



南水北调中线工程 关键水力学问题研究

刘之平 吴一红 陈文学 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

南水北调中线工程关键水力学问题研究

南水北调中线工程 关键水力学问题研究

刘之平 吴一红 陈文学 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

南水北调中线工程横穿四个流域带,工程规模庞大,控制节点多,可能出现的状况复杂,技术难度大,需要研究的课题多。依托“十一五”国家科技支撑计划项目课题“中线工程输水能力与冰害防治技术研究”(课题编号:2006BAB04A12),本书对南水北调中线工程水力特性、渠道的运行控制、冰期输水能力和冰期运行控制及信息技术应用等四大方面开展了较为深入的研究,是课题研究成果的总结。

本书系统性强,理论方法与工程应用相结合,既可为南水北调中线工程的运行、调度和管理提供科学依据,也可为其他大型长距离调水工程提供参考,还可供相关工程技术、管理人员及高等院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

南水北调中线工程关键水力学问题研究 / 刘之平等
著. — 北京:中国水利水电出版社, 2010. 11
ISBN 978-7-5084-8032-9

I. ①南… II. ①刘… III. ①南水北调—水利工程—水力学—研究—中国 IV. ①TV68

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第216313号

书 名	南水北调中线工程关键水力学问题研究
作 者	刘之平 吴一红 陈文学 等著
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	184mm×260mm 16开本 17.5印张 415千字
版 次	2010年11月第1版 2010年11月第1次印刷
印 数	0001—1500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

跨流域调水工程是水资源调配的重要手段之一，南水北调中线工程是缓解我国北方地区水资源严重短缺、改善生态环境的一项世界瞩目的重大工程。南水北调中线工程起点为丹江口水库库区的陶岔渠首，终点为北京、天津。总干渠全线长 1241.2km，天津干渠全长 142.0km，跨越长江、淮河、黄河、海河四大流域，穿过黄河干流及其他集流面积 10km^2 以上河流 219 条，跨越铁路 44 处，工程沿线设置 61 座节制闸控制渠道的输水过程，由 88 个分水口门向沿途用户供水，设 51 座退水闸。

中线工程规模庞大，调水距离长，跨越大别山与苏北平原地区、华北平原与鲁中中山地区和燕山地区等三个气候，气候条件复杂，沿途无在线调节水库，控制结点众多。水力学控制非常复杂，运行管理难度很大。从工程运行角度来看，中线工程水力学控制具有如下特点：

中线工程采用闸前常水位的运行方式，没有在线调节水库，渠道允许水位变幅小，运行条件苛刻；实现闸前常水位运行方式所需的蓄量变化，与用户需求引起的蓄量变化的趋势刚好相反，系统控制和稳定时间长；输水线路长，设计工况下水流从陶岔渠首到北京团城湖需要 2 周时间，重力波从陶岔传播至北京团城湖也需要 2 天多，水力控制难度大；沿线 61 个节制闸将渠道分为 60 个渠池，每一个闸门的操作所产生的扰动波将向上游、下游传播，渠池间存在的耦合效应将影响系统的响应速度和控制效果；总干渠交叉建筑物众多，地理环境和气象条件差异较大，水流由低纬度流向高纬度，在冬季运行时，黄河以北渠段会出现不同程度的冰情。

上述特点决定了中线工程水力学问题的难度和复杂性。近 20 年以来，国内许多科研单位的专家学者在中线干渠的水力特性、运行控制、冰情特性和信息化建设方面开展了大量科研工作，取得了许多具有参考价值的研究成果。由于南水北调工程史无前例，问题非常复杂，仍有许多关键的水力学问题亟

待进一步的研究，如闸前常水位实现方式、穿黄工程运行算法、中线工程冰期输水能力和冰盖下安全输水的运行控制方式、渠道水力参数的在线整定技术、鲁棒控制器设计方法及控制器参数的在线整定技术、应急调度技术等。

“十一五”国家科技支撑计划项目“南水北调工程关键技术研究与应用”中的课题“中线工程输水能力与冰害防治技术研究”（课题编号：2006BAB04A12）正是为深入研究中线工程的水力特性、输水能力、闸前常水位的实现方式、冰期输水模式、冰期输水能力及冰害防治技术等关键水力学问题而设立的，本书是在总结该课题所取得的部分成果的基础上撰写而成的。

