

三峡水利枢纽工程

几个关键问题的应用基础研究丛书

通航建筑物 应用基础研究

主 编 须清华

副主编 张瑞凯



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家自然科学基金委员会
中国长江三峡工程开发总公司

联合资助重大项目

项目编号: 59493600

总资助金额: 910 万元

起止年限: 1994 年 7 月~1998 年 12 月

项目负责人 林秉南 陈济生 哈秋舫

项目学术领导小组

组 长 潘家铮

副 组 长 林秉南 陈济生 哈秋舫

成 员 (以姓氏笔画为序)

朱伯芳 吴中如 张有天 周维垣

须清华 董哲仁 储传英 潘庆槩

项目办公室

主 任 董哲仁 高季章

成 员 陈华康 朱光裕 邓湘汉 李雪菡

主要撰写人名单

第 1 章 须清华 张瑞凯

第 2 章 饶冠生 王秉哲 陈永奎 李发政 孙乃雨

郑宝友 刘力中

第 3 章 张瑞凯 胡亚安 李 云 宣国祥 杨朝东

第 4 章 宣国祥 宗慕伟 张瑞凯 杨朝东 黄 岳

第 5 章 蔡汝哲 蔡 创

序

1994年,在国家自然科学基金委员会和中国长江三峡工程开发总公司的联合资助和领导下,在学术组长潘家铮院士的指导下,开展了题为“三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究”的研究工作。由于这项研究是结合三峡工程建设进行的,在选题时我们根据自己的认识尽可能以三峡工程建设的需要为准。这本书是四年半来研究成果的总汇,有一部分成果已得到三峡开发总公司的采纳。

本研究是三峡工程研究的补充。不言而喻,解决工程问题必须按既定的时间表进行,因而通常只能根据现有的知识来解决问题。知识之海浩浩荡荡,现有知识犹如沧海一粟,而复杂的工程问题无不错综复杂,现有知识是远不足以给出完备解答的,因此,对工程问题的解答通常只能是近似的。早期常将运转条件和物理过程简化,进行相对简单的试验和计算,并加入个人经验判断,从而给出答案。近代模型试验技术有很大发展,试验范畴也得到扩大,计算机的应用又使大规模的数字计算成为可能,两者共同构成强有力的模拟技术,包括实体模型模拟和数值模拟。应用现代模拟技术可以计入较多的影响因素和较复杂的运转条件及物理过程,特别是不恒定或非定常的过程,为工程师提供较齐备的设计依据。在这方面应提一下国外数值模拟技术目前存在的问题。以泥沙运动的模拟为例,1998年12月曾在香港举行第七次河流泥沙国际讨论会,会上主题报告人是新西兰的劳达奎韦(A. Raudkivi)教授,他指出,目前许多泥沙数学模型成果是计算机软件人员的产品,他们对泥沙运动规律等专业知识是不甚清楚的;他们的研究成果不是基于事实而是基于信念;只是根据他们的计算成果打印出来的图像美丽动人,具有“催眠”作用,这才打动了一些顾客。他还指出,泥沙知识是不完整的,其中还存在着许多“灰色地带”(即规律不清楚的领域),需要进一步研究。对此,笔者深有同感。但应说明,我国的数学模型和泥沙模型试验都是以实测资料和已知的泥沙运动规律为基础的,模拟方法大都是经过实测资料验证的。这是由于我国几十年来进行了大量的水文观测,取得了大量的宝贵资料可供使用。例如为葛洲坝进行的枢纽和水库泥沙模型试验,在葛洲坝建成运转后都得到了良好的验证。然而学无止境,我国的模拟技术还需要进一步提高。目前,为了解决同一问题而建立的若干模型所给出的成果也

还存在一定的差异，原因是人们对有关的规律了解得还不够。要缩小这个差异，便须对一些规律性问题进行研究，以缩小所谓的“灰色地带”。在本课题的所有专题研究领域，都存在着不同程度的“灰色地带”，有待大力缩小。只有不断缩小这些“灰色地带”，才能不断提高水利工程技术水平。这是开展本课题研究的一个原因。

其次，除了上述的规律性探讨外，开展本课题研究的另一个重要原因，便是努力为当前三峡工程建设中提出的一些比较困难的工程课题提供解答或解答的依据。根据工程的规划进度，这些工程课题在开题时还有一定的时间，可用以进一步搜集资料 and 进行较深入的研究。建筑物监测系统设计、反馈设计、船闸输水系统、船闸岩基开挖高边坡的稳定性、特殊混凝土和特殊水泥的研制等便是一些例子。这方面的研究或受众多因素的影响和控制，或涉及多种复杂的物理过程，或各阶段都需要现场资料的印证，或要求在取得现场最新资料后能快速作出反馈设计等。总之，问题是复杂的，工作中遇到的困难是较大的，取得成果是不易的。值得高兴的是，部分研究成果已得到工程建设单位的采用。

