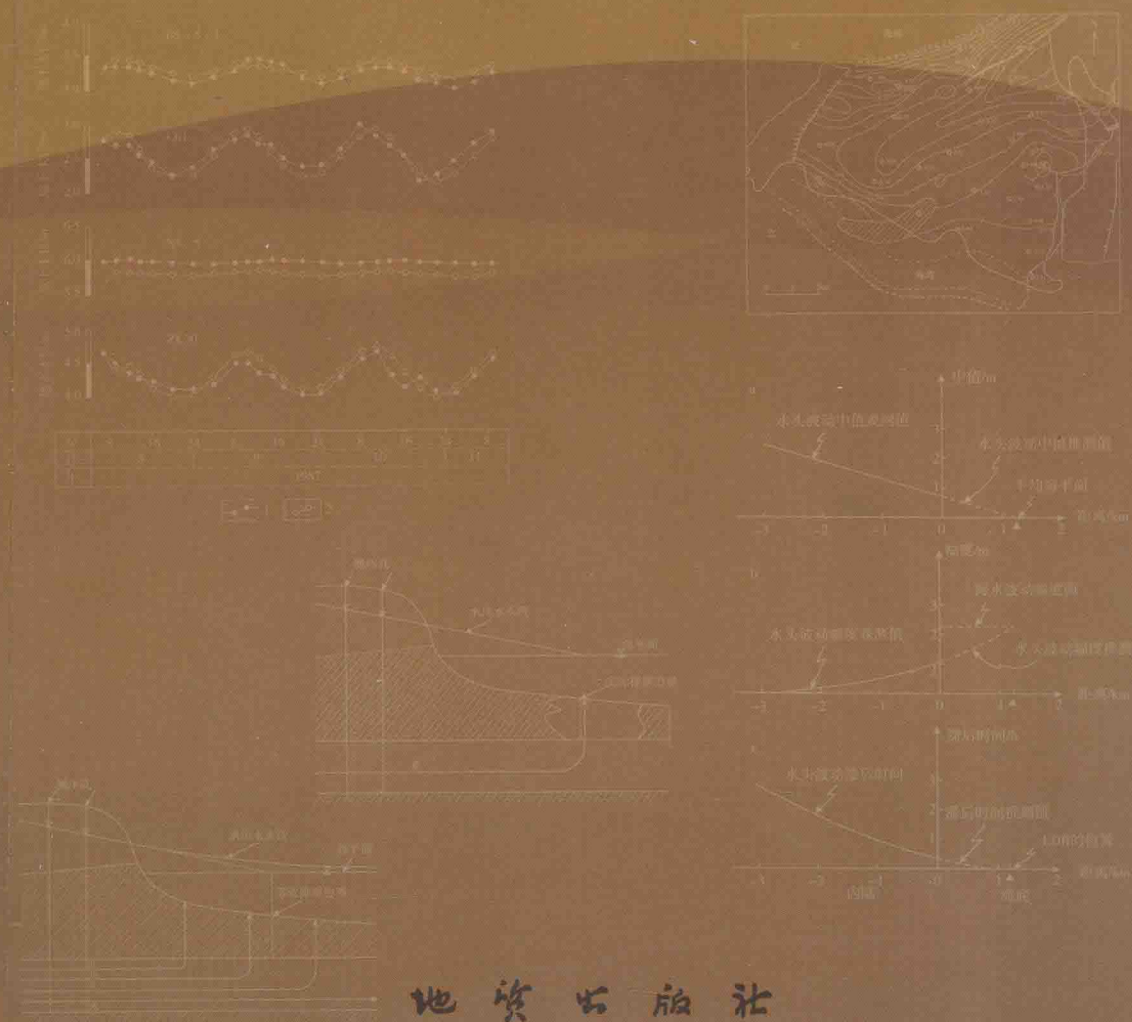


普通高等学校教材

地下水流数值模拟理论方法及模型设计

陈崇希 等著



地质出版社

中国地质大学研究生培养模式与教学改革项目资助
地下水与环境国家教学团队资助

地下水流数值模拟 理论方法及模型设计

陈崇希 唐仲华 胡立堂 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是1990年出版的《地下水流动问题数值方法》提升为大学生-研究生合二为一的教材。本教材仅保留地下水流动问题概述(第1章)、地下水流有限差分法(第2章)、迦辽金有限元法(第3章)、反求水文地质参数的数值方法(第6章)等4章,并全面提升为三维流问题。在此基础上,重点增加第4章边界条件和源汇等特殊问题的模拟与处理(包括混合抽水井、自流井、水平井和混合观测孔、非完整河-地下水的补给-排泄、降雨入渗补给滞后性、海边界、岩溶管道-裂隙-孔隙三重介质含水系统、地下水开采-地面沉降模拟等17项)和第7章数值模型设计、应用及水文地质勘查(包括数值模型中含水系统模拟层的划分、格/结点布设、模型识别的两个原则、形成初始条件问题的 s_0 法和 $P-H_0$ 法、模型反演过程中的几个问题及“拟合总是不佳”原因的分析;地下水流系统建模的模型维数问题、模型垂向范围的划定、模型边界的划定;预测模型若干问题及关于基岩含水系统建模特殊问题等。本章从正反经验实例中提取40多个专题信息进行分析 and 讨论),以及地下水流模型的拓展(地下水饱和-非饱和流耦合模型、地表水-地下水耦合模型以及分布式水文模型简介)和第8章数值模拟技术报告实例:陕西渭东北部岩溶水开采动态数值模拟研究(体现“模型识别过程是对水文地质条件的再认识”原则)等。

本书为高等学校水文与水资源工程、地下水科学与工程、地质工程、水文地质工程等相关专业本科和研究生的教材或参考书,也可供从事定量地下水科学研究和工程勘查人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下水流数值模拟理论方法及模型设计 / 陈崇希等

著. —北京:地质出版社,2014.2

ISBN 978-7-116-08718-7

I. ①地… II. ①陈… III. ①地下水—数值模拟—研究 IV. ①P641.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第023892号

责任编辑:李惠娣

责任校对:黄苏晔

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:22.75

