

水
力
公
式
集

铁道部科学研究院
水工水文研究室译

下
集

人 民 铁 道 出 版 社

水 力 公 式 集

下 集

(1971年修订版)

日本土木学会 编

铁道部科学研究院水工水文研究室译

人 民 铁 道 出 版 社

1 9 7 6 年 · 北 京

内 容 简 介

本书比较全面地介绍了水力学和水文学的基本理论公式及在河流, 水力发电, 给排水及水质保护, 海岸及港湾等方面的应用公式, 并对每一个公式作了扼要的推算和说明, 可供有关科技人员参考。

本书共五篇, 分上下两集出版。上集包括第一篇基本理论, 第二篇河流学, 第三篇水力发电; 下集包括第四篇给排水及水质保护, 第五篇海岸及港湾。

水力公式集

下 集

(1971年修订版)

日本土木学会编

铁道部科学研究院水工水文研究室译

人民铁道出版社出版

(北京市东单三条14号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 14.25 字数: 347 千

1976年12月第1版

1976年12月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—16,000册 定价(科三): 1.15元

译 者 说 明

在当前我国社会主义革命和社会主义建设蓬勃发展的大好形势下，水力学这一门科学在国民经济各部门中的应用日益扩大。为此，我们遵照毛主席“洋为中用”的教导，翻译出版这本《水力公式集》，供有关方面参考。

在译文中略去了原著的参考文献部分，但仍保留了参考文献角注，读者需要时，可根据角注查阅原著。

由于我们的水平不高，译文可能有不少错误，希望读者批评、指正。

在翻译过程中，水电部情报室、华东水利学院、水电部水利电力科学研究所水利室、交通部水运规划设计院等单位的几位同志，在百忙中帮我们校审了一部分译稿，特在此表示感谢。

目 录

第四篇 给排水及水质保护

1	地下水	1
1.1	渗透系数	1
1.2	稳定水井的水力计算	3
1.3	非稳定水井的水力计算	6
1.4	地下水有地面补给的水井	8
1.5	接近含水层边界的水井	11
1.6	井群	12
1.7	集水暗渠的水力计算	12
1.8	人工地下水的水力计算	13
2	管道和明渠	14
2.1	平均流速公式	14
2.2	水力特性曲线	21
2.3	摩擦损失以外的水头损失	22
2.4	各种水阀的水头损失	23
2.5	其它附属建筑物的水力计算	25
2.6	管内水压	28
2.7	配水管的漏水量	29
2.8	管网计算法	29
3	流量计和水泵	33
3.1	流量计	33
3.2	水泵	39
3.3	鼓风机	43
3.4	搅拌机	43
4	水的净化	45
4.1	沉降速度	45
4.2	沉淀池	49
4.3	絮状沉淀物的形成	55
4.4	用砂过滤	59
4.5	集水排水装置	61
5	市区降雨径流量	64
5.1	短历时暴雨	64
5.2	径流量分析	65
5.3	径流量推算	67

5.4	调蓄池	73
6	污水处理	74
6.1	喷洒过滤池的水力计算及氧的移动	74
6.2	反应槽内的混合	75
6.3	充气引起的氧气移动	78
7	污泥	81
7.1	管内的污泥流动	81
7.2	污泥的管道输送	82
7.3	污泥的脱水	85
7.4	污泥的热交换	87
8	水体的水质分布	90
8.1	水质方程式	90
8.2	稳定状态的水质分布	91
8.3	再生气系数	91
8.4	河流中的扩散	92
8.5	湖沼的流动	94
8.6	感潮河流中的混合和扩散	94
8.7	感潮河段的氧气不足曲线	97
8.8	海岸附近的扩散	99

第五篇 海岸及港湾

1	风浪的形成、成长和传播	102
1.1	风浪的统计性质	102
1.2	风浪的形成、成长和传播	107
2	波浪的变形	116
2.1	浅水地区波浪变形	116
2.2	折射	121
2.3	绕射	124
2.4	反射	128
2.5	破碎波	130
2.6	因水流引起的波浪变形	133
3	波压力和波浪爬高	134
3.1	立波的波压力	134
3.2	破碎波的波压力	136
3.3	波浪破碎后的波压力	139
3.4	不规则波的波压力	141
3.5	浮托力	141
3.6	波力作用下抛石斜面的稳定性	142
3.7	作用于水中物体和水面上物体的波力	143
3.8	波浪的爬高	148

3.9	越堤波量	155
4	漂砂	157
4.1	海滩的形状	157
4.2	海底沉积物和地形的关系	158
4.3	近岸流系	160
4.4	漂砂运动	162
4.5	建筑物附近的地形变化	169
4.6	河口处理	170
5	潮汐、潮流与其他水流	171
5.1	潮汐	171
5.2	湾和湖的振动	176
5.3	长周期波	180
5.4	潮流	181
5.5	漂流	182
5.6	坡度流	184
5.7	上升流	184
5.8	海流	184
5.9	在沿岸海洋上水流的结构	185
6	海啸与风暴潮	186
6.1	海啸	186
6.2	风暴潮	189
7	河口异重流和海岸地下水	192
7.1	河口异重流概述	192
7.2	河口二层流(弱混合型异重流)	193
7.3	混合型异重流	198
7.4	河口区的循环结构	201
7.5	海岸的地下水	205
索引		208
数表		216

第四篇 给排水及水质保护

1. 地下水

1.1 渗透系数

〔说明〕地下水流动，在通常的情况下服从Darcy定律：

$$Q = k A \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

式中 Q ——流量 (cm^3/sec)； A ——砂层断面面积 (cm^2)； Δh ——通过砂层厚 Δl 时的损失水头 (cm)； Δl ——砂层厚度 (cm)； k ——渗透系数 (cm/sec)。

