

“十二五”国家重点图书出版规划项目
交通运输建设科技丛书 · 水运基础设施建设与维护

Channel Regulation of Deep-water Rapids
Between Three Gorges Project and
Gezhouba Project of the Yangtze River

长江三峡—葛洲坝 两坝间深水危险滩



航道整治技术

郝品正 冯小香 陈冬元 著



人民交通出版社
China Communications Press

“十二五”国家重点图书出版规划项目

交通运输建设科技丛书·水运基础设施建设与养护

交通运输建设科技项目经费支持

长江三峡—葛洲坝 两坝间深水危险滩航道整治技术

郝品正 冯小香 陈冬元 著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书依托交通部西部交通建设科技项目“三峡两坝间大流量复杂水流下航运安全关键技术研究”的研究内容进行编写,共分为九章。全书比较系统和全面地研究了三峡—葛洲坝两坝间河段河道形态特征、水力特性和碍航原因,提出了全新的深水危险滩航道整治理念,可应用于长江三峡—葛洲坝两坝间危险滩段的航道整治,也可为其他“两坝间”特殊河段、以“深水”为特征的危险滩航道整治工程提供借鉴。

本书可供从事河流渠化、航道整治等专业的设计、科研和教学人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

长江三峡—葛洲坝两坝间深水危险滩航道整治技术/
郝品正,冯小香,陈冬元著. —北京:人民交通出版社
, 2013. 6

(交通运输建设科技丛书)

ISBN 978-7-114-10689-7

I. ①长… II. ①郝…②冯…③陈… III. ①三峡水
利工程—深水航道—航道整治 IV. ①U617

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 118538 号

“十二五”国家重点图书出版规划项目

交通运输建设科技丛书·水运基础设施建设与养护

书 名:长江三峡—葛洲坝两坝间深水危险滩航道整治技术

著 作 者:郝品正 冯小香 陈冬元

责任编辑:曲 乐 王文华

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010) 59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:中国电影出版社印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:10.25

字 数:240 千

版 次:2013 年 6 月 第 1 版

印 次:2013 年 6 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10689-7

定 价:35.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



交通运输建设科技丛书编审委员会

主 任：赵冲久

副主任：李祖平 洪晓枫 罗 强

委 员：赵之忠 林 强 付光琼 石宝林 张劲泉 费维军
关昌余 张华庆 蒋树屏 沙爱民 郑健龙 唐伯明
孙立军 王 炜 张喜刚 吴 澎 韩 敏

总 序

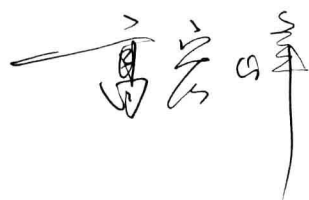
“十一五”以来，交通运输行业深入贯彻落实科学发展观，加快转变发展方式，大力推进交通运输事业又好又快发展。到2010年年底，全国公路通车总里程突破400万公里，从改革开放之初的世界第七位跃居第二位，其中高速公路通车里程达到7.4万公里，居世界第二位；公路货运量从世界第六位跃居第一位；内河通航里程、港口货物和集装箱吞吐量均居世界第一。交通运输事业的快速发展不仅在应对国际金融危机、保持经济平稳较快发展等方面发挥了重要作用，而且为改善民生、促进社会和谐作出了积极贡献。

长期以来，部党组始终把科技创新作为推进交通运输发展的重要动力，坚持科技工作面向交通运输发展主战场，加大科技投入，强化科技管理，推进产学研相结合，开展重大科技研发和创新能力建设，取得了显著成效。通过广大科技工作者的不懈努力，在多年冻土、沙漠等特殊地质地区公路建设技术，特大跨径桥梁建设技术，特长隧道建设技术和深水航道整治技术等方面取得重大突破和创新，获得了一系列具有国际领先水平的重大科技成果，显著提升了行业自主创新能力，有力支撑了重大工程建设，培养和造就了一批高素质的科技人才，为发展现代交通运输业奠定了坚实基础。同时，部积极探索科技成果推广的新途径，通过实施科技示范工程，开展材料节约与循环利用专项行动计划，发布科技成果推广目录等多种方式，推动了科技成果更多更快地向现实生产力转化，营造了交通运输发展主动依靠科技创新，科技创新更加贴近交通运输发展的良好氛围。

