

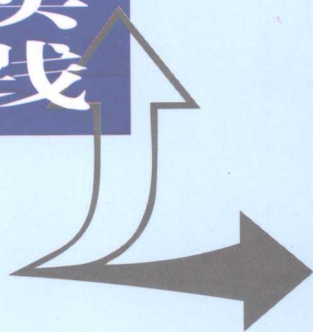
调水工程

渠道系统设计方法与实践

DIAOSHUI GONGCHENG

QUDAO XITONG SHEJI FANGFA YU SHIJIAN

吴泽宇 周凤珍 编著



长江出版社

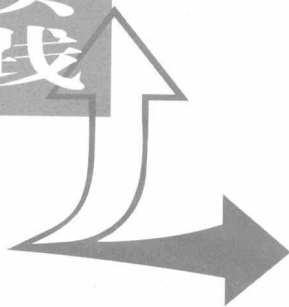
调水工程

渠道系统设计方法与实践

DIAOSHUI GONGCHENG

QUDAO XITONG SHEJI FANGFA YU SHIJIAN

吴泽宇 周凤珍 编著



长江出版社

图书在版编目(CIP)数据

调水工程渠道系统设计方法与实践/吴泽宇,
周凤珍编著. —武汉:长江出版社,2007.11

ISBN 978-7-80708-269-9

I. 调… II. ①吴…②周… III. 引水渠—设计 IV. TV67

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 177847 号

调水工程渠道系统设计方法与实践

吴泽宇 周凤珍 编著

责任编辑:高伟

装帧设计:刘斯佳

出版发行:长江出版社

地 址:武汉市解放大道 1863 号

邮 编:430010

E-mail:cjpub@vip.sina.com

电 话:(027)82927763(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销:各地新华书店

印 刷:通山县九宫印务有限公司

规 格:880mm×1230mm 1/32

7.125 印张 220 千字

版 次:2007 年 11 月第 1 版

2007 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-80708-269-9/TV · 76

定 价:22.00 元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)

前 言

水资源的时空分布不均，导致某些地区水资源严重不足。随着人口的增长、经济社会的发展，以及水污染的加剧，出现了供水危机。为了从根本上解决缺水区的的水资源不足问题，很多国家已兴建或正在筹建大型和特大型的长距离调水工程。我国也是如此，已建大型调水工程有数十座，举世瞩目的南水北调工程也正在建设之中。

通信、监控和自动化控制技术的进步，给调水工程的运行调度赋予了新的活力。在输水调度中引入先进的渠道控制技术，可以极大地提高长距离输水渠道的输水效率，减少中途所需的调蓄容量，从而减少工程投资，更好地为用水户服务。

采用输水控制技术的渠道系统设计与普通的渠道设计有很多不同的地方，如需要增加渠道控制设施、监测监控和通信系统，需要确定适宜的调度控制方式等，使得渠道系统的设计更为复杂。具有渠道自动化控制系统的调水工程，虽然增加了设计的难度和控制设施的投资，但这与节省下来的工程量和工程投资相比是微不足道的，同时还大大地增加了输水调度的灵活性，能够更快地对用水户的用水变化作出响应。

因此，现代化渠道系统应该由渠道及建筑物土建工程、控制设施、测量设施、通信与监控系统以及完整高效的调度方案五个部分组成。本书从长距离输水渠道运行控制与调度的要求出发，对这五个部分的设计方法进行了详细讨论。渠道及建筑物是渠道系统的硬件部分，是输水调度的物质基础；控制设施和测量设施是渠道系统的控制元件和感应设备；通信与监控系统相当于渠道系统的“眼”、“耳”、“手”；调度方案则是渠道系统的灵魂和原则。这五个部分对渠道系统来说缺一不可，是渠道系统设计必须涵盖的内容。本书