字 数:570千字

印 数:1—1500册

版 次:2014年2月北京第1版

印 次:2014年2月北京第1次印刷

定 价:45.00元

书 号:ISBN 978-7-116-08718-7

(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

我国大学本科相关专业的“地下水流数值方法”的教材已有几本，它们为数值模拟教学提供了必要的基础。然而这几本书总体上仍属于教学型高等院校的教材，已经不能满足当今社会、经济发展的需求。因此，需要一本研究生教材或大学本科—研究生统一教材。纵观国内外相关数值模拟的教材、专著和软件，一个共同的问题是对某些水文地质元素或问题（例如混合抽水井、混合观测孔、自流井、水平井、各类泉、非完整河与地下水流间的补排关系及转化关系、入渗补给的滞后性、岩溶管道-裂隙-孔隙三重介质的地下水流、初始水头分布、地下水开采-地面沉降以及含水系统的海边界等）的模拟与水流机理有不相符合之处。笔者（2003）认为，“防止模拟失真，提高仿真性是数值模拟的核心”，因此本教材强调水文地质诸模拟元素的仿真性，把分析控制水流的因素、提出符合机理的或更合理的模拟方法作为重点；同时针对当前教材与软件等通常忽视和缺少模型设计方面系统的内容，导致某些成果因此失误，本书专门增加了这方面的内容。

1. 历史回顾

我国地下水数值模拟 20 世纪 70 年代中期才起步（与地下水不稳定井流理论几乎同时），比国外晚 10 余年。在那时，出现了一批数学工作者，包括肖树铁（北京大学、清华大学）、孙讷正（山东大学）、谢春红（南京大学）、杨天行（原长春地质学院）和陈明佑（原北京地质学院）等，他们与水文地质工作者合作，在学习研究国外数值模拟方法及开发计算程序方面起了重要作用。1980 年，山东大学数学系孙讷正老师倡议，依靠产业单位召开水文地质勘查成果验收会之机，邀请从事地下水数值模拟的同仁聚会，交流国内关于地下水数值模拟中的问题及探讨国际上的发展趋势。这一倡议得到张蔚榛、肖树铁等老师的支持。这些活动对推动和发展我国地下水数值模拟发挥了积极作用。

学习研究和实践应用是齐头并进的。1975 年，北京大学数学系肖树铁、陈华惠等采用有限元法对河北王窑铁矿排水问题进行了数值模拟；山东大学数学系孙讷正等采用有限差分法模拟了山东莱芜铁矿排水问题。他们为我国地下水数值模拟的应用开了先河，并应中国地质科学院水文地质研究所之邀，与“地下水不稳定井流计算方法”一起，首次面向全国开办了为期三个月的地下水定量计算培训班；20 世纪 80 年代初，张宏仁和李俊亭为北方各省举办了多期有限差分培训班；这些，为我国发展和推广地下水动力学两大分支（解析法和数值法）做出了贡献。

