

四湖排水系统运行规划优化模型*

龙子泉 白宪台 郭宗楼 欧光华

(武汉水利电力大学 武汉 430072)

(湖北省荆州市水利局 荆州 434100)

摘要 分析了四湖排水系统的运行特点,应用大系统理论对系统进行了递阶分析并确定了该系统运行规划的NLP/DP/LP优化模型结构。在确定系统运行规则的基础上,分层建立了系统运行规划优化模型。

关键词 排水系统 运行规划 优化模型

分类号 S 276.3

四湖(洪湖、长湖、珊瑚、白露湖)地区位于湖北省江汉平原腹地,是重要的商品粮生产基地,该地区地势低洼,周围以长江、汉江和东荆河所环绕。圩垸面积 $10\,375\text{ km}^2$,汛期大部分地面高程低于外河水位,极易发生洪涝灾害。50年代以来,兴建了大量防洪排涝工程,到70年代末基本上形成了由大型调蓄湖泊、排水河道、电排站、排水闸等众多工程紧密结合的大型水资源系统。工程措施的不断完善,对系统管理运用提出了更高的要求,而加强水文预报、预警、科学调度、分蓄洪区合理利用等非工程措施的研究和实施是实现可持续发展战略的重要环节。80年代中后期曾有过初步的优化调度研究^[1,2],近年来由于扩建改建,使系统状态发生了较大变化,而且水文系列延长、出现了特大暴雨,该系统又是平原湖区典型而又复杂的排水系统,因此进一步全面研究该系统汛期优化调度有普遍的理论意义。

目前,水资源管理系统的运行决策常常是将运行规划的优化模型和实时调度的优化模型相结合,其中运行规划模型是利用长系列水文历史资料来产生能反映系统水文特征的运行规则,而实时调度模型是以上述运行规则为指导,以当前系统状态和短期水文预报资料为输入来产生最优的运行决策。由于篇幅所限,本文只介绍运行规划模型和运行规则的优选方法。

1 系统工程简介及系统运行特点

1.1 系统工程简介

四湖水资源系统分上区和中下区两个相对独立的系统。上区以长湖为调蓄中心,并有一个外排站和一个外排闸,中下区以洪湖为调蓄中心,有六个外排站和一个外排闸,其中,高潭口站和新滩口站为流域站,其他为区域站。另外,系统中还有若干条连接各项工程的排水干渠。上述工程构成一级排水系统(图1),沿各排干分布有众多小圩垸,垸内有排水沟网、内

收稿日期: 1997-08-04; 修改稿日期: 1997-12-16。

* 中国—加拿大国际合作项目。

排站、闸等构成二级排水系统。

1.2 系统运行特点

(1) 每个外排站、闸控制一个排区，它们既要满足排田要求又要满足排湖要求，而且大部分圩垸为两级排水。因而，各排水干渠水位高低直接影响两岸农田排水条件和各级泵站运行工况。各排区、各项工程都是既相互联系又相互独立的组成单元。

(2) 系统中降雨、径流的大小及分布、外河水位等水文要素均具有随机性。因此长系列水文资料对优化调度研究极为重要。

(3) 系统以排涝为主，兼顾灌溉、航运、水产养殖等。

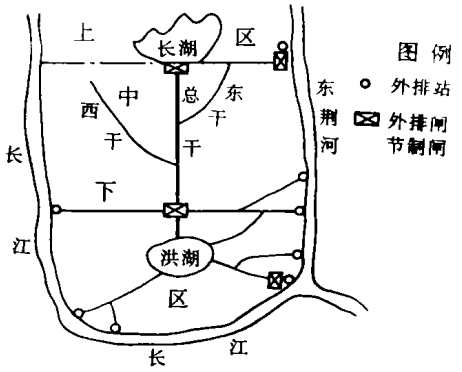


图1 一级排水系统工程示意图

Fig. 1. Sketch of projects layout of first-stage drainage systems

2 大系统递阶分析与模型结构

2.1 系统概化图

中下区排水系统比较复杂，而且在平原圩区具有广泛代表性，故主要以该系统为背景，建立一个较为通用的圩区排水系统优化调度数学模型。为便于建模，将中下区排水系统按其工程布局 and 主要功能抽象成图2所示的概化网络图。

