

水电站群多尺度多准则 联合优化调度研究

SHUIDIANZHANQUN DUOCHIDU DUOZHUNZE
LIANHE YOUHUA DIAODU YANJIU

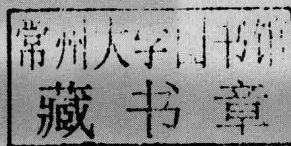
徐斌 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水电站群多尺度多准则 联合优化调度研究

徐斌 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书以长江三峡梯级、清江梯级混联水电站水库群系统为研究对象,以随机过程分析、统计理论、水库群优化调度方法为理论基础,对水库群系统在多时间尺度、多空间尺度、多目标准则下优化调度建模及求解方法展开探讨,建立分别适用于长期、中短期径流预报精度特征条件下的优化模型,提出多种目标准则下的模型求解方法,分析不同模型调度策略差异,为水库群联合优化调度实践提供理论依据。

本书具有较强的专业性、知识性和方法性,书中提出的优化调度决策模型及求解方法可供水利、生态、环境等领域的科研工作者、管理者及决策者使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

水电站群多尺度多准则联合优化调度研究 / 徐斌著

— 北京 : 中国水利水电出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-5170-5845-8

I. ①水… II. ①徐… III. ①梯级水电站—水库调度—研究 IV. ①TV74

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第230299号

书 名	水电站群多尺度多准则联合优化调度研究 SHUIDIANZHANQUN DUOCHIDU DUOZHUNZE LIANHE YOUHUA DIAODU YANJIU
作 者	徐斌 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	北京市密东印刷有限公司印刷
规 格	170mm×240mm 16开本 10印张 139千字
版 次	2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷
定 价	45.00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



能源是国民经济发展的基础资源，是维持社会进步、经济稳定发展和改善人民生活条件的基本保障。目前，我国正处于工业化、城镇化飞速发展的重要阶段，能源耗用强度较高。随着我国经济发展的增速，能源需求仍在持续增长。化石能源是能源供给中的主要组成部分。然而，化石能源的过度开发利用以及其不可再生性决定了其存在难以遏制的枯竭趋势。同时，大量耗用化石能源已带来严重的环境污染问题。能源和环境问题已成为影响我国经济发展、社会稳定、公众健康等诸多方面的重要问题。

大力发展清洁能源是缓解能源、环境问题的有效途径。近年来，我国在发展以水电为主的清洁能源方面已取得长足进步。目前，水电发展的重点为大型水电基地建设，包括金沙江中下游、雅砻江、大渡河、澜沧江中下游、黄河上游、雅鲁藏布江中游等河段，以及启动金沙江上游、澜沧江上游、怒江等流域水电开发工作。在未来可预计的 30 年内，这些骨干水利工程将逐步建设完工，标志着我国水能资源开发利用的重点逐步由工程建设转入运行管理的新阶段。水电站群联合优化调度是提高水能资源开发利用效率和增加调度效益的有效手段。研究表明，长期优化调度可提高发电量 2.0%~5.5%；短期优化调度可提高发电量 1.5%~5.0%；日时优化调度可节省发电成本 0.5%~3.0%。在大力发展水电能源的新阶段，研究和应用水电站群优化调度理论效益可观，前景广阔。

以最优化理论为手段，水电站水库群联合优化调度旨在寻求水电站系统放水的最佳时程、空间分配方式，以满足多样化、多用户

的用水需求。其本质是序贯组合多目标优化问题，具有时间尺度多样性、空间结构复杂性、目标准则多元化等基本特征。在大力开发水能资源的新阶段，水电站群联合优化调度理论研究将面临新的问题和挑战：第一，时间尺度多样性将增大优化调度模型的建模难度。主要体现为不同时间尺度下水雨情等信息预测精度存在较大差异，使得对应的优化调度模型结构难以统一。第二，空间结构复杂性将增加优化模型的求解难度。由于模型计算规模随水库规模的增加而激增，寻求快速有效的求解算法是保障决策模型时效性的重要措施。第三，目标准则的多样化以及协调对象的多元化将使决策难度加大。在水电站群多目标联合优化调度中，考虑到水电站群的水力联系、电力联系以及调节能力的差异，模型不仅需协调用水部门间的水量分配，同时还需对不同水库间的放水策略进行协调，使得该问题比单一水库的多目标优化调度问题更为复杂。国内外现有相关理论研究尚不成熟。

