

水利部公益性行业科研专项经费项目
(项目编号201201021)

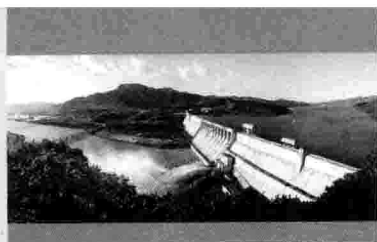
KUA LIUYU DIAOSHUI
LIANHE DIAODU YANJIU

跨流域调水 联合调度研究

主编◎ 谷长叶 副主编◎ 韩义超



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



水利部公益性行业科研专项经费项目
(项目编号201201021)

KUA LIUYU DIAOSHUI
LIANHE DIAODU YANJIU

跨流域调水 联合调度研究

主编◎谷长叶 副主编◎韩义超



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

水是人类经济活动和生活不可或缺的自然资源,而自然界的水资源量在时间和空间分布上是存在差异的,跨流域调水是解决资源性缺水地区水资源可持续利用、经济持续发展的有效途径。跨流域调水工程实施后,受水区水文水资源条件发生变化,调水区用水发生变化,因此,均需要对调度规则和调度方式进行研究。本书以辽宁省北、中、南三线涉及的10个流域14座大型水库所形成的复杂水资源系统为实例,全面分析了系统联合调度的需求、水文水资源特性、用水需求、系统结构特征,并建立了跨流域水库群调度模型,采用粒子群优化算法、集群智能与动态规划耦合优化方法进行了求解,介绍了跨流域多用户水库群联合调度供水软件系统的功能和操作流程,最后进行了效益分析。

本书对于多用水户的单一水库、串并联混合的水库群、跨流域调水水库群的兴利调度、联合调度软件的开发利用研究具有重要的参考价值和借鉴意义。本书可供相关科研单位、管理部门及决策部门的科技、管理人员使用,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

跨流域调水联合调度研究 / 谷长叶主编. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2014.8
ISBN 978-7-5170-2309-8

I. ①跨… II. ①谷… III. ①跨流域引水—调度—研究 IV. ①TV68

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第174550号

书 名	跨流域调水联合调度研究
作 者	主编 谷长叶 副主编 韩义超
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 15.25印张 290千字
版 次	2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	68.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《跨流域调水联合调度研究》

编委会

主 编：谷长叶

副 主 编：韩义超

编 委：李智慧 齐云飞 付桂芬 赵恩龙
张峰远 王晓鹏 刘玉龙 徐德增
赵宏兴 王海红 邹俏俏 姜广新

参编人员：韩凤媛 王晶晶 吴立君 冯 硕
杨峰峰 王志璋 雷晓辉 郭旭宁
马真臻 王 鑫 艾明岩 尹秋菊
赵丽丽 马龙伟 董 霞

前言

21 世纪水资源问题已经成为制约人类生存和可持续发展的瓶颈因素，水资源分布不均匀性与人类社会需水不均衡性的客观存在使得调水成为必然。跨流域调水是在两个或两个以上的流域系统之间通过调剂水量余缺所进行的合理水资源开发利用，它是解决水资源分布不均，改善水土资源组合的现有格局，实现水资源合理配置，保证国家、经济和环境持续协调发展的一项重要战略措施。

随着水资源利用的深入和供需矛盾的加剧，水库作用呈现出流域化、生态化趋势，水库调度成为流域水资源统一配置的重要手段。水库调度是根据水库所承担的水利水电任务的主次和规定的运行原则，凭借水库的调蓄能力，在保证大坝安全的前提下，对水库的入库流量过程进行调节，确保大坝及下游防洪安全、发展其经济效益，提高综合利用效益的一种控制运用水库技术，是水库长期运行计划的制定和实施的核心理问题。水库调度水平的高低直接影响着水库综合效益的发挥。

