

抽水试验 原理与参数测定

陈雨孙 颜明志

PRINCIPLE OF
PUMPING TEST
AND
PARAMETRIC
DETERMINATION

水利电力出版社

抽水试验

原理与参数测定

陈雨孙 颜明志

水利电力出版社

内 容 提 要

本书着重阐述了在降水下渗补给、地下径流补给和河流补给条件下的非稳定流抽水试验与稳定流抽水试验的基本原理,提出了表达抽水降落漏斗的通式,指出了裘布衣公式与泰斯公式的适用范围,概述了抽水试验井孔的合理设计与布置,以及准确计算水文地质参数的方法与示例。该书既有理论,又有方法,甚为实用,可供水利电力、城乡环保、地质冶金、机械轻纺、石油化工、铁道交通、农业灌溉等部门从事于水文地质勘察、施工、设计人员和有关院校师生的参考。

抽水试验原理与参数测定

陈雨孙 颜明志

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

轻工业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 8 印张 174千字

1985年8月第一版 1985年8月北京第一次印刷

印数0001—5410册 定价2.15元

书号 15143·5699

前 言

用抽水试验的方法来查明水文地质特性和确定参数，是水文地质勘察重要的环节和主要的手段。建国以来，虽然在这方面已有很大的进展，但是，至今在实际工作中也还普遍存在着水文地质参数测不准的问题。针对这一问题，我们试图通过对抽水试验的理论原理和参数计算方法的探讨，以期有助于参数的准确测定。

本书承蒙朱益春工程师提供宝贵的修改意见，书中引用了一些单位和个人的资料，在此一并致谢。鉴于我们的水平所限，书中难免有疏误，请读者批评指正。

作者 1984年8月15日

目 录

前言

概述	1
----------	---

第一章 稳定流抽水试验原理	7
---------------------	---

第一节 稳定流抽水经典公式—裘布衣公式介绍	7
-----------------------------	---

第二节 降水下渗补给的无界含水层稳定流抽水	15
-----------------------------	----

第三节 地下径流补给的无界含水层稳定流抽水	31
-----------------------------	----

第四节 河流补给的无界含水层稳定流抽水	47
---------------------------	----

第五节 有补给的含水层抽水通式	55
-----------------------	----

第六节 井内竖向水流的水头损失、井的非完整性、三维流、紊流对稳定流抽水试验的影响	70
--	----

第七节 裘布衣公式的适用范围	83
----------------------	----

第八节 双层介质（非均质）含水层稳定流抽水	84
-----------------------------	----

第二章 非稳定流抽水试验原理	91
----------------------	----

第一节 无补给的无界含水层非稳定流抽水	91
---------------------------	----

第二节 有越流补给的无界含水层非稳定流抽水	103
-----------------------------	-----

第三节 有补给的有界含水层非稳定流抽水	128
---------------------------	-----

第四节 恢复水位公式	133
------------------	-----

第五节 井内竖向水流的水头损失、井的非完整性、三维流、紊流对非稳定流抽水试验的影响	135
---	-----

第三章 多（隔）层含水层抽水试验原理	144
--------------------------	-----

第一节 中间含水层抽水	144
-------------------	-----

第二节 上层含水层抽水	148
-------------------	-----

第三节 下层含水层抽水	151
-------------------	-----

第四节 上、中、下三个含水层同时抽水	154
--------------------------	-----

第四章	抽水试验设计	158
第一节	抽水井适宜半径的确定	158
第二节	观测孔的布置方法	163
第三节	抽水试验延续时间的确定方法	175
第四节	抽水试验测试	179
第五章	参数计算	182
第一节	计算方法	182
第二节	参数计算	188
第三节	参数计算实例	200
附表	e^x , $K_0(x)$, $e^x K_0(x)$, $-E_i(-x)$ 和 $-E_i(-x)e^x$ 的函数值	239
参考文献		246

