



周建中 | 张勇传 | 陈璐

著



水电能源优化的若干问题研究

上海科学技术出版社

Shanghai Scientific & Technical Publishers



周建中 | 张勇传 | 陈 璐

著

水电能源优化的若干问题研究

上海科学技术出版社

Shanghai Scientific & Technical Publishers

图书在版编目(CIP)数据

水电能源优化的若干问题研究 / 周建中, 张勇传,
陈璐著. —上海: 上海科学技术出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5478-2922-6

I. ①水… II. ①周… ②张… ③陈… III. ①水利水电工程—最佳化—研究 IV. ①TV

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 289992 号

水电能源优化的若干问题研究

周建中 张勇传 陈璐 著

本书出版由上海科技专著出版资金资助

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行
200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 13.25 插页 4

字数 260 千字

2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-2922-6 / TK·16

定价: 78.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内容提要

本书系统地对水电能源优化运行中的若干问题进行了研究和总结,在论述水文预报、水文模拟及梯级水电站联合优化运行理论与方法的基础上,对电力市场条件下电价确定、水电站发电日计划编制,以及多业主背景下梯级水电站间合作调度等多个优化与决策问题进行了详细理论分析和探讨,并提出了相应的工程应用解决方案。

本书共分为 9 章,汇集了作者在水文预报、水电站优化运行、电力市场等方面的研究成果,并附有丰富的算例。内容简明扼要,理论与实践紧密结合,方法与技术融为一体,极大地丰富和拓展了水电能源复杂系统预报、调度和电力市场理论的内涵和外延。

本书系作者 10 多年来围绕水文预报、水库优化调度和电力市场运营等研究工作的总结,可为相关研究方向的研究人员和工程技术人员提供借鉴和参考,也可作为相关专业研究生掌握基础理论和培养创新能力的读本。

序

水电能源的综合开发与利用是国际学术前沿和我国可持续发展的重要战略方向,关系到经济、社会及生态环境可持续发展等诸多方面。水资源匮乏与供需矛盾、能源短缺与环境恶化,以及水电能源可持续发展问题已经成为影响国家水资源和能源安全、制约国民经济发展和科技竞争力的重大问题。

受人类活动和全球气候变化的影响,近年来极端水文事件频繁发生,对径流预报的预见期和精度研究提出了新的挑战。水文系统不仅是一个开放、复杂的巨系统,同时又是一个非线性系统。水文预报从经验公式、集总模型到现阶段的分布式模型,从定性研究到定量预测,已取得较为丰硕的研究成果,但仍有很多问题还在探究中。通常水文模型的大部分参数不能通过观测直接确定,且这些参数对水文模型的模拟精度有着极其重要的影响,因此参数估计是水文模型建模应用中的一个亟待解决的关键科学问题。水文预报不可避免地存在误差,如何对预报误差进行校正,从而有效地提高预报精度,也是一项值得深入研究的工作。此外,水文预报的不确定性也给流域梯级水电站群联合调度带来巨大挑战,如何定量分析预报不确定性,已成为水电站群联合调度风险分析中的关键问题。

随着长江流域巨型水电站群的相继建设投运,大规模水电系统联合运行的条件日趋成熟。对于单个电站和梯级水电系统,采取线性规划、动态规划、系统分解协调等数学规划方法,可以获得联合优化调度问题的最优解。然而,随着电站数量的不断增加,其联合调度问题的求解难度呈指数增长,存在严重的“维数灾”问题。受自然界中生物进化和鸟类觅食等自然现象的启发,一些学者提出了遗传算法、粒子群算法和引力搜索算法等人工智能优化方法,其启发式、演进和随机搜索的策略能够有效地避讳“维数灾”问题。

此外,流域水电站群建成投入运行后,各电站业主从效益最大角度出发,按照对自身最有利的方式控制电站运行,从而形成了电站业主间各自为政的局面。由于流域梯级电站间存在着紧密的水力、电力联系,不同电站间既相互影响又相互制约,各调度业主自身

效益最大的运行方式往往不利于整体效益的充分发挥。从水资源综合利用和总效益最大化的角度,需要流域各电站业主相互协调、精诚合作,放弃原自身效益最优的运行方式,转而采取流域整体效益最大的运行策略。由于电站的地理位置、装机容量和调节能力存在较大差别,各电站在合作调度中发挥的作用和承担的风险大相径庭,导致不同调度业主的合作意愿和效益期望存在冲突,亟待进行考虑效益补偿的流域多业主联合调度理论和效益分配方式的研究。

该书是作者 10 多年来围绕水文预报、水库群联合调度和电力市场运营等研究工作的总结,不仅全面系统地介绍了作者在该领域的理论研究和实践探索,而且反映了当前水库调度方向研究动态,以及作者在该领域独到的见解和取得的研究成果,极大地丰富和拓展了水电能源复杂系统预报、调度和电力市场理论的内涵和外延。此外,该书不仅进行了严谨的理论推导和证明,而且以长江三峡水库和金沙江下游梯级为研究对象进行了丰富的实例研究,是一本理论与实践相结合的著作。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely the author's name.

