

清华大学水利工程系列教材

System Analysis of Water Resources: Methods and Applications

水资源系统分析方法及应用

尚松浩 编著

Shang Songhao



清华大学出版社

清华大学水利工程系列教材

System Analysis of Water Resources: Methods and Applications

水资源系统分析方法及应用

尚松浩 编著

Shang Songhao

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

水资源系统分析是水资源及相关专业本科生及研究生的主要专业基础课之一。本书结合水资源系统的特点,阐述了系统分析方法及其在水资源系统规划、设计、管理中的应用。主要包括基本的系统分析方法(系统优化方法、系统模拟方法)及其应用,近年来应用较广泛的一些新方法(人工神经网络、遗传算法等),附录部分对目前常用的 Excel, MATLAB 等工具软件的优化工具进行了简要介绍。

本书可作为水文水资源、水利水电工程、农业土木工程及相关专业的本科生教材,同时可供研究生及工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

水资源系统分析方法及应用/尚松浩编著. —北京:清华大学出版社,2006. 1

(清华大学水利工程系列教材)

ISBN 7-302-11961-9

I. 水… II. 尚… III. 水资源—系统分析—高等学校—教材 IV. TV211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 116723 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 客户服务: 010-62776969

策划编辑: 徐培忠

文稿编辑: 赵从棉

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 北京国马印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 203 × 253 印张: 14.5 字数: 399 千字

版 次: 2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-11961-9/TV · 46

印 数: 1 ~ 3000

定 价: 29.80 元

前 言

水资源系统分析是近几十年来发展迅速的一门学科,它利用系统科学的理论和方法分析制定水资源的合理开发、利用、保护和管理方案,以达到整体最优或最满意的综合效益。系统分析方法已在水资源系统的规划、设计、施工、运行管理中得到了广泛的应用。

水资源系统分析是水资源及相关专业本科生及研究生的主要专业基础课之一。水资源系统分析方法包括系统建模方法、预测方法、优化方法、模拟方法、评价方法、决策方法等。考虑到本科生水资源系统分析课程的课时限制,本书以基本的系统分析方法(线性规划、整数规划、非线性规划、动态规划、多目标规划与决策等系统优化方法、系统模拟方法)为主,同时介绍了近年来应用较广泛的一些方法(人工神经网络、遗传算法等),附录部分对目前常用的 Excel, MATLAB 等工具软件的优化工具进行了简要介绍。本书可作为水文水资源、水利水电工程、农业水土工程及相关专业本科生教材,同时可供研究生及有关工程技术人员参考。

全书共分 8 章,讲授全部内容大约需要 60 学时。如果课时较少,可在课堂上讲授基本内容,其他内容由学生自学。各章节学时分配如下:

章 节	课时
第 1 章 水资源系统分析概论	4
第 2 章 线性规划及其应用	10
第 3 章 整数规划及其应用	6
第 4 章 非线性规划及其应用	10
第 5 章 动态规划及其应用	8
第 6 章 多目标规划与决策	8
第 7 章 系统模拟方法及应用	8
第 8 章 人工神经网络及应用	6
附录 A1	自学

本书是在近年来水资源系统分析教学工作的基础上编写的。在教学及教材编写过程中参考了有关论著(见参考文献),在此向有关作者表示衷心感谢。同时衷心感谢清华大学水利水电工程系张超教授在教学工作中的热情帮助,水文水资源研究所同事和清华大学出版社徐培忠编审对本书编写的大力支持,出版社有关编辑及研究生霍军军、邵惠芳、田俊武、胡庆芳等对书稿的认真校核。

对于本书的错误之处,敬请读者批评指正(联系地址:100084 北京 清华大学 水利水电工程系; email: shangsh@mail. tsinghua. edu. cn)。

