

中国科协三峡科技出版资助计划

大型梯级水利枢纽 调度运行的优化算法

李芳芳 著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

中国科协三峡科技出版资助计划

大型梯级水利枢纽 调度运行的优化算法

李芳芳 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

大型梯级水利枢纽调度运行的优化算法 / 李芳芳著.
—北京: 中国科学技术出版社, 2014. 2
(中国科协三峡科技出版资助计划)
ISBN 978-7-5046-6072-5

I. ①大… II. ①李… III. ①水利枢纽-调度-研究
IV. ①TV632

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 016795 号

总 策 划	沈爱民 林初学 刘兴平 孙志禹	责任编辑	夏凤金
项 目 策 划	杨书宣 赵崇海	责任校对	何士茹
出 版 人	苏 青	印刷监制	李春利
编辑组组长	吕建华 赵 晖	责任印制	张建农

出 版 中国科学技术出版社
发 行 科学普及出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编 100081
发行电话 010-62103349
传 真 010-62103166
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm×1092mm 1/16
字 数 108 千字
印 张 6.75
版 次 2014 年 2 月第 1 版
印 次 2014 年 2 月第 1 次印刷
印 刷 北京华联印刷有限公司

书 号 978-7-5046-6072-5/TU · 104
定 价 30.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

总 序

科技是人类智慧的伟大结晶，创新是文明进步的不竭动力。当今世界，科技日益深入影响经济社会发展和人们日常生活，科技创新发展水平深刻反映着一个国家的综合国力和核心竞争力。面对新形势、新要求，我们必须牢牢把握新的科技革命和产业变革机遇，大力实施科教兴国战略和人才强国战略，全面提高自主创新能力。

科技著作是科研成果和自主创新能力的重要体现形式。纵观世界科技发展历史，高水平学术论著的出版常常成为科技进步和科技创新的重要里程碑。1543年，哥白尼的《天体运行论》在他逝世前夕出版，标志着人类在宇宙认识论上的一次革命，新的科学思想得以传遍欧洲，科学革命的序幕由此拉开。1687年，牛顿的代表作《自然哲学的数学原理》问世，在物理学、数学、天文学和哲学等领域产生巨大影响，标志着牛顿力学三大定律和万有引力定律的诞生。1789年，拉瓦锡出版了他的划时代名著《化学纲要》，为使化学确立为一门真正独立的学科奠定了基础，标志着化学新纪元的开端。1873年，麦克斯韦出版的《论电和磁》标志着电磁场理论的创立，该理论将电学、磁学、光学统一起来，成为19世纪物理学发展的最光辉成果。

这些伟大的学术论著凝聚着科学巨匠们的伟大科学思想，标志着不同时代科学技术的革命性进展，成为支撑相应学科发展宽厚、坚实的奠基石。放眼全球，科技论著的出版数量和质量，集中体现了各国科技工作者的原始创新能力，一个国家但凡拥有强大的自主创新能力，无一例外也反映到其出版的科技论著数量、质量和影响力上。出版高水平、高质量的学术著

作，成为科技工作者的奋斗目标和出版工作者的不懈追求。

中国科学技术协会是中国科技工作者的群众组织，是党和政府联系科技工作者的桥梁和纽带，在组织开展学术交流、科学普及、人才举荐、决策咨询等方面，具有独特的学科智力优势和组织网络优势。中国长江三峡集团公司是中国特大型国有独资企业，是推动我国经济发展、社会进步、民生改善、科技创新和国家安全的重要力量。2011年12月，中国科学技术协会和中国长江三峡集团公司签订战略合作协议，联合设立“中国科协三峡科技出版资助计划”，资助全国从事基础研究、应用基础研究或技术开发、改造和产品研发的科技工作者出版高水平的科技学术著作，并向45岁以下青年科技工作者、中国青年科技奖获得者和全国百篇优秀博士学位论文获得者倾斜，重点资助科技人员出版首部学术专著。

我由衷地希望，“中国科协三峡科技出版资助计划”的实施，对更好地聚集原创科研成果，推动国家科技创新和学科发展，促进科技工作者学术成长，繁荣科技出版，打造中国科学技术出版社学术出版品牌，产生积极的、重要的作用。

