

Study on Engineering Hydrology in
the Tidal Reach of the Yangtze River

长江感潮河段 工程水文研究

李国芳◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

Study on Engineering Hydrology in
the Tidal Reach of the Yangtze River

长江感潮河段 工程水文研究

李国芳◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书针对长江感潮河段潮位资料非一致、潮流资料严重短缺、水位受径流和潮流共同作用等特点,着重开展三个方面的研究:一是探讨水文序列变异诊断和非一致性水文频率分析方法,应用于长江感潮河段潮位序列的变异检测和设计潮位计算;二是探讨基于潮位的潮流数值模拟和统计推算方法,应用于长江感潮河段年最大潮流量序列重构和设计潮流计算;三是探讨径流和潮流共同作用下的水位预报方法,建立长江感潮河段潮位预报及实时校正模型。本书可供从事工程水文设计、水情防汛和水资源利用等工作的科研人员和工程技术人员参考,为其他类似地区开展水文设计和水情预报提供借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

长江感潮河段工程水文研究 / 李国芳著. —南京:
河海大学出版社, 2013. 11
ISBN 978-7-5630-3555-7

I. ①长… II. ①李… III. ①长江—感潮河段—工
程水文学—研究 IV. ①TV882. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 287386 号

书 名 / 长江感潮河段工程水文研究
书 号 / ISBN 978-7-5630-3555-7/TV·368
责任编辑 / 吴俊燕 胡 健
封面设计 / 黄 煜
出版发行 / 河海大学出版社
地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编:210098)
网 址 / <http://www.hhup.com>
电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)
经 销 / 江苏省新华发行集团有限公司
排 版 / 南京新翰博图文制作有限公司
印 刷 / 南京工大印务有限公司
开 本 / 710×1 000 1/16
印 张 / 11.5
彩 插 / 1
字 数 / 230 千字
版 次 / 2013 年 11 月第 1 版
印 次 / 2013 年 11 月第 1 次印刷
定 价 / 38.00 元

前言

001

长江感潮河段范围涉及安徽、江苏和上海三个省(直辖市),沿江地区经济发达、人口稠密,在各省(直辖市)的国民经济和社会发展中均具有举足轻重的地位。感潮河段对区域经济社会发展的作用具有两面性:一方面它带来了充足的水源和发达的航运,有力地支撑了社会经济的发展;另一方面也带来了洪水和风暴潮,造成严重的经济损失甚至人员伤亡。为了兴利避害和促进经济发展,沿江地区修建了大量堤防、水闸、抽水站、航道、桥梁等涉水工程。无论在这些工程的规划设计阶段、施工建设阶段,还是运行管理阶段,都需要定量预测工程所在地附近区域未来的水文情势。根据预测途径和预测性质的不同,未来水文情势预测主要可分为两类:一是基于水文现象发生的统计规律,对未来长期的水文情势作出概率预估;二是基于水文现象发生的物理规律,对未来较短时期的水文情势进行预报。

水文频率分析是预估未来长期水文情势的有效方法,传统水文频率分析是以实测水文系列具有“可靠性”“一致性”和“代表性”为前提的,但是,一方面由于人类活动和气候变化的影响,长江感潮河段潮位序列的一致性已然遭到破坏,设计潮位计算面临潮位系列非一致的问题;另一方面由于受上游径流和下游潮流的共同作用,长江感潮河段水流流态复杂,潮流观测资料因测验难度大而断续零碎,设计潮流计算面临潮流资料严重短缺的问题。与此同时,径流和潮流的共同作用还加剧了长江感潮河段水位预报的难度,现有水位预报方法各有千秋,但大都难以兼顾感潮河段水位预报的预见期和精度要求。因此,加强长江感潮河段工程水文研究具有十分重要的理论和应用价值。

本书主要内容可概括为三个方面:一是探讨了水文序列变异诊断和非一致性水文频率分析方法,并应用于长江感潮河段潮位序列的变异检测和设计潮位计算;二是探讨了基于潮位的潮流数值模拟方法和统计推算方法,并应用于长江感潮河段年最大潮流量序列的重构和设计潮流计算;三是探讨了径流和潮流共同作用下的水位预报方法,建立了长江感潮河段潮位预报及其实时校正模型。研究成果丰富和完善了变化环境下感潮河段工程水文计算的理论与方法,可为本地区和其他