从 20 世纪 70 年代末开始，我国陆续出版了一系列涉及地下水数值模拟的教材和专著。比较具代表性的有：薛禹群、谢春红的《水文地质学的数值法》

(1980), 孙訥正的《地下水流的数学模型和数值方法》(1981), 王秉忱、杨天行等的《地下水污染地下水水质模拟方法》(1985), 林学钰、侯印伟、邹立芝等的《地下水水量水质模型及管理程序集》(1988), 罗焕炎、陈雨荪的《地下水运动的数值模拟》(1988), 雷志栋等的《土壤水动力学》(1988), 孙訥正的《地下水污染——数学模拟和数值方法》(1989), 李俊亭等的《地下水流数值模拟》(1989), 陈崇希、唐仲华的《地下水流问题的数值方法》(1990), 朱学愚、谢春红的《地下水运移模型》(1990), 薛禹群、谢春红的《海水入侵咸淡水界面运移规律研究》(1991), 张蔚榛等的《地下水与土壤水动力学》(1996), 陈崇希、李国敏的《地下水溶质运移理论及模型》(1996), 王文科的《地下水有限分析数值模拟的理论与方法》(1996), 陈崇希、林敏等的《地下水混合井流理论与应用》(1998), 陈崇希、林敏等的《地下水开采-地面沉降数值模拟及防治对策研究》(2001), 成建梅、李国敏、陈崇希的《滨海海岛海水入侵数值模拟研究》(2003), 薛禹群、谢春红的《地下水数值模拟》(2007), 杨金忠、蔡树英、王旭升的《地下水运动数学模型》(2009)等。这些教材和专著在撰写角度、专业需求上各不相同, 但大体上反映了我国当时地下水数值模拟领域的发展水平。这个时期也出现了若干有价值的研究论文, 如张宏仁和李俊亭的《解地下水流的不规则网格有限差分法》(1982)、张宏仁的《解渗流问题数值方法对比》(1984)和《有限元法的水头反常问题》(1992)等。上述成果对于地下水数值模拟理论和方法在我国的传播起到了推动作用。

由以上所列可见, 我国从事地下水数值模拟的科学工作者, 几十年来历尽艰辛, 在开拓地下水数值模拟方面取得了丰富的成果, 为我国经济社会和学科的发展做出了很大的贡献。然而个别著作对此却未客观阐述, 是件遗憾的事。

2. 本教材的主导思想

本教材注重思辨性。笔者认为, 把不同的观点一起讨论、争辩是科学发展的必要。基于此, 本教材与2011年出版的《地下水动力学》(第五版)一样, 把同类问题不同的模拟、处理方法, 不同的模型设计思想尽量摆在读者面前, 并给出比较完整的参考文献, 以鼓励读者查阅、对比, 促使读者独立思考, 培养具有创新思想的人才。本教材坚持“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”。

本教材注重对科学问题提出的思维分析。笔者(1966, 2011)认为, “不仅教给学生以知识, 而且要教给方法”是教育的进步, 然而似乎还不够, 还需要把教学的目标提高到“不仅要学会解决问题的方法, 更要学会发现科学问题的思维能力并能够科学地提出问题。”这种问题导向的教育方式, 有利于高层次专业人才的培养。

此外, 多年来地下水数值模拟领域积累了许多正面和负面经验的实例, 这些都是宝贵的学术财富, 为此, 我们在教材中引入并分析正、负面的实例, 以提高学生的视野和辨别能力。典型实例有多种来源, 除了选自公开发表的文献外, 也有部分来自技术报告、送审稿及会议讨论等(前者都已标注了文献出处)。当然,

难免有遗漏,敬请读者提供信息,以便再版时参考。本书在评述中提出的一些见解可能有不妥之处,对此欢迎公开讨论和争鸣。笔者希望本教材能够倡导并体现“我爱我师,我更爱真理”和“坚持真理,发扬正气”的科学精神。

提高模型的可靠性,是模拟工作者追求的目标。就此,笔者认为应从下列两个方面下功夫:①对诸模拟元素始终追求符合机理的模拟方法或处理方法;②合理进行水文地质条件的概化(不可失真),提高模型设计的水平。

人们都主张重视水文地质条件和流动机理的分析,但从一些实例来看却并不尽然。笔者认为,模拟工作的“短平快”要不得,单纯地追求“拟合”也是不对的,只有在合理概化水文地质模型,采用正确、合理的仿真技术基础上,才有真正意义上的“拟合”。模型识别过程中,不仅要“时时把握依水文地质条件来调整有关参数和分区等”,而且应该意识到“模型识别过程是对水文地质条件的再认识”。这看来是矛盾的,但却是对模拟者基本的要求,也可以作为评估模拟者综合素质水平的准则。模拟是对前期所有水文地质勘查成果的综合、升华及量化提高,许多重要结论(地下水可持续开采量的评价、地面沉降、海水入侵、生态环境保护、矿山排水、岩溶塌陷及水利工程相关问题等)都出自模拟结果,一切后续的管理措施由此而产生,关系重大。因此,模拟工作者应该高度负责地完成任务,这也是对前人从野外现场艰苦获得水文地质勘查成果的尊重。模型建设和模拟过程的确需要耗费很多时间和一定的经费,但野外的水文地质勘查所投入的经费更多、工期更长、工作更艰苦,积累的数据资料来之不易,绝不应由于缺乏责任心、不严谨的模拟工作使成果不能应用,甚至无后续的水资源-环境管理所必需的模拟预测而不了了之(如[例7.2.28])。