是为序。

中国长江三峡集团公司董事长



2012年12月

作者简介



李芳芳，女，2003年8月考入清华大学水利水电工程系，于2007年7月获得工学学士学位。2012年1月在清华大学获得工学博士学位。攻读学位期间，先后赴台湾“清华大学”、美国康奈尔大学交流学习。后在中国长江三峡集团公司进行博士后研究。2014年4月进入中国农业大学工作，现为中国农业大学水利与土木工程学院讲师。

主要从事水利工程调控、流域泥沙等方向的研究，在国内外期刊上以第一作者身份发表十余篇论文，其中包括“ASCE Journal of Water Resources Planning and Management”“Water Resources Management”等相关领域顶级期刊。多次在国际学术会议上做口头报告，为“IEEE Transactions on Power Systems”“Environmental Modeling & Software”等数个SCI源刊审稿人。

前 言

水是地球上一切生命发生和存在的最重要的物质基础，人类文明的出现与发展与水资源及其开发利用密不可分。随着人口的增加和社会经济的发展，水的利用量和能源的需求量也急剧增长。进入 20 世纪以来，世界各国兴建了大量水利工程，人类对水资源的利用进入了一个崭新的历史时期。

中国是世界上水力资源最丰富的国家之一。我国经济近年来的快速增长对水资源的利用量和对能源的需求不断增加，并且在未来相当长一段时期内将会保持增长态势。

然而，我国水能资源时空分布不均，水电资源大部分集中在西南地区，且河川径流丰枯季节、丰枯时段相差悬殊，自然调节能力不好。因此，在流域内开发具有调节性能的梯级水利枢纽是我国水电建设的必然趋势。目前我国已建成或正在建设黄河上游、长江、金沙江等 20 余个梯级水电站，已逐步形成由多个调节性能较好的水库组成梯级水库群联合调度的局面。

大型梯级水利枢纽建成后，运行调度水平的高低直接影响其综合效益的发挥。目前，在大型梯级水利枢纽的优化调度研究中，主要的难点来源于其高维性和非线性特点所带来的求解困难。梯级水利枢纽中的水力和电力联系存在多种非线性，而其在时间和空间上的决策维度远远超出现有的非线性优化算法的求解能力。除此之外，大型水库由于大库容高水头，优化时还存在连续大范围寻优而导致计算效率低下的问题。对于不同来流条件下水库优化结果的分析，目前也鲜有专门的方法研究。

针对大型水库大范围连续寻优的优化问题，本书提出了借助增量动态规划方法（Incremental Dynamic Programming, IDP）建立合理的寻优空间以提高优化效率的方法。充分利用 IDP 算法的收敛特性和启发式算法（Heuristic Algorithm, HA）在连续空间里强大的全局寻优能力，提出了 IDP-HA 耦合模型。以 IDP 优化后的调度线为参照，建立覆盖全局最优解的小

尺度寻优空间,在该空间内利用 HA 对高维变量进行寻优,有效解决了大型水库在高维时间尺度上大范围寻优导致的计算效率低下甚至无可行解的问题。

针对梯级水力枢纽的优化调度问题,本书通过将梯级水电站的优化调度在空间上解耦为对水能资源在不同水库之间进行合理分配的库群整体优化问题和水能资源在单个水电站的不同机组进行合理分配的水电站厂内优化问题进行降维。通过对水力发电机组运行特性的分析,对于不同特性的水电站,分别应用离散化和全微分形式的线性化方法。对于不同的问题,分别采用全局寻优的启发式算法和解决线性规划问题的单纯形法 (Simplex Method, SM),利用梯级水电站的水力电力联系对两级优化问题进行耦合求解,提出了解决大型梯级水力枢纽优化调度的 HASM 方法。并首次将动态降维搜索 (Dynamic Dimensional Search, DDS) 应用于水库优化调度领域。

对于不同来流条件下水库优化结果的分析方法,本书首次将基于径向核函数的非参数响应曲面方法应用于水库调度优化结果的分析。通过建立响应曲面,快速地定位出不同来流序列对应的水库最优运行方案,为水电站的实际调度提供参考。

书的最后,介绍将 HASM 方法应用于三峡—葛洲坝这一大型梯级水利枢纽的长期优化调度中的情况。结果证明,模型模拟精度令人满意,三峡—葛洲坝的实际调度尚存在优化的空间。

