

GAOYANGCHENG TIJI BENGZHAN
JIENENG JIANGHAO GUANJIAN JISHU YU FANGFA

高扬程梯级泵站 节能降耗关键技术与方法

徐存东 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高扬程梯级泵站 节能降耗关键技术与方法

徐存东 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共 8 章,第 1 章综述了梯级泵站节能降耗问题的研究意义以及研究现状,第 2 章提出了评估泵站提水效率和能耗水平的理论模型和方法,第 3 章至第 6 章具体论述了水泵机组、传动装置、进水管路、进出水池以及辅助设备对泵站能耗的影响机理和技术节能途径,第 7 章和第 8 章分别介绍了梯级泵站的运行工况调节和优化调度的技术方法。

本书可供水利水电工程专业的本科生、研究生及从事泵站运行和管理专业的科研、教学和工程技术人员学习和参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高扬程梯级泵站节能降耗关键技术与方法 / 徐存东
著. — 北京:中国水利水电出版社, 2014.9
ISBN 978-7-5170-2594-8

I. ①高… II. ①徐… III. ①水利工程—泵站—节能—研究 IV. ①TV675

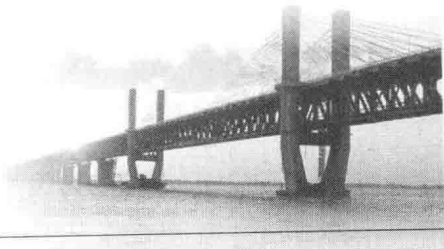
中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第233838号

书 名	高扬程梯级泵站节能降耗关键技术与方法
作 者	徐存东 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 14 印张 332 千字
版 次	2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	49.00 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

前言



随着世界经济的快速发展，能源的消耗越来越大，能源危机和由此引发的各种矛盾越来越突出。当今，能源问题已成为世界各国共同关注的大问题，严重影响着世界各国的政治和经济形势。我国的能源形势也非常严峻，能源不足已经严重影响到国民经济的发展，其中农业机电排灌每年都消耗了大量的能源，其用电量约占社会用电总量的 21%，受建造技术和管理水平的影响，我国的农业机电排灌的用电效率还比较低，机电排灌的节能潜力十分巨大。特别是高扬程梯级泵站的低效率、高能耗问题一直备受学者们的关注，因此，开展高扬程梯级泵站的能耗评估和节能降耗关键技术的研究具有重要的现实意义。

针对梯级泵站节能降耗关键技术的应用研究内容主要涵盖两个方面：一是研究监测和评估泵站提水效率和能耗水平的理论与方法；二是研究影响泵站提水效率和能耗的主要因素和影响机理，研发科学实用的节能降耗技术与方法。通过以上两方面的研究，其一，可为大型泵站客观地开展能耗评估提供科学的理论依据和必要的技术方法；其二，通过探究水泵机组、传动装置、进出水管路、进出水池以及辅助设备对泵站能耗的影响机理，为同类泵站的规划设计和更新改造提供技术支持；其三，通过探究泵站运行效率的调度管理技术，为已建泵站的科学调度提供技术支持，并为高扬程灌区节约运行成本、提高用水效率提供决策依据。

本书通过建立基于动态平衡的梯级泵站输水系统提水效率的评估模型，分析了我国代表性的高扬程梯级扬水灌溉工程的实际能耗状况和水平；从工程的建造技术和优化运行控制的角度，研究了高扬程梯级泵站节能降耗的关键技术与方法。具体内容包括：①通过分析影响泵站能耗的主要因素和影响机理，从优选机组、提高机组的装置效率、改善泵站设备（设施）的流态，减少能耗损失等建造技术的角度，探讨梯级泵站节能降耗的关键技术，为梯级泵站的规划设计和更新改造提供技术支持；②从影响水泵提水效率的高含

沙水流、水泵进出水管路、配套电机和附属设施等多角度分析影响水泵提水效率的主要因素，探讨提高水泵的机械效率、容积效率、水力效率的技术方法；③通过模拟研究泵站管道布置型式、前池和吸水管型式、泵阀布置等对水泵内部流态的影响，提出通过改善水泵及其装置内部流态的方法提高泵站提水效率的技术措施；④分析了水泵工况调节方式对其能耗的影响，以及梯级泵站系统区间分水后多级泵站调频运行的节能技术，探索了梯级泵站提高运行效率、降低提水能耗的运行管理和更新改造新技术。

本书由华北水利水电大学徐存东主笔，撰写过程中兰州理工大学樊建领、侯慧敏，华北水利水电大学王燕、韩立炜、张先起、张宏洋等都对本书的撰写提供了重要的参考资料，并提出了忠恳的修改意见和建议。本书的完成和出版得到了“国家自然科学基金（51279064，31360204）”、“2014年度河南省教育厅科技创新人才支持计划（14HASTIT047）”“华北水利水电大学高层次人才科研启动计划（201069）”的资助，在此表示感谢。