本书共分 11 章，第 1 章为绪论，介绍了水库调度的国内外研究现状及发展趋势，并介绍了本书的研究内容与技术路线；第 2 章为辽宁省联合调度需求分析，介绍了辽宁省的经济格局和北、中、南三线组成的“东水济西”水资源总体配置工程布局，并进行了联合调度需求分析；第 3 章为水文水资源特性分析，根据调水工程路线，分东、中、西三个区域分析年径流的互补性及互补程度；第 4 章为用水需求分析，对现状用水水平进行了分析评价，并分析了供水趋势、用水趋势和用水结构，提出了用水总量控制指标和用水效率控制约束指标，分别从生活、工业、农业和生态环境等方面对不同水平年进行了需水预测，并分析了预测结果与经济的适应性；第 5 章为三线联合调度系统结构与特性，介绍了三线联调系统的结构，分析了系统的庞大性、复杂

性、多样性等特点，分析了系统的水文互补性和库容互补性等联合调度潜力，并对系统内骨干工程的现状调度规则进行了介绍；第6章为跨流域水库群调度方法，根据系统水力联系的紧密程度将系统分解为北线、中线、南线调度子系统，以多年平均引水量最小、系统缺水量最小为目标，构建了水库群联合供水调度模型；针对具有多个用水部门的供水水库，提出了一种有序的供水调度规则，在该规则中水库按照用水部门的优先级确定供水的顺序，并根据水库相应的蓄水状态与用水部门限制供水线之间的关系，共同判定是否对其限制供水，基于供水过程动态博弈的特征，建立了水库对多个用水部门有序供水的规划模型；第7章为基于粒子群优化技术的调度研究，采用粒子群优化算法直接以调度图供水调度线和调水控制线位置为决策变量，通过计算可一次性得出水库调度图，避免了采用时历法的繁琐计算和经验修正，在综合利用水库的调度中，能搜索得出调度图的非劣解集，兼顾多个调度目标；第8章为基于集群智能与动态规划耦合优化的调度研究，中线与南线系统联合调度采用遗传算法和粒子群优化算法分别确定水库群的初始可行解，选取较好解作为 POA 算法的初始解，采用 POA 算法获得最终解，对于来水条件相似的水库群，将水库群聚合成虚拟等效水库，根据虚拟聚合水库的调度图确定水库群的供水，再通过分水规则对各水库进行调节计算，确定合理的分水规则；第9章为跨流域多用户水库群联合调度供水系统开发，首先介绍了系统开发的目标与原则，系统环境与开发工具，然后介绍了系统组成、系统开发及系统操作流程；第10章为效益分析，通过对比分析辽宁省北、中、南三线联合调度方案，计算了联合调度优化前后的供水效益，并进一步分析了三线联调的社会效益和生态效益；第11章为辽宁省北、中、南三线水库群联合调度展望，对联合调度研究、跨流域调水研究以及系统软件的应用趋势进行了分析。

本书主要在水利部公益性行业科研专项经费项目“辽宁北、中、南三线跨流域调水联合调度模式研究”（201201021）的研究成果的基础上提炼而成，编写过程中参考和引用了众多的相关文献和资料，文

献资料已尽可能地一一列出，但由于文献资料较多，难免存在疏漏，在此表示歉意，并向所有的参考文献资料作者表示衷心的感谢！

本书在写作过程中得到了项目协作单位中国水利水电科学研究院的通力协助，水利部国科司和辽宁省水利厅相关领导的出谋划策及鼎力支持，以及武汉大学胡铁松教授和大连理工大学周惠成教授、张弛教授的指导，在此一并表示诚挚的谢意！

限于作者水平，书中许多缺点和不完善之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2014 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水库调度概述	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 发展趋势	4
1.4 研究内容与技术路线	5
1.5 小结	6
参考文献	6
第 2 章 辽宁省联合调度需求分析	9
2.1 自然地理概况	9
2.2 经济发展格局	12
2.3 水资源分布特点	16
2.4 辽宁省水资源配置工程布局	19
2.5 联合调度需求分析	20
2.6 小结	21
参考文献	21
第 3 章 水文水资源特性分析	22
3.1 主要河流概况	22
3.2 气象特征	27
3.3 年径流分析	30
3.4 年径流互补性分析	40
3.5 水文水资源特性分析	54
3.6 小结	56
参考文献	57
第 4 章 用水需求分析	58
4.1 目标水平年	58
4.2 现状用水情况分析	58

