

◀ 国家内河航道整治工程技术研究中心系列成果 ▶

山区河流水沙 运动规律及航道整治技术研究

SHANQU HELIU SHUISHA
YUNDONG GUIULÜ JI HANGDAO ZHENGZHI JISHU YANJIU

杨胜发 高凯春 等 著



科学出版社

国家内河航道整治工程技术研究中心系列成果

山区河流水沙运动规律 及航道整治技术研究

杨胜发 高凯春 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书围绕山区河流航道治理的基本理论和复杂滩险治理应用,主要开展了以下研究工作:①山区河流水流基本特性及规律研究;②山区河流泥沙基本特性及规律的探讨研究;③山区河流航道岸坡稳定研究;④山区河流复杂滩险治理技术的研究。并将相关研究成果在山区河流航道治理中进行了实际应用。

本书可供水利工程领域研究人员、工程技术人员、研究生等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

山区河流水沙运动规律及航道整治技术研究 / 杨胜发等著.
—北京: 科学出版社, 2014.12

ISBN 978-7-03-042516-4

I. ① 山… II. ① 杨… III. ① 山区河流-河流泥沙-泥沙运动-研究 ② 山区河流-航道整治-研究

IV. ① TV143 ② U617.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 268448 号

责任编辑: 杨 岭 朱小刚 / 封面设计: 墨创文化

责任校对: 贺江艳 / 责任印制: 余少力

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年12月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014年12月第一次印刷 印张: 24 3/4 插页: 8面

字数: 590千字

定价: 99.00元

前 言

内河航运是典型的资源节约、环境友好型绿色交通运输方式，具有运能大、能耗小、成本低、占地少、污染轻等明显优势。在当前交通拥堵、污染和能耗问题突出，以及土地资源、生态环境日益严重的情况下，内河航运发展越来越受到重视。我国内河航道通航里程位居世界第一，但内河航运开发利用却十分不足。

我国水能资源非常丰富，居世界首位，其中尤以西南山区河流最具代表性。在大力开发山区河流水电能源的同时，相应河段也得以渠化，给山区河流的航运带来了前所未有的机遇，但同时也伴随着新的问题。山区河流在天然情况下大都比降大、江面窄、滩多水急、航道条件差，为根本改变其航运条件，必须大力提高航道等级，行驶大吨位船舶，减少运输成本，提升竞争能力。

本书紧紧围绕山区河流航道治理中的实际需求，以基础理论为导向，以研究工程实际问题为核心，以解决工程实际应用需求为目标，将原型观测、理论分析、数值模拟、物模试验等多种研究手段相结合，对山区河流复杂滩险航道治理问题进行了比较全面、系统、深入的研究。

本书汇集了二十多名专业技术人员近十年的研究成果，其中部分成果取自“十二五”国家科技支撑计划课题——“三峡水库变动回水区末端段航道治理研究”（课题编号：2012BAB05B03），以及国家自然科学基金面上项目——“卵石沙波三维运动规律的实验研究”（项目批准号：50779082）。

书中各章节均独立编写，作者分工如下：

第1章由杨胜发、高凯春编写；

第2章由杨胜发、胡江、许光祥、童思陈、李文杰编写；

第3章由杨胜发、胡江、许光祥、童思陈、付旭辉编写；

第4章由许光祥、童思陈、杨胜发、胡江编写；

第5章由王俊杰、王平义、喻涛、黄颖编写；

第6章由胡小庆、罗宏、解中柱、刘勇编写。

本书仅是作者近年来对山区河流水沙运动规律及应用的初步总结，水平有限，不妥之处敬请指正。

作 者

2014年6月

目 录

第 1 章 总论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 研究的迫切性	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 存在的问题	5
1.2.1 山区河流开发中存在的问题	5
1.2.2 水流运动规律方面	5
1.2.3 泥沙运动规律方面	7
1.2.4 复杂滩险治理方面	8
1.3 研究技术路线	9
1.4 主要研究内容与成果	10
1.4.1 研究主要内容	10
1.4.2 主要研究成果	11
1.4.3 创新点	13
第 2 章 山区河流水流运动规律	14
2.1 基于动量交换模式的明渠湍流结构	14
2.1.1 实验过程及测量布置	15
2.1.2 流动的时均特性	16
2.1.3 高分辨率测量结果	19
2.1.4 低分辨率测量分析结果	25
2.1.5 明渠湍流结构	28
2.1.6 小结	33
2.2 库区大水深湍流涡尺度研究	34
2.2.1 湍流涡结构尺度研究方法	34
2.2.2 测量布置	36
2.2.3 实测流速数据降噪方法	38
2.2.4 大水深明渠湍流时均特性分析	43

