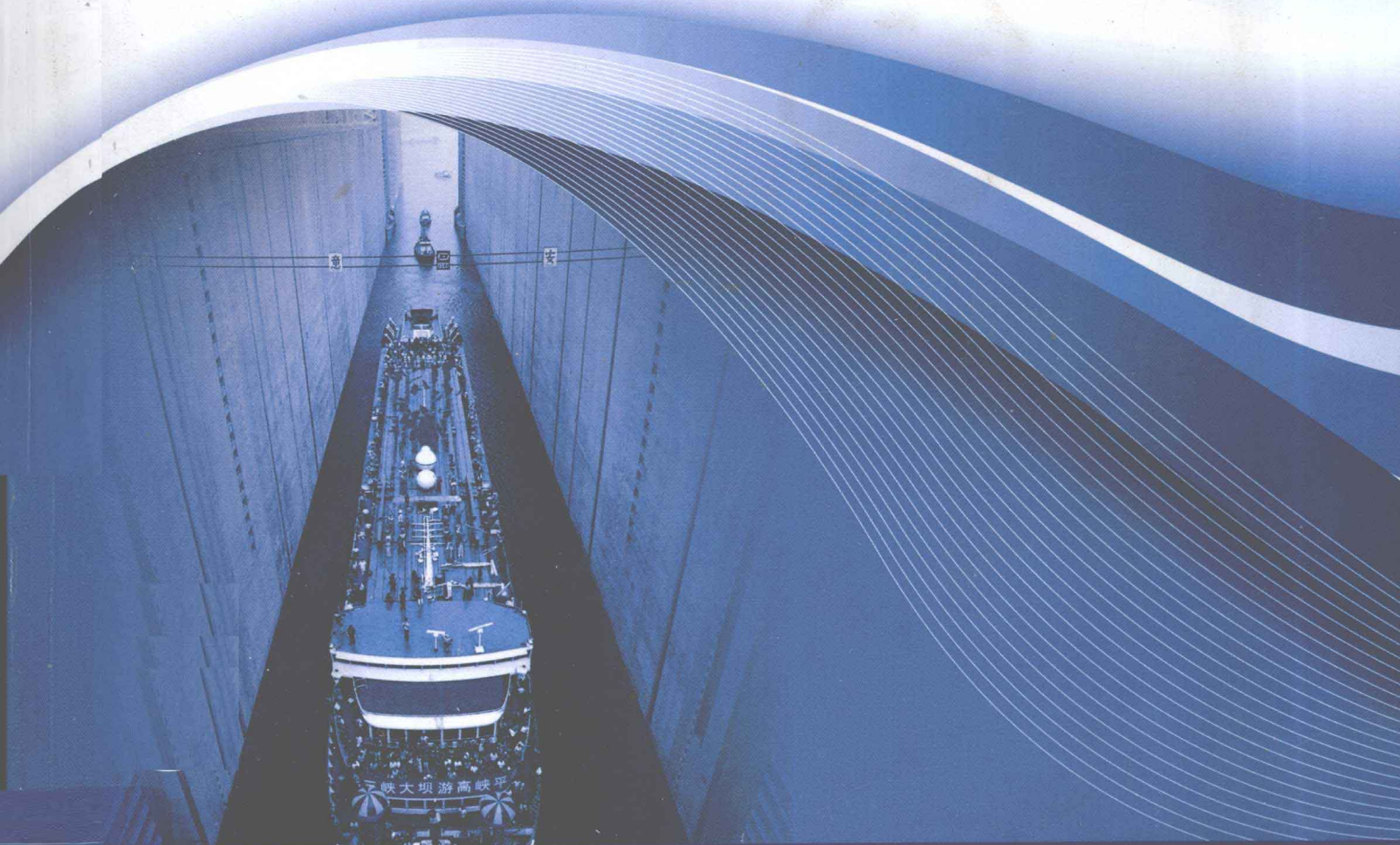


Navigation Technology in Water Resources and Hydropower Engineering

水利水电工程 通航技术

中国水电顾问集团华东勘测设计研究院 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

水利水电工程通航技术 / 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院组编. —北京: 中国电力出版社, 2011.2

ISBN 978-7-5123-1413-9

I. ①水… II. ①中… III. ①水电站—船闸—通航
IV. ①U641

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 025514 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月北京第一次印刷

880 毫米×1230 毫米 16 开本 34.5 印张 1095 千字

定价 125.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

序

我国幅员辽阔、流域众多，蕴藏着丰富的水利资源，为发电、航运、供水、灌溉、养殖业等提供了优越的条件。发展航运是综合利用中一项重要内容。

自古以来，江河就是大自然提供的天然通道，许多民族都依水而居，靠水路交通、运输，水运在人类发展过程中起了重大作用。在近代，水运以占地少、耗能小、投资少和成本低等优势，成为综合运输体系中的重要组成部分。进入 21 世纪以来，我国内河航运事业发展迅速，通航建筑物技术也随之日新月异。

通航建筑物主要有船闸和升船机两大类，各具优缺点。随着水口和五强溪三级船闸、三峡双线五级船闸，大化、乐滩、桥巩、巴江口、草街等船闸的投运，红水河岩滩、闽江水口、清江隔河岩、清江高坝洲四座升船机的建成，以及水利工程上各类通航建筑物的落成，我国水利水电工程通航技术得到前所未有的发展。目前，我国已建和在建的总水头 20.0m 以上的船闸共 25 座，占世界总数的 1/4。我国船闸及升船机技术水平已跻身世界先进行列。