类似地区开展水文设计和水情预报提供借鉴。

本书内容是作者承担的国家自然科学基金重大项目(51190091)“变化环境下工程水文计算的理论与方法”、国家科技支撑计划项目(2006BAG04B06)“苏通大桥建设关键技术研究”以及国家自然科学基金(51109053)和其他 10 余项课题研究成果的系统总结。本书所涉及的内容在研究过程中得到胡凤彬教授、华家鹏教授、张君伦教授及课题组其他成员的支持与帮助;朱元铎教授、刘新仁教授、陈元芳教授、陈喜教授对本书撰写提出了宝贵建议;本书出版受国家自然科学基金重大项目(51190091)资助;河海大学出版社谢业保、吴俊燕、胡健编辑为本书出版编辑付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心的感谢!

在全书的撰写过程中,作者投入了大量精力,努力提高本书的科学性、系统性和实用性,但受理论水平所限以及实际工作的复杂性影响,书中错误与疏漏之处在所难免,恳请专家、读者不吝赐教。

李国芳

2013 年 8 月

目 录

第一章 绪论	001
1.1 长江感潮河段范围	001
1.2 研究背景及意义	002
1.2.1 研究区工程水文问题	002
1.2.2 研究区水文计算难点	004
1.2.3 研究区潮位预报难点	006
1.2.4 研究目的和意义	008
1.3 研究内容与方法	008
第二章 研究区基本情况	011
2.1 长江流域概况	011
2.2 长江感潮河道概况	011
2.3 长江感潮河段入流量与泥沙	012
2.3.1 径流	012
2.3.2 泥沙	014
2.4 长江感潮河段潮位变化特征	015
2.5 潮位变化主要影响因素	017
2.6 特高潮位成因分析	020
2.6.1 年最高潮位发生时间统计	020
2.6.2 年最高潮位洪潮遭遇分析	020
2.7 洪灾及风暴潮灾概况	024
2.7.1 洪灾概况	024
2.7.2 风暴潮灾概况	024
2.8 代表站点及资料情况	027
第三章 水文序列变异分析检验方法	030
3.1 统计检验及其一般流程	030

3.2	水文序列趋势分析方法	031
3.2.1	线性回归法	031
3.2.2	Sen 斜率法	031
3.2.3	累积距平法	032
3.2.4	滑动平均法	032
3.2.5	Spearman 秩次相关检验	032
3.2.6	Kendall 秩次相关检验	033
3.2.7	Mann-Kendall 检验	034
3.2.8	TFPW-MK 检验	034
3.2.9	趋势检验方法的性能比较	035
3.3	水文序列变异点检验方法	042
3.3.1	滑动 t 检验	043
3.3.2	滑动秩和检验	044
3.3.3	Pettitt 检验	044
3.3.4	连续 MK 检验	045
3.3.5	变异点检验方法的性能比较	045
第四章	潮位序列变异分析检验	048
4.1	问题的提出	048
4.2	潮位序列插补延长	048
4.2.1	年最高潮位序列插补延长	049
4.2.2	年最低潮位序列插补延长	050
4.3	潮位序列趋势分析检验	050
4.3.1	年最高潮位序列趋势分析检验	050
4.3.2	年最低潮位序列趋势分析检验	053
4.3.3	年平均潮位序列趋势分析检验	056
4.4	潮位序列变异点检验	058
4.4.1	年最高潮位序列变异点检验	058
4.4.2	年最低潮位序列变异点检验	060
4.4.3	年平均潮位序列变异点检验	061
4.5	潮位非一致原因分析	062
第五章	非一致性年极值潮位频率分析	066
5.1	问题的提出	066