组织出版《交通运输建设科技丛书》，是深入实施科技强交战略，加大科技成果推广应用的又一重要举措。该丛书共分为公路基础设施建设与养护、水运基础设施建设与养护、安全与应急保障、运输服务和绿色交通等领域，将汇集交通运输建设科技项目研究形成的具有较高学术和应用价值的优秀专著。丛书的逐年出版和不断丰富，将有助于集中展示交通运输建设重大科技成果，传承科技创新文化，体现交通运输行业科技人员的智慧，促进高层次的技术交流、学术传播和专业人才培养，并逐渐成为科技成果转化的重要载体。

“十二五”期是加快转变发展方式、发展现代交通运输业的关键时期。深

入实施科技强交战略，是一项关系全局的基础性、引领性工程。希望广大交通运输科技工作者进一步增强做好交通运输科技工作的责任感和紧迫感，团结一致，协力攻坚，努力开创交通运输科技工作新局面，为交通运输全面、协调和可持续发展作出新的更大贡献！

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '高' (Gao), '宏' (Hong), and '峰' (Feng), which together mean 'Gao Hong'.

2011 年 12 月 6 日

前 言

长江是我国唯一一条贯穿东、中、西部的水路交通要道，在西部大开发、中部崛起和东部率先发展这三大战略的实施中具有举足轻重的作用。

长江干线航道长达 2 838km，长江经济带区别于其他地区的最大优势就是拥有长江黄金水道，长江水系通航里程占全国内河通航里程近 70%，通过各大通航支流和京杭大运河连接南北各地，构成了全国最大的内河航运网络。尽管随着工业化的深入，铁路、公路、航空等其他运输方式改变了长江水运传统的垄断地位，但并没有改变长江水运低成本、大运量、低能耗、低污染的独特优势。

三峡工程建设前，川江单向年运输量只有 1 000 万 t，三峡工程结束了“自古川江不夜航”的历史。2011 年 9 月 10 日，三峡蓄水位达到 175m，使川江航运条件得到根本改善，三峡大坝到重庆 600 多公里的江段变成 1 000 多平方公里的巨大水库，枯水期下泄流量可达 $5\,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上，比天然情况下增加至少 $2\,000\text{m}^3/\text{s}$ ，可使中游航道水深平均增加约 0.5m，同时还可提高长江支流的通航能力。2011 年三峡、葛洲坝船闸货运量双双过亿吨，但由于三峡—葛洲坝两坝间峡谷河道汛期大流量时具有“天然河道”特性，流速和比降大，流态极为紊乱，船舶航行条件险恶，通航安全问题突出，成为长江黄金水道水运的“瓶颈”河段，亟待进行深水急流滩、险滩航道整治，提高通过能力。

山区自然河流碍航滩险从工程角度可以分为急流滩和险滩两大类，河道急流滩常见的流态为剪刀水、跌水等，险滩常见的流态为回流和泡漩水等。关于自然河流急险滩整治的研究，国外开展的较少；国内针对某一具体滩险的整治研究成果较多，系统研究专著有 1975 年出版的《山区航道整治》和 1997 年出版的《川江航道整治》，两本专著对新中国成立以来我国山区航道整治技术与经验进行了系统总结；2001 年交通部西部交通建设科技项目“山区河流航道整治关键技术研究”全面总结了山区河流急险滩航道整治的成功经验，获得了丰硕的研究成果，成功解决了依托工程中的航道治理技术难题。

本书中所定义的“深水急险滩”与山区自然河流属性下的急险滩相比较，无论是航道边界条件、碍航特征，还是整治技术，均有着极大的差别，传统意义上的急险滩航道整治技术已不适用于两坝间深水急险滩航道整治。本书以长

江三峡—葛洲坝两坝间 38km 峡谷河道为研究对象，在交通部西部交通建设科技项目“三峡两坝间大流量复杂水流下航运安全关键技术研究”成果的基础上编写而成，比较系统和全面地研究了该河段河道形态特征和水力特性，解析了滩险碍航的根本原因，创新性地提出滩险分类方法、整治原则和整治工程方案。