本书以长江三峡、清江梯级混联水电站库群系统为研究对象，对系统的多时间尺度、多空间尺度、多目标准则优化调度模型建模及求解方法展开研究。共计6章，第1章阐述了在能源、环境双重危机条件下清洁能源的发展前景，分析了加大水能资源开发利用的重要性以及水电站群优化调度理论研究的意义。综述了多时间尺度、多空间尺度、多目标准则下水电站群联合优化调度理论的国内外研究进展。第2章主要考虑径流不确定性对多年调节水库年末消落水位的影响，建立以多年调度期内发电量与调度期外库群蓄能之和最大化为目标的多年调节水电站水库年末库容优化模型。比较确定性年末库容优化模型与随机优化模型所得年末库容的差别，采用数值试验分析两种年末库容方案在指导长期水库调度中的性能指标差异。第3章建立以系统期望发电量最大化为目标的长期水电站群随机规划模型。将径流描述为随机时间序列，并将随机径流过程离散化，采用基于聚类分析的Neural gas法从观测径流样本中提炼径流模式树。针对求解水库群系统随机优化模型存在的维数灾问题，研究径流模式树的裁枝方式以及径流模式树规模对模型目标函数、

模型解的影响。第4章针对遗传算法求解水库联合调度问题（“以水定电”模型）时，随机交叉、变异算子将可行解破坏为不可行解的问题，研究设计特殊遗传算子以提高子代群体中可行解的比例，进而提高算法搜索能力。第5章研究建立水电站群短期多目标“以电定水”模型。研究“以电定水”问题中，系统蓄能和出库水量两个目标对应的解对短期期末水位消落方案的影响，以及导致长期发电量差异的次生影响，通过耦合长期发电量作为短期多目标方案评价指标，并通过数值试验分析不同水文要素条件下的最佳短期调度方案特征。第6章为全书总结与展望。

通过研究，取得以下创新点：

（1）针对求解水库群随机优化调度模型中存在的维数灾问题，研究了降维方法——径流模式树的最佳裁枝方式；利用统计假设检验，侦测不同径流模式树规模下载枝解与原解的差异，依此率定最大裁枝程度；提出以不显著改变目标函数值和解质量为前提的裁枝准则。以清江梯级水电站群系统的长期联合优化调度为例，该方法将径流模式树裁枝40%不会显著降低模型的解质量，但至少可降低计算时间41%以上。

（2）针对遗传算法在应用于水库群优化调度问题求解时存在生成可行解效率低、可行解易被破坏等缺陷，提出可行域内交叉、变异的动态可行域遗传算法，在交叉、变异点构造的同时，满足前后相邻时段约束的动态可行域。应用于求解清江、三峡混联水库群系统的短期优化调度问题，计算结果表明：与传统遗传算法相比，平均每代可提高种群中可行解60%，提高收敛率71%，提高最终解可行率26%，提高系统发电量1.6%，缩短计算时间2.1s，降低实验标准差85%。

（3）以出库水量最小化及蓄能最大化两个目标，建立梯级水库群系统的短期多目标“以电定水”模型。由于“以电定水”模型的发电用水量待定，使得不同目标函数下短期方案的期末消落水位存在差异，影响后续的长期发电效益。结合短期方案的长期调度效益评价，挑选最佳短期调度策略；分析不同短期调度方案适用的水文

条件和工程条件；归纳总结了影响最佳短期调度方案的主要要素条件。结果表明，在考虑所有来水模式下，采用不同“以电定水”月调度方案造成的长期（后续 11 个月）发电量期望值差异可达 $7777\text{MW} \cdot \text{h}$ 。在丰水模式下，该差异为 $23000\text{MW} \cdot \text{h}$ 。

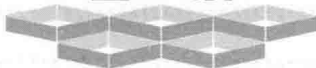
本书的出版得到了水利部公益性行业科研专项经费项目（编号：201501007）资助，感谢河海大学水文水资源学院钟平安、王建群、王船海、梁忠民、董增川、束龙仓、杨侃、陆宝宏、万新宇，河海大学水利水电学院唐洪武、唐德善，加州大学洛杉矶分校 William W. -G. Yeh 等教授及专家在本书成果研究、内容撰写过程中给予的大力支持。书中借鉴和引用了国内外相关研究成果，书后附有参考文献，在此一并表示感谢。