全书分为：概述、明渠水流数值模拟、输水渠道建筑物水力敏感性分析、基于伴随方程的输水渠道非线性预测控制、中线干渠自动化运行控制模式研究、中线干渠闸前常水位运行实现方式研究、输水明渠频率响应特性及PI控制器参数整定方法研究、中线干渠变闸前水位运行控制方式研究、闸前常水位运行控制模型试验研究、明渠冬季输水研究现状分析、南水北调中线干渠冰期输水能力研究、南水北调中线工程冰期输水特性研究、长距离输水渠道冰期运行控制方式研究、南水北调中线工程输水模拟平台、结论与展望等15章。本书系统性强，理论方法与工程应用相结合，既可为南水北调中线工程的运行、调度和管理提供科学依据，也可与其他大型长距离调水工程的设计、科研和管理工作提供参考。

本书撰写人有刘之平、吴一红、陈文学、石春先、崔巍、穆祥鹏、郭晓晨、程德虎和王琦。在撰写过程中，得到了国务院南水北调工程建设委员会办公室、南水北调中线干线工程建设管理局和中国水利水电科学研究院各位同仁的大力支持，在这里向他们表示衷心的感谢。

鉴于南水北调中线工程水力学和冰问题的难度与复杂性，以及作者水平及时间所限，尚有许多问题有待进一步深入研究，书中所存不足甚至纰漏之处，恳请读者与专家指正。

作者

2010年11月于北京

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 工程概况	1
1.2 气候特征	2
1.2.1 中线工程沿线气候特征	2
1.2.2 中线工程沿线典型台站冬季气温变化特征	3
1.3 工程特点及需要研究的水力学问题	4
1.3.1 中线工程的主要特点	4
1.3.2 需要研究的水力学问题	5
1.4 本书的主要内容	8
参考文献	9
第 2 章 明渠水流数值模拟	11
2.1 控制方程	11
2.2 有限差分格式	12
2.2.1 控制方程的离散	12
2.2.2 离散方程的线性化	12
2.2.3 定解条件	13
2.2.4 方程的解法	15
2.3 有限体积格式	17
2.3.1 格式的推导	17
2.3.2 格式的验证	20
2.4 弧形闸门流量计算方法分析	21
2.4.1 基于能量方程的弧形闸门堰流流量计算	22
2.4.2 基于能量方程的弧形闸门闸孔出流流量计算	22
2.4.3 基于量纲分析的弧形闸门流量计算公式	23
2.4.4 孔堰流分界点的数值处理	24
2.5 复杂输水渠道数值仿真平台开发	25
2.5.1 系统组成	25
2.5.2 仿真模拟平台验证	27
2.6 小结	29

参考文献	29
第3章 输水渠道建筑物水力敏感性分析	31
3.1 敏感性分析	31
3.2 分水口分水对渠道水位的影响	32
3.2.1 分水口流量变化速度对渠道水位的影响	33
3.2.2 分水流量增量占渠道流量比例对渠道水位的影响	34
3.2.3 分水流量增量对渠道水位的影响	34
3.2.4 分水口敏感性指标分析	35
3.3 节制闸运用对渠道水位的影响	37
3.3.1 渠池的敏感性指标分析	37
3.3.2 渠池的敏感性与渠池特征参数间的关系	38
3.4 小结	41
参考文献	41
第4章 基于伴随方程的输水渠道非线性预测控制	42
4.1 基于伴随方程的明渠水流敏感性分析	42
4.1.1 渠道伴随方程及其边界条件	42
4.1.2 分水口和节制闸的控制方程和伴随方程	43
4.1.3 滚动优化算法	45
4.2 滚动优化算法验证及分析	46
4.3 滚动优化算法在南水北调中线工程的应用	50
4.4 小结	52
参考文献	52
第5章 中线干渠自动化运行控制模式研究	53
5.1 概述	53
5.1.1 中线干渠自动化运行的必要性	53
5.1.2 渠系自动化技术发展历史及现状	53
5.1.3 中线干渠存在的运行控制问题	55
5.2 中线干渠运行控制概念分析	56
5.2.1 中线干渠配水方式	56
5.2.2 中线干渠的运行概念	56
5.2.3 中线干渠的控制概念	58
5.2.4 中线干渠的控制方法	59
5.3 中线干渠的渠池运行方式	60
5.3.1 闸前常水位(下游常水位)运行	60
5.3.2 闸后常水位(上游常水位)运行	61
5.3.3 等容积运行	61
5.3.4 控制蓄量法	62

