

珠江流域水利工程群 综合利用调度

珠江水利科学研究院 马志鹏 万东辉 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

珠江流域水利工程群 综合利用调度

珠江水利科学研究院 马志鹏 万东辉 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书以珠江流域水利工程群（干流梯级骨干水库群以及河网区闸泵群）为研究对象，结合水利工程群空间分布特点以及区域水资源防洪、发电、抑咸、生态、航运等多目标调度需求，自干流中上游而下至河网区，研究制定上游骨干水库群与珠三角河网闸泵群的调度方案，在保障流域防洪安全和咸潮上溯期间重点城市的供水安全的前提下，实现流域水资源的高效综合利用。

本书可供水文水资源、水利水电工程专业及相关行业的科研与管理人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

珠江流域水利工程群综合利用调度 / 马志鹏, 万东辉著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-5170-5091-9

I. ①珠… II. ①马… ②万… III. ①珠江流域—水利工程—水利资源综合利用 IV. ①TV213.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第323492号

书 名	珠江流域水利工程群综合利用调度 ZHU JIANG LIUYU SHUILI GONGCHENGQUN ZONGHE LIYONG DIAODU
作 者	珠江水利科学研究院 马志鹏 万东辉 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京博图彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10印张 213千字
版 次	2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	78.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



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。水资源是经济发展和社会进步的保障之一。我国是水问题多、水灾频发且影响范围较广的国家之一。从人口、资源、环境与社会经济协调发展的战略高度出发，利用已建的水利工程群，采取综合措施，对流域、区域水资源进行统一的调度管理，对我国经济和社会发展以及解决短期内的资源短缺问题具有重要意义。

珠江是我国的七大江河之一，由西江、北江、东江和珠江三角洲诸河组成，流域涉及云南、贵州、广西、广东、湖南、江西 6 省（自治区）和香港、澳门特别行政区以及越南东北部，总面积 45.37 万 km^2 ，其中我国境内 44.21 万 km^2 。珠江流域的主流为西江，西江也是我国第三大河流，水资源量丰富，其水资源调度的主要任务包括防洪、发电、供水、抑咸、航运、灌溉、生态等多目标综合利用。但是由于时空分布不均匀（汛期多年平均径流量约占年径流量的 70%，枯期约占年径流量的 30%）、流域工程体系还不够完善等因素，流域面临着汛期防洪形势严峻、枯期水量调度紧缺的不利局面；同时，由于现行的枢纽调度运行管理忽略了整个梯级枢纽的统筹协调，尚未实现流域梯级防洪、供水、抑咸、生态等多目标综合社会效益的充分发挥；而且，珠江三角洲河网区水系复杂，径流潮汐动力作用交互，人类活动强度大，各片区水闸泵站群调度各自为政，使得联围内水流、污染物运动过程复杂多变，内河涌水环境改善效果、水资源利用效率不高，并缺乏闸泵群与上游水库群联合调度技术指导，导致淡水资源未能得到充分利用。

本书主要是在我们过去工作成果的基础上，重新加以整编而成。全书的主要内容有：在流域基本情况介绍的基础上，结合近年来的水文情势变化以及经济社会发展对流域调度提出的新要求，分析流域的综合利用调度需求，分别开展了流域干流的防洪调度、水库群的综合调度以及感潮河网区的闸泵群联合调度。

本书由珠江水利科学研究院马志鹏、万东辉编纂完成，张康、王森等参与完成部分章节的编写工作，全书由熊静校核。本书的出版得到了国家重点研发计划（2017YFC0405905）的支持，编写过程中参阅了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！由于流域调度研究本身的复杂性，加之时间仓促和受水平所限，书中难免有不妥及错误之处，敬请读者批评指正。相关建议可发电子邮件 zhipengma@163.com 编者收。

作者

2016 年 11 月



目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 相关研究进展	2
1.3 研究内容	16
第 2 章 流域概况	18
2.1 河流水系	18
2.2 气象水文	21
2.3 水力开发	22
2.4 河口区基本情况	29
第 3 章 流域水文情势变化	31
3.1 梯级水库对洪峰传播时间的影响	31
3.2 洪水归槽作用下的设计洪水	44
3.3 河口区咸潮上溯	50
第 4 章 流域综合利用需求	55
4.1 汛期防洪需求	55
4.2 枯水期综合利用需求	57
4.3 河网区闸泵群调度需求	61
第 5 章 防洪调度方案研究	63
5.1 防洪调度的基本内容	63
5.2 防洪调度模型	65
5.3 龙滩单库防洪调度	67
5.4 龙滩、岩滩两库联合防洪调度	71
第 6 章 枯水期水量调度方案研究	77
6.1 水库群调度的基本内容	77
6.2 水库群综合调度模型	78
6.3 水库群水量统一方案	84

6.4	同等蓄水条件下梧州断面不同来水过程的调度影响分析	88
第7章	复杂感潮河网区闸泵群联合调度	91
7.1	感潮河网区水动力水环境变化规律	91
7.2	闸泵群调度模型结构与原理	110
7.3	闸泵群调度模型构建及验证	118
7.4	闸泵群调度方案研究	131
第8章	总结与展望	143
8.1	总结	143
8.2	展望	144
参考文献	145