2.2.5	大水深明渠湍流涡尺度分析	45
2.2.6	小结	59
2.3	非恒定流运动规律研究	60
2.3.1	实验布置	60
2.3.2	明渠非恒定流的传播特性	66
2.3.3	明渠非恒定流的阻力特性	91
2.4	库区波流运动规律研究	99
2.4.1	研究现状	99
2.4.2	西南山区通航河流库区适用的波浪理论	101
2.4.3	波浪传播与波要素变化	101
2.4.4	库区成浪特征	102
2.4.5	三峡库区波浪要素的计算	105
2.4.6	库区浪流的水动力分析研究	106
2.5	斜坡弯道水力特性	112
2.5.1	研究现状	112
2.5.2	河湾概化模型设计	113
2.5.3	弯道水流运动方程	117
2.5.4	弯道水面横比降及超高	118
2.5.5	弯道纵向流速的分布	123
2.5.6	弯道环流的计算与分析	125
第3章	卵砾石输移规律研究	131
3.1	卵砾石起动规律研究	131
3.1.1	水槽实验	132
3.1.2	其他研究者资料	134
3.1.3	与起动拖曳力公式和起动流速公式比较	134
3.1.4	卵砾石起动公式	138
3.1.5	小结	142
3.2	河湾坡岸泥沙研究	143
3.2.1	研究背景	143
3.2.2	研究现状	144
3.2.3	实验布置	145
3.2.4	河湾坡岸泥沙起动研究	145
3.2.5	河湾坡岸泥沙起动特性	154

3.2.6	河湾坡岸侵蚀机理与防护建议	167
3.3	卵石沙波运动规律研究	171
3.3.1	西南山区河流卵石的运动形态	171
3.3.2	卵石沙波运动规律实验布置	173
3.3.3	细沙沙波形态	173
3.2.4	卵石沙波形成过程	176
3.3.5	卵石沙波运动的不规则性	177
3.3.6	卵石沙波平整至逆行沙垄的判别标准	178
3.3.7	三维卵石沙波运动规律	185
3.3.8	小结	195
3.4	大比降卵砾石河流输沙率研究	196
3.4.1	水槽实验数据	197
3.4.2	寸滩推移质输沙率实测资料	200
3.4.3	卵石推移质输沙率成果分析	203
3.5	卵砾石河床沙波阻力研究	204
3.5.1	实验布置	206
3.5.2	实测资料	208
3.5.3	成果分析	209
第4章	山区航道整治通航指标研究	220
4.1	水力指标研究	220
4.1.1	研究船型的选择	220
4.1.2	航行阻力计算与研究	220
4.1.3	澜沧江 300 t 级船舶上滩水力指标研究	234
4.1.4	长江上游 1000 t 级船舶上滩水力指标研究	255
4.1.5	长江三峡库区 3000 t 级船舶上滩水力指标研究	258
4.2	水库下游非恒定流条件下设计水位的研究	261
4.2.1	非恒定流条件下设计水位的计算方法	261
4.2.2	非恒定流条件下河道糙率的确定方法	264
4.2.3	澜沧江景洪—关累河段航道设计水位的计算	266
4.2.4	金沙江向家坝电站下游河段设计水位的确定	270
4.3	卵石航槽稳定判别技术	275
4.3.1	技术背景	275
4.3.2	研究情况	276

4.3.3 卵石航槽稳定的判别	279
第5章 航道整治建筑物新型结构研究	282
5.1 岸坡稳定技术	282
5.1.1 岸坡失稳机理	282
5.1.2 岸坡稳定技术	291
5.2 航道整治建筑物稳定性及新结构研究	316
5.2.1 恒定流作用下丁坝附近紊动特性及水毁机理	316
5.2.2 非恒定流作用下丁坝附近水流特性及水毁机理	342
5.2.3 航道整治建筑物新结构研究	348
5.2.4 航道整治建筑物水毁监测及修复措施研究	350
第6章 复杂滩险航道治理技术及应用	361
6.1 复杂滩险航道治理技术	361
6.2 应用实例	363
6.2.1 三峡水库 156 m 蓄水前涪陵至铜锣峡河段航道整治炸礁工程	363
6.2.2 长江干线泸渝段航道建设工程	366
6.2.3 长江上游宜宾合江门至泸州纳溪航道建设工程	371
6.2.4 乌江河口至白马河段航道建设工程	377
6.2.5 长江三峡水库铜锣峡至娄溪沟河段航道炸礁工程	379
6.2.6 澜沧江航道整治工程	381
彩色图版	387