该套丛书收入了五部分研究的成果，它反映了我国在水利研究方面的一些新进展。希望这些新进展对其他水利工程建设也有一些参考价值。

在本项研究中，国家自然科学基金委员会和中国长江三峡工程开发总公司及时而有效地在各方面给予了支持和便利，使工作得以顺利进行。笔者在此谨代表全体人员表示深切的谢意。

中国水利水电科学研究院
国际泥沙研究中心

林秉南

1999年1月

前 言

举世瞩目的长江三峡工程正在兴建，第一期工程已胜利完成。作为三峡工程主体工程之一的永久船闸，按计划将于 2003 年正式通航。

由国家自然科学基金委员会和中国长江三峡工程开发总公司联合资助的重大项目“三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究”中的第二个课题《通航建筑物应用基础研究》，在各参加单位及科技人员的共同努力下，历经 5 年的辛勤工作，取得了丰硕的成果。所提出的成果不仅在应用基础研究上有许多可喜的进展，而且许多研究成果已直接应用于三峡工程。本书的特点或创新表现在以下几方面：①坝区泄洪主流摆动和引航道往复波流的数值模拟，以及通航水流条件的航行判据；②船闸输水非恒定流试验设备及机理；③船闸输水阀门防止空化的综合措施；④复杂分散输水系统的数学模型；⑤船舶过闸实时仿真模拟；⑥船闸运行可靠性估计；⑦小尺度自航船模的自动测控试验系统的研制与应用，以及相似理论研究。

本课题由南京水利科学研究院负责，下设 4 个专题，第 1 专题“三峡枢纽泄洪对通航条件的影响及改善措施研究”由长江科学院负责，参加单位有天津水运工程科学研究所，参加人员还有：陈济生、金恬、郭伟、杨淳、杜国仁、张富然、王育林等同志；第 2 专题“三峡船闸输水系统和闸阀门水力学应用基础研究”由南京水利科学研究院负责，参加单位有长江科学院、中国水利水电科学研究院、天津大学，参加人员还有：谢省宗、徐勤勤、林继镛、阎诗武、郑楚佩、陈泰春、严根华、凌国增、苏有为等同志；第 3 专题“三峡船闸运行过程仿真模拟及运行可靠性分析”由南京水利科学研究院负责，参加人员还有：李云、胡亚安、江南等同志；第 4 专题“船模技术及在三峡通航建筑物中的应用”由西南水运工程科学研究所负责，参加人员还有：赵世强、陈利芳、谢东、王平义等同志。

本课题的研究密切结合三峡工程通航建筑物的设计工作，及时提供了有关科研成果，同时还总结出了许多具有普遍性和规律性的成果，可以应用推广到其他工程或为制订相关设计规范创造条件。此外，在此期间研制的一些设备仪器、建立的数学模型或分析计算方法对今后的设计、研究工作均具有重要意义。

本书是在上述各专题研究成果的基础上编辑完成的，其内容包括了枢纽通航建筑物水力学和通航船模试验以及船舶过闸仿真等各个方面，这在国内外尚属首次。

限于时间和水平，书中难免有不足之处，敬请各位读者批评指正。

编 者

1998 年 10 月于南京

目 录

序

前 言

1 导论	1
1.1 三峡工程通航建筑物概况	1
1.2 应用基础研究的几个主要方面及其相互关系	3
1.3 本书概要	4
2 三峡枢纽泄洪对通航条件的影响及改善措施研究	12
2.1 上游引航道通航条件的研究	12
2.2 枢纽泄洪对下游引航道通航条件的影响	28
2.3 电站调峰非恒流通航条件	37
2.4 通航水流条件的航行判据研究	54
3 三峡船闸输水系统和闸阀门水力学应用基础研究	73
3.1 船闸整体输水系统几个应用基础问题研究	75
3.2 船闸阀门水动力学特性研究	87
3.3 阀门非恒定流空化特性及抑制阀门空化的工程措施	114
3.4 阀门流激振动特性及减振措施	138
3.5 船闸人字闸门运行动水阻力研究	155
3.6 输水系统水力学模型缩尺效应及校正方法	163
4 三峡船闸运行过程仿真模拟及运行可靠性分析	168
4.1 三峡船闸运行状态仿真	168
4.2 船闸输水过程仿真	172
4.3 航行条件的快时模拟	180
4.4 船舶航行条件实时模拟器的研究	188
4.5 船闸运行可靠性分析	204
5 船模技术及在三峡通航建筑物中的应用	217
5.1 船模及遥控监测系统	217
5.2 小尺度自航船模自动测控试验系统	227
5.3 相似问题研究	236
5.4 试验类型及方法	246
5.5 工程验证及实例	249
后 记	262

1 导 论

1.1 三峡工程通航建筑物概况

1.1.1 三峡通航建筑物的作用

三峡工程具有巨大的防洪、发电、航运等综合效益，是举世瞩目的巨型工程。工程建成后，在上游可渠化宜昌至重庆的川江河段，在下游可增加长江中游航道枯水期流量，显著地改善汉渝间航道的通航条件，满足长江上、中游航运发展的需要。在三峡枢纽与葛洲坝枢纽联合运行条件下，水库回水区流速可减少 30%~80%，水面坡降可减少 25%~95%，航道通过能力可达到或接近中游航道的通过能力。经水库调节后，宜昌河段最小流量可由目前的 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 提高至 $4460\text{m}^3/\text{s}$ ，葛洲坝下游枯水流量相应增加约 50%，万吨级船队由下游直达重庆的保证率可达 50% 以上，航道单向年通过能力将从目前的 1000 万 t 增至 5000 万 t。