第 1 章

绪 论

▶▶ 1.1 研究背景

随着社会经济的发展，水利工程在防洪兴利中的地位和作用越来越突出。对于综合利用工程来说，调度的根本目的就是要按照既定的水利任务，在确保工程安全的前提下，统筹防洪、灌溉、发电、航运、供水及环境等各部门对水量、库水位、水质的要求，协调矛盾，合理分配，尽可能地利用水文气象预报，充分利用库容和各种设备的能力，正确合理地安排蓄水、泄水和用水，尽量减少无益弃水和水头损失，在防洪和兴利方面发挥最大的综合效益。随着水库调度决策所考虑的因素不断增多，传统的常规调度已经不能满足人们的要求，水利工程的调度已经进入了优化调度阶段。优化调度是指在已知系统结构类型（水电站及其水库、水闸、泵站等水利工程）的功能、任务、参数、特性等原始数据和各种信息的约束条件下，为满足国民经济各有关部门和社会的要求，按运行调度基本原则，利用一定的优化理论方法和技术，制定和实现对水资源的优化利用和控制，即寻求系统的最优运行调度方式、最优策略、最优决策。

西江是珠江流域的主干流，水资源量丰富，其水资源调度的主要任务包括防洪、发电、供水、抑咸、航运、灌溉、生态等多目标综合利用。但是由于时空分布不均匀、水利工程体系还不够完善等因素，流域面临着汛期防洪形势严峻、枯期水量调度紧缺的不利局面；同时，由于现行的枢纽调度运行管理忽略了整个梯级枢纽的统筹协调，尚未实现流域梯级的统一调度；而且，珠江三角洲河网密布、水闸和泵站众多，水动

力条件复杂,受排污和咸潮影响,珠江三角洲局部地区供水安全和水环境问题突出。

因此,以流域调度管理中发现的问题为出发点,围绕防洪调度、汛期蓄水、枯水期水量统一调度、河网闸泵群联合调度关键科学技术问题,以流域综合利用效益最大为目标,利用优化理论技术,开展珠江流域水库工程群的综合调度研究,对于提高流域水利工程控制运用水平,具有重要理论意义和实际应用价值。

▶▶ 1.2 相关研究进展

利用已建水库、闸泵等水利工程对河道水流在时间、空间上按照某种目的进行流域或区域的水量、水质重新分配或调节,称为水资源调度,又称水利调度。根据调度所要解决的主要问题和实现的主要目标的不同,水资源调度类型一般分为防洪调度、供水调度、环境调度等。这几种调度在我国不同地方均进行了调度方法的研究,同时开展了一些调度实践。

调度按模型算法可分为常规调度和优化调度两类。常规调度简单直观,但调度结果不一定最优。优化调度是近50多年来发展较快的水库调度方法,尤其是对水电站水库,不需要增加额外的投资就可取得相当大的效益,是挖掘水电站水库潜力的有效手段。实行水库优化调度应解决两个问题:一是如何建立优化调度数学模型;二是如何选择求解这种数学模型的最优化方法。前者包括确定目标函数和相应的约束条件;后者最优化方法主要有线性规划、非线性规划、整数规划、动态规划、网络技术和大系统分解协调等。由此可见,水库优化调度涉及的数学基础较广,包括概率统计、运筹学、大系统分析、多目标理论、网络理论、人工神经网络以及模糊数学等诸多领域。

国内外关于优化调度的研究成果很多,尤以水库优化调度的研究最多。归纳起来,按研究对象分为单库(闸、泵)调度、具有水力联系的水库(闸、泵)群调度、具有电力联系的电力系统水库群调度;按目标函数分,可分为单目标和多目标两类;根据对径流描述的不同,又可分为确定型、随机型及隐随机型方法;从时间上划分,可分为中长期(年、月、旬)调度、短期(周、日、时)调度。

1.2.1 水库防洪调度

防洪的目的是设法防治、消除或减缓洪灾损失,保护人民生命财产,促进工农业生产发展,取得生态环境和社会经济的良性循环。防洪系统通常由工程措施和非工程措施组成,这两类措施合理配置、相互协调,就构成了近代完整的防洪系统。工程措施包括一切防洪的工程建筑,它们可以单独承担或与其他工程配合共同承担防洪任务;非工程措施是指通过有计划地开发和管理,从法律和行政两方面对洪泛区进行控制,改变对洪灾的敏感程度,减少洪灾损失。

1. 国外研究状况

防洪调度研究,国外始于20世纪初,初期的防洪调度主要是半经验、半理论的方

法,即通过防洪控制图来进行操作,并综合考虑前期的水文气象因素对预留库容的影响。随着科技的进步,在20世纪50年代末,将优化理论引入到防洪调度中,随着遥感、遥测、电算技术在水库调度领域的应用,极大地推动了水库的运行管理工作。在20世纪七八十年代,由于系统理论的发展,水库调度的研究成果也极为丰富,特别是库群联合防洪调度。水库群系统防洪联合调度,就是对流域内一组相互间具有水文、水力、水利联系的水库及相关工程措施(如堤防、滞洪区、分蓄洪区等)进行统一的调度,使整个流域的洪灾损失达到最小。到了90年代后期,国外开始注重于工程措施和非工程措施相结合的防洪系统研究。

