



李智录 费良军 等著

# 水库与灌区水利工程系统 优化调度研究

陕西科学技术出版社

封面设计  
责任编辑

杨文涛  
郭一博

ISBN 7-5369-1194-7/S·124

定 价：2.50元



# 水库与灌区水利工程系统 优化调度研究

李智录 费良军 等著

陕西科学技术出版社

特邀编辑: 张惠民

绘 图: 李燕明

水库与灌区水利工程系统

优化调度研究

李智录 费良军 等著

陕西科学技术出版社出版发行

(西安北大街 131 号)

西安空军工程学院印刷厂印刷

787×1092 毫米 32 开本 4.5 印张 9.5 万字

1992 年 3 月第 1 版 1992 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1-1000

ISBN 7-5369-1194-7/S·124

定 价: 2.50 元

## 内 容 提 要

本书针对水库与灌区内水利工程系统的联合优化调度问题，从优化调度、模拟优化调度、实时调度及常规调度四个方面，在理论研究、模型建立及其求解上作了较全面、深入地研究。对水库与灌区水利工程系统的实际生产调度和水电站群调度有积极的指导作用。它既是一本系统性的著作，各章又具有相对的独立性。

本书可作为高等院校有关专业本科生、研究生的参考书，也可供水资源研究的科技工作者及工程技术人员阅读。

## 前 言

系统工程应用于水资源系统的分析与研究迄今已有 40 来年了,我国是在 70 年代末才开始在水利水电工程中比较广泛地研究和应用.近十年来,在理论创新及理论联系实际方面都得到广泛的显著的进展.例如,在水力发电工程方面,单库优化调度的理论研究和计算方法已经成熟,某些方面已达到国际先进水平,且效益显著.其优化理论一般采用动态规划和马尔可夫决策规划,而在迳流处理上,一般采用与实际比较吻合,理论比较完善的随机型,既有计入相邻时段间相关关系,也有按随机独立处理.有的还利用中、短期迳流预报,同时还提出罚函数试算法和改变约束法,解决了满足设计保证率要求而发电量最大的问题,一般发电量可增加  $2\% \sim 3\%$ ,甚至更多.随着国民经济的发展和水电建设规模的扩大,在解决水电站水库群的优化调度中,由单库调度到两库调度,进而发展到提出计入迳流时空相关的多目标、多层次优化方法;扩展到梯级多库、梯级和跨流域的水电站水库群系统.在迳流描述求解规模和数学模型三个基本问题上有了创新和发展.

在灌排规划方面,系统工程除了在灌溉系统的改建、扩建、土地利用规划、灌区最优供水、配水、除涝排水最优规划等方面进行了广泛的研究和应用以外,随着国民经济的发展,灌排系统已由原来单一水源,发展成多种水源的联合开发,单一枢纽工程发展成蓄、引、提、大、中、小工程联合运行的灌溉系统.单纯靠排水沟和排水闸发展成湖泊河网、排水

沟、站联合工作的复杂系统,在灌溉系统和灌溉水库(群)优化调度方面,有用逐次逼近法与增量动态相结合的双层次逼近法进行四维动态规划的研究,有两个地面水水库与两个地下水水库联合调度的研究,有利用非线性规划进行南方山丘蓄、引、提结合的灌溉系统最优规划和调度的研究,有采用机遇约束进行考虑迳流自相关和来水、用水互相关的长藤结瓜式灌溉系统的非线性随机规划和调度的研究,以及用动态规划进行干旱地区非保证年优化调度的研究和用模拟技术研究地面水与地下水联合调度的研究等等.上述灌排系统的优化规划、优化调度的研究,最终目标都希望灌区农作物获得最高产量.然而,农作物的丰产,除了用土、肥农业技术措施等因素以外,需要根据自然现象条件进行适时适量供水,也就是说,灌排系统的优化调度,除与具有随机性、相关性的迳流有关外,还与决定灌溉用水的具有随机性的当地降雨、蒸发之间的相关性有关,这些因素极为复杂,地区性很强,目前尚未能从理论上揭示它们之间存在的内在关系.因此,尽管降雨-迳流-蒸发具有不重复和多变的特性,目前灌排系统和灌溉水库-灌区系统的优化调度只能采用确定性历史长序列模型.

我国不少以灌溉为主的水库,设计时都留有单独的防洪库容,并兼有发电的功能,对于这类水库-灌区系统的优化调度,不少文献采用随机模型,即迳流采用随机的,而灌溉用水则采用某几个典型年确定性水量.半随机模型的最大缺点是不能回答灌区可能有多大的灌溉设计保证率.换句话说,半随机模型中,迳流与灌溉用水没有任何对应关系,因而其优化成果仅仅反映了在设计年份灌区用水条件下的水库的最佳运行规律,并未体现在非设计年份的最佳运行规律.因此,在灌溉为主兼发电水库(群)优化调度中,采用半随机模型是欠妥的.

