



Fundamentals of Hydrogeology

水文地质学基础

第四章 地下水的运动

The movement of G.W

中国地质大学（武汉）水文地质学基础教学组

本章内容



4.1 达西定律

4.2 达西定律讨论

4.3 流网

实习实验 达西实验与应用

第四章 地下水的运动

❖ 渗流——地下水在岩石空隙中的运动称为渗流

■ 地下水渗流——遵循水力学基本原理（复习）

■ 差异——

- 水力学研究水在管、渠——明流
- 多孔介质，空隙细小，水流很缓慢——渗流
- 从流态来看——地下水多为层流（除岩溶管道外）
层流——紊流
- 侧重稳定流——（不讨论非稳定流）

4.1 达西定律 (Darcy's law)

达西定律—线性渗透定律 (linear law)

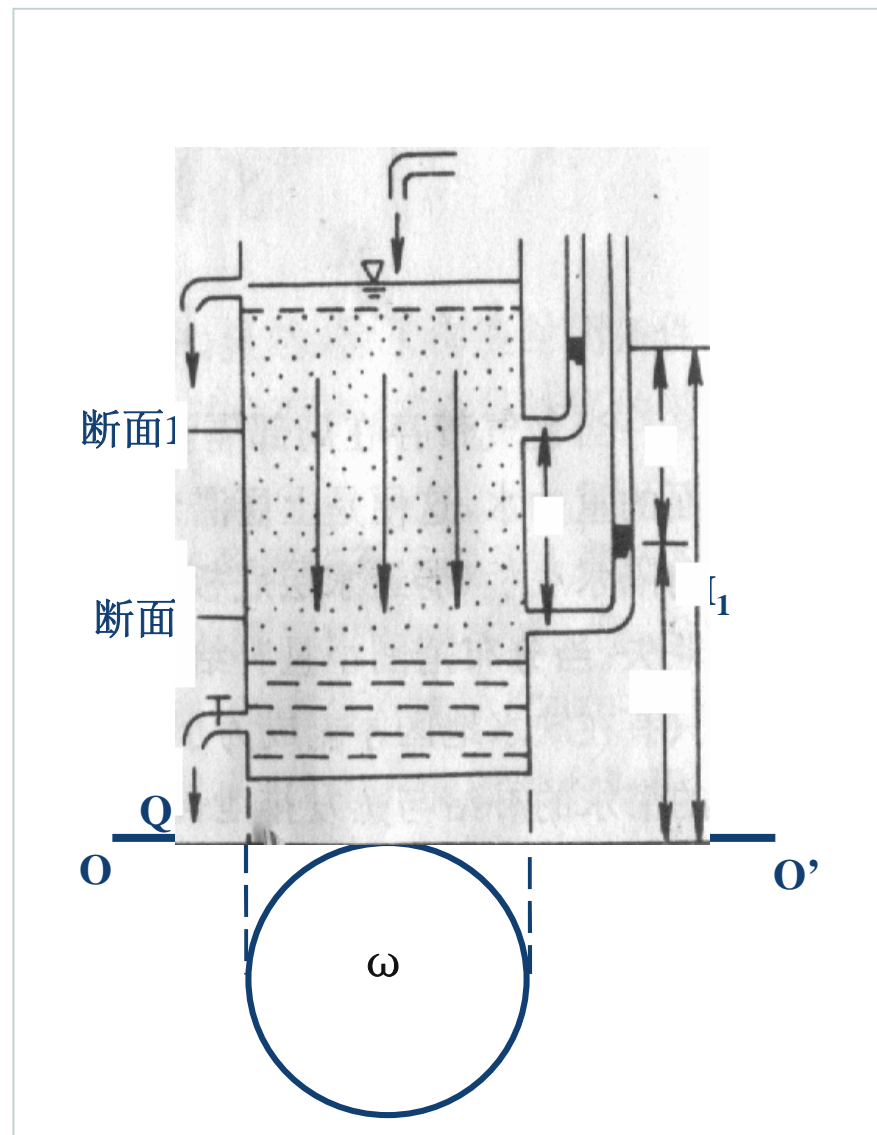
❖ H.Darcy—

法国水力学家，**1856年**（以实验为基础研究时期）
通过大量的室内实验得出的

4.1.1 实验条件：装置图—P36，图4-1

- 1) 等径圆筒装入均匀砂样 (**uniform sand**)，断面为 ω
- 2) 上（下各）置一个稳定的溢水装置——保持稳定水流
- 3) 实验时上端进水，下端出水——示意流线
- 4) 砂筒中安装了2个测压管
- 5) 下端测出水量 (**outflow**) — Q

