



普通高等教育“十三五”规划教材

水资源系统优化 原理与方法

门宝辉 尚松浩 编著



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

水资源系统优化原理与方法

门宝辉 尚松浩 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在介绍水资源系统优化基本原理的基础上,阐述了系统优化方法在水资源规划、设计和配置中的应用,并将 Excel 优化工具、LINGO 及 Matlab 优化工具箱引入例题的求解中,书中很多实例采用一题多解的方式来解决,为学生分析和处理复杂工程问题提供了思路和途径。

本书可作为水文与水资源工程专业、水利水电工程专业及相关专业的本科生教材,还可供研究生及从事水利工程或市政工程等涉及优化技术的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水资源系统优化原理与方法/门宝辉,尚松浩编著. —北京:科学出版社, 2018.5

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-03-057190-8

I. ①水… II. ①门… ②尚… III. ①水资源—系统优化—高等学校—教材 IV. ①TV211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 075297 号

责任编辑:文 杨 程雪星/责任校对:何艳萍

责任印制:吴兆东/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年5月第一次印刷 印张:18 3/8

字数:470 000

定价:89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

“水资源系统优化原理与方法”是水文与水资源工程专业的一门必修课程。通过本课程的学习，学生应掌握水资源系统优化的基本理论、分析方法和决策技术等，以及水资源系统分析、评价、优化模型构建及其计算机软件求解等方面的知识，具体为水资源系统的概念、水资源系统优化模型的建立及求解方法，包括水资源系统的线性规划模型、对偶模型、整数规划模型、非线性规划模型、动态规划模型、多目标规划模型，并了解遗传算法、人工神经网络、模拟退火算法、粒子群优化算法，以及混沌优化算法等一些新的理论和方法，并将系统工程的观点、思想、方法和原理应用到水资源工程及水利水电工程的规划、设计和管理等工程实践中，为学习水资源规划及利用、水库优化调度、水环境保护等专业课，以及毕业后从事水文水资源和水利工程等相关专业工作及进行科学研究打下基础。

本书是在作者多年实践教学的讲义基础上，结合当前有关水资源系统分析及优化方法的书籍(专著、教材、文章等)编写而成的。主要内容包括绪论、水资源系统线性规划模型及其应用、水资源系统线性规划的对偶模型及其应用、水资源系统整数线性规划模型及其应用、水资源系统非线性规划模型及其应用、水资源系统动态规划模型及其应用、水资源系统多目标规划模型及其应用、现代智能算法在水资源系统优化中的应用。各章均配有习题，有助于学生对课程内容的掌握。

本书由门宝辉和尚松浩编著，研究生田巍对书中的实例、计算程序的编制及例图做了大量工作，特此表示感谢！本书得到了华北电力大学教务处及华北电力大学教学名师培育计划(第四期)的资助，作者一并表示感谢！本书在内容编写过程中参阅并引用了书后所列参考文献的相关书籍、文章和网上相关数据资源，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，对于本书中的不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2017年7月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
一、系统的概念	1
二、系统的结构与功能	2
三、系统的属性	3
四、系统的类型	4
五、系统的模型化方法	5
六、系统模型的优化方法	7
第二节 水资源系统的优化及其应用软件	7
一、水资源系统的概念	7
二、水资源系统的优化	9
三、水资源系统优化的研究进展	11
四、应用软件	12
第三节 本书的主要内容	27
习题	28
第二章 水资源系统线性规划模型及其应用	29
第一节 概述	29
一、线性规划模型的实例	29
二、线性规划模型的一般形式	31
三、线性规划模型的标准型	32
第二节 线性规划模型的有关概念及解的基本性质	33
一、线性规划的有关概念	33
二、线性规划的图解法	34
三、线性规划解的几种情况	36
四、线性规划的基本定理	37
第三节 单纯形法	38
一、单纯形法的基本思路	38
二、单纯形法的基本原理	38
三、单纯形法的计算过程	41
四、单纯形高斯消去法举例	41
五、单纯形表	42
六、确定初始基可行解的人工变量法	43