5.2	基于一致性修正途径的频率分析	067
5.2.1	一致性修正方法概述	067
5.2.2	年最高潮位序列一致性修正	068
5.2.3	年最高潮位修正序列频率分析	074
5.3	基于序列分解合成途径的频率分析	076
5.3.1	水文序列分解合成原理概述	076
5.3.2	年最高潮位序列确定性成分提取	080
5.3.3	年最高潮位序列随机性成分频率分析	085
5.3.4	年最高潮位序列参数和设计值合成	086
5.3.5	年最低潮位序列确定性成分提取	087
5.3.6	年最低潮位序列随机性成分频率分析	088
5.3.7	年最低潮位序列参数和设计值合成	090
5.4	两种非一致序列频率分析方法讨论	091
5.5	基于样本分段的非一致变化对设计值影响研究	093
5.5.1	年最高潮位非一致变化对设计值影响	093
5.5.2	年最低潮位非一致变化对设计值影响	098
第六章	设计潮位过程推求	102
6.1	问题的提出	102
6.2	汛期排水设计潮位过程推求	102
6.2.1	选样及样本一致性分析检验	103
6.2.2	非一致汛期排水潮位特征值频率计算	104
6.2.3	汛期排水设计潮位过程线推求	106
6.3	非汛期引水设计潮位过程线推求	108
6.3.1	选样及样本一致性分析检验	108
6.3.2	非一致非汛期引水潮位特征值频率计算	110
6.3.3	非汛期引水设计潮位过程线推求	111
第七章	资料短缺情况下设计潮流计算	116
7.1	问题的提出	116
7.2	基于潮位的潮流数值模拟	117
7.2.1	潮流数学模型简介	117
7.2.2	模型计算域及边界条件	119

7.2.3	参数率定和模型验证	120
7.3	基于潮位的潮流统计推算	126
7.3.1	建立潮流回归模型的必要性	126
7.3.2	影响最大潮流量的潮位要素	127
7.3.3	多元线性回归分析原理	128
7.3.4	最大涨潮流量回归模型及统计推算	131
7.3.5	最大落潮流量回归模型及统计推算	132
7.3.6	最大垂线平均流速回归模型及统计推算	135
7.4	设计潮流量及相应断面流速分布计算	140
7.4.1	设计涨潮流量及相应断面流速分布计算	140
7.4.2	设计落潮流量及相应断面流速分布计算	142
第八章	潮位长期预报及实时校正模型研究	145
8.1	问题的提出	145
8.2	潮位长期预报模型	146
8.2.1	潮汐调和分析原理简述	146
8.2.2	潮汐调和分析年型选择	146
8.2.3	潮位长期预报模型率定	147
8.3	长期预报模型的误差原因分析	151
8.4	潮位预报实时校正模型	156
8.4.1	基于上游来水的实时校正模型	157
8.4.2	基于上游来水的校正效果分析	159
8.4.3	基于下游风暴潮的实时校正模型	162
8.4.4	基于下游风暴潮的校正效果分析	162
8.5	模型适用性讨论	163
第九章	总结与展望	166
9.1	总结	166
9.2	展望	169
	参考文献	171

第一章 绪 论

1.1 长江感潮河段范围

根据全国科学技术名词审定委员会公布的定义,感潮河段是流量及水位受潮汐影响的河段。潮水从外海进入江河,溯江河而上,受河床阻力与河水下泄径流阻压作用,潮波能量逐渐消耗,流速渐减,潮波上溯到某一地点潮流速度与河水流速正好相抵消,潮水停止倒灌,此处为潮流界;在潮流界以上,潮波继续上溯但振幅急剧减小,直到潮波能量消耗殆尽,潮差为零的地方为潮区界。根据感潮河段的定义,其范围应上自潮区界下至河口。感潮河段是河流与海洋两种动力相互作用、互相消长的区域。河流动力是指径流(液体径流和固体径流)的下泄;海洋动力主要是指潮汐的作用(潮位升降和潮流运动)。这两种动力中各因素的不同组合,使感潮河段的水文情势较之内河或海洋都要复杂且独具特色。

长江潮区界与潮流界的位置并不是固定不变的,而是随洪、枯水季节径流大小及河口潮汐大小呈周期性变化。长江枯季大潮期间,潮动力强而径流下泄阻压力小,有利于潮水上溯,潮区界与潮流界位置上迁;长江洪季小潮期间,潮动力弱而径流下泄阻压力大,不利于潮水上溯,潮区界与潮流界位置下移。不少学者对长江潮区界与潮流界的位置进行了研究,传统上认为长江潮区界位置在大通附近,潮流界位置在江阴附近^[1];恽才兴(2004)认为长江潮区界在安徽铜陵与芜湖之间,潮流界的上界位于江阴^[2];李褪来等(2005)认为长江潮区界在安徽铜陵与芜湖之间,潮流界江阴以下^[3];徐汉兴等(2012)根据实地调查及收集的大量资料,经数值模拟与调和分析,得出长江潮区界在安庆与南京之间,潮流界在镇江与江心沙之间^[4]。其中文献[4]是从历年实测资料中分析沿江出现潮差的最上游站和未出现潮差的最下游站以确定的潮区界的范围,分析出现涨潮流的最上游站和未出现涨潮流的最下游站以确定的潮流界的范围,也就是说考虑了历年的极端情况,故该文献确定的潮区界、潮流界变迁范围比其他研究成果确定的变迁范围都要大。本书从把握一般性规律的角度,认同长江潮区界上界位于安徽大通,长江感潮河段的范围是从口门至安徽大通,并以大通水文站作为代表长江下泄径流的控制站,如图 1-1 所示。