第1章为概述,描述了自动化输水调度的目的和要求以及渠道输水控制的发展历史;第2章阐述了渠道运行调度的基本概念以及渠道控制技术的新思路和新理念;第3章论述了渠道土建工程以及运行方式的设计方法;第4章讨论了渠道水流的数值模拟技术,借助该技术可以完善渠道系统的设计;第5章讨论了自动控制理论在渠道水流控制中的应用;第6章介绍了适合渠道系统的各种控制设备和测量设备以及选用这些设备的原则;第7章介绍了渠道的通信与监控系统及其设计方法。第1、2、3、4章由吴泽宇编写,第5、6、7章由周凤珍编写。

具有自动化控制特性的渠道系统设计是一个新型的发展学科,在实践中不断总结和发展起来,现仍处在不断完善之中。

本书作者为长期从事南水北调中线工程设计的技术人员,在南水北调中线工程的规划和设计中,学习国内外的先进经验,不断探索和实践,积累了大量有益的经验。本书谨在将积累的渠道系统设计经验介绍给读者,并与传统的渠道设计方法进行对比和综合,以供长距离调水渠道工程设计人员参考。

希望本书能起到抛砖引玉的作用,在有关专家和技术人员的共同努力下,在实践中不断发展和完善渠道系统设计方法。

编者

2007年10月

目 录

第 1 章 概述	1
1 国内外调水工程概述	1
1.1 国内调水工程	2
1.2 国外调水工程	9
2 输水调度的目的和要求	14
2.1 调水工程的输水系统组成	14
2.2 输水调度的目的	16
2.3 输水调度的要求	18
3 渠道运行控制的发展历史	21
第 2 章 渠道的运行调度	23
1 渠道水力学	23
1.1 恒定流	23
1.2 非恒定流	24
1.3 渠道调蓄容积	26
2 渠道运行控制方式	27
2.1 渠段下游常水位运行方式	28
2.2 渠段上游常水位运行方式	29
2.3 等容量运行方式	30
2.4 控制容量运行方式	31
2.5 控制方式的选择	32

3 节制闸的控制	33
3.1 渠道节制闸	33
3.2 顺序调节方式	34
3.3 同时调节方式	37
3.4 个别闸门调节方式	39
4 调度的约束条件	40
4.1 渠道及建筑物约束	40
4.2 冰期输水约束	45
4.3 调蓄容量限制	46
4.4 退水能力约束	47
4.5 电力约束	47
第3章 渠道系统设计	49
1 渠道的设计过程	49
1.1 运行控制和自动化	49
1.2 设计过程	50
2 工程总布置	51
2.1 受水区	52
2.2 供水要求	52
2.3 地形	53
2.4 调水规模	54
2.5 分水口	54
2.6 渠道水力设计	54
2.7 输水建筑物	54
2.8 控制建筑物	55
3 输水渠道设计	55
4 节制建筑物	59

4.1	节制建筑物的间距	60
4.2	节制建筑物控制设计	63
5	分水口门	64
6	退水口	66
6.1	确定是否需要退水口	66
6.2	选择退水口的类型	67
6.3	退水口的大小	67
6.4	退水口的位置	68
7	渡槽和倒虹吸	68
7.1	渡槽	69
7.2	倒虹吸	70
8	调蓄工程	71
8.1	调蓄工程的作用	71
8.2	调节水库的设计	72
9	抽水泵站	75
10	排洪建筑物	79
11	冰期输水设计	81
11.1	渠道的挟冰能力	82
11.2	冰盖对输水能力的影响	83
11.3	冰期输水渠道设计	85
11.4	冰期输水调度与冰害防治	86
12	运行准则设计	87
12.1	水位波动	87
12.2	退水	88
12.3	电力	88
12.4	泵站运行	89

