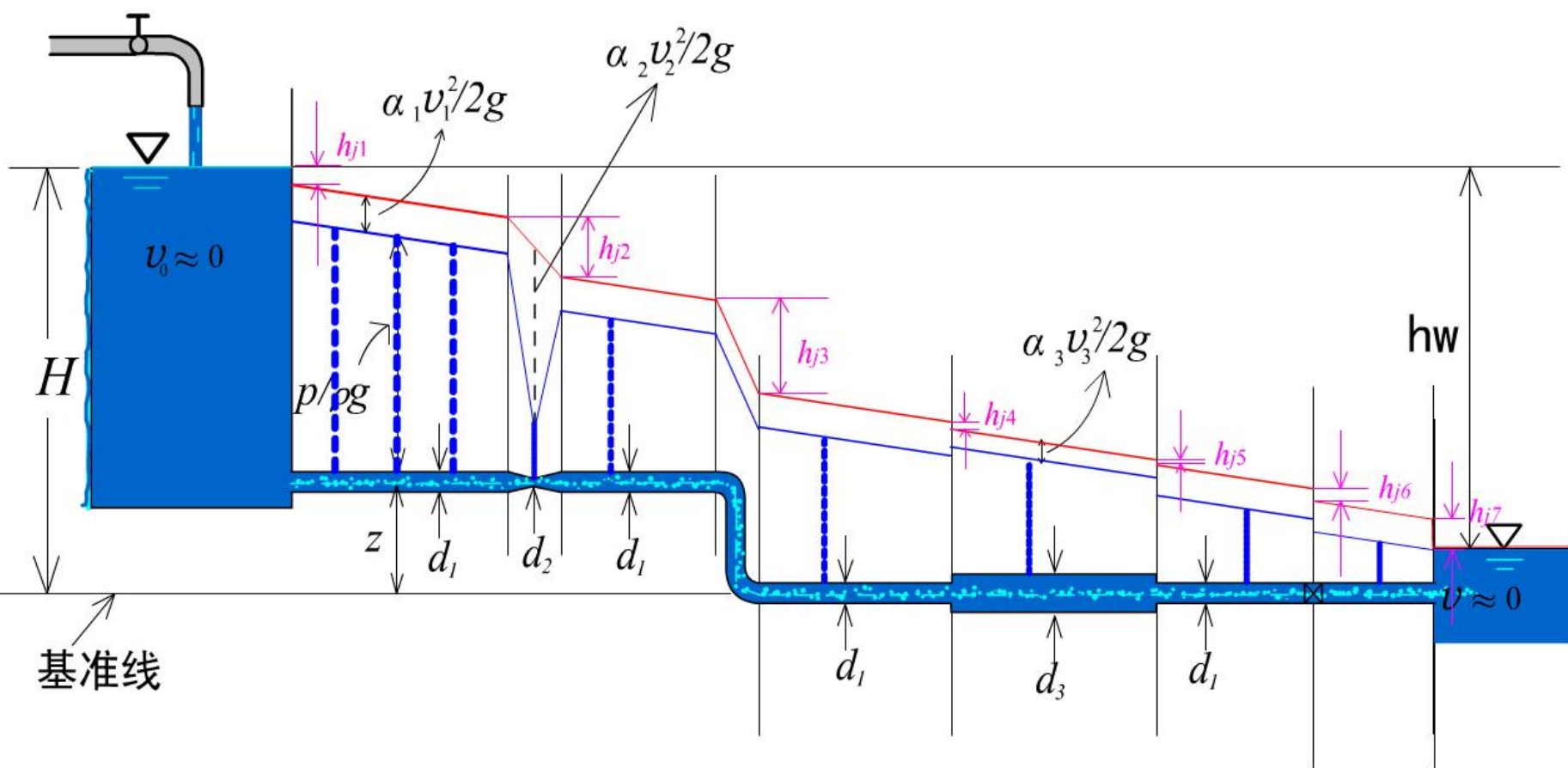
$h_m = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$ 要将该式变成计算局部损失的一般形式，利用 $v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2}$ $v_1 = v_2 \frac{A_2}{A_1}$

$$h_m = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = \zeta_1 \frac{v_1^2}{2g} \quad h_m = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2 \frac{v_2^2}{2g} = \zeta_2 \frac{v_2^2}{2g}$$

突然扩大的阻力系数为： $\zeta_1 = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$ $\zeta_2 = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2$

