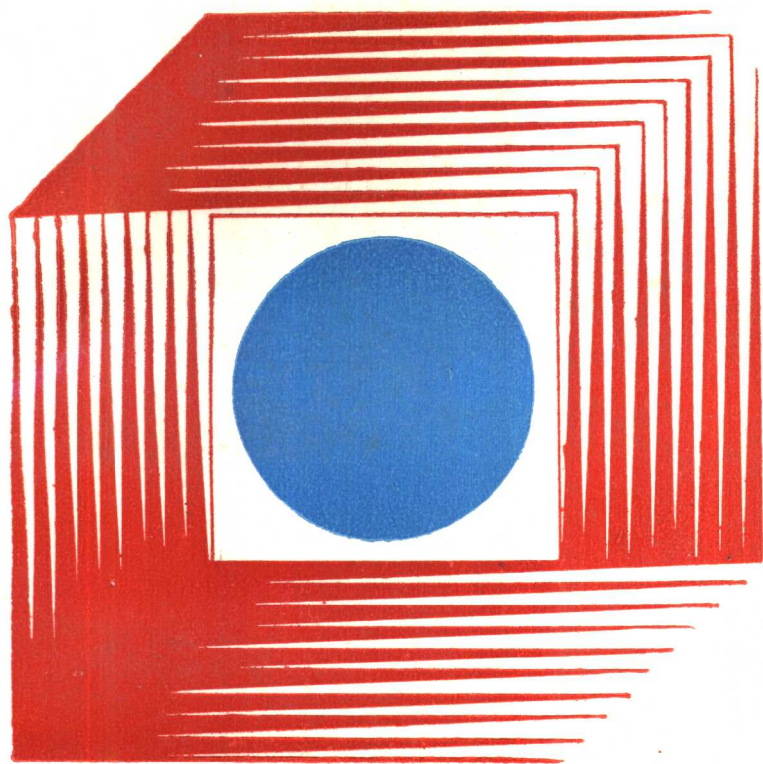


HYDROELECTRIC ENERGY OPTIMAL
MANAGEMENT



翦传 著

水电能优化管理

85790

TV7
1212

水电能优化管理

张勇传 著

华中工学院出版社

水 电 能 优 化 管 理

张勇传 著

责任编辑 李德

*

华中工学院出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中工学院出版社沔阳印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 11 插页: 2 字数: 273 000

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数: 1-2 000

ISBN 7-5609-0040-2/TK·2

统一书号: 15255-103 定价: 3.15元

TV 7
1212

857.90
94

内 容 提 要

本书讨论水电能优化管理的理论和方法,全书分九章,第一章为电力系统优化运行概述,第二、三、四章为电力系统短期优化运行理论,第五章为电力系统可靠性与系统备用容量,第六~九章为长期优化调度理论,包括径流随机分析,水库运行理论,库群调度和优化调度的模糊集方法。

本书适用于水资源、电力、能源规划调度与管理的科技工作者,大专院校教师和研究生。

水利部成都水力发电研究所

前 言

水电能优化管理是水电能源学科的一个重要组成部分，同时与水资源、能源管理、电力系统有着十分紧密的联系。近年来，我给研究生反复开了几轮“水电能优化调度与控制”课，所讲的内容主要反映了本人主持和参加的有关这方面的几个科研项目的成果，边教边改，整理出这本书。

本书内容由两部分组成，第一部分为短期优化，采用确定性优化模型，第二部分为长期优化，主要使用随机优化方法，并扼要介绍了模糊理论的应用。

感谢李福生、刘鑫卿、杜裕福、邓凤山、黄益芬、熊斯毅、付昭阳、揭明兰等同志，感谢Dalen T. Chiang教授和在我身边的研究生们，他们是我这本书中若干工作的合作者，我们的合作是十分愉快的。感谢华中工学院出版社李德同志，她为这本书的编辑付出了辛勤的劳动。

对这本书的错误和不足之处，欢迎读者批评指出。

著 者

1986.8



作者简介

张勇传，河南南阳人，一九三五年生。现任华中工学院教授，水电能源研究所所长，《水电能源科学》杂志主编。张勇传教授长期从事水电能源方面的教学与科学研究，在水电能源开发规划、优化调度管理和计算机实时控制等方面有较深入的研究。他主持了多项国家重点课题的研究工作，在已取得的成果中，两项获水电部重大成果二等奖，一项获江西省重大成果一等奖，一项获全国微机应用一等奖，“水电站水库优化调度理论应用与推广”获国家科学技术进步一等奖。