作 者

2005 年 10 月

目 录

前 言	I
第 1 章 水资源系统分析概论	1
1.1 系统与系统分析	1
1.2 水资源系统与水资源系统分析	6
1.3 水资源系统分析方法	8
1.4 课程主要内容	15
第 2 章 线性规划及其应用	17
2.1 线性规划的数学模型	17
2.2 线性规划的有关概念与基本原理	20
2.3 单纯形法	25
2.4 修正单纯形法	33
2.5 对偶理论与对偶单纯形法	36
2.6 灵敏度分析	43
2.7 随机线性规划	48
2.8 线性规划的应用	51
第 3 章 整数规划及其应用	54
3.1 概述	54
3.2 分枝定界法	56
3.3 割平面法	59
3.4 0-1 规划	61
3.5 指派问题	64
3.6 整数规划解法小结	69
3.7 整数规划的应用	70
第 4 章 非线性规划及其应用	72
4.1 概述	72
4.2 一维最优化方法	77
4.3 无约束非线性规划的解析搜索法	80
4.4 无约束非线性规划的直接搜索法	86
4.5 约束非线性规划	92
4.6 遗传算法	102

4.7 非线性规划的应用	107
第5章 动态规划及其应用	111
5.1 动态规划的基本原理	111
5.2 确定性动态规划应用实例	116
5.3 随机动态规划	122
第6章 多目标规划与决策	130
6.1 多目标规划的模型与概念	130
6.2 多目标问题转化为单目标问题的解法	134
6.3 多目标问题转化为多个单目标问题的解法	139
6.4 目标规划法	141
6.5 多目标线性规划的逐步法	143
6.6 多目标规划的直接解法	145
6.7 层次分析法	147
6.8 多目标规划与决策方法的应用	152
第7章 系统模拟方法及应用	157
7.1 系统模拟技术概述	157
7.2 蒙特卡罗法	159
7.3 水文过程的随机模拟	163
7.4 水资源系统模拟模型	174
7.5 系统模拟技术中的优化方法	179
7.6 系统模拟技术的应用实例	181
7.7 作物优化灌溉制度模拟模型	187
第8章 人工神经网络及应用	192
8.1 概述	192
8.2 BP 网络	196
8.3 人工神经网络在水文水资源领域的应用	201
附录 A1 Microsoft Excel 与 MATLAB 优化工具简介	208
A1.1 Microsoft Excel 规划求解工具及其应用	208
A1.2 MATLAB 优化工具箱及其应用	211
附录 A2 习题	217
参考文献	225

第 1 章

水资源系统分析概论

1.1 系统与系统分析

1.1.1 系统的概念

在自然界和人类社会中存在各种各样的系统,如天体系统、生态系统、海洋系统、电力系统、交通系统等。在水资源开发利用中,由挡水建筑物、水库水体、泄洪设施、水电站、供水设施、航运设施等组成的有机整体,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(水资源工程系统)。

系统的概念与系统思想是在人类认识自然、改造自然的实践过程中逐步形成并发展起来的,20 世纪 40 年代以后“系统”一词开始广泛使用。但不同的学科或不同的学者对系统概念的认识也不完全一致。一般来说,系统(system)是由相互作用、相互依赖的若干组成部分(元素)结合而成的具有特定功能的有机整体。

1.1.2 系统的结构与功能

1. 系统的结构

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。系统的组成元素之间是相互作用的,同时又是可分的。其中的每一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,其整体性也越强。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,地表水又包括河道、水库、湖泊等部分,而地下水则包括潜水、承压水等部分。

2. 系统的环境

系统总是处在一定的环境中。系统作为研究对象,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环境。环境对系统的作用表现为系统输入,而系统对环境的作用表现为系统输出,系统输入、输出是通过系统与环境的边界(界面)进行的,如图 1-1(a)所示。

环境是相对于系统而言的,如果系统的界限发生变化,环境也会随之变化。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因素(如气象、水文、地形、地

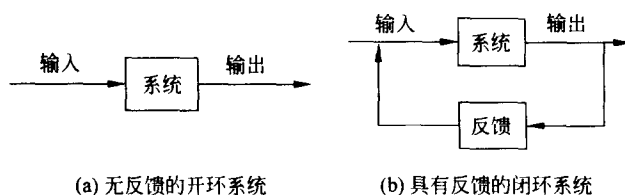


图 1-1 系统与环境的关系

貌、植被等)与人为因素(如水资源的开发利用),输入主要为降水,输出主要包括人类利用水量、自然消耗水量、外流河的人海水量等。

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(图 1-1(b)),这时称该系统具有“反馈”特性。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。