本书作者在清华大学王光谦教授的指导下完成了博士研究生阶段的学习及论文工作。在本书的编写过程中,得到了中国长江三峡集团公司曹广晶董事长、美国 Cornell 大学的 Christine A. Shoemaker 教授、清华大学的傅旭东教授以及魏加华副教授的精心指导。各位老师脚踏实地的求实精神、严谨的科学态度、一丝不苟的工作作风,始终鞭策着作者不断完善自己的工作。本书出版之际,特向各位老师致以崇高的敬意。对一切曾经鼓励、支持和帮助过我的领导、老师、朋友和读者,表示真挚的谢意。

对于书中因作者水平所限而存在的疏漏或错误之处,诚盼广大读者不吝指正。

李芳芳
2013 年 3 月

目 录

总 序	曹广晶
第1章 引 言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	5
1.3 研究内容	14
第2章 巨型水库寻优空间的 IDP-HA 耦合方法	16
2.1 巨型水库大范围随机寻优问题	16
2.2 建立巨型水库高效搜索空间的 IDP-HA 法	17
2.3 IDP-GA 耦合方法应用实例	19
2.4 结 论	28
第3章 梯级水库群优化调度的 HASM 降维方法	29
3.1 梯级水库群运行的高维性	29
3.2 梯级水库群空间层级耦合模型	29
3.3 梯级水库群优化调度的 HASM 降维方法	32
3.4 HASM 方法的检验	41
3.5 结 论	46
第4章 不同来流条件下优化结果的响应曲面	48
4.1 常用优化算法最优解信息	48

4.2 响应曲面法	49
4.3 不同来流序列的产生	50
4.4 水库优化调度的响应曲面	51
4.5 水库响应曲面实例	52
4.6 结 论	55
第5章 三峡—葛洲坝梯级水电站长期优化调度	57
5.1 三峡—葛洲坝梯级水利枢纽概况	57
5.2 三峡—葛洲坝梯级水电站水库特征参数	58
5.3 三峡—葛洲坝水利枢纽水位运行规程	66
5.4 模型模拟结果	67
5.5 长期优化模型	73
5.6 优化方法	76
5.7 优化结果	78
5.8 结 论	85
第6章 结论与展望	86
6.1 结论及创新点	86
6.2 研究展望	87
参考文献.....	88
索 引	94

第1章 引言

1.1 研究背景及意义

1.1.1 水电行业发展现状

我国经济近年来的快速增长对能源的需求不断增加,国家统计局统计公报显示,2010年全国能源消费总量为32.5亿吨标准煤,比上年增长5.9%。数据显示,煤炭消费量增长5.3%;原油消费量增长12.9%;天然气消费量增长18.2%;电力消费量增长13.1%。

随着国民经济的持续快速增长,我国能源需求必将持续增长,全国电力需求逐年上升,2010年之前,我国电力需求年均增长7%左右,年均需净增装机容量23000~26000MW^[1]。

能源短缺已经成为制约社会和经济发展的主要问题之一,而对煤、石油等不可再生常规能源的利用,会造成环境污染、生态破坏、地表塌陷、酸雨和“温室效应”等多方面的环境问题。

因此,我国在不断提高能源利用效率、节约能源资源的同时,大力开发利用可再生能源,加快调整能源结构,逐步降低煤炭等化石能源在能源消费结构中的比重,提出了“大力发展水电,优化发展火电,积极发展核电,努力发展新能源”的发展战略。2011年发布的中央一号文件《中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定》显示出了政府对水利建设的重视。水资源合理配置和高效利用体系成为中国水利建设的目标之一。作为水资源配置和利用的一个重要手段,水库群的建设和管理也成为重要的课题。