3. 本教材内容简介

笔者不想将本书撰写成地下水数值模拟的“大全”,而是强调理论、模拟方法的创新以及应用上的可操作性。从研究对象上看,本教材主要研究的是水流问题。然而,只要水流问题某水文地质元素的模拟方法有所改进、有所创新,那么地下水可持续开采量评价模型及地下水开采-海水入侵(热运移)模型、地下水开采-地面沉降模型及地下水开采-生态环境模型等的地下水对流项即可直接应用而提高模拟的仿真度,因此水流问题是这几类模型的基础。

在内容上,“地下水流定解问题概述”(第1章)、“地下水流有限差分法”(第2章)、“迦辽金有限元法”(第3章)和“反求水文地质参数的数值方法”(第6章)作为基础部分,并将其全部提升为三维模型,约占全书的三分之一强。基于“防止模拟失真,提高仿真性是数值模拟核心”的思想,本教材十分重视模拟方法的创新性和实用性。这部分内容集中反映在“边界条件和源汇等特殊问题的模拟与处理”(第4章)和“数值模型设计、应用及水文地质勘查”(第7章)两章。

作为本书教材重点的第4章“边界条件和源汇等特殊问题的模拟与处理”,一共讨论了17个问题。

首先,对于井孔-含水系统水流问题,引入笔者1992年基于广西北海混合抽水试验场的研究成果“渗流-管流耦合模型”,替代传统的纯渗流模型,从而使混

合抽水井流、自流井流、水平井流和三维流中常规观测孔等元素的模拟符合水流机理,大大提高了模拟的仿真性。这一成果逐渐得到国内外学界的认可和重视。需要指出的是,国外广泛流行的地下水模拟软件,如 MODFLOW、FEFLOW 等,对于上述四项地下水流元素的模拟——“井孔-含水系统模型”是其弱点。

其次,提出或引入理论上成立且便于使用的抽水井水位校正方法、井孔表皮效应(井周扰动效应)的处理方法、面井内抽水井水位降深的计算方法和非完整抽水井附近短滤管非完整观测孔水位的校正方法等问题的解决方法,对地下水模拟经常遇到的泉流模拟、非完整河与地下水之间补给-排泄模拟、降雨入渗补给滞后性的刻画、潜水蒸发排泄的处理和初始水头条件的确定等问题给出了模拟或处理方法。

再次,讨论了四项特殊问题的模拟方法,包括海边界、岩溶含水系统以及流速、流量的计算和地下水开采引发地面沉降等问题。如何确定地下水系统的海水边界,是滨海模型不可回避的问题。本教材基于笔者(1986~1988)提出的“海底等效边界”的理论及其潮汐效应识别方法,为确定海边界提供了技术依据,可避免某些滨海模型取海岸线直立面为边界的错误做法,也优于某些模型无依据地任意向海里延伸一定距离作为边界的做法。如何建立强岩溶化含水系统的地下水模型,是公认的难题,本教材阐述了笔者(1995)提出的“岩溶管道-裂隙-孔隙三重介质地下水流模型”并用相关实例进行了讨论。地下水开采-地面沉降问题是通常所谓地下水开采引发的三大环境问题之一(还有海水入侵和生态环境恶化),其核心是如何把地下水流过程与含水介质的固结过程耦合起来。国外普遍采用“两步法”——先求解准三维流问题,再根据所得的水头(水压/有效应力)变化计算介质的垂直一维固结变形。本教材引入笔者(1997~2000)研究苏州市地面沉降的模拟成果,认为(准)三维渗流-一维固结机理寓于地下水不稳定流“弹性释水”原理中,即不稳定流的水头解中已体现含水介质的固结,因而采用一步到位的方法同时模拟了三维水流-一维固结变形,简化计算步骤并提高了模拟的仿真性。此外,讨论了数值模型中流速(流量)的计算问题。

由于公开发表的有关地下水数值模拟的论文、专著有限,而搜集非公开的相关技术报告又十分困难,本教材引入的改进模拟方法,既非全部,更不是终点。

第5章“地下水流模型的拓展”包括地下水饱和-非饱和流耦合模型、地下水-河流耦合模型以及分布式水文模型简介,以使读者有一个比较完整的水循环及相关控制因素的概念,了解地下水流处于整体水循环过程中的地位及其与周围水的关系。

本教材的另一重点是第7章“数值模型设计、应用及水文地质勘查”。这一章内容以往的教材基本未涉及,但模型设计是数值模拟方法从学习阶段到应用阶段的必由之路,一些模拟成果的失真正是出在模型设计这个环节上。本章还通过较多的实例对比进行剖析。

