

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.10.035

小流域联合调度优化模型应用研究

——以浙江省长兴县泗安塘为例

金国祥

(浙江碧橙新材料有限公司, 浙江 杭州 311233)

摘要: 鉴于小流域水网和地势复杂多变,且涉及水利工程种类繁多,探索一种能考虑多因素的全局分析模型是十分必要的。为此,以涵盖山区和平原的泗安塘小流域整治工程为例,构建了泗安塘流域概化河网模型,并通过洪峰模数和洪水位进行了模型率定;在概化河网模型基础上,提出了“水库—泵站—桥梁—河道”联合调度优化模型,并采用遗传算法搜索出能满足流域规划要求的最优过流方案;最后结合河道和周边现状,明确了相应流域整治措施。经调查,该工程在设计水平年内取得了良好的防洪排涝效益和社会效益,可以为小流域整治工程提供参考。

关键词: 小流域;河网模型;联合调度模型;遗传算法;效益分析

中图分类号: TV8

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)10-0158-04

0 引言

由于特殊的地理环境、不断抬高的边界水位、近年来频发的极端天气,导致浙江省长兴县频繁出现洪涝灾害。据不完全统计,长兴地区因暴雨所致的洪涝灾害平均不到 5 a 就有一次。其中,1999 年的梅雨型洪水最为典型,具有暴雨集中、总量大、强度大等特点,太湖水位达到历史最高的 4.97 m(吴淞高程),远超 100 a 一遇的防洪标准。全县受灾人口达 45.6 万,14.2 万人紧急转移,洪水毁坏房屋约 1.7 万间,农作物受灾面积达 30 450 hm²,千余家企业停产,直接经济损失高达 17.3 亿元。作为长兴县西南部洪水重要排泄通道的泗安塘流域,其防洪排涝能力的提升整治受到长兴县委、县政府高度重视。目前小流域综合整治按专业学科主要分为水资源保护、水环境改善、生态修复、改善农田环境、构建科学管理制度等内容,但各专业之间缺乏高效的协调与统筹,小流域全局精细化调度有待解决^[1-3]。随着国家提出的主体功能区规划与长江三角洲城市群发展规划理念在水生态建设中的融合^[4],长兴县作为国家优化开发区和长江三角洲城市群之一,积极响应国家战略布局的需要,提出了泗安塘流域综合整治采用

总体规划、分片区治理、总体调度管理的“总—分—总”模式,为太湖流域和长三角城市群的水生态安全及水资源安全提供保障。本文基于泗安塘小流域现状和洪灾特点分析,构建了该流域概化河网模型;在此基础上,结合遗传算法提出了能够指导流域建设发展、满足流域规划要求的联合调度优化模型,明确了相应流域整治措施。分析表明,泗安塘小流域整治工程的防洪排涝效益和社会效益良好,可为小流域整治工作提供实践支撑。

1 流域概况

1.1 流域基本情况

泗安塘流域位于长兴县中部,流域范围内人口密集,工业企业较多,沿线分布大量圩斗,对长兴县经济社会发展起着举足轻重作用。干流泗安塘是长兴县境内四大骨干水系之一,不仅承担着区域防洪排涝功能,也是一条区域航运骨干支线航道。该河道起于青岷岭,向西南流至祖宁,折向南流经赵庄至朱湾,再折向东南流至三里桥进入长兴县境,经金塘村入泗安水库,总流域面积约 560 km²。流域内主要支流有:青东涧(及其支流荷花涧)、潘家山港、汪家山港、长潮涧、宿子岭涧等(见图 1)。历年来泗安塘流域遭受了多次洪涝台风灾害,其周边各乡镇及斗区均有不同程度的损失。

1.2 洪灾问题分析

(1)源短流急,排泄不畅。泗安塘流域区内山地

收稿日期: 2023-10-31

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600704);水工结构服役安全与性能提升创新团队项目(Y417015)

