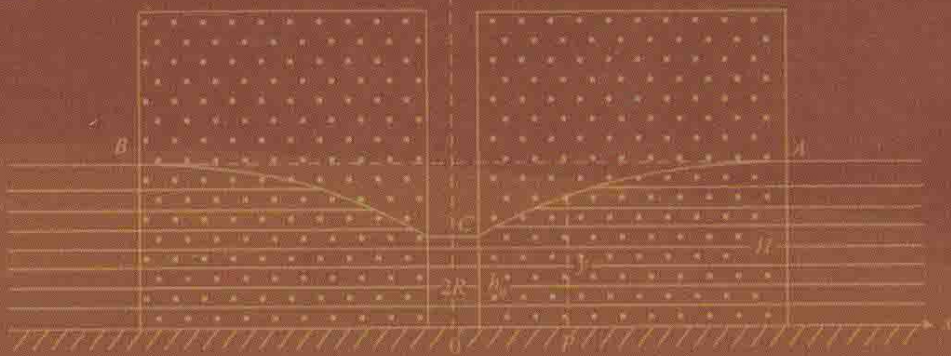


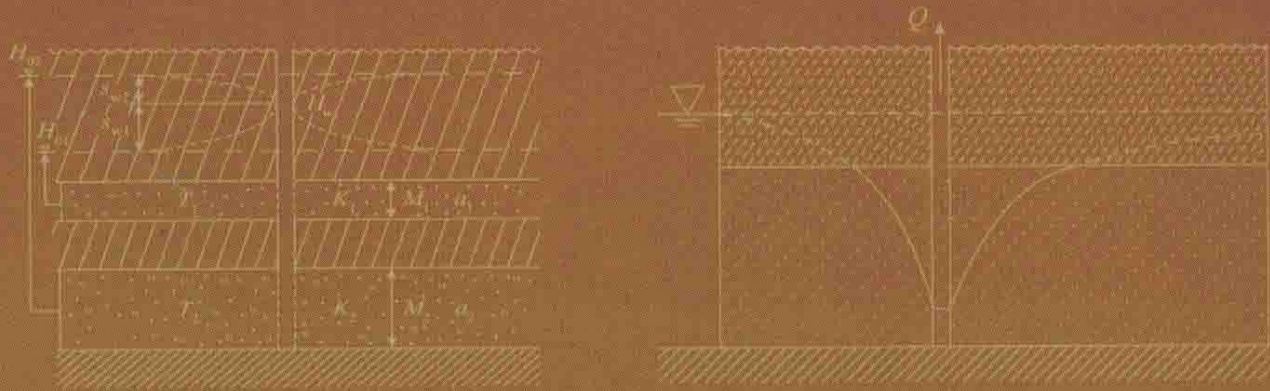
“水文与水资源工程”国家特色专业建设项目资助

地下水动力学 (第五版)

陈崇希 等编著



Dupuit (1863)



地质出版社

地下水动力学

(第五版)

陈崇希 编著
林 敏 成建梅

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本教材是1999年出版的《地下水动力学》(即第四版)的修订补充,内容包括:渗流理论基础(含裂隙介质渗透系数张量的计算,复杂坝下渗流计算,与含水层性变形有关的某些水文地质现象,通量潜水面边界条件等);Dupuit“圆岛稳定井流模型”及地下水可持续开采量的评价准则;比较完整的地下水不稳定井流模型体系(包括承压、潜水和二元结构含水系统,各向同性和各向异性介质,无界和有界含水系统,完整井流和非完整井流及热传导源汇理论,单层井流和混合井流,垂直井流和水平井流,承压井流和承压-无压井流以及泉流模型)。还增写了“50多年来本教材的建设历史及主要进展的简介”。

本书为高等院校水文与水资源工程、地下水科学与工程、地质工程、水文地质工程地质等相关专业的教材或参考书,也可供从事定量水文地质的科学研究和工程勘查人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下水动力学 / 陈崇希等编著. —5版. —北京 :
地质出版社, 2011.7 (2014.6重印)

ISBN 978-7-116-07217-6

I. ①地… II. ①陈… III. ①地下水动力学—高等学
校—教材 IV. ①P641.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第083633号

责任编辑:李惠娣

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京市海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324514(编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 82324340

印 刷:北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:24.75 插图:6

字 数:660千字

印 数:1501—4500册

版 次:2011年7月北京第5版

印 次:2014年6月北京第2次印刷

定 价:35.00元

书 号:ISBN 978-7-116-07217-6

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

本教材如果从 1996 年试用版/1999 年正式出版（即第四版）起至今已有 15 年了，这些年的教学、科研和应用实践，对教材的变革要求虽然不及 1975 年出版的《地下水不稳定井流计算方法》那么巨大，但也有必要对章节内容进行修订补充。基于此，今年出版《地下水动力学》第五版。

