

# 工程地下水

# 计算

王君连 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 工程地下水计算

---

---

王君连 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书在简明阐述地下水运动基本理论的基础上,着重介绍工程地下水问题的多种计算方法。本书共8章:第1章,地下水运动的物理模型及数学方程;第2章,直接积分法计算工程地下水;第3章,有限差分法计算工程地下水;第4章,地下水运动的有限单元法;第5章,有限单元法计算工程地下水;第6章,势函数法计算工程地下水;第7章,滨海含水层淡、咸水界面流;第8章,复势法计算区域性地下水。书中还包括12个专题计算机程序及相应的算例。

本书不仅对于从事水文地质、水工建筑、水资源工程、水环境工程等专业的科研工作人员和工程设计人员,是一本很有实用意义的专业技术书,而且对于上述专业的高等院校大学生和研究生也是一本有价值的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程地下水计算/王君连编著. —北京:中国水利水电出版社, 2004

ISBN 7-5084-1902-2

I. 工... II. 王... III. 地下水—工程计算  
IV. P641.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第002986号

|       |  |
|-------|--|
| 书 名   | 工程地下水计算  |
| 作 者   | 王君连 编著   |
| 出版 发行 | 中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) |
| 经 售   | 全国各地新华书店和相关出版物销售网点   |
| 排 版   | 北京密云红光印刷厂  |
| 印 刷   | 北京市兴怀印刷厂   |
| 规 格   | 787mm×1092mm 16开本 27.5印张 652千字   |
| 版 次   | 2004年3月第1版 2004年3月第1次印刷  |
| 印 数   | 0001—3100册   |
| 定 价   | 68.00元   |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

把水和土视为连续体的空间平均模式，是研究地下水运动的物理模型。加入了达西定律并以势函数为基本表述的三大方程：拉普拉斯方程  $\nabla^2\Phi = 0$ ，波松方程  $\nabla^2\Phi = -\epsilon$ ，热传导方程  $\nabla^2\Phi = \alpha \frac{\partial\Phi}{\partial t}$ ，则是研究地下水运动的数学模型。一般都可以加入边界条件后求解上述数学方程来计算地下水运动中各要素，如水位、流速、流量、流向等。

本书是一本实用性专业技术书，在简要介绍地下水运动的物理模型和数学模型以后，重点是介绍工程地下水问题的各种计算方法。

直接积分法：就是直接积分微分方程，代入边界条件求出一个地下水水头变化规律的数学表达式。它虽然理论上严格，计算精度也高，但只适用于一些边界条件很简单的工程地下水问题。

有限差分、有限单元法：它把计算域离散为有限个单元，用极值原理求出每一个单元上的水力要素，来取代求复杂的、统一的数学表达式。它几乎适用于工程中出现的各种边界条件，以及非均质地层，但是不适用无法确定边界的无界含水层中的工程地下水问题。

势函数法：均质、等向地层中的地下水运动，是一个有势场，当求得这个场的势函数表达式后，就等于求得场内任一点上的地下水运动要素，它特别适用于大范围的无界含水层计算，但前提条件是该含水层可以概化为均质、等向地层。

复势法：对于某些特定地下水问题，求解场内用复变函数表述的势函数，来表达该场内地下水运动规律特别有效，例如无界含水层中的河、渠系统、减渗体、排水体系统等。但计算起来比较繁琐，只有用其他方法难以计算的少数水文对象才采用此法。

所以，上述几种方法各有各的适用条件，但都不可缺少。

本书还专门用一章的篇幅来阐述滨海地区咸、淡水界面流问题，用界面流势函数表述咸、淡水流动状态和抽水井如何布置才抽不出咸水的问题。

地下水计算往往公式多、容量大，编制好程序，利用计算机来计算是必不可少的。为此，本书利用上述各种计算方法共编制了12个专题的通用程序，这些程序几乎涵盖了绝大多数的实际工程地下水问题，以便读者选用。

编著者

2003年11月

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 地下水运动的物理模型及数学方程

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 1.1 地下水运动的物理模型 .....      | 1  |
| 1.1.1 表征体元、连续介质概念 .....   | 1  |
| 1.1.2 物理模型 .....          | 2  |
| 1.1.3 达西定律, 裘布依假定 .....   | 3  |
| 1.2 土壤的水力特性指标 .....       | 4  |
| 1.2.1 渗透系数 $K$ .....      | 4  |
| 1.2.2 持水度 $S_n$ .....     | 5  |
| 1.2.3 给水度 $\mu$ .....     | 5  |
| 1.2.4 贮水率 $S_s$ .....     | 6  |
| 1.3 地下水运动的基本方程 .....      | 7  |
| 1.3.1 平面流基本方程 .....       | 8  |
| 1.3.2 剖面流基本方程 .....       | 10 |
| 1.3.3 径向流基本方程 .....       | 12 |
| 1.4 初始、边界条件和定解问题 .....    | 14 |
| 1.4.1 初始、边界条件 .....       | 14 |
| 1.4.2 定解问题与求解方法 .....     | 16 |
| 1.5 有势场及势函数公式 .....       | 17 |
| 1.5.1 渗流场, 无旋场, 有势场 ..... | 17 |
| 1.5.2 势的表达式及势函数公式 .....   | 19 |
| 1.6 流函数、流函数和势函数关系 .....   | 20 |
| 1.6.1 流线及流函数 .....        | 20 |
| 1.6.2 流函数、势函数组成复势 .....   | 21 |