在本书撰写过程中，本人始终秉承理论模型与实际应用相结合的思路，但鉴于水库群多尺度多准则优化调度研究属多学科交叉研究，涉及范围较宽，且研究难度较高，加之研究水平有限，书中难免出现疏漏和不足之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2017 年 3 月

目 录



前言

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的背景和意义	1
1.2 水电站群优化调度理论研究进展	5
1.2.1 多时间尺度优化调度模型研究	5
1.2.2 多空间尺度优化调度模型研究	12
1.2.3 多目标准则优化调度模型研究	16
1.3 本书结构框架	19
第 2 章 多年调节水库年末库容优化模型	23
2.1 径流模式树	25
2.2 随机优化模型	31
2.2.1 目标函数	31
2.2.2 约束条件	32
2.3 确定性优化模型	33
2.4 方案评价模型和评价指标	35
2.5 算例分析	36
2.5.1 清江梯级水库群系统	36
2.5.2 径流模式	38
2.5.3 模型结果	40
2.5.4 方案比较	44
2.6 小结	50

第3章 水电站群随机规划模型模式树裁枝方法	52
3.1 考虑实时修正的随机规划模型	54
3.1.1 目标函数	55
3.1.2 约束条件	55
3.1.3 实时修正策略	57
3.2 径流模式树裁枝的影响分析	57
3.2.1 目标函数值的影响分析	58
3.2.2 解的影响分析	62
3.3 算例	64
3.3.1 径流模式树生成和裁枝	65
3.3.2 模式树裁枝对目标函数的影响	68
3.3.3 模式树裁枝对解的影响	75
3.4 小结	81
第4章 水电站群联合优化调度动态可行域遗传算法	83
4.1 水电站群“以水定电”短期发电优化调度模型	84
4.1.1 目标函数	84
4.1.2 约束条件	84
4.2 传统遗传算法	86
4.2.1 编码方式及初始种群生成	86
4.2.2 个体优劣判别法则	86
4.2.3 交叉算子	87
4.2.4 变异算子	88
4.2.5 选择算子	88
4.2.6 进化终止	88
4.3 动态可行域遗传算法	89
4.3.1 单库动态可行域确定	89
4.3.2 库群约束可行域	91
4.3.3 交叉、变异算子改进	93
4.4 算法评价指标	93
4.4.1 系统总发电量	94

4.4.2	系统电量标准差	94
4.4.3	收敛率	94
4.4.4	最终解可行率	94
4.4.5	平均计算时间	94
4.4.6	种群可行解比例	94
4.5	算例	95
4.6	小结	101
第5章 考虑长期发电量的短期水电站群多目标优化模型.....		102
5.1	短期策略的长期影响分析	105
5.2	短期优化调度模型	106
5.2.1	目标函数	106
5.2.2	约束条件	108
5.3	长期优化调度模型	109
5.3.1	目标函数	109
5.3.2	约束条件	109
5.4	求解算法	110
5.4.1	短期优化模型的非支配排序多目标遗传算法(NSGA-II)	110
5.4.2	长期优化模型的动态规划法(DP)	111
5.5	评价指标	112
5.6	算例分析	113
5.6.1	短期模型的多目标非劣解前沿	113
5.6.2	长期发电量计算	116
5.6.3	灵敏度分析	121
5.7	小结	124
第6章 总结与展望.....		126
6.1	总结	126
6.2	展望	130
参考文献.....		132

第1章 绪 论

1.1 问题的背景和意义

能源是国民经济发展的基础资源，是维持社会进步、经济稳定发展和改善人民生活条件的基本保障。目前，我国正处于工业化、城镇化飞速发展的重要阶段，能源耗用强度高。英国石油公司世界能源统计年鉴数据表明，2013年中国一次能源消费为28.52亿t油当量，比2012年增加4.7%，占世界一次能源消费总量的22.4%。随着我国经济发展的增速，能源需求仍在持续增长，供需失衡将对国民经济发展造成重要影响。

化石能源是能源供给中的主要组成部分。2006年，煤、石油、天然气等化石能源在全球消耗能源中占比达87.9%，在我国消耗能源中占比达93.8%。预计在未来20年内，仍无法改变化石能源的主导地位。以2008年的资源开采速度预估，全球煤炭探明储量够开采122年，石油仅够开采42年，而天然气可供开采60年。我国煤炭探明储量占全球总量13.9%，仅低于美国和俄罗斯，储采比为41年；石油、天然气的探明储量分别仅占全球总量的1.2%和1.3%，对应储采比分别为32年和11年。对于一个全球人口占比22%的国家而言，煤资源供给在可预计的将来虽能得到保障，但石油、天然气供应形势岌岌可危。化石能源的枯竭存在难以遏制的趋势。