前言

随着我国水电能源的大规模迅速发展,在长江流域、黄河流域、珠江流域、辽河流域,以及黑龙江流域等 13 个流域,众多大型水利工程的不断建设完工,形成了规模庞大、结构复杂的流域梯级水库群,标志着我国水电能源开发从建设阶段逐步过渡到优化管理阶段。然而,在水库群一体化优化运行和综合管理起步阶段,尚存在一系列关键问题亟待解决。

问题一:在水电能源优化运行与管理过程中,定量、准确、可靠的水文预报,可为水资源的优化配置、合理开发利用及防洪决策等工作提供重要科学依据。随着大批水利工程的建成和投运,使天然河道水流传播受阻,水文系统严重偏离了自然条件下的演变规律,加之全球气候变化的影响,传统水文模型的预报、预测功能受到极大的限制,给水文预报工作带来了巨大的挑战。因此,迫切需要研究准确、可信的水文预报模型和校正技术,从而减小外力因素影响,提高预报精度。

问题二:水文系统不仅是一个开放、复杂的巨型系统,同时又是一个非线性系统,由于受众多因素影响,其动力学过程异常复杂。水文预报以水文、气象因子为输入条件,运用了许多概化的水文模型和参数,不可避免地存在不确定性。在水库防洪和发电调度中,上述预报不确定性会直接导致预报偏差,从而影响和降低调度决策的可靠性,或增加水库自身和下游的防洪风险,或造成欠蓄、欠发、出力受阻,危及电网安全。因此,定量地分析水文预报不确定性,揭示其随时间的演化规律,进而探讨预报不确定性对防洪发电调度的影响,已成为预报调度中亟待解决的关键科学问题。

问题三:目前,水文序列的随机模拟主要集中于研究单站的随机模拟技术。然而,随着梯级水库和水库群的建设,不仅需要单站的信息,而且需要流域内各站的综合信息,以便科学地制定水资源开发方案,预测可能产生的风险,实现对水资源的合理开发和可持续利用。因此,迫切需要研究一种新的多站随机模拟方法,用以模拟多站的日径流序列。

问题四:随着流域梯级水电站群规模的逐步扩大,传统的单一水库调度方式已无法满足梯级水电站群调度需求,需要考虑梯级水电站之间的水力、电力耦合关系,建立梯级电站群的联合优化调度模型。梯级水电日优化调度是典型的多阶段决策问题,其优化求

解面临维度高、非线性和约束条件耦合等一系列问题。需研究多阶段最优决策过程优化的平稳性质,分析最优决策的稳定性和最优过程的周期性,探索梯级水电日优化调度中的最优化策略。

问题五: 现有的水电能源优化调度模型所采用的求解算法,普遍存在过早收敛、易陷入局部最优等问题,直接制约了水电能源的经济运行。因此,迫切需要寻求一种更加稳定、高效的全局优化算法,用以避讳制约传统方法所遇到的“维数灾”以及求解速度缓慢的难题,从而提高优化调度模型求解精度和效率,确保有限的水能资源发挥最大的经济、社会效益。

问题六: 随着电力市场的开放,市场所具有的开放性、竞争性、计划性和协调性也逐步融入电力行业,电力市场中国家、电网、发电部门及用电方等不同利益主体的目标各不相同,有些相互竞争甚至相互冲突。为了实现不同目标之间的均衡以及资源的最优化配置,如何运用电价这支杠杆,探索一种规则机制或平衡框架用以合理均衡各目标,从而保证电力市场的正常运转,是市场环境下水电能源高效利用亟待解决的一个关键科学问题。

问题七: 合作对策理论是对策—决策理论中的一个重要概念,合作对策理论意在通过合作以实现集体利益和个体利益的最大化。纳什均衡意义上的传统调度理论在考虑梯级水库群联合调度时忽略了不同业主之间的竞争和动态博弈过程,这导致调度模型的实用性不强或者不能服务工程实践而难以实施。由合作对策理论衍生出的合作调度方法有效地解决了这一难题,从而激励梯级多业主电站追求梯级总体效益最优和缓解防洪发电调度中的突出矛盾。

