

考虑生态的多目标水电站水库 混沌优化调度研究

吴学文 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

考虑生态的多目标水电站水库 混沌优化调度研究

吴 学 文 著

内 容 提 要

本书系统探讨了考虑生态的多目标水电站水库优化调度的理论、方法及其应用问题。主要内容包括：绪论、水电站入库径流混沌预测、考虑生态的多目标水电站水库优化调度模型构建、水电站水库优化调度混沌遗传算法设计、水电站水库优化调度自动化监控系统开发、万家寨水电站水库优化调度实例研究、总结与展望等。

本书可作为水利水电工程技术人员、经济管理人员及广大水利工作者的参考书，也可作为高等院校水利类相关专业研究生的教学参考书。

图书在版编目（C I P）数据

考虑生态的多目标水电站水库混沌优化调度研究 /
吴学文著. — 北京：中国水利水电出版社，2011.12
ISBN 978-7-5084-9302-2

I. ①考… II. ①吴… III. ①水力发电站—水库调度—研究 IV. ①TV697.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第271004号

书 名	考虑生态的多目标水电站水库混沌优化调度研究
作 者	吴学文 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 (发行部)
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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	175mm×245mm 16开本 7.25印张 142千字
版 次	2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	20.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

■ 前言



水能资源是可再生、洁净的能源，充分、合理地利用水能不仅可以减少一次能源的消耗，还可以降低火电等其他能源造成的环境压力，因此世界各国都很重视水电开发。近 10 年来，随着我国对能源需求的快速增长，水电开发事业得到了持续快速发展，取得了举世瞩目的成就。截至 2010 年年底，全国水电装机容量达到 2.1 亿 kW，居世界第一，年发电量达到 5633 亿 kW·h，分别占全国电力装机容量和年发电量的 21.6% 和 16.4%。目前，水力发电在我国能源建设和现有的能源结构中都占有重要地位，如何管理和利用好已有的水力发电站，以合理的水库调度措施来提高其生产能力，在不增加额外投资的情况下获得更大的综合效益，对于我国经济和社会发展以及解决短期内我国能源短缺问题显得尤为重要。

水电站水库调度是一个涉及水资源、社会、经济、生态、环境、工程等众多因素的复杂系统工程。近年来，水库调度虽然在调度理论、模型、求解方法等方面取得了不少成果，形成了一套较为完整的研究体系，但由于水库系统的复杂性、水资源系统来水条件的随机性、水库运用的综合性及生产上许多因素的不确定性，水库调度研究中并没有找到一种具有普遍适用性的模型及方法。另外，大量水库的建设，对脆弱的河流生态环境系统造成了一定程度的影响，而目前的水库调度大多注重追求经济效益，而相对忽视生态环境的影响。如何建立适应社会经济发展和生态环境保护的水电站水库优化调度模型以及开发新型高效的智能优化算法是水电站水库调度研究的重要方面。

为此，笔者在吸收多年来的教学科研经验和成果的基础上，编写了本书。本书在综述水电站水库优化调度的国内外研究动态的基础上，深入分析入库径流时间演变特性，建立入库径流混沌预测模型，研究水电站水库生态调度基本理论，提出和建立考虑生态的多目标水电站水库优化调度数学模型，并将混沌优化算法和改进遗传算法相耦合，开发混沌

遗传算法对模型进行求解，研究水电站水库优化调度自动化监控系统，最后以万家寨水电站水库为例进行了应用研究。本书也是在本人完成的博士学位论文基础上进行编写的，书稿的完成，得到了两位导师河海大学索丽生教授、王志坚教授的悉心指导和帮助，在此向两位恩师表示衷心的感谢！同时也非常感谢支持、关心本书编写出版工作的所有领导、专家学者和编辑同志！

