

Simulation and Control of Transient Flow in
Long-distance Water Transfer System

长距离调水系统的 瞬变流模拟与控制

● 万五一 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

Simulation and Control of Transient
Long-distance Water Transfer

长距离调水系统的 瞬变流模拟与控制

万五一 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

瞬变流模拟与控制是长距离调水工程优化设计和稳定运行的重要环节。本书从调水工程的非恒定流理论出发,结合作者长期以来的相关研究,对自流压力输水工程、加压管路输水工程、海底管路输水工程、有压与无压输水工程等不同形式的输水线路进行了系统的研究。对于不同形式的工程,分别建立了相应的理论模型和边界条件方程,通过数学建模和数值模拟获得不同情况下的瞬变流特性,并提出了控制和减缓瞬变流的流量和压力波动方法。

本书可供水利水电工程、石油管道输送和城市给排水等相关专业的科学研究者、工程设计和工程运行人员作为参考,也可作为相关专业研究生的学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

长距离调水系统的瞬变流模拟与控制 / 万五一著

-- 北京:中国水利水电出版社,2016.9

ISBN 978-7-5170-4739-1

I. ①长… II. ①万… III. ①长距离—调水工程—研究 IV. ①TV68

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第224157号

书 名	长距离调水系统的瞬变流模拟与控制 CHANGJULI DIAOSHUIXITONG DE SHUNBIANLIU MONI YU KONGZHI
作 者	万五一 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.25印张 290千字
版 次	2016年9月第1版 2016年9月第1次印刷
印 数	0001—1000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

前 言

水是人类赖以生存的自然资源。我国是一个干旱、缺水严重的国家，虽然水资源整体占有量大，但是人均占有量少。我国的水资源空间分布不均衡，南多北少，东多西少；时间分布上夏秋多、冬春少。长距离输水工程可以缓解缺水地区的用水压力，优化配置水资源。输水工程具有高效、快捷地调配水资源的能力，可在短时间内较为快速高效地将水资源输送到缺水地区，对于我国水资源的优化利用有着重要意义。在实际的工程应用中，我国相继修建了一些重要的调水工程，这些工程在经济建设和改善居民生活条件中发挥着巨大的作用。

长距离输水的调节操作过程中产生的瞬变水流会使管路的压力和流速产生急剧波动，严重时还可能导致管路的振荡、噪声、空蚀和爆管等有害现象发生，所以调水工程瞬变流的模拟既是水力预测和调节控制的基础，也是优化设计和安全运行的重要前提。研究瞬变水流模拟方法并应用到类似工程，对长距离输水线路的适时适量供水具有重要意义，瞬变流控制在长距离调水工程的优化设计和安全运行中至关重要。本书从调水工程的非恒定流理论出发，对多种类型调水工程的非恒定流边界条件进行了建模和分析，针对不同边界类型的非恒定水流变化过程，从理论和应用方面提出相应的水力模拟和瞬变流的控制措施，为相关的长距离输水管路的设计和运行提供参考，也可作为相关研究人员的参考用书。

本书内容是作者长期以来对调水工程瞬变流模拟与控制方面研究工作的总结和提炼，其中有些内容参考了本人以前的相关研究成果。对同行研究人员相关工作的参考，以参考文献的形式列出，在此深表谢意！本书的研究得到了中国博士后基金（2004036254）、国家自然科学基金青年基金（50709029）和面上项目（51279175）等的资助。此外，本书的成稿与我的恩师天津大学练继建教授和崔广涛教授、清华大学李玉柱教授和江春波教授的悉心培养分不开，同时也得到我指导的研究生们的支持，在此表示感谢！

由于时间仓促，加之作者水平所限，书中难免有疏漏之处，恳请同行专家和读者批评指正，以便再版时更正改进。

作者

2016年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水资源短缺与调水工程	1
1.2 调水工程的建设现状与发展趋势	2
1.3 瞬变流模拟与控制在调水工程中的作用	4
1.4 调水工程瞬变流研究现状及发展趋势	4
第 2 章 瞬变流模拟的基本原理	7
2.1 瞬变流的基本概念及危害	7
2.2 瞬变流的研究方法	8
2.3 瞬变流的基本方程	9
2.3.1 流体运动的基本方程	9
2.3.2 瞬变流基本方程	10
2.4 瞬变流的特征线计算方法	14
2.4.1 水锤特征线求解方法	15
2.4.2 特征线方程组的差分变换	16
2.4.3 离散网格划分	17
2.4.4 瞬变流的基本计算流程	19
2.4.5 特征线方法验证	20
2.5 水锤特征线方程的矩阵形式	21
2.5.1 水锤模型的矩阵形式	21
2.5.2 流速为变量的水锤计算模型	23
第 3 章 调水工程中的边界模型	24
3.1 瞬变流的基本边界类型	24
3.2 状态边界条件的确定	24
3.2.1 上下游水位已知的边界	25
3.2.2 管道下游端为阀门的情况	26
3.3 固定边界求解模型	26
3.3.1 上游恒定取水口边界模型	26
3.3.2 下游恒定水位边界模型	27
3.3.3 调压井边界模型	27

