

## 摘 要

兴利调节计算是水库利水计算的重要内容,对水库的规划设计和实时运行都十分重要。同时兴利调节计算也比较复杂,其难点往往不在于调节计算方法的创新,而在于以下两个方面:一是兴利调节计算与水库综合运用任务相匹配;二是基于水库综合运用的多目标性,如何从多个可行兴利调节方案中选择一个满意的方案。这两个问题在白石水库的兴利调节中同时存在,解决这两个问题也对白石水库的兴利控制运用十分重要,也是本文研究和解决的重点问题。本文以白石水库为工程背景,重点研究了新环境下白石水库兴利调节可行方案和满意方案的优选决策,具体内容如下:

(1) 在阐述我国及辽宁省的水资源状况的基础上,提出研究水库兴利调节研究的必要性。介绍了目前国内外主要的径流调节计算方法,通过对兴利调节计算原理的详细阐述,进而对兴利调节计算方法进行了总结与分析。

(2) 首先介绍了白石水库的基本概况,对现有的兴利调度任务的进行了阐述,同时指出兴利调节任务变更的可行性,重点阐述了白石水库供水环境的新变化这一客观现实,论证了新环境下白石水库兴利调节的必要性和可行性。

(3) 深入分析了白石水库供水环境的新变化,并针对这种新变化,采用时历法进行兴利调节计算,生成与新环境下的兴利调度方案集,为多目标优化决策奠定基础。

(4) 针对兴利调度方案的多目标性,从两个方面研究基于“满意准则”的多目标优选决策模型与应用。首先对优化决策的必要性进行了分析,之后建立了多目标可变模糊优选模型,应用该模型对白石水库兴利调节方案进行优选;随后又建立了一个基于协商的多人多目标优选模型,用于解决决策人之间对评价指标的冲突,并用此模型对白石水库的调度方案进行优选。最后对优化决策的结果进行了综合分析,探讨了两种模型各自的特点与差异。

文章最后,对本课题研究需要进一步的工作方向进行了简要讨论,并提出了相关建议和展望。

**关键字:** 水库兴利调节; 可变模糊优选; 多人多目标决策

## Baishi Reservoir Water Conservancy Operating calculation and multi-objective optimization decision-making under New Environment

### Abstract

Reservoir benefit calculate is an important part of regulation calculate, for it is important to the planning and design of reservoir, as well as teal time operation. Benefit calculate is also complicated, that its difficulties are not the innovation of methods, but the two points as follows: First, it should agree with the comprehensive tasks of reservoir. Second, it should make a selection for an optimal scheme based on the multi-objective of reservoir operation. These two issues also exist in Baishi Reservoir, how to solve these two questions is significant, which is the emphases of this paper. On the base of Baishi Reservoir, reservoir benefit calculate and multi- objective decision are studied in this paper.

First, outlined the water resources situation in China and pointed out the necessity of research. Analysed the computational methods by study the theories.

Second, it introduced the situations of Baishi Reservoir as well as the operation tasks, which indicated the feasibility of the changed regulation tasks. It is feasible to ameliorate the operation tasks by calculating and analysing the benefit calculate of Baishi Reservoir in the new environment.

Third, after analyzing the new changes of Baishi Reservoir, using the Duration Methods to calculate for the schemes of benefit regulation, that as a basic of multi-objective decision optimization.

Forth, for the multi-objective of operation schemes, research on decision optimization model by two methods. In the first place, build a variable fuzzy assessment model and applicate it to the Baishi Reservoir. In the next place, build a multi-person multi- objective decision model, which use to harmonize the conflict about the evaluating indicator between the decision makers. It is necessarily that to compare these two models with their characters and differences.

And at the end of this Paper, a simple discussion and suggestion on further work were presented.

**Key Words:** Reservoir Benefit Calculate; Variable Fuzzy Assessment Model;  
Multi-person Multi- objective Decision

## 大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目： 新环境下白石水库兴利调节计算与多目标优化决策

作者签名： 贺东权 日期： 2009年6月25日

## 大连理工大学学位论文版权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于大连理工大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文题目： 新环境下白石水库兴利调节计算与多目标优化决策

作者签名： 张东毅 日期： 2009年6月25日

导师签名： 于国利 日期： 2009年6月25日

# 1 绪论

## 1.1 我国的水资源状况

江河湖泊较多,水资源总量较丰富,但人均占有量少。我国江河湖泊较多,水资源总量较丰富,建国后,大力开展水利水电建设,枢纽工程星罗棋布。据统计,已建成大中小型水库 8.6 万余座。但水资源人均占有量只有  $2700\text{ m}^3$ ,为世界人均的  $1/4$ 。随着我国经济社会发展、人口增多和气候变化等原因,水资源形势极为严峻,不仅资源性、水质性缺水现象日益加剧,而且两者并存的地区愈来愈多。具体概括为以下几个特点。

### (1) 水资源总量大、人均占有量少、时空分布不均

我国地域辽阔,跨越高、中、低三个纬度带,南北纬度的高低相差大,水资源在时空分布上呈现很强的不均匀性,降水量总的趋势是由东南向西北递减。我国地表径流的分布趋势,基本上与降水量相似,但地区分布的不均匀性比降水量更为严重。总的来说,南方水多、人多、地少;北方地多、人多、水少。南方水资源总量占全国的 81%,北方的黄河、淮河、海河三大流域的水资源总量仅占全国的 7.5%,而人口和耕地却分别占到全国的 34%和 39%。南方和北方相比,前者人均水量为后者的 4.5 倍。

我国水资源时空分布很不均衡,一方面水资源的地区分布和人口、耕地的分布很不相对应。长江流域及其以南耕地占全国总耕地面积的 36.0%,人口占全国总人口 54.4%,但水资源总量却占 81.0%,人均占有量为  $4180\text{ m}^3$ ,约为全国人均的 1.7 倍,亩均占有量为  $4130\text{ m}^3$ ,为全国均值的 2.3 倍多。而黄河、淮河、海河三大流域的河川径流量只占全国的 6.2%,耕地面积却占全国的近 40%。北方人均水量为南方的  $1/4$ ,亩均水量仅为南方的  $1/10$  左右。另一方面,我国水资源季节性变化很大,季风性气候使得年降雨多集中在夏季和秋季,而冬春两季则常因降水不足而发生干旱;年际间降水变化也很大,有时丰枯交替,有时也出现连丰、连枯的现象。北方地区年降水变幅在  $40\sim 600\text{ mm}$ ,而南方一般均在  $1000\sim 2000\text{ mm}$ 。这种水资源在时空上分布的不均匀,形成我国水资源量在地区上的南多北少,东南多西北少的格局,广大的北方和沿海地区水资源严重不足,影响了我们对水资源的充分、合理的利用,给我国农业生产带来了很大的不便。

### (2) 地下水资源严重超量开采

地下水是我国城市和工农业用水的重要供水水源,全国约有  $2/3$  的城市和部分农田以地下水作为主要的供水水源和灌溉用水,后者占地下水总开采量的 81%。目前,地下水资源开发利用存在着缺乏规划和管理、严重超量开采、水位持续下降、漏斗面积不断扩大和城市地下水资源普遍受到污染等问题,直接影响到地下水资源的持续利用。全国 185 个城市的 253 个主要地下水开采地段中,污染趋势加重的占 25%,平原地区约有 54% 的地下水不符合生活用水水质标准。京、津、晋、豫北、鲁北、胶东和辽中南等北方缺

水区的水资源的开发程度已多达 70%。目前,北方地区除辽宁、豫北、鲁南和晋东南部地区外,可供开发的当地水资源已极少。

### (3) 城市和农业生产严重缺水

我国 600 多座城市中,有 400 多座缺水,每年缺水量达 58 亿  $m^3$ ,日缺水 1600 万  $m^3$ 。缺水城市主要集中在华北、沿海、省会和工业型城市。城市缺水按性质划分为 4 种类型:资源缺水型、工程缺水型、污染缺水型和给水设施不足型,前 3 种占城市缺水量的 70%以上,严重制约了经济的发展和居民的用水需求。

我国是农业大国,农业生产每年缺水约 300 亿  $m^3$ ,受旱面积达 13~20 万  $km^2$ ,严重影响了农业生产。此外,我国还有 8000 万农村人口饮水困难。

### (4) 经济快速发展给水资源保护带来更大压力

随着工农业经济迅速发展,人口密度增大,污水排放量不断递增,水污染日益严重,威胁人民生命健康。目前大部分城市和地区的淡水资源供给已受到水质恶化和水生态系统破坏的威胁。由于全国有 80%左右的污水未经处理直接排入水域,造成全国 1/3 以上的河段受到污染,90%以上的城市水域污染严重,近 50%的重点城镇水源地不符合饮用水标准。国家环保总局公告了 2005 年 7 大水系 411 个地表水监测断面的水质状况,其中,已经达到 V 类和劣 V 类水质的,海河为 60%、辽河为 48%、淮河为 45%、黄河为 32%、松花江为 31%、长江为 13%、珠江为 6%。水资源开发利用还可能改变局部水域的纳污能力,这些都会给水资源的保护工作带来更大压力。

### (5) 水资源开发利用活动引起新的生态环境问题

一方面,我国水资源开发利用程度并不高,仍需多快好省地继续开发和利用;另一方面,由于有的开发活动对有关的生态环境所产生的负面影响重视不够,有的则对工程建设中的移民问题认识不够,因而带来了不容忽视的生态环境问题。尤其是一些无序开发活动更加剧了这些影响,造成湖泊萎缩、湿地生态服务功能下降、生物资源衰减、生物多样性受到威胁等,制约了水资源的可持续发展。此外,由于大量的围垦、不合理使用农药、化肥以及水土流失等原因,造成水生态系统破坏,淡水生物资源受到威胁。据统计,全国鱼虾绝迹的河流长约 2400 km,湖泊(面积在 1  $km^2$  以上者)数量在 30 年间减少了 543 个,并且部分湖泊富营养化严重,每年由于水生态系统破坏,造成淡水鱼损失 8 万吨,每年因污染造成的直接经济损失约 300 亿元。

### (6) 流域管理机制与流域综合管理的要求不相适应。

我国目前流域管理机制职能单一,难以根据流域和生态系统的整体性进行综合管理。流域的综合管理要求在流域尺度上,通过跨部门和跨行政区的协调管理,开发利用和保护水、土、生物等资源,最大限度地适应资源规律,充分利用生态系统功能,实现流域的可持续发展<sup>[1-3]</sup>。

## 1.2 辽宁省的水资源概况

对东北老工业基地辽宁省而言,水资源严重缺乏更是对经济社会发展造成了不利影响。根据第二次辽宁省水资源评价成果,该省人均水资源量仅为  $820 \text{ m}^3$ ,人均淡水资源占有量为全国平均水平的  $1/3$ ,属于重度缺水省份。省水利厅有关负责人曾透露,由于严重缺水,每年影响全省利税多达 20 亿元,仅沈阳、大连、鞍山、营口四城市,每年影响工业产值约 53 亿元。

辽宁省水资源不仅总量不足,而且在时间和空间分布上也很不均匀。在时间分布上,这种不均匀表现在年际、年内雨水变化较大,冬春雨雪稀少,夏秋降雨集中,尤以七、八两月降水量最大,占全年的 50%左右。从降水季节看,春季降水量占全年的 11%~16%,易发生春旱;夏季降水量占全年降水量的 60%~70%,常有暴雨发生,形成洪涝灾害;秋季降水量占全年的 17%~19%,屡有秋旱发生;冬季降水量仅占全年的 1%~4%。同时年际间径流变化也较大,有连续丰枯现象。就地域而言,由于受地理位置、海陆分布及地形等因素影响,降水、径流地区分布很不均匀,自东南向西北递减,东南部鸭绿江下游山区为多雨中心,年降水量在 1000 mm 以上,西北部风沙干旱,雨水稀少,仅 380~400 mm。

此外,全省经济发展不平衡也引发了水资源开发利用的不均匀性,造成经济发达地区水资源严重缺乏。据辽宁省水利局统计<sup>[4]</sup>,辽宁中心城市群(包括沈阳、抚顺、鞍山、本溪、辽阳、盘锦、营口)地区所在的辽浑太流域,承担着辽宁中部城市的工业、城市生活和农业用水等供水任务,是省内缺水最严重的地区。当前,辽宁中部城市群地区面临着日益严峻的水资源形势:

一是水资源短缺,承载能力不足。根据第二次全省水资源评价成果,辽宁中部地区多年平均水资源总量 162 亿  $\text{m}^3$ ,占全省总量的 47%,人均水资源占有量  $760 \text{ m}^3$ ,亩均水资源占有量  $550 \text{ m}^3$ ,低于全省平均水平,为全国的三分之一,为世界的十分之一。按照通行的人均水资源量  $1000 \text{ m}^3$  以下为严重贫水区的标准来衡量,辽宁中部地区属于严重贫水区。

二是水资源开发利用已经达到极限,水生态问题突出。目前中部地区水资源利用量达到了水资源总量的 76%,比全省平均值高出 34 个百分点。其中,辽河流域达到 65%,浑太河流域高达 92%,已超过了水资源开发利用的极限,基本没有可供开发的潜力。过量的水资源开发利用,引发了地下水超采、海水入侵、湿地萎缩等一系列严重的水生态问题,沈阳、鞍山、辽阳的地下水已经严重超采,营口出现海水入侵,沈阳卧龙湖湿地面积大幅度减少,水生态功能下降。

三是水资源供需矛盾尖锐,如不采取有力措施,极有可能出现水危机。目前,中部地区的水资源供给,基本上是按照保证生活用水,挤占农业用水,压缩工业用水,牺牲

环境生态用水的原则安排的。据预测,按现状节水水平和经济发展需水量测算,到2010年,中部地区所在的辽、浑、太河流域总缺水量为13.3亿 $\text{m}^3$ 。其中,城市生活和工业缺水7.8亿 $\text{m}^3$ ,农村生活缺水1.0亿 $\text{m}^3$ ,农业缺水2.0亿 $\text{m}^3$ ,环境缺水2.5亿 $\text{m}^3$ 。到2015年,总缺水量为16.3亿 $\text{m}^3$ 。其中,城市生活和工业缺水10.0亿 $\text{m}^3$ ,农村生活缺水1.7亿 $\text{m}^3$ ,农业缺水0.4亿 $\text{m}^3$ ,环境缺水4.2亿 $\text{m}^3$ 。

相比之下,位于辽宁省东部的浑江流域水资源丰富,开发程度低。浑河流域天然径流总量为73.97亿 $\text{m}^3$ ,人均水资源占有量为4187 $\text{m}^3$ ,亩均水资源占有量为4625 $\text{m}^3$ ,是水资源较为发达的地区。浑江流域现状水平年国民经济各部门用水量为6.95亿 $\text{m}^3$ ,经浑江流域水资源供需分析,在满足全流域国民经济各部门用水的情况下,多年平均浑江流域入鸭绿江水量为68.83亿 $\text{m}^3$ ,占浑江年径流量的93.05%。由此可见,浑江流域虽然水资源较丰富,但现状水利开发利用程度较低,绝大部分水资源都仅用于水能开发利用后流入鸭绿江<sup>[4]</sup>。

### 1.3 辽宁省省直管水库的任务划分

#### 1.3.1 水库调度分类

水库调度从时间上划分,一般可分为中长期(年、月、旬)调度和短期(周、日、时)调度;从径流描述上划分,一般可分为确定型和随机型两种;从采用的方法上划分,可分为常规调度、优化调度和模拟调度等,其中优化方法一般可分为线性规划、动态规划(增量动态规划、离散微分动态规划、逐次逼近法、逐步优化算法POA),聚合分解法和大系统分解协调法等;从分布状况上划分,一般可分为单库、梯级、并联和混联形式的水库群优化调度。下面按不同方式对水库调度进行分类:

