

含有协变

地下水动态规划管理模型研究

于福荣 刘中培 著

地质出版社

含有协变量的地下水动态 规划管理模型研究

于福荣 刘中培 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书作者依托国家自然科学基金项目“地下水管理模型中处理互馈协变关系的理论和方法”，对地下水互馈协变关系问题进行了深入的研究，较为详细地阐明了地下水互馈协变关系行为的作用过程和特征，提出了应用状态转移方程法构建含有协变量的地下水动态规划管理模型的理论和方法。首先针对具有互馈协变关系问题的假想例子，分别运用嵌入法和状态转移方程法建立了含有协变量的地下水非线性规划管理模型和地下水动态规划管理模型，分别采用 Lingo 软件和微分动态规划方法进行求解。在此基础上，将动态规划管理模型在吉林省西部松原地区进行了验证和应用，取得了良好的效果。

本书可供水文水资源、水文地质、水资源开发和管理等相关领域的科研工作者和高等院校师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

含有协变量的地下水动态规划管理模型研究/于福荣等著. —北京：地质出版社，2013.8

ISBN 978-7-116-08474-2

I. ①含… II. ①于… III. ①地下水资源—动态规划—研究
②地下水资源—动态管理—水资源管理—研究 IV. ①P641.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 204152 号

Hanyou Xiebianliang de Dixiashui Dongtai Guihua Guanli Moxing Yanjiu

责任编辑：祁向雷 陈 磊

责任校对：李 玫

出版发行：地质出版社

社址邮编：北京海淀区学院路 31 号，100083

电 话：(010) 82324508 (邮购部)；(010) 82324577 (编辑室)

网 址：<http://www.gph.com.cn>

传 真：(010) 82310759

印 刷：北京地大天成印务有限公司

开 本：787 mm×1092 mm^{1/16}

印 张：6.75

字 数：180 千字

版 次：2013 年 8 月北京第 1 版

印 次：2013 年 8 月北京第 1 次印刷

定 价：26.00 元

书 号：ISBN 978-7-116-08474-2

(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

水资源危机,包括缺水和水环境问题是人类 21 世纪面临的重大问题。随着人类社会的经济发展、人口增加以及气候环境的变化,水资源短缺现象日趋严重。作为水资源的重要组成部分,地下水是人类生活和工农业用水的重要供水水源。目前,部分地区地下水开采利用过程中由于缺乏宏观规划和科学管理,导致地下水严重超采,并造成了一系列地下水环境问题。因此,贯彻可持续发展的理念,对地下水资源进行优化管理,是解决地下水资源短缺及其环境问题的重要途径。

地下水系统的优化管理是决策科学在地下水开发利用过程中的应用,它是以地下水系统本身固有的物理规律为基础,充分分析并描述地下水系统所面临的决策环境,通过对人为可控输入策略的优化调控使地下水系统的状态行为和功能效果按照所确定的目标衡量达到最优的运筹过程。目前,模拟优化 (Simulation and Optimization) 仍然是对地下水实际系统进行机理分析、模拟预报和方案优选的主流技术方法。优化模型必须以模拟模型为基础,用以保证优化模型的寻优过程一定是在遵循地下水实际系统固有原理和规律 (由模拟模型来表达) 的基础上进行的。因此就需要通过某种方式和途径,把模拟模型嵌入优化模型之中,使之成为优化模型的组成部分,实现模拟模型与优化模型的连接。以往运用的嵌入法、响应矩阵法、状态转移方程法都是用来解决如何在优化模型中嵌入和调用模拟模型这一问题的。

在地下水系统的数值模拟和优化管理中,需要考虑地下水与其他水体的水力联系和交换。其中有一类交换量,如河水与地下水的交换量、蒸发排泄量、泉流量等,它们的共同特征是其大小都取决于补 (排) 点处地下水位的高低,不能人为给定,我们将这种交换量称为协变量,将人工开采 (补给) 量、地下水位和协变量三者之间的关系称为互馈协变关系。本书作者通过分析地下水互馈协变关系行为的作用过程和特征,研究协变量在模拟模型中的

