

输水工程水力特性 与控制

练继建 穆祥鹏 赵新 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

输水工程水力特性 与控制

练继建 穆祥鹏 赵新 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书较系统地阐述了长距离输水工程的水力特性和控制问题,主要包括输水渠道和管道糙率,局部建筑物水力特性,输水工程水力过渡过程的数值模拟方法,明渠、有压管道、泵站加压管道输水工程水力控制,单孔或多孔并联分段低压(保水降压)输水结构及水力控制,充水过程的水力仿真与控制,输水工程的冰情特性、冰期输水能力和冰害防治,突发污染事故下输水工程应急调控等,内容具有创新性和较高的实用价值。

本书是在总结天津大学练继建教授课题组多年来关于输水工程水力学研究成果的基础上撰写而成的。

本书可供从事水利水电工程、水资源管理、环境保护等行业专业技术人员的参考用书,还可作为高等院校相关专业的教授及研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

输水工程水力特性与控制 / 练继建, 穆祥鹏, 赵新
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 12
ISBN 978-7-5170-0517-9

I. ①输… II. ①练… ②穆… ③赵… III. ①输水—
水利工程—研究 IV. ①TV672

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第316132号

书 名	输水工程水力特性与控制
作 者	练继建 穆祥鹏 赵新 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 (发行部)
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 26印张 628千字 4插图
版 次	2012年12月第1版 2012年12月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	89.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

我国水资源时空分布严重不均，供需矛盾十分突出。全国 600 多座大中型城市中缺水的达到 400 余座，长距离调水工程是解决水资源供需矛盾的重要手段。以我国南水北调工程等为代表的调水工程的调水规模和输水技术难度均达世界之最。调水工程一般包括水源工程、输水工程和配套供水工程。其中长距离输水工程水流惯性大、输水建筑物种类多、水流衔接难度大、冰期输水尤为复杂，输水工程水力控制成为调水工程全局性的前沿难题。

作者及其研究团队结合南水北调工程、引滦入津工程、引黄济津工程、昆明掌鸠河引水工程等重大调水工程设计及运行实践，开展了输水工程水力特性和控制问题的长期研究，取得了丰富的研究成果和技术上的突破。

该书是在总结作者最新研究成果的基础上撰写而成的。其主要特色表现在以下几方面：第一，阐述了单孔或多孔并联分段低压（保水降压）输水结构及其水力特征、水力共振机理、避免水力共振发生的设计方法和整体优化原则；第二，系统论述了非冰期复杂输水系统（包括无压流有压流衔接、缓变流急变流过渡、明满流交替水力过渡过程）的水力仿真模拟方法，以及明渠、有压管道和有压-无压组合输水系统在流量调节、事故停泵、检修、不对称输水、充水过程等工况下的水力控制方法和技术；第三，对输水工程冰期输水水力控制及冰害防治技术也进行了较系统的总结，包括冰厚预测的辐射冰冻度日法，输水渠道冰盖稳定性控制指标以及天然冰凌下潜判断准则，输水渠道冰期输水仿真模型和冰期输水能力，输水渠道新型冰害防治设施和冰力灾害特性等；第四，提出了一种突发污染事故下输水工程多目标应急调控技术。

该书的问世，展示了我国在输水工程水力学研究领域取得的重要进展，有助于提升长距离输水工程的设计和安全运行水平。该书并可为广大水利水电工作者提供有益的参考和借鉴。

中国工程院院士



二〇一二年十二月

前 言

水的供需矛盾已成为当今世界面临的重大课题之一。随着经济的发展、社会的进步、人口的增长、城市化进程的加快和人民生活水平的提高，工农业、生活及生态等各方面对水的需求量也相应提高，水的供需矛盾有加剧的趋势。全国 600 多座大中型城市中缺水的达到 400 余座，其中有 100 余座严重缺水，缺水区主要分布在华北地区和沿海地带。这一供需矛盾往往需要借助于修建调水工程来解决。以南水北调工程、引滦入津工程、引黄济津工程为代表的长距离或跨流域调水工程的建设给我国的发展带来了巨大的社会、经济和生态环境效益，其调水规模和输水技术难度均达世界之最。

调水工程一般包括水源工程、输水工程和配套供水工程，其中输水工程往往包括明渠、管道（箱涵）、闸阀、调节井、倒虹吸、泵站、通气井等输水结构和设施，是调水工程建设难点和关键所在。长距离输水工程具有独特的水力特性，在输水工程运行调度过程中，为了满足适时、适量、安全、经济输水的要求，需要把握输水系统在不同输水方式、不同调度方式下（包括在流量调节、事故停泵、应急处置、检修、不对称输水、充水过程等工况下）输水系统的压力、水位、流速和流量等水力参数的变化规律，通过优化水力调控来提高工程的安全性和经济性。输水工程的水力特性和控制具有“长距离输水—水流惯性大一滞后性明显，多用户—用水需求多变—水力调控频繁，地形多变—输水建筑物多种—水流衔接条件复杂，投资土地等的限制—调蓄容量富裕度小，纬度跨度大一冰期输水冰害控制难度大”的特点，输水工程水力调控是调水工程必须解决的全局性关键技术难题。

天津大学于 20 世纪 80 年代初，结合我国首座跨流域长距离调水工程—引滦入津工程，开始研究长距离输水工程的水力特性，而后结合南水北调中线总干渠工程和天津干线工程、引黄济津工程、南水北调东线工程、宁波白溪引水工程、昆明掌鸠河引水工程等，开展了各类复杂输水工程水力特性和控制方式研究。在长距离分段低压输水系统的水力特征和水力共振机理，复杂输水系统的无压流有压流衔接、缓变流急变流过渡、明满流交替水力过渡过程仿真模拟方法，复杂输水系统在流量调节、事故停泵、检修、不对称输水、