##### a. 按水库目标分

(1) 防洪调度。防洪调度方式是根据河流上、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。

(2) 兴利调度。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。

(3) 综合利用调度。如果水库承担有发电、防洪、灌溉、给水、航运等多方面的任务,则应根据综合利用原则,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。

##### b. 按水库数目分

(1) 单一水库调度。为了说明水库调度的原则、方法,多从基本的最简单的单一水库入手,进而引申到水库群联合调度。



(2) 水库群的联合调度又包括并联水库、梯级水库群（串联水库群）和混联水库群调度。并联水库指位于不同河流上或位于同一河流的不同支流上的水库群，各水库水电站之间有电力联系没有水力联系，但在同一河流不同支流上的水库群还要共同保证下游某些水利部门的任务，例如防洪。梯级水库群（串联水库群）指位于同一河流的上、下游形成串联形式的水库群，各水库水电站之间有直接的径流联系。混联水库群是串联与并联的组合形式。

#### c.按调度周期分

水库调度实际是确定水库运用时期的供、蓄水量和调节方式。根据水库运用的周期长短可分中长期调度和短期调度。

(1) 中长期调度。对于具有年调节以上性能的水电站水库，首先要安排调节年度内的运行方式、供水、蓄水的情况。具体内容是以水电厂水库调度为中心，包括电力系统的长期电力电量平衡、设备检修计划的安排、备用方式的确定、水库入流预报及分析、洪水控制和水库群优化调度等。

(2) 短期调度与厂内经济运行。短期调度主要研究的是电力系统的日（周）电力电量平衡，水火电厂有功负荷和无功负荷的合理分配，负荷预测，备用容量的确定和合理接入方式等。厂内经济运行主要研究电厂动力设备的动力特性和动力指标，机组间负荷的合理分配，最优的运转机组数和机组的起动、停用计划等<sup>[5]</sup>。

### 1.3.2 辽宁省省直水库调度任务

辽宁省省直属的水库有大伙房、白石、观音阁、参窝、汤河、清河、柴河、闹德海 7 座大型水库，承担着辽河流域防洪、灌溉和城市生活、工业、环境供水任务。多年来，省水利部门对七大水库实行统一管理、联合调度，水库经营管理取得显著成效。七大水库在抗御历次大洪水中发挥了巨大的拦洪减灾作用，每年灌溉水田 450 万亩，每年为城市生活、工业供水 5 亿多立方米，保证了粮食增产、农民增收，促进了辽宁中部地区的经济社会发展<sup>[4]</sup>。

白石水库的主要任务是防洪、灌溉、城市供水，兼顾发电和养鱼。白石水库地处辽宁西部的水资源紧缺地区，其兴利蓄水任务十分对辽宁省西部的经济和社会发展具有重要作用，也因此一直受到高度重视，尤其是辽宁省东水西调工程还没有把辽宁西部纳入供水重点，充分发挥白石水库的兴利蓄水效益就显得更为重要，这也是本文选择白石水库的兴利调度研究的主要原因。

## 1.4 本文的必要性

### 1.4.1 论文选题背景

水资源是人类生存和经济社会发展的基础，是不可替代的自然资源。水资源问题成为世界普遍关注问题，其根本原因在于它不仅影响、制约现代社会的可持续发展，而且将成为 21 世纪全球资源环境的首要问题，直接威胁人类的生存和发展，并可能成为战争的诱因。

由于我国水资源时空分布不均的特点，以及人口的增长和国民经济的发展带来的工农业用水量的增加，污水的任意排放，水质性缺水也日益严重，水资源供需矛盾突出；同时，由于资源与人口、经济发展的不合理配置，致使水资源供需矛盾更加突出。一方面，表现在农业生产上，北方大面积耕地遭受干旱的威胁，全国平均每年受旱面积达到 3 亿亩，成灾面积 1 亿亩，抗旱已经成为一些地区常抓不懈的任务；另一方面，表现在城市上，城市缺水，工业用水严重不足。尤其是北方城市缺水已经影响到国民经济的发展和人们的日常生活。据报道，全国现有 668 座城市，有 400 座城市缺水，其中有 100 座城市严重缺水，1982 年大连市因为缺水，工业产值就减少 6 亿元，上交利润减少 1 亿元。

为了解决降水时间分布不均问题，人们修建了大量的水库，在汛期拦蓄洪水、消减洪峰，在枯水期则根据灌溉、发电、航运、工业与民用供水等兴利部门的要求重新分配天然径流。水库在减少洪涝灾害、保护下游城市、工矿企业、农田村庄等方面发挥了重要作用，同时，水库还可能是所在流域工农业、居民生活用水和城市用水的重要水源地。水库具有防洪和兴利的双重作用，而且这两种作用是相互矛盾的，在水库实际运行中要寻找防洪和兴利的切合点，优化水库防洪与兴利蓄水的综合效益。由于水库入流具有随机性，水库用户用水量也受大气降水的影响，年际之间变动较大，这些不确定因素给水库调度研究带来了很大困难。因此，水库调度是水库建立以来水利工作者的重要研究内容。

水库兴利调度的主要任务，是合理解决天然来水与用水部门之间的矛盾，在确保水库大坝安全的前提下，尽可能地发挥水库兴利效益。一般说来，水库都是综合利用的，可行的调度方案要考虑的通常是多目标问题，如水库汛限水位、水库的各项供水指标和上下游生态等，而这些目标往往是相互冲突的、不可公度的<sup>[6,7]</sup>。对复杂的水库调度系统，决策中必须兼顾技术、经济、社会、环境、法律等多方面的因素<sup>[8]</sup>。针对这一问题，国内外开始有人尝试采用一些优化的方法，针对个流域的实际特点来构建优化模型，并通过一定的数学算法求解得到一定约束条件下的优化调度方案。

优化调度方案为决策者提供了很好的便利，但优化方案本身因受其数学模型的限制而在一定程度上缺乏灵活性，因此得到的优化方案也不一定是决策真最为满意的方案。

水库兴利调度决策是非常复杂的过程,因为决策问题本身具有多目标性、模糊性等特点,故这类决策问题难以得到真挚根本得不到所谓的最优解,因此实践中不应以追求所谓的最优解为目标,而应追求基于满意准则的满意解。水库多目标兴利调度决策正确与否,不单与来水、用水等信息有关,还与决策者的经验、知识、偏好等因素密切相关。这些经验、知识、偏好和定性信息具有模糊性,且难以量化,从而又决定了水库兴利调度决策是一个定量与定性、结构性与非结构性决策相结合的半结构性决策问题<sup>[9]</sup>。通过各决策模型对兴利调度方案进行评价决策可以科学地对调度方案进行评判,选择满意的调度方案,这样可以实现水库的科学调度,带来了很好经济效益和社会效益。

基于水库兴利调节研究的重要性,尤其是白石水库对辽宁省西部地区经济社会可持续发展的重要性,并且该水库在新形势下兴利调节计算中仍存在的问题,本文选择以该水库为工程背景,研究实用化的新环境下白石水库兴利调度方案,服务于该水库的实时兴利控制运用。

#### 1.4.2 论文章节划分

第一章 绪论。阐述了我国水资源供需矛盾突出,时空分布严重不均,南方水多,北方水少。进一步引出辽宁省水资源分配也存在空间分布不均的问题。指出了兴利调度的根本所在,论文选题的背景,及本论文主要章节的划分。

第二章 详细阐述水库兴利调节计算原理。通过对兴利调节计算原理的研究,进而对兴利调节计算方法进行了分析,主要内容有:传统的兴利调节计算方法、兴利调节计算的数值解法、防洪兴利调节计算方法、兴利调节计算的优化方法。

第三章 新环境下白石水库兴利调节计算。简要介绍了研究区白石水库的基本概况,水库特性参数等;对现有的兴利调度任务的进行了阐述,同时指出兴利调节任务变更的可行性,通过对新环境下白石水库兴利调节的计算及计算结果的综合分析为任务变更的可行性提供了依据。

第四章 兴利调节计算方案生成和多目标优选决策。本章首先针对白石水库的供水任务的变化,采用时历法研究与新环境变化相适应的兴利调度方案;然后基于兴利度方案的多目标性,从两个方面研究了多目标优化决策模型与应用。首先建立了多目标可变模糊优选模型,应用该模型对白石水库兴利调节方案进行优选;随后又建立了一个基于协商的多人多目标优选模型,用于解决决策人之间对评价指标的冲突,并用此模型对白石水库的调度方案进行优选。最后对优化决策的结果进行了综合分析,探讨了两种模型各自的特点与差异。

第五章 结论与展望。概要总结全文的主要研究内容及取得的成果,提出论文的不足之处并对有待进一步研究的问题进行展望。

## 2 水库兴利调节计算原理

兴利调度是水库调度的重要部分。兴利调节计算方法,按照对原始径流资料描述和处理方法的差异可以分为时历法和数理统计法两大类。时历法是以实测径流资料为基础,按时历顺序逐时段进行水库水量蓄泄平衡计算的径流调节计算方法;数理统计法是应用径流的统计特性,按概率论原理对入库径流的不均匀性进行调节的计算方法。

水库兴利调度的主要任务,是在保证水库安全渡汛的前提下利用水库的蓄水调节能力重新分配河流的天然来水量,使之符合兴利部门的用水要求,充分发挥水库的综合利用效益<sup>[10]</sup>。为了实现这个任务,必须在原规划设计的基础上,求出各种水利水能要素(供水量、电站出力、库水位、蓄水量、弃水量及损失水量等)的时间过程以及调节流量、兴利库容和设计保证率三者之间的关系,作为确定工程规模、工程效益和运行方式的主要依据。

### 2.1 兴利调节计算的基本原理

水库兴利调节计算的基本依据是水量平衡原理,因为只有一个未知数,所以主要求解水库的水量平衡方程(2.1),即计算时段内进出水库的水量差,等于水库蓄水量的变化,无须试算。计算时段的水库水量平衡方程为

$$\Delta V = (Q - q)\Delta t \quad (2.1)$$

式中  $\Delta V$  — 计算时段  $\Delta t$  内水库蓄水量的变化,蓄为正、泄为负;

$Q$  — 计算时段  $\Delta t$  内的平均入库流量;

$q$  — 计算时段  $\Delta t$  内从水库取用及消耗的平均流量,包括各兴利部门的用水流量、蒸发损失及渗漏损失流量、以及水库蓄满后的无益弃水流量等。水位变化由库容-水位关系  $Z=F(V)$  查求。

如当  $Q > q$ , 时段末水位上升,若水位超过汛限水位,则汛限水位以上的水量要在给定时段  $\Delta t$  内均匀(亦称削平头)泄出,即时段末水位即是汛限水位,然后计算时段出库流量。

$$q = (Q\Delta t - \Delta V) / \Delta t \quad (2.2)$$

式中  $\Delta V$  — 汛限水位与计算时段  $\Delta t$  初库水位的库容水量差;

$Q$  — 计算时段  $\Delta t$  内的平均入库流量;

$q$  — 计算时段  $\Delta t$  内从水库总平均泄流量,减去各兴利部门的用水流量、蒸发损失及渗漏损失流量,即是弃水流量。

兴利调节计算的基本原理是联解水量平衡方程与运动方程，离散化后按时段的水库水量平衡方程与运动方程（用水位库容、水位泄量关系替代）：

$$W_{末} = W_{初} + W_{入} - W_{供} - W_{灌} - W_{蒸漏} - W_{弃} \quad (2.3)$$

$$W = f(Z), \quad W_{弃} = \Phi(Z)\Delta t \quad (2.4)$$

式中： $W_{末}$ —计算时段末的水库蓄水量；

$W_{初}$ —计算时段初的水库蓄水量；

$W_{入}$ —计算时段的入库水量；

$W_{供}$ —计算时段的水库供水量；

$W_{灌}$ —计算时段的农业灌溉用水量；

$W_{蒸漏}$ —计算时段的蒸发渗漏量；

$W_{弃}$ —弃水量，通过库容水位  $f(Z)$  关系和水位泄量  $\Phi(Z)$  关系计算。

## 2.2 传统的兴利调节计算方法

20 世纪 60 年代，在水库兴利调节计算方法领域，H.A.Jr.Thomas 等人提出了径流调节随机模拟法。它是应用随机过程和时间序列分析理论与时历法相结合的径流调节计算方法，即先根据历时径流资料和径流过程的物理特性，建立径流系列的随机模型，并据此模拟出足够长的径流系列，而后再按径流调节时历法进行计算。水库的兴利调节计算就是以实测资料为基础，根据各部门的用水需求，利用水库重新分配天然径流所进行的计算。对于已建水库如何选取一种合理的计算方法进行兴利调节计算，将直接影响水库的控制运用和兴利效益的发挥。水库兴利调节计算方法主要分为常规方法、模拟方法和系统分析法三类<sup>[11]</sup>。

(1) 常规方法。常规调节计算方法以调度规则为依据，利用建立在径流调节理论和水能计算方法基础上的历时法来确定满足水库既定任务的蓄泄过程。是一种半经验半理论的方法，采用历史水文统计资料，选择典型来水过程为代表年进行水量调节计算，取其包线绘制水库常规调度图来指导水库运行。常规方法简便迅速，易于操作。王平、刘殿武建议采用长系列法代替典型年法进行兴利调度，认为这样可以充分利用径流的统计特性。常规调度方法，按照对原始径流资料描述和处理方法的差异可以分为时历法和数理统计法两大类，时历法是以实测资料为基础，按时历顺序逐时段进行水库水量蓄泄平衡计算的径流调节计算方法，又可分为典型年法和长系列法；数理统计法是依据径流的统计特性，按概率论原理对入库径流的不均匀性进行调节的计算方法。

(2) 模拟方法<sup>[12,13]</sup>是通过模拟系统的实际情况来建立一个模型，作为实际物理系统的缩体来预测一定条件下（入流、调度规则等）该系统的响应（调蓄水位、下泄流量等）。由于在开发、利用水资源的规划设计中出现了许多复杂的课题，20 世纪 60 年代，在水库兴利调节计算方法领域，H.A.Jr.Thomas 等人提出了径流调节随机模拟法。它是应用

随机过程和时间序列分析理论与时历法相结合的径流调节计算方法,即先根据历时径流资料和径流过程的物理特性,建立径流系列的随机模型,并据此模拟出足够长的径流系列,而后再按径流调节时历法进行计算。当选用严格适合的数学模拟较为困难时,以功能模拟为基础的模拟方法相对而言较为有利。但是,该方法不能直接得到水库调度的最优解。模拟方法在早期的库容能力和调度分析方法与当代复杂的优化方法之间起到了桥梁作用。

(3) 优化调度方法。优化调度方法以运筹学为理论基础,利用现代的计算机技术和最优化方法,寻求满足调度原则的最有调度方式或方案,绘制最有调度图指导水库运行<sup>[14]</sup>。优化调度方法是从全局出发来探索增加整个系统的效益,而不是着眼于系统中某一部分效益的增加。所以必须明确地了解系统的结构,如系统的内在矛盾和因果关系,系统外的边界情况以及因为边界情况的改变对整个系统效益的影响等。系统分析方法一般可分为数学规划及概率模型两大类。数学规划在系统分析中占显要地位,其中包括线性规划、非线性规划、网络系统分析、动态规划等;概率模型考虑事态发生的不可靠性,其中包括排队论、马尔可夫决策过程、系统可靠性分析等。另外还有决策分析、模拟、模糊集理论和大系统分解协调技术等。