根据Darcy定律分析地下水流时，作为基本数值，必须知道渗透系数。渗透系数的概略值如表1.1所列。

表1.1

k (cm/sec)	10^2	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
土壤的种类	干净的砾石		干净的砂砾		干净的砂石	非常细的砂，淤泥等					无透水性 的土，粘土等	

空隙率大，渗透系数也大。空隙率粗砂中为40%，中砂中为41~48%，细砂中为44~49%，砂质壤土为50~54%左右。在大小颗粒混合的场合，由于小颗粒填充大颗粒的空隙，因此，空隙率较均匀颗粒时为小。至于粘土类空隙率虽大，但由于颗粒间保持着水分，因流动性小，故渗透系数变小。对渗流起着有效作用的空间用有效空隙率来表示。有效空隙率是由空隙率减去泥砂含水率之值。有效空隙率的实例如表1.2所示。

表1.2

地 层	空 隙 率 (%)	含 水 率 (%)	有效空隙率 (%)	地 层	空 隙 率 (%)	含 水 率 (%)	有效空隙率 (%)
冲积砾石层	35	10	15	洪积砂砾层	30	10~15	15~20
冲积细砾石层	35	20	15	洪积砂层	35~40	5~10	30
冲积砂层	30~35	10~15	20	洪积壤土层	50~70	30~50	20
冲积泥质粘土层	45~50	30	15~20	洪积泥层粘土层	50~70	45~60	5~10

渗透系数的测定方法有室内法和野外法。室内法有根据筛分试验定出粒径级配采用实验公式的间接法和使用渗透仪的直接法。野外法有用示踪剂测定地下水真实流速的方法和抽水试验的方法。

(A) 实验公式

参照第4.4节 (B) (1) 冲洗砂层的损失水头一项。

〔说明〕从土壤粒径级配、空隙率和流体性质求算渗透系数的公式很多，但多数与实测值不符，只可用来估算概略值。另外，快速砂过滤中损失水头也可用同样的公式，可是也有

和天然土壤的状态不同的場合。可采用以下一些公式作为参考公式。

(1) kozeny公式²⁾

$$k = \frac{Cg}{\nu} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} d_s \quad (\text{cm/sec})$$

式中, ν ——流体的动粘性系数 (cm^2/sec); ε ——空隙率; g ——重力加速度 (cm/sec^2); C ——与砂粒形状有关的常数 $0.003 \sim 0.0055$; d_s ——介于筛孔 d_1 (cm) 和 d_2 (cm) 之间的砂量对全部砂量之比为 Δ_{12} , 而 $d_{12} = \sqrt{d_1 d_2}$, 则 d_s 用 $1/d_s = \Sigma \Delta_{12}/d_{12}$ 来定义。

(2) Zunker公式

$$k = \frac{1.10}{\nu} \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^2 d_e^2 \quad (\text{cm/sec})$$

式中 d_e ——有效粒径, 对应于颗粒级配累积曲线上10%的粒径 (cm)。

(3) Rose-Fair-Hatch公式³⁾

参照第4.4节 (B)

(4) Slichter公式

$$k = \frac{C_s}{\mu} \cdot \frac{1}{x} \cdot d_s^2$$

式中 C_s ——形状系数, 球形为10.2; μ ——粘滞系数 ($\text{g}/\text{cm} \cdot \text{sec}$); x ——空隙率的函数。

ε (%)	30	35	40	45
x	52.5	31.6	20.3	13.7

(5) Terzaghi公式⁴⁾

$$k = (460 \sim 800) \frac{\mu_0}{\mu_t} \left(\frac{\varepsilon - 0.13}{\sqrt{1-\varepsilon}} \right)^2 d_s^2$$

式中 μ_0 ——温度为 10°C 时的粘滞系数 ($\text{g}/\text{cm} \cdot \text{sec}$); μ_t ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的粘滞系数 ($\text{g}/\text{cm} \cdot \text{sec}$), 光滑的球, 系数为800, 有棱角的砂为460。

(6) Hazen公式⁵⁾

$$k = C(0.7 + 0.03t) d_s$$

式中 t ——温度 ($^\circ\text{C}$);

C ——50~150, 通常为116。

(B) 室内法

(1) 固定水位法 (参照图1.1)

$$k = \frac{Ql}{Ah} \quad (1.1)$$

式中 Q ——渗透流量 (cm^3/sec);
 k ——渗透系数 (cm/sec);
 A ——试样断面面积 (cm^2);
 l ——试样的长度 (cm);
 h ——水位差 (cm)。

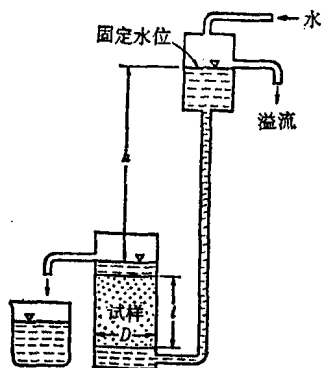


图1.1 固定水位法

〔说明〕1923年Meinzer的方法曾用于砂和砾石等渗透系数大的试样的测定。使水通过度和断面积为已知的试样，观察其上下水位差。注意不要让空气进入，并留意装砂的方法。因本法和变更水位法所得数值与实际出入相当大，只可考虑作为参考值。

