

ZHUJIANG HEKOU SHESHUI GONGCHENG

ZUSHUI XIAOYING JIQI

FANGHONG YINGXIANG KONGZHI GUANJIAN JISHU

珠江河口涉水工程 阻水效应及其 防洪影响控制关键技术

何用 何贞俊 王华 郭珊 卢健 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

珠江河口涉水工程 阻水效应及其 防洪影响控制关键技术

何用 何贞俊 王华 郭珊 卢健 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以珠江河口复杂系统的基本动力特征和珠江河口涉水工程分布与特征为基础,结合涉水工程阻水效应及群体效应机理研究,提出了珠江河口涉水工程防洪影响控制关键技术,并以此为基础,全面评估珠江河口已建涉水工程的综合影响,探讨控制河口涉水工程防洪影响的关键性指标。

本书可供高校水利、交通、环境等相关学科的师生学习参考,也可供珠江河口涉水工程建设、设计和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

珠江河口涉水工程阻水效应及其防洪影响控制关键技术 / 何用等编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2015. 11
ISBN 978-7-5170-3873-3

I. ①珠… II. ①何… III. ①珠江—河口—防洪—研究 IV. ①TV882.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第287800号

书 名	珠江河口涉水工程阻水效应及其防洪影响控制关键技术
作 者	何用 何贞俊 王华 郭珊 卢健 等 编著
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	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16.25印张 385千字
版 次	2015年11月第1版 2015年11月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	136.00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

QIANYAN

珠江河口地区面积 1.1 万 km^2 ，GPD 占全国约 10%，是我国重要的战略经济圈，经济地位举足轻重；毗邻港澳，政治地位十分敏感。珠江河口水系统复杂，具有“三江汇流、网河密布，八口入海，整体互动”的特点，河口涉水工程建设强度世所罕见，类型丰富，极具典型性和代表性。河口区经济社会高速发展，迫切需要协调河口资源开发与防洪安全之间的关系，以促进地区可持续发展。

河道管理范围内建设项目防洪评价主要集中于对单项涉水工程防洪影响评价，而对单项涉水工程如何优化、工程群体防洪影响如何评价、高强度开发下涉水工程如何管理少有研究。依托水利部公益性行业科研专项《珠江河口口门区滩槽演变及对泄洪的影响》、水利前期项目《珠江河口已建和规划建设项目防洪影响综合评价》和港珠澳大桥工程等 400 多项河口涉水工程项目研究，经过 10 年来不懈的研究、实践和总结，在河口涉水工程阻水效应、工程方案优化、工程群的阻水效应评价及工程防洪影响控制指标确定等方面取得了一些成果，本书是部分成果的总结。

本书围绕珠江河口涉水工程建设和管理中防洪影响控制的关键技术问题，以珠江河口涉水工程分布与特征和珠江河口复杂系统的基本动力特征为基础，开展涉水工程阻水效应及群体效应机理研究，解决不同水流条件下涉水建筑阻水效应和结构优化的基础性技术难题；以珠江河口涉水工程防洪影响模拟和评估的关键技术为基础，建立一套河口复杂径潮动力下特大型桥隧工程防洪影响控制优化方法，从涉水工程线位和走向、结构总体布局 and 结构形式三个方面实现工程方案优化；全面评估珠江河口已建涉水工程的综合影响，揭示工程群在网河及口门区阻水效应的叠加规律，提出工程群防洪影响关键性控制指标，实现关键控制指标定量化。

全书共 7 章，第 1 章是介绍研究的背景和总体思路；第 2 章介绍了珠江河口河道水系、区域经济、河道堤围等基本情况，依据河口区的动力特征划分了动力分区，分析各口门区动力环境，并对影响动力环境的河口河床演变特征进行了总结；第 3 章通过资料检索、实地调查和卫星影像识别，结合珠江三

角洲港口、桥梁、围垦工程建设历程与规划,分析了珠江河口区域涉水工程建设及占用水域情况;第4章在涉水工程阻水效应水力学基本方程的基础上,分析了涉水工程阻水效应的影响因素,通过宽水槽物理模型试验研究了阻水效应与关键影响因素的相关关系以及阻水效应的叠加规律,进而提出降低阻水效应的涉水工程结构优化技术;第5章主要论述了珠江河口涉水工程防洪影响模拟和评估的关键技术——水沙动力模拟技术,并结合河口重大涉水工程阐述了工程防洪影响控制的关键技术;第6章在珠江三角洲河网和河口大范围联解数学模型中实现了数模大尺度网格对小尺度桥墩阻水的准确模拟,计算分析了珠江三角洲和河口已建及规划工程对河口潮位、潮量、分流比、净泄量、流速、流态等防洪综合影响及不同口门的分布规律;第7章根据河口区不同区域的水文水动力、河势稳定、水文情势、已建涉水工程开发利用强度及其对防洪的影响等因子的差异性,对珠江河口区防洪影响敏感河段和敏感水域进行了划分,进而提出了珠江河口的防洪影响控制指标。

本书第1章由何用、卢健执笔,第2章1~2节由卢健执笔、3~5节由何用执笔,第3章第1节由卢健执笔、2~4节由王华执笔,第4章由何贞俊执笔,第5章由何用执笔,第6章由郭珊执笔,第7章第1节由卢健执笔、2~4节由王华执笔。全书由何用构思、提出编写大纲并统稿,由陈文龙定稿。除了上述主要编写人员外,参与有关研究工作的还有彭瑜、姚志坚、何颖清、刘霞、张金明、吕文斌、苏波、穆守胜、张鹏、朱毅峰、李慧婧、刘金阳、刘培、杨留柱、扶卿华、杨裕桂、陈海花等。

书中主要研究工作是在珠江水利科学研究院陈文龙、徐峰俊、吴小明、余顺超、陈荣力的悉心指导下完成的,在本书编写过程中,得到了王现方、李亮新、谢宇峰、邓家泉、李杰、杨芳、王卫光等院所领导的关心与支持,在此表示衷心的感谢!

