

分类号 \_\_\_\_\_ 密 级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_ 编 号 \_\_\_\_\_

# 西安理工大学

# 学位论文

南水北调东线

水量调度仿真系统研究与开发

(题目和副题)

赵 勇

(作者姓名)

指导教师姓名、学衔、职称 解建仓 教 授

杨方庭 高 工

马 斌 教 授

申 请 学 位 硕 士 学 科 名 称 水文学及水资源

提交论文日期 2002.1 论文答辩日期 2002.2

授予学位单位和学位授予日期 西安理工大学

答辩委员会主席 \_\_\_\_\_

评 阅 人 \_\_\_\_\_

## 摘 要

黄河、淮河和海河流域水资源紧张,已经成为制约该地区经济和社会发展的“瓶颈”,并且对生态环境产生了严重影响,为了解决水资源短缺的状况,南水北调工程动工实施的呼声越来越高。本文以南水北调东线工程为对象,从水量调配的角度分析了工程的可行性,建立南水北调东线水量调度仿真系统,为决策提供支持。

针对南水北调东线工程跨流域调水的复杂性,本论文采用系统分析的方法建立了南水北调东线工程水量调度模型;利用具有跨平台功能的面向对象的 JAVA 语言和基于客户服务器结构的 Sybase 数据库建立了南水北调东线水量调度仿真系统;该系统具有良好的功能,有利于系统的维护和推广。本论文探讨了将系统仿真和基于数理统计的仿真试验方法应用于调水工程的决策分析,并取得了很好的效果。本次研究结果表明南水北调东线工程调水量满足调水沿线的需水要求,黄河以南、黄河以北均有较高的保证率,调度过程合理。

**【关键词】:** 南水北调东线 调度模型 JAVA 语言 系统仿真 仿真试验

## Abstract

Water shortage in the Huang-Huai-Hai Basin has been the bottleneck factor for economic and social development in that area. It also causes severe eco-environmental impacts in that area. The clamor for constructing the south-to-north water transfer project to help mitigate water scarcity and its impacts has been growing louder. In this paper we analyze the feasibility of the east route of the south-to-north water transfer project from the viewpoint of water regulation in order to provide information to the decision-making process.

Due to the complexity of the east route of the South-to-North Water Transfer Project, the systems analysis method has been adopted in this research project to develop a Water Transfer Model. A simulation system for water regulation was established by employing JAVA programming language and Sybase. The simulation system is applicable with the aid of the object-oriented programming method and the multi-platform function. In this paper we discuss the satisfying results obtained from applying the simulation system, and the simulation experiment method based on mathematical statistics, to the decision-making process for the water transfer project. The study shows that the amounts of transferred water meet the demands along the route and, under a sound regulation process, both the south and north parts of the Yellow River achieve a relatively high guaranteed rate of water supply.

**【Key words】:** East route of the South-to-North Water Transfer Project; Regulation model; JAVA; System simulation; Simulation experiment

# 目 录

摘要

Abstract

## 第一章 概 述

|                        |   |
|------------------------|---|
| § 1. 1 引言.....         | 1 |
| § 1. 2 问题的提出及意义.....   | 1 |
| § 1. 3 国内外跨流域调水实例..... | 3 |
| § 1. 4 国内外研究现状.....    | 4 |
| § 1. 5 本文研究内容.....     | 6 |
| § 1. 6 本章小结.....       | 7 |

## 第二章 东线工程概况和工程规划

|                    |    |
|--------------------|----|
| § 2. 1 东线工程概况..... | 8  |
| § 2. 2 东线工程规划..... | 12 |
| § 2. 3 水源条件.....   | 14 |
| § 2. 4 本章小结.....   | 15 |

## 第三章 系统仿真的基本理论

|                       |    |
|-----------------------|----|
| § 3. 1 引言.....        | 16 |
| § 3. 2 基本概念.....      | 16 |
| § 3. 3 系统仿真的类型.....   | 17 |
| § 3. 4 系统仿真的一般步骤..... | 18 |
| § 3. 5 离散事件系统仿真.....  | 19 |
| § 3. 6 仿真数据的分析.....   | 20 |
| § 3. 7 本章小结.....      | 22 |

## 第四章 南水北调东线水量调度模型的建立

|                              |    |
|------------------------------|----|
| § 4. 1 跨流域调水工程中研究的水资源问题..... | 23 |
| § 4. 2 南水北调东线调度原则.....       | 24 |
| § 4. 3 南水北调东线调度方法.....       | 25 |
| § 4. 4 本章小结.....             | 30 |

## 第五章 仿真系统开发

|                       |    |
|-----------------------|----|
| § 5. 1 主要软件介绍.....    | 31 |
| § 5. 2 仿真系统的总体设计..... | 33 |
| § 5. 3 访问数据库.....     | 38 |
| § 5. 4 调度软件的建立.....   | 40 |
| § 5. 5 本章小结.....      | 42 |

## 第六章 调度结果分析

|                     |    |
|---------------------|----|
| § 6. 1 引言.....      | 43 |
| § 6. 2 现状工程规模.....  | 43 |
| § 6. 3 应急工程规模.....  | 44 |
| § 6. 4 第一期工程规模..... | 46 |
| § 6. 5 本章小结.....    | 51 |

## 第七章 仿真试验分析

|                     |    |
|---------------------|----|
| § 7. 1 引言.....      | 53 |
| § 7. 2 恒定数拉偏试验..... | 53 |
| § 7. 3 随机数拉偏试验..... | 55 |
| § 7. 4 本章小结.....    | 60 |

## 第八章 结 论

|                        |    |
|------------------------|----|
| § 8. 1 本论文取得的主要成果..... | 61 |
| § 8. 2 进一步的工作.....     | 63 |

## 参考文献

## 致谢

## 附表

## 附图

# 第一章 概 述

## § 1. 1 引 言

水是生命的源泉,有水才有生命。

水是重要的自然资源,地球表面的 74%被水覆盖,但是世界上水的分布是极其不均匀的,海洋拥有最多的水量,其数量约占全球总水量的 96.5%;而直接可供人们利用的淡水,包括湖泊、沼泽、土壤和大气中的水量微乎其微,仅占全球淡水总量的 0.386%,还不到全球总水量的万分之一<sup>[1]</sup>。由此可见,地球上与我们生活和生产相关的淡水如此之少,是何等的珍贵。

水资源是人民生活和国民经济发展的重要物质资源,也是影响生态环境的关键因素,它的合理开发利用与国民经济各个部门和广大人民群众的生产生活有着极为密切的关系。随着国民经济的发展,各行各业对水的需求也越来越多,水资源的供求矛盾也日益尖锐。

我国虽然幅员辽阔,河流众多,水资源总量比较丰富,居世界第六位,但从人均占有量来看,仅居世界第八十八位<sup>[2]</sup>。由于受地形、气候的影响,我国水资源具有地区、时空分配严重不均衡的特点,造成某些地区严重缺水,如华北地区、西北地区、辽河流域水资源匮乏,水资源供需矛盾已经成为发展国民经济和提高人们生活水平的制约因素。统一规划水资源的开发利用,进行跨流域调水将是解决这一矛盾的重要措施。

跨流域调水是一个涉及范围广,关联部门多的复杂的大系统。它不仅具有国民经济、社会发展和环境改善等多种目标,同时需要兼顾城市生活及工业供水、航运、灌溉、防洪、发电等多方面要求<sup>[3]</sup>。企图用传统的方法进行这种类型的水资源系统的多方案分析是十分困难的。因此采用系统分析的方法和计算机技术相结合进行跨流域调水规划是发展的方向。建立跨流域调水的系统分析模型,编制计算软件,将会大大地提高流域规划工作的科学性和工作效率,可以帮助决策者更好地协调好各种关系、权衡各种规划方案的利弊,更加合理地选定规划方案,使其更好地促进国民经济、社会和环境的持续发展。

## § 1. 2 问题的提出及意义

我国黄河、淮河和海河流域水资源紧张,已经成为制约该地区经济和社会发展的“瓶颈”,其水资源总量仅占全国 7.7%,人均占有量 501m<sup>3</sup>,还不到全国平均

水平的 1/4，特别是海河流域人均水资源占有量仅为  $348 \text{ m}^3$ ，接近全国平均数的 1/6，明显低于国际上公认的极严重缺水警戒线（人均水资源量  $500 \text{ m}^3$ ）<sup>[1]</sup>。随着人口的增长，人均水资源量还将减少，严重影响黄淮海地区可持续发展。缺水对黄淮海流域社会经济发展和生态环境产生了严重影响，主要有以下几点：

### 1. 城镇生活用水难以保证

黄河以北和胶东地区城镇生活用水普遍不足，每遇到干旱年定时、定量供水和排队等水的现象十分严重。缺水城市水质也难以保证，德州、沧州、衡水、天津市的静海、大港区一带，由于河道干涸，城镇生活用水主要靠抽取井深为 300~500m 的深层地下水，不仅难以保证供给，而且水中的氟含量偏高，造成人畜饮水困难。

### 2. 缺水制约工业发展

遭遇干旱年，工矿企业供水没有保障，甚至被迫实行限产、停产，严重制约了工业的发展并造成巨大的经济损失。八十年代以来，天津、沧州等大中城市曾多次发生水荒，造成部分电厂、工厂停产，曾多次引黄救急<sup>[2]</sup>。

### 3. 缺水是农业低产的根本原因

北方黄淮海平原土地平坦，气候温和，光热资源丰富，十分有利于农作物生长，但由于缺水，产量低而不稳。例如：鲁北地区有黄河水补充，早在八十年代初已跨入华北农业先进行列，而沧州、衡水等缺水地区的亩产量目前仍然很低。

### 4. 生态环境的严重恶化

地下水严重超采。近二十年来，黄淮海流域地下水用水比例不断上升，地下水水源得不到有效的回补，地下水位持续下降，形成大面积地下水位下降漏斗区<sup>[3]</sup>。北京、天津、石家庄、西安、太原等城市连年过量开采地下水，已经形成了区域地下水降落漏斗，并且漏斗面积在不断增加，地下水超采还使地下水资源面临枯竭的危险<sup>[4]</sup>。

河道断流、湖淀干涸，入海水量大幅度减少。随着水资源利用程度的提高，许多河道基本断流，河淀干涸，历史上的许多渔苇之地已变成荒滩和耕地，大量湿地消失，生物多样性遭到破坏。地表水资源过度利用，造成部分地区河湖水面萎缩，河道泄洪能力下降，入海水量明显减少，河口淤积加剧<sup>[1]</sup>。

水质污染严重，污水大量被引用。随着经济的发展，人口的不断增加，工业废水和生活废水也在增加，而相应的污水处理能力没有跟上，加上河道稀释能力降低，加剧了环境的污染。更为严重的是未经处理的污水大量被农田灌溉利用。水污染、水质下降，受污染水源不能正常使用，又加剧了水资源短缺的危机。

可以看出,由于缺水给黄淮海流域带来了严重的生态环境影响。在黄淮海流域,水资源短缺与经济社会发展及生态环境保护之间的矛盾,仅靠节水和挖掘水资源潜力是无法完全解决的,应在加大节水力度的同时,进行跨流域调水,实现我国水资源的合理配置。而长江流域水源丰富,年内各季节径流量的分布也较北方各河流相对均衡,长江正好自西向东流经大半个中国,上游靠近西北干旱地区,中下游与最缺水的华北平原相邻,地理条件极为有利兴建跨流域调水工程。

自新中国成立以来,南水北调工程就提上了议事日程,经过几十年的研究,提出了分别从长江上、中、下游引水的南水北调总体布局,西线、中线、东线三条调水线路与长江、黄河、淮河、海河相连接形成“四横三纵”的总体格局,三条线路各有主要供水范围,相容互补,是一个有机整体,共同实现我国的水资源优化配置。南水北调东线调度仿真系统是南水北调工程仿真系统的子系统,主要进行南水北调东线水量调配研究。跨流域调水的核心问题是水量问题,东线工程调水能否满足调水沿线的需求?如何使工程达到最大效益?调水的水量是多少?沿线用户的供水保证率能不能达到要求?调水对原用水户的影响?如何解决受水区 and 供水区的矛盾?调度系统稳定性如何?等等都是南水北调东线水量调度急需解决的问题。对南水北调东线工程这样一个跨流域调水工程来说,它不仅仅涉及工程技术问题,还要涉及到社会、经济、政治等各个方面,是一个十分复杂的大系统,其中有些问题可以定量分析,有些问题只能定性分析,甚至有些问题只能半定性分析。要研究这样的复杂大系统,只有采用系统工程的方法。而且像南水北调东线工程这样大型调水工程,工程的成败和效益的高低都至关重要,如何预测未来工程运行的情况,如何检验工程效益的好坏,是不能通过实物试验的,只有采用系统仿真试验的方法。

所以,进行南水北调东线水量调配仿真系统开发有着重要的意义:一方面可以为规划提供决策支持;另一方面可以根据该系统提供的方案为东线调水工程管理提供参考。

### § 1.3 国内外跨流域调水实例

为了解决水资源短缺问题,古今中外修建了很多跨流域、长距离调水工程。早期跨流域调水大多是为了漕运和农业灌溉,公元前 2400 余年<sup>[1]</sup>,埃及就开始修建跨流域调水工程,从尼罗河引水灌溉埃塞俄比亚高原南部地区。

在中国,公元前 486 年修建了引长江水入淮河的邗沟工程;公元前 361 年,开始修建引黄河水入淮河的鸿沟工程;公元前 256 年修建了都江堰引水工程;公

元前 246 年起兴建引泾水入洛水灌溉关中地区的郑白渠；公元前 219 年建成了灵渠，引湘江水入珠江水系的漓江。

1293 年京杭大运河全线贯通，全长近 1800 公里，贯穿钱塘江、长江、淮河、黄河和海河五大流域。

20 世纪初到 20 世纪中叶，跨流域调水工程发展较快，并向着多目标综合利用方向发展，调水不仅服务于农业灌溉和航运，而且兼有防洪、发电、城市供水、旅游、娱乐等多种功能。

美国在 20 世纪 40 年代建成了“中央河谷工程”（年调水量 134 亿立方米），70 年代建成了“加州调水工程”（年调水 52 亿立方米），这两个工程都是将加州北部的水调往加州南部，他们都具有防洪、发电、城市生活与工业供水、灌溉、旅游等多项功能<sup>[8]</sup>。

60~70 年代，巴基斯坦建成了西水东调工程，从印度河引水供给东部总干渠长 593 公里，年引水量 160 亿立方米，为当今世界上已建成的调水量最大的跨流域调水工程。

中华人民共和国成立以后，江苏省修建了江水北调工程；广东省修建了东深工程（向香港供水）；河北省与天津市修建了引滦工程；山东省修建了引黄济青工程；甘肃省修建了引大入秦工程，等等<sup>[9]</sup>。

以上调水工程的实施，都给受水区带来了巨大变化，促进了这些地区的可持续发展。

## § 1.4 国内外研究动态

近年来，国内外进行跨流域调水规划普遍采用系统分析的方法。系统分析应用于流域规划中主要有两种方法：①. 数学优化法；②. 模拟方法。这两个方法的共同特点是对所研究对象和问题的各个部分作为有联系的有机整体来进行系统的分析，但两者各有特点：优化方法一般采用数学规划的方法来求得其最优解；而模拟方法则是对已拟定的一些方案进行模拟计算，得到各种方案的指标值，然后通过比较进行方案优选。

### 1. 流域规划模型的研究

目前，已有不少综合利用的流域规划模型，如美国水利工程中心 1971 年研制的 EHC-3 和 1979 年研制的 EHC-5 模型，Texas 水系统开发的 SIM I 和 II 模型，纽约 Oswego 流域的模拟模型，Arkansas 河流域模型等，美国麻省理工学院 1974 年开发了 MIT RIVER BASIN SIMULATION MODEL（简称 MITSIM），这是一个多目标多

用途的流域规划模型,国内叶尔羌河流域的供水研究和辽宁太子河流域北水南调的调水研究中,都采用过这一模型<sup>[1][10][11][12]</sup>。

国内也有许多单位在这方面进行了大量的工作。黄委会研究开发了黄河流域水资源经济模型系统,包括模拟模型、优化模型、图形显示系统、水资源数据库四个部分,并就此展开了比较广泛的专题研究<sup>[10]</sup>。

近几年的研究趋势是在模型中引入优化的思想。在复杂的水资源系统中,人们往往期望模型具有一些自优化的功能,如采用反馈原理和方法,通过方案的反馈和反复模拟计算,直到得到允许精度下的最满意的方案。

## 2. 国内跨流域调水工程水资源规划研究现状

自 80 年代以来,为解决华北地区的缺水现状,对南水北调东线工程和中线工程进行了大量的规划研究工作,引入了先进的系统科学的研究方法,针对不同的问题建立了各种优化模型,并逐步发展到对整个工程系统的水资源规划进行系统仿真建立模型的研究,取得了一些成果。1993 年以来东北地区的北水南调工程的预可行性研究中,清华大学建立了水资源系统规划模型(THUSIM)<sup>[10][11][12]</sup>,并提出了具有实用价值的研究成果。

跨流域调水工程水资源规划在采用系统分析方法和模拟技术上已经取得了较好的进展。但迄今为止,这些研究还存在一个共同的重要问题,那就是:把跨流域调水工程中的水资源调出区和水资源调入区割裂开来,重点只对水资源调出区进行了比较详细的各地区、各用户水量平衡及水库调度研究,而没有把调出区与调入区作为一个整体的大系统来进行联合调度;在研究中重视了优先满足调出区的用水要求,而没有仔细研究调入区的需水情况;着重研究了优先保证调出区用水的条件下,调水工程多年平均可调水量的指标。从多年平均调水总量来看,可以大体满足水资源调入区的需要,但由于天然来水在时间分布上的不均匀性,在枯水年枯水期调出区的可调水量很少,增加了水资源调入区在枯水年枯水期用水的困难,将使调水效益受到严重的影响。在缺水期遭遇连续枯水期,缺水严重时,可能调出区也是枯水期,可调水量很少,在重要关头不能发挥调水工程的效益。因此在进行跨流域调水的水资源规划时,在优先满足调出区的需水、不降低调出区利益的基础上,努力向缺水期多调一些水,提高多年平均的可调水量之后。应进一步重点研究的问题是:

- ① 水资源调出区和调入区的调度进行合理的协调,改进调度方式,在不影响调出区利益、努力加大多年平均可调水量的同时,尽量增加枯水期的可调

水量,增加枯水期调水效益。

②. 将水资源调出区与调入区作为一个大系统,进行联合补偿调度,以更大程度的发挥调水工程效益。

### 3. 系统科学在水利工程上的应用

随着科技的发展,面对水科学的一系列问题,系统科学的理论和技术已广泛地引起人们的重视和应用。经过近三十年的实践和发展,水资源系统分析已在一些国家的规划和管理中得到应用<sup>[13]</sup>。1962年哈佛大学的学者把系统分析引入水资源规划,其代表作“Design of Water Resource Systems”作了基本的尝试<sup>[14]</sup>。70年代以后,美国麻省理工学院完成的科罗拉多河流域规划,巴基斯坦研制的印度河流域规划等,都采用了系统方法解决水资源规划与设计方面的实际问题。同时,原苏联、加拿大、英、法等国也都先后开始利用系统分析方法研究水资源问题<sup>[15]</sup>。在系统理论上,认识到水资源系统理论必须纳入系统科学的范畴来考察,必须将其视为更广泛的自然——社会系统来研究;在技术上,为适应问题要求和科技发展现实,逐渐冲出了传统的单一目标、单一技术和个体决策的范畴来考察,考虑了水资源多目标、多层次和群体决策的特点,走向探讨新理论和新方法的途径<sup>[16]</sup>。例如目前正在探讨的神经元系统、专家系统、人工智能和决策支持系统等方法。

我国在60年代末,中国水科院就开始用系统分析的方法对水库的优化调度进行研究。在70年代后期开始在防洪、发电、灌溉、排涝等规划中应用了系统分析的方法,使得系统分析方法在水资源研究领域中得到比较广泛的应用。例如红水河梯级水电站开发规划系统分析研究,引滦入津系统分析研究,松花江流域开发系统模拟研究等<sup>[14]</sup>。

### § 1.5 本文研究内容

跨流域调水涉及到国民经济、地区经济和社会发展、环境改善等多目标,是一个复杂的大系统,它不仅要考虑沿线各地区、各用水部门的利益,同时还要考虑调出流域和调入流域的矛盾。

本课题作为南水北调工程仿真系统的子系统,针对东线工程跨流域调水过程中具有的多地区、多用户、多供水保证率要求的特点,利用系统工程的理论,采用系统仿真的方法,建立南水北调东线水量调度模型,编制了相应的调度软件,进行多方案比较分析和仿真调度分析,对南水北调东线工程可行性进行分析研究,

为决策提供依据。具体研究内容如下：

1. 系统工程的基本理论在水资源调配等方面应用的情况综述；
2. 应用系统工程理论建立南水北调东线水量调度模型；
3. 应用 JAVA 语言开发南水北调东线工程水量调度仿真系统；
4. 南水北调东线调度成果分析；
5. 南水北调东线水量调度仿真试验分析。

## § 1. 6 本章小结

本章从南水北调问题的提出和意义出发，介绍了国内外的调水实例，探讨了国内外跨流域调水的研究动态，并对本论文研究的主要内容作了论述。

## 第二章 东线工程概况和工程规划

### § 2.1 东线工程概况

#### § 2.1.1 自然地理概况

##### ● 淮河流域

淮河流域处于我国东部,介于黄河和长江两大流域之间,位于东经 $111^{\circ}45'$ ~ $122^{\circ}45'$ ,北纬 $30^{\circ}55'$ ~ $38^{\circ}20'$ ,面积 $33\text{万km}^2$ (其中山东半岛 $6\text{万km}^2$ )。淮河流域平原面积占三分之二,山丘占三分之一;山东半岛平原和山丘约各占一半。

气候多变,旱涝转换迅速。淮河流域地处我国南北气候过渡带,属温暖带半湿润季风区,年平均降水量 $854\text{mm}$ ,水面蒸发量 $1084\text{mm}$ ,陆地蒸发量 $634\text{mm}$ ,气温 $11\sim 16^{\circ}\text{C}$ ,日照 $2000\sim 2400\text{h}$ ,年平均相对湿度为 $65\sim 80\%$ 左右。

河流扇形分布,支流众多,河系复杂。淮河流域由淮河及沂沭泗两大水系组成,废黄河以南为淮河水系,以北为沂沭泗水系。淮河水系一级支流中,流域面积大于 $2000\text{km}^2$ 的有16条,较大的有洪汝河、沙颍河、涡河、新汴河、史河等;沂沭泗水系由沂水、沭河、泗河组成;山东半岛各水系均直接入海,较大的有小清河、潍河等。

淮河流域湖泊众多,水面面积约 $1\text{万km}^2$ ,总蓄水能力约 $280\text{亿m}^3$ ,其中兴利量约 $60\text{亿m}^3$ 。淮河流域较大的湖泊有洪泽湖、高邮湖、洛马湖、邵伯湖、南四湖、城东湖和城西湖。

##### ● 海河流域

海河流域位于东经 $122^{\circ}\sim 120^{\circ}$ ,北纬 $35^{\circ}\sim 43^{\circ}$ 之间,东临渤海,南界黄河,西靠云中、太行山,北依内蒙古高原。流域地跨8个省、直辖市、自治区,包括北京、天津两市的全部,山西省东部,河南、山东省的北部,及内蒙古和辽宁省的一部分,总面积 $31.8\text{万km}^2$ ,其中山地和高原面积占 $60\%$ ,平原占 $40\%$ 。

流域内地貌类型多样,北有燕山、军都山,西有五台山、太行山,这些山脉环抱着东部华北平原;山地与平原直接交接,丘陵过渡区很短;平原地势自北、西、南三个方向呈扇形向渤海湾倾斜。地形西北高、东南低,总地势由西北向东南倾斜。

属于温带大陆性季风气候区。冬季盛行北风和西北风,夏季多东南风,春季干旱多风沙。全流域多年平均降雨量 $548\text{mm}$ ,年平均陆地蒸发量 $470\text{mm}$ ,水面蒸发

量1100mm, 平均气温 $1.5\sim 14^{\circ}\text{C}$ 。

海河流域河流扇形分布, 支流众多, 河系复杂。海河流域包括海河、滦河两大水系。海河包括北三河、永定河、大清河、子牙河、漳卫南运河、黑龙港水系和海河干流等; 海河干流起自天津市金刚桥, 东流至大沽入海; 滦河位于海河流域东北部, 为单独入海河流。

## § 2. 1. 2 社会经济概况

### ● 淮河流域

淮河流域位于我国东部地区, 面积 $27\text{万km}^2$ , 占全国面积2.8%。跨湖北、河南、安徽、江苏、山东五省的40个地市、171个县, 耕地面积1.8亿亩, 占全国的12.2%。山东半岛位于我国东部沿海地区, 面积 $6\text{万km}^2$ , 辖青岛、烟台等9个市, 32个县市; 耕地面积3672万亩。淮河流域片共有济南、徐州、青岛、郑州4座特大城市和连云港、烟台、蚌埠等22座大中城市。

1997年淮河流域人口为1亿6千万。占全国同年总人口的13%; 人口密度为595人/ $\text{km}^2$ , 为同年人口密度的4.6倍; 城镇人口2840万人, 占流域人口的17.7%。山东半岛1997年人口为3573万人, 人口密度为595人/ $\text{km}^2$ 。城镇人口为1025万人, 占总人口的28.7%。

淮河流域片是我国小麦、棉花、大豆、花生、油菜主产区之一。1997年淮河流域粮食总产值为10205万t, 占全国同年粮食总产量的20.6%。淮河流域工业总产值1997年为10732亿元。人均工业总产值为6680元, 为同期全国人均工业总产值的74%。山东半岛的工业总产值5526.6亿元, 人均工业总产值15467元, 为全国同年人均工业产值的168%。