第 1 章 总 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究的迫切性

内河航运是典型的资源节约、环境友好型绿色交通运输方式，具有运能大、能耗小、成本低、占地少、污染轻等明显优势。在当前交通拥堵、污染和能耗问题突出，以及土地资源减少、生态环境恶化日益严重的情况下，内河航运发展越来越受到重视。

我国内河航道通航里程位居世界第一，但内河航运开发利用却十分不足。我国内河航道里程 12.3 万公里，仅占河流总长的 29%。我国内河千吨级以上航道的里程占总航道里程的 7%，而美国达到 61%，德国更达到 70%。

美国密西西比河、俄罗斯伏尔加河、欧洲莱茵河水系是国外流域综合开发比较成功的三大水系。我国的长江水系与这三大水系相比具有显著的差异(表 1-1-1)，在内河航道整治工程建设中也会遇到不同的技术问题，可借鉴的技术较少。这两者的主要差别体现在三个方面。

表 1-1-1 国内外内河航道整治工程建设现状

国家 (地区)	河流	通航长度 /km	河流类型	大规模开发 时期	开发方案	现状
美国	密西西比河	3766	平原河流 为主	1920~1960 年	防洪、航运为主，兼 顾水电、灌溉、水产	航道高等级、网络化、 标准化已建成 美国正实施水运高速 走廊建设，欧洲正实施 水运设施功能提升计划
欧洲	莱茵河	886	平原河流 为主	1920~1960 年	航运为主，兼顾防 洪、灌溉、发电	
俄罗斯	伏尔加河	3000	平原河流 为主	1930~1960 年	发电为主，把航运 放在重要位置	
中国	长江	2938	山区河流占 60%，平原 河流占 40%	1993~2020 年 (规划)	防洪、发电和航运 综合考虑	实施跨越式发展战略， 同步开展大规模内河开 发和水运现代化建设

1)大规模开发时期不同

密西西比河、莱茵河和伏尔加河水系的大规模开发时期是 1920~1960 年，开发特点是上游梯级渠化，建坝必建船闸，干流航道延伸，全线航道贯通，航道等级较高，干支航道联网。1960 年至今，是内河航道现代化发展阶段，主要体现在综合开发水资源，开辟运河，建设高等级内河航道。

我国内河航道整治大规模开发是从 1994 年以三峡工程正式开工为标志开始的,按照交通运输部《公路水路交通中长期科技发展规划纲要(2006—2020 年)》,“在水资源较为丰富的长江水系、珠江水系、京杭运河与淮河水系、黑龙江和松辽水系及其他水系,形成长江干线、西江航运干线、京杭运河、长江三角洲高等级航道网、珠江三角洲高等级航道网、18 条主要干支流高等级航道”。我国内河航道目前正处于大规模开发时期,与密西西比河水系开发时期(1930~1940 年)相比,落后 80 年左右。

2) 河流特点和开发方案不同

密西西比河、莱茵河和伏尔加河水系的通航河段主要是平原河流,落差较小。长江水系通航河段的落差较大,有 60% 属于山区河流,40% 属于平原河流。

美国在开发和治理密西西比河水系时,以防洪为主,把航运放在重要地位,兼顾水电、灌溉、水产、旅游和环保等行业发展需求。俄罗斯则以发电为主,把航运放在重要位置。德国把航运放在河流开发的首位,兼顾防洪、灌溉、发电等其他效益。法国确定和实施了“航运第一、发电第二、灌溉第三”的罗纳河综合开发方案。荷兰将防洪与航运并重。各国情况不同,但在河流的综合开发中都十分重视发展航运。

长江水系开发方案综合考虑防洪、发电和航运,其中长江中下游以防洪、航运为主,长江上游以发电和航运为主。

3) 航道整治工程建设的阶段不同

密西西比河、莱茵河和伏尔加河经过一百年左右的建设,航道高等级、网络化、标准化已建成。目前美国正在实施沿海和内地水运高速走廊建设,2010 年动工兴建的高速水运走廊工程项目有 14 项之多。欧盟国家正在实施水运设施功能提升计划,进一步提升莱茵河、多瑙河、塞纳河、罗纳河和奥得河等欧洲内河航道网络基础设施的功能。

