

罗焕炎 著
陈雨孙

地下水运动的数值模拟

NUMERICAL

MODELING OF

GROUNDWATER

MOVEMENTS

中国建筑工业出版社

地下水运动的数值模拟

0195

地下水运动的数值模拟

罗焕炎 陈雨孙 著

中国建筑工业出版社

全书共八章。包括模拟的一般原则、地下水动力学的基本原理，矩阵运算及线性代数方程的解法，有限单元法的数学物理基础，有限单元的概念、模式和解法，有限单元法的应用，边界单元及其与有限单元耦合的原理与应用以及线性规划及其与有限单元法相结合的原理与应用等。书中给出了数十个计算公式，并有算例和实例。书前列有本书引用的主要符号与量纲，书末附有大量的参考文献和内容索引。

本书可作为与地下水有关专业的高年级大学生和研究生的参考用书，也可供农田水利、给水排水、供水水文地质、岩土力学、石油地质、地震地质、土壤物理等方面的专业技术人员参考。

ZW54/02

地下水运动的数值模拟

罗焕炎 陈雨孙 著

Numerical Modeling of Groundwater Movements

Huan-Yen Loo Yu-Sun Chen

* * *

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

* * *

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 19 1/2 字数: 488 千字

1988年5月第一版 1988年5月第一次印刷

印数: 1—4,250 册 定价: 5.20 元

ISBN7—112—00245—1/P·1

统一书号: 15040·5298

NUMERICAL MODELING OF GROUNDWATER MOVEMENTS

Huan-Yen Loo

Yu-Sun Chen

China Building Industry Press

Beijing

代 序

本书第一著者罗焕炎是我国从事地下水动力学研究的著名学者。在40年代晚期在国内从事水利工作，50年代初期在日本东京大学研究土坝渗流，在50年代中、晚期分别在美国西北大学和犹他大学专攻岩土力学和地下水动力学，并获得博士学位。罗焕炎自60年代初回国后，曾任中国科学院地质研究所研究员，负责地下水动力学方面的研究，现任国家地震局地质研究所研究员兼学位评定委员会主任，也是中国建筑学会工程勘察学术委员会的委员。最近还担任中国科学院黄淮海平原综合治理国家科技攻关项目领导小组副组长，负责水资源合理利用与调配的定量研究。与此同时，著者还利用岩土力学与地下水动力学的丰富知识以及数值模拟方法，从事大陆地震成因和机制的研究。近10年来，罗焕炎博士与美国、联邦德国和日本等国的专家学者频繁地进行学术交流、相互讲学并建立了双方教授间的学术合作。罗焕炎在水、土、岩的力学领域内从事了近40年的科学研究工作，发表了数十篇论文。并有“地下水文学的数值法”等书的译著。美国著名学者C·S·德赛教授主编的“岩土工程数值方法”一书就是罗焕炎最早向出版社推荐，并组织翻译和亲自担任了该书中译本的总校。该书已于1981年8月由中国建筑工业出版社出版，成为我国从事岩土工程的科研、教学、勘察、设计人员以及有关专业研究生和大学生的重要参考书。

本书第二著者陈雨孙亦是我国著名的水文地质学家并有丰富实践经验的高级工程师。陈雨孙1952年毕业于北京大学土木工程系，1956年前在建筑工程部从事房屋地基与工程地质勘察。1956年、1960年两次赴苏联从事工程地质、地下水非稳定流的研究。以后在国内一直结合大量的城市和工程建设的水源工程从事水文地质勘察和地下水动力学的研究。在我国《工程勘察》、《水文地质工程地质》、《水利学报》等学术刊物上发表论文数十篇，其中包括与第一著者罗焕炎合作，研究用有限元等方法计算多层含水层的地下水相互补给量等方面的论文数篇。陈雨孙著有《单井水力学》（1977年12月中国建筑工业出版社出版）、《抽水试验原理与参数测定》（与颜明志合写，1985年8月水利电力出版社出版）、《地下水运动与资源评价》（1986年7月中国建筑工业出版社出版）。陈雨孙现任城乡建设环境保护部综合勘察院水文地质总工程师。在学术界任中国建筑学会工程勘察学术委员会委员、水文地质学组副组长，中国地质学会水文地质专业委员会副主任委员、水文地质计算与地下水资源评价学组负责人。