12.5	响应时间	89
12.6	闸门运行准则	90
12.7	运行准则的风险评估	90
13	输水控制方式设计	91
14	技术经济分析	93
14.1	技术分析	93
14.2	经济分析	97
第4章	数值模拟技术及其应用	99
1	水流基本方程	100
2	数值求解方法	102
2.1	稳定流状态的分析	102
2.2	非稳定流分析	103
3	数值求解方法的应用	111
3.1	应用要求	111
3.2	数值计算程序	112
3.3	应用范围	113
4	应用实例	116
4.1	计算方法	116
4.2	加大流量时的计算结果	116
4.3	设计流量时的计算结果	119
第5章	控制理论及其应用	122
1	控制系统	122
1.1	开环控制与闭环控制	122
1.2	简单反馈系统	123
1.3	复杂渠道控制器	124
1.4	控制系统的基本要求	124

2	控制系统的数学模型与求解	125
2.1	建立数学模型	125
2.2	求解方法	126
3	输入与输出变量	128
4	响应特征	129
4.1	水力学模块	130
4.2	控制器模块	132
5	系统分析与操作特性	138
5.1	系统分析的内容	138
5.2	分析方法	139
5.3	操作特性	139
第6章	设备选择	144
1	控制设备	144
1.1	闸门和闸门控制器	144
1.2	分水泵站	147
1.3	电动机和传动设备	149
1.4	备用动力设备	151
1.5	自动化安全装置	152
2	测量设备	155
2.1	测量要求	155
2.2	水位测量	157
2.3	流量测量	159
2.4	闸门和阀门位置测量	165
2.5	警报	166
2.6	传感器	169
2.7	环境监测	171

2.8 设备房和环境	172
2.9 仪器的选择	173
第7章 通信与监控系统	178
1 通信系统设计	178
1.1 通信系统的作用	178
1.2 通信系统的选择	179
1.3 光缆	181
1.4 高频和甚高频无线电	185
1.5 微波	187
1.6 其他通信系统	189
1.7 通信网络结构	190
1.8 防雷电措施	191
2 监控系统设计	193
2.1 现地控制系统	193
2.2 集中监控系统	193
2.3 集中监控系统实施要求	197
2.4 集中监控系统设计	199
2.5 远程终端单元 (RTU)	203
3 实例	207
3.1 通信系统方案	209
3.2 监控系统方案	214
参考文献	217

第1章 概述

1 国内外调水工程概述

水是人类赖以生存的自然资源之一。有了水才有了人类和其他生物。地球表面积的 74% 被水以液态和固态形式所覆盖。但并不是地球上所有的水都可以叫做水资源。水资源通常指逐年可以得到恢复和更新的淡水量,而大气降水是它的补给来源。所以,通常所说的水资源是指人类可以利用的那一部分淡水资源,即河流、湖泊中的水及逐年可恢复的地下水。

对人类最有实用价值的水,是河川径流和浅层地下水。河川径流是一种动态水资源,全球每年流经河流的淡水资源总量约 41 万亿 m^3 , 仅为地球上水体总量的 $1/30000$ 、陆地上水量的 $1/1000$ 。说明地球上虽然有很多水,但人类能够利用的水资源只是其中的一小部分。

水资源是一种动态资源,它随着时间、空间的变化而变化。水资源的时间、空间分布极不均匀,由于分布不均匀,造成某些地区严重缺水,而另一些地区则受到洪水灾害的威胁。

我国有 45% 的国土处于降水量少于 400mm 的少水地区,黄淮海三大流域径流量仅为全国的 6.6%,而耕地面积却占全国的 40%。我国水资源的年内、年际分布同样很不均匀,降水多集中在汛期,汛期的降水量达到全年的 70% ~ 80%。

由于人口的增长、经济社会的发展以及人们对水量和水质需求的不断增长和提高,使得当前水资源利用中存在着诸多矛盾。随着城镇化的快速推进,不少城市供水紧张,供需矛盾日益突出,严重超采地下水,城镇挤占农业用水;农作物经常受旱,无水灌溉而导致灌区萎缩。城镇生活污水和工业废水对水资源的污染日趋严重,使可利用的水资