水电是一种技术成熟的可再生能源发电方式,是保障我国能源供应的重要措施。水电不但具有可再生、清洁环保、运行费用低廉、调峰调频能力强、能修复生态环境,

还兼有一次与二次能源双重功能、防洪、航运、旅游等优点，越来越受到重视。

从水电站的建设布局来看，我国水能资源空间分布不均，全国水电资源总量的 3/4 集中在西部地区，其中云、川、藏三省（自治区）占 60%，其次是中南和西北地区，分别占 15.5% 和 9.9%，而华东、华北、东北三大地区仅占 7% 左右。水电站，尤其是大型水电站主要集中在水能资源丰富的西部地区流域。而从时间分布上看，我国河川径流年内、年际分布不均，自然调节能力不好。为满足能源的实际需求，必须重视具有调节性能的水库水电站开发，发挥流域梯级水库及区域水库群的联合调度优势，发挥大区域水库之间的相互补偿优势^[2]。

流域梯级开发是我国水电建设的必然趋势，目前流域梯级水库已经初具规模，已建成或正在建设黄河上游、雅碧江、乌江等 12 大重点水电基地，共建 20 个左右梯级水电站，大型水电站数目达到 150 多座，逐步形成由多个调节性能较好的水库组成梯级水库群联合调度的局面，形成黄河上中游、长江、清江、乌江等梯级水电站水库群，按照流域划分，我国的梯级水电站建设情况如表 1.1 所示。

表 1.1 我国梯级水电站建设情况

水库	总库容 (亿 m ³)	正常蓄水位 (m)	所在梯级枢纽	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿千瓦时)	供电范围
三峡	393	175	三峡—葛洲坝	1820	847	华东、华中
葛洲坝	15.8	66	三峡—葛洲坝	271.5	157	华东、华中
二滩	58	1200	雅砻江梯级	3300	170	川渝
龚嘴	3.1	48	大渡河梯级	70	34.18	四川
梨园	7.27	1618	金沙江中游梯级	240	97.53	云南
阿海	8.82	1504	金沙江中游梯级	200	88.77	国网、南网
观音岩	20.72	1134	金沙江中游梯级	300	122.4	华东、华中
乌东德	76	975	金沙江下游梯级	870	387	华东、华中
白鹤滩	188	820	金沙江下游梯级	1200	515	华东、华中
溪洛渡	126.7	600	金沙江下游梯级	1386	571.2	华东、华中
向家坝	51.63	380	金沙江下游梯级	640	307.47	华东、华中
水布垭	45.8	400	清江梯级	1600	39.2	华中电网
高坝洲	4.3	80	清江梯级	25.2	8.98	华中电网
隔河岩	34	200	清江梯级	120	30.4	华中电网
龙羊峡	247	2600	黄河干流	128	23.6	西北电网
李家峡	16.5	2180	黄河干流	200	59	西北电网
刘家峡	57	1735	黄河干流	122.5	55.8	西北电网

续表

水库	总库容 (亿 m ³)	正常蓄水位 (m)	所在梯级枢纽	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿千瓦时)	供电范围
盐锅峡	2.2	1619	黄河干流	45.2	22.4	西北地区
万家寨	8.96	977	黄河干流	108	27.5	山西、蒙西
天桥	0.67	834	黄河干流	12.8	6.07	山西电网
小浪底	126.5	275	黄河干流	180	51	河南电网
洪家渡	49.47	1140	乌江干流	54	15.94	贵州电网
东风	10.16	970	乌江干流	57	24.2	贵州电网
索风营	2.012	837	乌江干流	60	20.11	贵州电网
乌江渡	23	760	乌江干流	63	33.4	西南电网
构皮滩	55.64	630	乌江干流	300	96.67	贵州、广东
思林	12.05	440	乌江干流	105	40.64	贵州、广东
沙沱	6.31	360	乌江干流	112	45.5	贵州、广东
糯扎渡	227.41	812	澜沧江干流	585	239.12	云南、南网
景洪	11.4	602	澜沧江干流	175	87	云南、南网
功果桥	3.16	1307	澜沧江干流	90	40.41	云南、南网
小湾	151.32	1240	澜沧江干流	420	190	云南、南网

1.1.2 梯级水库群运行调度中的主要问题

具有调节性能水库的修建对河川径流在时间上进行了重新分配。在同一条河流上修建梯级水库充分利用了水能资源。而梯级水库群建成后，其运行调度水平的高低直接影响着水库效益的发挥。梯级水利枢纽存在复杂的水力联系，整个梯级枢纽受上游来水影响、下游水库受上游水库调节能力制约。因此，梯级水电站的调度需要考虑各个电站的合理运行调度，更要考虑整个梯级系统的优化调度以提高水能利用率，使梯级枢纽中所有水库在调度期内的综合效益达到最大。