目前,我国内河水运建设已进入快速发展阶段,未来 10~20 年也将是我国大规模治理河流的重要时期,内河水运必须抓住机遇,实施跨越式发展战略,内河航道大规模建设与现代化发展同步进行。在大规模渠化工程和航道高等级、网络化、标准化的建设过程中,会遇到连续滩险整治、碍航卵石沙波治理等关键技术问题。

1.1.2 研究意义

交通运输部《公路水路交通中长期科技发展规划纲要(2006—2020 年)》提出:“到 2020 年,港口总通过能力将达 65 亿吨左右,其中码头集装箱通过能力约 2.4 亿标准箱(TEU);五级以上航道里程将达到 35000 公里以上,其中三级以上航道 15000 公里。”按照交通运输部的规划要求,目前三级以上的航道里程完成了 52%,还需建设 7822 公里,五级以上的航道里程完成了 70%,还需建设 10649 公里。

《国务院关于加快长江等内河水运发展的意见》(国发[2011]2 号)提出,加快长江等内河水运发展有利于构建现代综合运输体系、调整优化沿江沿河地区产业布局、促进区域经济协调发展、促进节能减排。我国进入了内河航运大规模开发时期。内河水运在能源、原材料等大宗物资和集装箱、重大装备运输中具有独特优势,加快发展内河水运有利于推动电力、钢铁、汽车等沿江沿河产业带的发展,推动东部地区产业升级和中西

部地区承接产业转移,优化流域经济布局和产业结构。利用10年左右的时间,建成畅通、高效、平安、绿色的现代化内河水运体系,运输效率和节能减排能力显著提高,水运优势与潜力得到充分发挥。

西部大开发是我国的一项重要战略举措,其中有很多老少边穷的地方亟待开发建设。西部地区尤其西南地区的地理条件较复杂,陆路交通总体环境差、等级低、运能小、造价高;该地区的内河航道主要由山区河流构成,由长江水系、珠江水系和一部分国际河流组成,但由于历史的原因,水运优势也远远没有发挥出来。而西南地区的优势交通资源就是山区河流的内河航运。为进一步实施和推进西部大开发战略,亟须对山区河流的水沙运动规律和通航问题进行深入、系统的研究。

按照内河水运“十二五”规划、《全国内河航道与港口布局规划》以及《长江干线航道总体规划纲要》的要求(表1-1-2),需要加快长江干线航道系统治理,上游1000 t级航道延伸至水富,适时实施三峡水库库尾航道整治;加快实施岷江、嘉陵江、乌江等航道的建设工程。国务院2011年5月18日常务会议通过《三峡后续工作规划》提出:开展三峡水运通道能力建设,进一步改善长江航运条件、提高航运效益。

表 1-1-2 全国内河航道布局规划

分布	航道名称	起讫点	航道等级现状	规划航道等级	总航道里程/km	山区河流部分/km	平原河流部分/km
两横	长江干线	水富—重庆	五至三级	三级	412	412	
	长江干线	重庆—长江口	三至一级	一级	2426	720	1706
	西江干线	南宁—广州	五至三级	三级及以上	854	854	
一纵	京杭运河	梁山—杭州	六至二级	三级至二级	1052		1052
十八线	岷江	乐山—宜宾	六至四级	三级	162	162	
	嘉陵江	广元—重庆	六至四级	三至四级	698	698	
	乌江	乌江渡—涪陵	七至五级	四级	594	594	
	湘江	松柏—城陵矶	六至三级	三级及以上	497	497	
	沅水	三板溪—鲇鱼口	六级	四级	859	859	
	汉江	安康—汉口	六、七级	四级	969	352	617
	江汉运河	龙洲垸—高石碑	不通航	三级	69		69
	赣江	赣州—湖口	六至三级	三级及以上	606	606	
	信江	贵溪—罐子口	七至五级	三级	244	244	
	合裕线	合肥新港—裕溪口	六至三级	三级	143		143
	淮河	淮滨—淮安	五级	三至四级	560		560
	沙颍河	漯河—沫河口	六、五级	五至四级	378	378	
	右江	剥隘—南宁	六级	四级	435	435	
	北盘江—红水河	百层—石龙三江口	七、六级	四级	741	741	
	柳江—黔江	柳州—桂平	六、五级	三级	284	284	
	黑龙江	恩和哈达—伯力	四、二级	三级及以上	1890	1290	600
	松花江	大安—同江	四级	四级	976	290	686
	闽江	南平—外沙	六至一级	四级及以上	278	278	
总计					15127	9694	5433