水库防洪调度分为常规方法和系统分析方法。常规方法以调度准则为依据,利用径流调节理论和水能计算方法,并借助于水库的抗洪能力图、防洪调度图等经验性图表实施防洪调度操作,是一种半经验半理论的水库调度方法。该方法考虑了前期一些水文气象因子对预留防洪库容的影响,并对预泄、错峰和补偿调度等具有一定的指导价值,是目前普遍采用的一种水库防洪调度方法。常规方法简单直观,便于操作,但存在着经验性且不能考虑预报,调度结果也不一定是最优的,所以一般只适用于中小型水库群的防洪联合调度。

随着系统工程的迅速发展与广泛应用,系统分析方法被引入到水库群防洪联合调度研究中来。该方法是以建立水库群防洪联合调度系统的目标函数,确定其满足的约束条件,并用最优化方法求解,从而使目标函数取得极值的水库控制运用方法。经常采用的有模拟模型法、优化法等。

国外在模拟方法上研究较多^[1-3],国外最早的模拟模型始于20世纪50年代初,美国陆军工程师兵团用计算机模拟了密西西比河支流上6座水库的联合调度。美国垦务局在20世纪70年代研制的科罗拉多模拟系统(colorado river simulation system)模拟了该流域内大型水库的供水、防洪、发电调度,还考虑了盐的浓缩问题。之后,该模型不断更新换代。1973年,南非的Windsor最早提出了以线性规划方法解决水库群防洪调度问题,他将洪峰-损失费用函数之间的非线性关系进行线性处理,但该模型没有考虑预泄、分级调洪等调度原则和预报误差、洪水传播历时及变形等影响因素^[4],之后,Windsor做了部分改进^[5]。1976年,Schultz对某并联水库群建立了一个动态规划模型,以下游削峰最大为目标,不需要洪水资料,但只适用于各支流洪水同时发生的情况^[6]。1983年,美国学者S. A. Wasimi将时间离散的线性二次高斯控制模型(LQG)应用于Des Moines River Basin库群防洪控制的日调度,寻求水库系统的运行策略,由于该模型在洪水预报和水库调度等方面都进行了较多的简化,适用于中等洪水,对大洪水应用效果不太理想^[7]。1989年,Simonovic、Savic研制了水库管理调度智能决策支持系统,该系统包含了11个分析模块,使用了线性规划、动态规划、非线性规划和模拟方法^[8]。1990年,Oleay I Unver和Lanyw Mays基于非线性规划理论和洪水验算理论,提出了一种实时调度优化模型及其算法,该模型较好地解决了调洪验算的精确性与水库群调度的维数灾问题^[9]。1992年,为了解决维数灾问题,Valdes、

Strzepek 提出了由随机动态规划方法和线性规划组成的多库系统时空聚集-解集方法^[10]；同年 Mohan、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^[11]。1994 年，Vasiliadis、Karamouz 对所谓驱动随机动态规划方法和贝叶斯决策理论进行了探讨^[12]。2000 年，Needham 等将混合整数规划方法应用于 Iowa and Des Moines River 的防洪调度时，指出作随机评价时可能会耗费过多的计算时间^[13]，由于该方法计算效率低，因此很难在隐随机优化中应用。2002 年，Shim 等将 DPSA 应用于朝鲜汉江流域的实时洪水控制调度^[14]。Beckor 运用约束法研究了一个多目标水库群的优化决策问题^[15]。Raman 和 Chandramouli (1996) 利用人工神经网络 (ANN) 求解初始库容、入流和需水量已知的水库优化泄流原则，比较了动态规划、随机动态规划、标准调度策略等方法，结论是动态规划方法较优，在 DP 中结合 ANN 性能最好^[16]。

此外，自从 20 世纪 70 年代决策支持系统 (DSS) 产生以来，国外开发了许多用于水情数据处理与洪水预报、水资源规划和管理、水环境管理和控制、防洪调度、水电站水库运行调度以及水利工程管理等方面的决策支持系统。1995 年，Ford 和 Killen 针对 Teinity River Basin 提出了洪水调度决策支持系统^[17]；Ahmad 设计的洪水管理智能决策支持系统，采用神经网络进行洪水预测，利用专家系统选择最佳洪水减灾方案，还可以建立洪水控制模型并进行经济评价^[18]。随着 GIS 等空间数据技术的发展，2002 年，Kyu-Cheoul shim 等提出了流域综合实时多目标多库群系统的空间决策支持系统 (SDSS)，并应用于韩国的汉江流域模拟 1995 年洪水，结果表明 SDSS 产生的综合洪水调度策略，在保证洪水季节后有足够用水量的同时，大大减轻了下流的洪水影响^[19]。