3. 系统的功能

把系统输入转换为输出就是系统的功能。功能由系统结构所决定,并受环境的影响,体现了系统与环境之间物质、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过程(输出),水利枢纽的结构决定了它在防洪、发电、供水等方面的功能。

1.1.3 系统的属性

根据系统的概念,系统具有以下基本属性。

1. 集合性

系统由至少两个可以相互区分的元素或子系统组成,可以表示为

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

式中 X 表示系统, x_i 表示系统第 i 个组成元素或子系统。例如水资源工程系统是由挡水建筑物、水库水体、泄洪设施、水电站、供水设施、航运设施等部分组成的。

2. 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系统元素之间的相互作用。

3. 层次性

系统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—县—乡镇等不同的层次,根据具体问题确定需要进行研究的一个或几个层次。

由于系统中元素所处位置的差别,它们之间形成 3 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相互关系。

4. 整体性

系统的各组成部分构成一个有机整体,系统不是各个组成部分的简单相加,系统目标、功能、规律等方面都体现出系统的总体特征。

5. 目的性

系统都具有其特定的功能,其组成都具有一定的目的并且有达到目的的手段。系统目的可以分解为多层次的目标,实现全部的系统目标,就等于实现了系统目的。

6. 环境适应性

系统存在于一定的环境之中,通过系统输入、输出与环境之间发生物质、能量、信息的交换。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,战国时期在成都平原修建的都江堰工程就是一个环境适应性比较强的系统,历经 2000 余年仍能发挥巨大的效益。

1.1.4 系统类型

系统千差万别,形态各异,为了便于对系统的研究,需要对其进行分类。根据不同的研究目的,可以选择不同的标准对系统进行分类。

1. 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、人造系统与复合系统。自然系统是由自然物质组成的系统,如太阳系、海洋系统等;人造系统是按照一定的目的而人为建立的系统,如经济系统、工程系统等;复合系统是由人造系统和自然系统复合而成的,既有人造系统的特性,又有自然系统的特性,如农田生态系统、气象预报系统等。

2. 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与概念系统。实体系统(硬系统)是由实物构成的系统,如工程系统、机械系统等;概念系统(软系统)是由非物质的概念、原理、方法等构成的系统,如法律系统、软件系统等。实体系统可以是自然系统、人造系统或复合系统中的任一种,但概念系统属于人造系统。

3. 按系统与环境的关系分类

按系统与环境的关系可将系统分为封闭系统与开放系统。当系统与环境之间有物质、能量、信息交换时称为开放系统;根据是否存在反馈作用,开放系统可分为闭环系统与开环系统(图 1-1)。当二者之间没有明显的物质、能量、信息交换时称为封闭系统。严格的封闭系统是不存在的,但当其间的交换量很微弱、可以被忽略时,可将系统近似视为封闭系统。

4. 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。静态系统的要素不随时间变化,而动态系统则随时间发生变化。事实上绝对的静态系统是不存在的,但如果在研究时段内系统随时间的变化可以忽略,则可近似视为静态系统,如灌溉渠道系统、给排水管网系统在一定时段内是相对稳定的,可以视为静态系统。多数系统属于动态系统,如水文循环系统、生态系统等。

5. 按系统的规模分类

按系统的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,系统元素或子系统的数量增加,各部分之间的关系从简单到复杂。

系统还可以按其他标准进行分类。此外,还可以按几个分类标准对系统进行组合分类,如按系统与环境的关系、系统状态这两个标准组合进行分类,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。

1.1.5 系统工程

20 世纪 40 年代以来,国外对量化系统方法的实际应用相继出现了不同的学科名称,如运筹学(operations research,OR)、管理科学(management science,MS)、系统工程(system engineering,SE)、系统分析(system analysis,SA)、系统研究(system research,SR)等,其内涵没有太大差别。按照钱学森(1983)的观点,以上学科中涉及工程实践的内容,均可以用系统的概念统一归入系统工程;而其数学理论和算法,可以统一地看成是运筹学。因此国内的运筹学概念与国外的 OR 并不完全一致,运筹学是系统工程的基础理论,属于技术科学;OR 在国外被称为狭义的系统工程,属于工程技术学科。