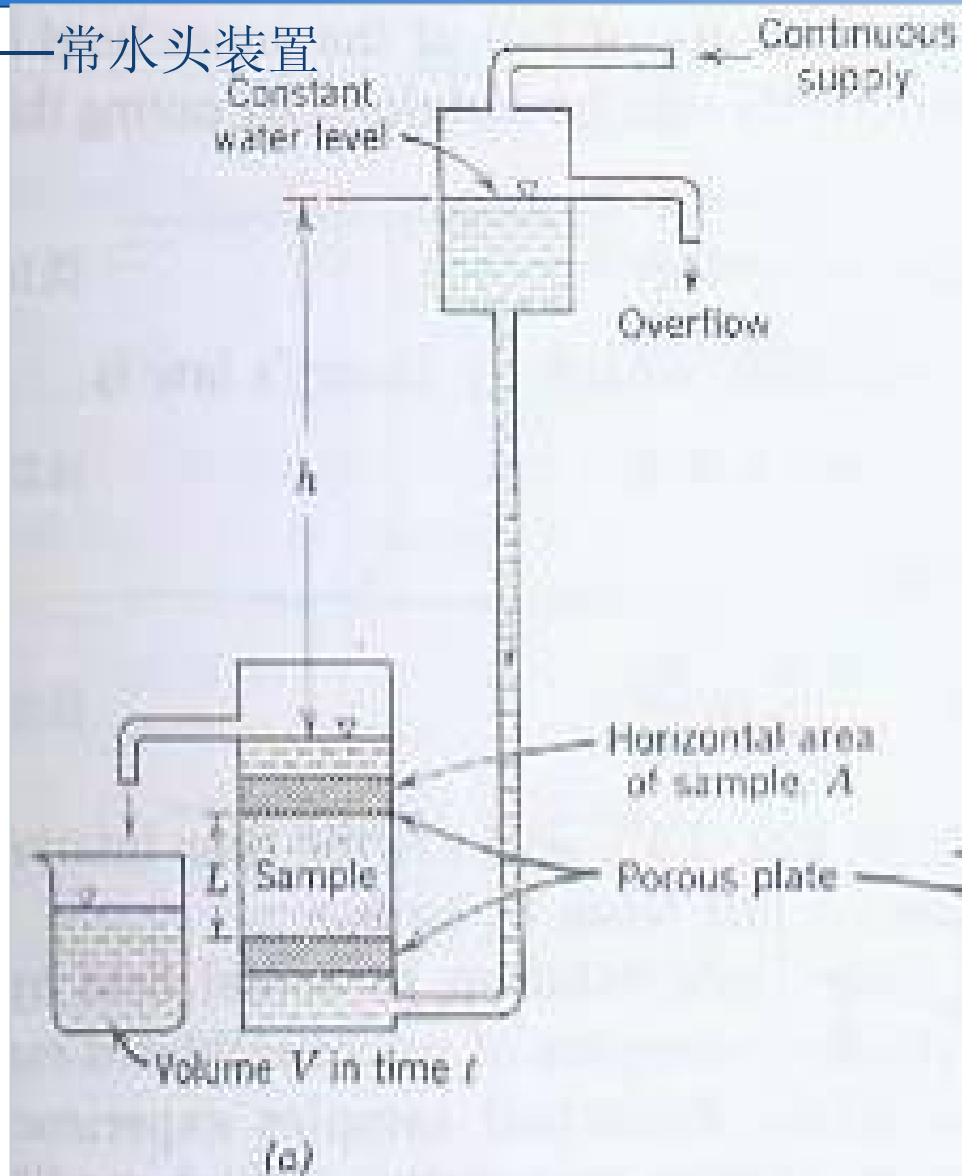
4.1.1 达西试验装置



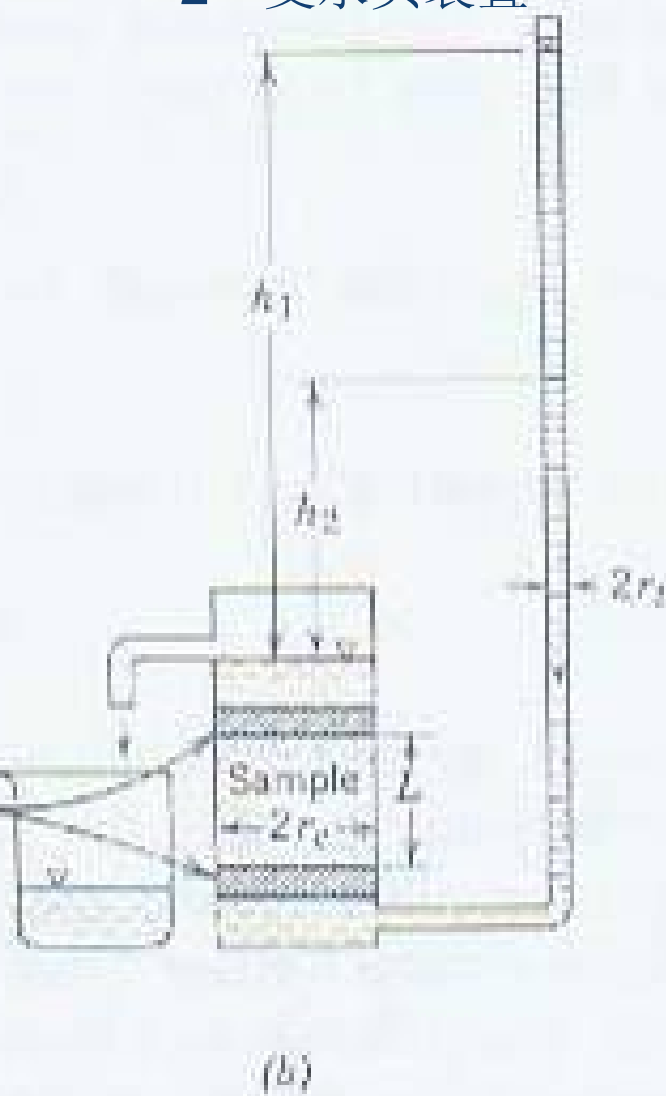
$$Q = K \omega \frac{h}{L}$$

达西试验装置_两种

1—常水头装置



2—变水头装置



4.1.2 达西定律 (Darcy's law)

- ❖ 通过变水头，多次实验得出：出水端的流量 Q 与砂柱、测压管水头之间的关系为：

(1)

$$Q = K \omega \frac{h}{L}$$

- Q ——渗流量； ω ——砂柱断面面积；
- h ——水头损失 (m)； L ——渗流途径；
- K ——与试样有关的比例常数。

- ❖ 由水力学中水动力学基本原理：

$$\frac{h}{L} = I = J \quad \text{——水力梯度} \quad \text{hydraulic gradient}$$

(2)

$$Q = K I \omega$$

4.1.2 达西定律 (Darcy's law)

❖ 渗透流速

- 根据水力学流速与流量的关系对上式转化:

$$Q = \omega \cdot V$$

$$U = \frac{Q}{A}$$

- 与 (2) 式比较

$$V = K \cdot I \quad \text{-----}$$

(3)