为全面落实《国务院关于加快长江等内河水运发展的意见》(国发[2011]2号)、内河水运“十二五”规划、《全国内河航道与港口布局规划》、《长江干线航道总体规划纲要》以及《三峡后续工作规划》的各项意见和规划,大力提升长江上游河段、西南地区山区河流以及三峡库区河段的航道标准,进一步实施碍航滩险的整治便显得十分必要并极为迫切。

为不断满足国民生产和社会经济快速发展的需要,在新的形势和条件下,在这些山区河流上规划和修建的梯级越来越多(图 1-1-1),且由于航道等级要求进一步提升以及航道长度需求的不断延伸,出现了一系列与航道建设、发展相关的新情况和新问题。例如,山区河流上复杂滩险的碍航问题、水库修建后上下游的航道边界条件和水沙条件均发生了重大变化、库区岸坡防护问题等日益突出。因此,针对内河航道特别是长江上游及西南地区山区河流航道、三峡库区河段的水沙运动规律进行研究,针对各种复杂碍航滩险进行整治具有极为重要的理论意义和重大的实际工程应用价值。



图 1-1-1 中国西南地区主要通航河流梯级开发图

1.2 存在的问题

1.2.1 山区河流开发中存在的问题

我国水能资源非常丰富,位居世界首位,其中尤以西南地区河流最具代表性。从我国能源形势和能源结构看,大力开发水电能源是大势所趋。就西南地区而言,其水能资源理论蕴藏量为4.90亿kW,可开发量2.46亿kW,理论蕴藏量和可开发量均占全国总量的70%,水电开发潜力很大。截至2010年底,我国水电(不含抽蓄,下同)约为2亿kW,水电资源最为丰富的西藏、四川、云南的水电装机容量合计为5549万kW,其中,四川省水电装机总容量3083万kW,云南省水电装机总容量2570万kW。水电是我国实现到2020年非化石能源占一次能源消费15%目标的关键。西南水电资源丰富,后续发展潜力大,在近段时期内为我国能源发展的重点地区。在大力开发山区河流水电能源的同时,相应河段也得以渠化,给山区河流的航运带来了前所未有的机遇,同时也伴随着新的问题。因此,为切实充分利用好山区河流的航运优势,需要针对山区河流渠化带来的新课题进行深入研究。

由于各河段各支流所处地形、地质、水文条件千差万别,在天然情况下,各河流通航等级相差悬殊,但大都坡降大、江面窄、滩多水急、航道条件差,只能季节性航行小吨位船舶,且运能小,成本高。为根本改变山区河流航运条件,山区河流水运要发挥其重要的航运地位和功能,就必须大力提高航道等级,行驶大吨位船舶,减少运输成本,提升竞争能力。

显然,提高山区河流航道等级的最佳出路是水运与水电开发相结合,对山区天然河流进行渠化,从而实现干支直达、上下通畅,形成统一协调的现代化高等级航道网。因此,山区河流渠化后,航运等级的提升和高等级航道网的延伸对于我国社会经济的发展具有极为重要的战略意义。但是,由于山区河流分布广泛,条件千差万别,不可能完全进行渠化梯级衔接。此外,即便是流域航运梯级开发,也存在一个开发时间、顺序和周期的问题。而国家西部大开发和山区社会经济的发展计划,使区域航运需求变得十分迫切。因此,高等级航道网的建设必然涵盖渠化梯级末端相应上游河段、梯级下游河段及渠化梯级支流(如三峡水库支流)等众多特性各异的河段。由此带来一系列新的课题亟待进行研究。

1.2.2 水流运动规律方面

1.2.2.1 非恒定流

非恒定流是自然界中流体运动最为普遍的形式,河道中的洪水推进、水电站泄洪、船闸充排水、水库溃坝、潮流、空气流动等都是典型的非恒定流。

在明渠均匀流中,水面坡度是恒定的,水位与流量呈单值关系,水流运动过程中,各

运动要素基本保持不变。均匀流使一般流动问题大为简化,使得问题的研究变得容易,因而现在关于水流及泥沙运动等问题的求解,基本上是在恒定均匀流的基础上建立起来的。

在非恒定流情况下,由于流量、水深、水面比降及流速等水力参数一直随时间而变化,因而其运动规律较均匀流复杂得多。当流量随时间的变化非常缓慢时,可将非恒定流近似作为恒定流处理。但在某些特殊条件下,如电站运行、水库调度等,由于非恒定流变化过程较快,水流非恒定性较强,如果再用恒定流条件来研究非恒定流状态下的问题,则可能导致泥沙运动、河床演变等系列问题的理论研究结果和实际情况有较大的差异。

