

水利部公益性行业科研专项资助项目 (200801015)

滦河下游 水库群联合调度研究

◆ 邱 林 马建琴 王文川 张振伟 韩晓军 著 ◆



97.1



黄河水利出版社

水利部公益性行业科研专项资助项目(200801015)

滦河下游水库群联合调度研究

邱 林 马建琴 王文川 张振伟 韩晓军 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书以滦河流域下游水库群联合调度研究为背景,系统地阐述了水库群联合优化调度的理论、技术与方法,主要包括:设计洪水过程线推求、水库防洪调度模型及求解、河道洪水演进方案、实时防洪调度多目标决策方法、水库群防洪调度研究、区域水资源优化配置研究、水库群联合优化调度方案和水库综合管理信息系统及开发等。

本书可供水文学及水资源工程、水利工程、管理科学与工程专业的研究生、相关科研人员及大专院校师生参考使用,也可各级防汛部门的领导决策提供依据,特别是为水库管理部门进行水库的调度工作提供参考、借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

滦河下游水库群联合调度研究/邱林等著. —郑州:
黄河水利出版社,2009.5
水利部公益性行业科研专项资助项目(200801015)
ISBN 978-7-80734-176-5

I. 滦… II. 邱… III. 滦河—下游河段—水库调
度—研究 IV. TV697.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 069677 号

策划编辑:李洪良 电话:0371-66024331 E-mail:hongliang0013@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hslcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:12.5

字数:286千字

版次:2009年5月第1版

印数:1—1 000

印次:2009年5月第1次印刷

定价:35.00元

前 言

当今世界面临的人口、资源和环境三大课题中,水已成为最为关键的问题之一。水资源的可持续利用是实现社会、经济以及生态环境可持续发展的极为重要的保证。我国是水问题最多的发展中国家之一,是世界上水灾频发且影响范围较广泛的国家之一。我国约35%的耕地、40%的人口和70%的工农业生产经常受到江河洪水的威胁,并且因洪水灾害所造成的财产损失居各种灾害之首。因此,合理调度水资源是维持水资源系统的和谐、保证系统的良性循环和流域水管理的重大科学与实践问题。

水库调度是一个传统的研究课题,随着社会的进步和经济的发展,水库防洪问题成为学术界普遍关注的问题。库群的防洪问题尤为引人注目,因为随着水资源的不断开发利用,水库群已成为最常见的水利水电系统。水库群的防洪联合调度虽然以单库防洪调度的理论和方法为基础,但其复杂性远远高于单库防洪调度。水库群是结构复杂、规模庞大、功能综合的大系统,水库联合调度问题在应用传统优化技术求解时,遇到了维数灾、定性与定量问题的处理、决策人参与和偏好处理等困难,并且实践证明,处理上述问题的任何一点技术改进都会带来较大的社会与经济效益。因此,从技术和经济角度寻求水库群联合调度的理论与方法,并进行实践应用是十分必要的。

本书是作者在过去研究与实践的基础上,对研究方面的一次全面总结与体系的提升。全书分3部分共12章,重点论述了研究背景及意义,工程概况及流域地表水资源分析,设计洪水过程线推求,水库防洪调度模型,滦河下游河道洪水演进方案,防洪调度模型求解,实时防洪调度多目标决策方法,滦河中下游水库群防洪调度研究,区域水资源优化配置研究;引滦工程六水库联合优化调度方案,水库综合管理信息系统,引滦枢纽工程综合管理信息系统开发。

第一部分包括第1、2章,主要对国内外水库防洪调度的现状进行论述,以阐明水库群联合调度的必要性和意义,指出其存在的问题,并且对实际研究对象——滦河流域六水库的工程概况和地表水资源状况进行了介绍。

第二部分包括第3~10章,是水库群联合调度的理论研究和应用部分。重点是研究水库的防洪调度模型及其求解、河道洪水演进、调度决策多级模糊优选、水库群水资源优化配置研究、联合调度研究等内容。本部分比较详细地介绍了以上内容,并在滦河流域进行了应用,是本书的核心和基础。

第三部分包括第11、12章,是水库群联合调度的管理信息系统的集成和应用部分。结合实际工程需要,采用计算机编程语言,进行了水库综合管理信息系统和引滦枢纽工程综合管理信息系统的开发、调试与应用。

本书由邱林、马建琴、王文川、张振伟、韩晓军共同撰写,最后由邱林统稿。本书写作过程中,作者参阅和引用了大量相关文献和研究成果,在此谨向有关作者和专家表示衷心的感谢。本书的出版得到了水利部公益性行业科研专项资助项目(200801015)、华北水