2. 国内研究状况

我国地处季风气候区，雨水的时空分布不均匀，特殊的地理条件和气候区导致了我国洪涝灾害十分频繁。因此，如何合理利用现有的水利工程进行防洪调度，减少洪涝灾害损失，从而最大限度地利用水利工程的防洪能力具有重要的意义。

在单库防洪调度方面，1983 年，鲁子林等应用增量动态规划，并结合短期洪水预报模型，实施了富春江水电站的优化调度，获得了平均每年增发电能 2470 万 kW·h 的效益^[20]；1986 年，王厥谋等对汉江中下游洪水进行最优控制，建立了丹江口水库防洪优化调度模型，目标函数为各种控制目标的罚函数之和，最优策略的求解方法采用线性规划法^[21]。

模拟方法是通过模拟系统实际情况建立一个模型，作为实际物理系统的缩体来预测一定条件下（入流、调度规则等）该系统的响应（调蓄水位、下泄流量等）。从 20 世纪 80 年代开始，袁宏源、马文正等人利用模拟技术建立了一些调度模型，以短时段为计算时段，并以长系列的历时资料进行模拟计算，大大提高了计算精度。1997 年，谢柳青等对某水库群系统的调度提出了逐级优化模拟复合法，计算结果与动态规划法的结果十分接近^[22]。

优化方法则是通过一组决策变量的值使得目标函数在约束条件下达到最优值。1990年,许自达用线性规划方法求解了并联水库群联合调度^[23];同年,李文家等根据下游超过防洪标准洪水最小准则,建立了三门峡—陆浑—故县三水库联合防御下游洪水的动态规划模型^[24]。1991年,吴保生等提出了并联防洪系统优化调度的多阶段算法,以时间向后截取的防洪控制点峰值最小为目标函数,成功解决了河道水流状况的滞后影响^[25]。1995年,都金康等构造了并联水库的线性规划模型^[26]。1996年,邵东国等建立了有模糊约束条件的防洪优化调度模型,提出了含罚函数的离散偏微分动态规划^[27]。1997年,傅湘等针对大型洪水组成的复杂防洪系统建立了多维动态规划模型,消除了后效性的影响,并用POA算法进行连续求解与决策,获得了泄洪的最优策略^[28]。1998年,王栋等按照水库防洪安全度最大原则,建立了淮河流域混联水库线性规划模型,并采用改进的仿射变换法进行求解^[29];同年,马勇等针对混联水库群和多分蓄洪区组成的复杂防洪系统,研究和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临界点及其相应的分阶段求解的处理方法^[30]。1999年,梅亚东提出了梯级水库防洪优化调度的动态规划模型,采用马斯京根方法推算梯级水库间的洪水演进,用一种简化多维动态规划的递推解法进行求解^[31]。2000年,徐慧等以最大削峰为准则,建立了淮河流域9座大型水库动态规划模型,并以实际洪水加以验证,取得了良好的效果^[32];同年,于翠松考虑水库群防洪权重随净雨量变化而每时段变化的特点,建立了小清河流域水库群防洪联合的线性规划模型^[33]。2002年,王金文等采用逐次迭代逼近的方法,每次仅对一个水库采用SDP求解,并假设其他水库的蓄水过程已确定为多年平均蓄水过程,最后以福建省闽江流域水电系统为例进行了实例应用^[34]。2006年,袁鹏等人集粒子群智能优化算法和其改进算法惯性权重,证明了粒子群优化算法在水库洪水调度上可以有较好的应用^[35]。

20世纪70年代,大系统理论得到迅速发展;80年代,董增川研究了大系统分解原理在水库群优化调度中的应用问题^[36]。1991年,封玉恒以最小洪灾损失为准则确定水库群优化调度目标函数,用分解协调方法对模型进行求解^[37];2000年,杨侃等将大系统分解协调原理和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,并进行了仿真验算^[38]。

防洪调度往往需综合考虑多个因素,多目标方法分析的度量单位多不可公度,有些目标之间还相互矛盾和竞争,在考虑决策者的偏好要求得出一组非劣解。1992年,陈守煜等对黄河防洪调度方案应用了多目标、多层次理论和模糊分析方法进行研究^[39]。1994年,黄志中等提出了水库防洪系统多目标决策模型,以水库、大坝安全、水库防洪区淹没损失最小为目标,以多个防洪效果指标为评判依据,寻求最优协调解,有效地降低了防洪系统的风险^[40];同年,王本德、周惠成、程春田结合丰满—白山梯级水库群的洪水联合调度,以调度方案为决策,以水库泄流为状态,应用模糊优选技术选择洪水调度方案^[41]。1995年,王本德等对淮河流域5座水库建立了多阶段多目标水库群防洪调度模型^[42]。

其他方法应用于防洪调度的研究还有：1995年，姜万勤提出了预报中小型区域洪水的一种快速图解方法，介绍了如何绘制不同防洪条件下并联式库群抗洪能力查算图^[43]；后来还提出了基于某些假定条件下中小型库群防洪调度的改进图解法^[44]。2001年，罗强等建立了水库群系统的非线性网络流规划法，并提出了逐次线性化与逆境法相结合的求解方法^[45]，其中网络流具有存储量小、计算速度快等优点。如何将多种解法耦合用于求解实际水库群的网络流模型需要更深入的研究。

