

SHUIZHIYUAN XITONG

DUOWEI LINJIE TIAOKONG DE

LILUN YU FANGFA

水资源系统 多维临界调控的 理论与方法

黄强 畅建霞 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

SHUIZIYUAN XITONG
DUOWEI LINJIE TIAOKONG DE
LILUN YU FANGFA

水资源系统 多维临界调控的 理论与方法

黄强 畅建霞 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 简 介

本书全面系统地论述了水资源系统多维临界调控的理论与方法。全书共分 10 章 5 个部分。一是水资源系统的描述方法,二是水资源需求预测的理论与实践,三是水资源系统配置的理论及模型,四是水资源系统多维临界调控的概念、理论方法和模型,五是水资源系统调控的风险分析,并以黄河流域水资源系统为例,进行了实例分析及应用。

本书可供从事水资源系统规划、设计和管理的科技人员学习参考,并可用作大专院校有关专业教师、研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

水资源系统多维临界调控的理论与方法/黄强, 畅建霞著. —北京: 中国水利水电出版社, 2007
ISBN 978-7-5084-4557-1

I. 水… II. ①黄…②畅… III. 水资源—协调控制—研究 IV. TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 050736 号

书 名	水资源系统多维临界调控的理论与方法
作 者	黄强 畅建霞 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 23.75 印张 452 千字
版 次	2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—3800 册
定 价	58.00 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

序 一

水资源是生命之源，亦是基础性的自然资源和战略性的经济资源，更是生态环境的控制要素。随着人口增加，社会、经济的高速发展，人类正面临着水资源短缺与水环境恶化的严峻局面，水资源已成为社会、经济可持续发展的制约因素。我国黄河水资源问题尤为突出，水资源短缺、水灾害加剧、生态环境恶化三大问题日益严重，其中黄河断流是水资源短缺的极端表现，全民堪忧。缓解黄河水资源危机、修复生态、重建“山川秀美”已成为当务之急。为此，国家科技部专门设立了重点基础研究发展规划项目（973）“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”，以研究黄河流域水资源的演化规律，实现黄河水资源的可持续利用。该项目包括三个方面的研究内容，第三部分是关于水资源可再生性维持机理与多维临界调控的应用基础研究，其目的是提出黄河流域水资源优化配置和多维临界调控模式。

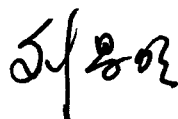
水资源系统是一个涉及政治、经济、社会、生态环境等方面的复杂巨系统，应用系统科学的方法研究水资源问题已越来越受到重视。水资源科学调控是对传统水资源分析方法的创新，是解决水资源可持续利用的有效途径。

西安理工大学以黄强教授为学术带头人的水资源系统工程学术团队长期从事水资源系统研究，推进了水资源系统工程理论发展，是一个充满活力和善于创新的团队。他们在水库优化调度、水资源调配及智能决策支持系统、水资源多维临界调控等方面的研究形成了自己的特色，为国家培养硕士、博士和博士后高层次人才近 100 名。近年来，该团队先后完成了国家、省部级等纵横向科研项目 60 余项，获国家、省部级科技进步奖 10 余项，发表学术论文 400 多

篇，被 SCI、EI 和 ISPT 收录的论文 150 余篇。

《水资源系统多维临界调控的理论与方法》专著凝聚了作者多年来积累的科研成果，较系统地介绍了他们完成的 973 项目创新成果。该书反映了作者在水资源领域多年实践和研究所取得的进展，也体现了他们对水资源学科发展所作出的贡献；同时，对水资源系统的规划、运行、调度和管理具有一定参考价值。

中国科学院院士



2007 年 3 月 1 日

于北京

序 二

水不再是取之不尽、用之不竭的一种自然资源，水资源是有限的和脆弱的。随着水资源危机的加剧和水环境质量的不断恶化，水资源短缺已演变成世界各国倍受关注的资源环境问题之一。长期以来，由于不合理开发利用水资源，对生态环境保护等问题重视不够，我国也正面临着“水多、水少、水脏、水浑”等主要水问题的困扰，水资源可持续利用面临着严峻的挑战。如何对水资源进行合理调控，以水资源的可持续利用来保障流域经济、社会和生态与环境的可持续发展，是摆在我们面前的一个重大课题。