## 第 2 章 直接积分法计算工程地下水

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 2.1 地下水流向河、渠 .....    | 22 |
| 2.1.1 一维稳定流 .....     | 22 |
| 2.1.2 一维非稳定流 .....    | 28 |
| 2.1.3 二维稳定流 .....     | 33 |
| 2.2 地下水流向抽(注)水井 ..... | 38 |
| 2.2.1 井的影响半径 .....    | 38 |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 2.2.2 完整井稳定流计算 .....  | 39 |
| 2.2.3 完整井非稳定流计算 ..... | 44 |
| 2.2.4 群井非稳定流计算 .....  | 51 |

### 第3章 有限差分法计算工程地下水

|                        |    |
|------------------------|----|
| 3.1 有限差分法概述 .....      | 53 |
| 3.1.1 网格、结点、步长 .....   | 53 |
| 3.1.2 差分和微分 .....      | 54 |
| 3.2 差分方程的推导 .....      | 55 |
| 3.2.1 一维稳定流差分方程 .....  | 55 |
| 3.2.2 二维稳定流差分方程 .....  | 56 |
| 3.2.3 一维非稳定流差分方程 ..... | 57 |
| 3.2.4 二维非稳定流差分方程 ..... | 59 |
| 3.3 有限差分法的边界条件 .....   | 60 |
| 3.3.1 边界条件处理 .....     | 60 |
| 3.3.2 垂直补给量处理 .....    | 62 |
| 3.4 差分法的计算步骤 .....     | 63 |
| 3.5 差分法计算工程地下水举例 ..... | 63 |
| 3.5.1 一维稳定流 .....      | 64 |
| 3.5.2 一维非稳定流 .....     | 66 |

### 第4章 地下水运动的有限单元法

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 4.1 有限单元法及单元基函数 .....      | 73  |
| 4.1.1 泛函、泛函极值、渗流定解问题 ..... | 73  |
| 4.1.2 里兹法, 伽辽金法 .....      | 78  |
| 4.1.3 有限单元法的基函数 .....      | 82  |
| 4.2 里兹法单元技术 .....          | 88  |
| 4.2.1 泛函极值方程 .....         | 89  |
| 4.2.2 建立单元方程 .....         | 90  |
| 4.3 伽辽金法单元技术 .....         | 93  |
| 4.3.1 总剩余量最小概念的应用 .....    | 93  |
| 4.3.2 建立单元方程 .....         | 95  |
| 4.4 建立总体方程及方程修正 .....      | 107 |

### 第5章 有限单元法计算工程地下水

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 5.1 平面二维稳定流 .....            | 110 |
| 5.1.1 本题工程地下水描述 .....        | 110 |
| 5.1.2 平面二维稳定流有限单元法有关公式 ..... | 112 |
| 5.1.3 计算机程序 .....            | 117 |
| 5.1.4 计算结果 .....             | 122 |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 5.2   | 平面二维非稳定流                | 122 |
| 5.2.1 | 本工程地下水描述                | 122 |
| 5.2.2 | 平面二维非稳定流有限单元法有关公式       | 124 |
| 5.2.3 | 计算机程序                   | 125 |
| 5.2.4 | 计算结果                    | 130 |
| 5.3   | 剖面二维稳定流                 | 131 |
| 5.3.1 | 本工程地下水描述                | 131 |
| 5.3.2 | 剖面二维稳定流有限单元法有关公式        | 132 |
| 5.3.3 | 计算机程序                   | 133 |
| 5.3.4 | 计算结果                    | 137 |
| 5.3.5 | 重力坝扬压力算例                | 137 |
| 5.4   | 剖面二维非稳定流                | 139 |
| 5.4.1 | 本工程地下水描述                | 139 |
| 5.4.2 | 剖面二维非稳定流有限单元法有关公式       | 139 |
| 5.4.3 | 计算机程序                   | 141 |
| 5.4.4 | 计算结果                    | 146 |
| 5.4.5 | 水位骤降均质土坝非稳定流算例          | 146 |
| 5.4.6 | 其他算例                    | 147 |
| 5.5   | 具有排水帷幕的坝基扬压力计算          | 149 |
| 5.5.1 | 本工程描述                   | 149 |
| 5.5.2 | 具有排水帷幕的坝基渗流有限单元法有关公式    | 150 |
| 5.5.3 | 排水孔负补给强度 $\epsilon$ 的置换 | 150 |
| 5.5.4 | 排水孔化引孔径                 | 153 |
| 5.5.5 | 计算机程序                   | 154 |
| 5.5.6 | 计算结果                    | 157 |
| 5.5.7 | 实测与计算对比举例               | 159 |

## 第 6 章 势函数法计算工程地下水

|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| 6.1   | 河渠间工程地下水       | 161 |
| 6.1.1 | 承压、非承压组合含水层    | 161 |
| 6.1.2 | 有局部补给非承压含水层    | 162 |
| 6.2   | 井流工程地下水        | 166 |
| 6.2.1 | 无界含水层完整井井流公式   | 166 |
| 6.2.2 | 靠近直线边界的完整井井流公式 | 168 |
| 6.2.3 | 非完整井井流公式       | 174 |
| 6.3   | 平面无界含水层工程地下水   | 178 |
| 6.3.1 | 均匀流流场          | 178 |
| 6.3.2 | 群井流场           | 179 |
| 6.3.3 | 渗漏池流场          | 180 |
| 6.3.4 | 灌溉区流场          | 182 |
| 6.4   | 渗流干扰区地下水计算     | 184 |

