

抽水试验资料 的分析和评价

G. P. 克鲁斯曼 N. A. 德里德 著

俞 树 森 译

沈 彤 校

地质出版社

抽水试验资料的分析和评价

G.P. 克鲁斯曼 N.A. 德里德 著

俞树森 译 沈彤 校

内 容 提 要

书中比较全面地介绍了抽水试验资料的各种分析方法,包括稳定流和非稳定流,无限分布的含水层和有各种边界的含水层,等等。本书以实用为主,详细列出了各种方法的应用步骤,有的并附有计算实例,第三章和第四章后还有在不同条件下应该选用什么评价方法的一览表。

ANALYSIS AND EVALUATION OF PUMPING TEST DATA

G. P. Kruseman N. A. De Ridder

International Institute for Land

Reclamation and Improvement

Wageningen the Netherlands

1970

抽水试验资料的分析和评价

G. P. 克鲁斯曼 N. A. 德里德 著

俞树森 译 沈彤 校

*

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本: $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张: 7·插页: 7个·字数: 178,000

1980年8月北京第一版·1980年8月北京第一次印刷

印数1—4,940册·定价1.30元

统一书号: 15038·新529

常用符号和单位

- K 含水层的渗透系数^①，米/日
 K' 半透水层的渗透系数，米/日
 D 含水层饱水部分的厚度，米
 D' 半透水围闭层 (Semi-pervious bounding layer) 的饱水部分的厚度，米
 KD 含水层的导水系数
 S 贮水系数
 S 给水度
 S' 半透水层的给水度
 $c \quad \frac{D'}{K'} =$ 半透水层的水力阻力，日
 $L \quad \sqrt{K D c} =$ 含水层的漏水因数，米
 $B \quad \sqrt{\frac{K D}{\alpha S}} =$ 有延迟给水的无压含水层的疏干因数，米
 $\frac{1}{\alpha}$ 博尔顿的延迟指数，日
 β 对每种所用的方法规定的一个水力参数
 i 水力坡度
 h 地下水测压水头，米
 l 测得水头损失所经的长度，米
 s 地下水位降深，米
 Q 流量，米³/日

① 原文为 hydraulic conductivity，直译为水力传导率，因与我们习惯所用的渗透系数定义相同，故译为渗透系数。而美国地质调查所等过去称作渗透系数者，符号为 P ，单位为加仑/日·英尺²。——编者

t 时间, 分或日

r 抽水井到观测孔的距离, 米

r_w 井半径, 米

脚标 i 为映射井

脚标 m 为稳定流

脚标 p 为拐点

序 言

本书拟作为抽水试验资料分析和评价的指南。我们希望它对于从事农业和地下水工程的人们以及这方面的学者来说，将是有用的。

不论是处理大规模的或小规模地下水水文学问题，地质学家和工程师经常面对着这样的问题，即找出含水层和弱透水层水力特性的可靠和有代表性的数据。已经证明，抽水试验是达到此目的的最适合的方法。

近几十年中，流向抽水井中的水流已经得到严密的数学计算。对于各种类型含水层中稳定流和非稳定流状态的解法已有发展，目前，许多研究的主题是多层含水层中瞬态流（transient flow）的问题。所以，这不足为奇，已经越来越有大量的研究流向抽水井中水流的文献可以利用了。

虽然，有的作者已经像对其他一部分事物那样，对这个题目作了概略处理，并在编纂现在所用的大部分普通分析方法方面，过去已经作出了一些成效，但是至今还没有可用的指南，它对发展到现在的各种方法，是用非数学方法处理的。

因此本书的主要目的是：收集和叙述分散在许多技术杂志中的、并且往往是用不同语言写成的抽水试验资料的各種分析方法。不应该认为是代替许多地下水水力学手册。我们力图把材料编排合宜，以便引导使用者通过解析法的难关。我们也尽可能地省略了数学的推导，因为实际工作者更感兴趣的是在什么时候和如何使用某一方法。本书的使用者仅需要基本的数学和物理基础。大多数公式和分析方法以前都已公开发表过，可从原著中找出推导和证明。本书提出了成功地应用各种方法所需要的不同步骤和程序。