本书在编写过程中参考和引用了许多专业书籍、文献资料、教材的论述，同时得到了诸多专家、教授的指导，他们对本书的编写提出了许多宝贵的意见和建议，在此一并表示衷心的感谢。因编者水平有限，经验不足，缺点和疏误在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2014年8月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 梯级泵站节能概述	2
1.3 国内外研究现状	3
1.4 问题的提出	7
2 梯级泵站的输水效率	9
2.1 梯级泵站输水系统及其特点	9
2.2 基于动态平衡的梯级泵站输水系统运行效率	19
2.3 无监测设备梯级泵站的能耗评估模型与方法	23
2.4 无监测设备的梯级泵站效率评估模型应用	25
2.5 泵站效率评估结果分析	32
3 水泵的运行效率	35
3.1 水泵效率概述	35
3.2 水泵性能与选型	35
3.3 提高水泵效率的途径与方法	44
3.4 含沙水流对水泵效率的影响研究	57
4 水泵装置与运行效率	64
4.1 水泵配套装置对能耗的影响	64
4.2 泵站管路系统对能耗的影响	69
5 前池布置与提水效率	102
5.1 泵站前池	102
5.2 泵站前池的泥沙淤积	106
5.3 前池流态数值模拟	111
5.4 前池参数对水泵进水流态的影响	123
5.5 改善前池流态的技术措施	138
5.6 进水池附属结构与泵站能耗	150
6 出水池布置与泵站能耗	156
6.1 出水池的布置形式	156
6.2 出水池布置与流态	156

6.3	出水池结构与泵站能耗	159
6.4	出水管的出流形式与泵站能耗	163
6.5	出水流道对能耗的影响	166
7	泵站的工况调节	169
7.1	实际工况与设计工况的比对	169
7.2	运行工况点的确定	176
7.3	泵站工况调节的主要方式	178
7.4	不同调节方式下泵的能耗分析	189
8	梯级泵站运行的优化调度	192
8.1	概述	192
8.2	梯级泵站的优化调度系统	192
8.3	梯级泵站优化调度对象	194
8.4	梯级泵站优化运行	197
8.5	梯级泵站优化调度模型的建立及求解	202
8.6	梯级泵站的科学管理	210
	参考文献	212

1

绪 论

1.1 研 究 背 景

能源是经济社会发展的重要物质基础。当今世界经济飞速发展,带动了生产的不断发展和生活水平的不断提高,而高度发达的现代化为人类创造出巨大财富的同时,也造成了极大的能源消耗和浪费。自20世纪70年代石油危机以后,能源已严重影响世界各个国家的政治和经济形式。能源问题已成为世界各国共同关注的大问题,为了解决能源问题,很多国家在积极研发和利用新能源的同时还在积极开展各种节能活动。

我国的能源形势非常严峻,能源不足已经严重影响到国民经济的发展。从20世纪80年代开始,我国政府就投入大量资金实施节能基本建设和技术改造,使国家重点考核的60多种工业产品的能源单耗指标有了较大幅度的下降,这些措施使我国能以较低的能源增长速度支持了国民经济的高速增长。但与国际先进水平相比,目前我国物理能耗水平仍比国际先进水平高出20%~30%,差距十分明显。因此,在加速开发新能源的同时,研究并推广各种节能措施,合理使用现有能源,已是当务之急。

我国的农业机电排灌每年都消耗大量的能源,其用电量约占社会用电总量的21%,由于受建造技术和管理水平的影响,我国的农业机电排灌的用电效率还比较低,机电排灌的节能潜力十分巨大。为节约能耗、提高排灌用电的效率,有关的泵站节能管理技术和设备建造技术方面的研究得到了世界各国的重视。国内外在泵站节能领域投入了越来越多的资金,开展了大量的科学研究,也取得了很多重要的研究成果。我国政府十分重视节能减排工作,一直在倡导绿色经济,并已将节能减排提升到了国家的重要建设目标之一。

随着我国工农业生产的快速发展,机电排灌事业也得到了飞速的发展。据统计,截至1980年,沿黄河建设有大中型抽黄水泵12万台套,总容量约340万kW。从20世纪80年代开始,黄河上的灌溉用泵就以每年2万台,装机容量40万~50万kW的速度增加,装机容量越来越大,提水扬程越来越高,并且以多梯级的提水灌溉工程为主。我国的高扬程梯级提灌工程大多集中在甘肃、宁夏、山西、陕西等省(自治区),这些工程总扬程可高达400.00~800.00m,单级泵的扬程达80.00~182.00m。