3.3.4 溢流井边界模型	29
3.3.5 分叉管边界模型	31
3.3.6 分水井的边界模型	33
3.4 动态边界模型	36
第4章 自流输水形式的瞬变特性	41
4.1 自流输水的条件及特征	41
4.2 自流输水模式的基本调节方法	41
4.3 自流输水模式的瞬变流特性模拟分析	44
4.3.1 基本概况	44
4.3.2 水锤波速分析	46
4.3.3 模型网格划分	46
4.3.4 关闭控制阀的水力特性研究	48
4.3.5 开启控制阀的瞬变水力特性研究	52
第5章 自流输水形式的瞬变控制方法	57
5.1 通气孔的基本形式及边界模型	57
5.2 通气孔在自流输水工程的水锤防护	60
5.2.1 关闭阀门的水力特性模拟	61
5.2.2 开启阀门的瞬变流特性模拟	63
5.3 溢流调压井在自流输水工程的水锤防护	64
5.3.1 阀前溢流井的基本形式及边界模型	64
5.3.2 发生溢流时的简化边界模型	67
5.3.3 溢流调压井的交替模型	68
5.4 溢流调压井防护特性分析	69
5.4.1 溢流井对关闭阀门的瞬变流影响	69
5.4.2 开启阀门的水力特性模拟	70
5.5 延时调节在自流输水工程中的水锤防护	72
5.5.1 延时调节在关闭阀门中的水力特性研究	73
5.5.2 延时调节在开启阀门中的水力特性研究	74
第6章 加压输水管路的瞬变流模拟	76
6.1 加压输水的基本类型	76
6.2 水泵的运行区域划分和数值全特性曲线	77
6.3 全特性曲线的拟合方法	78
6.4 全特性曲线3区修正	86
6.5 加压水泵边界条件模型	89
6.5.1 加压输水初始状态边界分析	89
6.5.2 水泵停机或失电边界条件模型	90

6.5.3 水泵开机边界模型	92
第7章 高扬程供水管路的水锤特性研究	94
7.1 高扬程供水管路的启动水锤模拟分析	94
7.1.1 单台水泵启动的水锤特性模拟分析	96
7.1.2 两台水泵同时启动的水锤特性模拟分析	97
7.1.3 两台水泵错时启动的水锤特性模拟分析	97
7.1.4 高扬程供水管路的启动水锤特性与优化分析	100
7.2 高扬程供水管路的正常停机水锤模拟分析	102
7.2.1 单台水泵正常停机的水锤特性模拟分析	103
7.2.2 两台水泵同时停机的水锤特性模拟分析	103
7.2.3 多台水泵运行单台水泵停机的水锤特性模拟分析	106
7.2.4 高扬程供水管路的正常停机水锤特性与优化分析	106
7.3 高扬程供水管路的失电水锤模拟分析	109
7.3.1 水泵事故失电时的水锤特性模拟	109
7.3.2 高扬程供水管路的失电水锤防护措施分析	111
第8章 高摩阻供水管路的水锤特性研究	116
8.1 高摩阻加压管路的启动水锤特性模拟	116
8.1.1 单台水泵启动的水锤特性模拟分析	117
8.1.2 两台水泵同时启动时的水锤特性模拟分析	119
8.1.3 两台水泵错时启动的水锤特性模拟分析	119
8.1.4 高摩阻供水管路的启动水锤特性模拟分析	121
8.2 高摩阻供水管路水泵正常停机水锤特性模拟分析	122
8.2.1 单台水泵正常停机的水锤特性模拟分析	122
8.2.2 两台水泵同时停机的水锤特性模拟分析	122
8.2.3 多台水泵运行单台水泵停机的水锤特性模拟分析	125
8.2.4 高摩阻供水管路的正常停机水锤特性与优化分析	126
8.3 高摩阻供水管路的失电水锤模拟分析	128
8.3.1 水泵失电停机的水锤特性模拟	128
8.3.2 高摩阻供水管路的失电水锤特性与优化分析	130
第9章 贮压空气罐在海底管道中的水锤防护特性	133
9.1 海底输水管路的基本特性	133
9.2 集成贮压空气罐水锤防护的基本原理	133
9.3 贮压式空气罐数值模型	135
9.3.1 水泵上游固定空气罐数值模型	135
9.3.2 水泵下游可控空气罐数值模型	136
9.4 空气罐水锤防护的基本响应特性	137