化石能源的利用导致环境恶化。在开采、存储、运输、耗用化石能源的每个环节均可能产生造成空气、水体环境污染的诸多污染物。燃烧煤炭产生大量的二氧化硫（SO₂）和烟尘，是造成我国大气污染的主要原因。近年来，我国华北地区、长三角地区频发的雾



霾天气，多归因于二氧化硫、氮氧化物及烟尘等污染物的过量排放。此外，这些污染物在空气中还会产生化学反应，造成二次污染。比如二氧化硫在大气中反应生成酸雨。石油在开采、提炼、输送等过程中会产生大量油污，导致水源污染，生态环境破坏。机动车尾气污染等问题与日俱增，空气污染已由煤烟型污染逐渐转为尾气、煤烟的混合型污染。

化石能源的消耗产生了大量温室气体，使温室效应增强，导致全球气候变暖。气候变暖已是不争的事实。1860年以来，全球平均气温提高了 $0.44\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ 。二氧化碳(CO_2)为温室气体的主要部分。自工业化以来，250多年时间内排放了约1.16万亿t二氧化碳，很可能是二氧化碳浓度由280ppm增加至379ppm的最主要原因。政府间气候变化专门委员会(IPCC)所做的气候变化预估报告指出，约90%以上的 CO_2 排放是燃用化石燃料产生的，人类活动很可能是造成全球气候变暖的主要因素。

全球能源危机随化石能源储量的逐步降低而日益迫近，以化石能源为主导的能源结构具有不可持续性。同时，化石能源燃用造成的环境问题也已影响到国家经济、社会稳定以及人民健康等方方面面。因此，亟须寻求替代能源和节能减排技术。

现阶段我国已进入“重化工业主导型”经济发展阶段，受限于化石能源“富煤贫油少气”的基础特征，决定了在相当长一段时期内，我国一次能源消费结构中煤炭为主的格局将难以改变。能源与生态环境问题业已成为制约我国社会经济可持续发展的两大瓶颈。《国家中长期科学与技术发展规划纲要》中明确指出：“能源在国民经济中具有特别重要的战略地位。我国目前能源供需矛盾尖锐，结构不合理；能源利用效率低；一次能源消费以煤为主，化石能的大量消费造成严重的环境污染。今后15年，满足持续快速增长的能源需求和实现能源的清洁高效利用，将是能源科技发展的重要任务。”

在“绿色化”经济发展的道路上，提高能源利用效率、强化节能、增大可再生能源的使用比例至关重要。国家发展改革委在《能



源发展“十一五”规划》中结合中国经济基本情况和国际形势，制定了“坚持节约优先、立足国内、煤为基础、多元发展”的能源方针，提出“2010年中国煤炭消费量占一次能源消费总量的66%”的目标。2006年，为促进可再生能源开发利用、增加能源供应以及保护环境，我国颁布《中华人民共和国可再生能源法》，该法案以及其修正法案组成了发展可再生能源的能源政策和法律体系。它涵盖了相关法规、执行部门职责、财政补贴政策以及相关国家标准。政府支持和引导以及市场需求的推动为可再生能源发展提供了良好的环境。近年来我国可再生能源的发展已步入新台阶：截至2013年年末，全国发电装机总量达12.47亿kW，同比增长9.3%。火电装机量8.6亿kW，占比69%，同比增长5.7%。新能源和可再生能源发电装机占比31%，同比提高5.76%。其中，水电装机量2.8亿kW，占比22.5%，同比增长12.3%；风电、太阳能、核电装机量分别为7548万kW、1479万kW和1461万kW，同比分别增长24.5%、240%和16.2%。伴随着水电开发的高速发展、核电项目进入投产高峰期以及风电投运的稳定增速，火电增速仍将持续回落，我国电源结构还将持续优化。

在众多可再生能源中，水电能源是具有清洁无污染、便于调峰、一水多用等功能的优质能源。从能源结构占比来看，水电仅次于火电，地位至关重要。2003年水力资源复查结果表明：我国拥有丰富的水能资源，水能理论蕴藏量6万亿kW，技术可开发容量和经济可开发容量分别为5.42亿kW和4.02亿kW，居世界首位。截至2014年，水电总装机容量分别占技术可开发容量和经济可开发容量的51.6%和69.7%，仍有较大潜力可挖掘。近两年水电发展的重点为大型水电基地建设，优先开发水能资源丰富、分布集中的河流，建设10个千万千瓦级大型水电基地，包括金沙江中下游、雅砻江、大渡河、澜沧江中下游、黄河上游、雅鲁藏布江中游等河段，以及启动金沙江上游、澜沧江上游、怒江等流域水电开发工作。

