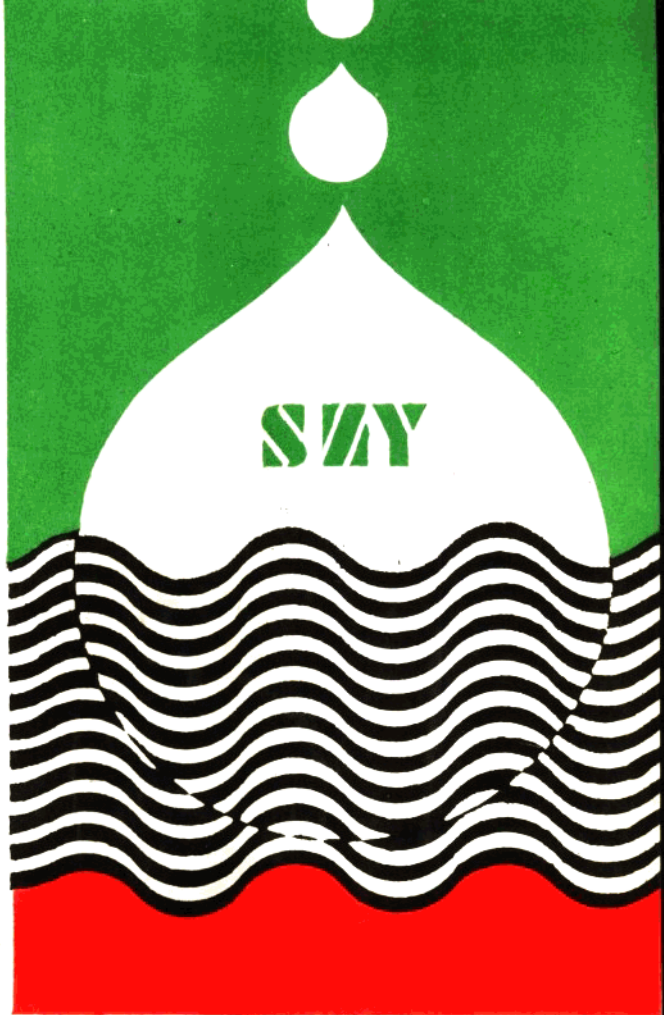


水资源大系统优化技术



马光文 王 黎 著

陕西科学技术出版社

水资源大系统优化技术

马光文 王 黎 著

陕西科学技术出版社

水资源大系统优化技术

马光文 王 黎 著

陕西科学技术出版社出版发行

(西安北大街 131 号)

西安交通大学出版社轻版印刷厂印刷

850×1168 毫米 32 开本 7.125 印张 18 万字

1992 年 5 月第 1 版 1992 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—1,000

ISBN 7-5369-1475-X/TV·7

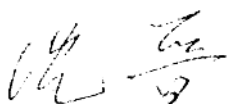
定 价: 3.50 元

序

水资源是人类赖以生存的自然资源之一。随着社会的进步和经济的发展,人类社会对水的需求愈来愈迫切,对水资源开发利用的期望也愈来愈高,水已成为国民经济发展的制约因素。为了最优地开发和利用水资源,使之在国民经济发展中取得最佳效益,必须在考虑满足对水量要求的同时,考虑水量的空间分布、时间变化及水质控制、环境保护、生态平衡等需要;必须将单目标扩展成多目标,将单一河段、单一水库的开发扩展到水库群、全流域乃至跨流域的整个水资源系统的规划、设计、运行和管理。显然,现代水资源系统的规模日益庞大,结构也越来越复杂,服务面更趋广阔,涉及的人力、物力、财力与设备相当惊人,规划、设计、运行和管理空前复杂,系统的决策变量以及可供选择的方案甚多。因此,用传统的常规方法或者普通的优化方法,分析和设计这些庞大而复杂的大系统时,会遇到所谓的“维数灾”,故必须应用最新的科学技术成就。大系统优化理论为解决“维数灾”问题提供了崭新的途径。本书是作者将大系统优化理论应用于水资源工程规划、设计、运行和管理等方面的大胆尝试,是作者在博士、硕士学位论文基础上研究成果的汇总。全书包括水电站群补偿调节优化运行,河流水质规划与管理,城市供水量优化分配及节水,河流规划及水库群参数优选等。这些研究成果,受到国内同行专家的高度评价。正如河海大学叶秉如教授,西安交通大学汪应洛教授、孙启宏教授,清华大学施熙灿教授,武汉水利电力学院冯尚友教授、大连理工大学陈守煜教授所评价的“近代电力系统十分庞大,极其复杂,它的优化运行和控制,在过去一直是把全系统分割成许多子系统分别加以研究,而作者应用大系统递阶多目标优化理论和方法,提出了水火混合电力系统优化运行总体模型,不仅考虑了梯级及跨流域水电站群的