第 10 章 多级加压泵站跨海输水瞬变流模拟应用	140
10.1 输水线路概化模型	140
10.2 输水线路特性参数	141
10.3 控制性建筑物及其特征参数	146
10.3.1 PE 管水锤波速与缓冲罐气体质量	146
10.3.2 缓冲罐气体质量	147
10.3.3 水泵全特性曲线	147
10.3.4 加压泵站的概化模型	147
10.3.5 特征线法网格划分	147
10.4 一级加压泵站水泵开机瞬变过程模拟与分析	148
10.4.1 一级加压泵站水泵开机过程水锤计算	148
10.4.2 一级加压泵站水泵开机优化前后比较分析	150
10.5 一级加压泵站水泵停机瞬变过程模拟与分析	151
10.5.1 一级加压泵站水泵事故停机工况计算结果	151
10.5.2 一级加压泵站水泵事故停机结果分析	151
10.6 二级加压泵站水泵开机瞬变过程模拟与分析	153
10.6.1 二级加压泵站水泵开机过程水锤计算	153
10.6.2 二级水泵开机优化前后比较	155
10.7 二级加压泵站水泵停机瞬变过程模拟与分析	155
10.7.1 二级加压泵站水泵事故停机工况计算结果	155
10.7.2 二级加压泵站水泵事故停机结果分析	157
10.8 结果分析	157
第 11 章 有压与无压结合的输水线路瞬变模拟与分析	158
11.1 有压与无压输水系统的瞬变特性	158
11.2 管渠复合的非恒定流模型	158
11.2.1 明渠非恒定流计算的基本方程	159
11.2.2 明渠非恒定流计算的插值特征线法	159
11.2.3 有压管道特征线方程	161
11.3 管渠结合线路的瞬变流模拟应用	162
11.3.1 模型概化	162
11.3.2 明渠同步启动时消力池壅水过程模拟	162
11.3.3 明渠正常运行时消力池壅水过程模拟	166
11.4 减缓消力池壅水措施和模拟结果分析	168
第 12 章 泵站出口调压池的水锤模拟与安全防护	169
12.1 工程整体布置	169
12.2 水锤计算基本参数	170

12.3 水锤模拟与比较分析.....	171
12.3.1 原方案水锤分析	171
12.3.2 调压井方案水锤计算	174
12.3.3 调节池方案水锤计算	176
12.4 优化分析.....	179
参考文献	180

第1章 绪 论

1.1 水资源短缺与调水工程

地球表面约 $3/4$ 的区域被水覆盖,淡水资源仅占 2.5% ,而这些淡水约有 70% 以冰川形式存在,其他主要以地下水和地表水形式存在。人们常用的地表水只占整个淡水资源的 1.3% ,其余主要以湖泊、河流和沼泽的形式存在。由于地表水的总量有限,而且时空分布不均,因此区域性缺水显著。随着全球人口增长和城市化进程的加快,加之环境污染等因素的影响,一方面,人类对水资源的需求和依赖程度不断增加;另一方面,可用水资源的总量不断减小,缺水地区不断增加,水资源越来越稀缺。目前,世界上约 28 亿人口每年中有 1 个月处于缺水状态,而这些人口中,约有 12 亿人生活在常年缺水的地区。水资源的短缺可分为资源型短缺和经济型短缺。资源型短缺是由于自然原因导致的天然缺水,这种情况常常伴随水资源的过度开发、地下水水位下降等;而经济型短缺是指由于社会发展水平和经济条件限制,而无法修建基础设施和有效利用水资源的情况。全世界范围来看,即使不考虑经济型缺水,资源型缺水的人口数量也已达到了 12 亿之多。

我国幅员辽阔,东西南北跨度大,水资源空间分布不均匀,南方水资源相对丰富,人口和耕地相对较少,北方水资源较少,人口和耕地相对较多,水资源地域分布从东南向西北逐渐递减。雨量的时间分配基本与季节变换相吻合,夏季和秋季降雨量相对较多,而春季和冬季降雨量相对较少。由于空间和时间分布不均,导致我国很多地方缺水形势严峻,此外,城市化进程和经济的快速发展,也加剧了水资源短缺的严峻程度。我国 600 多座大中型城市中,有 300 多座城市面临水资源短缺问题。在我国的水资源利用中,如何保护和高效合理地利用有限的水资源,成为当前面临的重大问题之一。

