

CHANGJULI DIAOSHUI GONGCHENG
QUDAO SHUSHUI KONGZHI JI SHUXUE MOXING
YUANLI YINGYONG FANGZHEN

长距离调水工程 渠道输水控制及数学模型

原理—应用—仿真

韩延成 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

长距离调水工程 渠道输水控制及数学模型

原理—应用—仿真

韩延成 著



中国水利水电出版社

内 容 提 要

渠道输水控制需要通过特定的输水控制模型来实现给沿线及下游末端用水户配水,输水控制模型是保证输水、配水的关键,在调度运行过程中处于中心地位。本书作者根据近年来在长距离调水工程输水控制方面的研究成果、调度运行系统开发项目内容编写,包括8章,讲述了以输水成本最小为目标的大型明渠输水控制模型,二步法最优控制模型及应用,自动控制数字仿真模拟系统开发及应用等。

本书可供调水工程设计及渠道输水运行、管理等部门的工作人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

长距离调水工程渠道输水控制及数学模型:原理—应用—仿真 / 韩延成著. — 北京:中国水利水电出版社, 2010.10

ISBN 978-7-5084-8014-5

I. ①长… II. ①韩… III. ①引水—水利工程—渠道流动—控制系统②引水—水利工程—渠道流动—数学模型 IV. ①TV68

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第209496号

书 名	长距离调水工程渠道输水控制及数学模型 原理—应用—仿真
作 者	韩延成 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 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	140mm×203mm 32开本 7.25印张 195千字
版 次	2010年10月第1版 2010年10月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	20.00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

PREFACE

渠道输水控制需要通过特定的输水控制模型来实现给沿线及下游末端用水户配水，输水控制模型是保证输水、配水的关键，在调度运行过程中处于中心地位。而长距离调水工程由于渠线长，控制建筑物多，加上冰期输水、与当地水源联合调度等要求，输水控制过程实际是一个非常复杂的系统工程。国外对渠道输水控制模型的研究较早，应用也较早，而我国在这方面起步较晚。虽然我国已建成运行的长距离调水工程不少，但到目前为止，真正应用渠道输水自动控制系统的很少，主要是重建设、轻管理，在规划、设计时对运行管理重视不够。

关于渠道输水自动控制模型方面的理论及应用，国内外已有大量论文发表，作者多年来一直在长距离调水工程一线进行输水调度工作。本书是根据作者近年来在长距离调水工程输水控制方面的研究成果和调度运行系统开发项目内容等编写而成的。

渠道输水过程的非恒定流模拟，在实际长距离调水工程调度运行中有重要应用价值，可用来实时预测水

位、流量的变化，对输水控制模型得到的结果进行模拟或用于渠道输水控制模型的仿真研究。作者在引黄济青工程调水期间，边调水，边编写程序，于 2001 年完成了引黄济青工程调度运行仿真模拟系统，采用隐式差分格式和特征线法，互相校核了程序的正确性。2002 年后在引黄济青工程调度运行仿真模拟系统的基础上，对功能进行了完善和扩充，使其成为可以计算河网、渠网的广义渠道输水仿真模拟系统。系统内置 10 余种常见的输水控制模型，留有自定义输水控制模型接口，使用者可根据需要编写自己的输水控制模型。

本书共分为 8 章，第 1 章为绪论，主要介绍研究的背景意义和基本概念、控制方法；第 2 章以输水成本最小为目标的大型明渠输水控制模型，主要论述了针对用梯级泵站扬水的长距离调水工程，构建基于电网峰荷期与基荷期不同电价及优化原理的最优输水控制模型的方法及应用；第 3 章为同步调节的长距离自流型渠道输水模型研究，论述针对自流型渠道建立的同步调节闸门的二步法最优控制模型及应用，其优点是可以最快的速度使渠道水位达到目标水位，以满足下游需水的要求；第 4 章基于人工神经网络的非线性自适应渠道输水控制模型，将神经网络与 PID 结合，在常规 PID 控制的基础之上，利用神经网络的自适应能力，使渠道输水控制过程自动调整系统的控制参数；第 5 章为实时参数模糊自适应渠道输水控制器及应用；第 6 章介绍了渠道输水非线性 PID 控制方法；第 7 章是关于冰期大型长距离渠道输水及控制模型，主要内容包括冰期输水危害、冰期输水

