

Hydraulics

水力学

第五章 有压管道中的恒定流

Steady flow in pipe

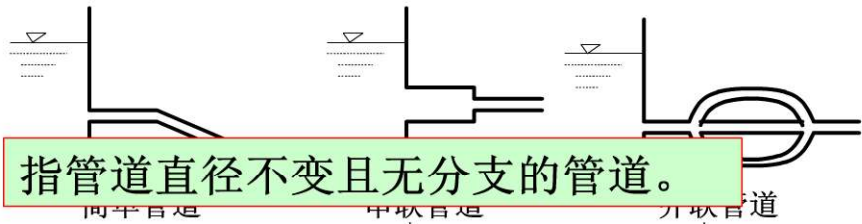
吕宏兴

§ 5 有压管道中的恒定流

有压管道
无压管道



有压流
无压流



简单管道
复杂管道

指管道直径不变且无分支的管道。

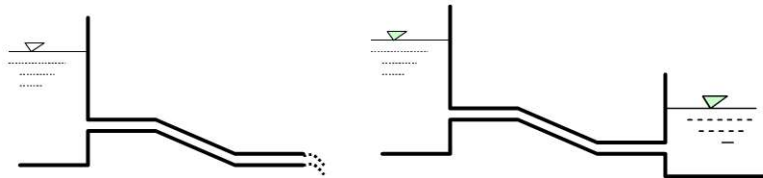
长管
短管

水头损失以沿程水头损失为主，局部水头损失及流速水头在总水头损失中所占比重很小，计算时可以忽略的管道

复杂管道

局部水头损失及流速水头在总损失中占有相当的比重，计算时不能忽略的管道

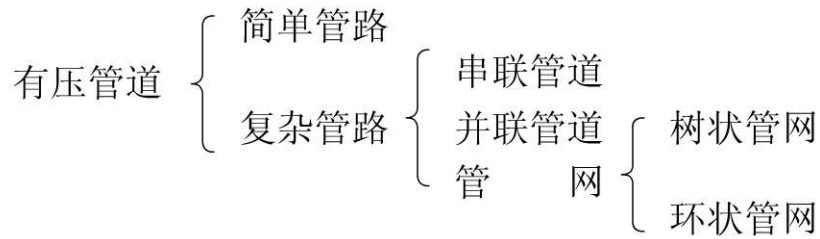
自由出流
淹没出流



§ 5 有压管道中的恒定流

1、有压管道根据布置的不同，可分为：

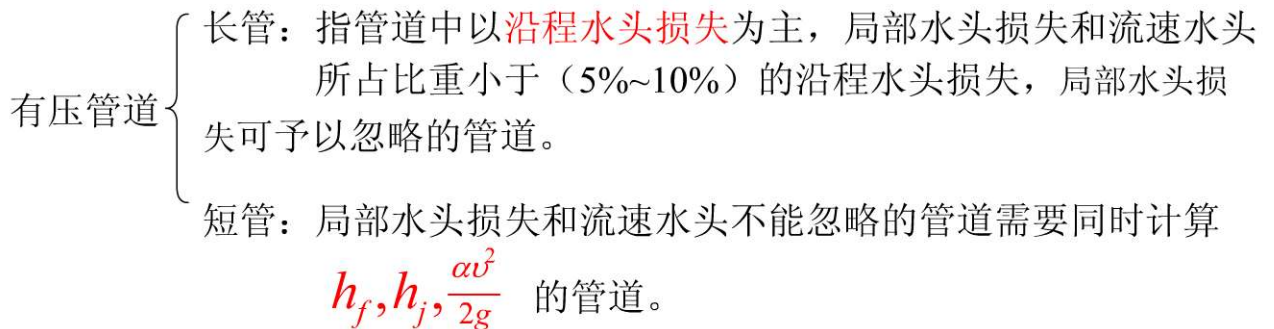
管流分类



简单管路：是指管径、流速、流量沿程不变，且无分支的单线管道。

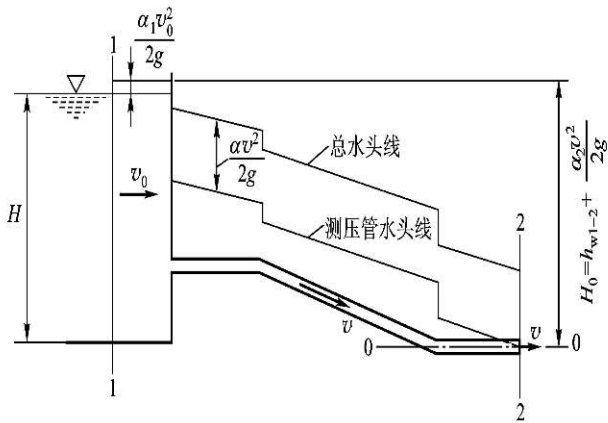
复杂管路：是指由两根以上管道所组成的管路系统。

2、按局部水头损失和流速水头之和在总水头损失中所占的比重，管道可分为

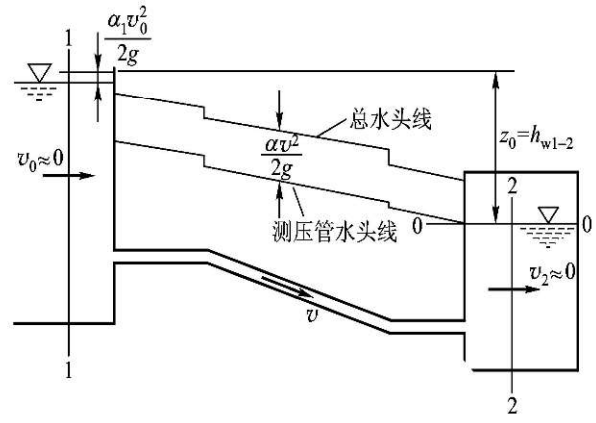


简单管道： 管道直径不变且无分支的管道。

其水力计算分为自由出流和淹没出流。

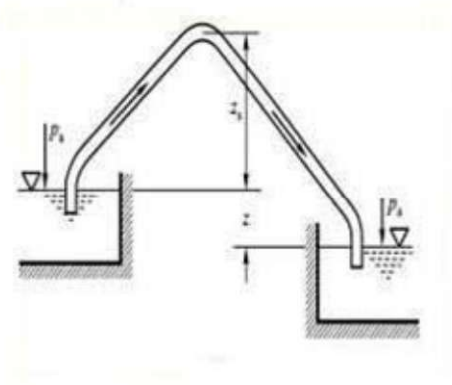


自由出流

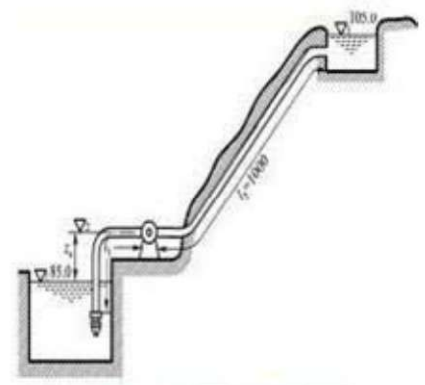
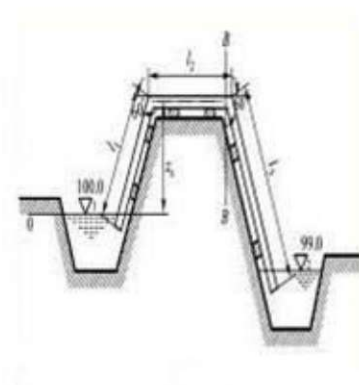


淹没出流

简单管道： 实际工程中常见的有虹吸管和水泵。

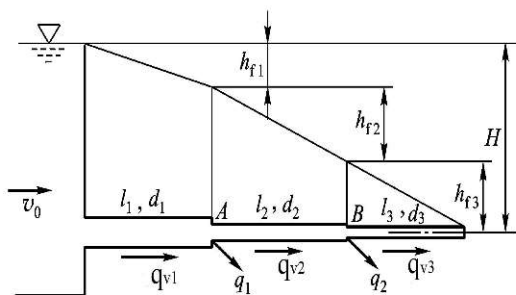


虹吸管

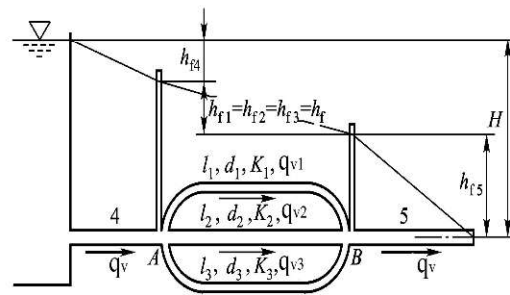


水泵

1. **串联管道:** 有直径不同的几段管道依次连接而成的管道。
2. **并联管道:** 凡是两条或两条以上的管道从同一点分叉而又在另一点汇合而成的管道。



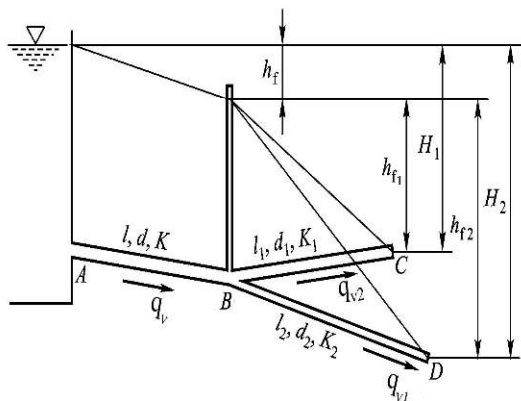
串联管道



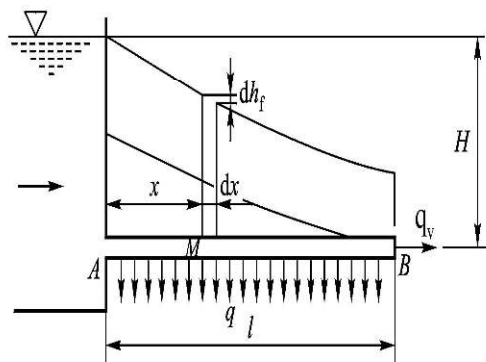
并联管道

3. 分叉管道：分叉后不再汇合的管道。

4. 沿程均匀泄流管道：沿程有流量泄出的管道。



分叉管道

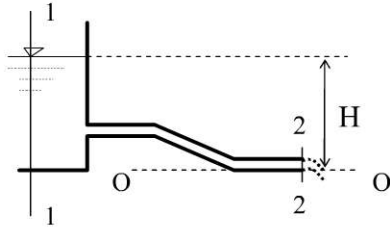


沿程均匀泄流管道

§ 5.1 简单管道水力计算的基本公式

一、简单管道自由出流

以管道出口中心为基准面，对1-1断面和2-2断面建立能量方程



$$H + \frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} = \frac{\alpha_2 v^2}{2g} + h_{w_{1-2}}$$

令： $H + \frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} = H_0$ 代入上式得

$$H_0 = \frac{\alpha_2 v^2}{2g} + h_f + \sum h_j = \frac{\alpha_2 v^2}{2g} + \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} + \sum \zeta_i \frac{v^2}{2g}$$

$$H_0 = \left(\alpha_2 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta_i \right) \frac{v^2}{2g}$$

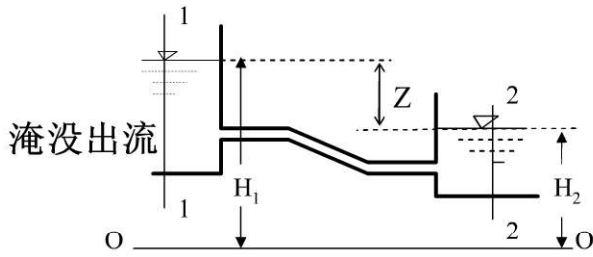
$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta_i}} \sqrt{2gH_0}$$

令： $\mu_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta_i}}$

$$Q = vA = \mu_c A \sqrt{2gH_0}$$

§ 5.1 简单管道水力计算的基本公式

二、简单管道淹没出流



以0—0为基准面，对1-1断面和2-2断面建立能量方程

$$H_1 + \frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} = H_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}$$

上下游过水断面远大于管道，故：

$$\frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} \approx 0, \quad \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \approx 0, \quad \therefore z = H_1 - H_2$$

$$\therefore h_w = h_f + \sum h_j = z$$

淹没出流时，作用水头 z 全部消耗于水头损失

$$z = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta_i \right) \frac{v^2}{2g}$$

$$\text{令：} \quad \mu_c = \frac{1}{\sqrt{\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta_i}}$$