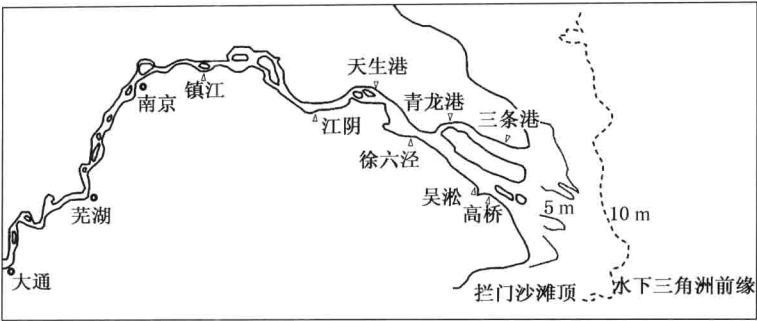


图 1-1 长江感潮河段示意图

1.2 研究背景及意义

1.2.1 研究区工程水文问题

(1) 沿江引排水工程的水文问题

长江大通以下沿江两岸是长江流域经济最发达的地区。自 20 世纪 50 年代开始,沿江各地为了抗御水旱灾害,陆续在通江河道的入江口处修建了水闸,这些水闸大多具有引排双向功能,人为控制引排水。近年来随着经济的快速发展,各地区对水资源的需求量迅猛增长、对抗御水旱灾害的要求也日益提高,水闸的数量越来越多。自 20 世纪 50 年代末 60 年代初开始各地区又纷纷修建抽水站,这样在长江水位低造成水闸引不到水的时期可以通过抽水站抽引水,区域内发生大洪水水闸不能及时排出洪水时可通过抽水站将区域洪水抽排入江,大大提高了抗御水旱灾害的能力。为了解决临近的太湖、苏北地区及北方地区的水资源问题,部分地区又修建了跨区域和跨流域调水工程。除此之外,沿江地区还有众多的涵洞、自来水厂和企业取水口、企业和污水处理厂排水口等。根据对大通~徐六泾江段的调查统计,沿江有大中小型水闸共 176 座,设计引水能力共计 $16\,611.8\text{ m}^3/\text{s}$;抽水站共 29 座,总抽引水能力 $2\,198.76\text{ m}^3/\text{s}$;涵洞 856 座(不完全统计,不易引水的地方没有统计,如南京、马鞍山、芜湖和铜陵市),若按照每座 $1\text{ m}^3/\text{s}$ 流量估算,总流量约为 $856\text{ m}^3/\text{s}$;沿江各城市日供水能力 $1\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 以上的水厂约 55 座,日供水能力总计约 $1\,068\text{ 万 m}^3/\text{s}$;沿江用水量大的企业主要是电厂,总计约 27 家的取水能力约 $176\text{ 亿 m}^3/\text{a}$,平均日取水能力约 $4\,890\text{ 万 m}^3$ 。调查还表明,大通~徐六泾沿江水闸、抽水站和涵洞的设计排水能力很大,总计约 $37\,000\text{ m}^3/\text{s}$ (汛期最大排水能力);沿江的企业中,用水量大的电厂均有单独排水口,其耗水量很少,假设退水量占取

水量的 95%，估算其退水能力约为 $167 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 和 $4\,645 \text{ 万 m}^3/\text{d}^{[5]}$ 。随着经济社会的发展，未来长江感潮河段还不断会有新的引排水工程建设。

上述引排水工程无论是自流引排水，还是通过抽水站引排水，都与长江干流的水位变化密切相关。在这些工程的规划设计阶段，需要针对工程特点推求长江干流的引排水设计潮位过程（也称设计潮型），作为工程设计的依据；在建设期间或建成运行阶段，需要预报长江干流的潮位过程，为工程施工或调度运行提供指导。