5.4 中线干渠控制建模分析	62
5.4.1 渠道控制模型研究概况	63
5.4.2 渠道控制模型发展趋势	64
5.4.3 中线干渠控制模型	65
5.5 中线干渠控制算法分析	65
5.5.1 变量选取	66
5.5.2 控制逻辑	67
5.5.3 控制算法	68
5.5.4 南水北调中线干渠的控制算法	72
5.6 中线干渠的节制闸运行技术	72
5.6.1 顺序操作技术	72
5.6.2 同步操作技术	74
5.6.3 选择性操作技术	74
5.7 小结	75
参考文献	75
第6章 中线干渠闸前常水位运行实现方式研究	80
6.1 闸前常水位运行方式分析	80
6.1.1 闸前常水位运行响应与恢复特性	80
6.1.2 闸前常水位运行流量蓄量关系	80
6.1.3 闸前常水位运行蓄量补偿时间	82
6.1.4 闸前常水位运行水位变幅约束条件	84
6.1.5 闸前常水位运行控制系统结构	85
6.2 渠道前馈控制算法——改进蓄量补偿法	86
6.2.1 蓄量补偿法原理	87
6.2.2 改进蓄量补偿法	88
6.2.3 前馈控制时间计算	88
6.2.4 多渠池多需求蓄量补偿算法	90
6.3 渠道反馈控制算法——水位流量串级控制算法	91
6.3.1 传统水位反馈控制系统	91
6.3.2 水位—流量串级反馈控制系统	92
6.3.3 特性分析及控制器设计	93
6.3.4 PI反馈控制算法	95
6.4 PI反馈控制算法参数整定	96
6.4.1 渠道极限增益 k_u 和极限周期 T_u	97
6.4.2 Auto Tune Variation 法	97
6.4.3 ATV 法与渠道 ID 控制模型	98
6.4.4 基于 ID 模型的 PI 控制裕量 ΔG 和 $\Delta \phi$	99

6.4.5 鲁棒 PI 控制参数整定	99
6.4.6 中线总干渠 PI 控制参数整定	100
6.5 渠道解耦控制算法	102
6.5.1 闸前常水位运行控制耦合作用分析	103
6.5.2 解耦设计及原理分析	104
6.5.3 两种解耦控制算法比选	105
6.5.4 结论	108
6.6 中线干渠闸前常水位运行典型工况仿真	108
6.6.1 工况 1	113
6.6.2 工况 2	114
6.6.3 工况 3	116
6.6.4 工况 4	117
6.6.5 分析与结论	118
6.7 小结	119
参考文献	119
第 7 章 输水明渠频率响应特性及 PI 控制器参数整定方法研究	122
7.1 概述	122
7.2 线性化圣维南方程组的频域模型计算	122
7.3 基于 ID 模型的控制参数整定算法	125
7.3.1 基于 ID 模型的传递函数	126
7.3.2 无量纲 PI 控制器设计	126
7.3.3 延迟裕度对控制器稳定性的影响分析	128
7.3.4 增益裕度对最大扰动误差的影响分析	129
7.3.5 增益裕度和相位裕度对最小稳定时间的影响分析	130
7.3.6 鲁棒控制器设计	130
7.4 控制参数变化对增益裕度和相位裕度的影响规律	133
7.4.1 k_p 变化对幅频曲线和相位曲线的影响	133
7.4.2 T_i 变化对幅频曲线和相位曲线的影响	134
7.4.3 k_i 不变 k_p 和 T_i 变化对幅频曲线和相位曲线影响	134
7.4.4 讨论	134
7.5 南水北调中线渠道控制参数整定及分析	135
7.6 小结	139
参考文献	140
第 8 章 中线干渠变闸前水位运行控制方式研究	141
8.1 穿黄工程渠池运行控制方式	141
8.1.1 穿黄工程运行控制问题分析	142
8.1.2 控制蓄量运行实现方式研究	143