综上所述，在水库防洪调度中，常采用的有模拟方法和优化方法。模拟方法是将被研究的客观系统转化为数学模型，利用计算机对数学模型进行多次模拟计算，分析每次模拟计算的结果，选出最优策略。模拟方法与优化方法相比，通常不受数学模型的限制，有利于计算机求解，但它不能直接产生模拟对象的最优解，而且，模拟技术很难使用现有的模拟模型，程序设计的工作量较大，模拟运算时间也较长^[46]。优化方法是使用一个目标函数和约束方程的简化数学模型，直接求解最优决策。在水库群防洪联合调度研究中，常采用的优化方法有线性规划法、动态规划法、非线性规划法、随机动态法、多目标决策技术、大系统分解协调法等。线性规划方法的求解技术成熟、处理方便，易于利用计算机求解；动态规划方法能较好地反映径流实际情况，可得到稳定的运行策略，缺点是计算工作量大，水库数目增加时，会产生“维数灾”；多目标分析法中考虑了不可公度目标的组合及其影响因素，但各目标权重系数的确定目前还有待商榷；大系统分解协调方法则是将复杂的大系统分解为若干的子系统，实现子系统局部最优化，然后根据大系统的总目标，使各子系统互相配合，实现全局最优法；模糊决策方法优点是模糊逻辑规则鲁棒性好，易调整，好理解，适宜应用于实际工程；人工神经网络具有快速收敛于状态空间中一稳定平衡点的优点，对于不同程度存在的“维数灾”问题提供了一条新途径；遗传算法是模拟生物在自然环境中遗传进化过程的一种自适应全局优化概率搜索算法，具有简单实用、鲁棒性强、适于并行计算的优点。

1.2.2 水库兴利调度

1. 国外研究状况

水库调度问题最早可追溯到哈桑的水库调度径流计算累积曲线法和莫罗佐夫关于调配调节概念的水库调度图。水库优化调度的研究在国外有很长的历史。美国的 Mases 于 1946 年将优化概念引入到水库调度中来^[47]。1955 年，美国的 Little 提出了水电系统随机动态规划模型，对水库优化调度进行研究，从而标志着用系统学科的方法研究水库优化调度的开始^[48]。

线性规划是水库优化调度中最早、最简单、应用最广泛的一种规划方法。这种方法处理高维问题的能力较强，不需要初始决策，结果收敛于全局最优解、计算速度快。Windsor (1973) 最早进行了水库群方面的线性规划研究^[49]，主要有适用于目标函数和约束高非线性、非凸集性的二元规划、整数规划、混合整数规划等线性模型。但是

线性规划要求目标函数和约束条件必须是线性的，这就需要对目标函数及约束条件进行线性化处理，可能会造成与实际问题有较大的偏差。

1960年Howard的《动态规划与马尔柯夫过程》为马氏决策规划模型奠定了基础。20世纪70年代初，国外陆续发表的研究成果表明单一水库优化调度的马氏决策规划模型已趋成熟。对于确定来水情况下的水库优化调度，Young在Hall、Howed和Roefs等人研究的基础上，应用动态规划方法研究了单一水库的最优控制问题^[50-52]。在此基础上，Kirk、Jacobson、Mayne、Tanura和Halkin等将极大值原理和微分动态规划方法引入到水库优化调度中^[53-55]。

动态规划可以把复杂的问题划分为若干个阶段的子问题，逐段求解，可以较好地反映径流实际情况。一些比较复杂的系统如水电站水库群常常有若干个状态变量，随着状态变量数目的增加，每阶段各状态的组合数目成指数关系增加，因而要求计算机的存储量显著增加，使动态规划方法的应用受到计算机存储量和计算时间的限制，通常称为“维数灾”。Croley、Puterman等的研究表明维数问题是多库优化调度中的最大障碍，简单地减少状态数以减少计算工作量不能找到最优解或者结果脱离实际^[56,57]。针对动态规划的维数灾问题，学者们提出了大量的改进措施，主要包括粗网格内插计算，联系逐次逼近动态规划（DPSA）、增量动态规划（IDP）以及离散微分动态规划法（DDDP），逐步优化算法（POA）等。粗网格内插技术主要是为了减轻离散点的大计算量带给内存使用紧张的问题。这种方法首先由Bellman（1957）提出^[58]。Johnson等人（1993）利用分段多项式函数使内插方法更加成熟^[59]。虽然这种方法减轻了维数问题，但还不能完全克服这个问题。Bellman和Dreyfus（1962）首先提出了逐次逼近方法（DPSA）^[60]。这种方法一段时间优化一个状态变量，其他状态变量保持原有值，将多维问题转化为一系列的一维问题。动态规划逐次逼近方法及其扩展方法（如将增量和逐次逼近相结合的增量动态规划逐次逼近方法）已经运用到很多库群系统。增量动态规划首先由Larson（1968）提出^[61]。Jacobson和Mayne（1970）首先提出了微分动态规划方法，利用解析解法而不是离散状态空间来解决动态规划的维数灾问题^[54]。随后，Heidari等（1971）提出了离散微分动态规划^[62]。加拿大学者H. R. Howson和N. G. F. Sancho（1975）提出了逐步优化算法，用于求解多状态动态规划问题，优点是状态变量不必离散，因而可以收敛于全局最优解^[63]。