罗焕炎和陈雨孙都是同济大学岩土工程系地下水资源专业的兼任教授，罗焕炎还是长春地质学院水文地质专业的兼任教授。为专业大学生、研究生和一些专门训练班授课、答疑，为培养专业人才做出了一定的贡献。

本书稿是两位著者合作的结晶，是总结十多年来研究成果写的专著。本书的前七章是罗焕炎科研工作的全面总结。书中对裘布依、泰斯公式的适用性提出了新的看法，并对承压水提出了新的概念，这有助于加深对地下水动力学的理论认识。特别在数值模型的边界

条件的处理方面提出了未知边界条件的约束法,从而增强了理论联系实际的可能性,为地下水的合理开发和利用创造了有利的条件。

1982年8月当罗焕炎将题为“地下水运动的有限单元分析——诱发地震、水量水质评价和地下热水利用”的手稿交给我们出版社时,我们请专家审阅即认为是一部理论性很强学术价值较高的著作,同时我们于1983年4月建议著者罗教授是否适当增加应用实例,使这本理论著作更有应用价值。著者采纳了我们的建议,在有限元法的应用一章中增加洛阳市水文地质问题计算实例与呼和浩特盆地地下水位预测计算等实例。同时罗焕炎教授又继有限单元法的数值计算法引进应用到水文地质计算之后,又引进了边界单元法,在原有的书稿基础上增写了“边界单元的原理与应用”一章,此时考虑到线性规划已在工程中获得较广泛的应用,故决定请当时已对线性规划作了一定研究并且已用来解决地下水的区域管理或水污染源的管理问题的陈雨孙教授增写了第八章“线性规划及其与有限单元法相结合的原理与应用”,并引用了最新资料,如安阳冲积扇地下水优化开采方案实例,这样就构成了本书的全貌。最后请颜明志副研究员缮校全稿,并编制了全书的主要符号、说明与量纲,以及和其他的专著一样编制了内容索引。书名经过著者的再三斟酌,决定由“地下水运动的有限单元和边界单元分析”改名为现在的“地下水运动的数值模拟”,为了便于对外交流,由罗焕炎教授将书名及章节目录相应的译成英文。

经过著者的多年努力,特别是近三年来的修改、补充、完善,终于写成本书稿与读者见面,我们要感谢两位著者对出版事业的支持,感谢他们将多年的科研成果与工作经验认真加以总结、献给读者。

我们相信,这本具有应用价值的学术性著作的出版,对进一步推动对数值法的研究并更深入地应用地下水动力学领域中将会起到积极作用。使我国城市建设中的水资源工程有关技术问题〔如地下水污染问题、地下水位大面积持续下降、地面沉降、咸(海)水入侵,浅层深层水的混合开采,地下热水的利用等等〕能进一步得到解决。我们继续希望,有更多的专家学者能在地下水动力学,特别是在推动学科发展、促进城乡建设环境保护事业发展的有关课题方面进行写作。我们期待,在我国有更多这方面的专著出版。

