

高 等 学 校 教 材

地 下 水 利 用

张席儒 赵尔慧 霍崇仁 郭西万 合编

水 利 电 力 出 版 社

高等学校教材

地下水利用

张席儒 赵尔慧 霍崇仁 郭西万 合编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书除绪论外,共分两篇,合计九章。第一篇为地下水的取集工程,其内容有:水井出水量的确定、管井及其施工、大口井与辐射井、井群水源地和水平集水工程。第二篇为地下水的利用规划,其内容有:水文地质参数及有关参数的确定、地下水资源及其评价、井灌区规划及井灌区的管理等。

本书为高等学校农田水利工程专业的教材。也可供有关专业师生和工程技术人员参考。

高等学校教材

地 下 水 利 用

张唐儒 赵尔慧 霍崇仁 郭西万 合编

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

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 11.75印张 263千字

1988年11月第一版 1988年11月北京第一次印刷

印数0001—3410册 定价2.40元

ISBN 7-120-00410-7/TV·154

前 言

本书是根据《1983~1987年高等学校水利电力类专业教材编审出版规划》和1983年3月,水利电力部教育司颁布的高等学校农田水利工程专业《地下水利用》教学大纲(试行),以及1983年12月在武汉召开的《农田水利专业教材编审小组会议》精神而编写的。

本书比较系统地阐述了在我国北方地区农田水利建设中合理开发利用地下水资源的重要性和必要性,以及合理开发利用地下水方面的基本理论、基本知识和基本方法等。由于《地下水利用》课程系一门专业课,故其内容侧重实用。书中尽可能编入国内外的最新成果,并比较系统地总结了我国建国30多年来地下水利用在生产、科研和教学方面的基本经验。同时对我国今后地下水开发利用事业的发展也提出了一些需要进一步研究探讨的有关问题。

参加编写此书的有:新疆八一农学院张席儒(绪论、第三章、第四章和第五章);陕西机械学院赵尔慧(第一章、第二章和第八章);华北水利水电学院霍崇仁(第六章和第七章);新疆八一农学院郭西万(第九章)。全书由张席儒任主编,并进行了全书的统稿工作。赵尔慧任副主编,对全部书稿进行了勘校工作。郭西万参加了统稿的协助工作。此外还有新疆八一农学院汤铁山、董新光、陈永东、虎胆·吐马尔拜及陕西机械学院尹焚华等协助主编、副主编参加了对书稿和插图的誊写、描绘与校对等工作。

在编写过程中,曾得到了农田水利教材编审组组长许志方教授的大力支持。他担任本书的主审负责组织武汉水利电力学院、水利水电科学研究院等有关兄弟院校和科研单位的教授、专家(李文渊、田元、伍军、张增新、刘好智、刘金山、朱学愚、陈崇希、李俊亭等),对本书的初稿进行了认真的评审,并提供了许多宝贵的修改意见和建议。特此一并致谢。

此外,对为本书在编写和出版过程中曾提供过参考资料和宝贵意见,以及给予过关心和帮助的有关单位和个人也表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免有不少缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编者

1987年5月

目 录

前 言	
绪 论	1

第一篇 地下水的取集工程

第一章 水井出水量的确定	6
§ 1-1 概述	6
§ 1-2 单井稳定井流的计算方法	7
§ 1-3 单井非稳定井流的计算方法	25
§ 1-4 影响水井出水量的主要因素	33
第二章 管井	36
§ 2-1 管井的结构形式	36
§ 2-2 井管的类型	38
§ 2-3 井管的联接	42
§ 2-4 滤水管的结构与设计	45
§ 2-5 滤水管的透水性和水力计算	55
第三章 管井施工	60
§ 3-1 井孔钻进	60
§ 3-2 电法测井	64
§ 3-3 井管安装	66
§ 3-4 管外填封	67
§ 3-5 洗井方法	68
§ 3-6 成井验收	70
第四章 大口井与辐射井	72
§ 4-1 大口井	72
§ 4-2 辐射井	78
第五章 井群水源地和水平集水工程	85
§ 5-1 井群水源地	85
§ 5-2 水平集水工程	88

第二篇 地下水的利用规划

第六章 地下水资源计算中水文地质参数及其它参数的确定	100
§ 6-1 用稳定流抽水试验确定水文地质参数	100
§ 6-2 用非稳定流抽水试验确定水文地质参数	103
§ 6-3 用其它方法确定有关参数	112
第七章 地下水资源及其评价	116