党的十六届三中全会提出了以人为本，全面、协调和可持续发展的科学发展观，国家为此从水资源的开发、利用、治理、配置、节约和保护等几方面确立了可持续的水利发展战略，并且已经取得了显著成效。《水资源系统多维临界调控的理论与方法》一书正是在这样的背景之下，在作者主持和参加了国家级、省部级等多项科学研究课题的基础上，根据多年来所取得的研究成果而编著的。该书的出版，及时向我们提供了水文模拟技术以及信息论、系统论和控制论等新技术、新理论，应用于水资源领域的丰富和宝贵经验以及可操作实施的方法，具有较高的学术意义和重要的应用价值。

《水资源系统多维临界调控的理论与方法》全面地介绍了国内外水资源预测、水资源配置、水库群调度、水资源调控及风险管理的研究和发展状况，以及未来研究发展趋势，对水资源预测、配置、调度及风险管理的数学模型和求解方法做了详细介绍，应用临界控制论、信息论和系统论进行流域水资源调控，并结合黄河实例给予了具体说明。全书内容新颖、充实，层次分明，论述深刻，逻辑性和系统性较强，是一部理论和实践性很强的优秀专著。

可以想象，该书的出版，对水资源调控理论的发展与完善会起到巨大的推动作用，同时，对广大的水资源工作者来说无疑是一本宝贵的参考教材，也将更有力地促进我国水资源学向更高、更新的方向发展。

中国工程院院士

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes.

2007年3月15日

于北京

前 言

水资源是人类生存不可替代的自然资源。从 1972 年联合国第一次人类环境会议发出“水将导致严重的社会危机”的呼吁以来，水资源问题已得到各国政府和相关部门的高度重视，成为科技工作者研究的热点。21 世纪，我国的发展面临着严峻的水资源形势。首先，是水资源供需矛盾突出，中国目前有近 7 亿人得不到安全饮用水，缺水城市达 400 多座，其中严重缺水的约 108 座，每年因缺水造成上千亿元人民币的经济损失，据预测，2010 年全国缺水量将达 1000 亿 m^3 。在缺水的同时，水灾害加剧，1998 年长江等地发生的大洪水，直接经济损失约 2551 亿元。其次，水资源短缺和不合理开发利用还引发了一系列其他的生态环境恶化问题，如草原退化、沙漠面积不断扩展、天然湖泊萎缩、河道断流和淤积、湿地消失、水土流失加剧等。

为此，许多专家学者都进行了深入研究，认为对水资源进行合理调控是解决水问题的有效措施之一，水资源调控的重要性也逐步得到大家的高度共识。所谓“调控”与“以需定供”、“以供定需”以及基于宏观经济的水资源利用方式不同，它需要综合考虑系统内社会—经济—生态复合系统的需求，通过调控社会、经济系统对水资源的需求和生态环境需水，以及社会、经济内部的供水过程和用水过程，以解决它们之间的竞争用水问题，协调社会、经济和生态环境的动态关系，提高水资源的利用效率和分配效率。在第二届世界水资源论坛会上，110 多位部长认为人类水安全面临七大挑战，其中包括“通过可持续管理确保和谐的生态环境”及“以更加明智的方式管理水资源”。可以看出，水资源合理调控的一个鲜明特征是可持续发展，追求经济、社会与资源、环境的协调，即经济发展必须限定在资源和环境的承载能力之内。中国可持续发展水资源战略研究报告提出，我国水资源的总战略必须以水资源的可持续利用来支持经济的可持续发展，建议从防洪减灾、农业用水、城市和工业用水、生态环境建设等 8 个方面实行战略性调控。由此可见开展水资源多维调控的重要性和迫切性。