内容上,本章介绍了模型设计的一般步骤,并重点阐明以下几点:数值模型中含水系统模拟层的划分、格/结点(剖分)设置方案、模型识别的两个原则、形

成初始条件问题的 s_0 法和 $P-H_0$ 法、模型反演过程中的几个问题及“拟合总是不佳”的原因分析等。本章还用较多篇幅讨论了地下水流系统建模涉及的模型维数问题、模型垂向范围的划定、模型边界的划定（含滨海模型的海边界）等问题。其中重点分析边界划定涉及“目标研究区”的人为边界问题。人为边界必需外扩，最好使模拟区扩大到自然边界，或者扩大到预测期内不致明显改变水头或流量的人为边界处，尽量减少人为边界对重点研究区的预测带来不利影响。此外，对两个理论模型问题、预测模型若干问题、关于基岩含水系统建模的特殊问题以及数值模型水文地质勘查等若干问题也进行了探讨。本章从正反经验实例中提取 40 多个专题信息进行分析和讨论，以提高实用价值和借鉴作用。

最后，第 8 章以陕西渭北东段岩溶水系统作为实例，采用案例式的方法完整呈现一个区域地下水的数值模拟工作，这是本书的详细提纲征求同行专家的意见后而增加的。其重点在于体现“模型识别过程是对水文地质条件的再认识”。这是笔者提出的模型识别两原则之一，供读者参考。另外，案例文本也为撰写数值模拟技术报告提供参照。

本书保持笔者（1983，1990，2011）不同于其他教材的特点是，避开地下水稳定流问题，而直接对地下水不稳定流问题建立有关方程及编制程序。这是由于实际问题大多属于不稳定流。为使这类问题有完整、系统地推导，我们不采用一般文献先叙述稳定流，再进而讨论不稳定流的编写方法，如此可避免两个推导过程过多的重复，或导致最常用的不稳定流问题的阐述不够完整之弊病。对地下水稳定流问题，只要令其中的 $\partial H / \partial t = 0$ （或 $\mu = 0$ ），整个推导过程及计算机程序都会有效。

本教材所介绍的各种方法，具有相对的独立性，以便不同层次的读者可以相对独立地选取有关章节阅读。在数值方法介绍之后，附有 FORTRAN 77 语言编写的程序，全书共计 13 个，供上机实习之用。为加强理论联系实际的教学环节，在相应部分还附有少量习题。

本教材的第 1、2 章（或加上第 3、6 章）及第 4、7、8 章部分内容可作为大学本科生学习地下水流数值模拟的基础，其他部分可作为研究生或从事数值模拟的水文地质工作者学习和参考。对于某些数值模拟课时不多而重应用的专业，也可直接学习三维流有限差分法及第 4、7 和 8 章的有关内容。

本教材内容的设计，出于笔者长期的思考：如何将研究生与本科生教材相统一；如何建设由教学型转向研究型高等学校的教材；如何使教材满足地下水特色专业的需要等，进行了尝试。

近些年来，学术界出现违背学术诚信之风，有识之士呼吁加强学术道德教育。本教材对此的尝试也有所体现。

基于本书的重点第 4 章边界条件、源汇等特殊问题的模拟与处理和第 7 章数值模型设计、应用及水文地质勘查等的内容，将书名定为《地下水流数值模拟理论方法及模型设计》，以体现本教材的特色和区别其他同类文献。

七八年前，有朋友曾建议笔者将所完成的模拟实例成果主要内容汇编出版，

考虑到以实例为主体的撰写方法,虽然一个实例体系较完整,易读,但重复性的内容难以避免。现今将其提取为第4、7、8章而编入教材,虽然实例的完整性上有所欠缺,但简明的应用却紧密地联系着某一理论的分析。为此总结诸水文地质元素的模拟方法和模型设计。本版教材的出版也完成了作者的心愿。

本教材撰写分工如下:第1、3、6章由唐仲华教授和陈崇希教授撰写;第2章由陈崇希教授和唐仲华教授撰写;第5章由胡立堂副教授撰写;陈崇希教授撰写第4、7、8章并统稿全书。

为了节约篇幅和方便读者,本书中所涉及的源程序及PGMS(基于多边形网格的三维地下水流有限差分模拟系统,2.0版。中华人民共和国国家版权局计算机软件著作权登记证书号:软著登字第0516401号)教育版未列在文中,有兴趣的读者可向唐仲华老师(zhhtang@qq.com)或胡立堂老师(litanghu@sina.com.cn)索取电子文档。

作者对李俊亭、孙连发、杨金忠和王旭升等教授阅读本书部分初稿并提出建议,及刘文波高级工程师模拟了第8章的实例和部分内容的撰写,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