### 2.3 水库调洪计算的数值解法

水库调洪计算的数值解法,是大连理工大学陈守煜教授在上世纪八十年代提出的新的计算方法,由于该方法适用于多种泄流设备、变时段计算等条件,尤其是不需要试算,具有十分强大的优越性,在国内已得到广泛应用。

水库调洪计算的实质,乃是对微分方程:

$$F(Z)dZ/dt = Q(t) - S(Z) \quad (2.5)$$

求解。

式中:  $Q$ —洪水流量,为时间  $t$  的函数;

$Z$ —水库水位,也是  $t$  的函数;

$F$ —水库水面面积,为  $Z$  的函数;

$S$ —通过泄水建筑物的流量,为  $Z$  的函数。

由于式(2.5)的精确求解困难,因此在工程设计计算中,通常采用各种近似积分法<sup>[15-16]</sup>。

采用数值解法,既不着眼于求式(2.5)的准确解,也不同于近似积分法,而是求满足初始条件下的特解,在一系列时刻  $t$  上的近似值。为此,把式(1)表示为:

$$dZ/dt = [Q(t) - S(Z)]/F(Z) \quad (2.6)$$

$$\text{令} \quad f(t, Z) = [Q(t) - S(Z)]/F(Z) \quad (2.7)$$

函数  $f(t, Z)$  为水库调洪函数, 它为时间  $t$  与水库水位  $Z$  的函数, 于是

$$dZ/dt = f(t, Z) \quad (2.8)$$

因此水库调洪计算可归结为求一阶微分方程(2.8)在满足初始条件:

$$Z|_{t=t_0} = Z_0 \quad (2.9)$$

时的特解:  $Z=f(t)$  在一系列时刻  $t$  上的近似值。

此初始条件为洪水开始  $t=t_0$  时水库的水位  $Z_0$ , 在设计条件下  $Z_0$  通常为设计蓄水位或汛期限制水位; 在水库运用条件下,  $Z_0$  为洪水开始时水库的实际水位。

通过出指点  $(t_0, Z_0)$ , 把微分方程(2.6)的特解  $Z = f(t)$  展开为泰勒级数:

$$Z = Z_0 + f'(t_0)(t-t_0) + \frac{1}{2!} f''(t_0)(t-t_0)^2 + \dots + \frac{1}{p!} f^{(p)}(t_0)(t-t_0)^p + \dots$$

当  $t=t_1$  时, 令  $t_1 - t_0 = h_1$ ,  $h_1$  为计算步长, 则

$$Z_1 = Z_0 + f'(t_0)h_1 + \frac{1}{2!} f''(t_0)h_1^2 + \dots + \frac{1}{p!} f^{(p)}(t_0)h_1^p + \dots$$

以此类推, 当  $t=t_n$  时,  $t_n - t_{n-1} = h_n$ , 则

$$Z_n = Z_{n-1} + f'(t_{n-1})h_n + \frac{1}{2!} f''(t_{n-1})h_n^2 + \dots + \frac{1}{p!} f^{(p)}(t_{n-1})h_n^p + \dots \quad (2.10)$$

式(2.10)是求解  $Z=f(t)$  在时刻  $t_n$  的近似值  $Z_n$  的一般表达式。但要计算式(2.10)中的各阶导数, 对调洪函数而言, 实际上是不可能的。为此取式(2.10)等式右端的前五项, 作为计算  $Z_n$  的近似值。

应用龙格—库塔公式:

$$Z_n = Z_{n-1} + \frac{1}{6}[k_1 + 2(k_2 + k_3) + k_4] \quad (2.11)$$

式中  $k_1, k_2, k_3, k_4$  可根据水库的调洪函数式(2.7)确定如下:

$$\begin{aligned} k_1 &= h_n [Q(t_{n-1}) - S(Z_{n-1})] / F(Z_{n-1}); \\ k_2 &= h_n [Q(t_{n-1} + h_n/2) - S(Z_{n-1} + k_1/2)] / F(Z_{n-1} + k_1/2); \\ k_3 &= h_n [Q(t_{n-1} + h_n/2) - S(Z_{n-1} + k_2/2)] / F(Z_{n-1} + k_2/2); \\ k_4 &= h_n [Q(t_{n-1} + h_n) - S(Z_{n-1} + k_3)] / F(Z_{n-1} + k_3) \end{aligned} \quad (2.12)$$

式中  $Q(t_{n-1}), Q(t_{n-1}+h_n/2), Q(t_{n-1}+h_n)$  可由洪水过程线确定;  $S(Z_{n-1}), S(Z_{n-1}+k_1/2), S(Z_{n-1}+k_2/2), S(Z_{n-1}+k_3)$  分别为库水位  $Z_{n-1}, Z_{n-1}+k_1/2, Z_{n-1}+k_2/2, Z_{n-1}+k_3$  时相应的水库泄流量。求得  $Z_n$ , 从而求出水库水位、库容与泄流量随时间的变化过程。

上面论述的数值解法, 不仅能简便地用于变开度计算, 且与近似积分法(试算法、图解法、半图解法等)相比, 在变动开度的计算中显现其一定的优点。数值解法因引入调洪函数的概念与公式, 使此问题得到较好的解决。不需查图与试算; 精度高; 速度快; 且易于程序化<sup>[17,18]</sup>。

## 2.4 防洪兴利连续调节计算方法

传统兴利调节的调节时段一般为月或者旬, 在汛期难以显现入库洪水过程和水库水位的变动过程; 在水库的规划过程中传统方法也将防洪与兴利调节计算分开, 造成防洪库容和兴利库容的重叠。因此, 大连理工大学王本德教授<sup>[19-23]</sup>提出了防洪兴利连续调节方法, 该方法在调节计算过程中, 考虑水库洪水调度方式与规则, 能够反映洪水期与枯水期径流连续变化的特性, 也更真实反映水库的水位变化过程。该方法对规划中的和已实际运行的水库都更符合实际运用情况, 得到的计算结果更科学合理。

由于该方法能更真实的反映水库的洪水的调节过程, 因此也更合理, 并且在辽宁省碧流河水库、筏窝水库、观音阁水库等得到成功应用, 并且有非常好的推广应用前景。

### 2.4.1 连续调节方法基本概念

防洪兴利连续调节计算方法, 是把径流资料中的洪水过程突显出来进行长系列统筹计算, 把年径流中部分时段长减小, 减至几小时甚至更短, 使洪水过程清晰的表达出来。在调节计算过程中, 若遭遇洪水过程, 则根据水库调洪水量平衡方程及防洪调度规则, 考虑下游的防洪要求、水库本身的泄流能力和水库本身安全要求进行洪水调节计算; 当处于非洪水过程期, 则可根据水量平衡方程及水库兴利调度原则, 采取削平头的泄流方式进行调节计算。削平头的泄流方式就是在泄流中不考虑实际的洪水过程和水库泄流能力的大小, 认为所有的来水都能在给定时间内泄掉的一种泄流方式。

防洪兴利连续调节计算方法对径流输入信息集和约束集的要求较高, 与传统兴利调节计算相比, 在径流输入信息集中增加了对洪水过程资料的要求, 在约束集中也要求增加必要的洪水调度原则、方式与规则、水库上下游的防洪安全特性指标, 如上游允许回水淹没高程, 下游安全泄量等<sup>[11]</sup>。

防洪兴利连续调节计算方法因为输入洪水和枯水径流信息, 受防洪和兴利两类约束, 调节计算过程既考虑兴利调度原则又考虑防洪调度原则, 所以输出成果集亦较传统兴利调节计算方法丰富, 不仅包括兴利调节参数, 而且还包含防洪调节参数。



### 2.4.2 连续调节方法基本原理

由于洪水兴利连续调节计算方法是将洪水调节计算与兴利调节计算有机地结合起来的一种方法,所以该方法的调节计算基本原理包括调洪计算的基本原理和兴利计算的基本原理两部分。

水库洪水调节计算原理,根据水力学明渠非恒定流的基本方程,即圣维南方程组:

$$\text{连续性方程} \quad \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (2.13)$$

$$\text{运动方程} \quad -\frac{\partial Z}{\partial s} = \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial w}{\partial t} \frac{Q^2}{K^2} \quad (2.14)$$

其中:  $w$ —过水断面面积( $\text{m}^2$ );

$t$ —时间( $\text{s}$ );

$Q$ —流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$s$ —沿水流方向的距离( $\text{m}$ );

$Z$ —水位( $\text{m}$ );

$g$ —重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ );

$v$ —断面平均流速( $\text{m}/\text{s}$ );

$K$ —流量模数( $\text{m}^3/\text{s}$ );

通常这个偏微分方程组难以得出精确的分析解,而是采用简化了的近似解法。长期以来,普遍采用的是瞬态法,即用有限差值来代替微分值,并加以简化,以近似地求解一系列瞬态流。

瞬态法将式(2.13)、(2.14)进行简化而得出基本公式,再结合水库的特性条件对基本公式进一步简化,则得到专用于水库调洪计算的实用公式:

$$\bar{Q} - \bar{q} = \frac{1}{2}(Q_1 + Q_2) - \frac{1}{2}(q_1 + q_w) = \frac{V_1 - V_2}{\Delta t} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.15)$$

式中  $Q_1, Q_2$ —分别为计算时段初、末的入库流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$\bar{Q}$ —计算时段中的平均入库流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ),它等于 $(Q_1 + Q_2)/2$ ;

$q_1, q_2$ —分别为计算时段初、末的下泄流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$\bar{q}$ —计算时段中的平均下泄流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ),即 $\bar{q} = (q_1 + q_2)/2$ ;

$V_1, V_2$ —分别为计算时段初、末水库的蓄水量( $\text{m}^3$ );

$\Delta V$ —为  $V_1$  和  $V_2$  之差;

$\Delta t$ —计算时段。

在一个计算时段中,入库水量与下泄水量之差即为该时段中水库蓄水量的变化。公式中并未计及洪水入库处至泄洪建筑物间的行进时间,也未考虑沿程流速变化和动库容等的影响,是连续方程的简化结果。

调洪计算时,入库洪水过程  $Q-t$  是已知的,即方程中  $Q_1$ 、 $Q_2$  为已知数。计算时段  $\Delta t$  可根据精度要求,视入库洪水过程的变化情况而定,一般,陡涨陡落的应取短些;变化平缓的可取长些。时段初的水库蓄水量  $V_1$  与下泄流量  $q_1$  可由前一时段求得,未知的只有  $V_2$  与  $q_2$ 。为了求解,需建立第二个方程,即水库的蓄泄方程。

对于具体的水库而言,当泄流建筑物型式与尺寸一定时,泄流量只取决于泄流水头或水库的蓄水量。即泄流量是泄流水头或库水位(即库蓄水量)的单值函数。可以用下面的蓄泄方程来统一表示,即

$$q = f(V) \quad (2.16)$$

$$\text{或 } q = f(Z) \quad (2.17)$$

这样,联立求解方程式(2.15)与(2.16)或(2.17),就可求得  $V_2$  与  $q_2$ 。

水库兴利调节计算原理,因为只有一个未知数,所以主要求解水库的水量平衡方程(2.18),即计算时段内进出水库的水量差,等于水库蓄水量的变化,无须试算。

$$\Delta V = (Q - q)\Delta t \quad (2.18)$$

式中  $\Delta V$ —计算时段  $\Delta t$  内水库蓄水量的变化,蓄为正、泄为负;

$Q$ —计算时段  $\Delta t$  内的平均入库流量;

$q$ —计算时段  $\Delta t$  内从水库取用及消耗的平均流量,包括各兴利部门的用水流量、蒸发损失及渗漏损失流量、以及水库蓄满后的无益弃水流量等。水位变化由库容—水位关系  $Z=F(V)$  查求。

如当  $Q > q$ , 时段末水位上升,若水位超过汛限水位,则汛限水位以上的水量要在给定时段  $\Delta t$  内均匀(亦称削平头)泄出,即时段末水位即是汛限水位,然后用式(2.16)计算时段出库流量。

$$q = (Q\Delta t - \Delta V) / \Delta t \quad (2.19)$$

式中  $\Delta V$ —汛限水位与计算时段  $\Delta t$  初库水位的库容水量差;

$Q$ —计算时段  $\Delta t$  内的平均入库流量;

$Q$ —计算时段  $\Delta t$  内从水库总平均泄流量,减去各兴利部门的用水流量、蒸发损失及渗漏损失流量,即是弃水流量。

### 2.4.3 连续调节方法的特点

连续调节与常规调节方法主要的差别在于洪水期对调节时段和调度规则的处理。常规调节方法汛期不考虑水库防洪任务,从满足兴利任务的角度出发,它划分的计算时段

历时较长,对每个时段使用兴利调度规则控制;连续调节方法在汛期考虑水库防洪任务,水库以防洪任务为主,兴利任务为辅,从防洪的角度出发,它划分的计算时段历时较短,整个汛期以洪水调度规则控制。具体来说,计算方法在以下两个方面对效益计算产生影响:

### (1) 汛期调节计算时段

汛期调节计算时段长短不同除了影响到计算精度之外,对调节计算的一些内在因素也产生很大影响,主要包括两个方面:① 径流处理方面的不同。连续调节以日或小时为计算时段,径流取时段平均值。②对兴利任务处理的不同。工农业用水部门的兴利任务通常是以旬或月为时段给出,因此在使用连续调节时,首先得将旬月为单位的兴利任务转换成以小时为单位的较小时段,对于工农业用水部门,在转换时,可以直接采用按比例分配的方法;对于电站,因为电站的出力同时受到发电流量和发电水头两个因素的影响,它具有瞬时性,不能够像工农业用水那样,直接进行分配。这种差异直接导致不同兴利部门对多余水量的利用潜力存在差异,因此对效益计算产生影响。具体来说,对于工农业供水,当用水要求得到满足之后,一般不再需要供水,根据控制规则,多余的水量将被弃掉而成为弃水。电站则不同,只要不超过电站装机容量,电站就可以充分利用多余水量,增加发电效益。

### (2) 调度规则不同带来的差别

常规调节不考虑水库汛期的防洪任务,它的泄流主要受水库的兴利任务控制,即在水库兴利调度规则允许的情况下,尽可能的满足水库的兴利任务。这种泄流方式简单直接。连续调节在汛期要考虑下游和水库本身的防洪安全,因此,它汛期依据的调度规则是水库的防洪调度规则。在防洪规则下的水库的泄流方式要比常规兴利调节复杂的多。不同的泄流方式除了对通过电站的流量产生影响,还将影响到水库时段水位的变化,而水库水位的不同,将影响到电站发电水头的不同,也就是说,调度规则的不同,将从发电流量和发电水头两个方面对电站产生影响。

## 2.5 兴利调节计算的优化方法

最优化方法(Optimization Method)是近几十年形成的,它主要运用数学方法研究各种系统的优化途径及方案,为决策者提供科学决策的依据。最优化方法的主要研究对象是各种有组织系统的管理问题及其生产经营活动。最优化方法的目的在于针对所研究的系统,求得一个合理运用人力、物力和财力的最佳方案,发挥和提高系统的效能及效益,最终达到系统的最优目标。

优化调度是一种建立以水库为中心的目标函数,拟定其满足的约束条件,然后利用最优化方法求解由目标函数和约束条件组成的系统方程组,使目标函数取得极值的水库

运行控制方式<sup>[23,24]</sup>。常用的优化方法有：线性规划、动态规划<sup>[25-27]</sup>、遗传算法<sup>[28,29]</sup>、大系统分解协调方法<sup>[30,31]</sup>、神经网络<sup>[32,33]</sup>等。