8.1.3 闸前常水位—控制蓄量联合运行控制算法研究	145
8.1.4 穿黄工程控制蓄量运行仿真	145
8.2 安阳以北渠池冰期输水过渡期运行控制方式	147
8.2.1 闸前变水位运行实现方式	147
8.2.2 闸前变水位运行闸门控制算法	148
8.2.3 总干渠冰期输水过渡期运行控制仿真	149
8.3 小结	151
参考文献	152
第9章 闸前常水位运行控制模型试验研究	153
9.1 渠道模型及控制系统	153
9.1.1 国内外模型渠道调研与分析	153
9.1.2 模型渠道的设计	154
9.1.3 测量仪器和闸门驱动系统	158
9.1.4 监测控制系统	158
9.1.5 采样步长与控制步长	162
9.1.6 平板闸门流量系数的率定	162
9.2 控制参数整定方法验证	163
9.2.1 控制参数频域整定方法验证	163
9.2.2 PI 控制器 ATV 在线整定方法验证	166
9.3 控制器参数敏感性分析	169
9.3.1 渠道控制指标	169
9.3.2 控制器参数敏感性试验比较	171
9.4 前馈控制研究	177
9.5 解耦系数比较研究	181
9.6 小结	182
参考文献	182
第10章 明渠冬季输水研究现状分析	184
10.1 河冰理论研究进展	184
10.1.1 水内冰、浮冰和锚冰的生成及演变理论研究	184
10.1.2 冰盖形成理论研究	185
10.1.3 冰盖下水内冰输运和堆积理论研究	186
10.1.4 封冻河道的阻力研究	186
10.1.5 冰厚的热力增长和消融理论研究	187
10.1.6 开河及冰坝理论研究	188
10.2 长距离调水工程冰期运行现状	188
10.2.1 国外冰期调水工程	188
10.2.2 国内冰期调水工程	189

10.2.3 冰期调水工程安全运行措施	193
10.3 小结	193
参考文献	193
第 11 章 南水北调中线干渠冰期输水能力研究	197
11.1 概述	197
11.2 渠道冰期输水能力的控制指标	198
11.2.1 结冰期的输水能力控制指标	198
11.2.2 稳封期的输水能力控制指标	199
11.3 渠道冰期输水能力的确定	201
11.3.1 冰盖形成期的输水能力	201
11.3.2 稳封期的输水能力	202
11.3.3 中线干渠黄河以北渠段冰期输水能力	203
11.4 冰期运行调度方式	204
11.5 小结	207
参考文献	208
第 12 章 南水北调中线工程冰期输水特性研究	209
12.1 数学模型	209
12.1.1 有浮动冰盖的渠道非恒定流控制方程	209
12.1.2 渠道的气、水、冰的热传导方程	209
12.1.3 水温、水内冰、浮冰控制方程	210
12.1.4 动态冰盖发展模型	211
12.1.5 冰期输水数学模型的验证	211
12.2 南水北调中线工程黄河以北冬季气温分析	212
12.3 中线干渠冰情特性分析	214
12.3.1 冰情模拟的计算条件	214
12.3.2 中线干渠的冰情演变特性	214
12.3.3 中线干渠的冰情特点	216
12.4 中线工程的冰水作用特性	217
12.4.1 冰情发展对渠道水情的影响	217
12.4.2 水流条件对渠道冰情的影响	219
12.5 小结	220
参考文献	220
第 13 章 长距离输水渠道冰期运行控制方式研究	222
13.1 概述	222
13.2 渠道冰期运行问题分析	223
13.3 渠道冰期运行控制研究	227
13.3.1 渠道冰期输水控制指标	227

13.3.2	节制闸的控制方式	227
13.3.3	控制参数的整定	228
13.3.4	渠道冰期运行控制效果验证	228
13.3.5	冰期控制运行的输水效益分析	232
13.4	小结	233
	参考文献	233
第 14 章	南水北调中线工程输水模拟平台	235
14.1	平台研制需求	235
14.2	平台的特点	235
14.3	采用的技术方法	236
14.4	系统框架设计	236
14.5	数据库与平台选型	237
14.6	三维 GIS 仿真平台	238
14.6.1	系统架构设计	238
14.6.2	数据库设计	239
14.6.3	功能设计	239
14.6.4	三维 GIS 仿真平台功能	240
14.7	二维 GIS 模拟平台	242
14.7.1	系统架构设计	242
14.7.2	数据库建设	243
14.7.3	功能设计	244
14.7.4	数学模型集成	244
14.7.5	二维 GIS 模拟平台功能	245
14.8	WebGIS 信息发布平台	253
14.8.1	WebGIS 相关技术	253
14.8.2	系统架构设计	255
14.8.3	数据库设计	256
14.8.4	关键技术	257
14.8.5	WebGIS 信息发布平台功能	258
14.9	小结	260
	参考文献	260
第 15 章	结论与展望	262
15.1	结论	262
15.2	展望	264