V—I关系图

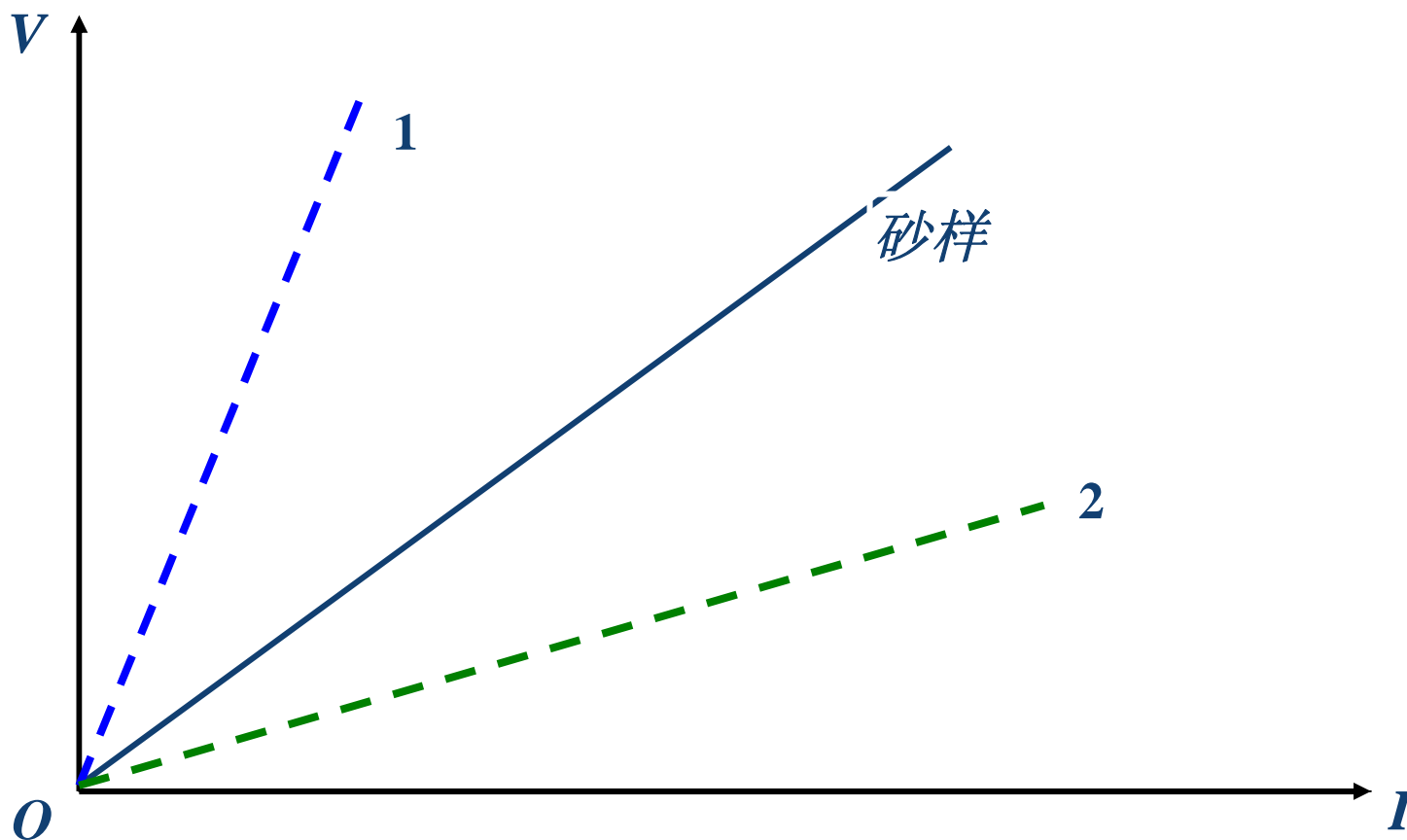
称为**渗透流速** (seepage velocity \Darcy velocity \specific discharge)

上式为单位面积上的流量——称比流量

- 达西定律中由此看出:
- 渗透流速与水力梯度是一次方成正比
- 故达西定律又称为线性渗透定律

转下页

$V—I$ 曲线



$$V = K \cdot I \quad \text{—— (3)}$$

4.2 达西定律讨论

4.2.1 渗透流速 (V) 与过水断面 (ω)

$$Q = K \omega I = \omega V$$

❖ 过水断面与水力学中的水流过断面是否一致？否

▪ 过水断面—— ω ，假想的断面

▪ 实际孔隙断面—— ωn 孔隙度

▪ 实际水流断面—— ωn 有效孔隙度

过水断面比较

$$U = \frac{Q}{A}$$

$$Q/\omega = V \quad \text{比照水力学, 实际流速} \quad Q/\omega' = u$$

❖ 关系：地下水渗透流速 $V = u n_e$

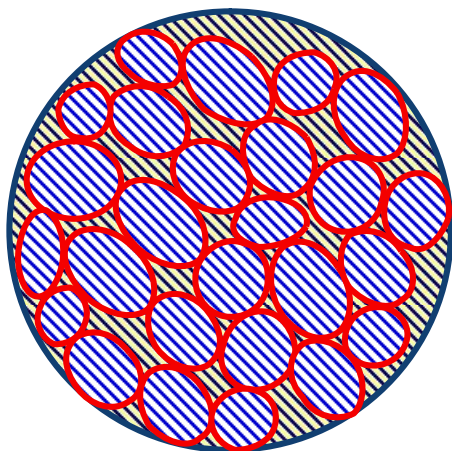
❖ 渗透流速 V ：是假设水流通过整个岩层断面（骨架+空隙）时所具有的虚拟的平均流速。

❖ 意义：研究水量时，只考虑水流通过的总量与平均流速，而不去追踪实际水质点的运移轨迹——简化的研究

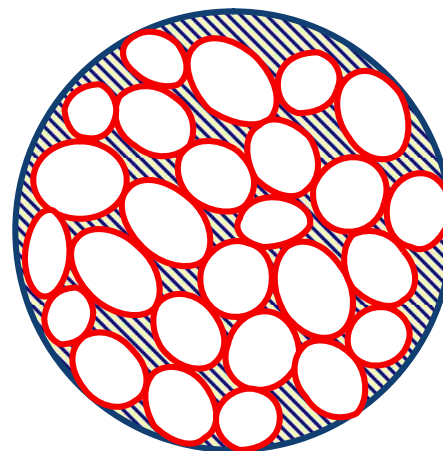


过水断面 ω 与实际过水断面 ω'