线性规划（linear programming）是在第二次世界大战中发展起来的一种重要的数量方法，线性规划方法是企业进行总产量计划时常用的一种定量方法。线性规划法是一种较成熟的优化理论，它利用线性规划迭代方法求解非线性规划问题。线性规划是运筹学的一个最重要的分支，理论上最完善，实际应用得最广泛。主要用于研究有限资源的最佳分配问题，即如何对有限的资源作出最佳方式地调配和最有利地使用，以便最充分地发挥资源的效能去获取最佳的经济效益。由于有成熟的计算机应用软件的支持，采用线性规划模型安排生产计划，并不是一件困难的事情。在总体计划中，用线性规划模型解决问题的思路是，在有限的生产资源和市场需求条件约束下，求利润最大的总产量计划。其优点是处理高维问题的能力，易于处理复杂的约束条件，算法简单、计算速度快。缺点是线性规划法中目标函数和约束条件必须是线性的，这使它在水库优化调度中的应用受到一定限制。

动态规划(dynamic programming)是运筹学的一个分支，是求解决策过程最优化的数学方法。20世纪50年代初美国数学家 R.E.Bellman 等人在研究多阶段决策过程的优化问题时，创立了解决这类过程优化问题的新方法——动态规划。动态规划是解决多阶段决策过程最优化的一种方法，其基本思路是将多阶段决策过程转化为一系列相互关联的单阶段问题，并依次求解。动态规划是一种逐步改善法，将复杂问题化成多个简单子问题，易于求解。动态规划求出的不仅是对整个过程的某一个特定状态的一个解，而且是对所有子过程的所有可能出现状态的一族解。但是构造动态规划模型时，状态变量必须满足“无后效性”，而一般实际问题往往不满足这个条件，降低了其通用性。由于动态规划是一个多阶段决策过程，其分析计算的工作量随着状态变量、决策变量的增加而增加，当决策比较数增加到一定程度时，产生了“维灾难”问题。动态规划适合于小型单一水库调度的运算问题。

遗传算法（Genetic Algorithm）最初由美国 Michigan 大学 J.Holland 教授于 1975 年首先提出来的，是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型，是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。在每次迭代中都保留一组候选解，模仿生物的进化和遗传，根据“生存竞争”和“优胜劣汰”的生物界生存法则，借助复制、交换、突变的操作，从解群中选取较优的个体，利用遗传算子对这些个体进行组合，产生新一代的候选解群，重复此过程，直到满足某种收敛指标为止。遗传算法使用简单，鲁棒性强，易于并行化，应用范围广，具有以下 4 个特点：①遗传算法的处理对象不是参数本身，而是对参数集进行了编码的个体，这使遗传算法具有广泛的应用领域。②遗传算法同时对空间中的多个解进行评估，使其具有较好的全局搜索性能，减少了陷

入局部最优解的风险。③遗传算法仅用适应度函数来评估个体，不受连续可微的约束，且定义域可以任意设定，扩大了使用范围，而且算法隐含的并行机制能避免“维灾难”问题。④遗传算法采用概率的变迁规则来指导它的搜索方向。近年来，遗传算法在水库调度方面的应用研究较多，并取得了一定的成效。

大系统分解协调方法是目前解决大规模复杂问题的有效途径之一。是把大规模复杂的系统分解成“独立”的子系统，分别建立模型进行优化，然后子系统之间用藕合变量连接在第二级或更高级进行协调，先实现子系统局部最优化，再根据大系统的总目标，使各子系统相互协调配合，实现全局最优化。这种分散处理的方法，利用层次、等级和阶梯的概念，是管理人员分析和了解下层子系统的行为，并把自下而上反馈的信息进行综合，把复杂的问题通过化整为零而求解相对比较简单的问题。分析协调法的重要理论基础是拉格朗日对偶性理论，分析协调法是将整体系统的最终控制问题变成多极系统的递阶控制问题。而梯阶控制的协调大多数方法属于目标协调或者是这两种的组合。该方法与一般方法相比有简化复杂性、减小工作量、避免“维灾难”等优点。其缺点是收敛性差。

80年代中期，美国加州理工学院生物物理学家霍普菲尔德教授(J.J.Hopfield)在神经网络建模及应用方面的开创性成果，在世界范围内掀起了神经网络的研究热潮。人工神经网络模型就是模拟人类生物神经网络以处理信息，信息处理部分常采用 Sigmoid 函数。当众多神经元相互联结成一个网络时，该网络具有一般非线性动力学系统的一切特征，即不可侧性、不可逆性、多个吸引子和出现混沌现象。神经网络在这个领域中有很多优点，使得它越来越流行。它在类型分类、识别方面非常出色。神经网络可以处理例外及不正常的输入数据，在构成原理和功能特点等方面更加接近人脑，它不是按给定的程序一步一步地执行运算，而是能够自身适应环境、总结规律、完成某种运算、识别或过程控制，这对于很多系统都很重要。神经网络的力量源自于以并行方式处理资讯，即是同时处理多项数据。因此，要一个串行的机器模拟并行处理是非常耗时的。通常都是因为缺乏足够强大的硬件，限制了神经网络的应用。

### 3 新环境下白石水库兴利调节计算

#### 3.1 白石水库概况

##### 3.1.1 白石水库的工程概况

白石水库位于辽宁省北票市上园乡附近的西部多少河大凌河干流上,距北票市 46 公里,距义县 45 公里。是辽宁省“九五”期间水资源开发的重点工程,是一座以防洪、灌溉、供水为主兼顾发电、养鱼等综合利用的大 I 型水利枢纽工程。工程于 1995 年开工,1999 年汛后落闸蓄水,2000 年汛后竣工。

白石水库坝址以上控制面积  $17649 \text{ km}^2$ ,占大凌河流域面积  $23263 \text{ km}^2$  的 76%,总库容为  $16.45 \text{ 亿 m}^3$ ,净调节水量为  $4.47 \text{ 亿 m}^3$ ,水库多年平均径流量为  $13.45 \text{ 亿 m}^3$ ,是多年调节水库。工程总投资 22.093 亿元,其中利用第四批日本海外经济协力基金(OECF)贷款 80 亿日元。水库正常高水位 127.0 m,防洪限制水位 125.6 m,死水位 108.0 m。白石水库枢纽建筑物为 500 年设计,设计水位 132.27 m,洪峰流量  $30233 \text{ m}^3/\text{s}$ ;5000 年校核,校核水位 133.88 m,洪峰流量  $45472 \text{ m}^3/\text{s}$ 。水库拦河坝为 RCD 碾压混凝土重力坝,坝顶长 513 m,最大坝高 49.3 m,其中溢流坝段布置在左侧,总净宽 132 m,布设 11 个溢流表孔、12 个泄流排沙底孔,进口底高程为 96.0 m,装平板门,出口挑流鼻坎高程 98.50 m;取水坝段设 2 个取水口,进口底高程分别为 105.0 m 和 116.0 m;电站坝段有 3 台机组(两大一小):HL240-LJ-180,HL240-LJ-120),总装机容量 9600 kw,进口中心高程 104.25 m。

白石水库的主要任务是防洪、灌溉、城市供水,兼顾发电和养鱼。水库正常运用后,在防洪方面,可保护下游义县、凌海两座县城,  $6.47 \text{ 万 hm}^2$  (97 万亩) 农田和两座铁路大桥的防洪标准由 20 年一遇提高到 50 年一遇;减小沈山、锦承铁路桥及新建京沈高速公路桥和秦沈高速铁路桥的洪水损失。在供水方面,水库日供水 30 万吨;配合区间每年可供阜新、北票、义县及锦州电厂等城市生活及工业用水  $2.02 \text{ 亿 m}^3$ ,其中新增阜新城市供水用水  $2.67 \text{ 亿 m}^3$ ,可增加水田灌溉面积  $1.33 \text{ 万 hm}^2$ ,并可提高滨海地区  $1.53 \text{ 万 hm}^2$  苇田供水保证率。在发电方面,多年平均发电量 2213 万 kw.h。在养鱼方面,可提供  $0.45 \text{ 万 hm}^2$  的养鱼水面,年产鱼 34 万 kg。

白石水库的修建,淹没区涉及 8 个乡镇,需动迁人口(10 年一遇) 17933 人,淹没耕地面积 47446 亩(2 年一遇),林地 41737 亩,房屋  $590725 \text{ m}^2$ ,还有公路、铁路、工矿企业、文物古迹等,淹没处理补偿费总计 7.27 亿元。与水库配套的工程有:辽河三角洲第二期农业综合开发工程及阜新市引白水源工程,总投资分别为 4.14 亿元和 5.4 亿元。

### 3.1.2 流域概况

白石水库位于辽宁省北票市上园乡附近的大凌河干流上。水库控制面积为 17649 km<sup>2</sup>, 控制大凌河流域面积为 76%, 其中山地、丘陵占 94%。

大凌河是辽宁省西部最大的河流, 干流全长 435 km, 流域面积 23837 km<sup>2</sup>, 其中辽宁省省内面积 20285 km<sup>2</sup>, 占全流域面积的 85%。地理位置: 东经 118°46′~121°50′北纬 40°28′~42°38′。上游分南北两支, 南支发源于辽宁省建昌县水泉沟, 北支发源于河北省平泉县, 南北两支于喀左县城附近汇合, 流经朝阳市、北票市、义县、凌海市后注入渤海。

大凌河流域包括辽宁省内锦州市、阜新市、朝阳市、盘锦市、葫芦岛市等 5 个地级市所辖的 13 个县市, 以及内蒙古通辽、赤峰市、河北省承德市部分地区。流域内总人口 525.21 万人, 其中城镇人口 172.62 万人, 2003 年国内生产总值 272.75 亿元, 工业增加值 84.7 亿元, 耕地面积 60.86 万公顷, 粮食产量 61.2 万吨。大凌河在朝阳市境内, 流经 5 县 1 市 2 区, 总流长为 283 公里, 总流域面积为 14162 平方公里, 最大径流量为 15600 m<sup>3</sup>/s, 最小径流量 0.09 m<sup>3</sup>/s, 年平均径流量为 8.82 亿 m<sup>3</sup>, 可利用水总量为 6.5549 亿 m<sup>3</sup>。境内共有大凌河支流 22 条, 主要支流有大凌河西支、老虎山河、牯牛河等。

大凌河流域现有大型水库 4 座, 分别是宫山嘴水库、菩萨庙水库、瓦房店水库、龙潭水库, 中型水库 7 座, 小型水库 73 座, 塘坝 380 处。总库容 23.45 亿立方米, 兴利库容 11.81 亿 m<sup>3</sup>, 设计供水能力 8.36 亿 m<sup>3</sup>。引水工程 59 处, 提水站 34 处, 地下水井 1.57 万眼。

大凌河流域 2003 年总供水量 11.20 亿 m<sup>3</sup> (包括向外流域供水量), 其中蓄水工程直接供水 0.33 亿 m<sup>3</sup>, 引水工程供水 0.55 亿 m<sup>3</sup>, 提水工程 0.24 亿 m<sup>3</sup>, 水井工程供水量 10.08 亿 m<sup>3</sup>。大凌河流域 2003 年总供水量扣除深层地下水利用量后为 10.93 亿 m<sup>3</sup>, 占水资源总量 19.43 亿 m<sup>3</sup> 的 56.3%, 其中地表水直接利用量为 1.12 亿 m<sup>3</sup>, 占地表水资源量的 6%, 水井工程开发利用量 9.81 亿 m<sup>3</sup>, 但有一部分是靠掠夺地表水, 地下水约占 65%, 占地下水可开采量的 120%。地下水严重超采。

### 3.1.3 水文气象概况

大凌河流域属温带季风气候, 夏季多雨炎热、空气湿润, 冬春少雨, 气候干燥, 是辽宁省干旱地区之一, 素有十年九旱之称, 严重影响工农业生产的发展。流域内多年平均降水量在 400~600 mm, 由南向北递减, 降水量年际变化较大, 丰、枯水年比值一般可达 3.5 倍, 降水量年际变化较大, 年内分配极不均匀, 年内多集中在汛期 6—9 月, 降水量占全年的 80%, 其中 7—8 月占 56% 左右, 汛期降水量又多集中在几次暴雨, 如朝阳站 1963 年 7 月 18 日—20 日降水量为 263.7 mm, 占全年总降水量的 40.3%。流域多

年平均蒸发量一般在 900~1200 mm。辽宁省境内多年平均径流量为 16.33 亿  $m^3$ ，7—9 月径流量约占全年的 70% 以上。大凌河流域内多石山及风化沙土，植被条件较差，荒山秃岭较多，水土流失严重，河流含沙量大，是辽宁省多沙河流之一，流经碎屑岩、火山岩和黄土地区，含沙量达  $57 kg/m^3$ ，水土流失严重。大凌河下游控制站——凌海水文站多年平均输沙量 1769 万 t。

多年平均气温在  $8^{\circ}C$  左右；极端最高气温在  $38^{\circ}C \sim 42^{\circ}C$  之间，多出现在 6—8 月；极端最低气温可达  $-25^{\circ}C \sim -37^{\circ}C$ ，多出现在 12、1 月。流域相对湿度在 38~82% 之间，其中 7—8 月最大。多年平均风速为 2.9—4.3 m/s，最大风速可达 28 m/s，其风向为南风。多年平均相对湿度在 38%~74% 之间，大凌河流域是辽宁省日照时数较长的地区，朝阳地区多年平均日照时数达 2854 h；无霜期在 130—180 天，初霜最早在 8 月下旬，终霜最晚在 5 月下旬；流域多年平均地面温度在  $10^{\circ}C$  左右，多年平均最高地面温度接近  $46^{\circ}C$ ，多发生在 6 月份；最低达  $-25^{\circ}C$ ，多发生在 1 月份。年最大冻土深度可达 147 cm，降雪期较长，从 10 月下旬至次年 3 月，积雪日期在 60—90 天左右，积雪深度 20 cm 左右。大凌河站气象特征见表 3.1。

表 3.1 大凌河流域各站气象特征表

Table 3.1 meteorological figures of Dalinghe River

项 目	单 位	站 名					
		建昌	喀左	朝阳	北票	义县	锦县
多年平均蒸发量	mm	1856.6	2059.4	2102.0	2156.8	1966.3	1735.9
多年平均气温	$^{\circ}C$	8.1	8.3	8.4	8.3	7.9	8.5
极端最高气温	$^{\circ}C$	40.7	41.1	40.6	40.7	41.6	39.7
极端最低气温	$^{\circ}C$	-26.9	-29.9	-31.1	-26.4	-29.9	-25.6
多年平均相对湿度	%	53	53	52	52	59	62
多年平均风速	M/s	3.0	2.3	3.0	2.09	3.0	4.2
最大风速	M/s	18	20	20	18	24	28
风向		NNW	NW	NNW	SSW	SSW	S
日照时数	h	2885	2842	2855	2908	2831	2801
霜日	d	153	148	160	146	149	180
多年平均地面温度	$^{\circ}C$	10.3	10.6	10.2	10.4	9.9	10.5
最大冻土深度	cm	129	119	135	147	130	131
最大积雪深度	cm	22	19	17	20	18	17

### 3.1.4 水库的特性参数

白石水库的水库特性参数见表 3.2。



### 3.2 白石水库的现有兴利调度任务

白石水库 1995 年 5 月进场开始前期准备工程,1999 年汛后下闸蓄水,2000 年底枢纽工程完工。白石水库,可使水库下游义县、凌海市两座县城、6.47 万  $\text{hm}^2$  (97 万亩) 农田和两座铁路大桥的防洪标准由 20 年一遇提高到 50 年一遇,每年可向阜新、锦州等城市提供 2.02 亿  $\text{m}^3$  的城市用水,向辽河三角洲地区提供 2.67 亿  $\text{m}^3$  的农业用水,增加水田 1.33 万  $\text{hm}^2$  (20 万亩),并可提高滨海地区 1.53 万  $\text{hm}^2$  (23 万亩) 苇田的供水保证率。它的建成将缓解辽西地区严重缺水局面,对辽西乃至全省经济发展起着重要的作用。