第 1 章 概 述

1.1 工 程 概 况

南水北调中线工程是缓解我国北方地区水资源严重短缺、优化水资源配置、改善生态环境的重大战略性基础设施，是关系我国经济、社会和生态协调发展的重大工程，是解决华北水资源危机的一项重大基础设施。中线供水区跨长江、淮河、黄河、海河四大水系，涉及北京、天津、河北、河南、湖北五省（直辖市），面积 15.5 万 km^2 ，占全国国土面积的 1.6%，耕地面积 840 万 hm^2 ，占全国耕地面积的 9%，人口 1.1 亿，占全国总人口的 9%，人口密度 700 余人/ km^2 ，耕地利用率 54%，是耕地、人口较密集地区。分布有北京、天津、石家庄、保定、沧州、邢台、邯郸、安阳、新乡、焦作、郑州、许昌、平顶山及南阳等十余座大中城市和百余座县城，城市化水平较高^[1]。

南水北调中线工程从丹江口水库引水经长江流域与淮河流域的分水岭河南省方城县（垭口），沿唐白河流域和黄淮海平原西部边缘开挖渠道，在郑州以西用隧洞穿过黄河，沿京广铁路西侧北上，自流到北京、天津。总干渠全线长 1432km，穿越长江、淮河、黄河、海河四大流域。中线工程主要向唐白河流域、淮河中上游和海河流域的西部平原的湖北、河南、河北、北京及天津五省（直辖市）供水，重点解决北京、天津、石家庄等沿线 20 多座大中城市的缺水，并兼顾沿线生态环境和农业用水。考虑汉江流域社会、经济和环境用水要求，中线工程多年平均调水量为 130 亿~140 亿 m^3 ，过黄河 80 亿~90 亿 m^3 ，除补充海河平原城市供水 50 亿~60 亿 m^3 外，可补充生态环境和农业用水。干旱年份汉江的可调水量约 65 亿~70 亿 m^3 ，可保证北京、天津及华北地区城市用水。

南水北调中线主体工程由水源区工程和输水工程两大部分组成。水源区工程为丹江口水利枢纽后期续建和汉江中下游补偿工程，输水工程即引汉总干渠和天津干渠。

丹江口水利枢纽在已建成的初期规模的基础上，按原规划续建完成，坝顶高程从现在的 162.00m，加高至 176.60m，设计蓄水位由 157.00m 提高到 170.00m，总库容达 290.5 亿 m^3 ，比初期增加库容 116.0 亿 m^3 ，增加有效调节库容 88.0 亿 m^3 ，增加防洪库容 33.0 亿 m^3 。

为免除调水对汉江中下游的工农业及航运等用水可能产生的不利影响，相应修建干流渠化工程兴隆或碾盘山枢纽、东荆河引江补水工程，并改建或扩建部分闸站和增建部分航道整治工程。

总干渠自陶岔渠首引水，沿已建成的 8km 渠道延伸，在伏牛山南麓山前岗垅与平原相间的地带，向东北行进，经南阳过白河后跨江淮分水岭方城垭口入淮河流域，经宝丰、禹州、新郑西，在郑州西北孤柏嘴处穿越黄河。然后沿太行山东麓山前平原，京广铁路西侧北上，至唐县进入低山丘陵区，过北拒马河进入北京市境，过永定河后进入北京市区，



终点是玉渊潭。总干渠全长 1241.2km。

天津干渠自河北省徐水县西黑山村北总干渠上分水（西黑山分水口）向东至天津西河闸，全长 142km。

黄河以南渠道纵坡 $1/23000 \sim 1/28000$ ，黄河以北一般在 $1/20000 \sim 1/30000$ 之间。渠道设计水深随设计流量由南向北递减，由渠首 8.0m 到进入北京时 3.8m，底宽由 13.5m 减至 8.0m（局部为 7.5m）。

总干渠沟通长江、淮河、黄河、海河四大流域，需穿过黄河干流及其他集流面积 10km^2 以上河流 219 条，跨越铁路 44 处，需建跨总干渠的公路桥 571 座，此外还有节制闸、分水闸、退水建筑物和隧洞、暗渠等，总干渠上各类建筑物共 936 座，其中最大的是穿黄河工程（简称穿黄工程）。天津干渠穿越大小河流 48 条，有建筑物 119 座。