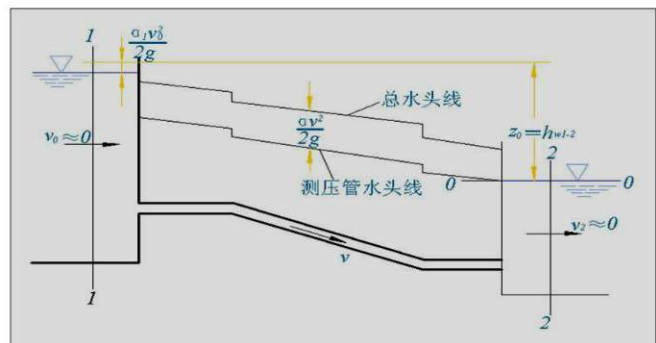
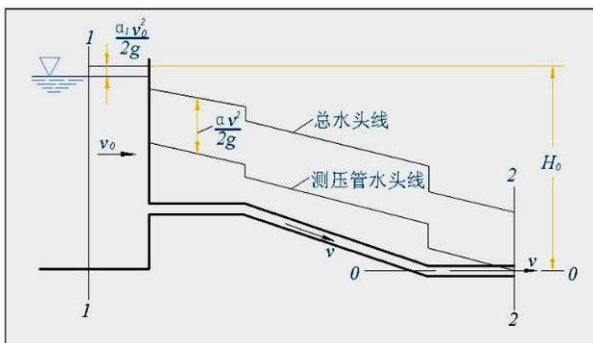
$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta_i}} \sqrt{2gz}$$

$$Q = vA = \mu_c A \sqrt{2gz}$$

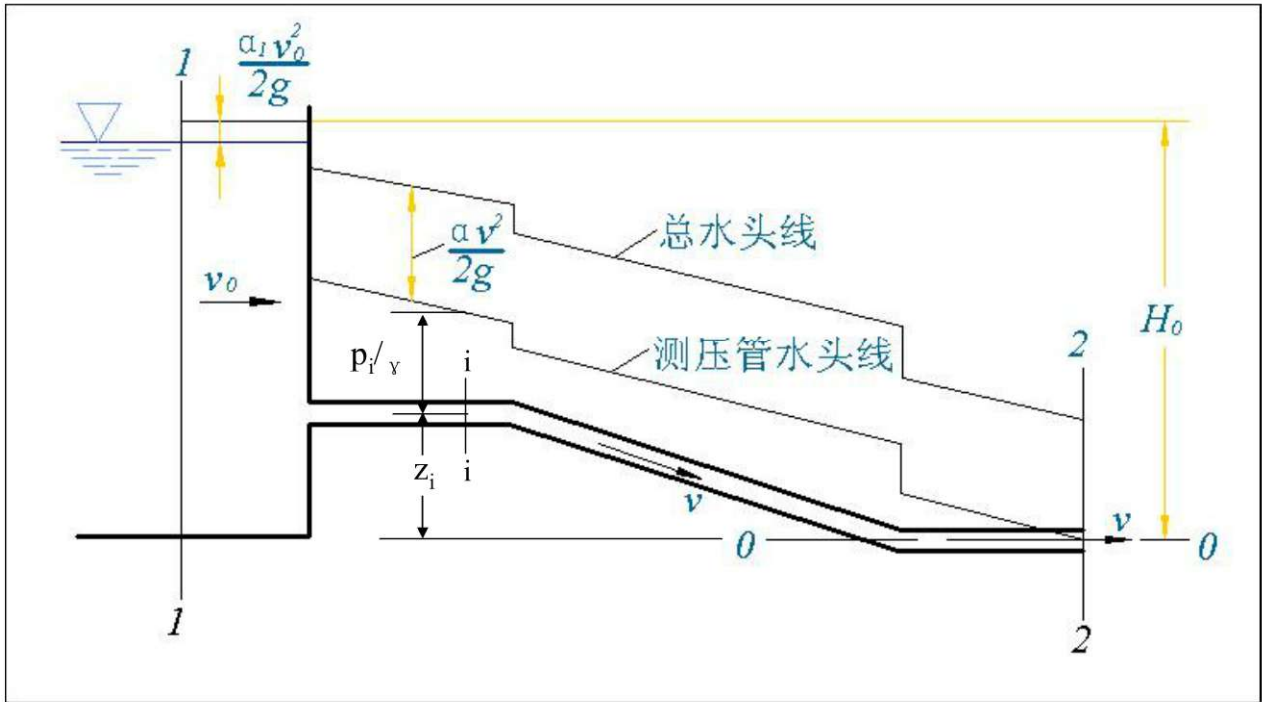
自由出流和淹没出流的比较

比较	流量	水头	μ_c
自由出流	$Q = \mu_c A \sqrt{2gH}$	H	$1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta_{\text{自}}$
淹没出流	$Q = \mu_c A \sqrt{2gz}$	Z	$\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi_{\text{淹}}$

注： $1 + \sum \zeta_{\text{自}} = \sum \xi_{\text{淹}}$

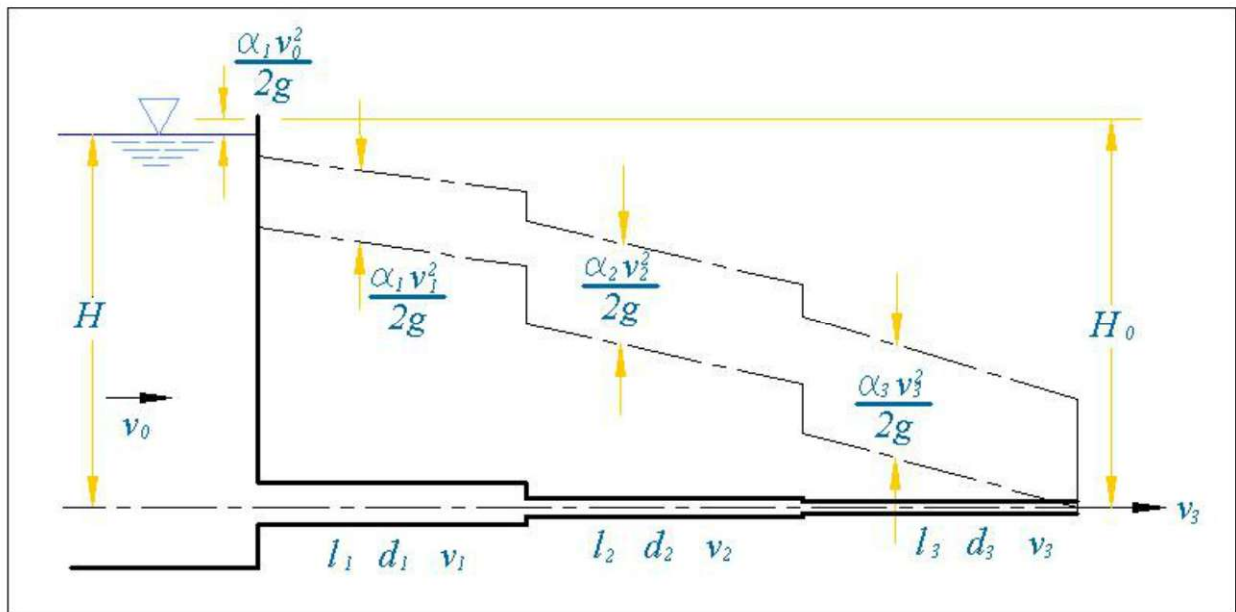


三、测压管水头线的绘制



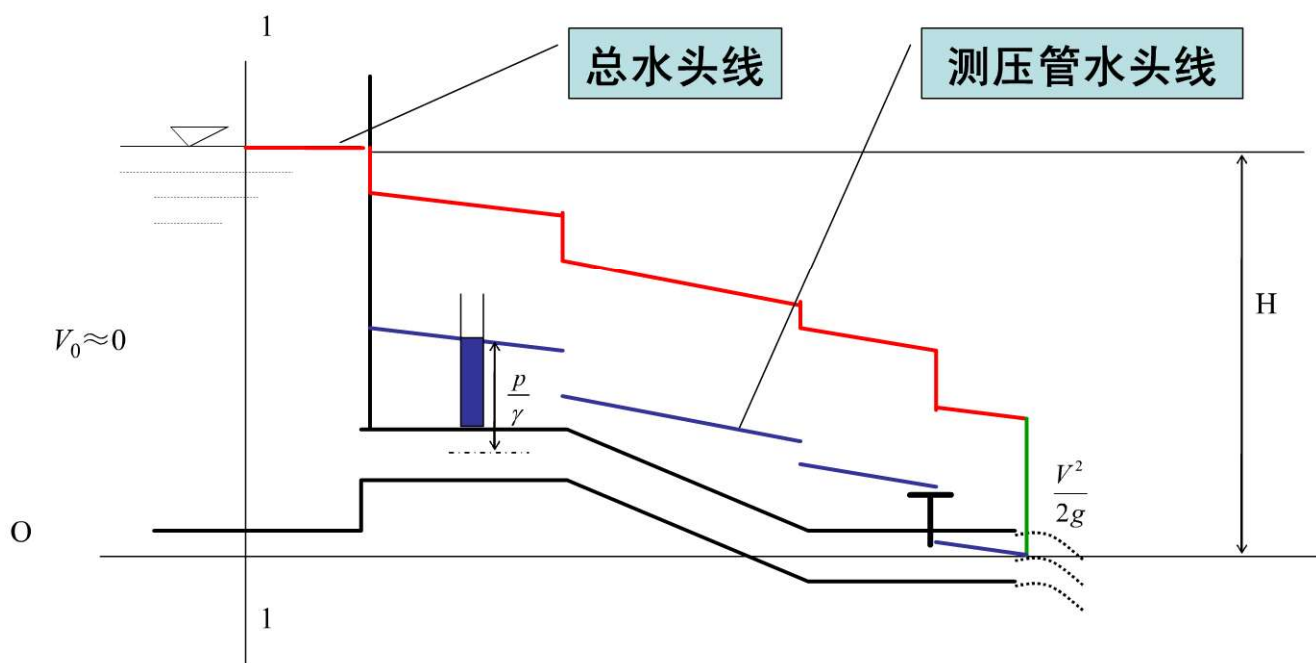
任选一断面*i*，列1—1与*i*—*i*断面的能量方程可得

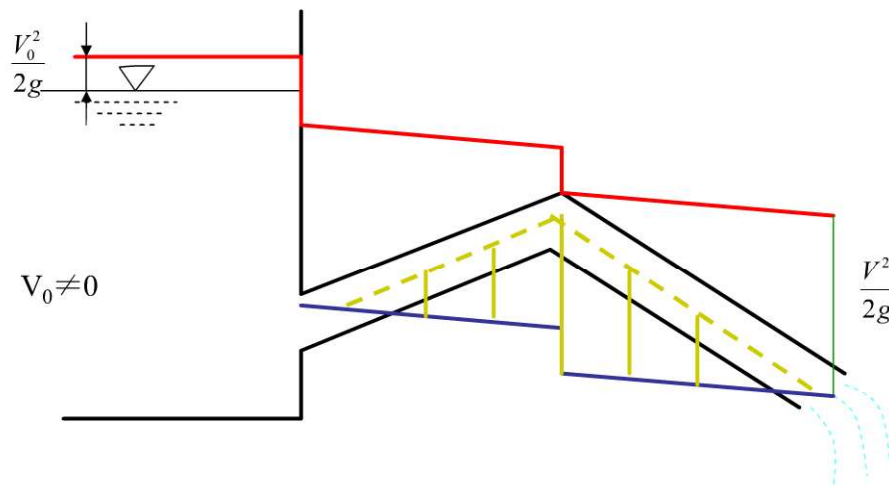
$$z_i + \frac{p_i}{\gamma} = H_0 - \frac{\alpha v_i^2}{2g} - h_{w_{1-i}} \quad \text{或} \quad z_i + \frac{p_i}{\gamma} = H_i - \frac{\alpha v_i^2}{2g}$$