（1）历史的回顾

为增进读者对本书的了解，下面简介本教材的发展历程和相关背景。

我国水文地质专业建于 1952 年，地下水动力学是以前苏联著名学者 Г. Н. Каменский（卡明斯基）的《地下水动力学原理》为教材，其中的水平无界含水层的井流问题都是“影响半径稳定井流”模型，并称其为 Dupuit 稳定井流模型。

由北京地质学院（陈崇希，胡佩清，林敏）编写的《地下水动力学》（1961，即第一版），是我国第一本自编的《地下水动力学》，虽然井流的内容比 Каменский 的丰富多了，包括源汇、势的概念及应用、井群势叠加、边界附近井流、非完整井流（包括 Бабушкин（巴布什金）、Гиринский（吉林斯基）和 Maskat（马斯克特）等方程）等问题，但“地下水井流”的基本模型没有改变。此后某些高校有些自编的内部教材，但都仍属于“影响半径稳定井流”模型范畴。

此后新编的《地下水动力学》（陈崇希，1966，即第二版）有两点重要进展。一是建立了孔隙介质和裂隙介质渗透系数的水力学模型/方程，这一成果揭示了地下水科学中最重要的参数——渗透系数的物理实质。后来了解到，Bear（1972）所表述的相关模型/方程与陈崇希（1966）的多孔介质渗透系数水力学模型/方程相同；法国学者 Louis（1967）也提出与陈崇希（1966）类似的裂隙介质水力学方程/模型。二是论证了“影响半径稳定井流模型”的错误。这本教材中明确指出：“井孔中抽水引起的影响范围随时间延续是发展的，因为井孔抽水破坏了原有的水动力平衡。假如没有因抽水而得到补给量的增加或排泄量的减少，那么影响范围将无限制地发展，达到整个含水层。也就是说，整个含水层中没有一

个点能够保持原有的水头,”(重点号为原文中的标注),“只有当地下水因抽水而得到新的补给量或排泄量的减少,而且该影响范围内新补给量和排泄量减少的总和等于抽水量,影响范围才能稳定下来。也就是说,只有当形成新的水动力平衡,影响范围才能稳定下来。”这个时期,作为主讲这门课的笔者,内心十分痛苦而无奈:所教的课程大部分的内容(井流)基本不能用,而又拿不出新的符合实际的教学内容。

“文革”期间下一步的工作暂时停顿下来。“文革”后期我国科技政策有所变动,有机会接触到欧美关于地下水不稳定井流原理的文献,笔者如获至宝,找到了地下水动力学的出路。在查阅大量相关文献的基础上,整理出系统讲稿。1974年3月,笔者应山东省地质局第一地质队邀请去讲授“地下水不稳定井流”时指出: Dupuit “影响半径稳定井流模型”错了。笔者大胆提出:“Dupuit 稳定井流方程的应用条件应当是圆岛中的一口井(简称‘圆岛模型’),而非‘影响半径’模型; Dupuit 公式中的‘影响半径’应改为‘圆岛半径’”(陈崇希, 1974a)。“这就从理论上纠正了 20 世纪 50 年代由国外传入,在我国影响深远的‘影响半径模型’的错误”(焦赳赳等, 2003)。

此后编写的《地下水不稳定井流计算方法》(陈崇希, 1975, 即《地下水动力学》下篇, 第三版), 是我国第一本系统阐述地下水不稳定井流原理及井流试验数据分析的教材, 读者对象是“文革”前学习过渗流理论基础及仅含“稳定井流”的“地下水动力学”的大学生。该教材继承了上述教材自己提出的理论观点, 另有多方面不同于其他教材的观点和特色内容, 主要概括如下:

1) 论证了“影响半径稳定井流”模型的错误。大胆地断定: Dupuit 稳定井流方程应当属于“圆岛模型”, 严格区分了 Dupuit 模型、Thiem 模型和 Theis 模型之间的本质区别。

2) 地下水可持续开采量的理论基础是地下水稳定井流, 若形不成稳定井流, 则无“可持续开采”可言。错误的稳定井流理论必导致错误的可持续开采量的评价。传统地下水资源评价的理论体系, 受“影响半径”模型的误导, 形成了一系列原则上错误的地下水资源评价准则和方法。该教材建立了评价地下水可持续开采量的基本准则及合理开采地下水的原则。