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 6.4.1 | 半无界含水层中均匀流、井流干扰流场 | 184 |
| 6.4.2 | 无界含水层中多项渗流干扰流场    | 186 |
| 6.4.3 | 干扰流场计算机程序         | 187 |
| 6.5   | 呈层地层中的势函数         | 193 |
| 6.5.1 | 格林斯基势             | 193 |
| 6.5.2 | 格林斯基势函数表达式        | 194 |
| 6.5.3 | 呈层地层干扰流场计算        | 197 |
| 6.6   | 具有不透水薄层含水层的渗流计算   | 198 |
| 6.6.1 | 基本公式和计算步骤         | 198 |
| 6.6.2 | 一维流动计算公式          | 202 |
| 6.6.3 | 一维流动计算机程序         | 204 |

## 第 7 章 滨海含水层淡、咸水界面流

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 7.1   | 界面流概述                       | 209 |
| 7.1.1 | 淡、咸水界面流现象                   | 209 |
| 7.1.2 | 吉本的界面假定                     | 210 |
| 7.1.3 | 界面流方程                       | 211 |
| 7.2   | 界面流势函数                      | 212 |
| 7.2.1 | 势函数通式                       | 213 |
| 7.2.2 | 界面流势函数                      | 214 |
| 7.2.3 | 滨海含水层的单值势函数                 | 215 |
| 7.3   | 井对界面流的影响                    | 216 |
| 7.3.1 | 单井界面流计算公式                   | 216 |
| 7.3.2 | 单井界面移动                      | 218 |
| 7.4   | 滨海含水层淡水开采的计算机程序             | 222 |
| 7.4.1 | 本题工程地下水描述                   | 222 |
| 7.4.2 | 计算途径及计算用公式                  | 222 |
| 7.4.3 | 程序结构及源程序                    | 223 |
| 7.4.4 | 数据文件及数据名                    | 224 |
| 7.4.5 | 计算结果                        | 225 |
| 7.5   | 具有粘土薄层的滨海含水层界面流             | 227 |
| 7.5.1 | 几种流动形态                      | 228 |
| 7.5.2 | 各含水层中的 $\Phi \sim \phi$ 关系式 | 229 |
| 7.5.3 | 粘土薄层边缘条件                    | 231 |
| 7.5.4 | 计算步骤                        | 233 |
| 7.6   | 粘土薄层界面流的计算机程序               | 238 |
| 7.6.1 | 流动形态的判别                     | 238 |
| 7.6.2 | 程序结构及源程序                    | 238 |
| 7.6.3 | 数据文件及数据名                    | 240 |
| 7.6.4 | 计算举例                        | 241 |



## 第 8 章 复势法计算区域性地下水

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 8.1 抽、注水井间流函数及流网 .....        | 244 |
| 8.1.1 均匀流、井流的流函数 .....        | 244 |
| 8.1.2 抽、注水两井间流网 .....         | 246 |
| 8.1.3 圆岛中的偏心井 .....           | 248 |
| 8.1.4 均匀流场中一湖泊 .....          | 250 |
| 8.2 复变函数、解析函数简述 .....         | 251 |
| 8.2.1 复数及其代数运算 .....          | 251 |
| 8.2.2 复变函数, 解析函数 .....        | 252 |
| 8.2.3 复线积分 .....              | 255 |
| 8.3 用复线积分模拟河、渠系统地下水 .....     | 257 |
| 8.3.1 工程地下水的复势 .....          | 257 |
| 8.3.2 线源(汇) .....             | 258 |
| 8.3.3 复线积分模拟河、渠系统地下水 .....    | 262 |
| 8.4 用偶极子模拟减渗体、排水体的地下水 .....   | 265 |
| 8.4.1 偶极子 .....               | 265 |
| 8.4.2 用线双偶极模拟减渗体地下水 .....     | 269 |
| 8.4.3 用线偶极模拟排水体地下水 .....      | 272 |
| 8.5 区域性地下水计算途径 .....          | 276 |
| 8.5.1 已知系数类的势 $\Phi_n$ .....  | 276 |
| 8.5.2 未知系数类的势 $\Phi_u$ .....  | 277 |
| 8.5.3 线性方程组 .....             | 278 |
| 8.6 区域性地下水复数法计算机程序 .....      | 279 |
| 8.6.1 计算用公式 .....             | 279 |
| 8.6.2 程序结构及源程序 .....          | 284 |
| 8.6.3 数据文件及数据名 .....          | 287 |
| 8.6.4 源程序 GWCNM.FOR 的扩展 ..... | 289 |
| 8.6.5 计算举例 .....              | 290 |
| 附录 A 拉普拉斯变换简表 .....           | 294 |
| 附录 B 计算机程序 .....              | 297 |
| 参考文献 .....                    | 427 |