管径不等时，各管段流速水头也不相等，测压管水头线与总水头线间距反映了流速水头的沿程变化。

总水头线与测压管水头线的绘制



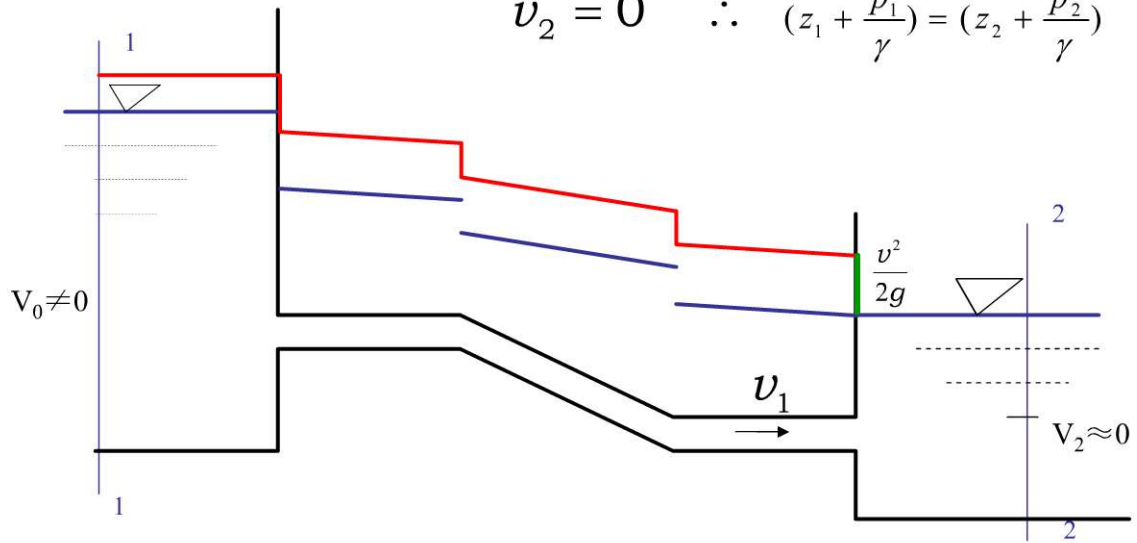


前进

由动量方程，管道出口为突然放大，测压管水头差为：

$$(z_1 + \frac{p_1}{\gamma}) - (z_2 + \frac{p_2}{\gamma}) = \frac{(v_2 - v_1)v_2}{g}$$

$$v_2 = 0 \quad \therefore (z_1 + \frac{p_1}{\gamma}) = (z_2 + \frac{p_2}{\gamma})$$

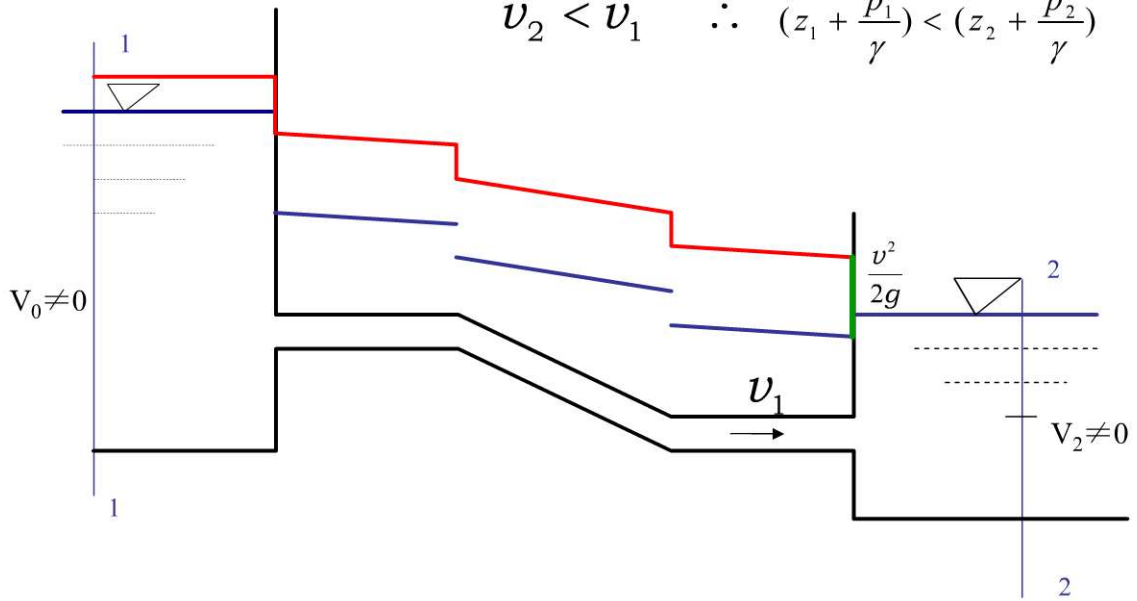


当下游流速水头等于0时，管道出口测压管水头线即为下游水池水面。

由动量方程，管道出口为突然放大，测压管水头差为：

$$(z_1 + \frac{p_1}{\gamma}) - (z_2 + \frac{p_2}{\gamma}) = \frac{(v_2 - v_1)v_2}{g}$$

$$v_2 < v_1 \quad \therefore (z_1 + \frac{p_1}{\gamma}) < (z_2 + \frac{p_2}{\gamma})$$



当下游流速水头不等于0时，管道出口测压管水头线将低于下游水池水面。

§ 5.2 简单管道、短管水力计算的类型及实例

一、水力计算的任务

对恒定流，有压管道的水力计算 主要有下列几种：

(1) 根据一定的管道布置、管道材料、管道直径和作用水头一定，计算管道的过水能力，即计算管道在一定条件下的出流量。

(2) 根据一定的管道布置、管道材料、作用水头和管道需要通过的设计流量，计算管道内径尺寸。

(3) 根据一定的管道布置、管道材料、管道直径、作用水头和管道的设计流量，计算管道的水头损失，包括沿程水头损失和局部水头损失。

§ 5.2 简单管道、短管水力计算的类型及实例

一、水力计算的任务

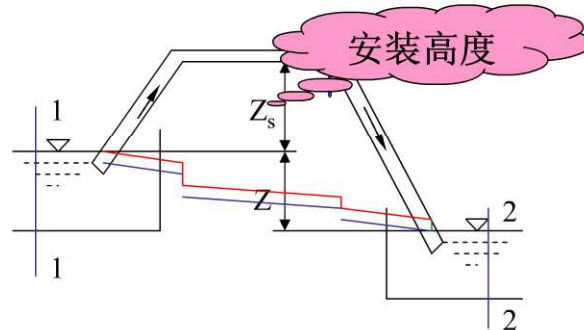
(4) 根据一定的管道布置、管道材料、管道直径和管道的设计流量，计算并绘制管道的测压管水头线和总水头线。

(5) 根据一定的管道布置、管道材料、管道直径、管道要求的出流量和管道出口要求的工作水头，计算管道进口处的作用水头、水塔高度或水泵扬程。

(6) 根据一定的管道布置、管道材料和管道的设计流量，确定管道直径 d 和作用水头 H 。

二、水力计算实例

1. 虹吸管水力计算



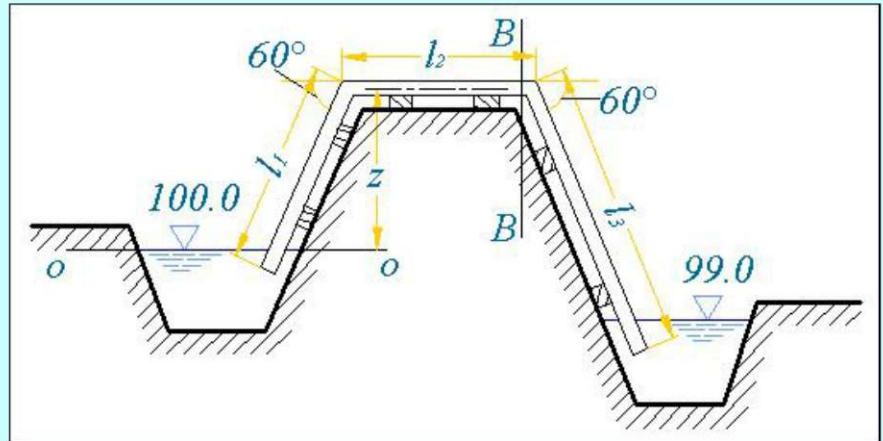
虹吸管是一种压力管，顶部弯曲且其高程高于上游供水水面。虹吸管顶部最大允许真空值一般不大于7~8m水柱高。虹吸管安装高度 Z_s 越大，顶部真空值越大。

虹吸管的优点在于能跨越高地，减少挖方。

虹吸管长度一般不长，故水力计算按短管计算。

例 有一渠道用直径 d 为0.40m的混凝土虹吸管来跨过山丘（见图），渠道上游水面高程 ∇_1 为100.0m，下游水面高程 ∇_2 为99.0m，虹吸管长度 L_1 为12m， L_2 为8m， L_3 为15m，中间有 60° 的折角弯头两个，进口安装滤水网，无底阀。试确定：

- (1) 虹吸管的流量
- (2) 当吸虹管中的最大允许真空值 h_v 为7m时，确定虹吸管的最高安装高程是多少？



解：(1) 计算虹吸管的流量

因为虹吸管的出口在水面以下，属于管道淹没出流。如果不考虑虹吸管进口前渠道的行近流速，则可直接应用淹没出流的公式计算流量。

上下游水头差为 $z = \nabla_1 - \nabla_2 = 100 - 99 = 1m$ 。

确定沿程阻力系数和局部阻力系数。对混凝土管道的 λ 值，先假定管道在阻力平方区工作，再用满宁公式计算谢才系数 C ，然后利用沿程阻力系数和谢才系数的关系确定 λ 。

取钢筋混凝土管的粗糙系数 $n = 0.014$ ，则

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} = \frac{1}{0.014} \left(\frac{0.4}{4} \right)^{1/6} = 48.664 m^{1/2} / s$$

$$\lambda = \frac{8g}{C^2} = \frac{8 \times 9.8}{48.664^2} = 0.0331$$

解：(1) 计算虹吸管的流量

管道各部位的局部阻力系数为：

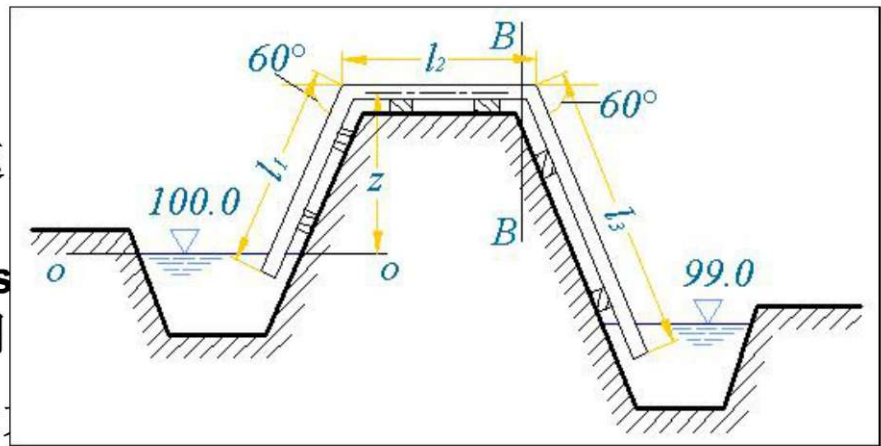
无底阀滤水网 $\zeta_{\text{网}} = 2.5$ ， 60° 折角弯管 $\zeta_{\text{折弯}} = 0.55$ ，
管道出口 $\zeta_{\text{出口}} = 1.0$ 。因此，管道的流量系数为

$$\begin{aligned}\mu_c &= \frac{1}{\sqrt{\lambda \frac{\sum l}{d} + \zeta_{\text{网}} + 2\zeta_{\text{折弯}} + \zeta_{\text{出口}}}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{0.0331 \frac{8+12+15}{0.4} + 2.5 + 2 \times 0.55 + 1}} = 0.3652\end{aligned}$$

虹吸管的输水能力：

$$Q = \mu_c A \sqrt{2gz} = 0.3652 \times \frac{3.14 \times 0.4^2}{4} \times \sqrt{2 \times 9.8 \times 1} = 0.2032 \text{ m}^3 / \text{s}$$

虹吸管的流速
流速大于1.2m/s
谢才公式的应用



(2) 计算虹吸管的最

虹吸管的_{最大真空}一般发生在管子最高位置且水平管段距进口最远处。本题中最大真空发生在第二个弯头处，即**B-B**断面。具体分析如下：

以上游渠道自由面为基准面，令**B-B**断面中心至上游渠道水面高差为 z_s ，对上游断面**0-0**及断面**B-B**列能量方程

式中， L_B 为从虹吸管进口至**B-B**断面的长度。

$$0 + \frac{p_a}{\gamma} + \frac{a_1 v_0^2}{2g} = z_s + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{a v^2}{2g} + \left(\lambda \frac{l_B}{d} + \xi_e + \xi_b \right) \times \frac{v^2}{2g}$$

$$0 + \frac{p_a}{\gamma} + \frac{a_1 v_0^2}{2g} = z_s$$

取 $\frac{\alpha_1 v}{2g}$

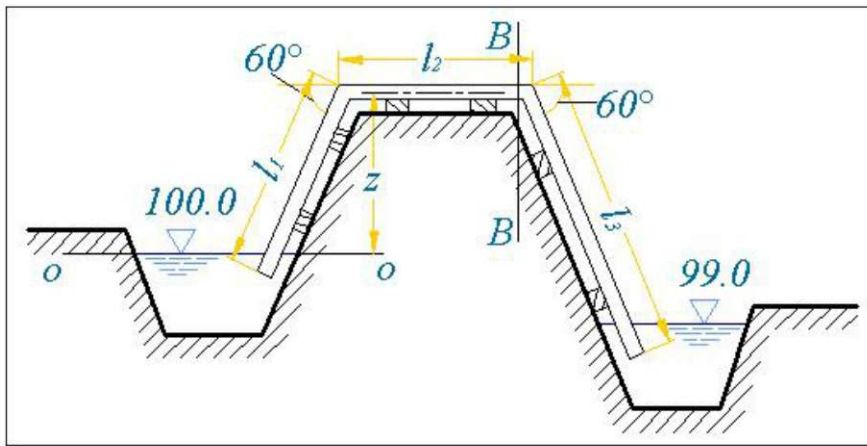
则 $\frac{p_a}{\gamma} - \frac{p_B}{\gamma} = z_s$