随着我国西部山区通航河流渠化的广泛推进，绝大多数通航河流的自然属性弱化，“两坝间河道”特征凸现，为研究成果的推广应用提供了空间。

本书共分 9 章：第 1 章介绍了山区自然河流急险滩航道整治研究成果、两坝间深水急险滩整治面临的问题与整治思路，由郝品正执笔；第 2 章介绍了三峡、葛洲坝枢纽及运行调度概况，分析两坝间航运现状及存在的问题，由陈冬元、郝品正执笔；第 3 章分析了两坝间河道形态基本特征，由郝品正执笔；第 4 章在实测资料分析及全河段二维、三维水流数学模型模拟的基础上，分析了河道水力特征，由冯小香执笔；第 5 章从不同角度对两坝间滩险进行分类，剖析碍航特征，提出针对性整治原则，由郝品正执笔；第 6、7 章分别对典型急流滩水田角、典型险滩石牌弯道航道整治技术方案及整治效果进行分析，由冯小香、郝品正执笔；第 8 章就两坝间航道系统整治问题提出初步方案，旨在解决长江黄金水道两坝间的“瓶颈”问题，由郝品正、冯小香、陈冬元执笔；第 9 章对两坝间河道特征和水力特性以及深水急险滩航道整治技术等总结，由郝品正执笔。

三峡—葛洲坝两坝间河道复杂，航道整治难度极大，涉及面广，限于作者水平，书中难免有欠妥和不当之处，希望读者批评指正。

作者

2013 年 2 月 26 日

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 引言	001
1.2 天然河流急险滩整治	002
1.3 两坝间航道整治	008
1.4 研究方法与思路	012
第 2 章 三峡—葛洲坝两坝间航运现状	013
2.1 三峡枢纽运行调度概况	013
2.2 葛洲坝枢纽运行调度概况	017
2.3 两坝间船舶航行规则	021
2.4 两坝间大流量下船舶限制性通航规定	023
2.5 两坝间通航设施	024
2.6 两坝间通航存在的问题	025
第 3 章 河道形态特征	029
3.1 河道平面形态特征	029
3.2 河道剖面形态特征	034
3.3 河道断面形态特征	034
第 4 章 河道水力特征模拟与分析	042
4.1 模型建立与验证	042
4.2 恒定流水力特征分析	044
4.3 非恒定流水力特征分析	065
4.4 小结	081
第 5 章 滩险碍航特征及整治原则	082
5.1 重点滩险河段碍航特征	082
5.2 滩险分类与整治原则	088
第 6 章 典型急流滩（水田角）航道整治研究	090
6.1 自然条件	090
6.2 三维水流结构模拟	094
6.3 航道整治工程方案及效果分析	106
第 7 章 典型险滩（石碑弯道）航道整治研究	109
7.1 自然条件	109
7.2 整治原则与工程方案	115

7.3	修建整治建筑物方案试验及效果分析	115
7.4	河床炸礁抛填方案试验及效果分析	119
7.5	推荐整治工程措施与方案	125
第8章	两坝间航道系统整治	126
8.1	航道系统整治目标	126
8.2	航道系统整治方案及效果	126
8.3	航道系统整治非工程对策	143
第9章	结语	146
9.1	河性与成滩原因	146
9.2	河道水力特征	146
9.3	滩险分类与航道整治原则	148
9.4	航道整治思路与方案	148
参考文献		150
索引		152

第1章 绪论

1.1 引言

长江是我国第一大河,素有“黄金水道”之称,是贯通我国东西的水上运输主通道,对沟通我国资源丰富的西南腹地和华中地区及经济繁荣的华东地区交通起着重要的作用,在我国经济发展和西部大开发中具有十分重要的地位和作用。已建的葛洲坝和三峡水利枢纽工程渠化了重庆以下的川江航道,航道通过能力大大提高,对长江航运起到了巨大的作用。