源越来越少,加重了局部地区的水资源危机。

解决水资源不足问题的主要措施有科学管理、节约用水、当地水挖潜和跨流域调水。可以将缺水分为三种类型,即工程性缺水、水质性缺水和资源性缺水。工程性缺水地区,说明当地水资源开发仍有潜力,可通过兴建水利工程,改变水资源的时空分布,从而解决当地水资源的供需矛盾。水质性缺水地区,则需要加强污水处理强度,推进污水回用,节约水资源。资源性缺水地区,则需要加大节约用水力度,调整产业布局,优化用水结构,减少生活、工业、农业及环境对水资源的需求。节约用水总是有一定的限度,达到一定的程度后,无法进一步削减需水量。因此,解决资源性缺水的对策是从区外调水,从根本上解决缺水区的水资源不足。

为了支撑经济社会的不断发展,解决地区性的缺水问题,许多国家已兴建或正在筹建大型长距离调水工程。如国内的引黄济青工程、东深供水工程和国外的加利福尼亚州调水工程、亚利桑那调水工程等。

1.1 国内调水工程

我国的水资源量约为 2.7 亿 m^3 ,位居世界第6位。但我国人口众多,以2000年的人口计算,人均水资源量约为 2200 m^3 ,仅为世界人均水资源量的 $1/3$,居世界第121位。水资源时空分布不均,造成南方水多,北方水少,南方水资源量占全国水资源总量的80%,特别是西北和华北地区严重缺水。为了解决水资源与土地、人口、环境、经济不协调的矛盾,我国已建设了一批跨流域调水工程,如东深供水工程、引滦工程、引黄济青工程、京密引水工程、引额济乌工程等。这些工程的供水用途已扩大到工业用水、城乡生活用水和改善生态用水。

1.1.1 东深供水工程

东深供水工程位于广东省东莞市和深圳市境内,是向香港、深圳以及工程沿线东莞城镇提供饮用水源及农业灌溉用水的大型跨流域调水工程。工程从东江引水,沿途经四级泵站提水,送水至深圳水库,

深圳水库放水通过管道输水到香港。输水干道从东江泵站至香港交水点三叉河全长 80km。

东深供水工程自 1965 年建成以来,经三期扩建,解决了香港、深圳及东莞沿线地区的用水需求,为香港的繁荣稳定和深圳市及东莞市沿线地区的经济发展作出了重大贡献。作为东深供水工程输水载体的石马河、沙湾河两岸,20 世纪 80 年代以前当地以农业经济为主,人口密度小,植被和环境质量都较好,供水水质一直保持了较高的水平。可是随着石马河及沙湾河流域经济的快速发展,未经处理的污染物流入供水河道,影响了供水水质。为彻底解决东深供水工程水质污染问题,2000 年开始对东深供水工程进行改造,修建专用输水渠道,将供水系统与石马河分离,实现清污分流。结合改造工程,根据实际和可能扩大对深圳市及东莞市沿线各镇的供水量。2003 年,改造工程建成通水。改造后的设计供水量为 24.23 亿 m^3/a ,其中供香港 11 亿 m^3/a ,供深圳 8.73 亿 m^3/a ,供东莞沿线乡镇 4.0 亿 m^3/a ,供水损失为 0.5 亿 m^3/a 。

东深供水工程采用专用渠道(部分管道)输水,以无压为主,泵站之间没有调节水库,主要靠泵站前池及供水涵(渠)有限的容积适应工况的变化,因此安全问题至关重要。为了确保安全运行,对全线输水系统实行“三控制”。

(1)流量平衡及控制。输水渠道的供水流量由东江太园泵站的开机台数确定。虽然沿线分水口较多,但分水量相对较少,全线基本能分段按等流量的原则控制。

(2)全线输水启动控制。全线输水启动是一个复杂的控制过程。对泵站的出水池进行预充水,充水的过程是各级泵站之间断续运行的一个过程。为了建筑物的安全,泵站前池水位是控制因素。水位偏低,机组不能运行及启动;水位偏高,要加快启动及逐步加大流量,以取得流量平衡,稳定前池水位。