长期以来,国家对西北干旱区的大型提灌工程在政策与资金等各方面都给予了大力支持,以甘肃省景泰川电力提灌工程和宁夏固海扬黄灌溉工程为例,为保证这些地区的农业灌溉,政府仅以0.04元/(kW·h)的远低于成本价的补贴电价补助灌区,以保证这些提灌工程的正常运行。近年来,国家又投入了大量的资金和人力物力对工程进行更新改造和续建配套,正是这一系列的扶助与支持,使得我国诸多梯级提灌工程自建成以来,就产生了良好的综合效益,为当地老百姓带来了巨大的实惠,同时对自然环境的改善也做出了巨大的贡献。



但是在市场经济环境下,随着灌溉面积的扩大,农业种植规模的增长,提灌工程用电费、水费远低于成本的矛盾日益凸现出来。以前,国内的电力提灌工程建设,比较关注工程所带来的社会效益和生态效益,而对工程的运行成本和科学管理考虑不足。长期以来,受到资金、管理观念、技术水平等方面的约束,国内的梯级提灌工程对泵站的提水效率大都没有进行有效监测,针对大型梯级泵站的节能降耗技术的系统性的研究也略显不足。

目前,农业排灌用电供需矛盾日益加剧,已严重制约了这些工程效益的正常发挥,如何提高泵站的提水效率,有效地降低能耗,直接关系到高扬程梯级灌区的可持续发展,关系到灌区周围生态环境的改善,也关系到灌区农户的利益和水管单位的生存与发展。所以,积极开展高扬程梯级提水灌溉工程节能降耗关键技术的科学研究,对于解决这些矛盾、促进高扬程灌区的可持续发展具有积极而深远的意义。

大量的科学研究表明,排灌泵站的节能降耗应该贯穿于泵站的设计、建设、运行管理、技术改造等各个方面。开展高扬程梯级提水泵站实际能耗的评估方法研究,客观地评估泵站装置系统和灌区输水系统对泵站能耗的影响,研发适合高扬程灌区的科学、实用的节能降耗的关键技术,可作为高扬程灌区节约运行成本、提高工程运行效率的决策依据,也可大型泵站的更新改造提供技术支持,同时为我国同类工程的规划设计和运行管理提供可参考的理论依据。这既是农业排灌工程建设的需要,也是国家节能减排的要求。

1.2 梯级泵站节能概述

泵站节能是指减少泵站耗能的技术措施及其效果的总称(《农业大辞典》注释)。即在满足农田灌溉或排水要求的前提下,最大限度地减少泵站不必要的能量损耗,以提高泵站效率 and 经济效益。泵站节能的途径和方法是多方面的,总结起来包括:加强水泵机组的维修管理;提高机、泵、传动设备的效率;减少管路和进、出水池的水力损失;减少灌溉水量损失;控制水源含沙量等。对于计划兴建的泵站,应该认真做好规划设计,根据建站条件选择高效水泵,合理配套动力机和传动装置,正确设计管路和进出水池,使泵站既能满足设计年份的流量要求,又能使泵站在多数年份中的运行效率高,能源消耗少。对于已经建成的泵站,应该通过测试,找出效率低、能耗大的主要因素,经过技术经济分析,对不合理的部分进行改造。

梯级泵站工程一般由泵站、级间输水渠道(管道)、闸门、倒虹吸等多种水工建筑物组成。各级泵站内部又包括水泵、流道、电机、变压器等设备。各单个泵站是系统的主要控制单元,泵站之间通过输水河道串联,即各级泵站之间存在密切的水位、流量关系。同时,梯级泵站系统在输水、供水的同时,往往还承担了灌溉、防洪排涝等多种其他功能。因此,梯级泵站输水系统是一项工程结构复杂、内部相互关联、影响因素众多的复杂系统工程,其运行及控制难度较大,只有从整体上对系统的各个方面进行集中协调和管理,才能更好地发挥经济、社会效益。

梯级泵站输水工程复杂,在运行过程中面临着多项技术难题,实际运行中若决策不当,将会造成大量的水量、电力浪费,无法实现经济运行目标。目前,我国梯级泵站工程

的运行中主要存在的问题有：①部分泵站运行中开、停机次数频繁。对于机组不可调节泵站，在运行过程中，由于各级泵站流量匹配偏差或输水工况改变，梯级间水位、流量处于变化中，造成机组被迫频繁开、停机以保持级间水位、流量满足相关要求。机组的频繁开、停机会加速设备损耗，间接增加运行成本。②部分泵站运行效率较低。由于输水过程中的运行工况的动态变化，泵站调度决策不能根据实时流量、扬程变化对机组运行方案进行调节，致使其偏离高效区，造成泵站运行效率偏低、输水成本升高。