表达形式、含有协变量的模拟模型与优化模型的耦合技术，以及这种管理模型的求解方法，提出了应用状态转移方程法构建含有协变量的地下水动态规划管理模型的理论和方法，并采用微分动态规划方法求解。本书主要研究内容如下：

(1) 通过分析协变量和地下水位之间的相互联系和作用机理，把描述协变量和地下水位的数学关系式代入数值模拟模型中，完成了含有协变量的地下水模拟模型的建立，应用有限差分法求解。

(2) 运用嵌入法实现了含有协变量的模拟模型与优化模型的耦合连接，将含有协变量的地下水模拟模型离散之后得到的代数方程组直接嵌入优化模型之中，作为约束条件的一部分，同时考虑其他水力等约束条件和目标函数，建立了具有处理互馈协变关系功能的地下水非线性规划管理模型，应用 Lingo 软件求解。

(3) 运用状态转移方程法实现了含有协变量的模拟模型与优化模型的耦合连接，首先运用含有协变量的地下水模拟模型获得状态转移方程，也就是用某一时段的初始水位和该时段的人工开采量把该时段的末刻水位表达出来，然后将状态转移方程嵌入到动态规划优化模型之中，同时考虑其他水力等约束条件和目标函数，建立了具有处理互馈协变关系功能的地下水动态规划管理模型。

针对含有协变量的地下水动态规划管理模型，采用微分动态规划方法求解。微分动态规划求解方法，能够把优化管理过程划分为多个时段，每个时段的末刻状态变量仅与该时段的初始状态和该时段的决策变量有关，大大减少了计算负荷，适合于解决大规模多时段的地下水系统管理问题。

(4) 将提出的理论和方法应用到一个典型的、具有互馈协变关系的假想地下水系统中，分别建立了含有协变量的地下水非线性规划管理模型和含有协变量的地下水动态规划管理模型，对本书提出的理论和方法进行了应用，并对模型进行了合理性分析。

(5) 在假想例子研究的基础上，以吉林省西部松原地区的地下水系统为研究实例，全面收集和整理资料，通过分析协变量与地下水位之间的相互作用过程和机制，完成了含有协变量的地下水模拟模型的建立，采用 Visual MODFLOW 软件求解。

(6) 针对实例研究区内的主要互馈协变关系问题, 在模拟模型的基础上, 以前郭县和扶余县部分地区为重点研究区, 应用状态转移方程法构建了含有协变量的地下水动态规划管理模型, 采用微分动态规划方法求解, 同步获得了优化的人工开采量、协变量和地下水位。

在本书的撰写、修改到成稿过程中, 作者的导师吉林大学卢文喜教授付出了大量心血, 卢教授深厚的学术造诣、严谨的治学风格以及高尚的人格都让我终身受益。在此, 向卢文喜教授致以深切的谢意和崇高的敬意! 同时感谢李平师姐在我撰写本书期间提供的帮助, 感谢松原市水资源办公室和前郭县水资源办公室领导和专家在论文写作中提供了数据和资料, 向你们深表谢意!

感谢华北水利水电学院高层次引进人才科研启动项目(编号: 40128)对本项研究工作及本书出版的资助!