目 录

第一章 电力系统优化运行概述.....	(1)
§ 1-1 电力系统运行方式与水电站	(1)
§ 1-2 水资源系统与水库.....	(2)
§ 1-3 最优运行准则.....	(4)
§ 1-4 优化运行的内容.....	(5)
第二章 水火电日负荷分配的基本原理	(8)
§ 2-1 电厂间日负荷分配的一般原则.....	(8)
§ 2-2 实现电厂间优化负荷分配的充分条件.....	(13)
§ 2-3 修正电厂特性保证耗煤最小.....	(16)
§ 2-4 机组启动和停用.....	(24)
第三章 网损及网损微增率.....	(31)
§ 3-1 电网中的节点和支路.....	(31)
§ 3-2 网损计算公式.....	(33)
§ 3-3 网损系数计算与估计.....	(40)
第四章 水电站上下游水位变动	(45)
§ 4-1 上游水位变动时负荷经济分配.....	(45)
§ 4-2 水电站的下游不稳定流.....	(53)
§ 4-3 梯级水电站日运行.....	(67)
第五章 可靠性与备用	(73)
§ 5-1 可靠性指标及分布函数.....	(73)
§ 5-2 系统可靠性.....	(83)
§ 5-3 可维修系统的可靠性.....	(100)
§ 5-4 可靠性与费用.....	(112)
第六章 入库径流随机分析	(124)

§ 6-1	径流描述.....	(124)
§ 6-2	用马尔柯夫链描述径流.....	(130)
§ 6-3	径流过程的典型分解.....	(135)
§ 6-4	径流随机模拟.....	(139)
第七章	水库运行理论	(148)
§ 7-1	调度图及运行计算.....	(188)
§ 7-2	优化调度及优化调度图.....	(200)
§ 7-3	惩罚与可靠性.....	(207)
§ 7-4	水库蓄水稳定分布.....	(213)
§ 7-5	折现和效益特性.....	(217)
§ 7-6	对策决策问题.....	(222)
§ 7-7	优化计算与凸动态规划.....	(228)
§ 7-8	多库优化调度.....	(243)
§ 7-9	多库径流预报.....	(253)
第八章	确定来水条件下的优化	(260)
§ 8-1	最优调度线.....	(260)
§ 8-2	来水确定的动态规划法.....	(276)
§ 8-3	调度规则.....	(291)
第九章	优化调度的模糊方法	(309)
§ 9-1	来水类型.....	(311)
§ 9-2	基于模糊关系的聚类.....	(315)
§ 9-3	预报模式.....	(305)
§ 9-4	适应型调度模型.....	(307)
§ 9-5	模糊决策.....	(311)
参考文献		(315)

第一章 电力系统优化运行概述

§ 1-1 电力系统运行方式与水电站

大中型电厂是很少单独向用户供电的，因为将若干个电厂（水电厂、火电厂等）联成电力系统供电较之各电厂单独供电有着极大的优越性，主要体现在：

（1）各个用户出现最大负荷的时间不同，因此电力系统的总最大负荷要比各用户最大负荷的总和小。这样，电网供电方式较电厂单独供电方式所需的设备容量要小，因而使电厂设备容量得到更充分的利用。

（2）各电厂设备互为备用，提高了供电的可靠性，同时又可减少备用容量。

（3）各电厂承担的负荷可以灵活安排，机组得到最经济、合理的利用。根据各机组的动力特性最经济地分配负荷，使水能得到充分利用，使燃料得到最大的节约，从而提高电力系统的经济性。

（4）水电厂参加电力系统后，增加了电力系统和水电厂本身运行方式的机动性和灵活性，能够更好的发挥作用。

例如，利用各水电厂的入流的不同步性和水库的不同调节能力，可获得水文补偿效益和水库补偿效益，提高水电站群的保证出力和保证电能，增加水电站群的工作可靠性，以及增加水电站的必需容量和装机容量，从而减少弃水，提高水量利用率，获得额外电能；由于水电厂可代替火电厂担负负荷图上的腰荷及峰荷，从而减少火电厂运行的不均匀性，使得火电厂的运行情况更经济；利用水电机组的起动迅速、工作可靠、调节性好的特性，由水电机组

担负电力系统的负荷备用和事故备用，从而可提高系统的可靠性和供电质量，并减少由火电机组担负备用时的附加燃料消耗。

总之，在电力系统运行方式中，运行的经济性、可靠性和供电质量的保证，都与水电厂及其水库的运行密切相关，在某种意义上讲，水电厂在电力系统运行方式中起着十分重要的作用。

§ 1-2 水资源系统与水库

大中型水电站都有一个不同调节程度的水库，其作用一是集中落差形成水头，二是调节径流形成流量。而水库又是水资源系统的重要组成部分。随着工农业现代化发展，能源紧张和水源短缺问题几乎是同时出现，并越来越引起人们的重视。