本书的编写，参考和引用了一些相关文献和书籍的论述，在此也向有关人员致以衷心的感谢！

限于时间和作者水平，书中疏漏和不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

作者

2011 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 水库优化调度国内外研究动态	3
1.3 本书主要研究内容与技术路线	13
第 2 章 水电站入库径流混沌预测	16
2.1 入库径流复杂系统相空间重构	16
2.2 入库径流混沌特性识别	22
2.3 水电站入库径流混沌预测模型	27
第 3 章 考虑生态的多目标水电站水库优化调度模型构建	35
3.1 水电站水库优化调度建模思想	35
3.2 水库生态调度模型	36
3.3 河流与水库生态环境需水量计算	37
3.4 考虑生态的多目标水电站水库优化调度模型建立	43
第 4 章 水电站水库优化调度混沌遗传算法设计	49
4.1 混沌遗传算法求解水电站水库调度模型基本思想	49
4.2 混沌遗传算法的算子设计	51
4.3 混沌遗传算法收敛性	55
4.4 算例研究	56
4.5 混沌遗传算法求解水电站水库优化调度模型步骤	58
第 5 章 水电站水库优化调度自动化监控系统开发	62
5.1 系统设计基本原则	62
5.2 系统的整体结构设计	63
5.3 系统各单元功能及结构	64
5.4 基于 OPC 的水库优化调度自动化监控管理系统体系结构	73
第 6 章 万家寨水电站水库优化调度实例研究	79
6.1 万家寨水电站水库概况	79

6.2 万家寨入库径流混沌预测 81

6.3 基于混沌遗传算法的万家寨水电站水库优化调度 86

第 7 章 总结与展望 97

7.1 总结 97

7.2 展望 98

参考文献 100

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

随着全球经济的迅速发展和人类生活水平的日益提高，对能源的需求越来越大，而随着煤、石油、天然气等化石能源的日益枯竭和所造成环境污染的日趋严重，开发清洁可再生能源已迫在眉睫。水能是一种可再生清洁能源，具有机组启停灵活、调峰调频能力强、运行成本低等优点，已成为国内外许多国家和地区的首选开发能源。我国水能资源丰富，理论蕴藏量为 6.76 亿 kW，居世界首位，技术可开发装机容量为 3.78 亿 kW，年可发电量达 1.9 万亿 kW·h，而截至 2010 年年底，我国水电装机容量仅为 2.1 亿 kW，水电的开发程度还比较低，开发潜力巨大。近年来，随着西部大开发“西电东送”项目以及“节能降耗”、“减排”等一系列政策的实施，为我国水电事业的发展提供了千载难逢的机遇。而随着我国水电事业的发展，水力发电已初具规模，目前，在全国范围内已经形成金沙江、雅砻江、大渡河、乌江、长江上游、南盘江红水河、澜沧江、黄河下游、黄河中游、湘西、东北、闽浙赣、怒江等 13 个大型水电基地，规划装机容量 2.78 亿 kW。对于大规模的水电站投产运行，水电站水库调度的地位和作用越来越突出。水库调度是根据水库的功能，根据水库的调蓄能力，在保证下游防洪安全和水工建筑物安全的前提下，对水库的来水过程进行径流调节，提高发电效益的一种水库运用控制技术。

水库调度一般分为常规调度和优化调度，常规调度是根据水库的调度规则，利用径流调节理论和水能计算方法，确定满足水库既定任务的蓄泄过程。常规调度简单、直观，可以汇入调度和决策人员的经验和判断能力等，所以是目前水库电站规划设计阶段以及中小水库运行调度中通常采用的方法，但常规调度只能从事先拟定的极其有限的方案中选择较好的方案，调度结果一般只是可行解，而不是最优解，且该方法难以处理多目标、多约束和复杂水利系统的调度问题。水库优化调度则是以系统工程方法为基础，建立以水库效益最大为目标，以水量平衡、供水能力等为约束条件的优化调度模型，然后用最优化的方法求解最优值的水库控制运用方式，它是近 50 年来得到较快发展的一种水库优化调度方法。对水电站水库，由于优化调度不需要增加额外的投资即可取得相当的效益，所以是挖掘水电站潜力的有效手段。



水库优化调度根据其发展的历程分为两个阶段：第一阶段为水库调度萌芽发展期，该阶段是以常规调度方法为主的经验寻优调度，以经验为指导，理论性不强，调度方法简单直观，调度过程简化约束，目标简单，调度结果也只是在一定程度上发挥了水库的调控作用；第二阶段为水库调度发展成熟期，该阶段是以运筹学为基础的水库优化调度阶段，对处理多目标、多约束的复杂水资源系统的调度模型和算法都有了极大完善和改进，尤其随着计算机技术的发展，调度方法由传统优化算法向智能优化算法发展，使得解决多目标多约束的复杂问题成为可能。