受研究手段的限制,当前对非恒定流的机理性研究多数还是在管道中进行的,对明渠非恒定流问题的研究则较少,且进展缓慢;而对于明渠非恒定流传播过程中流量和水深等水力参数如何确定、摩阻流速如何计算、垂线流速分布及紊动特性如何等,也都没有得到被广泛认可的结论。

1.2.2.2 河道型水库库区波浪

山区河道型水库建成后,水域面积将大幅增加。例如,三峡工程建成后,形成面积超过 1000 km^2 的水域,包括十多条支流河道的大型水库。库区大部分地区水位将抬升 $50 \sim 100 \text{ m}$,仅在重庆辖区内形成长 600 余千米、宽 $1 \sim 2 \text{ km}$ (局部达 3 km)的库区水域。

河道型水库的水域面积较大,则库区波浪问题以及由此引发的其他问题会变得突出。以三峡水库为例,三峡成库后,原有陆上岸坡变为水下岸坡或水位变动带的岸坡,物理力学指标大幅降低,加之建库后库区季风和湖(库)陆风将增强,风区扩大,吹程增加,因此库区风场所形成的风浪规模比成库前将有明显扩大,波浪的淘刷和侵蚀作用大为加强,不可避免地会引起路基软化、填料流失、坡岸淘刷、支挡结构承载能力降低等现象,最终造成路基边坡失稳、道路破坏。

1.2.2.3 山区河流弯道水流

自然界中的河流几乎都是弯曲的,河湾在大小河流中普遍存在。河湾水流形态多为由纵向水流与横向环流组成的螺旋流,这种面流指向凹岸、底流指向凸岸的螺旋流的不断侵蚀常常导致河湾凹岸冲刷、凸岸淤积,使船舶的航行停泊水流条件和港口航道几何条件不断恶化,最终导致碍航、断航甚至无法作业,给国民经济和社会的发展带来重大损失。因此,河湾的坡岸防护非常重要。

泥沙运动是河湾水流与坡岸相互作用的媒介。目前,对顺直河道河床的泥沙起动条件的研究已较为成熟;关于顺直河道坡岸和河湾河床的泥沙起动问题的研究成果较少见,且还停滞在粗略的阶段;而对于河湾坡岸泥沙起动条件的研究成果目前几乎还是空白,急需进行对该问题的研究。而要充分深入研究河湾坡岸无黏性均匀沙的起动和弯曲河道岸坡的稳定,首先必须对山区河流弯道水流特性进行深入研究。

1.2.2.4 河道型水库库区大水深紊流结构

对于天然河流,床沙质在搬运输移过程中,一直与河面泥沙不断地发生交换,冲泻质泥沙(沙粒直径 $D < 0.06 \text{ mm}$)从流域面上冲刷外移后,沿程很少在河槽中停留,不参

与造床。若在河流上修建水库,则坝前水位有抬高,形成雍水、回水;使河断面过水面面积增大,水流流速减缓,影响水流挟沙力;出现推移质在库尾回水区淤积,悬移质中较细部分的泥沙向下游输移,在水流流速很小、水流紊动较弱的区域形成冲泻质泥沙淤积。

2010年三峡水库实测泥沙淤积物级配资料表明,水库淤积泥沙主要是天然情况下不造床的冲泻质泥沙。在三峡水库,常年回水区内的泥沙淤积量占水库淤积总量的99%,航道内局部地区淤积严重。目前,对于细颗粒泥沙的淤积主要以清淤的方式进行航道疏通。但由于细沙淤积量大,疏浚后回淤较快,清淤的工作量大、作用效果也不明显。细颗粒泥沙输移运动的能量来源是水流的紊动动能。因此,如果紊动动能足以维持细颗粒泥沙向下游运动至大坝,排向下游,则在三峡水库常年回水区的细颗粒泥沙淤积将会大大地减缓。因此,对三峡水库大水深条件下水流紊动特性的研究具有重要意义。