3) 关于不稳定井流的基本方程 Theis 公式(20 世纪 70 年代, 人们因未能采用微积分方法获得其解而伤脑筋), 找到了 Boltzmann (博尔兹曼) 变换的推导方法, 使得未曾学习积分变换、分离变量等方法的读者(当时的大学生) 能够了解地下水不稳定流最基本的方程——Theis 公式

的完整推导过程,使读者对模型的理解和应用更加踏实。

4) 对 Theis 公式做了较详尽的讨论(所谓“六点讨论”),以了解 Theis 井流的基本特征以及建立模型的假设条件(特别是水平的初始水头条件及抽水井径趋于零两条件)与实际条件不符时所作的分析与处理方法。

5) 设立“与含水层变形有关的某些水文地质工程地质现象”一节,以增加小篇幅而拓宽读者的视野。

6) 独立地解释了承压地下水的固体潮效应(莱芜 1974 年)。

7) 承压井流、无压井流及承压-无压井流是以水动力特征划分的 3 种基本井流类型,但对于不稳定井流模型,文献中缺乏后者(它是矿山排水及河漫滩、阶地区段的常见类型),该教材提出“地下水不稳定承压-无压井流”的一种近似解法,以补充之。

8) 增设“瞬时抽/注水法”一节,该法在我国虽尚未应用,但国外已大量应用,有其特点,值得推荐。

9) 基岩含水系统往往属于各向异性介质,该教材设立“均质各向异性含水层中的完整井流”一章,不管是在其解决问题的方法上还是应用上都有重要价值。

10) 采用微积分方法推导出了关于河渠一维不稳定流的两个基本方程,使读者易于理解、掌握。

11) 地下水非完整井流,理论上比较复杂,实际应用中较多遇到,该教材作了较详细的分析。

12) 地下水渗流理论与热传导理论密切相关,Theis 公式就是引用热传导相关模型而建立的,一些术语也来自热传导学,该教材系统地搜集了与地下水井流相关的热传导理论,并整理成“源汇理论及其应用”一节,以提高读者对问题的系统性认识。

13) 建立“特定条件标准曲线拟合法”,拓宽了标准曲线拟合法的使用范围,如多主井抽水试验求参等(1983 年版)。

14) 提出抽水试验数据求取含水层参数的 $s-t$ 曲线拐点法。

15) 证明了越流系统无需水平的初始水头条件的要求,实际上可用于稳定的非水平的初始水头条件,从而大大地拓宽了这些方程的使用。

笔者用该教材为高等学校、研究所及原地矿部、原冶金部、水利系统举办 10 次培训班,宣传推广地下水不稳定井流理论和应用,为防止误传的“影响半径稳定井流模型/公式”的继续使用做出努力。

为教学需要,笔者将 1975 年的书稿内容稍加补充修改铅印,形成了

内部教材《地下水向集水建筑物的运动》(陈崇希, 1981, 即《地下水动力学》下篇, 第三版)。同期编写的《渗流理论基础》(林敏, 1982, 即《地下水动力学》上篇, 第三版)总结了多年教学成果, 包括不稳定 Darcy 流试验等内容, 与前者配套作为地下水动力学(第三版)教材, 直至 1996 年新教材出版。在此期间, 笔者托人从法国巴黎图书馆复印到 Dupuit (1863) 原著, 原著表示的正是 1974 年笔者大胆提出的“圆岛模型”, 笔者兴奋不已, 马上将 Dupuit 原著的“圆岛模型”引入早已向地质出版社交稿的《地下水不稳定井流计算方法》, 另外补充了 8 年期间的少量新成果及我国的应用实例。1983 年, 《地下水不稳定井流计算方法》终于由地质出版社出版。

1996 年, 笔者将上述《渗流理论基础》与《地下水不稳定井流计算方法》合编成了第四版《地下水动力学》, 受篇幅限制, 删去“与含水层弹性变形有关的水文地质反应”一节。当时中国地质大学(武汉)规定新教材公开出版之前必须先试用两年以上, 因此该教材未在当年公开出版。1999 年, 《地下水动力学》(陈崇希、林敏, 即第四版)由中国地质大学出版社正式出版。

本教材的第五版是在 1996/1999 年的《地下水动力学》的基础上扩充修订的, 主要包括:

1) 增加“地下水承压-无压井流问题”一节。地下水井流问题按水动力特征划分为承压井流、无压井流和承压-无压井流 3 大类。由于承压-无压井流模型的复杂性, 当前一般教材或者缺失此类模型, 或者只能采用分段法求解圆岛型稳定井流模型, 而其应用价值很小。现实要求增强承压-无压井流方面的内容。为此本教材做了尝试, 将其扩充至所有单层承压稳定井流可以求解的条件(转为承压-无压井流); 而不稳定承压-无压井流问题, 当前仅限于单井的近似模型。