水资源（水电能源为其组成部分）开发利用涉及的方面更为广泛，包括洪水控制、水力发电、灌溉排涝、工业给水、生活用水、改善航运、渔业养殖、旅游事业以及环境保护和生态平衡。

从水库的运行来说，上述几个方面的主要要求可简述如下：

1. 防洪

对水库运行的要求为根据洪水的水量大小及时间上的分布，在不超过下游安全泄量的条件下，按照一定的防洪标准将多余的洪水有计划的拦蓄在水库里。在某些情况下，防洪与发电能够很好地结合，而多数情况防洪与发电是矛盾的。

我国河流多属降雨型。影响洪水的因素众多、情况复杂，而多数河流都有不同程度的洪水灾害，因此大多数水电站水库都兼有防洪任务，其中有些水电站的水库还是以防洪为主要任务的。

2. 发电

水库的水头和流量是为发电提供的两个基本要素，多发电就要求水头高流量大。它们两者是互相矛盾的。尽可能维持水库的高水位可获得高水头，但在洪水期将因此造成过多的无益弃水，使水量利用率降低；反之，尽可能维持水库的低水位，腾出库容

以拦蓄可能发生的洪水，获得大流量，从而使水量得到充分的利用，但水头低了。合理的运行是在这两方面实行折中，获得尽可能大的发电效益。

3. 农业要求

主要指灌溉取水及排涝。灌溉取水可能在水库上游或下游，而排涝一般在下游。水库上游的灌溉取水口高程限制水库水位，在灌溉取水期间库水位不能低于这个高程。水库下游的灌溉取水通常可和发电结合起来，但有时在用水时间和用水量方面要求不一致。

如果在水库消落区有农作物种植安排，则对水库的消落和蓄水还应提出相应的要求。

4. 工业用水及生活用水

电力、冶金、化工、造纸等部门及生活用水都要求一定数量的水量，且要求较高的可靠性，即较高的供水保证率。

5. 航运

航运的第一个要求是一定的水深，水库上游足以满足此要求，而下游的水深则取决于水库的运行情况。一般来说，航深要求可归结为要求水库的下泄流量不能太小。

航运的第二个要求是航道内的表面流速不能过大，过大的表面流速会导致航行周转时间加长、效益降低及航行条件变坏，甚至停航。

航运的第三个要求是水位变率及日水位变幅不能太大，否则将造成船只操纵困难及港口码头的工作条件恶化。

由上所述，航运要求不仅影响水库调度而且影响水库的日调节。并且同水流的不稳定流动密切相关。

6. 渔业及其他

渔业要求能保证鱼类在水库上、下游的活动通道，这需要专门设置的鱼梯、鱼道的正常工作来保证，另外要求造成鱼类的正常产卵条件，保证鱼类的繁殖。

具有旅游设施的水库要求水库水位控制在某一适当的范围；具有较大浅水区的某些水库，在一定期间要求水库水位有适当的变化，以防止疟蚊的繁殖；某些水库的泄洪方式需满足防止淤积的要求等。

§ 1-3 最优运行准则

水电站及其水库的运行既与电力系统密切相关，同时又与水资源系统密切相关，这使得其运行方式的确定变得十分复杂和十分困难。

衡量运行方式优劣的根本标准，称为最优（或优化）准则。准则的确定是一个十分重要的问题，不同的准则，相应不同的优化运行方式。显然，应该在制定优化运行方式前确定准则，明确要求，确定出发点。

1. 国民经济效益最大

这是一个最一般性的准则，能够充分反映电力系统和水资源系统的全面情况和国民经济各部门的综合要求。

这个准则在理论上比较完善，但使用并不方便，因为使用这个准则选择优化运行方式时，需要计算各综合利用部门的实际效益，而效益计算一般是困难的。例如对航运而言，不同的水电站，日调节方案对航运的影响是不同的，可以从一般要求评价某个方案对航运最有利或能否满足航运要求，但很难计算出采用某一个方案比采用另一个方案可以使航运部门多得到多少效益。此外，有些效益（如防洪）甚至难以用数字计算。

另一个原因是各部门的效益有时是难以比较的。例如某一个方案较另方案能多发电，而另个方案较前一方案在灌溉方面有更高的可靠性（保证率），这两者间有时就难以在效益上加以比较。在这种情况下，多目标决策的思想和方法是有用的。