淮河流域是连接我国南北、东西的重要交通枢纽, 京沪、京九、京广铁路, 分别从淮河流域的东、中、西部通过; 著名的欧亚大陆桥—陇海铁路贯穿流域东西; 内河货运量居全国第二位的京杭大运河; 青岛、烟台、威海、日照、连云港等港口已为我国重要的对外海运港口。

### ● 海河流域

海河流域拥有包括首都北京、直辖市天津, 以及石家庄, 唐山等25个大中城市。1998年全流域总人口1.22亿, 占全国的9.7%, 其中城镇人口3365万人, 城镇化率27.5%。平均人口密度384人/ $\text{km}^2$ 。

海河流域的主要工业行业有冶金、电力、化工、机械、电子等, 在全国经济

中占有重要的地位。1998年工业总产值1.29万亿元，国内生产总值7501亿元，均占全国的12%。人均GDP6140元，高于全国的5000元的平均水平。

海河流域土地、光热资源丰富，适用于农作物生长，是我国的粮食生产基地。1998年耕地面积1.65亿亩，粮食总产量6272万t，占全国的12%。人均粮食占有量513kg，大大高于全国的403kg的平均水平。

### § 2. 1. 3 水旱灾害

#### ● 淮河流域

解放后，淮河水旱灾害仍频繁发生，50、60年代以来水灾最严重，其成灾农田，分别占耕地面积的16.9%、14.9%。80年代以来，淮河流域旱灾呈逐渐加重趋势，尤以90年代为甚。90年代累计成灾面积26171万亩，年均3271万亩，占耕地的18%，于50、60、70年代相比成灾逐年加重趋势，以90年代最严重。

#### ● 海河流域

海河流域素有“十年九旱”之说。据史料统计，1368~1948年的580年间，曾发生337次旱灾。据不完全统计1950~1980年的31年间，年平均旱灾面积约2225万亩。干旱缺水严重制约着农业生产持续稳定的发展。

### § 2. 1. 4 水资源开发利用现状

#### 1. 黄河以南地区

黄河以南受水区地处淮河流域下游平原，跨淮河和沂沭泗两个水系，水资源较丰富，但丰枯变化很大，调节能力较小，可利用量受到限制。1998年实际供水量见表2-1所示。

表2-1 1998年黄河以南供水区实际供水量表

单位：亿 m<sup>3</sup>

| 区 域       | 地表水    | 污水回  | 外流域调水 | 地下水   | 供水量总计  |
|-----------|--------|------|-------|-------|--------|
| 江水北调供水区   | 101.39 |      |       | 9.41  | 110.80 |
| 南四湖、东平湖地区 | 18.11  | 0.24 | 2.20  | 31.97 | 52.54  |
| 合 计       | 119.5  | 0.24 | 2.20  | 41.41 | 163.32 |

#### ● 江水北调地区

江水北调地区位于淮河及沂沭泗下游平原，供水范围目前已基本覆盖整个苏北地区，地表水较丰，但年际和年内丰枯变化悬殊。区内地势平坦，调蓄能力低，水资源供给受当地降水和上游来水影响较大，经常发生旱灾，而且旱涝急

转频繁。

### ● 南四湖和东平湖地区

南四湖和东平湖周边地区水资源日益衰减,平水年地表水基本利用,南四湖大多数年份不能蓄满,有些年份甚至连死水位都无法保证。该区城市集中,工业发达,城市用水主要抽取地下水,污水排入南四湖,不仅造成地下水超采严重并出现漏斗,而且使南四湖地区缺水和水污染都十分突出,湖区生态环境严重恶化。该区 1998 年地表水利用率为 60.3%,地下水利用率已达 116.0%,现状缺水属于资源性缺水。

## 2. 山东半岛

山东半岛面积 5.9 万  $\text{Km}^2$ ,是我国沿海经济发达地区,也是我国缺水最为严重的地区之一。山东半岛多为源短流急的山溪性入海小河,地表水拦蓄利用困难,地下水是主要的供水水源,各城市供水普遍紧张,城市和工业大量挤占农业用水,地下水处于持续超采状态,部分地区已引起海水入侵地下水。黄河是山东半岛的重要补充水源,但黄河持续断流和泥沙淤积问题限制了引黄水量。1998 年实际供水量见表 2-2 所示。山东半岛地表水利用率为 34.7%,地下水利用率为 88.4%,地表水尚有一定潜力。山东半岛可利用水资源匮乏,现状人均年用水量 246  $\text{m}^3$ ,低于黄河以北地区,节水水平已较高,现状缺水属于资源性缺水。

表 2-2 1998 年山东半岛供水区实际供水量表

单位: 亿  $\text{m}^3$

| 区 域  | 地表水   | 地下水   | 引黄水   | 海水   | 其它供水 | 总供水量  |
|------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| 山东半岛 | 23.16 | 51.93 | 21.92 | 1.04 | 0.17 | 98.22 |

## 3. 黄河以北地区

黄河以北供水区地处海河流域下游。历史上,上游来水较多,工农业生产大多用地表水,但自从各河上游修建了山区水库,山区基流得到有效控制,并用于山前平原的工农业生产。因而,本区入境水量随之减少,水源由地表水为主转向以地下水为主。1998 年实际供水量见表 2-3 所示。

表 2-3 1998 年黄河以北供水区实际供水量表

单位: 亿  $\text{m}^3$

| 区 域    | 地表水  | 地下水  | 微咸水 | 引黄水  | 海水利 | 污水回  | 总供水量  |
|--------|------|------|-----|------|-----|------|-------|
| 黄河以北地区 | 21.1 | 47.4 | 2.0 | 46.4 | 0.6 | 3.48 | 121.0 |

## § 2. 2 南水北调东线工程规划

南水北调东线工程是我国南水北调总体布局中的重要组成部分,规划从江苏省扬州附近长江干流引水,利用京杭大运河及其平行河道输水逐级提水北送。连通洪泽湖、洛马湖、南四湖和东平湖,在位山附近通过倒虹隧洞穿过黄河,利用卫运河、南运河等河道自流到天津,新建、扩建千顷洼、大屯、大浪淀、北大港等四处调蓄水库。从长江到天津北大港水库输水主干线全长 1156km,其中黄河以南 646km,穿黄段 17km,黄河以北 493km;为解决山东半岛严重缺水的状况,向济南、青岛、烟台、威海等城市供水,输水线路总长 701km<sup>[1]</sup>。

工程实施后可基本解决天津市、河北省黑龙港运东地区、山东鲁北、鲁西南和胶东部分城市的水资源紧缺问题,并具备向北京供水的条件。促进环渤海地带和黄淮海平原东部经济发展,改善因缺水而恶化的环境;为京杭运河济宁至徐州段的全年通航保证了水源;使鲁西和苏北两个商品粮基地得到巩固和发展。

### § 2. 2. 1 规划水平年

现状水平年为 1998 年,东线工程规划分为三个阶段:应急工程规划水平年是 2005 年;第一期工程规划水平年是 2010 年;第二期工程规划水平年是 2030 年。

### § 2. 2. 2 供水范围

南水北调东线工程的基本任务是从长江下游取水,主要为天津市、黄淮海平原东部和山东半岛补充水源,与引黄工程和南水北调中线工程一起共同解决华北地区水资源短缺问题,实现这一地区水资源的合理配置。

70 年代以来,水利部在多次论证的基础上,根据对黄淮海东部平原、山东半岛的社会经济发展以及水资源状况的分析、预测和水资源合理配置的要求,结合输水沿线各省市规划需求,南水北调东线工程合理的供水范围大致分为三片:①江苏省里下河地区以外的苏北地区和里运河东西两侧地区,安徽省蚌埠市、淮北是以及沿淮、沿新汴河、沿高邮湖地区和山东省南四湖、东平湖地区;②山东半岛;③黄河以北淀东清南天津平原,河北省黑龙港东部平原,运东平原和山东省徒骇河平原(简称黄河以南、山东半岛和黄河以北)。

南水北调供水区分布有淮河、海河、黄河流域 25 座地市级以上城市。包括天津、济南、青岛、徐州等特大和大城市及沧州、衡水、聊城、德州、滨州、烟台、威海、淄博、潍坊、东营、枣庄、济宁、菏泽、泰安、扬州、淮安、宿

迁、连云港、蚌埠、淮北、宿州等大中城市。这些城市都存在不同程度的缺水，多数以开采深层地下水和挤占农业水源补充城市供水。供水范围是淮河、海河流域缺水最严重的地区。

### § 2. 2. 3 供水目标

南水北调东线工程的供水目标是补充天津、山东半岛和输水沿线其它城市生活环境和工业用水，并适当兼顾农业和其它用水。

(1). 城市用水 天津市及调水沿线和山东半岛的大中城市的城市用水和重要电厂、煤矿用水是主要供水目标；

(2). 航运用水 保证济宁~扬州段京杭大运河用水；

(3). 农村用水 江苏省现有江水北调工程供水区和安徽省洪泽湖用水区的农村生活、农村工业、农业灌溉用水；

(4). 生态环境用水 在城市用水中考虑改善环境（绿化、河、湖）用水。

各部门的设计供水保证率见表 2-4 所示

表 2-4 各部门的设计供水保证率

| 供 水 部 门  |     |       | 供水保证率 (%) |
|----------|-----|-------|-----------|
| 生活、工业、航运 |     |       | 97        |
| 农业灌溉     | 水 田 | 淮河以南  | 95        |
|          |     | 淮河以北  | 75        |
|          | 旱 田 | 下级湖以南 | 75        |

### § 2. 2. 4 供水线路

东线工程利用现有江水北调工程，并扩大规模、向北延伸而成，充分利用了京杭运河及淮河、海河流域现有河道和建筑物。黄河以南沿线分布洪泽湖、洛马湖、南四湖和东平湖 4 个调蓄湖泊，形成 4 大段输水工程，湖与湖之间均设 3 级泵站，南四湖上、下级湖之间设一级泵站，从长江到东平湖共设 13 级泵站，地面高差 40 米，总扬程 65 米。

现有河道输水能力大部分满足近期调水要求，并具有扩建能力，南四湖以南采用双线或三线并联河道输水；南四湖以北基本为单线河道输水。具体输水线路如下：

从长江到洪泽湖，有三江营引水，分运东和运西两线，分别利用里运河、三阳河、苏北灌溉总渠和淮河入江水道送水。

洪泽湖到洛马湖，采用中运河和徐运河双线输水，新开子新河和利用二河从洪泽湖引水入中运河。

洛马湖至南四湖，有三段输水线路：中运河~韩装运河、中运河~不牢河、中运河~房亭河。

南四湖内除利用全湖输水外，须在部分湖断开挖深槽，并在二级坝建泵站抽水入上级湖。

南四湖以北至东平湖，利用梁济运河、柳长河输水至八里湾，由泵站抽水入东平湖。

穿黄位置在解山和位山之间，全长 16.89km，在黄河河底以下 70m 打通一条直径 9.3m 的倒虹隧洞。

江水出动平湖后穿黄河，通过小运河至临清，立交穿过位运河，经吴临渠入南运河道九宣闸，再由马厂减河送水到天津北大港水库。

胶东输水分干线西起东平湖，东至威海市米山水库，全长 700km，设 7 级泵站，自西向东分为西、中、东三段，西段即原西水东调工程；中段利用引黄济青渠段；东段为引黄济青渠道以东河段。

东线工程供水范围及供水线路见附图 1 所示。

## § 2.3 水源条件

### ● 长江水资源

东线工程主要水源是长江水。长江水量丰富、稳定，多年平均入海水量达 9560 亿  $\text{m}^3$ ，径流年内和年际变化较小，即使在特枯年份也有 6000 多亿  $\text{m}^3$ 。东线工程从长江下游三江营取水，距入海口约 280km，引水段水深 20~30m，长江水位在绝大部分时间内都能满足引水要求，而且三峡工程建成后，可以加大枯水季节的流量。

根据分析，东线工程即使第二期工程抽江 160 亿  $\text{m}^3$ ，也仅占长江入海水量的 1.67%<sup>[4]</sup>。

### ● 淮河流域水资源

黄河以南供水区内有淮河、沂、泗、汶等水系，分别汇入洪泽湖、洛马湖、南四湖和东平湖。除大汶河的来水已在黄河水资源中分配，其它各河来水和江水在东线工程运用中统一调度。

淮河流域各水系丰枯变化很大。枯水年份当地径流很少，一般年份在汛期各

水系均有不同程度的弃水,除少数年份外,洪泽湖和洛马湖弃水量分别在 50~250 亿  $\text{m}^3$  和 10~20 亿  $\text{m}^3$  之间,即使在冬春洪泽湖也有 7~220 亿  $\text{m}^3$  的弃水量。

淮河流域各水系水情常常南北各异,很少出现同时枯水,黄河以南和黄河以北丰枯遭遇的几率也非常小,因此江淮水统一调度是可行的,也是合理的。

### ● 黄河以北沿线水资源

黄河以北供水区处于海河流域下游平原,海河水系的山区径流很少有水进入东线受水区,平原径流的 90%以上集中在汛期,且年际丰枯悬殊,可利用的水量很少,一般只能用于灌溉,故本文调算,不予考虑。

## § 2. 4 本章小结

本章首先介绍南水北调东线工程供水沿线的概况和东线工程的基本概况、包括规划供水范围、供水目标、供水线路和水源条件和本次调节计算的规划水平年;然后介绍了南水北调东线规划情况;最后分析了南水北调东线调度水源状况。

## 第三章 系统仿真的基本理论

### § 3. 1 引言

系统仿真是近 30 年来发展起来的一门新兴技术学科。当由于安全上、技术上、经济上或者时间上的原因,对实际系统进行真实的物理实验很困难,有时甚至是不可能时,系统仿真技术就成了十分重要、甚至是必不可少的工具。特别是随着计算机技术的发展,仿真技术日益受到人们的重视,其应用领域也越来越广泛。在我国,仿真技术最初是用于航空、航天、核反应堆等少数领域,后来,逐步发展到电力、冶金、机械、通信网络等一些工业部门。现在,系统仿真已逐步扩大应用于社会经济、交通运输、生态环境、武器装备研制、军事作战、企业管理等众多领域<sup>[15]</sup>,开始成为分析、设计和研究公众系统的重要手段和辅助决策工具。

### § 3. 2 基本概念

#### § 3. 2. 1 系统的概念<sup>[11] [12]</sup>

系统(System)是具有特定功能的相互间具有有机联系的许多要素(element)所构成的一个整体。在美国的 Webster 大辞典中,“系统”一词被解释为“有组织的或被组织化的整体;结合着整体所形成的各种概念和原理的综合;又有规则的相互作用,相互依赖的形式组成的诸多要素集合,等等”。在日本的 JIS 标准中,“系统”被定义为“许多组成要素保持有机的秩序,向同一目的行动的集合体”。一般系统论的创始人 L. V. Bertalanffy 把“系统”定义为“相互作用的诸要素的综合体”。

#### § 3. 2. 2 仿真的概念<sup>[14] [17]</sup>

仿真(Simulation)就是利用模型对实际系统进行试验研究的过程。1961 年, G. W. Morgenthater 首次对“仿真”进行了技术性定义,即“仿真意指在实际系统尚不存在的情况下对系统或活动本质的实现”。1978 年 Korn 在他的著作《连续系统仿真》中将仿真定义为“能用代表所研究的系统的模型做试验”。1984 年 Oren 给出了仿真的基本概念框架“建模—试验—分析”的基础上,提出了“仿真是一种基于模型的活动”的定义。

#### § 3. 2. 3 系统仿真的概念

系统仿真是对实际系统的一种模仿活动,也就是利用模型来模仿事物发展变化规律。系统仿真的准确概念可以表述如下:系统仿真是指通过建立和运行系统的

计算机仿真模型，来模仿实际系统的运行状况及其随时间变化的规律，以实现在计算机上进行试验的全过程，在这个过程中，通过对仿真运行过程的观察和统计，得到被仿真系统的仿真输出参数和基本特性，以此来估计和推断实际系统的真实参数和真实性能<sup>[15]</sup>。

由系统仿真的定义，可以看出系统仿真具有以下特点：首先，系统仿真是一种有效的“试验”手段，它为一些复杂系统创造了一种“柔性”的计算机试验环境，使人们有可能在短时间内从计算机上获得对系统运动规律以及未来特性的认识；第二，系统仿真试验是一种计算机上的软件试验，因它需要较好的仿真软件来支持系统的建模仿真过程；第三，系统仿真的输出结果是在仿真过程中，由仿真软件实现的；第四，一次仿真结果，只是对系统行为的一次抽样，因此一项仿真研究往往由多次独立的重复仿真所组成，所得到的结果也只是对真实系统进行具有一定样本量的仿真试验的随机样本。因此，系统仿真往往要进行多次试验的统计推断，以及对系统的性能和变化做多因素的综合评估。

目前，系统仿真作为系统研究和系统工程实践中的一个重要技术手段，在各种具体的应用领域中表现出来越来越强的生命力。特别在一些复杂系统问题中，系统仿真具有下列几个优点：

(一). 系统仿真面向实际问题 and 系统问题，将不确定性作为随机变量纳入系统来处理，建立系统的内部结构关系模型，从而使我们对复杂的、带有多种随机因素的系统，可以方便的通过计算机仿真试验求解，避免了求解复杂的数学模型的困难。这也是目前系统仿真得到广泛应用的最根本的原因。

(二). 系统仿真采用问题导向来建模分析，并使用人机友好的计算机软件，使建模仿真面向分析人员，他们可以集中精力研究问题的内部因素及其相互关系。

(三). 系统仿真为分析人员和决策人员提供了一种有效的试验环境，他们的设想和方案可以通过直接调整模型的参数或结构来实现，并通过模型仿真运行得到其“实施”结果，从而可以从中选择满意的方案。

### § 3. 3 系统仿真的类型

可以从不同的角度对系统仿真加以分类，比较典型的分类方法是：根据模型的种类分类；根据系统模型特性分类。

根据模型的种类不同，系统仿真可分为三种：物理仿真、数学仿真和半实物仿真。

仿真基于模型，模型的特性直接影响着仿真的实现。从仿真实现的角度来看，

系统模型的特性可分为两大类，一类是连续系统；另一类是离散事件系统。由于这两种系统固有运动规律的不同，因而描述其运动规律的模型形式就有很大的差别，相应地，系统仿真技术也分为两大类：连续系统仿真和离散系统仿真。

连续系统仿真是指系统状态随时间连续变化的系统。由于连续系统的关系是要描述每一个属性的变化速率，所以连续系统的数学模型通常是由微分方程组成。连续系统仿真的中心问题是将微分方程描述的系统转化为能在计算机上运行的模型，常用的两种方法是数值积分法和离散相似法。

而离散事件系统是指系统状态在某些随机时间点上发生离散变化的系统。它与连续系统的主要区别在于：状态变化发生在随机时间点上。这种变化引起状态变化的行为称为“事件”，因而这类系统是由“事件”驱动的；而且，“事件”往往发生在随机事件点上，亦称为随机事件。离散事件系统一般都具有随机特性，系统的状态变量往往离散变化的。

### § 3.4 系统仿真的一般步骤

系统仿真的一般步骤如图 3-1 所示。仿真是基于模型的活动。系统定义是指在试图求解问题之前，详细的定义系统。定义一个系统时首先必须提出明确的准则来描述系统目标及是否达到目标的衡量标准；其次是必须描述系统的约束条件；然后要确定研究的范围，即确定那些实体属于要研究的系统，那些属于系统的环境。

**构造模型：**构造模型是要把真实系统缩小抽象，使它规范化，必须描述模型的要素、变量和参数以及它们之间的关系，在一定的约束条件下用数学模型所研究的系统。模型必须和所研究目的紧密结合，要有明确的目标与要求，模型的性质要求和真实系统尽量接近。同时模型必须尽可能的简单明了，容易控制，便于修改和改进。

**数据准备：**包括收集数据和决定在模型中

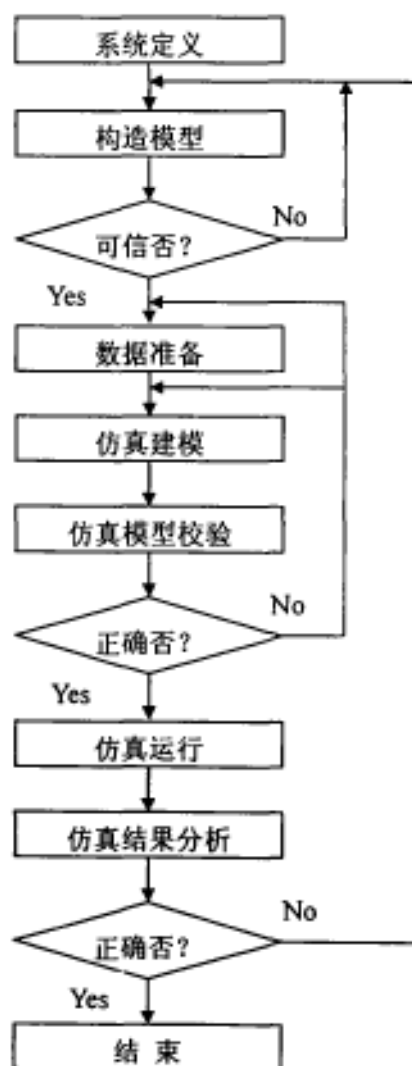


图 3-1 系统仿真的一般步骤

如何使用数据,收集数据是系统研究的一部分,必须研究系统的输入和输出数据以及描述系统各部分之间的关系数据。同时必须收集到确定模型中随机变量的概率分布或概率密度函数以及各项参数。

仿真建模主要任务是:根据系统的特点和仿真的要求选择合适的算法,将仿真模型用计算机能执行的程序来描述。程序设计中还包括仿真试验的要求,如仿真运行参数、控制参数、输出要求等。

程序检验是检验模型正确性。有了正确的仿真模型,就可以对模型进行试验,根据仿真目的对模型进行多方面实验,相应的得到模型输出。

仿真最后一个过程是要对仿真输出进行分析。输出分析在仿真活动中占有十分重要地位,特别是对离散事件系统,其输出分析甚至决定着仿真的有效性,输出分析既是对模型数据的处理,同时也是对模型的可信度进行检验。

### § 3. 5 离散事件系统仿真

离散事件系统仿真,是综合性很强的工作,它的主要技术内容覆盖了运筹学、系统工程、计算机科学和概率统计学等方面。

离散事件系统是状态变量只在一些离散的时间点上发生变化的系统,这些离散的时间点称为特定时刻。在这些特定时刻系统状态发生变化,在其它时刻系统状态保持不变,而在这些特定时刻是由于事件发生所以引起了系统状态发生变化。离散事件系统的一个主要特征是随机性。因为在这类系统中有一个或多个输入为随机变量,而不是确定量,所以它的输出也往往是随机变量。对离散事件系统模型可以进一步分为动态和静态二类。动态的离散事件系统仿真是在整个系统运行时间内的仿真;对静态系统仿真也被称为蒙特卡洛仿真,它是对每一个事件点上的系统进行仿真。由于本论文仅涉及静态系统仿真,所以下面仅对静态系统仿真加以说明。

#### 蒙特卡洛 (Monte-Carlo) 仿真

蒙特卡洛法 (Monte-Carlo Method) 是匈牙利数学家冯·诺伊曼 (Von Neumann) 在第二次世界大战中,为解决研制某新式武器中的计算问题首先提出来的。蒙特卡洛是摩纳哥一座著名的赌城,借用这一名称是为了表明该方法是一种概率和统计试验法。

蒙特卡洛法的原理是:在所研究的系统中,采用某种适当方式产生一连串随机数,根据随机数进行模拟随机事件。蒙特卡洛法实质是一种求解确定性问题,使用随机数构造一个与原问题没有直接关系的概率过程,并利用它产生统计现象进

行模拟的方法。因此，蒙特卡洛法是统计试验法。下面通过一个单变量积分问题对蒙特卡洛法的原理作简要说明。

设  $f(x)$  是区间  $(a,b)$  内的连续函数，且已知在该区间内  $f(x) \geq 0$ ，要求计算  $\int_a^b f(x)dx$  的值，当  $f(x)$  的形式比较复杂且非可积函数时，用解析法往往十分困难，但却可以构成一个十分简单的离散、随机性仿真模型。

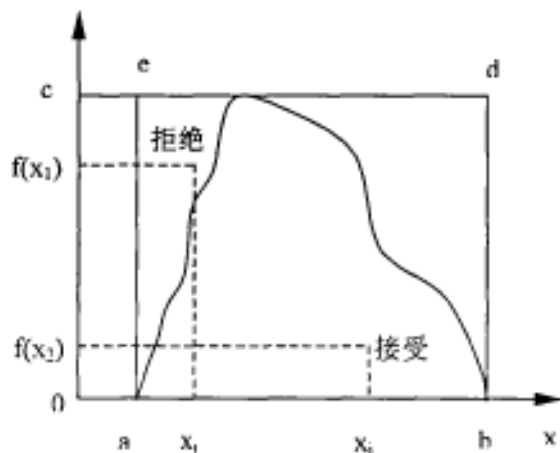


图 3-2 求  $\int_a^b f(x)dx$  的仿真模型

因  $f(x) \geq 0$ ，令  $c$  为  $f(x)$  上限，则函数  $f(x)$  所表达的曲线将包含在边长为  $c$  和  $(b-a)$  的矩形之内。如图 3-2 所示。若在  $(a,b)$  和  $(0, c)$  区间中分别产生两个均匀分布的随机数  $x_i$  和  $y_i$ ，由此构成的坐标点必在矩形  $a, b, c, d$  之内。为了计算该积分的值，可规定以下准则：

若  $y_i \geq f(x_i)$  则接受该点做计数统计；否则不做计数统计。

设共产生  $N$  个随机仿真点，如果共接受  $n$  个点，当  $N$  充分大时有

$$\frac{n}{N}(b-a)c \approx \int_a^b f(x)dx = \text{曲线下面积}$$

通过产生随机数的方法来统计落在曲线上或曲线下的坐标点数目，即可计算出定积分的值，计算精度将随着  $N$  的增大而提高。这就是典型的蒙特卡洛方法。

求解定积分  $\int_a^b f(x)dx$  本身是一个确定性的连续模型，但由于采用了随机试验的蒙特卡洛方法，使其变成了一个离散的随机性问题。因此，对此类连续系统往往可以通过离散计数建模，确定性问题可以建立成随机性模型，这种思想上的灵活性，为系统仿真的应用提供了广阔的前景。