(2) 变更水位法 (参照图1.2)

$$k = 2.3 \frac{d^2}{D^2} \frac{l}{t} \log_{10} \frac{h_0}{h} \quad (1.2)$$

式中 D —— 试样筒的直径 (cm)；

d —— 水位计的直径 (cm)；

l —— 试样的长度 (cm)；

t —— 水流动的时间 (sec)；

h_0 —— 水位计的初始水位 (cm)；

h —— t 秒后水位计的水位 (cm)。

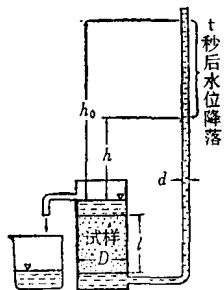


图1.2 变更水位法

〔说明〕这是1933年Theis提出的方法，用于测定渗透系数小的细颗粒泥砂。

(C) 追踪法

〔说明〕如把某一物质投入上游水井中，而在下游水井检出，那末，根据这段距离和流下来的时间就能测定地下水的实际流速。而地下水的表观流速则由 (实际流速) × (有效空隙率) 给定，因此，如已知地下水测压管压力坡和有效空隙率，用下式就能计算渗透系数。

$$k = \frac{\epsilon_e v_0}{i}$$

式中 ϵ_e —— 泥砂的有效空隙率； v_0 —— 实际流速 (cm/sec)； i —— 测压管压力坡 ($\Delta h / \Delta l$)。

示踪剂可用荧光染料 (荧光素Fluorescein, 荧光素钠Uranin等)、食盐、放射性同位素 (超重氢等)。由于地下水流速迟缓，故测定需要相当长的时间。同时，由于地下水水面有扰动，故施测必须慎重。据说一般有给出过大数值的倾向。

(D) 抽水试验

〔说明〕水井的抽水量公式有各种型式。如已知抽水量、地下水位降落值和含水层的状态，就可反求含水层的渗透系数。离试验井不同距离处设置2个以上观测井，如以试验井内的水位为基准，因水井周围的水流紊乱或井壁的水头损失而出现过大的水位降落则不好用。故用靠近试验井地点的观测井为好。关于计算方法，计有适用于长时间抽水以达到地下水位平衡状态的平衡方程式、从抽水时间与地下水位的不稳定关系进行推算的不平衡方程式、停止抽水观测地下水位复原的复原方程式和以灌水替代抽水从而观测水位的注水法等等，其公式可参照第1.2、第1.3等节。

1.2 稳定水井的水力计算

(A) 有压地下水的水井

(1) 水井穿透含水层的情况 (参照图1.3)

$$Q = \frac{2\pi kb(H - h_0)}{2.3 \log_{10}(R/r_0)} \quad (1.3)$$

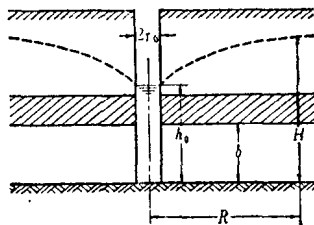


图 1.3

式中 Q ——产水量 (m^3/min)； k ——渗透系数 (m/min)； H ——从含水层底面到初见地下水位的高度 (m)； r_0 ——井的半径 (m)； b ——含水层厚度 (m)； R ——影响半径 (m)； h_0 ——井内水深 (m)。

〔说明〕此式适用于井底到达含水层下不透水层的场合。因水井周围的流速变大，Darcy公式有不适用的情况，而且还有水井的过滤损失，因此水井的实际水位更低。如井的直径很大，此式大体上尚能适用。因假定比 R 更远的地方不产生水位下降， R 的值是不明确的，多数取 r_0 的3000~5000倍或者500米左右。但因 R 是出现在公式(1.3)的对数中，故对 Q 值的影响较小，多数是凭经验决定的。

在设置观测井的试验井中抽水，求其渗透系数时，可采用下式（参照图1.4），

$$k = \frac{0.366Q \log_{10}(r_2/r_1)}{b(s_1 - s_2)}$$

式中 r_1 、 r_2 ——由水井到观测井的距离； s_1 、 s_2 ——各观测井的水位降落（单位为 $\text{m} \cdot \text{min}$ ）

此式一般称为Thiem平衡公式。

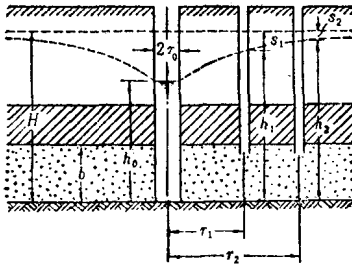


图 1.4

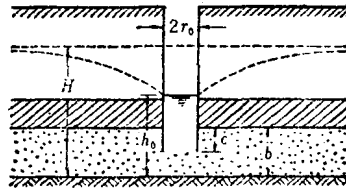


图 1.5

在有地下水流的抽水试验中，要调查地下水的流向，并以试验井为中心在上下游对称的位置分别设置距离不等的2个观测井，观测其平衡状态时水位，按照下式算出渗透系数。此式称为修正平衡公式。

$$k = \frac{2.93Q \log_{10}(r_2/r_1)}{M(s_{1u} + s_{1d} - s_{2u} - s_{2d})}$$

式中 r_1 ——从试验井到近处上下游观测井的距离； r_2 ——从试验井到远处上下游观测井的距离； s_{1u} ——上游 r_1 处的水位降落； s_{1d} ——下游 r_1 处的水位降落； s_{2u} ——上游 r_2 处的水位降落； s_{2d} ——下游 r_2 处的水位降落； $M=4b$ （单位为 $\text{m} \cdot \text{min}$ ）。