最后应强调的是,珠江河口涉水工程密布,阻水效应明显,河口地区经济快速发展对涉水工程建设需求巨大,如何保障河口地区防洪安全、协调河口资源开发与防洪安全之间的矛盾,事关经济社会的可持续发展,诸多问题还有待深入研究,希望本书能起到抛砖引玉的作用。由于受编著者水平等多种因素所限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编著者

2015年5月于广州



目 录

MULU

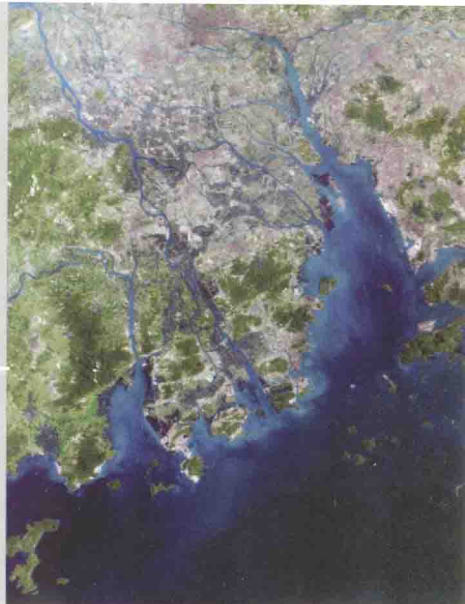
前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究进展	8
1.3 主要内容	13
第 2 章 珠江河口基本情况及动力环境	15
2.1 珠江河口基本情况	15
2.2 珠江河口动力分区	22
2.3 珠江河口动力环境	23
2.4 珠江河口近期水沙运动变化	40
2.5 珠江河口近期演变特征	55
第 3 章 珠江河口涉水工程调查与分析	61
3.1 珠江河口涉水工程概况及分类	61
3.2 珠江河口已建涉水工程遥感调查	73
3.3 珠江河口涉水工程布置及占用水域特征	79
3.4 涉水工程阻水原型观测调查	107
第 4 章 涉水工程阻水效应试验研究及工程结构优化	111
4.1 涉水工程阻水效应的影响因素	111
4.2 宽水槽物理模型建立	114
4.3 水位壅高与主要影响因素的相关关系	116
4.4 涉水工程阻水效应叠加规律	120
4.5 桥墩墩型选择及体型优化技术	128
第 5 章 河口重大涉水工程防洪影响控制关键技术	145
5.1 珠江河口水沙动力模拟技术	145
5.2 珠江河口典型重大涉水工程及工程方案优化难点	163

5.3 控制涉水工程防洪影响的关键技术	172
第6章 珠江三角洲及河口涉水工程群防洪综合影响研究	190
6.1 主要研究内容	190
6.2 珠江河口涉水工程群防洪综合影响数学模型	194
6.3 珠江三角洲典型网河区域佛山市河道建设项目防洪综合影响	216
6.4 珠江河口已建和规划建设项目防洪综合影响	219
6.5 防洪综合影响规律总结	224
第7章 珠江河口涉水工程防洪影响敏感河道及指标控制探讨	226
7.1 防洪影响敏感河段和敏感水域	226
7.2 一般性防洪影响控制指标	232
7.3 关键性防洪控制指标	233
附图	242
参考文献	249

第 1 章

绪论



珠江三角洲地区面积 1.1 万 km^2 ，GPD 占全国约 10%，是我国重要的战略经济圈，经济地位举足轻重；毗邻港澳，政治地位十分敏感。随着珠江河口地区经济总量的不断增加，城市化水平的不断提高，港口、码头、修造船基地、桥梁等涉水工程密度不断增加，珠江河口涉水工程建设强度国内罕见。珠江河口是世界上水系结构、动力特性、人类活动最复杂的河口之一，它具有“三江汇流、网河密布、八口入海、整体互动”的特点，其人类活动、河口动力及其影响因素众多。在水系结构和河道径潮动力如此复杂的珠江河网区，如何优化涉水工程布置，最大限度地减少对河道水流的影响，保障工程自身安全的同时，保证河道防洪安全，成为困扰工程设计和建设单位的技术难题。与此同时，涉水工程达到一定的规模和密度后，对河道、口门等地区产生累积影响，叠加效应突出。多年来，已建成涉水工程项目累积影响如何？建设项目的密度是否超出可控范围？下阶段河口开发活动高速发展，究竟如何控制涉水工程的影响？这些已成为关系到河口可持续发展的重大问题，也是加强河道管理迫切需要回答和解决的问题。

1.1 研究意义

加强珠江河口涉水工程调查和研究，揭示涉水工程的阻水效应及工程群叠加机理，建立一套涉水工程防洪影响评价和工程优化方法，深化控制涉水工程防洪影响关键技术，为珠江河口涉水工程建设和管理提供技术支撑，具有重大的理论和现实意义。

1.1.1 建设水生态文明的迫切需要

党的十八大以来，以习近平同志为总书记的党中央高度重视生态文明建设，强调良好生态环境是最公平的公共产品，是最普惠的民生福祉，对加快生态文明建设作出重大战略部署。水生态文明是生态文明的核心组成部分，山川秀美关键在水，建设美丽中国关键也在水。党的十八届三中全会把水利放在生态文明建设的突出位置，将水资源管理、水环境保护、水生态修复、水价改革、水权交易等纳入生态文明制度建设重要内容，为我们推进水利改革发展指明了方向。