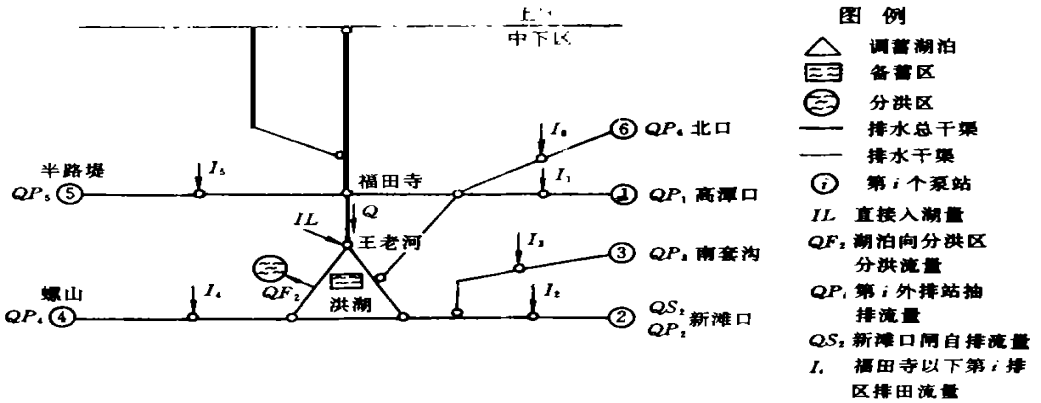


图2 系统概化图

Fig. 2. Simplified network of the system

2.2 大系统递阶分析与模型结构

四湖排水系统是由众多工程，多个排区有机结合而成的复杂系统，汛期调度以湖泊调蓄为中心，湖、河、闸、站联合运用。在优化调度模型中，既有控制湖泊运行的变量，又有控制外排站、闸和排水干渠运行的变量，且这些变量均随时间变化。因而变量维数很高，而且不同决策变量分属不同层次的管理机构。为使优化模型具有良好的仿真性能，而又不致过于复杂，拟应用大系统递阶分析方法，建立多层递阶模型，模型共分三层：

(1) 上层 (第三层) 为运行规则优化层, 用于优选最优运行规则中 3 个最优湖泊控制水位。对这一层建立非线性规划模型 (NLP 模型)。

(2) 中间层 (第二层) 是在给定湖泊控制水位条件下, 对系统入流在时间上进行优化分配, 建立动态规划 (DP) 模型。该模型给出逐时段最优排湖流量, 这也是个运行规则, 但它与多种随机变量相关, 且随年份和时段变化。

(3) 下层 (第一层) 是在第二层给定排湖流量条件下, 对排区入流或排湖流量在外排站和自排闸之间进行优化分配, 建立线性规划 (LP) 模型。

第三层与第二层之间的关联变量是湖泊控制水位, 第二层与第一层之间的关联变量是时段排湖流量。上述三层构成 NLP/DP/LP 模型结构, 降低了整个系统变量维数和计算上的复杂程度。