§ 7-1 概述	116
§ 7-2 水量均衡法	121
§ 7-3 开采试验法	123
§ 7-4 相关分析法	125
§ 7-5 开采强度法	131
§ 7-6 数值法	137
第八章 井灌区规划	141
§ 8-1 概述	141
§ 8-2 基本资料及其分析整理	142
§ 8-3 规划分区	143
§ 8-4 水量平衡计算	146
§ 8-5 井灌区的机井和工程规划	152
§ 8-6 井渠双灌和综合治理规划	161
第九章 井灌区的管理	164
§ 9-1 井灌区的用水管理	164
§ 9-2 水井的管理养护与修复	166
§ 9-3 井灌区的地下水动态与观测	167
§ 9-4 地下水的人工回补	169
§ 9-5 地下水的污染防治	170
§ 9-6 井灌区的经济技术分析	173
附录	177
附表1 $W(u)$ 数值表	177
附表2 $F(u, r/B)$ 或 $F(u', \alpha)$ 数值表	180
附表3 $K_0(r/B)$ 数值表	180
参考文献	181

绪 论

一、在干旱及半干旱地区合理开发利用地下水对农田水利事业的作用

全世界干旱及半干旱地区的面积约占全球大陆面积的三分之一，遍及50多个国家和地区。主要分布在亚、非、澳、美等洲。我国干旱及半干旱地区的面积约占全国总面积的一半，主要分布在我国的华北、西北、内蒙及青藏高原上的绝大部分地区。因其占全国总面积的比重较大，故研究这些地区水资源的合理开发利用将对加速我国四化建设的发展具有十分重要的战略意义。

由于在干旱及半干旱地区，地面水资源比较缺乏。因此，在进行这些地区的农田水利建设中除应充分开发利用地面水资源外，还必须积极开发利用地下水资源。以保证农田灌溉适时适量的需水要求。

根据我国北方干旱及半干旱地区对地下水资源开发利用的经验分析，合理开发利用地下水在农田水利事业中具有重要作用。

1. 可以抗旱治碱，确保农业增产 我国北方地区自古以来干旱灾害频繁。自1949年以来，我国通过30多年来的水利建设，取得了显著效果。但在一些缺水的干旱地区，干旱灾害仍然威胁着农业生产的发展，需要进一步研究解决。此外，在我国北方干旱及半干旱地区也常产生盐碱灾害，影响农业增产，故必须对水资源实行综合利用。使地面水与地下水在互相调配，联合运用中达到抗旱和治碱的双重目的。即在春旱期间可大力抽取地下水进行农田灌溉，到了夏秋季节又可专门利用地面水进行农田灌溉。这样实行井渠结合，联合抗旱，便会满足农业生产适时适量的灌水要求，从而确保农业增产。对已发生了盐碱化的灌区来说，可通过河水洗盐，井水排盐的联合措施，加速地下水位下降，提高土壤脱盐效果，在井渠结合中实行有灌有排，灌排平衡，从而达到彻底根治盐碱灾害的良好效果。

2. 可以供水牧区，促进牧业发展 我国北方干旱及半干旱地区，不仅是我国的农业生产建设基地，而且是我国的牧业生产建设基地。我国共有草原面积约30亿亩，其中缺水草场面积共约10亿亩，且大部分都是分布在我国西北的新疆、内蒙、青海、甘肃等省区。这些缺水草场，基本上都是缺乏地面水源的地区，故大部分都需要开发利用地下水来解决牧区供水问题，以促进牧区建设的发展。

3. 可以调配水源，保护生态平衡 在干旱及半干旱地区，单纯利用地面水，常常会破坏天然的生态平衡。如果将地面水与地下水进行统一的合理调配，则可减少破坏生态平衡的现象。例如在新疆塔里木河上游地区，由于修建水库过多，拦蓄水量较大，致使中、下游地区的天然胡杨林遭受到严重的破坏，农田沙化问题也日益严重起来。如果对地面水与地下水进行统一调配，实行综合利用，即在上游地区既修水库，也打水井，则可将上游水源的一部分调配到中、下游地区，即可保护中、下游地区的生态平衡。