充水过程等工况下的水力优化控制，冰期输水水力控制及冰害防治以及突发污染事故下输水工程应急调控研究方面取得创新性成果和突破。本书是在总结天津大学练继建教授课题组近 30 年来在输水工程水力学研究取得的创新性成果的基础上撰写而成的。

全书共分 16 章。包括概论，输水渠道和管道糙率，输水工程局部建筑物水力特性，输水工程水力过渡过程的数值模拟方法，明渠输水工程水力控制，有压管道输水工程水力特性与控制，泵站加压管道输水工程水力特性与控制，单孔或多孔并联分段低压（保水降压）输水结构，单孔或多孔并联分段低压输水系统水力控制，充水过程的水力仿真与控制，输水工程的冰情特性，输水工程冰害形成机理，输水渠道冰期输水仿真模型与输水能力，输水工程冰期输水控制与冰害防治工程措施，输水工程冰力学特性研究，突发污染事故下输水工程应急调控等。

本书由练继建、穆祥鹏、赵新撰写，为本书付出辛勤劳动的还有彭新民、杨敏、万五一、马超、司春棣、郑政、李琳、刘婵玉、许国峰、王俊、周芳等。我们不会忘记是在恩师崔广涛教授、林继镛教授指导下开始工程水力学研究的；不会忘记曹楚生院士、马洪琪院士、钟登华院士对我们的鼓励和指导。感谢朱芳清、曹为民、陈振飞、刘之平、吴一红、吴时强、吴换营、李静、杨开林等同行提供的无私帮助；感谢南水北调中线干线工程建设管理局、天津市水务局、中水北方勘测设计研究有限责任公司等单位对我们科学研究的支持！

由于作者的学识和水平所限，难免存在疏漏、不妥或错误之处，诚恳希望读者与专家指正。

作 者

2012 年 11 月

目 录

序 前言

第 1 章 概论	1
1.1 长距离输水工程概况	1
1.2 输水控制建筑物	49
1.3 长距离输水工程水力学问题	51
1.4 长距离输水工程水力控制问题	52
1.5 本书的主要内容	54
第 2 章 输水渠道和管道糙率	56
2.1 输水渠道糙率	56
2.2 输水管道糙率	60
2.3 输水隧道糙率	64
第 3 章 输水工程局部建筑物水力特性	68
3.1 平板和弧形闸门的流量特性	68
3.2 保水堰或结合井的水力特性	71
3.3 管道阀门的流量特性	84
第 4 章 输水工程水力过渡过程的数值模拟方法	86
4.1 水力过渡过程的基本方程	86
4.2 Preissmann 窄缝法基本原理	90
4.3 水力过渡流基本方程的数值解法	90
4.4 特征线法与 Preissmann 四点隐格式的比较与分析	97
4.5 水击波速的计算方法	105
4.6 几种水力边界的处理	106
4.7 气液二相瞬变流模拟方法	110
第 5 章 明渠输水工程水力控制	118
5.1 明渠输水水力控制方式	118
5.2 明渠输水水力控制算法	119
5.3 明渠输水自动化控制模式	123

第 6 章 有压管道输水工程水力特性与控制	127
6.1 组合阀门的特性分析与阀门边界模型	127
6.2 阀门流量特性对管路水击的影响分析	133
6.3 有压管道输水工程水力特性	135
6.4 输水管道控制结构优化	141
第 7 章 泵站加压管道输水工程水力特性与控制	144
7.1 水泵的全特性曲线	144
7.2 单泵和并联泵的水力过渡过程模拟计算	146
7.3 前项差分法及其在简化计算中的应用	150
7.4 泵站加压管道输水工程水力特性及水力控制优化	154
第 8 章 单孔或多孔并联分段低压（保水降压）输水结构	161
8.1 分段低压输水系统	161
8.2 分段低压输水系统的水力特性	164
8.3 分段低压输水系统的水力共振机理	173
8.4 防治水力振荡的设计原则和设计方法	181
第 9 章 单孔或多孔并联分段低压输水系统水力控制	183
9.1 流量调节过程的水力控制	183
9.2 事故停泵工况的水力控制	191
9.3 检修操作工况的水力控制	198
9.4 多孔并联输水系统不对称输水的水力控制	211
第 10 章 充水过程的水力仿真与控制	221
10.1 长距离输水工程充水过程	221
10.2 充水过程的水力仿真	221
10.3 有压管道充水过程的水力特性	223
10.4 基于水力仿真的充水过程水力控制	226
第 11 章 输水工程的冰情特性	228
11.1 冰的物理力学特性	228
11.2 典型输水工程冰情特性分析	231
11.3 冰情对输水特性的影响	241
11.4 冰盖生消及其稳定性研究	244
第 12 章 输水工程冰害形成机理	263
12.1 冰塞与冰坝	264
12.2 输水渠道冰凌下潜条件	266
12.3 输水渠道加厚冰盖形成过程	276