（2）沿江交通运输工程的水文问题

便利的交通是保障社会经济发展的重要基础设施。为适应社会经济发展的需要，各地在长江感潮河段建造了许多交通运输工程，包括属于陆运的过江隧道、跨江公路大桥、跨江铁路大桥以及属于水运的港口工程、航道整治工程等。

对于陆运，长江大通以下已建铜陵大桥、南京第一～第四大桥、润扬大桥、江阴大桥、苏通大桥、崇启大桥等公路大桥。在这些大桥的工程可行性研究阶段和初步设计阶段，需要开展水文计算专题研究，提出设计潮位、设计潮流量和潮流速等成果，为桥位的选定、桥型的选择、桥孔净空高度的确定及桥墩的布置等重要决策提供科学依据。由于这些大桥在水上施工周期较长，施工期间的潮位和潮流速的变化情况是施工进度、施工安全、施工质量等诸多方面的重要影响因素，因此，在施工设计阶段，需要开展分期（平水期、汛期、枯水期）设计潮位、设计潮流量和设计潮流速的分析计算，其成果作为施工设计和拟订施工抢险预案的重要依据之一。根据设计洪水的定义，在施工期间，当出现小于设计标准的不利水文条件时，施工设施、设备和安全措施能保证正常生产，否则要停工，进行防灾避灾，但在各分期（平水期、汛期、枯水期）内超标的有利水文条件在何时发生、影响时段多长，是施工设计阶段水文计算所回答不了的。施工期防止或降低超标洪水威胁的措施分为工程措施和非工程措施两大类，其中施工水情预报是重要的非工程措施之一。因此，在施工设计阶段，需要开展潮位、潮流速和风浪预报，这对于保证施工安全和提高施工效益具有直接意义。

对于航运，长江口河势的不稳定主要表现为大的分汊河段即南北支、南北港和南北槽分汊河段的变化。针对长江口的河势控制，1958 年以来，我国工程界开展了大规模现场调查和试验研究，1992 年“长江口拦门沙航道演变规律的研究（整治技术研究）”列入国家“八五”科技攻关项目。根据研究成果，确定了先整治南北槽分汊口河段、建设北槽深水航道的治理方案，并提出了“一次规划、分期建设、分期见效、滚动发展”政策，通过整治与疏浚相结合，最终达到 12.5 m 通航水深目标的方针。经过一、二、三期航道整治工程的建设，使工程前南北槽分流沙洲（江亚南沙）沙头的迅速冲刷后退现象得到遏制；工程前沟通北港与北槽的横沙东滩串沟、

沟通北槽与南槽的江亚北槽这两条大型分流通道被封堵,从而进一步稳定了北槽的分流、分沙,调整了北槽流场,基本上消除了南、北槽河势发生动荡的可能性,为南北槽分汉口河段水土资源综合开发的规划及实施创造了条件。继北槽深水航道治理工程之后,横沙东滩、崇明北沿、南汇东滩等区域正在实施或将要实施大规模的促淤圈围工程,为上海经济社会可持续发展储备土地湿地资源^[1]。

无论是对航道整治工程还是对滩涂促淤圈围工程,都需要根据邻近潮位站的实测资料,分析工程附近区域的防洪设计潮位、保证率潮位以及设计潮位过程,以满足工程规划设计、施工和运行管理等的需要。