第四节 修正单纯形法	47
一、修正单纯形法的基本思路	47
二、修正单纯形法的计算步骤	47
三、可行基 B 逆矩阵的求解方法	47
四、修正单纯形法的计算实例	48
第五节 随机线性规划模型	51
一、概率规划	52
二、机会约束规划	52
第六节 线性规划模型及其计算机求解的应用实例	54
一、流域规划问题	54
二、水库优化调度最优供水问题	58
三、水资源优化配置问题	62
习题	66
第三章 水资源系统线性规划的对偶模型及其应用	69
第一节 概述	69
一、线性规划对偶问题的数学模型	69
二、原问题与对偶问题数学模型的类型	72
三、对偶问题的性质	76
四、原线性规划 (LP) 与其对偶模型 (LD) 的对应关系	77
第二节 对偶单纯形法	78
一、对偶单纯形法的概念	78
二、对偶单纯形法的计算步骤	78
三、影子价格	80
第三节 灵敏度分析	82
一、资源向量的变化对线性规划模型解的影响	83
二、价值向量的变化对线性规划模型解的影响	85
三、约束条件中系数矩阵的变化对线性规划模型解的影响	86
四、增加决策变量对线性规划模型解的影响	86
五、增加约束条件对线性规划模型解的影响	89
第四节 对偶模型的实例应用	89
一、水电站发电的水价制定问题	89
二、水源地的供水问题	91
习题	92
第四章 水资源系统整数线性规划模型及其应用	94
第一节 概述	94
一、整数规划的概念与类型	94
二、整数规划的数学模型	94
三、整数规划的求解方法	95
第二节 分支定界法与割平面法	97

一、分支定界法	97
二、割平面法	100
第三节 0-1 型整数规划及指派问题	103
一、0-1 型整数规划	103
二、指派问题	107
第四节 整数线性规划的实例应用	112
一、投资建设项目的选址问题	112
二、投资建设项目选择问题	116
三、项目开发建设次序优化问题	117
四、工程建设中材料的优化问题	122
习题	124
第五章 水资源系统非线性规划模型及其应用	126
第一节 概述	126
一、非线性规划的数学模型	127
二、非线性规划的图解法	128
三、非线性规划的类型与特点	130
四、非线性规划的相关基础知识	130
第二节 一维最优化搜索方法	133
一、解析法	134
二、消去法	136
三、多项式插值法	137
第三节 无约束非线性规划的解析搜索法	138
一、梯度法	139
二、牛顿法	141
三、共轭梯度法	142
四、变尺度法	143
五、解析搜索法小结	146
第四节 无约束非线性规划的直接搜索法	146
一、坐标轮换法	146
二、模式搜索法	147
三、单纯形搜索法	149
四、共轭方向法	151
第五节 有约束非线性规划的求解方法	152
一、约束非线性规划的可行方向与起作用约束	153
二、拉格朗日乘子法	154
三、约束极值的最优性理论(Kuhn-Tucker 理论)	155
四、罚函数法	158
五、二次规划	162
第六节 非线性规划模型的实例应用	165

一、非线性回归分析问题	165
二、灌溉水量的合理分配问题	168
三、河流水质规划问题	169
四、城市排水方案的优化问题	170
习题	172
第六章 水资源系统动态规划模型及其应用	175
第一节 概述	175
第二节 动态规划的基本原理和基本方程	176
一、多阶段决策过程的数学描述	176
二、动态规划的基本概念	177
三、动态规划的基本原理	179
四、动态规划的基本方程	179
五、动态规划模型的基本形式	180
六、建立动态规划模型的一般步骤	180
七、动态规划的优越性和局限性	181
第三节 确定性动态规划模型及其实例应用	181
一、最优线路问题	182
二、资源优化分配问题	186
三、水库优化调度的动态规划模型	191
第四节 随机性动态规划模型及其实例应用	198
一、多阶段决策过程中的随机性	199
二、随机最优策略与基本方程	199
三、随机变量相互独立时的动态规划问题	201
四、随机变量具有马尔可夫链关系的动态规划问题	203
习题	205
第七章 水资源系统多目标规划模型及其应用	206
第一节 概述	206
一、水资源系统的多目标问题	206
二、多目标规划的数学模型及特点	207
三、多目标规划的解	207
四、多目标规划问题的求解方法	210
第二节 评价函数法	210
一、主要目标法	211
二、线性加权和法	213
三、理想点法	224
四、乘除法	225
五、功效系数法	226
第三节 分层求解法	228
一、分层序列法	228