1994年12月14日三峡工程正式开工,总工期17年。1998年5月1日,三峡临时船闸正式通航;2003年6月大坝蓄水至135m,三峡船闸开始试通航,同年7月10日第一台发电机组并网发电(机组总数26台,单机70万kW);2004年7月8日三峡船闸正式通航;2006年9月20日,三峡枢纽蓄水至156m水位,由围堰发电期转入初期运行期;2009年三期工程全部建成,9月15日启动试验性蓄水,起蓄水位为145m;2011年9月10日三峡蓄水位达到175m,三峡大坝到重庆600多公里的江段变成1000多平方公里的巨大水库,使重庆到三峡大坝的航道条件得到彻底改善。但由于三峡—葛洲坝两坝间峡谷河道汛期大流量时具有“天然河道”特性,流速、比降大,流态极为紊乱,船舶航行条件险恶,通航安全问题突出,成为长江黄金水道的“瓶颈”河段,亟待进行急流滩、航道整治,提高航道通过能力,从而整体改善长江流域水上运输网络。

三峡—葛洲坝两坝间38km航道处于川江航运的咽喉地段,在中、枯水条件下,通过两坝的联合调度,两坝间通航条件较好,而在汛期特别是在 $30\,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上大流量下,枢纽对流量的调节能力减弱。由于两坝间河道狭窄,水流不畅、流速急、流态紊乱,通航条件和航运安全与三峡库区不相适应,直接关系到船舶通航保证率和三峡工程航运效益的发挥。

本书中所定义的“深水急险滩”与山区自然河流属性下的急险滩相比较,无论是航道边界条件、碍航特征,还是整治技术,均有着极大的差别,传统意义上的急险滩航道整治技术已不适用于两坝间深水急险滩航道整治。

本书以长江三峡—葛洲坝两坝间38km峡谷河道为研究对象,借鉴山区自然河流急险滩整治经验,在交通部西部交通建设科技项目“三峡两坝间大流量复杂水流下航运安全关键技术研究”成果^[1]的基础上编写而成,比较系统和全面地研究了该河段河道形态特征和水力特性,解析了滩险碍航的根本原因,创新性地提出滩险分类方法、整治原则和实用的整治工程方案。随着我国西部山区通航河流渠化的广泛推进,绝大多数通航河流的自然属性弱化,“两坝间河道”特征凸现,本书的研究成果将具有广泛的推广应用空间。

1.2 天然河流急险滩整治^[2-7]

山区河流平面形态极为复杂,河道走向与河道平面形态受流经的山体地形和地质构造、岩性制约,在两岸山体岩石抗冲性较强的区域常发展成峡谷河段,在两岸山体岩石抗冲性较弱区域常发展成宽谷河段,沿程多呈峡谷段和开阔段相间分布,且常伴有急弯河谷。峡谷河段槽窄水深,中、洪水水位时水势险恶;宽谷河段谷身开阔,河床宽浅,两岸常有台地,河中常有边滩、江心洲。

山区河流两岸常有岩嘴、石梁等伸入河中,导致岸线极不规则,河面突宽突窄。在石嘴或乱石堆体伸入河床处,河面骤然缩窄,形成卡口;在支流汇入口处易形成冲积扇。山区河流纵向河底高低起伏,沿流程水深分布极不均匀,深槽水深可达几米甚至几十米,浅滩水深不足而成为碍航浅滩。

山区河流常因地质、地貌原因产生复杂水流,复杂水流的碍航常随着流量的加大而加剧,对船舶航行危害很大。主要碍航流态如下。

(1) 剪刀水

当河道两岸有突出的礁石、山体或河道断面突然缩窄时,其挑流作用会将水流逐渐向下游河中心收缩,断面流速分布在平面上呈V形,近岸流速小,河中心流速较大,称为剪刀水,剪刀水两侧常伴有回流。剪刀水的产生是水流和两岸地形、地物、地貌相互作用的结果,两岸地物突出越明显,水流流速越大,剪刀水越明显。下行船舶只能顺主流行驶,可能会由于舵效差而使船舶偏离航线造成危险;上行船舶可能会因动力不足而无法自航上滩。另外,剪刀水还常伴生跌水、激浪等不良流态,对船舶的安全航行造成严重威胁。

(2) 跌水

水流由水位较高处陡然跌落至下游,其间水面和河底坡度变化很大的水流流态称之为跌水。因像水流流过门槛一样,所以又称“门槛水”。跌水与水力学中“水跃”的形态有其相似之处,沿程比降变化均很剧烈,但定义不完全一致。水跃为缓流向急流过渡的局部水力现象,在水力学中有着严格的定量关系,而跌水只是一种定性的水力现象描述。滩口断面的水流可能还达不到水力学中的急流(水流的弗汝德数大于1)状态,但为了描述滩上水流坡陡流急,可定性地称之为跌水。