 突然扩大前后有两个不同的平均流速，因而有两个相应的阻力系数，计算时必须注意使选用的阻力系数与流速水头相适应。

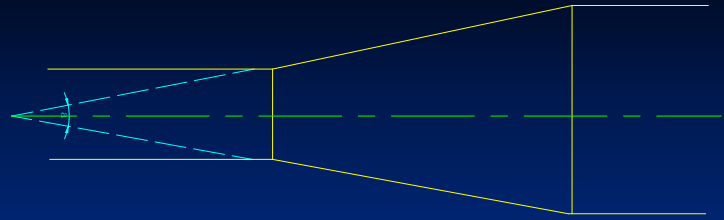
 当流体从管道进入无限大空间时， $\zeta_1 = 1$ ，这是突然扩大的特殊情况，称为出口阻力系数。



测压管水头线与能头线的绘制



渐扩管的局部损失

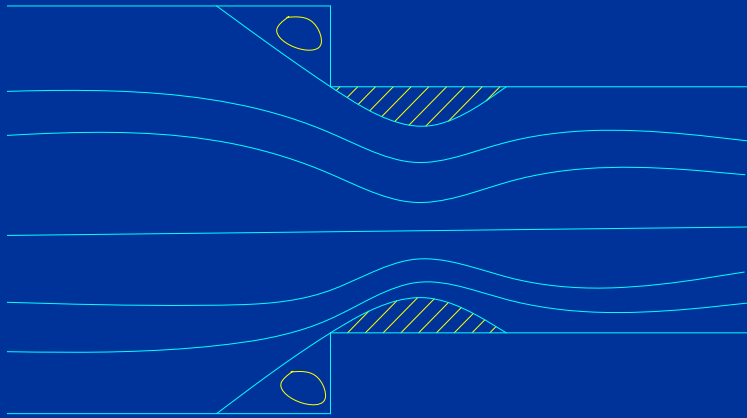


- 突然扩大的水头损失较大，改用渐扩管后，水头损失将大大减少。
- 渐扩管的水头损失可认为由**摩擦损失**和**扩散损失**两部分组成。
- 扩散损失是涡旋区和流速分布改组所形成的损失。
- 当扩大面积比不变时，渐扩管的摩擦损失随扩散角的增大和管段的缩短而减少，但扩散损失却随之增加。
- 最小水头损失扩散角约在 $5-8^\circ$ 范围内，所以扩散角最好不超过 $8-10^\circ$ 。
- 实际通风工程中，管道扩散角通常不超过 45° 。

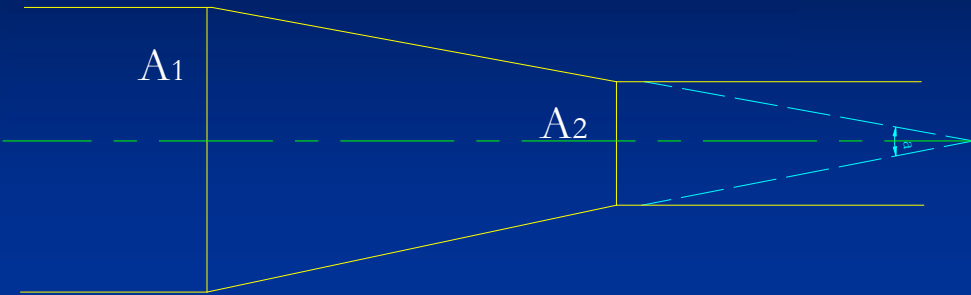
突然缩小的局部损失：

突然缩小的水头损失大部分发生在收缩断面后面的流段上，主要是收缩断面附近的旋涡区造成的。

突然缩小的局部损失为：
$$h_m = 0.5\left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right) \frac{v_2^2}{2g}$$



渐缩管的局部损失:



阻力系数可由图4-22查得

对应的流速水头为 $\frac{v_2^2}{2g}$

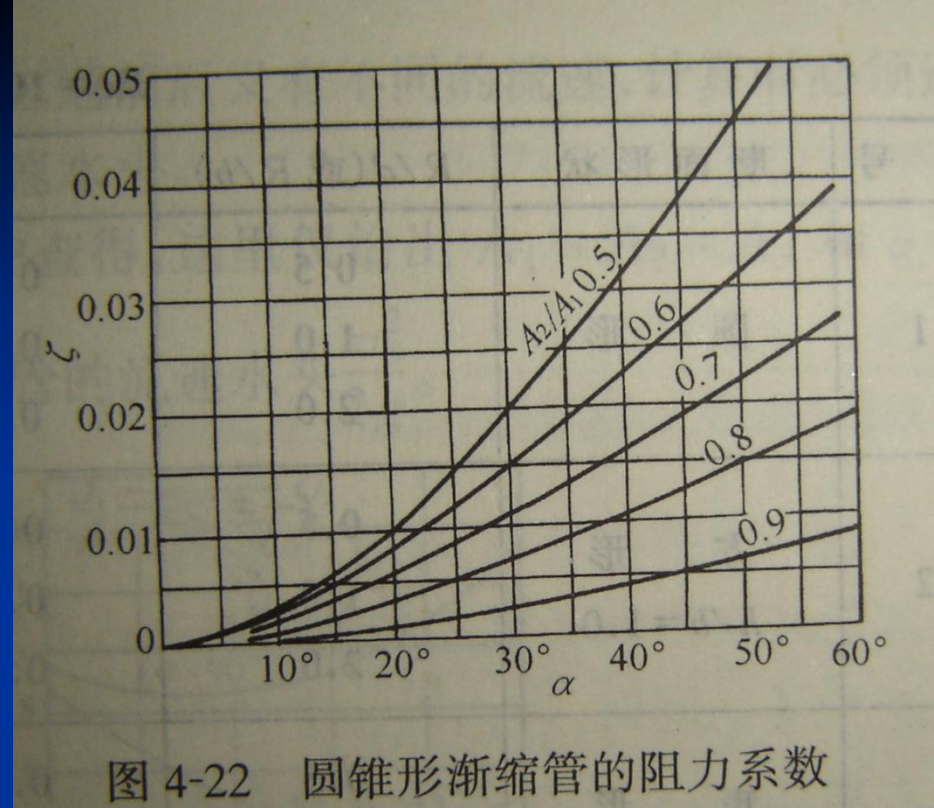


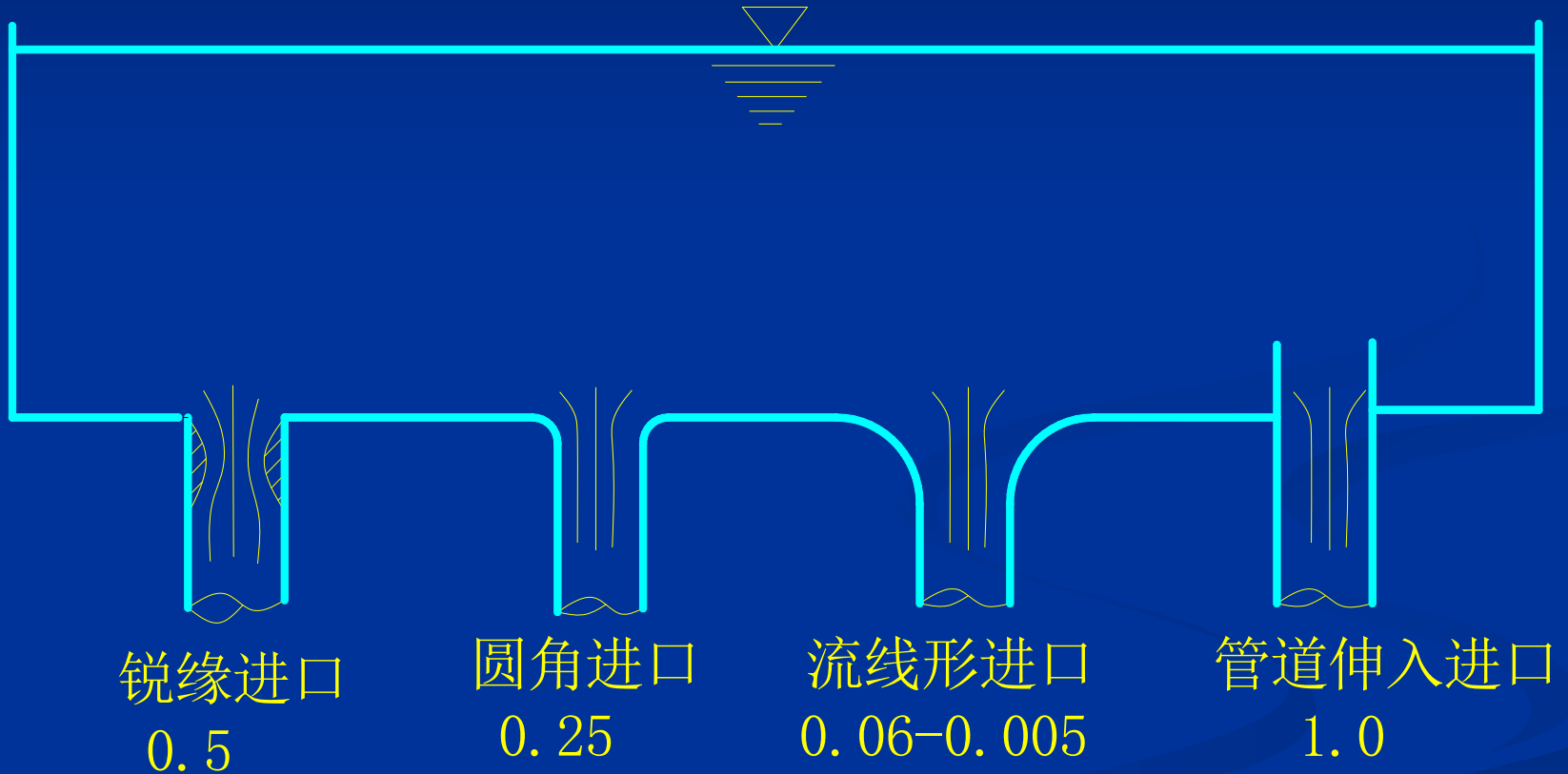
图 4-22 圆锥形渐缩管的阻力系数



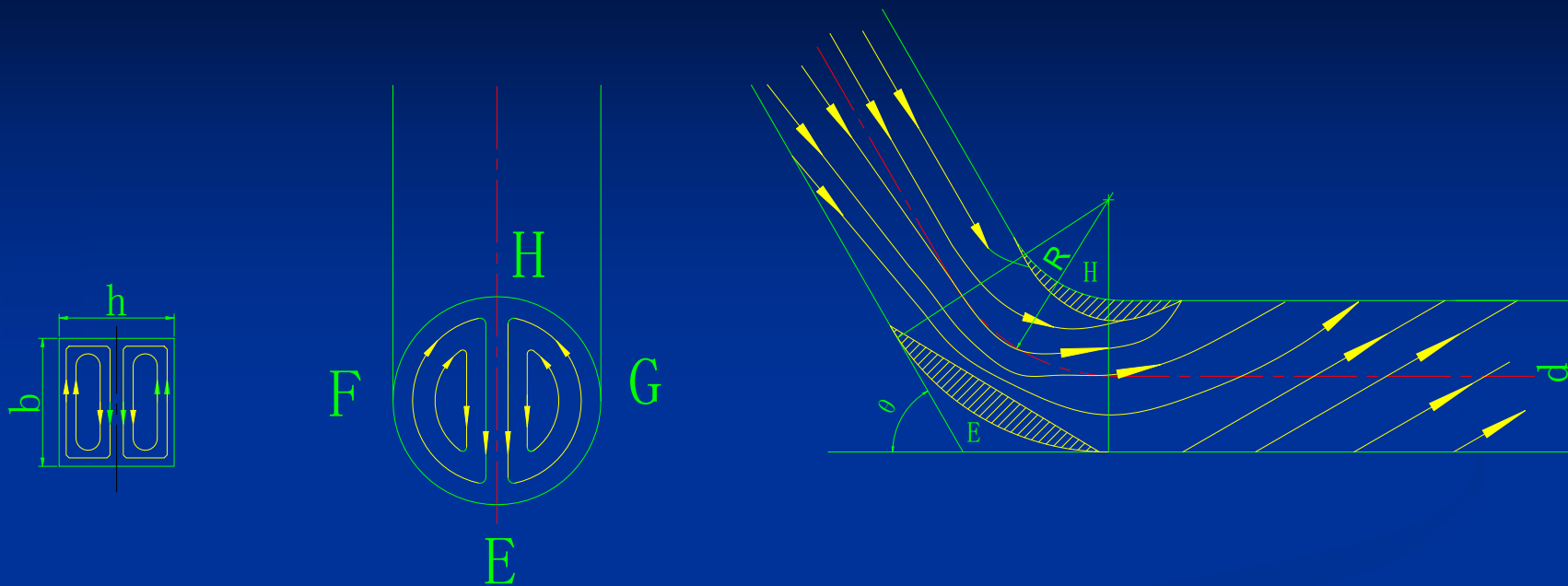
断面逐渐缩小时的水流图形



管道进口的局部损失:



弯管的局部损失:



- 🔔 弯管是典型的局部阻碍。它只改变流动方向，不改变平均流速的大小。
- 🔔 方向的改变不仅使弯管的内侧和外侧出现旋涡区，而且还产生了二次流现象。
- 🔔 二次流和主流叠加在一起，使通过弯管的流体质点作螺旋运动，加大了弯管的水头损失。