2A6-03/2/18

径流电力补偿,且考虑了水火电站之间的互补,这样大的优化模型,并在微机上实现计算,在国内外实属少见,是作者的大胆创造,对水火电力系统的规划设计和管理运行提供了一种完整的途径和可供应用的方法。”本书既有理论阐述,又有应用实例,可供从事水利、水电、城市供水、环保科技工作者参考,也可作为高等院校有关专业师生的教学参考书。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '沈晋' (Shen Jin).

一九九二年十二月

致 谢

在撰写本书及科学研究过程中,作者得到许多同行专家、教授的指导。尤其是陕西机械学院沈晋教授、颜竹丘教授、李建中教授,成都科技大学曾佑澄教授、吴明远教授、丁晶教授,清华大学施熙灿教授,河海大学叶秉如教授,武汉水利电力学院冯尚友教授,大连理工大学陈守煜教授,西安交通大学汪应洛教授、孙启宏教授,能源部科技司邴凤山司长,能源部成都勘测设计研究院朱藻文总工、朱忠德总工,四川省工程咨询公司周德常高工,四川省电力局戴维勇高工,能源部北京勘测设计院杨之林高工、辛复生高工,陕西省水利厅程永华高工,水利部黄委会规划设计院席家治高工、常炳炎高工。另外,在研究过程中,作者得到水利电力基金委员会,能源部科技司、中电联的资助和支持。作者感谢陕西科学技术出版社陈一诺同志,她为本书的编辑付出了辛勤的劳动。于本书出版之际,作者一并表示深切的谢意。

马光文 王黎

一九九二年十二月于西安

内容提要

水资源大系统优化技术是将大系统优化理论和方法与水资源工程的规划、设计、运行和管理有机结合的一门技术科学。本书是著者近几年在国内一、二级刊物及国内外学术会议等公开杂志上发表过的论文。全书共分为五章,重点介绍大系统优化理论在水电站群、电力系统优化运行、河流水质规划与管理、城市供水及节水、河流规划及水库群参数优选等方面的具体运用和实例。

本书可作为水利水电工程技术人员和管理人员及大学有关专业的技术参考书。

目 录

第 1 章 水电站群补偿调节优化运行

- 1.1 跨流域水电站群补偿调节的递阶多目标控制..... (1)
- 1.2 水电站群补偿调节的递阶控制——关联平衡法..... (15)
- 1.3 梯级水电站群最优运行的隐随机递阶控制..... (28)
- 1.4 梯级水电站优化运行的时间序列分析决策法..... (41)
- 1.5 大系统随机控制理论在水库群优化调度中的应用..... (53)

第 2 章 电力系统优化运行

- 2.1 电力系统优化运行的模型分层及递阶多目标控制..... (71)
- 2.2 水电站群在电力系统中工作位置的确定..... (87)

第 3 章 河流水质规划与管理

- 3.1 河流水质模型参数估计的逐次迭代算法..... (98)
- 3.2 多目标规划和层次分析法在河流水质管理中的应用..... (105)

第4章 城市供水与节水

- 4.1 灰色预测模型及在取水量预测中的应用 (113)
- 4.2 城市售水费率的制定方法 (120)
- 4.3 城市工业供水效益计算方法初探 (128)
- 4.4 城市工业用水量合理分配的多目标交互式决策方法 (135)

第5章 河流规划及水库群参数优选

- 5.1 水电站群开发的优化排序 (143)
- 5.2 应用层次分析法优选以发电为主的水库
正常蓄水位 (155)
- 5.3 应用可变容差法优化设计梯级水库群有
效库容 (173)

附录

- 数学基础 (182)

第1章 水电站群补偿调节优化运行

1.1 跨流域水电站群补偿调节的 递阶多目标控制

提要 本文应用大系统多目标优化理论和方法,建立了跨流域水电站群补偿调节优化的数学模型,提出了两级的多目标控制及其应用对偶分解得到了多级计算结构,在求解子问题时,应用了逐步优化算法。以四川省大渡河、雅砻江六个水电站计算为例,验证了模型及方法的可行性,并得到了对水电站群最优规划具有实际意义的成果。