剪刀水是滩段地形以纵向收缩为主的急流滩的主要流态,而跌水是特殊地形对水流作用的结果,产生的主要原因是河底纵坡的突然变陡和较低的下游水位。河底纵坡变化越大,滩口水面出现落差越大,跌水将越明显。跌水急流滩上游一般水面比降较小,甚至还会出现壅水,但过滩口后,水面比降急剧下降,流速很大,其后激起阵阵浪花。如果水流经过卡口后进入突然放宽的河段,滩上、下水位落差很大,则剪刀水也会表现出跌水的主要特征。

(3) 回流

回流是山区河流常见的一种流态,属于竖轴旋流,一般在河道平面形态突缩的上游和突扩的下游近岸侧水域产生。回流强度弱时对航行影响不大,但强度大和范围广的回流会严重影响船舶航行安全,船舶误入后会有触礁、碰岸的危险。

(4) 泡漩水

当流速很大的水流遇到水下障碍物的阻拦时,会形成强烈的底部上升水流涌出水面,称为泡水,泡水中心的压力大于四周水域,所以泡心处水面向上隆起,水流向四周呈辐射状滚出,形似泡花;泡花下潜水流与四周缓流之间的摩擦形成下凹形漩流,称为漩水,漩水的中心旋转速度大于边缘的旋转速度,漩水随着水流逐渐向下游移动,其旋转速度、旋转面积和凹面逐渐减弱,直至消失。泡水和漩水是同生水流流态,合称为泡漩水,泡漩水是水流动能转换成位能出现的流态现象。当船舶行经泡漩水区时,由于受到扩散力的横向作用而偏离航线,严重时会造成船舶倾覆。

(5) 滑梁水

水流漫过水下石梁、石盘或潜坝的顶部,流向水位较低一侧的水流流态称滑梁水。梁上水深常常不满足航道设计水深要求,局部水面比降较大,船舶航行不慎,容易被横向水流推至梁上发生触礁危险,当可航水域较狭窄时,发生事故的危險则更大。

(6) 扫弯水

在弯曲河段上,由于纵向水流受到离心力的作用,表层水体向凹岸流动,导致凹岸水面升高,凸岸水面降低。在水流压力作用下,形成贴岸而下的斜流,称为扫弯水。水流离心力与水流质量、流速的平方成正比,与河道弯曲半径成反比,弯曲半径越小,斜流就越大。在航道弯曲半径小、河面狭窄的河段,扫弯水对下行的船舶危害较大,船舶容易扫弯触礁。

存在上述碍航流态的滩险,从工程角度可以将滩险分为急流滩和险滩两大类,河道急流常见的不良流态有剪刀水、跌水等,险滩常见的不良流态有回流和泡漩水等。

1.2.1 急流滩水力特性及整治措施

1) 急流滩水力特性

山区河流石质或卵石急流滩的沿程分布取决于河流沿程地质地貌,具体到每一个滩,急流碍航水流的形成主要与滩段的地形条件有关。

国内关于急流滩水力特性较为系统的研究有《山区航道整治》^[2](1975年出版)和《川江航道整治》^[3](1998年出版)。《山区航道整治》对新中国成立以来我国山区航道整治技术进行了系统总结,分析了流态对船舶航行安全的影响,认为急流滩的成因是河床泄水断面受两岸地形地物的影响;《川江航道整治》是针对川江的航道整治经验的总结,将急流滩分为三个特征河段:缓流段、急流段和乱流段,认为基岩、河道堆积物是形成急流滩的基本成因。目前,对急流滩的水力特性研究多停留在定性描述阶段,对滩段的水面形态、沿



