

2013年度宁波市自然科学学术著作出版资助项目

水库群联合调度 实用方法与应用

◎ 张松达 夏国团 王士武 钱镜林 等著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

2013年度宁波市自然科学学术著作出版资助项目

水库群联合调度 实用方法与应用

◎ 张松达 夏国团 王士武 钱镜林 等著

图书在版编目(CIP)数据

水库群联合调度实用方法与应用 / 张松达等著.
— 杭州:浙江大学出版社,2013.12
ISBN 978-7-308-12549-9

I. ①水… II. ①张… III. ①并联水库—水库调度—
研究 IV. ①TV697.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 280524 号

本书简介

本书介绍了水库群实用调度方法、有关问题的处理以及对调度响应的评估,列举了相应的应用实例。主要内容是对有关课题研究成果及应用实践的总结、延展与提升。除了分期空库系数约束的调度图和调度函数方法(第二章第三节)外,其余方法和内容同样适用于单一水库的调度。

本书可作为从事水库调度、水库工程管理和水利调度工作人员的参考书,也可供相关专业的科研人员和院校师生参阅。

水库群联合调度实用方法与应用

张松达 夏国团 王士武 钱镜林 等著

责任编辑 沈国明

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址:<http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江时代出版服务有限公司

印 刷 德清县第二印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 8.25

字 数 150 千

版 印 次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-12549-9

定 价 32.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式:(0571) 88925591;<http://zjdxcbbs.tmall.com>

《水库群联合调度实用方法与应用》

编委会

主	编	张松达		
常务副主编		夏国团		
副主	编	王士武	钱镜林	
成	员	苏 飞	温进化	杨关设
		王海亚	胡国建	周 洪
主	审	陈步进	陈森美	

聯合調度經驗
科學創新成果

敬正書
癸巳年夏月

原水利部副部长敬正书为本书题词

序

对《水库群联合调度实用方法与应用》一书的出版,表示祝贺。本书作者是一支以来自科研机构、管理单位与行业主管部门工作的青年人为主的团队,近十年来,他们就水库联合调度开展了一系列科学研究和深入的推广实践,收到了很好的效果,获得了多项科技进步奖和创新奖。

水库群联合优化调度是科学、先进的管理运行模式。把多个水库整合成一个水库群系统,优势互补,扬长避短,用活、用足、用好整个水库群工程体系,可以为防洪、供水、灌溉、发电、航运和生态环境保护提供更好的服务,充分提高这些水库的整体效率和综合效益,发挥更好更大的作用。广泛实施水库群联合优化调度,是当前一项十分必要和重要的任务。

与单库调度相比,水库群的调度要复杂得多,更需要优化调度理论与方法、信息化高技术,以及水库管理体制与运行机制等多方面的支撑。随着经济社会发展,上述方面取得了长足进展,为广泛实现水库群联合优化调度创造了良好的条件。

本书有三个显著特点:一是理论与实践紧密结合,并在实践中注重提炼;二是多种途径和方法结合,强调优化与模拟方法的结合,多种优化方法的集成与交叉,可以解决大规模复杂的水库群联合优化调度问题;三是对传统经验和方法进行了进一步总结和提升,并对水库群实际调度中亟需解决的问题进行了有益探索与初步应用。相信本书的出版,对促进水库群联合优化调度将会发挥良好的示范作用。

期望在这一领域工作的同志,特别是中青年专家和管理人员,在推进水库群联合调度的进程中,继续发挥突出的作用,同时也希望有更多的理论联系实际的高水平的新著作问世。

中国工程院院士

2013年5月

前 言

随着我国经济社会的快速发展,人们对防洪安全、水资源供给安全、水生态安全提出了更高的要求。水库原水由于其众所周知的优质性,很高程度的可控性,依然存在的两重性,同时具有的稀缺性和较强的供水功能,特别重要公共性等特性,越来越体现出它对人类生态系统的重要价值。它与其他一般水资源相比,拥有更多的负熵。因此,长期来,水利工作者和科技人员在注重水库优化调度、充分利用优质水资源的基础上,更加重视水库群的大规模联合调度,进行优势互补,发挥水库群系统整体效益,实现优质水资源的优化配置和高效利用。