本论文在调水系统中选取了用户的需水量作为符合正态分布的随机变量，进行了南水北调东线调度仿真试验分析。

## § 3. 6 仿真数据的分析

### § 3. 6. 1 随机数字与随机函数的产生

仿真试验研究的实际系统要受到多种随机因素的影响，在仿真过程中必须处理

大量的随机因素。而要解决这一问题，前提是确定随机变量的类型和选择合适的随机数产生方法。

## 1. 随机数的产生

产生随机变量的基础是产生 $[0, 1]$ 区间上均匀分布的随机变量，亦称随机数发生器。

随机数的产生时采用一个不变的公式产生“随机”数，不具有真正的随机性，因此称其为伪随机数。虽然是伪随机数，但它们已经能够有效的模仿均匀分布性和独立性的思想特性，从而可以满足系统仿真的需要。

随机数的最具代表性的产生方法是线性同余法。根据递归关系式

$$X_{i+1} = (ax_i + c) \bmod m, \quad i = 0, 1, \dots$$

可以产生 0 到  $m-1$  之间的整数系列  $X_0, X_1, \dots$ 。其中：

$X_0$  —— 种子值；

$X_i$  —— 第  $i$  个中间值；

$a$  —— 常数乘数；

$c$  —— 增量；

$m$  —— 模（取充分大的正整数），其含义是将  $(aX_{i+1}+c)$  除以  $m$  取其余数即

为  $Z_i$ 。即  $Z_{i+1} = (aZ_{i+1} + c) - \left[ \frac{(aZ_{i+1} + c)}{m} \right] \times m$ ,

显然有  $0 \leq Z_i \leq m-1$ ，令  $u_i = \frac{Z_i}{m}$ ，则当  $m$  充分大时， $u_i$  将在  $(0, 1)$  区间内取值。

对  $a, m, c$  及  $X_0$  合适选取，可以使  $X_i$  数列具有良好的统计性质和较大的周期长度。

## 2. 随机变量的产生

对于一个系统，总有一些影响系统状态的随机性因素，这些因素在本质上是无法预期的，通常这些变量被认为是具有特定统计分布的随机变量，进行仿真研究必须按照分布特性产生随机变量，其方法是在随机数字产生的基础上进行数学处理。

随即变量的采样值得到有以下几种方法：采用逆变换法可用来从指数分布、韦泊分布、均匀分布和经验分布取的采样值；可采用反变换法取得正态分布的采样值；以及通过查表产生离散分布的随机变量。

### § 3. 6. 2 输入数据分析

由于在离散事件系统仿真中，有些数据及模型参数是随机数而不是确定型数，

故需对输入数据进行分析，即确定各输入数据的分布及参数。一般应分为以下几步：

首先应分析数据，分析所收集的数据是否足以确定在仿真系统中需要用作输入数据的分布及参数；第二步进行分布的识别，根据系统的特性或数据确定需要输入数据的分布；最后应对该分布的参数进行估算。

### § 3. 6. 3 输出数据分析

对于从运行系统仿真模型后得到的输出变量，应被看作是具有未知分布的随机变量，只不过是输出变量所有可能的观察总体的采样观察。任何一个观察值都不可以随意用来表示系统的真实值，必须通过统计分析才能得到真实值。为了说明系统输出变量的真实值，必须对变量的输出值进行多次观察，并将观察值加以统计分析，同时说明系统的输出变量真实值落在某一区间的概率。

### § 3. 7 本章小结

本章分析了系统仿真的有关概念，阐述了系统仿真的类型和一般步骤，重点论述了离散事件的系统仿真和仿真数据的分析。

## 第四章 南水北调东线水量调度模型的建立

### § 4. 1 跨流域调水工程中研究的水资源问题

在建立南水北调东线调度模型以前,应当首先确定南水北调东线工程中主要的水资源问题,才能够有的放矢的建立东线工程水量调度模型,调度模型才能够尽可能的符合实际,更加可行。下面将对跨流域调水工程中主要水资源问题加以分析。

#### § 4. 1. 1 调出区

调出区是跨流域调水工程的水源地,为水源丰富或较丰富的地区。调出区研究的最重要的问题是可调水量问题。从调出区引水必须保证对调出区现有的用水不会产生不利影响,并为调出区未来发展留有余地,调水不应对调出区产生较大影响并应采取措施来消除各种不利影响。目前我国对调出区的可调水量和对调出区的影响问题研究较多,但大都仅限于计算多年平均可调水量及调水量过程,对特枯水年或特枯水年组的可调水量及相应保证措施研究较少。因此,在研究调水区的可调水量问题时,应注意以下问题:

1、不影响调水区用水并保证其一定发展前提下的可调水量。这个调出水量是用以说明调水工程的可行性,如果调出区可能提供的调出水量很少或仅在丰水年可提供一些调出水量,则应对工程的可行性进行慎重的研究。

2、采取一定工程措施后,调出区的可调水量。研究这个问题主要用以说明调水规模的发展余地,如果实施一定的工程后,调出区可调出水量较不做工程增加较多,而且工程投入较少,则说明该调水工程有一定发展潜力。

3、在枯水年或特枯水年组合内,如何优化现有工程的调度。在不破坏或少影响调水区用水的前提下,保证提供一定调出水量,当调水区流域和调入区流域的丰枯遭遇几率较大时,这个问题应该重点研究。

#### § 4. 1. 2 调入区

调入区是跨流域调水工程的用水区,一般为水资源短缺的地区。调入区在已知调入水量和过程的前提下,应首先明确调水工程的供水范围,合理确定供水范围是保证充分有效利用调入水量的前提。如果供水范围不合理,所选择的供水范围较大,可能使重要的供水用户的用水经常遭到破坏;反之,选择的供水范围较小,

调入水量就不能得到充分的利用，造成浪费。调入区应研究的第二个问题是在一定的供水范围内和调水过程下，如何使用已有工程充分利用调入的水量，提高供水保证率，其实质是研究多水源多用户多工程的联合调度问题。

### § 4. 1. 3 主要控制性工程的调度

主要控制性工程是指调出区的水源控制工程。研究主要控制性工程的调度问题主要是解决如何协调好调出区的保证用水和尽可能的加大调出水量、提高调入区缺水期调入水量之间的矛盾，其实质是优化调度的问题。南水北调东线工程的水源控制工程是黄河以南的五大湖泊，其中最主要是洪泽湖和洛马湖，而供水区主要是黄河以北主要城市用水，本流域用水和调水在水源地就可以分开，在进行湖泊调度时可以分开考虑本流域用水和调水，主要研究在优先保证本流域用水并为流域发展留有余地的前提下，尽可能多的向北方调水，可以采用建立限调线的方法进行优化调度。

### § 4. 1. 4 调出区和调入区组成的大系统

跨流域调水工程是调出流域和调入流域共同组成的大系统。研究跨流域调水工程不能独立地研究调出流域或调入流域，应将调出流域和调入流域作为一个统一的大系统进行研究。本论文建立了调出流域和调入流域统一的调度模型，并对大系统联合调度运用以及调出流域或调入流域的枯水年和枯水年组调出区和调入区联合调度提高整个系统的供水保证率等问题进行了初步的探讨。

## § 4. 2 南水北调东线调度原则

南水北调东线工程输水河道和沿线水库是在原有工程基础上扩建、北延而成的，在确定调度原则时，既要经济合理的利用水资源，又要尊重现有用水现实，南水北调东线工程水量调配应遵循以下原则：

1. 尊重已用水源现实，调水工程的兴建以不影响原有灌区合理用水为原则；
2. 江水、淮水并用，淮河枯水年多抽江水，淮河丰水年多用淮河水；
3. 充分利用当地水资源，当地水资源不足时逐级从上一级湖泊调水补充，当地径流不能满足整个系统供水时，调江水补充；
4. 黄河以南各调蓄湖泊，考虑各区原有的用水利益，参照现有江水北调工程的调度运用原则，规定了各调蓄湖泊的北调控制水位，一般情况下，低于此水位时，停止从湖泊抽水。黄河以南各湖泊北调控制水表见表 4-1。

表 4-1 黄河以南各湖泊北调控制水位表

单位: m

| 湖 泊 | 7 月~8 月   | 9 月上旬~11 月上旬 | 11 月上旬~3 月底 | 4 月上旬~6 月底 |
|-----|-----------|--------------|-------------|------------|
| 洪泽湖 | 12        | 12.0~11.9    | 12.0~12.5   | 12.5~12.0  |
| 洛马湖 | 22.2~21.9 | 21.7~22.2    | 22.1~23.0   | 23.0~22.5  |
| 下级湖 | 32.0      | 31.7~32.1    | 32.1~33.0   | 32.5~32.0  |
| 东平湖 | 39.3      | 39.3~39.5    | 39.5~40.3   | 40.1~39.3  |

注: 东平湖为黄海高程, 其余为废黄河高程。

5. 供水次序是首先满足城市生活、工业及航运用水, 其次是黄河以南农业灌溉, 然后是北方输水沿线农业灌溉补水; 为保证城市用水, 在湖泊停止向北供水时, 抽江水量优先满足全区的城市供水。

6. 第一期工程抽江规模较小, 对长江口盐水入侵影响甚微, 不需“避让”。第二期工程, 在长江大通站流量小于  $9400\text{m}^3/\text{s}$  时, 限制抽江流量不超过  $400\text{m}^3/\text{s}$ , 大通站流量在  $9400\sim 10000\text{m}^3/\text{s}$  之间时, 抽江的流量不大于大通站  $9000\text{m}^3/\text{s}$  以上的流量。遇抽江“避让”时, 各湖泊优先向供水区的城市供水。

7. 黄河以北优先考虑没有调蓄水库的片, 各片按本时段分的水量供水; 蓄供片用本时段分的水量供水, 不能满足时, 再由水库补水; 本时段有余水时, 优先向缺水片供水, 然后再向水库充水。

### § 4. 3 南水北调东线调度方法

一般水量调节计算是根据来水、用水和水库的调节能力按时段用水量平衡原理进行的。南水北调东线工程是一个多水源、多用户、多调节水库的大系统, 工程建成后, 各地区的权益具体表现在获得的水量上, 如何协调各地区与各用水部门之间的矛盾, 使工程发挥最大效益, 是一个多目标决策分析的问题。因此, 本文拟采用系统分析的方法, 并初步应用优化理论进行水量调配研究。

#### 1. 问题的提出

东线工程是跨流域多水源供水, 跨地区多部门, 水量的调度和分配如何优化, 工程配置怎样合理, 与各水系、湖泊、地区防洪排涝的结合程度如何, 调出区与调入区的矛盾如何解决等是确定东线工程调度模型时应该考虑的问题。

#### 2. 系统的简化

南水北调东线工程是一个庞大、复杂的供、输、蓄水系统, 不可能考虑所有

因素,为了使模型简化又真实反映南水北调东线工程的特点,建模时仅考虑对工程影响较大的主要因素,突出整个工程的供水效益,将多目标的综合利用问题转化为单一目标求解。其效益均用供水量表示。南水北调东线工程水量调配模型简化如图 4-1 所示。供水沿线共分了 11 片,黄河以南 5 片,黄河以北 6 片,11 个单元自成系统,通过泵站、河道相联系。

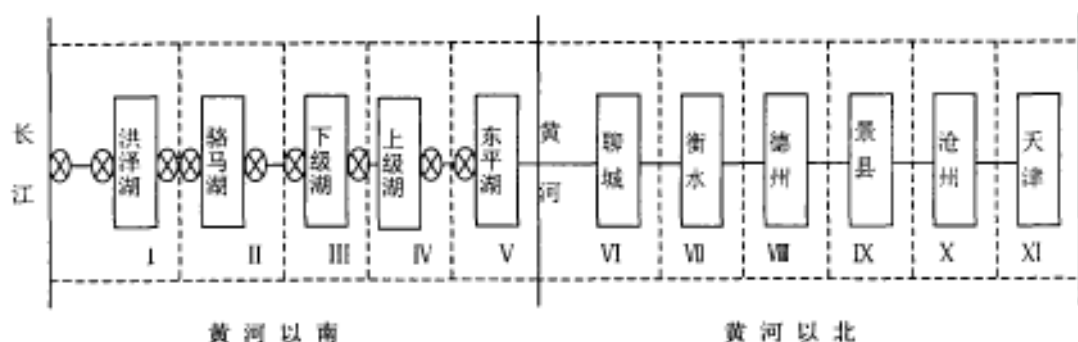


图 4-1 水量调配模型简化图

### ● 黄河以南子系统

黄河以南水量调配示意图见图 4-2 所示。根据黄河以南具体特点,黄河以南子系统建模时具体考虑了以下几个主要因素:

(1). 突出五个湖泊本身的调节能力,反映各湖泊之间的水量调配,忽略输水河网的调蓄功能;

(2). 以湖泊为中心,相应的将湖泊之间的复杂状况简化为单一河道,各湖泊形成串联结构,抽水泵站群复合在个湖泊出口和入口;

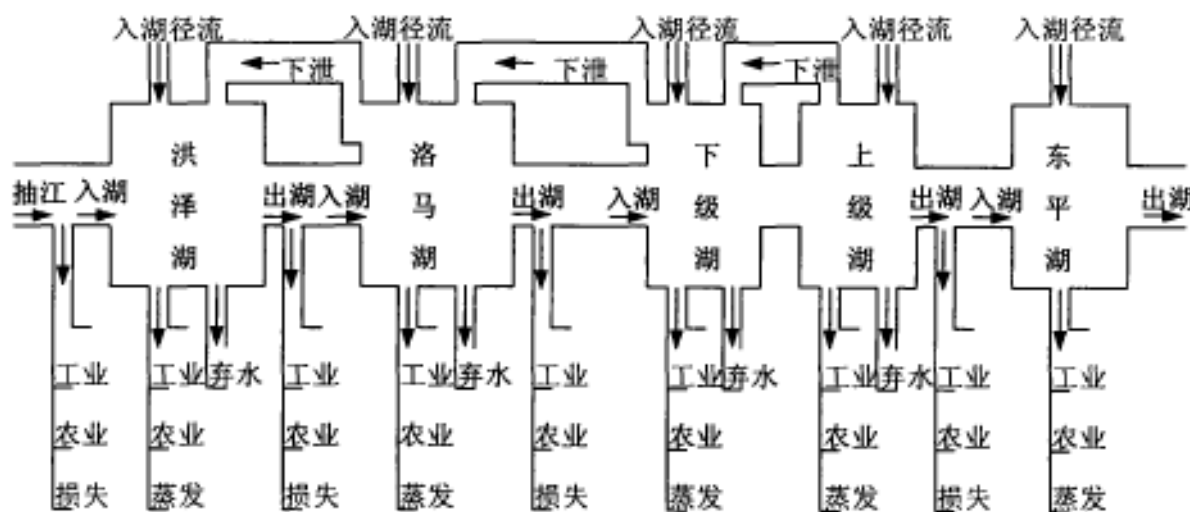


图 4-2 黄河以南水量调配示意图

(3). 对于系统内的各级泵站, 只考虑其补给过程 (抽水时间和抽水水量), 忽略水头变化对抽水效率的影响。

黄河以南子系统以五大湖泊为基础划分为 5 个计算单元 (每个单元为一片):

- |                      |        |
|----------------------|--------|
| ①. (长江~洪泽湖区间)+洪泽湖湖区  | ——洪泽湖片 |
| ②. (洪泽湖~洛马湖区间)+洛马湖湖区 | ——洛马湖片 |
| ③. (洛马湖~下级湖区间)+下级湖湖区 | ——下级湖片 |
| ④. (下级湖~上级湖区间)+上级湖湖区 | ——上级湖片 |
| ⑤. 梁济运河区间+东平湖湖区+胶东半岛 | ——东平湖片 |

### ● 黄河以北子系统

黄河以北水量调配示意图见图 4-3 所示。黄河以北子系统概化为 6 个分水口门, 相应的分为 6 个片, 为了提高供水区供水保证率, 规划了四座蓄水工程: 北大港水库、大浪淀水库、千顷洼水库和大屯水库。根据黄河以北具体特点, 建模时具体考虑了以下几个主要因素:

(1). 突出了河道本身的调节能力, 考虑了水库、蓄水河道的调节水量能力和它们之间的相互补偿作用;

(2). 以河道为中心, 相应的将河道之间的复杂状况简化为单一河道, 各蓄水河道形成串联结构;

(3). 各片内有需水量和水库蒸发量, 内部不再考虑输水损失。

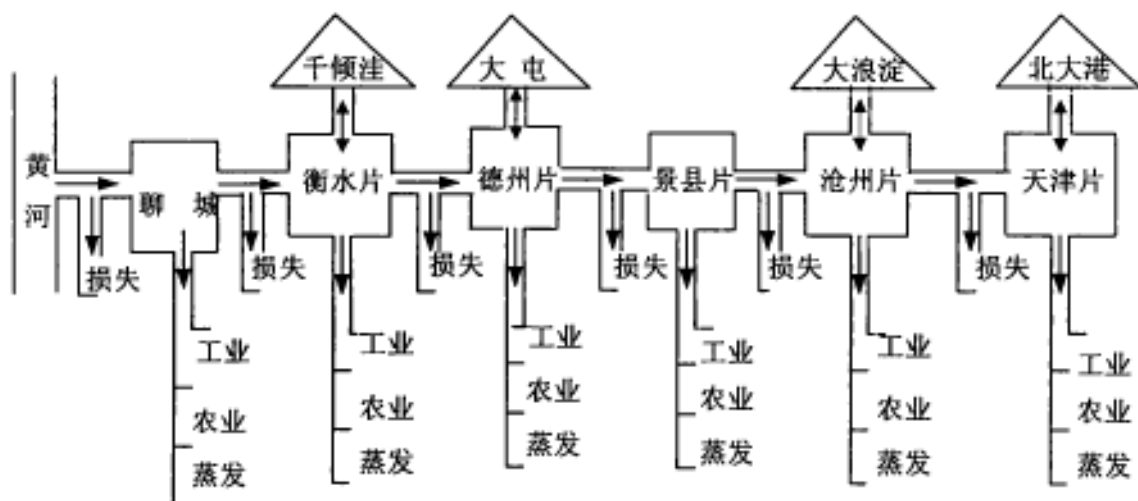


图 4-3 黄河以北水量调配示意图

黄河以北子系统分为 6 个计算单元 (每个单元为一片): (1). 聊城片; (2). 衡水片; (3). 德州片; (4). 景县片; (5). 沧州片; (6). 天津片。各片对应的调蓄水库

见图 4-3 所示,衡水片对应千顷洼水库;德州片对应大屯水库;沧州片对应大浪淀水库;天津片对应北大港水库;聊城片和景县片没有调蓄水库。

### 3. 数学模型

#### 目标函数

南水北调东线工程是一个多水源、多用户、多调节水库的大系统,各地区的权益具体表现在获得的水量上,如何协调各地区与各用水部门之间的矛盾,使工程发挥最大效益,是一个多目标决策分析的问题,为了突出整个工程的供水效益,将多目标的综合利用问题转化为单一目标求解,其效益均用供水量表示,取缺水量最少作为优化计算的目标函数。

$$OBJ = \min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n TB(i, j)$$

#### 水量平衡方程式

根据图 4-1 水量调配模型简化图,系统由 11 个计算单元组成,各单元在每一时段之间的联系都应符合水量平衡原理。各单元之间关系如图 4-4 所示,水量平衡方程式为:

$$V(i, t+1) = V(i, t) + Q(i, t) + PR(i, t) + T(i, t) - W(i, t) - PC(i, t) - D(i, t) - Los(i, t)$$

其中:

$$Q(i, t) = \sum_{j=1}^2 Q_j(i, t)$$

$$W(i, t) = \sum_{j=1}^2 W_j(i, t)$$

$$T(i, t) = \sum_{j=1}^2 TB_j(i, t)$$

$$D(i, t) = D_o(i, t) + D_l(i, t) - D_r(i, t)$$

$$Los(i, t) = \sum_{j=1}^2 B_j(i, t)$$

式中:

$Q_1(i, t)$ ,  $Q_2(i, t)$  分别表示第  $i$  片,  $t$  时段湖区和区间的天然径流量;

$W_1(i, t)$ ,  $W_2(i, t)$  分别表示第  $i$  片,  $t$  时段湖区和区间的预测需水量;

$PR(i, t)$ ,  $PC(i, t)$  分别表示第  $i$  片,  $t$  时段调入、调出的水量;

$TB_1(i, t)$ ,  $TB_2(i, t)$  分别表示第  $i$  片,  $t$  时段湖区缺水量和区间缺水量;

$V(i, t)$ ,  $V(i, t+1)$  分别表示第  $i$  片,  $t$  时段湖泊的时段初库容和时段末库

容:

$B_1(i, t)$ ,  $B_2(i, t)$  分别表示第  $i$  片,  $t$  时段湖面降雨与蒸发的代数和以及输水损失;

$D_o(i, t)$ ,  $D_i(i, t)$ ,  $D_l(i, t)$  分别表示第  $i$  片,  $t$  时段从河网泄入湖泊、从湖泊泄入河网和从湖泊泄入系统外的余水量;

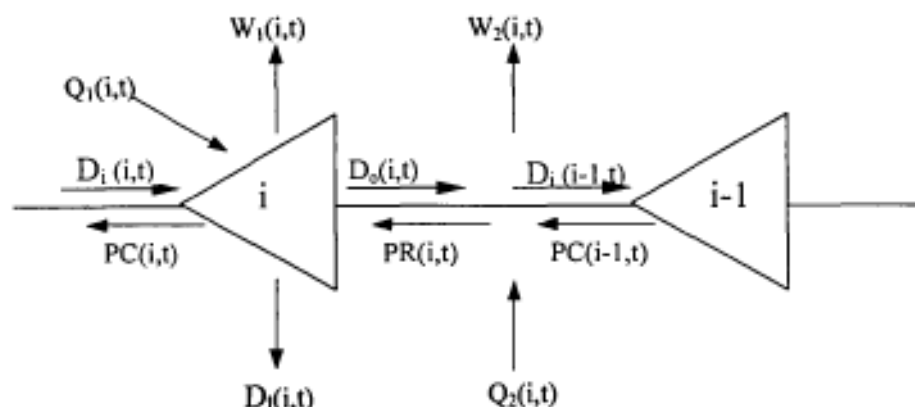


图 4-4 计算单元关联图

约束条件:

(1). 保证率约束: 各段、各部门供水保证率应达到设计保证率要求;

(2). 蓄水库容约束:  $V_{\min}(i, t+1) \leq V(i, t+1) \leq V_{\max}(i, t+1)$

(3). 抽水能力约束:  $PR(i, t) \leq PR_{\max}(i, t)$

$$PC(i, t) \leq PC_{\max}(i, t)$$

(4). 弃水量约束:  $D_o(i, t) \leq D_{o, \max}(i, t)$

$$D_i(i, t) \leq D_{i, \max}(i, t)$$

$$D_l(i, t) \leq D_{l, \max}(i, t)$$

(5). 北调控制线约束:  $V_{\min}(i, t) \leq V(i, t) \leq V_l(i, t)$

其中:

$PR_{\max}(i, t)$  ——第  $i$  库  $t$  时段的入库规模;

$PC_{\max}(i, t)$  ——第  $i$  库  $t$  时段的出库规模;

$D_{o, \max}(i, t)$  ——第  $i$  片  $t$  时段河网的承泄能力;

$D_{i, \max}(i, t)$  ——第  $i$  片  $t$  时段湖泊的承接泄水的能力;

$D_{l, \max}(i, t)$  ——第  $i$  片  $t$  时段泄出系统外的能力;

$V_l(i, t)$  ——第  $i$  库  $t$  时段北调控制线。

( $i=1, 2, 3, \dots, 11, t=1, 2, 3, \dots, 36$ )

**边界条件:**

- (1). 起调水位:  $H_1(i,1) = H_x(i)$  ( $i=1, 2, \dots, 9$ )
- (2). 传递条件:  $H_j(i,36) = H_{j+1}(i,1)$  ( $i=1, 2, \dots, 9$ )  
( $j=1, 2, \dots, 42$  年)
- (3). 各级工程规模和北调控制线在方案比较时可取不同值。

其中:

- $H_1(i,1)$  ——第  $i$  库第一年第一时段的水位;  
 $H_x(i)$  ——第  $i$  库的汛限水位;  
 $H_j(i,36)$  ——第  $i$  库、第  $j$  年最后一个时段的末水位;  
 $H_{j+1}(i,1)$  ——第  $i$  库、第  $j+1$  年第一个时段的初水位。

**4. 水文系列和计算时段**

本论文采用的水文系列从 1956 年 7 月到 1997 年 6 月共 42 年水文资料, 各湖泊规划入湖径流为天然径流扣除规划水平年的上游用水。

计算中各水库按水文年 7 月 1 日至次年 6 月 30 日统一调度, 黄河以南各湖泊起调水位为汛限水位, 黄河以北各水库起调水位取满库容的一半, 计算年内以旬为单位划分计算时段, 全年共 36 个计算时段。

**5. 计算过程:**

调节计算对数学模型采用了以黄河为分界线, 以穿黄水量为关联变量, 黄河以南和黄河以北子系统分别调算的方法。先根据工程规模计算黄河以南各片的调入、调出各湖的水量和穿黄的水量, 将这一穿黄水量作为黄河以北调度的输入, 进行黄河以北的调节计算, 再判断黄河以北各片的缺水、余水情况, 调整黄河以南穿黄水量, 重新进行黄河以南调算, 再计算黄河以南各湖调入、调出湖和穿黄水量, 反复迭代, 直到黄河以北的缺水、余水达到满意程度为止。