程比降与水流速度的变化规律没有深入研究。有些学者在研究某个具体急流滩整治时,对急流滩的水力特性有所涉及,但没有较为系统的研究成果。

曹民雄^[4]采用水槽模型试验研究方法,对滩段地形进行了1:50正态概化,通过在35m×3m×0.6m(长×宽×高)试验水槽内进行四组概化滩段的试验,研究了滩段流速、水位的变化规律,分析了影响滩情的主要因素和主要流态与碍航情况,较为全面地研究了急流滩水力特性的三维性质,论证了滩段水面形态、流速平面分布与滩段地形的相互关系。研究认为:滩段上游水面一般平静,水位变化平缓,流速沿程变化不大;当水流流近滩段进口段时,流速沿程增加,水位急剧降落;经过滩口断面后,主流集中在河中心,两岸突嘴后有回流伴随于主流两侧,主流流速沿程增加,水位也继续下降,经过一段距离后,流速达到最大,水面降至最低;其后出现水面倒比降、流速减缓;滩段的水面形态与流速平面分布相对应,滩段进口段上游水面基本呈平面形态,进口段水面形态仍较平缓,水流冲过滩口后,水面呈抛物面形态,主流在河中的位置受两岸突嘴伸入江中的程度和滩口段的突嘴岸壁挑流角度的影响;急流滩的滩情主要表现为滩口段水面陡比降的大小、滩口下游水流的最大流速值以及滩段流态的险恶程度,影响滩情的首要因素是滩口断面过水面积的减小程度;急流滩的主要流态有剪刀水和跌水,产生的主要原因分别是滩口断面的平面收缩和垂向收缩;急流滩往往还伴随着一些其他流态,如剪刀水两侧常伴有回流或泡漩水,其下有卷浪或波状水跃;如果两岸的相对突出宽度不同,剪刀水将伴随着横流而呈现“斜流”,如溢过石梁或暗礁斜交主流时,跌水将表现为滑梁水。

2) 急流滩整治措施

关于急流滩整治措施,《山区航道整治》中提出的基本方法有:扩大泄水断面、将对口滩改为错口滩、潜坝壅水减缓急流、在石盘上开挖航槽等;《川江航道整治》提出的基本方法有:扩大泄水断面、构成错口滩型、拓宽缓流航道等;《航道整治工程技术规范》(JTJ 312—2003)^[7]按基岩、溪口、崩岩滑坡、卵石、分汊型等急流滩的不同类型,提出了不同的工程措施与方法,主要有扩大断面法、筑坝拦石、疏浚等措施。

2005年,曹民雄的博士论文《山区河流急流滩险航道整治技术研究》^[4],在对急流滩险航道整治设计与建设中相关研究成果评述的基础上,研究了山区河流急流滩险整治的相关技术问题。根据水槽试验,分析了急流滩碍航情况和水力特性的三维性质,论证了滩段水面形态、流速平面分布与滩段地形的相互关系,并提出了滩段局部阻力系数的计算公式;通过遥控自航船模上滩试验,研究了船舶上滩的影响因素及动水特性,得到了船舶上滩航行对周围流场及比降的影响规律,为急流滩整治中常用的整治措施找到了理论根据;对兹万科夫船舶阻力计算方法进行修正,能很好地反映出浅水和狭水道对船舶阻力的影响,并推广应用于水面倒比降滩段的阻力计算;提出了一种新的消滩水力指标确定方法,可以计算不同船型条件下的消滩水力指标;较为系统地归纳了急流滩险的整治原则与方法。

1.2.2 险滩水力特性及整治措施

1) 泡漩水水力特性

泡水是一种由水底向水面翻涌、犹如锅内开水沸腾的水流，亦称上升流。漩水是环形水流的一种，相似于回流，但与回流有区别，漩水的中心旋转速度大于边缘旋转速度，漩水中心凹陷，形似涡状，故又名漩涡。泡水是高速水流在其流动过程中，受到障碍物阻挡而产生的高压水流，在冲破水面时所表现出的水面形态。当河底有凸起的礁石或陡壁时，急流受阻后，部分动能转变为位能，是较大流速的水流产生能量转换的一种形式。形成泡水的基本因素有流速、水深和河床形态。

一般来说泡水和漩水常相伴而生，故称泡漩水。

在泡漩水区域内，底流速大，面流速小，最大流速值与最小流速值相差在 2.5 倍以上，从远离泡水区到进入泡水区，各层水体流速变化的总趋势是：中、上层水体流速由大到小，底层流速由小到大，故底流受阻后较大的动能迅即积聚、转换、爆发为位能，故泡水的涌浪压力较大。