2012年7月12日于北京

目 录

前 言

第 1 章 地下水流定解问题概述	(1)
1.1 地下水流微分方程	(1)
1.1.1 地下水三维不稳定流微分方程	(1)
1.1.2 地下水稳定流微分方程	(3)
1.2 定解条件及定解问题	(4)
1.2.1 边界条件	(4)
1.2.2 初始条件	(7)
1.2.3 描述地下水流的定解问题	(7)
第 2 章 地下水流有限差分法	(8)
2.1 有限差分法的基本思想	(8)
2.2 导数的有限差分近似表示	(10)
2.3 承压一维流有限差分法	(12)
2.3.1 一维显式有限差分法	(12)
2.3.1.1 一维显式差分方程的建立	(12)
2.3.1.2 一维显式差分方程问题的求解方法	(14)
2.3.1.3 求解一维显式差分方程的计算机程序	(15)
习题 2.3.1	(16)
2.3.1.4 差分格式的收敛性	(16)
2.3.1.5 差分格式的稳定性	(18)
2.3.2 一维隐式有限差分法	(24)
习题 2.3.2	(29)
2.3.3 一维六点对称差分格式	(32)
习题 2.3.3	(36)
2.3.4 第二类边界条件的处理	(36)
2.4 承压二维流有限差分法	(38)
2.4.1 二维显式有限差分法	(38)
习题 2.4.1	(42)
2.4.2 二维隐式有限差分法	(42)
习题 2.4.2	(46)

2.4.3	二维十点对称差分格式 (Crank—Nicolson 格式)	(46)
2.4.4	二维交替方向隐式差分法 (ADI 法)	(47)
习题 2.4.4		(50)
2.4.5	越流、入渗和抽水井等问题的处理	(50)
2.4.6	非均质含水层变格距矩形网格有限差分法	(51)
习题 2.4.6		(55)
2.4.7	时间步长和格距	(56)
2.5	无压二维流有限差分法	(56)
2.5.1	显式差分法	(57)
2.5.2	显-隐式差分法	(58)
2.5.3	隐式差分法	(58)
2.5.4	预测-校正法	(59)
2.5.5	ADI 法与预测-校正法的结合	(60)
习题 2.5		(61)
2.6	三维流多边形 (棱柱体) 网格有限差分法	(61)
2.6.1	渗流区的剖分及多边形均衡网格的形成	(62)
2.6.2	多边形棱柱均衡网格的差分方程的建立	(62)
2.6.3	多边形网格差分方程的解法	(65)
2.6.4	求解 (任意) 多边形网格差分方程的计算机程序	(66)
习题 2.6		(67)
第 3 章	迦辽金有限单元法	(68)
3.1	承压水二维不稳定流动问题的迦辽金方程	(68)
3.2	三角形单元迦辽金有限元法	(70)
3.2.1	三角形单元剖分与基函数的构造	(70)
3.2.2	三角形单元迦辽金有限元方程	(74)
3.2.3	三角形单元有限元法与有限差分法的对比	(86)
3.2.4	三角形单元有限元法计算机程序	(87)
习题 3.2.4		(89)
3.3	矩形单元迦辽金有限元法	(89)
3.3.1	矩形单元剖分与基函数的构造	(89)
3.3.2	矩形单元迦辽金有限元方程	(92)
3.3.3	矩形单元有限元法计算机程序	(105)
3.4	任意四边形等参有限单元法	(106)
3.4.1	坐标变换	(107)
3.4.2	任意四边形有限元方程系数矩阵的计算	(108)
3.4.3	例题及任意四边形单元等参有限元法计算机程序	(112)

3.5 无压流问题的有限单元法	(114)
习题 3.5	(115)
3.6 地下水三维不稳定流问题四面体迦辽金有限元法	(115)
3.6.1 三维不稳定流问题迦辽金方程	(116)
3.6.2 单元剖分和线性插值	(117)
3.6.3 四面体单元迦辽金有限元法	(119)
3.6.4 四面体单元有限元法计算机程序	(123)
第4章 边界条件和源汇等特殊问题的模拟与处理	(125)
4.1 混合抽水井的模拟	(125)
4.1.1 概述	(125)
4.1.2 混合抽水井模拟方法——“渗流-管流耦合模型”的提出	(128)
4.1.3 混合抽水试验确定分层水文地质参数实例——北海混合抽水 试验场	(131)
习题 4.1	(132)
4.2 自流井的模拟	(133)
习题 4.2	(133)
4.3 水平井的模拟	(134)
习题 4.3	(136)
4.4 混合观测孔水位的模拟	(137)
4.5 非完整抽水井附近短滤管非完整观测孔水位的校正	(140)
4.5.1 问题的提出	(140)
4.5.2 校正方法	(141)
4.6 抽水井水位的校正	(143)
4.6.1 问题的提出	(143)
4.6.2 承压含水层完整井	(143)
4.6.3 无压含水层完整井	(146)
4.6.4 承压含水层非完整井	(146)
4.7 井周扰动效应(井孔表皮效应)的处理	(147)
4.8 面井内抽水井水位降深的计算	(148)
4.9 泉的模拟	(150)
4.10 河流与地下水间补给、排泄的模拟	(151)
4.10.1 完整河	(152)
4.10.2 非完整河	(152)
4.10.2.1 非完整河底面上存在弱透水层	(153)
4.10.2.2 非完整河底面上无弱透水层	(154)
4.11 降雨、河渠等入渗补给滞后性的刻画	(155)