中国建筑工业出版社 石振华

1986.12.25

符号与量纲

符 号	说 明	量 纲	符 号	说 明	量 纲
A	1. 单元面积 2. 未知系数矩阵 3. $m \times n$ 阶矩阵 4. 状态矩阵	L^2	\bar{C}^k	1. 节点 2. 节点 j 和时间步长 k 时指定的溶质浓度最大允许值	ML^{-3} ML^{-3}
$[A]$	1. 系数矩阵 2. 系数方阵		\bar{C}_j^k $[C]$	极限污染浓度 1. 系数矩阵 2. 弹性常数矩阵	
a	1. 系数 2. 向量 3. 距离	L	$[C^k]$	时间步长 k 时节点 $i = 1, 2, \dots, n$ 的溶质浓度未知数	
a_1, a_2, \dots, a_m	向量集		C	系数、常数或指数	
B	1. 常数或指数 2. 基变量 3. 含水层长度	L	D	1. 非基变量 2. 扩散系数 3. 弥散系数	$L^2 T^{-1}$ $L^2 T^{-1}$ $L^2 T^{-1}$
$B = [P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1m}]$	方阵的分解		$D_{x,h}$ (D)	弥散系数 (D_x 或 D_y) 弹性常数张量	
B_c	第 c 个约束条件的常数		$[D]$	弹性系数矩阵	
B_n	第 n 个平衡方程的常数		$[d]$	系数矩阵	
$[B]$	系数矩阵		E	弹性模量	$ML^{-1} T^{-2}$
b	1. 系数 2. 向量 3. $m \times 1$ 阶矩阵 4. 距离	L	E_c	介质压缩性	$ML^{-1} T^{-2}$
b_1, b_2, \dots, b_n	向量		e	岩体裂隙宽度	L
\vec{b}	体力矢量		F_x, F_y, F_z	作用力分量	
$\{b\}$	体力列矢量		$\{F\}$	作用力矢量	
$\{b^k\}$	反映时间步长 k 时的向量		$\{f\}$	列矩阵	
$\{\tilde{b}^k\} = [M]^{-1} \{b^k\}$			G	水力梯度	
C	1. 系数 2. 溶质浓度	ML^{-3}	G_c	与决策变量结合的矩阵	
C_0	系统内边界上的浓度	ML^{-3}	G_s	与状态变量结合的矩阵	
C_i	初始溶质浓度	ML^{-3}	$\{G\}$	水力梯度矩阵	
C_j^k	污染浓度	ML^{-3}	g	重力加速度	LT^{-2}
C_0^k	时间步长 k 时的污染源浓度	ML^{-3}	$\{g\}$	重力矢量	
C_s	1. 边界值 2. 污染源浓度	ML^{-3}	H	非承压含水层厚度	L
			h	1. 自由水面高度 2. 水头或水位	L L
			h_0	隔水底板上的水头	L
			$h_0(x, y)$	指定的边界常水位	L
			h_c	土体毛细水上升高度	L
			h_i	初始水位	L
			h_s	水跃(渗出)段高程	L
			h_w	井中水位	L