针对随机动态规划的“维数灾”问题，Hall（1970）提出了将所有水库群聚合成一个等价的单库。Turgeon（1980）利用这个办法，将随机动态规划应用到大型水电站库群^[64]。Karamouz等（1992）提出了一个贝叶斯随机动态规划（BSDP）^[65]，由于把随机动态规划应用于库群调度比确定性动态规划增加了状态的维数，因此较少将随机动态规划应用于库群调度。

线性规划和动态规划理论上比较成熟完善，在水库优化调度中得到了广泛的应用，非动态规划方法作为数学规划的重要分支之一，在水库优化调度中也得到了一定

的重视。如逐次线性规划 (SLP)、逐次二次规划 (SQP)、增量拉格朗日方法、广义梯度下降法 (GRG) 等。Barros 等 (2003) 把逐次线性规划方法应用于 Brazilian 水电站, 研究表明了该方法的精确性和计算的效率性^[66]。为了避免大规模二次问题由于时间间隔划分而产生的计算时间长的问题, Peng 和 Buras (2000) 把隐随机方案的广义梯度下降算法应用于美国缅因州 5 个上游水库^[67]。

启发式规划方法通常能得到全局最优解。Cliveira 等 (1997) 使用遗传算法 (GA) 生成了水库群系统的调度规则^[68]。Chandramouli 和 Raman (2001) 利用动态规划和神经网络进行水库群建模研究^[69]。Teegavarapu 等 (2002) 提出了基于模拟退火法的水库系统优化调度方法^[70]。模糊优化调度理论的发展历史虽然不长, 但在水电站水库群的优化调度中也得到了许多应用。Su 和 Hsu 根据模糊理论, 在短期水火电站联调中用成员函数来评价目标函数、负荷需求和旋转备用限制, 并通过模糊集相交, 构成了一个模糊动态规划的多阶段决策过程^[71]; Dhillon 等人考虑负荷和来水的随机特性, 采用权重系数法获得了多目标的非劣解集, 然后采用模糊决策的方法获得了短期水火电站联调的满意解^[72]。Russell、Samuel 等认为: 水库调度研究之所以较少付诸实践, 原因之一是实施者不愿意使用复杂的优化模型, 而模糊逻辑易于理解, 所以模糊优化是有前途的, 但只能作为其他优化技术的补充, 而非替代^[73]。

2. 国内研究状况

国内关于水库优化调度的研究和应用始于 20 世纪 60 年代。1960 年 9 月由当时的中国科学院和中国水利水电科学研究院联合编译了《运筹学在水文水利计算中的应用》。1960 年, 吴沧浦首次在国内提出了年调节水库的最优 DP 模型^[74]。1963 年, 谭维炎、黄守信等根据动态规划与 Markov 过程理论, 建立了一个长期调节水电站水库的优化调度模型, 并在狮子滩水库的优化调度中得到应用^[75]。从 20 世纪 70 年代末到 80 年代中期, 单库优化调度的理论研究和实际应用取得了较大的发展。1979 年, 张勇传、熊斯毅等采用可变方向搜索法, 引进了罚函数, 从而进一步提高了调度图的可靠性^[76]; 在同一时期, 董子敖等人在研究刘家峡水电站水库优化调度时, 提出了国民经济效益最大的目标函数, 在寻优技术方面, 采用了满足保证率要求的改变约束法, 以控制破坏深度^[77]。1982 年, 施熙灿、林翔岳等提出了保证率约束下的 Markov 决策规划模型^[78]。1983 年, 张勇传、傅昭阳等人提出了建立在对策论基础上的水库优化调度图^[79]。1986 年, 李寿声、彭世彰等针对多种水源分配的水库最优引水量问题, 建立了一个非线性规划模型和多维动态规划模型^[80]; 同年, 张玉新、冯尚友提出了一个多维决策的多目标动态规划模型, 以多目标中某一目标为基本目标, 将其他目标作为状态变量处理, 因此, 随着维数的增加, 计算工作量必然也随之增加^[81]。为了克服这一问题, 1988 年, 张玉新、冯尚友针对综合利用水库, 建立了多目标动态规划迭代法的求解方法, 通过构造一个三级段函数来提高计算效率^[82]。在水库优化调度中, 一般把入库水量过程看作确定性的或随机性的, 但事实上水文气象具有一定的模糊性。1983 年, 吴信益把模糊数学引入到水库优化调度中来^[83]。1988 年, 陈守煜提出多目标、多