由于水资源评价及地下水管理问题的复杂性, 书中可能存在不妥或不准确之处, 敬请读者批评指正。

于福荣

2013年6月

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 选题背景及研究意义	(1)
1.1.1 选题背景	(1)
1.1.2 研究意义	(2)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.2.1 地下水数值模拟研究现状	(2)
1.2.2 地下水管理模型研究现状	(5)
1.2.3 地下水管理模型求解方法研究进展	(9)
1.2.4 地下水管理模型中互馈协变关系问题研究进展	(13)
1.2.5 地下水管理模型软件	(14)
1.2.6 地下水管理模型存在的问题	(15)
1.3 研究内容与技术路线	(16)
1.3.1 研究内容	(16)
1.3.2 技术路线	(17)
1.4 创新点	(18)
第 2 章 地下水系统与地下水管理模型	(21)
2.1 地下水系统理论	(21)
2.2 地下水管理模型	(23)
2.2.1 地下水管理模型的数学表达式	(24)
2.2.2 地下水管理模型的组成	(24)
2.2.3 地下水管理模型的分类	(25)
2.2.4 地下水管理的研究步骤	(26)
第 3 章 含有协变量的地下水管理模型的建立	(27)
3.1 协变量与地下水位之间关系的数学表达式	(27)
3.2 含有协变量的地下水模拟模型的建立	(28)
3.3 含有协变量的地下水管理模型的构建	(30)

3.3.1	应用嵌入法构建含有协变量的地下水管理模型	(30)
3.3.2	应用响应矩阵法构建含有协变量的地下水管理模型	(31)
3.3.3	应用状态转移方程法构建含有协变量的地下水管理模型	(36)
第4章	地下水动态规划管理模型	(40)
4.1	动态规划的相关理论	(40)
4.1.1	动态规划的基本概念	(40)
4.1.2	动态规划的基本方程和解法	(41)
4.1.3	动态规划的最优性原理	(41)
4.1.4	动态规划在地下水资源系统中的应用	(41)
4.2	非线性规划问题及库恩—塔克条件	(45)
4.2.1	非线性规划问题	(45)
4.2.2	库恩—塔克条件	(47)
4.3	应用微分动态规划方法求解地下水动态规划管理模型	(48)
4.3.1	逆序递推过程	(48)
4.3.2	顺序决策过程	(49)
4.3.3	迭代过程	(50)
第5章	假想地下水系统互馈协变关系问题研究	(51)
5.1	假想例子	(51)
5.2	含有协变量的模拟模型的建立及求解	(52)
5.3	含有协变量的地下水管理模型的构建及求解	(54)
5.3.1	地下水非线性规划管理模型的构建及求解	(54)
5.3.2	地下水动态规划管理模型的构建及求解	(55)
5.4	求解结果	(56)
第6章	松原地区含有协变量的地下水数值模拟	(59)
6.1	松原地区自然地理与区域水文地质条件	(59)
6.1.1	地理位置	(59)
6.1.2	气象水文	(59)
6.1.3	地貌类型及地下水动态类型	(60)
6.1.4	水资源利用情况及地下水开发利用现状	(64)
6.1.5	含水系统的组成	(64)
6.1.6	地下水系统的循环条件	(64)
6.2	松原地区地下水数值模拟模型	(65)
6.2.1	水文地质概念模型	(65)
6.2.2	数值模拟模型	(66)

第 7 章 松原地区部分地段含有协变量的地下水管理模型 (77)

7.1 重点研究区简介 (77)

7.1.1 地理位置 (77)

7.1.2 研究区的含水层类型 (77)

7.1.3 地下水位变化特征 (77)

7.1.4 研究区内的协变量 (78)

7.2 含有协变量的地下水管理模型的建立及求解 (79)

7.2.1 管理模型的建立 (80)

7.2.2 管理模型的优化结果 (82)

7.2.3 优化结果分析 (84)

第 8 章 结论及建议 (85)

8.1 结 论 (85)

8.2 建 议 (86)

参考文献 (87)

第1章 绪 论

1.1 选题背景及研究意义

1.1.1 选题背景

本书依托于国家自然科学基金项目“地下水管理模型中处理互馈协变关系的理论和方法”(编号:40672157)和高等学校博士学科点专项科研基金项目“含有协变量的地下水管理模型研究”(编号:20050183055)。