除了上述列举的引排水工程、交通运输工程在不同阶段对水文设计、水情预报有实际需求外,还有很多建设项目的规划和建成投产也离不开对项目所在区域水文情势的预估(或预报)。比如,《建设项目水资源论证管理办法》(以下简称《办法》)第二条规定:“对于直接从江河、湖泊或地下取水并需申请取水许可证的新建、改建、扩建的建设项目,建设项目业主单位应当按照本办法的规定进行建设项目水资源论证,编制建设项目水资源论证报告书”;《办法》第八条规定:“业主单位应当在办理取水许可预申请时向受理机关提交建设项目水资源论证报告书;不需要办理取水许可预申请的建设项目,业主单位应当在办理取水许可申请时向受理机关提交建设项目水资源论证报告书;未提交建设项目水资源论证报告书的,受理机关不得受理取水许可(预)申请”;《办法》第十一条规定:“业主单位在向计划主管部门报送建设项目可行性研究报告时,应当提交水行政主管部门或流域管理机构对其取水许可(预)申请提出的书面审查意见,并附具经审定的建设项目水资源论证报告书;未提交取水许可(预)申请的书面审查意见及经审定的建设项目水资源论证报告书的,建设项目不予批准。”所以,在建设项目的可行性研究阶段,需进行水资源论证。在推求建设项目论证范围内的水资源量时涉及到设计年径流及其年内分配计算等工作内容。再比如,《中华人民共和国防洪法》第三十三条规定:“在洪泛区、蓄滞区内建设非防洪建设项目,应当就洪水对建设项目可能产生的影响和建设项目对防洪可能产生的影响做出评价,编制洪水影响评价报告,提出防御措施。”建设项目可行性研究报告按照国家规定的基本程序报请批准时,应当附具有关水行政主管部门审查批准的防洪影响评价报告。所以,在建设项目的可行性研究阶段,需开展防洪影响评价分析。在防洪影响评价时需要推求符合规定防洪标准的设计洪水过程。

1.2.2 研究区水文计算难点

工程水文计算的核心任务是应用概率论与数理统计原理研究水文现象的统计

规律。假定实测雨量、蒸发、水位、流量等某个水文要素的年极值(或年总量)组成的系列为独立随机抽自同一总体的样本,且样本对总体具有足够的代表性,在这两个基本假定下,由样本估计总体分布,进而由总体分布对水文变量的未来情势做出概率预估,即已知发生概率推求相应的设计值,为水资源开发利用工程、防汛抗旱水利工程和港口航道等其他涉水工程的建设及安全运行管理提供科学依据。这里必须强调,实测水文系列具有“可靠性”“一致性”和“代表性”是现行工程水文计算理论和方法得以成立的基础。长江感潮河段工程水文计算面临的主要问题在于以下两个方面。

(1) 由于人类活动和气候变化的影响,实测潮位序列的一致性遭到破坏

长江河口是长江流域的终端,也是长江流域经济社会发展最具战略地位的区域,其城市化程度高,人口密集,经济发达,占流域 1.27%的土地面积承载着流域 7.58%的人口,创造了流域 24.46%的国民经济产值。河口地区的发展极大地依赖于其资源环境条件,同时河口地区也更显著地受到流域人类活动的影响,更直接地受到气候变化引起的海平面上升的影响,导致其资源环境条件的改变比其他地区更为剧烈。

长江感潮河段水文要素受气候变化和人类活动的影响主要表现在以下几个方面:①为满足流域防洪、发电、灌溉、航运等综合治理开发的需要,长江流域内已建水库约 4.8 万座,总库容达 1 224 亿 m^3 ,这些水库通过径流调节改变了长江入海水量及其时程分配。②围垦江滩、修建堤防对洪泛区进行保护等使长江洪泛区面积从 1954 年的 317 万 hm^2 减至 1998 年的 32.13 万 hm^2 ^[6],与此同时,通江湖泊也遭围垦,长江中下游湖泊面积由 1949 年的 2.5 万 km^2 减至 1997 年的 1.4 万 km^2 ,这些人类活动使长江原有的行洪和滞洪功能遭到严重破坏,长江洪水靠干流河道泄洪的压力越来越大,洪水位大大抬高。③全球气候变化导致海平面上升,根据长江口外大戢山验潮站 1978 年 1 月—2006 年 12 月的潮位资料统计,年均海平面上升率为 4.0 mm/a ;而据嵎山站 1996 年 1 月—2006 年 12 月的资料统计,年均海平面上升率为 6.3 mm/a ^[7]。④全球气候变化导致台风、旱涝等极端气候事件频发。据统计,1950—1980 年,影响长江口并形成江阴站年最高潮位的台风为 2 场(5612 和 7413 号台风),而 1980—2008 年,影响长江口并形成江阴站年最高潮位的台风达 8 场(分别为 8114、9216、9608、9711、0012、0216 号台风、2005 年“麦莎”台风和 2006 年“帕丽斯”台风)。

谢平给出了水文变异的统计学定义:如果水文序列的分布形式或(和)分布参数在整个序列时间范围内发生了显著变化,则称水文序列发生了变异^[8]。受上述气候变化和人类活动因素的影响,长江感潮河段潮位已经出现一些变异特征,突出表现为高水位频频发生,以天生港站为例,20 世纪 60、70、80、90 年代的平均年