为了总结和展示水利水电工程通航领域的建设经验和创新成果，中国水电顾问集团华东勘测设计研究院组织编写了本书。本书汇集了福建闽江水口水电站通航建筑物、上海苏州河河口水闸、福建沙溪航运梯级通航建筑物、新安江通航建筑物和广西航电枢纽通航建筑物有关资料，包括试验研究、水工设计、金属结构、电气、施工管理以及运行监测等方面论文 100 余篇。文集结合实践，系统地整理了上述通航建筑物在各领域取得的技术进展和丰硕成果，特别注意阐述了我国的创新亮点。例如上海苏州河水闸采用了国内首创的 100m 大跨度闸门创新技术，福建水口高水头三级船闸输水系统创新技术，福建沙溪口船闸输水阀门突扩减压系统创新技术，福建高砂船闸集中输水创新技术等。尤其是福建闽江水口水电站的 2×500t 垂直升船机，既充分吸收国外技术，又紧密结合水电站具体建设条件和我国实际技术条件，精心选定机型及设计方案，做到技术上有所创新，既“简单”又“安全”，获得“2007 年度国家科学技术进步二等奖”，为三峡升船机建设提供了实践经验和实体模型，推进了升船机事业

的蓬勃发展。

当然，本书所述主要为华东地区和广西境内的通航建筑物，远未包括我国水利水电工程通航技术的全部成就。我希望本书的出版，能进一步促进水运交通工程技术创新，加快水利水电工程通航技术的现代化进程，为水运事业的可持续发展作出积极贡献。

潘家铮

2010年9月3日

前言

我国是世界上最早修建通航建筑物的国家，早在公元 11 世纪就已在通航河流上建有简易船闸，当时往往是为了改善河流通航条件而进行的单目标开发。20 世纪 50 年代末，开始在大型水利枢纽上建造船闸，先后建成了湖南双牌船闸和广西西津船闸，从此开始了我国大型水利枢纽上建设船闸的历史。尤以 70 年代以来，随着大型水利枢纽综合利用的多目标要求，结合水电站的建设，许多高水头大型船闸，如富春江电站七里泷船闸、长江葛洲坝水利枢纽的 1~3 号船闸、江西万安电站船闸、福建沙溪口船闸、水口三级船闸、水口 $2\times 500\text{t}$ 级垂直升船机、清江隔河岩垂直升船机、湖南沅水五强溪三级船闸、长江三峡五级船闸等相继建成，把我国通航建筑物建设迅速推向世界水平。

20 世纪 70~90 年代，在我国通航技术快速发展的这三十多年中，中国水电顾问集团华东勘测设计研究院（以下简称华东院）承担过多项水利水电工程通航建筑物的勘测设计任务，70 年代有富春江水电站七里泷船闸；80 年代有浙江瓯江紧水滩水电站、石塘水电站高低轮式斜面升船机，福建沙溪口水电站通航船闸、洋口水电站通航船闸；90 年代有福建水口三级船闸、福建沙溪流域 6 个航运梯级通航船闸、浙江新安江航道 3 个梯级通航船闸、水口 $2\times 500\text{t}$ 级垂直升船机，直到现在设计的广西桂江巴江口通航船闸及上海苏州河河口水闸。在为数众多的工程建设中，华东院不断地研究与创新，积累了丰富的实践经验，逐步形成了华东院通航建筑物设计特色和核心技术，反映了不同时期我国通航建筑物建设水平。

大、中型水利枢纽船闸、水闸及升船机的设计、研究、施工需考虑的各种因素远比一般通航运河的复杂，为了总结华东院多年通航设计技术的宝贵经验与研究成果，促进学术交流，华东院特组织编写了本书。本书从试验研究、水工设计、金属结构、电气系统、施工管理、运行监测几个方面着手，归纳整理了包括通航船闸总体设计，输水系统选型设计及试验研究，上、下游引航道的布置与设计，升船机形式选择，升船机的设计与施工，大型船闸与大型升船机金属结构闸阀门设计与研究，大型升船机电气设计与研究，大型河口水闸的结构设计与施工、电气设计研究等专业有代表性、有经验性的论文。

以福建水口水电站枢纽三级船闸及垂直升船机为例，华东院作为设计单位，参与工程建设的时间长达 20 年之久，本书收编了水口三级船闸及垂直升船机的总体布置、高水头船闸输水系统设计研究，以及科研、制造、施工、安装、调试、监理和建设管理等方面内容的文章，全面反映了在水利枢纽中多目标开发中建造高水头通航建筑物遇到的难题与挑战。

近年来随着我国西部高水头大容量水电工程的开工建设，水利水电通航建筑物的规模越来越大，技术难度越来越高，虽然取得了很大的成绩，但也面临不少的挑战。我们在现阶段编撰这本书也是希望能给水电同行带来可以借鉴的经验，我们也相信本书对于提高我国水利水电工程通航

技术的设计、研究、施工和运行技术水平将起到重要的促进作用。

在我们几十年的设计实践中，不断学习并融合了国内外专家的智慧与经验，且在本书的编辑过程中，得到了许多专家、学者的支持和指导，尊敬的潘家铮院士特为本书作序，在此谨向他们致以敬意！

本书共收编论文 100 余篇，分为技术综述、水工设计、金属结构、电气设计、运行监测、试验研究、施工管理七个部分。

受经验和技术水平所限，本书尚存在一定的不足，敬请广大读者谅解。

本书编写组

2010 年 9 月 25 日

《水利水电工程通航技术》

编 辑 委 员 会

顾 问 潘家铮

主 任 委 员 张春生

副主任委员 蒋效忠 吴关叶

委 员 (按姓氏拼音为序)