梯级泵站输水工程在实际运行过程中，除了保障工程的安全、经济运行外，还需要解决诸如泵站流量调节、水力过渡过程、分水口门分水、水量平衡调节、水位调节等方面的技术问题。因此，梯级泵站的节能降耗研究不仅要考虑单个泵站的效率提高和运行优化，而且还必须准确、全面、系统地分析系统运行过程中的静、动态水力特性，包括级间渠道、各控制建筑物等在内的整个系统进行统筹协调，寻求最优的运行方案。主要采取的措施有：结合现有系统设备条件，运用优化技术对系统各部分进行科学地协调，建立安全、经济的调度策略，在确保安全运行的基础下，有效降低运行成本；建立科学实用的水力仿真模型，对各种可能的运行工况进行模拟分析，确定输水系统的水位、流速、流量等水力参数的变化规律，寻找可靠、经济的输水方案和运行控制方案，为梯级泵站输水系统的高效运行及控制提供参考。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 单级泵站节能研究现状

单级泵站节能研究是梯级泵站节能研究的基础。单级泵站的节能研究主要目标是寻求泵站各机组的优化技术与决策。目前，国内外研究的重点包括泵站机组的性能分析，最优工况的确定以及装置配套优化等。

1.3.1.1 国外研究进展

20 世纪以来，国外的学者采用多种优化方法对泵站节能进行了研究。Vilas Nitivat-tananon 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，有效减少开、停机次数，每年可节约 20% 运行费用。Srinivasa Lingiredd 针对单级泵站运行，以运行效率最高为目标，采用遗传算法对水泵转速进行了优化决策，并定量计算了应用变速调节所节约的提水成本。Zheng Wu 采用遗传算法对单级泵站进行了优化调度，并对时段内流量、扬程及开、停机等决策进行了优化，以获得其最大运行效率。Dritan Nace 根据日需水量，在满足运行约束条件下，寻找出最优调水流量方案，在优化过程中采用了线性规划法。S. Pezeshkt 将适应性搜索算法应用于供水系统优化，该算法是一种离散的优化搜索模型，在实际优化计算中利用综合影响系数及管网压力作为控制参数，来决定泵的开、停机策略，可在一定程度上实现实时控制，提高输水效益。

1.3.1.2 国内研究进展

从 20 世纪 80 年代开始，国内的学者就针对单级泵站节能开展了相关探索与研究，并

取得了一系列的研究成果。1987年,湖南省水利厅的路辛幕等针对农田排灌系统优化问题,以机电排灌运行能耗最少为目标,采用系统分析方法进行了探讨和研究。1998年,刘家春等采用系统分析的方法,根据轴流泵站的运行情况,建立了单级泵站经济节能的数学模型,并探讨了其求解方法。

进入21世纪以后,随着泵站建造和运行管理技术的不断改进,国内的学者对单级泵站的能耗问题的研究越来越深入。2001年,武汉大学的周龙才等针对变速调节泵站,以单位水量能耗最小为目标,满足一定流量等约束条件,提出了泵站内多台机组联合变速节能模型,并给出了模型详细的求解方法,优化效果较为明显。2003年,河海大学水利工程学院的陈守伦等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各台机组的流量过程进行优化。同年,河海大学的程芳等针对泰州泵站中转桨式和定桨式轴流泵机组联合节能问题,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节能模型,并在每层采用相应的优化方法进行求解。2004年,武汉大学机械学院的龙新平等利用拟合算法建立了装置效率、叶片角度与装置扬程和流量的关系曲面以及连续函数,可确定任意工况下,一定扬程和流量所对应的装置效率、叶片角度、转速等,为泵站节能决策提供了基础。2007年,扬州大学的鄢碧鹏等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节能研究,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,可较好的对泵站节能问题进行求解。2010年,扬州大学程吉林等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,时段内的抽水量要求等为约束条件,根据峰谷电价与站上、下游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。扬州大学裘懿等针对泵站多机组叶片全调节日节能问题,建立了大系统分解—动态规划聚合模型,并给出了相应求解方法。以单位水量运行费用最小为目标,各机组提水量为决策变量,将总模型分解为多个单机组叶片全调节日节能子模型,模型采用动态规划方法求解。

1.3.2 梯级泵站节能降耗研究现状

梯级泵站输水工程可实现更高的提水高度、满足更大范围的供水任务。由于梯级泵站输水系统是一项工程结构复杂、内部相互关联、影响因素众多的复杂系统工程,其运行及控制难度较大。随着多个梯级泵站工程逐渐投入使用,对其节能研究也得到了较快发展和进步,人们逐渐意识到梯级泵站工程并不只是简单的单个泵站的叠加,对其优化问题仅考虑各级泵站内部节能是不够的。在梯级泵站输水系统中,各级泵站之间通过渠道(管道)连接,存在较为密切的水力联系,各站的流量、水位相互影响,共同决定了整个梯级泵站输水系统的运行状态。因此,梯级泵站输水系统的节能不仅要求对各级泵站内部各机组进行联合运行优化,还要考虑各梯级之间的水力优化组合问题。目前,国内外学者均针对这一问题开展了研究,并取得了一定成果。