概 述

在水利电力工程建设中的坝（闸）基渗透稳定、绕坝渗漏、库区浸没坍岸、基坑施工排水和火力发电厂供水；城乡供水和环境保护用水；地质、矿山排水；冶炼、化工、轻纺供水；油田注水；农业排灌等等，都要求进行水文地质勘测（察），以便了解含水层的特性和测定水文地质（含水层）参数——影响半径（ R ）、渗透系数（ k ）或导水系数（ T ）、释水系数（ S ）或给水度（ μ ）、导压系数（ a ）等。这就必须用井（孔）进行抽水试验，造成一个人工降深场即降落漏斗，以揭示抽水流量（ Q ）、降深（ s ）在时（ t ）空（径向距离 r 、含水层厚度 M 、井孔半径 r_w ）上的变化规律。

就抽水试验的类型而言，按其与地下水的成因类型的关系，可分为承压井抽水、潜水井抽水；按其与观测孔的关系，可分为单井（不带观测孔）抽水、多孔（带观测孔）抽水；按其与井孔的完整程度，可分为完整井抽水、非完整井抽水；按其与含水层的关系，可分为分层（或分段）抽水、混合抽水；按其与 Q 、 s 的关系，可分为常流量抽水、变流量（定降深）抽水；按其与地下水流态的关系，可分为稳定流抽水、非稳定流抽水试验等等。

而用来阐明抽水试验及其降深场变化规律的是稳定流理论和非稳定流理论。这两种基本理论已有很大的进展〔1〕〔2〕〔3〕。

从国外的情况来看，在稳定流理论方面：1863年，裘布衣（J. Dupuit）首先提出了稳定流抽水公式，即著名的裘

布衣公式，奠定了稳定流的理论基础。1870年，A.蒂姆(A. Thiem)发展了井流方程，并最先解释了裘布衣公式中的 R ，称之为影响半径。1886年，福希汉默(Ph.Forschheimer)引入了保角概念、流网结构、映射方法和复变函数理论，并首先提出了傍河抽水公式。1906年，G.蒂姆(G.Thiem)发展了一种用带观测孔的单井抽水试验资料来测定含水层参数的野外方法。1930年，格里(De Glee)提出了越流承压含水层稳定流抽水公式，从而形成了比较完整的裘布衣-蒂姆-福希汉默稳定流抽水试验的理论和方法。在30年代之后，稳定流抽水试验理论几乎没有什么进展了。

在非稳定流理论方面：1935年，泰斯(C.V.Theis)首先提出了非稳定流抽水公式，即著名的泰斯公式，奠定了非稳定流的理论基础。1940年，雅各布(C.E.Jacob)提出承压含水层弹性释水理论。1954年，博尔顿(N.S.Boulton)提出了重力疏干给水理论，并发表了潜水非稳定流第一公式。1955年，汉图什(M.S.Hanstush)和雅各布提出了越流承压含水层的越流理论，进一步发展了非稳定流理论。1959年，汉图什提出了定降深非稳定流抽水公式。1961年，汉图什提出了非完整井非稳定流抽水公式。1963年，博尔顿提出了滞后给水理论，并发表了潜水非稳定流第二公式，进一步改进了潜水非稳定流理论。1964年，汉图什提出了考虑弱透水层释放水的非稳定流抽水公式。1967年，威瑟斯庞(P.A.Witherspoon)提出了具有非完整观测孔的、抽水影响未达弱透水层顶板的稳定流抽水公式。1967年，帕帕多布洛斯(I.S.Papadobulos)首先提出了考虑抽水井容量(即井筒存水量)的非稳定流抽水公式。1969年，纽曼(S.P. Neuman)和威瑟斯庞提出了双层承压含水层、越流含水层

水流通用理论。1971年，又提出了用有限元法解自由水面非稳定流分析理论^[4]。1971年，纳罗斯基 (M.I.Nawroski) 把泰斯的标准曲线量板法、雅可布的半对数直线法、周文德 (1952) 的切线法和汉图什的越流标准曲线法进行了试验对比^[5]。其结果表明，用这四种方法算得的参数 (导水系数 T 和释水系数 S 值) 相当可靠，其误差在9%以内。1972年，纽曼提出了潜水含水层的延滞反应理论^[6]。1972年又提出了越流多层含水层系统水力特性的野外测定方法^[7]。1974年，赖与陈吾世 (R.Y.S.Lai and Chen-Wusu) 提出了考虑抽水井容量的越流完整井非稳定流抽水公式^[8]。同年，斯特列特索瓦 (T.D.Streltsova) 提出了潜水非完整井非稳定流抽水公式^[9]。1975年，纽曼提出了潜水含水层重力延滞反应理论及其抽水试验分析方法^[10]，又进一步发展了潜水含水层的非稳定流理论。1976年，博尔顿和斯特列特索瓦提出了考虑抽水井容量的非完整潜水井非稳定流抽水公式^[11]。从而逐渐形成了泰斯-博尔顿-汉图什-纽曼的非稳定流抽水试验的理论与方法。