二、我国在地下水利用方面的成就与贡献

我国是世界上农业发展最早的国家之一。因此，在农业生产中开发利用地下水进行农

田灌溉和解决人畜用水等方面具有悠久的历史 and 卓越的成就与贡献。根据有关历史传说的考证和文史资料的记载可知，远在古代黄帝时期我国便开始有了水井。到了尧、舜、禹时期水井已得到了广泛的应用。例如，《周书》中记有：“黄帝穿井”。《吕氏春秋·勿躬》内记有“伯益作井”。又如《诗经》中记有“凿井而饮，耕田而食”。易经中记有“因井为市”，“改邑不改井”。以及“汤旱七年，伊尹教民田头凿井灌田”。迄至春秋战国时代（公元前403~221年）我国四川人民群众已开始掌握了“汲卤煎盐”的钻凿盐井技术。到了汉朝时代（公元前206~公元220年）四川邛崃县开始凿成了第一口天然气井，用于煮盐和照明。直到明朝（公元1368~1644年）我国在民用水井结构方面已有了土井，石井，砖井，木井，竹井等多种类型。在提水工具方面已有了桔槔，辘轳，木制水车等多种形式。

通过上述事例可以知道我国古代人民群众，在开发利用地下水方面早就创造了光辉的历史，作出了卓越的贡献。但是在几千年来封建制度的束缚下，和在近百年来帝国主义的侵略下，以及在反动统治阶级的压迫下，使我国开发利用地下水事业没有得到应有的发展。

1949年以后，开发利用地下水的工作也和其他社会主义建设工作一样有了迅猛的发展。特别是在我国北方17省市自治区大规模开展机井建设以来，我国的井灌事业得到了巨大的发展，并取得了显著的成就。其突出表现有以下几点：

1. 扩大了农田灌溉面积，促进了农业发展 1949年前，我国北方干旱及半干旱地区的广大农村，基本上没有什么机（电）井建设。用于灌溉和生活方面的水井，只是一些人工挖掘的简易水井，全国井灌面积仅有1582万亩。建国后，通过30多年来对地下水的开发利用，我国北方地区的机井建设已成为农田水利建设的重要组成部分，在北方地区已有75%以上的县旗开展了井灌事业。目前，我国已建成各种类型的农用机井共约237万眼，井灌面积共约1.7亿亩，已成为世界上井灌面积最大的国家之一。每年提取地下水量约400~500亿 m^3 ，这对改变我国北方地区农业生产面貌和扭转南粮北调的被动局面已取得了显著的成效。

2. 改善了牧区供水条件，解决了人畜饮水困难 在1949年以前，我国北方广大牧区基本上没有什么牧区水利建设。近多年来，我国北方牧区中84个牧业县旗中已有79个牧业县旗装备了专业打井设备，培训了打井技术人员。通过牧区供水基本井的建设，加上其他小型水利设施，现已改善缺水草场和开垦无水草场面积共约1.65亿亩，并发展了饲草饲料基地的建设，为促进我国牧业生产的发展创造了良好的条件。与此同时还有力地解决了一些山区、牧区，黄土高原区和地方病区等大约8467万人和4610万头牲畜的人畜饮水困难问题。

3. 促进了农村牧区的机械化和电气化 由于我国近多年来在广大农村和牧区大规模地进行了机井建设，使我国提水动力业已增加到2000多万kW（其中机电各半），并同时增加了提水机和输变电路设备等，因而对促进我国广大农村牧区的机械化和电气化建设起到了良好的作用。

4. 加速了开发利用地下水的科学技术发展 随着我国社会主义生产建设事业的不断发

展,地下水开发利用方面的科学技术也有了很大的发展。例如,在地下水运动计算中,已由过去的稳定流理论发展到非稳定流理论。在地下水资源评价方法上也由过去的“四大储量”评价方法发展为“三量”评价方法,而且还应用了电子计算机。此外,电测井已广泛应用到成井工艺之中,使钻机打井业已普及到广大城乡,基本上代替了人工挖井。地下水动态的观测预报和人工回灌以及井灌区管理的自动化,电气化等工作在开发利用地下水资源中也都得到了迅猛的发展。同时,我国通过地下水的开发利用,一大批科技人员及技术工人队伍也正在成长壮大。

三、国外地下水利用的发展概况

由于全世界人口的不断增长,生产建设的不断发展以及地面水资源不断的被污染,从全世界来看,特别是从干旱及半干旱地区来看,为满足生活、生产所需要的淡水资源将日益感到缺乏。因此,对地下水的年开采量也将不断增加。特别是在近多年来工业技术不断革新,凿井机具及提水设备日臻完善的情况下对地下水的开发强度也就愈来愈大。目前,地下淡水资源在许多国家的供水比例中占有重要的地位。现仅介绍几个主要国家在地下水开发利用方面的发展情况如下:

1. 美国 美国自1900年便开始开发利用地下水,用于工农业生产。到70年代末,美国共有各种类型农用水井约500多万眼,年提取地下水量共约400多亿 m^3 ,因此美国的井灌面积已由40年代占总灌溉面积的11%,发展到70年代占总灌溉面积的47%。从50年代到70年代,美国的机井建设平均每年以5%的增长率向前发展。目前地下水的开采量已占全国总引水量的36%。美国的地下水开采区,多位于西部干旱及半干旱地区的17个州。其中得克萨斯州的井灌面积已占全州总灌溉面积的82%。加利福尼亚州利用地下水的灌溉面积已占全州总灌溉面积的40%以上。

2. 印度 在印度,尽管多年平均降水量为1140mm,但中部及南部仍有干旱缺水地区。所以印度开发利用地下水的历史也很悠久,大约在百年以前已有井灌面积约3000万亩,相当于当时渠灌面积1800万亩的1.7倍。印度在20世纪50年代共有各种类型的配套机井1.8万眼,井灌面积已有0.9亿亩。到70年代机井已增加到109万眼,井灌面积也增加到1.64亿亩,约占全国总灌溉面积的30%以上。年提取地下水量约为600亿 m^3 ,占全国总灌溉引水量的25%。

3. 巴基斯坦 巴基斯坦1892年便在北印度平原的瑞支那斗地区利用地面水进行农田灌溉。但由于灌区缺乏排水措施和不适当的过量灌溉,因而造成灌区地下水位的逐年上升,土壤盐渍化日益严重,并威胁着整个印度平原地区的农业生产。1962年巴基斯坦为了发展农业生产,提出了“盐分控制和土壤改良规划第1号”(SCARP-1)计划后,随即开展了竖井排灌工作,共打井2000多眼,年提取地下水量为26亿 m^3 ,与地面水混合灌溉,经过10年以后,到1971年灌区地下水位已平均下降3m,由于防治了盐碱危害,且扩大了灌溉面积,故使该地区的农业生产得到了发展,取得了较好的效果。

四、本课程的基本内容和学习要求

本课程的基本内容可分为两大部分:

第一部分为《地下水的取集工程》。其主要内容包括水井出水量的确定,管井及管井

施工，大口井与辐射井，井群水源地和水平取水工程等。

第二部分为《地下水的利用规划》，其主要内容包括地下水资源计算中水文地质参数及其它参数的确定，地下水资源及其评价，井灌区的规划及井灌区的管理等。

学习本门课程的目的是为了培养学生在综合运用已学过的基础课、技术基础课以及有关的专业课的基础上，通过理论联系实际，根据干旱及半干旱地区地下资源的赋存特征，能从事合理开发利用地下水与管理保护地下水的工作。并能参加有关地下水开发利用和管理保护方面的科学研究工作。因此，对本课程学习的总要求是，通过本课程的学习，能基本上掌握开发利用地下水的各种常用取水工程的设计与施工，并能结合当地水文地质条件和农田水利建设的要求进行地下水合理利用的规划和高效益的经营管理。同时应具有从事地下水开发利用方面的科学研究能力。

地下资源的合理开发利用，对我国社会主义建设事业的顺利发展和人民生活水平的不断提高都具有十分重要的意义。为此，我们必须采用理论联系实际，教学结合生产的方法，不断学习掌握合理开发利用与保护地下资源的先进技术，让我国丰富的地下水资源在为祖国四化建设中发挥更大的作用。

第一篇 地下水的取集工程

由于地下水的埋藏条件、补给条件、开采条件和当地的经济技术条件的不同，用以取集地下水的工程类型也就有多种多样，总括起来恐不下数十种。经综合归纳，常用者约有以下几种。

一、垂直系统

由于该种系统建筑物的延伸方向，基本与地表面相垂直，故称之为垂直系统。如管井、大口井等各种类型的水井便属此种系统。因其适应条件最为广泛，所以在生产中采用最多，也是本书阐述的重点之一。

二、水平系统

由于该种系统建筑物的延伸方向，基本与地表面相平行，因而称为水平系统。常见者有坎儿井、截潜流工程和横管井等。

三、联合系统

如将垂直与水平系统结合在一起，或将同系统中几种（个）联合成一体，便可称为联合系统。例如：复合井、井群、辐射井、虹吸井等。

四、引泉工程

根据泉水出露的特点，予以扩充、收集、调蓄和保护等的引取泉水的建筑物，称为引泉工程。它多用于供水、医疗或其它各种用途。

以上各系统中除引泉工程必须要具有特殊的天然露头外，其它各系统均应根据当地具体条件合理选用。

392963

第一章 水井出水量的确定

水井的出水量(生产能力)对水井的结构设计、井灌规划、水文地质参数的确定和地下水资源评价等都是十分重要的。但影响水井出水量的因素很多而且比较复杂,计算方法又因计算阶段、水文地质条件、井型和采用井流理论等的不同而差异较大。为了便于学习和避免不必要地重复,兹对垂直系统的各种井型出水量计算的基本原理和方法,专列一章以集中系统阐述。