二、重点目标法	234
三、分组序列法	234
第四节 目标规划法	234
一、目标规划法的基本思路	234
二、最小偏差法	234
三、线性目标规划	235
第五节 多目标线性规划的逐步法	237
一、逐步法的基本思路	237
二、逐步法的计算步骤	237
第六节 多目标规划模型及其实例应用	239
一、供水系统的目标规划模型	239
二、水资源优化配置的多目标规划模型	242
三、加权优序法在水质评价中的应用	246
习题	249
第八章 现代智能算法在水资源系统优化中的应用	251
第一节 概述	251
第二节 遗传算法	253
一、遗传算法的概念	253
二、遗传算法的主要参数	254
三、遗传算法的操作步骤	254
四、遗传算法的应用实例	257
第三节 人工神经网络	257
一、人工神经网络的基本概念	257
二、人工神经网络的网络类型	259
三、人工神经网络的应用实例	261
第四节 粒子群优化算法	265
一、粒子群优化算法的基本原理	265
二、粒子群优化算法的操作步骤	267
三、粒子群优化算法的两种模式	267
四、粒子群优化算法的应用实例	268
第五节 模拟退火算法	270
一、模拟退火算法的起源	270
二、模拟退火算法的基本原理	271
三、模拟退火算法的分类	272
四、模拟退火算法的操作步骤及参数选择	273
五、模拟退火算法的应用实例	275
第六节 混沌优化算法	276
一、混沌理论	276
二、混沌优化算法的概念	277

三、混沌优化算法的基本原理	277
四、混沌优化算法的分类	278
五、混沌优化算法的操作步骤	278
六、混沌优化算法的应用实例	279
习题	281
参考文献	282

第一章 绪 论

【学习要求】了解系统的概念；了解系统的结构和功能；了解系统的特征；掌握系统的属性和类型；掌握水资源系统的概念；掌握水资源系统的优化方法；了解 Excel 规划求解、LINGO、Matlab 优化工具箱。

【学习重点】水资源系统优化模型的结构及优化方法。

第一节 概 述

一、系统的概念

系统(system)的概念与系统的思想是在人类认识自然、改造自然的实践过程中逐步形成和发展起来的,20世纪40年代以后“系统”一词才开始被广泛使用。

系统最早源于古希腊语,其含义是指由部分组成的整体。从系统的组成角度看,系统是由两个或两个以上相互联系的要素组成、具有整体功能和综合行为的集合。系统是由组成要素集和要素集上的关系集共同决定的,其中,关系集是系统工程的工作重点。任何一个系统,必须满足三个条件:一是组成系统的要素必须是两个或两个以上,这反映了系统的载体基础的多样性、差异性,是系统不断演化的重要基础;二是各要素之间必须具有关联性,系统中不存在与其他要素无关的孤立要素,这反映了系统各要素相互作用、相互激励、相互依存、相互制约、相互补充、相互转化的内在相关性,也是系统不断向一定结构或秩序演化的重要机制;三是系统的整体功能和综合行为不必是系统各单个要素或这些要素之和所具有的,而是由各要素通过相互作用表现(emerge)出来的。

但是,不同学科或不同的学者对系统概念的认识也不完全一致。美籍奥地利理论生物学家冯·贝塔朗菲于1973年提出的系统概念是“相互作用的诸要素的综合体”,而我国系统科学界对系统科学的定义为,系统是由相互作用、相互依赖的若干组成部分结合而成,具有特定功能的有机整体。

水资源开发利用中,由挡水建筑物(大坝)、水库水体、泄洪设施(溢洪道、溢洪洞等)、水电站、供水设施(取水闸门、输水渠道、供水管网)、航运设施(船闸、升船机等)等组成的有机整体,可以实现防洪、发电、工农业供水、航运等功能,称为水资源利用系统。

综上所述,“系统”一般具有五方面的特征:①由两个或两个以上的元素组成;②各元素之间相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用;③各元素协同运作,使“系统”作为整体具有各组成元素单独存在时所没有的某种特定功能;④系统是运动和发展变化的,是动态的发展过程;⑤系统的运动具有明确的特定目标。

二、系统的结构与功能

(一) 系统的结构

任何系统都具有一定的结构，系统的结构就是组成系统的诸要素之间相对稳定的关联方式，也就是系统内部诸要素之间的联系，如一个家庭系统的人员结构、一个科研课题组系统的人员组成、一个公司(或企业)的部门组成。