（2）水井不穿透含水层的场合（参照图1.5）

1) de Glee公式⁷⁾

$$Q = \frac{2\pi k(H - h_0)}{\frac{2.3}{c} \log_{10} \frac{\pi c}{2r_0} + \frac{0.1}{b} + \frac{2.3}{b} \log_{10} \frac{R}{2b}} \quad (1.4)$$

式中 c ——穿进含水层的井壁长度，适用范围： $1.3c \leq b$ ， $c/2r_0 \geq 5$ 。

2) Kozeny公式⁸⁾

$$Q = \frac{2\pi k b c' (H - h_0)}{2.3 \log_{10}(R/r_0)} \left(1 + 7 \sqrt{\frac{r_0}{2b c'}} \cos \frac{\pi c'}{2} \right) \quad (1.5)$$

式中 $c' = c/b$

〔说明〕水井随穿入率而引起产水量的变化如图1.6所示。本图是根据 de Glee 公式绘制的⁹⁾。

图中 Q —— 穿透水井的产水量； Q_p —— 未穿透水井的产水量。

(E) 地下水保持自由水面的水井

(1) 井底到达不透水层的场合 (参照图 1.7)

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - h_0^2)}{2.3 \log_{10} (R/r_0)} \quad (1.6)$$

式中 Q —— 产水量 (m^3/min)； r_0 —— 井的半径 (m)； h_0 —— 井内水深 (m)； H —— 原始地下水水深 (m)； k —— 渗透系数 (m/min)； R —— 影响半径 (m)。

〔说明〕这是假定水井壁周围水是自由渗透的，地下水流速度的水平分量与地下水面坡度成比例，用垂直断面上的水平速度视为等速的 Dupuit-Forchheimer 的准均匀流推导出来的公式。同时，并认为当 $r > R$ 时，地下水水面不再产生降落。关于 R 值，与有压地下水的场合相同。

抽水试验的平衡公式 (符号与图 1.4 相同)：

$$k = \frac{0.733 Q \log_{10} (r_2/r_1)}{(h_1 + h_2)(s_1 - s_2)}$$

式中 h_1, h_2 —— 观测井的水位。

修正的平衡公式：

$$k = \frac{2.93 Q \log_{10} (r_2/r_1)}{M(s_{1u} + s_{1d} - s_{2u} - s_{2d})}$$

$$M = 4H - (s_{1u} + s_{1d} + s_{2u} + s_{2d})$$

(2) 只从平坦的井底涌水的场合 (参照图 1.8)

$$Q = 4kr_0(H - h_0) \quad (1.7)$$

(3) 只从球形的井底涌水的场合 (参照图 1.9)

$$Q = 2\pi kr_0(H - h_0) \quad (1.8)$$

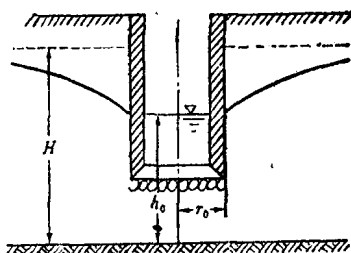


图 1.8

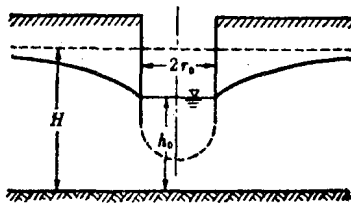


图 1.9

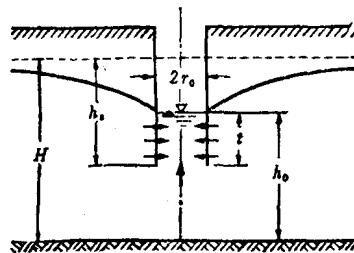


图 1.10

(4) 从井底与井壁进水的场合 (参照图 1.10)

1) de Glee 公式⁷⁾

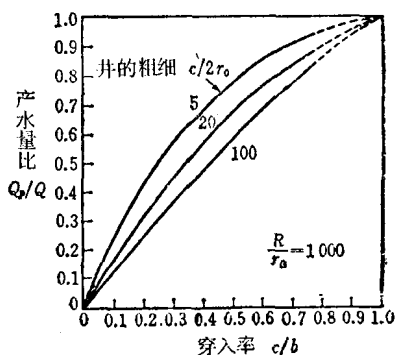


图 1.6

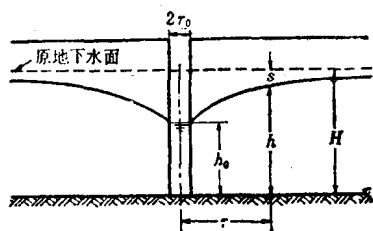


图 1.7

$$Q = \frac{4\pi k(H-h_0)}{\frac{4.6}{h_s} \log_{10} \frac{\pi h_s}{2r_0} + \frac{0.2}{H}} \quad (1.9)$$

2) Forchheimer公式¹⁰⁾

$$Q = \frac{\pi k(H^2 - k_0^2)}{2.3 \log\left(\frac{R}{r_0}\right)} \cdot \sqrt{\frac{t + 0.5r_0}{h_0}} \cdot \sqrt[4]{\frac{2h_0 - t}{h_0}} \quad (1.10)$$

〔说明〕de Glee公式适用于水位降落量比含水层的厚度小的情况。Forchheimer公式在含水层非常厚时给出过小的值。

(C) 有地下水流的情况⁹⁾ (参照图1.11)