利水电学院省级重点学科——水文学及水资源学科以及华北水利水电学院高层次人才启动项目(200514, 200821, 200903)的支持,在此表示感谢。

本书能够得以问世,要特别感谢水利部海河水利委员会引滦工程管理局周广刚副处长及有关同志,他们为资料的收集和整理付出了许多辛苦的汗水,同时也要感谢陈晓楠博士、段青春博士、韩宇平博士、徐冬梅博士、肖琳、冯晓波等为本书的程序实现和相关研究所作出的贡献。在本书正式出版之际,特向有关领导、专家以及为本书付出劳动的各位同仁表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,且部分成果有待进一步深入研究,书中谬误及不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2009年3月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 研究背景、目的及意义	(1)
1.2 水库调度研究概况	(5)
1.3 存在问题及发展趋势	(13)
1.4 研究内容	(15)
第2章 工程概况及流域地表水资源分析	(18)
2.1 工程概况	(18)
2.2 工程管理机构	(27)
2.3 引滦工程向唐山市和天津市供水情况	(27)
2.4 引滦供水分水原则	(28)
2.5 防洪调度	(29)
2.6 兴利调度	(30)
2.7 水库调度方案编制依据	(30)
2.8 降水资源	(30)
2.9 地表水资源及水灾害	(31)
第3章 设计洪水过程线推求	(37)
3.1 设计洪水过程线的选择	(37)
3.2 设计洪水过程线的放大方法	(38)
3.3 存在的问题	(40)
3.4 洪水过程线放大优化模型	(41)
3.5 模型求解方法	(42)
第4章 水库防洪调度模型	(43)
4.1 水库防洪调度综述	(43)
4.2 调洪演算	(44)
4.3 水库防洪优化准则	(46)
4.4 洪水频率判断条件分析	(47)
4.5 水库防洪优化调度模型	(48)
第5章 滦河下游河道洪水演进方案	(51)
5.1 概述	(51)
5.2 河道洪水演算理论	(52)
5.3 马斯京根模型与应用	(53)
5.4 模型参数率定与成果检验分析	(56)

第 6 章	防洪调度模型求解	(61)
6.1	动态规划法	(61)
6.2	粒子群优化算法	(64)
第 7 章	实时防洪调度多目标决策方法	(74)
7.1	防洪调度方案的生成	(74)
7.2	防洪调度决策多级模糊优选模型	(75)
7.3	目标综合权重的确定	(78)
第 8 章	滦河中下游水库群防洪调度研究	(81)
8.1	设计洪水过程线的推求	(81)
8.2	潘家口—大黑汀区间设计洪水过程	(85)
8.3	防洪优化调度模型及求解	(86)
8.4	潘家口、大黑汀、桃林口三库联合防洪调度研究	(94)
第 9 章	区域水资源优化配置研究	(102)
9.1	水资源优化配置理论	(102)
9.2	供水现状	(105)
9.3	区域水资源供需分析	(115)
9.4	区域水资源可持续利用对策	(120)
9.5	结论及建议	(124)
第 10 章	引滦工程六水库联合优化调度方案	(125)
10.1	联合优化调度的可行性	(125)
10.2	联合优化调度方案	(127)
第 11 章	水库综合管理信息系统	(143)
11.1	管理信息系统概述	(143)
11.2	水利信息化	(145)
11.3	系统功能设计研究	(154)
11.4	GIS 平台基本功能设计	(158)
11.5	数据库系统设计	(160)
第 12 章	引滦枢纽工程综合管理信息系统开发	(175)
12.1	系统实现功能介绍	(175)
12.2	防洪调度	(176)
12.3	供水调度	(181)
12.4	数据库管理及其他	(184)
参考文献		(186)

第1章 绪论

水是自然生态的生命要素、万物赖以生存的环境因子,是人类生存和社会发展的重要物质资源。水库工程是水利工程的主要形式,在水资源开发利用、防洪、抗旱等方面起着十分重要的作用。随着社会经济的发展和科技水平的提高,如何充分利用防洪调度理论与方法并结合现代智能技术,实现防洪系统的最优调度与管理、减少洪灾损失、提高防洪效益和最大限度地实现洪水资源化,具有十分重要的经济意义和社会意义。建立水库综合管理信息系统能够高效地收集、储存、传输、处理和利用这些信息,在保证工程安全的条件下,最大程度地发挥水库工程的效益,对指导水库运行调度、更好地发挥水库工程的作用至关重要。

本章通过介绍水库群联合优化调度研究背景和意义,重点对国内外水库防洪调度的研究现状进行分析,详细分析了水库优化调度技术、模拟方法,指出水库防洪调度研究中存在的问题及发展趋势,最后列出本书的主要研究内容。

1.1 研究背景、目的及意义

1.1.1 研究背景

在社会经济的快速发展中,水资源作为基础性的自然资源和战略性的经济资源,已逐渐演变为现代社会的“瓶颈”资源。在当今世界面临的人口、资源和环境三大课题中,水已成为最关键的问题之一,从当前和21世纪的发展来看,洪涝灾害、干旱缺水、水环境恶化三大问题已经成为我国社会经济可持续发展的重要制约因素。联合国《世界水资源综合评估报告》指出:水问题将严重制约21世纪全球经济与社会发展,并可能导致国家间的冲突。洪水是江河、湖海、水库等水体内水量迅速增加及水位急剧超过常规水位的水流现象,常见的有暴雨洪水、融雪洪水、冰凌洪水以及水库失事引起的溃坝洪水等。洪水灾害是影响范围最广、发生次数最频繁、损失最严重的自然灾害,它对人类的影响由来已久,尼罗河的第一次洪水记录可追溯到公元前3500年~公元前3000年,黄河的第一次洪水记录大约是在公元前2297年。有关洪水的故事深深地沉淀在世界各国的历史文献中。《圣经》中描述了那场覆盖全球、毁灭生灵的史前大洪水;《淮南子·览冥训》记载:“往古之时,四极废,九州裂,天不兼复,地不周载;火燄炎而不灭,水浩洋而不息”。毋庸置疑,洪水灾害对人类社会进步和社会经济发展产生了深刻的影响。据有关部门统计,全球灾害损失中有40%是洪水造成的。