表 3.2 白石水库特征参数表

Table 3.2 Characastic figures of Baishi Reservoir

序号	水库特性	单位	数量	备注
1	校核洪水位	m	133.88	下游 103.35
	相应: 库容 (原始/30 年)	亿 $\text{m}^3$	16.45/13.38	
	最大泄量	$\text{m}^3/\text{s}$	26626	
2	设计洪水位	m	132.27	下游 101.20
	相应: 库容 (原始/30 年)	亿 $\text{m}^3$	14.77 / 11.70	
	最大泄量	$\text{m}^3/\text{s}$	17227	
3	正常蓄水位	m	127.00	
	相应: 库容 (原始/30 年)	亿 $\text{m}^3$	10.00 / 7.10	
	库面积 (原始/30 年)	$\text{Km}^2$	79.5 / 75.0	
	回水长度	Km	34.5	
4	防洪限制水位	m	125.60	
	相应: 库容 (原始/30 年)	亿 $\text{m}^3$	8.90 / 6.07	
5	死水位	m	108.00	
	相应: 库容 (原始/30 年)	亿 $\text{m}^3$	1.30/0.85	
6	调洪库容 (原始/30 年)	亿 $\text{m}^3$	7.55/7.31	
7	兴利库容 (原始/30 年)	亿 $\text{m}^3$	8.70/6.25	
8	共用库容	亿 $\text{m}^3$	1.10/1.03	
9	全区防洪高水位 (2%)	m	130.24	
	相应防洪库容 (原始/30 年)	亿 $\text{m}^3$	3.68/3.49	
	锦县组合流量 (2%)	$\text{m}^3/\text{s}$	11882	
10	净入库水量	亿 $\text{m}^3$	8.48	
	毛调节水量	亿 $\text{m}^3$	5.28	

	净调节水量	亿 m <sup>3</sup>	4.47	
	调节系数	亿 m <sup>3</sup>	62.3	
	供工业用水	亿 m <sup>3</sup>	2.02	
11	其中：水库供水	亿 m <sup>3</sup>	1.43	
	利用区间	亿 m <sup>3</sup>	0.59	
12	供农业用水	亿 m <sup>3</sup>	2.67	
13	其中：水库供水	亿 m <sup>3</sup>	2.07	
	利用区间	亿 m <sup>3</sup>	0.59	
	其中：水库补水	亿 m <sup>3</sup>	0.20	
	利用区间	亿 m <sup>3</sup>	0.15	
14	补平原地区地下水	亿 m <sup>3</sup>	1.66	
15	其中：水库补水	亿 m <sup>3</sup>	0.77	
16	利用区间	亿 m <sup>3</sup>	0.88	
	水库弃水	亿 m <sup>3</sup>	3.20	

目前已建和拟建的白石水库取水工程有阜新引白工程、锦州引白工程、北票引白工程。阜新引白工程的管道供水正在建设当中，一期工程设计 2015 年前，供水能力为 16.5 万 t/d；二期工程设计 2015 年后，供水能力为 28.5 万 t/d。一期工程已在 2008 年投产使用。已批准的拟建有锦州引白工程，供水给锦州开发区，供水能力为 15 万 t/d。北票引白工程，供水能力为 7 万 t/d。

### 3.3 白石水库的兴利调度任务变更

作为省“五点一线”重点发展区域，锦州市经济技术开发区近年来经济社会不断发展，但受资源性缺水困扰的问题显得比较突出。为及早解决水资源供需问题，省水利厅经过两年的评估和论证，确定了引白石水库的水资源供开发区的工程方案。

引白工程是从大凌河流域的白石水库向锦州开发区铺设一条总长 120 公里的供水管线，并在距离白石水库下游 25 公里的义县境内建设供水预处理厂和加压泵站，以解决水体含沙量淤积管道和供水压力不足问题。在开发区建净水厂，分别供应工业用水、生活用水。通过对白石水库的调度原则和流域内各业供水保证率进行优化，白石水库每天可以供给开发区用水超过 11 万吨。引白工程预计总投资约 9 亿元，其中招商引资 6.3 亿元，银行贷款 1.5 亿元，开发区自筹资金 1.2 亿元。建设周期为三年半，项目前期工作一年半，施工期两年，预计 2011 年 10 月工程可竣工投入使用。

根据水库初设资料,白石水库向辽河三角洲地区提供 2.67 亿  $m^3$  的农业用水,随着周边地区经济的发展,水资源紧缺问题比较突出,一些地区开始新建引水工程从白石水库调水。目前已建和拟建的白石水库取水工程有阜新引白工程、锦州引白工程、北票引白工程。阜新引白工程的管道供水正在建设当中,一期工程设计 2015 年前,供水能力为 16.5 万  $t/d$ ;二期工程设计 2015 年后,供水能力为 28.5 万  $t/d$ 。一期工程已在 2008 年投产使用。已批准的拟建有锦州引白工程,供水给锦州开发区,供水能力为 15 万  $t/d$ 。北票引白工程,供水能力为 7 万  $t/d$ 。如果白石水库上级主管部门同意缩减一部分白石水库的农业供水量,将该部分水量提供给东港电力公司,供水 10—15 万  $t/d$  是可行的,但尚需进一步论证。

这些因素都使白石水库的兴利调度任务发生变化,必须重新制定新的调度方案,以确保水库发挥最大的兴利效益。

## 4. 新环境下白石水库兴利调节计算

### 4.1 白石水库兴利调节计算的分析说明:

(1) 水库按正常水位、正常用水供求关系条件下进行调节计算;

(2) 可以考虑减少下游水田面积或灌溉供水保证率的条件下, 进行水库的兴利供水计算;

(3) 由于水库的移民动迁淹没赔偿高程为 EL 127.5 m, 水库正常高水位为 EL 127.0 m, 有 0.5 m 的余地, 可以考虑利用这 0.5 m; 提高水库的汛期限制水位或正常高水位, 从而提高水库的供水保证率;

(4) 可以同时考虑(2)和(3)的两个条件, 进行水库的调节计算。

### 4.2 兴利调节计算的数据选取

兴利调度依据的主要资料包括有水库的特征水位及其相应的特征库容、水库的水位面积和水位容积关系、水库历史入库径流资料(包括逐月(旬)平均流量、洪水流量过程)、水库蒸发渗漏损失资料或者它们的计算方法、农业用水定额、城市供水量及各用水部门的用水计划和保证率、水库的兴利调度方案等<sup>[14]</sup>。

#### (1) 白石水库径流资料

1950~1992 年的旬月径流资料(6、7、8、9 月为旬资料, 其他的为月资料), 可参见白石水库调度手册。

(2) 白石水库水位~库容、水位~泄量关系资料见表 3.3 和表 3.4。

#### (3) 白石水库蒸发渗漏损失分析

通过分析历史资料, 为安全计选用 75%干旱年的蒸发量作为蒸发渗漏损失量, 具体损失量见白石水库调度手册。

#### (4) 农业灌溉用水量

农业灌溉用水量主要包括水田灌溉用水和苇田灌溉用水, 分配比例应用建库以来实际月、旬农业灌溉供水量平均值, 按水田供水保证率 75%, 苇田供水保证率 52%拟定农业灌溉年供水量为 2.67 亿立方米。

#### (5) 城市拟定用水量

按照 97.7%的供水保证率供水给水库周边的用水城市, 年供水量为 2.02 亿立方米。

表 4.1 白石水库水位~库容关系值

Table 4.3 relationship between reservoir elevator and capacity

水位 (m)	库容 ( $10^8 \text{m}^3$ )
94	0
96	0.043
98	0.085
100	0.128
102	0.297
104	0.584
106	0.9
108	1.302
110	1.633
112	2.203
114	2.807
116	3.506
118	4.382
120	5.291
122	6.42
124	7.682
126	9.2
127	10
128	10.8
130	12.553
132	14.5
134	16.58
140	23.796

表 4.2 水位与流量关系表及关系曲线

Table 4.4 relationship between reservoir elevator and spill capacity

泄量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	209	592	1087	1695	2412	3227	4137	5142	6236	7407
库水位 (m)	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125
泄量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	8614	9894	11246	12667	14159	15720	17343	19046	20818	22729
库水位 (m)	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135

### 4.3 资料的代表性分析

在插补延长系列的基础上, 对干流朝阳、大凌河站年迳流量做了系列代表性分析, 其中大凌河站累进均值、累进  $C_v$  值及差积曲线可知从 1962 年以后均值和  $C_v$  值趋向稳定, 大小水年对参数的影响不大, 如 36 年系列和 43 年系列计算  $C_v$  值是 0.47 和 0.49。从差积曲线看 1950—1992 年包括了丰、平、枯水周期。但从 1980 年起为连续枯水段, 本次延长 7 年系列, 均为枯水年、 $C_v$ 、均值变化都不大, 但枯水段长。另外朝阳站雨量观测年限较长, 做了长短系列参数的对比分析: 长系列 1908—1928 年、1934—1941 年、1951—1985 年, 共 62 年其均值为 487.1 mm,  $C_v$  值为 0.3, 短系列 1951—1985 年共 35 年均值 470.3 mm,  $C_v$  值为 0.25, 长短系列的参数变化不大。根据以上的分析, 认为大凌河流域从 1950—1992 年资料具有一定的代表性。

### 4.4 兴利调节计算初始、边界条件确定

水库兴利调节计算以水库汛限水位为初始条件, 即库水位为 125.60m 开始起调。兴利调节计算的边界条件包括以下几项:

(1) 水位: 汛期:  $108.00m \leq Z_i \leq 125.6m$

非汛期:  $108.00m \leq Z_i \leq 127.00m$

(2) 城市供水量:  $1.9 \text{ 亿 } m^3 \leq W_{\text{城}} \leq 3.0 \text{ 亿 } m^3$

(3) 苇田供水量:  $0.9 \text{ 亿 } m^3 \leq W_{\text{苇}} \leq 1.3 \text{ 亿 } m^3$

(4) 农田供水量:  $1.7 \text{ 亿 } m^3 \leq W_{\text{农}} \leq 2.0 \text{ 亿 } m^3$

(5) 城市缺水量:  $0.0 \text{ 亿 } m^3 \leq W_{\text{缺}} \leq 0.2 \text{ 亿 } m^3$

### 4.5 兴利调节结果—多方案生成

采用上述资料对白石水库进行兴利调节计算, 根据 4 个不同的调度图所计算出的结果如下:

(1) 采用兴利调度图 (一) 计算:

①城市计划供水量为 2.02 亿  $m^3$ /年, 从 1950 年 9 月 1 日 127.0 m 水位起调, 2006 年 8 月 31 日结束, 得

城市生活年均实供水量 1.9559 亿  $m^3$ , 年保证率 95%;

苇田 23 万亩, 灌溉定额: 112.5  $m^3$ /亩/月, 年均实供水量 1.016 亿  $m^3$ , 年保证率 79%;

水田 20.5 万亩, 灌溉定额: 231.75  $m^3$ /亩/月, 年均实供水量 1.7562 亿  $m^3$ , 年保证率 86%; 年均弃水量 6.5323 亿  $m^3$ 。

②城市计划供水量为 3 亿  $m^3$ /年, 从 1950 年 9 月 1 日 127.0 m 水位起调, 2006 年 8

月 31 日结束，得

城市生活年均实供水量 2.8626 亿  $m^3$ ，年保证率 89%；

苇田 23 万亩，灌溉定额：112.5  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 0.9735 亿  $m^3$ ，年保证率 75%；

水田 20.5 万亩，灌溉定额：231.75  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 1.701 亿  $m^3$ ，年保证率 82%；

年均弃水量 5.7438 亿  $m^3$ 。

(2) 采用兴利调度图（二）计算：

①城市计划供水量为 2.02 亿  $m^3$ /年，从 1950 年 9 月 1 日 127.2 m 水位起调，2006 年 8 月 31 日结束，得

城市生活年均实供水量 1.9601 亿  $m^3$ ，年保证率 95%；

苇田 23 万亩，灌溉定额：112.5  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 1.016 亿  $m^3$ ，年保证率 79%；

水田 20.5 万亩，灌溉定额：231.75  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 1.7604 亿  $m^3$ ，年保证率 88%；

年均弃水量 6.5288 亿  $m^3$ 。

②城市计划供水量为 3 亿  $m^3$ /年，从 1950 年 9 月 1 日 127.2 m 水位起调，2006 年 8 月 31 日结束，得

城市生活年均实供水量 2.8617 亿  $m^3$ ，年保证率 89%；

苇田 23 万亩，灌溉定额：112.5  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 0.9735 亿  $m^3$ ，年保证率 75%；

水田 20.5 万亩，灌溉定额：231.75  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 1.7053 亿  $m^3$ ，年保证率 84%；

年均弃水量 5.7441 亿  $m^3$ 。

(3) 采用兴利调度图（三）计算：

①城市计划供水量为 2.02 亿  $m^3$ /年，从 1950 年 9 月 1 日 127.4 m 水位起调，2006 年 8 月 31 日结束，得

城市生活年均实供水量 1.9632 亿  $m^3$ ，年保证率 95%；

苇田 23 万亩，灌溉定额：112.5  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 1.016 亿  $m^3$ ，年保证率 79%；

水田 20.5 万亩，灌溉定额：231.75  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 1.7604 亿  $m^3$ ，年保证率 88%；

年均弃水量 6.5294 亿  $m^3$ 。

②城市计划供水量为 3 亿  $m^3$ /年，从 1950 年 9 月 1 日 127.4 m 水位起调，2006 年 8 月 31 日结束，得

城市生活年均实供水量 2.8644 亿  $m^3$ ，年保证率 89%；

苇田 23 万亩，灌溉定额：112.5  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 0.9735 亿  $m^3$ ，年保证率 75%；

水田 20.5 万亩，灌溉定额：231.75  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 1.7053 亿  $m^3$ ，年保证率 84%；

年均弃水量 5.7445 亿  $m^3$ 。

(4)采用兴利调度图（四）计算：

①城市计划供水量为 2.02 亿  $m^3$ /年，从 1950 年 9 月 1 日 127.5 m 水位起调，2006 年 8 月 31 日结束，得

城市生活年均实供水量 1.9644 亿  $m^3$ ，年保证率 95%；

苇田 23 万亩，灌溉定额：112.5  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 1.016 亿  $m^3$ ，年保证率 79%；

水田 20.5 万亩，灌溉定额：231.75  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 1.7604 亿  $m^3$ ，年保证率 88%；

年均弃水量 6.5296 亿  $m^3$ 。

②城市计划供水量为 3 亿  $m^3$ /年，从 1950 年 9 月 1 日 127.5 m 水位起调，2006 年 8 月 31 日结束，得

城市生活年均实供水量 2.8653 亿  $m^3$ ，年保证率 89%；

苇田 23 万亩，灌溉定额：112.5  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 0.9735 亿  $m^3$ ，年保证率 75%；

水田 20.5 万亩，灌溉定额：231.75  $m^3$ /亩/月，年均实供水量 1.7053 亿  $m^3$ ，年保证率 84%；

年均弃水量 5.7449 亿  $m^3$ 。

整理上述几组数据，共生成 8 个方案如表 3.5 所示。

#### 4.5 计算结果的综合分析

在水库兴利调节计算过程中，城市计划供水量分别取 3 亿  $m^3$  和 2.02 亿  $m^3$ 。在两种情况下，调度方案中各项供水指标和弃水量有着显著差异，而根据调度图的不同而采用不同的起调水位对调度的影响并不是很大，各项供水指标间的差异并不大。可见该方法对于同一情况的调节计算具有稳定性。