总之,系统工程是一门新兴的工程技术学科,是应用系统理论、近代数学方法、计算机技术等理论和工具来研究系统的规划、设计、组织、管理、运行、评价等问题的学科。系统工程方法适合于一般的系统,而对于不同类型系统的研究,就形成相应的系统工程,如水资源系统工程、环境系统工程、农业系统工程、工业系统工程、经济系统工程、社会系统工程等。

系统工程不同于一般的工程技术。一般的工程技术(如水利工程、机械工程)均有其特定的研究对象,称之为“硬”工程;而系统工程的研究对象是一般的系统,除了以上各类“硬”工程外,还包括工程的组织与管理等软科学的内容。系统工程是一门“软”技术,可以为具体的工程技术提供方法、程序和决策等,以实现系统的最优规划、设计、施工、控制和管理。

由于研究对象的不同,系统工程的研究方法和步骤也不尽相同。在系统工程的发展过程中,提出了一些适合于系统分析的一般方法和步骤,比较有代表性的是 Hall 的三维空间结构。Hall 把系统工程的研究方法和步骤用三维坐标系(时间、逻辑和专业)来表示,称为三维空间结构(图 1-2)。

在 Hall 的三维空间结构中,时间维表示工作进程或工作阶段,逻辑维表示在系统各阶段的思维过程,专业维表示在思维过程中涉及的专业知识。在时间维中,从系统规划设计到更新的生命周期被划分为 7 个阶段,即规划、初步设计、系统开发(研制)、生产、安装、运行、更新。在每一个工作阶段,思维过程(逻辑维)进一步划分为 7 个步骤,即问题阐述、目标选择、系统综合、系统分析、最优化、决策、计划实施。专业维中的专业知识按照量化的难易程度依次为工程、医药、建筑、商业、法律、经济管理、艺术和社会等。

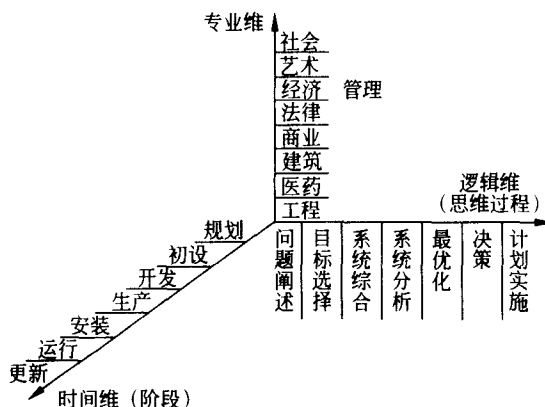


图 1-2 Hall 系统工程三维空间结构

1.1.6 系统分析

系统分析是系统工程中最基本、最普遍的分析方法,它通过研究确定系统内有关要素、结构、功能、状态、行为等之间的关系及其与环境的相互关系,并通过推理和计算的定量途径,找出可行方案;再经过分析、综合与评价技术,选出可行方案的最佳者,供决策者参考。

系统分析具有以下主要特点:

(1) 在思想方法上,强调整体性观点和协调精神。整体性观点也称全局性观点或系统性观点,指在处理问题时以整体为出发点、以整体为归宿。对系统的分析采用从整体到部分分析、再从部分到整体综合的途径,以整体目标为出发点协调系统各部分的运行,使整体目标达到最优。

(2) 在系统分析过程中,注重多学科合作、分析者与决策者合作。复杂系统一般涉及多个学科领域,在系统分析过程中需要不同专业人员共同合作,对系统各部分进行综合考虑,以避免片面性和主观性。同时,系统分析的目的是为决策者提供参考,因此决策者的参与对于系统分析来说也是至关重要的。