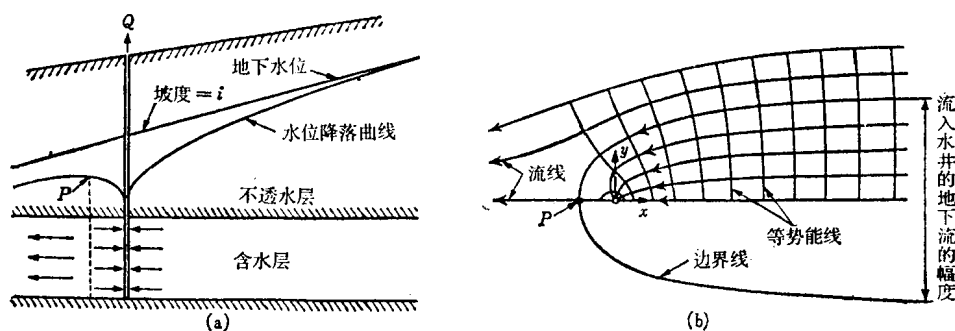


图 1.11

在有均匀地下水流的有压地下水中，流进水井的地下水被分界线所分开。分界线的位置用下式表示：

$$-\frac{y}{x} = \tan\left(\frac{2\pi k b i}{Q} y\right) \quad (1.11a)$$

流进水井的地下水水流在上游侧的宽度为：

$$y = \pm \frac{Q}{2k b i} \quad (1.11b)$$

在井的下游侧，流进水井的分水点为：

$$x = -\frac{Q}{2k b i} \quad (1.11c)$$

式中 x ——以水井为原点，与水流平行的上游侧作为+的坐标； y ——与 x 轴垂直的坐标； i ——地下水的测压管压力坡； b ——含水层的厚度。

〔说明〕具有自由水面的地下水，如果水位降落很小，则可用 H 替换 b 。计算方法参照第一篇基本理论第1.4节。

1.3 非稳定水井的水力计算

(A) 有压地下水的水井，Theis公式¹¹⁾

$$Q = \frac{4\pi T \cdot s}{W(u)} \quad (1.12a)$$

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \quad (1.12b)$$

$$u = r^2 S / 4Tt \quad (1.12c)$$

式中 s ——抽水 t 小时后的水位降落; Q ——抽水量; r ——从水井起算的距离; t ——抽水时间; T ——渗透量系数 $T=kb$; S ——调蓄系数; $W(u)$ —— Wensel 的水井函数; k ——渗透系数; b ——含水层厚度。

〔说明〕在平衡公式中, 抽水时间越长, 影响半径就越大, 从而出现不平衡的矛盾。该式是在假定水从受压缩的泥砂和水中流出的前提下而推导出来的。 S 值在 $0.01 \sim 0.001$ 左右。当然, 该式不能成为平衡状态, 只要没有地下水流, 水位就继续降落。实际上, 因为达到平衡状态, 所以单用本式还不能阐明水井的水力学。

如由抽水试验求出 T 和 S , 就能知道渗透系数 k , 同时, 即可算出在任意时间任意点的水位降落。

Wensel的水井函数 (Wu) 表

表1.3

u	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
$\times 1$	0.219	0.049	0.013	0.0038	0.0011	0.00036	0.00012	0.000038	0.000012
$\times 10^{-1}$	1.82	1.22	0.91	0.70	0.56	0.45	0.37	0.31	0.26
$\times 10^{-2}$	4.04	3.35	2.96	2.68	2.47	2.30	2.15	2.03	1.92
$\times 10^{-3}$	6.33	5.64	5.23	4.95	4.73	4.54	4.39	4.26	4.14
$\times 10^{-4}$	8.63	7.94	7.53	7.25	7.02	6.84	6.69	6.55	6.44
$\times 10^{-5}$	10.94	10.24	9.84	9.55	9.33	9.14	8.99	8.86	8.74
$\times 10^{-6}$	13.24	12.55	12.14	11.85	11.63	11.45	11.29	11.16	11.04
$\times 10^{-7}$	15.54	14.85	14.44	14.15	13.93	13.75	13.60	13.46	13.34
$\times 10^{-8}$	17.84	17.15	16.74	16.46	16.23	16.05	15.90	15.76	15.65
$\times 10^{-9}$	20.15	19.45	19.05	18.76	18.54	18.35	18.20	18.07	17.95
$\times 10^{-10}$	22.45	21.76	21.35	21.06	20.84	20.66	20.55	20.37	20.25
$\times 10^{-11}$	24.75	24.06	23.65	23.36	23.14	22.96	22.81	22.67	22.55
$\times 10^{-12}$	27.05	26.36	25.96	25.67	25.44	25.26	25.11	24.97	24.86
$\times 10^{-13}$	29.36	28.66	28.26	27.97	27.75	27.56	27.41	27.28	27.16
$\times 10^{-14}$	31.66	30.97	30.56	30.27	30.05	29.87	29.71	29.58	29.46
$\times 10^{-15}$	33.96	33.27	32.86	32.58	32.35	32.17	32.02	31.88	31.76

(1) Theis图解法

应用 Wensel 的水井函数表, 取横轴为 u , 取纵轴为 $W(u)$, 在透明的双对数纸上描绘标准曲线。在另一张双对数纸上, 取横轴为 r^2/t , 取纵轴为 s , 把水位降落记录点绘成曲线。将两图重叠并平行移动使 $W(u) \sim u$ 曲线和 $s \sim r^2/t$ 曲线完全重合。读出任意重合点的 r^2/t 、 s 、 u 和 $W(u)$ 的数值并代入 (1.12c) 中求出 T 和 S 。

(2) Jacob方法¹³⁾

当 u 小于 $1/50$ 时, $W(u)$ 展开式的第三项以下各项可忽略不计, 采用以下近似式:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln u) = \frac{2.3}{4\pi} \cdot \frac{Q}{T} \log_{10} \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (1.13)$$