图 3 为运行规划优化 NLP/DP/LP 模型总体结构框图。该模型结构包含六个模块, 经济模型与水力学模型均不在本文中介绍。

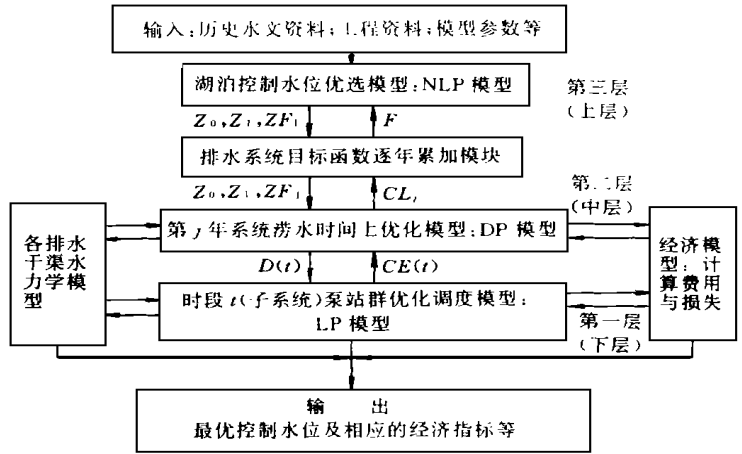


图 3 四湖中下区排水系统运行规划 NLP/DP/LP 模型结构示意图 (图中符号意义详见数学模型)

Fig. 3. NLP/DP/LP model structure of operation planning of the middle-and down-area of Sihou drainage system

3 运行规划优化模型

3.1 系统运行规则

运行规则是对系统最优运行起控制作用的参数, 须利用运行规划优化模型和历史水文资料优选确定。本系统运行规则包括如下两方面的内容:

(1) 洪湖的三个控制水位: Z_0, Z_1, ZF_1 。其中 Z_0 为起排水位, 即当洪湖水位大于或等于 Z_0 时, 可以排湖, 当湖水位低于 Z_0 时, 不排湖, 且流域站所控制排区径流倒流入湖; Z_1 为统排水位, Z_1 控制着参加排湖的一级泵站个数, 若湖水位低于 Z_1 , 只有流域站参加排湖, 若湖水位高于 Z_1 , 所有一级站均参加排湖; ZF_1 为内分洪控制水位, 控制是否要启用位于洪湖内的内分洪区来增加系统调蓄能力, 若湖水位低于 ZF_1 , 不向内分洪区分洪, 否则分洪。

(2) 汛期 (5.1~9.27) 每 5 d 的平均排湖流量 $D(t)$, $t = 1, \dots, 30$ 。这里的 $D(t)$ 是在上层给定最优控制水位 Z_0^*, Z_1^*, ZF_1^* 条件下, 运行 DP-LP 模型优化得出。显然, 各年给出的 $D(t)$ 并不相同, 但长系列计算的各年 $D(t)$ 过程应反映系统水文变化特征, 故可分析 $D(t)$ 与各水文要素 (如降雨、外河水位、湖泊水位等) 之间的相关性, 并建立 $D(t)$ 与多相关因子的多元回归模型, 以此作为统计调度模型。实时调度时, 当系统状态 (湖水位、外

河水位、短期历史降雨) 和短期预报已知时, 可由统计调度模型给出具体的 $D^*(t)$ 作为实时调度决策的目标值。

3.2 第三层: 湖泊控制水位优选模型——NLP 模型

3.2.1 变量 该层 NLP 模型的变量就是三个湖泊水位 Z_0 、 Z_1 、 ZF_1 。

3.2.2 目标函数 以各年汛期系统中除涝费用与受灾损失之和最小化为优化准则。费用函数包括: 一级(外排)站运行费用 CE ; 二级(内排)站运行费用 CEE ; 湖泊排水干渠防汛费用 CD 。洪涝损失函数包括: 备蓄区(湖内圩垸)分洪损失 LFA ; 分洪区(湖外圩垸)分洪损失 LFB ; 农田受涝损失 LW 。目标函数表达式如下:

$$\min F = \sum_{j=1}^J CL_j^*(Z_0, Z_1, ZF_1) \quad (1)$$

式中 $CL_j^*(Z_0, Z_1, ZF_1)$ 为在给定湖泊控制水位 (Z_0, Z_1, ZF_1) 条件下, 第 j 年的系统各种费用与损失之和的最小值, 由 DP 模型给出, 即

$$CL_j^* = \min\{CE_j + CEE_j + CD_j + LFA_j + LFB_j + LW_j\} \quad (2)$$

3.2.3 约束条件

$$Z_{01} \leq Z_0 \leq Z_{0m} \quad Z_{11} \leq Z_1 \leq Z_{1m} \quad ZF_{11} \leq ZF_1 \leq ZF_{1m} \quad (3)$$

$$Z_d < Z_0 < Z_1 \quad ZF_1 < Z_m \quad (4)$$

式中 Z_{01} 、 Z_{11} 、 ZF_{11} 分别为 Z_0 、 Z_1 、 ZF_1 的下限值; Z_{0m} 、 Z_{1m} 、 ZF_{1m} 分别为 Z_0 、 Z_1 、 ZF_1 的上限值; Z_d 为湖泊最低蓄水位(死水位); Z_m 湖泊允许最高蓄涝水位。