(3) 在系统分析技术上,将定性分析与定量分析相结合。在定性分析的基础上,建立系统模型(主要是数学模型),对系统进行定量分析。专家系统(expert system, ES)、人工智能(artificial intelligence, AI)、决策支持系统(decision support system, DSS)等技术的发展为定性分析与定量分析的结合提供了有力的工具。

(4) 在系统分析工具方面,以计算机为主要工具。在系统的规划、设计、施工(制造)、运行管理等环节,包含有数据采集与处理、模型优化与模拟等大量的计算工作,计算机技术的发展使系统分析中复杂的计算成为可能。目前,Internet/Intranet 和可视化技术的发展为系统分析提供了更为广阔的应用前景。但在应用计算机的同时,要注意人机结合,根据对计算结果合理性的分析改进和完善计算模型、计算方法。

1.2 水资源系统与水资源系统分析

1.2.1 水资源系统

处在一定环境下,为实现水资源的开发目标,由相互联系、相互作用的若干水资源工程单元(物质单元)和管理技术单元(概念单元)组成的有机整体构成水资源系统。从结构上来看,水资源系统由物质单元(如水体、挡水建筑物、泄水建筑物、输水建筑物、通航建筑物、电站等)和概念单元(如设计方案、管理策略、组织管理等)组成,其中物质单元是构成水资源系统整体性的前提,概念单元是划分系统与环境、识别系统内部要素的必要条件。水资源系统的结构决定了其具有的功能,如防洪、除涝、发电、灌溉、供水、航运及综合利用等。

水资源系统是自然与社会相结合的开放性动态复合系统,其结构、功能受自然规律的制约,对社会、环境的影响效应受人类意识的支配。水资源与社会经济、生态环境密切相关,三者构成水资源-生态环境-社会经济巨系统。

根据研究的范围,水资源系统可分为跨流域水资源系统、流域水资源系统、区域(行政区域、供水区域等)水资源系统等。

1.2.2 水资源系统分析及其步骤

将系统分析的思想、概念、理论和方法应用于水资源系统的规划、设计、施工、管理的实践中,就形成了水资源系统分析。根据全国科学技术名词审定委员会公布的水利科技名词(水利科技名词审定委员会,1998),水资源系统分析(system analysis of water resources)的定义为:“利用系统科学的理论和方法分析制定水资源合理开发、利用、保护和管理方案,使达到整体最优或最满意的综合效益。”

水资源系统分析的对象包括流域或区域水资源系统、水资源工程系统、防汛抗旱系统、农业灌溉排水系统、给排水系统、水污染控制系统等。近年来,研究领域进一步扩展到宏观经济水资源系统、水资源-生态环境-经济系统等。

水资源系统分析应结合水资源系统的特点进行,一般需要考虑以下特点:

(1) 多学科性 水资源系统是自然与社会相结合的复合系统,对其研究和分析涉及到多学科的知识,包括自然科学(如数学、物理学、化学、水文学、地质学、气象学等)、工程技术(如水利工程、农业工程、环境工程等)、社会科学(如经济学、管理学、社会学、法学等),在水资源系统分析中需要强调不同专业的协作。

(2) 多目标性 水资源是工农业生产、生活及生态环境所必需的资源,水资源系统从本质上讲具有多目标的特点。在水资源系统分析中,除了传统的经济目标外,社会福利、粮食安全、生态环境保护等也日益受到重视。在众多的目标中,不同的目标间可能是矛盾的(如防洪与发电、供水),甚至是不可公度的(即不能用同一单位来度量,如经济目标、社会发展目标与环境保护目标)。多目标问题是水资源系统分析的重要问题,但多目标问题的处理方法目前尚未成熟。

(3) 层次性 层次性是大系统的基本特征。作为社会经济系统的一个子系统,水资源系统本身也具有一定的层次性,如流域水资源系统—省级水资源系统—市、县级水资源系统等。在水资源系统规划中

需要考虑各层次之间的协调问题。

(4) 不确定性 作为水资源系统主要输入项的降水、径流具有很强的随机性,使得水资源系统具有显著的不确定性,增加了分析的难度。另一方面,水资源工程系统是受人类调控的,运行决策的不确定性也会增加其不确定性。