§ 1-1 概 述

水井中不论是管井或大口井,如根据凿入开采含水层的深度不同,可分为完整井和非完整井两种。当水井的进水部分穿过所开采含水层的全部厚度,并达到不透水层隔水底板时称为完整井(图1-1,1、2)。如果水井的进水部分只穿入含水层的部分厚度时则称为非完整井(图1-1,2、3、4、5)。在完整井的条件下,地下水仅是通过井壁汇入井中,而对非完整井,地下水可分别只从井壁或井底汇入,也可从井壁井底同时汇入。

由于含水层可分为潜水含水层和承压水含水层,在不同含水层中的水井,其水力条件各不相同,故相应称为潜水和承压水井(或称为自流井)。

在潜水中抽水时,井内和其周围含水层中的地下水位便开始下降,逐渐形成漏斗状的下降区(疏干区),通常称为水位降落漏斗[图1-1(a)]。而在承压水井中抽水时,则形成水压下降,可称为水压(压力水位)降落漏斗[图1-1(b)]。前者是在含水层内形成和发展的,即随着水位下降漏斗的扩大,其渗流过水断面是在不断变化着。而后者只有水压的变化,其渗流过水断面则是不变的。

由此可见,水井在抽水过程中,随着降落漏斗的扩展,其水力梯度和渗流(汇流)速度是在含水层的空间和随抽水时间的延长,也在不断变化着,即处于非稳定渗流状态。而

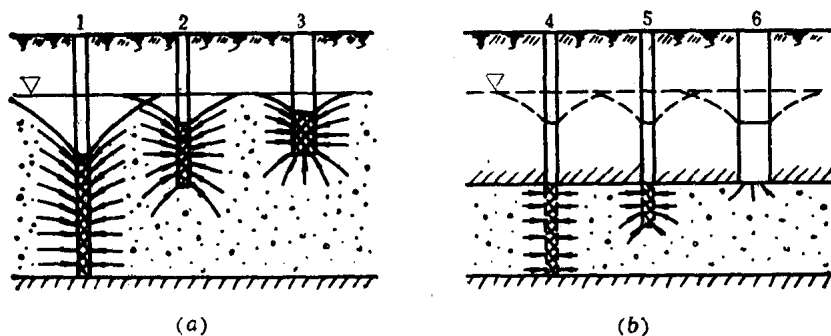


图 1-1 水井类型示意图

1—潜水完整井; 2—井壁进水潜水非完整井; 3—井壁井底进水潜水非完整井; 4—承压水完整井;
5—非壁进水非完整井; 6—井底进水承压水非完整井

当抽水时间延至相当长后, 降落漏斗扩展的速度, 小至对实用可忽略不计时, 即可近似认为处于稳定渗流状态。

根据计算阶段的不同, 宜采用的计算方法相应也应有所选择。一般在勘察或规划初期, 多采用解析法所得理论公式估算水井的出水量。而在设计和管理阶段, 常采用按抽水试验所得的经验公式确定水井的出水量。或对按解析法的估算结果予以验证。

二法各有其优缺点, 也各有其适用条件。在使用时宜相互补充, 而不宜并立与对立。

由于水井还可分为独立的单井和互有干扰的井群, 其计算方法也各不相同。

§ 1-2 单井稳定井流的计算方法

一、解析法

对于拟计算水井所在地的水文地质条件差异较小, 水文地质参数相对比较均一, 边界条件也比较简单的情况下, 常可用解析法按不同井型估算单井的出水量。

(一) 完整井出水量的计算

1. 潜水完整井 1863年法国水力学家裘布依 (Dupuit) 为了推导单井 (完整井) 稳定井流计算所建立的模型, 见图1-2。该模型设水井位于一个四周均为等深水体的圆岛中心, 即圆型定水头供水边界的含水层。并假设该圆岛正圆、均质、等厚且各向同性, 水位与不透水层底板呈水平状。