我国地域辽阔,处于季风气候区,由于受热带、太平洋低纬度上温暖而潮湿气团的影响以及西南的印度洋和东北的鄂霍茨克海的水蒸气的影响,东南地区、西南地区以及东北地区可获得充足的降雨量。同时,我国具有丰富的水资源,水资源总量为28 124亿 m^3 ,其中河川径流总量27 115亿 m^3 ,居世界第六位;但由于受地形和气候的影响,我国的降雨和水资源在时空分布上很不均匀,由此经常造成一些不利影响。我国降雨多集中在7~9

月,夏季暴雨集中,降雨量占全年的70%,由于河道宣泄不及,经常造成洪水泛滥,如果出现超过现有防洪能力的洪水时,全国近1/10的土地面积、1/2的人口和2/3的工农业总产值将受到不同程度的威胁。洪水历来是中华民族的心腹之患。我国960万km²的土地上分布着与世界文明息息相通的两大河流——黄河、长江,并伴有松花江、辽河、海河、淮河、珠江等五大水系。历史上我国常由于频繁的洪涝灾害而民不聊生。自公元前620年到1938年的约2600年中,黄河就决口了1590次,约为三年两决口,百年一次大改道。长江也常遇水患,在有历史记载的2000年中,平均每10年就有一次水灾,1931年、1935年、1954年的大洪水分别淹没农田5090万、2264万、4755万亩(1亩=1/15hm²,下同),受灾人口分别为2855万、1003万、1885万人,死亡人数分别为14.5万、14.2万和3.3万人。其他大、中、小河流的洪涝灾害更是不胜枚举。特别是1998年6~8月,长江又发生了1954年以来的全流域性大洪水,湖北、江西、湖南等省分别遭受了洪水的袭击;嫩江流域、松花江干流也相继发生了超过历史记录的特大洪水,西江和闽江发生了超过100年一遇的特大洪水。据统计,20世纪我国主要江河100年间平均每年发生超过2次的频率为10%~20%以上的洪水,且每两年至少发生一次频率为5%~10%以上的洪水,每3年左右就有可能发生一次频率5%以上的较大洪水或大洪水,可见洪水的频繁程度如表1-1所示。

表1-1 我国20世纪主要江河洪水发生频率统计

流域	频率为5%以上的洪水	频率为5%~10%以上的洪水	频率为10%~20%以上的洪水	合计
长江	6	19	33	58
黄河	4	4	15	23
淮河	4	9	14	27
海河	3	5	10	18
松花江	3	4	16	23
辽河	3	6	17	26
珠江	5	5	16	26
浙闽地区	3	3	6	12
合计	31	55	127	213

中华人民共和国成立以来,党和政府十分重视水利建设和防灾工作。经过50多年的努力,兴建了不少防洪工程,提高了许多河流的防洪标准,主要江河的一般性洪涝灾害基本得到控制,取得了很大的防洪效益。特别是在1998年“三江”大水后,水利部按照中央确定的新时期水利工作方针,从中国的国情和水情出发,提出了实现从传统水利向现代化水利、可持续发展水利转变的治水新思路。防洪减灾作为水利事业的最重要组成部分,随着我国整体治水观念的变革,也要与时俱进地进行科学调整。总的来说,防洪减灾思路主要从三方面进行重大调整和转变:一是从单纯的抗拒洪水转变为在防洪、抗洪的同时,要

给洪水以出路,1998年的大洪水给了我们一个重要启示,就是人类不给水出路,水就不给人类出路;二是从单纯的防洪工程体系转变为工程与非工程防洪措施相结合、社会共同参与的防洪减灾体系;三是从单纯的防洪减灾转变为在考虑防洪减灾的同时,如何充分利用雨洪资源,实现洪水资源化。同时,随着社会经济的发展和科技水平的提高,如何充分利用防洪调度理论与方法并结合现代智能技术,实现防洪系统的最优调度与管理、减少洪灾损失、提高防洪效益和最大限度实现洪水资源化,具有十分重要的经济意义和社会意义。

1.1.2 实际工程背景

引滦工程是滦河流域大型水利工程群。自1980年工程投入运行以来,截至2007年底已累计实现向天津、唐山两市供水318亿 m^3 ,为天津、唐山两市提供了安全的水源,促进了地区社会经济的快速发展。

滦河是北方地区较丰沛的河流之一,多年平均径流量是46.94亿 m^3 ,年际水量分配不均,具有连丰连枯的水文特性。自1999年以来,滦河流域连续多年持续干旱少雨,潘家口水库平均年来水量仅为7.43亿 m^3 ,占多年平均年来水量的30%。由于潘家口水库来水锐减,导致天津市先后4次实施引黄济津应急调水,5次动用潘家口水库死库容应急供水的窘迫局面。为进一步改善滦河流域供需矛盾、合理开发利用水资源、优化水资源配置,项目组提出了“水库群联合优化调度研究”。