(5) 时空不均匀性 降水量和蒸发量的动态变化与地域分布特性决定了水资源系统的时空不均匀性,水资源在时间、区域上的合理配置是水资源系统分析的重要内容。

(6) 非线性 水资源系统中约束条件和函数关系多数是非线性的,非线性问题的处理一般要比线性问题复杂得多。

结合水资源系统的特点,水资源系统分析一般包括以下步骤(图 1-3):

(1) 系统描述 根据所研究问题的性质和目的,对水资源系统进行定性分析,了解系统的结构、功能、环境及其相互关系。

(2) 目标选择 目标是水资源系统开发利用所要达到的目的,是评价方案优劣的标准,因此目标选择是否准确对系统分析结果至关重要。所选择的目标应该能够反映系统的整体目的,而不能只考虑局部的目的。

(3) 方案确定 分析确定系统中所有可行的决策方案。

(4) 约束分析 分析确定系统的所有控制条件,即约束条件。约束条件应该不遗漏、不矛盾,否则可能得不到正确的方案或无解。

(5) 模型建立 在确定目标、可行方案、约束条件之后,建立相应的数学模型以反映系统的特征及各部分的相互关系。在模型中,系统的目标和约束均用决策变量的函数来描述。水资源系统分析中常用的数学模型包括预测模型、优化模型、模拟模型、评价模型、决策模型等。

(6) 模型求解 根据模型的类型,用相应的方法进行求解,同时分析模型参数变化对求解结果的影响(灵敏度分析)。

(7) 模型检验与方案评价 将模型求解结果与历史资料进行比较,或根据系统分析人员、决策者的经验对结果进行判断,以确定计算结果的可靠性。如果结果可靠,可将推荐方案提供给决策者参考;否则需要返回第(1)步,重新对系统进行分析、建模。

(8) 决策与实施 决策者在系统分析推荐方案的基础上,考虑其他有关因素,做出决策并实施。在实施过程中,需要根据可能出现的情况和问题,对系统模型和方案进行必要的修正和调整。

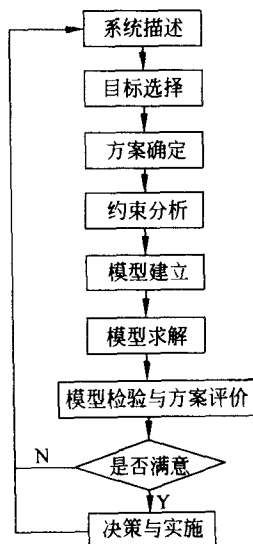


图 1-3 水资源系统分析步骤

1.2.3 系统分析方法在水资源系统中的应用范围

系统分析方法在水资源系统的规划、设计、施工、管理等方面得到了广泛的应用,主要应用范围包括以下几个方面(华士乾,1988;冯尚友,1991;王先甲,2000)。

(1) 水资源系统规划

水资源系统规划包括流域水资源规划、地区水资源规划、跨流域调水系统规划等类型。水资源系统规划的目的是根据流域或区域国民经济发展规划及生产、生活、生态环境对水资源的需求,结合区域水资源条件和特点,选择和制定水资源综合开发利用的最佳方案和实施计划,实现水资源的优化配置和高效利用。水资源系统规划是一个典型的多目标优化和决策问题,规划成果是区域内各种水资源工程规划设计的基础。

(2) 水资源系统专业规划

水资源系统专业规划包括防洪规划、水力发电规划、供水规划、灌溉规划、航运规划、水质规划等。例如防洪系统包括工程措施(如水库、堤防等)和非工程措施(如洪水预报预警系统、洪水保险等),防洪系统规划的目的在于选择合适的工程、非工程措施组合以及工程规模(如防洪库容)等,以最小的投资达到一定的防洪标准,或以一定的投资实现较高的防洪标准。与此类似,其他一些专业规划一般也要求以最小的投入实现预定的效果,或以一定的投入实现最大的经济效益。