江河湖泊是地球的血脉、生命的源泉、文明的摇篮。我国河湖众多,水系复杂,流域面积超过 100km^2 的河流有 22909 条,水面大于 1km^2 的天然湖泊有 2865 个。中央始终高度重视江河湖泊治理与保护工作,采取了一系列重大举措,推动河湖生态建设和水资源节约保护取得了明显成效。但是,随着经济社会快速发展和全球气候变化影响加剧,我国河湖管理和保护仍然面临诸多严峻挑战,不少河湖开发已经接近或超出水资源和水环境承载能力,水体污染、河道断流、湖泊萎缩、生态退化等问题日益凸显,已成为制约经济社会可持续发展的突出瓶颈。我们要认真贯彻落实党的十八大、十八届三中全会精神,牢固树立尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念,践行以人为本、人水和谐的可持续发展治水思路,坚持生产生活生态统筹、水域水量水质并重、预防保护治理齐抓,大力推进水生态文明建设,努力实现河湖水域不萎缩、功能不衰减、生态不恶化,为建设美丽中国、实现中华民族伟大复兴的中国梦提供有力支撑和保障。

江河湖泊具有重要的资源功能和生态功能,是洪水的通道、水资源的载体、生态环境的重要组成部分。河湖管理涉及水域、岸线、采砂、排污口设置、涉河建设项目等方面,是水利社会管理的核心内容,是确保河湖资源可持续利用的重要工作。近年来,各地积极采取措施,着力加强河湖管理,促进了河湖防洪、供水、发电、航运、生态等综合效益的发挥,有力支撑了经济社会的可持续发展。但是,一些地方在发展过程中,忽视河湖保护,违法围垦湖泊、挤占河道、蚕食水域、滥采河砂等问题突出,严重威胁着防洪安全、供水安全、生态安全。加强河湖管理,是建设美丽中国、建立生态文明制度的迫切需要,是推进工业化、城镇化、农业现代化和保障经济社会可持续发展的必然要求,是深化水利改革的重要内容。因此,必须进一步加强管理,加快建立严格的河湖管理与保护制度。

1.1.2 保障珠江河口防洪安全的重要性

珠江三角洲经济圈为我国三大经济圈之一,区域内有广州、深圳、佛山、东莞、中山、江门、珠海等七市和香港、澳门两个特别行政区,城市密集,经济发达。上述七市 2013 年地区生产总值达 48722 亿元,占全国的 8.57%,若将香港、澳门地区生产总值计算在内,其经济实力居我国长江三角洲、珠江三角洲及环渤海湾三大经济圈之首。到 2020 年,珠江三角洲地区(不含港澳地区)将率先基本实现现代化,地区人均生产总值达到 135000 元,地区总产值将达到 140809 亿元。珠江河口地区在我国经济社会发展中具有不可替代的带动作用 and 举足轻重的战略地位,随着泛珠三角区域协作发展和粤、港、澳经济一体化,该区域将迎来新一轮经济快速发展时期。城市化水平的不断提高,经济总量的不断增加,国际影响力的不断增强,必将对河口地区防洪(潮)、供水、生态安全保障和资源可持续利用提出更高的要求。

改革开放以来,随着珠江河口地区经济总量的不断增加,国内影响和国际竞争力的不断增强,城市化水平的不断提高,港口、码头、修造船基地、桥梁等涉水工程密度不断增加,对珠江三角洲经济圈的社会经济发展发挥了重要基础作用,但对河口地区河道防洪水位、行洪安全、引排能力、河势稳定和现有堤防、护岸工程均有不同程度的影响。同时,近年来珠江流域来水条件和河道边界条件发生了较大变化,珠江三角洲泄洪任务加重,防洪形势不容乐观。一方面因西江中下游两岸堤防加高培厚,导致洪水归槽现象越来越明



显,珠江三角洲大洪水频频发生,近年来发生的“94·6”“94·7”“98·6”“05·6”大洪水反映出,在上游洪水量级相近的情况下,西江梧州控制站洪水量级不断加大,注入三角洲的洪水量级也随之加大,如三角洲控制站马口断面“05·6”洪水洪峰流量达到 $53200\text{m}^3/\text{s}$,逼近1915年洪水;另一方面受河道采砂、航道升级、涉水工程建设的影响,三角洲水道的河床发生了剧烈变化,北江三角洲片河床下切严重,北江干流水道及东海水道河段河床平均下切了2m以上,顺德水道最深下切达5m,网河区河道下切的不均性导致了两大重要分流节点洪水分流比的改变,西、北江洪水向东四口门分泄比例增加,50年一遇洪水时三水站洪水分配比增加了2%,从而加重了北江三角洲部分河道的防洪压力和东四口门的泄洪任务。

因此,强化河口地区河道管理,特别是河道管理范围内建设项目管理,协调河口治理、工程建设、资源开发与防洪、供水、水生态安全之间的矛盾,维护珠江河口的健康发展已成为新时期水行政主管部门做好水行政管理,支持地方经济社会可持续发展迫切的战略需求。

1.1.3 珠江河口涉水工程建设对防洪综合影响的复杂性和典型性

珠江三角洲经济社会发展迫切要求进一步加快交通基础设施的建设步伐。近30年来,一大批包括港口、高速铁路、公路等交通基础设施陆续开工建设,珠江河口涉水工程的建设日新月异。

目前,珠三角已初步形成以广州市为中心,铁路、公路、水运、民航等多种运输方式相衔接,连通全省和全国的综合交通运输体系。其中,高速公路网基本覆盖区域所有县(市),内河航道网以千吨级航道为骨干,主要港口出海主航道均满足5万吨级船舶通航要求。珠江河口已形成了以广州港、深圳港、珠海港为主要港口,惠州港、虎门港、中山港、江门港为重要港口的分层次港口群发展格局,珠江河口沿岸已建码头泊位数1477个。截至2008年年底,珠江河口地区已建桥梁达7900余座,其中大桥及特大桥近千座,珠江三角洲地区公路通车里程约达5.3万km,其中高速公路约达2100km,公路密度 $98.34\text{km}/100\text{km}^2$,铁路运营里程约580km,铁路密度 $1.35\text{km}/100\text{km}^2$ 。

