



密云水库调蓄工程安全及 经济运行关键技术与示范

雷晓辉 田雨 吴辉明 王浩 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

密云水库调蓄工程安全及 经济运行关键技术与示范

雷晓辉 田雨 吴辉明 王浩 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书分为理论篇和实践篇两部分：理论篇介绍了梯级泵站输水系统技术体系、梯级泵站输水工程仿真技术、梯级泵站输水工程优化调度技术和梯级泵站输水工程控制运行技术等；实践篇详细介绍了密云水库调蓄工程的明渠输水过程模拟、有压管道输水过程模拟、梯级泵站高效运行优化调度和梯级泵站甩站节能运行等。

本书可作为高职高专水利工程学生的参考教材，也可作为梯级泵站调水工程运行管理业务技能培训用书。

图书在版编目（C I P）数据

密云水库调蓄工程安全及经济运行关键技术与示范 / 雷晓辉等著. -- 北京：中国水利水电出版社，2017.2

ISBN 978-7-5170-5198-5

I. ①密… II. ①雷… III. ①水库调度—安全管理—研究②水库蓄水—安全管理—研究 IV. ①TV697.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第030876号

书 名	密云水库调蓄工程安全及经济运行关键技术与示范 MIYUN SHUIKU TIAOXU GONGCHENG ANQUAN JI JINGJI YUNXING GUANJIAN JISHU YANJIU YU SHIFAN
作 者	雷晓辉 田雨 吴辉明 王浩 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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 14.5印张 284千字
版 次	2017年2月第1版 2017年2月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	55.00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

本书编写人员名单

(排名不分先后)

雷晓辉	田雨	吴辉明	王浩	王超	廖卫红
权锦	卢龙彬	孙嘉斌	杨迁	张召	王家彪
冯珺	李建国	李伟	马良	鲍淑君	蔡思宇
王旭	秦韬	杨明祥	尚毅梓	于茜	张丽丽
张诚	房彦梅	郑艳侠	张志勇	宋巍	刘阳
史晓宇					

前言

随着经济建设的迅猛发展,水资源在各地地区经济发展中的地位越来越重要,由水资源时空分布不均导致的供需矛盾也日渐凸显,跨流域长距离调水工程成为解决这一供需矛盾的主要途径。随着我国调水工程的不断增多,梯级泵站调水工程的作用越来越突出。南水北调来水调入密云水库调蓄工程(以下简称“密云水库调蓄工程”),输水线路长,提水加压扬程高,必须通过梯级泵站加压提水。该工程中共有9级泵站,团城湖—怀柔水库为前6级泵站串联提水,中间无调蓄工程,是由泵站、渠道、闸门等组成的复杂输水系统。怀柔水库—密云水库为后3级泵站串联提水,全长约31km,包括8km原京密引水渠道和新建22km直径2.6m的单排PCCP管道以及约800m的钢管管道,并新建3座加压泵站,输水规模为 $10\text{m}^3/\text{s}$ 。该系统兼具南水北调东线和中线两线工程的特点,即在无调蓄水库条件下,中线串联闸门联合运行控制和东线复杂泵站群运行控制,同时又是无压和有压结合的输水形式,工程调度运行十分复杂,对其进行调度控制不是单一的水力调度或泵站调度问题,而是涉及自动控制、水力机械、水力学等多学科的复杂问题。

密云水库调蓄工程需联合调度控制,中间无调蓄工程;运行时要求尽量保持泵站间流量、水位平衡,尽量减少或防止出现水位大幅上升、下降等情况。如调度不当,则水泵开停机操作频繁、设备使用寿命降低,出现单级或多级泵站临时故障等工况。此外,还需在外界扰动的情况下,保证梯级泵站间的流量平衡,保障系统运行安全;保证各站前池不弃水,节省水资源;尽量不用提高扬程来调节水量,而且使各泵尽量在最优工况点运行,降低运行能耗。因此,建立一个一维水力学仿真模型系统,研究各种工况下渠道中水位、流量的变化,管

道中流速的变化过程和可能产生的水锤影响,以及输水过程中水泵切入切出对渠池中水位的影响,考察渠池中水位的变化幅值与变化速度是否满足衬砌渠道的水位变化约束条件,具有重要意义。