(3) 大型水利水电工程规划设计

大型水利水电工程(如三峡工程、南水北调工程)规划设计中涉及各种复杂关系和目标,需要对不同方案下的工程投资、效益、淹没损失、移民等进行综合比较与评价,以确定合理的工程规模及设计方案。

(4) 水利水电工程建设组织管理

将系统分析方法应用于水利水电工程的施工管理(施工导流标准优选、施工设施选址、工程施工进度与造价控制等)、物资管理(包括物资的采购、订货合同、物资库存、物资的使用等)与建设信息管理,可以有效地节省工程建设成本,加快工程进度。

(5) 水利水电工程运行调度

工程运行调度是系统分析方法应用最早的领域之一,线性规划、非线性规划、动态规划、多目标决策方法等已在水库优化调度、水电站运行优化、灌区优化配水等方面得到了广泛应用,取得了显著的经济效益。

(6) 区域水资源优化配置

水资源系统作为水资源-社会经济-生态复合系统的一个子系统,在社会、经济发展及生态环境保护中具有重要作用。在水资源短缺情况下如何根据水资源条件进行产业结构调整,将有限的水资源在地区间、部门间进行合理分配,在保证一定的粮食生产和生态环境质量的基础上实现经济效益的最大化,是区域水资源优化配置需要解决的问题。

(7) 水利水电工程与生态环境

水利水电工程改变了自然与自然、自然与人类的关系,会对生态环境产生巨大的影响。如何评价水利水电工程对生态环境的影响、克服或减少工程对生态环境的不利影响,已成为水利水电工程建设中十分突出的问题。系统分析方法在这一领域也得到广泛应用,如工程环境影响评价等。

1.3 水资源系统分析方法

在水资源系统分析中,通常会用到一系列的系统分析方法,包括模型化方法、预测方法、优化方法、模拟方法、评价方法、决策方法等。这些方法构成了水资源系统分析方法体系,或称为水资源系统工程理论框架(金菊良等,2004)。

1.3.1 系统模型化方法

系统模型是系统分析的重要手段。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。

1. 系统模型的种类

系统多种多样,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,因此系统模型也有多种类型。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。

2. 系统模型的组成

系统模型通常由模型部件、变量和相互关系三部分组成(方乐润,1990)。

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、堤坝、电站、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、发电量或相应的经济效益。

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)、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。

3. 水资源系统模型化步骤

水资源系统模型化,就是将水资源系统问题进行抽象、概化,按照一定的规律、规则或经验建立反映系统变量和参数间相互关系的数学表达式或其他描述形式,利用一定的方法求解模型,然后将求解结果进行检验、评价与应用。

水资源系统模型化的主要步骤如下:

- (1) 明确系统建模目的与需要解决的问题;

- (2) 构思模型体系,包括需要建立的模型类型、各类模型间的关系(需要建立多个模型时);
- (3) 收集有关资料;
- (4) 设置系统变量和参数;
- (5) 用数学表达式等形式表示变量和参数之间的关系;
- (6) 系统模型的编程、求解;
- (7) 模型的检验、评价与应用,根据应用情况对模型进行修正和完善。

4. 系统模型化的主要方法

对于不同的研究对象与研究目的,需要建立的模型有所差异,建模方法也不相同(贺建勋,1995)。常用的建模方法包括:

(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 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,主要方法有 Buckingham π 定理、Rayleigh 法等。量纲分析法目前主要应用于力学、物理学等学科。

(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,如降雨径流相关模型、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(陈守煜,2002)。

(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(邓聚龙,2002)。

近年来,人工神经网络也广泛地应用于建模之中。对于复杂系统来说,建模过程中往往需要综合运用不同的建模方法,或建立不同的模型进行比较、分析。

1.3.2 系统预测方法

在水资源规划中,一项重要的工作是进行水资源供需预测分析(陈家琦等,2002)。需水预测是在社会、经济发展预测(城镇、农村人口及总人口等人口预测指标;国内生产总值、工业总产值等经济预测指标;种植业、牧业、林业、渔业等农业发展预测指标)等的基础上进行的,包括生活需水量、工业需水量、农业灌溉需水量、林牧渔业需水量、生态用水及环境用水等的预测,可根据具体情况采用不同的预测方法。供水预测是对水源工程(地表水源、地下水源、中水利用工程、微咸水利用工程、海水利用工程等)供水能力所进行的预测。在水资源供、需预测的基础上,进行供需平衡分析,论证改建、扩建水源工程的合理性与必要性,提出节约用水与调整国民经济结构的建议。在水资源供需预测中,涉及到多项预测内容与预测方法。