随着工农业高度发展和人口不断增长,水资源供需矛盾日趋尖锐,农业用水大户如果实行一水多用,开源节流,将能腾出更多的水量提供给其它用水部门.对于以灌溉为主兼顾发电(以及供水、航运)的骨干水库与其灌区水利设施系统的优化调度,应该实行以灌溉为主,兼顾发电(以及供水、航运),蓄、引、提、大、中、小结合,充分利用当地地面径流,开辟多种水源,将水库(群)与灌区水利系统作为一个整体的调度方针.从目前这类系统的研究文献来看,采用半随机的优化模型,多偏重于发电效益的提高,而在合理分配骨干水库的水量,保证在农业用水和发挥灌区内各种水利工程的作用方面注意不够,也就是在模型中对水库与灌区内的水利设施的联合运用,对开辟利用多种水源等整体观念反映不够,因而其优化结果显然是不足的.

本书汇集了多年来对安徽省淠河、史河的以灌溉为主,兼顾发电(包括供水及航运)的水库(群)与灌区水利系统优化调度的研究成果.内容有建立能充分全面描述该系统活动的确定型数学模型以及多种优化方法,实时调度与优化—常规调度等.研究中针对该系统的具体条件,将水库与灌区水利系统及有关水源当作一个大系统,优化调度中在充分利用当地地面径流的基础上,将灌区内众多的大、中、小型反调节水库和抽水站作为一个子系统.在目前生产管理水平低下,为了便于管理人员操作,令子系统中众多的大、中、小型水库和抽水站聚合成反调节聚合库和聚合抽水站,然后与另一个子系统,骨干水库(群)进行联合调度,采用确定性、多目标长系列数学模型,提出了骨干水库群的调度图形式,优选得出可以保证实现最大灌溉设计保证率条件下向灌区反调节聚合库供水和聚合抽水站开机的运行调度规则.灌区最大供水量、最小

缺水量以及最大发电量等效益指标.此外,为再进一步提高效益,对史河梅山水库-灌区优化调度,还将有效发电量(灌区内抽水站耗电量和骨干水库发电量总和)最大作为目标函数之一.在优化调度的基础上,探讨了实时调度的方法.

本书介绍的组合模型技术(第一章第一节)、自反馈优化模拟技术(第二章第一节)以及大系统递阶分解协调(第一章第四节)等几种优化方法均是求解水库群与灌区水利系统优化调度行之有效的方法.第一种方法利用可行分解原理将整体模型等价分解为多模型的组合,使问题求解大大简化,节省机时;第二种优化方法是对模拟技术的一种革新,仿真程度高.适用于任何复杂的大型水利系统的优化调度,但由于模拟中“状态”及“决策”分散点不可能太多,影响其计算精度.

回归模型是研究水库实时调度常用的方法,往往由于时段迳流预报不准确,使优化调度难以实施.本书介绍的回归模型与预报相结合的逐步逼近法,通过采用逐步实测的资料,逐日修正时段迳流的预报值的办法,可以减少由于中短期预报不准确造成的误差,为实时调度提供了一种新的有意义的尝试.由于迳流预报不准,习惯采用常规调度图指导水库的运行,效益不够显著.本书介绍的“逐步计算法”用优化方法进行常规调度使灌溉为主兼顾发电的水库(群)常规调度得以实施.其效益尽管低于优化调度,但比多年来平均的实际效益高.

这一方法还可推广到包括水电站水库(群)在内的各类水库的常规调度中.

对于以灌溉为主(包括其他综合用水部门)的水库(群)与灌区水利系统的优化调度,尚存在以下几个问题需要继续研究:

- 1.关于迳流与灌溉用水的双随机互相关模型的建立与求

解.

2.水库与灌区水利系统一般总是比较复杂,特别是规模比较大的系统更是如此,因此解决概化为系统与逼真描述系统的矛盾,是这类系统优化的关键.

3.在以灌溉为主(包括其他用水部门)的水库(群)与灌区水利系统中,除考虑灌溉保证年的优化外,还应考虑非保证年的优化,才能使这类系统的优化成果更符合实际,这一问题的解决,对灌溉保证设计率低下的北方灌区具有现实意义.

本书是在总结近几年来研究成果的基础上,在施丽贞教授指导下,分别由李智录、费良军、田军仓、刘汉宇同志撰写的,全书由李智录统稿、定稿.由于水平、时间所限,错误与片面之处,敬请批评指正.

在研究过程中得到了安徽省电力局孙世金高工,淠史杭灌区管理局的李寿颐总工,储惠和王家兴工程师等同志的协助和支持,陆雨同志打印了全书,在此表示感谢.