本书系统地对水电能源优化运行中上述若干问题进行了探讨和总结,不仅充分考虑了水文预报、水文模拟及梯级水电站联合优化运行的理论与方法,且对电力市场中电价确定、水电站发电日计划编制、梯级水电站间合作调度等多个优化问题进行了详细分析和探讨,并提出了相应的解决方案。

本书共分为 9 章:

第 1 章分析水文模型预报的准确性和可信性,提出非线性预测方法、预报误差串并校正技术和水量平衡校正原理,并定性分析河流径流的长期变化趋势。

第 2 章对预报不确定性进行定量分析,并提出了可以描述水文预报不确定性随时间演化规律的 CUE 模型,进而探讨预报不确定性对水库防洪预报调度的影响。

第 3 章基于多变量分析理论,提出了一种新的多站随机模拟技术,进一步丰富了多站日径流随机模拟理论、方法,为进行防洪设计和风险分析奠定了基础。

第 4 章围绕梯级水电日优化多阶段决策问题,推导了最优策略的收敛条件及最优过程的周期,建立周期优化模型和过渡优化模型,结合两个水电站组成的梯级系统,探究流达时间对梯级电站最优决策过程的影响机理。

第 5 章介绍了一类启发、演进、随机搜索的全局优化算法,提出该类算法的改进策略

并对其收敛性进行证明和验证。

第6章从电力市场中不同利益主体的角度出发,在“竞价上网,同网同价”的原则基础上建立反映各利益主体的数学模型,提出电厂以各机组为发电单元参加竞价的策略,确定适用于水电定价的“同网同价”原则及电价确定方法。

第7章系统地介绍对策决策理论与方法,并结合算例阐明非合作对策和合作对策理论。

第8章在对策决策理论的基础上系统阐述了合作调度方法及其应用,包括在电力撮合交易、公共资源使用、水电厂上网电价以及多目标问题等多方面的实际应用,最后探讨了合作调度中的防洪问题。

第9章给出了串并联校正、水量平衡校正以及合作调度的应用实例,表明研究成果已能用于指导工程实践,具有很好的实际应用背景和较高的工程应用价值。

本书相关研究工作得到了国家自然科学基金重点项目“市场条件下流域梯级水电能源联合优化运行和管理的先进理论与方法(51239004)”、“长江上游水库群复杂多维广义耦合系统调度理论与方法(51239004)”,国家自然科学基金面上项目“水电能源及其在电力市场竞争中的混沌演化与双赢策略研究(50579022)”、“水库群运行优化随机动力系统全特性建模的效益—风险均衡调度研究(51579107)”,国家自然科学基金青年项目“水库群复杂防洪系统的设计洪水及风险分析(51309104)”,高等学校博士学科点专项科研基金“电力市场环境下水电能源优化运行的先进理论与方法(20050487062)”、“复杂水火电多维广义耦合系统运行优化与风险决策(20100142110012)”,国家科技支撑计划课题“三峡及长江上游特大型梯级枢纽群联合调度技术(2008BAB29B0806)”,以及水利部公益性行业科研专项“面向生态调度的长江中上游复杂水库群多维调控策略研究(200701008)”等项目的支持资助。此外,本书的出版发行获得了上海科技专著出版资金的资助。

周建中教授拟定全书大纲并负责统稿和定稿工作,由周建中教授、张勇传院士、陈璐博士分工撰写。廖想博士、张睿博士、欧阳硕博士、王学敏博士,博士研究生王超、李纯龙、卢鹏、吴江、叶磊、张海荣、李薇等,硕士研究生王婷婷、卢韦伟等协助周建中教授负责应用实例的计算编写、全书校正和插图绘制工作。书中的一些内容是作者在相关研究领域工作成果的总结,在研究工作中得到了相关单位以及有关专家、同仁的大力支持,同时本书也吸收了国内外专家学者在这一研究领域的最新研究成果,在此一并表示衷心的感谢。

由于水电能源优化运行尚处在摸索阶段,有待进一步发展和完善,许多理论与方法仍在探索之中,加之作者水平有限,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2015年10月