一般来说,预测是在调查研究的基础上对系统未来的发展变化规律所进行的推测、估计、分析与评

价。系统预测是系统规划设计、经营管理和决策的基础,目前预测方法已广泛用于自然系统(如水文、气象、自然灾害等)、工程系统、社会系统、经济系统等。

系统预测的基本原理包括整体性原理、可知性原理、可能性原理、相似性原理、反馈原理(董肇君,2003)。

系统预测涉及到预测方法的选择、相关资料的收集与整理分析、建立预测模型、利用模型进行预测、对预测结果进行分析与评价等一系列的工作。系统预测的主要步骤包括:

- (1) 确定预测对象和预测目标;
- (2) 根据预测的目的和要求,选择合适的预测方法;
- (3) 根据预测目的和预测方法,收集必要的资料,并对其进行整理分析;
- (4) 确定模型的结构和参数,建立预测模型,并对模型进行检验;
- (5) 利用模型进行预测,对预测结果进行分析;
- (6) 根据预测效果对模型进行修正和完善。

随着预测科学的不断发展,预测方法越来越多,目前已达上百种,其中常用的有10余种。根据常用预测方法的性质,预测方法可以分为不同的类型(图1-4)。主要的预测方法包括以下几种类型。

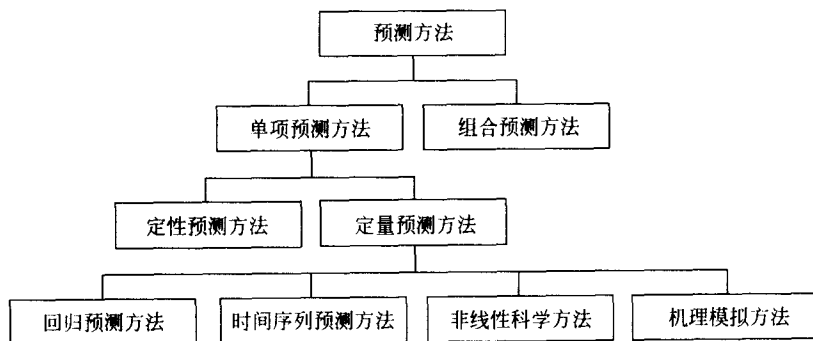


图 1-4 常用预测方法的类型

(1) 定性预测方法

定性预测方法以预测者对系统的认识和经验为基础,判断系统的发展趋势。定性预测方法适用于缺乏数据资料情况下的预测,其优点是简便、灵活,缺点是主观性较强。目前常用的定性预测方法有德尔菲(Delphi)法、主观概率法等,这类方法主要用于经济、社会等领域。

(2) 回归预测方法

回归预测是一种常用的定量预测方法,通过建立预测对象与其主要影响因素的回归模型而进行预测。目前常用的回归预测方法有一元与多元线性回归、非线性回归等,如水文学上利用降雨径流统计关系进行径流量预测,在经济领域利用生产函数(表示投入与产出的关系)进行产值预测等。

(3) 时间序列预测方法

时间序列预测方法根据预测对象自身的历史演化资料(时间序列),利用时间序列的有关分析方法对其发展趋势进行预测。时间序列通常可以分解为趋势项、周期项、相依随机项和纯随机项等部分。确定性时间序列预测方法一般只考虑趋势项、周期项,采用趋势外推、指数平滑等方法进行趋势预测;而随机性时间序列预测方法还需要在趋势项、周期项等的基础上建立描述随机项的模型,常用的随机模型有线性模型(如自回归滑动平均 ARMA 模型)、非线性模型(如门限自回归 TAR 模型、双线性模型等)。时间序列方法在水文、气象、经济等领域得到了广泛的应用。