作者简介: 金国祥(1977—),男,高级工程师,从事水利工程设计与环境保护工作。



图1 泗安塘流域片区划分示意图

多、平原少,泗安塘是长兴县西南部山洪排泄唯一的通道。区内山峰高程大多在 300~500 m,河道上游纵坡陡,源短流急,暴雨时洪水汇集迅速,形成洪峰。进入平原段后河道纵坡平缓,过水断面小,排泄不畅,梅雨期间受长兴县平原高水位顶托,洪水不能及时下泄。与此同时,中下游斗区现状堤防矮小单薄,高水位下易导致洪水漫溢,发生决堤倒圩,造成洪水泛滥,进而淹没大片农田和村庄。

(2)河网密度小,蓄洪能力差。泗安塘流域主要山区河流有 25 条,平原河道有 33 条,区域水域面积 26.04 km² (水库水域面积 11.74 km²),水面率为 7.02%。但扣除水库水域面积后水面率仅为 3.80%,远远低于长兴县平原地区水面率 10% 的平均水平。同时,随着区域经济建设发展,人类生产建设活动又造成区内河网水面率逐年降低,调蓄能力下降。由于泗安塘中下游地势低洼,近年的斗区建设使斗内河道、水田和鱼塘相继退出水网调蓄,改由外围排涝站

向主河道抽排积水,增加了泗安塘河道的行洪压力。

(3)梅雨、台风暴雨多发,量大且时长。长兴县地处长三角,东濒太湖,根据流域、气候和降水等特征,每年 4—10 月的汛期雨量占全年降水量的 75% 左右,易造成持续且量大的梅雨型洪水。除此之外,台风暴雨也是造成长兴地区洪涝灾害的主要原因,基本上平均每隔 3 年就会遭遇一次强台风或超强台风。例如在 2012 年强台风“海葵”肆虐期间,根据遥测雨量资料,长兴县平均降雨量为 207.9 mm,24 h 降水量最大达到 222 mm,长兴县平原地区普遍出现超警戒水位,其中长兴站超过保证水位 0.13 m,造成了全县大范围内涝和洪水灾害。

2 河网模型分析

2.1 构建河网模型

概化河网模型主要由域内水系、地形和现有水利工程共同组成。河网将泗安塘流域划分为 24 个计算分区,主河道选取泗安水库坝址至林城下游段,并将模型范围内 14 个规划圩区概化成湖泊,概化湖泊与主河网的联接方式有分洪闸、排涝泵站、堰、分洪河道 4 种。采用二界岭、泗安水库、姚家桥、虹星桥 4 个水位边界,考虑 9 条集中入流河道。其中二界岭下泄流量边界采用各设计频率下的下泄流量过程线确定;泗安水库调洪下泄流量边界根据水库调洪图进行错峰计算确定;姚家桥和虹星桥水位边界均采用规划推荐水位。泗安塘流域概化河网模型示意图如图 2 所示。

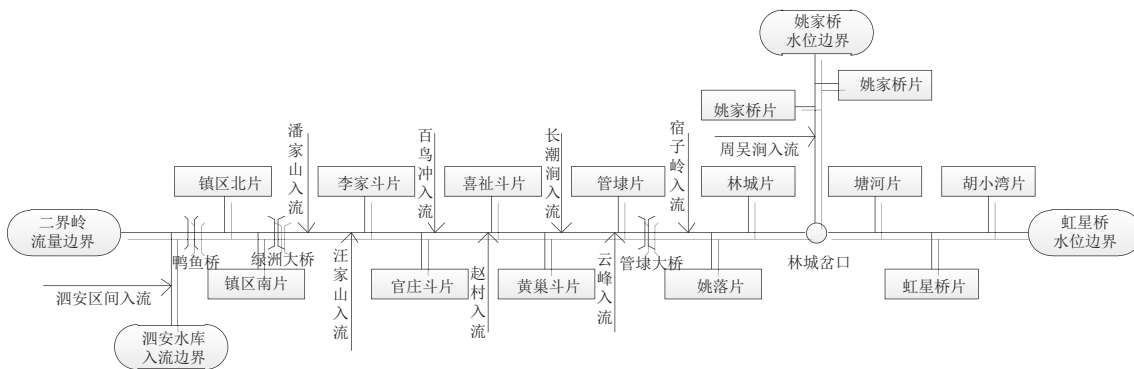


图2 泗安塘流域概化河网模型示意图

2.2 洪峰模数率定分析

一般流域洪峰模数计算中,山区区产流采用蓄满产流简易扣损法计算;平原区产流按水域、水田、旱地等分别考虑降雨、蒸发、水田下渗、旱地持水量、径流系数进行产流计算^[5-6]。汇流计算以 50 km² 集雨面积为分界,大于该面积时采用“瞬时单位线法”来