本书作者对水库群联合调度的理论方法和技术应用进行了实践和探索,组织攻关了多项科研课题,提出了水库群联合优化调度有关的理论、方法,取得了满意的结果,获得了多项奖励。本书提出的渐进最优性法与遗传算法的组合方法,分期空库系数约束的调度函数方法,以及分维数分析在划定过渡期的应用、基于产流预报的泄洪调度方式、干旱期考虑适度缺水深度的限供水量的确定等均是作者经过潜心研究,并在多年的实践中证明有效的方法。书中的算例也是实际应用的调度实践。编著本书,旨在与同行交流探讨,以期促进水库群联合优化调度技术进步,也借此供从事水利规划、设计、科研、运行管理等相关人员参考。

本书编著组由宁波原水集团有限公司、浙江省水利河口研究院、余姚市水利局的科研和管理人员组成。主要编著人员有张松达、夏国团、王士武、钱镜林、苏飞、温进化、杨关设、王海亚、胡国建、周洪等。编著过程中,胡秉锋、毛跃军、卢林全、胡琳琳等同志提供了许多帮助。浙江省水利厅教授级高工陈步进、浙江省水利河口研究院教授级高工陈森美负责审稿。

本书列入 2013 年度宁波市自然科学学术著作出版资助项目,获得宁波市科学技术协会的资助。



在本书的编写和出版过程中,得到中国水利水电科学研究院、浙江省水利厅、王浩院士工作站、宁波市科协、宁波市水利局的大力支持。原水利部副部长敬正书拨冗为本书题词,中国工程院王浩院士亲自为本书作序,中国水利水电科学研究院蒋云钟教授对本书进行了审阅,浙江省水利厅副厅长许文斌、宁波市水利局张拓原局长、浙江省水利河口研究院叶永棋院长、宁波原水集团王文成董事长等领导与专家对本书的编写给予了很大的关心和支持。在此一并表示衷心感谢。

囿于作者水平和条件,书中难免有疏漏欠妥之处,恳请广大读者和专家不吝指正。

作 者

2013 年 4 月

目 录

序

前言

第一章 绪 论	1
第一节 水库群联合调度的方式	2
第二节 水库群联合调度模型的构建	5
第三节 水库群联合调度优化方法	7
第四节 本书主要内容	10
第二章 水库群联合调度的实用方法	11
第一节 最大削峰目标的粒子群优化方法	11
第二节 补偿调洪的模拟方法	19
第三节 分期空库系数约束的调度图与调度函数	28
第四节 多目标免疫遗传优化方法	36
第五节 遗传算法与渐进最优性法的组合	42
第三章 有关问题及其处理	45
第一节 分维数分析在划定过渡期的应用	45
第二节 基于产流预报的泄洪调度方式	53
第三节 干旱期考虑适度缺水深度的限供水量的确定	59
第四章 水库群联合调度响应评估方法	61
第一节 变动范围法	62
第二节 灰关联熵方法	65



第五章 应用算例	68
第一节 水库群补偿调节模拟方法算例	68
第二节 水库群最大削峰目标的粒子群算法算例	72
第三节 空库系数约束的调度函数算例	75
第四节 多目标群智能算法算例	82
第五节 渐进最优性法与遗传算法组合算例	94
第六节 联合调度的响应评估算例	100
主要参考文献	115

第一章 绪 论

水库管理是水利管理的一个重要领域,水库调度是水库管理的一项重要工作。长期来,水库调度在防洪保安、水资源供给保障与水生态环境保护中发挥了重大作用。由于水库调度重要性和显著效益,这项工作一直受到高度重视。目前我国已建立了一整套调度管理制度,明确的工作程序,对基本的调度原则、典型的调度方式及具体调度规则的确定,有一系列规定。在长期调度实践与深入科学研究的基础上,我国制订了一系列规范、规程,形成了一个完善的技术规范体系。