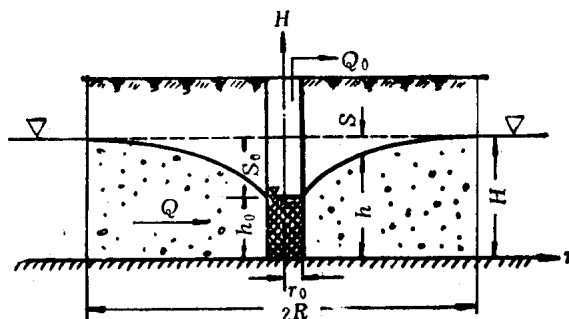


图 1-2 裘布依潜水完整井稳定井流计算模型

水井的半径为 r_0 , 供水边界距水井中

心的距离或称供水半径为 R 。水井当按某一定流量 Q 抽水时, 供水边界的水位保持不变, 可保证无限供给定流量 Q 。井流服从达西 (Darcy) 线性渗流定律和连续性定律, 并按轴对称井壁进水且无阻力地汇入井内。抽水期间只有供水边界补给, 再别无其它水的补给。

水井在未抽水前, 井中水位与外界相同称为静水位。而当抽水后, 静水位便被破坏而逐渐下降, 对某一抽水时刻的运动水位称为动水位。于是水井内外便形成水头差, 含水层中的水便在此水头差的作用下径向汇入井内。从而在水井周围便形成了以井孔轴心为对称轴的降落漏斗。当降落漏斗扩展至供水边界时, 抽水流量与边界供给流量相等, 降落漏斗和井中动水位便保持不变, 达到稳定状态。

潜水完整井抽水稳定后, 其流线在平面上呈对称辐射状汇入井内; 在剖面上为一组曲线, 最上部为降落漏斗的浸润面, 其曲率最大, 也称为降落曲线, 呈抛物线状。其下的流线随深度加大曲率逐渐变缓, 至不透水层底板处, 流线几乎与底板平行。在这种情况下, 渗流速度便可能产生水平分量与垂直分量; 但因一般垂直分量远小于水平分量 (特别在稳定井流情况下), 故可忽略不计, 于是便可把复杂的三维井流问题, 近似简化为二维井流来分析。

见图1-2, 取圆柱坐标系, 沿底板取井径方向为 r 轴, 井轴为 H 轴, 并假设渗流过水断面近似为同心的圆柱面, 于是:

按达西定律 $Q = 2\pi r h K \frac{dh}{dr}$

按连续定律 $Q = Q_0 = \text{const}$

合并 $2h dh = \frac{Q_0}{\pi K} \frac{dr}{r}$

积分 $h^2 = \frac{Q_0}{\pi K} \ln r + C$

当 $r = R$ 时, $h = H$ $C = H^2 - \frac{Q_0}{\pi K} \ln R$

于是 $Q_0 = \pi K \frac{H^2 - h^2}{\ln \frac{R}{r}} \quad (1-1)$

当 $r = r_0$ 时, $h = h_0$, 式 (1-1) 可改写为

$$Q_0 = \pi K \frac{H^2 - h_0^2}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (1-2)$$

式 (1-2) 即为有名的裘布依稳定井流潜水完整井出水量的计算公式。如将自然对数换为常用对数后, 则得

$$Q_0 = 1.364 K \frac{H^2 - h_0^2}{\lg \frac{R}{r_0}} \quad (1-3)$$

式中 Q_0 ——水井的出水量 (m^3/h ; m^3/d);
 K ——含水层的渗透系数 (m/h ; m/d);
 H ——含水层的厚度或供水边界的定水头高度 (m);
 h_0 ——井中稳定动水位下的井水深度 (m);
 R ——井的供水半径 (m);
 r_0 ——井的半径 (m).

又因 $h_0 = H - S_0$, 则 $H^2 - h_0^2 = (2H - S_0)S_0$, 所以式 (1-3) 可改写成

$$Q_0 = 1.364 K \frac{(2H - S_0)S_0}{\lg \frac{R}{r_0}} \quad (1-3')$$

由式 (1-1) 也可得降落曲线 (浸润曲线) 的表达式为

$$h^2 = H^2 - \frac{Q_0}{\pi K} \ln \frac{R}{r} \quad (1-4)$$

2. 承压水完整井

对承压水完整井, 裘布依建立了与潜水完整井相类似的稳定井流模型 (图1-3)。他假设承压含水层的顶, 底板呈水平且不透水。流线呈水平辐射状汇入井内。其余假设条件均与潜水含水层相同。