**§ 4. 4 本章小结**

本章运用系统分析的方法建立南水北调东线水量调配模型。通过对跨流域调水工程所涉及的水资源问题的分析, 给出了南水北调东线工程水量调度的原则和数学模型, 并给出了调度模型的计算过程以及调算的水文系列和计算时段。

## 第五章 仿真系统开发

### § 5. 1 主要软件介绍

在南水北调工程仿真系统中, 选择了具有跨平台功能的面向对象的 JAVA 语言来建立模型, 数据库采用基于客户服务器结构的 SYBASE 数据库。

#### § 5. 1. 1 JAVA 语言

Java 语言是 1995 年 5 月由 Sun 公司推出的一种通用的面向对象的程序设计语言 (Object-Oriented Programming, OOP)。它是网络时代的一颗明星。Java 语言实际上包含了两层意思: 第一, 它是 Sun 公司研制的新型简化的基于对象的开放系统语言, 允许软件开发人员将应用分布到环球网 (World Wide Web) 或由信息系统厂商所开发的任一前端设备上; 第二, 它是一种虚拟机 (或称 Java 虚拟机), 它最终可使所有基于 Java 的应用程序成为普遍存在的程序, 即不管硬件或操作系统环境, Java 应用程序都可以运行。Java 语言具有以下特性:

- 简单性

Java 的成功归因于 Java 语言以 C 和 C++ 为基础, 同时 Java 语言更加简洁, 数据类型更加明确, 没有指针, 简化了内存管理工作, 没有庞大的、结构复杂的和相关性很强的类库等等。

- 平台无关性

Java 语言的核心技术就是对可执行内容执行与平台无关的访问。所有的 Java 代码都是在物理上不存在的机器上编译使用的, Java 编译器首先将 Java 代码编译成字节码, 并集成成一个平台独立文件, 由 Java 虚拟机解释执行, 它直接导致了 Java 语言的可移植性和体系结构的中立性。

- 面向对象性

面向对象的编程技术已成为当今最先进的编程技术, Java 也是该技术的受益者。Java 语言的设计完全针对对象和接口, 并采用类的机制和状态接口技术, 通过结构层次模型来封装状态变量及其方法, 通过继承机制来实现代码的可重用性。

- 动态性和分布性

在集成方式上, Java 在后期才建立各模块之间的互连, 各个库可以自由增加新的方法和实例变量。Java 是一种支持 WWW 客户机/服务器计算模式的编程语言。采用 Java 所提供的类库可以很方便地处理 TCP/IP 协议, 同时 Java 还提供了一种通过定位 URL 地址来访问网络上其它对象的机制。

- 安全性和稳固性

用 Java 编写的代码是健壮和可靠的。Java 不支持指针变量，更不允许对内存进行操作；在语言上，Java 对类型化的要求比 C++ 更严格，并要求显示方法申明，Java 执行运行时检查，以保证所有资料和对串的引用不越界。在编译时，Java 提示可能的例外，帮助程序员采取措施防止系统崩溃。另外，Java 实时对内存进行管理，自动进行垃圾收集，满足程序释放未使用内存的需求。

- 可移植性

Java 采用了多种机制来保护可移植性，其中最主要的有两条：第一，从本质上讲，Java 是解释型的，因而，只要配备了 Java 解释器，任何一台机器都可以运行 Java 程序；第二，Java 的数据类型在任何机器上都是一样的。

- 多线程、高性能

可移植性、稳定性、安全性、解释性等语言特性的确牺牲了 Java 的性能，但它却能在如下两方面得到弥补：第一，支持多线程；第二，Java 编译器可以生成高效的字节码。

## § 5. 1. 2 Sybase 数据库

基于客户/服务器模式的 SYBASE 系统体系结构如图 5-1 所示。它的基本特点是：

- 服务器优化资料存取；
- 客户应用优化用户界面；
- 将业务规则化以保证数据完整性；
- 客户/服务器结构简化了应用维护。

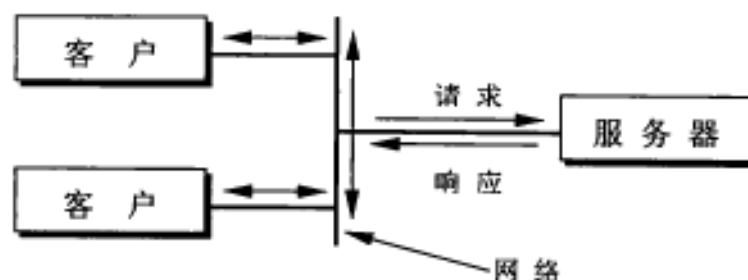


图 5-1 客户/服务器体系结构

SYBASE 客户机/服务器数据库环境：

### 1. 两层配置模式的客户/服务器体系结构

在两层配置模式中，客户应用直接与服务器进行连接，第一层为客户应用程序

序,主要是指实现应用逻辑和资料表现的开发工具软件;第二层为服务器应用程序,它提供直接服务管理和处理众多的连接操作。

## 2. 基于组件方式的三层体系结构

三层配置的主要特点是增加了基于组件方式的中间件层软件,该层能为分布式异构环境提供全局性的资料访问及事务管理控制。

## § 5. 2 仿真系统的总体设计

### § 5. 2. 1 仿真系统研制的目标

建立该仿真系统的目的是为南水北调工程决策提供方便实用的科学分析工具和仿真平台,从宏观上考虑和分析问题,为工程的决策提供技术支持。因此该仿真系统总体目标为:

①将主要从工程整体和宏观上的研究需要方面进行仿真系统的开发,使得所建立的仿真系统可以满足工程运行和调度方案预演和研究;

②主要从宏观意义上来考虑问题和建立仿真模型,对局部特性(如泵的过渡过程)可忽略不计或进行简化处理;

③具有良好的人机界面和图表、数字和曲线处理功能;同时具有较为逼真三维仿真结果的显示能力并且提供方便实用的二维显示,为使用者提供直接的可视化仿真结果和过程;

④该仿真系统由于涉及面广、数据处理量大和输入输出复杂,采用分布式技术,组成分布式仿真系统,满足仿真系统的要求;

⑤该仿真系统可进行参数修改和多种方案的选择仿真分析。

### § 5. 2. 2 系统的 C/S 体系结构

本系统的体系结构采用的是九十年代新兴的网络技术——客户服务器工作方式(C/S)。C/S结构是把一个完整的系统化分为两部分,分配到不同的计算机上以达到最佳的处理效果,在这一结构中,计算机按照分工的不同而分为客户机和服务器,即前端和后端。前段通常为一个智能的工作站上,它接受并处理用户请求,在需要时它把请求传送到后台服务器,让服务器来执行,把执行结果表达给用户。后端通常为提供服务的专用服务器,它通过网络接受请求,然后把请求处理后回送到客户机。本系统的体系就是这样一种典型的C/S结构,它的主要优点是整体性能优化,能实现资料的集中管理,系统缩放性好,易于扩充并支持开放性。

一个完整的客户机/服务器系统除了有网络、服务器、客户机等硬件外,还必须有相应的软件。这些软件可分为三类:

### 1. 服务器软件

服务器软件提供各种服务，它通常是在专用服务器上运行。服务器软件根据客户的请求提供相应的服务。本系统的服务器软件是：

操作系统：Windows 2000 Server

数据库管理系统：Sybase，它提供数据库服务和文件服务。

### 2 客户机软件

客户机软件提供应用编程接口，它接受用户的输入，并把输入转换成服务器接受的形式，通过网络传递给服务器。同时，它还负责接受服务器的回送信息，把它表达给用户。本系统的客户软件为：

操作系统：Windows 2000 Professional，

前端开发工具：系统开发采用 JAVA 语言。

### 3 连接软件

连接软件一般都是建立在网络协议（传输层）之上。它驻留在服务器与客户机两端，其主要作用是提供透明的网络连接与服务，让开发人员直观地使用网络，这是客户机/服务器结构的基本特征。

本系统网络协议采用的 TCP/IP 协议。

## § 5. 2. 3 系统流程

南水北调东线水量调度仿真系统分为黄河以北子系统和黄河以南子系统，总系统流程见图 5-2 所示，黄河以北和黄河以南子系统相互独立又相互联系，以穿黄水量作为黄河南北子系统的关联变量。

水量调算首先以穿黄工程规模作为穿黄水量进行黄河以南水量调算，即  $PC_1[5]=PC_{max}[5]$ ，将修正后的穿黄水量  $PC'_1$  传递给黄河以北子系统进行黄河以北水量分配，判断弃水量  $Q_{aban}$  或缺水量  $Q_{short}$ ，若  $Q_{aban}$  或  $Q_{short} \geq \Delta$ ，则说明黄河以南水量调算出的穿黄水量很大或很小，产生大量的弃水或水量不足。此时返回黄河以南重新调算，穿黄水量发生改变， $PC_2[5]=PC'_1[5]-Q_{aban}$  或  $PC_2[5]=PC'_1[5]+Q_{short}$ ，得到新的修正后的穿黄水量  $PC'_2$ ，判断弃水量或余水量；逐次叠代，直到弃水  $Q_{aban} < \Delta$  或  $Q_{short} < \Delta$  为止。黄河以南水量调算首先以工程规模进行调算，此时得到的穿黄水量是黄河以南水量调算在本时段所能提供的最大穿黄水量，如果黄河以北此时仍缺水，说明工程在满负荷状态下运行仍不能保证黄河以北在本时段的水量需求。

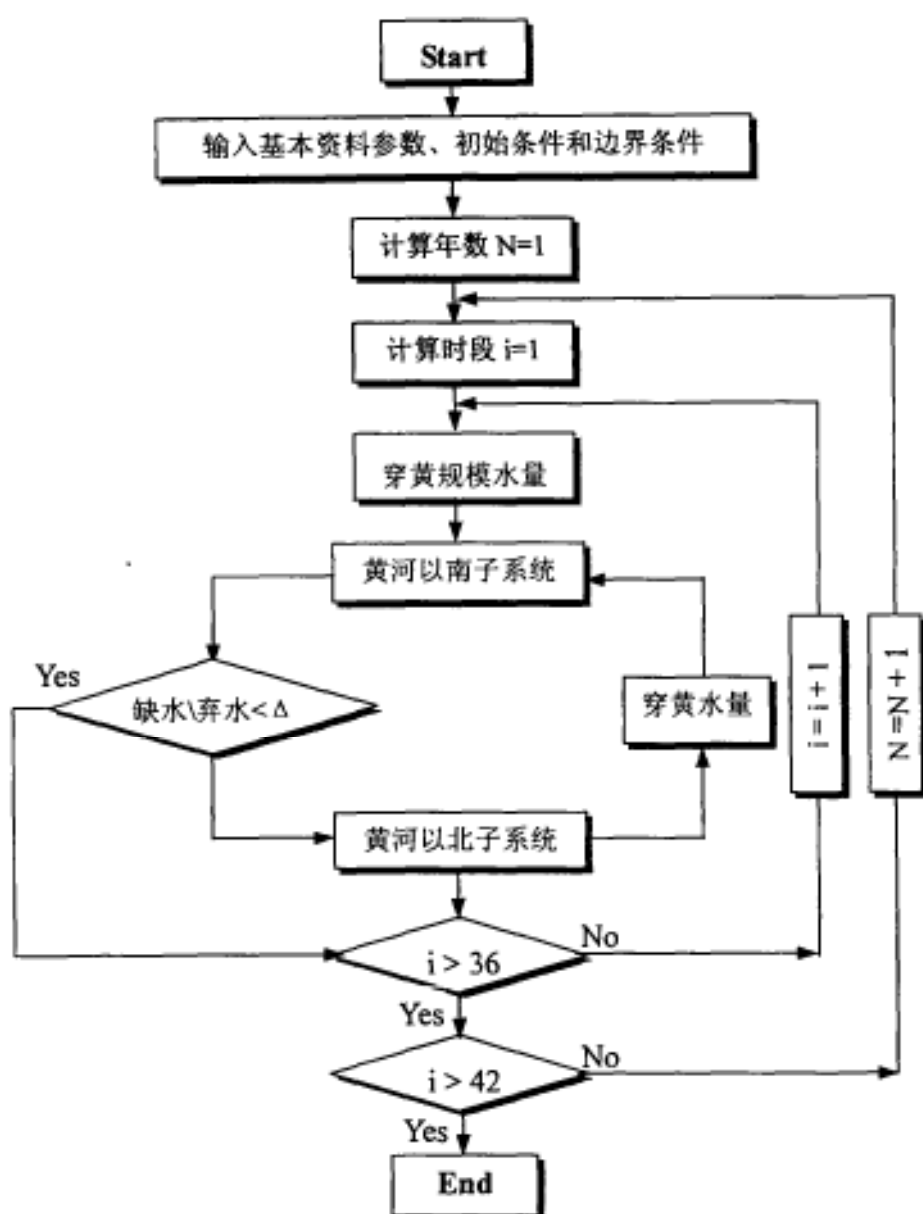


图 5-2 南水北调东线水量调度仿真系统流程图

### 1. 黄河以南

黄河以南子系统流程图见图 5-3 所示。黄河以南子系统水量调算的基本思路是首先假定末水位和出湖过程均是最大值，抽入湖过程未知，逆流进行水量平衡计算，得到最大抽入湖过程，但实际能否提供出湖规模的流量是未知的，此时，以求得抽入湖过程作为已知，顺流向进行水量平衡计算，修正出湖过程，然后再逆流进行计算以修正抽入湖过程，逐次叠代。图中 IP 为叠代次数， $(E_{IP} - E_{IP+1})$  表示两次迭代之差。

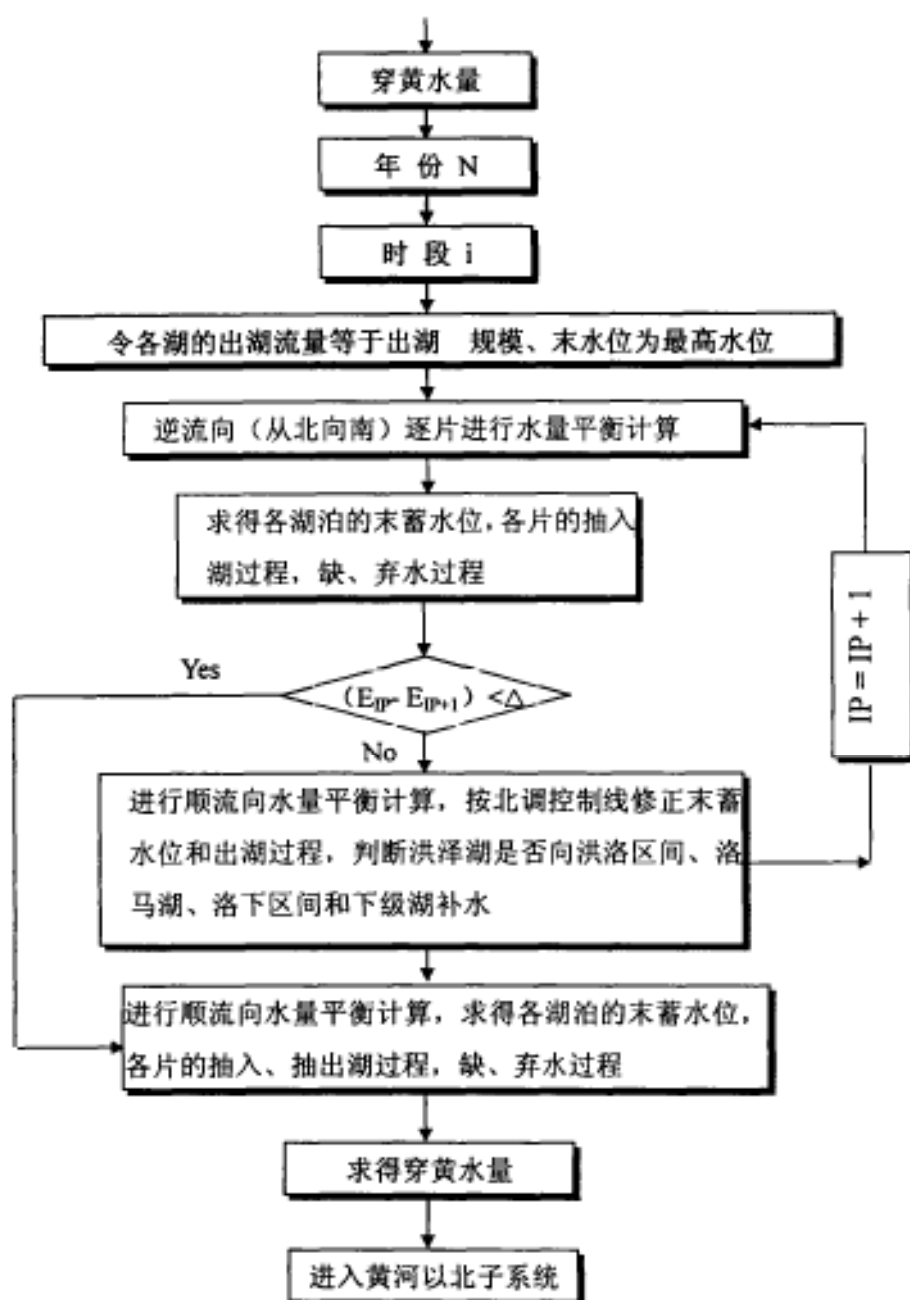


图 5-3 黄河以南子系统流程图

## 2. 黄河以北

黄河以北子系统实际上是水量分配过程, 将穿黄水量分给每个片, 由于黄河以北聊城片和景县片没有调蓄水库, 因此, 在水量分配时要重点照顾, 并对天津片供水优先考虑。当黄河以北有弃水或缺水时, 将弃水或缺水折算到黄河边, 判断是否返回到黄河以南子系统重新叠代计算。黄河以北子系统流程图见图 5-4 所示。

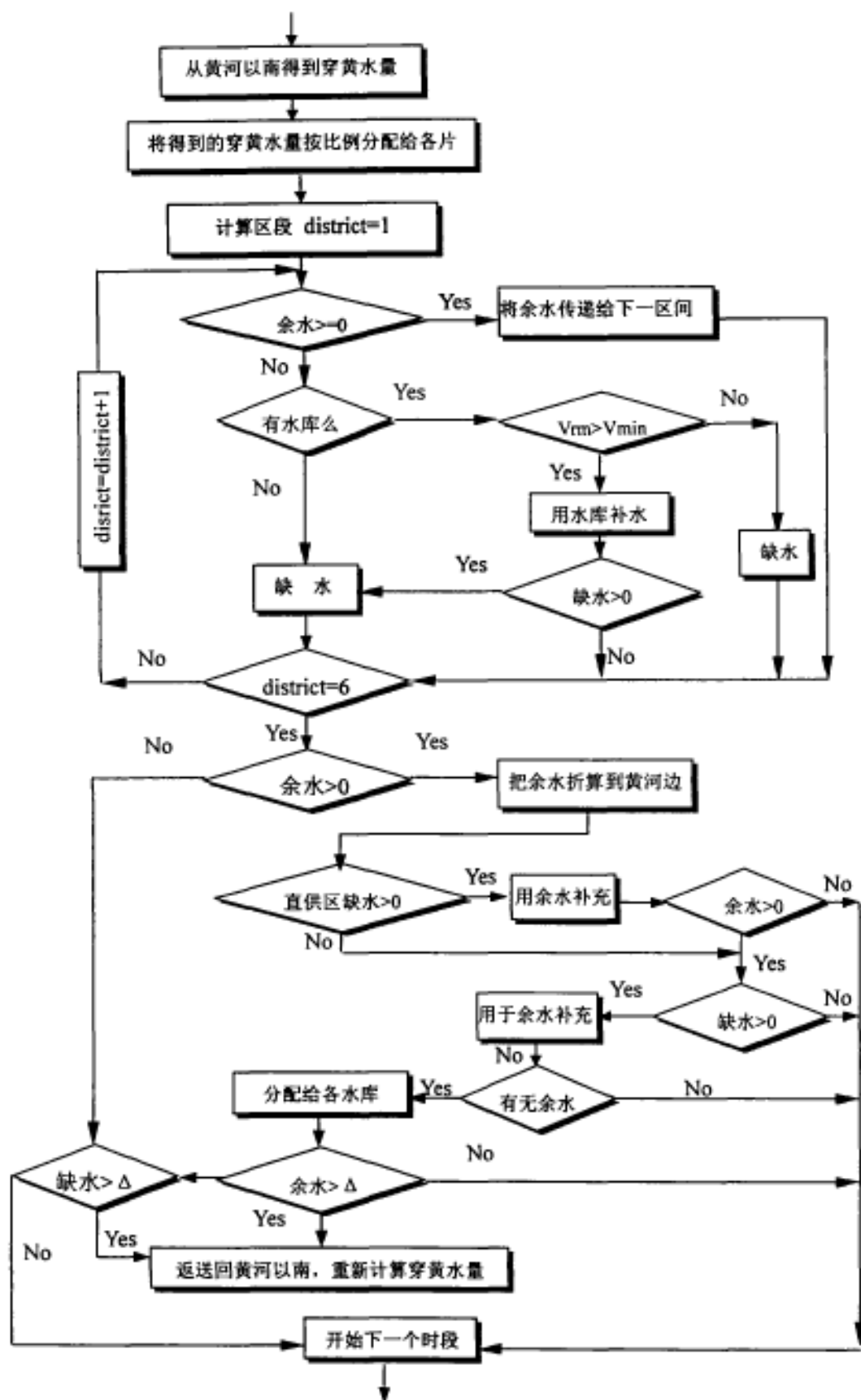


图 5-4 黄河以北子系统流程图

### § 5.3 访问数据库

Java 语言所具有的安全性、可移植性，容易理解，方便使用等特点，使得它成为发展数据库应用的极好的语言基础。本系统采用基于客户/服务器结构的 Sybase 数据库，本系统为应用程序与数据库连接，提供了两种实现方式：1. 利用 JDBC 接口直接与数据库相连；2. 通过 ODBC 与数据库连接。

#### § 5.3.1 利用 JDBC 与数据库直接连接

利用 JDBC 与数据库直接连接是本调度系统中与数据库相连的主要手段。JDBC (Java DataBase Connectivity, JAVA 数据库连接) 是一种支持基本 SQL 功能的一个通用低层的应用程序编程接口 (API)，由一组用 Java 语言编写的类和接口组成。JDBC 主要有两种接口，分别是面向程序开发人员的 JDBC API 和面向底层的 JDBC Driver API。JDBC API 是一系列抽象的接口，它使得应用程序员能够进行数据库连接，执行 SQL 声明，并且得返回结果。这些接口及其描述如表 1 所示。

表 1 JDBC API 接口

| 接 口                        | 描 述               |
|----------------------------|-------------------|
| java.sql.Driver            | 为一个数据库 URL 定位驱动程序 |
| java.sql.Connection        | 与一个指定的数据库进行连接     |
| java.sql.Statement         | 执行 SQL 语句         |
| java.sql.PreparedStatement | 处理参数化的 SQL 语句     |
| java.sql.CallableStatement | 处理数据库中存储过程的调用     |
| java.sql.ResultSet         | 获取 SQL 语句的执行结果    |
| java.sql.DatabaseMetaData  | 提供数据库的有关信息        |
| java.sql.ResultSetMetaData | 提供数据库返回的结果集的有关信息  |

jConnect 是 Sybase 高性能的 JDBC 驱动程序。Jconnect 使用的协议是 TDS5.0 (Tabular Data Stream, version 5)，用于 Adaptive Server 和 Open Server 应用程序的本地协议。jConnect 实现 JDBC 标准，提供到 Sybase 系列产品的优化的连接。

#### 1. 系统环境变量设置

当安装 Sybase Client 端软件时，需要安装 jConnect，缺省为安装该软件。安装完后，需要在系统环境变量 CLASSPATH 中增加 jConnect 类路径，具体设置方法如下：

## ①. 设置 JDBC\_HOME

JDBC\_HOME 指明了 jConnect 的安装路径。例如, 如果 Sybase 是安装在 C 盘根目录下, 即 C:\Sybase, 则 JDBC\_HOME 设为:

C:\Sybase\jConnect-4\_2

## ②. 设置 CLASSPATH

CLASSPATH 是用来定位 jConnect 运行时类, 亦即调用 jConnect 类时的寻找路径, 其设置与所用的 JDK 版本和 jConnect 的版本有关。我们使用的是 JDK1.2, jConnect-4\_2, 则在 Windows 系统下的 CLASSPATH 设置为:

%JDBC\_HOME%\classes

## 2. 与 Sybase Adaptive Server 连接

Java 程序定义了一个使用 jConnect 驱动程序连接 Adaptive Server 的 URL, 其基本形式如下:

*jdbc:sybase:Tds:host:port/database*

|                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| 其中: <i>jdbc:sybase</i> | 指明了驱动器                       |
| <i>Tds</i>             | 通信协议                         |
| <i>host</i>            | Adaptive Server 的主机名 (物理机器名) |
| <i>port</i>            | Adaptive Server 在主机上的监听端口    |
| <i>database</i>        | 指定所要连接的数据库, 可选               |

本论文中建立一个到 Adaptive Server 的连接, 该 Server 所在的主机名是“bjsc-server”, 监听端口号为 5000, 数据库名是 NSBD。

源代码是:

```
SysProps.put("user","userid");
SysProps.put("password","user_password");
String url = "jdbc:sybase:Tds:bjsc-server:5000/NSBD";
Connection con = DriverManager.getConnection(url,SysProps);
```

调度系统要与数据库通信, 因为原始资料大多为资料文本文件或者是 .mdb 格式的数据库文件, 且水文原始资料的编辑在 Microsoft Access 下操作比较方便, 所以还要设置一个 Access 数据库的 ODBC 资料源。待试验资料测试完后, 即往 Sybase Adaptive Server 导入, 然后开始在新的数据库中运行。这样一来, 就得修改源程序, 变换与数据库的连接, 这是件很麻烦的事。因此, 兼容本机上的 ACCESS 数据库, 把有关数据库连接的信息做成一个属性文件, 另外编写一个类, 用于读取相应的