穿黄工程位于郑州黄河铁路大桥上游约 30km 处，工程南岸起于荥阳市王村镇李村附近，北至黄河北岸，总长度 19.3km。

穿黄工程由南岸渠道、北岸渠道、南岸退水建筑物、跨渠建筑物、进口建筑物、邙山隧洞、穿黄隧洞段、出口建筑物、北岸新、老蟒河倒虹吸等交叉建筑物及北岸防护堤、孤柏嘴控导工程等组成。穿黄隧洞长 3.45km，双洞布置，洞径 7.0m，南北两岸渠道长分别为 4.63km 和 9.97km，南岸进口段长 1030.0m，其中邙山斜洞段长 800.0m，北岸出口段长 227.9m。工程设计输水流量 $265\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量 $320\text{m}^3/\text{s}$ 。

丹江口水库陶岔渠首引水量 $350\text{m}^3/\text{s}/420\text{m}^3/\text{s}$ （设计/加大，下同），穿黄工程输水规模 $265\text{m}^3/\text{s}/320\text{m}^3/\text{s}$ ，河北输水规模 $235\text{m}^3/\text{s}/265\text{m}^3/\text{s}$ ，北京和天津输水规模 $50\text{m}^3/\text{s}/60\text{m}^3/\text{s}$ （参见表 1-1）。沿线有 61 个节制闸控制渠道的输水过程，由 88 个分水口门向用户供水，由 51 座退水闸避免渠道水流漫溢。

表 1-1 南水北调总干渠关键点水位与流量

控制点或渠段	桩号 (m)	设计流量/加大流量 (m^3/s)	设计水位/加大水位 (m)
陶岔渠首	0+000	350/420	147.380/148.115
黄河南 (A)	473+833	265/320	118.000/118.710
黄河北 (B)	493+138	265/320	108.000/108.710
漳河倒虹吸 (进河北)	730+700	235/265	92.190/92.560
河北省段渠道终点	1196+362	50/60	60.300/60.400
惠南庄泵站进口	1198+143	50/60	59.904/59.904
团城湖进水闸	1276+414	30/35	48.574/48.574
西黑山分水口 (天津干渠取水点)	1120+520	125/150	65.274/65.805
西黑山节制闸进口	1120+590	100/120	65.273/65.791

1.2 气候特征

1.2.1 中线工程沿线气候特征

中线工程由南向北，起点陶岔渠首位于北纬 $32^\circ 40'$ 、东经 $111^\circ 42'$ ，终点北京市团城湖位



于北纬 $39^{\circ}59'$ 、东经 $116^{\circ}15'$ ，纬度相差 $7^{\circ}19'$ ，沿程经过大别山与苏北平原地区、华北平原与鲁中中山地区和燕山山地区等三个气候区^[2]，气候条件也有很大的差异，参见表 1-2。

表 1-2 中线工程沿线气候变化

气候区名称	温度带	干湿区	日平均气温大于 10℃的稳定天数	干燥度	1月气温 (℃)	7月气温 (℃)	年降水量 (mm)
大别山与苏北平原地区	北亚热带	湿润带	227	0.7	2.2	27.4	1106
华北平原与鲁中中山地区	暖温带	半湿润带	219	1.5	-0.4	27.5	671
燕山山地区	暖温带	半湿润带	184	1.5	-7.9	24.3	568

渠首地处北亚热带北缘，受季风进退影响，四季分明。一年中春秋两季较短，冬夏历时较长。春季温度回升快，前期少雨干旱，后期间有低温阴雨；夏季受西太平洋副热带高压控制，气温高而降雨多；秋季昼暖夜凉，温差较大，并时有连绵阴雨；冬季受强大的西伯利亚和蒙古冷高压控制，干燥寒冷，雨雪稀少。渠首地区水资源比较丰富，年平均降水量 $719.6 \sim 802.9\text{mm}$ ，最多年份达 $1067 \sim 1140\text{mm}$ ，最少年份只有 $391 \sim 412\text{mm}$ 。降水集中在夏季，占全年的 $47\% \sim 48\%$ ，春、秋各占 $22\% \sim 23\%$ ，冬季降水仅占全年降水量的 6% 左右^[3]。