陈文伟 费京伟 扈晓雯 金晓华 王玉洁

杨建军 汪云祥 郑永明 周垂一 周全才

主 编 扈晓雯

目 录

序
前言

一、技 术 综 述

水电站通航技术发展·····	扈晓雯	(3)
高坝通航技术在水口工程的新发展·····	蒋效忠 汪云祥 扈晓雯	(11)
高水头船闸输水系统设计·····	赵晓琳	(17)
水口水电站 2×500t 级垂直升船机总体设计·····	汪云祥 扈晓雯	(20)
上海市苏州河河口水闸设计综述·····	陈文伟 卢新杰 季永兴	(29)
中国古今斜面升船技术的发展·····	赵志佳	(34)
大型垂直升船机塔楼结构动力分析研究·····	扈晓雯 黄泰仁 熊立刚	(40)
水口水电站三级船闸及垂直升船机·····	王玉珠 赵晓琳 张跃跃	(44)

二、水 工 设 计

水口水电站垂直升船机水工结构设计·····	扈晓雯 吴爱玖	(49)
水口水电站 2×500t 级垂直升船机塔楼结构设计·····	扈晓雯	(53)
水口水电站垂直升船机塔楼 74.00m 高程平台板梁结构分析·····	郑永明	(56)
水口水电站三级船闸下游导航墙设计·····	扈晓雯	(60)
水口水电站垂直升船机上闸首上工作门段结构设计·····	侯继平	(63)
水口水电站三级船闸及上、下游停泊区设计·····	蒋效忠 扈晓雯 许满山	(66)
水口水电站垂直升船机承船厢整体浮运方案选择·····	严 俊	(70)
广西桂江巴江口水电站通航船闸设计·····	黄泰仁	(75)
广西巴江口水利枢纽船闸槛下闸底长廊道分散输水系统设计·····	宣国祥	(80)
沙溪流域斑竹水电站船闸输水系统设计·····	侯继平 郑永明	(85)
沙溪流域斑竹水电站通航船闸设计——闸墙长廊道短支管出流输水系统·····	郑永明 侯继平	(88)
沙溪流域高砂水电站船闸输水系统设计·····	扈晓雯	(92)
沙溪流域高砂水电站通航船闸闸室墙结构选型设计·····	侯继平	(95)
沙溪流域高砂水电站通航船闸设计·····	扈晓雯	(98)
紧水滩水电站航运过坝设施·····	王理华 周华生 叶景文	(102)

新安江航道柘林船闸设计	扈晓雯	(105)
新安江航道妹滩船闸输水系统设计	扈晓雯	(108)
沙溪口水电站通航建筑物设计	扈晓雯	(112)
红水河大化水电站船闸工程设计	麦建清	(117)
红水河桥巩水电站船闸输水系统布置研究	麦建清 宣国祥	(127)
乐滩水电站船闸设计	麦建清	(132)
苏州河河口水闸工程设计特色	季永兴 卢永金 陈文伟 饶建江	(140)
苏州河河口水闸三维固结有限元计算	王 伟 陈 剑 卢廷浩 李 飞	(143)
浮式钢壳沉井作水闸闸墩基础的应用	季永兴 李国林 周 琴 郑永明	(148)
苏州河河口水闸边墩支承座三维有限元分析	张媛媛 金秀华 季永兴	(157)
苏州河河口水闸桩基础设计与检测	季永兴 卢永金 陈海英 郑永明	(162)
苏州河河口水闸大跨度薄壁空箱式底板结构设计	陈 峰 卢永金 季永兴 吴维军 盛 军	(168)
苏州河河口水闸下卧式闸门消能防冲水力学问题	季永兴 卢永金 刘 桦	(173)
苏州河河口水闸沉井沉放影响分析与对策研究	季永兴 卢永金 张永宝 张志玉	(178)
层次分析法在苏州河河口水闸底板助浮方案选择中的应用	季永兴 黄庐进 唐国利 张义顺	(183)
苏州河河口水闸狭小空间基坑围护结构设计	陈 峰 卢永金	(189)
苏州河河口水闸差异沉降控制方案	缪圆冰 夏才初 季永兴 郑永明	(193)
苏州河河口水闸设计中的风险识别	季永兴 黄庐进	(198)

三、金 属 结 构

水口水电站升船机机型选择	汪云祥	(207)
水口水电站升船机闸首挡水闸门	平 静	(210)
水口水电站升船机平衡重系统设计	汪云祥	(216)
水口水电站升船机承船厢结构设计	余海涛	(219)
水口水电站升船机主提升机械设备	汪云祥	(226)
水口水电站升船机主提升设备减速器	张克琴	(229)
水口水电站升船机船厢对接装置	汪云祥	(232)
水口水电站升船机主拖动系统的应用	刘红兵 王 林	(235)
水口水电站升船机安全锁锭装置	陈文伟	(241)
减速器齿轮间隙对水口水电站升船机运行的影响及处理	胥福尧	(243)
水口水电站三级船闸液压启闭设备调试运行若干问题	汪云祥	(245)
水口水电站升船机安装调试有关问题及处理	林宗霖 张瑞清 王明琪	(249)
水口水电站升船机钢丝绳选型及采购	汤 敏 汪云祥	(252)
水口水电站三级船闸下沉式工作闸门设计特点	翟淑琴	(256)
反向弧形闸门作高水头船闸充泄水阀门	沈得胜 徐莲娜	(259)
苏州河河口水闸液压启闭机设计与同步控制研究	陈文伟 卞 建 孙美玲 沈燕萍	(262)
苏州河河口水闸水上安全防撞设施设计	饶建江 胡涛勇 任 涛 陈文伟	(266)
苏州河河口水闸底轴驱动式翻板闸门设计	卢新杰 石守津 韩 晶 陈文伟	(271)
苏州河河口水闸翻板闸门底轴支承材料选择	马盈三 陈文伟 卢新杰	(275)
广西巴江口水电站船闸金属结构设计	孙美玲	(279)
活动坝翻板闸门及液压启闭机设计与应用	孙美玲	(284)
水电站船闸金属结构设计	沈得胜	(288)