弯管的几何形状决定于转角 θ 、曲率半径与管径之比 (R/d)。对矩形断面的弯管还有高宽比 (h/b)。

$Re=1000000$ 时弯管的局部阻力系数

序号	断面形状	$R/d (R/b)$	30°	45°	60°	90°
1	圆形	0.5	0.120	0.27	0.48	1.000
		1.0	0.058	0.100	0.150	0.246
		2.0	0.066	0.089	0.112	0.159
2	方形 $h/b=1.0$	0.5	0.120	0.27	0.480	1.060
		1.0	0.054	0.079	0.130	0.241
		2.0	0.051	0.078	0.102	0.124
3	矩形 $h/b=0.5$	0.5	0.120	0.270	0.480	1.000
		1.0	0.058	0.087	0.135	0.220
		2.0	0.062	0.088	0.112	0.155
4	矩形 $h/b=2.0$	0.5	0.120	0.280	0.480	1.080
		1.0	0.042	0.081	0.140	0.227
		2.0	0.042	0.063	0.083	0.113

三通的局部损失:

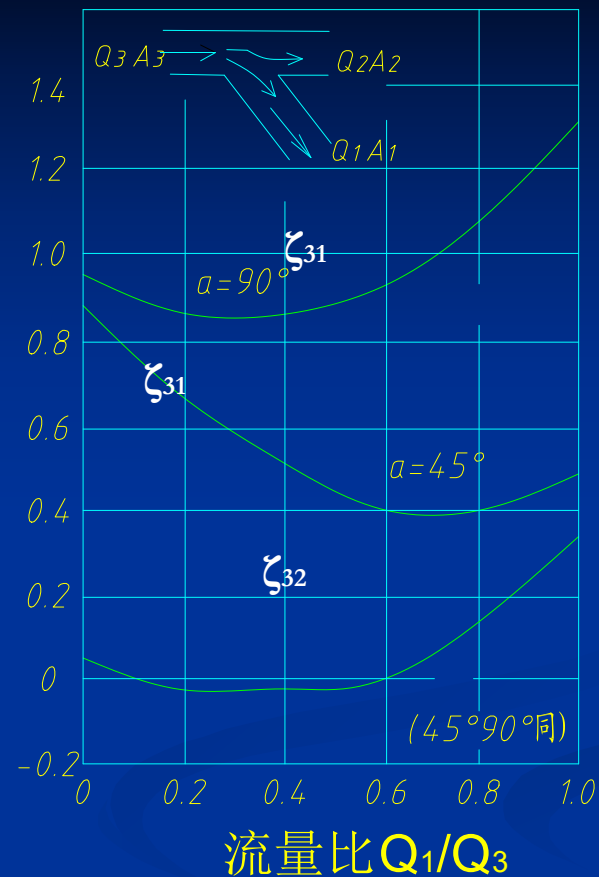
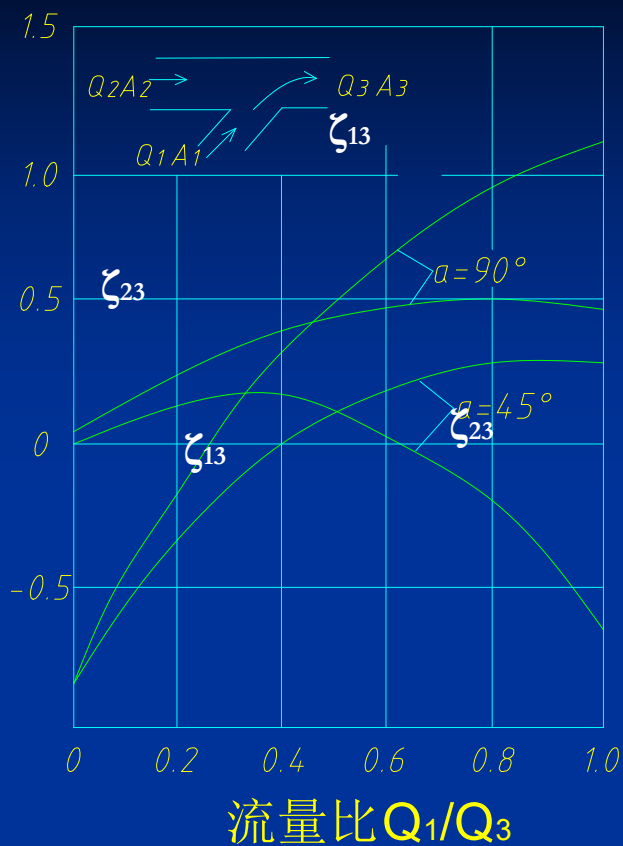
工程中常用的三通有两类: Y型三通和T型三通。