4.3	水资源需求总量控制指标研究	76
4.4	目标水平年经济社会发展用水需求研究	82
4.5	小结	102
	参考文献	102
第5章	三线联合调度系统结构与特性	104
5.1	水资源系统综述	104
5.2	三线联调系统结构	106
5.3	联调系统工程调度现状	109
5.4	调水系统特征分析	118
5.5	联合调度潜力分析	121
5.6	小结	125
	参考文献	125
第6章	跨流域水库群调度方法	126
6.1	系统概化与分解	126
6.2	跨流域调水系统联合调度建模	133
6.3	有序供水建模技术	141
6.4	小结	144
	参考文献	145
第7章	基于粒子群优化技术的调度研究	147
7.1	粒子群优化技术	147
7.2	应用实例——北线系统	149
7.3	小结	175
第8章	基于集群智能与动态规划耦合优化的调度研究	178
8.1	集群智能与动态规划耦合优化技术	178
8.2	应用实例——中线系统	183
8.3	应用实例——南线系统	192
8.4	小结	201
第9章	跨流域多用户水库群联合调度供水系统开发	202
9.1	系统的开发目标与原则	202
9.2	系统环境与开发工具	203
9.3	联合调度系统的组成与功能	204
9.4	小结	210

第 10 章 效益分析	211
10.1 水资源价值理论	211
10.2 供水效益货币化方法	213
10.3 北、中、南三线联合调度效益分析	215
10.4 小结	223
参考文献	223
第 11 章 辽宁省北、中、南三线水库群联合调度展望	225
11.1 联合调度研究展望	225
11.2 跨流域调水研究展望	226
11.3 系统软件应用展望	227
11.4 结语	227
附录 术语和定义	229

第 1 章 绪 论

1.1 水库调度概述

水库调度是根据水库所承担的水利水电任务的主次和规定的运行原则，凭借水库的调蓄能力，在保证大坝安全的前提下，对水库的入库流量过程进行调节，确保大坝及下游防洪安全、发展其经济效益，提高综合利用效益的一种控制运用水库技术，是水库长期运行计划的制定和实施的核心问题。水库调度水平的高低直接影响着水库综合效益的发挥。水库调度方式有很多种，按照划分方法的不同，一般有以下几种分类方式。

(1) 按水库调度方式的不同，可分为防洪调度、兴利调度、综合利用调度等。防洪调度是根据河流上、下游防洪及水库的防洪要求、自然条件、洪水特性、工程情况而合理拟定的；兴利调度一般包括发电调度、灌溉调度以及工业、城市供水与航运对水库调度的要求等；综合利用调度是当水库承担有防洪、发电、灌溉、供水等多方面的任务时，根据综合利用原则，使国民经济各部门的要求得到较好的协调，使水库获得较好的综合利用效益。

(2) 按水库个数划分，可分为单一水库调度和水库群联合调度。单一水库调度的调度对象只有一个水库，是水库群联合调度的基础；水库群联合调度指的是在实际中往往存在多个水库联合运行的情况，其结构形式又可分成 3 种：①并联水库群，即水库系统中位于不同河流或位于同一河流的不同支流上的水库群，并联水库群各水库间有电力联系而无水力联系；②梯级水库群（串联水库群），位于同一条河流的上、下游形成串联形式的水库群，这些水库之间除了电力联系以外，还有水力联系；③混联水库群，是指水库群中既有串联水库又有并联水库，这时应将水库群作为一个整体来考虑，寻求整体优化调度方案。在组成水库群的各个水库之间，存在着一定的水文或水利上的联系，不管怎样复杂的水库群，都是由梯级水库和同一流域内互有联系的干支流水库和混联水库组成的。

(3) 按调度的方法划分，可分为常规调度和优化调度。到目前为止，水库调度经历了两个发展阶段：第一阶段是所谓的常规调度阶段，即以历史的实测资料为依据，利用古典的水文学、水力学和径流调节的基本理论，研究调度方式、调