推求设计洪水^[7],同时遵从入流集中于调节中心、净雨过程调蓄考虑水库之间为串联调节、前后洪水互不影响并符合叠加原理的 3 个基本假定^[8];小于该面积时采用“浙江省推理公式法”(见式(1))来推求设计洪水,该公式已经过省内各地径流站实测暴雨洪水资料的论证。泗安塘流域产、汇流计算采用山区

和平原区联合分析方法。假定土壤最大含水量为100 mm,初期损失为25 mm;最大24 h后期损失为1 mm/h,其余2日后期损失为0.5 mm/h。与《长兴县水利综合规划》(以下简称《综合规划》)中泗安塘流域的洪峰模数推荐值进行对比后发现,概化河网模型计算值与《综合规划》推荐值的分布规律基本吻合,且相对误差最大仅为5.88%。由此可见本次概化河网模型是合理可靠的,可用于防洪水利计算。

“浙江省推理公式法”表达式为:

$$\begin{cases} Q_m = 0.278 \frac{h}{\tau} F \\ \tau = 0.278 \frac{l}{mJ^{1/3} Q_m^{1/4}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q_m 为洪峰流量, m^3/s ; h 为全局汇流 τ 时段的最大净雨量、局部汇流为单一洪峰时的净雨量,mm; F 为流域面积, m^2 ; τ 为流域汇流历时,h; l 为主流从出口断面至分水岭的最长距离,m; J 为沿流程 l 的平均比降; m 为汇流参数,根据流域形状和下垫面情况按经验取值。

泗安塘流域各洪水频率 P 下的设计洪峰模数见表1。

表1 泗安塘流域各洪水频率下的设计洪峰模数

洪水分区	计算依据	$P=2\%$	$P=5\%$	$P=10\%$
青东涧	《综合规划》	5.54	4.39	3.34
	概化河网模型	5.82	4.63	3.47
	相对误差 /%	5.05	5.47	3.89
长潮涧	《综合规划》	5.60	4.43	3.40
	概化河网模型	5.92	4.51	3.60
	相对误差 /%	5.71	1.81	5.88
荷花涧	《综合规划》	6.08	4.85	3.70
	概化河网模型	6.29	4.90	3.88
	相对误差 /%	3.45	1.03	4.86
周吴涧	《综合规划》	6.07	4.84	3.70
	概化河网模型	6.15	4.98	3.79
	相对误差 /%	1.32	2.89	2.43

2.3 洪水位率定分析

基于概化河网模型的洪水位计算中,干流河道槽率取0.030,边滩槽率取0.038。采用同洪水频率遭遇洪水组合计算值与水位站实测值进行对比分析。选取天平桥站和绿洲大桥站具有代表性的2015年(5 a一遇)和2016年(20 a一遇)实测洪水位数据,将洪水位模型计算值与实测值的对比列于表2。

由表2可知,模型计算值与实测值较为接近,绝

表2 洪水位模型计算值与实测值对比表

年份	站点	洪水位模型 计算值 /m	洪水位历史 实测值 /m	绝对 误差 /m	相对 误差 /%
2015	天平桥站	4.14	4.11	0.03	0.73
	绿洲大桥站	4.80	4.76	0.04	0.84
2016	天平桥站	5.36	5.32	0.04	0.75
	绿洲大桥站	6.66	6.64	0.02	0.30

对误差为0.02~0.04 m,相对误差最大仅0.84%。由此可知,概化河网模型可较准确地模拟泗安塘流域洪水过程。

3 联合调度模型优化分析

3.1 “水库—泵站—桥梁—河道”联合调度优化模型

“水库—泵站—桥梁—河道”联合调度优化模型是以概化河网模型为水情基础,调度方案和洪涝流量分配为分析变量,采用遗传算法进行全局优化搜索的一种小流域智能分析模型。

遗传算法是一种模拟生物进化论和遗传学机理科学的优化算法。其最大特点是具有内在的隐蔽性和全局寻优的能力,可以在不要求导和函数连续性受限的情况下,对研究对象直接进行优化搜索。遗传算法的运算过程仿照了自然界生物优胜劣汰的现象,通过计算机编程实现其遗传和变异特性。