根据《珠江三角洲基础设施建设一体化规划(2009—2020年)》,规划2020年建成网络完善、运行高效、与港澳及环珠三角紧密相连的综合交通运输体系。在轨道交通方面,重点加快建设广州—东莞—深圳、广州—珠海、广州—佛山、佛山—肇庆、佛山—东莞、东莞—惠州等城际轨道及广州、深圳、东莞、佛山等城市轨道交通。到2020年,基本形成“三环八射”的城际轨道交通网络架构,并以此为骨干形成区域快速公交走廊(见图1.1-1)。

在公路方面,加快完善高速公路网,加快广佛、佛开、广三、广清、梅观、水官等高速公路的扩建工程,扩大主要通道的通行能力;加快江肇、肇花、广珠西线、广深沿江等高速公路项目建设,推进虎门二桥、深中通道等跨珠江口项目的前期工作,加强区域间尤其是珠江口东西两岸的交通联系;加快惠深沿海高速惠州段、广肇高速二期、广州新洲至化龙快速路等项目建设,打通高速公路“断头路段”和“瓶颈路”;加快推进广贺、广河、广乐、大广等高速公路项目建设,提高对外通道能力,增强珠三角的辐射能力(见图1.1-2)。

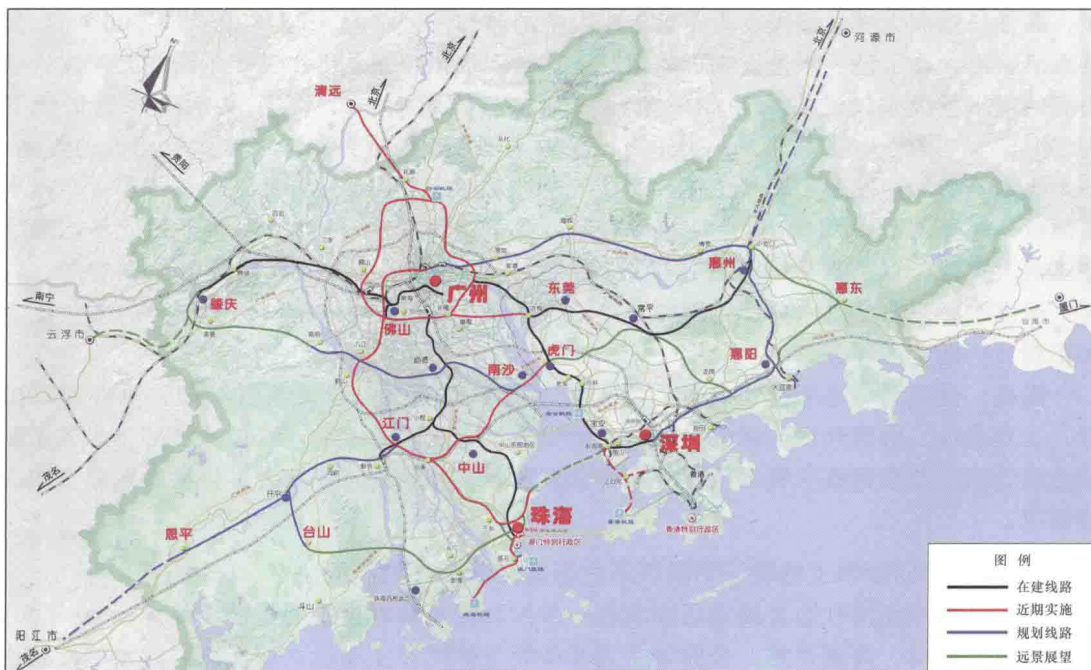


图 1.1-1 珠三角城际轨道交通布局规划图 (2009—2020 年)

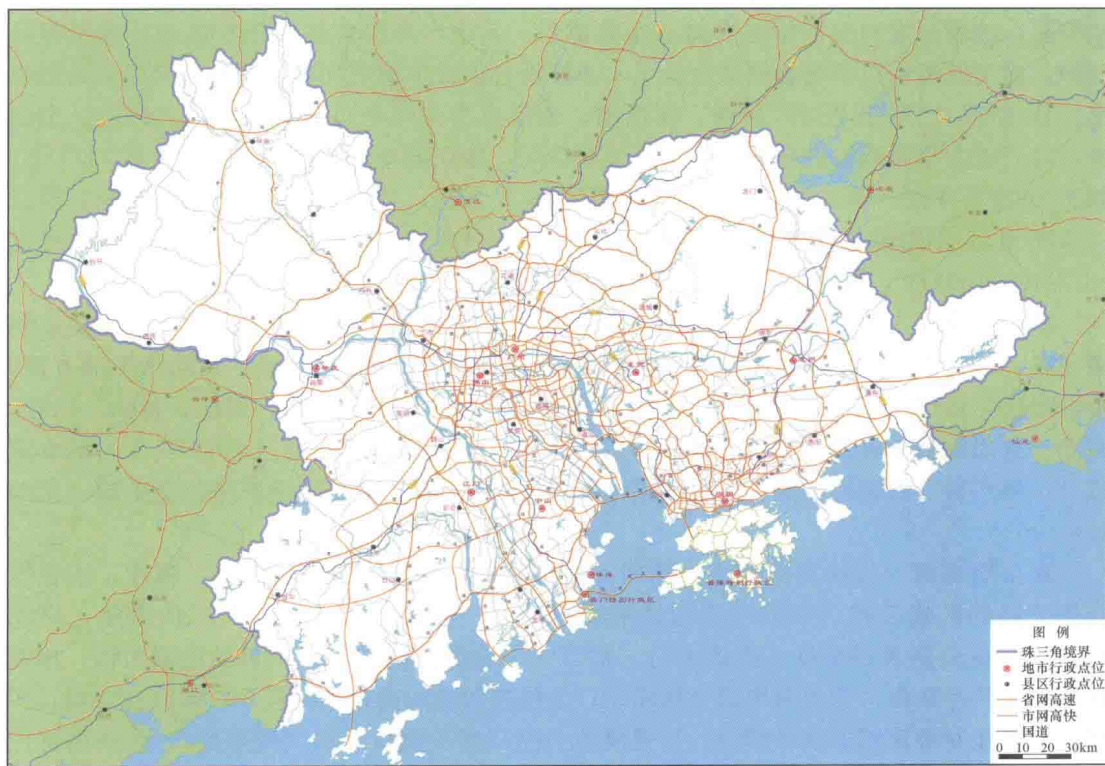


图 1.1-2 珠三角高快速路布局规划图 (2009—2020 年)