在单对数纸上令纵轴 (普通刻度) 为 s , 令横轴 (对数刻度) 为 t , 把水位降落记录点绘成曲线。当 t 值大时, 点绘点将排成直线。把此直线上 t 的一个对数周期 (例如从刻度 1 到刻度 10) 所对应的 s 差值设为 Δs , 将此直线延长与 $s=0$ 轴的交点的 t 值设为 t_0 , 则

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi \Delta s}, \quad S = \frac{2.25Tt_0}{r^2}$$

从这两式可算出 T 和 S 。

(3) 周文德方法¹⁴⁾

和 Jacob 方法一样, 把水位降落记录在半对数方格纸上点绘曲线, 求对应于 t 的 1 个对数周期的 Δs 。根据下式计算 $F(u)$:

$$F(u) = \frac{s}{\Delta s} \quad (1.14)$$

式中 s —— 在任意时间 t 的水位降落，
从图1.12求 $W(u)$ 和 u ，用 t 和 s 计算 T 和 S 。

(4) 水位恢复公式

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[\int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du - \int_{u'}^\infty \frac{e^{-u'}}{u'} du' \right] \quad (1.15)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}, \quad u' = \frac{r^2 S}{4Tt'}$$

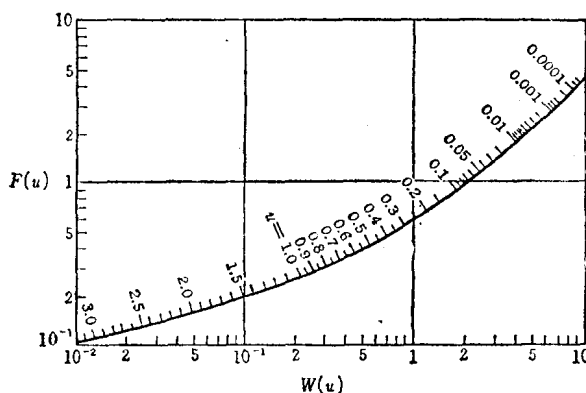


图 1.12

式中 s —— 原水位与恢复水位之差； t —— 从开始抽水算起的历时（从开始到某一恢复水位的时间）； t' —— 抽水停止后的时间。

抽水停止后经过相当的时间如达到 $u' < 1/50$ 时，可用下式计算：

$$T = \frac{2.3}{4\pi s} \log_{10} \left(\frac{t}{t'} \right) \quad (1.16)$$

用此近似水位恢复公式不能计算 S 。

(B) 地下水有自由水面的水井，Theis 公式

$$Q = \frac{4\pi Ts}{W(u)} \quad (1.17)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}, \quad T = kH,$$

〔说明〕适合本式的场合，有以下条件：水位降落要比地下水层的厚度小；要经过一定的抽水时间；此外，调蓄系数 S 须等于有效空隙率。

1.4 地下水有地面补给的水井

在 Theis 公式中，水的产量是用调蓄系数 S 来表示的。当来自被压缩的水和砂层的水量少时，则越抽水，当然水位越下降。在实际的水井中，即便认为 S 值显得大，或几乎没有横向地下水流，也可看到水位降落达到平衡的情况。这些方面如假定从地表或者不透水层得到了补给就很容易说明。而且，完全的不透水层大概是沒有的。所以，由于漏水，假定地下水会受到补给是合理的。

(A) 地下水有自由水面的水井⁹⁾

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - h_0^2) - \frac{1}{2} \pi W (r_0^2 - R^2)}{2.3 \log_{10} (R/r_0)} \quad (1.18)$$

式中 W —— 来自地面的补给量 ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$)； $Q = \pi R^2 W$

〔说明〕这是假定由于均匀降雨等原因使地下水从地面得到补给的算式。并假定沒有从 $r > R$ 范围内的横向补给，地下水位也不会增高。

(B) 有漏水时的有压地下水水井^{15)~18)} (参照图1.13)

$$Q = \frac{4\pi Ts}{W(u, \frac{r}{B})} \quad (1.19a)$$

$$W\left(u, \frac{r}{B}\right) = \int_u^{\infty} \frac{1}{u} e^{-\left(u + \frac{r}{4B^2u}\right)} du \quad (1.19b)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (1.19c)$$