# 第 1 章 地下水运动的物理模型及数学方程

## 1.1 地下水运动的物理模型

### 1.1.1 表征体元、连续介质概念

土层或岩层，主要是由固体骨架和孔隙空间两部分组成，具有许多孔隙空间的介质又称多孔介质，土层和岩层也是多孔介质，地下水的流动主要发生在地层这一多孔介质中具有连续孔隙空间的那一部分。连续空间也可以这样来定义，即位于介质孔隙中的任意两点，可以用一条完全位于其中的曲线连接起来，除特殊情况外，这样的曲线可以有許多条，可以相互交差。

#### (1) 多孔介质的表征体元

设  $p$  是多孔介质区域内的一个数学点，围绕  $p$  点取一体积单元  $\Delta U$ ，它包含有若干孔隙和固体颗粒，现在把  $\Delta U$  中的孔隙体积用  $\Delta U_v$  表示，则这一体积单元的孔隙率  $n$  可以用下式表示。

$$n = \frac{\Delta U_v}{\Delta U} \quad (1-1)$$

围绕  $p$  点取一系列体积单元  $\Delta U_i$ ，它们的尺寸规律是： $\Delta U_1 > \Delta U_2 > \Delta U_3 > \dots$ ，相应地有孔隙体积系列为  $\Delta U_{v1}, \Delta U_{v2}, \Delta U_{v3}, \dots$ ，根据 (1-1) 式，求得孔隙率系列为  $n_1, n_2, n_3, \dots$ ，若把  $\Delta U_i$  和  $n_i$  的关系绘制成曲线，一般将具有如图 1-1 所示的线型，线型表明：当  $\Delta U_i$  由大变小趋近于某一  $\Delta U_0$  时， $n_i = n_i(\Delta U_i)$  的振幅在减小并趋近于一稳定值  $n_0$ ；但是，当  $\Delta U_i$  继续变小时， $n_i$  的振幅会愈来愈大；当  $\Delta U_i$  趋近于零时， $n_i$  可能等于 0，也可能等于 1。等于 0 时，表明  $p$  点微体积单元是固体颗粒；等于 1 时，表明  $p$  点微体积单元正好是孔隙空间。这里，我们称  $\Delta U_0$  就是多孔介质在  $p$  点处的表征体积单元（简称表征体元），称  $n_0$  就是  $p$  点处多孔介质的孔隙率，用数学表达式表之为

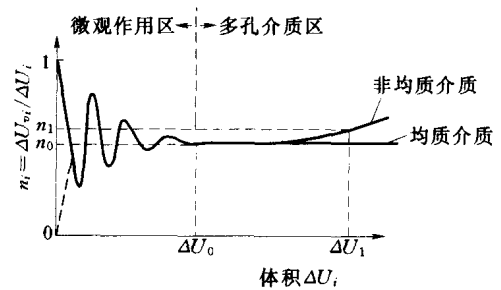


图 1-1 孔隙率及表征体元的定义

$$n_0 = \lim_{\Delta U_i \rightarrow \Delta U_0} \frac{\Delta U_{vi}}{\Delta U_i} \quad (1-2)$$

#### (2) 连续介质

一个具有更大体积的介质，甚至于整个区域地层，都将是上述表征体元的集合，在这一集合中，定义在表征体元上的各种物理量，如孔隙率、渗透系数、容重、给水度等，都认为在空间上是连续变化的，或者说这些物理量在被研究的空间域内处处可导，这种多孔

介质就被称为连续介质。如果把地下水也定义为介质，而且是连续介质，那么，地下水和地层组成的含水层也是连续介质，这样，就可以统一研究在这种两相介质内（甚至多相介质）各种物理量的变化，也就为研究地下水在含水层中的运动规律建立了理论基础。

### 1.1.2 物理模型

水在多孔介质中的流动现象相当复杂，由于土壤颗粒排列、孔隙及孔隙通道的大小、分布等都是随机的，因此，水在孔隙中的流动，路线弯弯曲曲，固体颗粒表面和裂隙岩壁起着边界的作用，因此，阻力处处存在，流速分布很不均匀，想要确切地描述多孔介质中的流动状态，尤其是想用数学模型来表达，将是十分困难的，研究水文地质学的学者们，曾建立了几种运动模式来表述流体在孔隙空间中的流动状态。

#### (1) 分子运动模式

分子运动模式是把水在土壤中运动的物理量都定义在水分子上。理论上它似乎是最严密的模式，但实践中几乎不可能。

#### (2) 质点运动模式

质点运动模式是把水在土壤中运动的物理量定义在水质点上。它是分子运动模式的平均化，虽说利用流体力学理论可以在每条孔隙通道内建立起物理模型，但是，土壤内的孔隙通道随机多变，难以确定其边界条件，几乎无法用数学方法表达。