的方法、冰期输水的特点、冰盖形成及消融机理、冰期输水控制方法等；第8章为长距离调水工程渠道输水调度运行及自动控制数字仿真模拟系统开发；第9章为长距离调水工程水质分析与预测。

本书可作为调水工程设计及渠道输水运行、管理等部门的工作人员学习和参考。由于作者水平有限，错误和不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2010年8月

于泉城济南

目录

CONTENTS

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 渠道输水控制数学模型研究现状	5
1.3 渠道输水自动控制的基本概念	9
1.4 渠道输水过程中的约束条件	15
1.5 闸门及泵站的调节方法	18
1.6 常用渠道输水控制模型	20
1.7 控制蓄量法	25
第2章 以输水成本最小为目标的大型明渠输水控制模型	29
2.1 带梯级泵站的长距离调水工程最优控制数学模型	30
2.2 以输水成本最小为目标的最优控制数学模型	32
2.3 约束条件	34
2.4 基本控制过程	37
2.5 数学模型求解	37
2.6 模型应用	37
2.7 闸门开度的反算	43
2.8 本章小结	44
第3章 同步调节的长距离自流型渠道输水模型研究	45
3.1 长距离自流型渠道输水控制运行的特点	45
3.2 自流型渠道输水的二步法模型	46

3.3	二步法模型应用·····	50
3.4	二步法的优点·····	52
3.5	需水型渠道输水控制·····	53
3.6	目标函数·····	57
3.7	约束条件·····	57
3.8	应用算例·····	58
3.9	以单日或多日为周期的需水型输水控制模型·····	60
第4章	基于人工神经网络的非线性自适应渠道输水控制模型 ·····	62
4.1	渠道输水就地 PID 控制·····	63
4.2	神经网络 PID 控制器·····	64
4.3	基于 RBF 神经网络的下游常水位自适应渠道输水控制研究·····	66
4.4	特性指标·····	70
4.5	输水 PID 控制过程的水力学模拟·····	70
4.6	RBF 神经网络模型应用·····	71
4.7	基于 CMAC 神经网络的自适应渠道输水自动控制研究·····	79
第5章	实时参数模糊自适应渠道输水控制器及应用 ·····	92
5.1	参数模糊自整定的渠道输水 PID 控制·····	92
5.2	模糊自适应 PID 控制构造·····	93
5.3	明渠输水的实时模糊自整定控制过程及仿真·····	97
5.4	模型应用·····	98
5.5	本章小结·····	105
第6章	渠道输水非线性 PID 控制方法 ·····	106
6.1	问题的提出·····	106
6.2	渠道输水非线性 PID 控制·····	106
6.3	渠道输水非线性 PID 控制过程的非恒定流模拟·····	113
6.4	模型应用·····	114
6.5	几种非线性控制渠道输水控制方法对比·····	119

6.6	本章小结	121
第7章	冰期大型长距离渠道输水及控制模型	123
7.1	冰期输水危害	123
7.2	冰期输水特点	123
7.3	冰盖形成及消融机理	124
7.4	初始冰盖的形成及控制	126
7.5	冰盖期及融冰期	128
7.6	冰期输水就地自动控制	131
7.7	冰期集中输水控制模型	139
7.8	本章小结	146
第8章	长距离调水工程渠道输水调度运行及自动控制数字 仿真模拟系统开发	147
8.1	系统结构及总体设计	147
8.2	系统的功能、特点及使用	148
8.3	非恒定流偏微分方程及求解	150
8.4	圣维南方程组的特征线方程和特征方程	151
8.5	隐格式法求解法	154
8.6	外边界及内边界求解	158
8.7	明满交替流的非恒定流计算	171
8.8	渠道输水自动控制仿真模拟子系统设计	174
8.9	系统使用	175
8.10	输水自动控制过程模拟系统	185
8.11	输水控制智能决策支持功能	189
8.12	长距离明渠输水工程输水事故情况下的控制及仿真 模拟	189
第9章	长距离调水工程水质分析与预测	208
9.1	基本控制方程和求解方法	208
9.2	明渠一维水质分析模型	209
9.3	水质模拟及预测	210
	参考文献	215