$$\frac{r}{B} = \frac{r}{\sqrt{T/(k'/b')}} \quad (1.19d)$$

式中 k' ——不透水层垂直方向的渗透系数； b' ——不透水层的厚度； B ——漏水常数。

〔说明〕 Jacob和Hantush 假定上面有漏水的不透水层有与水位降落成比例的漏水，从

而导出此公式。同时，假定不透水层以上的地下水位没有变化。 u 和 $W(u, \frac{r}{B})$ 的关系，显示于图1.14上。

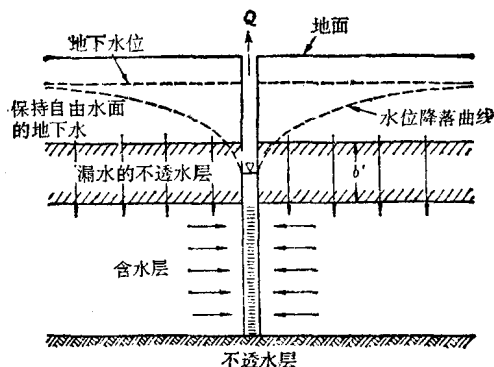


图 1.13

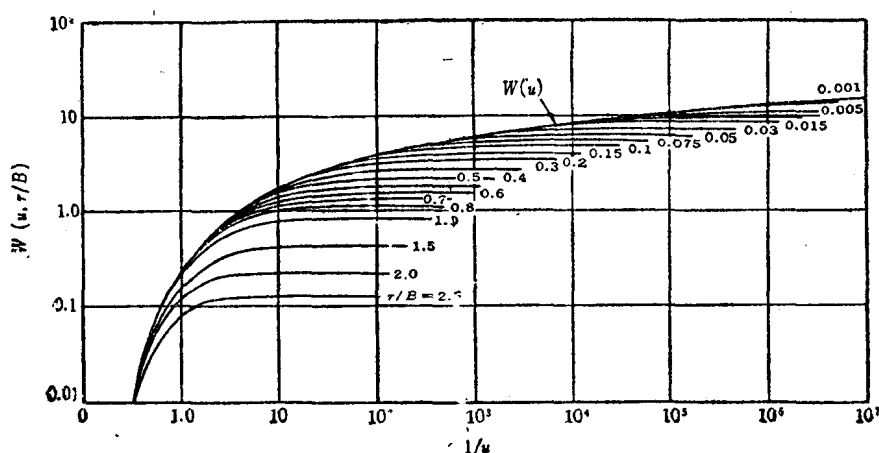


图 1.14

采用此式的计算法，是很复杂的。

1) Hantush图解法¹⁹⁾

与图1.14一样，在双对数纸上，取横轴为抽水时间，纵轴为水位降落，点绘抽水试验值的曲线。重叠在图1.14上，像Theis图解法那样，移动位置使曲线重合一致。由任意点的 W

$(u, \frac{r}{B})$ 、 u 、 s 、 t 及重合曲线上的 r/B

值，求 S 、 T 。抽水开始后不要经过很长时间，曲线 $W(u)$ 就上升，之后，就和含有 r/B 的曲线上的数值重合。当水位降落无变化时，就达到平衡状态，水井的产水量就完全取决于漏水。

2) Hantush 的解法¹⁹⁾ (参照图1.15)

这是比 1) 更精确地计算 S 、 T 和漏水常数的方法。可按照下述程序计算。

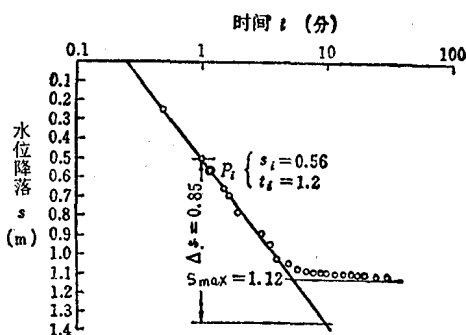


图 1.15¹⁹⁾

在半对数纸上取纵轴为水位降落, 横轴为抽水时间, 点绘抽水试验值的曲线。通过抽水试验取得 $s_{\max}$ 。设屈伏点为 $s_i = \frac{1}{2} s_{\max}$, 时间为 t_i , 则 s_i 点的点绘值的斜率为 $m_i = \Delta s /$ (对数周期)。

从下式和表1.4求 r/B :