第 13 章 输水渠道冰期输水仿真模型与输水能力	285
13.1 冰期输水仿真计算模型	285
13.2 冰盖糙率变化规律	289
13.3 输水渠道控制冰凌下潜输水能力	296
13.4 输水渠道加厚冰盖下输水能力	299
13.5 输水渠道封冻期输水能力	302
第 14 章 输水工程冰期输水控制与冰害防治工程措施	305
14.1 输水工程冰期输水运行控制方式	305
14.2 输水工程冰害防治工程措施	316
第 15 章 输水工程冰力学特性研究	340
15.1 冰力模型试验的主要原理和设备	340
15.2 冰盖膨胀力	342
15.3 冰盖上拔力	348
15.4 漂移冰体对建筑物撞击力	350
第 16 章 突发污染事故下输水工程应急调控	356
16.1 闭闸控制下渠段水流运动规律分析	356
16.2 考虑响应时间下渠段污染物输移扩散规律分析	375
16.3 突发水污染事故明渠输水工程应急调控及实例分析	388
附表 典型水工建筑物冰水热交换系数	392
参考文献	393

第 1 章 概 论

1.1 长距离输水工程概况

水是人类社会赖以存在和发展的基础。地球上的总水量大致为 15 亿 km^3 ，淡水只占 2.5% 左右，而淡水中的 68.7% 又固定在两极冰盖和高山冰川中，其余的大部分是土壤中的水分或是深层地下水，难以开采利用，较易开采以供人类使用的江河、湖泊、水库及浅层地下水等水源，其数量不足世界淡水的 1%。随着社会的发展，人类对水的需求量快速增长。世界人口的增长率约为 2%，而用水量的增长率却为 4%，有的国家甚至达到 10% 以上，需水量的急剧增加使得世界各国都感到用水紧张；另外淡水的天然分配与人类生存的地理分布不相协调，来水量的时间分配与人类生活需求差距甚大；加之水源污染的加重，淡水面积的大幅度萎缩使得原本就不容乐观的水问题更是雪上加霜。我国是典型的水资源时空分布不均的国家，我国现有大中型城市 612 个，有 300 多个严重缺水，其中特别严重的有 110 个，缺水问题已成为制约我国经济发展的瓶颈。

解决区域性水资源短缺问题最直接和有效的方法就是修建调水工程，把水从水资源丰富的地区输送到水资源短缺的地区，这是实现水资源合理配置的一项有效措施，是促进缺水地区经济发展与水资源综合利用的重要途径。目前调水工程的重点从发展农业灌溉转为向城市供水，调水工程的规模和艰巨性也逐步增加，调水工程的分布范围也日益广泛。据不完全统计，目前世界上已建、在建或拟建的大型跨流域调水工程有 160 多项，遍布世界各个地区。

调水工程一般包括水源工程、输水工程和配套供水工程，其中输水工程往往包括明渠、管道（箱涵）、闸阀、调节井、倒虹吸、泵站、通气井等输水结构和设施，是调水工程建设难点和关键所在。在输水工程运行调度过程中，为了满足适时、适量、安全、经济输水的要求，需要把握输水系统在不同输水方式、不同调度方式下（包括在流量调节、事故停泵、应急处置、检修、不对称输水、充水过程等工况下）输水系统的压力、水位、流速和流量等水力参数的变化规律，通过优化水力调控来提高工程的安全性和经济性。输水工程的水力调控具有“长距离输水—水流惯性大一滞后性明显，多用户—用水需求多变—水力调控频繁，地形多变输水建筑物多种—水流衔接条件复杂，纬度跨度大的输水工程冰期输水冰害控制难度大”的特点，是调水工程必须解决的全局性关键技术难题。

1.1.1 国外输水工程

输水工程发展历史悠久，早在公元前 3400 年，埃及就开始引尼罗河水灌溉沿岸土地；公元前 3000 年，印度沿着印度河发展引水灌溉。但是直到第二次世界大战，全世界仅有几十条灌溉渠道。

20 世纪 50 年代以来, 国外大规模的调水工程发展较快, 国外许多国家如美国、苏联、加拿大、法国、澳大利亚、巴基斯坦、印度等, 都进行了较大规模的跨流域调水工程的建设和规划, 国外较主要的大型调水工程如表 1-1 所示。

表 1-1 国外已建 (含在建) 的大型调水工程基本资料

国家	工程名称	水量调出区	水量调入区	调水方式	引水流量 (m^3/s)	年调水量 (亿 m^3)	输水渠道长 (km)				灌溉面积 (万 km^2)	开工年份
							总长	渠道	管道	隧洞		
美国	中央河谷	萨克拉门托河	圣华金地区	提水	636	134	986	700		21.3	109.84	1937
美国	加州水利	费瑟河等	南加州地区	提水	292	52		1028		12.7	29.10	1959
加拿大		尼切克河	凯马诺电厂	自流	185				16.3			1925
埃及	努巴里亚	尼罗河	努巴里亚	提水	116			150			2050	1966
前苏联		额尔齐斯河	努拉河	提水	75	25	458				7.3	1962
巴基斯坦	西水东调	印度河	巴基斯坦东	自流	1492	160	593	593			153.10	1960
法国	普罗旺斯	迪朗斯河	唐德贝尔湖	自流	40		210	90		120	5.99	1963
澳大利亚	雪山工程	雪山河	莫累河	自流		23.7	644	76		135	53.50	1940
印度		比阿斯河	萨特累季河	自流	225	47	40			25	53.30	1960
罗马尼亚		多瑙河	罗通海湖	提水	200	20					34.95	
德国		多瑙河	莱茵河	提水	27	3			100			1974
伊拉克	塞尔萨尔	底格里斯河	塞尔萨尔河等	自流	600			177				1956
西班牙	北水南调			提水	66	10						
秘鲁	马赫斯			自流	260					95	5.99	