此外，三峡工程可使长江上游水系的通航里程大大延长，预计沿线 10 多条支流的通航里程较建库前增加约 500km。而且随着船队的标准化、大型化及船队运输效率的提高和能源消耗的降低，船舶运输成本可降低 35%~37%。综上所述，三峡通航建筑物的建设具有重大的社会效益和经济效益。

1.1.2 通航建筑物在三峡枢纽中的布置

三峡枢纽三斗坪坝址位于西陵峡中部，该处河谷开阔、河道弯曲，左岸为凸岸，岸坡较缓，上游引航道附近有较宽阔的水域，下游通过设置隔流堤，引航道出口较顺直。右岸为凹岸，地势陡峻，上下游引航道进出口水流条件较差。经比较，选定在左岸布置通航建筑物。

通航建筑物主要包括永久船闸和升船机，在施工期还建有临时船闸和导流通航明渠。由于三峡工程最终确定库水位为 175m 方案，则当葛洲坝库水位为 62m 时，总水头达 113m。永久船闸必须采用多级船闸方案。在可行性研究阶段，曾经比较了连续 4 级和 5 级船闸及分散 3 级船闸方案，最后确定采用双线连续 5 级船闸方案。船闸闸室有效尺寸为 $280\text{m} \times 34\text{m} \times 5\text{m}$ （长×宽×吃水深），与葛洲坝 1 号及 2 号船闸相同。升船机采用一级平衡重式垂直升船机，承船箱尺寸为 $120\text{m} \times 18\text{m} \times 3.5\text{m}$ ，与葛洲坝 3 号船闸相当。

永久船闸主体段长度约为 1.6km，为满足上游引航道水流条件和上下游引航道直线段的要求，船闸线路布置在坛子岭左侧，在坝轴线处离左岸电站约 1.2km。垂直升船机位于永久船闸右侧，两者相距约 1km。临时船闸布置在垂直升船机右侧，两者之间为左岸非溢流坝 8 号坝块，在施工后期，临时船闸将被改建为冲沙闸。三峡通航建筑物总体布置见图 1.1。

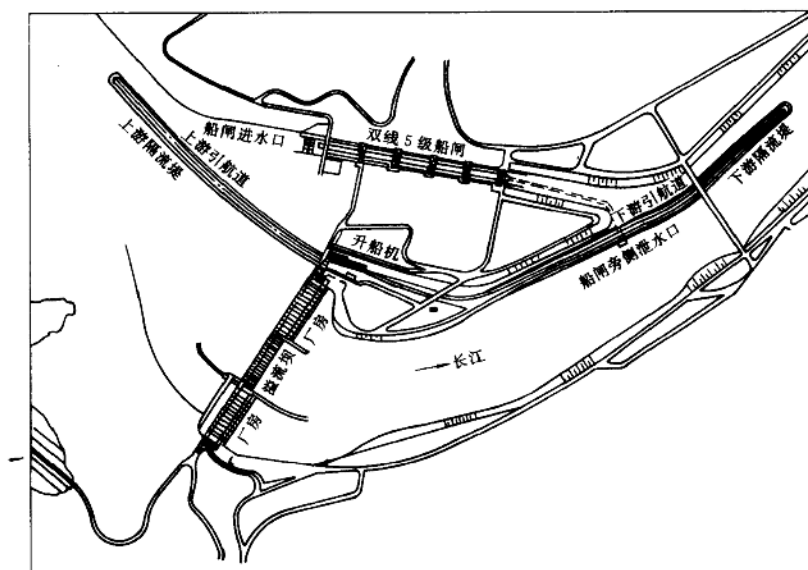


图 1.1 三峡通航建筑物总体布置图

1.1.3 通航建筑物简介

一、永久船闸

双线连续 5 级船闸位于左岸临江最高点坛子岭左侧，每一线由 6 个闸首和 5 个闸室组成，主体段总长 1607m，分别在第 1、6 闸首的上、下游设置 200m 的导航墙和靠船墩。船闸输水系统采用两侧主廊道、闸室底部 4 区段 8 支管顶部孔缝出水加消能盖板的形式。上游引航道最终确定采用“全包”形式，即在冲沙闸（施工期为临时船闸）右侧建长隔流堤，堤身全长 2720m，堤顶高程 150m。堤头位于祠堂包附近，口门处宽度为 220m，船闸上游引航道宽度为 180m，其中心线由第 1 闸首向上游延伸 930m 直线段，接半径为 1000m、圆心角为 42° 的弯段，再接长 450m 的直线段至口门，引航道底高程为 139m（近期为 130m）；下游引航道中心线从第 6 闸首向下先延伸 930m 直线段，接半径为 1000m、圆心角为 54° 的弯段，再接长 1380m 的直线段后，用半径为 1200m 的圆弧段与主河道连接。在引航道的右侧建有包括垂直升船机在内的长度为 3350m 的隔流堤，堤顶高程：上段为 78m，下段为 76m，堤下游端位于坝河口上游约 450m 处。引航道宽度：在船闸下游导墙范围内为 128m，正常段为 180m，口门处为 200m，底部高程为 56.5m。