这些骨干水利工程的建设完工，将标志我国水能资源开发利用



的重点逐步由工程建设转入运行管理阶段。水电站群联合优化调度是提高水能资源开发利用效率和增加调度效益的有效手段。按时间尺度划分,可分为长期调度、短期调度和日时调度。其中,长期优化调度可提高发电量 $2.0\%\sim 5.5\%$;短期优化调度可提高发电量 $1.5\%\sim 5.0\%$;日时优化调度可节省发电成本 $0.5\%\sim 3.0\%$ 。水电站群联合优化调度的本质是序贯优化决策问题,以水电站群的水文补偿、水利补偿、库容补偿以及电力补偿等补偿机制为根基,以调度效益最大化或费用最小化为目标,以最优化理论寻求水电站群蓄放水策略的最佳时空组合。从时间角度而言,通过优化调度寻找最佳蓄放水时机,既避免因过量放水后遭遇枯水段导致后期供水、发电不足,又防止大量蓄水后遭遇丰水段而产生弃水,使水能资源的以时程分配方式最优化;从空间角度而言,联合调度即求解水电站群最优蓄放水次序,以高调节性能水库为主导,利用水电站群间的水量、水头、发电效率的置换关系实现整体效益最大化。在大力发展水能资源的新阶段,水电站群联合优化调度理论研究将面临前所未有的挑战 and 新的问题。

(1) 多时间尺度优化调度建模。不同时间尺度下水雨情等信息预测精度存在较大差异,使得对应的优化调度模型结构难以统一,增大了建模难度。一般认为,预见期愈短,预测的精度愈高,短时间尺度下信息预测精度高,随机性偏低,宜采用确定性优化模型制定短期调度计划;长期时间尺度下信息预测精度低,随机性偏高,宜采用随机优化模型制定长期调度计划。依据不同时间尺度下决策者的具体需求以及信息准确度的差异建立不同优化调度模型,利用长期调度策略引导短期调度策略并建立信息的滚动反馈机制是解决多时间尺度优化调度问题的关键。

(2) 多空间尺度优化模型求解。优化调度模型规模将增大,导致问题求解难度增加。随着西部大开发“西电东送”项目的启动以及大量调节性能优异的水电站群逐渐建成投产,通过电网互联的跨区域甚至跨流域的水电站群可实施电力补偿,实现全网甚至跨网联合优化调度。因此,参与联合优化调度的水电站群规模将加大,导



致水电站群优化调度模型的计算开销激增,加大模型的求解难度。在此条件下,为保障实时调度决策的及时性,亟待寻求快速有效的求解算法。

(3) 多目标准则优化调度建模。目标准则的多样化以及协调对象的多元化将使决策难度加大。随着大型水电基地的投产运行以及电力市场化改革的逐步实施,水电站群联合优化调度的目标准则将更大程度地关注水能资源分配的经济效益,考虑电价实时浮动对电力市场供需平衡的影响。此外,在水电站群多目标联合优化调度中,考虑到水电站群的水力联系、电力联系以及调节能力的差异,模型不仅需协调用水部门间的水量分配,同时还需对不同水库间的放水策略进行协调。使得该问题比单一水库的多目标优化调度问题更为复杂。

因此,研究多时间尺度、多空间尺度、多目标准则下水库群联合优化调度技术是适应水电能源发展阶段转型的必然,是在新阶段下发挥水电优势、降低化石能源耗用、实现资源优化配置的有效手段。现有国内外相关理论研究尚不成熟,研究具有重要的理论意义与实用价值。

1.2 水电站群优化调度理论研究进展

1.2.1 多时间尺度优化调度模型研究

多时间尺度分层耦合是水库调度的一个重要特征。结合考虑目前水文、气象预报的精度情况,一般认为,水库调度的时间尺度按调度期长可分为长期(调度期不低于月)、短期(调度期不超过月)、日时(调度期为若干日)等三种尺度。