综合利用的各方面是有主次、有重点的；特别是有些部门只提出基本要求，超过基本要求的供水并不能带来附加效益。例

如，超过灌区用水的供水，不仅无益反而有害；超过安全标准的泄量对防洪是不允许的，把泄量控制在比安全泄量低的某一数值也并不能由此带来附加效益。还考虑到大中型水电站的水库又多是以发电为其主要任务的，所以它们的运行优劣一般都放在电力系统予以考察，而把它们在水资源系统中担负的任务作为条件（约束条件）来处理，这样便可采用简化而实用的优化准则。

2. 电力系统耗煤量最小

在满足各水利综合利用部门一定要求的条件下，使电力系统的总耗煤量最小，即

$$G \rightarrow \min \quad (1-1)$$

式中 G 表示电力系统的总耗煤量。

应该指出，所谓电力系统耗煤量即系统中火电厂的耗煤量，这里，水电厂的作用在于替代火电厂的发电量和不利负荷位置，从而可以使火电厂的耗煤量减少。如果各火电厂所用煤质不同，则应折算成每公斤7000大卡的标准煤；如果因运输条件等原因，各火电厂所用煤的煤价不同，则应按费用对耗煤量进行折算，以使耗煤量和燃料费用相一致。所谓水利综合利用部门的一定要求，是指以一定的保证率保证各部门对水位和流量的要求得到满足。

3. 水电厂发电量最大

在满足电力系统和水资源系统一定要求的前提下，使水电厂的发电量最大，即

$$E \rightarrow \max \quad (1-2)$$

式中 E 表示系统中水电厂的总发电量。

电力系统的一定要求主要指容量平衡（检修和备用容量平衡）、保证出力和相应的保证率。

§ 1-4 优化运行的内容

电力系统优化（经济）运行，涉及的面很宽，因素众多，关系

复杂，为了使问题便于求解，通常按具体问题的性质把总问题划分为子问题，每个子问题有一定的独立性，同时又有一定的联系。有三个子问题或称三种方式：厂内运行、短期运行和长期运行方式。

1. 厂内经济运行

对厂内经济运行，主要研究的是电厂动力设备的动力特性和动力指标；机组（火电厂还有锅炉）间负荷的合理分配；最优的运转机组数和机组（包括锅炉）的起动、停用计划；机组的合理调节程序和电能生产的质量控制及用计算机实现经济（优化）运行实时控制等。

2. 短期经济运行

通常又称水火电厂短期经济运行，主要研究的是，电力系统的日（周）电力电量平衡；水火电厂有功负荷和无功负荷的合理分配；负荷预测；电网潮流和调频调压方式；备用容量的确定和合理接入方式；水电厂的水库日调节和上游水位变动、下游不稳定流对最优运行方式的影响等。

3. 长期经济运行

长期运行方式通常指年（季、多年）运行方式。具体内容是以水电厂水库调度为中心，包括电力系统的长期电力电量平衡、设备检修计划的安排、备用方式的确定、水库入流预报及分析、洪水控制和水库群优化调度等。

厂内、短期和长期经济运行方式三者间互相制约、互相影响，是一个整体，其关系如图1-1所示。

制定任一种经济运行方式时，都必须考虑该运行方式与其他运行方式的关系和其他运行方式对它的影响。在理论研究及分析最优运行方式所具有的特点时，应首先解决厂内经济运行方式问题。先厂内，次短期，后长期。在制定短期经济运行方式时，把一个厂看做一个单元，认为厂内各动力设备的运行是按最优方式进行的，全厂动力特性是在厂内经济运行的基础上作出的。在制定长期

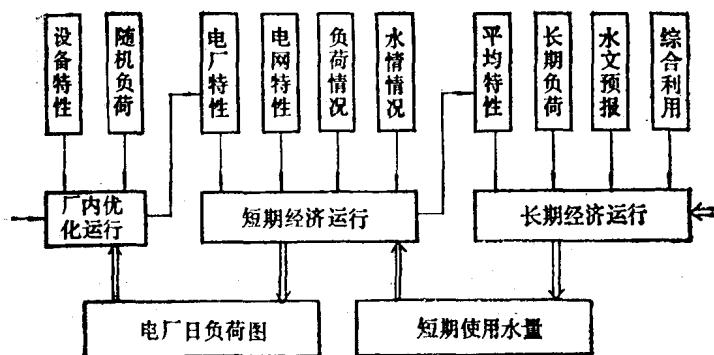


图1-1

经济运行方式时，则认为厂内和短期运行都是按经济运行方式进行的，所具有的动力特性相应于短期的平均参数，称做平均特性，它是在厂内和短期最优运行的基础上绘制出来的。在实际制定各种经济运行方式用以指导运行管理时，则依与上述顺序正好相反的顺序进行。长期优化的基本任务，是把水电厂规定的有限输入能量(或相应的水量)分配给各个时段(短期)；短期经济运行方式的任務，主要是把长期经济运行确定的、短期可使用的水量在短期期间合理使用，以确定电厂的逐时(小时)运行状态和负荷在各电厂间的分配；厂内经济运行的基本任务则是根据短期经济运行方式确定的电厂的负荷(日负荷图)，组织厂内各动力设备的经济运行。