#### (3) 孔隙平均模式

孔隙平均模式是把水在土壤中的运动物理量定义在孔隙平均断面上。无论土壤的孔隙通道分布如何复杂，但是有一点，即水总是从水头高的一端，通过各种孔隙通道，向水头低的一端流动。基于这一点，可以建立起孔隙平均模式的物理模型。例如，这时的流速可用下式表达

$$v = \frac{Q}{An} \quad (1-3)$$

式中， $Q$  为通过土壤面积  $A$  所测得的流量； $n$  为土壤孔隙率； $v$  为孔隙平均流速。其数学表述是建立在孔隙通道统计学基础上的。

#### (4) 空间平均模式

空间平均模式是把水在土壤中的运动物理量定义在水、土混合物所占有的空间上。由于地下水和地层都定义为连续介质，那么就可以建立空间平均模式的物理模型。例如，这时的流速可用下式表述

$$u = \frac{Q}{A} \quad (1-4)$$

式中， $u$  为空间平均模式下的渗透流速。

所谓空间平均模式，是假定略去渗流区内全部固体骨架，全部空间由水体充满，而水体中孔隙的边界条件（阻力的存在）仍保持不变，这种模式的地下水流动，又称假想流动。它的物理量表达上也和孔隙平均模式不一样，比较（1-3）式和（1-4）式可知

$$u = nv \quad (1-5)$$

即渗透流速  $u$  比孔隙流速  $v$  要小。

在裂隙性岩石含水层中钻孔试验所取得的含水层物理量，如图 1-2 所示也是空间平均值的概念。下面章节将介绍的达西定律，也是用空间平均模式建立起来的流量与水力坡降关系的数学表达式。

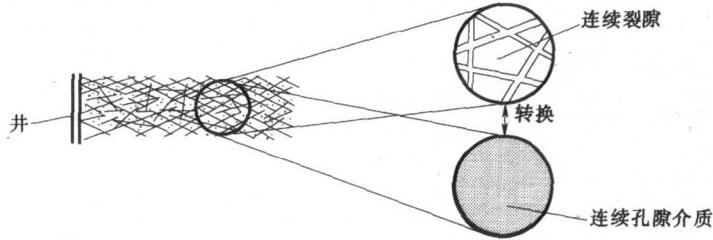


图 1-2 裂隙性岩石空间平均示意图

### 1.1.3 达西定律，裘布依假定

达西定律和裘布依假定这两个古老而实用的渗透定律，在许多理论研究和实践中都证明了它们的广泛正确性和实用性。

#### (1) 达西定律

1856 年，法国水力学学者达西 (H. Darcy) 对水在均质砂柱中的流动做了一系列试验，最后得出结论：渗透流量  $Q$  与砂柱横断面积  $\omega$  及两测点间的水头差 ( $h_1 - h_2$ ) 成正比，和测点距离  $l$  成反比，并与土壤的透水性能有关。这样，建立了如下的关系式

$$Q = K\omega \frac{h_1 - h_2}{l} \quad (1-6)$$

式中比例系数  $K$ ，是反映土壤透水性能的一个综合系数，称作渗透系数（又称水力传导系数）。如果把单位长度内的水头损失  $\frac{h_1 - h_2}{l}$  用水力坡降  $J$  来表示，则 (1-6) 式可写成

$$Q = K\omega J \quad (1-7)$$

达西实验，属均匀渗流，可以认为横断面上所有点的流动状态相同，断面上任一点的渗透流速  $u$  等于断面平均流速，故有

$$u = KJ \quad (1-8)$$

如果用微分式来表示水力坡降，那么，(1-8) 式可改写成

$$u = -K \frac{dH}{dl} \quad (1-9)$$

应当说明，随着流动途径增加  $dl$ ，水头在降低，即水头“增量”  $dH$  是负值，因此 (1-9) 式中在  $\frac{dH}{dl}$  前取负号。

达西定律是一个实验定律，最初有人把达西公式 (1-9) 式看作是渗流运动方程，而且直接推广到三维运动和非恒定流运动上去，后来通过大量有计划的实验，以及实际工程的验证，证明这种推广是成功的。当坐标轴的方向和孔隙介质渗透性的主方向一致时，达西公式的三维形式可变成

$$\left. \begin{aligned} u_x &= -K_x \frac{\partial H}{\partial x} \\ u_y &= -K_y \frac{\partial H}{\partial y} \\ u_z &= -K_z \frac{\partial H}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式中,  $u_x, u_y, u_z$  分别为渗透流速在  $x, y, z$  三个方向上的分量;  $K_x, K_y, K_z$  分别为土壤渗透系数在  $x, y, z$  三个方向上的分量;  $\frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial H}{\partial y}, \frac{\partial H}{\partial z}$  分别为水力坡度在  $x, y, z$  三个方向上的分量。

### (2) 裘布依假定

如图 1-3 所示的地下水流动剖面, 潜水面是一条曲线, 过水断面也是一条曲线, 在该曲线上任一点的渗透流速  $u_s$  是处处相等的。这是实际流动状态。19 世纪水力学家裘布依 (Dupuit), 根据大部分地下水流动的水面坡降很小这一事实提出假定: 假定在垂直过水断面上任一点的流速  $u_x$  是处处相等的, 而且流线均为平行直线。

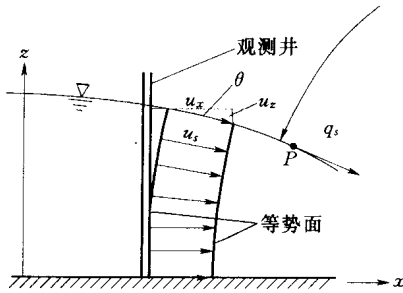


图 1-3 裘布依假定

由图 1-3 可知:  $u_s$  和  $u_x$  存在一夹角  $\theta$ , 则有  $\frac{u_x}{u_s} = \sin\theta, \frac{u_z}{u_s} = \cos\theta, \frac{u_z}{u_x} = \tan\theta$ 。当  $\theta \rightarrow 0$ , 则  $\tan\theta \rightarrow 0$ , 即  $u_z \rightarrow 0$ 。因此, 裘布依假定实际就是, 在地下水流动中, 忽略了  $z$  方向的流速分量  $u_z$ , 把实际剖面流是