十多年来,作者对水库群联合优化调度问题开展了一系列工作:一是以调度图优化为重点,同时对调度函数方法和模拟方法进行了应用研究。20世纪20年代,莫罗佐夫提出水库调度图,得到了广泛应用,并在长期的使用过程中积累了大量经验,不断完善,已成为一个普遍使用的调度工具。调度图方法、调度函数方法与模拟方法一起,在水库调度中发挥了重要作用。二是通过优化与模拟相结合的途径,求解单目标问题的最优解与多目标问题的非劣解(集)。最优化方法除了运筹学的常规方法(如线性规划、非线性规划、动态规划等)外,积极推广应用启发式的优化方法。在模拟方面,考虑到水环境、水生态等问题,在非定常浅水动力学计算的基础上,进行环境水力学和生态水力学方面的工作。三是对多目标、高维、紧耦的复杂问题,采用集成组合方法解决,如渐进最优性法与遗传算法相结合的组合方法;大系统递阶控制结合其他方法(除以上方法外,模拟退火技术、人工神经网络等)的组合方法。四是围绕优化调度,发挥产流预报的作用,适度延长预见期,优化汛限水位,用分维数计算成果结合成因分析,合理确定汛期过渡期。五是采用变动范围法(RAV)和灰关联熵,对水库群联合调度的激励响应,在生态流量范围和水资源系统水平上进行分析、评价。



第一节 水库群联合调度的方式

以水库作为控制性工程,对区域或流域水资源时空分布进行合理调节,实现防洪、兴利(包括生态环境安全)的目的,成为水库调度的主要任务。一个流域或区域内,根据自然地理、地形条件、气象水文状况等,往往建有一定数量、规模和功能不同的水库来保障经济社会发展需求。单一水库调度已经在水资源管理中发挥了重要的作用,然而难以考虑水库群系统的协同工作,限制了整体效率和综合效益的发挥。水库群联合优化调度能够对流域或区域内相互间具有一定联系的水库以及相关工程设施进行统一的控制运用,以实现整体效益最大化。它涉及防洪、供水、发电、灌溉、航运等多种目标。实际工作中,水库群调度的形式包括防洪调度、兴利调度、综合利用调度等。

一、防洪调度方式

水库防洪调度是在确保水库工程自身安全前提下,按照设计的防洪库容和下游区域防汛状况,及时拦蓄洪水,削减洪峰,减少或免除下游洪水灾害,并为非汛期工农业生产和城乡人民生活用水储备水源。水库防洪调度方式需要根据水库防洪、兴利的要求和流域的自然特点及下游防洪体系的操作方式决定。通常有以下几种。

1. 下游有防洪要求的水库洪水调度

一般分为防洪补偿调节、固定泄洪调节、预报预泄调节、自由泄洪或敞泄调节、预报调度等方式。

(1)当水库距下游防洪控制点较远,区间流域面积较大,其间可产生较大洪水时,应采用补偿调节方式。

(2)当防洪区距水库较近,区间面积较小,洪水不大或流量变化平稳时,基本上可以忽略区间洪水影响或看作常量,可根据下游防洪对象定出判别条件,确定相应级别的安全泄量固定泄洪。

(3)根据一定精度和准确度较高,有一定预见期的水文气象预报,按照预报的洪量提前进行更高级别的安全泄量进行泄洪,采用预报预泄的方式。

(4)当水库只有开敞式无控制泄洪设施或出现超标准洪水时,采用自由泄洪或敞泄调度方式。

2. 下游无防洪任务的水库洪水调度

为确保水库工程自身安全,一般以水库水位或入库流量作为控制运用的

判别条件。当遭遇设计洪水时,库水位不得超过设计洪水位,如果超过设计洪水位时,按规定的方式泄洪;遭遇校核洪水时,库水位不超过校核洪水位。

3. 有防洪兴利任务的水库洪水调度

为解决蓄泄矛盾、防洪与兴利的矛盾,充分发挥水库的综合效益,可根据雨洪变化规律和暴雨成因分析,将汛期划分为几个时段,再根据各个分期(时段)设计洪水并进行调洪演算,确定各自的防洪限制水位与相应的泄洪调节方式。