厂内经济运行要求较高的实时性并和不断变动的电网及电厂动力设备的运行参数检测、数据处理、控制参数的调整控制相联系，完善的实施需要一个计算机(微型机)系统。本书主要讨论电力系统的短期和长期经济运行。

第二章 水火电日负荷分配的基本原理

在“日”这样长的期间内，电力系统的负荷可预先较为准确地预报出来，水电厂的日耗水量是由长期运行方式确定的，故均为已知；对于长期调节水电厂，水库上游水位在一日内实际上可认为是常数；电厂动力特性（例如水电厂的流量是其有功负荷和无功负荷的函数，火电厂的耗煤是其有功负荷和无功负荷的函数）都是在厂内经济运行的基础上确定的，都是已知的。

§ 2-1 电厂间日负荷分配的一般原则

设电力系统中有 n 个水电厂和 m 个火电厂，在上述条件下，日负荷分配的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} Q_i &= Q_i(N_i, P_i) \\ B_j &= B_j(N_{Tj}, P_{Tj}) \end{aligned} \right\} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (2-1)$$

式中， Q 表示流量， B 表示耗煤， N 表示有功负荷， P 表示无功负荷， i, j 表示电厂编号， T 表示火电。

电力系统有功、无功负荷平衡分别如下

$$\begin{aligned} F_1 &= \sum_{i=1}^n N_i + \sum_{j=1}^m N_{Tj} - N_o - N_L = 0 \\ F_2 &= \sum_{i=1}^n P_i + \sum_{j=1}^m P_{Tj} - P_o - P_L = 0 \end{aligned} \quad (2-2)$$

式中， N_o 和 P_o 分别表示系统的有功和无功负荷，都是时间的已知函数， N_L 和 P_L 分别表示电网中有功和无功损失。

水电厂日规定用水条件

$$\int_0^{t_r} Q_i dt = W_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2-3)$$

式中, t_r 表一日时间, W_i 表第 i 个水电厂规定的日用水量。

目标函数。系统日运行的总耗煤量 G 最小, 即

$$G = \int_0^{t_r} \left(\sum_{j=1}^m B_j \right) dt \rightarrow \min \quad (2-4)$$

这是一个含多个未知函数的条件变分问题。作辅助泛函数

$$\phi = \sum_{j=1}^m B_j + \sum_{i=1}^n \lambda_i Q_i + \lambda_{i,1} F_{i,1} + \lambda_{i,2} F_{i,2} \quad (2-5)$$

式中, λ_i 为常数待定系数 ($i=1,2,\dots,n$), $\lambda_{i,1}$ 和 $\lambda_{i,2}$ 为随时间而变的待定系数。

按照变分学, 求辅助泛函数的极小值, 令 ϕ 对 N_i , P_i , $N_{\tau j}$, $P_{\tau j}$ ($i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$) 的偏导数为零, 可得

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i \frac{\partial Q_i}{\partial N_i} + \lambda_{i,1} \left(1 - \frac{\partial N_L}{\partial N_i} \right) - \lambda_{i,2} \frac{\partial P_L}{\partial N_i} &= 0 \\ \lambda_i \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} - \lambda_{i,1} \frac{\partial N_L}{\partial P_i} + \lambda_{i,2} \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i} \right) &= 0 \\ \frac{\partial B_j}{\partial N_{\tau j}} + \lambda_{i,1} \left(1 - \frac{\partial N_L}{\partial N_{\tau j}} \right) - \lambda_{i,2} \frac{\partial P_L}{\partial N_{\tau j}} &= 0 \\ \frac{\partial B_j}{\partial P_{\tau j}} - \lambda_{i,1} \frac{\partial N_L}{\partial P_{\tau j}} + \lambda_{i,2} \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{\tau j}} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

$$(i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m)$$

将发电机中因无功引起的功率损失忽略不计或并入电网损失, 则任一发电厂的耗水或耗煤仅与该厂担负的有功负荷有关, 即

$$\frac{\partial Q_i}{\partial P_i} \approx \frac{\partial B_j}{\partial P_{\tau j}} = 0 \quad (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m) \quad (2-7)$$

将(2-7)式代入式(2-6), 可得