系统的相互联系、相互作用的组成部分(元素)称为系统的结构。系统的组成元素是相互作用的，同时又是可分的，其中，每个元素也可能是由更小的元素组成的系统，称为子系统。结构是形成系统整体性的基础，系统的结构越严密，其整体性越强。例如，水资源系统一般由水资源、水资源工程系统、水资源管理系统等组成，其中，水资源由地表水资源和地下水资源构成，地表水又包括河流、湖泊、水库等部分，而地下水则包括潜水、承压水等部分。

(二) 系统的外部环境

系统总是处在一定的环境之中。作为研究对象，系统在时间和空间上都限定在一定的范围内。在系统之外与其有物质、能量、信息交换的事物构成系统的外部环境。外部环境对系统的作用表现为系统输入，而系统对外部环境的作用表现为系统输出，系统输入、输出是通过系统与外部环境的边界进行的，一般情况下，将外部环境的输入转变为系统的输出称为开环系统[图 1-1 (a)]。环境是相对于系统而言的，如果系统的界限发生变化，环境也随之变化。对于流域水资源系统来说，环境包括对水资源系统有影响的自然条件(如气象、水文、地形、地貌、植被等)与人为因素(水资源的开发利用，如筑坝、蓄水、引水、灌溉等)，输入主要为降水，输出主要包括人类活动利用水量、自然消耗水量、外流河的入海水量等。

一般情况下，系统输入决定输出，但输出往往也会对输入产生影响，这时称该系统具有“反馈”特性，将系统输出对环境的输入的影响构成的系统称为闭环系统[图 1-1 (b)]。能使系统输入得到增强的反馈称为正反馈，反之则称为负反馈。

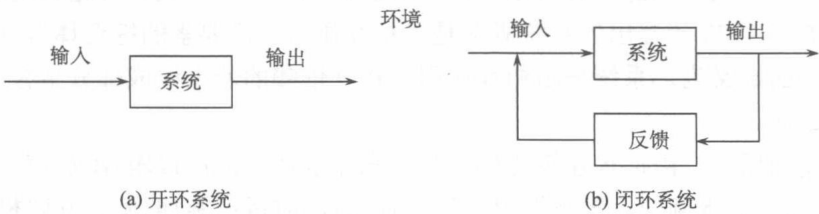


图 1-1 系统与外部环境的关系

(三) 系统的功能

任何系统都有一定的目的，也就是都具有特定的功能，系统的功能是指系统与外部环境相互联系和相互作用中所表现出来的性质、能力和行为，也就是系统与外部环境之间的外部联系，系统的功能包括接收系统输入、把系统输入转换为系统输出的系统转换、向外部环境进行系统输出、反馈等。例如，本科高校系统的一个功能就是把高中生培养成为大学毕业生；

信息系统的功能是进行信息的收集、传递、储存、加工、维护和使用。系统的结构是系统的内在基础，系统的功能是系统要素和结构的外在表现，一定的结构总是表现为一定的功能，一定的功能总是由具有一定结构的系统实现的。要素间协调联系程度高，则系统功能良好程度高，反之系统功能良好程度低。系统的结构与功能相互作用，以适应系统和环境变化的需要。系统发展的驱动力就是系统内部诸要素之间及系统与外部环境之间的相互作用。

把外部环境的输入转换为系统的输出就是系统的功能。系统的功能取决于系统结构，并受外部环境的影响，这充分体现了系统与外部环境之间物质、能量和信息输入、输出间的关系。例如，水利枢纽的功能是把天然径流量(输入)调节为人类所需要的水量(输出)，水利枢纽的结构决定了其在防洪、发电、供水、航运，以及下游生态环境保护等方面的功能。

三、系统的属性

根据系统的概念，以及系统的结构与功能，系统的属性一般具有集合性、相关性、层次性、整体性、目的性、环境适应性等六项。

(一) 集合性

系统至少由两个可以互相区分的元素或子系统组成，可以用式(1-1)表示

$$X=\{x_i|i=1, 2, \dots, n, n\geq 2\} \quad (1-1)$$

式中： X 为系统； x_i 为系统第 i 个组成元素或子系统。

如果 X 用来表示水资源工程系统，则水资源工程系统中的挡水建筑物、水库水体、泄洪设施(溢洪道、溢洪洞)、水电站、供水设施(输水渠道、输水管道)、航运设施(船闸)等为 x_i 。