本书分为理论篇和实践篇两部分,理论篇介绍了梯级泵站输水系统技术体系、梯级泵站输水工程仿真技术、梯级泵站输水工程优化调度技术和梯级泵站输水工程控制运行技术等;实践篇详细介绍了密云水库调蓄工程的明渠输水过程模拟、有压管道输水过程模拟、梯级泵站高效运行优化调度和梯级泵站甩站节能运行等。

本书的完成得到了北京市团城湖管理处、北京市南水北调工程建设管理中心的大力支持和协助,在此一并表示真挚的感谢。

由于水平所限,书中缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2016年12月

目 录

前言

理 论 篇

第 1 章 复杂输水工程安全及经济运行技术体系	3
1.1 关键技术研究进展	3
1.2 技术体系总体框架	8
第 2 章 输水工程仿真技术	14
2.1 明渠输水水力过渡过程模拟	14
2.2 有压管道输水过程模拟	40
2.3 明渠-有压交替输水过程模拟	66
第 3 章 梯级泵站输水工程优化调度技术	70
3.1 输水工程管道优化调度技术	70
3.2 梯级泵站节能优化技术	72
第 4 章 梯级泵站输水工程控制运行技术	87
4.1 蓄量补偿控制技术	88
4.2 输水系统自动控制技术	90

实 践 篇

第 5 章 密云水库调蓄工程概述	101
5.1 泵站工程	101
5.2 渠道工程	106
5.3 倒虹吸工程	107
5.4 管道工程	108
第 6 章 泵站抽水装置性能研究	112
6.1 抽水装置及相关概念	112
6.2 抽水装置性能计算方法	114
6.3 B 样条方法拟合水泵装置效率曲线	114

6.4 密云梯级泵站抽水装置性能研究	117
第7章 明渠输水过程模拟及水力特性分析	127
7.1 水力学仿真模型框架	127
7.2 水力学模型验证	128
7.3 恒定流水力特性分析	129
7.4 非恒定流水力特性分析	140
第8章 有压管道输水过程模拟及水力特性分析	155
8.1 有压管道瞬变流计算模型建模框架	155
8.2 水锤波速与计算标准的确定	156
8.3 正常工况下水力过渡过程分析	157
8.4 事故停泵工况下水力过渡过程分析	170
8.5 结论	194
第9章 梯级泵站高效运行优化调度	196
9.1 单级泵站高效运行方案	196
9.2 梯级泵站系统高效运行方案	206
第10章 梯级泵站甩站节能运行	211
10.1 甩站的可行性分析	211
10.2 甩站运行节能分析	213
第11章 结论与展望	216
11.1 水力模拟技术	216
11.2 优化调度技术	217
11.3 自动控制技术	217
参考文献	219

理论篇

密云水库调蓄工程输水线路长，输水工况多，运行控制和调度管理难度大，支撑系统安全及经济运行的关键技术包括模拟、调度和控制三部分。其中，模拟部分主要研究多种工况下梯级明渠输水和有压管道输水核心技术理论，调度部分主要围绕梯级输水工程单泵流量分配、级间扬程分配和考虑不同运行成本下的分时运行展开研究，控制部分主要基于蓄量补偿原理研究多种运行工况下的自动控制关键技术。



第1章 复杂输水工程安全及经济运行技术体系

1.1 关键技术研究进展

1.1.1 复杂输水工程水力仿真研究进展

水力仿真计算作为一门新学科,形成于20世纪60年代,主要用于解决水力学问题中比较复杂的紊流、分离、气穴、水击等流动现象,由于各流动现象数学模型大多具有非线性及非恒定性的特点,受当时数值计算技术及计算机水平的限制,只有少量特定条件下的问题,可通过简化得到其解析解,长期以来,水力学的仿真试验都只能借助于物理模型^[1]。随着数字计算机技术、数值计算技术及系统仿真技术的飞速发展,以计算机作为系统仿真平台的水力数字仿真建模、仿真试验、仿真优化也开始逐渐发展起来,目前已成为复杂长距离输水工程中研究各种水力学、运行调度问题的一个重要手段。复杂输水工程水力仿真主要包括明渠调水工程水力仿真和有压管道输水系统水锤分析研究。