若要求管内真空值不大于某一允许，即 $\frac{p_a - p_B}{\gamma} \leq h_v$ 式中 h_v 为允许真空值， $h_v = 7\text{m}$ 。则

$$z_s + \left(1 + \lambda \frac{l_B}{d} + \xi_e + \xi_b\right) \frac{v^2}{2g} \leq h_v$$

即虹吸管安装高程应满足：

$$z_s \leq h_v - \left(\alpha + \lambda \frac{l_B}{d} + \xi_e + \xi_b\right) \frac{v^2}{2g}$$



计算得：

$$z_s \leq h_v - \left(1 + \lambda \frac{l_B}{d} + \xi_e + \xi_b\right) \frac{v^2}{2g}$$

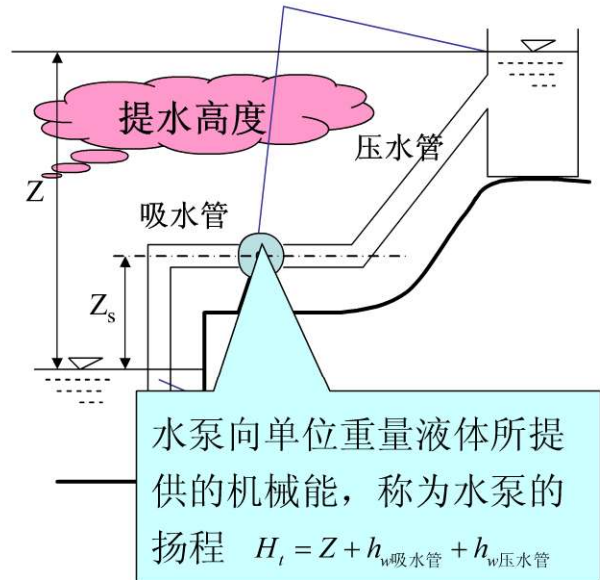
$$= 7 - \left(1 + 0.0331 \times \frac{12 + 8}{0.4} + 2.5 + 0.55\right) \times \frac{1.6169^2}{2 \times 9.8} = 6.24m$$

故虹吸管最高点安装高程为 $100 + 6.24 = 106.24m$

故虹吸管最高点与上游水面高差应满足 $z_s \leq 6.24m$ 。

2. 水泵装置的水力计算

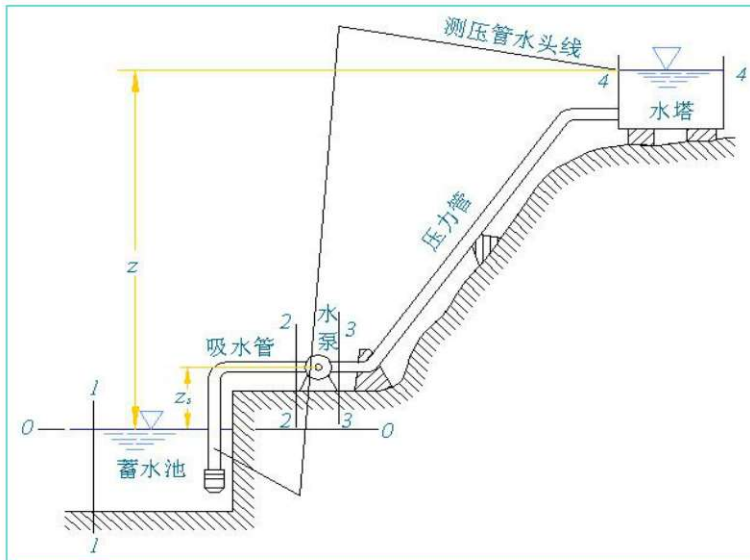
水泵是通过叶轮的转动作用，在水泵吸水管端形成真空，使水流在池面大气压作用下沿吸水管上升，流经水泵时从水泵获得新的能量，从而将水流从低处通过压力管输送到高处的提水设施。



水泵装置是包括吸水管和压水管的一个管道系统，其水力计算包括吸水管和压水管水力计算以及水泵配用动力机械功率计算等内容。水泵装置如图所示。

2 水泵装置的水力计算

水力计算包括 { 吸水管 → 短管
压力水管 → 短管或长管



1). 吸水管的水力计算

主要任务是确定吸水管高程。

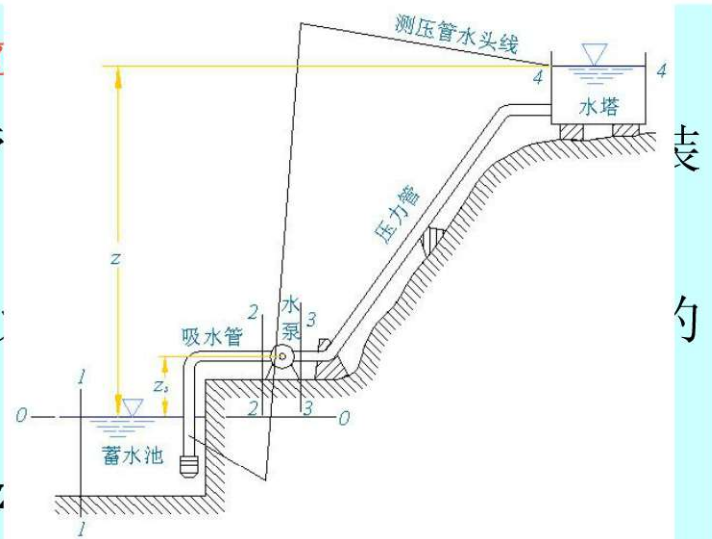
吸水管管径一般是根据允许流速为为0.8~1.25m/s。

水泵的最大允许安装高程:

值 h_v 和吸水管的水头损失。列1-1和2-2断面能量方程有

$$\frac{p_a}{\gamma} = z_s + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2} \Rightarrow z_s = \frac{p_a - p_2}{\gamma} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \lambda \frac{l}{d} \frac{v_2^2}{2g} - \sum \xi \frac{v_2^2}{2g}$$

水泵的最大允许安装高程 $z_s \leq h_v - (\alpha_2 + \lambda \frac{1}{\alpha} + \sum \xi) \frac{v_2^2}{2g}$



2). 压力水管的水力计算

压力水管的计算在于决定必需的管径及水泵的装机容量。其直径由经济流速确定。对于排水管道 $d = xQ^{0.42}$

式中 x 为系数，可取 **0.8~1.2**。

水流经过水泵时，从水泵的动力装置获得了外加的机械能。

$z + h_{w1-4} = H_t$ 为水泵向单位重量液体所提供的机械能，称为水泵的总水头或扬程 $H_t = z + h_{w1-2} + h_{w3-4}$

上式表明水泵向单位重量液体所提供的机械能一部分是用来将水流提高一个几何高度，另一部分是用来克服水头损失 h_{w1-4}

3) 水泵的配用动力机械功率

要使水泵将一定流量 Q 的液体提升到高度 h_p ，必须要克服吸水管和压水管的水头损失。因此水泵需要输入的机械能功率为

$$N_p = \frac{\gamma Q(z + h_{w_{1-4}})}{1000\eta_P} = \frac{\gamma Q h_p}{1000\eta_P}$$

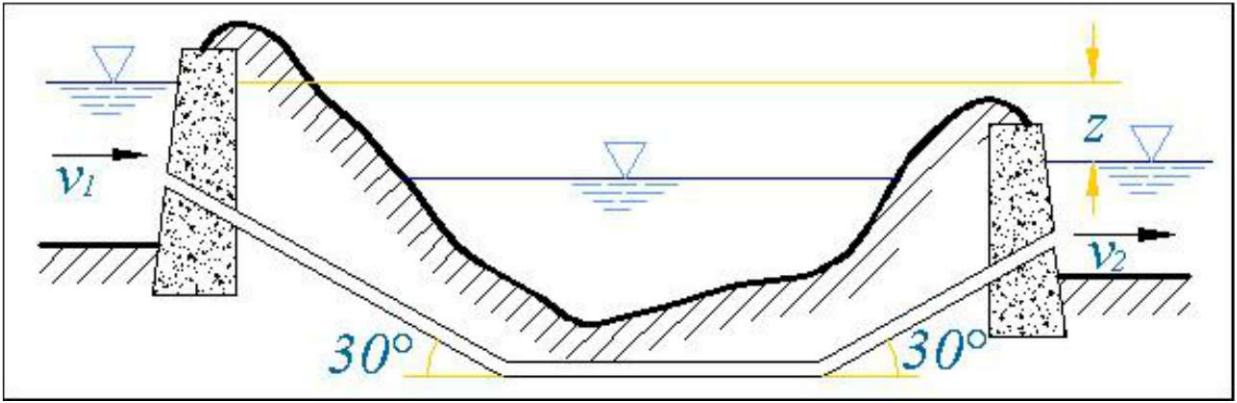
式中 N_p 为动力机械的功率（kw）； Q 为流量（ m^3/s ）； h_p 为水泵扬程(m)； γ 为水的容重(N/m^3)； η 为水泵和动力机械的总效率。

$h_{w_{1-4}}$ 为吸水管及压力管水头损失之和。压力管一般按长管计算。

3. 倒虹吸管水力计算

倒虹吸管是穿过河流、道路、渠道等障碍物的一种输水管道。倒虹吸管中的水流只是一般压力管流，并无虹吸现象，因此，倒虹吸管的水力计算主要是计算管径、流量以及水头损失。

例 一横穿河道的钢筋混凝土倒虹吸管，如图所示。已知通过流量 Q 为 $3\text{m}^3/\text{s}$ ，倒虹吸管上下游渠中水位差 z 为 3m ，倒虹吸管长 l 为 50m ，其中经过两个 30° 的折角转弯，其局部水头损失系数 ξ_b 为 0.20 ；进口局部水头损失系数 ξ_e 为 0.5 ，出口局部水头损失系数 ξ_o 为 1.0 ，上下游渠中流速 v_1 及 v_2 为 1.5m/s ，管壁粗糙系数 $n=0.014$ 。试确定倒虹吸管直径 d 。



解：倒虹吸管一般作短管计算。本题管道出口淹没在水下；且上下游渠道中流速相同，可消去流速水头。

$$\text{因 } Q = \mu_c A \sqrt{2gz} = \mu_c \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2gz}$$

$$\text{所以 } d = \sqrt{\frac{4Q}{\mu_c \pi \sqrt{2gz}}} \quad \text{其中流量系数 } \mu_c = \frac{1}{\sqrt{\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi}}$$

因为沿程阻力系数 λ 与谢才系数 C 都是 d 的复杂函数，因此需用**试算法**。先假设管径 $d=0.8\text{m}$ ，用谢才公式计算沿程阻力系数：

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} = \frac{1}{0.014} \left(\frac{0.8}{4}\right)^{1/6} = 54.62 \text{m}^{1/2} / \text{s},$$

$$\lambda = \frac{8g}{C^2} = \frac{8 \times 9.8}{54.62^2} = 0.0263$$

流量系数

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\lambda \frac{l}{d} + \xi_e + 2\xi_b + \xi_0}} = \frac{1}{\sqrt{0.0263 \times \frac{50}{0.8} + 0.5 + 2 \times 0.2 + 1}}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{3.54}} = 0.531$$

可求得管径：
$$d = \sqrt{\frac{4 \times 3}{0.531 \times 3.14 \sqrt{2 \times 9.8 \times 3}}} = 0.97m$$

计算出管径与假设不符，故再假设**d=0.95m**，重新计算：

$$C = \frac{1}{0.014} \left(\frac{0.95}{4} \right)^{1/6} = 56.21 m^{1/2} / s \quad \lambda = \frac{8 \times 9.8}{56.21^2} = 0.0248$$

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{0.0248 \times \frac{50}{0.95} + 0.5 + 0.4 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{3.20}} = 0.558$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \times 3}{0.558 \times 3.14 \times \sqrt{2 \times 9.8 \times 3}}} = 0.945m$$

所得直径和第二次假设值非常接近，故设计管径取**d=0.95米**。

§ 5.2 长管的水力计算

在管道水力计算中，由于管道的流速水头和局部水头损失的总和与沿程水头损失比较起来很小，因此计算时常常将局部水头损失按沿程水头损失的一定比例估算或完全忽略不计，这样不仅使计算大大简化，而且对计算精确度影响不大，这就是水力长管的计算问题。

管道直径沿程不变，并且没有分支的管道称为简单管道。对同时忽略局部水头损失和流速水头的简单管道自由出流，是长管水力计算中最基本的情形。其他各种复杂的管道可以认为是简单管道的组合。所以简单管道的水力计算是长管水力计算的基础。