对于已建成的梯级水电站而言，如何合理高效地优化水库群的联合调度是行业中亟待关注和解决的问题。水库群的联合调度是指对流域内一群相互间具有水力、电力联系的水库进行统一的协调调度，使流域内水利效益最大化。水库群的联合调度通常采取系统工程的处理方式开展水库群优化调度。目前对于梯级水电站，尤其是包含大型水电站的梯级枢纽的研究中，普遍存在模型模拟精度不高，对水电站运行特性分析不足的问题，与实际生产尚存在距离。研究成果对于实际的调度指导意义不大。具体来说，我国目前梯级水电站的调度和研究存在着以下一些问题。

(1) 理论与实际差距较大。为了提高计算效率,理论研究中的物理模型往往对水力发电的过程进行了简化处理。现有的计算模型往往比较简单,与实际复杂的物理过程存在差异,模型本身模拟精度不高,不能很好地反映实际的运行调度过程。因此,理论研究很难对实际的水库运行产生指导意义。模型精度不高的另一个结果便是很难对现有的水资源调度过程进行定量的分析研究,对实际工作的总结深度不够,流于形式。

(2) 对于大型水电站的运行调度缺乏研究。大型水电站是指库容较大,水头较高,总装机容量较大的水电站。随着技术的进步,一批大型水电站正在逐步地投入建设和使用。大型水电站在流域中往往承担着防洪、保障供水和下游安全的重任,在电网中承担着系统调峰、调频和事故备用等重任。由于大型水电站的建成历史较短,案例有限,对于其运行特性缺少分析研究。在水电站运行过程中,存在调度不合理,对水能资源利用不充分的现状。例如,水电站水库在低水位多发电,造成巨大的电量损失。对于大型水电站,高效合理的运行意义尤为重大。这是大型水电站厂内机组的单机出力较大,如果能高效地利用水能资源,带来的效益也巨大。但大型水电站特殊的运行特性为优化调度增加了难度。高水头大库容的特性使得水电站的运行区间较大,即水位的取值范围较大,在如此的大范围内选定一个最佳的运行方案是一个难题。对于大型水电站,在大范围内选择一个较优的运行方案,是一个具有挑战性的问题。

(3) 水能资源空间分配不合理。具有水力电力联系的各个水库组成的水库是一个整体。各个水库效益最的简单求和并不等于水库群联合调度的总体效益。需要充分利用各个水库调节性能的特点,统一调度,最终水库群的社会经济效益应该大于各水库效益之和。同一流域上的各个水电站之间存在复杂的水力电力联系,原有的单库最优调度方式并不能简单地推广到多库系统的优化调度中去。单库的调度中,设立单一或多个调度目标,并没有考虑其对水库群以及整个流域的影响。单个水库的最优调度方案一般并不利于流域内水利综合效益的发挥。水库群的形成,改变了原来单库的水力条件,各水库之间存在相互影响,需要统一规划,采取联合调度的方式,开展水库群优化调度。另外,由于历史原因,我国水电站的建设是逐步投入的。早期的水电站建设缺乏统一的规划,会出现先建成的电站装机容量较小,当后续建设的其他水库投入运行时,水力条件改变,其综合能力不能充分发挥的现象。具体表现在,下泄流量不稳定,调峰性能不满足电网要求等。水能资源在空间上不仅要做到在水库群中的合理分配,还要做到在厂内不同机型机组之间的合理分配,因此是一个高维问题。梯级水电站运行调度上的非线性和高维性都使得找到一个较优的水能资源空间分配方案成为一个难题。