对于船闸输水进水口，曾设计、研究过两种布置形式，一是在 1 闸首前引航道底部廊道侧孔进水，一是在引航道堤外侧向支孔进水。最后因确定采用“全包”一次建成方案，并取消船闸右侧 660m 短隔流堤，故仍决定采用引航道底部正面进水方式。

船闸末级泄水采用侧向长廊道泄水入长江和辅助短廊道泄水至下游引航道的方式。侧向泄水廊道全长 1320m，共 2 条，每一廊道的断面尺寸为 9.6m×9.6m；辅助泄水廊道阀门

断面尺寸为 $3.60\text{m} \times 3.75\text{m}$ (宽 $\times$ 高)。

船闸输水阀门均采用反向弧形阀门,其尺寸除 1、6 闸首为 $4.5\text{m} \times 5.5\text{m}$ 以外,其余各闸首均为 $4.2\text{m} \times 4.5\text{m}$ 。阀门开启时间为 2min。中间级闸室输水最大水头为 45.2m,输水时间为 12min 左右。过闸最大船队为 1 (推轮) + $9 \times 1000\text{t}$ (甲板驳) 或 $1 + 4 \times 3000\text{t}$ (油轮),设计单向下水货运量为 5000 万 t (2030 年)。

为适应船闸上、下游水位的变化,并适当降低闸墙高度,经论证比较,确定采用只补不溢的补溢水方案,并通过输水阀门进行操作。最大补水层厚度为 13.35m。

二、升船机

升船机采用全平衡垂直提升钢丝绳卷扬形式,最大提升高度为 113m,由上闸首、主机室 (包括承重塔柱、承船厢、提升机房)、下闸首、上下游导航墙和靠船墩组成,上下闸首间主体段长度为 278m。承船厢带水的总重量为 11800t。上闸首右侧设长 250m 的浮式导航墙,靠近坝前 100m 范围内的导航墙上部为实体堤,下部为土石料填筑堤。下游引航道宽 80m,底高程 58.0m。下段并入永久船闸下游引航道 (见图 1.1)。下游导航墙布置在引航道左侧,长 100m,在距下闸首 300m 处布置有靠船墩,长 100m。

上闸首工作门由 7 节高 3.75m 的叠梁和 1 扇高 15.5m、带有卧倒小门的平板大门组成,以适应上游水位的变化。下闸首工作门为 1 扇高 19.5m 的带卧倒小门的下沉式平板闸门,可适应下游水位的变化。承船厢两端设有卧倒式闸门及防撞架。8 台卷扬式提升主机通过 48 根钢丝绳与承船厢相连,提升时间为 12min,驱动电机总功率为 $8 \times 250\text{kW}$ 。

承船厢两端的卧倒门高 5.5m (自支铰中心计),由 2 台 500kW 液压启闭机启闭,变速运行,启闭时间为 2~3min。船舶单向通过升船机的时间为 60min。年通过能力 350 万 t。承船厢内允许误差水深为 $\pm 15\text{cm}$ 。

1.2 应用基础研究的几个方面及其相互关系

该书主要涉及 4 个方面的研究,即三峡枢纽泄洪对通航条件的影响及改善措施研究,三峡船闸输水系统和闸阀门水力学应用基础研究,三峡船闸运行过程仿真模拟及运行可靠性分析,船模技术及在三峡通航建筑物中的应用。

这些研究内容既有其相对的独立性,又相互关联并形成一个整体,它们包括了水利水电枢纽通航建筑物建成后,船舶从大坝上游河道经通航建筑物至大坝下游河道安全运行的各个方面。

作为应用基础研究,上述研究内容既包含了对基础理论的研究,又紧密结合三峡工程的实际需要,因此,研究成果可推广应用于其他通航枢纽工程。

由于三峡工程极其复杂,其设计研究工作从 50 年代开始,至今已 40 余年,历经多个阶段。1986 年对三峡工程重新进行了论证,选定的正常蓄水位为 175m,初期运行水位为 156m。1992 年初开展了初步设计,确定永久船闸采用连续 5 级船闸,通航建筑物布置在左岸,后又确定升船机在 2009 年或以后建成。在枢纽布置方面,永久船闸上游引航道原设计为小包长堤方案,即在船闸右侧修建一条长度为 2113m 的隔流堤,堤头位于祠堂包以上 390m 处,双线船闸输水廊道进水口布置在第一闸首前的引航道底部。但初步设计与技术设