前 言

位于不同河流上的梯级水电站,存在着水文径流特性和调节性能等方面的差异。当它们联合工作时,可进行径流电力补偿调节,大大提高水电站群的总保证出力和年发电量,从而提高系统的供电质量和水资源利用程度,减少系统重复装机,提高装机年利用小时数,节省系统能源建设的投资和运行费用。特别是具有水、火电站装机比重不同的若干大区电力系统联网时,如何充分发挥不同电源的优势,获得最大经济效益,这正是在流域和河流规划中研究跨流域水电站群补偿调节的意义所在。

跨流域水电站群补偿调节优化问题的研究,涉及到水电站群参数的选择和运行方式的优化,而这两者是互有影响的,在参数给定的前提下,不同运行方式可以输出不同能量指标(保证出力 and 年发电量),而不同能量指标又反过来影响参数的选择。因此,水电站群补偿调节问题,不同于水电站群长期最优运行问题。因为在系统中除已建电站外,还包括待建(或规划)电站,而这些电站施加于研究系统上的有些约束是弹性约束,尤其有些参数还有待优选,这就体现了水电站群补偿调节课题研究的特点。为了解决水电站设计参数与运行方式间错综复杂的关系,我们可以利用大系统分解协调和控制论的思想,以假定的待建水电站设计参数为控制变量,然后以此为前提,优化水电站群的运行方式,其优化结果作为反馈信息来改变控制变量。这样,跨流域水电站群补偿调节问题的研究,构成了所谓“战略与战术”问题。其战略问题就在于确定水电站群的设计参数,构成水电站群运行方式的可行域;其战术问题是在所假定的待建水电站设计参数下,如何使运行方式最优化。本文重点研究“战术”问题。我们所研究的问题与该课题的本身构成了如图1所示的控制系统。

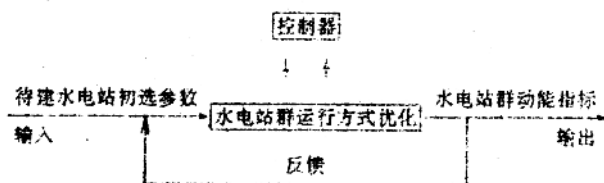


图1 水电站群设计参数优选与运行方式优化控制示意图

众所周知,我国各大电力系统中现都已有若干个水电站和火电站联合运行。随着电力建设事业的发展,今后,系统中水、火

电站数目还会继续增加。但是,仅就水电系统而言,随着河流及梯级水电站数目的增加,变量和约束数目急剧增加,导致所研究的系统模型维数很高,而且,可能对系统性能的评价准则必须用到多个不同的目标,它们甚至是互相冲突的。比如,要求水电站群总的保证出力最大及多年平均年发电量最大等,这就需要用多目标准则进行决策和优化。就水电站群补偿调节优化问题的结构而言,它包含着许多个相互关联的子系统(比如单个水电站),既体现在各子系统的单独特性上,同时还体现在它们之间相互关联的特性上。跨流域水电站群补偿调节优化问题的特点,在于具有多级的或递阶的、多阶段的或动态的结构,且系统有多个目标。所以,该问题可用最近几年才发展的大系统递阶多目标分析方法来研究。

数学模型

在跨流域水电站群系统中,为了使补偿调节作用最优,即要求补偿调节后的水电站群总保证出力最大,其意义是在与设计保证率相应的径流序列条件下(设计枯水年或设计枯水段),使水电站群最小的月平均出力最大。这样,可使水电站群获得尽可能大的替代火电容量效益。除此以外,还希望水电站群总发电量最大。这就构成了我们所研究问题中的目标集。

目标 I

$$\max P$$

$$P = \min_{1 \leq i \leq M} \left\{ \sum_{j=1}^N \eta_j \cdot Q_{ij} \cdot H_{ij} \right\}$$

或写成

$$\max \min_{1 \leq i \leq M} \left\{ \sum_{j=1}^N \eta_j \cdot Q_{ij} \cdot H_{ij} \right\}$$

目标 I

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^M \eta_i \cdot Q_{it} \cdot H_{it}$$

其中 N ——系统内水电站总数;

M ——总时段数,通常以月计,本文取设计枯水年 $M=12$;

η_i ——第 i 水电站的输出系数;

Q_{it} ——第 i 水电站第 t 月的发电流量;