在港口建设方面,有效整合优化珠江口港口资源,促进珠三角港口群协调发展。到2020年,港口总体能力适度超前经济发展,形成布局合理、层次分明、功能完善的现代化港口体系,港口技术装备水平、管理体制与服务质量达到国际先进水平(见图1.1-3)。

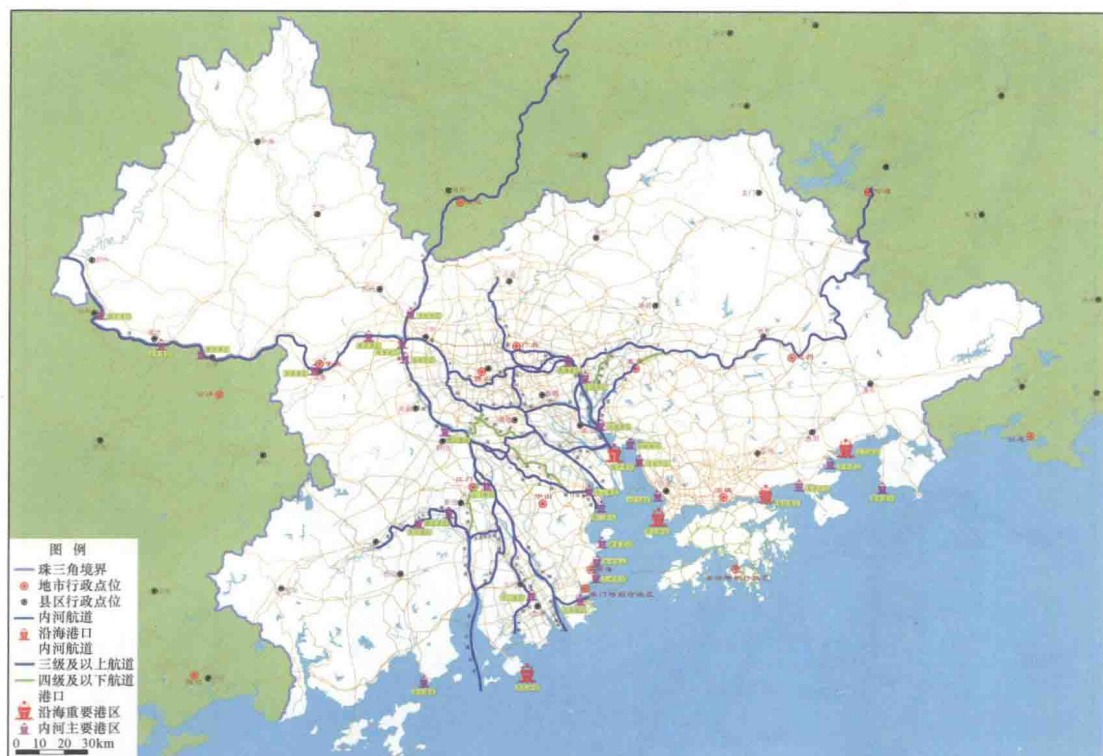


图 1.1-3 珠三角港口与内河航道布局规划图(2009—2020年)

随着一批交通基础设施的陆续开工建设,交通路网将与现有三角洲河网交叉,构成更为密布的涉水工程群。珠江河口涉水工程的建设强度之高、发展速度之快、工程类型之丰富,具有非常强的代表性和典型性。大规模涉水工程的建设无疑将加大河道行洪阻力,尤其是工程群体效应,将壅高河道水位,改变局部河道动力,可能对河道行洪排涝及河势稳定产生深远的影响。

1.1.4 珠江河口涉水工程建设水域的复杂性和独特性

珠江河口是世界上水系结构、动力特性、人类活动最复杂的河口之一,它具有“三江汇流、网河密布、八口入海、整体互动”的特点(见图1.1-4),其人类活动、河口动力及其影响因素众多。

珠江流域的西江、北江和东江汇入珠江三角洲后,在思贤窖以下形成西北江三角洲,在石龙以下形成东江三角洲。经过长期的历史演变,珠江三角洲网河密布,其中西北江三角洲主要水道近百条,总长约1600km,河网密度为 $0.81\text{km}/\text{km}^2$,东江三角洲主要水道5条,总长约138km,河网密度达到 $0.88\text{km}/\text{km}^2$ 。除此之外,河道多级分汊,形成三角