目前,模拟优化(Simulation and Optimization)仍然是对地下水实际系统进行机理分析、模拟预报和方案优选的主流技术方法。模拟模型是指应用数学模拟模型对地下水实际系统进行仿真模拟,是地下水实际系统本身固有规律的表达,是实际系统所遵循的物理、化学和生物原理和规律的描述,刻画了地下水实际系统的输入-输出响应关系,相当于地下水实际系统的复制品。对于自然条件和人为决策的变化,都可以运用模拟模型来预报结果。

但模拟模型只能解决给定输入决策下的预报问题,而对于究竟选择哪种输入决策才能获得最优效果响应的问题的解决则是软弱无力的。优化模型(也称为运筹学模型)则能解决寻优的问题,即在给定的目标和约束之下,通过对输入操控方案(通常作为决策变量)的优选,使目标达到最优,从而找到最优的决策方案。

应该注意到,优化模型必须以模拟模型为基础,用以保证优化模型的寻优过程一定是在遵循地下水实际系统固有原理和规律(由模拟模型来表达)的基础进行的。因此就需要通过某种方式和途径,把模拟模型嵌入到优化模型之中,使之成为优化模型的组成部分,实现模拟模型与优化模型的连接。以往运用的嵌入法、响应矩阵法、状态转移方程法都是用来解决如何在优化模型中嵌入和调用模拟模型这一问题的。

在地下水系统的数值模拟和优化管理中,需要考虑地下水与其他水体的水力联系

和交换。其中有一类交换量,如河水与地下水的交换量、蒸发量、泉流量等,在一定条件下,它们的共同特征是其大小都取决于补(排)点处地下水位的高低,不能人为给定,我们将这种交换量称为协变量;将人工开采(补给)量、地下水位和协变量三者之间的关系称为互馈协变关系。

在含有协变量的地下水管理模型中,优化的人工开采(补给)量、地下水位和协变量都是待求的量,且这三者之间又相互联系相互影响,致使这种问题的处理就变得非常复杂。在开展本研究之前,应用嵌入法和响应矩阵法构建含有协变量的地下水管理模型及其求解已获得了解决。但是,到目前为止,对于含有协变量的地下水动态规划管理模型的处理以及应用互馈协变关系的理论和方法处理实际地下水系统的管理问题都尚未见有相关文献的报道。这正是本书作者要解决的关键问题。

1.1.2 研究意义

本书作者研究建立了含有协变量的地下水动态规划管理模型,采用微分动态规划方法求解。这种处理方法把地下水优化管理过程划分为多个时段,每个时段末刻的状态变量仅与该时段的初始状态和该时段的决策变量有关,大大减少了计算负荷,适合于解决大规模、多时段的地下水系统管理问题,考虑了面向实际、处理实际问题的能力。通过本项研究,作者在地下水管理模型中拓展了处理互馈协变关系的理论和方法,为各种有关实际问题的解决奠定了理论基础和提供了技术途径。

地下水管理模型中互馈协变关系问题的研究,对于掌握地下水系统各要素之间的相互关系,以及如何采取有效措施解决地下水资源短缺及其环境问题具有重要的意义。本研究能够极大地改进地下水管理模型的仿真程度,还能大幅度提高地下水管理模型应对复杂实际问题的能力,为地下水资源的可持续利用提供强有力的科技支撑。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 地下水数值模拟研究现状

1.2.1.1 解地下水流问题的数值方法

随着现代应用数学以及计算机技术的发展和广泛应用,数值模拟逐渐成为研究地

下水运动规律、定量评价地下水资源以及模拟一些水文地质过程发生发展的主要手段。其研究范畴,由单纯研究地下水系统与自然环境系统之间的相互关系,扩大到研究与社会经济系统的相互关系;其研究内容,涉及饱和带、非饱和带和饱和-非饱和带^[1]。