北京属暖温带半湿润季风型大陆性气候，年平均气温 $11 \sim 12^{\circ}\text{C}$ ，年平均降水量 640mm 左右，主要集中在夏季，占全年降水量的 70% 左右，冬季降水量仅占年降水量的 $2\% \sim 3\%$ 。北京气候的主要特点是四季分明，风向有明显的季节性变化。冬季干燥，春季多风，夏季多雨，秋季舒爽，春秋短，夏冬长。冬季寒冷干燥，多风少雪，月平均气温都在 0°C 以下，最冷的 1 月平均气温为 -4.6°C ，山区在 -8°C 以下。

1.2.2 中线工程沿线典型台站冬季气温变化特征

中线工程沿线有南阳、郑州、新乡、安阳、邢台、石家庄、保定和北京等 8 个主要的气象站，统计 1957~2005 年的气象资料表明（参见表 1-3，郑州和南阳站只统计了 1986~2005 年的气温资料），沿线各站冬季月平均气温和冬季日最低气温均随纬度增高而降低，安阳以北地区 1 月平均气温低于 0°C ，邢台以北地区冬季平均气温均低于 0°C ，因此，对于中线工程而言，安阳以北地区冬季输水过程中将会出现不同程度的冰情问题。

表 1-3 中线工程沿线典型气象站冬季气温变化 单位： $^{\circ}\text{C}$

气象站	北京	保定	石家庄	邢台	安阳	新乡	郑州	南阳
纬度	$39^{\circ}48'$	$38^{\circ}87'$	$38^{\circ}02'$	$37^{\circ}04'$	$36^{\circ}03'$	$35^{\circ}19'$	$34^{\circ}43'$	$33^{\circ}02'$
12月平均气温	-1.8	-1.5	-0.3	0.0	0.7	1.5	2.55	3.69
1月平均气温	-3.7	-3.2	-1.9	-1.4	-0.8	0.2	0.60	1.79
2月平均气温	-0.8	-0.2	0.7	1.2	1.9	2.5	3.72	4.66
冬季平均气温	-2.1	-1.7	-0.6	-0.2	0.5	1.2	2.25	3.34
最低日均气温	-15.9	-13.4	-13.7	-14.6	-11.7	-9.7	-9.6	-10.33
最低气温	-27.4	-22.0	-26.5	-22.4	-17.3	-19.2	-16.4	-15.9



分析新乡到北京6个气象站冬季平均气温变化曲线可知(见图1-1和图1-2),尽管从20世纪70年代开始,各气象站监测到的冬季气温有逐渐增加的趋势,但是,高纬度地区的冬季平均气温仍低于 0°C ,因此,这些地区的渠段在冬季输水过程中将会出现结冰现象。