1.3.2.1 国外研究现状

国外学者早在 20 世纪 50 年代就开始了针对梯级泵站节能调度的研究,所采用的方法主要包括数学规划、模拟技术、大系统理论等方法。主要研究思路为:建立系统简化模型或大系统优化决策模型,采用多种优化算法,并与仿真模拟技术相结合,得到最优的工程运行决策方案。

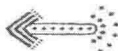
1982 年,Weiner & Arie Ben-Zvi 针对 Mediterranean Dead Sea Project 跨流域梯级泵站调水工程,采用动态规划法建立了节能模型,研究了其节能问题。1984 年,Marino & Loaiciga 等用 POA 法对美国中央河谷工程中的水库群联合运行方案进行了优化求解。Dragan A. Savic 采用遗传算法,对多个大型配水系统的设计进行优化研究,并提出了相应的优化设计要素(管道、水库、泵站),实践表明,采用优化方案可减少 30%~40% 的运行费用。I. Pulido. Calvo 应用神经网络系统预测日需水量,与多级衰减和单一时间连续分析法相比,神经网络系统预测结果更为精确。K. Takeuchi 将随机 DP 和逐次逼近的搜索式法相结合,对美国加利福尼亚中央河谷工程中的两个并联水库的泄水方案进行优化,获得最优的泄水方案。

1.3.2.2 国内研究现状

20 世纪 70 年代以后,国内学者也开始了对大型复杂工程采用系统优化的方法进行分析研究,其中也包括梯级泵站工程的节能研究。需要指出的是,20 世纪 80 年代之前,我国已建的多数泵站受制于自身制造条件,大多安装的是工况不可调节的水泵机组,所以关于梯级泵站工程节能调度的研究,主要集中在如何实现梯级间流量平衡方面。

随着计算机技术迅速发展,自动化设备性能的不断提高以及多项跨流域调水工程的建设,高扬程梯级泵站工程的优化调度研究成果得到了进一步的发展和应用。1990 年,中国水利水电科学研究院的高占义以大禹渡梯级泵站为研究对象,建立节能的泵站物理模型和数学模型,并运用动态规划方法结合模拟技术进行求解,优化后可节能 7.55% 左右。2000 年,扬州大学的刘正祥等针对梯级泵站工程,以系统总能耗最小为目标,采用动态规划法确定各级泵站内各机组联合最优开机组合,并对系统级间渠道运行进行数值模拟,同时确定梯级间的最优水位组合。2001 年,江苏省国营淮海农场的张文渊开展了梯级泵站的流量和水位(扬程)优化研究,针对由工况可调和不可调泵站组成的梯级泵站系统,采用动态规划法对梯级泵站运行进入稳态后的水位(扬程)进行优化,结果证明可显著提高系统的运行效率及效益。2002 年,北京理工大学的李世芳等在对梯级间流量平衡进行分析探讨的基础上,建立了扬程优化调度的数学模型及动态规划求解的方法。在满足泵站流量、扬程的前提条件下,对各级泵站的调蓄水位进行动态优化,寻找出最优的调蓄水位,使供水系统工作在最优状态。

2005 年,武汉大学的朱劲木针对东深供水工程优化运行问题,采用大系统分解协调方法,考虑了不同地区、不同时间段的电价对优化调度的影响,寻求梯级各泵站联合优化运行方案。武汉大学的熊晓明等发表了“梯级泵站的实时优化调度研究”,以输水成本最小为目标,考虑了电价波动和级间弃水等影响因素,提出了实时流量优化的方案,并将优化方案在东深供水梯级泵站水力仿真模拟系统上进行了验证,结果表明,经济效益明显,



大大减小了系统弃水量。

2006年,扬州大学的仇宝云等针对南水北调东线工程梯级泵站的特点,分析比较大中型水泵机组各种变工况方式,并提出了南水北调东线源头泵站宜采用变速、变角运行方式;进、出湖泵站宜采用变频变速或变角运行方式;中间泵站宜采用机械式运行全调节变角运行方式等结论。2008年,扬州大学的冯晓莉等针对江都排灌站扬程变化幅度大、变化频繁的特点,以输水效益最高为目标,在满足日提水总量的前提下,考虑分时电价等相关约束条件,建立泵站运行优化数学模型,并采用遗传算法求解,确定泵站各时段的最优开机台数和机组运行工况(叶片调节角度),结果表明,优化运行方案可显著降低运行费用。