§ 5.2 长管的水力计算

如图，列断面1-1、2-2的能量方程得

$$H + 0 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = 0 + 0 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_f + \sum h_j$$

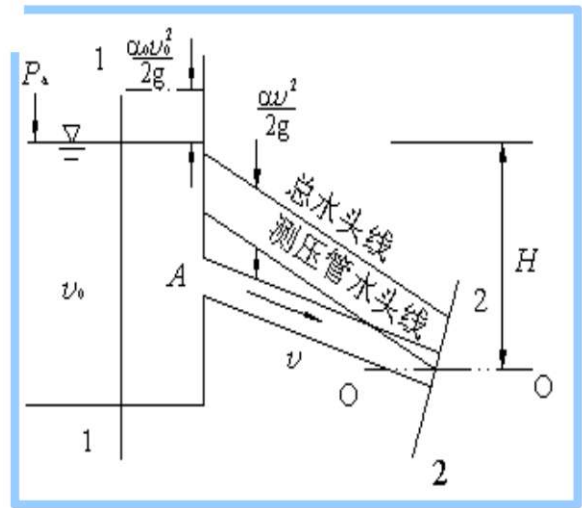
忽略局部水头损失和流速水头可得

$$H = h_f, \quad h_f = \lambda \frac{l}{4R} \frac{v^2}{2g}$$

$$\text{谢才公式 } v = C\sqrt{RJ} \quad R = \frac{A}{\chi} \quad J = \frac{h_f}{l}$$

$$\text{流量: } Q = Av = AC\sqrt{RJ} = K\sqrt{J}$$

$$\text{其中: 流量模数 } K = AC\sqrt{R} \quad C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \quad \lambda = \frac{8g}{C^2}$$



§ 5.2 长管的水力计算

由连续性方程及谢才公式可得：

$$Q = Av = AC\sqrt{RJ} = K\sqrt{J} = K\sqrt{\frac{h_f}{l}}$$

$$\text{则 } H = h_f = \frac{Q^2}{K^2}l$$

上式即长管水力计算的基本公式，它表明管道出口中心到上游水位的高差**H**，全部消耗于管道的沿程水头损失**h_f**。

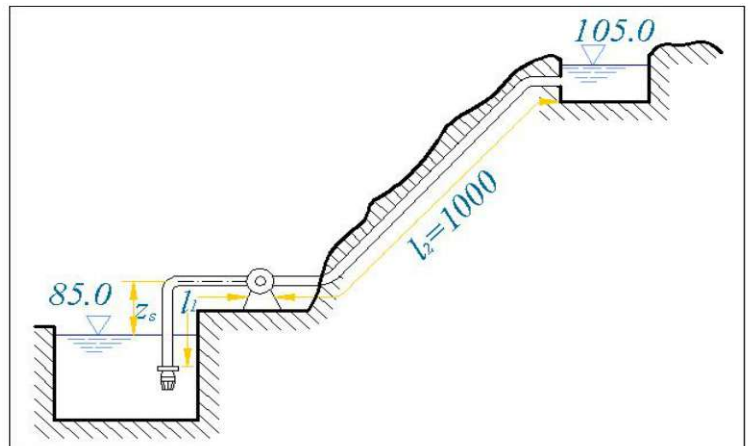
给水管道中的水流，一般流速不太大，可能属于紊流粗糙区或过渡粗糙区。可近似认为当 $v < 1.2\text{m/s}$ 时，管流属于过渡粗糙区， h_f 约与流速 v 的1.8次方成正比。故当按常用的经验公式计算谢才系数 C 求 h_f 应在右端乘以修正系数 k ，即 $H = h_f = k \frac{Q^2}{K^2} l$

管道的流量模数 K ，以及修正系数 k 可根据相关手册资料得到。

例 用离心泵将湖水抽到水池，流量 Q 为 $0.2\text{m}^3/\text{s}$ ，湖面高程 ∇_1 为 85.0m ，水池水面高程 ∇_3 为 105.0m ，吸水管长 L_1 为 10m ，水泵的允许真空值 $h_v=4.5\text{m}$ ，吸水管底阀局部水头损失系数 $\xi_e=2.5$ ， 90° 弯头局部水头损失系数 $\xi_b=0.3$ ，水泵入口前的渐变收缩段局部水头损失系数 $\xi_g=0.1$ ，吸水管沿程阻力系数 $\lambda=0.022$ ，压力管道采用铸铁管，其直径 d_2 为 500mm ，长度 L_2 为 1000m ， $n=0.013$

(见图)。试确定：

- (1) 吸水管的直径 d_1 ；
- (2) 水泵的安装高程 ∇_2 ；
- (3) 驱动水泵的动力机械功率，动力机械的效率 $\eta=0.7$ 。



解：

① 确定吸水管的直径：

吸水管允许流速为**0.8~1.25m/s**，取设计流速 **$v=1.0\text{m/s}$** ，

则

$$d_1 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.2}{3.14 \times 1}} = 0.505\text{m}$$

选用标准直径 **$d_1=500\text{mm}$** 。

水泵吸水管流速：

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \times 0.2}{3.14 \times 0.5^2} = 1.02\text{m/s}$$

② 水泵安装高程的确定：

安装高程是以水泵的允许真空值来控制的。令水泵轴中心线距湖面高差为 z_s ，则 $\nabla_2 = \nabla_1 + z_s$ 。

$$\begin{aligned} \text{计算 } z_s \text{ 值 } \quad z_s &\leq h_v - \left(\alpha + \lambda \frac{l_1}{d_1} + \sum \xi \right) \frac{v^2}{2g} \\ &= 4.5 - \left(1 + 0.022 \times \frac{10}{0.5} + 2.5 + 0.3 + 0.1 \right) \frac{1.02^2}{9.8 \times 2} \\ &= 4.5 - 0.22 = 4.28m \end{aligned}$$

水泵轴最大允许安装高程 $\nabla_2 = 85 + 4.28 = 89.28m$ 。

其中吸水管水头损失为：

$$h_{w吸} = \left(\lambda \frac{l_1}{d_1} + \sum \xi \right) \frac{v^2}{2g} = \left(0.022 \times \frac{10}{0.5} + 2.9 \right) \times \frac{1.02^2}{19.6} = 0.18m$$

水泵提水高度： $z = \nabla_3 - \nabla_1 = 105 - 85 = 20m$

③ 带动水泵的动力机械功率

$$\text{因 } N_p = \frac{\gamma Q(z + h_{w_{1-4}})}{1000\eta_p}$$

$h_{w_{1-4}}$ 为吸水管及压力管水头损失之和。已求得吸水管水头损失为**0.18m**，当压力管按长管计算时，整个管道的水头损失为

$$h_{w_{1-4}} = 0.18 + \frac{Q^2}{K^2} l$$

压力管的流量模数

$$K = A_2 C_2 \sqrt{R_2} = \frac{3.14 \times 0.5^2}{4} \times \frac{1}{0.013} \left(\frac{0.5}{4} \right)^{2/3} = 3.77 m^3 / s$$

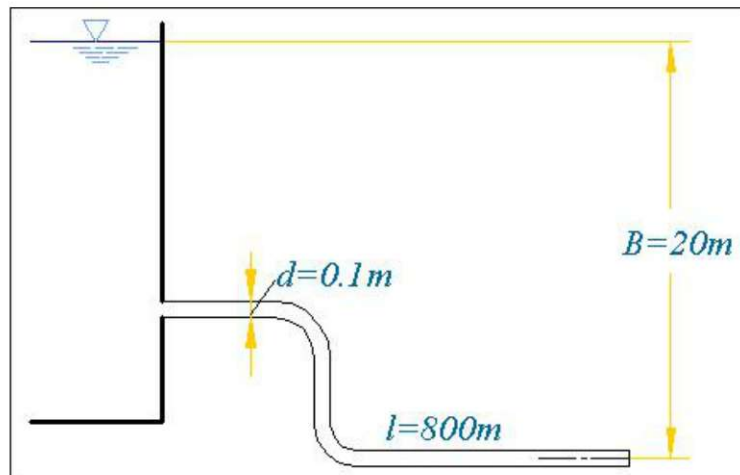
则
$$h_{w_{1-4}} = 0.18 + \frac{0.2^2}{3.77^2} \times 1000 = 2.99m$$

动力机械的效率 η_p 为0.7，水的重率为9800N/m³；即可求得所需动力机械功率

$$\begin{aligned} P_P &= \frac{\gamma Q(z + h_{w_{1-4}})}{1000\eta_p} = \frac{9800 \times 0.2(20 + 2.99)}{1000 \times 0.7} \\ &= 64.37kW \end{aligned}$$

选用水泵动力机械的功率应大于64.37kW

例 一简单管道，如图所示。长为800m，管径为0.1m，水头为20m，管道中间有二个弯头，每个弯头为90°转弯，转弯半径为0.4m，已知沿程阻力系数 $\lambda = 0.025$ ，试求通过管道的流量。



(一) 先将管道作为短管，求通过管道流量。根据(4-4)式并且不考虑行近流速水头，则 $Q = \mu_c A \sqrt{2gH}$

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \xi}}$$

局部损失系数：进口损失 $\xi_e = 0.5$ ，可知 $R/d=4$ ，查表4-6得弯头局部损失系数 $\xi_w = 0.3$

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.025 \times \frac{800}{0.1} + 0.5 + 2 \times 0.3}} = \frac{1}{\sqrt{202.10}} = 0.0703$$

$$Q = 0.0703 \times \frac{3.14 \times 0.1^2}{4} \sqrt{19.6 \times 20} = 0.01093 \text{ m}^3 / \text{s}$$

(二)计算沿程损失及局部损失

$$\text{管中流速 } v = \frac{Q}{A} = \frac{0.01093}{\frac{3.14 \times 0.1^2}{4}} = 1.39 \text{ m/s}$$

$$\text{流速水头 } \frac{v^2}{2g} = \frac{1.39^2}{19.6} = 0.0989 \text{ m}$$

$$\text{沿程损失 } h_f = \lambda \frac{1}{d} \frac{v^2}{2g} = 0.025 \times \frac{800}{0.1} \times 0.0989 = 19.79 \text{ m}$$

$$\text{局部损失 } h_j = \sum \xi \frac{v^2}{2g} = (0.5 + 2 \times 0.3) \times 0.0989 = 0.109 \text{ m}$$

故沿程水头损失占总水头的百分数为

$$\frac{h_f}{H} = \frac{19.79}{20} = 0.989 = 98.9\%$$

所以该管道按长管计算就可以了。

(三) 按长管计算管道所通过的流量

根据

$$K = AC\sqrt{R}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} = \sqrt{\frac{8 \times 9.8}{0.025}} = 55.9 m^{1/2} / s$$

$$Q = \frac{3.14 \times 0.1^2}{4} \times 55.9 \times \sqrt{\frac{0.1}{4}} \times \sqrt{\frac{20}{800}} = 0.01097 m^3 / s$$

故按长管计算与短管计算所得流量相差**0.00004m³/s**，相

对误差为 $\frac{0.0004}{0.01093} = 0.36\%$ 。由此可见，将上述管道按长

管计算，误差很小。

§ 5.4 串联、分叉与并联管道的水力计算

一、串联管道

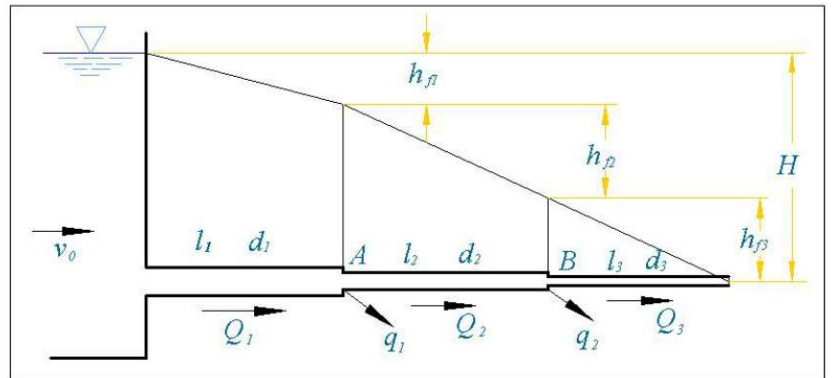
由直径不同的几段管道依次连接而成的管道，称为串联管道。给水工程中串联管道常按长管计算。设任一管段的直径为 d_i ，管长为 L_i ，流量为 Q_i ，两管段连接点称为节点，节点分出流量为 q_i ，且满足连续性方程： $Q_i = Q_{i+1} + q_i$