(4) 水能资源时间分配不合理。由于预报精度和预见期的限制,在目前的水资源时间分配上,尤其是长期调度中,并不能实现最优化方案。在实际的调度中,往往出

现电量“惜发”的现象，由于来流预报精度和预见期的限制，调度过于保守。为避免出现枯水年造成正常工作遭破坏，水电站在整个非汛期均按保证出力工作。而汛期来临时，不得不将水位下降到汛限水位以下，造成大量弃水，不能充分利用水能。反之，水电站在非汛期前期盲目多发电，一旦遭遇枯水年，则会使得系统水量不足，不能完成发电、调峰等任务。造成水能资源时间分配不合理的主要原因在于对不同来流条件的估计和分析不足。由于缺乏对不同来流序列的分析，水库的运行调度很大程度上依赖于来流预报的精度和预见期。而在现有技术条件下，预报最长的预见期基本为一周，这对于水库长期运行调度的决策显然是不够的。如何尽可能分析和挖掘不同来流条件下水库优化运行方案中所传递的信息，为水能资源在时间上的合理高效分配提供依据，也是目前水库调度中亟待解决的一个主要问题。

1.2 国内外研究现状

优化理论针对某一特定问题对应的数学模型，寻求其最佳的决策方案对应的最优解，其研究的领域包括建立寻求最优解的计算方法，讨论这些优化方法的性质等。

如果优化后找到的只是某一个范围内的最优解，称为局部最优解。相对于局部最优解而言，寻找全局最优解，即在决策变量允许的取值范围内的最优决策方案更具有实际意义。全局最优化在实际生产中应用广泛，通用表达如下：

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & \text{s. t. } g_i(x) \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x \in \Theta \end{aligned} \quad (1-1)$$

式(1-1)中， Θ 为 R^n 的一个非空闭子集， $f, g_i, i = 1, 2, \dots, m$ 为定义在 Θ 上的函数。

水库调度领域的很多问题，其数学模型都可归结为一个全局优化问题。对于全局优化问题的求解，已成功发展起许多理论和具体方法。梯级水电站的发电效益巨大，巨大的发电效益背后隐藏着巨大的效益提升空间。无论是从技术还是经济的角度来看，梯级水电站的优化调度研究都是急需解决的、具有重要理论意义和应用前景的课题。

梯级水库群在空间上存在水能资源在各库之间进行分配和水能资源在水电站内各机组之间分配的两级优化问题，本研究中分别将其称为梯级水库的整体优化问题和水电站厂内经济运行问题。库群之间的水力电力联系使得两个问题相互耦合，造成了梯级水电站优化中的高维性。另一方面，梯级水库运行中复杂的水力条件和电力条件大多数非线性，对于这种复杂的非线性问题，目前还少有确定的全局优化方法可以解决。梯级水电站运行的高维性和非线性都为优化的研究带来了困难。在此基础上，如果

系统中存在大型水库，还会出现前面所说的大型水库大范围寻优所造成的难点问题。此外，对于不同来流条件下优化结果的分析也鲜有报道。以下分别针对梯级水库的整体优化问题，水电站厂内经济运行问题，大型水电站大范围寻优问题以及不同来流条件下优化结果的分析方法，介绍国内外的研究现状。

1.2.1 梯级水库群整体优化问题研究综述

水库群优化调度是一个典型的大规模高维、多目标的非线性动态规划问题。总的来说，在水库群调度领域常用的方法可分为数学规划和启发式算法两大类。数学规划 (Mathematic Programming) 主要包括线性规划 (Linear Programming, LP)、非线性规划 (Non-Linear Programming, NLP) 和动态规划 (Dynamic Programming, DP) 等；启发式算法 (Heuristic Algorithm, HA) 是一种基于直观或经验构造的算法，在可接受的计算时间内给出组合优化问题的最优解，主要包括遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)、人工神经网络算法 (Artificial Neural Networks, ANN)、模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA) 和粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 等。如图 1.1 所示。