$u_x, u_z$  二维流动问题, 简化为  $u_x$  一维问题。

## 1.2 土壤的水力特性指标

### 1.2.1 渗透系数 $K$

渗透系数  $K$  (又称导水率), 是指在单位水力坡度作用下, 土壤单位面积上通过的渗透流量, 其量纲是  $[L/T]$ 。

渗透系数的大小与土壤特性有关, 如颗粒大小、形状、排列等, 还与流体的粘滞性有关。在实际工程中, 确定土壤渗透系数的方法是进行室内、外渗透试验。室内试验是指在现场采取土样, 在室内利用试验装置进行渗透试验。

室外试验是指在现场向含水层钻孔, 进行抽水或注水试验, 原理上用井流公式整理资料, 求得含水层渗透系数。下面提供的土壤渗透系数表, 见表 1-1, 是大量室内、外试验所得土壤渗透系数综合出的范围值。

表 1-1

土壤渗透系数范围值

| 土壤名称  | 渗透系数 $K$ (cm/s)                   | 土壤名称 | 渗透系数 $K$ (cm/s)                    |
|-------|-----------------------------------|------|------------------------------------|
| 砾石、粗砂 | $a \times (10^{-1} \sim 10^{-2})$ | 粉土   | $a \times (10^{-4} \sim 10^{-6})$  |
| 中砂    | $a \times (10^{-2} \sim 10^{-3})$ | 粉质粘土 | $a \times (10^{-6} \sim 10^{-7})$  |
| 细砂、粉砂 | $a \times (10^{-3} \sim 10^{-4})$ | 粘土   | $a \times (10^{-7} \sim 10^{-10})$ |

注  $a$  为 1~9 之间的某一常数。

应当指出，裂隙性和孔隙性岩石的渗透系数，是通过钻孔试验而求得，它代表了较大范围内岩层的平均渗透性，可以说是“空间平均模式”的再平均。

### 1.2.2 持水度 $S_r$

定义一块土样或岩样的孔隙率为其孔隙体积  $\bar{V}_v$  和其总体积  $\bar{V}$  之比，写成

$$n = \frac{\bar{V}_v}{\bar{V}} \quad (1-11)$$

表 1-2 是几种土壤和岩石的孔隙率的典型数值，可供参考和选用。

表 1-2 几种土壤、岩石孔隙率的典型数值

| 土壤名称    | 孔隙率       | 土壤名称 | 孔隙率       |
|---------|-----------|------|-----------|
| 泥炭土     | 0.6~0.8   | 砾石   | 0.3~0.4   |
| 壤土      | 0.5~0.6   | 砂砾石  | 0.3~0.35  |
| 粘土      | 0.45~0.55 | 砂岩   | 0.05~0.2  |
| 粉土      | 0.4~0.5   | 砾岩   | 0.02~0.05 |
| 中、粗粒混合砂 | 0.35~0.4  | 灰岩   | 0.01~0.15 |
| 均质砂     | 0.3~0.4   | 页岩   | 0.01~0.05 |
| 中、细粒混合砂 | 0.3~0.35  |      |           |

(根据吐特)

表 1-2 中土壤孔隙率，一般是指土壤总体孔隙和总体积之比。但从地下水流动的观点看，并不是所有的孔隙都参与流动作用，孔隙介质中有连通孔隙，也有不连通的封闭孔隙，即使是连通孔隙，在其支叉上会出现死端孔隙。因此，那些封闭孔隙、死端孔隙并不参与地下水流动作用，部分起到保持水的作用，这样，土壤中结合水、毛细水再加上封闭、死端孔隙持水构成了土壤的持水性。

持水性是指土壤在重力作用下能保持一定水量的性能。持水性的定量指标是持水度  $S_r$ ，持水度是指土壤在重力作用下所能保持的水量  $\bar{V}_r$  和土壤总体积  $\bar{V}$  之比，写成

$$S_r = \frac{\bar{V}_r}{\bar{V}} \quad (1-12)$$

显然，持水度与土壤种类和结构状态有关。

### 1.2.3 给水度 $\mu$

在非承压含水层内的饱和带，取一个面积为单位面积的柱体单元，单元底部为不透水层，当流出该单元体的水量大于流进水量时，则柱体潜水面就会下降，在  $\Delta t$  时段内，这一流进、流出的水量差  $\Delta \bar{V}$ ，就是从潜水面下降了  $\Delta h$  高度的柱体中释放出来的水量，这就是土壤的给水性，因此，给水性是指饱和土壤在重力作用下能自由排出一定水量的性能。其定量指标是给水度  $\mu$ ，给水度是饱和土壤在重力作用下释放出来的水体积  $\bar{V}_\mu$  与土壤总体积  $\bar{V}$  之比，写成