阶段模糊优选模型的基本原理和解法,把动态规划和模糊优选有机地结合起来^[84];同年,陈守煜、赵英琪提出了系统层次分析模糊优选模型,为水库模糊优化调度的研究奠定了理论基础^[85]。1995年贺北方、涂龙将径流过程的随机描述与模糊动态规划方法相结合,建立了水库优化调度的随机系统模糊动态模型(SFDPM)^[86]。1996年,马光文、王黎等将人工智能浮点表示遗传算法(FP)用于求解水电站优化调度问题,它的主要优点在于状态和控制变量不必离散化,所需内存少,编程简单,它为克服水库群优化运行“维数灾”问题提供了一条新途径^[87]。1997年,马光文、王黎将从遗传算法多个初始点开始寻优,沿多路径搜索实现全局最优^[88];同年,魏强、张勇传等提出了径流AR(P)模型条件下的RBSI法^[89]。2001年,金菊良等设计了简单遗传算法的改进形式,即加速遗传算法(AGA)^[90]。

随着水电能源的开发,水库群成为常见的水利水电系统,水库群从水力联系上一般分为串联、并联和混联三种形式。水库群优化是以单一水库优化调度理论和方法为基础的,伴随着国家各大流域开发的逐步完成,我国在水库群方面的研究成果也很多。

国内关于水库群优化调度的研究始于20世纪80年代初,谭维炎等在研究四川水电站水库群优化调度图和计算方法时,提出了考虑保证率约束的优化调度图的递推计算方法^[91]。1981年,张勇传利用大系统分解协调的观点,对两并联水电站水库的联合优化调度问题进行了研究,先进行单库优化调度,然后在两水库单库最优策略的基础上引入偏优损失最小作为目标函数,对单库最优策略协调求得总体最优^[92]。1982年,熊斯毅、邴凤山根据系统分析思想,提出水库群优化调度的偏离损失系数法:采用Markov描述径流过程,偏离系统通过逐时段求解最优递推方程求得,能反应面临时段效益和余留期影响,形式简单,使用方便,理论上也比较完善^[93];同年,叶秉如提出了并联水电站水库群年最优调度的动态分析法,该法以古典优化法为基础,结合递推增优计算,在闽北水电站水库群的模拟计算中增发6.6%的发电量^[94]。1983年,鲁子林将网络分析中最小费用算法用于并联水库群的优化调度计算^[95]。1988年,胡振鹏、冯尚友提出了动态大系统多目标递阶分析的分解-聚合方法,将库群多年运行的整体优化问题分解为按时间划分的一系列子系统,在各子系统优化的基础上,将各库提出的年内运行策略聚合成上一级系统,并由聚合模型描述和确定水库群的多年运行过程和策略^[96]。这种分解-协调-聚合方法与一般方法相比较,简化了系统复杂性,减少了计算工作量、避免了维数灾的特点,可直接应用到不同模型求解子系统,但收敛性差,即使收敛,也需要较长的计算时间。1989年,董子敖提出了计入径流在时间、空间相关关系的多目标多层次优化数学模型^[97]。1990年,张勇传等提出了水库群优化调度的效益统计迭代(RBSI)法^[98];同年,陈洋波、陈惠源开展了水电站库群隐随机优化调度函数的研究^[99]。1998年,李爱玲针对黄河上游梯级水电站群的兴利优化调度问题进行研究,对这一多阶段非线性随机决策问题,应用迭代方法求解^[100]。1999年,刘鑫卿和钟琦给出了水库群发电优化调度随机统计迭代算法,通过计算最优余留效益函数,得出最优调度函数,其最优性与随机动态规划方法相同^[101]。2000年,梅亚东、

朱教新提出了黄河上游水电站短期优化调度模型及迭代解法^[102]；同年，王仁权等建立了梯级水电站群用水最小模型，利用 POA 有效分配各水电站的负荷，为大规模水电站水库群优化调度提供了例证^[103]；毛睿等提出了基于并行分布式计算技术的高性能计算方法进行库群优化调度的方法来解决“维数灾”问题，结果大大优于常规调度，并缩短了整个计算决策时间^[104]。2003 年，宗航等给出了 POA 算法在梯级水电站短期优化调度的应用及结果，并指出了进一步的研究方向^[105]。

其他系统理论应用到水库优化调度中的有：1995 年，谢新民、陈守煜等建立水电站水库群模糊优化调度模型，提出了一种目标协调-模糊规划 (IB-FP) 法^[106]；同年，胡铁松、万永华等提出了水库群优化调度函数的人工神经网络方法^[107]。1996 年，马光文、王黎将遗传算法应用到水库群优化调度中^[108]。1998 年，杨侃、陈雷把多目标分层排序网络分析模型拓展到多目标梯级水电站调度的网络分析中，提出了梯级水电站群多目标网络分析模型^[109]。粒子群优化算法 (PSO) 是基于群体的演化算法，其思想来源于人工生命和演化计算理论。2006 年，杨道辉等人将粒子群优化算法应用到水库优化调度中^[110]。2007 年，张双虎等人针对 PSO 算法的约束处理机制，提出了一种改进的自适应粒子群优化算法 (Modified Adaptive PSO, MAPSO)，并将其应用到水电站优化调度中^[111]。梁伟和陈守伦 (2008) 利用混沌优化算法对梯级水电站中长期水库调度问题进行优化计算^[112]；刘起方和马光文等 (2008) 提出一种对分插值与混沌嵌套搜索算法的梯级水库联合优化调度求解方法^[113]，实例表明该算法具有参数简单、普适性强、稳定性高、全局优化等特点。辛芳芳、梁川 (2009) 以四川省凉山州安宁河龙头水库大桥水库水电站为研究对象，利用加速遗传算法进行求解，计算结果表明，该方法能有效地克服标准遗传算法早熟收敛、计算量大、全局优化速度慢等缺点，能较好地应用于水库优化调度计算^[114]。