从我国的情况来看，虽然凿井取水是世界上最早的国家之一，但是，用抽水试验的方法来测定参数那还是自1949年建国以来的事。在50年代初期，主要是从苏联引进稳定流抽水试验的理论、方法、规程等。但是，随着水文地质勘察的广泛深入开展，发现所引进的方法不能完全解决生产中出现的问题。为此，我国的水文地质工作者作出了积极的努力，不断地对抽水试验进行探讨和实践。

1957年，常士骝在生产实践中发现，抽水井滤水管底的水头与管顶的不一样，即后者高于前者。于是，他提出了用积分方法求得滤水管内水头降的变化及其计算降深的公

式^[12]。

1958年，张有龄对稳（定）流与不（非）稳流抽水试验进行了理论分析^[13]，他最早引入非稳定流抽水试验的理论。

1963~1966年，冶金工业部前勘察总公司研究室刘光尧曾在北京南苑建立抽水试验场，同时进行了野外多孔抽水试验与室内模型实验，并对稳定流和非稳定流抽水试验做了对比，取得了大量的、有价值的试验资料。另外，还证实了因滤水管内流速变化而引起的水头损失，这对含水层中的地下水流起着控制作用；也还证实了福希汉默的紊流规律；同时提出了正确运用裘布衣公式的理论见解。

与此同时，原建筑工程部综合勘察院、西北分院，进行咸阳纺织厂水源地的稳定流多孔抽水和非稳定流抽水试验研究，对抽水试验的基本原理和参数计算方法进行了探讨，并导出了有垂直方向和水平方向补给的抽水公式。

70年代以来，水电、地质、煤炭和石油等部门的有关单位，例如，长江流域规划办公室在鸭河口、原东北电力设计院在元宝山；河南省地质局在商邱；山西省地质局在大同；西安煤炭地质勘探研究所在峰峰；大庆油田指挥部在大庆，华北油田指挥部在任邱等地，都进行过大量的抽水（试采）试验与研究，积累了丰富的资料 and 实践经验。在这期间，陈雨孙等提出了引用补给半径(R_v)的概念^[14]，它等价于裘布衣的影响半径(R)。若以 R_v 置换 R ，可使裘布衣公式更广泛地应用于实际含水层，显示出 R_v 的实用性。

由此可见，在稳定流方面，国外自30年代之后几乎不见进展；但继而兴起的是非稳定流，形成了完整的、系统的、严密的非稳定流抽水试验理论和方法，都用标准曲线簇来描绘含水层、弱透水层、井的完整程度、抽水延续时间与降深

的关系。迄今，虽然在潜水井的某些方面（例如，公式只能适用于小的降深，潜水层的各向异性及延迟释水、渗流的垂直分速等）尚不十分完善，而且又有争论。但是，从事于实际工作的水文地质人员却不能等待在理论争议有定论之后才对分析、计算方法进行选择。所以，沃尔顿（W.C. Walton）全面地综述了〔15〕〔16〕抽水理论和参数计算方法，并把大都是在50~70年代导出的公式及方法，推荐给水文地质工作者，以便解决当今的实际问题。此外，在抽水试验的数据分析和参数计算方法方面，几乎都是采用图表法，即用标准曲线图配合相应的函数表，为参数的计算提供了方便。不过，从70年代以来，电子计算机和带程序袖珍计算器已用于抽水试验求解参数。这就可以更快速地、更方便地、更精确地计算参数。不能不说，这是在抽水试验计算技术方面的一大进展；而我国虽然对抽水试验理论的探讨稍晚，但是，在某些方面也有一定的进展，也都不同程度地充实了抽水试验的理论。