2010年,扬州大学的冯晓莉、仇宝云等以南水北调东线高港泵站为研究对象,以泵站主机组耗用电费最少为目标,在满足日抽水量的前提下,考虑不同时段装置扬程和分时电价的变化,建立高港泵站运行优化模型,模型采用遗传算法求解,并用退火算法处理约束条件,优化结果可显著降低运行费用。2011年扬州大学的龚懿等开展了南水北调东线泵站(群)运行的相关优化方法研究,考虑峰谷电价影响,针对泵站多机组、并联泵站群、梯级泵站群开展了全面的研究,提出了一套优化运行理论方法,采用大系统分解、动态规划聚合优化方法,分别建立了单机组、泵站多机组、并联泵站群优化运行模型,并同级间输水渠道一维明渠非恒定流模拟相结合,提出了上、下梯级泵站提水扬程与泵站运行(开机台数、叶片角度、机组转速等)的综合优化方法。

1.3.3 梯级泵站系统水力模拟与控制研究现状

梯级泵站输水工程一般输水线路长,涉及范围广,输水建筑物种类繁多,为实现整个输水系统优化运行的目标,需要建立相应的水力仿真数学模型,对各种可能发生运行工况进行模拟分析,确定输水系统的水位、流速、流量等水力参数的变化规律,寻找可靠、经济合理的输水方案和运行控制方案,为梯级泵站输水系统的运行及控制提供参考。目前,国内外专家学者针对输水水力模拟及控制等方面已经进行了大量研究,取得了一系列的成果。

天津大学的练继建等建立了明渠—管道—明渠复杂输水系统的瞬变流计算数值仿真模型,并采用变时步的方法进行处理计算,可对实际输水中的水力过渡过程获得较为精确的模拟结果;中国水利水电科学研究院的杨开林等提出了线性变换求解渠道输水非恒定流模型,并利用该方法模拟了东深供水改造工程中—太园录站出水池莲湖泵站进水池之间的水力过渡过程,模拟效果较为精确;杨开林等针对引黄入晋输水工程变速泵的调节特性,还研究了同步电动机的调速模型及前池水位的自动控制模型,分析探讨了PID水位调节器的控制参数对水位调节效果的影响。武汉大学的刘梅清运用瞬变流的基本理论和数值计算方法,建立了复杂抽水系统水力过渡过程计算的数学模型,包括长管道输水系统中的两相瞬变流计算模型,泵、管、渠、池复杂抽水系统瞬变流计算模型及梯级泵站调水系统联合运行瞬变流计算模型,并以此为计算平台,建立了空气阀、调压塔、单向调压塔及水柱分离及再弥合水锤计算边界条件模型,提出了长距离输水系统的水锤防护策略,为瞬变流计算理论的完善与发展及大型调水工程的优化设计和运行提供了技术依据。

2003 年, 广东粤港供水有限公司的潘志权针对东深供水工程水力过渡过程的特点, 建立了管、渠、泵系统联合水力过渡过程计算的数学模型, 并进行了大量的分析、计算与测试研究, 研究内容包括正常工况泵站流量关联和匹配研究, 泵组叶片角度的优化配置与调节研究; 分析事故工况下水力过渡过程中可能存在的薄弱环节。同年, 清华大学的樊红刚建立了梯级泵站全系统的仿真模型, 根据各级泵站不同位置提出了两种系统流量平衡调节方法。通过调节叶片角度改变泵站流量, 使中间泵站保持其前池水位不变, 从而实现系统的流量自动调节平衡。

2007 年, 太原理工大学的寇姝静、段富等以万家寨引黄工程为研究对象, 研究系统运行仿真及优化调度。其主要思路是在系统分析的基础上, 采用水力学模拟软件 Mouse, 建立梯级泵站及其管网组成的综合仿真模型。同时, 将大系统分解—协调模型应用于各级泵站联合运行的优化调度中, 以输水能量消耗最小为目标, 综合考虑目标区域需水量、输水流量约束等相关因素, 求出各泵站各机组节能方案。并将运行方案在建立的综合仿真模型上进行验证, 最终可实现系统的节能调度仿真。

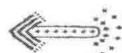
目前, 部分梯级泵站系统水力模拟及控制研究成果已经应用到现行跨流域调水工程中, 山西万家寨引黄入晋输水工程采用丹麦 DHI 咨询公司的 Mouse 模型, 建立了优化运行及仿真系统, 并开发了一整套调度运行软件; 武汉大学、清华大学、中国水利水电科学研究院对东深供水工程改造工程泵站及全系统水力过渡过程进行了计算分析, 对该工程的水力过渡过程及调节控制方式进行了分析及评估, 提出了工程调度运行的最佳模式及方案, 并开发了输水系统过渡过程、系统流量平衡等仿真软件等。