4.12	潜水蒸发排泄的处理	(159)
4.13	初始水头条件的模拟	(160)
4.14	含水系统海边界问题	(161)
4.14.1	问题的提出	(161)
4.14.2	承压含水层的海边界确定方法	(161)
4.15	数值模型中流速(流量)的计算问题	(165)
4.16	岩溶含水介质地下水流模型	(166)
4.16.1	岩溶含水介质的空隙及其水动力特征	(166)
4.16.2	三重空隙介质地下水流模型的建立	(167)
4.16.3	三重空隙介质地下水运动的模拟方法	(169)
4.16.4	理想模型的模拟	(169)
4.16.5	小结	(171)
4.17	地下水开采-地面沉降模型	(172)
4.17.1	建立准三维流模型,还是三维流模型?	(172)
4.17.2	地面沉降(土层固结)与地下水流如何耦合?	(173)
4.17.3	土层固结过程中参数如何考虑?	(173)
4.17.4	软土层的固结滞后于含水层水头的变化如何刻画?	(175)
第5章	地下水流模型的拓展	(176)
5.1	地下水饱和-非饱和流耦合模型	(176)
5.1.1	基本概念	(176)
5.1.2	含水率和非饱和土渗透系数关系的经验公式	(177)
5.1.3	地下水饱和-非饱和水流模型控制方程的推导	(178)
5.1.4	地下水饱和-非饱和水流模型的定解条件	(180)
5.1.5	地下水饱和-非饱和水流模型的数值模型	(181)
5.1.6	地下水饱和-非饱和流动问题实例分析	(182)
5.2	地表水-地下水流耦合模型	(186)
5.2.1	地表水-地下水流耦合模型分类	(186)
5.2.2	地表水与地下水转化量的计算方法	(189)
5.2.3	地表水和地下水流模型耦合的流程	(190)
5.3	分布式水文模型简介	(192)
5.3.1	水文过程概述	(192)
5.3.2	分布式水文模型涉及的主要模拟元素的物理机制与模拟方法	(193)
第6章	反求水文地质参数的数值方法	(196)
6.1	反求参数问题的适定性	(196)
6.1.1	解的唯一性	(196)
6.1.2	解的稳定性	(197)

6.2	反求参数的直接方法	(200)
6.3	反求参数的间接方法	(201)
6.3.1	试估-校正法	(201)
6.3.2	最优化方法	(202)
第7章	数值模型设计、应用及水文地质勘查	(206)
7.1	数值模型设计及应用主要步骤	(206)
7.1.1	明确目标任务	(206)
7.1.2	水文地质资料收集	(206)
7.1.3	水文地质概念模型设计	(206)
7.1.4	数学模型的建立	(207)
7.1.5	数值模型的建立	(207)
7.1.6	数值模拟预测	(207)
7.2	水文地质概念模型设计	(208)
7.2.1	模型基本类型的论证	(208)
7.2.1.1	建模维数问题及其不同意见	(209)
7.2.1.2	稳定流/不稳定流模型问题	(218)
7.2.2	模型空间范围-边界的划定	(218)
7.2.2.1	模型空间范围必须包括“目标研究区”	(220)
7.2.2.2	“目标研究区”的人为第一类边界必须外扩	(220)
7.2.2.3	模拟区扩大到自然边界	(220)
7.2.2.4	模拟区扩大到预测期内不致明显改变水头或流量的 人为边界处	(228)
7.2.2.5	尽量减少人为边界对重点研究区的预测带来不利影响	(229)
7.2.2.6	正确建立滨海含水系统模型的海向边界条件	(231)
7.2.2.7	垂向范围的划定	(239)
7.2.2.8	几个理论模型问题	(240)
7.3	数值模型的建立	(246)
7.3.1	含水系统模拟层的划分与分区	(246)
7.3.1.1	岩性剖面图	(246)
7.3.1.2	孔隙含水系统划分为偶数层	(246)
7.3.1.3	划分的总层数问题	(246)
7.3.1.4	分层方法	(246)
7.3.2	格/结点(剖分)设计	(248)
思考题 7.3.2		(250)
7.3.3	时间步长	(251)
7.3.4	各格/结点给定参数值	(251)