多年来,我们一直从事水资源系统分析方面的研究工作,先后承担了国家“九五”科技攻关项目“黄河干流非汛期水量调度研究”、国家重点基础研究发展规划973项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”、国家自然科学基金项目“自然—人工二元模式下的河川径流变化规律及合理描述方法研究”和“河川径流演变规律对人类活动和全球变化的响应”、中国电力教育基金项目“水电站厂内经济运行研究”、青海省科技厅项目“黄河干流水电站补偿效益分配方案与实施对策初步研究”等60多项纵横向科研项目,已获国家级奖1项,省部级奖8项。培养45位博士和60多位硕士研究生。本书是在总结上述研究成果的基础上完成的,主要从以下几方面对这些成果进行了总结。

(1) 以往的水资源系统研究中,认为水资源系统是以流域分水岭所组成的区域而形成的自然系统。在这个系统中,社会系统、经济系统和生态环境系统相互交织、容错,越发显得水资源系统庞大而复杂;同时,由于对系统周界的识别及维护、交换作用缺乏足够的认识,增加了对水资源系统研究的复杂性。本书采用界壳理论描述水资源系统,提出了水资源系统界壳的要素和作用,并从水资源保护、开发、利用和优化配置方面分析了水资源界壳理论的应用前景。

(2) 需水量预测是水资源配置与调控的前提,本书针对水资源系统不同性质的预测问题,深入探讨了时间序列法、结构分析法及一些系统工程方法在需水量预测中的原理与应用。

(3) 分析总结了水资源系统配置的原则、指标、理论及模型;对水库调度的理论、方法及模型进行了详细论述,对几种常用的方法如动态规划、逐步优化算法、遗传算法、大系统分解协调等方法进行了介绍;对系统工程新方法,如蚁群优化算法和粒子群优化算法在水库调度中的应用进行了探讨。以发电调度为例,给出了短期和中长期发电优化调度的模型及求解方法,并给出某梯级水库群发电优化调度的计算实例。

(4) 在分析水资源多维临界调控的机理和含义的基础上,将临界控制理论、协同学理论和耗散结构理论等理论结合,考虑可持续发展、和谐、节水、协调(协同)等作用,建立了水资源系统有序度熵、良性循环等诸多概念、模型和算法,提出了水资源多维临界调控的理论与方法。

(5) 依据多维临界调控理论,在传统调控模型的基础上,建立了控制者模型与被控制对象模型相结合的水资源多维临界调控模型。该模型能够充分考虑水资源复合系统的生态、社会和经济子系统之间的协调关

系,以及水资源系统的有序程度和演化趋势,并且能够把管理人员的知识经验融入系统模型,能够把定量计算和定性分析相结合,快速、准确地对方案实施调控。

(6) 从协同和系统演化的观点,应用调控层次、调控措施以及调控理论,提出了水资源多维调控程序。

(7) 针对黄河流域水资源开发利用目标,以及可实施的调控手段和措施,如工农业节水、增加调控工程和西线南水北调等,设置了2010年、2020年、2030年和2050年四个水平年的83个调控方案,在水资源多维临界调控理论的指导下,分别对83个方案进行了调控计算,得出了四个水平年的最佳调控方案。

(8) 介绍了水资源系统调控风险因子的识别和主要风险因子的筛选方法,以及基于概率论和数理统计方法、重现期法、蒙特卡洛模拟法、JC法、灰色系统理论和模糊风险分析法风险计算模型,给出了单目标和多目标风险决策的理论方法,并对2010水平年黄河干流梯级水库电站补偿调节方案进行了实例应用。

本书由黄强、畅建霞统稿编著;第1、第6、第7、第8章由畅建霞编写;第2章由佟春生、黄强编写;第3章由张洪波、黄强编写;第4章由刘涵、畅建霞、陈南祥编写;第5章由畅建霞、刘涵编写;第9章由王煜、黄强编写;第10章由彭少明、黄强编写;第11章由席秋义、黄强编写。