各国修建调水工程的目的和用途不同, 加拿大已建调水工程主要用于发电, 以向美国出口电代替出口水; 印度和巴基斯坦的调水工程则几乎都是以灌溉为目的的; 前苏联调水工程以灌溉为主, 城市和工业供水为辅, 兼顾发电和航运; 美国调水工程则大多以城市和工业供水为主要目的, 兼顾灌溉和发电。

1.1.1.1 美国中央河谷工程

中央河谷地区是美国加利福尼亚州中部的大地槽, 位于内华达山脉与沿岸山脉之间, 为一南北长 700km, 东西宽 90km 的平坦的冲积平原。河谷内大部分径流集中在萨克拉门托 (Sacramento) 河和圣华金 (San Joaquin) 河内。中央河谷是加州著名的农业地带, 可耕地面积约 400 万 hm^2 , 由于土地肥沃, 是美国最大的水果生产基地, 还盛产棉花、谷物以及蔬菜等。河谷北部多年平均降雨量为 760mm, 南部只有 200~400mm, 部分地区不到 100mm, 素有“荒漠”之称, 雨水北丰南缺。河谷内耕地 2/3 位于南方, 而北方的水资源却占了全河谷的 2/3。河川径流量有 70% 产生于河谷以北, 而河谷以南的需水量占全河谷总需水量的 80% 以上。河谷内 3/4 的降水量主要集中在 12 月至次年 4 月的冬春两季, 而农业的主要需水季节则为夏秋季。图 1-1 是美国中央河谷工程输水线路示意图。

为解决加利福尼亚州中部和南部干旱缺水及城市发展需要, 美国兴建了中央河谷工程 (Central Valley Project), 将河谷北部萨克拉门托河的多余水量调至南部的圣华金流域, 以解决河谷南北水量不平衡的问题。该工程在 1937 年开工, 1982 年大部分工程竣工, 共

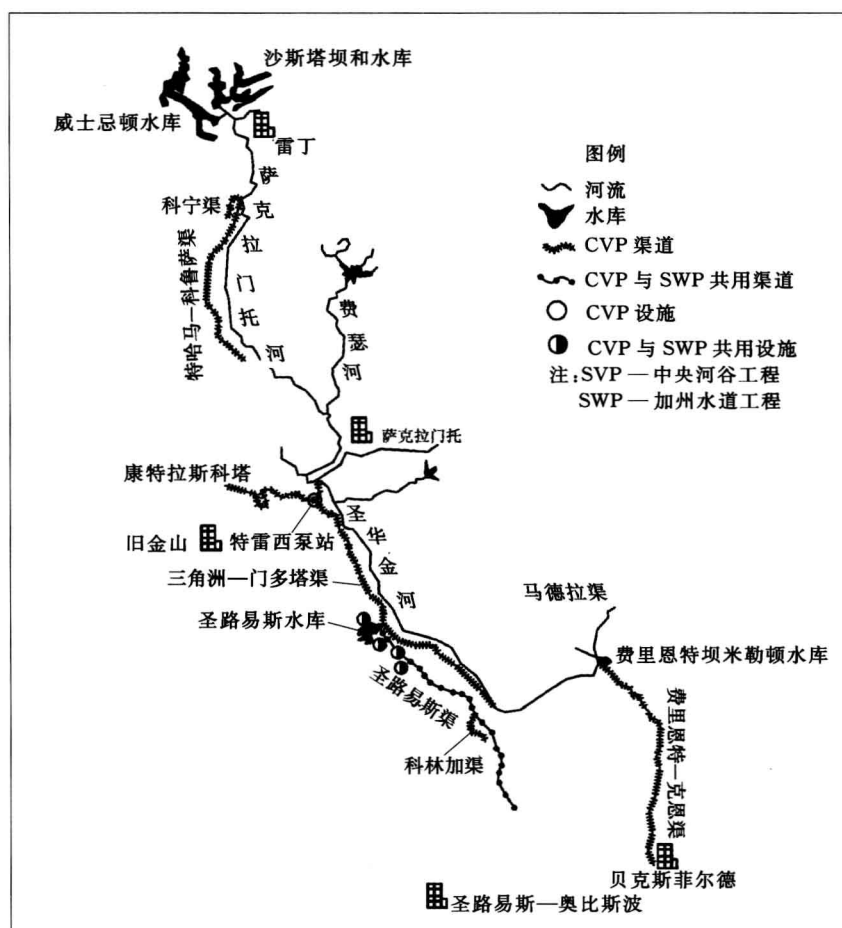


图 1-1 美国中央河谷工程输水线路示意图

建成水库 19 座，总库容 154 亿 m^3 ；输水渠道 8 条，总长 986km；水电站 11 座，总装机容量 163 万 kW，泵站 9 座。工程平均年可供水 134 亿 m^3 ，其中满足原有水权要求 45 亿 m^3 ，兴利水量为 89 亿 m^3 。预计完成全部已批准的工程后，尚可增加供水 7 亿 m^3 。

按照设计，初期工程主要调水路线是：在丰水的河谷北部萨克拉门托河上游兴建沙斯塔水库（Shasta，总库容 55.5 亿 m^3 ），将汛期多余的洪水拦蓄起来，在灌溉季节将水经萨克拉门托河下泄至萨克拉门托—圣华金三角洲，经三角洲横渠（Delta Cross）过三角洲到南部的特雷西（Tracy）泵站，经该泵站将水分成两股：一股入康特拉—科斯塔（Contra Costa）渠输水到马丁内斯水库（Martinez），向旧金山地区供水；另一股通过三角洲门多塔（Delta—Mendota）渠流入弗里恩特水库（Friant，总库容 6.4 亿 m^3 ），最后通过弗里恩特—克恩（Friant—Kern）渠把水调向南部更缺水的图莱里（Tulare）湖内陆河流域。