过水断面 (ω)



实际过断面 (ω')



4.2.2 水力梯度

水力梯度 (I) (hydraulic gradient)

- ❖ 水力学中水力坡度 (J): 单位距离上的水头损失
- ❖ 是沿渗流途径上的水头损失与相应的渗流长度之比

$$I = \frac{H_1 - H_2}{L_{1-2}} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{h}{L}$$

- ❖ 物理涵义上来看 I : 代表着渗流过程中, 机械能的损失率, 由水力学中水头的概念加以分析:

- ❖ 在地下水渗流研究中
任意点的水头表达式

$$H = Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

总水头
机械能

测压水头
势能

速度水头
动能

4.2.2 水力梯度

水力梯度 (I)

❖ 在达西实验中:

$$H_1 = Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g}$$

其原因是 $u^2/2g$ 很小而忽略

❖ 在地下水渗流研究中常:

$$H_1 \approx Z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$$

■ 总水头 \approx 测压水头 (这是习惯用法)

我们仍然用 $\Delta H = H_1 - H_2$ 代表该程 L_{1-2} 上的总水头损失,

I 则为总能量损失率

❖ 渗流过程中总机械能的损耗原因 (与水力学相近)

- 流体的粘滞性引起的——内摩擦阻力 (分子间)
- 固体颗粒表面对水流的反作用力

4.2.2 水力梯度

水力梯度 (I)

从达西公式: $V = KI$ 来看:

- ❖ 当 I 增大时, V 也愈大;
- ❖ 即流速 V 愈大, 单位渗流途径上损失的能量也愈大; 反过来, 水力梯度 I 愈大时, 驱动水流运动与速度也愈大

注意: 水头损失一定要与渗流途径相对应

4.2.3 渗透系数

渗透系数 K (coefficient of permeability)

在有些教科书中也称为水力传导率
(hydraulic conductivity)

❖ 定义：水力梯度为 $I = 1$ 时的渗透流速 ($V=KI$)

具有速度量纲 $L^2 T^{-1}$

❖ 由公式 $V = K I$ 分析

$V-I$ 关系图

▪ 当 I 一定时，岩层的 K 愈大，则 V 也愈大， Q 大

因此，渗透系数 K 是表征岩石透水性的定量指标

4.2.3 渗透系数

渗透系数 K

❖ 影响因素：—— 以松散岩石,等径孔隙为例来分析

$$K = \frac{\gamma}{32 \mu} d_0^2 n_e$$

- γ ——水的重率; μ ——动力粘滞系数

❖ 从公式 即得出:

- K 与岩石性质有关 $K \propto (d_0^2, n_e)$
- 与流体物理性质有关 $K \propto (\gamma/\mu)$

表4-1列出常见岩石渗透系数的参考值

4.2.4 达西定律的适用范围（自学P38中间一段）

雷诺数数介于 1~10 之间

4.3 流网 (Flow net)

4.3.1 基本概念 (concept)

❖ **渗流场**：地下水流动（运动）的空间

流网是描述渗流场中地下水流动状况的有效工具

❖ **流网**：是由一系列等水头线（**equipotential lines**）与流线（**flow lines**）组成的网格，称流网（**flow net**）

❖ **流线**：某时刻在渗流场中画出的一条空间曲线，该曲线上各个水质点的流速方向都与这条曲线相切（某时刻各点流向的连线）（**迹线**：流体水质点在渗流场中某一时间段内的运动轨迹——**trace line**）

❖ **等水头线**：在某时刻，渗流场中水头相等各点的连线（水势场的分布）

4.3.1 基本概念

基本概念

❖ 二维流网图：

- 平面流网：潜水等水位线图，承压水等测压水位线图
- 剖面流网：含水量厚度较大时，常需要刻画剖面的水流

❖ 流网特点：

- ① 在各向同性介质中，流线与等水头线正交；在各向异性介质中，流线与等水头线斜交
- ② 是按一定规则绘制的，等水头线（等水头差绘制），流线（等流量宽，单宽流量相等）