1.2.1.1 长期优化调度模型

长期调度计划主要用于设置水库群系统在长期调度期中主要时间窗的控制水位,以约束短期调度计划的期末水位,比如多年调节水库连续枯水年组消落水位、分季控制水位、汛前消落水位、汛后



蓄水水位等。长期径流序列具有较强的混沌、随机特征,难以准确预测。目前长期径流预测多采用经验性统计模型,预测精度较差,往往只能捕捉径流的统计参数(均值、偏态系数、离势系数等)。因此,常采用随机过程描述长期径流序列。同时,受地区性气候条件的季节性变换影响,长期径流常呈现出较为明显的统计特征,可依据这种统计特征将径流处理为随机或弱相关序列。长期径流的随机过程描述常包括以下三种方式:

- (1) 已知分布的随机变量。
- (2) 只考虑前后时段相关的一阶马尔科夫过程或条件分布。
- (3) 考虑与前若干时段相关的马尔科夫重链或联合分布。

采用随机过程描述径流序列导致调度决策中存在不确定性,决策的结果往往是收益的某种概率分布或者统计意义上的优化方式。随机性的径流描述更侧重于阐述调度决策的风险性。相应地,随机优化调度模型即依据随机径流过程寻求统计意义上调度利益最优的策略。随机优化调度模型包括隐式随机优化模型(Implicit Stochastic Optimization, ISO)和显式随机优化模型(Explicit Stochastic Optimization, ESO)两类。隐式随机优化模型以大量径流系列为输入,径流系列可为历史观测系列或随机水文模型的生成径流系列,对每种径流系列分别采用确定性优化模型求解限定约束下的最优调度方案,然后选定某种线型用于拟合调度策略与相关因子(如当前水位、过去时段径流、预报径流等)的关系,作为调度规则。然而,线型的选择、样本的代表性、样本的噪声等因素都可能影响提取规则的质量,目前这些要素的具体处理方式尚无统一标准。

显式随机优化模型以随机径流过程作为输入,直接求解随机过程下的最佳调度策略,无须从优化调度样本中提取优化调度策略。但显式随机优化模型应用于求解水库群系统联合优化调度策略时,其计算开销要显著高于隐式随机优化模型。

二阶段随机优化模型是显式随机优化模型中的典型。模型将时段分为两段:当前时段和未来时段,并假定当前时段的信息以及决



策是唯一确定的,而未来时段的信息和决策具有随机性。因此,模型目标函数常包含当前时段的确定性效益(或成本)与未来时段的期望效益(或成本)之和。通过生成未来时段入流的径流模式,并赋予各模式对应的发生概率,则可将随机优化模型转化为确定性的等效优化模型。在此条件下,水库在未来时段的放水策略与具体的径流模式相关联,为随机过程。

随机动态规划法是求解二阶段随机优化模型的代表性方法。该方法通常把径流过程假定为一阶马尔科夫过程或时间上相互独立的随机过程,然后采用逐阶段的动态规划迭代格式进行模型求解。Baraga 等将调度期分实时、长期两段,建立了两阶段水电站群优化调度模型。在长期阶段,依据历史平均径流,采用确定性模型计算长期调度期中的逐时段期末控制水位;在实时阶段,将径流描述为一阶马氏链,依据历史资料率定转移概率,采用随机动态规划法计算实时优化调度方案。Stedinger 等用当前时段预报入库替代过去时段入流作为水文状态变量,建立了随机动态规划模型,以尼罗河流域阿斯旺水库为例验证了该模型的性能。随机动态规划法在应用于求解随机优化模型时存在如下缺陷:①受限于无后效性要求,只能采用零阶或一阶马尔科夫过程描述径流序列,无法考虑径流序列的多时段相关性;②计算规模随库群数目增加而激增,存在维数灾问题。

采用一阶马尔科夫过程描述长期径流时常难以满足实际调度需求。比如,受地下水退水影响,枯季旬径流往往与前若干旬的径流形势相关。针对这一问题,Turgeon 提出了采用多阶自回归滑动平均模型(Auto Regressive Moving Average, ARMA)描述径流序列,并用径流标量代替径流矢量作为状态变量。该模型考虑了径流多阶相关性,但径流矢量标量化过程将难以避免造成精度损失,而且标量化过程推导复杂,模型难以推广。Kelman 等提出了直接利用实际观测样本作为径流模式的采样随机动态规划法(Sampling Stochastic Dynamic Programming, SSDP)。该法从观测径流序列中随机采集完整径流序列,直接考虑了径流序列的时间和空间相关