$$\mu = \frac{\bar{V}_\mu}{V} \quad (1-13)$$

也有人称给水度为可排水孔隙率。

显然，给水度也与土壤的结构状态有关，表 1-3 是几种土壤的给水度范围值，可供参考和选用。

表 1-3 几种土壤的给水度范围值

| 土壤名称   | 土壤结构                    | 给水度   | 土壤名称                                 | 土壤结构               | 给水度                                   |
|--|-------------------------|-------|--------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| 粘土<br>重粘质壤土  | 块状结构，很细或细的针状结构          | 1%~2% | 轻粘质壤土<br>粉土<br>粉质壤土<br>很细的砂质壤土<br>壤土 | 中等棱柱状和次角状小块体结构     | 6%~12%                                |
| 粘土<br>粘质壤土<br>粉质粘土<br>砂质粘壤土                                | 很细或细的棱柱状结构，棱角状、小块状、片状结构 | 1%~3% | 细砂壤土<br>砂壤土                          | 粗次角状小块体和角状结构，细团粒结构 | 12%~18%                               |
| 粘土<br>粉质粘土<br>砂质粘土<br>粉粘质壤土<br>粘质壤土<br>粉质壤土<br>粉土<br>砂粘质壤土 | 细的和中等棱柱状结构，棱角状、小块状、片状结构 | 3%~8% | 壤质砂<br>细砂                            | 中等团粒结构<br>单颗粒结构    | 15%~22%                               |
|  |                         |       | 中等砂                                  | 单颗粒结构              | 22%~26%                               |
|  |                         |       | 粗砂<br>砾石                             | 单颗粒结构              | 26%~35%                               |
|  |                         |       | 凝灰岩、石灰岩<br>细砂岩<br>中砂岩<br>粉砂岩         |                    | 2%~47%<br>2%~40%<br>12%~41%<br>1%~33% |

(根据美国垦务局，斯曲拉克)

表中岩石类的给水度变化范围较大，这主要是取决于岩石的裂隙程度。威斯特 (De.

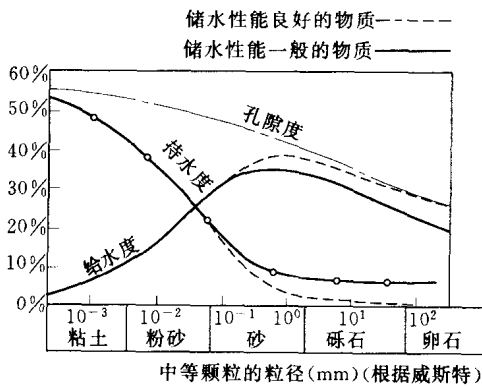


图 1-4 给水度和颗粒粒径的关系

Wiest) 做了一系列土壤试验，建立起了持水度、给水度、孔隙率和土壤中等颗粒直径 ( $d_{50}$ ) 之间的关系如图 1-4。

美国垦务局收集了世界不同地区的一些资料，建立起土壤给水度与土壤渗透系数之间的关系，如图 1-5，可供参考选用。图中实线表示给水度的平均值；+25%和-25%两条垂线表示给水度的范围值。

#### 1.2.4 贮水率 $S_s$

土壤是由孔隙和骨架组成的，属于弹塑性体。水在一定程度上也属于弹塑性体。地层中的一块饱和土体受到附加压力作用时，土体骨架颗粒位置要调整，孔隙率减小，孔隙中一部分水被挤压出来。如果土体在受到附加压力的同时，土体中的水体却同时受到附加减小压力，产生水的膨胀，因此也要释放出一部分水，这样两者的综合结果是都要释放出部分水量。土壤这种在弹性阶段的附加压力作用

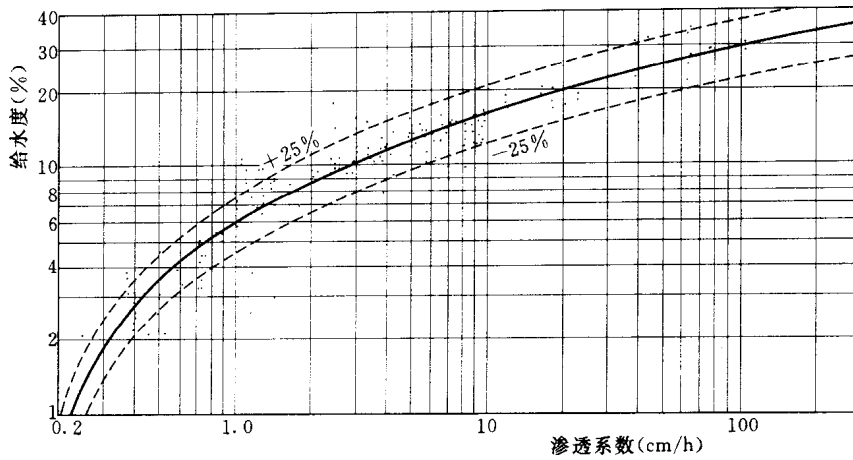


图 1-5 给水度和渗透系数的关系

下能释放部分水量的性质称为弹性释放。如果发生相反的过程，土体又能蓄存部分水量，称为弹性贮存，统称贮水性。

土壤贮水性的定量指标是贮水率  $S_s$ 。贮水率  $S_s$  是指压力水头变化一个单位时，由于含水层的弹性作用（土体压缩和水体膨胀）从单位土体中释放或贮存的水量，其量纲为  $[L^{-1}]$ 。设含水层厚度为  $M$ ，当压力水头变化一个单位，从面积为一个单位，高度为含水层厚度的柱体中释放或贮存的水量，称为贮水系数  $S$ ，无量纲，写成