对于资源型缺水,调水工程是解决区域性缺水的最直接的途径之一,通过将水资源丰富地区的淡水调配到水资源短缺的地区,在重新分配资源的同时,可以优化配置水资源和实现区域经济的平衡发展。有关调水工程的定义并没有统一的标准,从广义上讲,一切通过人工渠道、渡槽、管道和隧洞等改变水资源地域分布的工程都可称为调水工程。

根据调水工程的线路形式、动力水头和调水目的,调水工程可分为多种类型。

(1) 从调水工程的作用来分,可分为航运、灌溉、防洪、供水、发电、改善生态环境等。早期的调水工程主要功能是为航运和灌溉服务。如巴拿马运河、苏伊士运河和京杭大运河等人工水道主要是为航运服务。此后修建的工程更多用于灌溉、发电等,如美国的加利福尼亚州北水南调工程、中央河谷工程、秘鲁的马赫斯调水工程等。随着人口的增加和

经济的发展,近代修建的调水工程主要是用于解决缺水地区的工业和居民生活用水问题,如我国的南水北调工程、引滦入津工程、掌鸠河调水工程等。

(2) 从调水工程的形式来分,通常可分为无压输水和有压输水。无压输水通常采用人工河道、明渠和无压暗渠;有压输水通常采用隧洞、管道等。为灌溉和航运服务的早期的调水工程通常采用人工河道和明渠等无压输水形式,而为满足城市和居民生活用水需求的调水工程则通常采用隧洞和管道等有压输水形式。

(3) 从输水动力来分,通常可分为加压输水和自流输水。加压输水是指通过水泵等加压设施将水体由低处向高处输送,自流输水是指水流在重力作用下,水体由高处向低处输送的形式。

在长距离输水工程中,同一输水工程的输水形式往往多种多样,既包含有压部分,也包括无压部分;既包含加压输水,也包含自流输水。

1.2 调水工程的建设现状与发展趋势

从20世纪30年代开始,一些国家相继修建了许多具有现代意义的长距离调水工程,据不完全统计,目前全世界已建的调水工程有300多项。国外已建大型的调水工程主要集中在20世纪中期,这些调水工程规模宏大、覆盖的地域广,在改善区域生活环境和促进社会经济增长中发挥了巨大作用。其中美国加利福尼亚州调水工程是世界上最大的供水工程之一,该工程于1960年开始兴建,1997年完工,工程包括了21座大坝,由渠道、管道和隧洞组成的1100km输水线路,该工程的多年平均供水量为30亿 m^3 ,约为当地总用水量的60%,为2300万人口提供饮用水。此外,该工程每年还能产出电能65亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。该工程的兴建为加利福尼亚州南部经济、社会发展以及生态环境的改善提供了充足的水源。现已发展灌溉面积133万 hm^2 ,使加利福尼亚州南部成为果树蔬菜等经济作物的生产出口基地,并保证了以洛杉矶为中心的1700万人口的生活和工业用水。同样位于加利福尼亚的中央河谷工程位于该州的中北部,该工程建于1933年,包括20座水库,总库容达到368亿 m^3 ,年输水能力达到209亿 m^3 ,该工程与加利福尼亚州调水工程相连接,可以进行联合调度和资源共享,在供水区的农业灌溉和生态湿地的改善中发挥了巨大作用。此外,美国的大型调水工程还有科罗拉多河水道工程、柯罗拉多-大汤普森工程、特拉华调水工程、中央亚利桑那工程等。国外其他著名的调水工程还包括巴基斯坦西水东调工程、埃及西水东调工程、秘鲁东水西调工程、马赫斯调水工程、澳大利亚雪山调水工程、以色列北水南调工程等。国外调水工程的形式比较多样化,无论是渠道调水还是管道调水都在工程中得到了广泛应用,并且已经修建长距离、大流量的渠道和管道调水工程。

我国修建调水工程的历史悠久,早期的工程主要用于航运和灌溉。这些工程的规模巨大,但主要以开凿河道为主,如举世闻名的京杭大运河是世界上最长的人工河道,运河北到北京,南到杭州,全线长度约为1800km,该运河沟通了海河、黄河、淮河、长江和钱塘江等五大水系,从古至今,在我国运河航运中一直发挥着非常重要的作用。更早修建的邳沟工程同样是为水运和航行服务,成为沟通长江和淮河的水运通道。古代的灵渠工程连