1.1.1.1 明渠调水工程水力研究进展

明渠一维恒定流和非恒定流计算的基础是圣维南方程组。它是一阶双曲线型拟线性微偏分方程组,在数学上无法求得其解析解。在计算机出现以前,常将圣维南方程组进行简化,然后再求解。由于在简化的过程中忽略了方程组中的某些项,因而这类方法适用范围较窄,通用性差。然而随着计算机技术的发展,数值方法逐渐成为求解圣维南方程组的重要手段。1900年,比利时的Massau^[2]运用特征线法相关理论来求解明渠的非恒定流,1945年和1946年,Gray A^[3]和Re R^[4]分别从微波的角度分析求解非恒定流方程组。

国内针对非恒定流的研究虽落后于国外,但国内专家学者针对非恒定流水力模拟等方面已经进行了大量研究,并取得了一系列的成果。钱木金等^[5]提出了用混合网格法求解明渠非恒定流基本方程,该方法具有易于稳定、计算格式为显式的特点。林秉南^[6]采用的特征线等时段法,大大减少了明渠非恒定流求解的步骤。邓家泉^[7]提出了用BGK方法模拟明渠非恒定流过程,推导出了明渠水流运动控制方程,拟解决传统仿真明渠水流方法的不足。杨开林等^[8]针对东深供水工程,采用线性变换方法求解明渠非恒定流方程,模拟效果良好。2013年,张大

伟^[9]以南水北调中线干渠为背景,通过对中线内部节制闸、倒虹吸、分水口等建筑物进行过流特性分析研究,构建了南水北调中线干渠恒定流和非恒定流基本模型,实现了中线干渠水动力数值仿真。2013年,桑国庆^[10]以南水北调东线工程台儿庄一万年闸、万年闸—韩庄输水渠段为研究对象,建立了明渠恒定流和非恒定流数值仿真模型,对各种输水工况下的水力学特性进行了分析研究,并基于大系统分解-协调理论,以水力学仿真模拟的手段,得到了大型梯级泵站输水系统稳定高效运行与控制的耦合数学模型。2015年,刘波波^[11]以密云水库调蓄工程团城湖—怀柔水库段为研究区域,针对该研究渠段开发了渠道、倒虹吸、泵站等建筑物联合运行水力学仿真模型,研究输水系统的水力学特性。在水力学仿真基础上,利用遗传算法进行梯级泵站优化运行研究,得出设计参数下优化运行方案,可为实际工程运行调度提供决策支持。

1.1.1.2 有压管道输水系统水锤研究进展

有压管道输水系统水锤现代研究计算方法是由美国的 Michigan 大学 Streeter V L、Wylie E B 等^[12]首次提出的,解决了图解法在复杂水力过渡过程中求解十分困难的问题,并使水锤分析计算变得简单可行。在水锤防护方面,Humphreys^[13]对不同型号空气阀产生的水锤防护效果进行了对比,为空气阀的选型做出了巨大贡献;日本的秋元德三^[14]出版了《水击与压力脉动》,多方面研究了水力过渡过程,并提出了大量新观点。在断流空腔弥合水锤方面,Kalkwijk 等^[15]经过多次实验,在考虑气液两相性基础上,建立了弥合水锤数学方程的修正方法,并提出了相应的水锤防护措施;David Stephenson^[16]针对空气阀的尺寸和进、出速度,分析了空气阀在水锤防护中起的作用;从20世纪60年代开始,泵站输水系统水力过渡过程的研究在国内飞速发展,刘竹溪、刘光临^[17]出版了《泵站水锤及其防护》,对我国泵站输水系统水力过渡过程的研究起了很大的启蒙作用;1995年,王学芳等^[18]出版的《工业管道中的水锤》则对水电站、泵站及其他系统中的水力过渡过程进行了全面研究;2000年,杨开林^[19]出版了《电站与泵站中的水力瞬变与调节》,简化了相应的特征线法求解过程。