潘家口、大黑汀、桃林口、于桥、邱庄、陡河六座水库(以下简称“引滦工程六水库”)是天津、唐山、秦皇岛三市的重要水源地,开展引滦工程六水库联合优化调度研究对实现滦河水资源优化配置,充分发挥各水库的综合效益,提高天津、唐山、秦皇岛三市用水保证率,改善该地区水生态环境,减轻洪水对滦河下游造成的损失具有重要意义。引滦工程六水库联合优化调度主要包括防洪调度和兴利调度。

滦河洪水具有暴涨陡落的特点,但滦河下游部分防洪工程标准偏低。大黑汀水库下游白龙山水电站的安全泄量仅为3000 m^3/s ;为保护滦河行洪滩地村庄而修筑的防洪小埝,设计行洪能力为5000 m^3/s ,防洪标准只达到3年一遇。潘家口、大黑汀及桃林口三水库的建成,对滦河洪水起到了一定的消峰滞洪作用,但由于大黑汀水库和桃林口水库以供水为主,没有防洪库容,设计上不承担下游防洪任务,当滦河流域突发中小型洪水时,如按照常规调度方案调度,极有可能发生滦河下游区间洪水和潘家口、大黑汀及桃林口三水库下泄洪水组合遭遇,给滦河下游防洪造成较大压力。为充分发挥潘家口、大黑汀及桃林口三水库蓄滞洪水的效益,在确保工程安全的前提下,改变以往各自独立的调度模式,实施潘家口、大黑汀及桃林口三水库联合优化调度,是实现洪水资源利用、减少滦河下游防洪损失的有效手段。

作为天津、唐山、秦皇岛三市重要的引水工程,引滦工程六水库为天津、唐山、秦皇岛三市的城市发展提供了有力的供水保障。近年来,随着环渤海地区社会、经济的快速发展,特别是滨海新区成为继深圳、浦东之后的中国经济“第三增长点”,曹妃甸港区将建设成为华北地区最大的钢铁、石化产业基地。华北沿海地区地下水资源多年来一直超采严重,导致地下水位持续下降、大范围地面下沉,并形成多个地面沉降中心,海河流域、滦河流域水生态环境急剧恶化。按照天津、唐山两市中长期用水规划,天津、唐山两市将全面建设生态宜居城市,恢复扩大原有湿地。面对天津、唐山、秦皇岛三市快速增长的用水需求,经济社会发展与

水生态环境的矛盾更加明显。南水北调 2010 年即将通水,天津市外调引水源地的增加将引起天津市供水形势的变化。传统的单一水库调度模式已不能适应引滦供水形势的变化,天津、唐山、秦皇岛三市的供水结构将发生改变,水资源供需矛盾日益突出。

为此,研究根据引滦工程六水库的工程现状和滦河流域水文特性,结合天津、唐山、秦皇岛三市用水需求,以实现引滦工程由注重工程管理向既注重工程管理又注重水资源管理转变,由注重经济效益向既注重经济效益又注重社会效益、生态效益转变,充分发挥引滦工程六水库河系相通的优势,在确保工程安全、不改变分水配置原则的前提下,合理配置滦河水资源,全面实现天津、唐山、秦皇岛三市经济的可持续发展,提出引滦工程六库联合优化调度研究。

研究针对滦河下游连通河系的特点,通过对滦河水资源的分析,利用现有水利工程,在不增加水利工程建设投入的基础上,实施潘家口、大黑汀、桃林口三水库水量置换;在流域发生中、小洪水时,充分发挥潘家口、大黑汀、桃林口三水库蓄洪、滞洪的作用,适时为滦河下游实施错峰调度,以改善天津、唐山两市用水环境,实现滦河水资源的优化配置。

1.1.3 研究目的及意义

实行水库优化调度可提高水库的经济管理水平,几乎在不增加任何额外投资的条件下,便可获得显著的经济效益,水库优化调度是挖掘水库潜力的有效手段。水库优化调度是在常规调度和系统工程的一些优化理论及其技术基础上发展起来的,它是指在保护水库安全可靠的情况下,解决各用水部门之间的矛盾,满足其基本要求,利用水库调度技术,经济合理地利用水资源及水能资源,以获得综合利用的最大经济效益。因此,开展水电站水库优化调度具有十分重要的经济意义。

水库防洪调度是一个传统的研究课题,其解决的方法主要有两种:其一是采用综合治理的方针,合理安排蓄、泄、滞、分的工程措施;其二是与之相应的非工程防洪措施,它已成为防洪规划与管理工作中受到重视的研究课题,这样才能充分发挥防洪系统的作用,达到流域防洪减灾的目的。我国历次洪水都暴露出防洪体系还不够完善、防洪调度手段还不够先进、实时防洪调度方法模型还有待改进等问题。

综观水库洪水调度研究历史,早期、中期主要是针对模型与算法,侧重于调度理论研究。近十多年来,随着理论研究的日趋成熟、完善和不断深入,研究的目标逐渐由单目标扩展到了多目标,研究对象由单库扩大到了多库乃至整个流域或跨流域系统的库群,其模型也由单一模型发展到了组合模型。尤其是与计算机及人工智能技术结合,引入新的理论,采用先进的计算机可视化编程语言和多媒体技术,开发直观易读、方便易行、交互能力强的水库调度应用软件,把专家知识、经验知识和决策知识融于一体的智能型决策支持系统是未来的水库优化调度研究的一个热点和发展趋势。