续表

符 号	说 明	量 纲	符 号	说 明	量 纲
I	积分式		p_0	毛细水压力	$ML^{-1}T^{-2}$
$I_{x,k}$	边界外法线方向余弦		Q	流量、水量、开采量	L^3T^{-1}
$[J]$	单位矢量或单位列矩阵		Q_0	单位面积的溶质流	$ML^{-2}T^{-1}$
i	节点号、序号、足标		Q^0	决策变量	
i_x, i_y, i_z	x, y, z 方向的单位矢量		Q^j	不可控制荷载	ML^{-2}
J	泛函		Q_x, Q_y, Q_z	流量的分量	L^3T^{-1}
$[J]$	雅可比矩阵		\bar{Q}	给定的单位体积流量	L^3T^{-1}
j	节点号、序号、足标		$\{\bar{Q}\}$	1. 给定的流量矢量 2. 作用力函数	L^3T^{-1}
K	1. 线性规划问题的可行解集合 2. 污染物衰变因子 3. 热转移系数		q	1. 断面流量 2. 边界流量 3. 边界单位长度流量率	L^3T^{-1} L^3T^{-1} L^3T^{-1}
K_s	弹簧刚度		$q(x, y)$	单位面积抽水率	LT^{-1}
$[K_b]$	岩块刚度矩阵		q_0	自由水面上的节点流量	L^3T^{-1}
$[K_j]$	裂隙刚度矩阵		\bar{q}	给定的边界流量	L^3T^{-1}
k	1. 时间步长 2. 渗透系数	T LT^{-1}	$\{q\}$	抽水率 q_{ij} 的系数向量	
k_0	非饱和系数	LT^{-1}	$\{\bar{q}_n\}$	给定的单元节点流量的矢量	
k_p	岩体裂隙渗透系数	LT^{-1}	R	影响半径	L
k_x, k_y, k_z	各向异性渗透系数	LT^{-1}	R^n	n 维向量空间 ($n = 1, 2, \dots$)	
L	1. 长度 2. 含水层宽度	L L	r	径向距离	L
l	单位矢量		$r(A)$	$m \times n$ 阶矩阵 A 的秩	
l_x, l_y, l_z	外法向		\bar{r}	单元节点径向距离的平均值	L
l_r, l_θ	方向余弦		$\{r\}$	反映边界系数的向量	
l_1, l_2, l_3	自然座标或面积座标		S	1. 弹性释水系数 2. $S = S_0 M$ 的含水层储量系数	L^{-1}
M	1. 单元总数 2. 承压含水层厚度	L	S_n	1. 空隙率 2. 孔隙率 3. 给水度	
$[M]$	1. 时间步长 k 时的溶质浓度有限差分系数矩阵 2. $\{C^k\}$ 的系数矩阵		S_0	单位体积储量系数	L^{-1}
$[M]^{-1}$	$[M]$ 的逆		$\{S\}$	形如 $(r, 0, \dots, 0)$ 的系数向量	
m_i	系数 ($i = 1, 2, \dots, r$)		s	1. 沿流线的长度 2. 水位下降值 水头下降值	L L L
N	1. 节点总数 2. 状态变量总个数		s_d	受约束于 (即 Subject to 的缩写)	
$[N]$	1. $\{C^k\}$ 的系数矩阵 2. 时间步长 $k = 1$ 时的溶质浓度有差分系数矩阵		$s.t.$		
n	1. 单元节点数 2. 高斯积分点数		T	1. 导水系数 2. 联系于决策变量的矩阵	L^2T^{-1}
P	1. 作用力 2. 原点至直线的距离	$ML^{-1}T^{-2}$ L	T_s	水的表面张力	$ML^{-2}T^2$
P_j	j 列向量		T_x, T_y, T_z	表面力矢量的分量	
$[P]$	1. 系数矩阵 2. 流量矩阵		$\{\bar{T}\}$	表面力矢量	
p	水压力	$ML^{-1}T^{-2}$	t	时间	T
p_0	大气压力	$ML^{-1}T^{-2}$	U	1. 应变能 2. 最优基可行解	
			U_0	余应变能	