水库优化调度虽然自 20 世纪 40 年代以来已经有将近 70 年的研究历史，在调度理论、模型、求解方法等方面取得了不少成果，形成了一套较为完整的研究体系，但由于水库系统的复杂性、水资源系统来水条件的随机性、水库运用的综合性及生产上许多因素的不确定性，导致水库优化调度在实际应用过程中存在诸多问题。如水库优化调度是在径流预报结果的基础上，对预报入库水量进行调度调控以发挥水库综合效益的过程，因此径流预报的精度直接影响水库优化调度的结果。但由于径流形成的影响因素（地表状况、雨势等）较多，预报理论不完善而导致长期径流预报精度低，短期径流预报实时性差等问题，严重制约了水库优化调度结果对实际应用的指导意义的发挥。水库优化调度虽然已经在模型和算法方面取得了长足的进步，但是大部分的模型及算法的普适性差，往往是针对特定的水库条件及运行特性开发特定的模型及算法。因此需要进一步研究如何增强算法的适用性和有效性，从而提高实际应用的可能。

水电作为一种清洁环保、可再生能源，随着能源环境的问题日益突出，水电开发将进入新的阶段，发展前景将更广，而水库优化调度的发展空间将更加广阔。目前水电站水库调度方面仍存在三个基本问题有待深入研究。

(1) 水库入库径流的模拟预报。优化调度的成果如何很大程度上取决于径流预报的精确程度，尤其短期和实时优化调度，其调度效率与精度更是与径流预报息息相关。

(2) 考虑水库库区及下游河道生态环境需水要求，建立适应社会经济可持续发展和生态环境保护的多目标水电站水库优化调度模型，并以新型高效的算法进行模型求解，最大可能的提高水电站的综合效益。

(3) 集水库调度专业知识、自动化硬件设备与接口、计算机及网络通信技术、决策支持理论等多专业为一体，开发具有良好的扩展性、兼容性和可维护性的水库优化调度自动化监控系统。

这些也是未来一段时间内水电站水库优化调度的研究热点和难点。因此，针对以上问题，开展水电站水库优化调度研究，建立一种兼顾水电站发电效益和生态保



护的调度模型,促进水电站水库的经济、社会和生态环境综合效益最大化,对于提高水库控制运用水平,具有重要理论意义和实际应用价值。

1.2 水库优化调度国内外研究动态

水库优化调度自20世纪40年代起步以来,在模型、优化算法以及应用等各方面发展迅猛,尤其优化算法更是随着计算机技术的发展突飞猛进,从线性到非线性,从传统优化到智能优化,为复杂系统的优化求解问题提供了广泛思路。水库优化调度作为系统优化的应用领域,对系统优化算法的发展起到了巨大的推动作用,从萌芽状态的线性规划、动态规划,到为解决多维问题的逐步优化算法、增量动态规划,以及为解决复杂问题的遗传算法等各种智能算法,都在应用与实践体现出优化算法的可行性和优越性。