目前,我国对水电站水库群的发电优化调度研究较多,而对水库防洪调度的研究相对较少,尤其是水库群系统的联合防洪调度的研究有待于进一步加强与完善,以便在流域的联合防洪调度中发挥其巨大的作用。还应看到,在搞好水库防洪调度的同时,还应加强对水资源的合理利用,即在防洪的同时达到兴利目的。我国现有的水资源非常短缺,水资源已成为制约一些地区国民经济发展的瓶颈,因此我们要合理调度和利用水资源,达到既能防洪又能兴利,保证国民经济的快速稳定发展。本书围绕水库群防洪优化调度问题及水

库综合管理信息系统的研制,以水利部海河水利委员会“引滦工程六水库联合调度”为课题,以潘家口、大黑汀和桃林口三水库作为研究对象,进行水库防洪调度的理论探讨和实际应用研究。

1.2 水库调度研究概况

1.2.1 水库调度的分类

水电站水库优化调度从时间上划分,一般可分为中长期(年、月、旬)调度、短期(周、日、时)调度;从径流描述上划分,一般可分为确定型调度和随机型调度。此外,也可以按水库目标、水库数目、调度周期等不同方式对水库进行分类,具体分类如下所述。

1.2.1.1 按水库目标划分

水库调度按水库目标划分为:

(1)防洪调度。防洪调度方式是根据河流上、下游防洪及水库的防洪要求、自然条件、洪水特性、工程情况而合理拟定的。

(2)兴利调度。兴利调度一般包括发电调度、灌溉调度以及工业、城市供水与航运对水库调度的要求等。

(3)综合利用调度。如果水库承担有发电、防洪、灌溉、给水、航运等多方面的任务,则应根据综合利用原则,使国民经济各部门的要求得到较好的协调,使水库获得较好的综合利用效益。

1.2.1.2 按水库数目划分

水库调度按水库数目划分为:

(1)单一水库调度。为了说明水库调度的原则、方法,多从基本的、最简单的单一水库入手,进而引申到水库群联合调度。

(2)水库群的联合调度又包括并联水库调度、梯级水库群(串联水库群)调度和混联水库群调度。并联水库指位于不同河流上或同一河流不同支流上的水库群,各水库水电站之间有电力联系没有水力联系,但在同一河流不同支流上的水库群还要共同保证下游某些水利部门的任务,例如防洪。梯级水库群(串联水库群)指位于同一河流的上、下游形成串联形式的水库群,各水库水电站之间有直接的径流联系。混联水库群是串联与并联的组合形式。

1.2.1.3 按调度周期划分

水库调度实际是确定水库运用时期的供、蓄水量和调节方式。根据水库运用的周期长短可分中长期调度和短期调度。

(1)中长期调度。对于具有年调节以上性能的水电站水库,首先要安排调节年度内的运行方式、供水、蓄水的情况。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。

(2)短期调度与厂内经济运行。短期调度主要研究的是电力系统的日(周)电力电量平衡,水电厂、火电厂有功负荷和无功负荷的合理分配,负荷预测,备用容量的确定和合理接入方式等。厂内经济运行主要研究电厂动力设备的动力特性和动力指标,机组间负荷

的合理分配,最优的运转机组数和机组的启动、停用计划等。

1.2.2 水库优化调度技术

水库优化调度的研究最早从 20 世纪 40 年代开始,美国人 Mases 于 1946 年最先将优化概念引入水库调度,西方国家的专业文献一般认为 1955 年美国哈佛大学水资源大纲标志着系统分析及优化模型在水资源规划及管理中应用研究的开端。从水库调度方面来讲,李特尔 1955 年采用马尔科夫过程原理建立水库调度随机动态规划模型是水库优化调度开创性的研究成果。1966 年霍华特的《动态规划与马尔科夫过程》一书的发表为马尔科夫决策规划模型奠定了基础。国内的相关研究则从 20 世纪 60 年代起步,特别是在 80 年代,优化调度理论得到了充分重视,并运用到防洪调度研究中。随着数学规划理论的日渐完善和计算机技术的广泛应用,优化调度方法更加丰富。从采用的优化方法划分,一般可分为线性规划法、非线性规划、动态规划法、多目标优化技术、大系统分解协调法、模拟算法以及现代启发式智能方法等。从所包含的水电站分布状况划分,一般可分为单库、梯级、并联及混联形式的水库群优化调度。

1.2.2.1 线性规划(Linear Programming, LP)法

线性规划法于 1939 年提出,是在水资源领域中应用最早,且最广泛的规划技术之一,有成熟的算法和应用程序。目前,大型线性规划法可以求解成千上万个变量,对于一些特定的非线性规划则常常进行线性化处理,使之转为线性规划问题。

在水库(群)系统防洪调度方面,1973 年南非的 Windsor 最早把线性规划应用于水库群的联合调度,他将洪峰-损失费用函数之间的非线性关系进行线性化处理,以单纯形法或者混合整数规划法求解。1983 年,美国学者 S. A. Wasimi 应用离散线性二次最优控制方法寻求水库系统的运行策略,但该模型在洪水预报和水库调度等方面都进行了较多简化,应用效果不太理想;同年, Yazigil H. 等为绿河流域(Green River Basin)应用线性规划建立了一个水电系统汛期实时调度模型,采用该模型对不断更新的洪水预报信息进行决策。Needham 等于 2000 年将线性规划的混合整数规划法应用于美国的 Iowa Des Moines 河的防洪调度,然而该方法在作随机评价时,耗时很多。