续表

符 号	说 明	量 纲	符 号	说 明	量 纲
U_x, U_y, U_z	位移矢量的分量		β	角度或倾角	
$\{U\}$	位移矢量		β_n	第 n 个状态变量的系数	
u_i	变量 ($i = 1, 2, \dots, m$)		Γ	场的边界	
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	水流质点速度的分量	LT^{-1}	γ_f	淡水重力密度	
V	体积	L^3	γ_s	咸水重力密度	
v	1. 渗流速度 2. 达西速度	LT^{-1} LT^{-1}	γ_m	水的重力密度	
v_i	变量		$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$	剪应变	
v_k	对流速度	LT^{-1}	Δ	介质格架变形	
v_x, v_y, v_z	渗流速度分量	LT^{-1}	$\Delta x, \Delta y$	x, y 方向的剖分间距	L
W	1. 外力做功 2. 加权函数 3. 补给率或排泄率	L^2T^{-1} L^2T^{-1}	δ	变分	
$W(x, y)$	单位面积回灌率	L^2T^{-1}	$\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$	向量	
W_p	作用力势函		ϵ	1. 极小的数 2. 应变	
\bar{W}	位移矢量		$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	应变分量	
$\{W\}$	补给率 W_i 的未知数向量		$\{e\}$	应变矢量	
X	1. 任意点 2. X 座标		ζ	1. 局部座标 2. 无量纲座标	
X_k	边界值		η	1. 局部座标 2. 无量纲座标	
$X^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$	任一可行解, 而 $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ 为 X^0 的非零分量		θ	3. 系数 1. 非基变量 x_{m+k} 进入基后的值 2. 与污染源浓度 C_0 有关的参数 3. 非饱和含水量	
\bar{X}	凸集内任意点、极点		$\theta = \theta(x_k)$	决策变量	
$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$	体力矢量分量		θ_i	决策变量	
\hat{X}, \hat{X}	极点		$\frac{\theta_0}{\theta, \bar{\theta}}$	饱和含水量 浓度参数	$ML^{-2}T^{-2}$
x, y, z	正座标		χ	周围边界的传热系数	
x_{B_i}	X^0 的基变量 ($i = 1, 2, \dots, m$)		λ	系数	
x_i	变量		μ	1. 系数 2. 粘滞系数	$ML^{-1}T^{-1}$
x_j	非基变量		ν	泊松比	
x_k	笛卡尔座标 (x, y 或 z)		ξ	1. 局部座标 2. 无量纲座标	
Y	1. 人工变量 2. Y 座标		π	总势能	
y	R^n 的基的线性组合		ρ	密度	
y_1, y_2, \dots, y_m	非基变量		σ	应力	ML^{-2}
Z	Z 座标		$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	应力分量	
z	目标函数		$\bar{\sigma}$	应力张量	
\bar{z}	单元节点正座标平均值		$\{\sigma\}$	应力矢量	
α	角度		τ	剪应力	ML^{-2}
α_i	第 i 个决策变量的系数		$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	剪应力分量	
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$	系数		$\{\Phi\}$	总体水头矢量	
$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$	R^n 的 n 个线性无关的向量, 是 R^n 的一个基				
$\{a\}$	列矩阵				
$\{\bar{a}^{-1}\} = [M]^{-1}$					
$\{a^{-1}\}$					

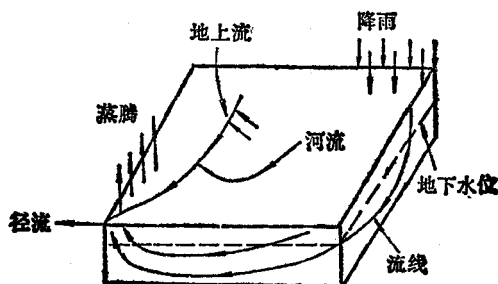
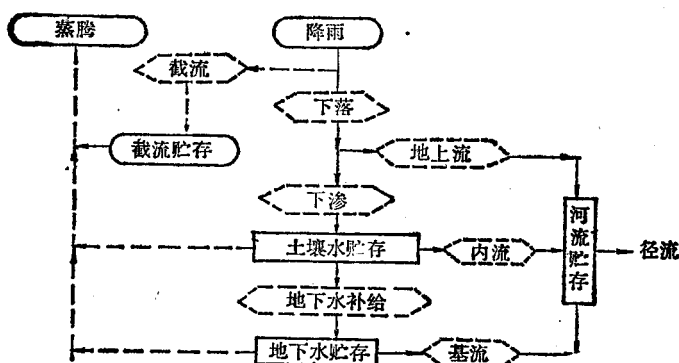
续表

符 号	说 明	量 纲	符 号	说 明	量 纲
$\{\phi\}^e$	单元节点水头矢量		$\{\psi\}$	1. 总体导水度矩阵	
ϕ	1. 状态变量 2. 水头	L	$\{\psi\}^e$	2. 系数矩阵	
ϕ_n	1. 周围边界的温度 2. 周围边界的浓度	$ML^{-2}T^{-1}$	Ω	1. 单元导水矩阵	
$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$	单元节点的水头	L	ω	2. 单元系数矩阵	
ϕ_p				场的内域	
ϕ_n	第 n 个状态变量		ω_i	1. 角度	
$\{\phi_n\}$	单元水头矢量			2. 松弛因子	
				参变量	