在瞬变流理论和计算方法方面,吴建华等^[20]利用特性线法,针对事故停泵工况,对液控两阶段缓闭阀关闭规律进行了优化;于必录等^[21]对有压输水管道系统的液柱分离进行了大量的理论研究,为液柱分离两相性研究做出了巨大贡献。

武汉大学的刘梅清^[22]基于瞬变流的基本理论和特征线法,建立了水泵、管道、空气阀、渠池、调压塔、单向调压塔等联合运行的复杂调水系统瞬变流计算模型,分析研究了各种典型工况,提出了空气阀、调压塔、单向调压塔等水锤防护元件措施,为梯级泵站调水工程安全稳定运行提供了理论依据和技术支撑。

1.1.2 泵站优化调度运行研究进展

1.1.2.1 单级泵站优化调度运行研究进展

单级泵站优化运行研究是梯级泵站优化运行研究的基础。单级泵站的优化运行研究主要目标是寻求泵站内各机组的优化技术及决策。其核心思路为：在一定输水条件下，根据一定的优化准则和目标，在对泵站内各机组性能充分了解的基础上，考虑相关约束条件，以运筹学为理论基础，利用最优化理论和方法，寻求泵站内最优运行方案。在优化方法上，随着人工智能算法的不断发展，在大多数泵站的优化调度问题中采用了人工智能算法。

近年来，国外一些学者^[23-25]采用多种优化方法对泵站优化运行进行了研究。Vilas Nitivattananon 等^[23]针对单级泵站的实时调度运行问题，在满足输水流量要求下，提出了基于动态规划的优化模型，可有效减少开、停机次数，每年可节约 20% 的运行费用。Zheng Wu 等^[24]采用遗传算法对单级泵站进行了实行优化调度，并对时段内流量、扬程和开、停机等决策进行了优化，以期获得最大运行效率。Dritan Nace 等^[25]根据日需水量，在满足运行约束条件下，寻找出了最优调水流量方案，在优化过程中采用了线性规划法。

与此同时，国内的专家及学者针对单级泵站优化运行开展了相关探索与研究，取得了一系列的研究成果。2003 年，陈守伦等^[26]针对变角和变速泵站的实际运行情况，以经济效益最优为目标，在满足日抽水总量约束下，采用动态规划的方法对各个时段和每台机组的流量过程进行了优化。同年，河海大学的程芳等^[27]针对泰州泵站中转桨式和定桨式轴流泵机组联合优化运行问题，根据调度目标和任务，结合现有机组设备，应用大系统分解-协调技术，建立了包含两层结构的泵站优化运行模型，并在每层采用相应的优化方法进行求解，计算结果表明，所提出的优化模型较为合理，可显著降低泵站的运行成本。2007 年，扬州大学的鄢碧鹏等^[28]针对叶片可调节泵站，将遗传算法和神经网络应用于泵站经济优化运行研究，以泵站总能耗最小为优化目标，建立了泵站内经济运行优化数学模型，并以优化仿真结果为样本案例，采用人工神经网络对其相似工况进行预测，结果表明，遗传算法和神经网络联合应用求解的精度和可靠性较高，可较好地对泵站优化运行问题进行求解。2010 年，扬州大学的程吉林等^[29]采用动态规划法建立了叶片可调节单机组日运行优化模型，以输水费用最小为目标，以时段内的抽水量要求等为约束条件，根据峰谷电价与站上、下水位变化过程划分阶段变量，以各阶段水泵叶片角为决策变量，寻求各时段最优运行方案，并以江都四站为例进行计算，节能效果显著。

1.1.2.2 梯级泵站优化调度运行研究进展

为了实现水资源的合理配置，国内修建了许多大型跨流域、串并联梯级泵站调水工程，如南水北调东线工程——世界上规模最大的泵站群、东江—深圳供水

工程、河北引滦入津工程、万家寨引黄入晋工程——中国最大的引水工程等。在这些已建工程中,梯级泵站输水系统发挥着巨大的作用,但也往往由于机装机容量大、耗能多,具有很大的节能潜力,这也成为许多学者研究如何提高泵站效率、实现高效节能运行的素材。近年来,国内外很多学者^[30-34]对泵站优化调度运行分别采用不同优化方法进行了分析研究。