在泗安塘流域整治方案分析中,主要以干流、支流、小流域、沿线集镇片低洼易涝区治理为主。模型优化目标可定为流域内产汇流计算总值与排涝规划值之差 ΔQ 最小,约束条件为水库调洪能力、生态基流,以及流域各水利工程的防洪排涝能力等。优化算法中相关参数经试算,泗安塘流域模型中迭代次数可定为50代,种群参数为50个,交叉概率为0.8,变异概率为0.2,采用浮点数编码,个体长度为7。

“水库—泵站—桥梁—河道”联合调度模型优化分析示意图见图3。

模型目标函数为:

$$\min[\Delta Q] = \sum_{i=1}^n Q_{mi} - \sum_{j=1}^m Q_{hj} \quad (2)$$

式中: n 为用于产汇流计算的片区数量, $n=24$; m 为具有排涝能力的河道数量; Q_{mi} 为 i 片区的洪峰流量, m^3/s ; Q_{hj} 为 j 河道的规划排涝流量, m^3/s 。

约束条件为:

$$V_{\text{调整后水库库容}} = V_{\text{原水库库容}} + q_{\text{入库流量}} - q_{\text{下泄流量}} - E_{\text{蒸发损失}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{河道过流能力}} \geq Q_{\text{max}} \text{ 涵闸过水流量} + Q_{\text{max}} \text{ 泵站排涝流量} +$$

Q_{\max} 水库下泄流量 $-Q_{\max}$ 生态基流
且约束条件中所有变量均为非负数。

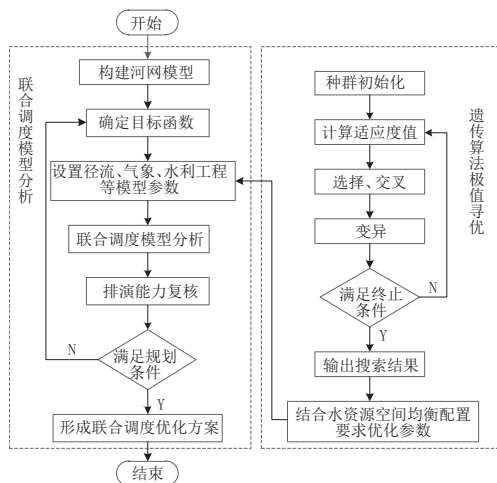


图3 “水库—泵站—桥梁—河道”联合调度模型优化分析示意图

3.2 优化结果

经优化搜索后(见图4),目标函数最优值为 $0.0092 \text{ m}^3/\text{s}$, 相应干流河道过水断面面积总体需增加约 24.5%; 支流河道过水断面面积总体需增加约 10.6%; 涉及桥梁存在阻水情况,需配合河道断面同时拓宽。在集镇低洼易涝区,泗安片现状外排流量为 $0.78 \text{ m}^3/\text{s}$,需增加 $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 外排流量;镇区南片现状无外排泵站,需增加 $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 外排流量;汪家山片现状外排流量为 $0.62 \text{ m}^3/\text{s}$,需增加 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 外排流量。