属性文件，建立对数据库的连接，而在应用程序中只须调用这个类即可，修改只在属性文件中进行。

### § 5.3.2 通过 ODBC 与数据库连接

ODBC (Open DataBase Connectivity) 即开放式数据库互联标准，是连接 windows 系统中的数据库的一种方式。通过 ODBC，开发人员不用关心他们在与之相连的特定数据库。通过使用 ODBC 能够超越特定的数据库，而是在一个抽象的水平上与数据库建立连接。当通过 ODBC 访问一个数据库时，该数据库必须已经被作为数据源被指定，应用程序只需要知道它的数据源名称，见图 5-5 所示。



图 5-5 客户应用程序通过 ODBC 与数据库的连接

在安装好 SYBASE 客户端软件，建立 SYBASE ODBC 资料源，进行 ODBC 配置，就建立 ODBC 的数据库连接，程序中就可以访问这个 ODBC 资料源了。

### § 5.4 调度软件的建立

启动南水北调东线水量调配仿真系统，就可以进入到主界面。本系统的主要功能有七项，可以进行基本资料查询、修改模型参数、进行仿真试验，调度计算、调度结果查询以及提供帮助信息。主界面如图 5-6 所示。

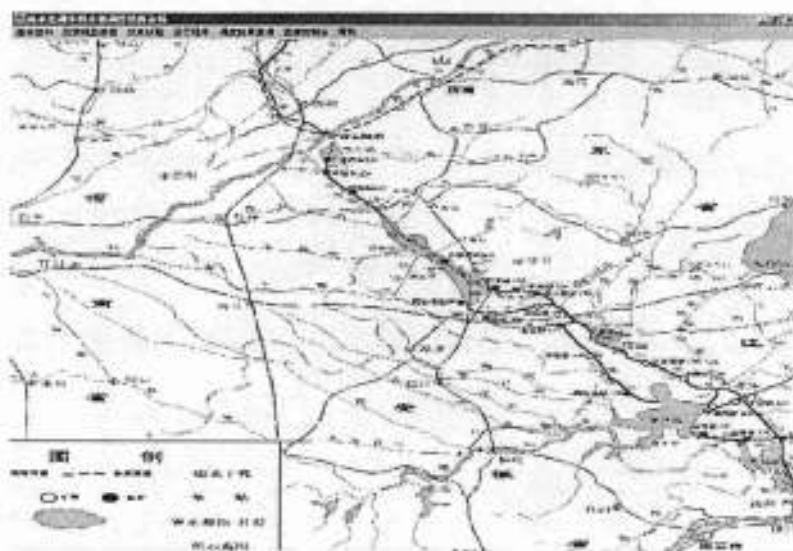


图 5-6 南水北调东线水量调配仿真系统主界面

基本资料查询栏可以查询黄河以南、黄河以北各水湖、库的基本信息和各片的

基本数据资料:

在水量调算时需要改变模型参数,可以修改的模型参数有黄河以南、黄河以北输水损失、需水资料、损失资料,工程规模、和分水系数等。如图 5-7 为修改黄河以南的工程规模参数:

本系统提供恒定数拉偏试验和基于数理统计的随机数拉偏试验,拉偏试验随机数的产生见图 5-8 所示:



图 5-7 修改工程规模



图 5-8 产生随机数

本系统既可以进行 42 年的水量调算,也可以选择某一年进行水量调节计算分析;

本系统可以进行各种规模的结果查询,可以实时查询仿真结果,结果输出形式多样,可以进行图形输出也可以数据列表输出。如图 5-9 为图形输出界面;图 5-10 为数据列表输出界面。

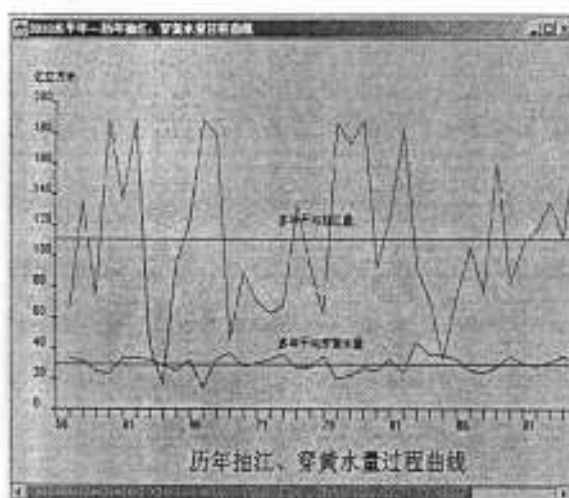


图 5-9 图形输出界面

| 年份   | 月份 | 入江干渠流量  | 入供渠流量 | 出供渠流量      | 入海干渠流量    | 出海干渠流量    | 入下区干渠流量 | 出下区干渠流量 | 入上区干渠流量 | 出上区干渠流量 | 入东干渠流量 | 出东干渠流量 | 入西干渠流量 |
|------|----|---------|-------|------------|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 1950 | 1  | 5171.95 | 12.5  | 0.0        | 0.0       | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1950 | 2  | 3149.19 | 13.0  | 0.0        | 440.5     | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1950 | 3  | 1944.19 | 13.0  | 0.0        | 447.0     | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1950 | 4  | 1167.75 | 13.0  | 0.0        | 452.0     | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1950 | 5  | 202.54  | 13.0  | 268.34261  | 445.0     | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1950 | 6  | 215.83  | 13.0  | 216.72224  | 455.0     | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1950 | 7  | 111.32  | 13.0  | 186.85570  | 311.0     | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1950 | 8  | 10.06   | 13.0  | 337.86670  | 311.0     | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1950 | 9  | 7.30    | 13.0  | 268.11670  | 349.34700 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1950 | 10 | 8.85    | 13.0  | 225.71670  | 214.18700 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1950 | 11 | 779.67  | 13.0  | 19.800700  | 231.73100 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1950 | 12 | 195.19  | 13.0  | 15.840700  | 235.20700 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1951 | 1  | 243.44  | 13.0  | 28.470700  | 231.71100 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1951 | 2  | 138.0   | 13.0  | 158.31670  | 263.14700 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1951 | 3  | 130.0   | 13.0  | 268.11670  | 263.14700 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1951 | 4  | 186.00  | 13.0  | 213.00070  | 261.18700 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1951 | 5  | 451.37  | 13.0  | 0.0        | 216.18700 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1951 | 6  | 267.39  | 13.0  | 0.0        | 268.06700 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1951 | 7  | 335.87  | 13.0  | 58.160700  | 338.20700 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1951 | 8  | 9.9     | 13.0  | 440.83074  | 480.18377 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1951 | 9  | 0.0     | 13.0  | 113.864745 | 473.86372 | 479.84877 | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1951 | 10 | 0.0     | 13.0  | 113.864745 | 479.84877 | 479.84877 | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |
| 1951 | 11 | 1185.45 | 13.0  | 0.0        | 454.16666 | 0.0       | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0     | 0.0    | 0.0    | 0.0    |

图 5-10 数据列表输出界面

### § 5.5 本章小结

本章首先介绍了调度仿真系统的硬件环境，介绍了 Java 语言和 Sybase 数据库的特点；进行了系统的总体设计，给出了系统流程图；详述了本系统数据库访问形式；建立了调度仿真软件。

## 第六章 调度结果分析

### § 6.1 引言

江苏省江水北调工程在南四湖以南已经形成 9 个梯级,但各梯级间级配并不协调。入洪泽湖的规模为  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ,出洪泽湖的工程规模小于  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ,出洛马湖~南四湖下级湖仅为  $50\sim 20 \text{ m}^3/\text{s}$ ,形成卡水段,限制了工程能力的发挥。从江水北调现状的运行分析,工程的利用率较低,尤其在冬春季节更低,工程尚有潜力可以开发。

根据海河流域和东线供水区城市水资源规划成果,北方地区缺水量是逐渐增加的,而东线工程又便于分期实施。因此,采取“分期实施,先通后畅”的办法实施南水北调东线工程是经济可行的。目前,江苏省江水北调工程,江都泵站等不少梯级泵站运行小时较低,黄河以北有引黄济津输水河渠可以利用,只需扩建现有部分,扩挖梁济运河和柳长河,就可打通从长江到天津 1000 多公里的输水干渠,达到先通后畅送水到天津的目标。

根据工程规划,南水北调东线工程共分了三步,即应急工程、一期工程和二期工程,由于本课题缺少二期工程的资料,所以进行水量调算是以应急工程和一期工程为主。按照优先满足供水区内城市用水的调度原则,采用 1956~1997 年 42 年水文资料进行各种方案的水量调节计算。

### § 6.2 现状工程规模

为了与规划调水工程相比较,首先调算现状工程规模状况下的调水能力。现状工程规模见表 6-1 所示。现状调水过程是根据现状的工程规模,利用一期工程规模的需水量根据前面所述的调度原则进行水量调算,得到的多年平均调水量见表 6-2 所示。

表 6-1 南水北调东线工程现状工程规模

单位:  $\text{m}^3/\text{s}$

| 区 段  | 抽 江       | 入洪泽湖 | 出洪泽湖 | 入洛马湖 | 出洛马湖 | 入下级湖 |
|------|-----------|------|------|------|------|------|
| 工程规模 | 400 (200) | 200  | 200  | 150  | 50   | 20   |
| 区 段  | 出下级湖      | 入上级湖 | 出上级湖 | 入东平湖 | 穿黄河  | 山东半岛 |
| 工程规模 | 0         | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

注:抽江 400 (200), 括号中为 5 到 8 月的抽江规模。

表 6-2 南水北调东线工程现状规模调水量

单位: 亿  $m^3$ 

| 区 段  | 抽 江  | 入洪泽湖 | 出洪泽湖 | 入洛马湖 | 出洛马湖 | 入下级湖 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 多年平均 | 50.9 | 26.3 | 24.8 | 12.1 | 9.3  | 2.5  |
| 区 段  | 出下级湖 | 入上级湖 | 出上级湖 | 入东平湖 | 穿黄河  | 山东半岛 |
| 多年平均 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

### § 6.3 应急工程规模

应急工程规划水平年为 2005 年,其主要目标是尽快具备向天津供水的能力,遇到北方连续干旱,可在冬春季节(10 月到次年 4 月上旬)向黄河以北紧急供水,并为山东半岛提供水源条件。

由于应急工程主要利用江水北调工程的潜力,遇淮河枯水年将产生南北供水矛盾,供水不稳定,只是作为第一期工程的一个实施步骤和解决北方地区缺水问题的暂时性的过渡措施;同时,调水水质状况是南水北调东线调水工程一个关键的问题。目前,东线工程沿线水质较差,能否提供给北方清洁的水源,仍不能给予以准确答案。许多单位对此进行过研究并提出不同的看法,清华大学和淮河水利委员会认为调过黄河水质状况在现有的制污规划下可以达到三类水;中国环保局认为只能达到四类水;南水北调工程仿真结果得到的结论是:目前的制污规划不能够满足调水要求。对于此项事关东线工程成败却又无法给与准确解释的问题,只能用实践证明,应急工程就可达到此目的,即可尽快向天津供水,又可检验调水水质状况,节省了时间和投资。

应急工程拟定了两种工程方案,方案一:考虑调到天津的水量有一定的保证率,即有一个比较稳定的水源;方案二:考虑现有工程具有向天津应急供水的能力,仅在骆马湖以北适当扩大规模。工程规模见表 6-3 所示。

表 6-3 应急工程不同方案工程规模表

单位:  $m^3/s$ 

| 分 段     |      | 方案一       | 方案二       |
|---------|------|-----------|-----------|
| 长 江~洪泽湖 | 抽 江  | 400 (200) | 400 (200) |
|         | 入洪泽湖 | 300       | 200       |
| 洪泽湖~洛马湖 | 出洪泽湖 | 230       | 160       |
|         | 入洛马湖 | 200       | 150       |
| 洛马湖~下级湖 | 出洛马湖 | 200       | 200       |
|         | 入下级湖 | 150       | 150       |
| 下级湖~上级湖 | 出下级湖 | 125       | 125       |

|         |      |     |     |
|---------|------|-----|-----|
|         | 入上级湖 | 125 | 125 |
| 上级湖~东平湖 | 出上级湖 | 110 | 110 |
|         | 入东平湖 | 100 | 100 |
| 东 平 湖   | 穿 黄  | 100 | 100 |

注：抽江 400 (200)，括号中为 5 到 8 月的抽江规模。

应急工程利用洪泽湖、洛马湖和下级湖调蓄，不用上级湖和东平湖调蓄。利用洪泽湖调蓄江水，可提高用水高峰期和枯水年江水北调现有供水区的供水保证率。为了加大北调水量，在调水期（10 月~次年 4 月上旬）采用江水先满足北调要求再补充洪泽湖的调度方式。

应急工程利用江水北调工程的潜力，在冬春季节向黄河以北送水。为了维护江水北调供水区原有的用水利益，规定了不同时段各湖泊的北调控制水位，一般情况下低于此水位时，停止北调，应急工程北调控制水位见表 6-4。

表 6-4 应急工程北调控制水位表 单位：m

| 湖 泊         |     | 7 月~8 月 | 9 月~12 月  | 1 月~3 月   | 4 月~5 月   | 6 月  |
|-------------|-----|---------|-----------|-----------|-----------|------|
| 方<br>案<br>一 | 洛马湖 | 22.5    | 22.5~22.7 | 22.7~23.0 | 23.0~22.5 | 22.5 |
|             | 下级湖 | 32.1    | 32.1      | 32.1~32.5 | 32.5~32.1 | 32.1 |
|             | 东平湖 | 39.3    | 39.3      | 39.3      | 39.3      | 39.3 |
| 方<br>案<br>二 | 洛马湖 | 22.5    | 22.5~23.0 | 23.0      | 23.0~22.5 | 22.5 |
|             | 下级湖 | 32.1    | 32.1      | 32.1~32.5 | 32.5~32.1 | 32.1 |
|             | 东平湖 | 39.3    | 39.3      | 39.3      | 39.3      | 39.3 |

注：东平湖为黄海高程，其余为废黄河高程。

根据上述北调控制水位和调度原则，采用 1956 年~1997 年共 42 年水文系列计算，应急工程多年平均调水量表见表 6-5；方案一黄河以南历年抽入各湖泊的水量见附表 1；方案二黄河以南历年抽入各湖泊的水量见附表 2。

表 6-5 南水北调东线应急工程多年平均调水量表 单位：亿 m<sup>3</sup>

| 区 段  | 多年平均调水量 |      |
|------|---------|------|
|      | 方案一     | 方案二  |
| 抽 江  | 60.5    | 47.7 |
| 入洪泽湖 | 51.60   | 37.5 |
| 出洪泽湖 | 42.5    | 33.7 |
| 入骆马湖 | 33.6    | 24.8 |
| 出骆马湖 | 33.3    | 27.2 |

|                        |      |      |
|------------------------|------|------|
| 入下级湖                   | 22.3 | 16.3 |
| 出下级湖                   | 15.0 | 11.0 |
| 入上级湖                   | 15.0 | 11.0 |
| 出上级湖                   | 11.6 | 10.0 |
| 入东平湖                   | 11.0 | 9.3  |
| 穿黄水量                   | 10.3 | 7.8  |
| 过黄河水量小于 10 亿 $m^3$ 的年数 | 9    | 18   |
| 无水调过黄河的年数              | 3    | 7    |

调算结果表明, 方案一具有一定的供水保证率和运行可靠性, 在不影响江苏省现状用水情况下, 一般年份冬春季节可向黄河以北调水 10~13 亿  $m^3$ , 而且可提高江水北调灌区灌溉高峰季节的供水效益。但遇到淮河枯水年份将会发生南北用水矛盾, 向天津供水难以完全保证。方案二由于洛马湖以南没有增加工程, 调水后将影响洛马湖以南地区现有的供水效益, 在供水保证率和运行可靠性上都存在比方案一更大的风险。

两种方案在供水效益上方案一明显比方案二要优越的多, 但方案二投资要节省的多, 二方案谁优谁劣需要综合考虑投资、经济分析以及其它有关因素加以考虑比较选择。

## § 6.4 第一期工程规模

### 1. 调水工程规模

第一期工程规划水平年是 2010 年, 应急工程只是一期工程的第一步, 应急工程调算只考虑可以为黄河以北和山东半岛提供水源的量, 而没有对黄河以北和山东半岛进行调算, 一期工程将要对东线工程的全线进行水量调算。一期工程规模见表 6-6 所示。

表 6-6 南水北调东线工程一期工程规模表 单位:  $m^3/s$

|      |         |      |         |      |           |      |
|------|---------|------|---------|------|-----------|------|
| 区 段  | 抽 江     | 入洪泽湖 | 出洪泽湖    | 入洛马湖 | 出洛马湖      | 入下级湖 |
| 工程规模 | 600     | 550  | 450     | 375  | 350       | 300  |
| 区 段  | 出下级湖    | 入上级湖 | 出上级湖    | 入东平湖 | 穿黄河       | 山东半岛 |
| 工程规模 | 260     | 260  | 220     | 200  | 200       | 50   |
| 区 段  | 位 山~临清段 |      | 临 清~吴 桥 |      | 南运河吴桥~九宣闸 |      |
| 工程规模 | 200     |      | 180~150 |      | 150~100   |      |

## 2. 蓄水工程规模

蓄水是调水工程的重要组成部分,利用水库调节本流域来水和北调水量,可减小工程规模,使工程在供水量和供水时间上满足各部门的需求。黄河以南的洪泽湖、洛马湖、南四湖是调节淮河和沂沭泗水系来水的综合利用湖泊,规划抬高湖泊的蓄水位以更有效调蓄水量,增加调蓄库容 15.01 亿  $\text{m}^3$ ,总调蓄库容 48.95 亿  $\text{m}^3$ 。黄河以南湖泊蓄水指标表见表 6-7 所示。黄河以北规划了 4 座平原水库,总调库容 9.75 亿  $\text{m}^3$ 。各水库的蓄水指标见表 6-8 所示。

表 6-7 黄河以南各湖泊蓄水特性表

| 湖 名 |     | 死水位   | 蓄水位 (m) |       | 死库容<br>(亿 $\text{m}^3$ ) | 调蓄库容(亿 $\text{m}^3$ ) |       |
|-----|-----|-------|---------|-------|--------------------------|-----------------------|-------|
|     |     |       | 汛期      | 非汛期   |                          | 汛期                    | 非汛期   |
| 现状  | 洪泽湖 | 11.30 | 12.50   | 13.00 | 7.00                     | 15.30                 | 23.10 |
|     | 洛马湖 | 21.00 | 22.50   | 23.00 | 3.20                     | 4.30                  | 5.90  |
|     | 下级湖 | 31.50 | 32.50   | 32.50 | 3.45                     | 4.94                  | 4.94  |
|     | 东平湖 |       |         |       |                          |                       |       |
|     | 合 计 |       |         |       | 13.64                    | 24.54                 | 33.94 |
| 规划  | 洪泽湖 | 11.30 | 12.50   | 13.50 | 7.00                     | 15.30                 | 31.35 |
|     | 洛马湖 | 21.00 | 22.50   | 23.50 | 3.20                     | 4.30                  | 7.50  |
|     | 下级湖 | 31.50 | 32.50   | 33.0  | 3.45                     | 4.94                  | 8.00  |
|     | 东平湖 | 38.8  | 39.30   | 40.30 | 1.20                     | 0.57                  | 2.1   |
|     | 合 计 |       |         |       | 14.85                    | 25.11                 | 48.95 |

表 6-8 黄河以北各湖泊蓄水特性表

| 湖 名 |     | 水 位 (m) |       | 库 容(亿 $\text{m}^3$ ) |      |
|-----|-----|---------|-------|----------------------|------|
|     |     | 死水位     | 蓄水位   | 死库容                  | 调蓄库容 |
| 现状  | 北大港 | 2.00    | 5.50  | 0.64                 | 4.36 |
|     | 大浪淀 | 6.50    | 12.50 | 0.05                 | 0.96 |
|     | 千顷洼 | 18.00   | 21.00 | 0.21                 | 1.02 |
|     | 合 计 |         |       | 0.90                 | 6.34 |
| 规划  | 北大港 | 2.00    | 5.50  | 0.64                 | 4.36 |
|     | 大浪淀 | 6.50    | 12.50 | 0.09                 | 2.45 |
|     | 千顷洼 | 18.00   | 21.00 | 0.21                 | 1.02 |
|     | 大 屯 | 21.50   | 28.00 | 0.08                 | 1.92 |
|     | 合 计 |         |       | 1.02                 | 9.75 |

### 3. 北调水量

根据上述的调度原则和预测的来水、需水量,按照上述工程规模采用 1956~1997 年水文系列进行水量调节计算。调度结果如下:

历年抽江和过黄河水量过程线如图 6-1;黄河以南多年平均调水量见表 6-9 所示;黄河以南历年抽入各湖泊的水量见附表 3。各年送到胶东的水量比较均匀,调过黄河水量为 13.4~43.0 亿  $\text{m}^3$ ,可满足供水区城市供水要求。

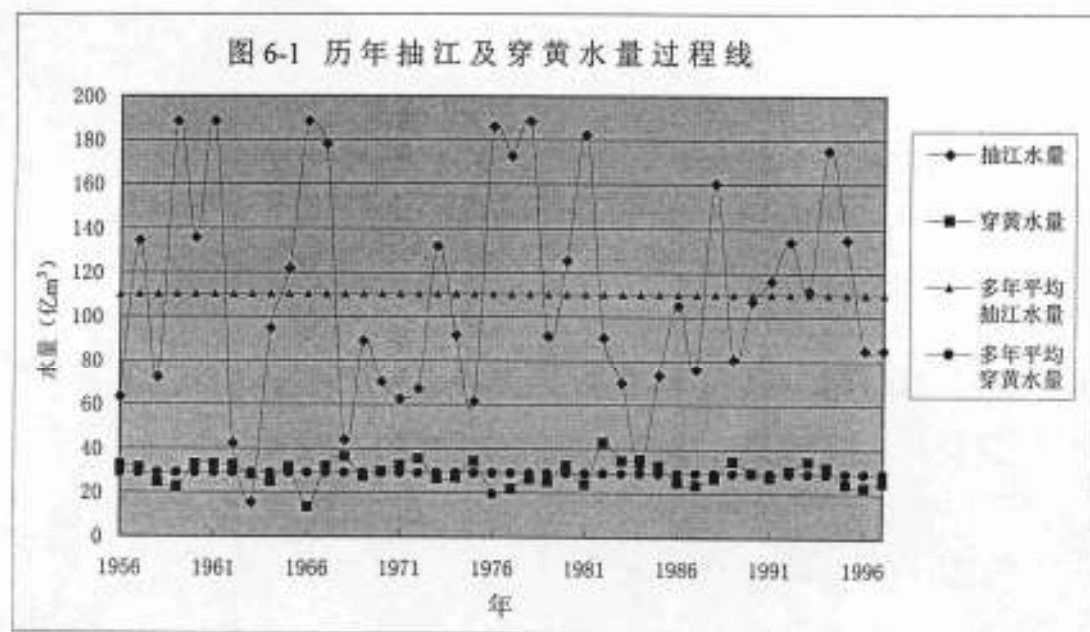


表 6-9 南水北调东线一期工程多年平均调水量表

单位: 亿  $\text{m}^3$

| 区段  | 抽江    | 入洪泽湖 | 出洪泽湖 | 入洛马湖 | 出洛马湖 | 入下级湖 | 出下级湖 | 入上级湖 | 出上级湖 | 入东平湖 | 穿黄河  | 山东半岛 |
|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 调水量 | 110.2 | 75.5 | 85.9 | 68.2 | 67.2 | 57.6 | 44.8 | 44.8 | 44.0 | 37.9 | 29.0 | 8.6  |

上述调水量是在拟定的需调水量的规划下计算的,而工程规模是根据枯水年的供需水量确定的,因此,工程在一般年份还有加大供水的潜力。由于南北丰枯不同步,在南方的平、丰年份工程具有向北方农业和生态增加供水的能力。按工程的供水能力计算:多年平均抽江水量 118.8 亿  $\text{m}^3$ ,多年平均过黄河水量 43.0 亿  $\text{m}^3$ 。与工程的供水能力计算的调水量相比较可看出,多年平均还可以增抽江水 8.6 亿  $\text{m}^3$ ,多年平均过黄河增调水量 14.0 亿  $\text{m}^3$ ,可以增加向黄河以北供水,补充黄河以北的农业和生态用水量。

典型枯水年调水量见下表 6-10 所示。淮河流域多年平均来水量为 173.77 亿  $\text{m}^3$ ，其中特枯年份 1966 年和 1978 年淮河流域降水量来水量为 0，1961 年为 2.5 亿  $\text{m}^3$ ，1981 年水为 61.5 亿  $\text{m}^3$ 。

表 6-10 一期工程典型年调水量表 单位: 亿  $\text{m}^3$

| 年 份                        | 抽 江   | 入<br>洪泽湖 | 入<br>洛马湖 | 入<br>下级湖 | 入<br>上级湖 | 入<br>东平湖 | 穿 黄  | 胶 东  |
|----------------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|------|------|
| 多年平均                       | 110.2 | 75.5     | 68.2     | 57.6     | 44.8     | 37.9     | 29.0 | 8.6  |
| 淮<br>河<br>枯<br>水<br>年      | 1959  | 188.6    | 140.8    | 87.5     | 64.0     | 49.8     | 31.8 | 22.7 |
|                            | 1961  | 188.6    | 136.1    | 72.1     | 65.6     | 47.7     | 41.0 | 32.8 |
|                            | 1966  | 188.6    | 136.1    | 51.9     | 37.0     | 23.4     | 20.1 | 13.4 |
|                            | 1976  | 186.2    | 127.9    | 65.1     | 45.4     | 30.5     | 29.3 | 19.5 |
|                            | 1978  | 188.6    | 136.1    | 62.1     | 50.4     | 38.9     | 35.9 | 26.3 |
|                            | 1981  | 182.5    | 131.1    | 89.8     | 62.8     | 41.7     | 33.2 | 24.0 |
|                            | 1994  | 175.4    | 118.1    | 70.2     | 59.8     | 50.3     | 40.6 | 31.9 |
| 海<br>滦<br>河<br>枯<br>水<br>年 | 1961  | 188.6    | 136.1    | 72.1     | 65.6     | 47.7     | 41.0 | 32.8 |
|                            | 1965  | 121.9    | 85.5     | 73.4     | 56.2     | 46.2     | 40.9 | 31.5 |
|                            | 1968  | 44.0     | 23.2     | 90.6     | 75.5     | 58.0     | 45.8 | 36.3 |
|                            | 1971  | 62.5     | 36.4     | 72.7     | 57.7     | 47.9     | 40.7 | 32.5 |
|                            | 1975  | 61.5     | 39.2     | 69.7     | 59.3     | 48.3     | 43.1 | 34.3 |
|                            | 1981  | 182.5    | 131.1    | 89.8     | 62.8     | 41.7     | 33.2 | 24.0 |
|                            | 1989  | 81.1     | 52.3     | 79.8     | 60.1     | 49.0     | 43.3 | 34.6 |
|                            | 1992  | 134.0    | 94.1     | 76.3     | 62.1     | 50.5     | 39.8 | 30.3 |