前 言

地球表部包括气圈、水圈、岩圈三个部分。水圈的动态既受气圈的影响,也受岩圈环境的约束;反过来,水圈在天然和人为作用条件下的排泄和补给过程,不仅影响大气的动态,也对固体岩圈物质的迁移、转化和变形(例如石灰岩溶洞的形成和空隙水压的变化能够激发地震等)有直接作用。可见,气圈、水圈和岩圈不是孤立无关,而是有内在联系的。

在人类的活动中,水是不可缺少的。它分布很广,而且是最重要的地球资源之一。但对它的利用和管理不当的话,反会有害。例如,加重洪涝灾害、地面沉降、水源污染和土壤盐渍化等。为了达到兴利除害的目的,必须掌握水在地表,特别是在地下的运动规律,



以及它们之间的内在关系。这样,人们才能获得利用和改造自然的自由。水圈是一个循环不息的运动体系(图0.0.1)。地下水系是它的地下组成部分。从地下水的分布角度看,可以分成饱气带(在地下水位以上的非饱和带)和饱水带(在地下水位以下部分)。这两个带的地下水类型和运动性质有很大的差别。土壤物理学家着重于研究饱气带的水分在降雨入渗、土面蒸发和作物蒸腾等作用下的动态变化对作物生长的影响;而水文地质学家则注意研究排泄、补给、抽水、注水等对饱水带的影响,宏观地评价地下水资源的开发和利用。事实上,若从力学角度看这两个带是连通的,是相互制约的,是同一事物的两个方面,是不可分割

的,应作为整体来研究。生产实践使人们认识到,只有把地表水、土壤水、地下水三者视为一个水文整体(图0.0.2)才能调节、控制、改造地下水的动态。于是要求水力学、岩土力学、水文学、地质学、土壤物理学等学科相互渗透,并联合对这个整体进行研究。

本书在内容上说明宏观与微观、室外与室内、定性与定量、单学科与多学科相结合的道路。首先,扼要叙述模拟地下水运动的一般原则,重点阐明地下水(包括土壤毛细水)动力学的基本原理和发展过程,然后着重说明近期发展起来的有限单元法的数学物理基础

及其在地下水方面应用的灵活性。书中包括了作者多年来的研究成果和经验体会。例如,从理论分析和实验研究说明了一百多年前的裘布依假定从属于虚构流网的新观点,提出了静态的毛细水带中任一点的水头应等于同一通道另一端处的自由水面上的水头的新看法,从而加深了对该带的物理知识;在地下水动态的预测方面给出了单层和多层含水体系的不定常流的近似解析解和数值解;还利用了有限单元法的灵活性,在边界条件处理上提出了未知流量边界的新概念,在实践中已证明这种概念可用来反求地下水多层体系的渗透系数和地下径流量,为地下水的开发和利用创造了有利的条件。这些就是在地下水运动的理论分析方面的新论点和在有限单元法的应用上的新发展。

因为有限单元法要求熟悉矩阵运算、理解建立方程的物理力学依据和掌握应用方面的灵活性和限制性等三个方面。因此,本书第一部分侧重介绍地下水动力学的一般原理和存在的一些问题,第二部分扼要地叙述了矩阵运算和数值解法,第三部分细致地说明了有限单元法的数学物理概念和基本原理,但不强调某些数学上的严格性,最后一部分举例说明有限单元法的适用性,以及与边界单元、线性规划相结合的优越性。本书的前七章(1~7)由罗焕炎执笔,第8章由陈雨孙执笔。在第6.2.3和6.3.3两节中的实例,分别由李玉芳和陈国志执笔。全书的符号与量纲、索引的编制和文稿的缮校由颜明志完成。本书插图由张云美描绘。

本书的主要对象是水文地质方面的年轻科研教学人员和实际工作者以及高年级大学生和研究生,也可作为农田水利、岩土力学、石油地质、地震地质、土壤物理等方面工作者的参考。在撰写过程中,对问题的物理概念和方程的推导,尽量加以解释,力求减轻读者的困难,便于读者实际应用。

著者欢迎对本书的一切有益的批评指正意见。

著 者

1986.10.