2) 我国教材尚未引入水平井流问题。考虑到在低渗透性、薄含水层的地下水采排工程中, 水平井的工作效率要比垂直井高得多, 随着水平井钻井工艺的提高和成本的降低, 水平井技术有很大的应用前景。为此本版教材增加“地下水水平井流问题”一节。

3) 自然界的含水系统, 绝大多数具多层性, 对于多层含水系统, 为增大出水量, 简化施工工序和降低成本, 普遍采用混合井开采地下水(除非水质不佳), 甚至利用混合井做抽水试验。可以说, 几乎没有一个地区无混合井孔的。因此, 如何建立混合井流的模型, 是半个多世纪来人们十分关注的问题。但是, 由于混合井流的复杂性, 使其研究进展缓

慢。尽管如此,本版教材增加“地下水混合井流问题”一节,为读者提供基本概念和最基本的规律。

4) Maillet (1905) 和其他学者提出的岩溶泉流量衰减方程——层流态的 $Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$ 及紊流态的 $Q_t = [1 - \alpha(t-t_0)]$ ——在国内外已得到普遍使用,以确定岩溶泉流量的衰减系数 α , 并用以评价岩溶含水层的水资源和了解它的水动力特征。但是,衰减系数 α 的参数组成结构尚不清楚。为此本版教材增加“岩溶含水层泉流量衰减的解析模型”一节,以分析不同流态的岩溶水向泉口运动的特征,揭示衰减系数的组成要素和相互关系,也从机理上阐明了岩溶泉流的动态规律。

上述 1) ~4) 组成“特殊地下水井流等问题”一章。

5) 原“潜水含水层中的完整井流”一章,改为“二元结构含水系统及潜水含水层中的完整井流”。考虑到 Boulton 三维流模型已被包括在 Neuman 模型中(即与其长时间解一致),Boulton 重力水滞后释水的二维流模型与二元结构含水系统模型的解一致,而且后者解释了 Boulton 模型中物理意义不明确的滞后指数 $1/\alpha$ 的水力参数的组成。基于此,本教材忍痛删去经典的 Boulton 的两个潜水井流模型,并强调了现实中二元结构含水系统完整井流模型的重要意义。

6) 增写了“50 多年来本教材的建设历史、主要进展以及我国的相关背景的简介”。

7) 建立潜水面边界条件,历史上都采用物质导数的方法。本教材采用类似推导地下水流控制方程的方法——质量守恒法来建立相关方程。此方法物理概念明确且推导简单。

8) 补写了关于“井孔流量与水位降深关系的经验公式”的注记。

9) 恢复了“与含水层弹性变形有关的水文地质反应”一节。

10) 增写了现实中十分重要的“裂隙渗透系数张量 $\tilde{K}$ 的计算”。

11) 对当前有关地下水非 Darcy 流的 Forchheimer 方程和 Смрекер (斯姆列盖尔) 方程,在流动机理上是否存在某些缺陷,提出探讨。

12) 作为分段法的应用,增写了“分段法在复杂坝下渗流计算中的应用”。

13) 不少人受某些教材的影响,怀疑存在水跃的潜水井流其流量方程的正确性,为此本教材引入详细证明。

14) 改写了“Thiem 模型与 Dupuit 模型的本质差别——历史回顾”一节。

15) 改写了“严格区分 Thiem 模型与 Dupuit 模型的地下水资源评价

意义”一节。

16) 在 Theis 公式“六点讨论”的基础上, 增加第 7 点关于“水头下降引起地下水从储存量中的释放是瞬时完成的”假定的讨论。

17) 增写了“线性变流量井流问题的解析解”。

18) 增写了“多阶梯定降深井流问题的解析解”。

19) 对于非完整井流问题, 为便于使用, 制作了 $d=0$ 条件的三维非完整性附加阻力系数 ζ 的表值及 $\zeta(r/M, z/M, l/M)$ 等值线分布图。