H_{it} ——第 i 水电站第 t 月的发电平均水头;

F ——水电站群最小月平均出力。

约束集

(1) 系统出力约束

$$\sum_{i=1}^N \eta_i \cdot Q_{it} \cdot H_{it} \geq F \quad (t=1, 2, \dots, M)$$

(2) 水量平衡约束

$$V_{j,t+1} = V_{j,t} + Y_{jt} - Q_{jt} - S_{jt}$$

$$Y_{jt} = \sum_{i=1}^N W_{ij} (Q_{it} + S_{it} + F_{it} - D_{it})$$

式中 W_{ij} —— $N \times N$ 维布尔矩阵,其元素由 0 或 1 组成,反映

第 j 水库的泄水量与第 i 水库入流量的关联;

F_{it} ——与上游直接相邻库 i 第 t 月的区间入流量,当其上游无直接相邻库时, F_{it} 表示天然入流量;

S_{jt} ——第 j 库第 t 月弃水流量;

D_{jt} ——第 j 库第 t 月下游取水流量(比如灌溉、工业民用供水等);

Y_{jt} ——第 j 库第 t 月的关联入库流量,它由上游直接相邻水库的泄流量和区间流量扣除取水流量所组

成;

V_u ——第 i 库第 t 月初水库蓄水量;

V_{u+1} ——第 i 库第 t 月末水库蓄水量。

(3) 水库蓄水量约束 由于防洪、排沙、水库取水、电站进水口高程等因素及正常蓄水位、死水位限制,有

$$V_{\min} \leq V_{\text{min}} \leq V_u \leq V_{\text{max}} \leq V_{\text{max}}$$

其中 $V_{\text{max}}, V_{\text{min}}$ 分别表示第 i 库正常蓄水位、死水位所对应库容;
 $V_{\text{imax}}, V_{\text{imin}}$ 分别表示第 i 库第 t 月允许的最高水位及低水位所对应库容。

(4) 水电站发电水头约束

$$H_u = f_i(V_{u+1}, V_u, Q_u, S_u, D_u) - \Delta H_u$$

其中, ΔH_u 为水头损失; f_i 表示函数关系。

(5) 水电站装机容量约束

$$n_i \cdot Q_u \cdot H_u \leq N_i$$

其中 N_i 表示第 i 水电站装机容量。

(6) 下游综合用水约束

$$Q_u + S_u \geq D_u$$

(7) 其它约束

$$0 \leq Q_u \leq Q_{\max}, S_u \geq 0$$

其中 $Q_{\max}$ 表示第 i 水电站水轮机过水能力。

上述的目标函数集与约束集可归纳为:

$$\begin{aligned} \max \min \left\{ \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot Q_u \cdot H_u \right\} \\ \max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \eta_i \cdot Q_u \cdot H_u \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N \eta_i \cdot Q_u \cdot H_u \geq P \quad (l = 1, 2, \dots, M) \end{aligned} \quad (1)$$

$$P = \min_{1 \leq i \leq M} \left\{ \sum_{j=1}^N \eta_j \cdot Q_u \cdot H_u \right\}$$

$$V_{u+1} = V_u + Y_u - Q_u - S_u \quad (2)$$

$$Y_u = \sum_{j=1}^N W_{uj} (Q_j + S_u + F_j - D_j) \quad (3)$$

$$V_{1, \min} \leq V_{u, \min} \leq V_u \leq V_{u, \max} \leq V_{M, \max} \quad (4)$$

$$H_u = f_i(V_{u+1}, V_u, Q_u, S_u, D_u) - \lambda H_u \quad (5)$$

$$\eta_j \cdot Q_u \cdot H_u \leq N_i \quad (6)$$

$$Q_u + S_u \geq D_u \quad (7)$$

$$0 \leq Q_u \leq Q_{\max} \quad (8)$$

$$S_u \geq 0 \quad (9)$$

递阶多目标控制方法

为了实现对系统的分解, 依 Lagrange 对偶分解原理, 首先考虑目标函数 I 和约束(3)。约束(3)式的对偶问题可定义为:

$$\max D(\lambda) \quad (10)$$

$$\text{其中 } D(\lambda) = \min \{L(Q, S, \lambda); \text{约束}(2), (4)-(9)\} \quad (11)$$