在计算机上利用数值法可以模拟各种复杂的水文地质条件,虽然用这种方式求出的数值解仍然是近似值,但仍能满足人们生产研究的要求^[2]。和其他方法比较,数值模拟有很多优点,主要有^[3]:①模拟在计算机上进行,不需要像物理模拟那样建立专门的一套设备;②有广泛的适用性,可以用于水量计算、水位预报以及地面沉降等的计算,各种复杂的含水层、边界条件、水流情况都能模拟出来;③修改算法、修改模型比较方便;④可以程序化,只要编好软件,对不同的具体问题只要按要求整理数据就能上机计算,并立即得到相应的结果。它的不足之处是不如物理模拟来得逼真、直观,且计算工作量大。

目前,解地下水流问题的数值方法有很多,但最通用的还是有限差分法(Finite Difference Method)和有限元法(Finite Element Method)。这两种方法的根本区别在于有限差分法是建立在用差商近似表示导数的基础上的,而有限元法是建立在直接求函数的近似解基础上的。除了这两种方法以外,还有特征线法(Method of Characteristics)、边界元法(Boundary Element Method)等,在此不再详述。

20世纪50年代有限差分法主要用于石油流动领域的计算,60年代中期拓宽了应用领域,用于解地下水流问题。有限差分法有许多优点:①对于简单问题(如均质各向同性含水层中的一维、二维稳定流问题)的数学表达式和计算过程比较直观、易懂;②有相应高效的算法;③对一般的地下水流问题来说解的精度比较高;④有广泛使用的商用软件,如MODFLOW、PLASM等。需要注意的是,对某些自然边界条件,有限差分法必须进行特殊处理,灵活性一般说来相对要差一些。因此,标准的有限差分法在近似不规则边界上不如有限元法方便(积分有限差分法能和有限元法一样处理不规则边界),对内部边界如断层带的处理以及模拟点源(汇)、渗出面和移动着的地下水面等,有限差分法也不如有限元法好。

有限元法于20世纪60年代后期引入地下水计算中。这种方法的优点有:①程序的统一性。有限元法对各种地下水流和溶质、热量运移问题,计算过程基本相同,程序编写比较方便,很多例子表明从解某一类问题的程序转换为解另一类问题的程序比较简单;②对不规则边界或曲线边界、各向异性和非均质含水层的处理比较方便;③

单元大小比较随意,同一计算区内可以视需要采用多种单元形状和多种插值函数以适应水头、浓度等变量的变化或精度要求;④水流问题、溶质运移问题的解精度一般比较高。有限元法虽然有上述这些优点,也有一些缺陷,主要是局部区域质量不守恒,有时会影响计算结果。另一个是和有限差分法等共有的缺陷,即渗流速度、流量只能在先求出水头后,再由 Darcy 定律算出渗流速度,渗流速度乘以过水断面面积再得到流量^[3]。这样做误差大,算不准,至今尚未彻底解决。2004 年薛禹群等^[4]、YE 等^[5]又把数学上新出现的多尺度有限元法引入地下水领域,并得到初步应用,它不仅可以减少单元数,还能提高计算精度。因此,多尺度有限元是一种很有应用前景的方法。

1.2.1.2 地下水数值模拟软件

随着计算机技术的快速发展,使得复杂含水层系统中的地下水流运动及溶质运移的数值模拟变为可能。近年来,在人机交互、计算机图形学和科学可视化等技术的推动下,地下水数值模拟软件在质量上有了较大的发展和提高^[6]。其中较有影响地位的有 Visual MODFLOW、FEFLOW、GMS。

(1) Visual MODFLOW:由加拿大 Waterloo 水文地质公司在 MODFLOW 的基础上开发研制的 Visual MODFLOW 软件,是目前较流行且被各国同行一致认可的三维地下水流和溶质运移模拟评价的标准可视化专业软件系统^[7]。该软件主要包括 MODFLOW(水流模拟)、Modpath(平面和剖面流线示踪分析)、MT3D(溶质运移模拟)和 Zone Budget(水量均衡计算)四大模块。界面设计包括三大彼此联系但又相对独立的模块,即前处理模块、计算模块和后处理模块。Visual MODFLOW 以其求解方法的简单适用、适应范围的广泛及可视化功能的强大成为较有影响的地下水数值模拟软件,其使用范围越来越大。然而实践证明,它往往并不适合某些复杂的地质条件,如不饱和流、密度变化的水流(海水入侵)、热对流等棘手的问题。