为满足工农业生产及城市迅速增长的需水要求，陆续在萨克拉门托河的北部大支流亚美利加（American）河上兴建了斯莱公园水库（Sly Park）、福尔瑟姆水库（Folsom，总

库容 15.5 亿 m^3) 和宁巴斯水库 (Nimbus); 在加州北部单独入海的特里尼蒂 (Trinity) 河上兴建特里尼蒂水库 (总库容 30.9 亿 m^3), 同时开凿了 17.4km 长的克利尔河 (Clear Creek) 隧洞将水调入萨克拉门托河, 增加向南部的可调水量。

为提高从三角洲向南调水的能力, 在输水干渠中段还建了一座旁引水库, 即圣路易斯水库 (San Luis, 总库容 25.1 亿 m^3), 与加利福尼亚水道共用; 同时兴建了圣路易斯渠与普莱森特瓦利渠 (Pleasant Valley), 向沿途两岸供水。

除了干渠引水外, 在萨克拉门托河上游还兴建了科宁渠 (Corning)、奇科渠 (Chico) 和蒂黑马—科卢萨渠 (Tehama Colusa), 向沿渠两岸地区供水; 在圣华金河下游支流马德拉河 (Madera) 上兴建马德拉渠, 除满足沿渠两岸用水需要外, 将多余的水引入弗里恩特—克恩渠。

1979~1985 年, 在圣华金河流域下游支流斯坦尼斯劳斯 (Stanialaus) 河上开始兴建新梅洛内斯 (New Melones) 水电站, 该电站水库总库容 29.85 亿 m^3 , 工程以防洪为主, 为三角洲地区的径流调节起了重要作用。

中央河谷工程是美国为解决加利福尼亚州中部和南部地区干旱缺水及城市发展需要而建设的 4 项调水工程之一, 主要在灌溉、水力发电、城市及工业用水、防洪、抵御河口盐水入侵、环境和发展旅游等方面取得巨大的经济效益和社会效益。

灌溉: 工程对发展河谷地区农业灌溉起到很大的作用, 在控制范围内的可灌面积约为 153.3 万 hm^2 , 包括补水灌区在内, 1982 年实灌 110 万 hm^2 。

水力发电: 工程中的水电站所发出的电能, 约有 1/3 用于泵站抽水, 其余并入电网销售。水电收入是偿还工程投资的重要来源。

城市及工业用水: 工程的水源也承担城市及工业用水任务。例如, 康特拉—科斯特渠将水送到马丁内斯、安蒂奥克、匹兹堡等城市, 为钢铁、炼油、橡胶、造纸、化工等工厂及居民供水。

防洪: 沙斯塔、弗里恩特、福尔瑟姆等大型水库及其他小水库, 都留有一定的防洪库容, 为减小中央河谷地区的洪涝灾害发挥了主要作用。

抵御河口盐水入侵: 旧金山海湾的海水经常倒灌入萨克拉门托—圣华金三角洲, 对洲内 14.4 万 hm^2 土地造成盐化影响。从沙斯塔等水库流出来的流量, 经三角洲横渠输送到三角洲地区, 有抗拒盐水入侵的能力, 有利于土地耕种。

旅游: 工程内旅游胜地很多, 如沙斯塔水库、威士忌顿水库等, 每年吸引大批游客前来参观游览。

中央河谷工程具有如下特点:

(1) 在调水工程的起点, 都建有控制性大型骨干水库, 使水源得到充分的保证。

(2) 水库多数建有水电站, 在引水、防洪、发电等方面发挥多目标效益。中央河谷工程的发电量为抽水用电量的 3 倍。

(3) 为了适应灌区地形上的要求并使渠系工程量减少, 采取该扬则扬的手段, 特雷西水泵站都具有很大的规模。跨过分水岭后可利用水头发电, 同时较多地采用了可逆式抽水蓄能机组。

(4) 在跨流域调水工程系统中, 又重复套入了跨流域调水措施。例如中央河谷工程的

首部从特里尼特河调水入萨克拉门托河。

(5) 调水工程规模宏大, 用混凝土衬砌渠道作远距离调水, 有的调水距离超过 700km, 工程配套, 水资源利用的效益显著。

(6) 中央河谷工程与另几个调水工程一样, 已装备了遥控和集中控制系统, 有些主要渠道的控制性工程已做到无人管理的程度。

1.1.1.2 美国加利福尼亚州调水工程

加利福尼亚州 (以下简称加州) 调水工程 (California State Water Project) 是美国为解决加州中部和南部地区干旱缺水及城市发展需要而建设的 4 项调水工程之一, 其部分目标与中央河谷工程相同, 并把调水范围延伸到加州南部的洛杉矶地区。该工程原称为费瑟河及萨克拉门托—圣华金三角洲引水工程, 于 1951 年由加州议会批准, 1960 年加州议会通过发行 17.5 亿美元公债兴建的, 全部工程分两期完成, 第一期工程于 1959 年开工, 1973 年底主要工程竣工, 可供水 28 亿 m^3 , 丰水年可达 37 亿 m^3 。第二期工程完成后, 供水量可达 52 亿 m^3 。全部工程包括水库 23 座, 总库容 71 亿 m^3 , 输水干支渠 5 条, 总长 1028km, 泵站 22 座, 总扬程 2396m, 水电站 6 座, 总装机容量 136 万 kW, 年均发电量 66 亿 kW·h, 泵站抽水耗电约 125 亿 kW·h。加州调水工程调入南加州的水量占整个工程供水量的 59%, 除保证城市工业用水外, 还具有防洪、灌溉、水力发电及旅游等综合效益。