表 4.5 白石水库兴利调度方案集

Table 4.5 conservancy schemes of Baishi Reservoir

方案	起调水位 (m)	城市计划 供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	城市年均 供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	苇田灌水 量 (亿 m <sup>3</sup> )	水田年灌 水量 (亿 m <sup>3</sup> )	城市缺水 量 (亿 m <sup>3</sup> )	年均弃水 量 (亿 m <sup>3</sup> )
一	127.0	3	2.8626	0.9735	1.701	0.1374	5.7438
二	127.2	3	2.8617	0.9735	1.7053	0.1383	5.7441
三	127.4	3	2.8644	0.9735	1.7053	0.1356	5.7445
四	127.5	3	2.8653	0.9735	1.7053	0.1347	5.7449
五	127.0	2.02	1.9559	1.016	1.7562	0.0641	6.5323
六	127.2	2.02	1.9601	1.016	1.7604	0.0599	6.5288
七	127.4	2.02	1.9632	1.016	1.7604	0.0568	6.5294
八	127.5	2.02	1.9644	1.016	1.7604	0.0556	6.5296

## 5. 兴利调节计算方案的多目标优选决策

### 5.1 多目标优化决策的必要性

可行兴利调节计算方案集为方案的多目标优化决策奠定了基础。

水库兴利调节,无论在规划阶段还是在实际运行中都是十分重要的,调节方案的选择也是一项不可缺少的内容。尽管水库的兴利调节计算,尤其是单个水库的兴利调节计算过程并不复杂,有传统的和新的优化算法,给定初始和边界条件就可以快速生成相应的优化方案,但实践中好的水库兴利调度方案要考虑的因素并非优化模型都能考虑的,其复杂性不仅在于决策的多目标性,有的目标还难以公度,也在于目标之间可能具有一定的冲突性。实践也表明,对于这种复杂的多目标决策问题,即使通过优化模型求得最优解,也是在一定约束下的优化结果,它在为决策者提供重要依据和同时,也往往由于模型难以反映多目标问题的复杂性而影响成果的实用性。因此,针对这类复杂的多目标决策问题,人们不应再追求所谓的最优解,而应追求基于满意原则的“满意解”。

一般而言,对于综合利用水库,可行的调度方案要考虑多个目标,如水库特征水位控制、各项供水任务和生态保护目标等,必须兼顾技术、经济、社会、环境等多方面的因素,有的目标具有模糊性,而有些目标之间可能会有一定的冲突性,如在有限的水资源下,城镇生活用水、工业、农业和生态用水之间存在一定冲突,相关利益群体和部门的偏好也就不能完全一致,结果是决策模式与决策过程存在需要协调的矛盾冲突。这使得水库的兴利调度决策问题构成一个有一定冲突的多目标群决策问题,即同一决策者不同目标之间的冲突和不同决策者由于偏好差异导致的冲突。尽管国内外关于多目标决策的模型与应用有很多,但针对综合运用水库兴利调度方案的多目标决策问题,尤其是有一定冲突的多目标决策问题,尚没有研究与应用。

针对白石水库的兴利调度方案的多目标性、目标的模糊性和目标间的冲突性,本文构建相应的多目标决策模型以获得满意解。

### 5.2 多目标可变模糊优选模型

资源系统中常常是一个多因素、多层次、多目标、多功能、多阶段的复杂巨系统,经典的数学优化理论与技术很难胜任。相对于经典数学,模糊数学主要研究和处理现实中大量存在的模糊现象,即它研究的是事务性态和类属方面的“亦此亦彼”性。模糊数学已在系统分析、评价中得到广泛应用。陈守煜教授提出的以相对隶属函数为基础的动态工程可变模糊集理论,在很大程度上能消除或减小模糊数学在应用领域存在的主观任意性,扩大其在工程领域的应用范围,提升模糊数学运用的权威性<sup>[34,35]</sup>。

## 5.2.1 可变模糊优选的基本原理

定义 1.1: 设论域  $U$  上的一个模糊概念(事物、现象) $A$ , 对  $U$  中的任意元素  $u(u \in U)$ , 在相对隶属函数的连续统数轴任一点上,  $u$  对表示吸引性质  $A$  的相对隶属度为  $\mu_{\underline{A}}(u)$ , 对表示排斥性质  $A^c$  的相对隶属度为  $\mu_{\underline{A}^c}(u)$ , 设

$$D_{\underline{A}}(u) = \mu_{\underline{A}}(u) - \mu_{\underline{A}^c}(u) \quad (5.1)$$

$D_{\underline{A}}(u)$  称为  $u$  对  $A$  的相对差异度。

映射

$$\begin{cases} D_{\underline{A}} : D \rightarrow [-1, 1] \\ u \mapsto D_{\underline{A}}(u) \in [-1, 1] \end{cases} \quad (5.2)$$

称为  $u$  对  $A$  的相对差异度函数。

根据

$$\mu_{\underline{A}}(u) + \mu_{\underline{A}^c}(u) = 1 \quad (5.3)$$

则

$$D_{\underline{A}}(u) = 2\mu_{\underline{A}}(u) - 1 \quad (5.4)$$

或

$$\mu_{\underline{A}}(u) = (1 + D_{\underline{A}}(u)) / 2 \quad (5.5)$$

定义 1.2: 令

$$V = \{(u, D) \mid u \in U, D_{\underline{A}}(u) = \mu_{\underline{A}}(u) - \mu_{\underline{A}^c}(u), D \in [-1, 1]\} \quad (5.6)$$

$$A_+ = \{u \mid u \in U, 0 < D_{\underline{A}}(u) \leq 1\} \quad (5.7)$$

$$A_- = \{u \mid u \in U, -1 \leq D_{\underline{A}}(u) < 0\} \quad (5.8)$$

$$A_0 = \{u | u \in U, D_{\underline{A}}(u) = 0\} \quad (5.9)$$

式中:V 称为模糊可变集合;A<sub>+</sub>、A<sub>-</sub>、A<sub>0</sub> 分别称为模糊可变集合 V 的吸引(为主)域、排斥(为主)域和渐变式质变界。

定义 1.3: 设 C 是 V 的可变因子集

$$C = \{C_A, C_B, C_C\} \quad (5.10)$$

式中:C<sub>A</sub> 为可变模型集;C<sub>B</sub> 为可变模型参数集;C<sub>C</sub> 为除模型及其参数外的可变其他因子集。

令

$$A^- = C(A_+) = \{u | u \in U, 0 < D_{\underline{A}}(u) \leq 1, -1 \leq D_{\underline{A}}(C(u)) < 0\} \quad (5.11)$$

$$A^+ = C(A_-) = \{u | u \in U, -1 \leq D_{\underline{A}}(u) < 0, 0 < D_{\underline{A}}(C(u)) \leq 1\} \quad (5.12)$$

统一称为模糊可变集合 V 关于可变因子集 C 的可变域。

令

$$A^{(+)} = C(A_{(+)}) = \{u | u \in U, 0 < D_{\underline{A}}(u) \leq 1, 0 < D_{\underline{A}}(C(u)) \leq 1\} \quad (5.13)$$

$$A^{(-)} = C(A_{(-)}) = \{u | u \in U, -1 \leq D_{\underline{A}}(u) < 0, -1 \leq D_{\underline{A}}(C(u)) < 0\} \quad (5.14)$$

统一称为模糊可变集合 V 关于可变因子集 C 的量变域。

相对差异函数模型

设 X<sub>0</sub>=[a,b]为实轴上模糊可变集合 V 的吸引(为主)域,即 0 < D<sub>A</sub>(u) ≤ 1 区间,X=[c,d]为包含 X<sub>0</sub>(X<sub>0</sub> ⊂ X) 的某一上、下界范围域区间。如图 5.1 所示。

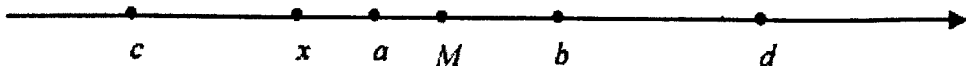


图 5.1 点 x、M 与区间 X<sub>0</sub>、X 的位置关系

Fig. 5.1 relative position of x and M with range X<sub>0</sub> and X

根据模糊可变集合 V 定义可知[c,a]与[b,d]均为 V 的排斥域,即 -1 ≤ D<sub>A</sub>(u) < 0 区间。

设  $M$  为吸引(为主)域区间  $[a, b]$  中  $D_{\Delta}(u) = 1$  的点值,按物理分析确定,  $M$  不一定是区间  $[a, b]$  的中点值。  $x$  为  $X$  区间内的任意点的量值,则  $x$  落入  $M$  点左侧时的相对差异函数模型可为

$$\begin{cases} D_{\Delta}(u) = \left[ \frac{x-a}{M-a} \right]^{\beta}; x \in [a, M] \\ D_{\Delta}(u) = -\left[ \frac{x-a}{c-a} \right]^{\beta}; x \in [c, a] \end{cases} \quad (5.15)$$

$x$  落入  $M$  点右侧时, 其相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_{\Delta}(u) = \left[ \frac{x-b}{M-b} \right]^{\beta}; x \in [M, b] \\ D_{\Delta}(u) = -\left[ \frac{x-b}{d-b} \right]^{\beta}; x \in [b, d] \end{cases} \quad (5.16)$$

$$D_{\Delta}(u) = -1; x \notin (c, d) \quad (5.17)$$

式(5.15)、式(5.16)中  $\beta$  为非负指数,通常可取  $\beta = 1$ ,即相对差异函数模型为线性函数,式(5.15)与式(5.16)满足:(1)当  $x=a$ 、 $x=b$  时,  $D_{\Delta}(u) = 0$ ; (2)当  $x=M$  时,  $D_{\Delta}(u) = 1$ ; (3)当  $x=c$ 、 $x=d$  时,  $D_{\Delta}(u) = -1$ 。符合相对差异函数定义 1.1。  $D_{\Delta}(u)$  确定以后,根据式(5.5)可求解相对隶属度  $\mu_{\Delta}(u)$ 。

### 5.2.2 可变模糊模型

设在水资源优化配置中有  $q$  个方案组成论域  $U$ , 其中有  $n$  个非劣方案满足约束集形成决策集  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ , 每个方案有  $m$  个目标组成对决策集  $D$  的评价目标集  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 。

对系统每个决策方案均可求得其  $m$  个目标值, 得到目标特征值矩阵

$$X_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij}) \quad (5.18)$$

上式矩阵中,  $x_{ij}$  为方案  $j$  的第  $i$  个目标值,  $i=1, \dots, m; j=1, \dots, n$ 。

文献<sup>[36]</sup>中导出的可变模糊优选(识别)模型为:

$$v_{\underline{A}}(u)_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{gj}}{d_{bj}}\right)^\alpha} \quad (5.19)$$

式中:  $v_{\underline{A}}(u)_j$ , 为方案集( $j=1, 2, \dots, n; n$  为方案数)综合相对优属度;  $\alpha$  为优化准则参数,  $\alpha=1$  为最小一乘方准则,  $\alpha=2$  为最小二乘方准则;  $d_{gj}$  为方案  $j$  的距优距离,

$$d_{gj} = \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_i (1 - \mu_{\underline{A}}(u)_{ij})]^p \right\}^{1/p} \quad (5.20)$$

$d_{bj}$  为方案  $j$  的距劣距离,

$$d_{bj} = \left\{ \sum_{i=1}^m (\omega_i \mu_{\underline{A}}(u)_{ij})^p \right\}^{1/p} \quad (5.21)$$

$\omega_i$  为指标  $i$  的权重,  $\mu_{\underline{A}}(u)_{ij}$  为方案  $j$  指标  $i$  的相对隶属度;  $p$  为距离参数,  $p=1$  为海明距离,  $p=2$  为欧氏距离。

模型(5.19)中,  $\alpha, p$  可搭配为以下 4 种模型:

1)  $\alpha=1, P=1$ 。式(4.19)变为:

$$v_{\underline{A}}(u)_j = \sum_{i=1}^m \omega_i \mu_{\underline{A}}(u)_{ij} \quad (5.22)$$

式(5.22)相当于模糊综合评判模型, 是一个线性模型, 它是可变模糊优选模型的一个特例。

2)  $\alpha=1, P=2$ 。式(4.19)变为:

$$v_{\underline{A}}(u)_j = \frac{d_{bj}}{d_{bj} + d_{gj}} \quad (5.23)$$

在式(5.20)和式(5.21)中, 取  $p=2$ , 即取欧氏距离, 此时式(5.23)相当于理想点模型, 它是可变模糊优选模型的又一个特例。

3)  $\alpha=2, P=1$ 。式(5.19)、式(5.21)变为:

$$v_{\underline{A}}(u)_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-d_{bj}}{d_{bj}}\right)^2} \quad (5.24)$$

$$d_{bj} = \sum_{i=1}^m \varpi_i \mu_{\underline{A}}(u)_{ij} \quad (5.25)$$

式(5.24)为 sigmoid 型函数, 可用以描述神经网络系统中神经元的激励函数<sup>[37]</sup>。

4)  $\alpha=2, P=2$ 。式(4.19)、式(4.20)、式(4.21)变为:

$$v_{\underline{A}}(u)_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{gj}}{d_{bj}}\right)^2} \quad (5.26)$$

$$d_{gj} = \sqrt{\sum_{i=1}^m [\varpi_i (1 - \mu_{\underline{A}}(u)_{ij})]^2} \quad (5.27)$$

$$d_{bj} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\varpi_i \mu_{\underline{A}}(u)_{ij})^2} \quad (5.28)$$

此时可变模糊优选模型变为模糊优选模型。

应用模型 1—模型 4, 即式(5.22)—式(5.24)及式(5.26), 分别计算方案集对 1 级(即优级)的综合相对隶属度矩阵  $v_{\underline{A}}(u)_j$ , 简称方案相对优属度矩阵:

$$V_{\underline{A}}(u) = \begin{bmatrix} v_{\underline{A}}(u)_{11} & v_{\underline{A}}(u)_{12} & v_{\underline{A}}(u)_{13} & v_{\underline{A}}(u)_{14} \\ v_{\underline{A}}(u)_{21} & v_{\underline{A}}(u)_{22} & v_{\underline{A}}(u)_{23} & v_{\underline{A}}(u)_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{\underline{A}}(u)_{n1} & v_{\underline{A}}(u)_{n2} & \dots & v_{\underline{A}}(u)_{n4} \end{bmatrix} = v_{\underline{A}}(u)_{jq} \quad (5.29)$$

式中  $q=1, 2, 3, 4$ , 代表模型 1—模型 4。

根据对立模糊集定义, 可得到方案集对 2 级(即劣级)的综合相对隶属度  $v_{\underline{A}^c}(u)_j = 1 - v_{\underline{A}}(u)_j$ 。应用级别特征值公式<sup>[8]</sup>:

$$H_{jq} = 1 \times v_{\underline{A}}(u)_j + 2 \times v_{\underline{A}^c}(u)_j \quad (5.30)$$

式中: 1 表示优级; 2 表示劣级。

求方案集的级别特征值矩阵:

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{n1} & H_{n2} & \dots & H_{n4} \end{bmatrix} = H_{jq} \quad (5.31)$$

式中:  $j=1, 2, \dots, n; q=1, 2, 3, 4$ 。

根据矩阵(5.31)分析可变模型 1—模型 4 关于方案级别特征值排序为 1(即级别特征值最小)方案的稳定性。根据排序为 1 的方案确定优选方案。

### 5.2.3 白石水库调度方案决策

白石水库位于辽宁省北票市上园镇境内大凌河干流上, 水库的主要任务是防洪、灌溉、城市供水, 兼顾发电、养鱼等。在方案决策过程中以起调水位和城市计划供水量作为决策变量, 为方便计算主要考虑五个目标: 城市年平均供水量、苇田灌水量、水田年灌水量、城市供水缺水量和年平均弃水量。