最高潮位分别为 3.55 m、3.66 m、3.87 m 和 4.20 m(黄海基面)。高水位的变异表明工程水文分析计算的“一致性”前提已经不成立,采用传统的工程水文分析计算方法确定设计高潮位,不仅理论依据不足,对防洪工程建设和运行调度也起不到应有的指导作用。年最高潮位序列如此,与长江感潮河段航运、各通江河道引排水等经济活动密切相关的年平均潮位、年最低潮位等特征值的变异性如何?在变异情况下如何推求其设计值?这一系列问题亟待进行专门研究。

(2) 由于周期性潮汐运动的影响,实测潮流量序列的代表性难以保证

由于大通水文站以下河段水位受东海潮汐影响而呈波动状态,测流难度较大,所以国内外很多研究选择大通站作为长江入海径流的控制站^[7,9]。大通以下河段的潮流量观测资料很少,已有的潮位和潮流同步测验工作主要是为专门工程服务的。徐六泾站虽然自 1984 年 1 月 2 日改为水文站,但起初采用的是常规多船组全潮水文测验,此方法所需人力物力非常大,难以长期维持,1993 年才开始采用 ADCP 按每月观测 3 个代表潮的方法进行潮流量观测,从而计算得到潮流量^[10]。总的来说,长江感潮河段的潮流量观测资料断续零碎,不能满足工程水文计算对序列代表性的要求。

在具有长期潮位观测资料但仅有少量潮流观测资料的情况下,以设计潮型为边界条件的潮流数值模型算法(或物理模型试验法)是目前常用的推求设计潮流流量的方法,其主要步骤包括:①在设计断面上、下游选择潮位代表站,以设计断面、上下游站的同步潮位潮流观测资料率定模型参数;②分别推求上、下游站的设计潮型作为设计条件下模型计算的边界条件;③通过数值模型计算(或物理模型试验)确定设计边界条件下设计断面的潮流量,认为此潮流量的发生概率等于上下边界的组合概率。此类方法在现有资料条件和技术水平下具有可操作性,但存在以下问题:①设计潮型的推求目前还不成熟,仅凭借设计频率的某个潮位特征值来推求一个潮位过程存在很大的任意性,导致以设计潮型为边界条件得出的设计潮流量带有很大的不确定性;②上下边界的潮位过程往往既不完全独立,也不完全相关,其组合概率难以确定;③上下边界的组合概率与设计断面潮流量的发生概率是不能等同的两个概念^[11]。以该类途径推求的设计潮流量指导涉水工程的建设 and 运行管理,存在较大风险。因此,需要寻求适应长江感潮河段水情和资料特点、具有明确频率概念的设计潮流量计算方法。

1.2.3 研究区潮位预报难点

感潮河段的潮位除了受上游洪水波的影响外,还受到海洋潮波的影响。后者在一般情况下主要是天文潮,在台风期间则包括风暴潮和天文潮两部分。由于影响因素众多,感潮河段的水位预报难度较大,是水文预报中需要深入研究的课题。

目前常用的潮位预报方法可以归纳为以下几类:

(1) 系统分析法。该法将感潮河段视为一个水文系统,以上游流量(或水位)、下游潮位和区间来水为系统的输入,以预报断面的水位为系统的输出,基于相关分析、神经网络^[12]或支持向量机^[13]等方法建立描述系统输出与输入响应关系的模型来预报潮位。此类方法的优点是能对上游流量(或水位)、下游潮位和区间来水等条件的变化做出及时的响应;不足在于仅考虑系统的输入和输出,没有考虑预报断面潮位形成的物理过程,且预见期较短(模型预见期取决于系统所有输入中以最短传播时间到达预报断面的输入项)。

(2) 水动力模型法。该法基于圣维南方程组建立考虑潮水顶托影响的河道水位过程预报模型,按维数分为一维、二维和三维模型,按床面分为定床、动床模型。在具备详细河道地形资料的前提下,水动力模型可较好地模拟感潮河段的水流状态,但仅有模拟功能,无预报功能,必须与能够预报模型边界条件的其他模型相耦合,才能获得与其他模型相同的预见期。