(二) 相关性

组成系统的元素或子系统之间存在着普遍联系，这些联系是反映系统特征和保证实现系统目标的主要内容，体现了各个子系统或各个元素之间的相互关系。

(三) 层次性

各个元素在系统中是按照一定的层次排列的。一个系统可以分解为若干个子系统，子系统可以再细分。例如，一个国家的水资源系统，可以分为国家—省—市—县—乡镇等不同层次的水资源系统，根据研究问题的不同来确定细分成一个或几个层次。

由于系统中各个子系统或元素所处位置的不同，各子系统或元素之间存在三种关系，即上级子系统或元素对下级的领属关系、下级子系统或元素对上级的从属关系、同级子系统或元素之间的平等关系。

(四) 整体性

系统的各组成部分构成一个有机整体，系统不是各个子系统或元素等组成部分的简单相加，系统的目标、功能，以及系统的演化规律等方面都体现出系统的总体特征，即系统具有整体性。

(五) 目的性

系统的存在都具有其目的性,即系统都是为了完成其特定的功能而存在的,其各个子系统或元素等组成部分都具有一定的目的并且有达到目的的手段。系统的目的可分解为多层次的目标,实现全部的目标,就等于实现了系统的目的。

(六) 环境适应性

系统存在于一定的外部环境之中,通过外部环境的输入和系统的输出与环境发生物质、能量和信息的交换(即物质流、能量流、信息流)。环境提供并限制了系统的运行条件,构成了系统的约束。系统离不开环境,并且要不断适应环境的变化,否则,系统将不能长期存在。例如,我国古代水利工程都江堰就是一个环境适应性很强的水资源系统,历经 2000 多年仍能发挥其巨大的社会、经济和生态环境效益。

四、系统的类型

为了更好地研究系统,需要对其进行分类。根据不同的研究目的和需要,可以根据不同的准则对系统进行分类。

(一) 按系统组成部分的属性分类

按系统组成部分的属性可将系统分为自然系统、人工系统和复合系统。自然系统是由自然物质组成的系统,如银河系、太阳系、海洋系统、陆地系统、水文循环系统、碳循环系统、水生态系统等;人工系统是按照一定的目的而人为建立的系统,如社会经济系统、城市建筑系统、公路交通系统等;复合系统是由人工系统和自然系统复合而成,既有人工系统的特性,又有自然系统的特性,如农田生态系统、灌溉渠道系统、城市供水排水管网系统、气象预报系统、水库防洪调度系统、水文预报系统、水资源优化配置系统等。

(二) 按系统组成部分的形态分类

按系统组成部分的形态可将系统分为实体系统和概念系统。实体系统(硬件系统)是由实物构成的系统,如建筑工程系统、机械工程系统、供水工程系统等;概念系统(软件系统)是由非物质的概念、原理、方法等构成的系统,如法律法规系统、软件系统、水文模型系统等。实体系统可以是自然系统、人工系统或复合系统中的任何一种,但概念系统属于人工系统。

(三) 按系统与外部环境的关系分类

按系统与外部环境的关系可将系统分为开放系统和封闭系统。开放系统是指系统与外部环境之间存在物质、能量和信息的相互交换。根据是否存在反馈作用,开放系统可分为开环系统和闭环系统(图 1-1)。封闭系统是指系统与环境之间没有明显的物质、能量和信息的相互交换。实际上,严格的封闭系统是不存在的,当系统与外部环境之间的物质、能量和信息的相互交换量很少、强度很弱时,即可近似看成封闭系统。

(四)按系统所处的状态分类

按系统所处的状态可将系统分为静态系统和动态系统。静态系统是指各个子系统和组成的元素不随时间变化,而动态系统则是指各个子系统和组成的元素随时间变化。实际上,静态系统是不存在的,但如果在一时间内系统的变化可以忽略,或是相对稳定的,则视为静态系统,如灌溉渠道系统、城市供水排水管网系统。现实中的系统多是动态系统,如水文循环系统、生态系统、社会经济系统等。