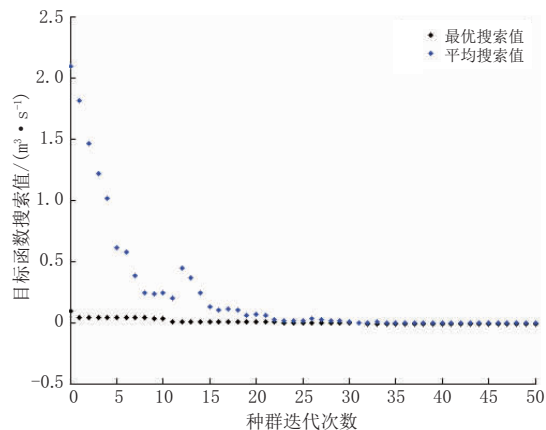


图4 遗传算法寻优过程图

4 流域综合整治方案及效益分析

4.1 干流河道整治措施

干流河道整治主要以拓浚河道为主,河线基本按原河道走向布置,堤线结合城镇建设和规划要求布置^[9]。泗安塘流域干流河道整治总长约 23 km,除泗安水库坝址—鸭鱼桥河段 4.95 km 维持现状规模外,其余河段均根据 20 a 一遇洪水标准拓浚河道,河道过水断面面积平均增加约 30%;河段拓宽配套拆

建桥梁共 4 座,并加高加固现有堤防,选用生态松木桩护岸。同时考虑两岸古镇特色,水景观设计中融入水文化要素,打造人与自然的和谐画面。

4.2 支流河道整治措施

支流整治主要以水系连通和生态修复为主,并保证洪水下泄顺畅^[10]。整治措施多为湿地恢复、水流调节、水库筑坝、局部切滩疏浚等^[11]。泗安塘流域支流河道整治可按 20 a 一遇洪水标准进行适当拓宽,河道过水断面面积平均增加约 12%,以保证上下游河道顺畅衔接。配套新建景观堰坝 14 座,拆建桥梁共 20 座,拆建堰坝 10 座,修复堰坝 14 座;同时结合泗安集镇和工业园区已有建筑物状况,局部加高加固现有堤防或新建防洪墙。

4.3 低洼易涝区整治措施

城镇片低洼易涝区治理措施主要为“挡、排、撇、疏”四方面。“挡”指在低洼易涝区外围设置拦洪设施,主要是在河口建闸和加固加高防洪堤。“撇”指山区汇水尽可能高水高排,采用撇洪渠等工程措施排水至平原河网。“排”指当外港水位较高需关闭闸门时,可采取泵站抽水排涝。“疏”指内港河道可将区间暴雨涝水排入内河,自流至外港。泗安塘流域低洼易涝区无自排条件,主要以泵站抽水排涝为主。泗安片新建 3 座排涝站,泗安南片新建 4 座排涝站,汪家山片新建 1 座排涝站,分别可提升片区 4.87、5.70、1.50 m^3/s 的排涝能力。

4.4 设计水平年效益分析

防洪效益可分为农村综合防洪效益、工业及城镇综合防洪效益两部分^[12]。通过对泗安塘流域受灾农田面积、工业总产值和其他涉及行业综合损失调查,据洪水频率法,农村综合排涝效益为 500 万元/年,城镇综合排涝效益为 7 500 万元/年。另外通过对 2022 年流域的水土环境调查统计,该流域扰动土地整治率为 96%,水土流失总治理度为 90%,林草植被恢复率为 98%,均已达到国家二级标准要求。各项指标显示流域水土环境得到了有效改善,防洪排涝能力得到了有效提升,综合效益发挥显著。

5 结语

通过对泗安塘流域整治工程应用分析,可知“水库—泵站—桥梁—河道”联合调度优化模型可以对流域各干流、支流、工程设施等的防洪排涝能力进行综合分析,通过遗传算法快速寻找到较为合理的优化方案,为小流域整治方向和规模研究提供思路。同

(下转第 209 页)

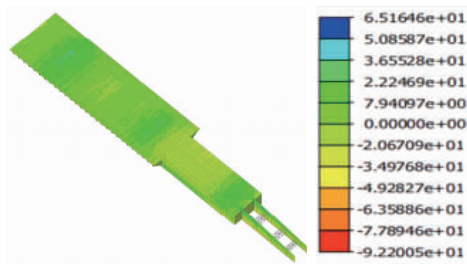
表 2 钢箱梁应力实测值与模拟值对比

截面	类别	实测值 /MPa	模拟值 /MPa	顶推距离 /m
10#	σ_{max}	21.1	23.9	70.0
	σ_{min}	-25.3	-22.9	100
9#	σ_{max}	21.1	24.2	75.0
	σ_{min}	-28.1	-32.1	50.0
8#	σ_{max}	33.2	24.2	83.4
	σ_{min}	-27.8	-34.4	60.0
7#	σ_{max}	15.6	20.1	105.0
	σ_{min}	-27.5	-25.4	75.0
6#	σ_{max}	21.1	25.1	120.0
	σ_{min}	-19.8	-22.6	95.0
5#	σ_{max}	13.4	17.5	130.6
	σ_{min}	-17.8	-23.1	115.0
4#	σ_{max}	4.2	3.8	110
	σ_{min}	-16.7	-20.7	130
3#	σ_{max}	—	—	—
	σ_{min}	-6.4	-3.6	130.6