(3)停止输水及事故停机控制。全线输水量是根据用水计划及用户的实际情况确定的。由调度中心控制四级泵站运行,结合终端深

圳水库调蓄能力,进行全线各段的运行调度。当出现事故或停水检修时,在控制方面做到一个泵站出现事故停机时其余各泵站应相应停机,以避免溢流或即使出现溢流也在溢流建筑物、溢流闸设计规模范围内,保证水工建筑物的安全和减少对周边地区的影响。

1.1.2 引滦工程

自滦河流域的潘家口水库引水到天津、唐山两市供水的跨流域调水工程,始建于1978年,1986年完工,年调水量可达19.5亿 m^3 。

引滦工程南、北二线与其相连的潘家口、大黑汀、于桥、邱庄、陡河和尔王庄6座水库,以及其他水闸、泵站、水电站、河网、渠道等构成跨流域开发利用滦河的水资源网络。其中潘家口水利枢纽是引滦工程网络中的主要水源。在大黑汀水库下游电站尾水渠上建分水闸,闸左侧和右侧分别为引滦南、北二线。北线即引滦入(天)津工程,南线即引滦入唐(山)工程,合计总长度为286km。引滦工程的建成,大大改善了天津、唐山供水状况,控制了地面沉降,促进了生产,并间接改善了首都北京的供水情况。从引滦工程运行多年来的实践证明,其经济效益和社会效益是显著的。

引滦入津工程设计流量为 $60\text{m}^3/\text{s}$,校核流量为 $80\text{m}^3/\text{s}$,设计引水量为10亿 m^3/a 。12.4km长隧洞穿越滦河与海河分水岭,输水至于桥水库。经水库反调节,设计下泄流量为 $100\text{m}^3/\text{s}$,然后沿州河和蓟运河,经沿途灌溉及用水后,再经三次提水、一次加压,分两路入天津自来水厂和海河。引滦入津工程全长234km,于1982年5月开工,1983年9月建成通水。

引滦入唐工程设计流量为 $80\text{m}^3/\text{s}$,供给唐山城市的年水量为3亿 m^3 ,其余的6.5亿 m^3 供唐山地区的农业用水。工程以渡槽跨横河,经隧洞埋管穿越滦河及海河分水岭,还利用落差建南观水电站,水流入还乡河注入邱庄水库,经水库反调节后通过隧洞、埋管、明渠等入陡河水库,最后引入唐山市区,全长52km。工程于1978年开工,1985年竣工。

1.1.3 引黄济青工程

引黄济青工程是山东省 20 世纪 80 年代兴建的一项大型的跨流域调水工程,目的是解决青岛市及工程沿线地区水资源供需矛盾。由于城市发展和自然地理条件限制,青岛市供水一直处于紧张状态。20 世纪 60 年代之后,为缓解供水危机,曾兴建过应急工程,耗资巨大,但均未从根本上解决供水问题。经有关单位和专家论证,要彻底解决青岛市的供水问题,必须从水资源较丰富的黄河跨流域调水。1985 年 10 月经国务院同意,国家计委正式批准兴建引黄济青调水工程。1986 年 4 月开工建设,1989 年全线通水。

引黄济青工程自打渔张引黄闸取黄河水,经沉沙池后进入引黄济青输水干渠。干渠经博兴、广饶、寿光、寒亭、昌邑、高密、平度、胶州、即墨 9 个县(市、区),到达终点棘洪滩水库,全长 253km。其中利用原有河道 42km,新开渠道 211km。