度规则, 绘制调度图, 编制调度规程等指导水库运行的方法, 具有简单、客观、可靠的优点, 但难以处理多目标, 多约束, 复杂水利系统的调度问题; 第二阶段为优化调度阶段, 以系统工程学为理论基础, 利用现代的计算机技术和最优化方法, 以一定的最优目标作为调度准则, 充分利用水库的调节能力, 对来水量进行时间和空间的再分配, 在满足综合需水条件及约束条件下获得最大的综合效益。

目前水库调度的研究主要集中在水库群联合调度及优化调度中, 本文研究的内容即为水库群联合调度与优化调度。

1.2 国内外研究现状

水库群联合调度是一个约束条件多、动态、复杂非线性系统的最优控制问题。近年来, 系统分析方法在水库群联合调度的研究和实践中得以广泛应用, 并取得丰硕成果。此方法先确定系统调度的目标函数, 建立相应约束条件, 运用一定优化方法求得目标函数的极值, 从而得到水库群控制运用的最佳调度运行方式。目前常用的有动态规划方法、大系统分解协调方法、模拟方法、人工神经网络法、粒子群优化算法和遗传算法等。国内外学者对上述优化调度方法研究历程如下。

1.2.1 国外研究现状

国外研究起步于 20 世纪 60 年代。1960 年, Dantzig 和 Wofle 提出大系统分解概念, 将复杂的大系统分解为若干简单的子系统, 实现子系统局部最优化, 然后根据大系统的总任务和总目标, 使各子系统相互配合, 实现全局最优化; 1961 年, Mesarovic 提出了大系统递阶控制理论, Hall 等第一次应用动态规划法 (DP) 来确定水库最优轨迹; 1967 年, Young 根据动态规划在确定性来水条件下提取调度规则, 在求解库群的复杂调度问题时常常遇到维数问题, 众多学者进行动态规划降维研究; 1968 年, Larson 使用了增量动态规划法 (IDP) 研究了四库联调问题; 1970 年, Arvanitidis 和 Rosig 提出了水库群调度的聚合分解法, 由 Turgeon 对该法进行了改进; 1970 年, Bellman 等人提出模糊动态规划法 (FDP), 将经典的动态规划技术与模糊集合论融为一体; 1971 年, Heidari M 等提出了离散微分动态规划 (DDDP), 又被称为“廊道法”, 它也是通过迭代计算达到降维目的; 1975 年, Howson 等提出逐次优化算法 (POA); 1980 年, Jamshidi 应用分解协调技术解决了 Grande 流域开发问题, 将流域分解为多个子系统, 具有简化复杂性, 减小工作量、避免维数灾的优点; 1980 年, Goldberg 对分解协调技术进行了归纳总结, 形成了遗传算法的基本框架。遗传算法直接对



问题的某种编码优化,算法通用性强、操作简单、适应面广,直接以目标函数为搜索依据,可应用于离散问题和函数关系不明确或难以描述的问题,能够和其他算法结合起来混合运算,解决很多传统算法无法解决的问题,是一种非常有效的优化方法;1997年,Oliveira等使用遗传算法生成水库群系统的调度规则,Slobodan进行了水库风险调度研究,提出了可靠性规划模型的两层算法;1999年,Philbrick等进行了水库调度确定性优化的局限性研究;2001年,Chandramouli等利用动态规划和神经网络进行水库群建模研究;2002年,Teegavarapu等提出了基于模拟退火法的水库系统调度优化方法;2003年,Demetris Koutsoyiannis对粒子群优化算法(PSO)在水库群调度应用的可行性进行了验证,模型变量少,编程相对简单,计算时间与计算周期呈线性增长,减少了计算时间,考虑确定性因素与随机因素,优化效果明显;2006年,L.F.R.REIS利用遗传算法(GA)和线性规划的混合方法研究4个水库联调问题,优化效果明显。