1.4 问题的提出

梯级扬水灌区的输水系统是由多座泵站、级间输水渠道(管道), 输水建筑物、灌区、受水单元等共同组成的复杂系统。其中各单级泵站是该系统的核心及主要控制单元。一般来说, 进行梯级泵站工程规划设计时, 通常根据水源、河道资料和级间的地形条件, 确定各泵站设计扬程分配, 优选泵站的机组设备, 以节能降耗为目标进行规划, 期望各级泵站建成后均能在高效状态下工作。但是, 受灌溉区不同时段输配水的限制, 并不能完全预测实际运行期间梯级泵站工作条件的实际时序状态。因此, 梯级泵站输水系统规划设计可以看作是对这个庞大的系统进行特定运行工况的一种优化。

在各泵站投入运行后, 由于施工、设备安装等因素的影响, 对整个梯级泵站输水系统来说, 其各泵站设计扬程、流量并不一定是整个系统的最优工况点。因此, 为提高梯级泵站输水系统实时运行效率和时段经济效益, 有必要对系统重新进行优化运行及控制研究, 寻求实时优化运行及控制方案。

梯级泵站输水系统中各级泵站之间通过渠道(管道)相连, 各级泵站之间存在着密切的水力(水位、流量)联系, 各泵站的运行受制于级间的水力状态, 是泵站内优化运行的前提, 而各泵站的运行状态又是级间水力状态优化的依据。由于受泵站工况调节和灌溉区间用配水量变化的影响, 系统常处于运动状态, 即级间水位流量处于不断变化中, 因此, 其泵站内优化运行及调度决策也具有实时性。而作为决策依据的流量、水位状态又受到泵



站内调度决策的影响。如果被动地根据实时流量、水位状态进行优化，系统将始终处于变化中，泵站将一直处于调节状态，优化目标将很难实现。

为科学地评价梯级泵站系统的输水效率，客观地评估系统的能耗水平，需要研究梯级泵站输水系统运行效率的表述形式和指标体系。通过对代表性的梯级扬水灌溉工程实际能耗的监测和评估，研究影响系统输水效率和能耗的主要因素，建立基于动态平衡的梯级泵站输水系统优化运行及控制理论和方法。另外，通过分析影响泵站能耗的主要因素和影响机理，从优选机组、提高机组的装置效率、改善泵站设备（设施）的流态，减少能耗损失等建造技术的角度，探讨梯级泵站节能降耗的关键技术，为梯级泵站的规划设计和更新改造提供技术支持。

从建造技术的角度来看，高扬程梯级泵站的节能降耗研究主要包括：①从影响水泵提水效率的高含沙水流、水泵进出水管路、配套电机和附属设施等多角度分析影响水泵提水效率的主要因素，探讨提高水泵的机械效率、容积效率、水力效率的技术方法；②模拟研究泵站管道合并时的角度、前池形式、吸水管形式、泵阀布置等对水泵内部流态的影响，计算分析最优管道夹角和弯管布设形式，探寻通过改善水泵及其装置内部流态的方法提高提水效率的技术；③研究水泵工况调节方式对能耗的影响，以及梯级泵站系统区间分水后多级泵站调频运行的节能技术；④探索梯级泵站提高运行效率、降低提水能耗的运行管理和更新改造新技术。

2

梯级电站的输水效率

2.1 梯级电站输水系统及其特点

2.1.1 梯级电站输水系统结构

梯级扬水灌溉工程是通过多级泵站，将低处河道的水提至高出适宜灌溉的区域进行灌溉的复杂系统，各级泵站按照其不同的扬程串联设置在输水线路上，组成泵站链逐级提水，即梯级泵站输水工程见图 2-1。

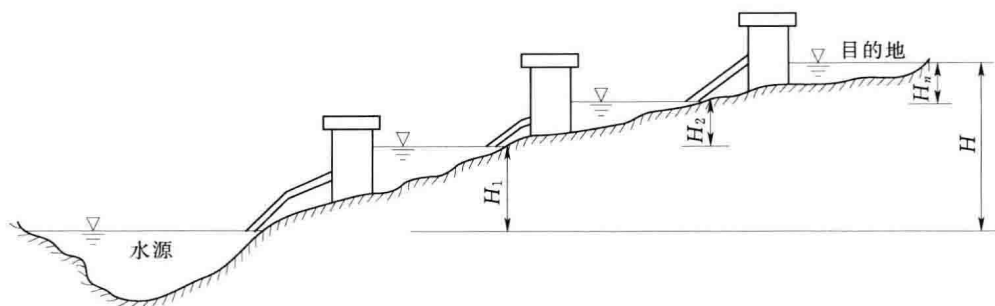


图 2-1 梯级泵站输水工程示意图

梯级泵站输水系统是由梯级泵站和级间输水河道、控制建筑物组成的复杂系统。各单个泵站是调水系统的控制单元，泵站之间通过输水河道、管道串联，各级泵站之间有着密切的水力联系。各站之间的流量、水位互相影响，制约整个梯级泵站输水系统的运行，梯级泵站输水系统组成见图 2-2。

