

泵站优化调度的分解协调模型

程 芳 陈守伦

(河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :针对泰州泵站中转桨式与定桨式轴流泵机组同时并存的情况 ,依据其常规调度模式和机组布置的特点 ,引入大系统分解协调技术 ,建立了两层谱系结构的泵站优化调度模型 ,并在不同层次采用了合理的优化技术进行求解 . 计算结果表明 ,所提出的模型及优化原则保证了泵站在原有设施条件下能经济高效地运行 .

关键词 :泵站 ;轴流泵 ;优化调度 ;分解协调

中图分类号 :S277.1 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2003)02-0136-04

泰州引江河工程是江苏一项战略性重点水利工程 ,建成后将是一条具有引水、排涝、航运等诸多功能的综合利用河道 . 泰州枢纽则是这一工程的控制口门 . 在该枢纽中 ,有总装机容量为 18 000 kW 的泵站 1 座 (以下称泰州泵站) . 泵站共设 9 台轴流式水泵机组 ,其中 6 台为转桨式 ,3 台为定桨式 ,两者通过挡水墙由调度闸相隔 . 在冬春季长江水位较低时 ,可由泵站抽引江水 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 为里下河供水 ,泵站最东侧的 3 台定桨式机组 (抽水能力 $100\text{ m}^3/\text{s}$) ,还可通过调度闸的调度控制对通南地区进行灌溉和排涝 . 建站以来 ,泵站在抗御旱涝灾害、保障农业发展、供水等方面发挥了巨大作用 . 在实现“ 工程水利 ”向“ 资源水利 ”转变的过程中 ,有必要采取非工程措施来挖掘泵站的潜力^[1] ,通过泵站的优化调度与控制来达到高效、节能、经济运行的目的 . 为此 ,笔者对泰州泵站的优化调度问题进行了研究 . 为叙述方便起见 ,本文只讨论一种泵站优化运行准则 ,即给定泵站运行总流量 ,以泵站能耗最小为优化目标 .

1 系 统 概 化

对于泵站的优化调度 ,已有不少学者做了有益的探索^[2-3] . 在本文所研究的泵站中 ,同时存在着两种不同调控性能的机组 ,给建模带来了较大的困难 . 通过对该泵站的系统分析 ,结合泵站的实际布置情况和常规调度操作——当调度闸关闭时 ,6 台转桨式水泵和 3 台定桨式水泵可以分别独立地向里下河和通南地区供水 ,当调度闸开启时 ,9 台水泵可以一同工作向里下河地区供水 ,认为所建立的优化调度模型必须能适应这几种调度操作 . 为此 ,引入大系统理论 ,将该泵站分解为两个相对独立的子系统 (系统 1 ,由 6 台转桨式机组组成 ;系统 2 ,由 3 台定桨式机组组成) ,建立如图 1 所示的 2 层递阶分解协调模型 .

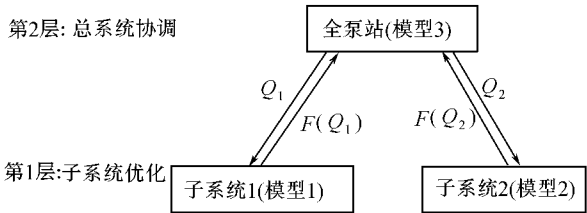


图 1 泵站优化调度分解协调模型

Fig.1 Decomposition-coordination model for optimal operation of pumping station

收稿日期 2001-12-18

作者简介 :程芳(1974—) ,女 ,江苏南京人 ,博士研究生 ,从事水电系统规划与动能经济研究 .

2 数 学 模 型

2.1 子系统优化模型——模型 1

子系统 1 中的机组全部为叶片角度可以调节的轴流转桨式机组,这一有利条件使我们可以在给定的工作水头下,通过调节水泵的叶片角度来控制流量的变化,并合理确定开机台数,通过机组间的优化组合,使整个子系统的能耗最小.这一问题的实质是一个流量负荷在 6 台机组之间分配的空间最优化问题,通过人为地给所研究的问题赋予时间特性,即将系统内可投入运行的机组按顺序编号,把每台机组作为一个阶段,这样子系统 1 的优化问题就变成了一个多阶段决策过程的最优化问题,可以采用动态规划技术来求解.模型如下:

- a. 阶段变量.每台机组为一个阶段, $i = 1, 2, \dots, m$ (m 为可投入运行的机组台数).
- b. 决策变量.分配给第 i 台机组的流量 Q_i .
- c. 状态变量.可以分配给第 $i, i + 1, \dots, m$ 台机组的流量 Q'_i .
- d. 面临时段指标.第 i 台水泵机组的分配流量 Q_i 时的能耗——抽水功率为

$$N_i(Q_i, H_i) = 9.81 Q_i H_i / \eta_i \tag{1}$$

式中: H_i ——第 i 台机组的扬程; η_i ——第 i 台机组的效率.

e. 余留期最优指标函数 $F_i(Q'_i)$.当流量 Q'_i 分配给第 $i, i + 1, \dots, m$ 台机组时,流量最优分配时子系统的最小功率.

f. 目标函数.就是使子系统 1 的总抽水功率最小:

$$f = \min \sum_{i=1}^m 9.81 Q_i H_i / \eta_i \tag{2}$$

g. 系统状态转移方程
$$Q'_{i+1} = Q'_i - Q_i \tag{3}$$

h. 约束条件:

总流量约束
$$\sum_{i=1}^m Q_i = Q_A \tag{4}$$

机组过流约束
$$Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max} \tag{5}$$

机组功率约束
$$N_i(Q_i, H_i) \leq N_0^i \tag{6}$$

式中: $Q_{i\max}, Q_{i\min}$ ——第 i 台机组的最大和最小抽水流量; $N_i(Q_i, H_i)$ ——第 i 台机组输入功率, N_0^i ——允许的最大输入功率; Q_A ——模型第 2 层分配给该子系统的流量.

i. 边界条件.第一阶段状态变量的取值为 $Q'_1 = Q_A \tag{7}$

j. 动态规划的递推计算方程.按照决策变量与状态变量的定义,动态规划采取逆向递推,正向决策法计算,递推方程可以采用如下形式:

$$\left. \begin{aligned} F_i(Q'_i) &= \min \{ N_i(Q_i) + F_{i+1}(Q'_i - Q_i) \} \quad (i = m - 1, \dots, 1) \\ F_m(Q'_m) &= \{ N_m(Q'_m) \} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

2.2 子系统优化模型——模型 2

子系统 2 中的 3 台机组全部为叶片角度不可调节的轴流定桨式机组,在给定总流量的条件下,也存在合理确定开机台数使整个系统的能耗最小的问题.机组的工作特点是,在确定的工作水头下,每台水泵所能抽取的流量以及耗费的抽水功率均为一定值.这样,机组运行时的工作状况或者为关机状态,或者以该水头下的额定流量运行.根据这一特点,引入标识机组状态的 0-1 变量 X_i ($X_i = 0$,第 i 台机组关机; $X_i = 1$,第 i 台机组开机, $i = 1, 2, \dots, m, m$ 为该系统可投入运行的定桨机组的台数),建立如下 0-1 规划模型.

a. 目标函数
$$f = \min \sum_{i=1}^m 9.81 X_i Q_i H_i / \eta_i \tag{9}$$

b. 约束条件:

总流量约束
$$\sum_{i=1}^m X_i Q_i \leq Q_B \tag{10}$$

机组过流约束
$$Q_i X_i \leq Q_0^i \tag{11}$$

机组功率约束

$$N_i(Q_i, H_i)X_i \leq N_0^i \tag{12}$$

机组开机台数的限制

$$0 \leq \sum_{i=1}^m X_i \leq m \tag{13}$$

0-1约束

$$X_i = 0 \text{ 或 } 1 \quad (i = 1, \dots, m) \tag{14}$$

式中： Q_0^i 和 N_0^i ——给定工作水头下定桨机组*i*的额定的抽水流量和抽水功率，可由机组特性曲线求得； Q_B ——模型第2层分配给该子系统的流量。当模型2不是单独运行时，机组台数*m*取决于第2层模型对其分配的流量，上限值取为*m*。