四、电 气 设 计

水口水电站垂直升船机供电设计·····	周建阳	(295)
水口水电站垂直升船机计算机监控系统的设计·····	钱志斌	(300)
水口水电站垂直升船机主提升电气控制系统设计与应用·····	刘红兵 崔 勇	(304)
水口水电站垂直升船机电力拖动系统同步设计方案的研究·····	林 峰	(308)
水口水电站垂直升船机检测设备的设计与配置·····	王 林 林景华	(311)
水口水电站垂直升船机运行程序设计·····	汪云祥 王 林 陈文伟	(317)
水口水电站垂直升船机直流调速系统负载自适应控制的实现·····	崔 勇 刘红兵	(322)
水口水电站垂直升船机工业电视、通航信号和广播系统·····	王 林	(326)
水口水电站垂直升船机计算机监控系统的双机热备方案·····	黄晓芬 雷念芳	(330)
水口水电站垂直升船机计算机监控系统设备选型·····	王 林	(335)
组态软件 InTouch 在升船机控制系统中的应用·····	黄晓芬	(339)
Profibus 双网冗余技术在水口水电站垂直升船机的应用·····	王 湛 钱志斌 李海龙	(343)
S5 PLC 串行通信技术在水口水电站垂直升船机的应用·····	王 湛 代诗刚 雷念芳	(347)
水口水电站垂直升船机多功能数据库管理程序·····	黄晓芬 林宗霖	(350)
苏州河河口水闸液压启闭机电气及同步控制系统·····	王 林	(354)
苏州河河口水闸工程供电设计·····	沙 滨 陈 钢	(357)
苏州河河口水闸监控系统·····	徐 涵	(359)
紧水滩水电站斜面升船机电设计·····	翟堃煜 郎天锡 胡祖安	(364)

五、运 行 监 测

水口水电站垂直升船机观测设计·····	王玉洁 李延芳	(371)
水口水电站升船机原型观测·····	陈锦珍	(374)
水口水电站升船机监测设计及监测资料分析·····	王玉洁 徐建清	(380)
水口水电站垂直升船机承船厢下水观测·····	余良民	(385)
水口水电站三级船闸一闸室结构监测资料分析·····	王玉洁 徐建清 魏德荣	(389)
苏州河河口水闸工程监测·····	吕永宁 郑晓红	(395)
苏州河河口水闸闸门轴变形监测系统·····	夏一强 王小荣 吕永宁	(398)
福建沙溪口水电站船闸监测资料分析·····	徐建清 王玉洁	(401)
富春江水电站船闸变形观测资料分析·····	赵 斌 王志远 王梅技	(404)

六、试 验 研 究

水口水电站垂直升船机 1:10 整体物理模型试验研究·····	包纲鉴	(413)
水口水电站升船机塔楼结构动力试验研究及数值分析·····	何 蓓 李同春	(422)
水口水电站升船机船厢液压调平系统试验·····	林宗霖 王明琪	(426)
水口水电站垂直升船机安全锁锭装置现场试验·····	郑冬梅 汪云祥	(429)
水口水电站升船机主提升系统试验的安全控制·····	胥福尧	(434)
苏州河河口水闸垂直二维流动精细数值模拟·····	王本龙 何刚强 王瑟澜 刘 桦	(438)
苏州河河口水闸平面二维水流数值模拟·····	吴 卫 季永兴 王瑟澜 张景新 刘 桦	(443)
苏州河河口水闸渗流场数值分析·····	王 蓬 何刚强 季永兴	(448)