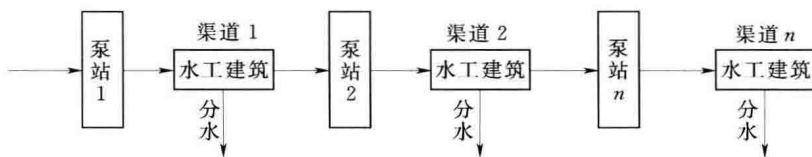


图 2-2 梯级泵站输水系统组成示意图

因此，在进行运行优化时，可将梯级泵站输水系统分为泵站、输水两个相互关联的子系统。输水子系统由级间的渠道、管道、水工控制建筑物等输水设施组成。泵站子系统由各级泵站组成，泵站内部又由抽水装置和辅助装置组成。两个子系统的运行状况共同决定了系统的整体运行状态。两个系统的边界条件，内部变量及相互关系见表 2-1。

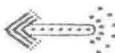


表 2-1

各系统变量及相互关系

系统名称	外边界条件	状态变量	决策变量
泵站子系统	梯级间水位、流量值	各泵站运行效率；泵站子系统效率	泵站内运行方案：机组开关机组合，各抽水装置流量分配、水泵叶片角度、电机转速等
输水子系统	梯级间水位、流量值	梯级间输水损失；输水子系统运行效率	梯级间水位、流量
梯级泵站输水系统	梯级总扬程、流量值	梯级泵站输水系统运行效率	级间水位、流量、各级泵站内运行方案

从表 2-1 可以看出，泵站、输水两个子系统通过级间水位、流量水力要素相互关联。两个子系统共同决定了系统整体运行状态。现以 n 级泵站组成的梯级泵站输水系统为例，其系统结构如图 2-3 所示。

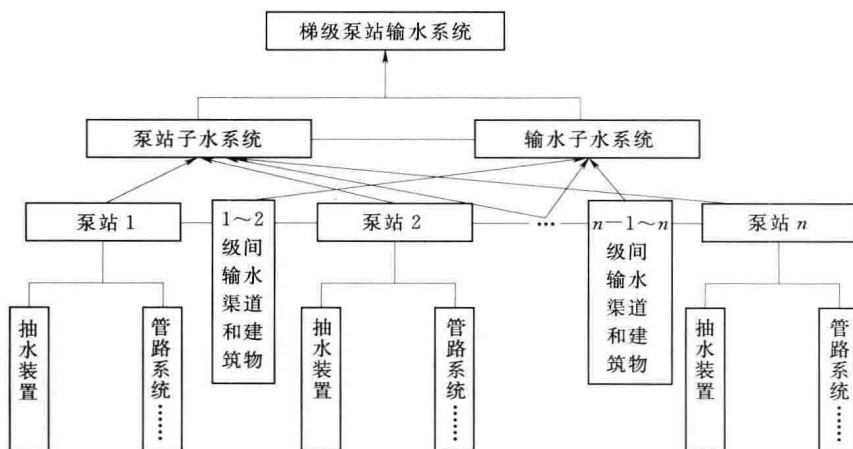


图 2-3 梯级泵站输水系统结构图

2.1.2 梯级泵站输水系统主要特点

梯级泵站输水系统主要有下列特点：

(1) 泵站子系统和输水子系统紧密联系。泵站子系统与输水子系统通过级间水位、流量水力要素紧密联系。其一是流量联系，即上一级泵站的出水池出流量为下一级泵站的进水池的入流量，由于两站之间距离较远，需考虑级间流量相互配合及滞后影响；其二是水位联系，站间渠道上游水位为上级泵站的出水池水位，下游水位为下级泵站的前池水位，两者之间的差值为级间水力损失。其中，水位和流量是泵站系统运行的边界条件，决定了泵站子系统运行状态。而泵站运行状态的改变将反作用于输水子系统，两个系统共同决定了梯级泵站输水系统的整体运行状态。

(2) 梯级泵站输水系统为水力可控系统。大型梯级泵站输水系统级间有一定的调蓄容积，梯级间水位存在一定的变化调节区间，其水位为人工控制水位。泵站为梯级泵站输水系统的主要控制单元，通过内部机组叶片、转速的调节可完成流量的调节，辅以闸门等其