计阶段的试验研究工作表明,由于船闸充水引起的非恒定流对引航道中停泊与航行的船队影响较大,故确定采用侧向进水口形式,将取水口布置在引航道隔流堤外侧,同时将隔流堤缩短为 660m,并称之为小包短堤方案。该方案在枢纽投入运行 30+2 年^①以内,可满足通航水流条件的要求。考虑到运行 50+4 年^②以后,坝前库区的泥沙淤积对船闸和升船机上游引航道船舶(队)的航行条件将有一定的影响,设计考虑了在升船机右侧建长隔流堤的大包方案或在冲沙闸右侧建长堤的全包方案。近年来,有关枢纽通航及泥沙淤积的研究都是针对上述各个不同的设计方案进行的,这也直接关系到本书各章所阐述的具体研究内容。大量的研究成果由于设计的改变,虽然最终不为工程所采用,但所揭示的普遍性的规律和所提出的工程措施仍对设计的不断优化有很大的作用。直到 1998 年 9 月初,三峡永久船闸上游引航道隔流堤才确定采用“全包”方案一次建成,并取消了原设计的 660m 短堤,船闸进水口亦由侧向取水恢复为闸首前引航道底部正向取水。目前对此方案正在进行补充试验研究。

本书第 2 章研究了泄洪对通航条件的影响,主要是分析影响船队(舶)在船闸和升船机上下游航道安全航行与停泊的水流要素,并从引航道及隔流堤布置形式方面提出了改善措施。

本书第 3 章讨论的船队(舶)在通过通航建筑物时的安全航行与停泊问题,侧重研究船闸输水系统的布置和闸阀门(人字闸门与反向弧形阀门)的安全运行,而首末级闸室的输水(充水和泄水)布置形式、取(泄)水口布置以及闸(阀)门操作方式,又直接关系到上、下游引航道的非恒定流状态,亦即与第二章的内容紧密联系。

本书第 4 章主要通过数值模拟,对船闸的输水过程及运行过程进行仿真模拟,所得到的各种水力特征值可与第 3 章的物理模型试验值进行对比,而后者又为数值仿真提供必要的各种系数(如输水系统各种阻力系数)值。此外,所研制的船舶模拟器则是研究船队(舶)航行条件的一种新手段,它可弥补小尺度自航船模的不足,即不存在时间上的尺度效应。另外模拟器可模拟外景(云、雾等)。

第 5 章讨论小尺度自航船模技术的应用,它作为判断船队(舶)在上、下游引航道中航行条件的主要手段,比水工模型试验更为直观和真实。但船模试验与水工、河工模型试验又是不可分割的一个整体,因此本章内容与第 3 章内容也是相互紧密联系的。

综上所述,本书各章内容既可自成体系,又是相互紧密联系的,它们综合在一起,全面反映了枢纽通航建筑物应用基础研究的全貌。

1.3 本书概要

1.3.1 导论

本书第 1 章“导论”主要介绍了三峡工程通航建筑物的概况,对于通航建筑物的作用

①、② 30+2 年或 50+4 年是指枢纽运行 30 年末或 50 年末各增加一个 1954 年和 1955 年典型水文年,这是水库泥沙淤积试验所需要的。

与意义、永久船闸和升船机在枢纽中的布置及其主要技术参数作了简要介绍,对通航建筑物应用基础研究所涉及的几个主要方面及其相互关系作了说明,最后扼要介绍了本书各章节的主要内容。

1.3.2 枢纽泄洪对坝区通航条件的影响

本书第2章主要介绍枢纽泄洪、船闸输水以及电站调峰对通航条件的影响。三峡水库汛期最大通航流量为 $5.67 \text{ 万 m}^3/\text{s}$,相应的库水位为147m,此时现有3000t级船队可单向运行。对于万吨级船队与客货轮迎向运行情况,采用通航流量 $4.50 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 与库水位145m相组合。近期通航流量为 $3.50 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 时的库水位为135m。

为了使船队(舶)安全通过坝区和通航建筑物,必须在设计引航道布置时,满足航运部门提出的三峡工程通航标准。除布置上的一些具体要求,如闸前引航道直线段和过渡段长度、引航道宽度、弯曲半径等外,对于水流条件的具体要求是:引航道内最大纵向流速不大于 $0.5 \sim 0.8 \text{ m/s}$,横向流速不大于 0.15 m/s ,波高小于 $0.3 \sim 0.4 \text{ m}$,引航道口门区纵向流速小于 2.0 m/s ,横向流速小于 0.3 m/s ,回流流速小于 0.4 m/s 。升船机承船厢处的波高要求小于 $\pm 0.15 \text{ m}$,该限值是由平衡重式承船厢所允许的最大误载水深所决定的。此外,还需满足船队(舶)在引航道内靠船墩处允许系缆力的要求。

针对三峡工程的具体情况所进行的大量试验研究表明,通过采取相应的工程措施,优化船闸与电站的运行方式,可以达到坝区通航条件的要求。

一、枢纽泄洪对上游引航道通航条件的影响

枢纽泄洪对上游引航道通航条件的影响主要表现在以下两个方面:一是枢纽泄洪和船闸自上游引航道内取水引发的非恒定流对船只航行和停泊的影响;二是随着工程运行年份的增加、水库泥沙淤积的发展,改变了原有河势条件,从而加大了由主流摆动生成的往复波流对通航水流条件的影响。

物理模型试验研究和数学模型分析计算表明:枢纽运行初期(30+2年),水库泥沙淤积量较小,坝区河段水流基本保持空库态势,引航道内非恒定水流的各项水力要素的变化仅与通航水位、引航道的布置形式、船闸调度运行方式以及船闸取水口布置形式等有关。