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 渠道输水控制技术

据不完全统计,全球已建、再建或拟建的大型跨流域调水工程有 160 多项。如美国加州调水工程,在加州干旱河谷地区发展灌溉面积 2000 多万亩 ($1 \text{ 亩} = 6.6667 \times 10^2 \text{ m}^2$),使加州发展成为美国人口最多、灌溉面积最大、粮食产量最高的一个州。美国其他的调水工程如中央河谷、科罗拉多水道和洛杉矶水道等调水工程对美国的经济发展作出了巨大的贡献。前苏联已建的大型调水工程达 15 项之多,年调水量达 480 多亿 m^3 。澳大利亚为解决内陆的干旱缺水,在 1949~1975 年期间修建了雪山调水工程,通过大坝水库和山涧隧道网,从雪山山脉的东坡建库蓄水,将东坡斯诺伊河的一部分多余水量引向西坡的需水地区,沿途利用落差发电供应首都堪培拉及墨尔本、悉尼等城市。

1949 年中华人民共和国成立后,为解决水资源分配不均及城市供水问题,我国相继建设了许多长距离调水工程,在江苏修建了江都江水北调工程,广东修建了东深引水工程,天津修建了引滦工程,山东修建了引黄济青工程,甘肃修建了引大入秦工程,新疆修建了引额济克工程等。这些工程都成为当地农业、工业、城市和人民生活的命脉。对长距离调水工程,调度运行是调水工程的最重要的内容之一,特别是对大型长距离调水工程,任何调度运行的失误都可能造成严重的后果,轻则引起渠道的水位骤降、骤升,造成渠道衬砌破坏、渠堤滑坡;重则可能漫堤、毁闸、淹泵。长距离调水工程特点是距离长、控制站点多、分布广,要求实行不间断供水,调度和控制十分复杂。其难点在于:

(1) 渠线长,控制建筑物多。对长距离调水工程,如要将整

个渠道的水流从一种状态调节到另一种状态，并保持稳定，将十分困难。而实际调度还要考虑紧急停水（如事故停电、停机及其他事故），上、下游或中间流量的突然增大或减少等因素，这就需要研究响应快，反应灵敏的控制方法。例如南水北调中线工程，主干渠上有节制闸、分水闸和退水闸等控制性建筑物共计200多座，相邻的两个控制站距离有的只有几公里，有的几十公里不等。如果没有节制闸的控制，水流以自然状态从丹江口流到北京需要10多天时间。

(2) 明渠输水为无压自流形式，如果输水干渠上没有任何调蓄水库，输水控制过程的可调节能力较差，控制难度也就更大。

(3) 一般长距离调水工程沿线水量分配不均，而且与当地水源联合调度，互相补充，各闸门的需水量也是变化的。如果用传统的从上游到下游逐级调控闸门的控制方法，很难及时满足下游用水户的需水变化。因此，对长距离输水工程，研究新的、高效的全线同时控制闸门的输水技术及仿真模拟系统是非常必要的。

对引黄济青、胶东调水、万家寨引黄等带有梯级泵站的长距离调水工程，泵站提水成本是最重要的运行成本之一。研究在正常渠道输水条件约束下（水位下降速度、最高水位、最低水位、过流能力等约束），通过更科学的输水控制模型，既满足供水的需求，又降低运行成本的输水控制技术是非常必要的。

另外，渠道输水自动化，也是提高输水效率，减小水资源浪费的有效措施之一。常规的灌区渠道控制的方法是“串联”式的按顺序从上游到下游逐级调节闸门，即下游预先提出一个需水量，管理部门开始从上游到下游逐级控制闸门或泵站，将水从上游输送到下游。但这种输水方法往往不能很好地满足灌区需水的要求。如下游由于降雨或其他原因需水量突然减小时，不得不将长距离调到灌区的水弃掉。相反，当干旱等原因下游需水量忽然增加时，流量又得不到满足。较理想的方法是，利用需水型控制方法进行渠道调度，即对下游任意需水量的变化，利用同时调节闸门的方法，使下游及沿线需水得到及时的满足。随着水资源紧

缺与供需矛盾的日益明显, 节约水资源、提高水资源的利用率已成为实现水资源可持续利用的关键。因此, 以自动监测、控制自动化为标志的渠道输水自动化建设迅猛发展, 以期提高灌区输水效率, 降低运行成本, 更好地满足灌区需水的要求。