20) 对于若干近似解析模型用数值模拟加以对比, 以说明某些假定条件下获得解析解的误差。

21) 部分章节结构的变化, 主要是 Theis 井流等理论及其井流试验数据分析合并为一章。

22) 对某些理论、方法的缺陷, 哪怕是疑点, 也一并提出以供读者思考。增加了思考题, 并将习题、实验与教材合二为一, 以方便学生使用。

这里较详细地列出各版间内容上的差异, 使看过本教材上一版的读者只需稍花一点时间即可了解下一版的全貌, 也能大体了解本教材与其他教材的差异。

我国的同类教材, 需要提到的是印数较多的由南京大学等院校合编的《地下水动力学》(薛禹群等, 1979, 1986, 1997, 2010), 由于它们与笔者的《地下水不稳定井流计算方法》(1975/1983) 及《地下水动力学》(1996/1999, 2011) 教材的专业方向是一致的, 因而大部分内容也基本相似。但不得不遗憾地指出, 两者存在重大的理论分歧: 南京大学等院校合编的教材仍将“影响半径稳定井流模型”纳入教材, 还称其为 Dupuit 稳定井流模型, 并作为重点内容之一; 而笔者所撰写教材特别强调“影响半径”模型是对 Dupuit 模型的误传。地下水稳定井流的理论是地下水资源评价的基础, 不同的稳定井流理论必导致不同的“可持续开采量”的评价, 应当严肃对待, 不可掉以轻心。为了对学生和广大读者负责, 希望开展讨论, 以提高《地下水动力学》教材的质量, 防止严重错误的出现。

必须提到, 此期间还出版了若干各具侧重和特点的相关教材。《地下水非稳定流计算和地下水资源评价》(张蔚榛, 1983) 及《地下水与土壤水动力学》(张蔚榛, 1996), 是农田水利专业的地下水动力学教材, 以非饱和水动力学、地下水溶质运移理论及水平沟渠地下水动力学为其鲜明的特色。《地下水向井的非稳定流动原理及计算方法》(杨天行等,

1980) 以较完整地推导有关方程为其特点。另外, 还有 4 院校合编的《地下水动力学》(李俊亭等, 1987) 以及《地下水动力学》(郭东屏, 1994), 还有《地下水水力学的发展》(张宏仁等, 1992) 等都起到重要作用。

有几本国外的书籍对我国地下水动力学教材影响较大, 如《多孔介质流体动力学》(Bear, 1972) 和《地下水水力学》(Bear, 1979) 等。

(2) 本教材的特色

内容上追求科学性、系统性和严密性; 把重点放在基本概念、原理的阐明, 模型和建立模型基本条件的准确描述和应用上; 在分析的方法上尽力做到深入浅出, 数学模型的求解不脱离本专业数学教学大纲范围内的知识; 便于读者自学。内容的科学性、严密性是教材最基本的要求, 由于考证了 Dupuit 稳定井流为“圆岛模型”, 因此本教材在概念上严格区分 Dupuit 圆岛稳定井流模型、Thiem 影响半径稳定井流模型与 Theis 不稳定井流模型之间根本的差别, 以免导致概念上的混乱和地下水资源评价上的失误。

不同的观点、理论及方法进行公开的讨论、争辩, 是科学发展的必要。因此, 鲜明的观点和有针对性的评论、让读者进行对比判断, 是本教材的另一特色。为此本教材给出比较完整的参考文献, 特别是同类教材中不同观点的教材, 以鼓励读者查阅、对比不同文献的见解, 促进读者独立思考。笔者深刻地体会到, 教材的主要读者是学生, 给刚入门的学生以正确概念十分重要。一旦学生辨别不了错误的或模棱两可的概念, 纠正起来就困难了, 不少事实说明这一点。一个错误的概念与一个正确的概念让学生辨别是非, 可能相当一部分人会有正确的选择, 但一个错误的或模棱两可的概念直接地教给学生, 能指出老师错误的学生则极少了。另外, 如今“坚持真理, 发扬正气”这个科学工作者最基本的准则还得大力倡导。

笔者在编写本书过程中经常思考的一个问题: 作为一门主要的专业基础课程, 如何引导学生独立思考、促进创新思维的形成? 如何坚持“不唯上、不唯外、不唯书、只求真”的观念、树立批判性思维乃至鼓励“挑战权威的魄力”^①? 本教材希望对此做些尝试性的工作。笔者认为, “不仅教给学生以知识, 而且教给方法”是教育的进步, 然而似乎不足, 还需要把教学的目标提高到“不仅要学会解决问题的方法, 更应具有发

^① “中国的年轻学者对老师太尊重了, 挑战权威的魄力可能不够”。——美国科学院前院长、《科学》杂志主编艾伯茨。

现科学问题的思维能力并能够科学地提出问题”，“有的问题发现问题比解决问题更难。正确地提出科学问题，可以说这个问题已经解决了一半”。高层次专业人才的培养，应当以此为目标。