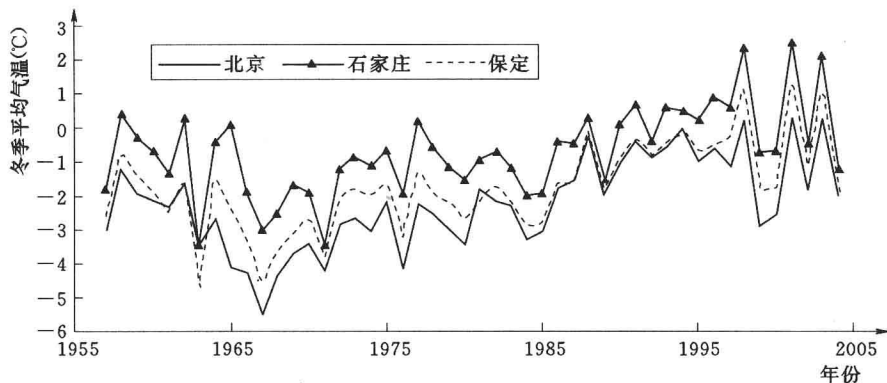


图1-1 北京、石家庄和保定三个气象站监测到的冬季气温随时间变化曲线

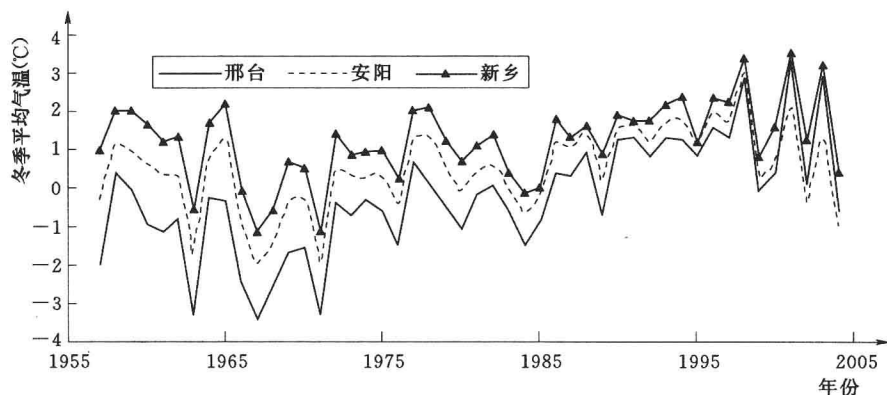


图1-2 邢台、安阳和新乡三个气象站监测到的冬季气温随时间变化曲线

1.3 工程特点及需要研究的水力学问题

1.3.1 中线工程的主要特点

从工程运行的角度看,中线工程具有如下一些特点:

(1) 中线渠道采用闸前常水位的控制方式运行,沿线没有在线调节水库,渠道允许水位变幅小,运行条件苛刻。

(2) 渠道运行的方式有闸前常水位法、闸后常水位法、等容积法和控制蓄量法等^[4]。由于实现闸前常水位运行方式所需的蓄量变化与用户需求引起的蓄量变化的趋势刚好相反,因此,系统控制和稳定时间在所有运行方式中是最长的。为了实现闸前常水位的自动



控制，需要提高控制的响应速度、缩短系统的稳定时间。

(3) 设计工况下，输水渠道内水流平均流速为 $0.8\sim 1.2\text{m/s}$ ，水流波速约为 $5\sim 7.2\text{m/s}$ （参见表 1-4），水流从陶岔渠首到团城湖需要 2 周时间，重力波从陶岔传播到北京团城湖也需要 2d 左右的时间。水流稳定时间长，水力控制难度大。

(4) 沿线 61 个节制闸将渠道分为 60 个渠池，每个渠池的蓄量在 $2\times 10^6\sim 10\times 10^6\text{m}^3$ 之间，相当于一系列小型水库。渠道在运行过程中，若能够充分利用渠池的蓄量，则可提高系统的响应速度。

(5) 每一个闸门的操作所产生的扰动波将向上、下游传播，影响周围渠池的运行，即各渠池间存在耦合效应，这种耦合效应将影响系统的响应速度和控制效果。

(6) 总干渠沿线穿越众多的河流、公路、铁路，沿线存在多种复杂地质条件，地理环境和气象条件差异较大。渠道输水过程中，不确定的扰动因素相对增加。

(7) 南水北调中线工程输水线路长，水流由低纬度流向高纬度。在冬季运行时，黄河以北渠段会出现不同的冰情。

表 1-4 中线渠道典型断面流动特性

建筑物名称	总桩号 (m)	设计流量 (m^3/s)	波速 (m/s)	流速 (m/s)	Fr
陶岔渠首	0+000	350	6.92	1.17	0.17
十二里河节制闸	97+089	340	7.24	1.23	0.17
玉带河节制闸	266+443	315	6.91	1.13	0.16
金水河节制闸	434+884	285	6.65	1.07	0.16
须水河节制闸	446+650	270	6.91	1.21	0.17
索河节制闸中点	459+417	265	6.91	1.18	0.17
淇河节制闸	663+620	245	6.26	1.08	0.17
白马河节制闸	849+162	220	6.56	1.13	0.17
古运河节制闸	968+909	170	6.23	0.98	0.16
磁河节制闸	1000+721	165	5.99	0.97	0.16
漠道沟节制闸	1035+451	135	5.85	0.93	0.16
西黑山节制闸进口	1120+395	100	5.54	0.86	0.16
北易水节制闸	1156+148	60	5.15	0.76	0.15
河北省段渠道终点	1196+167	50	4.92	0.75	0.15

1.3.2 需要研究的水力学问题

南水北调中线工程干渠全长 1432km，可利用水头 87.476m（从陶岔到惠南庄泵站），沿线控制建筑物和交叉建筑物众多，地质、气候条件复杂多样，需要研究的课题多，技术难度大。近 10 年以来，国内许多科研单位针对南水北调中线工程所涉及的水力学问题开展了大量的研究工作，取得了许多有参考价值的研究成果。

肖万格等^[5]利用动态规划的方法确定了中线工程沿线渠池和水工建筑物的水头分配