4.3.2 定性流网绘制

定性流网的绘制---（各向同性介质中）

- 在许多实际工作中，绘制定性流网分析问题很重要
- 精确流网受许多条件（资料不足等）制约，很难办到

❖ 思考回答：

- 边界条件？有哪几类？
- 流线起点和终点？等水头线如何控制？
- 等流量如何确定？
- “源”—**resource** （发散流线处）
- “汇”—**sink** （吸收流线处）
- “地下分水线”—**divide line** （分水或分流处为“流线”）

4.3.2 定性流网绘制

❖ 绘制步骤（简要）：

1) 寻找已知边界（湿周，隔水边界，水位线）

2) 分水线、源、汇的确定

边界性质图

3) 画出渗流场周边流线与条件

4) 中间内插

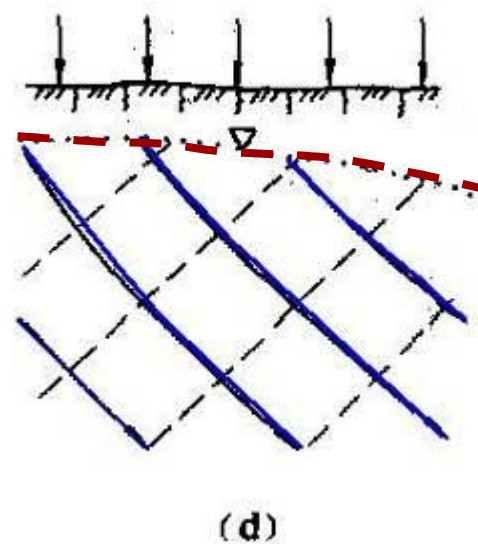
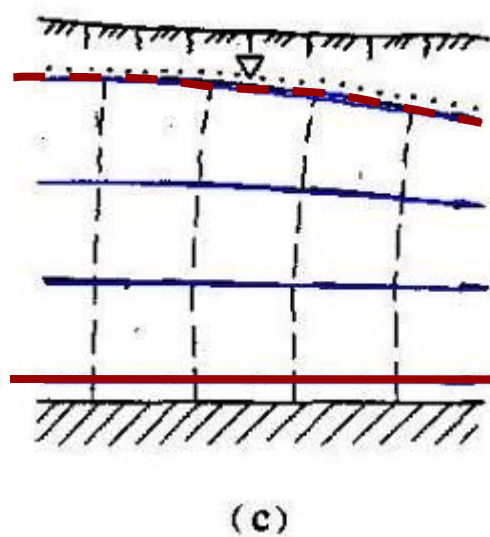
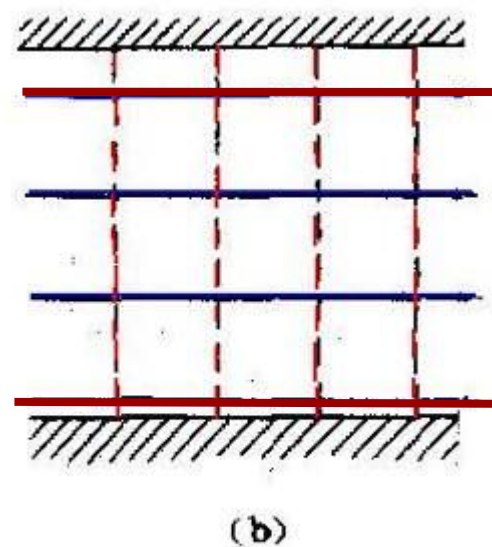
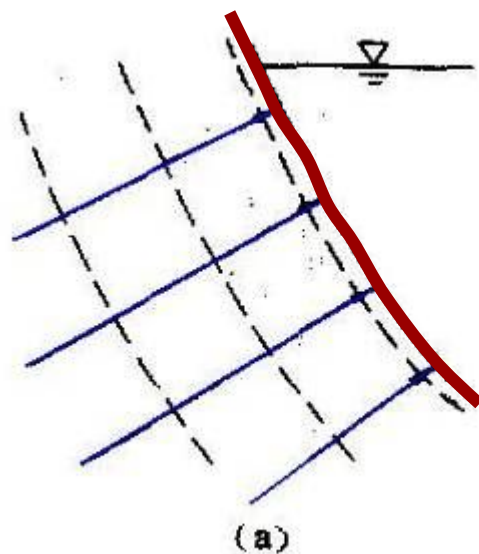
流量等单宽量流量控制流线根数