二、兴利调度方式

兴利调度涉及灌溉、发电、供水、航运等方面,一般要求尽量减少水库群不必要的弃水量,提高需水期的供水量,常采用以实测入库径流资料为依据绘制的水库调度图、优化方法等进行调度,以具体控制水库的供水量。

对于灌溉和供水水库的调度方式,应在满足灌溉或供水设计保证率和设计引水流量要求、协调取水水位与用水过程和用水量关系的基础上,合理拟定灌溉期或供水期的水库供水方式。

梯级水库发电调度设计时应考虑梯级联合运行的补偿作用,可采用逐级补偿调度方法或联合统一补偿调度方法;对需要进行跨流域水库群补偿调节计算的水电站,应拟定水库群补偿调节的调度方式。

兴利水库调度线划分为若干个运行区,其中主要包括:

(1)保证供水区:上限为保证供水线,下限为降低供水线。当面临时段的库水位位于此区时,水库按保证供水量方式供水。

(2)降低供水区:上限为降低供水线,下限为死水位。当面临时段的库水位位于此区时,水库按降低供水量方式供水。

(3)加大供水区:上限为防洪限制水位线或正常蓄水位线,下限为保证供水线。当面临时段的库水位位于此区时,水库按加大供水量方式供水。

三、综合调度方式

承担两种以上水利任务的水库调度运用,包括防洪、发电、灌溉、航运、供水、防凌、养殖、旅游等,水库调度应尽量做到一库多利、一水多用,充分发挥综合效益,以达到国民经济整体利益最大的目标。综合利用水库调度应依据水库开发任务的主次和协调关系及各开发任务的不同特点,合理处理各项开发任务之间的关系,提出水库综合利用的调度方式。



(1)承担防洪与兴利任务水库的调度设计中,对于降雨成因和洪水发生无明显规律的水库,宜选择防洪库容和兴利库容不结合的形式;对于降雨成因和洪水发生有明显规律的水库,应尽量选择防洪库容和兴利库容相结合的形式。

(2)有供水任务的水库,应优先满足城乡生活用水要求,并为连续枯水年预留一部分生活用水的备用水量。

(3)以发电为主的水库,灌溉(供水)用水相对较小时,按发电的一级调度拟定调度方式;承担坝下引水灌溉任务时,可利用发电后的水量进行灌溉,在灌溉用水高峰时段,宜减小发电流量,尽量满足灌溉取水要求。

(4)对于改变了原河道径流分配,从而对环境和生态产生影响的水库,在水库调度设计中应考虑环境和生态的用水要求,将水库蓄放水对环境和生态的影响控制在允许的范围内。

(5)在实施调度中,应根据当前的库水位和前期来水情况,参照调度图和水文气象预报,调整调度计划。对于多年调节水库,在正常蓄水情况下,一般应控制调节年度末库水位不低于规定的年消落水位,为连续枯水年蓄备一定的用水量。当遇到特殊的干旱年,水库水位已落于限制供水区时,应根据当时具体情况核减供水量,重新调整各用水部门的用水量,经上级主管部门核准后执行。

第二节 水库群联合调度模型的构建

在明确了水库群联合调度的目标后,水库群的联合调度面临的两个关键问题是数学模型的构建和求解。对于水库群联合调度模型的构建,要根据实际的调度目标、水库工程设施及控制条件来建立。

一、目标函数

水库群联合优化目标必须尽可能满足国民经济和社会发展的各项具体要求或目的,如防洪、发电、灌溉、供水和生态等能以定量指标表示的具体目标。在以发电为主的水库群系统中,常以发电量最大、总出力最大或发电效益最大等为目标函数;在以防洪为主的水库群系统中,常以最大削峰准则、最大防洪安全保证准则和最短洪灾历时准则等作为目标函数。在不同类型水库的调度中,发电、灌溉及供水一般主要是兴利调度对象,防洪是各水库在汛期的主要调度对象。灌溉、供水、航运、泥沙、防凌和生态调度等主要是在兴利调度中通过给定限制条件来实现的。近年来随着水资源可持续发展观念的日益加强,综合考虑水资源经济、环境、生态和社会的和谐发展,水库群联合调度已经成为多目标调度问题,越来越受到关注。对于具有防洪、发电、灌溉、航运及生态等多任务的水库群系统,如果各目标效益可以公度,则其运行调度可采用单一经济目标的优化模型;若不能公度,则需转化为多目标问题来处理。