(2) FEFLOW:FEFLOW 是由德国水资源规划与系统研究所(WASY)历时 20 多年的研究,开发出来的地下水流及物质迁移模拟软件系统^[8]。软件问世以来,在理论研究和实际问题的处理上,经过了不断的发展、修改、扩充、提高,日趋完善。从 20 世纪 70 年代末至今,FEFLOW 经过了大量的测试和检验,成功地解决了一系列与地下水有关的实质性问题,如判断污染物迁移途径、追溯污染物的来源、海水入侵等,是功能较齐全的三维地下水模拟分析软件。

(3) GMS: GMS 是由 Brigham Young 大学环境模拟研究实验室开发的较先进的、基于概念模型的地下水系统模拟软件^[9]。GMS 是唯一支持 Tins、solids、钻孔数据、2D 或者 3D 地质统计学的系统,它也包括 2D 和 3D 的有限单元和有限差分模型。此外,它还封装了基于 MODFLOW 的水流模型、溶质运移模型 MODPATH、MT3D 和 RT3D,以及基于有限单元法的 FEMWATER 模型等。其主要优点体现于:在前处理过程中,GMS 软件可以采用 MODFLOW 等模块的输入数据,同时 MODFLOW 等模块的计算结果又可以直接导入 GMS 中进行后处理,实现计算结果的可视化。

1.2.2 地下水管理模型研究现状

1959 年,Todd 在他的经典论著《Ground Water Hydrology》中明确提出了地下水管理的概念,20 世纪 60 年代以来,迅速发展起来的地下水数值模拟模型大大推进了地下水的定量化研究^[10]。“备选方案法”是一种比较简单的确定地下水管理方案的方法。通常给定多种条件(如开采方案),多次运行数值模拟模型,可以得到不同条件下的地下水状态,在给定的目标下,通过比较各种方案,可选择目标较优的方案作为决策方案,这是 20 世纪 70 年代以前最常用的优选地下水开发利用方案的方法。由于要多次运行模拟模型,比较不同方案下的地下水状态,这种方法耗时较多。这不是严格意义上的“最优解”,没有运用运筹学的方法全面、综合地考虑管理的目标和各种约束,从而得不到理论意义上的最优地下水开发利用方案。

地下水管理模型通常由地下水系统的数值模拟模型和优化模型耦合而成。Maddock^[11]推导出地下水系统单位脉冲响应函数,提出了建立大规模地下水水力管理模型有效的方法——响应矩阵法。而 Aguado 和 Remson^[12]首次将地下水数值模拟模型与线性规划联立,明确提出了建立地下水水力管理模型的嵌入法。20 世纪 70 年代到 80 年代初,国外以研究地下水水力管理模型为主,并提出了完善的理论和实用的建模方法,Gorelick^[13]对分布参数地下水管理模型,特别是水力管理模型进行了综述。

我国科技人员于 20 世纪 80 年代中后期开始地下水管理模型的研究与应用工作,公开发表的论著如林学钰、焦雨著《石家庄市地下水资源的科学管理》^[14],许涓铭等^[15]系统论述了建立分布参数地下水水力管理模型的基本理论和方法。在这一阶段,我国几乎所有以地下水为主要供水水源的大城市,针对不同的问题,都建立了地下水管理模型,如石家庄、西安、哈尔滨、长春、济南、包头等。一些典型地区也建立了

区域地下水管理模型,如河北平原、河西走廊、柴达木盆地等。这些研究大大推进了我国地下水科学管理的进程,但由于当时建模所考虑的因素多为水力要素,模型结构也比较简单,多归结为求解线性规划问题,这大大限制了模型的实用性和可操作性。