泥沙运动与水流的紊动现象有密切的关系。悬移质之所以能抗拒重力作用,在垂线上保持一定分布,完全是水流紊动引起上下水团交换的结果。但由于水流紊动特性及悬移质泥沙运动十分复杂,现有理论主要研究成果是在实验室条件下得到的,并且泥沙运动研究成果多基于一些较为理想的情况,采用了理论假设和概化模型等。但实验条件或假设条件与三峡库区常年回水区的实际情况相差较远,不能客观反映目前三峡水库常年回水区所出现的细颗粒泥沙淤积现象等问题。

1.2.3 泥沙运动规律方面

1.2.3.1 卵石沙波运动形式

山区河流在我国通航里程中占有重要的地位,其中长江水系通航里程6.5万km,占国内河通航总里程的53%,而其中干线航道2838km,98%以上为高等级航道。长江航运发展迅速,是世界上运量最大、运输最为繁忙的通航河流。2009年,长江干线货运量达到13.3亿t,干线规模以上港口完成货物吞吐量11.3亿t,已成为名符其实的黄金水道。

但长江上游航道尤其是宜宾至重庆河段分布有大量碍航的卵石滩险,其中部分重点滩险有明显的卵石沙波运动,如九堆子、筲箕背滩、漂灯碛滩、螃蟹子滩、东溪口滩。卵石沙波滩险的形成机理较为复杂,航道整治工程治理难度较大,效果难以维持,严重影响长江上游黄金水道的效益发挥。

1.2.3.2 卵石泥沙运动理论

山区河流卵石沙波运动理论研究包括卵石的起动条件、沙波形态随水流条件变化的过程和分类、沙波随时间变化的形态发展和变化过程、卵石推移质输沙率等方面。本书主要从卵石的起动条件、卵石沙波的形态分类及水流临界条件和卵石推移质输沙率这三个方面进行研究。

从1879年法国的P. Duboys第一次提出推移质运动的拖曳力理论开始,推移质输沙率的研究已进行了130多年。目前,工程界普遍接受并实际运用的推移质输沙率的计算公式多达数十种,包括著名的Meyer-Peter、Einstein、Bagnold、Engelund、Brownlie、

Shields、Graf、Yalin、Van Rijn、Yang 等公式,如果考虑这些公式的修正式,则推移质输沙率公式可达上百种。但在实际计算过程中,这些经典公式在相同水流条件下的计算成果可能相差数倍。这些推移质输沙率计算公式从拖曳力、概率统计、流速、功率等方面考虑水流对推移质的作用,孰优孰劣尚无定论。

1.2.3.3 弯道泥沙运动

山区河流弯道发育、弯道河床泥沙运动以及岸坡的稳定都与弯道泥沙起动息息相关。目前,对泥沙起动的研究多是针对顺直河道河床的泥沙起动条件进行的。顺直河道坡岸和河湾河床的泥沙起动问题的研究成果较少见,且大都还停滞在粗略的阶段。对于弯道坡岸泥沙起动条件的研究也几乎还是空白。

1.2.4 复杂滩险治理方面

1.2.4.1 山区河道通航水力标准

山区河流滩险众多,在所有种类的滩险中,急流滩占 80% 以上,是滩险整治研究的重点。山区河流通航条件通常包含航道尺度和水流条件。作为航道尺度,一般的通航河道均比较明确,如航宽 40 m,水深 2 m,弯曲半径 300 m;而作为航道的水流条件标准——水力指标(流速和比降组合),目前只有少部分重要河段提出了明确标准,而绝大部分山区河流由于航道及水流条件和通航船舶均不尽相同,难以借鉴其他航道的通航水力指标。如直接沿用其他航道的数据标准,会使整治工程的研究和设计过程具有一定的盲目性,整治措施偏于保守,常常需要采用较大的工程量去大幅度地降低滩险的流速和比降,以达到船舶能自航上滩的目的。

因此,基于典型山区河流对通航水力标准进行研究,为航道设计和航道整治工程提供技术指标、建造适合新指标的船型、整治适合新指标的航道,将十分有效地减少船舶营运和整治成本,提高经济效益,促进山区河流航运建设快速发展。

1.2.4.2 坝下非恒定流条件下的设计水位

设计水位包括设计最低通航水位和设计最高通航水位,设计水位是山区河流航道整治的基本参数和主要依据。现有规范和手册确定设计水位的方法都是基于恒定流条件下的成果。而山区河流修建渠化梯级后,梯级下泄水流具有明显的非恒定流特性,在非恒定流情况下设计水位的确定不能再根据恒定流方法推算。