在这样篇幅的一本书内，不可能完全包括所要讨论题目的材料。对大量的方法已作了选择，但所提出的那些包括了实际工作者可能遇到的现场条件中十分广阔的范围，公式一般以其最后形式表示。而在同样的公式用于几种含水层条件的情况下，则难免有所重复。

尽管我们的愿望是在一个短时间内汇总出这个材料，但因其他工作而大大推迟了，而且如果没有国际土地开垦和改良协会负责人范斯塔夫伦（J. M. van Staveren）先生的鼓励，还达不到这个程度。对土地和水管理研究所所长范登堡（van den Berg）博士也要表示我们的感谢，他慷慨地给我们时间来完成原稿，并允许我们使用该所文件中的抽水试验资料，以便举例说明所叙述的分析方法的应用。

特别感谢阿姆斯特丹水厂的负责人提供了休伊斯曼-肯珀曼（Huisman-Kemperman）法的典型曲线。我们也感谢布鲁格曼（G. A. Bruggeman）先生和厄恩斯特（L. F. Ernst）博士答应引用他们未发表的研究报告。

在原稿的准备工作中，土地和水管理研究所和国际土地开垦和改良协会的同事们慷慨地供献了他们的时间和精力。

原稿由瓦赫宁根土地和水管理研究所的韦斯林（J. Wesseling）博士、罗马联合国粮食与农业组织的托马斯（R. G. Thomas）先生、德尔夫特 T. N. O. 地下水服务公司的斯穆尔（P. B. Smoor）博士和海牙（Hague）“里杰克斯沃特斯塔特”（Rijkswaterstaat）水管理和水力研究所的拉特格斯（F. Rutgers）先生审阅过，所有以上的人们在此工作中化了大量的时间并为了改进提供了很多有用的建议。对这些帮助我们致以最大的谢意。

其他作了评论的有德尔夫特的休伊斯曼教授；海牙的桑廷（G. Santing）先生；德尔夫特的沃特（C. Voûte）教授；德尔夫特的沃尔克（A. Volker）教授；格勒诺布尔的埃德尔曼（J. H. Edelman）博士和渥太华（Ottawa）的范埃弗丁吉（R. O.