目 录

代 序

符号与量纲

前 言

第 1 章 模拟的一般原则	1
1.1 体系的概念	1
1.2 模型的概念	1
1.3 数学模型	2
1.4 计算机模拟的科学基础	2
1.5 状态相关体系的计算机模拟	3
1.6 模型的建立和运行的阶段	3
1.7 算法语言	4
1.8 模型的有效性	5
1.9 由模拟实验所作的结论	6
1.10 模型和模拟的交流	6
第 2 章 地下水动力学的基本原理	8
2.1 物理背景	9
2.2 达西定律	10
2.2.1 饱和水流	10
2.2.2 非饱和水流	11
2.3 地下水流方程	13
2.3.1 动量方程或运动方程	13
2.3.2 连续性方程	16
2.3.3 介质格架不可变形情况	16
2.3.4 介质格架可变形情况	17
2.3.5 流线和等势线	18
2.4 裘布依公式及其适用性	19
第 3 章 矩阵运算及线性代数方程的解法	33
3.1 初始值和边界值问题	33
3.1.1 常微分方程	33
3.1.2 偏微分方程	34
3.2 偏微分方程的分类	34
3.2.1 双曲型方程	35

3.2.2 抛物型方程	35
3.2.3 椭圆型方程	36
3.3 与有限单元法相关的矩阵运算	36
3.3.1 矩阵定义	36
3.3.2 矩阵运算	37
3.3.3 对称正定矩阵与正定二次型	41
3.4 线性代数方程的几种常用解法	42
3.4.1 直接法	42
3.4.2 迭代法	50
3.4.3 直接法和迭代法评价	54
第4章 有限单元法的数学物理基础	55
4.1 有限差分法引论	56
4.1.1 有限差分近似式	56
4.1.2 与时间相关的有限差分近似式	60
4.2 试函数法	62
4.2.1 变分法的基本原理	62
4.2.2 变分试函数法	71
4.2.3 剩余试函数法	74
4.3 结语	77
第5章 有限单元的概念、模式和解法	78
5.1 内插函数	79
5.1.1 一维单元	79
5.1.2 二维单一型一次单元	80
5.1.3 三维单一型单元	81
5.1.4 二维复合型高次单元	83
5.1.5 等参数单元	84
5.2 伽勒金有限单元法与有限差分数值积分法的等价性	92
5.2.1 有限差分数值积分法	93
5.2.2 伽勒金有限单元法	94
5.3 渗流场问题的有限单元解法	95
5.3.1 初始条件和边界条件	96
5.3.2 有限单元法解题的主要步骤	96
第6章 有限单元法的应用	102
6.1 利用有限单元法反求含水层参数	102
6.1.1 在抽水条件下非均质含水层线性流的反演问题	102
6.1.2 利用区域地下水位长期观测资料反求含水层参数	110
6.1.3 在砾石含水层中非线性流的反演问题	113
6.2 定常和不定常流的非承压井的轴对称或二维流	116