按达西定律 $Q = 2\pi KM r \frac{dh}{dr}$

按连续定律 $Q = Q_0 = \text{const}$

合并 $dh = \frac{Q_0}{2\pi KM} \frac{dr}{r}$

积分 $h = \frac{Q_0}{2\pi KM} \ln r + C$

当 $r = R$ 时, $h = H$,

$$C = H - \frac{Q_0}{2\pi KM} \ln R$$

于是

$$H - h = \frac{Q_0}{2\pi KM} \ln \frac{R}{r}$$

所以

$$Q_0 = 2\pi KM \frac{H - h}{\ln \frac{R}{r}} \quad (1-5)$$

当 $r = r_0$ 时, $h = h_0$,

$$Q_0 = 2\pi KM \frac{H - h_0}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 即为裘布依稳定井流承压水完整井出水量的计算公式。如将自然对数换为常用对数后, 得

$$Q_0 = 2.73 KM \frac{H - h_0}{\lg \frac{R}{r_0}} \quad (1-7)$$

如引入 $S_0 = H - h_0$ 后, 式 (1-7) 则

$$Q_0 = 2.73 KM \frac{S_0}{\lg \frac{R}{r_0}} \quad (1-8)$$

式中 M ——承压含水层的厚度 (m);

其余符号意义同前。

由式 (1-5) 得水压降落曲线的表达式为

$$h = H - \frac{Q_0}{2\pi KM} \ln \frac{R}{r} \quad (1-9)$$

这里需要明确指出, 式 (1-1) 和式 (1-5) 是裘布依按假设的圆形定水头供水边界的模型条件下, 所推导出来的。但在实际生产中, 除特殊情况外, 一般是很少能遇到这种模型条件的, 所以这两个公式的使用便受到了很大的限制。

1870年德国土木工程师启姆(A. Thiem)将裘布依公式扩展使用到如图1-4所示的无限供水边界(简称无界)含水层中。并提出将供水半径改为影响半径(influence radius)。他定义为距抽水井中心到实际上观测不明显地下水位(或压力水位)下降处的水平距离。

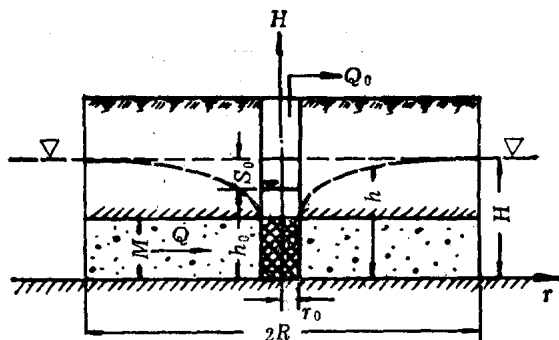


图 1-3 裘布依承压水完整井稳定井流计算模型

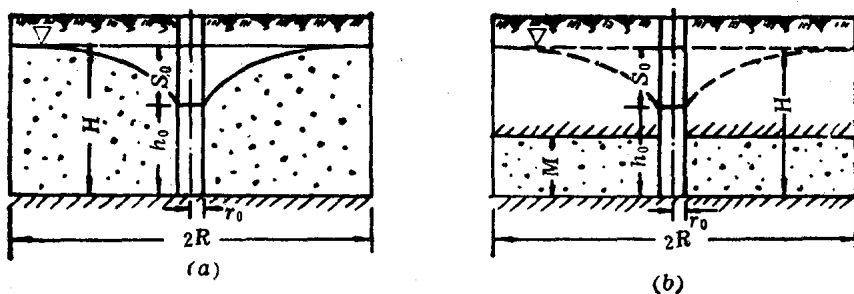


图 1-4 启姆稳定井流模型
(a)潜水完整井; (b)承压完整井

但严格地说,裘布依模型和启姆模型是截然不同的。因为当 $r = R$ 时,前者 $\left. \frac{dh}{dr} \right|_{r=R} = \frac{Q}{2\pi RT} = \text{const}$; 而后者 $\left. \frac{dh}{dr} \right|_{r=R} \approx 0$, 即 $Q_R \approx 0$ 。由此可知,在启姆模型中,要保持 $Q_0 = Q_R$, 则 R 便不能成为定值,也就是说 R 是随着抽水时间的延长,是在不断向外伸展着的,直至补给和排泄边界为止。故可以说在启姆模型或无界含水层中,是没有形成稳定条件的。