1.2.1 水库调度国外研究动态

在单库调度方面,美国 Masse 于1946年最早提出了水库优化调度问题,其目的是以非工程措施充分利用水能资源,提高水电站的发电效益。G. B. Dantig 于1947年提出了单纯形法求解一般线性规划问题。随后,由于大量建设水库,线性规划也开始用于水库优化调度中。1951年美国数学家 R. Bellman 等人提出了“最优化原理”,创建了动态规划法(Dynamic Programming,简称DP),用于求解多阶段决策过程的最优化问题。Little. J. D. C (1955)最先用动态规划理论来寻求水库最优调度方案,他采用马尔可夫链过程原理建立的水库调度随机动态规划模型,并以美国大古力水电站水库为例进行了研究,是水库优化调度开创性的研究成果,标志着用系统科学方法研究水库优化调度的开始,自此拉开了水库优化调度研究的序幕^[1]。20世纪六七十年代初期,水库优化调度的马尔可夫链决策规划模型已日趋完善。Howard. R. A. (1960)提出了动态规划与马尔柯夫过程理论(MDP),水库优化调度从理论上得到了进一步完善,以前模型很难达到多年期望效益最大和满足水库系统可靠性要求的理论性缺陷得到了解决^[2]。Loucks 等(1970)提出无折扣、马氏决策规划模型的策略迭代法^[3]。Aslew (1974)用概率约束代替机会约束进行随机模型研究,其结果比机会约束有了很大的进步^[4]。Rossman. L (1977)将 Lagrange 乘子理论用于随机约束问题的动态规划解,使破坏的期望值被约束在一个常数以下^[5]。Young. G. K (1967)研究了确定性来水条件下的水库优化调度 DP 法^[6]。Hall. W. A 和 Shephard. R. W. (1967)用确定性动态规划对美国加利福尼亚州的 Shasta 电站进行优化计算,获得了比较满意的效果^[7]。Neelakan (2000)利用神经网络方法研究了水库优化调度问题^[8]。Teegavarapu (2002)构建了基于模拟退火算法的水库优化调度数学模型^[9]。Akter (2004)研究了模糊集和



遗传算法耦合进行水库短期优化调度问题^[10]。

水库群调度方面,直到20世纪60年代末才起步。1968年Larson为避免常规动态规划在水库群调度中的“维数灾”问题,在水库群调度中采用增量动态规划,有效解决了多维的寻优问题^[11];1971年Heidari等在来水已知的前提下,采用离散微分动态规划的计算方法对四个水库进行调度问题研究^[12];Turgeon于1981年运用随机动态规划和逼近法解决了并联水库群水力发电系统的优化问题^[13];Foufoula等(1988)在模型中采用梯度动态规划算法,有效避免了因水库数目增加而造成的“维数灾”问题^[14];1992年,Karamouz等将贝叶斯随机动态规划应用到水库群调度中,得到了很好的结果^[15];Oliveira等(1997)在水库群调度中使用遗传算法,该算法为该系统生成了系统的调度规则,很好地指导了该系统运行,使该系统收到了很好的效益^[16]。Chandramouli(2001)研究了动态规划和神经网络技术求解水库群优化调度^[17]。Mousavi(2002)对动态规划在水电站水库优化调度中的应用进行了研究^[18]。

近代兴起的智能算法也大量的被应用到水库调度中来,其中人工神经网络(Artificial Neural Network,简称ANN)是一门新兴的交叉科学,自从美国物理学会1986年在Snowbirds召开国际神经网络学术会议以来,各国对神经网络和应用的研究迅速地发展起来,20世纪90年代以来,人工神经网络在水文预报中的应用逐渐增多,为水库调度提供科学的预报。蚁群算法(Ant Colony Algorithm,简称ACA)是20世纪90年代诞生的随机优化方法,是一种源于大自然的新的仿生类算法,其首先用于求解TSP问题,取得了巨大的成功,随后,该算法在二次分配问题、工件排序问题、车辆调度问题等方面也表现出相当好的性能,具有通用性、鲁棒性和并行搜索的优点。S. J. Huang(2001)应用ACA求解我国台湾水电系统短期优化调度,将问题构造为与DP求解类似的多阶段决策结构,得到了近似最优解^[19]。

美国、日本、澳大利亚等发达国家在进行水库优化调度时,对河流生态问题给予了很大的重视,开展了水利水电工程与生态环境问题的研究。美国加利福尼亚州中央河谷工程(CVP)建于20世纪20年代,含有20座水库,在1937年颁布的《农垦法》中,“CVP水库首先用于调节河流、改善航运和防洪;其次用于灌溉和生活用水;最后用于发电。”到20世纪90年代,修改了该法律,指出:CVP水库首先用于调节河流、改善航运与防洪;其次用于生活与灌溉用水及满足鱼类与野生动物需要;最后用于发电和增加鱼类与野生动物。1996年,美国联邦能源委员会(FERC)审查水电站运行许可时,要求对生态环境影响制定新的水电站水库运行方案,提高最小泄流量、增加或改善鱼道以及陆域生态保护措施等^[17]。20世纪90年代,美国田纳西流域管理局(TVA)以河道最小生态流量和溶解氧浓度为指标,