尽管如此，然而前人对降落漏斗很少研究。通常，只考虑降落漏斗的界限——影响半径。这反映在30年代以前各家所提出的计算影响半径的经验公式和理论公式，之后却极少再看到有关这方面的文章；而对于降落漏斗的性质、动态、补给等方面的研究，至今仍涉及甚少。笔者认为，这些问题乃是抽水试验测定参数的理论依据，不研究清楚就不可能正确测定参数。正像多年来生产实践所表明的，用抽水试验来测定参数还存在着许多实际问题：诸如，抽水井的口径多大合适；测定参数用大流量抽水试验，还是用小流量的抽水试验，以何者为好；观测孔需要不需要和如何合理布置；抽水的延长时间多长合适；滤水管内、外的水头损失要不要考虑和怎样考虑；采用不同的公式算得的参数各不相同；用稳定

流和非稳定流求得的参数相差很大；用单孔和多孔得出的参数也迥然而异；用完整的和非完整井抽水算出的参数差别悬殊，等等。归结到一点，就是参数测不准。之所以如此，主要的是对抽水试验的原理没有充分认识。而用抽水试验的方法来测定参数的基础是单井抽水公式。如果单井抽水公式不能正确地反映抽水时所形成的降落漏斗的内部规律，那么即便抽水试验所得的原始数据很准确，但代入公式计算也不可能获得正确的结果。

在实际工作中，过去经常使用的是稳定流的裘布衣公式和非稳定流的泰斯公式。可是，由于这两个公式都受到推导前提的一系列假定的限制，即后者完全不考虑补给，而前者考虑的却是圆柱侧面的常水头补给。这些都和实际情况出入太大。所以，就会带来公式的误差和使用上的局限性。

因此，本书提出的单井抽水公式，着重考虑地下水的补给来源这一主导因素，即从比较常见的、比较主要的补给方式——降水下渗补给（垂向）、地下径流补给（侧向）和河流补给的等三种类型出发，最后得出它们的抽水通式，试图在回答上文所提及的在生产实践中存在的问题上能有所前进。

第一章 稳定流抽水试验原理

第一节 稳定流抽水经典公式一

裘布衣公式介绍

一、裘布衣公式的由来

稳定流抽水公式首先是由法国水力学家裘布衣于1863年提出的,是按图 1-1-1 所示的模型由潜水推导出来的。这个公式至今还是人们在计算参数、潜水井水位和流量时所常用。而在推导这个公式时,为简化复杂的潜水流而作的假定,即裘布衣假定至今仍是研究潜水流的一个有力的工具。因此,对该公式的由来作一介绍是很有必要的。

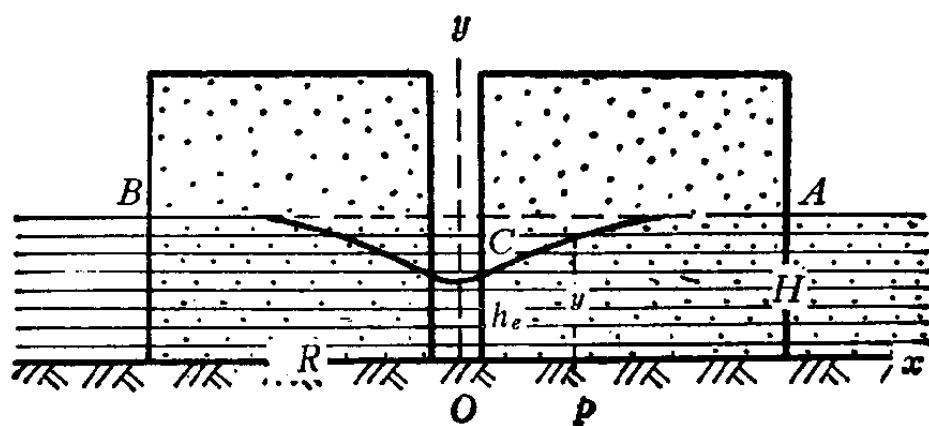


图 1-1-1 裘布衣稳定流抽水试验模型^[17]