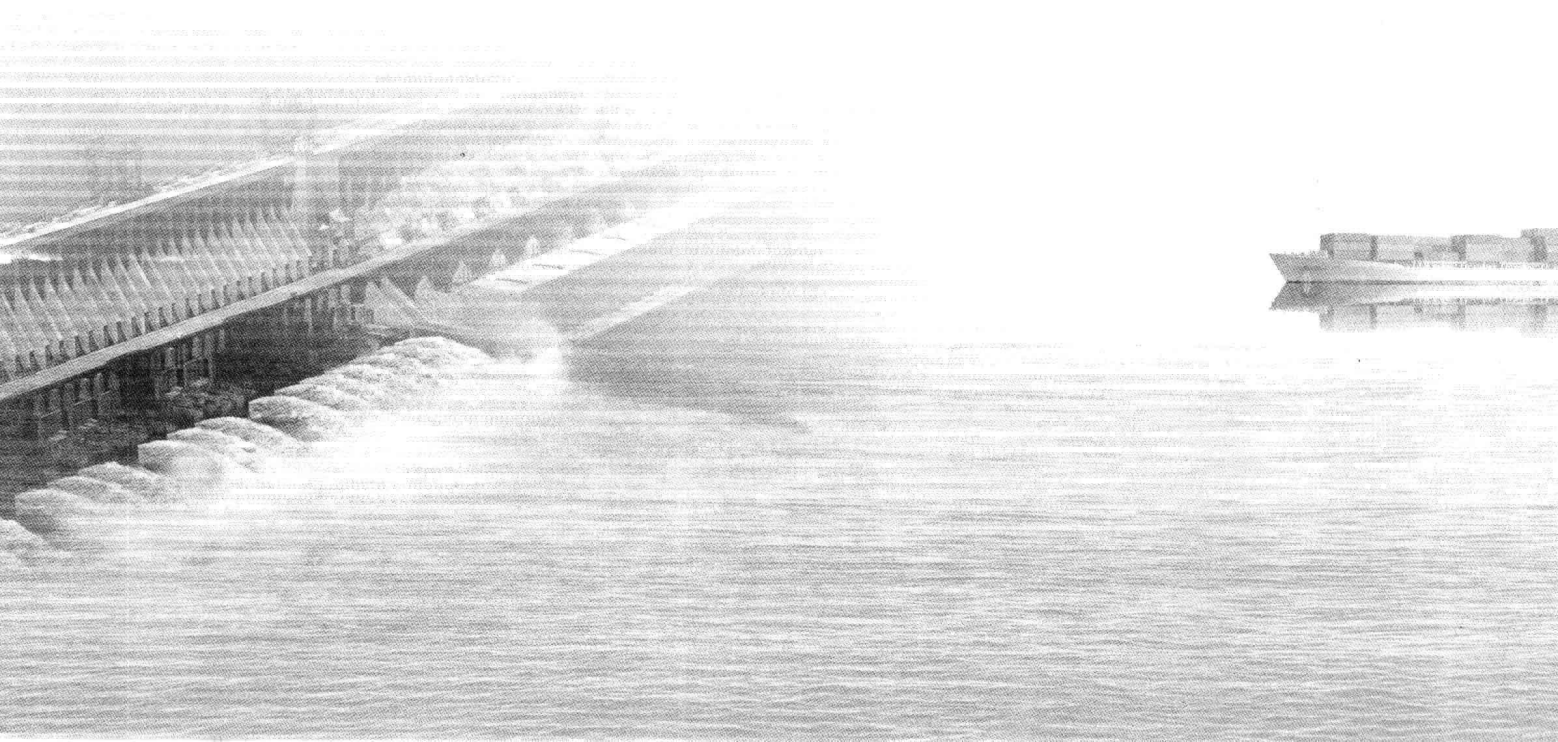
苏州河河口水闸抗波浪振动控制方法.....	罗银淼	冯颖慧	齐尔鸣	(453)		
苏州河河口水闸流体激振模型试验.....	罗银淼	刘佑清	吕飞鸣	(459)		
苏州河河口水闸金属结构数学模型分析研究.....			严根华	(465)		
广西桂江巴江口水利枢纽船闸充水阀门模型试验研究.....		宣国祥	王溥文	(478)		
基于计算机网络的船闸优化调度系统开发研究.....	李中华	张瑞凯	宣国祥	(483)		
船闸闸室空间优化调度模型仿真及评价.....	宣国祥	张瑞凯	李中华	(488)		
广西乐滩水电站船闸闸室流态问题的研究与对策.....		张艺祯	麦建清	(492)		
三峡船闸完建期提高船闸通过能力措施研究.....	胡亚安	张瑞凯	李 云	宗慕伟	李 君	(495)

七、施 工 管 理

水口水电站垂直升船机塔楼结构施工.....	杨有霖	边财松	黄德平	(509)
滑框倒模技术在水口水电站 2×500t 级垂直升船机塔楼施工中的应用.....	杨有霖	边财松		(514)
水口水电站三级船闸四闸首人字闸门安装.....			陈东曦	(518)
水口水电站三级船闸土建工程施工质量监理.....			何大明	(521)
钢纤维硅粉混凝土在三峡临时船闸坝段叠梁门槽中的应用.....	陈 鼎	樊述斌		(526)
MgO 混凝土在沙溪口水电站船闸闸室右闸墙缺陷处理中的应用效果分析.....			陈重喜	(530)
水口水电站升船机的运行安全性.....			郑冬梅	(535)



一、技术综述





水电站通航技术发展

扈晓雯

(中国水电顾问集团华东勘测设计研究院)

【摘要】 本文概括介绍了中国水电顾问集团华东勘测设计研究院成立 50 年来在水电站通航设计领域所取得的卓越成就。

【关键词】 通航建筑物 总体布置 输水系统 结构设计 技术发展

1 发展状况

我国是世界上最早修建通航建筑物的国家, 20 世纪 50 年代以来, 我国通航建筑物的建设得到了迅猛发展, 迄今已建成船闸 900 余座。高水头通航建筑物的建设始于 60 年代, 至今已有 16 座单级和连续多级高水头船闸。70 年代以来, 结合水电站的建设, 许多高水头大型船闸如富春江电站七里泷船闸、长江葛洲坝水利枢纽的 1~3 号船闸、江西万安电站船闸、福建沙溪口船闸、水口三级船闸、水口 $2 \times 500\text{t}$ 级垂直升船机、清江隔河岩垂直升船机、湖南沅水五强溪三级船闸、长江三峡五级船闸相继建成, 把我国通航建筑物建设迅速推向世界水平。

中国水电顾问集团华东勘测设计研究院(以下简称华东院)成立 50 年来, 承担过多项水电站通航建筑物的勘测设计任务, 20 世纪 70 年代有富春江电站七里泷船闸; 80 年代有浙江瓯江紧水滩、石塘水电站高低轮式斜面升船机, 福建沙溪口船闸、洋口船闸; 90 年代有福建水口三级船闸、福建沙溪流域 6 个航运梯级船闸、浙江新安江航道 3 个梯级船闸, 水口 $2 \times 500\text{t}$ 级垂直升船机, 直到现在设计的广西桂江巴江口船闸。