加州调水工程主要调水路线是: 在萨克拉门托河支流费瑟河北支上游兴建 5 座小型水库 (费伦奇曼湖、安蒂洛普湖、戴维斯湖、阿比桥湖和迪克西雷夫奇湖, 总库容 2.76 亿 m^3), 在费瑟河干流上游兴建大型蓄水库——奥罗维尔湖 (Oroville, 总库容 43.6 亿 m^3)。从该水库放出来的水经费瑟河与萨克拉门托河下泄后到达胡德 (Hood), 然后分成两支, 主流继续沿萨克拉门托河下泄, 另一支沿周边 (Peripheral) 渠道输水, 两支穿越萨克拉门托—圣华金三角洲到达其南部的克利夫顿考特 (Clifton Court) 前池, 经三角洲泵站将 292 m^3/s 的水提升 74m 后进入贝瑟尼 (Bethany) 水库, 经加利福尼亚水道自流 108km 进入奥尼尔前池 (O'Neill), 由泵站抽水入加州调水工程与中央河谷工程共用的圣路易水库 (San Luis, 总库容 25.1 亿 m^3)。由圣路易斯水库起, 主流继续沿加利福尼亚水道向东南方向流动, 经多斯博卡斯 (Dos Bocas)、比尤纳维斯塔 (Buena Vista)、惠勒里奇 (Wheeler Ridge) 和温德加普 (Wind Gap) 4 级泵站 (总扬程 326m) 提升, 到达埃德蒙斯顿 (Edmonston) 特大泵站, 该泵站将水提升 587~965.3m 高程, 再经过总长达 12.7km 的 2 条隧洞、4km 长的 2 条虹吸管道穿越塔哈查皮山 (Tehachapi) 至塔哈查皮后池, 主水道然后经梨花 (Pearblossom) 泵站和莫哈韦 (Mojave) 虹吸管道至锡尔弗伍德 (Silverwood) 湖, 再经圣贝纳迪诺 (San Bernadino) 隧洞、德弗尔峡 (Devil Canyon) 水电站和圣安娜 (Santa Ana) 管线, 最后到达佩里斯 (Peris) 湖, 向加州南部洛杉矶地区供水, 工程示意图见图 1-2。

除干渠调水以外, 沿途还修建了 4 条支渠, 它们是:

(1) 北湾 (North Bay) 水道, 从萨克拉门托—圣华金三角洲引水, 经卡尔洪 (Calhoun)、特拉维斯 (Travis)、科迪利亚 (Cordelia) 以及因特里姆 (Interim) 4 级泵站向西将水调到 42.6km 以外的纳帕 (Napa) 分水库, 供索拉诺县和纳帕县的工业和城市给水