裘布衣在推导他的公式时,他所依据的是水力学家普龙纳 (de Prony) 的管渠水力学公式:

$$i = \frac{\lambda}{\omega} (\alpha v + \beta v^2) \quad (1-1-1)$$

式中

i —— 渠底倾角的正弦。在管渠断面不变时, 该倾角应与水面坡度相等;

χ —— 水流的截面积;

ω —— 湿周;

v —— 流速;

α 、 β —— 取决于界面糙度的系数。

裘布衣把含水层假想为无数微细管渠的集合, 其中任一根管渠中的流速和水力坡度的关系均可用图 1-1-2 表示。继而又假定在一垂直截面 (图 1-1-2 中垂直于 x 轴的虚线) 内这些微细渠道均处于相同条件下, 故在该截面内任一孔隙, 即任一微细渠道的水力坡度及流速均相同。由此引伸出式 (1-

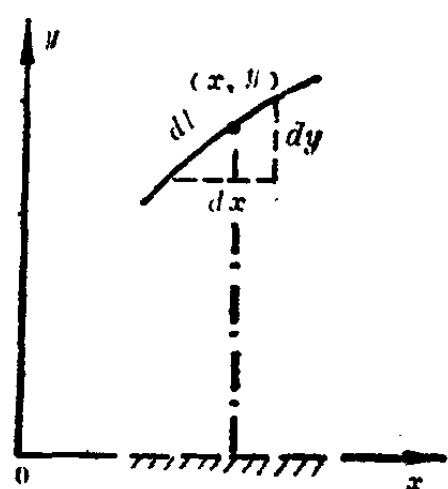


图 1-1-2 裘布衣含水层
流速与水力坡度的关系

1-1) 中的 i 、 v , 可以代表整个垂直截面上任一点水力坡度及流速。再则, 在地下水流速很小的前提下, 或略去式 (1-1-1) 中的二次方项 βv^2 , 即:

$$i = \eta v, \text{ 而 } \eta = \frac{\chi}{\omega} \alpha \quad (1-1-2)$$

此式适与达西定律相符合。

裘布衣又认为, 潜水层的底板是水平的。因此, 式 (1-1-1) 中的倾角应该用潜水面代替, 而潜水面倾角的正弦就是水力坡度, 也就是式 (1-1-1)、(1-1-2) 中的 i 。但由于潜水面的倾角一般很小, 所以其正弦也可以用正切来代替。于是式 (1-1-2) 可改写成:

$$-\frac{dy}{dx} = \eta v$$

还设流过单位宽度的垂直截面的流量为 q ，而它与 v 有如下的关系：

$$v = \frac{q}{\varepsilon y}$$

其中之 ε 为含水层的孔隙率。另又令 $\eta' = \eta/\varepsilon$ ，则：

$$-\frac{dy}{dx} = \eta' \frac{q}{y} \quad (1-1-3)$$

式 (1-1-2)、(1-1-3) 是裘布衣公式推导的基础。构成这基础的假定条件概括起来就是：

- (1) 在垂直截面中不同深度各点的水力坡度均相等；
- (2) 该水力坡度就等于该截面的动水曲面的曲面坡度。

这两点就是一般通称的“裘布衣假定”。

此外，裘布衣还假定含水层是一平底的圆柱侧面上保持常水头 h_0 ；一完整井恰位于圆柱的轴心；井水面与井壁的潜水面相重合，即不存在“渗出段” (图 1-1-3)。这样，图 1-