$$\frac{2.3s_i}{m_i} = e^{r/B} K_0 \left(\frac{r}{B} \right)$$

式中 $K_0(r/B)$ ——第二类 0 阶的 Bessel 函数。

表1.4¹⁾

x	e^x	$e^x K_0(x)$	x	e^x	$e^x K_0(x)$	x	e^x	$e^x K_0(x)$	x	e^x	$e^x K_0(x)$
0.010	1.0101	4.7687	0.065	1.0672	3.0450	0.300	1.3499	1.8526	0.850	2.3397	1.2265
0.011	1.0111	4.6771	0.066	1.0682	3.0319	0.310	1.3634	1.8304	0.860	2.3632	1.2205
0.012	1.0121	4.5938	0.067	1.0693	3.0189	0.320	1.3771	1.8089	0.870	2.3869	1.2145
0.013	1.0131	4.5173	0.068	1.0704	2.8086	0.330	1.3910	1.7883	0.880	2.4109	1.2029
0.014	1.0141	4.4467	0.069	1.0714	2.7941	0.340	1.4050	1.7685	0.890	2.4351	1.2029
0.015	1.0151	4.3812	0.070	1.0725	2.9814	0.350	1.4191	1.7493	0.900	2.4596	1.1972
0.016	1.0161	4.2514	0.071	1.0736	2.9693	0.360	1.4333	1.7308	0.910	2.4843	1.1916
0.017	1.0171	4.2627	0.072	1.0747	2.9573	0.370	1.4477	1.7129	0.920	2.5093	1.1860
0.018	1.0182	4.2088	0.073	1.0757	2.9455	0.380	1.4623	1.6956	0.930	2.5345	1.1860
0.019	1.0192	4.1588	0.074	1.0768	2.9340	0.390	1.4770	1.6789	0.940	2.5600	1.1722
0.020	1.0202	4.1098	0.075	1.0790	2.9226	0.400	1.4918	1.6627	0.950	2.5857	1.1699
0.021	1.0212	4.0642	0.076	1.0790	2.9113	0.410	1.5068	1.6470	0.960	2.6117	1.1647
0.022	1.0222	4.0207	0.077	1.0800	2.9002	0.420	1.5220	1.6317	0.970	2.6645	1.1595
0.023	1.0233	3.9793	0.078	1.0811	2.0094	0.430	1.5373	1.6169	0.980	2.6912	1.1544
0.024	1.0243	3.9398	0.079	1.0822	2.8786	0.440	1.5527	1.6025	0.990	2.6912	1.1494
0.025	1.0253	3.9019	0.080	1.0833	2.8680	0.450	1.5683	1.5886	1.000	2.7183	1.1445
0.026	1.0253	3.8656	0.081	1.0844	2.8575	0.460	1.5841	1.5750	1.100	3.0042	1.0983
0.027	1.0274	3.8307	0.082	1.0855	2.8472	0.470	1.6000	1.5671	1.200	2.3201	1.0575
0.028	1.0284	3.7972	0.083	1.0865	2.8472	0.480	1.6161	1.5489	1.300	3.6693	1.0210
0.029	1.0294	3.7650	0.084	1.0876	2.8270	0.490	1.6323	1.5363	1.400	4.0552	0.9881
0.030	1.0305	3.7339	0.085	1.0887	2.8171	0.500	1.6487	1.5241	1.500	4.4817	0.9582
0.031	1.0315	3.7039	0.086	1.0898	2.8073	0.510	1.6653	1.5122	1.600	4.9530	0.9309
0.032	1.0325	3.6749	0.087	1.0909	2.7976	0.520	1.6820	1.5006	1.700	5.4739	0.9059
0.033	1.0336	3.6468	0.088	1.0920	2.7881	0.530	1.6989	1.4892	1.800	6.0496	0.8828
0.034	1.0346	3.6196	0.089	1.0931	2.7787	0.540	1.7160	1.4781	1.900	6.6859	0.8614
0.035	1.0356	3.5933	0.090	1.0942	2.7694	0.550	1.7333	1.4673	2.000	7.3891	0.8416
0.036	1.0367	3.5678	0.091	1.0953	2.7602	0.560	1.7507	1.4567	2.100	8.1662	0.8230
0.037	1.0377	3.5430	0.092	1.0964	2.7511	0.570	1.7683	1.4464	2.200	9.0250	0.8057
0.038	1.0387	3.5189	0.093	1.0975	2.7421	0.580	1.7860	1.4363	2.300	9.9742	0.7895
0.039	1.0398	3.4955	0.094	1.0986	2.7333	0.590	1.8040	1.4264	2.400	11.0232	0.7740
0.040	1.0408	3.4727	0.095	1.0997	2.7246	0.600	1.8221	1.4167	2.500	12.1825	0.7596
0.041	1.0419	3.4505	0.096	1.1008	2.7159	0.610	1.8404	1.4073	2.600	13.4637	0.7459
0.042	1.0429	3.4289	0.097	1.1019	2.7159	0.620	1.8589	1.3980	2.700	14.8797	0.7329
0.043	1.0439	3.4079	0.098	1.1030	2.6989	0.630	1.8776	1.3889	2.800	16.1742	0.7206
0.044	1.0458	3.3874	0.099	1.1041	2.2906	0.640	1.8965	1.3800	2.900	18.1742	0.7089
0.045	1.0460	3.3673	0.100	1.1052	2.6823	0.650	1.1955	1.3713	3.000	20.0855	0.6978
0.046	1.0471	3.3478	0.110	1.1163	2.6045	0.660	1.9348	1.3627	3.100	22.1980	0.6871
0.047	1.0482	3.3287	0.120	1.1275	2.5345	0.670	1.9542	1.3543	3.200	24.5325	0.6770
0.048	1.0492	3.3100	0.130	1.1388	2.4707	0.680	1.9739	1.3461	3.300	27.1126	0.6673
0.049	1.0502	3.2918	0.140	1.1503	2.4123	0.690	1.9937	1.3380	3.400	29.9641	0.6580
0.050	1.0513	3.2739	0.150	1.1618	2.3585	0.700	2.0138	1.3301	3.500	33.1155	0.6490
0.051	1.0523	3.2564	0.160	1.1735	2.3585	0.710	2.0340	1.3223	3.600	36.5982	0.6405
0.052	1.0534	3.2393	0.170	1.1853	2.2625	0.720	2.0544	1.3147	3.700	40.4473	0.6322
0.053	1.0544	3.2226	0.180	1.1972	2.2193	0.730	2.0751	1.3072	3.800	44.7012	0.6243
0.054	1.0555	3.2062	0.190	1.2093	2.1788	0.740	2.0959	1.2998	3.900	49.4025	0.6166
0.055	1.0565	3.1901	0.200	1.2214	2.1408	0.750	2.1170	1.2926	4.000	54.5982	0.6093
0.056	1.0576	3.1744	0.210	1.2337	2.1049	0.760	2.1383	1.2855	4.100	60.3403	0.6022
0.057	1.0587	3.1589	0.220	1.2461	2.0710	0.770	2.1598	1.2785	4.200	66.6863	0.5953
0.058	1.0597	3.1437	0.230	1.2586	2.0389	0.780	2.1815	1.2716	4.300	73.6998	0.5887
0.059	1.0608	3.1288	0.240	1.2713	2.0084	0.790	2.2034	1.2649	4.400	81.4509	0.5823
0.060	1.0618	3.1142	0.250	1.2840	1.9793	0.800	2.2255	1.2582	4.500	90.0171	0.5761
0.061	1.0629	3.0999	0.260	1.2969	1.9517	0.810	2.2479	1.2517	4.600	99.4843	0.5701
0.062	1.0640	3.0858	0.270	1.3100	1.9253	0.820	2.2705	1.2452	4.700	109.9472	0.5643
0.063	1.0650	3.0719	0.280	1.3231	1.9000	0.830	2.2933	1.2389	4.800	121.5104	0.5586
0.064	1.0661	3.0584	0.290	1.3364	1.8758	0.840	2.3164	1.2323	4.900	134.2898	0.5531
									5.000	148.4132	0.5478