渠首引黄流量规模为 $45\text{m}^3/\text{s}$,渠道末端棘洪滩泵站前的设计流量为 $23\text{m}^3/\text{s}$ 。全线设有 4 座泵站,分别是宋庄、王樗、亭口、棘洪滩泵站,均为大流量低扬程泵站,并配有备用机组和小流量副机组。

总干渠两岸地势平坦,渠道纵坡比降为 $1/6000 \sim 1/20000$,设计水深 $2.1 \sim 3.5\text{m}$,梯形渠道底宽 $7.4 \sim 18.9\text{m}$,内边坡坡比为 $1:1.5 \sim 1:2.5$ 。

输水干渠沿途共穿越天然河沟 90 余条,为防止污染均采用立交方式。渠道倒虹吸 34 座,总长 5356m,渡槽 2 座,总长 160m。穿过总干渠的河道倒虹吸 51 座,排水及灌溉渡槽 13 座,铁路桥 2 座,公路桥 28 座,生产桥 165 座。沿线共有水闸 64 座,涵洞 20 座。

输水干渠的末端是棘洪滩水库,该水库与总干渠同期建设,是引黄济青调水工程的配套设施,为一平原水库,总库容 1.45亿 m^3 ,调蓄库容 1.1亿 m^3 ,围坝长 14km,坝高 14m。从棘洪滩水库至青岛市水厂为低压供水系统,长 22km,并配有增压泵站 1 座。

引黄济青工程于 1989 年 11 月 25 日正式通水,因其速度快、质量好、投资省和安全施工受到了国务院和山东省政府的好评。引黄济青工程保证率 95% 年份可增加青岛市供水 30 万 t/d ,一般年份还

可向沿线供水 7500 万 m^3 。近年在棘洪滩水库东南面又修建了 1 座自来水厂,解决了周边城镇的用水问题。

黄河冬春季含沙量小,且水量较稳定,为避免与农业用水产生矛盾,引黄时间为每年的 11 月至次年 3 月。输水时间在冬季,气温低、水流易结冰,渠道易遭冻胀破坏;输水渠沿线土质较差,渗漏严重;输水线路长,泵站多,发生故障的频率高。针对这些特点,引黄济青工程在设计和实际运行中因地制宜、大胆创新、不断改进,取得了巨大的成功。为了适应梯级泵站的运行、便于水量调节、实现蓄水保温和避免事故弃水,采用了控制容量运行方式进行输水调度。

为了保证向青岛市供水和有计划地向沿途送水,沿线统一设置了管理机构。按先远后近沿线供水的原则,编制统一调度计划,严格按计划分配水量。各有关地、市、县,都认真签订和严格履行供水、输水和防止污染的合同。实行科学管理,协调好调水、蓄水、配水、用水等各方面关系,建立现代化通信系统,做到遥测、遥控,实现全线自动化控制。引黄济青工程对青岛市及山东省的经济建设作出了重大贡献。

1.1.4 京密引水工程

京密引水工程将密云水库的水引入北京城区,引水渠全长 102km,始于密云水库的调节池,流经密云、怀柔、顺义、昌平、海淀 5 个县、区,穿怀柔水库,过颐和园团城湖在海淀区罗道庄与永定河引水渠汇合,构成北京市完整的地表水供水系统。怀柔水库以上渠段称为引水渠上段,长 25km,设计流量 $66\text{m}^3/\text{s}$ 。怀柔水库至团城湖渠段称为引水渠下段,长 77km,设计流量 $40\text{m}^3/\text{s}$ 。全渠段共有各种配套建筑物 440 座,其中发电站 5 座、倒虹吸 9 座、节制闸 14 座、泄洪闸 11 座、铁路桥 5 座以及渡槽、分水闸、涵洞等。引水渠上段纵坡比降为 $1/4000$,底宽 8 米;下段纵坡比降为 $1/20000$,底宽 20m。京密引水工程 1961 年开始兴建,1966 年全线通水。当时设计该引水渠是以农业灌溉为主要目的,20 世纪 70 年代后期,由于北京