在本书编写过程中,得到了刘昌明、王浩、李佩成院士,以及原黄河水利委员会(总工程师)陈效国先生、黄河水利委员会石春先副主任的指导与关怀;得到张会言、侯传河等教授级高工以及吴泽宁、徐建新、邱林、梅亚东等教授以及蒋晓辉、薛小杰、刘俊萍、王增发、李会安、赵麦换、徐晨光、王义民、赵雪花、夏忠、畅明琦、吴新等博士的帮助;同时,还得到了乔西观、谢小平、李梅、郑振宇、刘晓黎、李群等在读博士的帮助;此外中国水利水电出版社马爱梅副编审也给予了大力支持,使本书得以顺利出版,在此深表谢意。

由于作者水平有限,书中谬误难免,望广大读者给予批评指正。

作 者

2006年11月

于西安

目 录

序一

序二

前言

1 绪论	1
1.1 全球水资源开发利用状况	1
1.1.1 世界水资源概况	1
1.1.2 世界用水情况	2
1.2 中国水资源概况	4
1.3 水资源问题及研究战略	5
1.3.1 全球水资源问题	5
1.3.2 水资源战略	6
1.4 水资源系统多维临界调控的目的和意义	8
1.5 本书概要	9
2 水资源系统的描述方法	10
2.1 水资源系统概述	10
2.1.1 系统的概念	10
2.1.2 水资源系统的概念	11
2.2 界壳论简介	12
2.2.1 界壳论基本概念	12
2.2.2 界壳基本要素	13
2.3 水资源系统的界壳描述	14
2.3.1 水资源系统界壳理论的相关概念	15
2.3.2 水资源系统界壳的临界状态描述	18
2.4 水资源系统界壳理论的初步应用	20
2.4.1 流域水资源管理体制的界壳分析	20
2.4.2 水资源系统—生态系统—社会系统的演化与约束机理分析	26
2.5 水资源系统界壳理论的应用前景	28
2.5.1 水资源系统界壳理论与水资源保护	29

2.5.2 水资源系统界壳理论与水资源开发	29
2.5.3 水资源系统界壳理论与水资源利用	29
2.5.4 水资源系统界壳理论与水资源优化配置	30
参考文献	31
3 水资源需求预测的理论与实践	32
3.1 水资源需求预测的原理	32
3.1.1 水资源需求预测概述	32
3.1.2 水资源需求预测的基本原则	33
3.1.3 水资源需求预测的进展	33
3.1.4 水资源需求预测的影响因素	34
3.1.5 水资源需求预测的步骤	35
3.2 水资源需求预测方法概述	37
3.3 时间序列法	39
3.3.1 时间序列分析	39
3.3.2 趋势外推法 (确定型)	40
3.3.3 移动平均法 (确定型)	43
3.3.4 指数平滑法 (确定型)	45
3.3.5 马尔科夫法 (随机型)	50
3.3.6 博克斯-詹金斯法 (随机型)	53
3.4 结构分析预测法	54
3.4.1 回归分析预测法	54
3.4.2 工业用水弹性系数法	57
3.4.3 指标分析预测法	57
3.5 灰色 GM (1, 1) 预测模型	61
3.5.1 GM (1, 1) 模型的基本原理	61
3.5.2 灰色预测的类型	62
3.5.3 GM (1, 1) 模型的建立方法和步骤	62
3.5.4 模型检验	63
3.5.5 算例	64
3.6 人工神经网络预测方法	66
3.6.1 BP 网络的结构	66
3.6.2 BP 神经网络的计算过程	66
3.6.3 模糊神经网络预测算法	68
3.6.4 BP 遗传预测方法	69
3.6.5 算例分析	71
3.7 统计学习理论预测方法	75