确定等水头差间隔

❖ 参见河间地块流网图P40，图4-4

河间地块流网

等水头线、流线与各类边界的关系



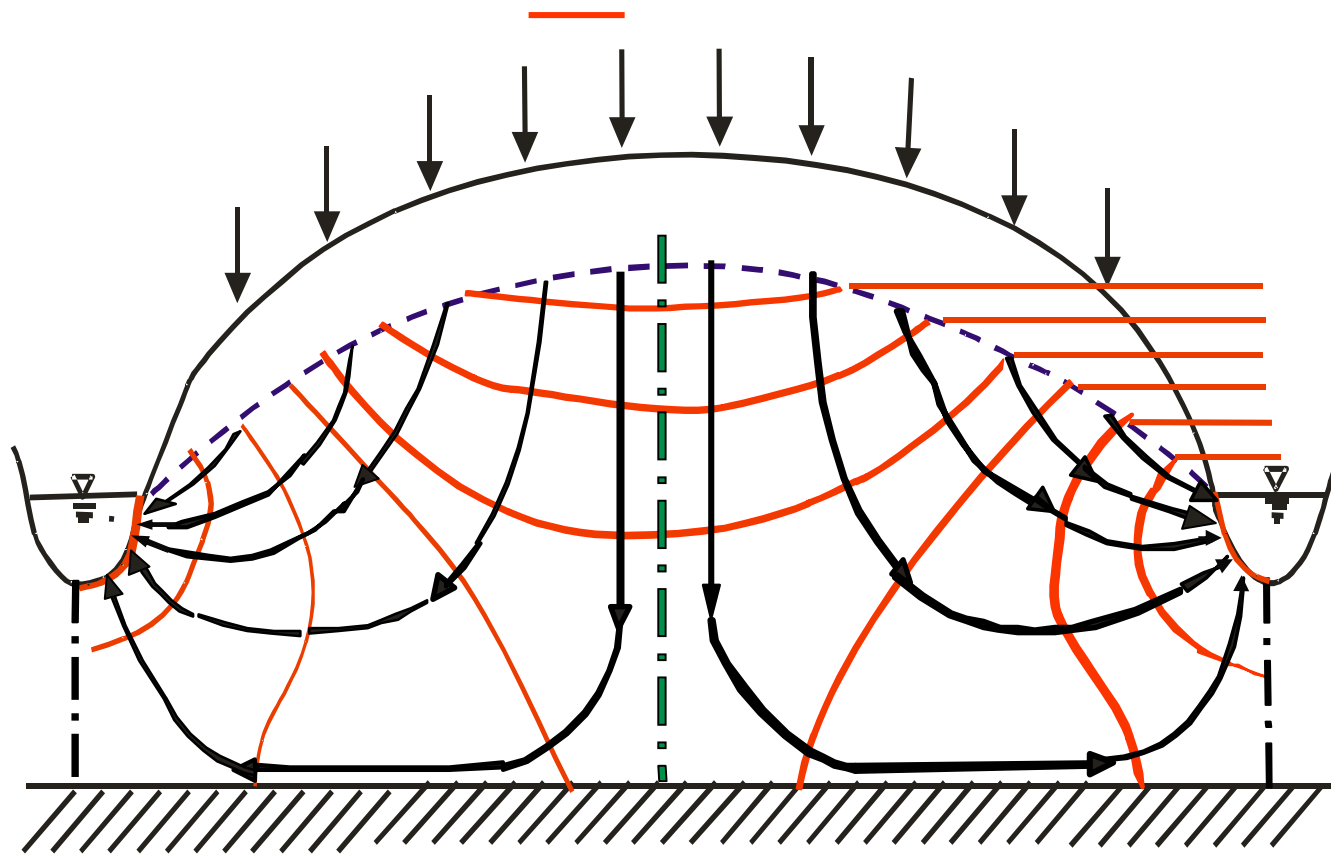
已知边界

a—湿周

b—隔水边界

c\d—水位线

河间地块流网的绘制



- 1) 寻找已知边界（湿周，隔水边界，水位线）
- 2) 分水线、源、汇的确定
- 3) 画出渗流场周边流线与条件，
- 4) 确定等水头值，中间内插

4.3.3 流网的应用

流网图的应用

它反映了渗流场中地下水的流动状况，同时也是介质场与势场的综合反映。提供这两方面的信息：

- 1、可以确定任意点的水头值（ H ），并了解其变化规律

图中A点水头？ H_A 与 H_B 的大小？

流网的应用

- 2、确定水力梯度 I 的大小，及其变化规律