#### 4. 水量分析

第一期工程多年平均抽江水量 110.2 亿  $\text{m}^3$ ，全线水量损失 26.63 亿  $\text{m}^3$ ，水量损失率约为 24.2%；过黄河水量 29.0 亿  $\text{m}^3$ ，输水损失 9.72 亿  $\text{m}^3$ ，占损失总量的 36.5%，占输水总量的 33.5%。

规划调水量包含了现有工程的可供水量，增供水量是由于兴建了工程而增加的供水量，它反映了新建调水工程的效益。增供水量包括增供的抽江水量和淮水利用量两部分水量。经调算得出多年平均增供水量 71.3 亿  $\text{m}^3$ ，其中增抽江水量 59.3 亿  $\text{m}^3$ ，增加利用淮河水量 11.9 亿  $\text{m}^3$ 。第一期工程多年平均增供水量见表 6-11。

表 6-11 一期工程多年平均增供水量表

| 区 段  | 工程规模 (m <sup>3</sup> /s) |     |           | 调水量 (亿 m <sup>3</sup> ) |       |      |
|------|--------------------------|-----|-----------|-------------------------|-------|------|
|      | 现状                       | 规划  | 增加规模      | 现状                      | 规划    | 增抽水量 |
| 抽 江  | 400 (200)                | 600 | 200 (400) | 50.9                    | 110.2 | 59.3 |
| 入洪泽湖 | 200                      | 550 | 350       | 26.3                    | 75.5  | 49.2 |
| 出洪泽湖 | 200                      | 450 | 250       | 24.8                    | 85.9  | 61.1 |
| 入骆马湖 | 150                      | 375 | 225       | 12.1                    | 68.2  | 56.1 |
| 出骆马湖 | 50                       | 350 | 300       | 9.3                     | 67.2  | 57.9 |
| 入下级湖 | 20                       | 300 | 280       | 2.5                     | 57.6  | 55.1 |
| 出下级湖 | 0                        | 260 | 260       | 0                       | 44.8  | 44.8 |
| 入上级湖 | 0                        | 260 | 260       | 0                       | 44.8  | 44.8 |
| 出上级湖 | 0                        | 220 | 220       | 0                       | 44.0  | 44.0 |
| 入东平湖 | 0                        | 200 | 200       | 0                       | 37.9  | 37.9 |
| 穿黄水量 | 0                        | 200 | 200       | 0                       | 29.0  | 29.0 |
| 山东半岛 | 0                        | 50  | 50        | 0                       | 8.6   | 8.6  |

多年平均净需水量和净供水量见表 6-12。供水区历年供需水量表见附录 4、附录 5。根据水量调算结果,供水区内的城市用水全部满足,在淮河枯水年份为了保证北方城市用水,农业灌溉用水仍有一定的缺水。

表 6-12 多年平均净需水量和净供水量表

单位: 亿 m<sup>3</sup>

| 区 段 | 净需水     | 净供水     | 净缺水量  | 供水保证程度 | 旬供水保证率 |
|-----|---------|---------|-------|--------|--------|
| 洪泽湖 | 101.778 | 101.654 | 0.124 | 99.9%  | 99.3%  |
| 骆马湖 | 31.779  | 30.897  | 0.882 | 97.2%  | 99.2%  |
| 下级湖 | 21.845  | 20.835  | 1.01  | 95.5%  | 94.8%  |
| 上级湖 | 11.486  | 10.832  | 0.654 | 94.3%  | 97.3%  |
| 东平湖 | 5.68    | 5.577   | 0.103 | 98.2%  | 94.8%  |
| 胶 东 | 8.76    | 8.20    | 0.56  | 93.6%  | 98.3%  |
| 聊 城 | 1.52    | 1.445   | 0.077 | 95.8%  | 95.7%  |
| 衡 水 | 2.4     | 2.397   | 0.003 | 99.9%  | 99.3%  |
| 德 州 | 2.45    | 2.45    | 0     | 100%   | 100%   |
| 景 县 | 0.66    | 0.627   | 0.033 | 96.0%  | 95.7%  |
| 沧 州 | 2.12    | 2.12    | 0     | 100%   | 100%   |
| 天 津 | 7.665   | 7.609   | 0.056 | 99.3%  | 99.8%  |

由表 6-11 可以看出最不利情况是在 1961 年和 1981 年, 出现黄河南北同时遭遇枯水年, 由表 6-13 看到最不利年份 1981 年全线缺水 10.03%, 其中天津缺水达到 15.18%, 此年整个黄河以南调水沿线大面积干旱, 洛马湖、南四湖和东平湖来水远远小于正常年份; 1966 年与 1981 年情形类似, 全线缺水达到 15.5%; 而 1961 虽然淮河来水仅为 2.5 亿  $\text{m}^3$ , 但洛马湖、南四湖和东平湖来水为正常来水, 可以有效地调节北调水量, 对全线影响很小; 除了 1966 和 1981 年部分城市供水受到影响, 其它年份对城市供水缺水几乎没有。遇到 1981 年情况时, 在实际的调度运行中, 可以采取减低北调线, 先满足全线城市需水, 这时江水北调区农业需水效益要受到损害。

## § 6. 4 本章小结

本章根据编制的东线工程水量调度软件, 进行了各方案的计算分析, 首先计算了现状规模下的调水量, 以供分析增调水量; 进行了应急工程两种方案的比较; 重点进行了一期工程的调算, 给出了北调水量, 进行了水量分析。

表 6-13 最不利年份需水、供水量表 单位: 亿 m<sup>3</sup>

| 丰枯<br>情况         | 年<br>份 | 全线<br>总缺<br>水率<br>% | 黄 河 以 南 |       |          |      |      |          |      |      |          |      |      |          | 黄 河 以 北 |      |          |      |      |          |      |      |          |
|------------------|--------|---------------------|---------|-------|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|----------|---------|------|----------|------|------|----------|------|------|----------|
|                  |        |                     | 洪泽湖片    |       |          | 洛马湖片 |      |          | 南四湖片 |      |          | 东平湖片 |      |          | 山东省     |      |          | 河北省  |      |          | 天津市  |      |          |
|                  |        |                     | 需水      | 供水    | 缺水<br>率% | 需水   | 供水   | 缺水<br>率% | 需水   | 供水   | 缺水<br>率% | 需水   | 供水   | 缺水<br>率% | 需水      | 供水   | 缺水<br>率% | 需水   | 供水   | 缺水<br>率% | 需水   | 供水   | 缺水<br>率% |
|                  | 平均     | 1.51                | 101.8   | 101.7 | 0.12     | 31.8 | 30.9 | 2.77     | 33.3 | 31.7 | 4.97     | 14.4 | 13.8 | 4.60     | 3.97    | 3.88 | 1.93     | 5.18 | 5.14 | 0.695    | 7.67 | 7.61 | 0.78     |
| 淮<br>枯<br>海<br>丰 | 1959   | 5.51                | 85.6    | 85.6  | 0        | 34.9 | 34.9 | 0        | 33.8 | 27.0 | 20.1     | 13.3 | 10.6 | 20.3     | 3.97    | 3.63 | 8.56     | 5.18 | 5.03 | 2.90     | 4.44 | 4.44 | 0        |
|                  | 1994   | 0.01                | 120.3   | 120.3 | 0        | 42.7 | 42.7 | 0        | 35.0 | 35.0 | 0        | 15.3 | 15.3 | 0        | 3.97    | 3.96 | 0.25     | 5.18 | 5.18 | 0        | 8.30 | 8.30 | 0        |
| 淮<br>枯<br>海<br>平 | 1966   | 15.5                | 126.4   | 125.9 | 0.43     | 34.9 | 25.7 | 26.5     | 36.3 | 20   | 44.9     | 14.4 | 6.4  | 55.6     | 3.97    | 3.17 | 20.2     | 5.18 | 4.8  | 7.34     | 5.76 | 5.76 | 0        |
|                  | 1976   | 4.50                | 136.2   | 135.9 | 0.25     | 42.7 | 41.6 | 2.65     | 37.9 | 30.0 | 20.8     | 14.8 | 13.4 | 9.19     | 3.97    | 3.75 | 5.54     | 5.18 | 5.10 | 1.54     | 3.81 | 3.81 | 0        |
| 淮<br>海<br>同<br>枯 | 1961   | 1.54                | 103.0   | 103.0 | 0        | 31.1 | 30.1 | 3.31     | 44.4 | 42.8 | 3.60     | 14.8 | 14.2 | 3.76     | 3.97    | 3.91 | 0.15     | 5.18 | 5.16 | 0.386    | 11.2 | 11.2 | 0        |
|                  | 1981   | 10.03               | 126.4   | 126.4 | 0        | 42.7 | 35.1 | 17.7     | 44.4 | 30.7 | 30.8     | 14.8 | 14.0 | 5.63     | 3.97    | 3.29 | 17.12    | 5.18 | 4.82 | 6.95     | 11.2 | 9.40 | 15.18    |

## 第七章 仿真试验分析

### § 7. 1 引言

任何一个系统若只能在标准参数状态下运行,不能在参数偏差的情况下运行,就不是个好系统。南水北调东线工程是一个跨流域的调水工程,涉及面广,运行复杂。东线调水工程调度的灵活性如何,能否适用变化的实际需求,决定了东线工程实施以后能否发挥预想的效果。所以非常有必要对东线工程进行仿真试验分析,检验系统在参数偏差的情况下的运行情况。

参数偏差有两种情况:恒定数偏差;随机数偏差。目前对调水工程进行参数偏差分析主要采用恒定数拉偏,但现实中参数的变化往往是随机的、不确定的,所以采用随机的方法进行拉偏试验更趋合理。

在南水北调东线水量调度系统中,用户需水的变化对整个东线工程水量调配有着至关重要的作用,所以本论文选择需水量作为变化参数进行拉偏试验,以供水保证程度作为指标,检验需水参数在各种偏差情况下,对总的调度结果的影响,检验东线工程调度的灵活性,适用变化的能力。

本文在进行南水北调东线水量调度拉偏试验中采用恒定数拉偏和基于数理统计的随机数拉偏两种方法。为了与规划工程相比较,拉偏试验选择一期工程方案。

### § 7. 2 恒定数拉偏试验

恒定数拉偏是目前在进行水量调度分析中经常使用的方法,用以检验参数的线性变化对整个系统的影响。淮委和长委在进行南水北调东、中线水量调度时只作了恒定数拉偏试验,检验需水量增加对调度结果的影响。恒定数拉偏可以检验需水增加到什么程度的情况下,规划工程水平依然可以较好满足用户的需水要求。

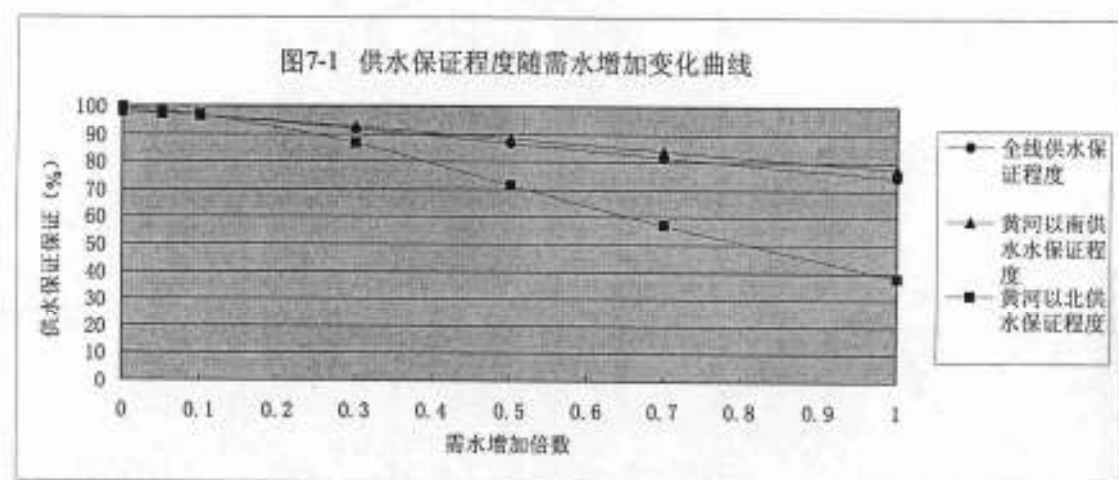
恒定数拉偏的假设条件是全线用户的需水统一增加一定比例,但这并不反映实际的发展状况,虽然目前的趋势是南水北调供水沿线需水量在不断的增加,但是随着经济技术的发展,农业的灌溉制度和工业万元产值用水呈下降趋势;而且各地区经济结构不同、社会发展的水平不同,发展目标不同,发展速度不同,其需水变化的趋势势必是不同的,也就是说,恒定数拉偏的假设条件不尽合理。它只能大致、参考性的反应需水增加时,调水工程效益的变化情况。

本论文将全线需水量统一增大 5%、10%、30、50%、70%、100%来进行拉偏试验,以全线供水保证程度、黄河以南供水保证程度和黄河以北供水保证程度检

验供水保证程度随需水增加变化情况。恒定数拉偏试验结果如表 7-1 所示；图 7-1 给出了供水保证程度随需水增加变化曲线。

表 7-1 供水保证程度随需水增加变化表

| 需水量增加 (%)     | 0    | 5    | 10   | 30   | 50   | 70   | 100  |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 全线用水保证率 (%)   | 98.5 | 97.5 | 96.6 | 91.9 | 86.9 | 81.6 | 74.6 |
| 黄河以南用水保证率 (%) | 98.3 | 97.4 | 96.5 | 92.4 | 88.3 | 84.0 | 77.9 |
| 黄河以北用水保证率 (%) | 99.1 | 98.6 | 96.7 | 86.8 | 71.3 | 55.2 | 38.0 |



由表 7-1 和图 7-1 可以看出，当需水量增加在 25% 变化之内的时候，黄河以南和黄河以北供水保证程度都可达到 90% 以上；需水量增加 30% 时，全线供水保证程度为 91.9%，黄河以南仍能达到 92.4%，但黄河以北只有 86.8%；当需水增加量超过 30% 以后，黄河以北的保证程度急剧下降，黄河以南变化缓慢，说明黄河以北调蓄能力比黄河以南差，尤其是聊城和景县两片，没有调蓄水库，适应变化能力很差；当需水量增加到 30% 以后，此时北大港、千顷洼、大浪淀和大屯水库的调蓄能力也将迅速降低。

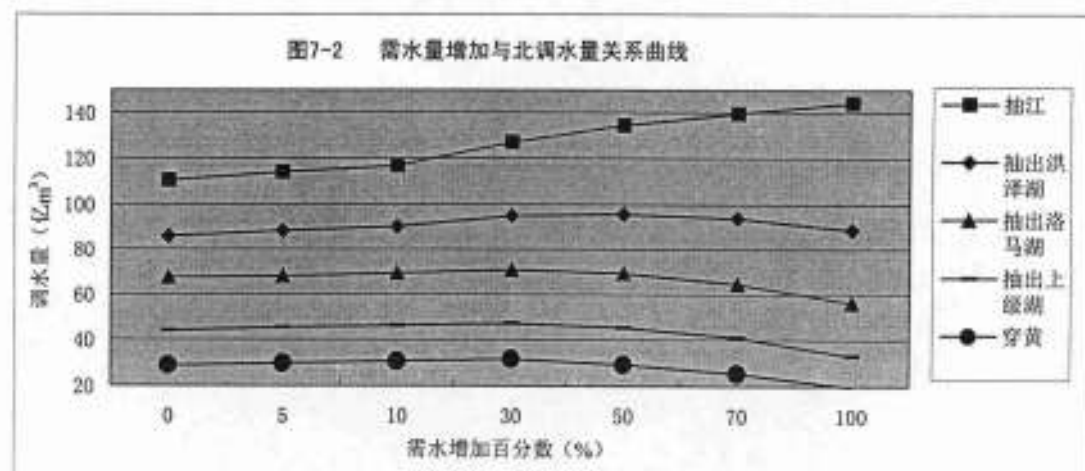
表 7-2 统计了需水量增加情况下的北调水量；图 7-2 给出了北调水量随需水增加曲线。

表 7-2 需水量增加情况下的北调水量 单位：亿  $m^3$

| 增加 (%) | 长江    | 洪泽湖  |      | 洛马湖  |      | 下级湖  |      | 上级湖  |      | 东平湖  | 穿黄   | 胶东  |
|--------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
|        | 抽出    | 抽入   | 抽出   | 抽入   | 抽出   | 抽入   | 抽出   | 抽入   | 抽出   | 抽入   |      | 抽入  |
| 0      | 110.2 | 75.5 | 85.9 | 68.2 | 67.2 | 57.6 | 44.8 | 44.8 | 44.0 | 37.9 | 29.0 | 8.6 |
| 5      | 113.8 | 77.0 | 88.1 | 69.3 | 68.0 | 58.2 | 46.0 | 46.0 | 45.4 | 39.1 | 30.0 | 8.9 |
| 10     | 116.9 | 78.0 | 89.8 | 70.6 | 69.1 | 59.1 | 46.3 | 46.3 | 46.2 | 39.8 | 30.6 | 9.1 |

|     |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 30  | 127.0 | 80.8 | 94.5 | 73.5 | 70.9 | 60.2 | 46.4 | 46.4 | 47.2 | 40.9 | 31.7 | 9.2 |
| 50  | 134.6 | 80.6 | 95.7 | 73.4 | 69.4 | 58.4 | 43.8 | 43.8 | 45.2 | 39.5 | 29.5 | 9.6 |
| 70  | 139.5 | 78.4 | 93.8 | 70.3 | 64.7 | 53.5 | 38.7 | 38.7 | 40.9 | 35.7 | 25.5 | 9.7 |
| 100 | 144.4 | 73.1 | 88.7 | 63.4 | 56.1 | 45.1 | 30.6 | 30.6 | 33.1 | 28.5 | 19.7 | 8.3 |

图7-2 需水量增加与北调水量关系曲线



由表 7-2 和图 7-2 可以看出,抽江水量一直呈上升趋势,即使需水量增加 100%,在满足抽江水量的调度原则,即保持大通站流量不小于  $9000\text{m}^3/\text{s}$  的情况下,长江水源仍没达到其可提供水量的峰值。在需水量增加 30% 的情况下,抽入洪泽湖的水量达到最大值,随着需水增加,抽入洪泽湖的水量将减少,而抽出洪泽湖在全线需水量增加 50% 才达到峰值,这是由于洪泽湖水量比较充沛,调蓄库容很大,可以较好的调蓄水量。可以看到入出洛马湖、下级湖、上级湖和东平湖水量都是在全线需水量增加 30% 达到峰值,说明黄河以南各级工程规模级配选择较好。

通过恒定数拉偏试验,可以得出(1)南水北调东线工程在全线需水量增加 25% 以内的时候,仍然有较满意的供水保证程度;需水量增加大于 25%,黄河以北的用水保证程度将会迅速下降;(2)南水北调东线工程黄河以南的调蓄能力很强,黄河以北的调蓄能力次之;(3)一期工程的工程规模选择比较合理,工程级配较好。

### § 7.3 随机数拉偏试验:

南水北调东线工程水量调度的需水量参数是由各地方预测统计得到的,需水量参数与真实值有一定的偏差,而各地方预测的需水量都希望尽可能的符合实际值,即需水量的期望是真实值,可能有一些偏差,但偏差小的概率要多于偏差大的概率,这种情况符合正态分布。那么,在需水量参数按正态分布的偏差变化时,调水工程的效益受不受到影响,影响程度的大小如何,都是不知道的,所以本论

文引入了基于数理统计的随机数拉偏试验以检验系统随参数变化情况, 以获得更准确合理描述系统的运行情况, 检验南水北调东线工程水量调度的敏感性。

### § 7. 3. 1 正态分布基本概念:

假定连续性随机变量  $X$  符合高斯分布, 概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < +\infty$$

其中  $\mu$ ,  $\sigma$  为常数,  $\mu$  为概率密度中的数学期望,  $\sigma$  为均方差, 记为  $X \sim N(\mu, \sigma)$ ;  $f(x)$  的图形如图 7-3 所示。它具有以下性质:

1. 曲线关于  $x=\mu$  对称;

2. 当  $x=\mu$  时取到最大值,  $f(\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ .

$x$  离  $\mu$  越远,  $f(x)$  的值越小, 这表明对于同样的长度的区间, 当区间离  $\mu$  越远,  $X$  落在这个区间的概率越小。

3. 如果固定  $\mu$ , 改变  $\sigma$ , 当  $\sigma$  越小时图形变得越尖 (见图 7-4), 因而  $X$  落在  $\mu$  附近的概率越大。

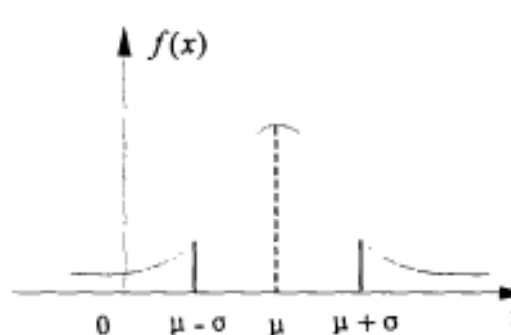


图 7-3 概率密度曲线

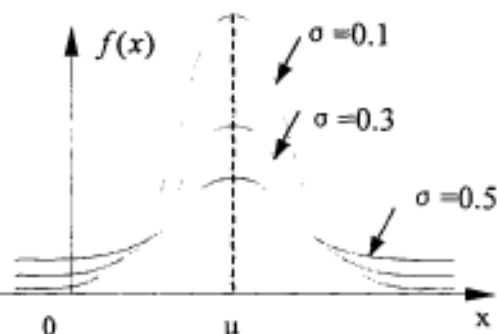


图 7-4 概率密度函数随  $\sigma$  变化曲线

4. 正态随机变量的三个重要的数据, 落入概率

$$P\{\mu - \sigma < X < \mu + \sigma\} = 0.683$$

$$P\{\mu - 2\sigma < X < \mu + 2\sigma\} = 0.954$$

$$P\{\mu - 3\sigma < X < \mu + 3\sigma\} = 0.997$$

也就是说, 随机变量落在  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$  内几乎是肯定的事。

### § 7. 3. 2 正态随机变量的产生

前面确定了随机变量的分布类型是正态分布, 仿真运行时, 则需要根据确定的分布类型产生随机变量。采用反变换法产生正态分布随机变量, 正态分布随机

变量的分布函数没有直接的封闭形式,但将其转换到极坐标后,则可以得到其封闭形式。

假设  $x_1, x_2$  是两个独立的  $N(0, 1)$  随机变量, 则其联合密度函数是

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi} e^{-(x_1^2 + x_2^2)/2}$$

将其转换成坐标形式:  $\begin{cases} x_1 = \rho \cos \phi \\ x_2 = \rho \sin \phi \end{cases}$

则  $f(\rho, \phi) = f(x_1, x_2) |J|$

其中  $|J| = \begin{vmatrix} \cos \phi & -\rho \sin \phi \\ \sin \phi & \rho \cos \phi \end{vmatrix} = \rho$

从而可得  $f(\rho, \phi) = \frac{1}{2\pi} \rho e^{-\rho^2/2} = f(\rho) f(\phi)$

其中  $f(\rho)$ ,  $f(\phi)$  分别为随机变量  $\rho$ ,  $\phi$  的密度函数

$$\begin{cases} f(\rho) = \rho e^{-(\rho^2/2)} \\ f(\phi) = \frac{1}{2\pi} \end{cases}$$

相应的分布函数为:

$$\begin{cases} F(\rho) = 1 - e^{-(\rho^2/2)} \\ F(\phi) = \frac{1}{2\pi} \phi \end{cases}$$

对随机变量  $\rho$ ,  $\phi$  来说, 他们的分布函数具有封闭形式, 可采用反变换法, 即可独立地产生两个  $[0, 1]$  区间上均匀分布的随机数  $u_1$ ,  $u_2$ , 分别对  $F(\rho)$ ,  $F(\phi)$  进行反变换, 可得

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{-2 \ln(1 - u_2)} \\ \phi = 2\pi u_1 \end{cases}$$

根据  $x_1$ ,  $x_2$  与  $\rho$ ,  $\phi$  之间的关系,

$$\text{可得} \begin{cases} x_1 = (-2 \ln u_2)^{1/2} \cos 2\pi u_1 \\ x_2 = (-2 \ln u_2)^{1/2} \sin 2\pi u_1 \end{cases}$$

采用上述反变换, 每次可产生一对服从正态分布的独立的随机变量。

### § 7. 3. 3 试验方法:

1. 按均值为 0, 均方差为  $\sigma_1$ , 取 36 个随机数  $\Delta Q_1, \dots, \Delta Q_{36}$ , 以此作为全线用户的

用水偏差量, 即各用户的需水量变为:  $Q_i = Q_0 (1 + \Delta Q)$ ;