在国内,王厥谋于 1985 年为丹江口水库建立了一个线性规划模型,可考虑河道洪水变形和区间补偿等,但实施调度时需要长达 7 d 的入库和区间洪水过程。许自达(1990)将水库群防洪联合调度的注意力转移到下游河道的洪水演进上,分别用马斯京根法和槽蓄曲线推导了优化调度计算式,还给出了一个以线性规划法求解四水库并联的水库群系统防洪优化联合调度的算例。都金康等(1994)分析了并联水库群下泄流量与河道防洪控制点洪峰流量之间的内在联系,提出了水库群洪水调度模型及其逐次优化解法,后又与李罕、王腊春等构造了一个线性规划模型,并提出了两种所谓替代解法,但所建模型只考虑了并联水库的情况。1998 年,王栋、曹升乐对水库群系统防洪联合调度建立了一类最大防洪安全保证的线性规划模型;同年,马勇、高似春、陈惠源针对由混联水库群和多分蓄洪区组成的复杂防洪系统,建立了一个防洪系统联合运行的大规模线性规划模型,提出了判断扒口分洪界点及相应的分阶段解算的处理方法。

1.2.2.2 非线性规划(Nonlinear Programming, NLP)法

与线性规划不同,非线性规划模型中的目标函数或约束条件是非线性的,严格地讲水

库调度中有很多关系都是非线性的,但由于其计算过程比较复杂、费时,且没有通用的解法和程序,所以直接利用非线性规划法解决水库调度问题的并不多见,实际应用时常常需要进行线性化,将非线性规划问题转化为线性规划问题求解,或者与其他优化方法和模拟方法结合。

1990年,Oleay I. Unver 和 Lany W. Mays 结合非线性规划理论和洪水演算原理,提出了一种实时调度优化模型及其算法,较好地解决了调洪演算的精确性与水库群调度的维数灾问题。Simonovic 和 Savic 研制了水库管理调度智能决策支持系统,包含了11个分析模块,使用了非线性规划法、动态规划法、线性规划法和模拟算法。

1.2.2.3 动态规划(Dynamic Programming, DP)法

动态规划法是处理多阶段决策问题的有效方法,是水库群优化调度中应用最为广泛的数学规划法。

国外最早把动态规划应用于水库优化调度的是美国人 J. D. Little, 1955年他提出了基于随机径流的水库优化调度随机数学模型; R. A. Howard 于1962年提出了动态规划与马尔科夫过程理论。Rossman L. 于1979年将拉格朗日(Lagrange)乘子理论用于随机约束问题的动态规划求解。Turgeon A. 于1981年运用随机动态规划和逼近法解决了并联水库群的优化问题。Roefs T. G. 和 L. D. Bodin 分别用动态规划法进行水库群的优化调度。维数灾问题是动态规划法实用的最大障碍,针对动态规划求解的维数灾问题,到目前为止,比较常用的方法有以下几种:

(1) 1957年, Bellman 提出粗网格内插技术,主要通过采用扩大离散距离的方法来减轻由内存负担和储存所有离散点优化结果而产生的庞大计算量,从而达到减轻维数的目的。

(2) 1962年, Bellman 和 Dreyfus 提出动态规划逐次逼近(DPSA)法,将多维问题转化为一系列的一维问题。实践证明,这种方法虽然可以减少维数灾,但还是不能从根本上克服它。

(3) 1968年, Larson 提出状态增量动态规划(IDP)法,该方法的有效性取决于初始试验轨迹,求得的最优解往往只是局部最优解。

(4) 1970年, Johnson 和 Mayne 提出微分动态规划(DDP)法,这种方法利用解析解法代替原先的离散状态空间来解动态规划的维数灾。

(5) 1971年, Heidari 等提出离散微分动态规划(DDDP)法,对两库系统有效,但不适合更大的库群系统。

(6) 1975年, H. R. Howson 和 N. G. F. Sancho 提出逐步优化算法(即 POA 算法),采用两时段滑动求解,通过反复迭代修正,直到达到计算精度和收敛条件为止。A. Turgen 成功地应用 POA 算法求解了梯级水电站的短期优化调度问题。

目前,比较成熟和常用的方法是随机动态规划(SDP)法和二元动态规划(BSDP)法。

(1) 随机动态规划法。随机动态规划由动态规划与马尔科夫随机决策过程理论发展而形成。由于河川径流在出现上具有随机特性,因此研究水库优化调度必须考虑径流的随机特性。可以将水库入库径流处理为相互独立的月随机过程,以皮尔逊-Ⅲ型分布函数描述径流的随机分布特性,应用马尔科夫值迭代法和随机动态规划法研究水库水电站

的优化调度,求各月的优化调度规律,并运用优化调度规律进行模拟调度计算,编制电站的优化发电调度图。国内有关单位把此方法用于清江隔河岩水电站和浙江凤树岭水电站,获取了较好的优化调度效益。