7.3.5	边界条件	(253)
7.3.6	初始条件	(253)
7.3.7	水文地质模拟元素的梳理及选择模拟软件或自编程序	(253)
7.3.8	模型识别	(254)
7.3.8.1	模型识别两原则	(254)
7.3.8.2	初始条件问题: s_0 法和 $P-H_0$ 法	(255)
7.3.8.3	模型识别方法及注意问题	(257)
7.3.8.4	“拟合总是不佳”的分析	(260)
7.3.8.5	灵敏度分析	(262)
7.3.8.6	模型检验	(263)
7.4	预测模型若干问题	(264)
7.4.1	概述	(264)
7.4.2	预测的初始条件	(265)
7.4.3	无压流导水系数 T 的动态设定	(265)
7.4.4	无压流重力给水度的动态设定	(266)
7.4.5	预测模型中“等效参数”的处理	(266)
7.4.6	预测模型边界条件问题	(267)
7.4.7	预测模拟的预测时间问题	(267)
7.4.8	地下水可持续开采量的数值模拟问题	(271)
7.5	关于基岩含水系统建模的特殊问题	(271)
7.5.1	基岩含水系统分层问题	(271)
7.5.2	断层问题	(272)
7.5.2.1	分层问题	(272)
7.5.2.2	格/结点设置问题	(272)
7.5.2.3	剖面上格/结点的设置	(273)
7.5.3	大降深预测模型中裂隙-岩溶介质渗透系数的赋值问题	(273)
7.5.4	岩溶含水系统渗透系数/导水系数的赋值问题	(275)
7.5.5	岩溶泉问题	(275)
7.5.6	热水深观测孔水位的拟合问题	(276)
7.5.7	古近-新近系半胶结的砂质泥岩-粉砂岩可否作为隔水层 处理的问题	(276)
7.6	数值模型水文地质勘查等若干问题	(276)
7.6.1	非完整河河床岩性结构渗透系数的获取	(276)
7.6.2	非完整河傍河抽水试验的设置(带观测孔)	(276)
7.6.3	地下水浅埋强蒸发区地形标高数据	(276)
7.6.4	设置“水中蒸发皿”确定水稻田的入渗补给强度	(277)

7.6.5	设置沿河的水位观测站甚至流量观测	(277)
7.6.6	泉口标高的测量	(277)
7.6.7	采用解析方法预先进行模型识别	(278)
7.6.8	水文地质勘查设计书应提出拟建的水文地质概念模型	(278)
7.6.9	抽水试验设计	(278)
7.6.9.1	主井位置的选择	(278)
7.6.9.2	观测孔的布置	(279)
7.6.9.3	抽水试验前水位动态的观测	(279)
7.6.9.4	抽水试验流量设计	(279)

第8章 数值模拟技术报告实例：陕西渭北东部岩溶水开采动态数值模拟

研究	(280)
8.1 自然地理及地质-水文地质条件	(281)
8.1.1 自然地理	(281)
8.1.2 地质-水文地质条件	(283)
8.1.2.1 地质概况	(283)
8.1.2.2 水文地质概况	(284)
8.2 模型	(289)
8.2.1 水文地质概念模型	(289)
8.2.1.1 模型的特色和改进	(289)
8.2.1.2 存在主要问题：观测孔水头的温度矫正	(291)
8.2.2 数学模型及改进	(291)
8.2.3 多边形网格有限差分法数值模型	(292)
8.3 模型识别	(292)
8.3.1 基础工作	(292)
8.3.1.1 模拟区范围、边界及模型识别时段	(292)
8.3.1.2 辅助三角形剖分与格点设置	(294)
8.3.1.3 模型识别的基础资料	(294)
8.3.2 原水文地质模型重要校正——古近系—新近系地层弱透水和南部 卤泊滩排泄	(298)
8.3.3 水文地质参数的确定	(298)
8.3.3.1 待求的水文地质参数	(298)
8.3.3.2 水文地质参数的确定步骤	(298)
8.3.3.3 参数的确定	(298)
8.3.3.4 拟合曲线和精度分析	(300)
8.3.3.5 模型区等水头线和补、径、排及水均衡情况	(304)

8.4 地下水开采动态预测	(307)
8.4.1 预测方案设计	(307)
8.4.2 地下水开采动态预测分析	(310)
8.4.2.1 水头动态	(314)
8.4.2.2 泉和自流井流量动态	(316)
8.4.3 三种预测方案的等水头线和地下水循环	(317)
8.4.4 三种方案的水均衡分析	(320)
8.5 进展和建议	(324)
8.5.1 本研究在机理、建模和预测等方面的进展	(324)
8.5.1.1 在基本模型和模型分层方面	(324)
8.5.1.2 在水流机理及模拟技术的创新方面	(324)
8.5.1.3 模型识别过程对水文地质条件认识的重要改变 (探讨) ...	(325)
8.5.1.4 模拟预测成果的若干进展	(325)
8.5.2 经验与建议	(325)
主要参考文献	(327)
后语	(341)
作者简介	(343)