接了湘江和漓江的上游河段,该工程除了简单的航运功能外,还通过堰坝向附近区域提供灌溉供水。此外,举世瞩目的都江堰工程也可以看成是早期的供水工程之一,它通过将岷江的水引入成都平原,在农业灌溉、防洪和航运上都发挥着巨大的作用,虽然经历了漫长的 2000 多年,但该工程依旧神奇地发挥着应有的功能。真正意义上为缓解大中型城市供水矛盾的调水工程的建设起步相对较晚,但发展非常迅速。这些工程通常以城市供水为主,也兼顾生态和农业。如 1966 年建成的京密引水渠,输水线路全长 113km,其主要作用是从密云水库引水到北京城区,为保障北京城区的居民用水做出了重要贡献。1983 年建成的引滦入津工程,输水线路全长 234km,其作用是从河北省滦河大黑汀水库引水到天津市市区,该工程为改善天津市居民的生活用水条件和保障工业生产发挥重大作用,为提高工业经济效益起了很大作用。1989 年建成的引黄济青工程,输水线路全长 290km,其作用是从滨州市境内将黄河水引到青岛市,该工程每年向青岛供水 1 亿多 m^3 ,对满足青岛市的生活用水、工农业生产用水起到了重要作用,在防止海水倒灌和地面沉降等方面意义重大。同时,还部分满足了输水沿线 60 多万居民的生活用水和农业用水。2003 年建成的引黄入晋工程,输水线路全长 450km,其主要作用是从黄河万家寨水库取水,分别引水至太原、大同和朔州三个重要城市,对满足当地居民生活用水、工业生产和环境用水发挥了巨大作用,很大程度上解决了山西省水资源短缺问题。2000 年建成的引额济克工程,输水线路全长 324km,其主要作用是从额尔齐斯河引水至克拉玛依市,该工程对解决新疆北部地区的水资源短缺问题发挥了重要作用,保障了克拉玛依市的石油开发和农业供水,也对当地的经济发展和社会稳定具有重要意义。我国南水北调工程是举世闻名的巨型长距离调水工程,该工程是长江流域综合利用规划的重要组成部分。南水北调工程包括三条路线,工程输水线路总长 4350km。其中南水北调东线工程线路全长约为 1160km,该线路从江苏扬州江都水利枢纽提水,途径江苏、山东、河北、天津,为华北地区和线路沿线提供生产生活用水,该工程已于 2013 年正式通水,对受水地区的工业、航运、城市生活用水和农田灌溉意义重大。南水北调中线工程线路全长约为 1430km,该线路从湖北丹江口水库取水,调水终点为北京团城湖,该线路的供水受益地区包括河南、河北、天津和北京,年调水量为 141.4 亿 m^3 ,主要满足受水区的工业和城市生活用水,同时兼顾农业灌溉和生态环境用水,工程于 2014 年 12 月正式通水。南水北调西线工程总体规划是从长江上游通天河、雅砻江、大渡河引水到黄河上游,以解决黄河上、中游的青海、甘肃、宁夏等省份的水资源短缺问题,计划年引水量 170 亿 m^3 。

从我国调水工程的发展来看,目前调水工程的主要目标是解决缺水地区,特别是大中型城市的水资源短缺问题。调水工程投资大,对水源区和受水区的居民生活、工农业发展、生态环境和经济发展等都具有重大的影响,因此,能否修建调水工程受到多方面的条件限制。如水资源分配和缺水情况分布、工程规模和技术难度、供水区和受水区人口、经济发展水平等。随着我国生活和经济水平的提高,人们对水资源的需求也在不断提高,一方面,随着城市化进程的加快,很多城市天然水资源量无法满足人口和经济发展的需要;另一方面,人类活动对水资源形成了巨大的威胁,城市附近的河流湿地过度开发,水资源污染加剧等更加加剧了城市的水资源短缺。可以预见,随着城市经济水平的不断发展,以及城市自身水资源的短缺,很多城市将去寻求远离污染的水资源。因此,我国的大中型调

水工程,特别是城市供水工程将会逐渐增多。此外,随着我国对沿海岛屿的开发和利用,跨海调水工程也会不断增加。这些工程的主要作用不再是航运和农业灌溉,而是主要集中在解决大中型城市的居民生活用水、工业用水和城市环境用水上。调水工程的形式也会从开敞式的人工渠道调水转向以密闭的隧道和管道调水为主。