2. 进行42年调蓄计算, 求得在新需水量下的水量保证程度  $P_1 = \frac{Q_{s1}}{Q_{n1}}$ ,

其中  $Q_{s1}$  为第一次调算的供水量,  $Q_{n1}$  为第一次调算的需水量;

3. 仍在均方差为  $\sigma_1$  的情况下取新的36个随机数, 重复进行第2步调蓄计算, 得到  $P_2 = \frac{Q_{s1} + Q_{s2}}{Q_{n1} + Q_{n2}}$ ; 在  $\sigma_1$  相同的情况下, 重复  $t$  次第1、第2步, 直到用户的

水量保证程度收敛为止, 即:  $|P_n - P_{n-1}| < \Delta$ , 此时,

$$P_n = \frac{Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3} + \cdots + Q_{sn}}{Q_{n1} + Q_{n2} + Q_{n3} + \cdots + Q_{nw}}$$

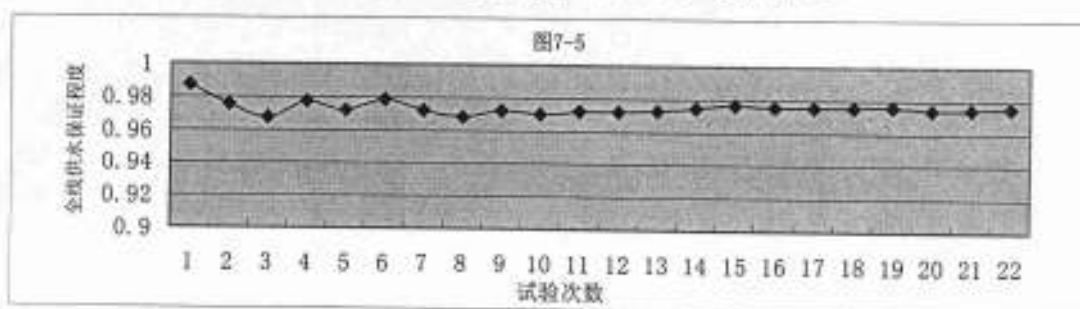
就求得在用户需水量偏差的均方差是  $\sigma_1$  的供水保证程度  $P_{\sigma_1}$ ;

4. 另取均方差为  $\sigma_2$ , 求得此时的水量保证程度  $P_{\sigma_2}$ ; 重复上述步骤即可求得供水保证程度与需水量偏差的均方差的关系曲线。

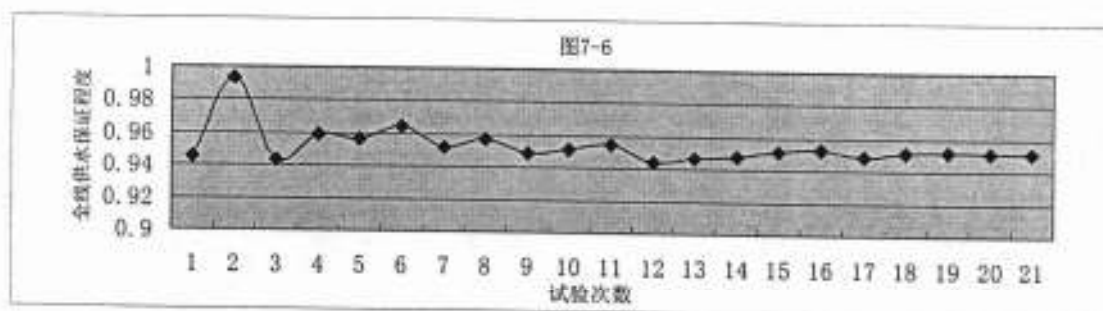
### § 7.3.4 仿真试验结果:

按照上述试验方法, 分别取  $\sigma = 0.1$ 、0.3、0.5、1.0 进行随机数拉偏试验。各方差情况下全线用水保证程度的收敛过程系列图形如下。以全线供水保证程度、黄河以南供水保证程度和黄河以北供水保证程度作为指标, 检验偏差达到多大的时候依然可以达到满意的保证率。

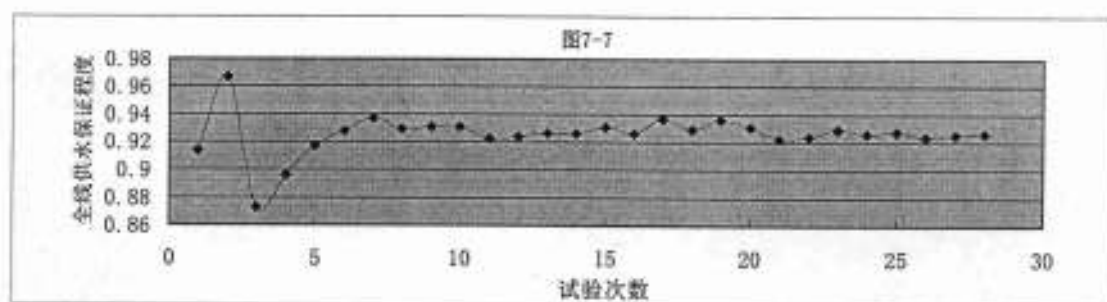
当  $\sigma = 0.1$  时, 全线供水保证程度  $P_{\sigma=0.1} = 0.975$ , 见图 7-5。



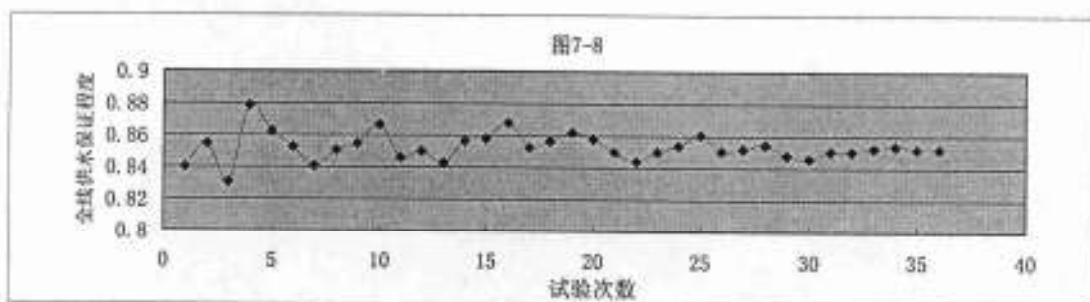
$\sigma = 0.3$  时, 全线供水保证程度  $P_{\sigma=0.3} = 0.951$ , 见图 7-6。



$\sigma=0.5$  时, 全线供水保证程度  $P_{\sigma=0.5}=0.925$ , 见图 7-7。



$\sigma=1.0$  时, 全线供水保证程度  $P_{\sigma=1.0}=0.852$ , 见图 7-8。

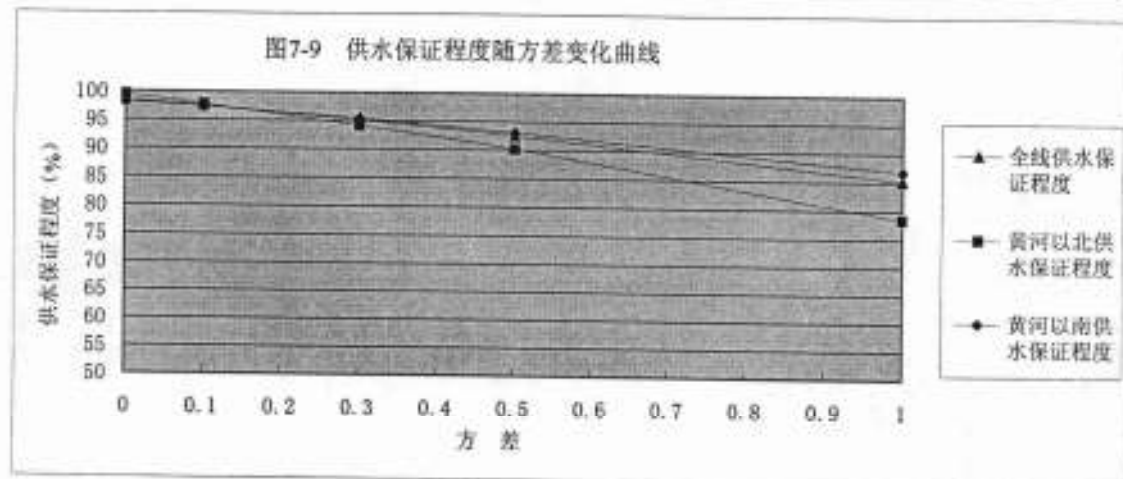


由上面的计算, 可以得到供水保证程度随方差变化曲线, 见表 7-3 和图 7-9 所示。

表 7-3 供水保证程度随方差变化表

| 保证程度 \ 方差      | 0    | 0.1  | 0.3  | 0.5  | 1.0  |
|----------------|------|------|------|------|------|
| 全线供水保证程度 (%)   | 98.5 | 97.5 | 95.1 | 92.5 | 85.2 |
| 黄河以南供水保证程度 (%) | 98.3 | 97.4 | 95.5 | 93.1 | 86.8 |
| 黄河以北供水保证程度 (%) | 99.1 | 97.8 | 94.1 | 90.2 | 78.6 |

图7-9 供水保证程度随方差变化曲线



试验结果表明：全线供水保证程度在方差为 0.6 的时候仍可达到 90%，但是黄河以北的供水保证程度小于 90%；如果要求黄河以北的供水保证程度大于 90% 的情况下，方差变化范围要小于 0.5，所以认为沿线用水需求有 50% 变化（偏差按正态分布、均方差）情况下仍能较好的满足沿线用水需求的调水工程。

## § 7.4 本章小结

本章首先分析了南水北调东线调水工程仿真试验分析的必要性，进行了恒定数拉偏试验，并且引入了基于数理统计的随机数拉偏试验来分析调水工程敏感性，并取得了较好的效果。

由恒定数拉偏试验和随机数拉偏试验，可以得出南水北调东线工程调蓄的灵活性较强，有很强的适用参数变化的能力。

在随机数拉偏试验中，本章仅仅对全线用户的需水量进行了随机数拉偏试验，在南水北调东线水量调度系统中，有很多的参数发生变化是随机的，比如来水量，渠系利用系数等等，也可以对其进行拉偏试验，检验其偏差变化对整个系统的影响。

## 第八章 结 论

黄淮海流域水资源紧张,已经成为制约该地区经济和社会发展的“瓶颈”,并且对黄淮海流域社会经济发展和生态环境产生了严重影响。并且随着人口的增长、经济的发展,人均水资源量还将减少,严重影响黄淮海地区可持续发展,跨流域调水成为解决北方地区缺水的有效方法。跨流域调水是一个涉及范围广,关联部门多的复杂的大系统,用传统的方法进行这种类型的水资源系统的多方案分析是十分困难的,本论文采用系统分析的方法和计算机技术相结合建立了南水北调东线水量调度仿真系统,为决策提供支持。

### § 8.1 本论文取得的主要成果

#### 1. 建立了南水北调东线水量调度模型

南水北调东线工程是一个多水源、多用户、多调节水库的大系统,各地区的权益具体表现在获得的水量上,如何协调各地区与各用水部门之间的矛盾,使工程发挥最大效益,是一个多目标决策分析的问题。本文采用系统分析的方法,建立了南水北调东线水量调配模型。

#### 2. 开发了南水北调东线水量调度仿真系统

本论文运用了具有跨平台功能的面向对象的 JAVA 语言和基于客户服务器结构的 SYBASE 数据库建立了南水北调东线水量调度仿真系统。

#### 3. 仿真调度结果

根据海河流域和东线供水区城市水资源规划成果,北方地区缺水量是逐渐增加的,而东线工程又便于分期实施,因此,采取“分期实施,先通后畅”的办法实施南水北调东线工程是经济可行的。本论文调算了各种工程规划规模下的水量调配情况。

**现状工程规模** 本论文首先调算了现状工程规模情况下的调水量,得到多年平均调水量见表 8-1 所示

表 8-1 南水北调东线工程现状规模调水量

单位: 亿  $m^3$

| 区 段  | 抽 江  | 入洪泽湖 | 出洪泽湖 | 入洛马湖 | 出洛马湖 | 入下级湖 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 多年平均 | 50.9 | 26.3 | 24.8 | 12.1 | 9.3  | 2.5  |
| 区 段  | 出下级湖 | 入上级湖 | 出上级湖 | 入东平湖 | 穿黄河  | 山东半岛 |
| 多年平均 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

**应急工程规模** 调算并比较了应急工程规模的两种方案。调算结果表明,方案一具有一定的供水保证率和运行可靠性,并且可提高江水北调灌区灌溉高峰季节的供水效益,但遇到淮河枯水年份将会发生南北用水矛盾,向天津供水难以完全保证。方案二由于洛马湖以南没有增加工程,调水后将影响洛马湖以南地区现有的供水效益,在供水保证率和运行可靠性上都存在比方案一更大的风险。二方案谁优谁劣需要综合考虑投资、经济分析以及其它有关因素加以考虑比较选择。

**一期工程规模** 本论文调算了一期工程规模的北调水量并进行了调水量分析。表 8-1 为一期工程多年平均调水量表。

表 6-9 南水北调东线一期工程多年平均调水量表 单位: 亿  $m^3$

| 区 段  | 抽 江   | 入洪泽湖 | 出洪泽湖 | 入洛马湖 | 出洛马湖 | 入下级湖 |
|------|-------|------|------|------|------|------|
| 多年平均 | 110.2 | 75.5 | 85.9 | 68.2 | 67.2 | 57.6 |
| 区 段  | 出下级湖  | 入上级湖 | 出上级湖 | 入东平湖 | 穿黄河  | 山东半岛 |
| 多年平均 | 44.8  | 44.8 | 44.0 | 37.9 | 29.0 | 8.6  |

第一期工程多年平均抽江水量 110.2 亿  $m^3$ , 全线水量损失 26.63 亿  $m^3$ , 水量损失率约为 24.2%; 过黄河水量 29.0 亿  $m^3$ , 输水损失 9.72 亿  $m^3$ , 占损失总量的 36.5%, 占输水总量的 33.5%。

增供水量包括增供的抽江水量和淮水利用量两部分水量。经调算得出多年平均增供水量 71.3 亿  $m^3$ , 其中增抽江水量 59.3 亿  $m^3$ , 增加利用淮河水量 11.9 亿  $m^3$ 。

#### 4. 进行了南水北调东线调度的仿真试验分析

南水北调东线工程是一个跨流域的调水工程, 涉及面广, 运行复杂。东线调水工程调度的灵活性如何, 能否适用变化的实际需求, 决定了东线工程实施以后能否发挥预想的效果。本论文进行了仿真试验分析, 检验系统在参数偏差的情况下的运行情况。

**恒定数拉偏试验** 将全线需水量统一增大一定比例进行拉偏试验, 结果表明当全线需水增加 25% 时, 黄河南北供水保证程度都可以达到 90% 以上。

**随机数拉偏试验** 本论文引入了基于数理统计的随机数拉偏试验检验系统随参数变化情况, 结果表明在沿线用水需求有 50% 变化 (偏差按正态分布、均方差) 情况下仍能较好的满足沿线用水需求。

## § 8.2 进一步的工作

(一).多目标优化调度 本论文为满足实际工作需要将多目标的综合利用问题转化为单一目标求解。对于南水北调东线这样一个跨流域、多水源、多用户的复杂系统，它不仅具有国民经济、社会发展和环境改善等多种目标，同时需要兼顾城市生活及工业供水、航运、灌溉、防洪、发电等多方面要求，其调度过程是多目标决策分析的问题。所以进行多目标调度是更优化的方法。

(二).模块化开发 对于调水工程来说，都包括水源、用户、输水路线。水源包括水库水、江水、河湖水、地下水等；用户包括城市用水、农村用水等；输水线路包括河道输水、人工渠输水、管道输水等，所有的调水工程都具有这些属性，所以在南水北调仿真系统开发的基础上，探讨开发模块化水量调度软件是非常值得研究的工作。

(三).多参数仿真试验分析 本论文的仿真试验分析仅选择了用户需水量作为参变量进行仿真试验分析，在南水北调东线水量调度系统中影响调度结果的参量还有预测的来水量、输水损失系数等，判断这些变量及这些变量的叠加效果对调度结果的影响，可以更有效的反应调水工程在参数偏差情况下的运行状况，并且可以检验和优化选择工程规模。

## 参考文献

- [1] 张修真主编 南水北调—中国可持续发展的支撑工程 中国水利水电出版社 1999.1
- [2] 刘成武 杨志荣 方中权等编著 自然资源概论 科学出版社 2001.3
- [3] 冯尚友著 水资源持续利用与管理导论 科学出版社 2000.7
- [4] 南水北调工程总体规划 中华人民共和国水利部 2000.9
- [5] 海河流域水资源合理配置与对策研究 中国水利水电科学研究院 水利部海河水利委员会 2000.12
- [6] 刘昌明 傅国斌 今日水世界 清华大学出版社 暨南大学出版社 2000.7
- [7] 南水北调东线工程总体规划报告 水利部淮河水利委员会 水利部海河水利委员会 2001.8
- [8] 加利福尼亚北水南调考察报告 刘子慧 吴泽宇 林全胜 吴斌 1997.12
- [9] 严恺 刘国纬 中国南水北调 浙江科学技术出版社 1999.9
- [10] 水利部 中国水资源公报 1998
- [11] 王肇荣 熊国强 阎东明 编著 系统工程 陕西科学出版社 2000.5
- [12] 汪应洛主编 系统工程理论、方法与应用 高等教育出版社 2000.6
- [13] 冯尚友 水资源系统分析应用的目前动态及发展趋势 系统工程理论与实践 1990 (5)
- [14] 王西琴 关中地区水环境与经济协调发展战略研究 西安理工大学博士论文 2000.3
- [15] 谭跃进 陈英武 易进先 系统工程原理 国防科技大学出版社 1999.11
- [16] 田元 张燕云 陈家栋 系统仿真导论 清华大学出版社 2000.7
- [17] 刘藻珍 魏华梁 系统仿真 北京理工大学出版社 1998.8
- [18] 陈宗海 编著 构成系统建模与仿真 中国科学技术大学出版社 1997.10
- [19] 沈大军 梁入驹 王浩 杨小柳 水资源价值理论与实践 科学出版社 2001.2
- [20] 孟晓风, 王行仁. 建模与仿真的智能化、集成化发展综述. 系统仿真学报. 1996, 增刊: 1-5
- [21] Tauxe G W. Multi-objective Dynamic Programming with Application to a Reservoir[J]. Water Resources Research, 1979, 15(6):1403-1408.
- [22] W. W. G. Yeh. Reservoir management and operations models: a state of the art review. Water Resources Research, 1985, 21(12), 1797~1818.

- [23] S.P.Simonvic. Reservoir analysis: closing gap between theory and practice. *Journal of Water resources Planning and Management*, 1992, 118(3), 263~279.
- [24] Gal S. Optimal management of stochastic multireservoir water supply system. *Water Resour. Res.*, 1979, 15(4):737~749.
- [25] Butcher W. Stochastic dynamic programming for optimal reservoir operation. *Water Resour Bull.*, 1971, 7(1):115~123.
- [26] 盛骤 谢式千 潘承毅编 概率论与数理统计 高等教育出版社 1997. 3
- [27] 庄楚强, 吴亚森. 应用数理统计基础. 广州: 华南理工大学出版社, 1992.
- [28] 张颖琪 流域调水模拟模型的研究 清华大学硕士学位论文 1995. 6
- [29] 石海峰 跨流域调水工程模拟模型及其决策支持系统 清华大学硕士学位论文 1996. 6
- [30] 刘宇琼 跨流域调水工程水资源规划模拟模型及其决策支持系统 清华大学硕士学位论文 1999. 6.
- [31] 田峰巍 黄强 解建仓 水库实施调度及风险决策 水利学报 1998. 3. 13
- [32] David M. Geary. 马欣民等译. Java2 图形设计卷 I: AWT. 机械工业出版社, 2000. 1
- [33] 王克宏 刘波主编 JAVA2 核心类库详解 清华大学出版社 1999. 7
- [34] 王珊 主编 Sybase 原理、高级系统管理与性能调优 中国水利水电出版社 1998. 8
- [35] 邵佩英 杨孝如编 Sybase 数据库系统基础知识 中国水利水电出版 1998. 2
- [36] 姚晓春, 郑文清. 等编著 Java 编程技术教程. 清华大学出版社, 2000. 9
- [37] Mark C. Chan, Steven W. Griffith, Anthony F. Lasi. 毛选等译. JAVA 程序设计技巧 1001 例. 北京: 电子工业出版社, 1998. 8
- [38] 王克宏, 刘波等. Java 语言 API 类库. 清华大学出版社, 1997. 5
- [39] Joseph L. Weber. 卜照斌等译. Java2 编程详解. 电子工业出版社, 1999. 8
- [40] 卢华友, 郭元裕, 利用多层递阶回归分析制定水库优化调度函数的研究, 水利学报, 1998. 12.
- [41] 程春田, 王本德等, 长江中上游防洪系统模糊优化调度模型研究, 水利学报 1997. 2.
- [42] 周志军, 雒文生, 水文时间序列与水库优化调度的模拟研究, 武汉水利电力大学学报, 1997. 4(34).

- [43] K. Srinivasan, T. R. Neelakantan, P. Shyam Narayan, and C. Nagara jukumar, Mixed\_integer Programming Model for Reservoir Pereformance Optimization, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol.125, No.5, september/October, 1999.
- [44] Khaliquzzaman and Subhash Chander, Network Flow Programming Model for Multireservoir Sizing, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 1, January/February, 1997.
- [45] Jamieson D G. Decision support systems(special issue). *Journal of hydrology*. vol.177 1996
- [46] Systems. A P(ed), Modeling and Management of Sustainable Basin-Scale Water Resource Systems. Proceeding of IAHS Symposium 6. IAHS Publication, 1995.
- [47] XU GangQing. Discussion on several premises for South-North Water Transfer Project[J]. *Science and Technology Bulletion*, 1999(5)
- [48] Sigvaldason O T. A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. *Water Resources Research* , 1976, 12.
- [49] A igner D J. A note on verification of computer simulation in models. *Managemnt Science*. 1972. 18(11)
- [50] Roger O, Hurst C, Harshadeep N. Water resources planning in a strategic context: linking the water sector to the national economu[J]. *Water Resources Research*, 1993. 29(7)
- [51] William E. Cox. Interbasin water transfer in the united states: Overview of the Institutinal framework , proceedings of TWRA scminter on interbasin water transfer . 1-10 June 15-19, 1986, Beijing , China

## 致 谢

我不会忘记在论文完成过程中曾给予我关心和帮助的老师 and 同学。

首先要感谢我的导师解建仓教授、马斌教授，在三年的学习期间，无论是生活还是学习上都给予了我很大的帮助。论文的完成凝结着导师的心血，在此向导师表示衷心的感谢。

在本论文的完成过程中，得到了北京仿真中心杨方廷博士的悉心指导和大力支持，在此向他表示诚挚的感谢。

在论文的完成过程中还得到西安理工大学黄强教授、周孝德教授、畅建霞博士、北京仿真中心的赖纯洁副总工程师、史燕燕、韩军；淮河水利委员会水保局谭炳卿总工、规划处张少华处长、李燕工程师；海河水利委员会刘思清高工的关心和帮助，在此向他们表示诚挚的感谢。

感谢北京农业大学魏明博士、房加志博士、刘旭东硕士、清华大学张尚弘博士、北京理工大学纪良雄硕士、哈尔滨理工大学金玲春硕士、西安理工大学王玉敏、尧桂龙、孟文杰、王晓辉、章晋雄、刘文芳、顾永刚、庞飞等和我一起在北京仿真中心度过了一段愉快的时光。

感谢我的同学陈莹、李玉荣、李发文、李少华、张毅、方神光等在三年学习和生活期间给我的帮助。

此外，在自己多年的求学过程中，父母和家人始终给予无尽的关爱、支持与理解，这为本人能够顺利完成学业起到了不可或缺的作用。

最后，衷心感谢关心和帮助过我的老师、同学和朋友们！

赵 勇

2002 年 1 月 20 日

附表 1:

应急工程方案一黄河以南历年抽入各湖水量表

单位: 亿 m<sup>3</sup>

| 年    | 抽 江   | 入洪泽湖 | 入洛马湖 | 入下级湖 | 入上级湖 | 入东平湖 | 穿黄水量 |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 1956 | 37.4  | 30.0 | 41.7 | 27.6 | 19.4 | 12.8 | 12.1 |
| 1957 | 80.0  | 69.8 | 27.6 | 17.4 | 13.6 | 10.4 | 10.3 |
| 1958 | 37.6  | 30.3 | 31.2 | 21.9 | 16.0 | 12.9 | 12.1 |
| 1959 | 104.5 | 90.5 | 34.9 | 17.1 | 7.9  | 0    | 0    |
| 1960 | 80.1  | 70.0 | 29.7 | 19.9 | 13.7 | 11.1 | 10.8 |
| 1961 | 97.6  | 83.3 | 27.1 | 15.2 | 12.1 | 9.1  | 9.0  |
| 1962 | 17.0  | 13.6 | 18.9 | 22.1 | 13.1 | 12.7 | 11.8 |
| 1963 | 4.5   | 3.3  | 26.8 | 18.4 | 13.0 | 12.7 | 11.9 |
| 1964 | 59.9  | 51.5 | 24.0 | 14.7 | 13.7 | 12.7 | 11.8 |
| 1965 | 68.5  | 59.6 | 42.0 | 25.9 | 18.2 | 12.8 | 12.0 |
| 1966 | 108.8 | 93.3 | 19.9 | 6.0  | 0.9  | 0    | 0    |
| 1967 | 92.0  | 78.2 | 29.7 | 18.5 | 10.2 | 11.3 | 11.1 |
| 1968 | 19.6  | 15.5 | 49.8 | 34.1 | 19.7 | 11.7 | 10.9 |
| 1969 | 54.3  | 47.4 | 39.4 | 24.2 | 18.1 | 12.6 | 11.8 |
| 1970 | 39.2  | 34.1 | 35.9 | 26.0 | 18.3 | 12.7 | 11.9 |
| 1971 | 34.0  | 27.2 | 41.5 | 27.3 | 19.6 | 12.8 | 12.0 |
| 1972 | 36.8  | 31.2 | 35.9 | 23.0 | 17.1 | 12.7 | 11.9 |
| 1973 | 68.7  | 59.4 | 34.8 | 20.4 | 13.6 | 9.5  | 9.4  |
| 1974 | 53.3  | 45.5 | 30.2 | 22.0 | 14.7 | 12.6 | 11.8 |
| 1975 | 27.3  | 22.8 | 34.5 | 24.4 | 16.3 | 12.7 | 11.9 |
| 1976 | 93.2  | 77.4 | 29.8 | 17.7 | 12.1 | 8.6  | 8.4  |
| 1977 | 95.9  | 82.9 | 31.8 | 22.0 | 12.1 | 9.2  | 8.9  |
| 1978 | 108.8 | 93.3 | 17.0 | 8.4  | 1.5  | 0    | 0    |
| 1979 | 53.2  | 45.5 | 46.2 | 32.6 | 20.3 | 12.9 | 12.1 |
| 1980 | 75.2  | 65.3 | 34.0 | 23.4 | 18.2 | 12.8 | 11.9 |
| 1981 | 99.8  | 85.3 | 41.9 | 22.9 | 13.2 | 6.8  | 6.5  |
| 1982 | 45.7  | 38.5 | 37.0 | 26.6 | 16.2 | 12.9 | 12.1 |
| 1983 | 40.4  | 33.8 | 30.6 | 22.4 | 14.7 | 12.9 | 12.1 |
| 1984 | 13.2  | 10.4 | 20.2 | 14.5 | 11.2 | 12.9 | 12.0 |
| 1985 | 35.3  | 29.3 | 31.3 | 24.0 | 16.4 | 12.9 | 12.0 |
| 1986 | 58.1  | 50.3 | 38.8 | 27.5 | 18.9 | 13.0 | 12.1 |
| 1987 | 38.2  | 32.4 | 33.7 | 26.4 | 17.6 | 12.9 | 12.0 |
| 1988 | 78.2  | 66.4 | 46.0 | 25.5 | 16.2 | 11.2 | 10.3 |
| 1989 | 42.3  | 37.2 | 44.3 | 23.6 | 15.7 | 13.0 | 12.1 |
| 1990 | 70.5  | 61.4 | 35.2 | 22.0 | 15.8 | 11.8 | 11.0 |
| 1991 | 71.2  | 62.9 | 42.7 | 28.5 | 18.7 | 12.9 | 12.1 |
| 1992 | 75.7  | 65.2 | 40.7 | 23.5 | 17.8 | 12.1 | 11.8 |
| 1993 | 56.2  | 46.6 | 32.5 | 22.0 | 14.6 | 12.8 | 12.0 |
| 1994 | 86.6  | 72.5 | 34.2 | 23.9 | 17.2 | 12.7 | 11.9 |
| 1995 | 82.0  | 70.5 | 31.3 | 25.0 | 17.8 | 11.5 | 11.2 |
| 1996 | 47.1  | 38.8 | 33.1 | 24.4 | 17.4 | 5.7  | 4.5  |
| 1997 | 51.7  | 44.9 | 26.1 | 23.7 | 16.5 | 13.0 | 12.1 |
| 多年平均 | 60.5  | 51.6 | 33.7 | 22.3 | 15.0 | 11.0 | 10.3 |

附表 2:

应急工程方案二黄河以南历年抽入各湖水量表

单位: 亿  $m^3$ 

| 年    | 抽江   | 入洪泽湖 | 入洛马湖 | 入下级湖 | 入上级湖 | 入东平湖 | 穿黄水量 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1956 | 25.0 | 18.5 | 28.6 | 15.8 | 9.9  | 8.4  | 6.7  |
| 1957 | 56.9 | 46.7 | 17.3 | 10.1 | 10.5 | 11.0 | 10.1 |
| 1958 | 33.9 | 26.0 | 28.8 | 20.4 | 15.9 | 13.0 | 11.1 |
| 1959 | 76.2 | 62.2 | 15.2 | 3.0  | 1.1  | 0.0  | 0.0  |
| 1960 | 56.7 | 46.7 | 18.3 | 10.7 | 8.8  | 9.2  | 8.1  |
| 1961 | 77.7 | 62.2 | 10.6 | 7.6  | 4.6  | 3.5  | 2.5  |
| 1962 | 16.5 | 13.1 | 17.2 | 22.8 | 13.7 | 13.0 | 11.1 |
| 1963 | 5.4  | 4.2  | 24.1 | 16.7 | 12.8 | 13.0 | 11.1 |
| 1964 | 44.6 | 36.3 | 19.6 | 11.5 | 11.8 | 13.0 | 11.1 |
| 1965 | 55.4 | 46.0 | 30.2 | 15.2 | 11.5 | 11.0 | 9.4  |
| 1966 | 77.7 | 62.2 | 2.2  | 1.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  |
| 1967 | 70.1 | 55.3 | 18.5 | 13.3 | 8.1  | 12.0 | 10.1 |
| 1968 | 13.0 | 9.7  | 36.8 | 21.6 | 8.8  | 0.0  | 0.0  |
| 1969 | 41.1 | 34.1 | 27.9 | 16.1 | 12.8 | 13.0 | 11.1 |
| 1970 | 31.3 | 26.4 | 28.9 | 22.4 | 16.3 | 13.0 | 11.1 |
| 1971 | 23.2 | 17.2 | 28.1 | 13.8 | 9.9  | 11.2 | 9.5  |
| 1972 | 26.2 | 20.7 | 29.3 | 20.3 | 15.3 | 12.6 | 11.1 |
| 1973 | 57.8 | 46.9 | 28.6 | 14.1 | 10.0 | 11.4 | 10.2 |
| 1974 | 46.7 | 38.6 | 26.5 | 21.9 | 14.9 | 13.0 | 11.1 |
| 1975 | 21.7 | 16.8 | 30.2 | 20.0 | 15.9 | 13.0 | 11.1 |
| 1976 | 76.2 | 59.5 | 14.1 | 8.5  | 5.4  | 1.8  | 0.8  |
| 1977 | 69.0 | 55.3 | 18.5 | 12.5 | 3.3  | 0.0  | 0.0  |
| 1978 | 77.7 | 62.2 | 3.9  | 1.4  | 1.3  | 0.0  | 0.0  |
| 1979 | 39.6 | 32.4 | 31.4 | 23.0 | 13.2 | 11.0 | 9.4  |
| 1980 | 54.2 | 44.3 | 24.0 | 17.8 | 14.0 | 13.0 | 11.1 |
| 1981 | 73.5 | 58.5 | 26.7 | 10.1 | 2.5  | 0.3  | 0.0  |
| 1982 | 32.7 | 26.2 | 30.7 | 21.3 | 11.9 | 11.6 | 10.4 |
| 1983 | 35.7 | 29.1 | 27.7 | 19.7 | 14.7 | 13.0 | 11.1 |
| 1984 | 11.7 | 8.9  | 18.3 | 11.9 | 10.2 | 13.0 | 11.1 |
| 1985 | 31.5 | 24.6 | 29.0 | 23.3 | 16.5 | 13.0 | 11.1 |
| 1986 | 46.7 | 38.6 | 32.1 | 20.2 | 15.5 | 13.0 | 11.1 |
| 1987 | 31.3 | 25.4 | 29.4 | 25.2 | 17.6 | 13.0 | 11.1 |
| 1988 | 61.7 | 48.3 | 32.0 | 14.2 | 4.4  | 0.0  | 0.0  |
| 1989 | 30.1 | 25.0 | 35.1 | 16.9 | 9.8  | 10.7 | 10.0 |
| 1990 | 54.0 | 44.9 | 27.3 | 16.6 | 11.0 | 7.7  | 5.8  |
| 1991 | 51.4 | 43.2 | 30.4 | 16.6 | 10.0 | 10.6 | 9.4  |
| 1992 | 57.7 | 46.5 | 30.3 | 16.5 | 8.1  | 8.0  | 6.8  |
| 1993 | 48.5 | 38.9 | 28.8 | 20.2 | 14.8 | 13.0 | 11.1 |
| 1994 | 76.3 | 60.4 | 28.2 | 18.2 | 14.8 | 13.0 | 11.1 |
| 1995 | 66.5 | 53.5 | 21.8 | 21.3 | 13.5 | 13.0 | 11.1 |
| 1996 | 38.8 | 30.5 | 28.9 | 23.8 | 19.7 | 7.0  | 5.1  |
| 1997 | 40.1 | 32.8 | 25.1 | 28.6 | 16.1 | 13.0 | 11.1 |
| 多年平均 | 47.7 | 37.5 | 24.8 | 16.3 | 11.0 | 9.3  | 7.8  |

附表 3:

一期方案黄河以南历年抽入各湖水量表

单位: 亿 m<sup>3</sup>

| 年    | 抽江    | 入洪泽湖  | 入洛马湖 | 入下级湖 | 入上级湖 | 入东平湖 | 出东平湖 | 进胶东 |
|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-----|
| 1956 | 63.4  | 37.4  | 74.6 | 70.1 | 56.6 | 41.2 | 32.4 | 8.8 |
| 1957 | 134.6 | 99.0  | 60.6 | 47.1 | 39.7 | 40.2 | 31.4 | 8.8 |
| 1958 | 72.3  | 41.4  | 52.5 | 43.6 | 33.9 | 33.3 | 24.5 | 8.8 |
| 1959 | 188.6 | 140.8 | 87.5 | 64.0 | 49.8 | 31.8 | 22.7 | 8.3 |
| 1960 | 135.8 | 100.1 | 65.0 | 56.4 | 45.6 | 41.5 | 32.7 | 8.8 |
| 1961 | 188.6 | 136.1 | 72.1 | 65.6 | 47.7 | 41.0 | 32.8 | 8.8 |
| 1962 | 42.4  | 25.6  | 46.5 | 54.2 | 41.4 | 42.0 | 32.5 | 8.8 |
| 1963 | 15.5  | 5.5   | 50.6 | 41.0 | 32.5 | 37.4 | 28.0 | 8.8 |
| 1964 | 94.9  | 65.7  | 48.7 | 38.6 | 30.2 | 33.6 | 24.8 | 8.8 |
| 1965 | 121.9 | 85.5  | 73.4 | 56.2 | 46.2 | 40.9 | 31.5 | 8.8 |
| 1966 | 188.6 | 136.1 | 51.9 | 37.0 | 23.4 | 20.1 | 13.4 | 5.2 |
| 1967 | 178.2 | 124.5 | 71.9 | 55.2 | 37.3 | 41.5 | 31.9 | 8.8 |
| 1968 | 44.0  | 23.2  | 90.6 | 75.5 | 58.0 | 45.8 | 36.3 | 8.8 |
| 1969 | 89.0  | 60.0  | 73.6 | 58.3 | 45.3 | 36.1 | 27.3 | 8.8 |
| 1970 | 70.3  | 50.6  | 62.1 | 57.1 | 45.3 | 38.4 | 29.7 | 8.8 |
| 1971 | 62.5  | 36.4  | 72.7 | 57.7 | 47.9 | 40.7 | 32.5 | 8.8 |
| 1972 | 67.3  | 44.1  | 64.9 | 58.2 | 47.7 | 44.8 | 35.5 | 8.8 |
| 1973 | 132.1 | 89.9  | 74.5 | 58.2 | 42.9 | 34.5 | 26.4 | 8.8 |
| 1974 | 91.7  | 56.7  | 50.9 | 46.9 | 35.5 | 36.3 | 26.8 | 8.8 |
| 1975 | 61.5  | 39.2  | 69.7 | 59.3 | 48.3 | 43.1 | 34.3 | 8.8 |
| 1976 | 186.2 | 127.9 | 65.1 | 45.4 | 30.5 | 29.3 | 19.5 | 8.8 |
| 1977 | 172.8 | 121.7 | 68.8 | 56.3 | 38.1 | 31.6 | 21.8 | 8.2 |
| 1978 | 188.6 | 136.1 | 62.1 | 50.4 | 38.9 | 35.9 | 26.3 | 8.8 |
| 1979 | 91.4  | 58.8  | 71.3 | 63.1 | 45.8 | 34.5 | 25.1 | 8.8 |
| 1980 | 125.4 | 92.4  | 75.0 | 63.6 | 51.6 | 41.4 | 32.5 | 8.8 |
| 1981 | 182.5 | 131.1 | 89.8 | 62.8 | 41.7 | 33.2 | 24.0 | 7.9 |
| 1982 | 90.6  | 60.1  | 79.6 | 74.9 | 57.3 | 52.4 | 43.0 | 8.8 |
| 1983 | 70.0  | 46.2  | 66.1 | 57.5 | 46.4 | 43.5 | 34.7 | 8.8 |
| 1984 | 32.5  | 14.8  | 47.4 | 41.5 | 33.8 | 44.0 | 35.3 | 8.8 |
| 1985 | 73.4  | 49.9  | 70.1 | 68.4 | 52.9 | 41.3 | 32.5 | 8.8 |
| 1986 | 105.2 | 73.1  | 73.1 | 63.3 | 51.2 | 33.5 | 24.7 | 8.8 |
| 1987 | 76.1  | 47.2  | 69.6 | 63.4 | 47.7 | 32.9 | 23.6 | 8.8 |
| 1988 | 160.4 | 108.3 | 90.8 | 73.1 | 54.2 | 35.6 | 26.8 | 8.8 |
| 1989 | 81.1  | 52.3  | 79.8 | 60.1 | 49.0 | 43.3 | 34.6 | 8.8 |
| 1990 | 107.1 | 75.7  | 58.7 | 47.7 | 40.6 | 38.1 | 29.3 | 8.8 |
| 1991 | 116.4 | 84.7  | 81.4 | 66.8 | 50.5 | 35.4 | 27.3 | 8.8 |
| 1992 | 134.0 | 94.1  | 76.3 | 62.1 | 50.5 | 39.8 | 30.3 | 8.8 |
| 1993 | 111.9 | 73.7  | 71.4 | 59.7 | 46.4 | 43.2 | 34.5 | 8.8 |
| 1994 | 175.4 | 118.1 | 70.2 | 59.8 | 50.3 | 40.6 | 31.9 | 8.8 |
| 1995 | 135.1 | 93.9  | 57.5 | 57.3 | 47.8 | 33.7 | 24.2 | 8.8 |
| 1996 | 85.2  | 58.1  | 65.4 | 58.5 | 50.1 | 31.7 | 23.0 | 8.8 |
| 1997 | 85.2  | 56.0  | 62.1 | 63.0 | 50.5 | 33.9 | 25.1 | 8.8 |
| 多年平均 | 110.2 | 75.5  | 68.2 | 57.6 | 44.8 | 37.9 | 29.0 | 8.6 |

## 附录 4:

一期工程黄河以南各片供需水量表

单位: 亿 m<sup>3</sup>

| 年    | 洪泽湖片   |        | 洛马湖片  |       | 下级湖片  |       | 上级湖片  |       | 东平湖片 |      | 胶 东  |      |
|------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
|      | 需水     | 供水     | 需水    | 供水    | 需水    | 供水    | 需水    | 供水    | 需水   | 供水   | 需水   | 供水   |
| 1956 | 89.76  | 89.76  | 31.11 | 31.11 | 24.62 | 24.62 | 13.29 | 13.29 | 6.05 | 6.05 | 8.76 | 8.76 |
| 1957 | 106.84 | 106.84 | 31.11 | 31.11 | 17.63 | 17.63 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1958 | 89.76  | 89.76  | 26.32 | 26.32 | 17.63 | 17.63 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1959 | 85.55  | 85.55  | 34.88 | 34.88 | 20.49 | 15.61 | 13.29 | 11.42 | 4.57 | 3.69 | 8.76 | 8.34 |
| 1960 | 110.51 | 110.51 | 31.11 | 31.11 | 17.63 | 17.63 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1961 | 102.98 | 102.98 | 31.11 | 30.08 | 31.10 | 29.49 | 13.29 | 13.29 | 6.05 | 5.49 | 8.76 | 8.76 |
| 1962 | 85.55  | 85.55  | 26.32 | 26.32 | 17.63 | 17.63 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 4.64 | 8.76 | 8.76 |
| 1963 | 85.55  | 85.55  | 26.32 | 26.32 | 17.63 | 17.63 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1964 | 110.51 | 110.51 | 34.88 | 33.70 | 24.62 | 24.62 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1965 | 85.55  | 85.55  | 26.32 | 26.32 | 17.63 | 17.63 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1966 | 126.43 | 125.89 | 34.88 | 25.63 | 24.62 | 14.40 | 11.74 | 5.61  | 5.70 | 3.83 | 8.76 | 5.23 |
| 1967 | 136.18 | 135.69 | 42.69 | 38.16 | 31.10 | 27.51 | 13.29 | 10.86 | 6.05 | 4.06 | 8.76 | 8.76 |
| 1968 | 102.98 | 102.98 | 26.32 | 26.32 | 20.49 | 19.65 | 9.17  | 7.87  | 5.24 | 4.38 | 8.76 | 8.76 |
| 1969 | 95.10  | 95.10  | 31.11 | 31.11 | 17.63 | 17.63 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1970 | 85.55  | 85.55  | 26.32 | 26.32 | 17.63 | 17.63 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1971 | 99.31  | 99.31  | 31.11 | 31.11 | 20.49 | 20.49 | 11.74 | 11.74 | 5.70 | 5.70 | 8.76 | 8.76 |
| 1972 | 99.31  | 99.31  | 31.11 | 31.11 | 17.63 | 17.63 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1973 | 110.51 | 110.51 | 34.88 | 34.88 | 24.62 | 24.62 | 13.29 | 13.29 | 6.05 | 5.80 | 8.76 | 8.76 |
| 1974 | 85.55  | 85.55  | 26.32 | 25.54 | 20.49 | 20.49 | 11.74 | 11.74 | 5.70 | 5.01 | 8.76 | 8.76 |
| 1975 | 85.55  | 85.55  | 26.32 | 26.32 | 24.62 | 24.62 | 11.74 | 11.74 | 5.70 | 5.70 | 8.76 | 8.76 |
| 1976 | 136.18 | 135.85 | 42.69 | 41.56 | 24.62 | 19.11 | 13.29 | 10.88 | 6.05 | 4.69 | 8.76 | 8.76 |
| 1977 | 136.18 | 135.77 | 34.88 | 29.65 | 24.62 | 21.08 | 13.29 | 8.50  | 6.05 | 4.21 | 8.76 | 8.17 |
| 1978 | 110.51 | 107.22 | 34.88 | 32.20 | 17.63 | 14.98 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1979 | 89.76  | 89.76  | 26.32 | 25.62 | 20.49 | 19.76 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1980 | 106.84 | 106.84 | 42.69 | 41.16 | 24.62 | 24.23 | 13.29 | 13.29 | 6.05 | 6.05 | 8.76 | 8.76 |
| 1981 | 126.43 | 126.43 | 42.69 | 35.13 | 31.10 | 24.62 | 13.29 | 6.08  | 6.05 | 2.19 | 8.76 | 7.93 |
| 1982 | 102.63 | 102.63 | 31.11 | 31.11 | 17.63 | 17.63 | 13.29 | 12.57 | 6.05 | 5.00 | 8.76 | 8.76 |
| 1983 | 102.98 | 102.98 | 26.32 | 26.32 | 20.49 | 20.49 | 11.74 | 11.74 | 5.70 | 5.70 | 8.76 | 8.76 |
| 1984 | 85.55  | 85.55  | 34.88 | 34.88 | 17.63 | 17.63 | 11.74 | 11.74 | 5.70 | 5.70 | 8.76 | 8.76 |
| 1985 | 89.76  | 89.76  | 26.32 | 26.32 | 24.62 | 24.62 | 11.74 | 11.74 | 5.70 | 5.70 | 8.76 | 8.76 |
| 1986 | 89.76  | 89.76  | 26.32 | 26.32 | 20.49 | 20.49 | 14.50 | 14.50 | 6.51 | 6.51 | 8.76 | 8.76 |
| 1987 | 95.10  | 95.10  | 34.88 | 34.88 | 31.10 | 31.10 | 14.50 | 14.50 | 6.51 | 6.51 | 8.76 | 8.76 |
| 1988 | 120.27 | 120.27 | 34.88 | 34.88 | 24.62 | 24.62 | 14.50 | 14.50 | 6.51 | 6.51 | 8.76 | 8.76 |
| 1989 | 102.63 | 102.63 | 31.11 | 31.11 | 20.49 | 20.49 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1990 | 85.55  | 85.55  | 26.32 | 26.32 | 17.63 | 17.63 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1991 | 85.55  | 85.55  | 34.88 | 34.88 | 31.10 | 31.10 | 13.29 | 13.29 | 6.05 | 5.44 | 8.76 | 8.76 |
| 1992 | 102.63 | 102.63 | 34.88 | 34.30 | 17.63 | 16.66 | 11.74 | 11.74 | 5.70 | 5.20 | 8.76 | 8.76 |
| 1993 | 102.98 | 102.98 | 31.11 | 31.11 | 24.62 | 24.62 | 9.17  | 9.17  | 5.24 | 5.24 | 8.76 | 8.76 |
| 1994 | 120.27 | 120.27 | 42.69 | 42.69 | 20.49 | 20.49 | 14.50 | 14.50 | 6.51 | 6.51 | 8.76 | 8.76 |
| 1995 | 102.98 | 102.98 | 26.32 | 26.32 | 17.63 | 17.63 | 11.74 | 11.74 | 5.70 | 5.70 | 8.76 | 8.76 |
| 1996 | 99.31  | 99.31  | 26.32 | 26.32 | 20.49 | 20.49 | 14.50 | 14.50 | 6.51 | 6.51 | 8.76 | 8.76 |
| 1997 | 85.55  | 85.55  | 26.32 | 26.32 | 17.63 | 17.63 | 11.74 | 11.74 | 5.70 | 5.70 | 8.76 | 8.76 |
| 平均   | 101.39 | 101.27 | 31.65 | 30.79 | 21.74 | 20.76 | 11.49 | 10.85 | 5.68 | 5.28 | 8.76 | 8.63 |

附录 5:

一期工程黄河以北各片供需水量表

单位: 亿 m<sup>3</sup>

| 年    | 滕城片  |      | 衡水片  |      | 德州片  |      | 景县片  |      | 沧州片  |      | 天津片   |       |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|      | 需水   | 供水   | 需水   | 供水   | 需水   | 供水   | 需水   | 供水   | 需水   | 供水   | 需水    | 供水    |
| 1956 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 5.94  | 5.94  |
| 1957 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 8.85  | 8.85  |
| 1958 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 3.81  | 3.81  |
| 1959 | 1.52 | 1.18 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.51 | 2.12 | 2.12 | 4.44  | 4.44  |
| 1960 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 10.99 | 10.99 |
| 1961 | 1.52 | 1.46 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.64 | 2.12 | 2.12 | 11.24 | 11.24 |
| 1962 | 1.52 | 1.42 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.62 | 2.12 | 2.12 | 8.12  | 8.12  |
| 1963 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 5.86  | 5.86  |
| 1964 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 5.95  | 5.95  |
| 1965 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 7.93  | 7.93  |
| 1966 | 1.52 | 0.72 | 2.40 | 2.37 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.31 | 2.12 | 2.12 | 5.76  | 5.76  |
| 1967 | 1.52 | 1.38 | 2.40 | 2.33 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.61 | 2.12 | 2.12 | 6.19  | 6.19  |
| 1968 | 1.52 | 1.38 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.61 | 2.12 | 2.12 | 11.24 | 11.24 |
| 1969 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 5.95  | 5.95  |
| 1970 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 6.84  | 6.84  |
| 1971 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 11.24 | 11.24 |
| 1972 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 11.24 | 11.24 |
| 1973 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 5.95  | 5.95  |
| 1974 | 1.52 | 1.46 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.64 | 2.12 | 2.12 | 5.95  | 5.95  |
| 1975 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 10.88 | 10.88 |
| 1976 | 1.52 | 1.30 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.58 | 2.12 | 2.12 | 3.81  | 3.81  |
| 1977 | 1.52 | 1.10 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.48 | 2.12 | 2.12 | 3.81  | 3.81  |
| 1978 | 1.52 | 1.48 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.64 | 2.12 | 2.12 | 3.81  | 3.81  |
| 1979 | 1.52 | 1.49 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 5.95  | 5.95  |
| 1980 | 1.52 | 1.46 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.64 | 2.12 | 2.12 | 11.24 | 11.24 |
| 1981 | 1.52 | 0.84 | 2.40 | 2.33 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.37 | 2.12 | 2.12 | 11.24 | 9.40  |
| 1982 | 1.52 | 1.42 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.62 | 2.12 | 2.12 | 12.52 | 11.48 |
| 1983 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 11.24 | 11.24 |
| 1984 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 11.18 | 11.18 |
| 1985 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 9.06  | 9.06  |
| 1986 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 3.81  | 3.81  |
| 1987 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 4.21  | 4.21  |
| 1988 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 7.33  | 7.33  |
| 1989 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 11.24 | 11.24 |
| 1990 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 7.08  | 7.08  |
| 1991 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 7.10  | 7.10  |
| 1992 | 1.52 | 1.42 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.62 | 2.12 | 2.12 | 8.06  | 8.06  |
| 1993 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 11.21 | 11.21 |
| 1994 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 8.30  | 8.30  |
| 1995 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 3.95  | 3.95  |
| 1996 | 1.52 | 1.51 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.66 | 2.12 | 2.12 | 3.81  | 3.81  |
| 1997 | 1.52 | 1.46 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.64 | 2.12 | 2.12 | 5.94  | 6.38  |
| 平均   | 1.52 | 1.43 | 2.40 | 2.39 | 2.45 | 2.45 | 0.66 | 0.63 | 2.12 | 2.12 | 8.85  | 7.57  |

附图:

南水北调东线供水范围和调水线路示意图