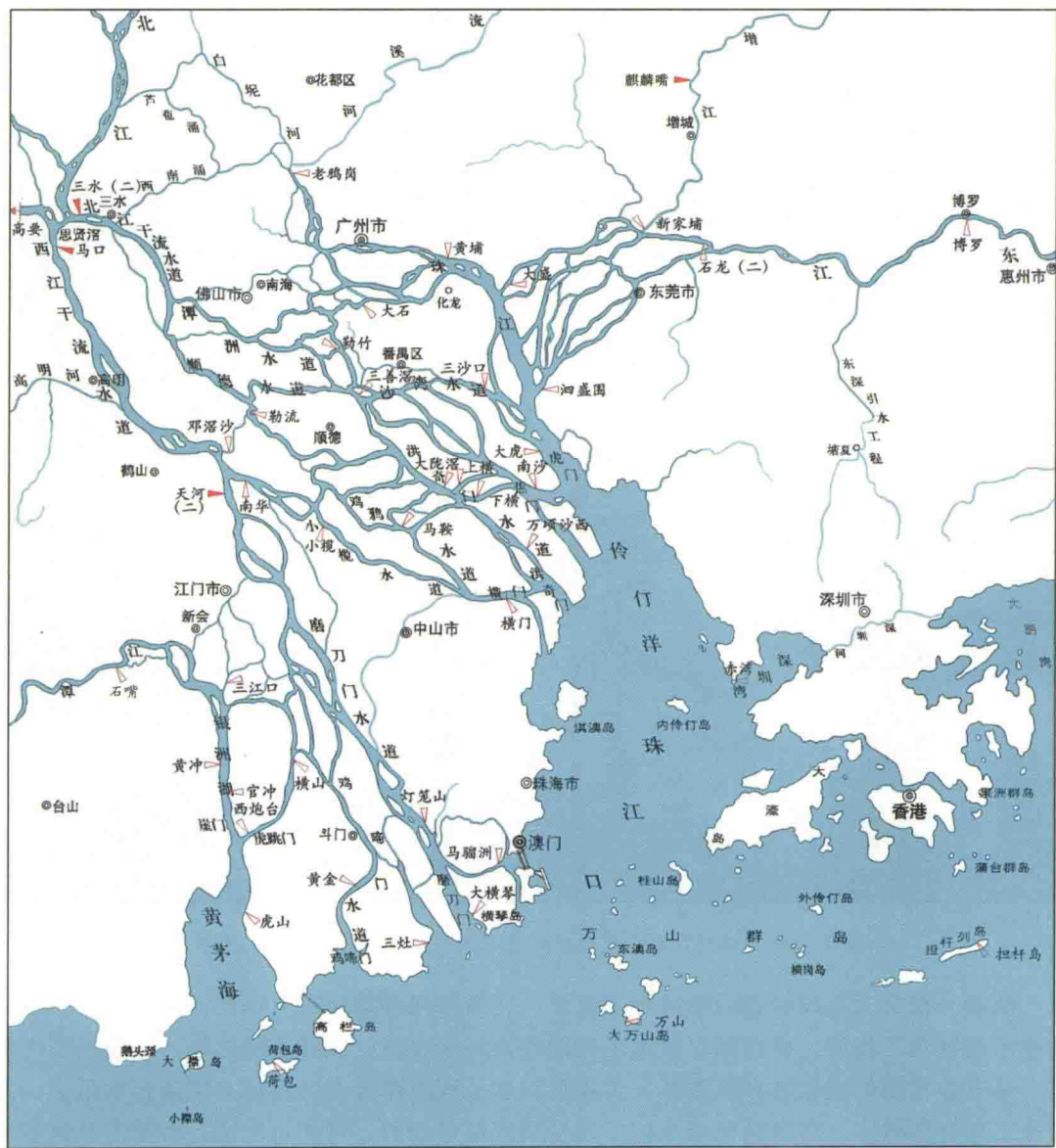


图 1.1-4 珠江河口基本格局

洲如织的河网体系，水系结构十分复杂。珠江经虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门和崖门等八大口门汇入南海，珠江三角洲前沿发育了以径流动力作用为主的磨刀门口门，以潮流动力作用为主的伶仃洋河口湾和黄茅海河口湾，形成了潮优型河口与河优型河口相互依存、耦合共生的形态独特的复合型河口。

珠江河口水动力过程极其复杂：①受全球气候变化及三江上游工程控制及人类活动等影响，上游来水来沙变化复杂；②河口河网密布，水流相互贯通、相互影响，呈“牵一发而动全身”之势，河网间分流分沙情况极为复杂；③八大口门分属不同水系，动力条件差异较大，潮优型河口与河优型河口相互依存、耦合共生；④三江汇入三角洲后，径流组合



变化多样,西北江和东江洪水相互遭遇复杂;⑤河口潮流受天文、气象等影响,经常出现天文大潮、台风暴潮与上游大洪水“三碰头”现象,致使河口洪潮遭遇更加复杂;⑥珠江口外大洋海流、风成漂流、气压梯度流、水层温度差、盐度差引起的密度梯度流、波浪破碎形成的波浪流以及局部地区的补偿流等,使得近岸海流体系复杂。

为减轻对河道水流的影响,涉水工程建设必须充分认识河道水动力特性,从工程选线、工程布局、结构形式等多方面综合优化,以适应河道水动力条件。在水系结构和河道径潮动力如此复杂的珠江河口区,如何优化涉水工程布置,最大限度地减少对河道水流的影响,保障工程自身安全的同时,保证河道防洪安全,成为困扰工程设计和建设单位的技术难题。

1.1.5 涉水工程阻水效应及防洪影响控制关键技术研究必要性

珠江河口地区社会经济的快速发展,交通基础设施的突飞猛进,涉水工程建设日新月异,在水系结构和径潮动力如此复杂的珠江河口区,如何协调涉水工程建设与河口治理和保护的关系,保障河口防洪、供水、水生态安全,促进资源可持续利用,已成为该区域社会经济发展和社会稳定迫切需要解决的问题。

对于桥梁,一般单个桥梁占用河道过水面积在5%~20%之间,单个建设项目对河道的行洪影响一般较小,但大量桥梁的建设,特别是桥梁密度较高的河道,则会对泄洪产生不利影响,尤其对大洪水的壅水作用更明显。根据已有的研究成果,由于建桥的影响,“98·6”水文条件下,顺德水道上游、潭州水道上游和平洲水道水位变化在10cm以上,顺德水道下游、容桂水道上游、小榄水道上游、东海水道和西海水道水位变化在5~10cm之间。

码头的阻水效应也不容忽视,码头一般均伸出现有堤岸建设,无论是重力式码头还是高桩码头,只要占用河道行洪断面,其对行洪纳潮均有不同程度的影响。目前深水岸线越来越成为宝贵的港口岸线资源,部分建设单位为了减少疏浚和维护量,使码头主体尽量向河道内延伸,进一步加大了阻水,减小了河道行洪断面。