1.2.4.3 整治建筑物新结构形式

据调研,山区河流目前航道整治建筑物主要为散抛石坝体,以及干砌条石和浆砌条石坝面结构。丁坝和顺坝的顶宽为 2~3 m,潜坝顶宽为 3~5 m,迎水边坡坡率为 1:1.5~1:2.0,背水边坡坡率为 1:1.5~1:2.5。山区河流一般具有河床地质较好的特点,这种结构在一般情况下是稳定的。但山区河流特点之一就是滩多流急,在滩段水流流速

较大(超过 3 m/s)时,坝体结构的坝头和坝体顶冲部位可能仍将出现毁坏。

1.2.4.4 整治建筑物的平面布置及各类滩险的整治原则

山区河流一般具有水位暴涨暴落、坡陡流急等特点,因而各类急、浅、险滩时常发育,对航运产生较大危害。山区河流整治建筑物一般包括丁坝、顺坝、锁坝、鱼嘴坝等形式。整治建筑物平面布置应结合上、下游河势,使整治线方向尽量有利于航槽稳定,尽量依托现有河道中的节点控制河势。然而,现有研究一般针对单个滩险进行,对于连续滩险、弯浅险复合滩险、坝下游受非恒定流影响的滩险以及变动回水区卵石滩险等山区河流复杂滩险,还没有深入的研究。

1.3 研究技术路线

本项目的研究技术路线如图 1-3-1 所示。

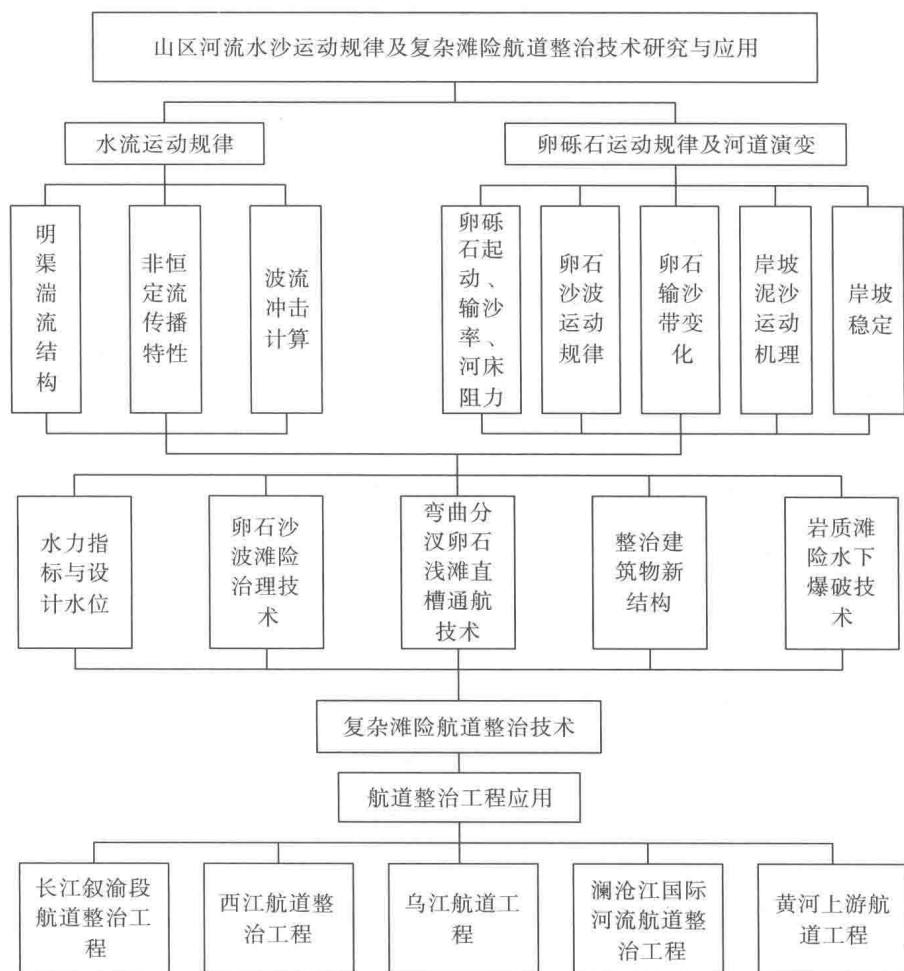


图 1-3-1 研究技术路线图