2.3 系统协调优化模型——模型3

第2层优化模型的作用为：将泵站运行的总流量在两个不同的子系统之间协调分配，直至整个泵站系统达到其优化目标。为此，建立如下线性规划模型：

目标函数

$$\min F = C_A Q_A + C_B Q_B \tag{15}$$

约束条件

$$Q_A + Q_B = Q \tag{16}$$

式中： Q ——整个泵站本次调度的总流量； C_A, C_B ——子系统1、2抽排单位水量时的功率耗费，此处可称为“价格系数”，单位为kW/(m³·s⁻¹)，可据第1层各优化模型的最优结果由下式来确定：

$$C_i = f_i / Q_i \tag{17}$$

式中 f_i 为第*i*个子系统承担 Q_i 流量时的最小功率耗费。

3 求解方法

根据上述应用大系统分解协调原理建立起来的多层谱系模型结构的特点，可采用模型协调法^[4]进行求解。其求解过程为：通过指定或预估模型系统关联变量的值（此处为分配给子系统1、2的流量），把第1层中的各子系统相互分隔开来，各自独立地进行最优化。这种条件下各子系统的最优解虽然符合各项约束条件，但未必能使系统整体达到最优，因而各子系统应将相应的目标值返回给上一层（第2层），在该层对协调变量进行校正即改变关联变量的预估值，再传递给下层，这样反复求解，直至求得全局和整体的最优解。

求解过程中，对于协调迭代的收敛性问题，可采用如下方法进行处理。首先，针对该泵站的实际情况，设立“整站原则”，即当总流量能够由转桨式机组承担时，不启用定桨机组，然后在求解时利用这一“整站原则”对总流量这一约束进行过滤，当符合这一原则时，即为 $Q_A = Q, Q_B = 0$ 的特殊情况，此时仅需迭代一次就可以得到最优的结果，否则进行协调迭代，注意到子系统2中机组均为定桨机组，即在给定水头条件下每台机组能抽取的流量为一定值，可利用这一信息对反馈的协调变量进行必要的干预和修正，以避免无效的迭代过程，加快解的收敛速度。从这一过程可以看出，所采用的分解协调模型适应了特殊问题对建模的要求，同时，问题本身的特殊性又为求解带来了方便。

4 应用

泰州泵站设有叶轮直径为3 m的立轴抽芯式轴流泵9台，配套2 000 kW立式同步电动机。在给定总流量235 m³/s、泵站水头3.5 m条件下，优化计算结果如表1所示。

表1 泰州泵站优化运行结果

Table 1 Results of optimal operation of Taizhou Pumping Station

机组编号		流量/(m ³ ·s ⁻¹)	轴功率/kW	叶片安装角/(°)	水泵装置效率
转桨 机组	1	30.0	1 011	1.73	0.680
	2	35.9	1 313	3.10	0.730
	3	34.0	1 302	4.00	0.726
	4	34.0	1 302	4.00	0.726
	5	33.0	1 287	-2.80	0.715
	6	32.0	1 178	1.80	0.703
定桨 机组	1	关机	1 292		0.681
	2	36.1			
	3	关机			

5 结 论

- a. 所建立的两层递阶优化调度模型和相应的优化原则 ,保证了泵站在原有设施条件下能经济高效地运行 .
- b. 由于采用了分解协调技术 ,有效地降低了系统维数 ,为计算带来了方便 ;同时这种递阶结构的模型具有较大的灵活性和适应性 ,各子系统单独运行完成各自的抽水任务时 ,可以单独调用对应的计算模块而无须再另编程序 ,适应了不同调度任务对泵站系统提出的要求 .

参考文献 :

[1] 陆林广 . 泵站进水流道设计理论的新进展 [J]. 河海大学学报(自然科学版) 2001 29(1) :40—45 .
[2] 汪安南 , 伍杰 . 大型轴流泵站最优运行方式的探讨 [J]. 农田水利与小水电 ,1993 (11) 36—38 .
[3] 丘传忻 , 贺贵明 . 泵站运行的优化调度 [J]. 水利学报 ,1993 (3) 35—41 .
[4] 冯尚友 . 水资源系统工程 [M]. 武汉 : 湖北科学技术出版社 ,1991 .23—44 .

Decomposition-coordination model for optimal operation of pumping stations

CHENG Fang , CHEN Shou-lun

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China)

Abstract : In consideration of the co-existence of the fixed- and adjustable-blade axial-flow pumps at the Taizhou Pumping Station , a double layer decomposition-coordination model was established for the optimal operation of the pumping station based on its conventional operational mode and characteristics of pump set allocation . With the model , different optimal solutions can be found for different layers . The calculated result shows that the model and the principle of optimization presented can ensure rational and economical operation of the pumping station with the original facilities .

Key words : pumping station ; axial flow pump ; optimal operation ; decomposition-coordination