1.2.2 国内研究现状

国内研究开始于20世纪80年代初。1982年,邝凤山根据系统分析思想,提出了水库群优化调度的偏离损失系数法,该法在湖南拓溪—风滩水库群的最优调度中得到了应用;1986年,董子敖等提出了计入径流时空相关关系的多目标多层次优化模型,先后完成黄河以南43个水库的优化调度和补偿调节;1988年,胡振鹏等提出了动态大系统多目标递阶分析的分解—聚合方法,将库群多年运行的整体优化问题分解为按时间划分的一系列子系统,将各水库的年内运行策略聚合成上一级系统,并有聚合模型表述和确定水库群的多年运行过程和策略;1994年,万俊和陈惠源结合DDDP法和大系统分解协调技术进行了水库群优化补偿调节;1994年,胡铁松等研究了Hopfield网络在水库优化调度中的应用,建立了一般意义下混联水库群优化调度的神经网络模型,应用于3个并联供水水库的调度问题;2002年,王仁权等建立了福建梯级水库群用水最小模型,利用逐步优化算法(POA)有效分配各水库的负荷,为大规模水库群优化调度提供了例证;2002年,李晓磊等提出了一种基于动物自治体的寻优模式——鱼群算法,这是一种有效的寻优模式,对于精确解的获取需进行适当的改进;2005年,徐刚等把蚁群算法应用到梯级水库群优化调度中;2006年,王德智等针对供水水库群联合调度的多水源多用户水资源配置问题,设计了一种对供水水库群分解协调的算法,与经典的分解协调法相比,具有较强的实用性;2006年,王少波等引入可以根据个体优劣和群体分散程度对遗传控制参数进行自动调整的自适应遗传算法;2006年,李崇浩等引入遗传算法中的“杂交”算子,采用自适应的惯性权重,改进粒子群算法;2006年,修春波等提出一种基于混沌优化算法和蚁群算法相结合的混合算法,将蚁群算法的思想结合到混沌优化算法中,用于



解决函数优化问题,利用信息素正反馈的思想指导混沌搜索的方向和区域,从而克服混沌搜索的盲目性,提高算法的寻优效率;2007年,杨俊杰等提出了一种新的多目标粒子群优化(MOPSO)算法,通过对三峡梯级多目标优化调度问题的计算,表明该算法是求解大规模复杂多目标优化问题的一种有效手段;2008年,白小勇等利用人工鱼群算法(AFSA)对水库调度进行了优化计算,利用鱼群系统寻优结果与离散微分动态规划法(DDDP)进行比较后,计算结果令人满意,计算时间更短,优化效果明显。

1.3 发展趋势

水库优化调度技术研究起步于20世纪60年代,至今只有短短几十年的历史,却已经历了几个时代,其总的发展趋势是应用基本理论来解决水库实际运行过程中发现的调度难题。从简单处理洪水调节到复杂的水库入库水流运动形态仿真,从简单计算入库水量平衡到水库生态调蓄需水量的确定,从单目标到多目标综合考虑,从单一水库运行效益到水库群综合效益最大化,水库调度目标经历了许许多多的变化,随着自动控制理论、数学规划、决策论、人工智能等相关学科在水库调度中的应用,水库调度理论日新月异。

1998年美国前副总统戈尔提出了“数字地球”概念后,在全世界引起了强烈的反响,成为当今社会一个热门话题,也引起了中国领导人和专家学者的极大关注。

“数字地球”是以计算技术、多媒体技术和大规模存储技术为基础,以宽带网络为纽带,运用海量地球信息对地球进行的描述,并用来支持和改善人类的活动,数字地球的海量信息对科学技术提出了更高的要求,需要逐步建设和完善。

2001年,张勇传院士结合水利水电工程的实际,率先提出了“数字流域”概念,为水库(群)调度自动化系统的更高水平建设指出了发展方向,随着我国国民经济的快速发展和国力的增强,未来的水库(群)调度自动化系统势必将沿着“数字流域”的方向发展。

今后,为了解决理论研究方面存在的问题,应采用系统的调度理论,从全局出发,不断完善调度理论,注重理论与生产实际相结合,注重研究成果向生产转化,把理论研究与实际应用的差距缩短,结合生产需要和具体问题,研究探讨适合某一具体河流或区域、简便实用并为生产管理者所接受的水库调度模型及应用方法。

未来水库调度方面的研究趋向主要有以下5个方面:

(1) 加强水文水资源机理方面的研究。这是真正揭示本领域自然规律、掌握



自然现象成因的根本途径,只有在此基础上选用合适的数学方法研究水文水资源领域的问题,才能具有强大的生命力。

(2) 水库调度理论和算法的研究、改进和应用。粒子群优化算法、遗传算法、蚁群算法、模糊优选决策方法等算法已经开始应用于水库调度,尤其是在水库群优化调度中显示出它们强大的生命力。但这些优化算法不可避免地存在一些缺陷,需要对其进行改进,研究出更加科学合理的新算法、新理论。可以综合各种方法的优点,取长补短,几种优化算法结合使用也是研究的热点之一。

(3) 注重生态环境的水库调度。生态文明的提出,要求水库调度工作不仅只是考虑经济效益,还要考虑生态效益和社会效益。生态调度已经越来越受到重视,但其理论尚未成熟,还有待进一步研究和改进。

(4) 模糊优化调度理论研究。由于在水库调度中往往存在许多模糊信息,例如入库流量和出库流量,其中入库流量既受环流形势和天气系统、地理位置和地形地貌等自然因素影响,又受人类生产活动、预报人员分析水平、发布预报时的心理等社会因素影响,所以水库入库流量得到的信息是具有模糊性的。模糊优化调度是水库调度的一个发展方向。

(5) 水库调度自动化是水库调度发展的必然趋势。水库调度自动化是水库调度、计算机科学、信息学、3S技术、气象学、水文学等多学科多领域相结合的一门学科,这使得水库调度自动化系统成为一个极其复杂的系统。因此,要进行此项研究,既需要某个领域的学者进行相应的基础理论和生产应用研究,同时需要具有知识全面、在众多相关领域都有所研究的学者进行复杂系统的分析、研究和集成。

总之,在水库调度方面更广泛地、高质量地应用高新技术,可以使得调度决策变得更科学化、更智能化、更敏捷化。应进一步提升调度决策的技术水平,使水库调度向着可视化、交互化、智能化、集成化的方向前进。

1.4 研究内容与技术路线

本书主要针对辽宁省北、中、南三线跨流域调水水库群联合调度问题进行论述,结合辽宁省水资源和水利工程特点,构建辽宁北、中、南三线跨流域调水联合调度模型,实现水资源的优化配置,挖潜工程内部相互补偿调节功能,提高水资源调控能力,最终确定适应新形势下的骨干工程联调调度规则和技术参数。主要技术路线如下:

以江河湖库水文、工程特征参数、调度运行参数及相关区域现状用水情况等基本资料为基础;通过水文不同频率互补性、常规和模型方法需水量预测及经济

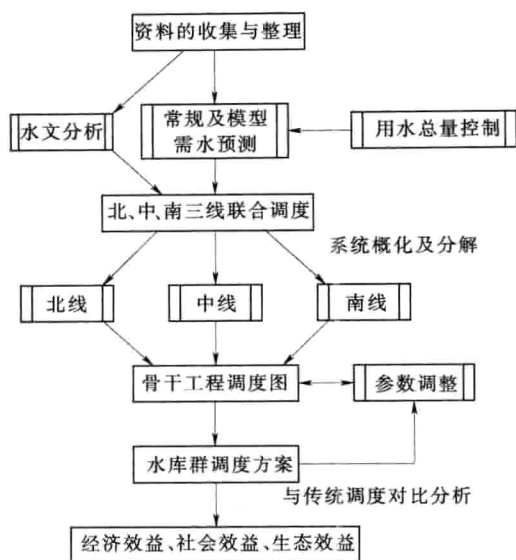


图 1-1 技术路线图

适应性分析,明确开展联合调度的可能性,提出辽宁省用水总量及用水效率控制指标;所构建的北、中、南三线跨流域调水联合调度大系统网络,针对其多流域、多工程、多供水目标的复杂结构,将其分解为北、中、南3个子系统,分别采用不同的联合调度模型求解,获取骨干工程的联调调度规则和技术参数,取得与传统调度成果的对比结果;挖潜工程内部相互补偿调节功能,提高水资源调控能力,提出水资源配置方案 and 不同情景下的供水方案;分析联调工程的经济效益、社会效益及生态效益。