1、按长管计算：

$$H = h_{f1} + h_{f2} + h_{f3}$$

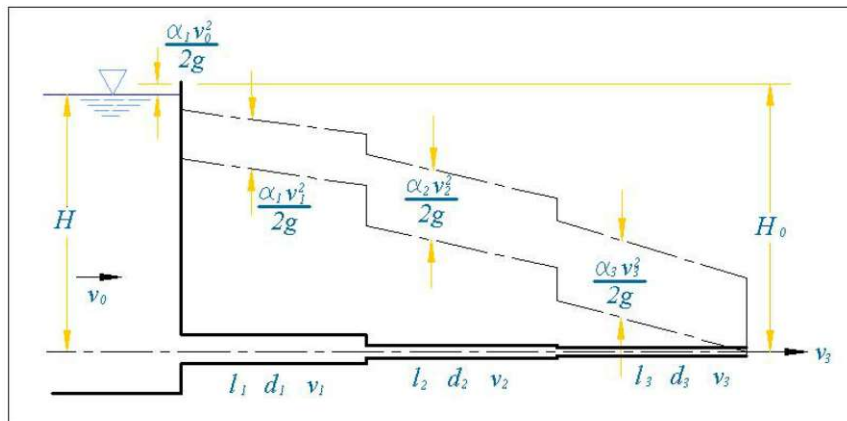
$$= \frac{Q_1^2}{K_1^2} l_1 + \frac{Q_2^2}{K_2^2} l_2 + \frac{Q_3^2}{K_3^2} l_3$$

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= Q_2 + q_1 \\ Q_2 &= Q_3 + q_2 \end{aligned} \right\}$$



2、按短管计算

当管道长度不是很大，没有流量分出，局部损失不能略去时，应按短管计算。

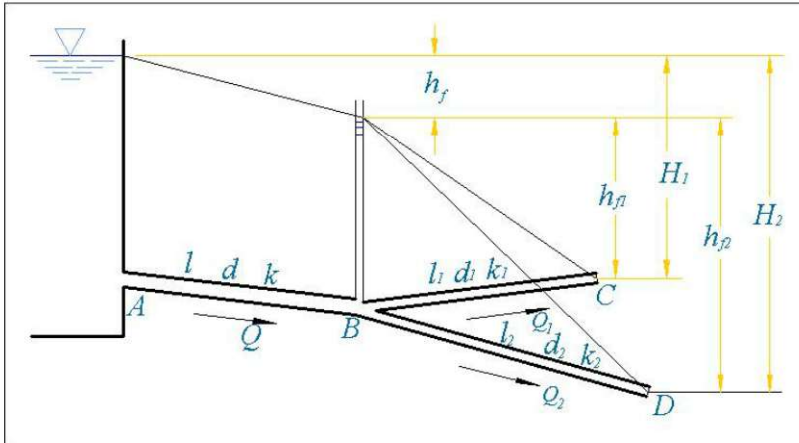


$$H_0 = \sum \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \frac{v_i^2}{2g} + \sum \xi_i \frac{v_i^2}{2g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$$

$$H_0 = \left[1 + \sum \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \left(\frac{A}{A_i} \right)^2 + \sum \xi_i \left(\frac{A}{A_i} \right)^2 \right] \frac{v^2}{2g}$$

二、分叉管道的水力计算

水电站引水系统中，经常碰到由一根总管从压力前池引水，然后按水轮机台数分成数根支管，每根支管给一台水轮机供水，这种分叉后不再汇合的管道称为分叉管道。



对管道**ABC**有

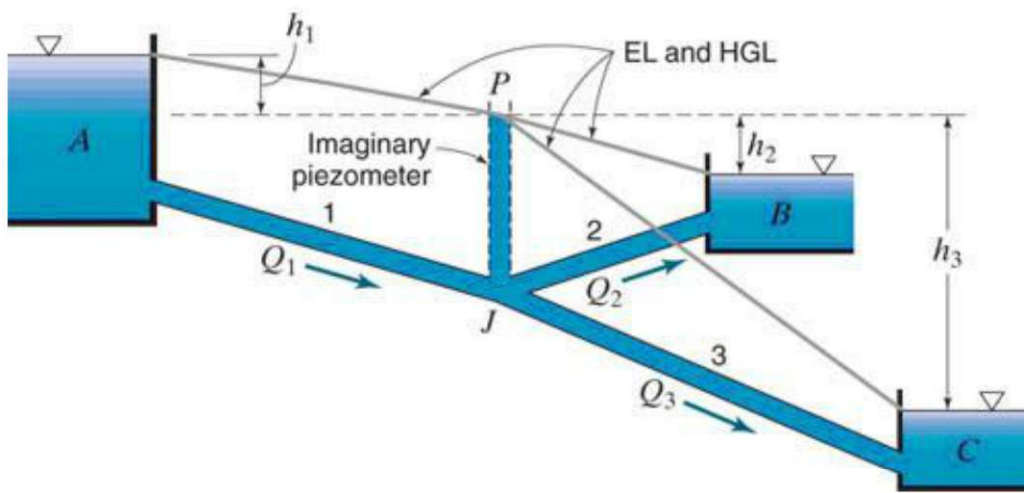
$$H_1 = h_f + h_{f1} = \frac{Q^2}{K^2}l + \frac{Q_1^2}{K_1^2}l_1$$

对管道**ABD**

$$H_2 = h_f + h_{f2} = \frac{Q^2}{K^2}l + \frac{Q_2^2}{K_2^2}l_2$$

由连续性方程可得

$$Q = \sqrt{\left(H_1 - \frac{Q^2}{K^2}l\right) \frac{K_1^2}{l_1}} + \sqrt{\left(H_2 - \frac{Q^2}{K^2}l\right) \frac{K_2^2}{l_2}}$$



例题 图示为连接水池ABC的分叉管道，管径、管长分别为 $d_1=60\text{cm}, L_1=900\text{m}, d_2=45\text{cm}, L_2=300\text{m}, d_3=40\text{cm}, L_3=1200\text{m}$, AB水池水位差为12m，AC水池水位差为30m。管材为新钢管，计算各管流量 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 。

解：查新钢管糙率 $n=0.011$ ，计算流量模数：

$$K = AC\sqrt{R} = \frac{1}{4} \pi d^2 \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \sqrt{R} = \frac{1}{4} \pi d^2 \left(\frac{d}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{1}{n} = \frac{\pi d^{\frac{8}{3}}}{4^{\frac{5}{3}} n}$$

代入数据得流量模数	$d_1=60\text{cm}, L_1=900\text{m},$	$H_{AB}=h_1+h_2=12\text{m}$
$K_1 = 7.257\text{m}^3 / \text{s}$	$d_2=45\text{cm}, L_2=300\text{m},$	$H_{AC}=h_1+h_2=30\text{m}$
$K_2 = 3.369\text{m}^3 / \text{s}$	$d_3=40\text{cm}, L_3=1200\text{m},$	
$K_3 = 2.461\text{m}^3 / \text{s}$		

水头损失公式

$$H_{AB} = h_1 + h_2 = \frac{Q_1^2}{K_1^2} l_1 + \frac{Q_2^2}{K_2^2} l_2$$

$$H_{AC} = h_1 + h_3 = \frac{Q_1^2}{K_1^2} l_1 + \frac{Q_3^2}{K_3^2} l_3$$

代入数据并计算得方程组

$$17.089Q_1^2 + 26.43Q_2^2 = 12$$

$$17.089Q_1^2 + 198.13Q_3^2 = 30$$

代入数据并计算求解得

$$Q_2 = \sqrt{\frac{12 - 17.089Q_1^2}{26.43}}$$

$$Q_3 = \sqrt{\frac{30 - 17.089Q_1^2}{198.13}}$$

由连续性方程

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 =$$

$$\sqrt{\frac{12 - 17.089Q_1^2}{26.43}} + \sqrt{\frac{30 - 17.089Q_1^2}{198.13}}$$

$$Q_1 = \sqrt{\frac{12 - 17.089Q_1^2}{26.43}} + \sqrt{\frac{30 - 17.089Q_1^2}{198.13}}$$

方程中右端根号内数值应大于零，即：

$$12 - 17.089Q_1^2 \geq 0, \quad Q_1 \leq \sqrt{\frac{12}{17.089}} = 0.83$$

$$30 - 17.089Q_1^2 \geq 0, \quad Q_1 \leq \sqrt{\frac{30}{17.089}} = 1.32$$

$$Q_2 = \sqrt{\frac{12 - 17.089Q_1^2}{26.43}}$$

$$Q_3 = \sqrt{\frac{30 - 17.089Q_1^2}{198.13}}$$

取 $Q_1 = 0.8m^3/s$ 计算得 $Q_1 = 0.51m^3/s$

取两次平均值并计算得 $Q_1 = 0.66m^3/s \rightarrow Q_1 = 0.75m^3/s$

再取上述平均值并计算得 $Q_1 = 0.706m^3/s \rightarrow Q_1 = 0.692m^3/s$

重复取两次平均值并计算得 $Q_1 = 0.7m^3/s \rightarrow Q_1 = 0.701m^3/s$

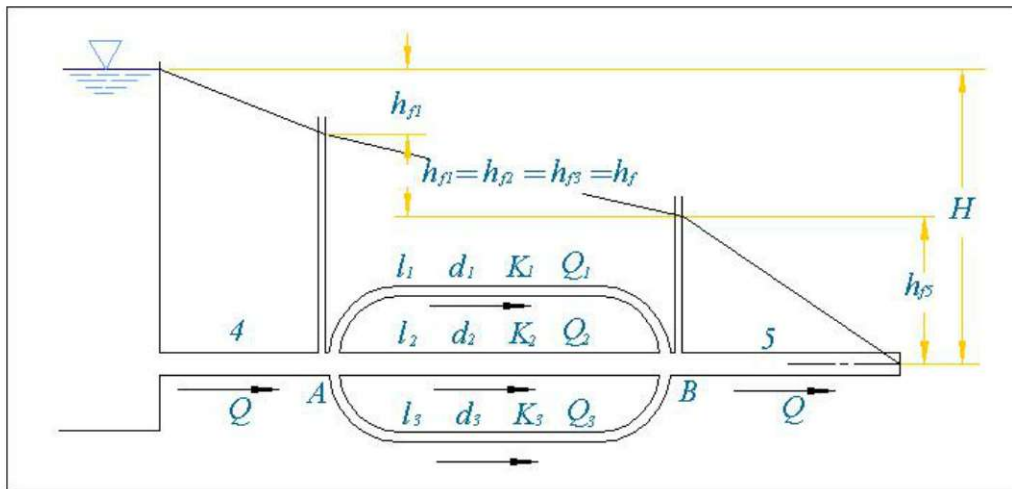
计算得

$$Q_1 = 0.701m^3/s, \quad Q_2 = 0.37m^3/s, \quad Q_3 = 0.33m^3/s$$

三、并联管道的水力计算

凡是两条或两条以上的管道从同一点分叉而又在另一点汇合组成的管道称为并联管道。并联管道一般按长管计算。

下图所示为三管段并联，**A**、**B**二点分别为各管段管道的起点和终点。通过每段管道的流量可能不同，但每段管道的水头差 $H = H_A - H_B$ 是相等的。节点流量与分叉管道一样满足连续性条件。



并联的两个节点之间的各管段水头损失相同

$$h_{f1} = h_{f2} = h_{f3} = h_f \quad \text{或} \quad \frac{Q_1^2}{K_1^2} l_1 = \frac{Q_2^2}{K_2^2} l_2 = \frac{Q_3^2}{K_3^2} l_3$$

$$h_{f1} = \frac{Q_1^2}{K_1^2} l_1$$

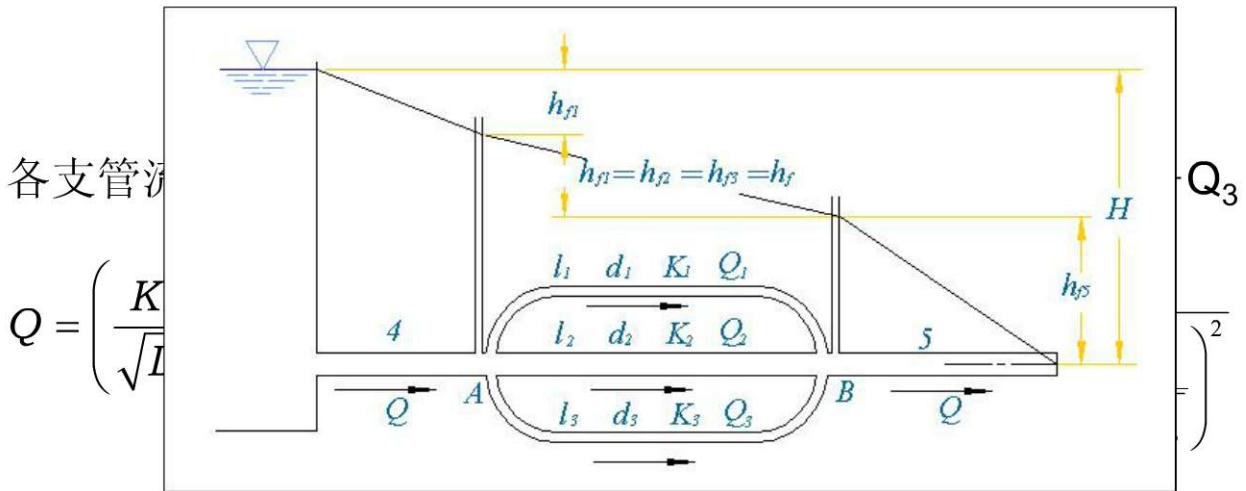
$$Q_1 = \frac{K_1}{\sqrt{L_1}} \sqrt{h_f}$$