(2)二元动态规划法。传统的动态规划法是离散化状态空间,并且允许状态变量 S_i 和 S_{i+1} 可以取得状态空间的这些离散值,如果 n 维状态空间的每个坐标被划分为 M 个离散值,由这些离散值的每一种组合形成的格点总数 M^n 是随着维数 n 呈指数增长的。BSDP 求解方法是在每次迭代中以 2^n 格子的子集代替 M^n 个格点的,在每次迭代中,当移动状态空间的子集时,使状态子集相互联系的各种定界有可能改善目标函数,以至达到最优轨迹。为水库系统运行问题而提出的二元动态规划法,使得中等规模系统的解可能在合理的计算时间范围内,其阶段目标函数不需要符合任何特性,甚至对于高维的问题,其收敛的速度也是很快的。

国内对动态规划的研究与应用十分广泛,20 世纪 70 ~ 80 年代取得的成果最丰富。1983 年,虞锦江等在最可能洪水概念的基础上提出了满足洪水设防要求的洪水调度动态规划模型;1987 年,胡振鹏、冯尚友在研究复杂防洪系统联合运行时,以分洪量和防洪库容最小为目标进行实时预报调度,建立了防洪系统联合运行的动态规划模型,并提出了“预报—决策—实施”的前向滚动决策方法。该方法是解决确定性优化模型应用于实时调度的一个较有效的方法,至今仍在多方面使用;1988 年,许自达以时空动态规划求解水电站水库群最优洪水调度问题,以一般动态规划求解整体防洪最优运用问题;1990 年,李文家、许自达根据经过水库群拦蓄后下游超过设防标准洪水最小的准则,建立了黄河三门峡、陆浑、故县三库联合调度防御下游洪水的动态规划模型;1991 年,吴保生、陈惠源建立了一个并联水库防洪优化调度的多阶段逐次优化算法模型,解决了河道水流状态的滞后影响问题;1998 年,付湘、纪昌明针对过去使用动态规划进行防洪调度时忽略了后效性影响的缺陷,建立了一个多维动态规划单目标模型,采用 POA 算法连续求解。

1.2.2.4 多目标优化技术(Multi-objective Optimization)法

考虑到水库要实现防洪、灌溉、发电等多方面的效益以及决策者的偏好,多目标优化分析方法的引入势在必行。1982 年, G. L. Becker 用约束扰动法研究了水库群系统的多目标问题,在得到一组非劣解后,由决策者根据其主观原因确定一个满意结果。Mohan 和 Raipure 对印度包含 5 个水库的流域建立了一个线性多目标模型,以约束法求优化泄水方案。

在国内,林翔岳、许丹萍、潘敏贞于 1992 年采用多目标、多层次法对某水库群的多目标优化调度问题进行了研究。1995 年,贺北方、丁大发、马细霞以自动优化模拟技术求解了两水库多目标优化调度问题;同年,王本德、周惠成、蒋云钟等对淮河流域五水库建立了多阶段多目标水库群防洪调度模型。

多目标分析法与单目标分析法相比,可考虑不可公度目标的组合以及更多的实际影响因素,可明晰获得权衡系数,但就目前而言,理论与实际应用方法均需进一步完善。

1.2.2.5 大系统分解协调(Large Scale System Decomposition-Coordination)法

20 世纪 70 年代起,大系统理论得到迅猛发展。大系统具有高维性、不确定性、规模庞大、结构复杂、功能综合、因素众多等特征,分解协调法几乎贯穿于大系统理论的所有方

面。目前,大系统分解协调法在水电站水库群系统优化调度领域渐受重视,在防洪水库群系统中的应用才刚刚起步。

1980年,Jamshidi应用分解协调技术解决了Grande流域开发问题,将流域分解为多个子系统,将每个子系统按时间分解,构成三级谱系结构。

在国内,董增川在20世纪80年代研究了大系统分解协调原理在水库群优化调度中的应用。1991年,封玉恒以最小洪灾损失为准则确定了水库群优化调度目标函数,以分解协调法对模型进行了求解。1995年,黄志中、周之豪等研究出并联和串联库群实时防洪调度的分解协调算法,并将此法推广到混联库群的实时调度,试验结果表明此法可克服一般动态规划的维数灾。2000年,杨侃、张静仪和董增川针对长江防洪系统,将大系统分解协调原理与网络分析方法相结合,提出了长江防洪系统网络分析分解协调优化调度方法,并进行了仿真验证。2001年,杨侃和刘云波将基于多目标的大系统分解协调法应用于串联水库群宏观优化调度的分析研究中,建立了基于多目标分析的库群系统分解协调宏观决策模型,通过实例证明了该法的可行性。2002年,谢柳青和易淑珍提出一种离散微分动态规划与马斯京根洪水演进相结合的大系统分解协调算法,并以三库联合防洪优化调度为例,计算结果满意。