技术路线如图 1-1 所示。

1.5 小结

水库调度是一种控制运用水库的技术管理方法,是水库工程管理的环节之一,是水库安全、经济运行的关键。本章介绍了水库调度的国内外研究现状及发展趋势,并结合辽宁省水资源和水利工程特点,确定了本书的研究内容,提出了本书的技术路线。

参考文献

- [1] Hall W A, Buras N. The Dynamic Programming Approach to Water - Resources Development [J]. J. Geophys. Res., 1961, 66 (2): 510 - 520.
- [2] Young, G. K. Finding reservoir operating rules [J]. Journal Hydraulic Div. Am. Soc. Civ Eng. 1967, 93 (HY6): 297 - 321.
- [3] Larson R E. State increment dynamic programming [M]. American Elsevier New York, 1968.
- [4] Heidari M, Chow V T, Kokotovic P V, et al. Discrete differential dynamic programming approach to water resources systems optimization [J]. Water Resources Research, 1971, 7 (2): 273 - 282.



- [5] Howson H R, Sancho N. A new algorithm for the solution of multi - state dynamic programming problems [J] . Mathematical Programming, 1975, 8 (1): 104 - 116.
- [6] M. JAMSHIDI, R. J. Heggen. Conjunctive use of ground and Resources Systems, May 1980, A multi - level stochastic management model for optimal surface water. Proc. IFAC Symposium Water & Land Related Cleveland, OH.
- [7] Oliveira, R. , Loucks, D. P. . Operating rules for multireservoir systems [J] . Water Resources Research. 1997, 33 (4): 839 - 852.
- [8] Slobodan P. simonovic. Reliability programming in reservoir management [J] . Water Resources Research, 18 (4) .
- [9] Philbrick C R, Kitanidis P K. Limitations of deterministic optimization applied to reservoir operations [J] . Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 125 (3): 135 - 142.
- [10] Chandramouli V, Raman H. Multireservoir modeling with dynamic programming and neural networks [J] . Journal of Water Resources Planning and Management, 2001, 127 (2): 89 - 98.
- [11] Teegavarapu R S V, Simonovic S P. Optimal operation of reservoir systems using simulated annealing [J] . Water Resources Management, 2002, 16 (5): 401 - 428.
- [12] Demetris Koutsoyiannis, Athanasia Economou. Evaluation of the parameterization - simulation - optimization approach for the control of reservoir systems [J] . Water Resources Research, 2003, 39: 1170 - 1187.
- [13] LFRREIS F G D. Water Supply Reservoir Operation by Combined Genetic Algorithm - Linear Programming (GA - LP) Approach [J]. Water Resources Management (2006) 20: 227 - 255.
- [14] 邴凤山. 水电站优化调度技术研究和推广工作取得进展 [J] . 水力发电, 1982 (8): 57.
- [15] 董子放, 阎建生. 计入径流时间空间相关关系的梯级水库群优化调度的多层次法[J] . 水电能源科学, 1987 (1): 29 - 40.
- [16] 胡振鹏, 冯尚友. 大系统多目标递阶分析“分解-聚合”方法 [J] . 系统工程学报, 1988 (1) .
- [17] 万俊, 陈惠源. 水电站群优化调度分解协调-聚合分解复合模型研究 [J] . 水力发电学报, 1996 (2): 41 - 50.
- [18] 胡铁松, 万永华, 冯尚友. 水库调度智能决策支持系统研究 [J] . 成都科技大学学报, 1994, (6): 39 - 45.
- [19] 王仁权, 王金文, 伍永刚. 福建梯级水电站群短期优化调度模型及其算法 [J] . 云南水力发电, 2002, 18 (1) : 52 - 53.
- [20] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法 [J] . 系统工程理论与实践, 2002, 22 (11): 7.
- [21] 徐刚, 马光文, 梁武湖, 等. 蚁群算法在水库优化调度中的应用 [J] . 水科学进展, 2005, 16 (3): 397 - 400.