对水库的调度运行方式进行调整,使水库在保证航运、发电、防洪等原有功能的同时,在水质改善、娱乐方面发挥了重要作用^[20]。Cavallo A^[21]、Lence Barbara J^[22]等研究了水库生态调度模型,并在实际工程中进行了应用。1995年日本河川审议会的《未来日本河川应有的环境状态》报告指出推进“保护生物的多样生息和生育环境”、“确保水循环系统健全”、“重构河川和地域关系”的必要性。1997年日本对其河川法做出修改,不仅治水、疏水,而且“保养、保全河川环境”也写进了新河川法。筑坝使河流下游水流稳定而丧失活力,导致河床形态改变和浸水频率减少;沙石供给使河床下降、河床材料粗粒化,最终导致多种生物的栖息地减少。鉴于此,日本通过弹性管理大坝对下游放水、将蓄沙堰临时沉积的泥沙还原给大坝下游、设置排沙闸等,尽可能使泥沙供给、移动对自然环境的冲击得到恢复^[23]。此外,在非洲南部的津巴布韦,研究人员在 Odzi 河的 Osborne 水库观测站开展研究,运用 Desktop 模型,估算河流生态环境需水流量,为水库调度提供了切实可行的指导^[24]。在澳大利亚,每个州和地区都要对“水依赖的生态系统”做出评价,并且提出水的永续利用和恢复生态系统的分配方案。水的分配方案必须考虑到 10 年之后可能出现的情况,以达到最佳的生态状态^[25]。

1.2.2 水库调度国内研究动态

单水库调度方面,我国开展的研究与应用始于 20 世纪 60 年代。谭维炎、黄守信(1963)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,并在狮子滩水电站的优化调度中得到应用^[26]。施熙灿、林翔岳等(1982)在研究枫树坝水电站优化调度时,提出了保证率约束下的 Markov 决策规划模型^[27]。董子敖等人(1983)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^[28]。张勇传、熊斯毅等(1985)在建立柘溪水电站水库优化调度模型时,用时空离散简单 Markov 过程描述径流过程,面临时段入流则由短期预报提供,寻优方法采用可变方向探索法,由于引进了惩罚项,因而提高了调度图的可靠性^[29]。王厥谋(1985)建立了丹江口水库防洪优化调度模型,以对汉江中、下游洪水进行最优控制,其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^[30]。李寿声和彭世彰(1986)结合一些地区水库调度的实际问题,拟订了一个非线性规划模型和多维动态规划模型,用于解决满足多种水源分配的水库最优引水量问题^[31]。张玉新和冯尚友(1986)建立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,而将其他非基本目标作为状态变量处理,求解方法仍基于一般的动态规划原理^[32]。该方法实质上是单目标动态规划法在多目标问题中的应用,因此,随着维数的增加,计算工作量增加较多。为克服这一问题,张玉新和冯尚友(1988)又提出了一个称之



为多目标动态规划迭代法的求解方法,其核心是构造一个三级段函数,计算效率有所提高,在研究以发电量和淤沙量为目标的水沙联合优化调度中,用该法求出非劣解集后再应用均衡规划法选出满意的调度方案^[33]。田峰巍和解建仓(1993)^[34]、黄强和颜竹丘(1993)^[35]、谢新民和周之豪(1994)^[36]等将大系统递阶优化控制方法应用于水电站水库群优化调度方面。王本德等(1999)提出了梯级水库群防洪系统多目标洪水调度的模糊优选模型^[37]。马光文和王黎(1997)^[38]、畅建霞(2000)^[39]分别运用二进制和十进制的遗传算法对水电站优化调度进行了研究。邱林等(2005)将混沌优化算法运用到水库优化调度中,利用混沌迭代的遍历性,取得全局最优解^[40]。