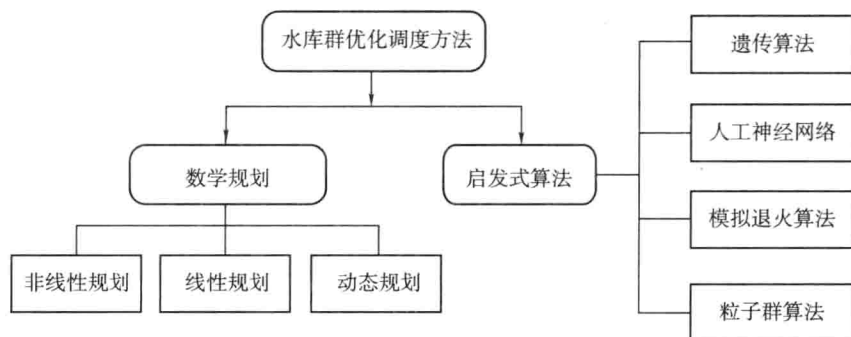


图 1.1 水库优化调度方法分类

(1) 数学规划。

数学规划是一种确定性的方法，但一般对于模型的数学结构要求较高，需要对物理模型进行简化。其中，线性规划 (LP)^[3-4] 的理论和寻优算法发展较为完善，有成熟、通用的求解方法及程序，但要求数学模型的目标函数和约束条件都是线性的，水库运行实际过程不符合线性要求，需要对模型进行简化。非线性规划 (NLP)^[5-6] 能有效地处理不可分目标函数和非线性约束优化问题。NLP 处理非线性问题的主要方法有：利用罚函数将约束合并到目标函数中从而得到无约束优化问题；对非线性问题进行线性化从而得到线性问题等。NLP 的优化模型复杂，没有通用的求解方法，计算效率低

下,需要针对不同的数学模型形式建立不同的求解方法,因此,NLP在水库群调度领域的应用不及动态规划及线性规划广泛。动态规划(DP)^[7-11]是解决多阶段决策过程最优化的一种数学方法,其基本思想是把多阶段决策问题变换为一系列互相联系的单阶段决策问题逐个解决。DP对目标函数和约束条件没有严格的要求,不受任何线性、凸性甚至连续性的限制,也可以方便地考虑随机性优化问题。但DP存在致命的“维数灾”问题,不能求解多变量复杂的高维问题。针对这一问题,Rotfs. T. G和L. D. Bodin于1970年发展了约束微分动态规划,并应用于10个水库的库群优化调度;Heidari等于1971年首次将离散微分动态规划法(DDDP)应用于典型的四库优化问题^[12];对于该问题,Larson也在1968年用增量动态规划法(IDP)进行过研究;Nopmogcol和Askew在1976年发展出了多重增量动态规划技术(MDP)研究此问题;Foufoula等在1988年提出了梯度动态规划算法(GDP)以解决由于水库数目增加造成的“维数灾”问题^[13]。但这些方法所能计算的规模仍然有限,并没有从根本上解决动态规划的维数灾问题。此外,从根本上讲,动态规划还是一种需要对状态变量进行离散的优化方法,与水库运行中水力条件连续的特性不符。

(2) 启发式算法。

启发式算法尽管在理论上不很成熟,缺乏全局最优性条件,甚至没有确定的方法判断一个局部最优点是否为全局最优点,但算法对数学模型结构要求不高,对不同问题的适用性较强,因此自提出以来,其研究和应用一直颇受学者青睐。启发式算法中的遗传算法较为成熟,应用也最为广泛。遗传算法由美国Michigan大学Holland J. H.教授于1975年提出^[14],是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化搜索算法。算法具有并行性和自适应性,可以从多个初值点、多路径搜索全局最优解,尤其适用于求解大规模的高维非线性问题,被广泛地应用于水库优化调度领域。在早期的应用中,遗传算法被证明对于复杂系统,例如四库问题运行规则的制定有很强的应用价值和鲁棒性^[15-16]。Oliveira等(1997)使用遗传算法生成水库群系统的调度规则等^[17]。在近10年的研究中,遗传算法在算法设计、基因编码、参数选择等方面更是有了长足的进步。例如,Yuan^[18]在2002年就提出混合混沌算法的遗传算法来解决梯级水库的短期优化问题;Chang^[19]分析了算法参数的敏感性,并且对遗传算法参数的选择提供了可参考的依据。多目标的水库优化调度中也多使用遗传算法^[20-21]。还有一些其他的改进技术也被引入用于水库优化调度的遗传算法研究中^[22-24]。人工神经网络由心理学家McCulloch W和数理学家Pitts W,于1943年提出,本质上是一种模仿神经网络行为,通过调整内部大量节点之间相互连接的关系处理信息,是一种分布式并行处理信息的数学模型。ANN具有自学习和自适应的能力,可以充分逼近复杂的非线性关系,具有很强的鲁棒性和容错性。水库优化调度通常采用前馈式神经网络。当模型的输入层和输出层确定后,节点数目之间影响模型精度,此外训练的次数也会