各支管
水头损失

$$h_{f2} = \frac{Q_2^2}{K_2^2} l_2$$

则各支
管流量

$$Q_2 = \frac{K_2}{\sqrt{L_2}} \sqrt{h_f}$$



例题 已知 $H=10$, $\lambda = 0.025$

各管长度, 直径, 求各管流量

并联管道的水力计算公式

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

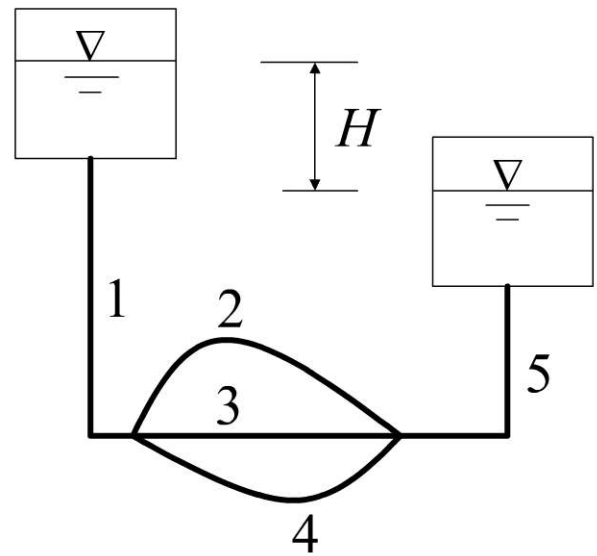
$$h_{f1} = h_{f2} = h_{f3}$$

$$\text{总水头 } H = h_{f1} + h_{f2} + h_{f5}$$

$$h_{f2} = h_{f3} = h_{f4}$$

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5$$

并联管道的水力计算



解 (1) $H = h_{f1} + h_{f2} + h_{f5}$

(2) $h_{f2} = h_{f3} = h_{f4}$

(3) $Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5$

由 (2) 式 $K = AC\sqrt{R} = \frac{\pi d^{5/2}}{4^{5/2} n}$

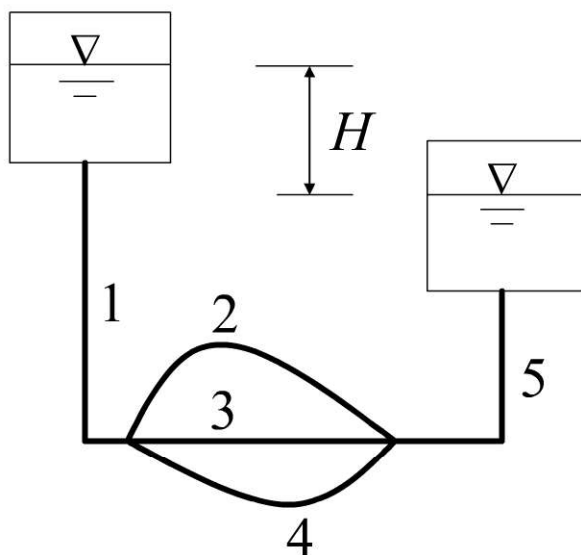
$$l_2 \left(\frac{Q_2}{K_2} \right)^2 = l_3 \left(\frac{Q_3}{K_3} \right)^2 = l_4 \left(\frac{Q_4}{K_4} \right)^2$$

$$\frac{\lambda_2 l_2 Q_2^2}{d_2^5} = \frac{\lambda_3 l_3 Q_3^2}{d_3^5} = \frac{\lambda_4 l_4 Q_4^2}{d_4^5}$$

$$\frac{Q_3}{Q_2} = \sqrt{\frac{\lambda_2 l_2}{\lambda_3 l_3} \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^5} = 0.661$$

$$\frac{Q_4}{Q_2} = \sqrt{\frac{\lambda_2 l_2}{\lambda_4 l_4} \left(\frac{d_4}{d_2} \right)^5} = 1.069$$

由 (3) 式 $Q_1 = Q_5 = (1 + 0.661 + 1.069) Q_2 = 2.73 Q_2$



由 (1) 式 $H = h_{f1} + h_{f2} + h_{f5} \quad H = 10m$

$$= \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q_1}{\pi d_1} \right)^2 + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q_2}{\pi d_2} \right)^2 + \lambda_5 \frac{l_5}{d_5} \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q_5}{\pi d_5} \right)^2$$

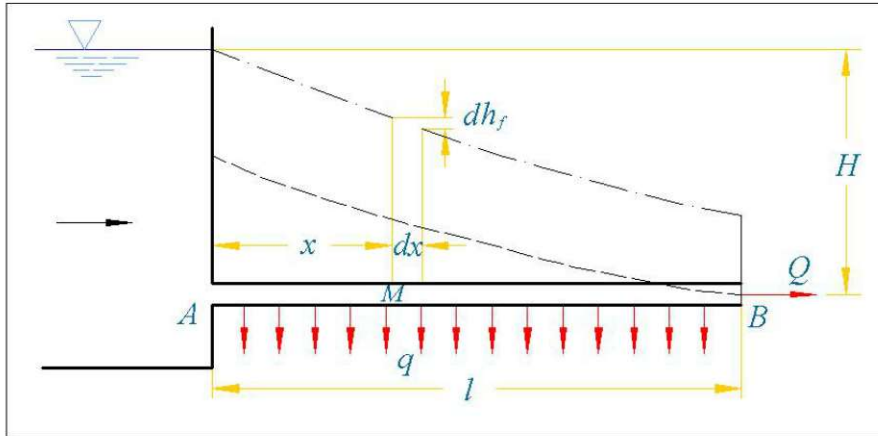
$$= \left[\lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \left(\frac{4 \times 2.73}{d_1} \right)^2 + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \left(\frac{4}{d_2} \right)^2 + \lambda_5 \frac{l_5}{d_5} \left(\frac{4 \times 2.73}{d_5} \right)^2 \right] \frac{Q_2^2}{2g\pi^2}$$

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= 0.03702m^3 / s \\ Q_2 &= 0.01356m^3 / s \\ Q_3 &= 0.00896m^3 / s \\ Q_4 &= 0.01450m^3 / s \end{aligned} \right\} \begin{aligned} Q_1 &= Q_2 + Q_3 + Q_4 \\ &= 0.03702m^3 / s \end{aligned}$$

§ 5.5 沿程均匀泄流管道的水力计算

沿程连续不断分泄出的流量称为沿程泄出流量，若管段各单位长度上的沿程泄出流量相等，这种管道称为沿程均匀泄流管道。

如图所示管道AB长为L，水头为H，管道末端流出的流量为Q，管道单位长度上沿程泄出流量为q。



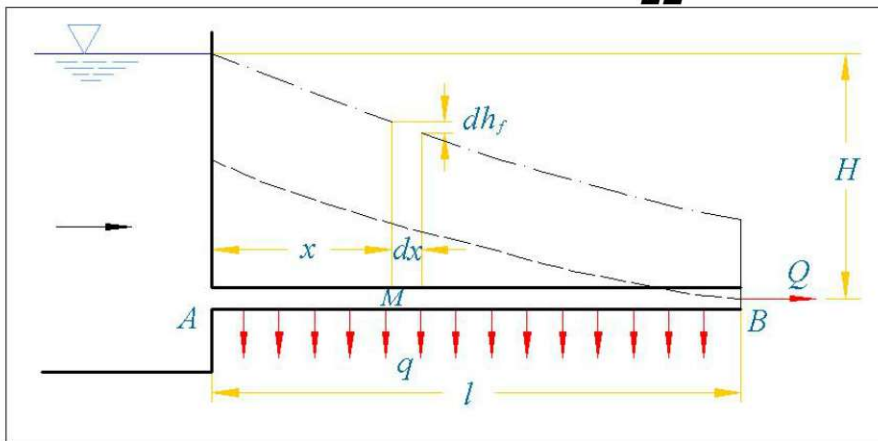
在离进口A距离为x的M点断面处流量为

$$Q_m = Q + (l - x)q$$

在dx管段内沿程水头损失 $dh_f = \frac{1}{K^2} [Q + (l - x)q]^2 dx$

积分得总水头为 $H = h_{fAB} = \int_0^l \frac{1}{K^2} [Q + (l - x)q]^2 \cdot dx$

$$= \frac{l}{K^2} (Q^2 + Q \cdot q \cdot l + \frac{1}{3} q^2 l^2)$$



$$.55ql)^2 = \frac{Q_r^2}{K^2} l$$

呈均匀泄流的管道按

$$H_{AB} = \frac{l}{K^2} (Q^2 + Q \cdot q \cdot l + \frac{1}{3} q^2 l^2)$$

当管道出口流量 $Q=0$ 时，沿程均匀泄流的水头损失为

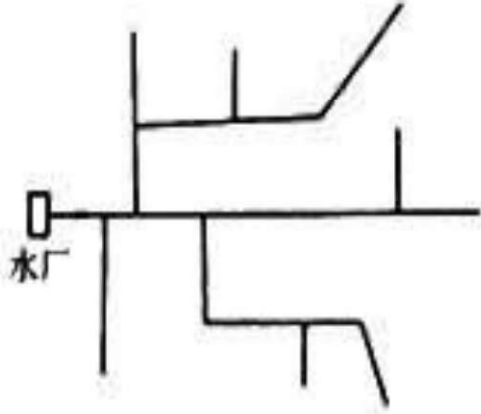
$$H_{AB} = h_{fAB} = \frac{1}{3} \frac{1}{K^2} (ql)^2 l$$

上式表明，当流量全部沿程均匀泄出时，其水头损失只等于全部流量集中在末端泄出时的水头损失的三分之一。

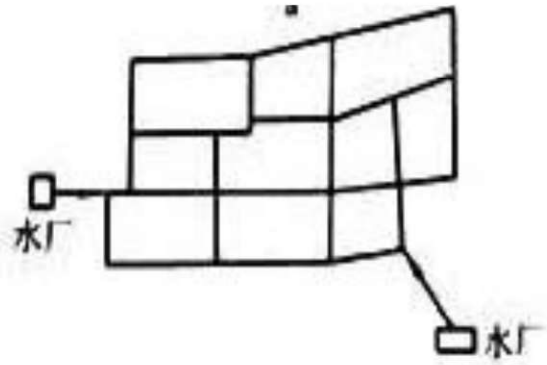
§ 5.6 管网的水力计算

一、概述

为了满足不同供水要求，在给水中往往将许多管路组合成为管网。管网按其布置形式可分为树状及环状两种。



树状管网
Branching system



环状管网
Pipe networks

树状管网(Branching system)

在树状管网中，从水源到用户的管线，有如树状，从一点引出，逐级分流。这种管网的特点是造价较低，但供水可靠性较差，一旦管网中有一段发生故障，在该管段下游的各级管段都要受到影响，另外，树状管网的末端管道，由于逐级分流，流量较小，流速较低，甚至停滞，水质容易变坏。

环状管网(Networks of pipes)

在环状管网中，从水源到用户的管线连接成环状，当管网中有一段发生故障时，用隔离闸阀将其与管网断开，进行检修，影响范围只有该管段，其它管线可以继续供水，因而环状管网的供水可靠性较高。另外，环状管网还可以大大减轻水击的破坏。但工程造价较高。

管网内各管段的管径是根据流量 Q 及速度 v 来决定的。所以在确定管径时，应作技术经济比较。采用一定的流速使得供水的总成本（包括管网建设费用和管网运行费用）最低，这种流速称为经济流速 v_e 。

经济流速涉及的因素很多，综合实际的设计经验及技术经济资料，对于中小直径的给水管路
当直径 $D=100-400\text{mm}$ $v_e=0.5 \sim 1.0\text{m/s}$
当直径 $D>400\text{mm}$ $v_e=1.0 \sim 1.4\text{m/s}$
但这也因地因时而略有不同。

一、树状管网(Branching system)