李智录

1992.1

# 目 录

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 第一章 优化调度 .....                        | (1)   |
| 第一节 罚函数组合模型及其在灌溉兼发电水库群优化调度中的应用 .....  | (1)   |
| 第二节 灌溉兼发电水库与蓄、引、提、灌溉系统的联合优化调度 .....   | (21)  |
| 第三节 灌溉兼发电水库群数学模型及其求解方法 .....          | (33)  |
| 第四节 分解协调算法在灌溉兼发电水库群优化调度中的应用 .....     | (45)  |
| 第二章 模拟-优化调度 .....                     | (54)  |
| 第一节 模拟-自反馈优化技术在灌溉兼发电水库群联合调度中的应用 ..... | (54)  |
| 第二节 灌溉兼发电水库与蓄、引、提、灌溉系统的模拟-优化调度 .....  | (71)  |
| 第三章 实时调度 .....                        | (91)  |
| 第一节 回归模型与预报相结合的逐步逼近法 .....            | (91)  |
| 第二节 灌溉兼发电水库与蓄、引、提、灌溉系统的联合优化实时调度 ..... | (107) |
| 第四章 常规调度 .....                        | (122) |

# 第一章 优化调度

## 第一节 罚函数组合模型及其在灌溉兼发电水库群优化调度中的应用

李智录 施丽贞

### 一、前言

本节采用一个简单的外点隐罚函数组合模型<sup>[1]</sup>,结合安徽省磨子潭、佛子岭、响洪甸水库的联合优化调度,使淠河的水资源在时间上和空间上得到合理的重新分配,既满足了淠河灌区灌溉保证率的要求,又显著的提高了发电效益.事实证明,这种方法是有效的,成功的.

一个以灌溉为主,兼有发电、航运、供水和防洪的大型水利系统,常包括有多功能的骨干水库群、灌区反调节水库和塘坝,以及可以从外区引水等不同类型的水利工程.这些设施运行得当与否,对水资源的利用以及对各用水部门的效益都有极大的影响.因此,系统的调度涉及到如何充分利用水资源以及如何在保证灌溉部门获得一定效益的条件下,使系统获得最大的综合经济效益的问题.

图 1-1 是安徽省淠河上一个以灌溉为主的水利系统,包括几个骨干水库、灌区渠首枢纽、众多的可以拦蓄当地径流和引蓄渠首引水量的反调节水库和塘坝,以及可以从外区抽

水补充灌区用水的电灌站.这个系统有以下特点:(1)骨干水库的调节库容承担以灌溉兼发电的任务,在运行中不仅有水量的要求,而且还有水头的要求,在整个系统中起主导作用;(2)灌

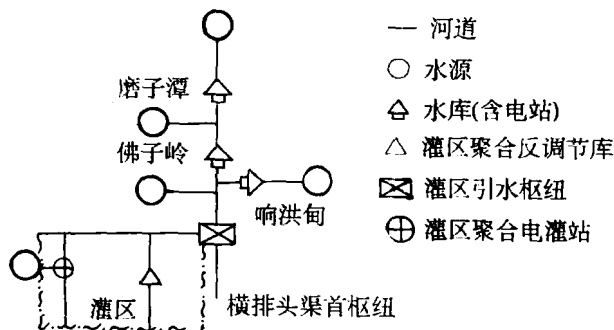


图 1-1 渭河水利系统概化图

区内有少量航运和城市供水任务,它们仅有水量要求;(3)灌区内各种水利设施类型不同,数量多,主要为灌溉服务.根据这样一个复杂的、多变量的系统,需要进行简化与聚合处理,才易于系统的调度计算.例如,在图示系统中,航运和供水比重小,可以把它们的用水并入灌溉用水中考虑.而塘坝很分散,每个的工程规模很小,又直接分布在农田之中,把每个塘坝作为一个子系统来对待是不现实的.处理的办法可以把它们能够提供的水量从总灌溉用水量中扣除之后,不足水量作为灌区要求上游提供的灌区用水量.至于灌区中的反调节水库和电灌站,基本上只有水量要求,可以进行归类聚合.灌区中的聚合反调节水库和聚合电灌站是配合骨干水库群工作的重要设施,

但其规模比骨干库群小,可以通过制定反调节水库的充蓄规则和电灌站的开机条件作为上游库群的约束,这样就把复杂的系统分成上游库群系统和下游灌区水利系统(包括聚合反调节水库和聚合电灌站)两个子系统.形成上游库群为主导,下游灌区水利系统的运行作为制约的联合调度系统,并把多目标的问题简化为只有灌溉和发电双目标问题.于是图 1-1 所示水利系统的联合优化调度问题变成为保证灌溉,并以提高灌溉和发电综合效益为目标,以灌区内水利设施的运行规则为制约的灌溉兼发电水库群的优化调度问题.