目 录

第 1 章 水文预报模型	001
1.1 水文预报模型简介	003
1.1.1 水文预报模型的数学表达	003
1.1.2 模型参数优选	004
1.1.3 气象径流模型	007
1.2 人工神经网络模型	007
1.3 预报的准确性和可信性	010
1.3.1 准确性	010
1.3.2 可信性	010
1.4 模型比较	012
1.4.1 模型准确性	012
1.4.2 模型结构及参数优选	013
1.4.3 模型的数学检验	014
1.5 非线性 ARMA 模型	015
1.5.1 非线性 ARMA 模型简介	015
1.5.2 模型的适用性	018
1.6 预报误差串并校正	019
1.6.1 串行校正	019
1.6.2 并行校正	021
1.6.3 耦合校正	024
1.6.4 非线性校正	025
1.7 水量平衡校正原理及方法	027
1.7.1 原理	027
1.7.2 方法	027
1.8 径流的长期变化趋势预测	029
1.8.1 勒让德多项式分析研究	029
1.8.2 傅里叶级数分析法	032

1.8.3	线性组合及预报	033
1.8.4	可信程度	033
1.9	小结	034
第2章	水文预报不确定性分析与模拟	035
2.1	水文预报不确定性随时间的演化过程分析	037
2.2	基于 CUE 模型的预报不确定性随机模拟	041
2.2.1	边缘分布的选择	041
2.2.2	联合分布的建立	041
2.2.3	预报不确定性随机模拟	041
2.3	水文预报序列的随机模拟	041
2.4	水库防洪预报调度风险分析计算方法	042
2.5	实例研究	042
2.5.1	三峡水库概况	042
2.5.2	三峡水库水文预报不确定性模拟	042
2.5.3	三峡水库防洪预报调度的风险分析	045
2.6	小结	045
第3章	多站日流量随机模拟	047
3.1	多维 Archimedean Copula 函数的构建	049
3.1.1	多维 Archimedean Copula 函数	049
3.1.2	条件混合法	050
3.2	多站随机模拟	050
3.2.1	多维联合分布函数建立	051
3.2.2	多站随机模拟的步骤	052
3.3	实例研究	053
3.3.1	多维联合分布的建立	053
3.3.2	多站日流量的模拟及检验	054
3.4	方法比较	061
3.5	小结	062
第4章	梯级水电日优化	063
4.1	确定性过程优化的平稳性质	065
4.1.1	多阶段优化模型	065
4.1.2	最优决策和最优状态	066
4.1.3	周期优化和过渡优化	070
4.2	考虑流达时间的梯级水电优化问题	071
4.2.1	问题描述	071

4.2.2	同期优化和过渡优化的计算	072
4.3	小结	074
第5章	全局优化算法	075
5.1	遗传算法	077
5.2	模拟退火算法	079
5.3	粒子群算法	082
5.3.1	基本 PSO 算法	082
5.3.2	PSO 算法的改进算法	083
5.3.3	不同演化算法的比较原则	084
5.4	微粒群模型与 PSO 模型	084
5.4.1	PS 模型与 PSO 模型	084
5.4.2	基本 PSO 模型的简化	085
5.4.3	仿生与 PSO 模型	087
5.5	随机搜索算法(RSA)及其收敛性	087
5.5.1	基本算法	087
5.5.2	分布函数的抽样变换	088
5.5.3	改进随机搜索算法	090
5.5.4	群随机搜索算法	091
5.6	小结	096
第6章	水能电力、市场和资源	097
6.1	问题描述	099
6.2	模型	100
6.3	电价确定	100
6.4	最优解的存在和均衡性质	103
6.5	电厂和发电单元	106
6.6	水电的电价	107
6.6.1	日电价曲线与日计划	108
6.6.2	日计划制定	110
6.7	仿真与调控	111
6.8	需求与电价	111
6.9	小结	112
第7章	对策决策理论与方法	113
7.1	理性与均衡	115
7.2	对抗	115
7.3	模型扩展	118

7.4	非合作对策	123
7.5	合作对策	126
7.6	小结	130
第8章	梯级水库合作调度模型	131
8.1	模型	133
8.2	合作调度	135
8.3	利益再分配	137
8.4	合作调度的实施	138
8.5	合作多赢	139
8.6	多目标问题	139
8.7	其他几个问题	143
8.7.1	电力撮合交易	143
8.7.2	公共资源使用	144
8.7.3	水电厂上网电价	147
8.7.4	多目标问题	149
8.8	合作调度中的防洪问题	154
8.8.1	防洪库容上移	154
8.8.2	样本修正	155
8.8.3	洪水分期及相关	157
8.9	小结	158
第9章	应用实例	159
9.1	预报误差串并校正算例	161
9.1.1	串行校正算例	163
9.1.2	并行校正算例	166
9.1.3	耦合校正算例	167
9.1.4	结论	168
9.2	水量平衡校正算例	168
9.3	合作调度算例	178
9.3.1	两库各自优化	178
9.3.2	梯级联合优化	182
9.3.3	结果比较分析	184
9.4	小结	187
缩略语表		189
索引		191
参考文献		193