二、约束条件

由于水库群间的水文、水利联系,在调度中会产生相应的约束关系。约束条件在总体上可以分为水库自身水位安全控制约束、蓄泄水量平衡约束,以及其他有关安全或生态要求约束等。

水库特征水位作为水库调度中的一系列控制条件,应当根据水库设计时规定的相应特征水位(水库特征值),考虑工程安全情况、社会各系统的现实要求,以及水文数据的变化等具体情况研究确定,并应获主管部门审查批准。水库控制运用指标主要有:

(1)允许最高水位,即水库遭遇校核洪水时允许充蓄到的最高水位,是判断水库防洪安全的重要指标;



(2)防洪限制水位,是水库在汛期为预留防洪库容而限制蓄水的上限水位;

(3)汛末蓄水位,即水库在汛末计划充蓄到的正常高水位,它在很大程度上决定了水库在下一个汛期到来之前可能发挥的兴利效益;

(4)兴利下限水位,即水库在正常兴利运用情况下允许消落到的最低水位,它反映兴利需要及各方面的控制条件;

(5)防洪运用标准,即为水库本身及为下游防洪安全制定的防洪标准,一般采用一定重现期的设计洪水或以可能最大洪水为标准。

对蓄泄水量平衡约束,一般要结合水库来水和用水情况,依据降水—径流条件、水库群系统的结构、水量输送要求等,按照水量平衡原理建立。

其他约束还有工程自身泄流能力要求、下游冲沙调沙的下泄流量要求、维持下游河道生态流量要求、跨片调水的水量要求、水电站的出力要求等。

第三节 水库群联合调度优化方法

在信息化及有关高技术、系统分析与多种优化方法的支持下,目前更多的水库从单库调度向水库群联合调度的更高阶段发展。对水库群进行联合优化调度,国内外早就开始了研究和实践,其中水库群联合优化调度方法方面,已有包括网络流模型在内的多种模型与方法,以及成功的应用实例。如美国加利福尼亚中心流域工程优化调度系统(CVP)、田纳西流域机构的水资源优化调度系统(HYDROSIM)、美国陆军工程兵团开发的防洪兴利调度系统(HEC-5)等。我国系统地研究水库群优化调度问题则开始于20世纪80年代初,在调度图方法、大系统分解协调方法、动态规划、模糊优选、智能算法等方面进行了广泛深入的研究。随着大系统递阶控制方法、动态规划中的渐进最优性法(POA)和动态规划逐次渐近法(DPSA)及启发式方法(包括群智能、人工神经网络等),尤其是各方法组合(两种及两种以上方法的组合)的应用,水库调度能力得到了大幅度优化。组合方法与水利动能的模拟计算相结合的做法,为我们解决大规模的复杂的水库群联合调度的优化问题,提供了一条切实有效的途径。

一般的优化具有下面形式:

$$\min f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-1)$$

$$\text{s. t. } g(X) \geq 0, X \in D \quad (1-2)$$

其中 $x_1, x_2, \dots, x_n \in \Omega$ (可行域,代表问题参数的选择范围),即 $\min f(X)$, 其中 $X \in \Omega$ (矢量形式)。 $f(X)$ 是决策问题的数学模型,也是决策问题的目标函数, $g(X) \geq 0$ 是决策问题的约束条件, D 是决策问题的定义域(可行域)。

水库群联合调度问题归结为上述形式的极值求解问题,特别对于多目标问题,极值点(或非劣解)非常多。根据优化算法的发展历程,可以将其分为经典优化算法和启发式优化算法。求解不同的优化问题应选取相应的合适算法。

经典优化算法包括:单纯形法(Simplex Method)、最速下降法(Steepest)、共轭梯度法(Conjugate Gradient Algorithm)、牛顿法(Newton Algorithm)、拟牛顿法(Pseudo Newton Algorithms)、拉格朗日乘子法(Augmented Lagrangian Algorithms)、序列二次规划(Successive Quadratic