$$S = S_s M \quad (1-14)$$

贮水率  $S_s$  的范围值参见表 1-4。

表 1-4 几种土壤的贮水率  $S_s$  范围值

| 土壤种类 | 贮水率 $S_s$ (1/cm)                             | 土壤种类 | 贮水率 $S_s$ (1/cm)                             |
|------|--|------|--|
| 塑性粘土 | $1.9 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-4}$ | 密实砂层 | $1.9 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-6}$ |
| 固结粘土 | $2.4 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-4}$ | 密实砂砾 | $9.4 \times 10^{-6} \sim 4.6 \times 10^{-6}$ |
| 硬粘土  | $1.2 \times 10^{-4} \sim 8.5 \times 10^{-5}$ | 裂隙岩层 | $1.9 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-7}$ |
| 松散砂层 | $9.4 \times 10^{-5} \sim 4.6 \times 10^{-5}$ | 固结岩层 | $3.0 \times 10^{-7}$ 以下                      |

(根据杜美尼克)

贮水系数  $S$  是含水层厚度和埋深的函数，含水层埋深愈深，土层愈密实，孔隙率愈小，贮水率也愈小，即可开采的弹性储量愈少。

应当指出，地层的渗透系数、持水度、给水度、贮水系数这些水力特性指标，应当通过室内和现场一系列试验而取得，文中提供的各水力特性公式、图表仅作为没有确切试验资料时的估算选用值，也可作为对少数试验值误差的检查。

### 1.3 地下水运动的基本方程

在 1.1 节中，已经把地下水在地层中的流动定位在空间平均模式的物理模型上，且土壤和水均为连续介质，运动符合达西定律和裘布依假定，现在进一步研究这一运动的数学



描述，建立数学方程。

地下水运动方式按工程性质分为：平面问题，剖面问题；按流动形式分为：承压流，非承压流；按时态上分为：稳定流，非稳定流。

任一实际工程中的地下水流动，常常是上述情况的组合。

### 1.3.1 平面流基本方程

#### (1) 非承压平面流

裘布依假定不考虑垂直方向上的流速分量  $u_z$ ，因此，地下水流动的过水断面成一垂直平面。设含水层底为一水平不透水层，现在含水层内取一底面积为  $dx dy$  的微柱体见图

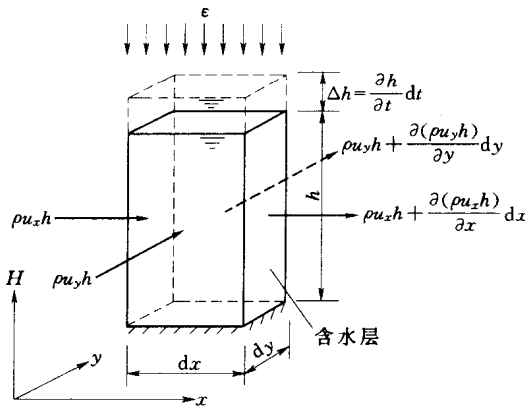


图 1-6 非承压含水层微柱体

1-6。层底至潜水面高度为  $h$ ，在  $x, y$  两方向上沿高度  $h$  的渗透流速  $u_x, u_y$  处处相等，考虑微柱体顶面有垂直向补给  $\epsilon [L/T]$ ，严格地说，有垂直补给时就存在垂直方向分速  $u_z$ ，如果补给量相对于主渗流量很小时， $u_z$  就可以不考虑。这样，原来的三维流动，由于引进了裘布依假定，就可以用二维 ( $x, y$  方向) 流动来处理，以下是从质量守恒原理推导微柱体的连续方程。

微柱体质量守恒指：流进、流出微柱体的流体质量差应等于潜水面升高（或降

低） $\Delta h$  的柱体内贮存或释放的流体质量，见图 1-6。

在  $x, y$  两个方向流入的变量要素分别为  $\rho u_x h, \rho u_y h$ 。

在  $x, y$  两个方向流出的变量要素分别为  $\left[ \rho u_x h + \frac{\partial(\rho u_x h)}{\partial x} dx \right], \left[ \rho u_y h + \frac{\partial(\rho u_y h)}{\partial y} dy \right]$ 。

在  $dt$  时段内，两个方向的流入、流出质量差分别为

$$x \text{ 方向} \quad m_x = - \frac{\partial(\rho u_x h)}{\partial x} dx dy dt$$

$$y \text{ 方向} \quad m_y = - \frac{\partial(\rho u_y h)}{\partial y} dx dy dt$$

这样，两个方向上流进、流出总质量差为  $m_1 = m_x + m_y$ ，即

$$m_1 = - \left[ \frac{\partial(\rho u_x h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y h)}{\partial y} \right] dx dy dt$$

此外，流体的垂直向补给量  $m_2$  为

$$m_2 = \rho \epsilon dx dy dt$$

在  $dt$  时段内，潜水面升（降）值  $\Delta h$  等于  $\frac{\partial h}{\partial t} dt$ ，则贮存（或释放）在  $\Delta h$  柱体内的水体质量  $m_3$  可表示为

$$m_3 = \rho \mu \frac{\partial h}{\partial t} dx dy dt$$