Savic D A 等^[31]对多个大型配水系统的设计进行了优化研究,运用遗传算法,提出了针对各建筑物(泵站、管道、水库)的优化设计要素,结果显示,优化方案可减少 30%~40% 的运行费。da Costa Bortoni E 等^[32]提出了一种基于动态规划的优化算法框架,实现了在可编程逻辑控制器中的应用,以改善对并联水泵的自动控制,达到节能的目标。Srinivasa Lingireddy 等^[33]运用遗传算法,以机组运行效率为目标函数,对水泵变速调节所节省的费用进行了优化研究。Pulido-Calvol 等^[34]采用动态规划法,针对跨流域梯级泵站调水工程,建立了优化运行模型,研究了其优化运行问题。

近年来,国内对梯级泵站系统的优化运行研究也取得了很多成果。龚懿等^[35]以并联泵站群日提水费用最少为目标函数,建立了优化模型。此方法可用于解决并联泵站群系统不同日均扬程、不同工况调节方式下的日优化运行问题。冯晓莉等^[36]把泵站、输变电设备、输水河道作为大型梯级泵站系统整体考虑,以系统总输入功率最小为目标,建立了优化数学模型,求解采用模拟退火粒子群算法,得出了整个系统的优化运行方案,包括梯级之间的扬程分配、泵站内的开机台数及流量分配等详细指标,结果证明,优化方案可减少运行功率 6.83%。蒋绍阶等^[37]通过系统分析和最优化理论,建立了串联泵站变时优化调度模型,利用动态规划法进行了求解,并把此模型应用于白沙镇供水管网系统,得出了一个调度周期内(24h)各泵站开泵的最佳时间。这套方法可应用于地处山区、城镇供水管网结构类似的系统中。朱劲木等^[38]采用大系统分解协调建模思路,以梯级泵站系统运行成本最低为目标函数建立了梯级泵站系统优化运行数学模型,以单级泵站运行成本最低为目标函数建立了子系统优化模型。在子系统优化中考虑各台水泵机组性能可能不同,采用了不同的解决方式。求解采用遗传算法,经实例验证可大大节省运行费用。此方法适用于泵站内多台不同型号水泵机组的分时段优化调度。2008 年,扬州大学的冯晓莉等^[39]基于分时电价规则,以运行费用最低为目标,采用遗传算法求解,建立了江都排灌泵站优化运行数学模型,确定了泵站不同时段的最优开机组合和机组运行叶片角度。

1.1.3 长距离梯级泵站系统自动控制研究进展

20 世纪 50 年代,美国内务部垦务局(U. S. Department of Interior, Bureau of Reclamation)开始有关渠系自动控制项目的研究,形成了一套比较完整的渠

系运行控制理论,并开发了一系列实用的渠道自动化控制的算法^[40],对提高渠道的输水效率起到了积极的作用。Renault^[41-42]研究了系统层面上的渠道敏感性指标,可以根据要达到的性能而给出控制精度,并对不同的渠道系统进行了定量分析和比较。Liu F 等^[43-44]采用显式有限差分的格式实现了灌渠闸前常水位控制,对多个渠池进行了数值仿真模拟,结果比较理想。Ruiz - Carmona^[45]和 Malaterre^[46-47]等对已有的研究成果进行分析总结,提出了将非线性的输水系统简化成为线性系统,但还没有在实际中得到应用。Rijo^[48]在一条长 141m 的模型渠道上研究了闸前常水位和闸后常水位的 PI 控制过程,为研究渠道自动控制提供了支持。