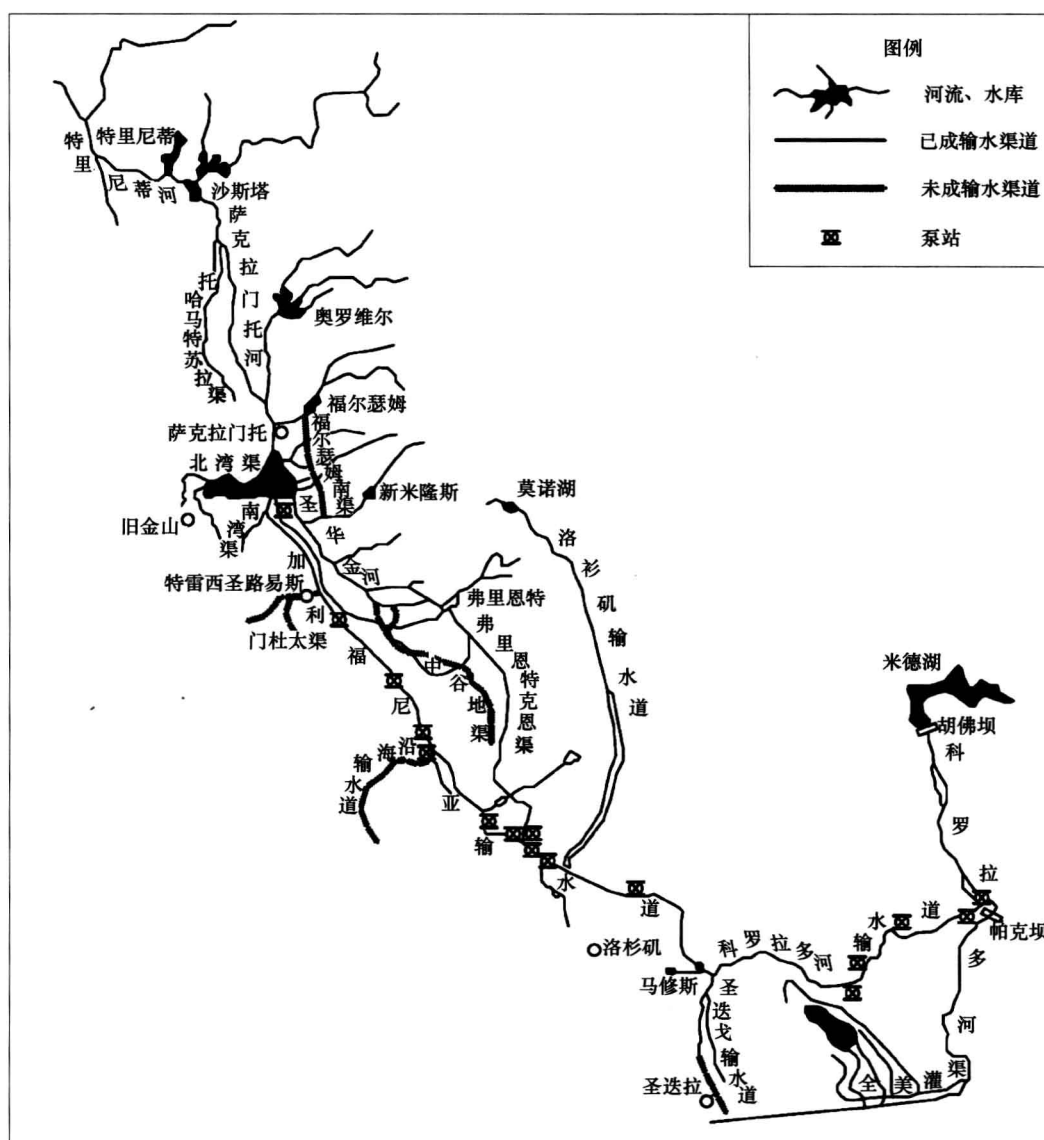


图 1-2 加州调水工程输水线路示意图

之用。

(2) 南湾 (South Bay) 水道, 将贝瑟尼水库的一部分水经南湾泵站和德尔瓦耶 (Del Valle) 泵站向西抽至德尔瓦耶水库, 然后通过拉科斯塔 (La Costa) 隧洞和米申 (Mission) 隧洞将水向西南方向调至圣克拉拉 (Santa Clara) 终端水库, 向沿途地区及圣克拉拉县防洪及水管区供水。

(3) 沿岸 (Coastal) 水道, 在凯特曼市以下大约 20km 处从加利福尼亚引水干渠引水, 经拉斯佩里拉斯 (Las Perillas)、拉德杰希尔 (Radger Hill)、德弗尔斯登 (Devil's Den)、索图斯 (Sawtooth) 和波洛尼奥 (Poloni) 5 级泵站 (总扬程 536m) 提升将水向

西输送至圣马格里塔, 然后向南经圣路易斯奥比斯波 (San Luis Obispo) 水电站到达圣玛丽亚 (Santa Maria) 终端水库, 向沿渠两岸地区及圣巴巴拉县防洪和水保区供水。

(4) 西水道 (West Branch), 从加利福尼亚水道干渠上的塔哈查皮后池引水, 经奥索 (Oso) 泵站提升后, 向西经奎尔 (Quail) 湖, 再向南流入金字塔 (Pyramid) 水库, 水流跌落 198m, 再经直径 8m、长 11.6km 的安杰莱斯 (Angeles) 隧洞进入卡斯泰克 (Castaic) 水电站, 最后到达卡斯泰克水库。

1.1.1.3 加拿大詹姆斯湾调水发电工程

詹姆斯湾工程是加拿大拉布多拉半岛詹姆斯湾东岸的一项水电开发工程, 又名拉格朗德 (La Grande) 流域工程, 其工程示意图见图 1-3。该工程始于 1971 年, 至今尚未竣工。工程前期投资额 137 亿美元。拉格朗德河是加拿大詹姆斯湾五大水系之一, 蕴藏着丰富的水能资源, 尤其是下游干流 440km 河段内有落差 360m, 水电资源集中, 干流分四级开发。詹姆斯湾工程计划从伊斯特曼河、欧皮纳卡河和坎尼亚皮斯科河向拉格朗德河上修建的水库大量调水, 从而使拉格朗德河的平均径流量由 $1700\text{m}^3/\text{s}$ 增加至 $3300\text{m}^3/\text{s}$ 。一期工程包括其中三座梯级, 拉格朗德 II 级 (LG-2) 坝和水电站于 1982 年完工, 该电站发电容量达 5328MW, 具有当时世界最大的地下发电厂房。LG-2 坝拥有一条分层的溢洪道, 其高度相当于尼亚加拉大瀑布的 3 倍。拉格朗德 III 级 (LG-3) 电站和拉格朗德 IV 级 (LG-4) 电站分别于 1984 年 2 月和 1984 年 5 月竣工。LG-4 电站的完工也标志着一期工程的结束, 并将魁北克水电工程装机容量提高了 10300MW。