20世纪90年代以来,由于数值模拟和计算机技术以及数学方法在地下水资源优化开发方面的理论与方法日臻完善,使复杂的水资源管理问题得以有效的解决。这不但促进了地下水管理学科的迅速发展,并在推动水文地质学从定性研究进入量化研究的过程中作出了应有的贡献。从模型的研究内容看,主要集中在地表水-地下水联合调度、地下水量-水质综合管理、地下水可持续利用管理模型的研究上;从模型的结构看,主要是以非线性规划、动态规划和多目标规划管理模型为研究的热点和难点问题。

1.2.2.1 地下水非线性管理模型研究进展

地下水管理模型的非线性问题是普遍存在的,产生非线性的原因主要有两个:其一是系统状态的非线性,如潜水含水层模拟模型的非线性;其二是管理问题的非线性,如目标函数和某些特殊约束条件的非线性。真实的地下水系统管理问题大多数是非线性的,因此非线性管理模型能更精确地描述这类地下水系统及其管理问题,因而提高模型结果的精度和可信度。由于非线性规划问题没有统一的模式,在可行域内有可能存在多个局部最优解,因而到目前为止,还没有通用的、高效的求解方法,要根据管理模型的结构特点和规模,选择合适的求解方法^[10]。

线性化是解决非线性问题最简单的方法,如Gorelick和Remson^[16]、Ratzlaff^[17]等都应用这种方法解决这类问题。迭代法也是解决非线性问题的有效方法之一,如Aguado和Remson^[18]用预测-校正法通过反复迭代求解潜水含水层地下水管理问题;Willis和Newman^[19]用求解一系列线性规划替代非线性目标函数、线性约束条件的非线性规划问题。王洪涛提出了非线性多含水层地下水资源管理的处理方法,并把这一方法应用到唐山市以防治岩溶地面塌陷为目的的水资源管理中^[20]。

若非线性规划的目标函数是决策变量的二次多项式,并且模拟模型和其他约束条件又全是线性的,则称这种非线性规划为二次规划。二次规划有统一的表示形式和通用解法,是非线性管理模型中最常用的求解方法之一。如Lefkoff和Gorelick^[21]、Misirli和Yazicigil^[22]等均是二次规划求解管理模型。

此外,常用于解非线性规划的方法还有直接搜索法(主要有修正单纯形法、Nelder

—Mead 单纯形法、并行方向搜索法) 和基于导数的优化方法(如约束优化的隐式筛选法等)。人工智能算法(又称进化算法, evolutionary algorithms, EA) 也为求解高度非线性规划问题开拓了广阔的前景。

1.2.2.2 地下水动态规划管理模型研究进展

地下水系统本身是一个高度复杂的动态系统。由于管理区的自然条件和人为作用等均在不断地发生变化, 尤其当水源地的地下水要进行长期开采时, 地下水资源管理模型必须随着时间推进做定期的修正以保证模型的精确性和可靠性, 地下水动态规划管理模型的提法便应运而生^[23]。这方面的研究可参阅有关文献, 如 Yakowitz, Andricevic^[24,25]等。动态规划方法本身还不够完善, 在高维的情况下会产生所谓的“维数灾”问题, 目前在求解地下水动态规划管理模型中, 用的较普遍的方法是微分动态规划方法, 它是由 Jacobson 和 Mayne^[26]提出的。微分动态规划方法是一种多维动态规划的改进算法, 不需要进行状态变量和决策变量的离散化, 克服了计算量呈维数增长这一障碍。因此, 它提供了一种解算大型、多时段、非稳态流的地下水资源管理模型的可行的分析计算方法^[27]。