应该看到,这个经过简化的系统各变量之间仍然存在非常复杂的非线性关系,因而,是属于一个非线性模型的寻优问题.

## 二、基本原理

一个复杂的水库群系统的非线性模型为:

$$\text{目标函数 } \min f(x) \quad (1)$$

约束条件:

$$g_i(x) \geq 0 \quad (2)$$

$$X \geq 0 \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, l$$

可以采用外点隐罚函数法加以求解,由(2),(3)式组成的可行域记为  $R$ .

构造一个函数  $\psi(t)$  并令在  $t=0$  处连续,于是

$$\psi(t) = \begin{cases} 0, & \text{当 } t \geq 0 \\ t^2, & \text{当 } t < 0 \end{cases}$$

把  $g_i(x)$  视为  $t$  当  $X \in R$  时,

$$\sum_{i=1}^I \psi(g_i(x)) = 0$$

而当  $X \in R$  时,

$$0 < \sum_{i=1}^I \psi(g_i(x)) < \infty.$$

取一个充分大的数  $M_k > 0$ , 得惩罚函数

$$F(X, M) = f(x) + M_k \sum_{i=1}^I \psi(g_i(x)). \quad (4)$$

式中右边第二项为惩罚项,  $M_k$  为罚因子, 等价地

$$F(X, M_k) = f(x) + M_k \sum_{i=1}^I [\min(0, g_i(x))]^2. \quad (5)$$

其中:

$$0 < M_1 < M_2 < \dots < M_k < M_{k+1},$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} M_k = +\infty.$$

$$\min[(0, g_i(x))] = \begin{cases} g_i(x), & \text{当 } g_i(x) < 0 \\ 0, & \text{当 } g_i(x) \geq 0 \end{cases}$$

分析(5)式可以看出, 当  $g_i(x) \geq 0$  时, 惩罚项不起作用, 而当  $g_i(x) < 0$  时, 一般来说, 惩罚项就起作用, 对上述无约束条件的罚函数  $F(X, M_k)$  求极值, 其结果将随罚因子而变, 随着  $M_k$  值的增加, 惩罚项起作用愈大,  $\min(X, M_k)$  的解  $X(M_k)$  与约束集  $R$  的距离愈近, 当  $M_k \rightarrow \infty$  时, 点列  $X(M_k)$  就可以从可行域  $R$  的外部趋于原问题的最优解  $X_{\min}$ .

但是, 对于灌溉兼发电水库群的调度计算, 在遇到  $g_i(x) < 0$ , 即问题得“解”在可行域之外时, 可以采取一步到达可行域边界的办法, 达到简化计算的目的.

根据上述方法建立起来的外点隐罚函数模型, 可以用来控制整个系统的活动, 计算过程中, 各子系统采用二阶段逐次

渐近模型(POA<sup>[2]</sup>法),交叠顺序计算最优轨迹,其中时段选优则采用黄金分割法进行。

### 三、灌溉兼发电水库群的外点 隐罚函数组合模型

水库群系统要求在保证实现规定的灌溉设计保证率的基础上,电站的总发电量之和最大。

#### (一) 数学模型

##### 1. 目标函数

根据调度要求,有两个目标函数:

##### (1) 目标函数 I

实现规定的灌溉设计保证率,就是要求灌溉用水遭到破坏的机率小,亦即要求各时段的灌溉缺水量最小或者是灌溉弃水量最少。即:

$|\bar{Q}_{i2t} + R_{i2t} + \bar{Q}_{i3t} + R_{i3t} - D_t|$  最小,或:

$(\bar{Q}_{i2t} + R_{i2t} + \bar{Q}_{i3t} + R_{i3t} - D_t)^2$  最小,

于是,目标函数 I 为:

$$Z_1 = \min_{\bar{Q}_{i2t}, \bar{Q}_{i3t}} \sum_{t=1}^{T_0} \sum_{i=1}^N (\bar{Q}_{i2t} + R_{i2t} + \bar{Q}_{i3t} + R_{i3t} - D_{it})^2. \quad (6)$$

##### (2) 目标函数 II

希望发电量最大,即:

$$Z_2 = \max_{\bar{Q}_{ij}} \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{T_0} \{A_{ij} \bar{Q}_{ij} \bar{H}_{ij}\}. \quad (7)$$

以年为决策单元,(6),(7)式写成:

$$Z_{11} = \min_{\bar{Q}_{2t}, \bar{Q}_{3t}} \sum_{t=1}^N (\bar{Q}_{2t} + R_{2t} + \bar{Q}_{3t} + R_{3t} - D_t)^2, \quad (8)$$