上述模型中包括运行规则中的 3 个变量, 可用向量 $X = (Z_0, Z_1, ZF_1)^T$ 表示。每给定一个 $X^{(K)}$ 值 (K 为向量编号), 便调用 1 次 DP 模型及一次目标函数值累加模块来计算相应的目标函数值 F , 如图 3 所示。因 F 是 X 的非线性函数, 故构成 NLP 模型。

3.3 第二层: 湖泊调蓄优化调度模型——DP 模型

3.3.1 变量

(1) 阶段变量: 将汛期(5~9月)划分成 T 个阶段, 阶段序号以 t 表示, $t = 1, 2, \dots, T$; 时段步长根据流域汇流时间和计算精度要求确定, 本系统时段长度 Δt 定为 5 d。

(2) 状态变量: 以时段初湖泊蓄水量为状态变量, 记为 $S(t)$, $t = 1, \dots, T+1$;

(3) 决策变量: 以时段 t 湖泊向外排站、闸的总排水流量为决策变量, 记为 $D(t)$, $t = 1, \dots, T$ 。

3.3.2 系统方程 系统方程为调蓄湖泊的水量平衡方程

$$S_j(t+1) = S_j(t) + [I_{0j}(t) - D_j(t) - QF_{2j}(t) - E_j(t)]\Delta t \quad \forall j, t \quad (5)$$

式中 j 为年份序号, $j = 1, \dots, J$; t 为时段序号, $t = 1, \dots, T$; $I_{0j}(t)$ 为第 j 年时段 t 入湖流量; $QF_{2j}(t)$ 为第 j 年时段 t 向湖外分洪区分洪流量; $E_j(t)$ 为第 j 年时段 t 湖泊蒸发水量折算的流量, 且

$$I_{0j}(t) = Q_j(t) + IL_j(t) + \sum_{i=1}^m QL_{ij}(t) \quad \forall j, t \quad (6)$$

式中 $Q_j(t)$ 、 $IL_j(t)$ 、 $QL_{ij}(t)$ 分别为第 j 年时段 t 由湖泊集水区(即王老河以上)产生的入湖流量, 直接进入湖流量和下区各排区倒流入湖的流量。

3.3.3 目标函数 以第 j 年汛期系统中除涝费用与受灾损失之和最小为优化准则, 目标函数

表达式为

$$\begin{aligned}
 CL_j &= \min_{t=1}^T C(S_j(t), D_j(t)) \\
 &= \min_{t=1}^T [CE(S_j(t), D_j(t)) + CEE(S_j(t), D_j(t)) + CD(S_j(t), D_j(t)) + \\
 &\quad LFA(S_j(t), D_j(t)) + LFB(S_j(t), D_j(t)) + LW(S_j(t), D_j(t)) \quad j = 1, \dots, J \quad (7)
 \end{aligned}$$

3.3.4 约束条件 所有年份都须满足下列约束, 为简便计, 省略年份序号下标 j 。

(1) 调蓄区水位 Z ~ 容积 S 关系约束

$$S(t) = \begin{cases} f(Z(t)) & Z \leq ZF_1 \\ f_1(Z(t)) + f(Z(t)) & Z > ZF_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中 $f(Z)$ 、 $f_1(Z)$ 分别为湖泊和备蓄区的蓄量 S 与湖泊水位 Z 的关系函数。