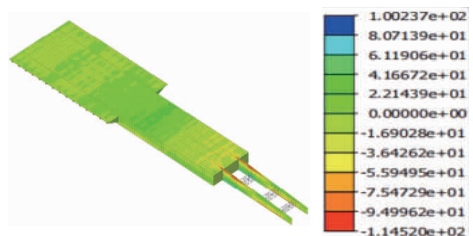
(3)顶推过程中,钢箱梁变形及应力、钢导梁应力的实测数据与模拟数据基本符合,说明两种方法进行对比分析可有效反应结构的受力状态,为保障施工的顺利进行提供了理论依据。

参考文献:

[1] 苏成,廖威,袁昆,等.桥梁健康监测在线预警指标研究[J].桥梁建



(a)钢箱梁 8# 截面测点最大拉应力云图(单位:MPa)



(b)钢箱梁 8# 截面测点最大压应力云图(单位:MPa)

图 15 钢箱梁 8# 截面应力云图

设,2015,45(3):44-50.

[2] 彭卫兵,沈佳栋,唐翔,等.近期典型桥梁事故回顾、分析与启示[J].中国公路学报,2019(12):132-144.
 [3] 解祎,黄海燕.基于 ANSYS 的桥梁施工健康监测研究[J].低温建筑技术,2013(12):59-61.
 [4] 易翔,郑辉,柏观福.钢箱梁顶推施工控制与数值模拟[J].长沙大学学报,2021,35(5):18-22,33.
 [5] 杨晓东,汪选吉,刘艳双,等.某 132 m 钢箱梁步履式顶推施工技术及其监测研究[J].建筑结构,2023,53(增刊 1):2292-2295.
 [6] 黄竞锋.大跨钢箱梁斜拉桥的施工监控及索力测试[D].长沙:湖南大学,2020.

(上接第 161 页)

时,在小流域后期运管阶段,该模型也可随着流域建设发展而作相应调整,辅助小流域实现长效治理与动态管理相结合的目标,构建稳定、科学生态圈。

参考文献:

[1] 付国强.浅谈小流域治理技术方案[J].环境工程,2023,41(增刊 2):146-149.
 [2] 连燕.基于加权和多目标优化法在小流域治理中的研究[J].云南水力发电,2022,38(8):66-70.
 [3] 王春明,王文冬,高晓薇,等.某生态清洁小流域治理与综合效益分析[J].水利技术监督,2022(9):220-223,264.
 [4] 段义宇,王可壮,何倩,等.基于新发展理念的浚谷小流域治理实践与探索[J].水利规划与设计,2022(9):10-13.
 [5] 刘永杰.小流域治理中水土保持技术应用的研究[J].农业技术与装备,2021(5):103-104.

[6] 曲静.小流域治理工程的建设管理[J].河南水利与南水北调,2021,50(9):75-76.
 [7] 张柯.基于生态文明建设的小流域治理与城乡融合发展浅见[J].中国水土保持,2020(12):20-22.
 [8] 陈雪英,梁敏.层次分析法在河北省小流域治理土地资源评价中的应用研究[J].河北水利,2020(9):18-20.
 [9] 侯小华.浅谈小流域治理规划与社会进步[J].农业科技与信息,2020(17):55-56,62.
 [10] 庞南柱,李远游.探索水土保持技术在小流域治理中的应用实践[J].科技与创新,2020(13):160-161.
 [11] 施建林.浅谈皖南山区小流域治理[J].安徽农学通报,2020,26(12):53-54.
 [12] 褚雅红.小流域治理中水土保持措施及效益分析[J].内蒙古水利,2020(2):56-57.