枢纽运行后期(50+4年),由于水库泥沙淤积增多,河床比空库时深槽最大可抬高100多m,河槽深泓线和主流线左移160~480m,河道断面上流速最大增加5~9倍,天然河势发生较大改变,致使引航道口门前的回流强度加大,从而引发引航道内的往复波流,并对通航条件造成影响。

枢纽泄洪与船闸联合运行的试验研究表明:枢纽运行初期(30+2年),船闸充水采用侧向取水方式时,对于各种引航道布置方案(短隔流堤、大包或全包等),通航建筑物上游航道的通航条件均可满足要求,但升船机承船厢内的水位波动尚超过允许值。枢纽运行后期,采用大包或全包方案,堤头适当左移,再辅以升船机消浪措施(在其右侧直立式隔流堤上升孔),则上游航道的通航条件亦可满足要求。

二、枢纽泄洪对下游引航道通航条件的影响

根据工程总体布置,末级船闸闸室泄水由两套独立的泄水系统组成:主泄水廊道向外江旁侧泄水,辅助泄水短廊道向下游引航道内泄水。对内外泄水系统的特性与联合运行方

式和相应改善措施的研究表明：外泄廊道出流与长江主河道水流正交，两股水流叠射产生的涌波下行至引航道隔流堤头后，将绕过堤头传入引航道内，从而引发出周期性波动的非恒定流波，直接影响到船舶的航行和停泊。船闸双线同时外泄时最为不利，将不能满足通航要求。

为了改善通航水流条件，采用内外泄水廊道配合运行方式，即主要通过外泄廊道泄水，当泄水水头较小时，再开启内泄阀门向引航道泄水，这样可达到减小引航道内的水位波动、控制闸室水位超泄值和泄水时间的目的。

采用单线船闸运行或双线船闸错开运行的方式，可以有效地降低升船机承船厢内的水位波动，但仍略超过允许值。大坝泄洪对升船机承船厢水位波动的影响就更显著了。

针对洪水频率 $P=1\%$ 的调洪方案所进行的试验研究表明，在调洪过程中，下游引航道中往复流波动值并不大，只是升船机承船厢内波高达到 0.6m 左右，大大超过了承船厢的允许误差水深，但对船舶（队）在下游引航道及口门区的航行条件并无影响。

三、电站调峰非恒定流对通航条件的影响

根据工程设计规划，三峡电站具有如下运行特性：汛期低库水位、大来水量下，电站主要承担电力系统中的基荷，机组满负荷运行，电站泄量稳定，其在枢纽总泄量中所占比例较小，不存在电站调峰非恒定流对通航的影响。但在枯水季节，水库水位高，来水量小，不存在弃水，电站主要承担电力系统中的调峰任务，电站负荷日调峰幅度较大，相应下泄流量的变化幅度也大，日最大负荷为 1697.6 万 kW，相应的下泄流量为 1.83 万 m^3/s ，日最小负荷为 150 万 kW，相应的下泄流量为 1580 m^3/s 。因此，电站调峰产生的非恒定流势必对坝下游两坝间（三峡—葛洲坝）河段的通航条件产生影响。试验研究表明，葛洲坝电站的反调节功能足以将三峡电站调峰非恒定流对两坝间通航条件的影响控制在设计要求的范围内。通过优化三峡电站和葛洲坝电站的联合运行方式，可保证在调峰过程中，万吨级船队能正常航行于两坝间航道。由于两坝间河道具有 8600 万 m^3 调蓄库容，对流量的变化具有很大的调蓄作用，非恒定流波在其间传递时，将迅速衰减，从而大大减轻了电站调峰对通航条件的影响。

四、通航水流条件的航行判据

建立船模航行参数与水力学参数特征量之间的关系，作为研究分析通航水流的航行判据。分析了水流对船模航行的作用及其斜流效应，给出了斜流效应与斜流流速的关系、均匀斜流场船舶的横漂速度、非均匀斜流场和用舵条件下的横漂速度。对船闸下游口门区非均匀斜流横漂过程建立了数值模拟。采取坐标变换的方法，引入斜流中平均速度来计算船队的有关运动参数，并用 PIP 自动舵对船队进行控制。设定船队在斜流中的运动为纵荡、横漂和转动三者的复合运动，从而建立标准运动方程组。计算与船模试验的结果是一致的。此外还利用自航船模研究了非恒定流对航行的影响。试验表明，泄洪非恒定流对引航道口门区的航行有明显影响，可使船队对岸航速发生较大变化，但尚不致碍航。

1.3.3 船闸输水系统和闸阀门水力学

本书第 3 章主要介绍船闸输水系统和闸阀门水力学应用基础研究的情况。由于三峡永久船闸为双线连续 5 级船闸，其总水头达 113m，中间级闸室最大工作水头达 45.2m，闸室

输水时间要求不大于 12min, 上闸首人字闸门高 40m, 淹没水深达 35m 以上。上述水力指标均超过了世界上已建的许多高水头大型船闸, 其技术问题十分复杂。为了保证船队(船)能安全、迅速地通过船闸, 需要解决一系列技术难题, 可归纳为以下几方面。