有关泡漩水的研究，国外相关资料很少，国内有关这方面的研究也不多，且都停留在初步摸索阶段。

(1) 长江水利水电科学研究院的研究^[8]

为了解决葛洲坝工程南津关河段航道的泡漩碍航问题，配合整体模型和现场观测调查研究，1973 年长江水利水电科学研究院进行了水槽试验，进一步研究泡漩水的成因及相似性问题，得出有关泡漩水的主要定性结论如下。

①边界条件的影响。平底水槽和水槽底坎的高度不高时，未有泡漩水产生；当底坎达到一定高度后，并且不断增大其阻水面积，才有泡漩水出现，将陡坎改为较缓的反坡时，泡漩水随之消失；在岸边突嘴边界条件下，当流量、水深、流速及岸边突嘴与河底突出物的阻水面积均相同时，岸边突嘴所产生的泡漩水远远大于河底突出物产生的泡漩，并且这种泡漩不仅强度大，频率高，而且范围广。

②水力条件的影响。泡水的成因可能是由于回流区流速低、位能高，主流区流速高、位能低，扩散的主流便由底部进入回流再涌出水面，从而形成泡水。

③涌速与水深的关系。当流量固定不变时，泡水的涌速随水深的增加而呈直线递减。

④关于泡漩水流的相似性。保证弗汝德数 Fr 相同，得出泡漩水流的主要特性——涌速和流态符合重力相似准则。

(2) 张秀芳等的研究^[9]

针对顺直河段深沱孤礁地形产生的泡漩水进行了 32 组概化模型试验。通过试验和理论分析，找出了深沱孤礁地形泡漩水产生的条件，分析了这种地形泡漩水产生的原因以及影响泡水强度的主要因素，并对各因素进行相关分析，得出了泡水高度与各因素之间的量化关系式。



①影响泡漩水强弱主要的因素有水面比降、流速、水深及孤礁的阻水宽度等。当流量和孤礁阻水宽度一定时,水面比降越大,泡水高度越高,泡水的个数越多,泡水出现的频率越高,漩涡速度越快,泡漩越强。随着水面比降的减小,泡漩随之减弱甚至消失。其他条件不变时,随着流量的加大,泡水不仅范围增大,且泡水高度增加,发泡个数增多。几个因素中,比降和流量的变化对泡水强度的影响更加明显。试验结果表明,深沱的上下游坡角及水槽的底坡对泡水强度(泡高)的影响不大。

②当产生泡漩水的边界条件一定,即礁石的阻水宽度不变时,泡漩水的出现及其强弱取决于水流的水力条件。

a. 泡漩出现时的临界水力条件。当边界条件一定时,泡漩水的出现取决于水面比降、流速和水深。试验表明:当礁石的阻水宽度、流量一定,出现微弱泡漩时,减小水面比降,增加水深,泡水会逐渐减弱直到消失;当比降、流量一定时,孤礁的阻水宽度越小,出现泡漩水的临界值越大,阻水宽度越大,临界值越小。

b. 泡漩水强弱与水力条件的关系。当孤礁的阻水宽度一定时,泡漩水的强度受来流条件影响明显。水深相同的情况下,流速越大,泡漩水越强;流量相同的情况下,水深不同,泡漩水的强度不一样。这说明流速、水深对泡漩水强度(泡高 h)的影响不可忽视。

c. 泡高计算经验公式。试验结果分析表明,泡高的相对值 h/R 与雷诺数 Re 、水面比降 J 以及孤礁阻水的相对宽度 L/B 有关。经过试验数据多元线性回归分析,得出泡高的表达式为

$$h/R = e^{-24.29} Re^{1.53} J^{0.17} (L/B)^{0.064}$$

2) 泡漩水整治措施

我国山区河流众多,而大部分山区河流的通航能力还很低。泡漩水险滩是山区河流中主要碍航险滩类型之一,到目前为止,我国对泡漩水险滩的整治主要采取现场观察、工程实践和河工模型试验相结合的办法。对泡漩水险滩整治始于20世纪50年代,常采用切除突嘴、平整河床、采用整治建筑物等方法,调整水流结构和流向。

(1) 卢汉才等人的研究^[10]