1.2.2.6 模拟算法

在水资源系统中,常存在变量过多以及多目标之间关系过于复杂的问题,从而使选用严格合适的数学模型有很大困难,甚至无法解决。这时,以功能模拟为基础的数学模拟技术就显得极为有力,成为水资源系统分析的一个重要技术手段。随着系统分析理论在水资源研究中的不断深入,水资源系统模拟作为水资源系统分析学科的分支,也得到了一定的发展。模拟模型(Simulation Model)是利用数学关系式描述系统参数和变量之间的数学关系,详细地描述系统的物理特征和经济特征,并能在模型中融入决策者的经验和判断,通过计算机模拟计算提出各种规划方案比较时所必要的评价指标,以帮助决策者对各方方案的利弊得失进行权衡比较,同时还能对决策中临时提出的规划方案及时提供模拟成果。一旦提供必要的系统输入,程序就可生成系统对这些输入的响应,从而揭示系统的运行特性规律。在水库调度中,当问题的规模太大、影响因素太多、非线性程度太高时,解析方法的应用受到严重制约,过度简化与概化的模型往往使解析法获得的不但不是最优的方案,甚至连合理性都无法保证,在这种情况下,模拟模型显示出较大的优越性。

最早的水资源系统模拟是1953年美国陆军工程师团在计算机上以整个系统的发电量最大为目标,模拟了密西西比河支流密苏里河上的6座水库的联合调度策略。美国垦务局在20世纪70年代研制的科罗拉多模拟系统CRSS(Colorado River Simulation System),模拟了该流域内大型水库的供水、防洪、发电调度。之后,该模型不断更新换代,美国垦务局曾在1991年专门论述了该局使用的20多个模拟模型。

我国从20世纪80年代开始,广泛开展模拟模型的研究,目前已形成许多能实现特定功能的模拟模型系统。如中国水利水电科学研究院研究开发的华北水资源规划模拟模型,水利部东北勘测设计研究院与清华大学联合开发研究的松辽流域水资源系统规划模拟模型等。1989年,雷声隆等首先将自优化模拟技术应用到南水北调东线工程中。1996年,崔远来等在分析了水库等调蓄工程状态域及自优化模拟技术特征的基础上,建立了以

防洪及兴利为目标的水库优化调度自优化模拟模型。2001年,李会安等研究了自优化模拟技术在水量实时调度中的应用,建立了黄河干流上游梯级水量实时调度自优化模拟模型。

1.2.2.7 现代启发式智能方法

随着系统工程理论和现代计算机技术的发展,特别是现代智能启发优化算法的兴起,在常规优化算法求解遇到困难时,现代智能优化算法便开始体现出优势,在水库优化调度领域也得到广泛的应用,主要包括遗传算法、人工神经网络、模拟退火算法、混沌优化算法、蚁群优化算法、粒子群优化算法等。

1) 遗传算法(Genetic Algorithm, GA)

遗传算法是模仿自然界生物进化过程中自然选择机制而发展起来的一种全局优化方法,由 J. H. Holland 在 20 世纪 70 年代初期提出的,是演化算法的重要分支。它具有并行计算的特点与自适应搜索的能力,可以从多个初值点、多路径搜索实现全局或准全局最优,并且占用计算机内存少,尤其适用于求解大规模复杂的多维非线性优化问题。遗传算法作为一种全局优化搜索算法,因其简单通用、鲁棒性强、适于并行处理,已广泛用于不同领域。与传统优化方法如线性规划法、非线性规划法、动态规划法、单纯形法、梯度法、分支定界法等相比,遗传算法具有其独特的特点:①对优化问题没有太多的数学约束,可以处理任意形式的目标函数和约束;②能够进行概率意义下的全局搜索;③能够灵活构造领域内的启发算法。马光文等用基于二进制编码的遗传算法求解水电站优化调度问题,同动态规划相比,减少了计算机内存,实现了随机全局搜索。常用的有常规遗传算法、十进制遗传算法和二倍体遗传算法。

常规遗传算法把搜索空间(问题的解空间)映射为遗传空间,以每一个可能的解编码为一个向量(二进制),称为一个染色体(或个体),所有染色体组成群体(群体中染色体个数用 POP 表示)。水库优化调度的遗传算法可以理解为:随机选取 POP 组水库运行中水库水位值的序列,并作为母体,按预定的目标函数进行评价,计算每个染色体的适应度。根据适应度对诸染色体进行选择、交叉、变异等遗传操作,剔除适应度低的染色体,从而得到新的群体。遗传算法就这样反复迭代,向着更优解的方向进化,直至满足某种预定的优化收敛指标。由于水电站优化调度是多维优化问题,采用二进制编码,染色体串非常长,从而使算法的搜索效率很低,而且在每一次循环运算过程中要进行二进制与实数之间的转换,大大降低了运算速度。用基于十进制编码的遗传算法研究水电站优化调度问题,与通常采用的基于二进制编码的遗传算法相比,避免了采用二进制编码时存在的编码冗余问题,即由于二进制编码串很长而造成的算法搜索效率低的缺陷。基于十进制整数编码的改进遗传算法来进行水电站水库优化调度研究,多个初始点开始寻优,占用内存少,能以较快速度找到全局最优解。二倍体遗传算法是以两条等长度的二进制码组成一对表示个体,这种表示方式更接近于自然界中生物组织的基因染色体结构。

由于遗传算法在求解水库优化问题方面相对于传统方法的优越性,许多学者进行了大量的研究,主要有:伍永刚等应用二倍体遗传算法(DGA)对梯级水电站日优化调度问题求解,借助于基因显性机制,利用二倍体基因结构具有内在的保护群体基因多样性的能力来提高算法的全局寻优能力;王大刚等用基于十进制编码的遗传算法研究水电站优化