本教材撰写分工如下：第4~9章与10.1节、10.3节、10.4节和2.4节、2.6.1节、3.1.4节、3.3节及实验习题由陈崇希教授撰写，并统稿全书；第1~3章及第11章由林敏教授撰写，上述中的1.2.3节之(3)、5.4.1节之(2)及10.2节由王旭升副教授撰写；成建梅教授参与完成了本教材大量的修编工作；唐仲华教授编制有关非完整性附加阻力系数 ξ 的数值计算程序及其相关计算、制表与图件工作；胡立堂副教授撰写了10.1节部分初稿。

作者对地质出版社地质教材编辑室魏智如主任的热情支持，责任编辑李惠娣博士的辛勤工作表示感谢；对中国地质大学（武汉）水资源与水文地质系系主任万军伟教授对本教材出版的支持表示感谢；对唐仲华教授、王旭升副教授、胡立堂副教授对本教材撰写的支持和研究生们的辛勤劳动致以衷心感谢。限于笔者的水平，不妥和错误之处，恳请读者批评指正。对本书的批评、建议请发至电子信箱：ccx33@126.com。

陈崇希

2010年12月

目 录

前 言	
绪 言	(1)
第 1 章 地下水运动的基本概念与基本定律	(3)
1.1 地下水运动的基本概念	(3)
1.1.1 渗流与典型体元	(3)
1.1.2 渗流的运动要素	(4)
思考题	(7)
1.2 渗流基本定律	(8)
1.2.1 线性渗流定律及渗透系数	(8)
1.2.2 非线性渗流定律	(13)
1.2.3 各向异性介质中地下水的运动规律	(14)
思考题	(20)
实验规则	(20)
实验 I 不稳定渗流实验	(20)
1.3 地下水通过非均质介质突变界面的折射现象	(23)
思考题	(24)
1.4 流 网	(24)
1.4.1 各向同性介质地下水的流网特征	(25)
1.4.2 各向异性介质地下水的流网特征	(26)
思考题	(27)
第 2 章 地下水运动的基本微分方程及定解条件	(28)
2.1 渗流连续性方程	(28)
2.2 水和多孔介质的压缩性	(29)
2.2.1 地下水弹性储存的概念	(29)
2.2.2 水的压缩方程	(30)
2.2.3 多孔介质(岩土)的压缩方程	(31)
2.3 渗流基本微分方程	(32)
思考题	(37)
2.4 与含水层弹性变形有关的某些水文地质工程地质现象	(37)
2.4.1 地面沉降	(37)
2.4.2 潮汐效应	(38)
2.4.3 气压效应	(40)
2.4.4 外部荷载变化效应	(41)
2.4.5 固体潮效应	(43)

2.4.6	地震效应	(43)
	思考题	(44)
2.5	潜水流动的 Boussinesq 微分方程	(44)
2.5.1	Dupuit 假定	(44)
2.5.2	Boussinesq 微分方程	(46)
	思考题	(47)
2.6	定解条件及数学模型	(48)
2.6.1	定解条件	(48)
2.6.2	数学模型及其解法	(51)
第 3 章	地下水向河渠的运动及复杂坝下渗流计算	(52)
3.1	均质含水层地下水向完整河渠的流动	(52)
3.1.1	承压含水层地下水向完整河渠的稳定流动	(52)
3.1.2	无入渗潜水含水层地下水向完整河渠稳定流动	(53)
3.1.3	均匀稳定入渗的潜水向完整河渠的稳定流动	(58)
3.1.4	承压含水层地下水向完整河渠的不稳定流动	(63)
	思考题	(66)
	实验 II 渗流槽剖面二维流实验	(67)
3.2	非均质含水层地下水向完整河渠的稳定流动	(71)
3.2.1	分段法	(71)
3.2.2	等效厚度法	(76)
3.2.3	Гиринский 势函数法	(77)
3.2.4	积分法	(80)
	思考题	(82)
3.3	分段法在复杂坝下渗流计算中的应用	(84)
	思考题	(87)
第 4 章	Dupuit 稳定井流	(88)
4.1	Dupuit 稳定井流基本方程	(89)
4.1.1	Dupuit 稳定潜水井流	(89)
4.1.2	Dupuit 稳定潜水井流基本方程的讨论	(91)
4.1.3	Dupuit 稳定承压井流	(95)
	思考题	(97)
4.2	Thiem 模型与 Dupuit 模型的本质差别——历史回顾	(97)
	思考题	(99)
4.3	严格区分 Thiem 模型与 Dupuit 模型的地下水资源评价意义	(100)
	思考题	(101)
	实验 III Dupuit 型潜水稳定流井流实验	(101)
第 5 章	单含水层中地下水完整井流	(104)
5.1	无界含水层单个定流量井流	(104)
5.1.1	基本方程——Theis 公式	(104)
5.1.2	Theis 公式的讨论	(110)
5.1.3	井流试验数据分析	(118)