水库群调度方面,我国于20世纪80年代初开始进行研究。张勇传(1981)利用大系统分解协调的观点,对两个并联水电站水库的联合优化调度问题进行了研究,先把两库联合调度问题变成两个水库的单库优化问题,然后在两水库的单库最优策略的基础上引入偏优损失最小作为目标函数,对单库最优策略进行协调,以求得总体最优^[41]。熊斯毅和邝凤山(1982)根据系统分析的思想,提出了水库群优化调度的偏离损失系数法,该方法采用Markov模型描述径流过程,通过逐时段求解最优递推方程求得偏离损失系数,因此能反映面临时段效益和余留期影响,不仅形式简单、使用方便,而且理论上比较完善。该法在湖南柘溪——凤滩水电站水库群的最优调度中得到了实际应用^[42]。叶秉如(1982)提出了并联水电站水库群年最优调度的动态解析法,该法以古典优化法为基础,结合递推增优计算,并以闽北水电站水库群优化调度为例进行了模拟计算,结果可增加发电量6.6%^[43]。鲁子林(1983)将网络分析中的最小费用法用于水电站水库群的优化调度^[44]。黄守信和方淑秀(1985)提出了以单库优化为基础的两库轮流寻优法,用于并联水库群的优化调度计算^[45]。1985年,谭维炎和刘健民等采用考虑保证率约束的优化调度图的递推计算方法对四川水电站水库群的调度图和计算方法进行研究^[46]。董子敖(1986)提出了计入径流时空相关关系的多目标多层次优化法,其基本思想是采用分区推求条件频率曲线和隐相关相结合的方法计入径流的时空相关关系,把一维动态规划逐步逼近法用于二维状态,并采用参数迭代法实现降维求单目标次优解,以解决“维数灾”问题^[47]。1988年,胡振鹏和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运行子系统,在各子系统优化的基础上,将各水库提供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^[48]。吴保生和陈惠源(1991)提出了并联防洪系统优化调度的多阶段逐次优化算法,该方法由三阶段子模型和跨阶段子模型组成,以时间向后截取的防洪控制点过程的峰值最小为目标函数,成功地解决了河道水流状态的滞后影响^[49]。都金康和周广安(1994)针对上



述吴保生等提出的方法寻优速度较慢的缺点,提出了一种简便高效的水库群防洪调度逐次优化方法^[50]。1995年,谢新民和陈守煜等利用大系统理论、模糊数学规划理论和动态规划技术,提出一种水电站水库群模糊优化调度模型与目标协调模糊规划法,该模型充分地考虑了人的知识、经验和决策过程中存在的模糊性因素对水库优化调度的影响,并较好地解决了大规模水库群优化调度计算问题^[51]。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^[52]。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,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^[53]。

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做了一些研究^[54,55]。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。黄河水利委员也对小浪底等水库联合调度进行“调水调沙”原型试验^[56]。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^[57]。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^[58]。刘凌^[59]、杨志峰^[60]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t;王兆印、林秉南^[61]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^[62]、禹雪中^[63]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。

在水库调度自动化方面,20世纪70年代中期,河南板桥、石漫滩水库的垮坝事故促使我国科研单位开始了水情测报系统现代化的研制。1980年电力部选择黄龙滩水电厂作为自行研制建立现代水情自动测报系统的试点,1986年投入运行。迄今为止,全国电力系统已建、在建水情测报系统多达数百个。但是,已开发的水情自动测报系统还难以满足实际生产的需要,另外,也缺少洪水预报、水库调度等指导水库实时运用的应用软件,使水调工作缺少系统性和科学性。1997年,国调中心在《全国电网调度自动化“九五”规划纲要》中增加了水调自动化的内容,并明确水调自动化为电网调度自动化的一部分,从此掀开了水调自动化的新篇章。1998年3月,国调中心制定了《电力系统水调自动化功能规



范》，进一步规范和促进了水调自动化系统的发展。目前，西北以及福建、贵州、云南、广东、广西等的水调自动化系统已通过工程验收，东北、华中水调自动化系统即将投入运行，国调水调自动化系统一期工程投入了试运行，其他水电比重较大的网省水调也都在积极筹建。目前，各水库、水电站的自动化建设主要以计算机监控为主。鉴于目前中小库自动化控制质量差，运行效率低下等现状，大量的水库自动化程度低或控制设备老化，急需更新换代。同时，水库综合自动化系统研究较少，实际工程建设应用中，还存在着一些亟待解决的问题。因此，为结合防汛抗旱工作，变洪水为资源，以“水利信息化带动水利现代化”的指导思想，将先进的信息技术引进水库自动化系统，利用信息技术，提高工程管理水平，改造传统调度方式实时性差、主观性强的弱点，建立以计算机监控系统为主的综合自动化系统是非常必要的^[64-74]。