(2) 状态约束

$$S_d \leq S(t) \leq S_m \quad \forall t \quad (9)$$

式中 S_d 、 S_m 分别为湖泊死水位 Z_d 和湖泊允许最高蓄涝水位 Z_m 所对应的蓄量。

(3) 时段 t 湖泊外排站、闸排泄流量 $D(t)$ 的上下限约束

$$D_{\min}(t) \leq D(t) \leq D_{\max}(t)$$

式中 $D_{\min}(t)$ 、 $D_{\max}(t)$ 为时段 t 允许的最小与最大排湖流量, 由湖泊水位、最低与最高水位限制、外排闸、站排湖能力之和等因素确定, 即

$$D_{\min}(t) = \max\{0, (s(t) - S_m)/(0.36\Delta t) + I_0(t) - E(t) - QF_2(t)\} \quad (11)$$

$$D_{\max}(t) = \min\{(S(t) - S_d)/(0.36\Delta t) + I_0(t) - E(t) - QF_2(t), \\
 \sum_{i=1}^m (QP_i(t) - I_i(t)) + QS_2(t)\} \quad (12)$$

式中 $QP_i(t)$ 为时段 t 第 i 个泵站的抽排能力; $I_i(t)$ 为时段 t 第 i 个排区的排田流量; $QS_2(t)$ 为时段 t 新滩口闸外排能力; m 为参加统排的外排站个数。

(4) 向外分洪区分洪流量 $QF_2(t)$ 的约束

因向外分洪区分洪方式为破堤分洪, 因而不受建筑物限制, 但外分洪有多个, 且有大有小, 具体向哪个洪区分洪要根据分洪水量的大小及分洪损失的大小确定, 故这里向外分洪区分洪水量的计算是以满足最小分洪水量考虑的, 即

$$QF_2(t) = \begin{cases} 0 & \text{当 } S(t+1) \leq f(Z_m) + f_1(Z_m) \\ \frac{s(t+1) - f(Z_m) - f_1(Z_m)}{0.36 \Delta t} & \text{当 } S(t+1) > f(Z_m) + f_1(Z_m) \end{cases} \quad (13)$$

(5) 沿排水干沟各控制断面流量、水位约束

$$Q_{i,k}(t) \leq QM_{i,k} \quad i = 1, \dots, m; \quad k = 1, \dots, N \quad (14)$$

$$ZL_{i,k} \leq Z_{i,k}(t) \leq ZM_{i,k} \quad i = 1, \dots, m; \quad k = 1, \dots, N \quad (15)$$

式中 $Q_{i,k}(t)$ 、 $Z_{i,k}(t)$ 分别为时段 t 第 i 干渠第 k 断面的流量和水位; $ZL_{i,k}$ 、 $ZM_{i,k}$ 分别为第 i 干渠第 k 断面的允许最低水位和最高水位; $QM_{i,k}$ 为第 i 干渠第 k 断面最大过水能力。

3.3.5 边界条件

$$S(1) = S_d$$

3.4 第一层：外排泵站群优化调度数学模型——LP 模型

3.4.1 第一层优化的功能 第一层是在第二层给定子系统(时段 t)排湖流量 $D(t)$ 条件下,对调蓄湖泊周围有关的外排站进行排水流量优化分配,使在给定排湖流量 $D(t)$ 下,各外排站运行费用之和最小。

3.4.2 排水闸运行模拟模型 中下区外排闸主要是新滩口闸,可以洪湖水位和外河水位为上、下边界条件,通过“洪湖出湖闸~下内荆河~新滩口闸”水力计算,求得新滩口闸逐时段自排流量。

3.4.3 外排泵站群抽排流量优化分配模型

(1) 在任一时段 t , 需要由外排泵站群承担的总抽排流量 $DB(t)$ 按下列公式计算:

$$DB(t) = \begin{cases} D(t) + I_1(t) + \sum_{i=3}^m I_i(t) - QS(t) & QS_2(t) \geq 100 \\ D(t) + \sum_{i=1}^m I_i(t) & QS_2(t) < 100 \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$QS(t) = \begin{cases} 0 & QS_2(t) \leq I_2(t) \\ QS_2(t) - I_2(t) & QS_2(t) > I_2(t) \end{cases} \quad (17)$$