卢汉才等根据泡漩水形成机理,提出了泡漩水险滩整治方法,主要是炸除突嘴、清理河床、平顺岸线,或布置整治建筑物调整水流流向和流速分布,消除形成水流能量转换的各种因素,并根据对川江、乌江、西江、红水河等15个泡漩水险滩的分析,整治方法归纳为以下三种。

①改变河床边界条件以改善碍航水流流态。具体措施有炸除突嘴、清理河床、平顺岸线。例如乌江的七里滩河道比较顺直,形成泡漩水的原因是两岸有交错突嘴,在炸除突嘴、切除挑流石盘后,泡水减小,达到通航标准要求。

②改变成泡水流动力条件以减泡移泡。具体措施有:凹岸建丁顺坝,调整成泡水流方向,这种措施在航道宽度较大的河段实施较为有效。例如川江的折桅子滩,在突嘴上游凹

岸建丁顺坝后,急水流挑离凸嘴,泡水消减并下移至航道外;在凸嘴上游深槽建潜坝扩散成泡的底流,减小成泡水流冲击力,达到减泡移泡目的。例如川江的钓鱼嘴险滩和雨丘石险滩,因航道较窄,在凸嘴上游建丁坝后,建坝段航槽流速增大,形成碍航新滩,建潜坝后,底流扩散,泡水强度减小,泡水移至航槽外,达到安全航行目的。

③改变成泡边界条件的同时,改变成泡水流动力条件。具体措施有:a.扩散剪刀水,调整流速分布。一些峡口河段,峡内两岸突嘴且河床纵向变化大,出口段有较大的反向纵坡,因突嘴剪刀水压缩面流下潜,较大的底流遇到反坡则急亟上升形成泡漩水。因此切除上游突嘴及反坡附近岸边石梁,改变上边界条件,面流增大,则底流减小,因而泡强减小,达到整治目的。南津关泡水险滩就是采取这种整治措施获得成功的。b.洲头建坝,拦截横流、拓宽主流。有一些卵石或沙卵石洲,副槽浅窄,不能通航,在中、枯水期水流从副槽一侧绕过洲头进入主航槽,横流极大,而且横流冲向对岸有礁石的航槽边沿,形成碍航泡漩水。对于这种水流特点,建洲头坝,拦截横流,即调整边界条件(洲头上延),同时改变水流方向达到改善航行水流条件的目的。川江的瓦窑滩等就是采取这种整治措施获得成功。

(2) 李旺生等人的研究^[11]

李旺生等按产生泡漩水的水流条件和边界条件,将泡漩水分为孤礁型、凹岸突嘴型、凸岸突嘴型、交错突嘴型、品字形突嘴型、峡(狭)口放宽型、卡口兼突嘴交错型等不同类型,通过整治实例对不同类型的泡漩水滩提出了相应的整治措施。

3) 回流险滩水力特性及整治措施

回流是河道常见的一种流态,当回流达到一定的范围和强度时,就形成回流碍航险滩。回流的旋转速度小、面积大,中心水面不做起伏运动,在同一水位下,平面上的位置大都保持常态不变。

关于回流水力特性的研究,目前国内外学者绝大多数都将精力集中在由河道整治建筑物——丁坝而派生出来的回流水力特性研究,其研究成果浩如烟海^[12-13]。研究手段多采用水槽试验方法,从而得出丁坝局部一维、二维、三维流场(主要是回流)的描述。这种研究有一定工程意义,但对于天然河流回流碍航险滩水力特性及其整治工程措施的研究,几乎为空白。

1.2.3 小结

山区天然河流多为非冲积性河流,其平面、剖面、断面形态复杂,受制于所流经区域的山体地形、地质构造和岩性。平面上多为蜿蜒曲折且峡谷和开阔段相间分布,两岸常有岩嘴、石梁等伸入河中,导致岸线极不规则,河面突扩突缩;河床剖面跌宕起伏,沿流程水深分布极不均匀;断面上则表现为岸壁陡峻,断面形态不规则。因此,山区天然河流常常滩险密布。山区天然河流由复杂河谷、河床形态和暴涨暴落的径流过程而派生出复杂的水流流态,很少有不加整治就能满足船舶通航条件的山区河流。