1.2.3 水库优化调度常用方法

从目前的研究成果看，常用的水库优化调度方法主要有线性规划法（LP）、动态规划法（DP）、增量动态规划法（DDDP）、逐步优化算法（POA）、模糊优化方法（FOA）、模拟退火算法（SAA）、禁忌搜索算法（TSA）、遗传算法（GA）、人工神经网络（ANN）、人工免疫算法（AIA）、蚁群算法（ACA）、粒子群算法（PSO）和混沌优化算法（COA）等^[75-94]。

线性规划法（LP）要求水库调度数学模型的目标函数和约束条件均为线性。该法于1939年提出，目前应用较为成熟，有通用的求解程序，因此在水库调度中已得到广泛应用，是水库调度早期的运用方法之一，为水库优化调度的发展奠定了良好的基础。

动态规划法（DP）是解决多阶段决策过程最优化的一种数学方法。动态规划在水库调度中的应用可根据入库径流情况分为确定型动态规划和随机型动态规划，但由于动态规划法在求解过程中，需要将状态变量离散化，占用内存多，计算量会随状态变量的增加膨胀式变大而导致维数灾问题，因此在动态规划使用过程中受到了一定的限制。

增量动态规划法（DDDP）是动态规划的一种改进算法，它采用逐次逼近的方法进行寻优，每次寻优只在某个状态序列附近小的范围内，用动态规划法进行，有效地克服了常规动态规划法在求解多维问题时的维数灾问题。增量动态规划法对初始状态序列要求较高，所选初始决策序列愈接近最优决策序列，则增量动态规划法的计算工作量愈小，因此一般应根据经验或其他简便方法定出一条尽可能接近最优的决策序列作为初始状态序列，在此基础上进行增量动态规划的寻优；另外，增量动态规划所求得解不能保证在所有情况下都收敛到全局最优，有可能收敛到某一局部最优解，因此为增加所得结果为真正总体最优解的可能性，可采用从不同的几



个初始状态序列开始,然后在几个不同的最优解中选出最好的解作为最优解,这样可以大大提高该算法收敛到最优解的概率。

逐步优化算法(POA)是动态规划的另一种改进算法,1975年由加拿大学者 H. R. Howson 和 N. G. F. Sancho 提出,用于求解多状态动态规划问题,作者根据 Bellman 最优化原理,提出逐步最优化原理,即“最优路线具有这样的性质,每对决策集合相对于它的初始值和终止值来说是最优的”,该算法的优点在于状态变量不必离散,因而能获得较精确的解,可以收敛到总体最优解。

模拟退火算法(SAA)最早由 Metropolis 于 1953 年提出,是一种全局最优算法,它是基于迭代求解策略的一种随机寻优算法,源于对固体退火过程的模拟,采用 Metropolis 接受准则,并用一组称为冷却进度表的参数来控制算法的进程,使算法在多项式时间内给出一个近似最优解。

禁忌搜索算法(TSA)最早由 Glover 等于 1986 年首次提出,是一种亚启发式搜索技术。它是对局部邻域搜索的一种扩展,是一种全局逐步寻优算法。TSA 通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌表来避免重复搜索,并通过藐视准则赦免一些被禁忌的优良状态。TSA 对初始解的依赖性较强,好的初始解有助于搜索很快地达到最优解,而较坏的初始解使搜索很难或不能够达到最优解,其迭代搜索过程是串行的,仅是单一状态的移动,而非并行搜索。

遗传算法(GA)根据模拟生物进化的基本过程,将生物进化中的染色体用数码串表示,通过一代代的选择、交叉、变异等遗传运算来寻求问题的最优解。GA 不依赖于问题领域的信息来指导搜索,GA 实现简单,效果良好,通用性好,鲁棒性强等,但 GA 属于概率性搜索优化,存在局部寻优效果不好的缺点,且在算法后期搜索速度缓慢。GA 很大程度上取决于问题的多种参数,若这些参数设置不好,会出现“早熟收敛”现象。