一、输水系统水力学

三峡永久船闸输水系统采用了 4 区段 8 支管顶支孔出水盖板消能的动力平衡系统, 它可使水流均匀分布于整个闸室平面, 从而可减小闸室输水所导致的非恒定流水面波动和局部水流紊动, 保证船队(船)在闸室内的停泊条件, 使系缆力不超过允许值(纵向分力小于 50kN, 横向分力小于 30kN)。

为了阐明输水过程一些水流现象的机理, 在物理(水工)模型试验的基础上建立了复杂分散输水系统的数学模型, 并对出水支廊道的支孔流量分配规律进行了分析计算, 得出了影响支孔出流的各种因素, 如支孔形状、廊道雷诺数、廊道阻力、支孔高宽比、支孔总面积与廊道面积比等。根据研究成果对三峡船闸输水系统的支孔布置提出了改进意见。

此外, 还提出了减小船闸输水惯性超高(降)的改善措施, 避免人字闸门被反向作用水头顶开或在开启过程中恶化闸室内的船舶停泊条件。

二、船闸阀门水动力学特性

船闸输水阀门是船闸运行的咽喉。在高速水流的作用下, 阀门每日将操作运行数十次, 因此必须了解其水动力学特性。在本书中, 针对三峡船闸的具体情况, 研究了阀门段廊道水流流态特征, 探明了阀门段非恒定急变分离流的机理, 分析了影响空化与振动的因素, 利用流动显示技术和二维大涡模拟数学模型探讨了阀门段流场特征, 对阀门后廊道底扩体形与顶扩体形流态进行了综合比较, 说明了底扩体形的特有流态, 将对改善阀门空化和振动十分有利。

对反弧门后水流收缩系数的观测和研究表明, 该系数与阀门及廊道体形有关, 它是高水头船闸水力计算和设计的一项重要水力参数, 特别对于计算门后最低压力、最大流速和空化数是必不可少的。

对阀门段廊道压力的非恒定流数据信号处理、压力的时域特性、频域特性、阀门承受的最大水动力荷载系数均进行了详细的试验研究, 所得成果为设计部门提供了依据。

对阀门启闭力与支铰荷载特性的研究表明, 阀门启闭速率、阀门体形均对启闭力有影响。在研究中优化了阀门门型、阀门底缘形式和支臂包护方式。计算获得的阀门支铰受力与实测值是一致的。

三、阀门空化特性及抑制空化措施

高水头船闸阀门空化是导致阀门及阀门段廊道边壁空蚀破坏以及阀门振动的主要原因, 对于三峡船闸来说, 是必须解决的技术难题之一。由于阀门确定采用快速开启, 其非恒定流特性十分明显, 因此在本书中首先对非恒定流减压试验方法进行了探讨, 这是研究船闸输水阀门空化所必须的, 为此专门研制了大型非恒定流减压设备, 可进行 1:10 三峡船闸阀门的大比尺减压模型试验。通过试验研究, 给出了抑制阀门空化的工程措施, 主要有三方面: ①采用快速阀门开启方式, 以 t_0 (阀门开启时间) 为 1~2min 为佳; ②优化阀门段廊道体形, 通过底扩与顶扩体形抗空化性能的比较, 论证了前者具有明显的优越性, 其临界空化所对应的初始淹没水深比顶扩减小了 10m 左右; ③阀门门楣通气措施经过 1993~

1996年在葛洲坝1、2、3号船闸中实施,取得了明显的抑制阀门底缘和顶止水缝隙空化的效果,在此基础上,提出了三峡船闸门楣加设掺气坎的通气措施;④跌坎通气措施,对工程已确定采用的阀门后廊道底扩体形,在跌坎处加设通气管,以强迫通气方式解决某些非正常运行工况下可能产生的局部空化。

四、阀门流激振动特性及减振措施

在水弹性相似的物理模型上研究了三峡船闸阀门水流激振动特性,并结合葛洲坝、五强溪等船闸的原型观测,认为三峡船闸阀门的水力性能较优,阀门段空化得到充分抑制,因此在运行过程中不致产生危害振动。

对阀门结构进行了动态优化设计,通过灵敏度分析,指出了结构的动态薄弱环节及修改方向。

针对结构动力响应所采取的减振措施有很多,经多方面比较,针对船闸反弧门运行特点,确定采用可控油液阻尼器作为阀门智能减振措施,它利用阻尼消耗振动能量使振幅值衰减。结构的振动通过活塞缸使活塞产生往复运动,此时油液通过活塞上的节流孔和节流管,从而产生强烈的摩擦,使振动动能转变为热能而消散。通过调节节流阀控制阻尼器的阻尼系数和阻尼力,油液阻尼器安装在反弧门上边缘两角点处。试验结果表明,安装阻尼器后,可使阀门原径向加速度响应降低50%左右,切向加速度响应降低70%左右,但对侧向加速度影响不大。说明在反弧门上安装油液阻尼器改变了结构的自振特性,起到了一定的减振效果,将其应用于阀门流激减振是可行的。