van Everdingen) 博士。

如果此书有助于促进那些从事农业和地下水工程的人们的工作，那么我们致力于原稿而所化的时间和精力就不曾白化了。

G. P. 克鲁斯曼

N. A. 德里德

目 录

序言

常用符号和单位

绪论	1
----	---

第一章 定义	3
--------	---

1.1 达西定律	3
----------	---

1.2 含水层类型	4
-----------	---

1.2.1 无压含水层	4
-------------	---

1.2.2 承压含水层	5
-------------	---

1.2.3 半承压含水层	5
--------------	---

1.2.4 半无压含水层	5
--------------	---

1.2.5 综述	6
----------	---

1.3 水力特性	6
----------	---

1.3.1 导水率	7
-----------	---

1.3.2 贮水系数和给水度	7
----------------	---

1.3.3 水力阻力	7
------------	---

1.3.4 漏水因数	8
------------	---

1.3.5 疏干因数	8
------------	---

1.4 水流公式的类型	8
-------------	---

1.4.1 稳定流	8
-----------	---

1.4.2 非稳定流	9
------------	---

第二章 抽水试验	10
----------	----

2.1 一般布置	10
----------	----

2.1.1 试验的目的	10
-------------	----

2.1.2 初步研究	11
------------	----

2.1.3 从测井记录估算导水率	12
------------------	----

2.1.4 试验场地的选择	13
---------------	----

3.4 半承压含水层中的非稳定流	71
3.4.1 沃尔顿法	74
3.4.2 汉士什法 I	77
3.4.3 汉士什法 II	81
3.4.4 汉士什法 III	85
3.4.5 评价	88
3.5 半无压含水层和有延迟给水的无压含水层中的非稳定流	89
3.5.1 博尔顿法	92
3.6 无压含水层中的稳定流	101
3.6.1 蒂姆-裘布依法	102
3.7 无压含水层中的非稳定流	103
第四章 抽水试验资料的分析方法 (下)	107
4.1 由一个或多个边界限制的含水层	108
4.1.1 由一个或多个直线补给边界限制的承压或无压含水层中的稳定流	108
4.1.1.1 迪茨法	108
4.1.2 由一个或多个直线补给边界或隔水边界限制的承压和无压含水层中的非稳定流	112
4.1.2.1 斯托尔曼法	112
4.1.2.2 汉士什映射法 (仅对一个补给边界)	116
4.2 各向异性的含水层	122
4.2.1 各向异性的承压或无压含水层中的非稳定流	122
4.2.1.1 汉士什法	122
4.2.1.2 汉士什-托马斯法	126
4.2.2 各向异性半承压含水层中的非稳定流	129
4.2.2.1 汉士什法	129
4.3 楔形含水层	129
4.3.1 在水流方向上厚度为指数变化的承压含水层中的非稳定流	129
4.3.1.1 汉士什法	129
4.4 倾斜的含水层	133

4.4.1 等厚的倾斜的无压含水层中的稳定流	133
4.4.1.1 顶点法	133
4.4.2 等厚的倾斜的无压含水层中的非稳定流	134
4.4.2.1 汉土什法	134
4.5 以变流量抽水的含水层	136
4.5.1 阶梯式抽水	136
4.5.1.1 库珀-雅各布法	136
4.5.2 连续降低抽水流量	138
4.5.2.1 阿伦-斯科特法	138
4.5.2.2 斯顿伯格法	141
4.5.2.3 斯顿伯格的恢复法	143
4.6 局部揭露的含水层	144
4.6.1 局部揭露的承压含水层中的稳定流	145
4.6.1.1 用于局部揭露的休伊斯曼修正法 I	145
4.6.1.2 用于局部揭露的休伊斯曼修正法 II	147
4.6.1.3 用于局部揭露的雅各布修正法	148
4.6.2 在局部揭露的半承压含水层中的稳定流	151
4.6.2.1 休伊斯曼的修正法 I 和 II	151
4.6.3 在局部揭露的无压含水层中的稳定流	151
4.6.3.1 汉土什修正法	151
4.6.4 在局部揭露的承压含水层中的非稳定流	151
4.6.4.1 用于局部揭露的泰斯法的汉土什修正	151
4.6.4.2 用于局部揭露的雅各布法的汉土什修正	154
4.7 由大直径井抽水的含水层	155
4.7.1 在承压含水层中的非稳定流	155
4.7.1.1 帕普多普劳斯-库珀法	155
4.8 双层的半承压含水层	158
4.8.1 稳定流	158
4.8.1.1 休伊斯曼-肯珀曼法	160
4.8.1.2 布鲁格曼法	165
4.8.1.3 其他方法	167
4.9 近似法	168