1.3 瞬变流模拟与控制在调水工程中的作用

调水工程通常具有线路长、流量大、控制性建筑物多、水流条件复杂的特点。输水系统在流量调节、闸门操控、水泵启闭等情况下,都会形成管路系统中的压力和流量的急剧波动。瞬变流形成的压力和流量波动通常会超过恒定流设计情况下的极限值,因此,可能导致水压力过高,造成爆管、阀门损坏、管道变形、空蚀破坏、负压和脱空、以及明满流交替等现象,严重时导致供水中断和生命财产受到危害。在工程设计和运行中,输水系统的瞬变流问题是工程安全和系统稳定的重大隐患。为了控制和防止输水系统中瞬变流的危害,需要在设计阶段就对系统的瞬变流特性进行研究和分析,并制订相应的防护措施,以防止瞬变流可能导致的危害和风险。

在调水工程中,瞬变流的研究主要包括以下两个阶段。

第一阶段是对可能发生的瞬变流过程进行模拟和预测,即通过数值模拟预测输水系统的闸门、阀门、水泵等控制性建筑物在开启、关闭和调节过程中产生的瞬变流过程,获得不同调节工况下管道的控制点的压力、流量随时间波动的过程,全线的最大、最小压力分布,控制系统的流量和压力随时间变化的特性等。通过瞬变情况下的流量、压力、水位等随时间变化的过程,分析瞬变流可能带来的风险和危害。

第二阶段是对瞬变过程中可能带来的危害的预防和控制。这一阶段的主要任务是选取合适的瞬变流防护设备,如调压井、空气阀、减压阀、空气调压室等,并制订最优的调度和操作方法,控制瞬变过程中的高压、负压和波动幅度,以确保不同瞬变流情况下满足系统的安全。

瞬变流的模拟与控制在调水系统的设计和运行阶段都非常重要。瞬变流模拟和预测可以为设计和运行部门提供重要的水力特征参数,可以有效地避免瞬变流带来的危害,并且通过优化设计和运行来提高输水系统的稳定性和安全性。

1.4 调水工程瞬变流研究现状及发展趋势

有关瞬变流的研究持续了将近一个多世纪,从理论上讲,瞬变流模拟并不是一个复杂的问题,它所用到的相关基本理论和研究方法都趋于成熟。这些理论和方法以往在水电站的引水系统中得到了非常广泛的应用。最初的瞬变流研究主要源于水力发电站的管道引水系统的水力振荡。1904年,Joukovsky通过试验和理论分析获得了直接水锤情况下,瞬变流导致的压强变化值的计算公式,该公式建立了没有返射波叠加情况下的压强变化和水流

流速变化的简单关系式，它可以应用到一些简单的直接水锤的瞬变流压力的粗略估算，但这种计算通常只应用于某点的瞬变流的压强变化。此后，Allievi 开始更加深入地研究瞬变流理论与计算方法，并最终提出了阿维列水锤连锁计算方程。该方程可以对管路瞬变流随时间变化情况下不同断面的瞬变压力过程和分布进行计算，因此在当时得到了广泛的认可和应用，并且极大地激发了学者们对瞬变流的研究热情。此后，Streeter 和 Wylie 等系统地总结出瞬变流的方程，它由连续方程和运动方程组成，该方程从理论上非常全面地描述了瞬变水流的运动。然而，瞬变流方程包含的连续方程和运动方程是双曲偏微分方程，无法获得其理论上的解析解，因而不能直接应用于瞬变流的计算和分析。为了利用瞬变流方程进行水锤分析，先后经历了解析法、图解法、特征线法、有限元法等。在这些方法中，特征线法（method of characteristics）由于结构简单、步骤清晰和易于编程等特点，成为了最受欢迎的方法。特别是随着计算机技术的发展，特征线方法几乎能够应用于所有的瞬变流计算。它也是目前在瞬变流计算中最常用的方法，该方法已经广泛应用于工业界的瞬变流模拟和研究。Wylie 和 Streeter 在文献 [38] 中对特征线方法进行了系统的阐述，此外，Chaudhry 也出版了文献 [3]。这两本著作对管路和明渠的瞬变流分析与应用进行了经典的论述，为瞬变流的理论和模拟提供了宝贵的参考。随着 20 世纪 70 年代 Fortran 计算机语言的发展，瞬变流的特征线计算方法得到了前所未有的应用。该方法广泛地应用到电站、供水、核电、石油等相关领域的科学研究和工程优化。同时，在特征线方法的基础上，瞬变流理论和模拟计算方法得到了不断的扩充和改良。阀门系统的优化控制、瞬变流的二维模拟模型、非恒定摩擦阻力分析、弹塑性瞬变模型等均可以通过水锤特征线方法进行研究。目前，瞬变流的特征线方法不仅可以应用到所有复杂封闭管路的动态压力和流量的模拟，而且，也可以模拟明渠情况下的瞬变流过程。