五、船闸人字闸门运行动水阻力

与输水阀门一样,船闸工作闸门亦是启闭频繁的重要设备,上闸首人字门更是枢纽前缘的挡水设备。闸门运行动水阻力与淹没水深、启闭方式、启闭机型式以及边界条件(门瓮形状、门底间隙、有无补水涵洞)有关。通过物理模型试验,得出了动水阻力矩的变化特征,提出了减小阻力矩峰值的措施。对液压直联式和四连杆式启闭机进行了比较,并对其运行方式进行了优化。研究表明,对选定的液压启闭机,采用一级和二级无级变速运行,均能大幅度降低动水阻力矩,减小运行角加速度亦可有效降低阻力矩峰值。

六、船闸水工模型试验缩尺效应

任何水工模型试验均存在一定程度的缩尺效应,模型比尺愈大,缩尺效应愈小。船闸水工整体模型比尺一般介于1/40~1/25之间。由于输水廊道的糙率在按比尺换算为原型糙率后,均比原型实际混凝土廊道糙率要大,再加上模型水流雷诺数比原型要小,达不到阻力平方区即完全紊流流态的要求,因此廊道的沿程阻力系数偏大,这样模型实测的流量系数就偏小,导致输水流量偏小,输水时间偏长,因此对模型中所量测的水力特征值必须加以校正。

1.3.4 船闸运行过程仿真模拟及可靠性分析

本书第4章主要介绍船闸输水过程和船舶过闸仿真以及船闸运行可靠度分析。

三峡连续5级船闸要满足不同时期(施工期、永久通航初期及后期)上、下游水位变化的要求。有些水位情况下需采用后3级或4级运行,有些情况下又必须补水运行,其运行情况极为复杂,因此预见其建成后的运行情况十分必要。本章主要采用计算机仿真模拟

方法,对船闸输水及船舶过闸过程进行模拟,其优点是经济、快速、易于长期保留,预演过程整体性强,缺点是直观性不如物理模型,一些系数尚不能完全从理论或经验上确定,某些系数还需由物理模型提供。

由于船闸的闸、阀门众多,操作频繁,一旦出现故障,必将影响船舶过闸,严重时甚至会造成断航。因此对船闸运行可靠性的分析是很重要的。

一、船闸输水过程仿真

船闸输水过程仿真的实质就是模拟输水过程的水力情况。为了确保模拟的精度,专门利用了一个已建的物理模型,测定仿真模型所需的某些系数,如输水系统的各种阻力系数,并将计算所得的水力特征值与模型实测值进行对比。针对三峡船闸的具体布置,对各种典型运行状态进行了仿真计算,获得了相应的水力特征值和水力特性曲线。

二、航行条件的快时模拟

应用数学模型研究船舶在航道中的航行状态。首先根据“环境”(水流条件、船舶操纵控制条件等)决定船舶的操纵情况,应用水动力模型,得到船舶的运动状态;由船舶的运动资料,进一步考虑对船舶航行的“环境”的影响,然后根据航道条件设计操舵用车过程,再应用水动力学模型计算船舶受力,最后由船舶运动方程式计算船舶的航行状态。由于该研究方法将操船人的行为也数学模型化了,故称之为快时模拟。

应用该模拟方法,曾对广东飞来峡枢纽下游航道的通航条件进行了研究,针对两条航线,分析研究了水流流态,船舶操舵方式,船舶的航线、航向、运动速度以及航迹带等。

三、船舶航行条件实时模拟器的研究

船舶通过三峡船闸的过程,不仅要考虑船舶的操纵性能,还要考虑船闸输水对船舶运动的影响,以及船闸等建筑物对航行的限制,甚至还要考虑自然气象条件(如风、雾)的影响,因此其复杂性远比模拟输水过程为甚。

从70年代开始,国外研制了船舶模拟器,对船舶的航行条件进行实时仿真模拟。在模拟器中,船舶操纵运行采用数值仿真,驾驶人员可根据三维虚拟外景在模拟驾驶台前通过有关仪表操纵船舶,各种操纵参数被输入船舶操纵运动数学模型进行仿真,船舶的位置发生变化,外景也随之改变,驾驶人员可根据变化了的外景及仪表的新参数进行操纵,如此反复。

为此,开展了船舶航行条件实时模拟器的研究,分析了模拟器的系统要求和组成。完成了船舶航行条件实时模拟器的成像系统、船舶运动仿真系统以及操纵驾驶台系统等的研制工作,并对所研制的模拟器进行了性能测试。结果表明:满足设计要求且性能良好。利用该船舶航行条件实时模拟器对船舶进出三峡船闸的实际情况进行了仿真,发现船舶可较平顺地进入闸室,但船舶操纵人员较为紧张。

四、船闸运行可靠性分析

采用网络分析法对可靠性进行预测。首先将系统的工程图转变为系统的可靠性框图。系统的工程图是表示组成系统的部件(单元)之间的物理关系和工作关系,而可靠性框图则描述系统的功能与组成系统的部件(单元)之间的可靠性功能的关系,设想有一个信号从框图的输入点进入,如果系统是可靠的,那么信号可以从框图的输出点得到。可靠性框图是建立在对系统整个部件功能了解的基础上的,部件在结构上是串联的,但功能并非一定