图中A点的 I ？ I_A 与 I_B 比较谁大？

- 3、确定渗透流速 V 的大小，及其变化规律

图中A点的 V_A ？ V_A 与 V_B ？

- 4、渗流场内的流量分布情况

（如果要打井取水，井布置在何处为什么？）

- 5、水质点的渗流途径及长短，当流线与迹线重合，流线近视为水质点的运移轨迹

思考题

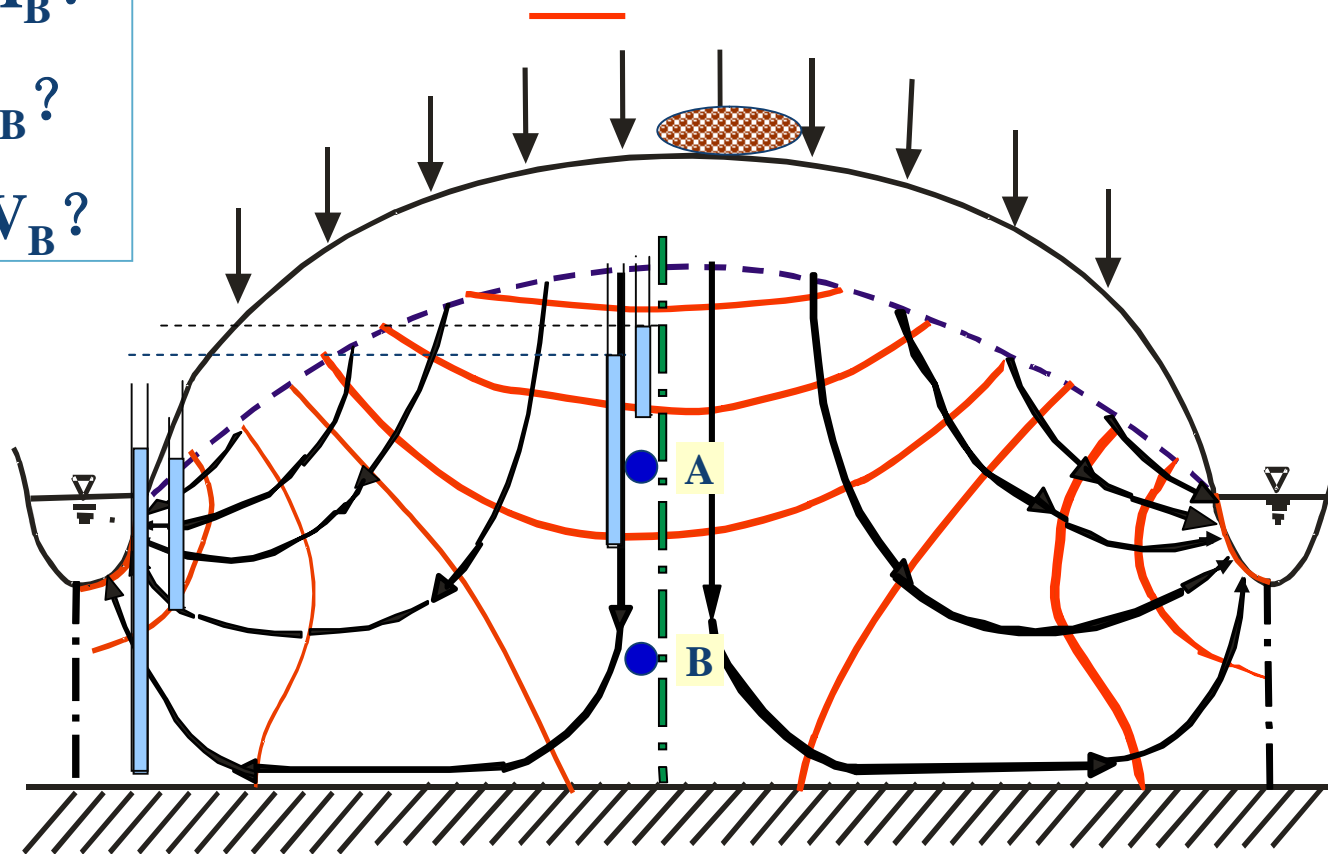
河间地块流网的应用

比较:

H_A 与 H_B ?

I_A 与 I_B ?

V_A 与 V_B ?



思考题

❖ 1、在上页图示条件下，在何处打井取水，井水不会受污染物的影响？

❖ 2、预习：流网与地下水流动系统的关系
p81~94。

❖ 自选学习内容

- 层状非均质介质中的流网
自学图4-5的内容，图4-8内容
- 饱水粘性土中水的运动规律