5.1.3.1	标准曲线拟合法	(118)
5.1.3.2	直线图解法	(122)
	思考题	(124)
5.2	井群干扰	(126)
5.2.1	点井渗流叠加法	(126)
5.2.2	面井法	(129)
5.2.3	多主井井流试验数据分析	(137)
	思考题	(139)
5.3	直线边界附近的井流——反映法	(139)
5.3.1	基本方程	(139)
5.3.1.1	半无限含水层	(140)
5.3.1.2	扇形含水层	(144)
5.3.1.3	带状含水层	(145)
5.3.1.4	矩形含水层	(148)
5.3.2	边界附近定流量井流试验数据分析	(149)
5.3.2.1	计算含水层参数	(149)
5.3.2.2	近似确定直线边界的位置	(158)
	思考题	(160)
5.4	变流量井流	(163)
5.4.1	基本方程	(163)
5.4.2	水位恢复试验数据分析	(165)
	思考题	(168)
5.5	无限含水层中单个定降深井流	(170)
5.5.1	基本方程	(170)
5.5.2	定降深井流试验数据分析	(173)
	思考题	(177)
5.6	瞬时抽/注水试验数据分析	(177)
5.7	确定井损系数和井孔有效半径的井流试验	(181)
5.7.1	概 述	(181)
5.7.2	阶梯流量井流试验	(185)
5.7.3	多次定流量井流试验	(185)
5.7.4	水位恢复试验	(188)
第 6 章	越流系统中的承压完整井流	(192)
6.1	第一类越流系统中的定流量井流	(192)
6.1.1	基本方程	(192)
6.1.2	井流试验数据分析	(196)
6.1.2.1	不稳定井流试验	(196)
6.1.2.2	稳定抽水试验	(208)
	思考题	(210)
6.2	第二类越流系统中的定流量井流	(211)
6.2.1	基本方程	(211)

6.2.1.1	定解问题的建立	(212)
6.2.1.2	定解问题的解	(213)
6.2.1.3	方程讨论	(215)
6.2.2	井流试验数据分析	(216)
思考题		(217)
6.3	第一类越流系统中的定降深井流	(218)
6.3.1	基本方程	(218)
6.3.2	井流试验数据分析	(220)
6.4	第二类越流系统中的定降深井流	(222)
第7章	均质各向异性含水层中的完整井流	(223)
7.1	概 述	(223)
思考题		(224)
7.2	基本方程	(225)
7.2.1	微分方程和定解条件	(225)
7.2.2	均质各向异性介质中渗流问题的解法——坐标变换法	(225)
7.2.3	均质各向异性含水层中定流量井流等降深线的特点	(229)
思考题		(231)
7.3	井流试验数据分析	(231)
7.3.1	具有等降深曲线资料的情况	(231)
7.3.2	缺乏等降深曲线资料的情况	(232)
第8章	承压非完整井流及源汇理论的应用	(236)
8.1	基本方程	(236)
8.1.1	控制方程和定解条件	(236)
8.1.2	降深方程	(238)
8.1.3	小 结	(244)
思考题		(244)
8.2	源汇理论及其应用	(245)
8.2.1	空间点汇	(245)
8.2.2	平面点汇	(248)
8.2.3	空间线汇	(249)
8.2.4	半无限空间线汇	(251)
8.2.5	有限空间线汇	(252)
8.2.6	抽水早期测压计降深的特点	(253)
思考题		(254)
8.3	井流试验数据分析	(254)
8.3.1	完整井流法	(254)
8.3.2	修正非完整性附加水头损失的直线图解法（用于各向同性含水层）	(254)
8.3.3	拐点法（用于各向同性含水层）	(255)
8.3.4	标准曲线拟合法（用于各向同性含水层）	(256)
8.3.5	$s-lgr$ 曲线图解法	(257)
思考题		(259)