既如上述,为什么100多年来,特别是在非稳定井流理论问世前,按稳定井流公式设计的生产工程,对有些情况仍取得了较满意的结果呢?笔者认为井流问题是水流和地质条件综合形成的非常复杂的物理过程,要典型概括所有的影响条件是比较困难的。对于地下水资源如属于补给型或调节型,作为估算仍可采用启姆模型稳定井流公式计算。所以,裘布依公式仍不失其在理论上和历史上的先导意义。只要选用条件合适,现今仍有一定的实用价值。

关于在无界含水层中,影响半径(有人称为引用供水半径) R 是一个非常重要的参数。在这方面历史上探讨的学者很多,得出了许多计算的经验公式。经检验这些经验公式的误差均较大,且未抓住问题的实质。最后经笔者分析验证,认为影响半径 R 是随含水层的特征和抽水时间的函数,即

$$R = 1.5\sqrt{at} = 1.5\sqrt{\frac{Tt}{\mu}} \quad (1-10)$$

式中 R ——影响半径 (m);

a ——含水层的水位或压力传导系数 (m^2/d);

T ——含水层的导水系数 (m^3/d);

μ ——含水层的给水度或释水系数,为无量纲量,在潜水含水层和承压含水层中,其概念各不相同(见后);

t ——抽水延续时间 (d)。

由式(1-10)表明,当含水层的特征已定时,即 a 等于常量,影响半径的变化主要决定于

● 苏联鲍戈莫洛夫(Г.В. Богомолов)也导出同样公式(1978)。

抽水时间 t 。只有当 $t \rightarrow \infty$ 时, $R \rightarrow \infty$ 。但一般水井连续抽水时间一般多为一日十几小时, 或数日间歇一次。因此 R 随着 t 的限定也有一定的限定。

对于不同有限(界)补给边界和隔水边界情况下的供水半径 R (图 1-5), 惠斯曼 (L. Huisman) 用映象法推导, 并简述于下:

图 1-5(a) 表示井位偏心圆岛情况, 供水半径为

$$R = L \left(1 - \frac{b^2}{L^2} \right) = 2a \left(1 - \frac{a}{2L} \right) \quad (1-11)$$

图 1-5(b) 表示井位布于两供水边界直角块状无界含水层的情况, 其供水半径为

$$R = \frac{2L_x L_y}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (1-12)$$

当 L_x 与 L_y 相差不大时, 即 $L_x \approx L_y$, 便可简化为 $R \approx 1.41L$ 。

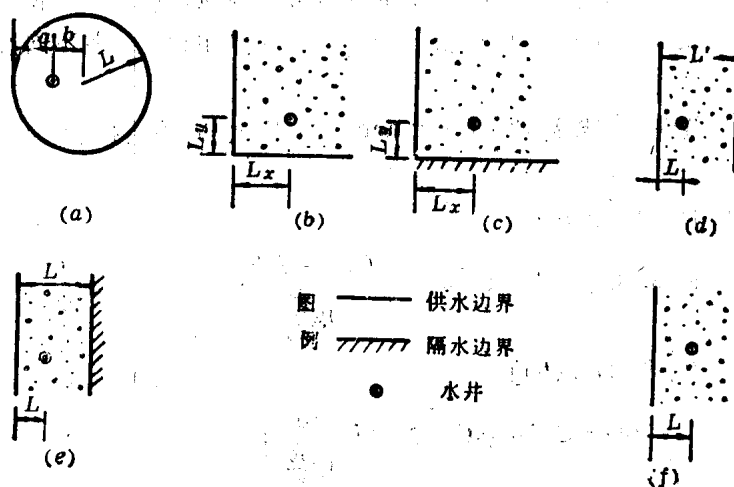


图 1-5 水井位于不同供水和隔水边界示意图

图 1-5(c) 表示与上述情况相似的直角块状无界含水层, 但其中一边为供水边界, 另一边为不透水隔水边界。其供水边界为

$$R = \frac{2L_x}{L_y} \sqrt{L_x^2 + L_y^2} \quad (1-13)$$

同样可简化为 $R = 2.83L$ 。

图 1-5(d) 表示为一无界条带含水层, 其两边均为供水边界。这种情况的供水半径为

$$R = \frac{2L'}{\pi} \sin \frac{\pi L}{L'} \quad (1-14)$$

近似令 $L = L'/2$ 时, 可简化为 $R = 1.27L$ 。

图 1-5(e) 与该图(d)所示情况相似, 唯其一边为不透水隔水边界。其供水半径为

$$R = \frac{4L'}{\pi} \operatorname{tg} \frac{\pi L}{2L'} \quad (1-15)$$