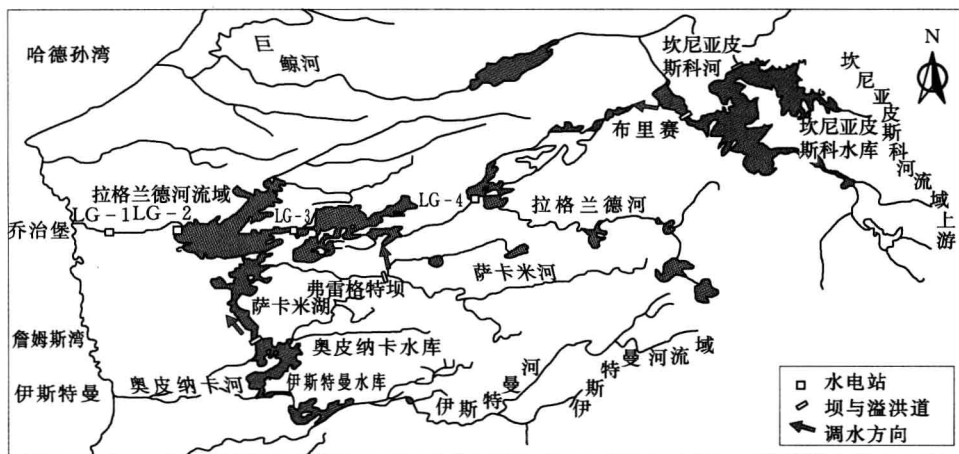


图 1-3 加拿大詹姆斯湾调水发电工程示意图

二期工程于 1989 年开工, 至今尚未竣工。首先建设的是拉格朗德 I 级 (LG-1) 电站工程, 该工程位于詹姆斯湾地区拉格朗德河河口。詹姆斯湾二期工程包括拉格朗德 II 级二期工程 (LG-2A), 拉福齐河的两座电站, 巨鲸河 (Great Whale) 综合工程及位于巨鲸河、诺丁威河和鲁珀特河 (Rupert River) 上的大坝工程。詹姆斯湾一期和二期工程估计在 9 条未开发河流上建坝, 库区淹没面积相当于比利时国土面积。两期工程总装机容量为 27000MW, 预计总投资额达 630 亿美元。

詹姆斯湾二期工程的电能计划向美国纽约州、新罕布什尔州、缅因州和佛蒙特州出

售。1992年,当时的纽约政府官员 Mario Cuomo 命令纽约州能源局,取消与魁北克公司签订的合同以鼓励节约能源,并从其他地方购买电能。由于缺少市场需求,魁北克政府和水电公司宣布无限期推迟巨鲸河综合工程(规划电力装机容量 316 万 kW,年发电量 163 亿 kW·h)。因此在 90 年代实际建成的是 LG-1、LG-2A,拉福齐河梯级和引水自坎尼亚皮斯科水库的布里赛电站共计 520.8 万 kW。

詹姆斯湾第二期工程的另一部分,也就是目前魁北克水电委员会宣传的第三期工程,是在 2002 年克里人和魁北克水电公司及詹姆斯湾工程达成一个新的协议之后开始的。这一协议将在 50 年内付给克里人约 45 亿加元的赔偿,建立特殊野生动物与林业制度,同时保证克里人的企业和工人在这一地区工程中获取一定份额。作为回报,克里人不再反对在一系列环保和社会发展规划管制下进行包括 Eastmain-1 电站(政府在 1993 年 3 月授权),以及将鲁珀特河引入 LG-2 水库的工程。2004 年新的协议同意在鲁珀特河和伊斯特曼河继续新建装机 888MW 两个水电站项目,将鲁珀特河 71% 流量经 314km² 引水水库引入伊斯特曼河(此河流在前面的工程中已经引入拉格朗德 II 级水库)。后一部分项目在 2005 年被克里人酋长在选举中再次反对,但是 2007 年项目工程得到许可,并计划在 2012 年建成——过去十年中已经投资约 50 亿美元,其中 1.2 亿美元用于环境保护。

目前建成工程包括拉格朗德河 4 个梯级五座水电站(二级包括两期厂房)共计 13648MW 装机和 1420 亿 m³ 库容(有效库容 525.5 亿 m³,为该河原平均年径流量 546 亿 m³ 的 95%);自卡尼亚皮斯科河(Caniapiscou)建设的卡尼亚皮斯科水库(库容 538 亿 m³,调节库容 390.7 亿 m³)和引水至拉福齐河的布里塞(Brisay)水电站装机容量(469MW),引用原本作为科克索克河支流的卡尼亚皮斯科河上游 45% 的流量至拉格朗德河上游支流拉福齐河上游经拉福奇(Laforge)河 I 级(878MW)和 II 级(319MW)进入 LG-4 电站水库;伊斯特曼河建 Eastmain-1(480MW)电站;位于奥皮纳卡河(Opinaca)与伊斯特曼河上的奥皮纳卡水库(85 亿 m³)将伊斯特曼河和奥皮纳卡河流量引入 LG-2 水库。在建的包括两个电站,鲁珀特河引水项目将鲁珀特河水通过 Eastmain-1 进入 LG-2,同时扩建 Eastmain-1-A 电站,并在奥皮纳卡至 LG-2 水库的水道上建设 150MW 的 Sarcelle 电站,两电站发电及下游梯级新增年发电量约 87 亿 kW·h。另有最初规划的 Eastmain-2 电站 250MW 目前还不清楚是否决定以及何时开始建设。

目前已经建设 9 座水电站的总装机达到 16500MW,计入在建 17418MW,年发电量达到 83.8TW·h(WIKI 数据 85.7Tw·h,国内数据没有算 Eastmain-1)与三峡相当,约占 2010 年加拿大全国水电年发电量的 23%,计入在建鲁珀特河工程则达 92.4TW·h。

拉格朗德河水电资源开发具有以下特点:

(1) 经济效益显著。虽然拉格朗德河远离负荷中心,交通非常不便,所有材料设备和生活供应都需要远距离运输,而且当地气候严寒,施工条件极为困难,工程造价相当高,加上 1100km 长距离超高压输电线,合计单位千瓦投资高达 1422 美元,但是由于较高的利用小时数和水电的低运行成本,北美巨大而高度灵活的电力市场,经济效益仍然十分显著。

(2) 利用当地材料筑坝。就工程上讲,大量采用当地材料建坝(拉格朗德河上三座高