4.9.1 承压含水层中的稳定流	169
4.9.1.1 洛根法	169
4.9.1.2 戈塞林法	170
4.9.2 无压含水层中的稳定流	171
4.9.2.1 洛根法	171
4.9.3 局部揭露的承压含水层中的稳定流	171
4.9.3.1 赞加法	171
4.9.4 承压含水层中的非稳定流	172
4.9.4.1 赫尔法	172
4.9.5 无压含水层中的非稳定流	174
4.9.5.1 赫尔法	174
4.10 自流井	174
4.10.1 承压含水层中的非稳定流	174
4.10.1.1 雅各布-洛曼法	175
第五章 修正和换算	176
5.1 对外界影响的修正	176
5.1.1 单向性的变化	176
5.1.2 周期性的波动	177
5.1.3 非周期性的有规律波动	179
5.1.4 异常的波动	179
5.2 单位换算	179
参考文献	183
附录	187
I、与 u 和 $1/u$ 值相应的 $W(u)$ 值表	188
II、与 u 值相应的 $W(u)$ 和 $F(u)$ 值表	189
III、 e^x , e^{-x} , $K_0(x)$ 和 $e^x K_0(x)$ 函数表	190
IV、 $W(u, r/L)$ 函数表	198
V、 $W(u_A, r/B)$ 和 $W(u_Y, r/B)$ 函数表	203
VI-A、与 u 和 $1/u$ 值相应的 $W(\beta^2 u)$ 值表	206
VI-B、 $W_R(u, \beta)$ 值表	206
VI-C、 $W_B(u, \beta)$ 值表	206

VII、与 β, u_p 相应的 $W(u_p, \beta)$ 和 $f(\beta)$ 值表	207
VIII、 $\epsilon = f(P, l)$ 值表	209
IX、 $M(u, \beta)$ 值表	210
X、 $F(u_w, \beta)$ 函数表	211
XI、 $uW(u)$ 值表	212

绪 论

近几十年来地下水流问题的数学分析和模拟技术方面有了很大的进步。例如在水资源的开发、地下水盆地的补给、向低凹的围垦地区的渗透水流、灌溉沟渠的渗出、在海岸含水层中潮汐的传导、土地改良的人工排水以及许多其他的情况等，其中大部分复杂程度不同的水流问题现在可用适当的数学方法和模型来解决。然而，用这些方法所获得的成果，其可靠性很大部分取决于公式中所用的含水层 (water-bearing layers) 和弱透水层 (less-permeable strata) 水力特性数值的准确度以及假设适宜的边界条件 (boundary conditions)。当这些数值和边界条件不清时，显然任何地下水流的计算成果将是错误的。

抽水试验是确定含水层和围闭层 (confined beds) 的水力特性的最有用的方法之一。它所提供的成果一般代表较大的面积，比之单个点上的观测要可靠。

在达西和裘布依 (Dupuit) 工作的基础上，1870 年，一个德国科学家阿道夫·蒂姆 (Adolph Thiem) 发表了第一个公式，主张由一个井抽水，在其附近若干个井中观测抽水效果来计算含水层的水力特性。自从一个世纪以前这些经典著作发表以来，流入抽水井的水流已是大量出版物的主题。对于抽水试验资料的分析来说，已经有许多新的或精练的方法可以应用了。

对于抽水试验资料的分析几乎所有的公式是以一定的假设和概括为基础的。含水层的水力计算的错误成果有时归结于公式应用的错误，而错误的实际原因在于现场条件不能满足公式所假设的条件。所以在本书中特别注意各种分析条件的条件和限制。每种解法只在受一定限制的条件下才是有效的。然而在实践中，对理论条件和假设可能发生较大的偏离。人们对每种情况要小心确

定哪一种解法最适合现场所遇到的特殊条件。人们对偏离理论条件的大小也得有个概念。对理论条件的任何偏离将导致计算中的错误。有时所观测的资料在代入公式之前要作修正。

这个指南本身限于颗粒状沉积层 (granular deposits) 中的抽水试验。不包括裂隙岩层 (fractured rocks) 或岩溶区 (Karst areas) 的抽水试验。也不描述确定含水层水力特性的其他方法：例如实验室方法，建立在水均衡 (water balance) 或天然地下水流动态基础上的方法。最后，需要使用数字计算机的分析方法也未包括在内。