在此, 用上述优化模型解决水库调度决策存在的问题, 获得最优方案。

由表 得到白石水库兴利调度的方案集 X。

$$X = \begin{bmatrix} 2.8626 & 2.8617 & 2.8644 & 2.8653 & 1.9559 & 1.9601 & 1.9632 & 1.9644 \\ 0.9735 & 0.9735 & 0.9735 & 0.9735 & 1.016 & 1.016 & 1.016 & 1.016 \\ 1.701 & 1.7053 & 1.7053 & 1.7053 & 1.7562 & 1.7604 & 1.7604 & 1.7604 \\ 0.1374 & 0.1383 & 0.1356 & 0.1347 & 0.0641 & 0.0599 & 0.0568 & 0.0556 \\ 5.7438 & 5.7441 & 5.7445 & 5.7449 & 6.5323 & 6.5288 & 6.5294 & 6.5296 \end{bmatrix}$$

上式矩阵中,  $x_{ij}$  为方案 j 的第 i 个目标值, 评价之前需对各目标值进行归一化。

对越大越优的目标, 其相对优属度公式为



$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \bigwedge_j x_{ij}}{\bigvee_j x_{ij} + \bigwedge_j x_{ij}} \quad (5.32)$$

或

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\bigvee_j x_{ij} + \bigwedge_j x_{ij}} \quad (5.33)$$

对越小越优的目标，其相对优属度公式为

$$r_{ij} = \frac{\bigvee_j x_{ij} - x_{ij}}{\bigvee_j x_{ij} + \bigwedge_j x_{ij}} \quad (5.34)$$

或

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\bigvee_j x_{ij} + \bigwedge_j x_{ij}} \quad (5.35)$$

根据目标特征值的不同情况，可以选用合适的计算公式，计算得到方案优属度矩阵 R。

$$R = \begin{bmatrix} 0.9970 & 0.9960 & 0.9990 & 1 & 0 & 0.0046 & 0.0080 & 0.0093 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.0724 & 0.0724 & 0.0724 & 0.9293 & 1 & 1 & 1 \\ 0.0109 & 0 & 0.0326 & 0.0435 & 0.8972 & 0.9480 & 0.9855 & 1 \\ 1 & 0.9996 & 0.9991 & 0.9986 & 0 & 0.0044 & 0.0037 & 0.0034 \end{bmatrix}$$

根据专家给出的权重  $w=(0.32,0.28,0.15,0.17,0.08)$ 。令  $\mu_A(u)_{ij} = r_{ij}$ ，应用可变模糊优选模型(5.19)和综合相对优属度公式(5.29)，求出在模型 1—模型 4 的四种情况下，方案集的综合相对优属度 V。

$$V = \begin{bmatrix} 0.4009 & 0.3093 & 0.4779 & 0.4558 \\ 0.4096 & 0.3249 & 0.4802 & 0.4605 \\ 0.4160 & 0.3367 & 0.4828 & 0.4656 \\ 0.4181 & 0.3406 & 0.4836 & 0.4673 \\ 0.5719 & 0.6409 & 0.5129 & 0.5258 \\ 0.5930 & 0.6798 & 0.5203 & 0.5405 \\ 0.6004 & 0.6930 & 0.5232 & 0.5463 \\ 0.6033 & 0.6981 & 0.5243 & 0.5485 \end{bmatrix}$$

根据公式(4.30)计算得到反感级别特征值矩阵 H。

$$H = \begin{bmatrix} 1.5991 & 1.6907 & 1.5221 & 1.5442 \\ 1.5904 & 1.6751 & 1.5198 & 1.5395 \\ 1.5840 & 1.6633 & 1.5172 & 1.5344 \\ 1.5819 & 1.6594 & 1.5164 & 1.5327 \\ 1.4281 & 1.3591 & 1.4871 & 1.4742 \\ 1.4070 & 1.3202 & 1.4797 & 1.4595 \\ 1.3996 & 1.3070 & 1.4768 & 1.4537 \\ 1.3967 & 1.3019 & 1.4760 & 1.4515 \end{bmatrix}$$

由矩阵 H 可见，不同模型的最小级别特征值虽然相差不大，但相当稳定，均为方案八。

### 5.3 基于协商对策的多目标优化决策模型

#### 5.3.1 水库兴利调度多人多目标决策分析

在水库兴利调度中，不仅要考虑环境、供水、防洪等各项指标，而且在现有水利工程管理机制下，水库调度计划的决策由多个部门共同协商决定，如环境部门、供水公司、防洪办等。这些部门之间常常存在着利益冲突，因此，决策时必须兼顾这些部门的利益和愿望。对于一个多目标群决策的问题，其决策模式与决策过程存在着两类需要解决的矛盾冲突，即同一决策者不同目标之间的冲突和不同决策者由于偏好差异导致的冲突，冲突解决的关键是确定决策者关于目标的权重和协调决策者的满意程度。目前，成熟、实用的多目标群决策方法还尚未形成，主要采用的是在多目标算法中引入群决策机制 [38-44]。

兴利调度的决策者按其实际利益和愿望不同分成两类：一类以公益目标为主，希望通过水位、生态供水等的控制提高社会公益目标；另一类以盈利为主，通过增大城市

和发电供水而获得更多经济利益。这两类决策者构成了冲突的双方，具体的冲突主要体现在对汛期水位的要求不同和对各项供水指标间的偏好不同。要解决这些冲突，实际决策中还需要权威部门（或权威部门指定的个人或群体）进行仲裁，组成仲裁谈判的第三方—仲裁人。上述三方决定了水库兴利调度决策机制是：A、B 为冲突双方，仲裁人（C）负责协调并决定满意方案。

在解决此类冲突问题时，双方不仅关心各自的利益，还都对对方所关心的问题给予一定的关注；更重要的是，双方均希望通过有限的妥协，经仲裁人 C 协调达成协议。此外，A、B、C 给出的权重应该具有较高的可信度，能够客观的反应决策人对指标的偏好，这对最终结果有着至关重要的影响。

### 5.3.2 多目标群决策模型分析

决策中双方有需要共同考虑的多个目标，首先由 A、B 双方向 C 提供他们各自认为满意的若干方案，同时给出各自对不同目标的偏好程度（权重），由仲裁方 C 根据公正和公平性原则，并结合他自己的偏好和判断进行最终决策。裁决结果应该是在满足公平性原则前提下兼顾了双方及整体利益。

上述水库兴利调度决策问题是一个由 A、B、C 三方构成的一个确定的仲裁局势，记之为  $M=(A,B;x_1,x_2, \dots,x_m;C)$ ，其中， $x_1,x_2, \dots,x_m (m>2)$  为双方都关心的目标。

假定仲裁人 C 要求 A、B 各方均提供  $n$  个备选方案，每个方案均有  $m$  个目标，A、B 提供的方案集分别用  $A_n$ 、 $B_n$  表示，分别为  $A_n = (a_{ij})_{n \times m}$  和  $B_n = (b_{ij})_{n \times m}$ 。式中  $a_{ij}$ 、 $b_{ij}$  分别为 A、B 提交仲裁人 C 的第  $i$  个方案的第  $j$  个目标值，其中  $i=1,2,\dots,m$ ； $j=1,2,\dots,n$ 。

第一阶段决策规划：效用均衡规划

$$\begin{aligned} & \max SF_A(X) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} SF_A(X) = SF_B(X) \\ X \in S \end{cases} \end{aligned} \quad (5.36)$$

第二阶段决策规划：边际效用规划

$$\begin{aligned} & \max SF_A(X) + SF_B(X) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} SF_A(X) \geq SF_B(X_0) \\ SF_B(X) \geq SF_A(X_0) \\ X \in S \end{cases} \end{aligned} \quad (5.37)$$

式(5.36)和(5.37)中  $SF_A 0$ 、 $SF_B 0$  分别是关于  $x_1, x_2, \dots, x_m$  的综合满意函数；设  $X=(x_1, x_2, \dots, x_m)^T$  为解向量； $X_0$  为第一阶段的仲裁解； $S$  为约束条件集。利用两阶段满意规划法进行仲裁，关键是满意函数的构造。

由于多目标的相互矛盾性，我们认定 A、B 在进行各方案的权衡后，其提交  $n$  个方案，反映了他们对各目标的最低和最高要求，因此仲裁人 C 依据式(5.36)和(5.37)提供的信息，可以构造满意函数。

对于效益型目标，A、B 的满意函数分别是

$$SF_A(x_j) = \frac{x_j - \bigwedge_{i=1}^n a_{ij}}{\bigvee_{i=1}^n a_{ij} - \bigwedge_{i=1}^n a_{ij}} \quad (5.38)$$

$$SF_B(x_j) = \frac{x_j - \bigwedge_{i=1}^n b_{ij}}{\bigvee_{i=1}^n b_{ij} - \bigwedge_{i=1}^n b_{ij}} \quad (5.39)$$

对于成本型目标，A、B 的满意函数分别是

$$SF_B(x_j) = \frac{\bigvee_{i=1}^n b_{ij} - x_j}{\bigvee_{i=1}^n b_{ij} - \bigwedge_{i=1}^n b_{ij}} \quad (5.41)$$

设 A、B 和仲裁人 C 给予各目标的权重向量分别为

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)^T \quad (5.42)$$

$$\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)^T \quad (5.43)$$

和

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T \quad (54.44)$$

则关于 A、B 的综合满意函数分别为

$$SF_A(X) = \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot SF_A(x_j) \quad (5.45)$$

$$SF_B(X) = \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot SF_B(x_j) \quad (5.46)$$

将式(5.45)和(5.46)代入式(5.36)和(5.37)中, 即可得出仲裁解。  $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*)^T$ 。  
仲裁解  $X^*$  为仲裁人 C 依据 A、B 双方提供的信息得出的一种双方都可以接受的理想状态。由于在水库兴利调度中各目标间纯在着矛盾且相互制约, 实际上难以甚至不可能得到一个最优解, 而仲裁解是经过两阶段规划得到的能够为 A、B 双方所接受的理想状态。因此, 本文将仲裁解  $X^*$  作为理想方案的目标状态, 以模式识别方法在 A、B 提供的方案中选择一个最为接近仲裁解的方案为最终的满意方案。

当用模式识别方法时, 需要对 A、B 方案集中各目标值和仲裁解  $X^*$  进行归一化处理。

$$\text{记 } a_{j\max} = \max\left(\bigvee_{i=1}^n a_{ij}, x_j^*\right), \quad a_{j\min} = \min\left(\bigwedge_{i=1}^n a_{ij}, x_j^*\right)$$

$$\text{和 } b_{j\max} = \max\left(\bigvee_{i=1}^n b_{ij}, x_j^*\right), \quad b_{j\min} = \min\left(\bigwedge_{i=1}^n b_{ij}, x_j^*\right)$$

则对于效益型指标, 归一化公式为

$$\overline{a_{ij}} = \frac{a_{ij} - a_{j\min}}{a_{j\max} - a_{j\min}} \quad \text{和} \quad \overline{x_j^*} = \frac{x_j^* - a_{j\min}}{a_{j\max} - a_{j\min}} \quad (5.47)$$

$$\overline{b_{ij}} = \frac{b_{ij} - b_{j\min}}{b_{j\max} - b_{j\min}} \quad \text{和} \quad \overline{x_j^*} = \frac{x_j^* - b_{j\min}}{b_{j\max} - b_{j\min}} \quad (5.48)$$

对于成本型指标, 归一化公式为

$$\overline{a_{ij}} = \frac{a_{j\max} - a_{ij}}{a_{j\max} - a_{j\min}} \quad \text{和} \quad \overline{x_j^*} = \frac{a_{j\max} - x_j^*}{a_{j\max} - a_{j\min}} \quad (5.49)$$

$$\overline{b_{ij}} = \frac{b_{j\max} - b_{ij}}{b_{j\max} - b_{j\min}} \quad \text{和} \quad \overline{x_j^*} = \frac{b_{j\max} - x_j^*}{b_{j\max} - b_{j\min}} \quad (5.50)$$

用式(5.47)、(5.48)和式(5.49)、(5.50)分别对  $a_{ij}$ 、 $x_j^*$  和  $b_{ij}$ 、 $x_j^*$  归一化, A、B 各方

案对仲裁解  $X^*$  的贴近度分别是

$$r_{ai} = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^m [w_j(\bar{a}_{ij} - \bar{x}_j^*)^2] / m} \quad (5.51)$$

$$r_{bi} = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^m [w_j(\bar{b}_{ij} - \bar{x}_j^*)^2] / m} \quad (5.52)$$

仲裁结果以  $Max\{r_{a1}, r_{a2}, \dots, r_{am}, r_{b1}, r_{b2}, \dots, r_{bn}\}$  求出。

因此, 求解水库兴利调度多目标群决策问题的步骤可归纳为:

- (1) 由冲突双方 A、B 根据管理模型 (或模拟模型) 运行得到的优化结果给出反映自己偏好的目标特征值矩阵, 以及相应的权重向量和目标趋向。
- (2) 仲裁人根据式(5.38)、(5.39)、(5.40)、(5.41)和目标权重构造综合满意函数。
- (3) 解式(5.36)和(5.37)的规划问题, 最终得出仲裁解  $X^*$ 。
- (4) 由式(5.47)、(5.48)和(5.49)、(5.50)对 A、B 方案集所构成的矩阵和仲裁解  $X^*$  进行归一化, 用式(5.51)和(5.52)求 A、B 各方案对仲裁解的贴近度, 以贴近度最大的方案为最终的满意决策。

### 5.3.3 白石水库调度决策

白石水库在实际调度中, 各指标间存在用水冲突, 且决策人对各指标的偏好也有冲突。在此, 用上述优化模型解决水库调度决策存在的问题, 获得最优方案。决策人就城市计划供水量分别提出供水 3 亿  $m^3$  和供水 2.02 亿  $m^3$  两项计划。在方案决策过程中以起调水位和城市计划供水量作为决策变量, 为方便计算主要考虑五个目标: 城市年平均供水量、苇田灌水量、水田年灌水量、城市供水缺水量和年平均弃水量。对双方而言, 前三项越大越优, 后两项越小越优, 只是各目标偏好不同。A、B 均提交四个备选方案给 C, 如表 4.1、表 4.2 所示, 请 C 仲裁。

A、B、C 给出的目标权重分别为:

A 为  $\alpha = (0.25, 0.35, 0.18, 0.15, 0.07)$

B 为  $\beta = (0.4, 0.18, 0.16, 0.16, 0.1)$

C 为  $\omega = (0.32, 0.28, 0.15, 0.17, 0.08)$

表 5.1 A 提供的方案集

Table 5.1 schemes provided by decision maker A

方案	起调水位 (m)	城市计划 供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	城市年均 供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	苇田灌水 量 (亿 m <sup>3</sup> )	水田年灌 水量 (亿 m <sup>3</sup> )	城市缺水 量 (亿 m <sup>3</sup> )	年均弃水 量 (亿 m <sup>3</sup> )
一	127.0	3	2.8626	0.9735	1.701	0.1374	5.7438
二	127.2	3	2.8617	0.9735	1.7053	0.1383	5.7441
三	127.0	2.02	1.9559	1.016	1.7562	0.0641	6.5323
四	127.2	2.02	1.9601	1.016	1.7604	0.0599	6.5288