即 $QS(t)$ 为时段 t 新滩口闸在承担本排区排田任务后尚余的排湖能力;由于新滩口闸排水能力很大,式(16)中参数 100 表示新滩口闸启、闭的临界流量,即当该闸过流量 (QS_2) 为 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右时,闸上下游水位相差不大,为防止江水倒流,当 $QS_2 > 100 \text{ m}^3/\text{s}$ 时开闸,同时新滩口泵站关机,否则关闸,新滩口泵站开机(若需要)。且,当 $m < 3$ 时, $I_i(t) = 0, i = 3, 4, 5, 6$, 即当湖水位小于统排水位 Z_1 时,区域站不开机,其控制排区涝水倒流入湖。

(2) 外排泵站群优化运行的 LP 模型

现以各泵站的抽排流量为决策变量,以 $x_i (i = 1, \dots, m)$ 表示,对 $DB(t)$ 的分配建立如下数学模型:

① 目标函数 以时段 t 外排泵站群总运行费 CE 最小为优化准则,目标函数表达为

$$\min CE = \sum_{i=1}^m C_i(x_i)x_i \quad (18)$$

式中 C_i 为时段 t 第 i 个外排站抽排单位流量所需运行费,即价格系数,由下式计算:

$$C_i = (C_1 + C_2) 9.81 H_i \Delta t / (100 A_i) \quad \forall i \quad (19)$$

式中 $C_1、C_2$ 分别为单位 kWh 所需电费和第 i 个泵站其他运行费; H_i 为时段 t 第 i 外排站净扬程,可由干渠末端水位 $Z_{iN}(t)$ 与外河水位求得; A_i 为时段 t 第 i 外排站装置效率,系根据机组性能曲线 $A = \Phi_i(H)$ 求得。

② 约束条件 分两种情况表示

(a) 当 $DB \leq \sum_{i=1}^m P_i NP_i$ 时

$$\begin{aligned} x_i &= DB & i &= 1, \dots, m \\ x_i &\leq P_i NP_i & i &= 1, \dots, m \\ x_i &\leq I_i & i &= 1, \dots, m \end{aligned} \quad (20)$$

(b) 当 $DB > \sum_{i=1}^m P_i NP_i$ 时

$$x_i = P_i NP_i \quad i = 1, \dots, m \quad (21)$$

式中 P_i 为时段 t 第 i 外排站的单机流量,系根据机组性能曲线 $P_i = \Phi_{2i}(H_i)$ 求得; NP_i 为

第 i 个外排站的装机台数, 已知; I_i 为时段 t 第 i 个排区需要排出的排田流量。

在上述 (b) 条件下, $(DB - \sum_{i=1}^m P_i N P_i) \Delta t$ 为蓄在田里的涝水, 其相应的受涝损失应记录下来, 并计入第二层优化模型的目标函数中。

由公式 (19) 可见, 价格系数 C_i 是扬程 H_i 的函数, 扬程 H_i 是由泵站的内水位决定, 而泵站内水位是 x_i 的非线性函数, 这就说明 C_i 是 x_i 的非线性函数, 故上述数学模型实际上是非线性的。然而, 这个非线性模型可以通过迭代求解, 使在每次迭代计算时, H_i 已知, C_i 为常数, 从而按 LP 模型求解, 这就是第一层称为 LP 的原因。

4 模型的求解

上述 NLP/DP/LP 模型结构中, 不同层次的模型具有不同的形式和特点。因此, 各层应采用适合其具体形式和特点的求解方法。这里, 上层 NLP 模型采用多变量直接搜索法——BOX COMPLEX METHOD (复形法) 求解, 这是一种常用的序列搜索技术, 已经证明对求解具有非线性不等式约束的非线性目标函数问题是有效的; 第二层 DP 模型为一维确定型动态规划模型, 采用常规离散动态规划法求解, 第一层 LP 模型则可采用单纯形方法求解, 但由于模型结构较为复杂, 具体求解时还要处理一些特殊问题, 如模型之间的相互协调, DP/LP 模型与经济模型及水力学模型关系、LP 模型的迭代计算等, 限于篇幅, 此处省略。