图4-25 三通的两种主要类型

(a)“Y”形分流三通; (b)“T”形合流三通

三通有两个支管, 所以有两个局部阻力系数。三通前后又有不同的流速, 计算时必须选用和支管相应的阻力系数, 以及和该系数相应的流速水头。



45° 和90° “T”形三通的局部阻力系数

合流三通的局部阻力系数出现负值，为什么？

★三通两个支管的阻力系数，绝不会同时出现负值。

局部阻力之间的相互干扰

- 🔔 一般给出的 ζ 值都是在局部阻碍的前后有足够长的直管段，使进入和流出局部阻碍的流动能够恢复均匀流正常流速分布与脉动强度。测得的局部损失包括影响长度内的附加损失。
- 🔔 工业管道的设计中不可避免地存在着局部阻碍之间的相互干扰问题。目前该问题的研究还很不够。
- 🔔 干扰修正系数
- 🔔 相互干扰的结果使局部损失可能减小，也可能增大。
- 🔔 如局部阻碍之间的直管段长度大于 $3d$ ，干扰修正系数一般都小于1。即设计管道时，如各局部阻碍之间的距离都大于 $3d$ ，忽略相互干扰的影响的计算结果，一般是偏于安全的。


第九节 减小阻力的措施

减小管中流体运动阻力有两条完全不同的途径：

 改进流体外部的边界，改善边壁对流动的影响。

 减小管壁的粗糙度

 用柔性边壁代替刚性边壁

 添加剂减阻：在流体内部投加极少量的添加剂，使其影响流体运动的内部结构来实现减阻。（与紊流机理这个流体力学中的基本理论问题密切相关）

减小紊流局部阻力的着眼点在于防止或推迟流体与壁面的分离，避免旋涡区的产生或减小旋涡区的大小和强度。

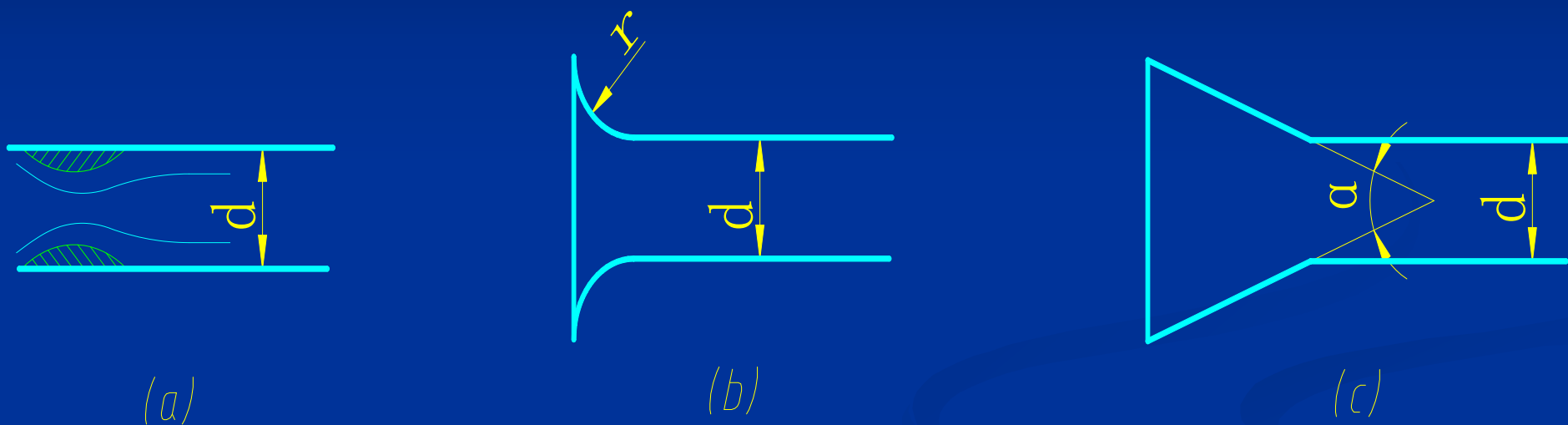


图4-27 几种进口阻力系数