一般集中控制投资大, 对设备、自动化程度的要求高, 而一些长距离调水工程由于投资问题不能实现集中控制, 需要用就地控制方法进行控制。也有一些长距离输水渠道需要就地控制作为集中控制的补充。而渠道输水控制过程具有实时、非线性、滞后性和复杂性的特点, 应用传统 PID 类控制 (proportional+integral+differential control, 如 P+PR、EL-FLO plus reset、PI 渠道输水控制等) 往往达不到理想的效果, 容易出现超调、振荡及响应慢等影响输水系统正常运行的现象, 如果应用现代控制理论, 又需要辨识出控制对象精确的数学模型, 这对复杂渠道输水是很困难的。常规的渠道输水 PID 控制器参数的整定需要大量的模拟或试验确定, 对于存在时滞性、非线性系统更难整定。如果将先进的神经网络控制、模糊智能控制等非线性、自适应控制技术应用到渠道输水控制, 必将提高渠道输水控制的效果。

1.1.2 长距离调水工程渠道输水调度运行及自动控制数字模拟系统

引黄济青是为彻底解决青岛用水而修建的大型跨流域长距离调水工程, 工程自黄河打渔张引水闸引水, 采用明渠输水, 全长 253km。沿线包括宋庄、王樗、亭口、棘洪滩 4 级泵站, 49 座控制站, 其他涵闸、渡槽、分水闸等建筑物 500 多座。渠首引水流量 $38.5\text{m}^3/\text{s}$, 渠末流量 $23\text{m}^3/\text{s}$ 。为防止渠道水位骤降发生堤岸滑坡, 闸门的控制要十分小心, 控制不当水位下降过快, 可能会造成滑坡; 反之则水位如不能及时下降, 则可能造成漫堤或淹没泵站等更大的事故。引黄济青工程的输水时间为 11 月至次年 3 月。由于明渠在冰盖下输水减小了过水断面, 输水能力减小, 需要抬高水位运行, 这时对水位变化幅度的要求更严, 水位下降或上升的速度或幅度过大均可使冰盖破裂, 形成冰塞、冰坝, 造

成漫堤、毁坏建筑物等严重事故。另外，黄河来水量极不稳定，加之引黄济青渠线长，控制难度更大。由于工程距离长，控制站点多，分水口多，加上沿线调蓄能力差，调度和控制十分复杂，以往凭经验进行控制，往往顾此失彼，事故难免发生。因此，对引黄济青这样的长距离输水工程的输水调度进行系统研究是非常必要的。近年，引黄济青开始了自动化控制的建设，其中最复杂、最关键的课题是究竟用何种输水控制方法，最能适应引黄济青工程。因为不同的控制方法其控制效果、投资均不同，一种控制方法可能适应某个工程，但由于输水工程的类型、水源、渠道的调蓄能力、渠段长度等不同，却不一定适用于另一个工程。需要对多种控制方法进行研究，优选一种最适合引黄济青工程的输水控制数学模型。对这些输水控制数学模型进行系统的研究，一是用物理模型进行试验，二是用非恒定流仿真模拟。如果用物理模型试验的方法研究这些控制方法，则一是投资大，据估算，如果要对这些控制模型进行系统的物理模型试验，初步估算，至少需要 200 万元以上的投资。二是不能做全系统控制研究。引黄济青工程渠线 200 多千米，包括 4 级泵站，40 多座节制闸（包括倒虹吸前节制闸），倒虹吸 30 多座，500 多个分水闸、桥、涵、渡槽等建筑物，形式多样，输水特性各异。三是物理模型对深入研究输水控制过程有限。对长距离输水过程，输水流量不同，输水特性也不同，对闸门启动过程等均需要进行研究，物理模型试验不能完成全面的输水控制特性及输水模型的研究。而仿真模拟，投资少，能够深入地研究输水控制过程的特性，也符合当前国际前沿研究的趋势。胶东地区引黄供水工程开通及引江水后，除青岛支线外，还需要考虑到烟台、威海的胶东调水支线，工程沿线水量过程更加变化不均，须与当地水源联合调度，互相补充。引江后，沿线有更多的用水户需要水量，各口门的需水量是变化的。在实际运行中，调度中心需根据各分水口需水量和引黄、引江水量进行动态调节水量，进行水量分配然后通过节制闸控制调度，将各分水口的应分配水量送达各分水口门。这样复杂

的工程,需要一套切实可行的仿真模拟系统,用于辅助调度和对控制模型的研究。但目前没有适合长距离调水工程输水运行及自动控制模拟软件,目前市面上的 MIKE11、HEC-RAS、RiverCAD 等均不能满足要求。