Murry 等^[28]运用带约束条件的微分动态规划方法成功地实现了多级水库的优化控制; Jones 等^[29]利用微分动态规划方法求解了最优控制模型, 成功地解决了理想模型中 8 个假设井的最优开采量分配问题; Culver 等^[30]建立了地下水水质模拟模型并应用有限元法求解, 通过应用微分动态规划方法和 Quasi-Newton 近似法, 确定了含水层不同时期的最优抽水方案; Chang 等^[31]应用微分动态规划方法解决了时变地下水系统污染修复最优控制问题; Chang 等^[32]联合应用微分动态规划方法和遗传算法解决了地下水管理问题; Chu 等^[33]应用人工神经网络方法和微分动态规划方法解决了大规模地下水系统的管理问题。我国学者李文渊等^[34]建立了以抽水费用最小为目标的地下水管理模型, 应用微分动态规划方法求解, 并编制了计算机程序; 郝永红等^[35]结合阳泉市岩溶地下水系统的实际, 应用微分动态规划方法为阳泉市岩溶水的开发提出了最优开采方案; 王浩然^[36]以位于山东省淄博市境内的孝妇河流域上游地区的地下水系统为研究对象, 构造了地下水开采条件下的控制模型, 采用微分动态规划方法求解, 获得了比较符合实际且容易实施的地下水优化开采量。

1.2.2.3 地下水多目标管理模型研究进展

地下水多目标管理模型是以地下水模拟模型为基础,由两个或两个以上的目标函数及其约束条件组成的,用于对地下水进行统筹规划和有效保护的管理模型。地下水多目标管理模型更能体现地下水系统的层次性和多目标性,模型不仅能提供地下水合理开发利用最优方案,而且可作为宏观经济和环境规划的决策依据,因而更具实用性和可操作性^[37]。由于多目标问题类型多,无统一的数学形式,故没有通用的求解方法。针对不同的管理模型和目标评价准则,应采用相应的解法。

20 世纪 70 年代以来,多目标管理模型用于解决水资源的规划问题^[38,39];80 年代以后,随着对地下水系统研究的不断深入、地下水模拟技术及其与管理模型耦合技术的发展,多目标规划才出现在地下水管理问题中。Willis 等^[40]首次建立了地下水多目标管理模型;Bogardi 等^[41]采用一种交互式多目标决策方法求解地下水多目标管理问题,有三个目标函数:总抽水量最大、抽水降深最小以及总抽水费用最低;Ritzel 等^[42]用遗传算法求解多目标地下水污染控制问题;Park 等^[43]运用多目标遗传算法对沿海含水层中的抽水量和井位进行优化,以防止海水入侵;Kollat 等^[44]对 4 种多目标优化算法进行了对比研究;邵景力等^[45,46]运用线性规划方法对包头市地下水多目标管理模型进行了求解,他们还建立了包头市地下水-地表水联合调度多目标管理模型,模型最终归结为求解线性目标规划问题;代振学等^[47]建立了济宁-兖州矿区地下水多目标管理模型,采用模糊线性规划法求得了管理模型的最优解,最后通过灵敏度分析和流场模拟,证实了最优解的正确性;孟庆国等^[48]进行了城市地下水多目标管理模型的相关研究,建立了内蒙古呼和浩特市地下水多目标管理模型,采用多阶段目标规划法对模型进行求解;王来生等^[49]建立了哈尔滨市地下水资源多目标规划管理模型,将求解多目标最优化问题的约束法和线性加权法相结合,给出了一种综合解法;王红旗等^[32]根据大庆市西部地区地下水系统的特点,构建了地下水资源多目标动态规划管理模型,采用多目标规划的改进线性加权法和微分动态规划方法相结合的方法进行求解,通过管理模型的运算得出三种规划方案下的地下水最优开采量,并根据管理模型的运算结果对研究区的地下水资源开发利用规划提出合理化建议;贺北方等^[50]建立了区域水资源多目标优化配置模型,目标有 3 个:区域供水净效益最大、区域重要污染物排放量最小、供水系统缺水量最小,应用遗传算法求解了此管理模型。