有一章专门用于特殊的少有的水流条件下的抽水试验分析。它们在水文地质手册中一般均未谈及，对此我们认为应当作详细的叙述。

主要内容编排如下：

第一章：在自然界中所遇到的各种地下水条件的定义以及影响地下水流的水力特性的定义。

第二章：抽水试验的实际安装和技术程序。

第三章：评价在简单的、水平的、无限含水层中的抽水试验资料时使用的公式和方法，附一些例题说明。

第四章：评价在特殊条件下的抽水试验资料时使用的公式和方法。

第五章：为外界影响而对现场资料所作的修正；单位换算表。

附录：某些函数的数值表。

为了快速确定用何种方法最为有效，在表 15 和 17 中给出了所叙述的所有方法的回顾。

首先建议阅读第一章和第二章，以便熟悉著者所用的术语，并了解我们对抽水试验方法的观点。

对于抽水试验的评价，首先应确定水流条件。第二步是参考第三章和第四章的目录，或者用表 15 或表 17 选择适宜的分析方法。

第一章 定 义

1.1 达 西 定 律

根据达西定律,通过多孔介质 (porous medium) 的流量与水头损失成正比,与水流经过的长度成反比,并和系数 K 成正比。所以达西定律可表示为

$$Q = K i A \text{ 或 } \frac{Q}{A} = v = K i$$

式中 Q 为流量 (米³/日), K 是一个常数 (米/日), i 是水力坡度,即通过距离 l 的水头损失 h , A 是垂直于水流的总断面积 (米²) 和 v 是流速 (米/日)。

在达西流量方程式中系数 K 是个常数,取决于多孔介质和流体的性质。因为这里仅以水而言,所以也称为水力传导率和渗透率^①。既然 K 是单位坡度的影响下通过单位断面积的流量,其单位为长度³/长度² × 时间或长度/时间,但不应与流速混同。

对于各种不同类型物质的水力传导率的一些数值在表 1 中给出。

本书中水力坡度是个无因次参数。这个情况在使用单位换算表 (表 18) 时应加注意。

测压水头是在一个观测孔中一般用海平面表示的水位标高。测压水头的量度为长度,例如用米表示。测压水面是把所有揭露含水层的观测孔中水位上升点连接起来的假想水面 (imaginary surface)。

① 即过去书籍上常用的渗透系数。——译者注

不同物质水力传导率 K 的大小

表 1

物 质	K 米/日
粘 土	10^{-5} — 10^{-7}
粉 砂	10^{-1}
细 砂	10^{-1} — 10
粗 砂	10^0 — 2×10^2
砾 石	10^0 — 10^3 或更大

土中的潜水位 (phreatic level) 或自由水位 (free water table) 规定为地下水的压力高度等于自由大气压。一般来说就是浅钻孔 (shallow bore holes) 和井中的水位。

在以下的篇幅中规定了沉积层 (sediment) 的其他水力特性, 因为本书中到处都用到它们。此外, 不同类型含水层的定义一般不同于地下水流动系统的定义。

1.2 含水层类型

1.2.1 无压含水层

无压含水层 (unconfined aquifer, 图 1) 是只有一部分充水的透水层, 并下伏有相对的不透水层 (relatively impervious layer)。它的上部边界是由处于大气压下的自由水面或潜水位构成

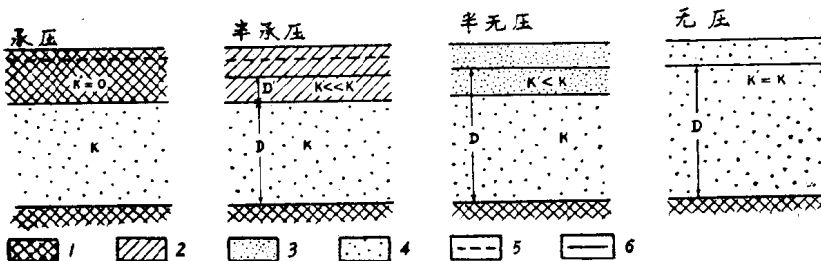


图 1 在不同类型的含水层中 K 和 K' 之间的关系

1—不透水层; 2—半透水层; 3—细颗粒层; 4—含水层; 5—测压水面;
6—潜水面