开发专门针对渠道输水方面的仿真模拟系统,在输水运行控制方面的应用非常广泛,可用于调度运行过程模拟(但与自动控制模块不同,一般可与自动控制模块联合应用)、调度运行方案研究、长距离调水工程的规划设计、自动控制系统的研究等。对一些长距离调水工程,只按恒定均匀流或只进行恒定流的分析是远远不够的,特别要考虑将来的实际控制(主要是非恒定流问题)及可能实现自动化控制等,在闸门位置选定、泵站设计、控制渠段长度的选择、优化等方面均需全面考虑,非恒定流的分析 and 模拟是很必要的,否则可能会造成实际控制的困难。

1.2 渠道输水控制数学模型研究现状

就地渠道自动控制方法的研究与应用,在国外开展的较早,而我国在这方面的研究较为滞后。早在 1937 年,第一个上游常水位自动闸门(AMIL)在阿尔及利亚安装使用。应用此类闸门的还有法国的 Septentrionales 渠道,马来西亚的 selangor 工程,美国佛罗里达的 Walt Disney 排水系统等。现在在北非、法国、美国等地仍然可以看到仍在工作的 AMIL 闸门。20 世纪 40 年代,下游常水位控制闸门(AVIS 或 AVIO)安装使用。20 世纪 50 年代,曾有 400 多个同类闸门在法国及阿尔及利亚安装并使用。1952 年,美国垦务局研究开发了一种叫做“小人”(Little Man)的控制方法,被应用到美国加州中央流域工程的 Friant-Kern 渠道(243km, $113\text{m}^3/\text{s}$)^[1,2],及美国哥伦比亚流域工程(385km, $16\sim 144\text{m}^3/\text{s}$),它是一种三位置控制方式(设定位置、操作时间和停机时间),输入量为水位,输出为闸门启闭增量。因其充当了一个成功的职工,因而得名“小人”控制法。在“小人”控制器的基础上发展的 Convin 控制也是基于三位置的控制

方式,但进行了一些改进,应用了 VRT 技术(时间变化技术,即如果水位变化较快,停止的时间将缩短;如果水位变化慢,停止的时间将加大),闸门的运动不再是固定的,而是水位变化率的函数。Convin 控制法被应用于科罗拉多 North Poudre 供水工程、新墨西哥 Juan - Chama 工程^[2]等。此后,比例、积分控制技术研究和应用到渠道输水控制中。1974~1979 年美国垦务局研究小组^[1,3]研究了一种叫“电子水位过滤器补偿+复位”(EL - FLO plus reset)的就地控制算法,是一种下游常水位控制。它是在传统的比例+积分控制中加入过滤水位波动的模块,以消除闸门操作和水位变化之间滞后影响,它包括水位传感器、电子滤波器、比例控制器、复位控制器、闸门开度比较器及闸门操作执行单元等部分。应用的有美国加州 Corning 渠道(34km, 12 个控制闸,平均间隔 2.6km,流量 2.5~14.2m³/s)、加州 Coalinga 渠道等^[1,2]。在 Corning 渠道运行中发现,当流量较小控制效果较好,流量接近设计流量时,性能变差。BIVAL^[2]控制模型是法国 SOGREAH 公司研究的一种需水型就地控制算法,是一种等容积就地自动控制模型,也是一种比例积分控制,只是支枢点设在渠段的中央附近,需要同时测量上、下游水位,应用本方法的有马利共和国 Sahe 等渠道、墨西哥 Cupatitzio - Tepalcatepec 工程等。其他同类控制如 P+PR^[1~4](比例+比例复位)控制算法将积分控制引入渠道控制,用于上游控制模式,应用的有华盛顿 Umattilla^[4]流域工程、亚利桑那 Yuma Desalting 水槽排水渠道等。

随着自动化技术的发展,渠道输水控制技术迅速发展,概括起来主要研究方向有:①针对传统渠道输水控制响应速度慢、超调量大、滞后性的缺点,对一些输水模型进行改进,研究开发新的控制模型;②离散状态空间法被成功引用到渠道输水控制领域;③随着智能控制在工业控制方面成功应用,模糊控制、神经网络控制等不需要精确辨识数理过程的智能控制方法在渠道输水控制领域开始研究;④一些特殊的渠道(如陡渠、缓渠、复杂渠