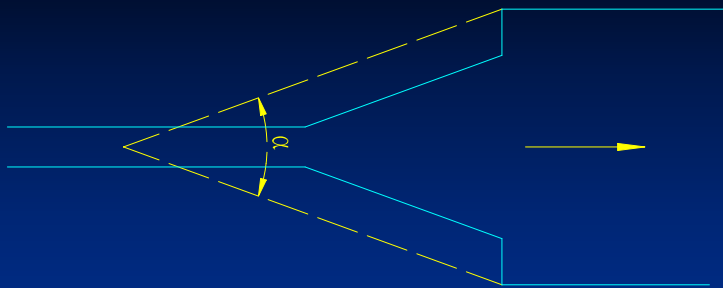
$$\zeta = 1$$

$$\frac{r}{d} = 0.2$$

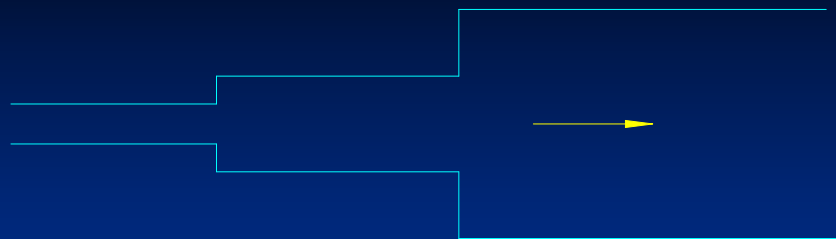
$$\zeta = 0.03$$

$$\alpha = 40^\circ \quad 80^\circ, \frac{b}{d} = 0.25 \quad 1.0$$

$$\zeta = 0.1 \quad 0.2$$



(a)



(a)

复合式渐扩管和台阶式突扩管

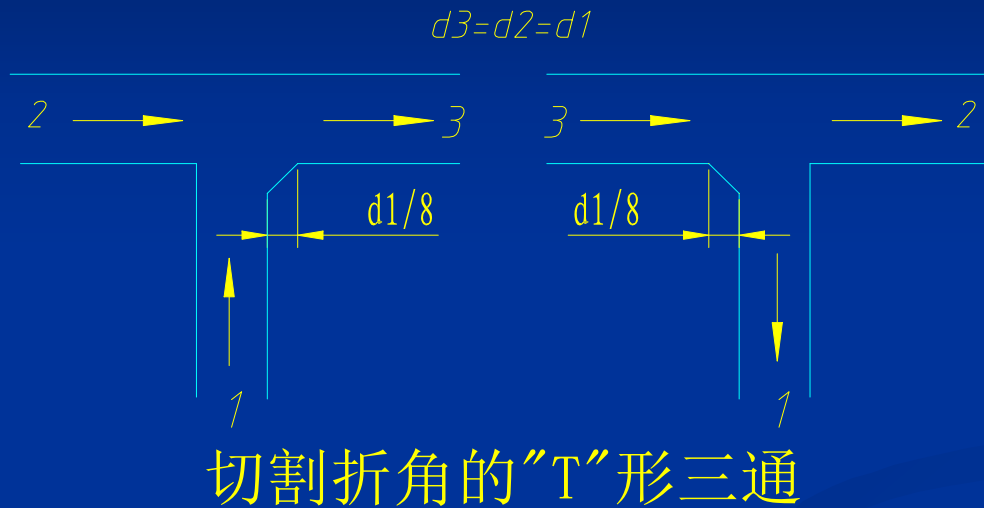
不同 R/d 时 90° 弯管的 ξ 值 ($Re=1000000$)

R/d	0	0.5	1	2	3	4	6	
ξ	1.14	1.00	0.246	0.159	0.145	0.167	0.20	

注意:弯管的 R 最好在 $(1-4)d$ 的范围内
 R/d 较小时, 可布置导流叶片



尽可能减小支管与合流管之间的夹角，或将支管与合流管连接处的折角改缓，都能减小三通的局部阻力系数。



配件之间的不合理衔接，也会使局部阻力加大。

先弯后扩？先扩后弯？

油在管中以 $v=1\text{m/s}$ 的速度流动，油的密度 $\rho=920\text{kg/m}^3$
 $L=3\text{m}, d=25\text{mm}$,水银压差计测得 $h=9\text{cm}$, 试求

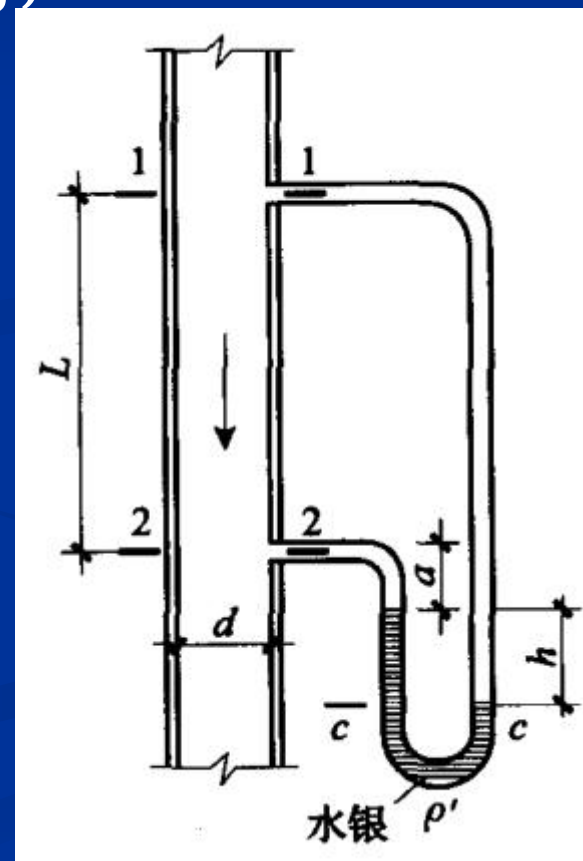
- (1) 油在管中的流态?
- (2) 油的运动黏滞系数?
- (3) 若保持相同的平均流速反向流动,
压差计的读数有何变化?