国内有关单位和专家、学者也对生态调度进行了研究。长江水利委员会等对三峡水库的生态调度作了一些研究。2006 年，长江干流水位创历史同期最低，上游川渝两省市发生特大干旱，长江水利委员会及时提出三峡水库于汛末开始蓄水的方案，通过合理调度，控制了宜昌站流量不小于 $8000\text{m}^3/\text{s}$ ，保证了长江中下游地区生态环境用水需求。黄河水利委员会也对小浪底等水库联合调度进行“调水调沙”原型试验。董哲仁、孙东亚等通过分析现行水库优化调度方法的不足，指出应在实现社会经济多种目标的同时，兼顾河流生态系统需求，实行水库的多目标生态调度。徐杨、常福宣等在系统地分析了国内外大量水库生态调度实践的基础上，对水库生态调度的内涵及其研究状况进行了较全面的归纳和总结，并分析研究了水库水量、泥沙、水质的生态调度方式。刘凌、杨志峰等提出防止河道泥沙淤积的生态需水量定量计算方法，并确定防止黄河下游河道淤积、维持河道平衡的年平均水量为 184亿 m^3 。王兆印、林秉南通过探讨中国河流治理和灾害防治中的泥沙问题，提出要建立河道非恒定流输沙理论，利用水库的生态调度，改善河道淤积、生态恶化现象。吕新华、禹雪中分别研究了水利工程的生态调度问题，提出了基于河流流域生态健康的水库调度模式。

1.2.3 闸泵工程调度

闸泵等水利工程的科学调度可以加快水体流动,不仅可以在洪水时期加大泄洪量,减小洪涝灾害,而且可以增加污染河道的水量,提高水体自净能力,增加水体环境容量,是一项迅速改善河道水质的有效措施。

闸泵工程的调度主要涉及的技术内容有水动力模拟、污染物运动模拟及水量水质调度等内容。

1. 水动力模拟

水动力数值模拟的发展有三个阶段。第一阶段是数值计算,其特点是用计算机对水力学公式或方程直接计算求解,解决了用简单计算工具难以完成的计算,操作简便、计算快速、方法实用。第二阶段是单因素水动力数值模拟,这是水动力数值模拟的初级阶段,其特点是采用数值计算方法对水动力运动方程进行离散求解,采用的数值计算方法包括有限差分法、有限元法、边界元法等。本阶段要研究各种离散方法的格式构成,离散方程与原微分方程的相容性,计算过程的稳定性、收敛性和精度等一系列问题。第三阶段是多因素过程模拟,这是利用电子计算机和数值方法对自然界地貌演变过程中各种现象进行过程模拟。由此开发出一系列的新技术,例如:与物理模型相结合的复合模型,多因素联合运行,智能型和可视化模拟技术,随机模拟分析等。这些都极大地丰富了数值模拟技术,扩大了数值模拟的应用范围,使数值模拟技术提高到一个崭新的水平。

20世纪80年代以前,由于受实测技术与计算机条件的限制,水动力模拟还多采用一维和二维模型来完成。河网问题虽然是一维问题,但由于在分汊点处要考虑水流的衔接情况,增加了问题的复杂性,所以人们一般把河网问题单独提出来加以研究,在过去的30年中,这方面的研究已取得了很大进展。河网问题最后都归结为一维圣维南方程组的求解问题,其求解方法有直接解法、荷兰水力学家Dronkers^[115]提出的分级解法、法国水力学专家Jean提出的组合单元解法、有限元法等。张二骏等人^[116](1982)提出了河网非恒定流的三级联合解法,吴寿红^[117](1985)出了河网非恒定流的四级解法。芮孝芳^[118](1990)以三级联合解法为指导,对多支流河道提出了虚设单元河段法处理方程组的系数矩阵。这些都是对分级解法的改进。李毓湘、逢勇^[119]利用一维非恒定流基本方程组、河网节点联结方程及边点方程建立了珠江三角洲河网区水动力学模型;将参加计算的方程分成微段、河段、汊点三级,采用逐级处理再联合运算的方法(即三级联解法),求得河网中各计算断面的水位、流量等值。姚琪等^[120](1991)将分级解法与组合单元解法相结合,提出了具有这两种方法优点的混合方法。研究人员的多年应用证明:求解圣维南方程组时,采用有限元法可以得到较高效的模型。Szymkiewicz^[121]用有限元法计算一维河网的水环境问题,张华庆、金生^[122]采用半隐式有限元方法,建立了珠江三角洲河网水流、泥沙数学模型。

常用的二维水动力模式有隐式交替方向技术(Alternating Direction Implicit,