珠江河口地区社会经济的快速发展,对防洪安全提出了更高的要求,也使得对涉水项目管理的规范化、定量化变得越来越迫切。如何评估涉水工程阻水效应,优化河口涉水工程设计方案,以适应河道水动力特性,减少水流对结构物作用和破坏的同时,控制工程对防洪影响,既是困扰工程建设和设计单位的重要技术问题,更是水行政主管部门的开展河道管理和水行政许可的关键技术问题。

当前河口地区涉水建设项目开展的防洪评价,通常都是考虑单个工程的影响,或只考虑邻近工程的影响,未考虑涉水工程达到一定规模和密度后形成的工程群体对河道、口门等地区的累积影响效应。而珠江三角洲及河口区,水流相互贯通,牵一发而动全身,单个工程或仅考虑邻近工程在内的防洪评价难以反映工程建设对整个河口区水动力变化的影响,因此不能够科学、全面地反映建设项目对河道防洪的综合影响。多年来,已建成和批复涉水工程项目累积影响如何?建设项目的密度是否超出可控范围?下阶段河口开发活动高速发展,究竟如何控制涉水工程的影响?这些成为关系到河口可持续发展的重大问题,也是加强河道管理迫切需要回答和解决的问题。



1.2 国内外研究进展

1.2.1 涉水工程阻水效应基础研究进展

国外从 20 世纪后期就开始了涉水建筑物壅水的调查分析和实验研究工作, 以 D' Aubuisson 1840 年提出的桥墩壅水计算公式为起点, 已有 170 多年的历史。该公式实际上是恒定非均匀水流运动的伯努利方程在过桥水流中的应用, 稍后 Weisbach (1848)、Ruhlmann (1880) 等分别提出了桥墩壅水的堰流公式, Naglar (1917)、Lane (1920) 利用试验资料对 D' Aubuisson 公式和 Weisbach 公式进行了修订。而后德国人 Rehbock 和美国人 Yarnell 分别进行了大量系统的室内实验, 在区分流态 (急流、缓流和过渡流) 的基础上把前人的研究向前推进一大步。20 世纪 50 年代, 苏联在桥渡设计的规范中列入了修正的 D' Aubuisson 公式。

从 20 世纪 60 年代开始, 国外将电子计算机应用于桥梁和河道水力计算。60 年代末到 70 年代初, 美国陆军工程兵团地质工程中心 (HEC) 等部门编制了桥梁河道水力学和各种涵洞水力计算程序。1974 年美国 Franques 和 D. W. Yannitell 拟出了桥前壅水二元流分析的第一个有限元模型。到近期, 随着计算方法和模型离散方法的改进, 出现了许多精度更高的计算程序, 例如 PHOENICS、CFX、STAR-CD、MIKE、FLUENT 等多个商用 CFD 软件。

我国的公路和铁路系统从 20 世纪 70 年代末期开始研究这个问题。“98” 长江大洪水之后, 水利部门对这个问题的研究逐渐增多。王开、傅旭东、王光谦等 (2006) 结合水工模型试验资料对 Yarnell 公式、D' Aubuisson 公式、Henderson 公式和无坎宽顶堰公式进行了对比检验, 分析了不同公式的适用条件及偏差, 秦蓓蕾 (2010) 结合具体工程和数值模拟方法, 分析了这四种经验公式的误差及原因。由于早期的公路桥和铁路桥桥墩都较大, 墩型单一, 受当时测试设备的限制, 率定这些公式的试验只能在较大的阻水比条件才能达到精度要求, 现今单个工程的阻水效应已控制到较小且桥墩形式多样, 这些早期的经验公式在应用中出现了较大偏差, 尤其在河口和三角洲平原地区, 试验需向低阻水比区间扩展。

以下为目前常用的壅水计算公式:

(1) D'Aubuisson 公式。

$$\Delta Z = \left[\frac{1}{\mu^2 (b - \Delta B)^2 h_3^2} \frac{1}{b^2 (h_3 + \Delta Z)^2} \right] \frac{Q^2}{2g} \quad (1.2-1)$$

式中 μ ——与墩头形式有关的水流侧收缩系数。

式 (1.2-1) 亦常写为

$$\Delta Z = \left[\frac{8}{\mu^2 (A_3 - h_3 \Delta B)^2} - \frac{1}{A_1^2} \right] \frac{Q^2}{2g} \quad (1.2-2)$$

或

$$\Delta Z = \left[\frac{8}{27 K_{DA}^2} \frac{(1 + 0.5 Fr_{3c}^2)^3}{Fr_{3c}^2} - \left(\frac{1}{1 + \Delta Z/h_3} \right)^2 \right] \frac{U_3^2}{2g} \quad (1.2-3)$$

式中 K_{DA} ——桥墩形状系数;



Fr_{3c} ——桥下出现临界水深时的下游弗洛德数,与阻水比有关:

$$a = 1 - \left[\frac{3 - K_L}{2 + (1 - K_L) Fr_{3c}^2} \right]^{3/2} Fr_{3c} \quad (1.2-4)$$

式中 K_L ——墩后水流扩散损失系数。

D'Aubuisson 公式忽略了摩阻损失,并假定断面之间不存在局部水头损失。

(2) Yarnell 公式。

$$\Delta Z = 2K_Y(K_Y + 10\omega - 0.6)(a + 15a^4) \frac{v_3^2}{2g}$$

其中

$$\omega = \frac{v_3^2}{2g} \quad (1.2-5)$$

式中 K_Y ——桥墩形状系数。

式 (1.2-5) 是 Yarnell 在 $a = 11.7\%$ 、 23.3% 、 35% 、 50% 条件下通过模型试验得到,在美国工程界获得广泛应用。

(3) 修正 Yarnell 公式。

Charbencau 和 Holley 修正了 Yarnell 公式,得到的修正公式为

$$\Delta Z = \beta K_Y(K_Y + X10\omega - 0.6)(a + 15a^4) \frac{v_3^2}{2g} \quad (1.2-6)$$