5 模型运行结果

以四湖排水系统31年水文资料为基础, 为选择最优湖泊控制水位, 从11组不同的湖泊控制水位初始值开始, 分别用 NLP/DP/LP 模型进行计算, 其结果如表1。

表1 模型运行结果

Table 1. Operation results of the models

方案号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
最优控制水位	Z_0	24.54	24.55	24.54	24.25	24.25	24.49	24.50	24.36	24.25	24.54	24.25
	Z_1	25.53	25.50	26.21	25.50	25.50	25.59	25.72	26.31	25.93	25.79	26.30
(m)	ZF_1	26.47	26.48	26.47	26.50	26.47	26.49	26.50	26.50	26.20	26.50	26.50
目标函数值 (10^6 元)		243.97	243.97	244.56	244.50	244.49	243.97	244.41	244.73	254.91	244.42	245.00

表中结果表明: (1) 不同的初始点用该模型计算可能会收敛到不同的极小点, 这是由 NLP 模型性质与求解方法所决定的, 但通过多次计算, 该模型能优选出近似全局极小点; (2) 目标较小且较接近的几个极小点之间, 各相应的最优控制水位也较接近, 说明了模型的正确性与求解方法的有效性。

通过定性分析, 从表中选择了目标函数值较小、控制水位具有代表性的方案2、方案6和方案10作为备选方案, 并计算出该三个方案相应的31年各时段最优湖水位与最优排湖流量, 供模拟运行计算与统计分析计算, 以便最终选择方案。

6 结 论

(1) 对四湖排水系统的工程结构及运行特点进行了详细的分析, 以此为基础对系统进行了概化, 用大系统递阶分析方法, 建立了系统优化运行规划的NLP/DP/LP共三层的递阶模型结构。该模型结构降低了整个系统变量维数和计算复杂程度。

(2) 分层建立了优化运行规划数学模型, 在不同的优化层采用了不同的优化技术, 用DP/LP模型解决了涝水在时、空上的优化分配, 用NLP模型实现了湖泊控制水位的优化选择。

(3) 模型的优化计算中, 将优化运行规划数学模型与排水干渠水力学模型及经济模型相结合, 使经济指标计算更加准确, 极大地提高了模型的仿真程度。

(4) 模型及解法应用于本系统获得了成功。目前, 已根据该模型的计算结果, 通过统计分析, 建立了实时调度模型, 即将应用于实际调度。

(5) 本研究成果, 对其他类似系统的研究提供了很好的借鉴。

参 考 文 献

- 1 白宪台, 郭元裕等. 平原湖区除涝系统优化调度的大系统模拟模型. 水利学报. 1987, (5): 1 ~ 10
- 2 白宪台, 龙子泉等. 平原湖区除涝优化调度的随机方法. 水电能源科学. 1990, (2): 163 ~ 171
- 3 龙子泉, 白宪台. 抽水灌溉系统站库联合优化调度数学模型. 水科学进展. 1993, (2): 106 ~ 112
- 4 Haimes YY. Hierarchical Analysis of Water Resources Systems. New York: McGraw-Hill, 1977

An Optimal Model of Operation Planning and Its Solution for Sihu Drainage System

Long Ziquan¹, Bai Xiantai¹, Guo Zonglou¹, and Ou Guanghua²

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering¹, Wuhan 430072)

(Jingzhou Water Resources Bureau², jingzhou 434100)

Abstract: This Paper gives an analysis of operation characteristics of Sihu Drainage System, sets up a NLP/DP/LP model structure of operation planning for the system, and presents an optimal model of operation planning for the system. The model consists of nonlinear programming, dynamic programming and linear programming, which can carry out different optimal function of the system.

Key words: drainage system; operation planning; optimal model.