表 5.2 B 提供的方案集

Table 5.2 schemes provided by decision maker B

方案	起调水位 (m)	城市计划 供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	城市年均 供水量 (亿 m <sup>3</sup> )	苇田灌水 量 (亿 m <sup>3</sup> )	水田年灌 水量 (亿 m <sup>3</sup> )	城市缺水 量 (亿 m <sup>3</sup> )	年均弃水 量 (亿 m <sup>3</sup> )
一	127.4	3	2.8644	0.9735	1.7053	0.1356	5.7445
二	127.5	3	2.8653	0.9735	1.7053	0.1347	5.7449
三	127.4	2.02	1.9632	1.016	1.7604	0.0568	6.5294
四	127.5	2.02	1.9644	1.016	1.7604	0.0556	6.5296

A 的综合满意函数为

$$SF_A(X) = 0.2757 x_1 + 8.2353 x_2 + 3.0303 x_3 - 1.9133 x_4 - 0.0888 x_5 - 12.8664$$

B 的综合满意函数为

$$SF_B(X) = 0.4434 x_1 + 4.2353 x_2 + 2.9038 x_3 - 2x_4 - 0.1274 x_5 - 8.8425$$

解  $SF_A(X) = SF_B(X)$  得

$$-0.1677 x_1 + 4x_2 + 0.1265 x_3 + 0.0867 x_4 + 0.0386 x_5 = 4.0238$$

形成第一阶段规划为

$$\begin{aligned} \max \quad & 0.2757 x_1 + 8.2353 x_2 + 3.0303 x_3 - 1.9133 x_4 - 0.0888 x_5 - 12.8664 \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} -0.1677 x_1 + 4x_2 + 0.1265 x_3 + 0.0867 x_4 + 0.0386 x_5 = 4.0238 \\ 1.9559 \leq x_1 \leq 2.8653 \\ 0.9735 \leq x_2 \leq 1.016 \\ 1.701 \leq x_3 \leq 1.7604 \\ 0.0556 \leq x_4 \leq 0.1383 \\ 5.7438 \leq x_5 \leq 6.5323 \end{cases} \end{aligned}$$

得第一阶段最优解

$$X_0 = (2.8653, 1.0138, 1.7604, 0.0556, 5.7438)$$

解得目标函数值:  $SF_A(X_0) = 0.9904$

$$SF_B(X_0) = 0.9904$$

第二阶段规划  $SF_A(X) + SF_B(X)$

$$\begin{aligned} \max \quad & 0.7191 x_1 + 12.4706 x_2 + 5.9341 x_3 - 3.9133 x_4 - 0.2161 x_5 - 21.7089 \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} 0.2757 x_1 + 8.2353 x_2 + 3.0303 x_3 - 1.9133 x_4 - 0.0888 x_5 \geq 13.8568 \\ 0.4434 x_1 + 4.2353 x_2 + 2.9038 x_3 - 2x_4 - 0.1274 x_5 - 8.8425 \geq 9.833 \\ 1.9559 \leq x_1 \leq 2.8653 \\ 0.9735 \leq x_2 \leq 1.016 \\ 1.701 \leq x_3 \leq 1.7604 \\ 0.0556 \leq x_4 \leq 0.1383 \\ 5.7438 \leq x_5 \leq 6.2353 \end{cases} \end{aligned}$$

解得第二阶段最优解

$$X^* = (2.8653, 1.016, 1.7604, 0.0556, 5.7438)$$

得  $SF_A(X^*) = 1.009$

$$SF_B(X^*) = 1.0001$$

较之第一阶段, 均略有改善。

然后对 A、B 提出的方案矩阵和  $X^*$  归一化, 由式(5.47)、(5.48)、(5.49) 和(5.50)计



算 A、B 和相应的  $X^*$  归一化值如表 4.3、表 4.4 所示。

由式(5.51)和(5.52)分别计算 A 和 B 各方案的贴近度。

表 5.3 A 与相应的  $X^*$  归一化结果

Table 5.3 standerized A and relevant  $X^*$

	城市供水量	苇田灌溉量	农田灌溉量	缺水量	弃水量
方案一	0.9970	0.0000	0.0000	0.0109	1.0000
方案二	0.9960	0.0000	0.0724	0.0000	0.9996
方案三	0.0000	1.0000	0.9293	0.8972	0.0000
方案四	0.0046	1.0000	1.0000	0.9480	0.0044
$X^*$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

表 5.4 B 与相应的  $X^*$  归一化结果

Table 5.4 standerized B and relevant  $X^*$

	城市供水量	苇田灌溉量	农田灌溉量	缺水量	弃水量
方案一	0.9990	0.0000	0.0000	0.0000	0.9991
方案二	1.0000	0.0000	0.0000	0.0113	0.9986
方案三	0.0000	1.0000	1.0000	0.9850	0.0003
方案四	0.0013	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000
$X^*$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

$$T_a = (0.6547, 0.6597, 0.7163, 0.7183)$$

$$T_b = (0.6536, 0.6547, 0.7172, 0.7175)$$

根据贴近度最大原则，仲裁人选择 A 方提出的方案四为最优方案。

#### 5.4 优化决策结果的综合分析

文章根据可变模糊优选模型和基于协商的多人多目标决策模型对白石水库的调度

方案进行评价优选。在决策过程中虽然考虑的评价指标相同，最终的目标权重也相同，但是多人多目标决策模型中考虑了决策者之间的权重冲突，所以在接过上略有差异。根据可变模糊优选模型计算的结果显示，通过变换参数( $\alpha$ 与 $p$ )变化模型(本文为4个模型，包括1个线性，3个非线性)进行评价，对多个评价结果进行比较分析，不同模型的最小级别特征值虽然相差不大，但相当稳定，均为方案八。即：起调水位为127.5 m，城市计划供水量为2.02亿 $m^3$ ，城市供水量为1.964亿 $m^3$ ，苇田供水量为1.016亿 $m^3$ ，农田供水量为1.7604亿 $m^3$ ，城市缺水量为0.0556亿 $m^3$ ，年弃水量为6.5296亿 $m^3$ 。说明可变模糊评价模型与方法能够科学、合理地确定样本指标对各级指标标准区间的相对隶属度、相对隶属函数，并且能够通过变化模型及其参数，最终合理地确定出样本的评价等级。将可变模糊评价方法应用到水库兴利调度方案综合评价中，所得结果可信度高。而应用多人多目标决策模型进行决策的过程中，决策人在对各项评价指标的偏好上存在冲突，主要表现在城市供水量和苇田供水量两项指标上。由此模型计算选出的是A方提出的方案四。即：起调水位为127.2 m，城市计划供水量为2.02亿 $m^3$ ，城市供水量为1.9601亿 $m^3$ ，苇田供水量1.016亿 $m^3$ ，农田供水量为1.7604亿 $m^3$ ，城市缺水量0.0599亿 $m^3$ ，年弃水量为6.5288亿 $m^3$ 。算例表明，本文提出的决策方法概念清晰、计算简便，具有较强的可操作性。作为一种解决有冲突的多目标群决策方法，该方法同样可以应用于解决其它领域的决策问题。

## 6. 总结与展望

### 6.1 总结

我国江河湖泊较多,水资源总量较丰富,但人均占有量少,具有时空分布不均这一主要特点。为了解决这一问题,人们按照需要通过水库的蓄水、泄水作用,控制径流和重新分配径流。根据国民经济各有关部门的用水要求,利用水库重新分配天然径流,这一过程称为兴利调节计算。

水库兴利调节分为:径流输入模型、调节约束条件、计算方法和计算输出,四个部分。本文重点研究了兴利调节的计算方法。通过对兴利调节计算原理的研究,进而对兴利调节计算方法进行了分析,主要内容有:传统的兴利调节计算方法、兴利调节计算的数值解法、防洪兴利调节计算方法、兴利调节计算的优化方法。

本文系统地对白石水库的兴利调度方案决策问题进行了深入的研究,总结前人的研究成果,对优化决策的必要性进行了分析,之后建立了多目标可变模糊优选模型,应用该模型对白石水库兴利调节方案进行优选。结果显示,通过变换参数( $\alpha$ 与 $p$ )变化模型(本文为4个模型,包括1个线性,3个非线性)进行评价,对多个评价结果进行比较分析,不同模型的最小级别特征值虽然相差不大,但相当稳定,均为方案八。

随后又建立了一个基于协商的多人多目标优选模型,用于解决决策人之间对评价指标的冲突,并用此模型对白石水库的调度方案进行优选。计算结果为A方提出的方案四,即最初给定方案集的方案六。

两种模型决策结果存在差异是因为可变模糊模型是按照统一的指标偏好进行决策,以城市供水的权重最大,而在实际决策中,有一部分认为茅田供水比城市供水更为重要,所以在多人多目标决策模型中,削减了城市供水的重要性,所以在最终的优选调度方案中,城市供水量比可变模糊模型的结果偏小。

### 6.2 展望

水库兴利调节所涉及到的问题一般属于复杂的多目标问题,本文仅仅是对其中某些关键环节进行研究,其中必然有一些不合理之处,有待于今后在以下方面研究或完善:

(1) 在水库优化调度过程中,调节计算是一个重要环节,在计算过程中,计算方法的改进对水库调度至关重要。在计算过程中考虑的因素越多计算结果越接近于实际值,然而计算任务也越繁重,影响了计算的效率,在这一方面还有待于进一步的研究。

(2) 目前,成熟、实用的多目标群决策方法还尚未形成,主要采用的是在多目标算法中引入群决策机制。多人多目标决策问题类型很多,处理方法也有很多,如何建立一个公平的、有效的多目标群决策模型是问题的关键,随着数学规划理论和计算机技术的

发展，一定会找到能切实反映各决策人意愿的公平合理的决策模型。

(3) 水文要素预报不可避免的存在误差，利用预报结果进行兴利调度必定存在风险，无论考虑年预报的水库调度图还是考虑中短期预报的水库调度图，本文都没有研究预报误差的问题，今后研究还应对由预报不准确而产生的风险及调度出现失误时可行的补救措施作研究。随着科技的进步，短期预报的准确性不断提高，短期的优化调度对水库的实际运行更具有指导意义，如何进行这方面的研究工作也是值得考虑的。

## 参 考 文 献

- [1] 叶新霞. 区域水资源合理配置及跨流域调水水资源系统问题研究[D]. 南京:河海大学, 2005.
- [2] 雷川华, 吴运卿. 我国水资源现状、问题与对策研究[J]. 节水灌溉, 2007(4):41~43.
- [3] 苏征耀. 我国水资源形势及其应对策略[J]. 水资源研究, 2007, 28(1):11~13.
- [4] 辽宁省水利水电勘测设计研究院. 大伙房水库输水工程初步设计报告[R]. 沈阳: 2002.
- [5] 刘涵. 水库优化调度新方法研究[D]. 西安: 西安理工大学. 2006.
- [6] 姚荣, 唐德善. 应用模糊模式识别交叉迭代模型优选水库兴利调度决策方案[J]. 水利水运工程学报, 2003(3):55~58.
- [7] 陈守煜, 黄宪成, 李登峰. 大连市水资源利用与宏观经济协调发展规划多目标群决策模型与方法[J]. 水利学报, 2003(3):42~48.
- [8] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连:大连理工大学出版社, 1994.
- [9] 吕涑琦. 浑河流域防洪调度决策研究及系统设计[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- [10] 大连工学院水利系水工教研室, 大伙房水库工程管理局. 水库控制运用. 水利出版社, 1972:35~37.
- [11] 徐瑞华. 水库兴利调节输入模型及计算方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007.
- [12] 谷长叶等. 自优化模拟技术在水库兴利调度中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2004, 8(5):32~36.
- [13] 雷声隆等. 自优化模拟及其在南水北调东线工程中的应用[J]. 水利学报, 1988, 2(5):24~28.
- [14] 王本德. 水库模糊优化调度[M]. 大连:大连理工大学出版社, 1990.
- [15] 波达波夫, 常锡厚译. 径流调节[M]. 北京:高等教育出版社, 1956.
- [16] 陈守煜. 水库调洪计算的数值解法及其程序[J]. 水利学报, 1980(2):44~49.
- [17] 许海军, 陈守煜, 郭纯一. 基于实测资料的水库动库容调洪数值解法[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(6):837~840.
- [18] 许海军, 陈守煜. 水库动库容调洪计算的数值-解析解法[J]. 水利学报, 2002(3):69~73.
- [19] 张子贤. 综合利用水库兴利调节计算中若干问题[J]. 海河水利, 1995(12):13~17.
- [20] 马小兵. 洪水兴利连续调节方法与汛限水位的模糊优选研究[D]. 大连:大连理工大学, 2004.
- [21] 张晓刚. 水库汛限水位动态控制效益分析[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
- [22] 谷长叶等. 自优化模拟技术在水库兴利调度中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2004(5):28~30.
- [23] William W-G. Yeh, Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review[J]. Water Resources Research, 2004, 21(12):1797~1818.
- [24] 石琦. 水电站群长期发电优化调度及数据库设计[D]. 武汉:华中科技大学, 2002.
- [25] 路志宏. 三峡梯级水库优化调度模型及应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2003.

- [26] 吴爱华. 梯级水电站长期优化调度的研究与运用[D]. 武汉:华中科技大学, 2003.
- [27] 刘子龙. 水库确定性优化调度动态规划法模型及应用[J]. 人民长江, 1999, 30(10):46~48.
- [28] 钟登华, 熊开智, 成立芹. 遗传算法的改进及其在水库优化调度中的应用研究[J]. 中国工程科学. 2003. 5(9):22~26.
- [29] 刘攀, 郭生练, 李玮, 易松松. 遗传算法在水库调度中的应用综述[J]. 水利水电科技进步. 2006. 26(4):78~83.
- [30] 陈洋波, 曾碧球. 水库供水发电多目标优化调度模型及应用研究[J]. 人民长江, 2004, 35(4):11~14.
- [31] 万俊. 大系统分解协调技术及 DDDP 算法在水库群优化补偿调节中的联合应用[J]. 水利水电技术, 1994(5):2~5.
- [32] 孙英广. 神经网络在径流预测模型研究中的应用及软件实现[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
- [33] 王文圣, 丁晶. 人工神经网络非线性时序模型在水文预报中的应用[J]. 四川水力发电, 2000(8):8~10.
- [34] 陈守煜, 王子茹. 可变模糊优选理论及在水电站联合调度方案优选中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测. 2006. 30(6):16~20.
- [35] 陈守煜, 胡吉敏. 可变模糊工程综合评定方法及其应用[J]. 系统工程与电子技术. 2008, 30(8):1474~1477.
- [36] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005.
- [37] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.
- [38] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003
- [49] 孟波, 付微. 一种有限方案多目标群决策方法[J]. 系统工程, 1998. 16(4):57~61.
- [40] 孙巍巍. 多指标群决策及其方法研究[J]. 华北矿业高等专科学校学报, 2001, 3(4):33~36.
- [41] 祝世京, 温鹏, 陈珽. 多人多目标决策的均衡协调解[J]. 系统工程学报, 1993, 8(1):9~15 .
- [42] Julie Hodgkin, Valerie Belton, Anastasia Koulouri. Supporting the intelligent MCDA user: A case study in multi-person multi-criteria decision support[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 160:172~189.
- [43] 夏英, 周树民, 易程. 模糊多属性群决策的相对优属度法[J]. 统计与决策(理论版), 2007(12):145~147.
- [44] 程春田, 陈守煜, 王本德. 一类具有冲突的有限方案多人多目标决策模型及其应用[J]. 控制与决策, 1995, 10(4):369~372.

## 致 谢

本论文是在导师王国利副教授的悉心指导之下完成的。几年来，导师渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德、平易近人的人格魅力对我影响深远。本论文从选题到完成，几易其稿，每一步都是在导师的指导下完成的，倾注了导师大量的心血，在此我向我的导师王国利副教授表示深切的谢意与祝福！

本论文的完成也离不开白石水库管理局领导和技术人员的关心与帮助，感谢他们在我论文编写过程中给我的建议和帮助。