第 1 章

水文预报模型

在自然、社会、经济及国防的众多领域,有着各种各样的预报和预测问题。水文预报是指根据前期或现时的水文气象资料,对某一水体、某一地区或某一水文站在未来一定时间内的水文情况作出定性或定量的预测。水文预报从经验公式、集总模型到现阶段的分布式模型,从定性研究到定量预测,已取得较为丰硕的研究成果。开发定量、准确、可信的水文预报模型对充分利用水资源及发挥水利防洪等措施的效益具有重要意义,如何进一步提高水文预报模型的精度,已成为水文研究领域经久不衰的热门问题。此外,随着全球气候变化的加剧,研究及预测气候的长期变化趋势,也是水文学近几年关注的热点问题。

本章围绕水文预报的基本问题,推导了水文预报模型的数学表达,探讨了模型的参数优选方法,详细地介绍了人工神经网络及自回归滑动平均(auto regressive moving average, ARMA)两种非线性预报方法,分析了预报模型的准确性和可信性,并对各预报模型进行比较研究,进而提出了预报误差的串并校正方法。此外,针对全球变暖等热点问题,探究了径流的长期变化趋势。

1.1 水文预报模型简介

1.1.1 水文预报模型的数学表达

一般,预报、预测是多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)的,但它可划分为多个多输入单输出(multiple-input single output, MISO)问题。

对 MISO,令 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 表示输入,令 y 表示输出,假设他们有关系为:

$$y = f(X) + \xi \quad (1-1)$$

式中, $f(X)$ 是未知的; ξ 是白噪声,假定其服从正态分布:

$$\xi \sim N(0, \sigma^2) \quad (1-2)$$

式中, σ^2 也是未知的。

已知 n 组数据,来自实际观测值,将其划分为两部分,分别表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}: (y_i, X_i) (i = 1, 2, \dots, n) \\ \mathbf{A}: (y_i, X_i) (i = 1, 2, \dots, n_a) \\ \mathbf{B}: (y_i, X_i) (i = 1, 2, \dots, n_b) \\ n_a + n_b = n \end{cases} \quad (1-3)$$

式中, $\mathbf{A}$ 称为训练集; $\mathbf{B}$ 称为测试集。

问题如下:

(1) 如何构造一个模型?

含有待定参数 θ (为向量)的模型可表示为 $f(x, \theta)$, 然后使用训练集 $\mathbf{A}$ 中数据来优

选 θ , 通常做法是按下式计算:

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^{n_a} [y_i - f(X_i, \theta)]^2, (y_i, X_i) \in A \quad (1-4)$$

令

$$\begin{cases} f(X, \hat{\theta}) = \bar{f}(X) \\ \bar{r}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_a} [y_i - \bar{f}(X_i)] \\ r_a^2 = \frac{1}{n_a - 1} \sum_{i=1}^{n_a} [y_i - \bar{f}(X_i)]^2 \end{cases} \quad (1-5)$$

式中, $\bar{r}_a$ 称为训练误差均值; r_a^2 称为训练误差方差。

(2) 如何评价所得出的模型?

通常是使用测试集 B 中的数据, 计算出:

$$\begin{cases} y_i - \bar{f}(X_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n_b) \\ \bar{r}_b = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} [y_i - \bar{f}(X_i)] \\ r_b^2 = \frac{1}{n_b - 1} \sum_{i=1}^{n_b} [y_i - \bar{f}(X_i)]^2 \\ (y_i, X_i) \in B \end{cases} \quad (1-6)$$

式中, $\bar{r}_b$ 为测试误差均值; r_b^2 为测试误差方差。

由于好的模型 $\bar{f}(X_i)$ 应和 $f(X_i)$ 充分接近, 而此时训练误差和测试误差都应是 ξ 的抽样, 于是

$$\bar{r}_a = \bar{r}_b = 0 \quad (1-7)$$

$$r_a^2 = r_b^2 (= \sigma^2) \quad (1-8)$$

都是 $\bar{f}(X_i)$ 和 $f(X_i)$ 充分接近的一种反映。当然, 预测的准确和可信是评价预测模型优劣, 从而决定取舍的基本原则。

1.1.2 模型参数优选

本节讨论模型参数的优化算法, 首先讨论模型中只有两个待定参数的情况。

已知 $\{x_i, y_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$, 它由下式产生:

$$y = a^0 x + b^0 x^2 + \xi \quad (1-9)$$

式中, a^0, b^0 为已知, 但作为谜底暂时保密; $\xi \sim (0, \sigma)$ 是均值为零、均方差为 σ 的随机变