式中 β 、 X ——修正系数。

式 (1.2-6) 中的流速与渠道断面形状有关,对于底宽为 b 的矩形渠道:

$$v_1 = \frac{Q}{bh_1}, \quad v_2 = \frac{Q}{(1-a)bh_3}, \quad v_3 = \frac{Q}{bh_3} \quad (1.2-7)$$

(4) Henderson 公式。

$$\Delta Z = \frac{v_2^2}{2g} \frac{v_1^2}{2g} + \eta \frac{v_2^2}{2g} = (1 + \eta) \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \quad (1.2-8)$$

该式由 Henderson 通过分析桥墩造成的局部能量损失提出,式 (1.2-8) 中 η 为与桥墩形状有关的 Henderson 系数,矩形墩取 0.35,圆形墩取 0.18。

(5) 无坎宽顶堰公式。

$$\Delta Z = \frac{Q^2}{2g\mu_1^2 A_2^2} - \frac{v_1^2}{2g} \quad (1.2-9)$$

式中 μ_1 ——流量系数,与桥墩墩头(尾)形状有关;

A_2 ——桥墩过水总面积。

当忽略水流出桥孔的水面回升,对矩形桥孔有 $A_2 = (b - \Delta B)h_3$,对梯形桥孔有 $A_2 = (b - \Delta B + mh_3)h_3$; m 为梯形边坡系数;当比值 $\sigma = A_2/A_3$ 大于 0.95 时, ΔZ 甚小可以不计。

涉水工程阻水效应受河道断面、沿程糙率、阻水比、涉水工程形状及布置的影响,至今没有广泛接受的计算公式,上述计算公式都有一定的适用条件。无坎宽顶堰公式适用于高阻水比的桥墩, Henderson 公式适用于糙率较大的天然河流, Yarnell 公式依据的试验条件是 $a > 0.1$,原则上仅适用于 $a > 0.1$ 的情形,应用于低阻水比的情形结果偏大。修正 Yarnell 公式基本适用于低阻水比,但只有半圆形桥墩和圆形桥墩两种桥墩的修正参数。



D'Aubuisson 公式计算复杂,需要确定出现临界水深时的下游弗洛德数,应用不便。

目前采用数值模拟方法研究涉水建筑物阻水问题的成果较多,孙翠玲、许晓辉等(2006)对佛山市多座桥梁的联合阻水效应进行了数学模型分析;徐林春、黄东等(2008)采用数值模拟方法分析了北江白庙特大桥工程的行洪影响;吴飞、甘盟(2009)采用数值模拟方法分析了桥墩组中轴线与水流方向夹角过大时对河流流场影响;周勤、尹崇清等(2011)采用数值模拟方法分析了斜交桥墩的阻水特性;丁伟、唐洪武等(2011)采用数值模拟方法分析了涉河桥梁阻水的影响因素。近年来对桩群码头阻水影响的研究较多,吴飞(2008)对高桩码头桩群对河道流场影响进行了数值模拟;解晓鸣、张玮等(2008)提出了桩群数值模拟的一种概化方法;黄本胜、程菊香等(2010)采用三维数值模拟方法分析了码头桩群对河道行洪与流场影响。对于一些特殊建筑物的阻水问题,采用了物理模型试验方法开展了研究,黄本胜、赖冠文等(1999)对河滩种树对行洪影响进行了试验研究;李文文、黄本胜等(2004)针对高桩码头桩群的水力特性开展了探索性的试验研究;王协康、刘同宣等(2013)研究分析了坡面柔性植被的阻水效应及其局部水头损失特性。

可见,国外对涉水建筑物阻水效应的研究起步较早,并结合模型试验先后提出了一些桥前壅水的计算公式,由于受当时测试设备精度的限制,这些经验公式在工程应用中偏差较大。随着计算机技术和计算水力学的快速发展,数值模拟手段在涉水建筑物阻水问题的研究中得到广泛应用,但数值模拟需以实测或试验数据作为验证,针对柔性植被和高桩桩群码头等特殊建筑物阻水问题国内开展了探索性的试验研究。

涉水工程阻水效应问题研究得较早,但是从水力学规律系统性的分析阻水效应影响因素的研究不多,对阻水效应的叠加问题、从结构优化角度减小水位壅高的研究非常少,而这正是珠江河口当前面临的主要问题。

1.2.2 河口涉水工程防洪影响研究进展

我国河口地区经济发达、人口稠密、岸线利用率高。随着经济建设的飞速发展,陆续修建了大量的涉水工程。特别是一些重大涉水工程(例如杭州湾大桥、上海长江大桥等)的建设,克服自然水体阻隔、为两岸人民生活提供了更为便捷的交通服务,极大的加速了两岸经济的发展,在防洪、抢险与救灾的紧要关头也显示出强大的支撑作用;但与此同时,这些重大涉水工程由于规模巨大,对水流的阻滞作用更强,工程的建设引起水位壅高、束水、挑流、冲刷、涨潮动力减弱等一系列问题也更严重,因此工程对防洪产生的负面影响以及洪水对工程自身安全的不利影响,必须认真对待,妥善处理,并提出减缓其防洪影响的补救措施。

针对河口重大涉水工程对防洪产生的负面影响,2000年后政府加强了对河口的管理,大型涉水工程必须出具对防洪影响的研究报告,近10年来这方面的研究成果数量较多。大多是在工程可行性研究阶段针对工程自身安全开展研究(陶静,2009),或者是通过建立河口数模、物模研究工程方案的防洪影响(熊绍隆等,2002),或者就工程对潮汐河口动力特性的某个方面影响(如对涌潮的影响)开展了较深入的研究(曾剑,2006)。

从以上的研究现状可以看出,对于河口重大涉水工程对水动力环境影响方面,国内学者研究手段从原型观测、理论分析到物理模型、数学模型等多种方法均有涉猎,取得的研究成果也非常丰富。