国内渠道输水运行控制的研究开始较晚,始于 20 世纪 50 年代,虽然发展迅速,但实际应用甚少。20 世纪 80 年代之后,由于国内调水工程的实施和大中型灌区自动运行控制的要求,有些科研单位陆续开展了渠道自动化试行的研究。王念慎等^[49-50]用现代控制理论构建了常水位和等体积实时控制模型,并进行了模型验证,得出了等水位控制比等体积控制简单,计算速度快、精度高等优点。20 世纪 90 年代,武汉大学的王长德等^[51]运用水利自动闸门的控制原理,解决了水利自动闸门运行不稳定问题。之后,王长德等^[52]又针对闸门过流的过程,假设闸门能以任意速度进行调节,提出了 P+PR 与比威尔控制算法相结合的控制方式,并做了比较。近年来,国内学者尝试用现代控制理论^[53-54]、智能控制理论^[55]及模糊控制理论^[56-57]研究渠道运行系统。中国水利水电科学研究院用状态空间法仿真及实验研究了引黄济青工程等容量控制^[58-59]。韩延成等^[59]凭借对年调度的实践经验和优化控制理论,运用两阶段的输水控制方法对渠道进行了数值模拟,结果证明该方法具有响应时间短、闸门调节次数少等优点。目前,许多学者对下游常水位运行方式开展了大量的研究。姚雄等^[60]提出了流量主动补偿的前馈控制方法,并与水位反馈控制相结合来改善闸渠道的响应特性,该模型没有考虑闸门开度变化对上、下游渠道的影响,又由于在流量主动补偿阶段,需要各渠段上游流量变化都要超过下游流量变化,致使各渠段上游流量和闸门开度都有较大的超调,有待进一步改进。丁志良、王长德等^[61]把基于蓄量补偿的前馈控制运用到闸前常水位运行的方式中,并采用 PI 反馈控制对南水北调中线部分渠段进行了仿真模拟,在一定程度上改善了渠道的响应和恢复特性。黄会勇、刘子慧等^[62]根据渠道初始和稳定时候的流量及水位、渠道的蓄量、渠道水位降幅限制和水位波动限制条件等,制定了基于蓄量补偿的前馈控制策略,该方法涵盖了南水北调中线工程调度运行中可能出现的各种运行工况。

目前,国内外对明渠的水动力学计算有了一些研究基础,但大部分研究集中在改进渠道的控制运行算法上。然而还有许多算法仍旧停留在理论研究阶段,未能运用到实际工程中,对于大规模复杂明渠系统的模拟分析和应用还不成熟,自

动控制方式的研究也主要是应用在灌溉工程方面,还不能完全解决大规模调水渠道的整体集中自动控制问题。另外,与国内外已建成的调水工程^[63-64]相比,密云水库调蓄工程梯级泵站调水工程规模大,线路长,前6级中可用于反调节的调蓄工程几乎没有,兼有南水北调中线和南水北调东线两者的输水特点,这些都是当前国内外没有遇到过的问题^[65]。所以,必须从南水北调中线工程总干渠输水安全和稳定性出发,对其展开相应的运行控制研究。

1.2 技术体系总体框架

梯级泵站输水系统一般为解决区域水资源短缺问题而建立,工程线路长、涉及范围广、耗资巨大、建设周期长、投入使用后的运行时间长、能耗大,工程运行及管理水平将直接影响其工程安全问题,并制约其经济效益的发挥。因此,梯级泵站输水工程的需求主要有安全稳定运行和高效经济运行。

本书研究对象——密云水库调蓄工程还涉及明渠反向输水过程,其安全稳定和高效经济运行具有以下难点。

(1) 可利用调蓄能力小。从团城湖到怀柔水库的前6级泵站提水,没有任何调蓄工程可以调节,完全依靠渠道自身调蓄能力。

(2) 输水通道特征对工程安全运行影响大。密云水库调蓄工程于2015年7月试运行,由于最初设计方案对夏季水草滋生影响考虑的欠缺,给实际工程安全运行带来了较大的难度;输水通道特征对水力学响应的机理研究相对较少,已有研究对密云水库调蓄工程这样的复杂调水工程并不适用。

(3) 环境条件变化。工程试运行过程在利用原有京密引水渠反向输水过程中,遇冬季冰水两相输水模式,其调度模式在国内外尚无实例可以借鉴,各项水力学参数(糙率和局部损失系数)难以确定。

(4) 算法设计技巧复杂。复杂调水工程涉及渠道、PCCP管道、泵站、水闸、倒虹吸等各类建筑物,计算中,通常将这些建筑物作为水动力学模型的内边界条件,这些建筑物水力特性各异,导致渠道内边界条件极其复杂,使得识别季节变化对复杂调水工程水力响应机理研究变得更加困难。