在水利领域的研究中，早期的瞬变流模拟主要集中在水电站压力引水系统的瞬变过程。随着调水工程的发展和修建，瞬变流模拟的方法被直接应用到输水工程的瞬变流模拟。由于瞬变流理论和计算方法的相对成熟，有关调水工程的瞬变流模拟研究更加注重于实际应用和工程优化。特别是随着我国调水工程的不断修建，国内许多学者在调水工程的水力控制理论、数值模拟和实时仿真等方面开展了大量的实践研究，积累了大量的研究经验和科研成果。有关调水工程的瞬变流研究不断注重理论，而且非常注重结合实际的工程应用。杨开林等对南水北调、引黄入晋等工程的瞬变流问题进行了系统深入的研究，并将神经网络的方法应用到调水工程的水力控制仿真；练继建等对南水北调、掌鸠河引水、白溪引水等工程的瞬变流进行了诸多研究，并对北方冰期输水等进行了系统的研究，郑源、张健、刘德有等对管道系统的水力过渡和含气水锤的防护进行了大量研究；刘光临、刘梅清等研究了长输水管道的水柱分离以及空气罐对水锤的预防；李进平、杨建东等研究了非恒定摩阻对管道水力过渡过程的影响；党志良等对重力给水系统管道减压进行了探讨；钟登华、章晋雄、吴建华等将计算机的仿真应用到长距离输水工程的水流控制。此外，一些相关高等院校和科研部门都对输水工程的实时调度、工程应用的研究较为重视，并获得了大量的研究成果。

长距离调水工程通常经过不同的地质、地貌，而且输水形式和输水规模也各不相同，因此不同的工程在控制和运行方式上多种多样。在保证调水工程安全的前提下，满足适

时、适量供水一直是调水工程的重要水力学难题。随着我国大量调水工程的兴建,不同工程的适时、适量输水导致的瞬变水流问题不尽相同。从水力学角度来看,无论是在设计还是在运行阶段,输水工程的瞬变流的预测和分析是保证工程安全稳定和优化运行的重要环节,不同的调水工程既有共性,也具有独特性。在未来的调水工程的瞬变流研究中,更加注重不同工程的具体水锤防护措施和优化控制方法。本书从瞬变流模拟和控制方面,对不同调水工程的控制方式、水力过渡过程进行分类建模和模拟分析,这些工程包括了自流压力输水形式、加压输水形式、有压管道形式和无压输水形式的调水工程,可为相关的工程在瞬变流建模、预测和优化控制等方面提供参考和借鉴。

第2章 瞬变流模拟的基本原理

2.1 瞬变流的基本概念及危害

描述水流运动的要素包括诸多方面，主要表现在流体的密度、位置和时间的关系。通常情况下，根据流体运动状态是否随时间发生改变，可将流动分为恒定流和非恒定流两种。在流动中，所有流动要素均不随时间发生改变的流动称为恒定流（steady flow）。流动区域中只要有一个以上要素随时间发生了改变，那这种流动就属于非恒定流（unsteady flow）。在多数情况下，非恒定流也常称为非定常流或瞬变流（transient flow）。然而根据非恒定流的变化强度和不同的领域，人们也称为水锤、水击、水力过渡过程等。严格来讲，任何流动都或多或少随时间发生改变，也就是说实际的流动都属于非恒定流范畴，恒定流也可以看成非恒定流的一种特殊情况。

瞬变流的特点主要表现在，水流随时间发生改变，在描述水流运动的方程中，总有一项或多项水力要素对时间的导数不为零。其表现为密度、压力、流速、流向和流量等水力参数不能维持恒定，总有一项或多项会随着时间的发生改变。这种流动是一种不稳定流动。水锤通常指封闭管网中的水流随时间发生急剧改变的非恒定流。过渡过程通常指水流由一种状态过渡到另一种状态的水流变化情况。明渠中的非恒定流动通常称为明渠非恒定流。

在调水工程的系统中，阀门的关闭和开启、水泵的启动或停机、水轮机的导叶开启和关闭以及其他原因使流动状态发生改变，均可以导致瞬变流的产生，管道系统中的瞬变流会使内压力和流量等发生急剧的波动，通常超出恒定流的设计范围，可能在管路中形成振荡、噪声、负压和爆管等危害。在调水工程中，对工程的危害主要表现在以下几方面：