6.2.1 双层介质中潜水井定常流	119
6.2.2 非承压和非定常流抽水试验资料分析	123
6.2.3 洛阳市水文地质问题计算实例	129
6.3 在松散含水层中的三维空间水流	133
6.3.1 潜水含水层的不定常三维流	133
6.3.2 承压含水层的不定常三维流	140
6.3.3 呼和浩特盆地地下水水位预测计算	148
6.4 基岩裂隙水流及其与地应力、地震的关系	152
6.4.1 岩体空隙水压与变形破坏的相互作用	153
6.4.2 岩块不透水的可变形断裂的水流	156
6.4.3 岩块透水但裂隙不变形的岩体水流	169
6.4.4 注水诱发或控制地震的动态分析	171
6.5 不混多相流体的渗流问题	174
6.5.1 饱和-非饱和水流	174
6.5.2 咸水-淡水接触面问题	185
6.6 可混多相流体的渗流问题	187
6.6.1 渗流方程	187
6.6.2 污水运动方程	190
6.7 地下热水利用	192
6.7.1 液相运动方程	192
6.7.2 热传导方程	193
6.7.3 示例	196
第7章 边界单元及其与有限单元耦合的原理与应用	197
7.1 势流问题的边界单元分析	198
7.2 一般线弹性平衡方程的边界单元分析	201
7.3 边界单元和有限单元耦合求解	203
7.3.1 势流问题的数值解	203
7.3.2 线弹性问题的数值解	207
7.4 结语	213
第8章 线性规划及其与有限单元法相结合的原理与应用	215
8.1 引论	216
8.2 线性规划的数学知识	218
8.2.1 向量空间与线性无关	218
8.2.2 线性无关的特殊性质	220
8.2.3 基	221
8.2.4 基中的一个向量用任意一个向量代替	221
8.2.5 向量空间的子空间	222
8.2.6 矩阵的秩	223
8.2.7 线性方程组	223

8.2.8 基解	224
8.2.9 基解的数目	224
8.2.10 退化解	225
8.2.11 直线及超平面	225
8.2.12 凸集	225
8.2.13 线性规划及其解的代数概念	226
8.3 单纯形法	227
8.3.1 单纯形法求解的步骤	227
8.3.2 单纯形法的原理	230
8.3.3 求解初始基可行解的方法——两段法	238
8.4 有限单元法与线性规划的结合	241
8.4.1 引言	241
8.4.2 一维稳定流问题	241
8.4.3 二维稳定流问题	243
8.4.4 一维非稳定流问题	244
8.4.5 排水疏干问题	246
8.4.6 地下水的区域管理	249
8.4.7 一维非稳定地下水污染源管理	251
8.4.8 地表水污染的控制	255
8.5 二维非稳定流问题及地下水的优化开采实例	259
8.5.1 超补给开采下地下水位下降的特点及简化	259
8.5.2 安阳冲积扇地下水优化开采方案实例	262
参考文献	280
索 引	286

CONTENTS

FOREWORD

SYMBOLS AND DIMENSIONS

PREFACE

1. GENERAL PRINCIPLES OF SIMULATION.....	1
1.1 System Concepts.....	1
1.2 Model Concepts.....	1
1.3 Mathematical Models.....	2
1.4 Scientific Basis of Computer Simulation.....	2
1.5 State Related Computer Simulation	3
1.6 Model Set-up and Operations.....	3
1.7 Algorithm Language.....	4
1.8 Model Efficiency.....	5
1.9 Conclusion of Model Test.....	6
1.10 Interchanging Views on Models and Simulations	6
2. FUNDAMENTAL THEORY OF UNDERGROUND HYDRO- DYNAMICS.....	8
2.1 Physical Background.....	9
2.2 Darcy's Law.....	10
2.3 Equations of Groundwater Flow.....	13
2.4 Dupuit Equation and its Applicability	19
3. MATRIX ALGEBRA	33
3.1 Initial and Boundary Value Problems.....	33
3.2 Classification of Partial Differential Equations.....	34
3.3 Matrix Operations Related to Finite Element Methods.....	36
3.4 Conventional Solutions of Linear Algebraic Equations	42
4. MATHEMATICAL AND PHYSICAL BASIS OF FINITE ELEMENT METHODS	55
4.1 Introduction of Finite Difference.....	56
4.2 Methods of Trial Function	62
4.3 Summary	77
5. CONCEPTS AND SOLUTIONS OF FINITE ELEMENT METHOD	78
5.1 Interpolation Functions.....	79
5.2 Equivalency of Galerkin-Finite Element and Finite Difference Nume- rical Integration Method	92