(五)按系统的规模分类

按规模可将系统分为小型、中型、大型、超大型系统。随着系统规模由小到大,系统中各个子系统和元素的数量将增加,各部分之间的关系将越来越复杂。

系统还可以根据其他的准则进行分类,也可以按照几个分类准则对系统进行组合分类,如按系统与外部环境的关系、系统状态这两个准则组合进行分类,则系统可分为静态开放系统、静态封闭系统、动态开放系统、动态封闭系统;如按系统组成部分的属性、系统的状态这两个准则组合进行分类,则系统分为静态自然系统、静态人工系统、静态复合系统、动态自然系统、动态人工系统、动态复合系统。

五、系统的模型化方法

系统模型是对系统进行分析的重要手段。系统的模型化(系统建模)是把系统各组成要素之间相互关联的信息,用数学、物理或其他方法进行抽象,建立系统模型,使其与系统有相似的结构或行为并体现系统的整体特征。

(一)系统模型的种类

一般情况下,系统是多种多样的,对于同一系统也可用不同的方法、从不同的角度建立不同的模型,因此系统模型也是多种多样的。按照形态,可将模型分为实体模型和抽象模型两类。实体模型又称物理模型,是根据相似原理(如几何相似、运动相似、动力相似)对实际系统的尺寸进行放大或缩小并用实物构造的模型,其特点是直观、形象,如水工建筑物模型。抽象模型是用概念、原理、方法等非物质形态对系统进行描述得到的模型,可以反映系统的本质特征。数学模型、逻辑模型等均属于抽象模型。

系统模型还可以按照其他方法进行分类,如按研究对象可将系统模型分为工程模型、生态模型、环境模型、资源模型、能源模型、经济模型、人口模型等;按用途可将系统模型分为预测模型、优化模型、过程模型、决策模型等;按适用范围可将系统模型分为总体模型与局部模型、宏观模型与微观模型等。

系统分析中最常用的模型是数学模型,通常所说的系统模型一般指数学模型。数学模型具有高度的抽象性,可以定量描述各因素、变量间的关系,具有较高的精度和较强的适应性,便于利用计算机进行编程求解。根据数学模型的特点,可进一步将其细分为静态模型与动态模型、线性模型与非线性模型、连续模型与离散模型、确定性模型与随机性模型、集中参数模型与分布参数模型、投资模型与运行模型等不同的类型。系统分析中的各种预测模型、优化模型、模拟模型、评价模型和决策模型等,多数属于数学模型。

(二) 系统模型的组成

通常情况下,系统模型一般由模型部件、模型变量和相互关系三部分组成。

模型部件是指模型的组成元素。对于水资源工程系统来说,模型部件在概念上相当于构成水资源系统的工程建筑物,如水库、大坝、电站、堤防、渠系、灌区等。

模型变量包括决策变量、状态变量、模型参数、输入变量和输出变量。决策变量(设计变量)是系统中可以人为设定和控制的变量,如水资源系统规划中水库的库容、电站的装机容量、灌区的灌溉面积,系统运行中水库的泄水量、地下水开采量等。状态变量是描述系统运行中各个组成部分的状态及其变化的变量,如水库的蓄水量与水位、地下水位、农田土壤含水量等。模型参数是描述系统特性和条件的变量中不受人为因素直接影响的变量,如输水效率、水轮机效率等。系统输入变量一般不受人为因素控制,如径流系列、气象(降水、气温、蒸发等)系列等。输出变量表示一定决策方案下的系统效应,如供水量、发电量及相应的经济效益。

相互关系是指模型部件之间相互制约、相互作用的各种联系,水资源系统模型中一般包括运行规则、约束和设计准则等三类基本的相互关系。运行规则是系统运行中需要满足的要求,如水库运行规则是在考虑水库防洪、发电、灌溉、航运等要求的基础上拟定的。约束是系统变量之间必须满足的函数关系,水资源系统中有不同类型的约束,包括物理约束(如非负约束、水量平衡)、技术约束(如水库的最大库容、泄水能力、渠道或管道的输水能力)、法律约束(如分水协议、技术标准、行业规范)、经济约束(如投资)等。设计准则用于评估系统特性,确定系统目标函数。

(三) 系统模型化的主要方法

对于不同的研究对象和研究目的,需要建立的模型有所差异,建模方法也不相同,常用的建模方法主要有以下几种。

(1) 直接分析法,对于比较简单的系统,可以根据有关的原理直接分析列出系统的模型,如水资源系统(水库、河道、土壤水、地下水等)的水量平衡方程可以根据质量守恒定律得到。