(3) 时间序列分析法。该法将潮位过程视为时间序列,根据预报断面潮位自身随时间的变化规律,建立门限自回归模型^[14]、ARMA 模型^[15]或灰色马尔科夫模型^[16]等进行预报。此类方法的优点是只需要预报断面的实测潮位资料,不需要其他资料,便于应用;缺点是没有考虑潮位形成的物理过程,加上利用的信息量少,一般预见期较短且难以取得令人满意的预报精度。

(4) 潮汐调和分析法。该法基于潮汐理论,认为地球上的潮汐现象主要由月球和太阳的引力作用产生,是一种强迫振动,振动周期等于强迫力(引潮力)的周期,通过对引潮力、引潮势或平衡潮的展开将一个复杂的潮波分解为较多具有一定周期和振幅的单波(也称为分潮)^[17]。在依据实测潮位过程资料确定各个分潮的周期、振幅、初相角、迟角等参数后,潮位值仅为时间的函数,可以用来预报任意时刻的潮位^[18]。潮汐调和分析法的优点是只需要预报断面的实测潮位资料,不需要水下地形资料;理论依据强,预见期不受限制。该法的缺点是预报的潮位值仅是时间的函数,无法对上游流量(水位)、下游潮位和区间来水等条件的变化做出任何响应,只有当预报期潮位与率定期潮位的上下游边界条件和河床边界条件接近时才能取得较好的预报精度,否则容易出现明显的系统误差^[19]。

感潮河段水流运动的复杂性决定了其潮位预报比单纯的内河水位预报或单纯的海洋潮位预报难度都要大,这也是至今感潮河段潮位预报问题未能得到很好解决的主要原因。以上不同潮位预报方法各有优缺点,因此有必要研究将两种或两种以上方法有机结合,相互取长补短,以期提供更优质的预报成果服务于涉水工程的施工或运行管理、防汛抗旱、水资源合理开发利用等。

1.2.4 研究目的和意义

长江感潮河段潮位资料的非一致性使其不能满足工程水文分析计算方法对样本“一致性”的要求,对潮位资料的非一致性不经分析检验和处理,直接套用基于“一致性”假定的分析计算方法来推求各种潮位设计值,以指导流域水资源开发利用和防洪抗旱等活动,将面临环境变化带来的巨大风险。因此,研究检测水文变异的方法,针对环境变化提出适应性的工程水文计算方法,是长江感潮河段工程水文计算亟待解决的问题。不仅如此,由于全世界范围普遍存在的水文气候变异现象,变化环境下的工程水文计算理论和方法已成为当前国内外水文水资源领域的研究热点之一。

长江感潮河段潮流资料的严重短缺使其不能满足工程水文分析计算方法对样本“代表性”的要求,以设计潮位过程为边界条件,通过潮流数值模型计算或物理模型试验来推求潮流量(流速)设计值时,由于设计潮位过程推求带有一定任意性,且上下边界潮位过程的组合概率难以确定等原因,使得计算成果具有较大的不确定度,且发生频率也不明确。因此,需要寻求适应长江感潮河段水情和资料特点、具有明确频率概念的设计潮流计算方法。

感潮河段水流运动的复杂性决定了其水位预报比单纯的内河水位预报或单纯的海洋潮位预报难度都要大。现有潮位预报方法各有优缺点,因此有必要研究将两种或两种以上方法有机结合,相互取长补短,以提供更优质的预报成果服务于涉水工程的施工或运行管理、防汛抗旱、水资源合理开发利用等。

综上所述,由于长江感潮河段潮位资料的非一致性、潮流资料的严重短缺性和潮位变化的复杂性,无论是水文计算还是潮位预报都存在相当的难度,尚未得到很好的解决,因此加强长江感潮工程水文研究具有十分重要的理论和实用价值。

1.3 研究内容与方法

针对长江感潮河段潮位资料非一致、潮流资料严重短缺、水位受径流和潮流共同作用等特点,确立如下主要研究内容与研究方法:

(1) 水文序列变异分析检验方法(第三章)

从统计意义上说,如果水文序列的分布形式或(和)分布参数在整个序列时间范围发生了显著变化,则称水文序列发生了变异,或称水文序列具有非一致性,本书中的“水文序列变异”与“水文序列非一致性”具有同等含义。水文序列的变异主要表现为在整个序列时间范围发生了趋势变化或(和)跳跃变化,跳跃变化又有均值跳跃和方差跳跃等。尽管目前已经发展了多种趋势变化和跳跃变化的分析检验