（1）对管路产生额外的瞬变压力，可能导致爆管。在非恒定水流情况下，管路中的流量和压力通常发生波动和变化，特别是内水压力的波动通常超过恒定流情况的设计压力，当最大极值压力波动超过一定的范围时，可能导致管道的破裂和漏水，这种现象是水锤危害较常见的形式。

（2）导致阀门破裂或损坏。阀门的开启和关闭是导致管路发生激烈水锤的主要情况之一，阀门的正常操作通常不会因为水锤导致阀门发生破坏，但是阀门的误操作可能导致阀门上游形成较大的水锤增压，同时，阀门下游可能形成较大的水锤降压，二者叠加，会使阀门整体上承受水流方向的合力，从而导致阀体破坏或阀销发生破坏。

（3）瞬变流产生的负压可能导致管道变形和压扁。封闭管路中的剧烈水锤不仅会增加管道的内水压力，而且也可能导致管路中的压力发生急剧降低，从而导致管路发生变形和

压扁。管路中产生负压有两种可能：一是由于升压波反射后形成降压波导致压力下降；另一种是由于关阀时在下流直接产生降压波，这两种情况都可能导致管路中的内水压力过低或者产生负压，从而导致管壁变形和压扁。

(4) 水轮机和水泵等发生空蚀破坏。瞬变流也可能导致水轮机和水泵的叶轮发生空蚀破坏，当水锤降压发生在叶轮附近时，在低压环境下水流发生气穴，而这种气穴在叶轮附近溃灭时，可能对叶轮表面产生巨大的撞击力，从而在叶轮上形成微小的破坏，而这种微小的破坏在不断重复和积累的情况下形成大面积的剥蚀和破坏，严重危害水轮机和水泵水轮效率和使用寿命。

(5) 导致供水管路系统发生中断和停水。供水管路系统中的水锤是设计和运行部门非常关注的水力学问题。长距离供水管路正常运行中通常需要开启、关闭以及流量调节等操作，这些操作在管路中都会导致压力和流量的大幅度波动。由于供水管路具有管路长、流量大、管径大等特点，因此，调节过程中的瞬变压力可能超过正常设计情况下的水压标准，特别是泵站失电或阀门误操作等情况下，通常会导致全线系统发生中断或停水。

(6) 导致管路形成负压和脱空。在一些起伏不平，或者具有衔接井的长距离管道输水工程中，水锤可能导致管路高点出现负压，这种现象可能导致水柱分离，而水柱弥合时可能带来巨大的冲击压力导致管路破坏。

(7) 形成明满流交替现象。在暗渠输水中，瞬变流导致的压力和水位波动可能导致暗渠中的水位急剧上升和降低，对于设置有衔接井的长距离调水工程，大幅度的水位波动导致衔接井或管口发生脱空，这种现象可能导致水流拍打管口，形成噪声和振动。

2.2 瞬变流的研究方法

瞬变流的研究是水力学领域的热点问题之一。瞬变流的模拟、预测和控制是防止瞬变流危害的重要环节。最早引起工程师们重视的瞬变流问题出现在水电站的水力调速系统，水电站在甩负荷和增加负荷时，输水系统中的压力和流量波动对发电机组的稳定运行影响比较突出，如何预测和防治水锤对输水系统的影响是水电站输水系统极为关注的问题。此后，瞬变流问题在引水管道、市政管网和核电水力系统中被广泛研究。水锤的理论和模拟方法得到了深入的研究和发展。

基于水锤的理论分析，试验测试和数值模拟是水锤预测的主要方法。水锤的理论分析方法通常用于推导水锤的基本理论模型，这些模型只有在特定的情况下才能对水锤现象进行初步分析和简单估算，对复杂的水锤过程无法进行完全模拟和计算。试验测试的方法需要建立物理模型，需耗费大量的时间和成本，而且在相似和测试方面存在一定的难度。数值模拟方法通常需要建立较为复杂的理论方程和数学模型，由于无法直接获得这些方程的解析解，需要对方程进行离散，并编制相应的数值计算程序对瞬变过程进行模拟。在理论研究和数值模拟方面，水锤的模拟方法经历了图解法、解析法、特征线法和有限元法等。图解法能够对一些简单的边界进行处理，但该方法依靠作图求解，无法进行复杂的建模和计算。解析法需要求解复杂的方程，很多情况下，水锤方程无法获得特定的解析解。特征