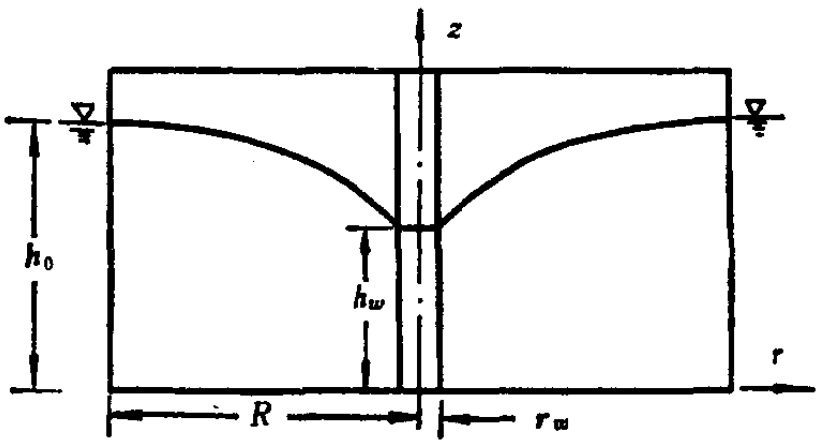


图 1-1-3 裘布衣含水层抽水试验示意图

1-2 中的直角座标应易以圆柱座标；而垂直于 x 轴的垂直截面也应代之以垂直于 r 平面的圆柱截面。该截面积为 $2\pi rh$ ，通过该截面积的流量为 Q ，它与 q 的关系为 $Q = 2\pi r q$ 。于

是，式 (1-1-3) 可变为：

$$-\frac{dy}{dr} = \eta' \frac{Q}{2\pi r y}$$

式中， Q 由 R 流至 r_w 时，一直保持常量，即与 r 无关。故将上式积分，以图 1-1-3 所示的边界条件代入，且将 η' 易以 k ，即得潜水稳定流的裘布衣公式：

$$h_0^2 - h_w^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r_w} \quad (1-1-4)$$

二、“裘布衣假定”的分析

前已述及，潜水面是含水层的一个边界，该边界会影响到其下运动着的潜水流速，而潜水流的流速又会反过来影响潜水面的形状。要弄清这种相互影响的依存关系是困难的。但“裘布衣假定”的提出就排除了这种困难。

众所周知，水力坡度是指水流单位长度流程的水头差。在承压水流中，水流是平行于顶底板的。若顶底板均为水平的，则流线也是水平的，故水力坡度可写作 $\frac{dh}{dx}$ ；而在潜水流中，潜水面自身就是一条流线。若潜水面是弯曲的，则其流程也是弯曲的曲线。而且，潜水面以下不同深度的各流线也都是随着潜水面的弯曲而弯曲。尽管它们的弯曲程序愈近于层底愈小，但严格地说，只有紧贴水平底板的一条流线才是水平的，其水力坡度可用 $\frac{dh}{dx}$ 表示，而其上各条流线的水力坡度均应写作 $\frac{dh}{dl}$ 。 dl 就是流程曲线的微分弧长。 $\frac{dh}{dx}$ 与 $\frac{dh}{dl}$ 二者的区别可从图 1-1-2 中的三角形中看出，这两个微商分别是流线倾角 α 的正弦与正切，即：

$$\frac{dh}{dl} = \sin\alpha, \quad \frac{dh}{dx} = \operatorname{tg} \alpha$$

根据裘布衣的第 2 条假定，即令

$$\frac{dh}{dl} = \frac{dh}{dx} \text{ 或 } \sin\alpha = \operatorname{tg} \alpha$$

这一替代意味着潜水流线与其自由水面的弯曲程度无关，即自下而上的流线都是水平的。因而等压线也跟着由曲线变为铅直线。在此铅直线上，各点的流速当然也相等。于是，便自然得出垂直断面中不同深度的水力坡度均相同的第 1 条假定。这样，就把潜水流简化到和承压水一样，人为地打破了自由曲面和流速之间的依存关系，把两者分开来考虑，从而使潜水问题的解答大为简化，于是得出潜水曲面的裘布衣公式 (1-1-4)。这就是“裘布衣假定”所具有的优点。

三、裘布衣公式的误差

但是，裘布衣假定有它的局限性，即当水面倾角增大到一定的程度时（表 1-1-1），裘布衣公式的误差将是不允许的了。根据现行的地下水计算的精度要求，我们认为，3.5% 的误差还是允许的。因此，当水面倾角小于 15°（相当于水力坡度的 1/4）时，用裘布衣假定导得的公式一般还是可用的。但是，随着距离 r 的缩小和降深 s 的增大，自由曲面的坡度也将大大超过上述的限制。此时，等压线和流线均远远偏离直线，而地下水流由二维的转为三维的。这时，式 (1-

表 1-1-1 裘布衣公式的误差

α	$\sin\alpha$	$\operatorname{tg}\alpha$	误差 (%)
6°	0.105	0.105	0
10°	0.174	0.176	+1.15
15°	0.259	0.268	+3.50