由输水管道逐段分支构成的树枝状管网系统，各末梢管路末端保持一定的各自所需的工作水头 H_z 和流量 q_e 。

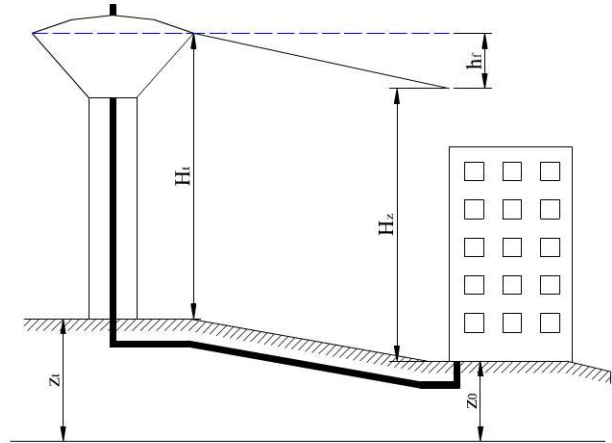
进行水力学计算时，应根据已布置的树枝状管网系统，选定一设计管线。一般是选择从水源点到最远的、最高的、供水流量最大的管线为设计管线。也就是以最不利管线为设计管线。若将从水源至末梢沿设计管线各管段的序号记为 i ，则水源供水所需水头为：

$$H_i + z_i = \sum h_{fi} + H_z + z_0$$

$$H_i = \sum h_{fi} + H_z + z_0 - z_i$$

$$\sum h_{fi} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i^2}{K_i^2} l$$

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_e}}$$



一、树状管网(Branching system)

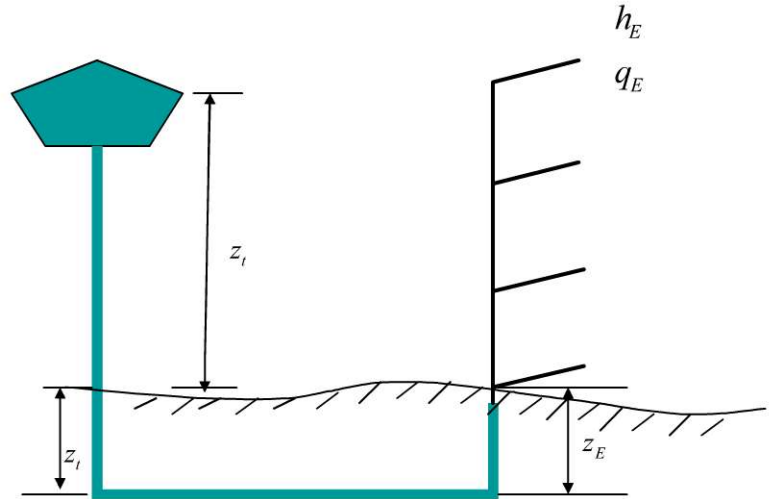
由输水管道逐段分支构成的树枝状管网系统，各末梢管路末端保持一定的各自所需的工作水头 h_e 和流量 q_e 。

进行水力学计算时，应根据已布置的树枝状管网系统，选定一设计管线。一般是选择从水源点到最远的、最高的、供水流量最大的管线为设计管线。也就是以最不利管线为设计管线。若将从水源至末梢沿设计管线各管段的序号记为 i ，则水源供水所需水头为：

$$H_t = -z_t + z_E + h_E + \sum h_{fi}$$

$$\sum h_{fi} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i^2 l}{K_i^2}$$

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_e}}$$



二、环状管网(Networks of pipes)

环状管网(Looping Pipes)：由许多条管段互相连接成闭合形状的管道系统称为环状管网。

• 环状管网水力计算的基本原则

假定分流都发生在节点，则

1、在节点上应满足连续性方程，若记流入节点的流量为负，流出为正（包括节点供水流量 q_e ），则节点处：

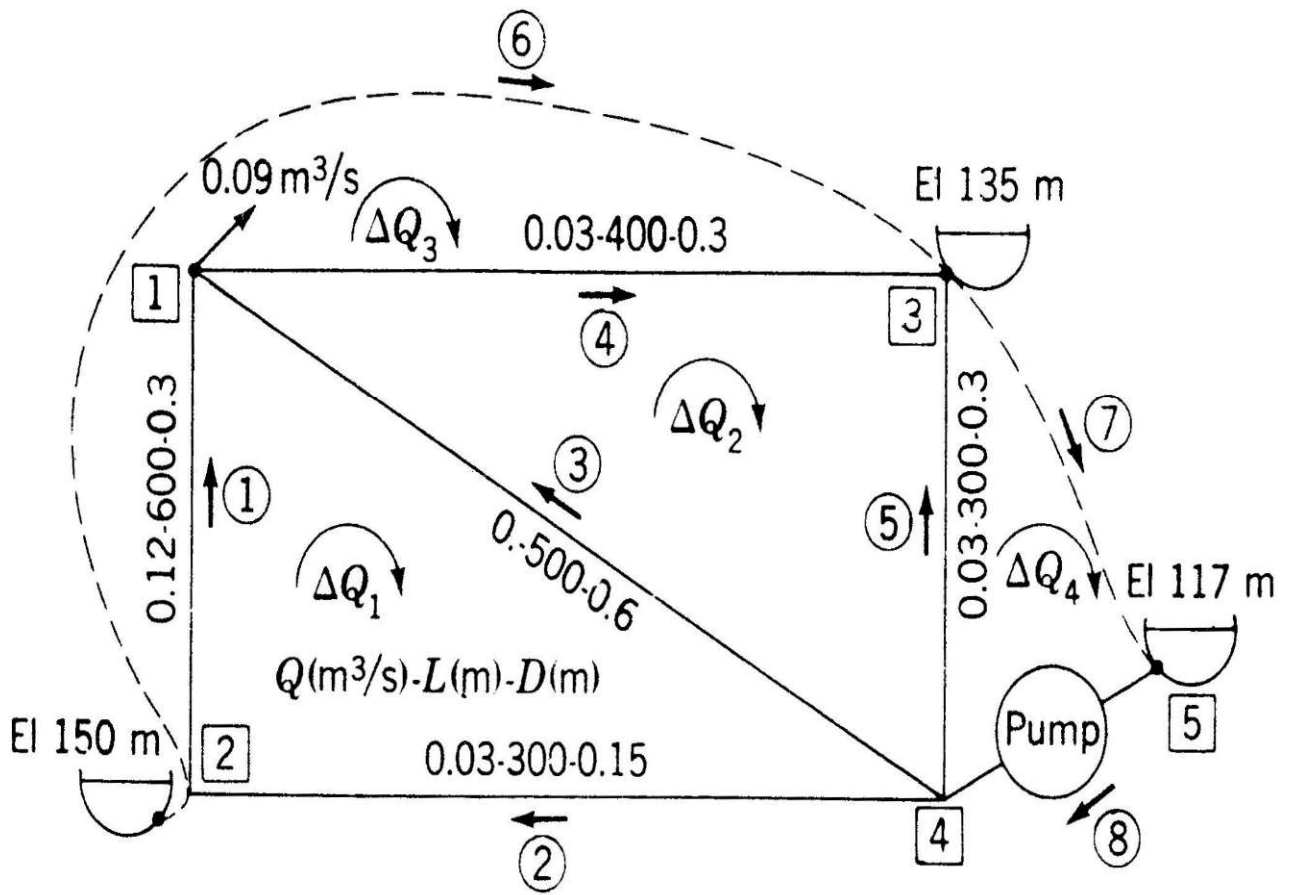
$$\sum Q_i + q_e = 0$$

2、在管网的任一闭合环路中，以顺时针方向的水流所引起的水头损失为正，逆时针方向的水流所引起的水头损失为负，则环路中水头损失的代数和应等于零，即：

$$\sum h_{fi} = 0$$

3、在环路中，任一根简单管道都根据长管计算，则：

$$h_{fi} = l_i \frac{Q_i^2}{K_i^2}$$



•环状管网的计算步骤

1、根据各节点供水流量，假设各管段的水流方向，并对各管道的流量进行初步分配，并使各节点满足节点流量 $\sum Q_i + q_e = 0$ 的要求。

2、依据初步分配的流量，确定各管段的管径，并按假设的水流方向计算各管道的沿程水头损失。若记逆时针方向为CC (counterclockwise)；顺时针方向为C(Clockwise)，则该闭合环路水头损失应满足

$$\sum_c l_i \frac{Q_i^2}{K_i^2} = \sum_{cc} l_i \frac{Q_i^2}{K_i^2}$$

若不满足，则需进行流量修正。

3、计算结果若有 $\sum_c l_i \frac{Q_i^2}{K_i^2} > \sum_{cc} l_i \frac{Q_i^2}{K_i^2}$ ，则沿顺时针方向分配的流量应减少 ΔQ ，逆时针方向流量应增加 ΔQ ，反之亦然。修正流量可按下式计算

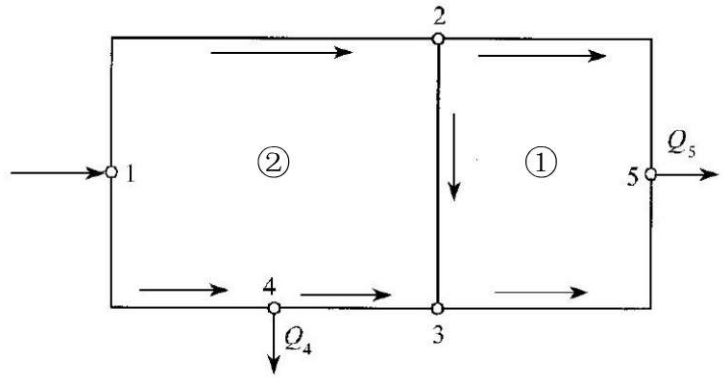
$$\Delta Q = \frac{\sum_c l_i \frac{Q_i^2}{K_i^2} - \sum_{cc} l_i \frac{Q_i^2}{K_i^2}}{2 \left(\sum_c l_i \frac{Q_i^2}{K_i^2} + \sum_{cc} l_i \frac{Q_i^2}{K_i^2} \right)}$$

4、再进行下列水头损失计算：

$$\sum_c \frac{l_i}{K_i^2} (Q_i - \Delta Q)^2 \quad \sum_{cc} \frac{l_i}{K_i^2} (Q_i + \Delta Q)^2$$

使两者相等，或两者相差小于允许误差值（一般取 0.1~0.5m）即为所求结果。否则重复步骤1~3，直到误差达到要求的精度为止。

例5.10 如图所示为水平铺设的两环管网（图5-17），已知两个用水点的流量分别是 $Q_4 = 0.032 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $Q_5 = 0.054 \text{ m}^3/\text{s}$ 。各管段均为铸铁管，粗糙系数 $n = 0.013$ ，长度及直径如表5.2。求各管段通过的流量（水头损失闭合差小于0.5m即可）。



环号	管段	管长 (m)	管径 (mm)	第一次分配流量 (m^3/s)	水头损失 (m)	修正流量	第二次分配流量 (m^3/s)	水头损失 (m)
1	2-5	220	200	0.03	1.852		0.02781	0.013
	5-3	210	200	-0.024	-1.131		-0.02619	-0.007
	3-2	90	150	-0.006	-0.140		-0.00819	0.000
	闭合差				0.580	-0.00219		0.006
2	1-2	270	200	0.036	3.273		0.03199	0.031
	2-3	90	150	0.006	0.140		0.00199	0.000
	3-4	80	200	-0.018	-0.242		-0.02201	-0.001
	4-1	260	250	-0.05	-1.851		-0.05401	-0.015
	闭合差				1.320	-0.00401		0.015

- 作业**5-3**，**5-4**，**5-5**（是否需要机组效率？），**5-6**

<http://baidu.cntv.cn/schedule/SCHE1325679002434350&videoId=3d67788faef14824a53220709a96d469>

管 道 概 论

项 目	特 点	水力计算问题	计算应用方程	应 用		
短 管	沿程管径与流量均不变	1. 已知作用水头、管线布置、断面尺寸和局部阻力组成的条件下，确定输送流量； 2. 已知管线布置、断面尺寸和必需输送的流量，确定相应的水头； 3. 已知管线布置和必需输送的流量，确定相应的管径； 4. 绘制总水头线与测压管水头线，确定管线真空区。	能量方程	抽水机、泵等的吸水管、虹吸管、倒虹吸管、铁路涵管等。		
长 管	简单管路		沿程管径与流量均不变	能量方程	各管路往往用以合成更复杂的管路或管网。	
	复 杂 管 路		串联管路	由直径不同的几段管段顺次联接而成		1. 能量方程；2. 连续性方程
			并联管路	在两节点之间并设两条以上管路而形成		1. 能量方程；2. 连续性方程；3. 并联的任何管段沿程水头损失皆相等，即 $h_{f1} = h_{f2} = \dots = h_{fn}$
	均匀泄流管路		沿程有流量连续均地泄出	1. 能量方程；2. 连续性方程		灌溉工程中的人工降雨管路或给水工程中的滤池冲洗管。
	管 网		枝状管网	由简单长管组成的树枝状管网		1. 能量方程；2. 连续性方程
环状管网		由简单长管组成闭合环路而组成的管网	1. 能量方程；2. 连续性方程； 3. 在任一闭合环路中，有 $\sum h_{fi} = 0$	用于确定管网中各管段的通过流量与管径，从而求得各段的水头损失		