2 通航船闸

船闸是克服河流上建坝形成的集中水位差的一种过坝建筑物。它由闸首、闸门、输水系统、闸室、引航道、导航靠船建筑物等组成, 是过船建筑物的一种主要型式。华东院设计的浙江富春江七里泷, 福建沙溪口、水口等水电站船闸, 福建沙溪流域航电梯级、浙江新安江航道梯级船闸, 均属于这种类型的过坝建筑物。在船闸设计中, 平面布置确定后, 重点是进行船闸输水系统设计和船闸结构设计, 主要为了解决船闸水力学问题和船闸结构问题。

2.1 输水系统

华东院设计的第一座通航船闸, 是 1970 年建成的富春江七里泷船闸, 设计水头 19m, 输水系统采用闸底长廊道短支管加消能盖板, 输水阀门型式为带有随动附腿的锐缘平板钢阀门。水流通过进水口进入闸底长廊道, 由短支孔向闸室供水, 属于单区段供水, 出水孔的分布及消能条件好, 可减少局部水流力的作用, 尤其对阀门开启不同步或单边阀门开启的适应性较好。其布置简单、造价较低、技术成熟。从七里泷船闸多年的运行情况看, 闸室内水流平稳, 水面涌高均匀, 系缆力小, 船舶在闸室内的泊稳条件好。

20 世纪 80 年代, 华东院设计的福建沙溪口船闸, 航道等级 V 等, 通过 300t 级船闸, 设计水头 24.2m。在当时国内已建成的单级船闸中, 大于 24.2m 水头的仅有葛洲坝船闸, 输水系统采用四区段等惯性底板纵向长廊道加消能盖板方案。沙溪口船闸由于闸室宽度偏小, 无法布置复杂的多区段等惯性输水系统, 通过水力学模型试验研究后采用简单动力平衡输水系统。由于设计水头偏高, 充水阀门廊道压力过大, 设计研究在充水阀门后采用突扩廊道型体的超空穴方案, 避免或减弱阀门底缘空化, 改善阀门工作条件。通过多方案的比选和优化, 采用了闸底板长廊道多支孔垂直出流, 盖板消能分散式输水系统形式以及带附腿的锐缘平板钢阀门方案。这是我国第一次在输水阀门后采用突扩洞室体型方案, 经原型充泄水验证, 水面升降平稳, 输水效果良好。



20 世纪 80~90 年代,随着科学技术水平的提高,我国船闸设计越来越向着水头高、闸室平面尺寸大、充泄水的水体大、充泄水时间短、阀门开启速度快的趋势发展。华东院设计的福建闽江水口船闸,就是在这时期建设的。

水口水电站位于福建省闽江干流闽清县境内,距闽清县城 14km,上游距南平市 94km,下游距福州市 84km。该水电站具有发电、航运等综合利用效益。三级船闸是水口水电站枢纽工程主要建筑物之一,位于枢纽的右岸,与毗邻的升船机共同承担水口工程建成后的闽江永久通航任务。通航规模是根据 1987 年 3 月“四部一省一委”第一次工程协调会确定采用 $2\times 500\text{t}$ 级一线三级船闸和一线 $2\times 500\text{t}$ 级垂直升船机,远景年货运量 400 万 t,木竹过坝量 200 万~250 万 m^3 。工程投运后将有效改善闽江内河航运条件,可与南平上游沙溪口水电站船闸相衔接,沟通闽江至上游支流的航运,500t 级船队可由南平直达福州。

水口三级船闸总水头为 57.36m,最大水头为 41.74m。输水系统采用阀门后突扩型长廊道分散式输水型式,除在初步设计阶段进行了船闸整体模型试验验证所选输水系统合理性外,在技施设计阶段又进行了比尺为 1:25 的船闸水力学模型试验、输水阀门减压模型试验,主要解决输水系统进出口水流流态、闸室充泄水水利特性、船队停泊条件、廊道压力、阀门后空化情况及防止空蚀发生的措施、阀门开启方式等问题。经过大量试验分析研究,较深刻地揭示水口三级船闸水力学现象,解决了诸如:工作阀门后输水廊道采用突扩洞室体型以提高工作阀门段空化安全度;闸室内输水系统的底板主廊道由支廊道在闸室中部进水,立体分流,两区段等惯性输水;旁侧溢流孔为浅没式取水,降低闸室内水面横向坡降,改善船舶受力条件等技术难题。水口船闸通航后,输水系统水力指标、阀门工作条件、船舶在闸室内的泊稳条件非常好,船闸输水系统各项指标均能满足要求。

在水口三级船闸设计期间,华东院同时承接了闽江流域规划中的沙溪航运梯级开发工程的勘测设计任务。20 世纪 80 年代,随着对外开放、深化改革以及外向型经济的发展,学习了国外水资源综合治理的先进技术,吸取了美国田纳西流域开发经验,结合流域资源特点,在资源综合开发治理规划中,以中型水电站梯级连续开发为实施重点,兼顾水资源综合利用要求,充分发挥水资源综合效益。

规划的沙溪河段有高砂、沙县、斑竹、台江、竹洲、贡川 6 个梯级电站,以发电、航运为开发任务。华东院设计了高砂、斑竹、台江、竹洲 4 个梯级电站,沙溪梯级航运过坝采用同等规模的船闸,设计水头相近,属中水头船闸。输水系统的型式各具特色。高砂船闸设计水头 12.0m,属于中水头船闸,输水系统突破现行规范,率先在中水头船闸中采用集中输水方式,通过水力学计算、水工模型试验和实际运行检验,证明所选输水系统具有消能效率高,利用闸首空间充分,水面涌高均匀,水流衔接条件好,结构简单等优点。斑竹船闸采用的分散式侧墙长廊道短支管输水系统,这类输水系统在美国已广泛应用并且技术十分成熟,但在我国已建船闸中尚属首例。竹洲船闸则采用分散式底板长廊道等惯性输水系统,这类输水系统我国早在 70 年代七里泷船闸设计时就采用过,至今运行良好。沙溪梯级船闸设计积极采用了国内外的先进技术,并根据工程条件,灵活应用,因地制宜,较好地解决了船闸水力学问题和船闸结构力学问题。到目前为止,除台江梯级电站正在建设外,其余电站全部投产发电,梯级开发取得了水资源综合治理的成功。