(5) 水力学参数(糙率和局部损失系数)识别方法不易,由于调水工程的复杂性、明渠反向输水的特殊性,需要一套新的技术来进行水力学参数(糙率和局部损失系数)识别。

综上,密云水库调蓄工程中出现的调蓄能力低、多流态、多约束、多起伏、多内边界等复杂水力学和水力控制问题,给复杂调水工程对明渠反向输水响应机制研究带来了更多的困难和挑战。因此,为实现系统的安全、经济运行,必须针对梯级泵站输水系统优化运行调度控制问题开展研究,运用状态空间分析、数学

优化、自动控制等技术对系统各部分进行科学的协调,建立一种安全、经济的调度策略,使系统可以应对各种工况需求,在确保安全运行的条件下,有效降低运行成本,实现其经济效益和社会效益。

如图 1.2-1 所示,梯级泵站输水系统运行技术体系包括模拟、调度、控制三大部分。模拟主要是明渠、倒虹吸、管道、泵站等组成的复杂输水系统的水力模拟;调度主要是单级泵站站内流量优化分配以及基于分时电价的梯级泵站的扬程优化分配和时段内流量分配等;控制主要是单、多渠道的蓄量补偿自动控制。

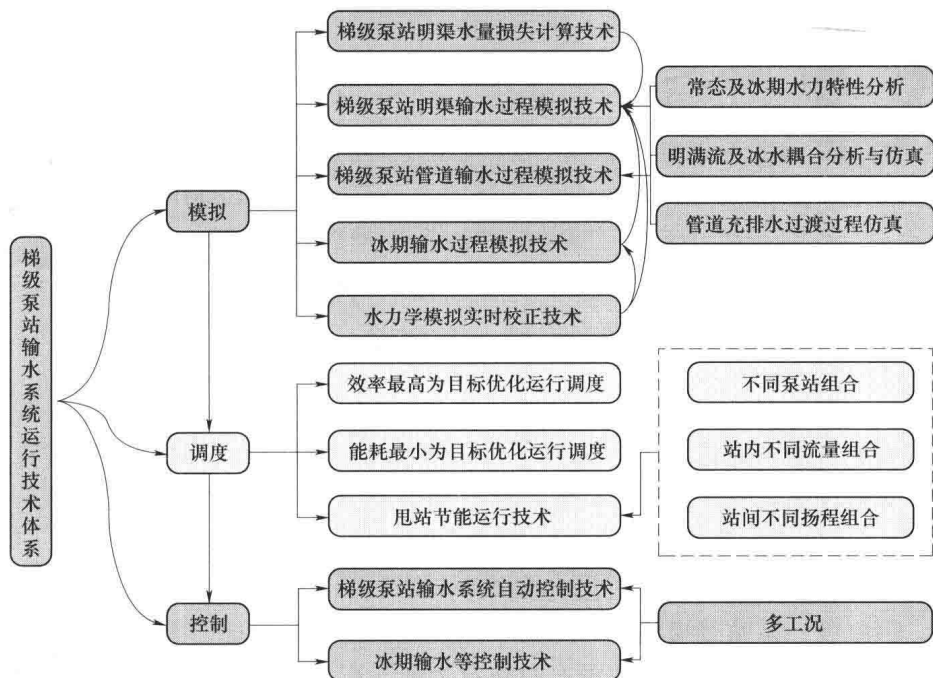


图 1.2-1 梯级泵站输水系统运行技术体系

1.2.1 模拟技术体系

模拟技术体系包括水力学模型实时校正技术、梯级泵站明渠水力学模拟技术、冰期水力学模拟技术以及梯级泵站有压管道水力过渡过程模拟技术等,模拟技术体系如图 1.2-2 所示。

(1) 水力学模型实时校正技术。运用水力学模拟模型计算不同影响因素下明渠反向输水各渠段的水力学参数(糙率和局部损失系数),结合数据同化技术建立以水位、流量、糙率和局部损失系数为状态量的实时校正模型,实现状态量的校正和模型参数的自动调整,提高水力学模型的计算精度;运用数据同化技术反演出一套无限接近实际运行工况的泵站特性曲线。

(2) 梯级泵站明渠水力学模拟技术。构建一维非恒定流水力学仿真模拟模