人工神经网络(ANN)是在对人脑组织结构和运行机制的认识理解基础之上模拟其结构和智能行为的一种工程系统。ANN 的特点和优越性,主要表现在三个方面:一是具有自学习功能。例如实现图像识别时,只要先把许多不同的图像样本和对应的应识别的结果输入人工神经网络,网络就会通过自学习功能,慢慢学会识别类似的图像。二是具有联想存储功能。三是具有高速寻找优化解的能力。寻找一个复杂问题的优化解,往往需要很大的计算量,利用一个针对某问题而设计的反馈型人工神经网络,发挥计算机的高速运算能力,可能很快找到优化解。人工神经网络缺点是一旦能量函数陷入到局部极小值,它将不能自动跳出局部极小点而到达全局最小点,因而无法求得网络最优解。

混沌优化算法(COA)利用混沌的遍历性(混沌运动能在一定的范围内按其自身的“规律”不重复地遍历所有状态),用类似载波的方法将混沌状态引入到优



化变量中,并把混沌映射(Logistic映射)产生的序列“放大”到决策变量的取值空间,然后利用混沌变量进行搜索。COA分两个阶段进行:首先,在整个空间内按混沌变量的变化规律依次考察经过的各点,接受较好点作为当前最优点;其次,一定步数后认为当前最优点已在实际最优点附近,然后以当前最优点为中心,附加一混沌小扰动,进行仔细搜索寻找最优点。

人工免疫算法(AIA)的研究始于20世纪90年代后期,AIA模仿生物免疫系统的自适应机制和排除机体的抗原性异物机制,从而使AIA具有学习、记忆和自适应调节能力,AIA将抗原和抗体分别对应于优化问题的目标函数和可行解。把抗体和抗原的亲合力视为可行解与目标函数的匹配程度:用抗体之间的亲合力保证可行解的多样性,通过计算抗体期望生存率来促进较优抗体的遗传和变异,用记忆细胞单元保存择优后的可行解来抑制相似可行解的继续产生并加速搜索到全局最优解,同时,当相似问题再次出现时,能较快产生适应该问题的较优解甚至最优解。

蚁群算法(ACA)由意大利学者M.Dorigo等人于1991年首先提出。仿生学家经过大量细致观察研究发现,蚂蚁个体之间是通过一种称之为外激素(pheromone)的物质进行信息传递,从而能相互协作,完成复杂的任务。ACA不仅利用了正反馈原理,在一定程度上可以加快进化过程,而且是一种本质并行的算法,个体之间不断进行信息交流和传递,有利于发现较好解。单个个体容易收敛于局部最优,但多个个体通过合作,很快收敛于解空间的某一子集,有利于对解空间的进一步探索,从而不易陷入局部最优。但是ACA也具有速度慢、易陷入局部最优等缺点。蚁群中多个个体运动是随机的,当群体规模较大时,要找出一条较好的路径需要较长的搜索时间。

粒子群算法(PSO)由Kenney与Eberhart于1995年提出的一种模拟鸟群的捕食行为的微粒群算法。PSO求解问题的基本思想是随机产生一粒子群作为初始解,用粒子的位置表示待优化问题的解,每个粒子性能的优劣程度取决于待优化问题目标函数确定的适应值,微粒尽量靠近最优点并且有随机的变化发生,使得微粒不会停留在最优点不动,而是尽量靠近,同时保持创新性。每个微粒记录它自己的最优位置(pbest),还要记录所有微粒的最优位置(gbest),然后通过比较当前位置和两个最优位置的差别来调整速度以确定下一步的位置。每个粒子由一个速度矢量决定其飞行方向和速率大小,通过改变速度的大小和方向使随机的初始解“飞向”最优解。PSO优势在于简单、易于实现,没有许多参数需要调整,但算法收敛性、理论依据等还有待研究。

1.2.4 混沌遗传算法在水库调度中的应用研究进展

混沌理论已于20世纪80年代末在水库优化调度领域有了研究,取得了重要进