3.7.1	支持向量机理论	75
3.7.2	最小二乘支持向量机	78
3.7.3	改进的最小二乘支持向量机	79
3.7.4	基于混沌优化的最小二乘支持向量机需水预测模型	80
3.8	小波分析预测方法	82
3.8.1	小波分析的发展历史	82
3.8.2	小波分析的基本原理	82
3.8.3	小波分析在需水时间序列组成分析中的应用	85
3.9	系统动力学预测方法	88
3.9.1	概述	88
3.9.2	系统动力学简介	89
3.9.3	系统动力学结构分析及模型建立	90
3.9.4	系统动力学建模软件介绍	91
3.9.5	应用实例	93
3.10	可拓聚类预测方法	96
3.10.1	可拓学理论	96
3.10.2	可拓预测的建模机制	96
3.10.3	实例计算	98
3.11	水资源需求预测方法的分析与对比	101
	参考文献	103
4	水资源合理配置的理论与模型	106
4.1	水资源合理配置的内涵	106
4.1.1	水资源配置的基本概念	106
4.1.2	水资源配置与供需平衡的关系	108
4.2	水资源配置的基本原则、指标和功能	108
4.2.1	水资源配置基本原则	108
4.2.2	水资源配置基本指标	110
4.2.3	水资源配置基本功能	111
4.3	水资源配置的主要任务	111
4.4	水资源配置的国内外研究进展	112
4.4.1	国外水资源配置研究进展	112
4.4.2	国内水资源配置研究进展	114
4.5	水资源配置理论	116
4.5.1	以需定供的水资源配置理论	116
4.5.2	以供定需的水资源配置理论	116
4.5.3	基于宏观经济的水资源配置理论	116

4.5.4	可持续发展的水资源配置理论	117
4.5.5	优化配置目标的度量与识别	117
4.5.6	优化配置中的平衡关系	118
4.6	水资源配置模型	119
4.6.1	水资源配置模型的定义	119
4.6.2	水资源配置模型及特点	119
4.6.3	几种常用的水资源配置模型	124
4.7	地表水与地下水联合运用	127
4.8	水资源优化配置理论研究展望	129
4.8.1	理论的完善与创新	129
4.8.2	水质水量问题	129
4.8.3	水资源优化配置的全局性	130
4.8.4	水务一体化管理	130
4.8.5	其他问题	130
4.9	小结	130
	参考文献	131
5	水库调度的理论与模型	134
5.1	水库调度	134
5.1.1	水库调度分类	134
5.1.2	水库优化调度研究综述	135
5.1.3	水库模拟调度研究综述	139
5.1.4	水库优化调度方法介绍	140
5.1.5	水库优化调度的蚁群算法和粒子群算法	148
5.1.6	水库调度存在的主要问题	157
5.2	以发电为主的水库（群）优化调度研究	158
5.2.1	水库（群）中长期发电优化调度模型	158
5.2.2	水库（群）中长期发电优化调度模型的求解方法	161
5.2.3	水库（群）中长期发电计划的制订	174
5.2.4	水库（群）短期发电优化调度模型	175
5.2.5	水库（群）短期发电优化调度模型的求解方法	181
5.2.6	水库（群）短期发电计划的制订	187
5.2.7	实例应用	187
5.3	小结	200
	参考文献	200
6	水资源多维临界调控的理论体系及概念模型	203
6.1	水资源多维临界调控的含义	203