解：建立1-2断面之间的能量方程

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_f$$

$$v_1 = v_2$$

$$\left(\frac{P_1}{\gamma} + Z_1\right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + Z_2\right) = h_f$$



$$\left(\frac{P_1}{\gamma} + Z_1\right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + Z_2\right) = h_f$$

$$P_1 + \gamma(L + a + h) = P_2 + \gamma a + \gamma' h$$

$$P_1 + \gamma(L + h) = P_2 + \gamma' h$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + (L + h) = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\gamma'}{\gamma} h$$

$$\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} = \frac{\gamma'}{\gamma} h - (L + h)$$

$$\frac{\gamma'}{\gamma} h - (L + h) + Z_1 - Z_2 = h_f$$

$$\frac{\gamma'}{\gamma} h - h = h_f$$

$$\frac{13.6}{0.92} h - h = h_f = 1.24 \text{ m}$$

$$\lambda \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} = h_f = 1.24 \text{ m}$$

假设流动为层流，则：

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64\nu}{vd}$$

$$\lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} = \frac{64\nu}{vd} \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} = \frac{64\nu Lv}{2gd^2} = 1.24$$

$$\nu = 1.24 \frac{gd^2}{32Lv} = 79 \times 10^{-6}$$

经检验：

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu} = \frac{1 \times 0.025}{79 \times 10^{-6}} = 316 < 2000$$

(3) : 若反向流动, 流速不变, 损失也不变

$$\frac{p_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_f = \frac{p_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \xrightarrow{v_1=v_2}$$

$$h_f = \left(\frac{p_2}{\gamma} + Z_2 \right) - \left(\frac{p_1}{\gamma} + Z_1 \right)$$

$$\frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = h_f + Z_1 - Z_2$$

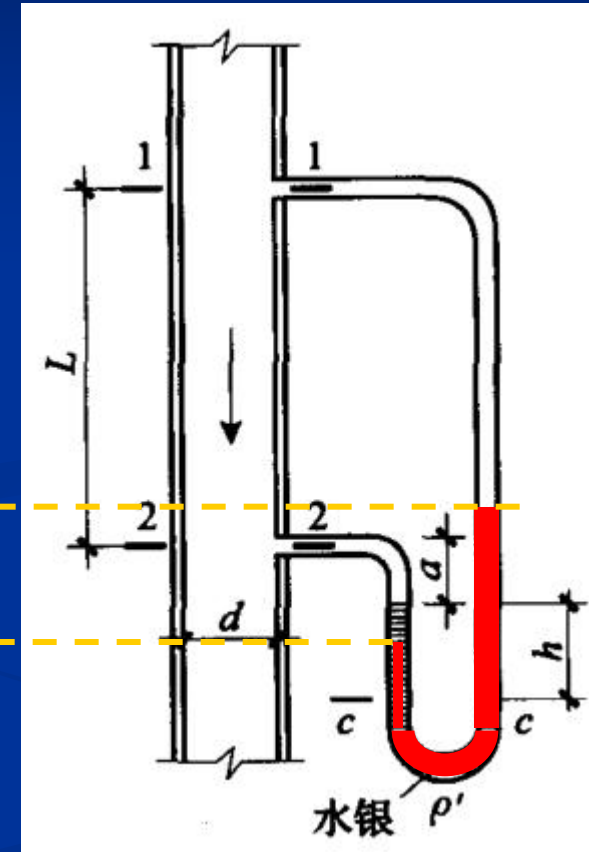
$p_2 > p_1$ 这时测压计变成如图所示:

$$p_2 + \gamma a' = p_1 + \gamma L' + \gamma' h' \xrightarrow{L'+h'=L+a'}$$

$$p_2 + \gamma a' = p_1 + \gamma(L + a' - h') + \gamma' h'$$

$$\frac{p_2 - p_1}{\gamma} = L - h'(1 - \frac{\gamma'}{\gamma})$$

$$\frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = h_f + Z_1 - Z_2$$



$$L - h'(1 - \frac{\gamma'}{\gamma}) = h_f + L \rightarrow h_f = h'(\frac{\gamma'}{\gamma} - 1) \quad h' = h$$