20 世纪 90 年代初,华东院还承担了新安江梯级航道工程的勘测设计任务。这是一项中法合作项目,中方负责通航建筑物输水系统设计;法方负责总体设计,并向中方提供活动坝技术。新安江航道综合利用开发工程,是为了沟通皖、浙、苏三省的水上运输,促进徽州地区经济发展,调整运输网布局和运输结构而兴建的。该工程以航运为主,兼顾旅游、发电、水产养殖等水资源的综合利用。开发屯溪至深度 55km 航道,分妹滩、柘林、湖边三个,并按通航 300t 级船舶的五级航道标准进行建设,从而开辟以新安江为纽带的水上旅游线。

妹滩船闸是航运梯级中的最下游一个梯级,其通航建筑物采用船闸方案。妹滩船闸设计最大水头 13.24m,在设计中结合我国国情,通过研读法方提供的技术文件,根据设计水头和总体布局,对输水系统的布置原则、消能措施、水力特性、停泊条件及适用范围进行分析研究,通过船闸水力学计算,寻求合理的参数范围,从而指导输水系统的布置和设计。经过论证采用闸墙长廊道短支管输水系统,在法国召开的设计联席会上,输水系统总体设计受到法国专家很高的评价。

柘林、湖边两个船闸位于妹滩船闸上游,设计水头在 9~10m,属于中水头船闸。在初步设计中运用



全面质量管理的方法,应用系统工程综合评价理论,通过对已建的湖南甘溪船闸、安徽蒙城船闸收资调研,进行输水系统水力学计算,通过能力分析以及选型布置等,经论证后各项水力指标完全满足规范要求。由于方法正确、论证充分,柘林船闸输水系统 QC 小组荣获能源部、水利部“1991 年度优秀质量管理小组”称号。

从输水系统设计中可以看出,不论是中、小水头还是高水头船闸,选择一个合理的输水系统、确保船闸安全有效运转是船闸设计的关键技术之一。

2.2 船闸结构

船闸结构主要有闸首、闸室、导航、靠船构筑物。闸首由于挡水要求和下沉门的安装要求,一般采用钢筋混凝土坞式结构。船闸闸墙结构型式大体分为整体式和分离式两大类,在船闸输水系统型式确定之后,船闸结构型式大致就确定了。

2.2.1 闸首

为了使船闸闸门设计规范化,华东院设计的船闸挡水闸门,上游一般为下沉门,下游一般为人字门,因此闸首结构受力有一个共同的特点:上闸首结构受力部位主要有帷墙、边墩、底板,下闸首结构受力部位主要有边墩、底板。上、下闸首由于输水系统布置及通航功能的要求,整个结构孔洞多、形体不规则,结构受力复杂。

闸首结构无论是结构体型还是受力特征,都表现出明显的空间性。华东院在闸首结构计算分析中,早在 20 世纪 80 年代就全面、系统地引入了有限单元法对闸首结构进行三维空间应力、位移分析,廊道的圆弧段采用退化的四面体单元进行过渡,利用折线来逼近圆弧线,较能真实完整地反映结构的受力状态。在水口船闸闸首结构分析计算中,采用有限元方法计算分析,发现闸首帷墙处出现较大的拉应力集中现象,最大值高达 5MPa,说明闸首帷墙的应力状态较为恶劣,这为优化闸首结构尺寸及配筋提供了依据。

高砂船闸采用集中输水系统,孔洞集中在闸首部位,采用传统的材料力学方法有较多的局限性,特别是在有孔洞,截面变化处、空间受力部位等很难精确计算。运用三维有限元程序可以达到计算精度要求,真实完整地反映结构的受力状态。根据三维有限元法计算成果,闸首边墩水平及竖向最大位移均在 1cm 左右;上闸首帷墙由于受下游侧边墩向两侧张开的位移协调影响,水平向拉应力较大;闸首底板虽然承受侧向水头较高,但实际拉应力不大,主要原因是一部分荷载转移到帷墙上,由帷墙来承受。

在闸首的配筋设计中,遵循以有限单元法为主兼顾材料力学法的原则,在孔洞、空腔、廊道及进水口部位采用有限单元法成果,在帷墙、闸墩、底板部位采用两种方法相结合的原则进行控制配筋。而且根据应力区的范围、应力值的大小决定钢筋的锚固长度及混凝土不同标号分区。由于结构配筋设计合理,符合实际受力情况,确保了工程安全,取得了十分理想的效果。

2.2.2 闸室墙结构

(1) 分离式结构。七里泷船闸建于 20 世纪 70 年代,单级船闸中 19m 水头偏高,由于输水系统采用闸底长廊道输水方案,底板有较多孔洞,为使闸室墙结构受力清晰明确,稳定应力条件好,设计采用了分离式闸墙。多年的运行实践证明,所选的闸室墙结构合理安全。