(2) 机理分析法,根据系统的特性、结构、功能及其与外部环境的相互关系,分析其因果关系与演化过程,在一定的假设条件下建立机理模型,如地表水、土壤水、地下水的动力学模型。

(3) 量纲分析法,是利用量纲和谐原理(凡是正确反映客观规律的物理方程,其各项的量纲必须一致)来推导数学模型的方法,主要有白金汉 π 定理、瑞利法等。量纲分析法目前主要应用于力学、物理学,以及水利工程的水力学等。

(4) 数理统计方法,利用采集的一定量的观测数据,建立系统变量与其影响因素间的统计模型。回归分析方法、时间序列分析方法等都属于这一类方法,常用于预测模型的建立,如降水径流相关模型、径流量时间序列模型等。

(5) 模糊方法,在系统中有一类模糊系统,其行为/结构没有清晰的界定,系统的信息具有模糊性(系统不确定性的一种表现形式),如汛期与非汛期、丰水年与枯水年之间均存在一定的模糊性。根据模糊集理论,可以用隶属度将具有模糊性的概念定量化,建立模糊系统的数学模型,如模糊预测模型、模糊优化模型、模糊评价模型、模糊决策模型等。

(6) 灰色系统建模方法, 灰色系统理论是研究灰色不确定性(数据与信息不足所产生的不确定性)的理论, 适合于小样本建模, 一般观测数据达到 4 个就可以建立灰色模型 (grey model, GM), 如灰关联模型、灰预测模型、灰决策模型等。

近年来, 人工神经网络、遗传算法、模拟退火算法、粒子群优化算法和混沌优化算法等都广泛地应用于建模及优化求解之中。对于复杂系统来说, 建模过程优化往往需要综合应用不同的建模方法, 或建立不同的模型进行比较、分析。

六、系统模型的优化方法

最优化是系统方法处理问题的基本方法, 是在一定的约束条件下寻求合理的决策方案, 使系统的总体效果达到最优。解决这类问题的方法即为系统优化方法。

在水资源系统的规划、设计、施工、运行管理过程中, 经常会提出一些问题, 即“如何合理地利用、分配有限的人力、物力、财力等资源, 才能使整个系统效果最好(效益最大、费用最省或损失最小)”。这类问题属于水资源系统优化问题。

系统最优化的一般模型由目标函数和约束条件组成。

目标函数:

$$\text{opt } Z(X) \quad (1-2a)$$

约束条件:

$$h_i(X) = b_i, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (1-2b)$$

$$g_j(X) \geq b_j, \quad j=1, 2, \dots, p \quad (1-2c)$$

$$X \geq 0 \quad (1-2d)$$

式中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为决策向量; $Z(X)$ 为目标函数; opt 表示最优化(包括最小化 min 与最大化 max); 式(1-2b)~式(1-2d)表示约束条件。根据目标函数、约束条件的性质, 最优化模型有不同的类型, 需要采用相应的优化方法进行求解。

如果系统目标只有一个, 或者多个目标是可以公度的(如水资源系统中灌溉效益、发电效益、供水效益等均可用货币来度量), 则目标函数是一个标量, 相应的优化模型属于单目标优化模型。在单目标优化模型的求解方法中, 线性规划适用于目标函数与约束函数均为线性函数的情况, 整数规划适用于决策变量为整数的情况, 非线性规划适用于目标函数或约束函数存在非线性函数的情况, 动态规划适用于可以表示为多阶段决策过程的情况。

如果多个目标间是不可公度的(如经济效益、社会效益、生态环境效益), 则目标函数为一向量, 相应的优化模型属于多目标规划模型。多目标优化问题的求解方法主要包括: ①化多目标为单目标, 如评价函数法中主要目标法、线性加权和法、理想点法、乘除法, 以及功效系数法等; ②分层求解法中的分层序列法、重点目标法和分组序列法; ③目标规划法。求解过程中, 一般都涉及决策者的价值取向, 因此多目标问题的求解往往需要决策者的参与。

第二节 水资源系统的优化及其应用软件

一、水资源系统的概念

水资源系统(water resources system, WRS)是指在一定区域内由水文、水力和水力上相互