网)的输水控制被重视和研究。

C. M. Burt^[5]等将传统的比例、积分控制用增量式格式代替,可以尽量减小闸门开度测量和执行误差,更符合工程的实际需要,并对增量式 PI 控制的参数进行了计算。Zimmerman^[4]研究了一种根据控制过程中统计水位变化数据,用趋势预测法进行渠道输水的控制,打破了传统的渠道输水控制的模式。Sogreah PID^[6]控制法在渠道输水 PI 控制的基础上进行了改进,被应用于控制 Kirkuk Adhain 主干渠道控制。针对渠道输水存在滞后的问题,也有学者把 SMITH 预测算法加到渠道输水 PI 控制中(Jean-Lue, Deltour^[8], 1992),以消除输水与闸门控制之间的滞后问题。Burts^[6]针对急需型系统的控制方法进行了研究,简称为 CARD (Canal Automation for Rapid Demand) 控制法。一般渠道输水控制方法是基于单个渠道输水控制的, CICN 控制法 (Clemmens^[22], 1988) 针对复杂渠网系统的输水控制方法进行了研究。Fubo Liu^[23] (1993) 等建立了基于圣维南方程组,用显示差分法求解的多渠段串联输水控制模型。

在渠道优化控制方法方面, Corrigan^[9] (1982) 研究了基于水位的一种次优化方法 (Sub optimal level control) 和基于容积控制法的次优化方法 (Sub-optimal volume control), 但这种优化方法过于复杂和理论化, 目前还没有实际应用的报道。引黄济青工程建成后曾投入过大量资金, 与科研单位对这种控制方法进行研究, 也未获得成功。但 Corrigan 的研究对后来基于状态空间响应的 LQR 法的渠道输水控制方法产生了积极的影响。Balogun^[10] (1985) 等曾深入、系统地研究了基于线型二次规划法 (LQR) 的明渠输水的反馈控制方法, Garcia、Hubbard^[83] (1992)、Sawadogo^[6] (1992) 等完善或发展了 LQR 方法。但基于状态空间响应的 LQR 法相对于传统的比例积分控制法要复杂, 在实际工程中应用相对较少。

大多数就地控制模型是针对单个控制闸的, 根据渠道水力学原理, 一个闸的控制过程对上、下游的水流均有影响, Over-

loop1^[11]研究了多闸联动, 基于离散优化控制方法, 以当前水位和目标水位差值最小为目标建立了复合比例+积分控制模型。

近年, 许多学者对渠道输水的预测控制法 (MPC) 进行了研究^[12], 这种方法不是根据当前水位与目标水位的误差直接进行传统的反馈控制, 而是根据控制变量及误差建立控制准则, 以最小化控制准则建立整个控制模型。它的优点一是不需要深入了解过程的内部机理, 也不需要建立复杂的系统辨识模型; 二是由于是在线反复优化计算, 滚动实施, 对由于水位波动、控制误差、测量误差等引起的不确定性干扰能得到弥补。

随着智能控制的发展, 神经网络、模糊控制及遗传优化等控制势必成为未来渠道输水控制的研究热点。目前一些学者已经开始进行这方面的研究, Omer F. Durdu (2004)^[15]将 HOPFIELD 神经网络应用到渠道输水控制的研究中。王涛、阮新建^[16]等建立了简单的单神经元的渠道输水控制器模型。为了避免复杂的数学模型, Yagi^[17] (1999)、李梅^[18] (2000) 等引进遗传算法进行渠系配水的优化, 该方法是对参数的编码进行操作而非对参数本身, 具有全局优化、鲁棒性强, 对优化函数限制少等特点, 目前已经成功地应用于排水系统和供水系统中, 但在明渠输水控制方面的应用未见报道。模糊控制在工业控制中得到了广泛的应用, 武汉大学的王长德教授撰文指出^[19]: “明渠控制系统, 由于水流的运动规律有非线性、大滞后, 在随机干扰作用下参数易变的特点, 引进模糊控制是非常适宜的, 但目前国内外尚无在水力工程管理上应用模糊控制先例”。学者们也对大型复杂渠道的集中控制方法进行了研究。控制蓄量法是通过控制渠段蓄水量从而控制整个渠道运行的, 应用的有美国加州调水工程、亚利桑那调水工程等^[26]。动态调节法 (Dynamic Regulation) 最初由法国普罗旺斯渠道公司 (Société du Canal de Provence^[2]) 开发, 成功应用于普罗旺斯渠道 (105km 主干明渠 130km 管道, 最大流量 45m³/s)、希腊雅典供水工程等^[2]。Gate Stroke (H. T. Falvey 1979^[74], H. T. Falvey 1987^[66]) 是基于非恒定流数值解的输水