第9章 二元结构含水系统及潜水含水层中的完整井流	(260)
9.1 概 述	(260)
思考题	(261)
9.2 二元结构含水系统完整井流	(261)
9.2.1 理 论	(261)
9.2.2 井流试验数据分析	(263)
思考题	(267)
9.3 考虑弹性释水的三维潜水井流模型	(268)
9.3.1 理 论	(268)
9.3.1.1 假定条件及定解问题的建立	(268)
9.3.1.2 降深方程	(269)
9.3.1.3 Neuman 解的特点	(271)
9.3.2 井流试验数据分析	(277)
9.3.2.1 抽水试验	(277)
9.3.2.2 水位恢复试验法	(283)
9.3.2.3 降深-距离标准曲线拟合法适用性的分析	(283)
9.3.2.4 雅可布修正法的应用	(284)
9.3.3 实例	(284)
思考题	(289)
第10章 特殊地下水井流等问题	(290)
10.1 地下水承压-无压井流	(290)
10.1.1 地下水承压-无压稳定井流	(290)
10.1.2 地下水承压-无压不稳定井流	(293)
10.1.2.1 Moench 模型——仿冻结/融解热传导模型	(293)
10.1.2.2 基于 Гиринский 势函数的近似解析模型	(293)
10.1.2.3 Moench 模型与笔者近似模型的对比	(298)
思考题	(298)
10.2 地下水水平井流	(298)
10.2.1 承压含水层内无限长水平井的解析解	(298)
10.2.2 承压含水层内有限长均匀线汇水平井的解析解	(299)
10.2.3 均匀线汇水平井模型的问题与改进	(302)
思考题	(302)
10.3 地下水混合井流	(302)
10.3.1 地下水稳定混合井流问题	(303)
10.3.2 地下水不稳定混合井流问题	(304)
思考题	(307)
10.4 岩溶含水层泉流量衰减的解析模型	(307)
10.4.1 Darcy 流态泉流量衰减模型	(307)
10.4.2 紊流态泉流量衰减模型	(309)
10.4.3 泉流量衰减系数物理意义的讨论	(311)
思考题	(311)

第 11 章 研究地下水运动的物理模拟方法	(312)
11.1 砂槽 (渗流槽) 模拟方法	(312)
11.1.1 砂槽结构	(312)
11.1.2 砂槽模拟的基本原理	(313)
11.2 连续型电模拟方法	(314)
11.2.1 连续型电模拟基本原理	(315)
11.2.2 电模型设计要求	(315)
11.2.3 模型的截取和合理简化	(316)
11.2.4 模型试验材料的选择	(317)
11.2.5 电模型的装置及工作方法	(317)
思考题	(319)
11.3 流网计算渗流区的运动要素及渗流量	(319)
11.3.1 水头值的确定	(319)
11.3.2 水力坡度的确定	(319)
11.3.3 渗透流速的确定	(320)
11.3.4 渗流量的确定	(320)
实验 IV 水电比拟实验	(321)
主要参考文献和非公开出版物	(324)
作者——陈崇希教授简介	(331)

附表	(335)
----------	-------

附表 1 无越流含水层定流量井流 Theis 井函数 $W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx$	(335)
---	-------

附表 2 无越流含水层定降深井流的降深函数	
$A(\bar{r}, \bar{t}) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{J_0(u)Y_0(\bar{r}u) - Y_0(u)J_0(\bar{r}u)}{J_0^2(u) - Y_0^2(u)} \exp(\bar{t}u^2) \frac{du}{u}$	(338)

附表 3 矩形面井井函数 $S^*(\alpha, \beta) = \int_0^1 \operatorname{erf}\left[\frac{\alpha}{\sqrt{\tau}}\right] \operatorname{erf}\left[\frac{\beta}{\sqrt{\tau}}\right] d\tau$	(340)
---	-------

附表 4 第一类越流系统的定流量井函数	
$W\left(u, \frac{r}{B}\right) = \int_u^\infty \frac{1}{y} \exp\left(-\left(y + \frac{r^2}{4B^2y}\right)\right) dy$	(343)

附表 5 虚宗量零阶第二类贝塞尔函数 $K_0(x)$	(350)
-----------------------------------	-------

附表 6 e^x 、 $K_0(x)$ 、 $e^x K_0(x)$ 、 $W(x)$ 、 $e^x W(x)$ 函数表	(353)
--	-------

附表 7 第二类越流系统定流量井函数 $H(u, \beta) = \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} \operatorname{erfc}\left(\frac{\beta\sqrt{u}}{\sqrt{y(y-u)}}\right) dy$	(358)
--	-------

附表 8 第一类越流系统定降深井流流量函数	
$G(\bar{t}, \frac{r_w}{B}) = \frac{r_w}{B} \frac{K_1(r_w/B)}{K_0(r_w/B)} + \frac{4}{\pi^2} \exp\left(-\bar{t}\left(\frac{r_w}{B}\right)^2\right) \int_0^\infty \frac{u \cdot \exp(-\bar{t}u^2)}{J_0^2(u) + Y_0^2(u)} \cdot \frac{du}{u^2 + (r_w/B)^2}$	(360)

附表 9 $\operatorname{erf}(x)$ 和 $f(x) = x \exp(x^2) \operatorname{erf}(x)$	(363)
---	-------