6.2	水资源多维临界调控的临界控制论	204
6.2.1	临界控制论	204
6.2.2	流域水资源多维临界调控相关问题研究	204
6.3	水资源多维临界调控的有序原理	206
6.3.1	熵理论	206
6.3.2	两种有序结构	207
6.3.3	新的有序原理	208
6.3.4	水资源系统的耗散特性	209
6.4	水资源多维临界调控的协同特性	211
6.4.1	协同学概述	211
6.4.2	序参量作用	213
6.4.3	水资源子系统之间的竞争与协同关系	213
6.4.4	调控的协同特性	214
6.5	流域水资源多维临界调控的控制论概念模型框架	215
6.5.1	控制论模型的提出	215
6.5.2	多维临界调控的控制论模型框架	215
6.6	流域水资源多维临界调控过程	217
6.6.1	定义及解释	217
6.6.2	多维临界调控过程	218
6.7	小结	218
	参考文献	219
7	黄河流域概况及多维临界调控基本资料	220
7.1	黄河水资源开发利用概况	220
7.1.1	流域水资源概况	220
7.1.2	水资源利用存在的问题	221
7.2	黄河水资源研究综述	223
7.3	黄河流域水资源调控基本资料	224
7.3.1	水库电站概况	224
7.3.2	水资源分配现状	226
7.3.3	损失水量	227
7.3.4	各库月末最高水位	228
7.4	黄河流域水资源多维临界调控研究的目的和内容	228
	参考文献	230
8	黄河流域水资源多维临界调控模型	231
8.1	黄河流域水资源调控对象仿真模型	231
8.1.1	流域概化及节点描述	231

8.1.2	模型变量说明	232
8.1.3	多维临界调控目标	234
8.1.4	约束条件	236
8.2	仿真模型的求解	237
8.2.1	模型求解原则	237
8.2.2	模型求解步骤	238
8.3	黄河流域水资源多维临界调控控制者模型的构建	241
8.3.1	知识获取	241
8.3.2	知识库	242
8.3.3	知识库中序参量的确定	242
8.3.4	知识库中临界阈值的确定	246
8.3.5	临界调控专家系统的推理机	248
8.4	黄河流域水资源多维临界调控程序	255
8.5	小结	257
	参考文献	258
9	黄河流域水资源多维临界调控手段及方案	260
9.1	黄河流域水资源多维临界调控手段体系结构	260
9.2	黄河流域水资源多维临界调控手段	262
9.2.1	水资源开发利用调控手段	262
9.2.2	黄河流域防洪防凌调控手段	269
9.2.3	生态与环境调控手段	273
9.3	黄河流域不同规划水平年调控方案	276
9.3.1	初始方案与平衡方案界定	276
9.3.2	调控手段变量因素分析	276
9.3.3	基于多维调控手段集成的调控方案拟订原则	278
9.3.4	调控方案集	279
9.4	小结	283
10	黄河流域水资源多维临界调控成果	284
10.1	近期(2010水平年)方案调控成果及分析	284
10.1.1	初始方案调控成果	284
10.1.2	近期(2010年)方案集调控成果及分析	286
10.2	中期(2020年)方案调控成果及分析	290
10.3	远期(2030年)方案调控结果及分析	294
10.4	远景(2050年)方案调控结果及分析	298
10.5	调控结论	301
10.6	小结	302

11 水资源调控的风险分析	303
11.1 引言.....	303
11.2 水资源系统风险概述.....	304
11.2.1 国内外研究概述	304
11.2.2 水资源系统风险评估概述	306
11.3 风险识别.....	307
11.3.1 风险因素识别	307
11.3.2 主要风险因素筛选	308
11.4 风险估计.....	314
11.4.1 风险指标	314
11.4.2 风险计算方法	316
11.5 风险决策.....	325
11.5.1 单目标风险决策	325
11.5.2 多目标风险决策	327
11.5.3 可接受风险准则	333
11.6 风险控制.....	334
11.6.1 风险控制概述	334
11.6.2 水资源调控风险控制	334
11.7 实例应用.....	335
11.7.1 界壳的泛系观控模型应用	335
11.7.2 水资源调控风险分析应用	339
11.8 小结.....	347
参考文献.....	347
附表	349
附表 1 乌江梯级水电站发电计划制订结果表 (I)	349
附表 2 乌江梯级水电站发电计划制订结果表 (II)	351
附表 3 乌江梯级水电站发电计划制订结果表 (III)	353
附表 4 乌江梯级水电站发电计划制订结果表 (IV)	355
附表 5 乌江梯级水电站日调度计划 (I)	357
附表 6 乌江梯级水电站日调度计划 (II)	358
附表 7 乌江梯级水电站日调度计划 (III)	359