式中, $D(\lambda)$ 为对偶函数, $L(Q, S, \lambda)$ 为目标函数 I 对约束(3)的 Lagrange 函数:

$$\begin{aligned} L(Q, S, \lambda) &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N -\eta_j \cdot Q_u \cdot H_u + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \lambda_j^u [Y_u \\ &\quad - \sum_{j=1}^N W_{uj} (Q_j + S_u + F_j - D_j)] \\ &= \sum_{i=1}^M \left\{ \sum_{j=1}^N [-\eta_j \cdot Q_u \cdot H_u + \lambda_j^u Y_u \right. \\ &\quad \left. - \sum_{j=1}^N \lambda_j^u W_{uj} (Q_j + S_u + F_j - D_j)] \right\} \end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^N L_i \quad (12)$$

式中, Q, S 分别为发电流量和弃水流量的向量,

$$L_i = \sum_{j=1}^M [-\eta_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot H_{ij} + \lambda_j Y_{ij} - \sum_{k=1}^N \lambda_{jk} W_{jk} (Q_{ij} + S_{ij} + F_{ij} - D_{ij})] \quad (13)$$

可见, L_i 只与子系统 i 有关, 而与其它子系统无关。再分析目标函数 I 与约束(1)式。根据问题的特点, 我们用式

$$P_{m+1} = P_m + \Delta P_m \quad (14)$$

去替代目标 I 。其中 P_m 为第 m 次迭代的水电站群最小月平均出力, ΔP_m 为 m 次迭代 P_m 的增量。显然, ΔP_m 的大小不仅受到系统的其它约束, 重要的是受到式(1)的约束。所以, $P_m + \Delta P_m$ 即第 $m+1$ 次的水电站群最小月平均出力 P_{m+1} 要满足条件

$$\sum_{i=1}^N \eta_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot H_{ij} \geq P_{m+1}$$

定义式(14)为协调器 I 的迭代式, 可见, 协调器 I 通过对整个系统的干预, 主要起着对目标函数 I 的控制和对约束(1)式的协调作用, 它的协调变量就是水电站群最小月平均出力。

通常, 对于给定的 Lagrange 乘子向量 λ , 式(13)子问题受约束(2)、(4)~(9)的解仅满足子问题的最优条件, 为了检查是否满足整个问题的最优条件, 还需要用最优解的 Lagrange 条件进行检验。注意 $D(\lambda)$ 对 λ_i 的导数

$$D_i(\lambda) = Y_{ij} - \sum_{j=1}^M W_{jk} (Q_{ij} + S_{ij} + F_{ij} - D_{ij}) \quad (15)$$

这样, 我们可引进协调器 II。它对低一级提供协调变量 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, N)$ 。当 $i=1, 2, \dots, M$, 协调器 II 就可利用梯度法来反复修改 λ_i , 以使对偶函数 $D(\lambda)$ 达到最大。协调器 II 对 λ_i 修正的迭代

式为

$$\lambda_u^{k+1} = \lambda_u^k + \alpha \cdot [Y_u^k - \sum_{j=1}^N W_{uj}(Q_j^k + S_j^k + F_j - D_j)]$$

式中, k 为迭代次数, α 为步长。可见, 协调器 I 起着对目标函数 I 的控制及对子系统间的协调作用。协调器 I、II 与子系统间的信息传递见图 2。

整个问题的求解, 是通过逐次修正两个协调器的协调变量, 并重复求解各子问题的迭代过程来实现的。协调器 I、II 分别按照所选定的寻优程序进行搜索, 协调器 I 每改变一次协调变量 P_n 的设定值, 协调器 II 通过不断调整协调变量 λ_u 完成迭代过程, 各子问题把求得的最优性能指标值告诉协调器以便为下一步搜索提供依据。这个过程一直继续到使水电站群总保证出力最大, 又使水电站群发电量最大为止。

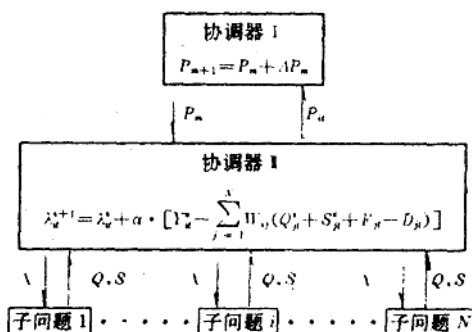


图 2 协调器与子问题的信息传递

子问题求解的 POA 方法

如上所述, 子问题的求解是在上一级协调器指定的协调变量 λ_u 下进行的, 这些子问题实际上是有约束的非线性规划问