高砂船闸是沙溪流域最下游的一个梯级,初步设计阶段对闸室结构型式进行了充分的分析论证,应用全面质量管理的方法,开展了船闸闸墙结构优化 QC 小组活动,进行了整体坞式闸墙和分离式闸墙的结构计算、应力分析、工程量比较、施工难易对比,经技术经济论证和综合比较,两种型式均可行。鉴于该船闸输水系统将廊道、消能结构集中布置在闸首部位,船闸基础沿纵向呈阶梯状,基岩起伏较大,所以选择分离式闸墙结构更合理。岸侧采用钢筋混凝土扶壁式结构,利用回填土压重增加结构的稳定性;河床侧因电站泄洪的要求采用直立式空箱框格墙结构,空箱内回填石渣增加结构的稳定性。本项课题成果获 1996 年度国家级优秀 QC 小组奖。在技施设计阶段,对选定的闸墙结构作了局部细化和进一步优化工作,在船闸建成后的充泄水试验和运行期间,充水时相对变位 1.5mm,泄水时残余变形 0.55mm。变形观测结果在设计允许范围,说明船闸闸墙选型合理,结构处于安全正常工作状态。高砂船闸荣获 2003 年度交通部优秀工程勘测设计三等奖。

(2) 整体坞式结构。沙溪口船闸闸室为整体坞式结构,左侧闸墙为支肋式钢筋混凝土结构,为满足结



构抗剪要求,在墙背回填砂砾石,以平衡部分水压力;右闸墙外侧紧靠溢流坝,泄洪时要求水流平顺,采用空箱直立式结构。输水主廊道通过闸室底板中部,输水主廊道上部开垂直出水孔缝。闸墙内侧设有浮式系船设施供船舶在闸室内系缆停靠。

水口船闸是我国建造的第一座连续三级船闸,位于电站枢纽的右岸,坝址处河谷相对较窄,布置需要充分利用地形地质条件,合理处理通航过坝建筑物与电站泄洪、发电等关系,所以在布置上受到电站枢纽的影响和制约。水口船闸闸墙采用的钢筋混凝土整体坞式结构,在闸墙下部设有输水支廊道、上部设有输水侧溢孔,闸室底板内设有输水主廊道,其特点是孔洞多、结构复杂。为了弄清楚闸室结构的变形和应力状况,设计采用弹塑性结构静动力分析程序,对闸室结构进行二维有限元分析计算。

闸室底板由于输水系统采用闸室中间立体分流的等惯性输水系统,因此在闸室中部设置了分流墩段,分流墩段长 26.0m、宽 32.0m。分流墩段结构形体变化多,承受水荷载大,应力状态相当复杂。为弄清分流墩段结构的应力状况,进行了三向光弹试验和有限元分析计算,用以分析对比。

斑竹船闸由于建基面较低,在底板布置输水廊道有较大的空间,因此闸室采用整体坞式结构;长廊道短支管出流输水系统;闸墙长廊道与闸室的连通短支孔间距 3m,沿着闸墙均匀分布;闸室为一典型的平面受力结构。设计中分别进行二维有限元法及材料力学法计算,底板按弹性地基梁假定,闸墙按悬臂梁假定。计算表明:在最不利荷载组合下,底板、闸墙最大拉应力都能通过配筋加以解决。2003 年底船闸建成充水试验反映:闸墙顶部位移量很小,应力指标小于规范允许值,结构安全稳定。

2.3 输水阀门

船闸输水阀门一般采用平板阀门和弧形阀门,工程中大多采用平板阀门,如沙溪口、七里泷、高砂、斑竹船闸等。随着水头的增加,水力学条件更趋复杂,对输水阀门的要求逐步提高,于是弧形阀门在工程中得到了广泛应用。

华东院设计的水口三级船闸,二闸首的阀门承受水头达 41.70m。由于船闸输水系统运行频繁,且输水阀门的工作条件差,对于三级船闸安全运行十分重要,输水阀门的水力学问题非常突出。根据国内外运行实践,船闸输水系统工作阀门在动水条件下启闭,最好采用反向弧形阀门,它能适应较高水头状况下的运行。华东院在设计中意识到对高水头船闸而言,采用反向弧形阀门比较合适,它能承受各种复杂动荷载作用,解决非恒定流高速水流作用下安全运行的问题,所以针对反向弧形阀门的水动力特性,空化、振动特性及抑制空化的工程措施进行了研究,主要内容如下:

(1) 大气整体模型试验,主要验证和优化整个充泄水系统的布局、观察流态、测定流量和压力分布及优化确定反向弧形阀门后采用突扩结构所需的体形和结构尺寸。

(2) 减压箱局部模型试验,主要进一步验证门体体形,突扩段尺寸,详细测定各点压力变化,流态及空化情况,确定该部分的优化尺寸。

(3) 门楣段局部(1:1)切片模型试验,包括门楣段进行局部掺气,对消除和减轻空化措施的试验。

(4) 流激振动试验,摸清门体结构流固耦合后的动态特性、自振频率和激振频率,是否会出现谐振的可能。通过试验发现,启闭拉杆分节过长,设计中将每节拉杆长度由 10m 改为 5m,以增加这部分刚性和阻尼。

通过试验研究,水口船闸反向弧形阀门重点采取了三项措施:阀门和水工结构体形进行了多次修正和优化;阀门段采用突扩结构,提高了阀门段压力,改善了流态,使出现的空化发生在水体中,不致影响混凝土结构;在顶楣埋设了可控制的通气管,必要时可进行适量掺气,以消除或减轻空化程度。

3 升船机

3.1 斜面升船机

高低轮斜面升船机是最早采用的一种通航建筑物,在结构和施工方面技术问题较简单,它主要由独立墩、轨道梁、承船车、卷扬机、牵引钢丝绳、过顶设施以及转向导轮和水平托辊等组成。过坝方式采用惯性过顶设施,集中自动程序控制。华东院在 20 世纪 80 年代设计的紧水滩、石塘工程通航建筑物均采用这种形式。