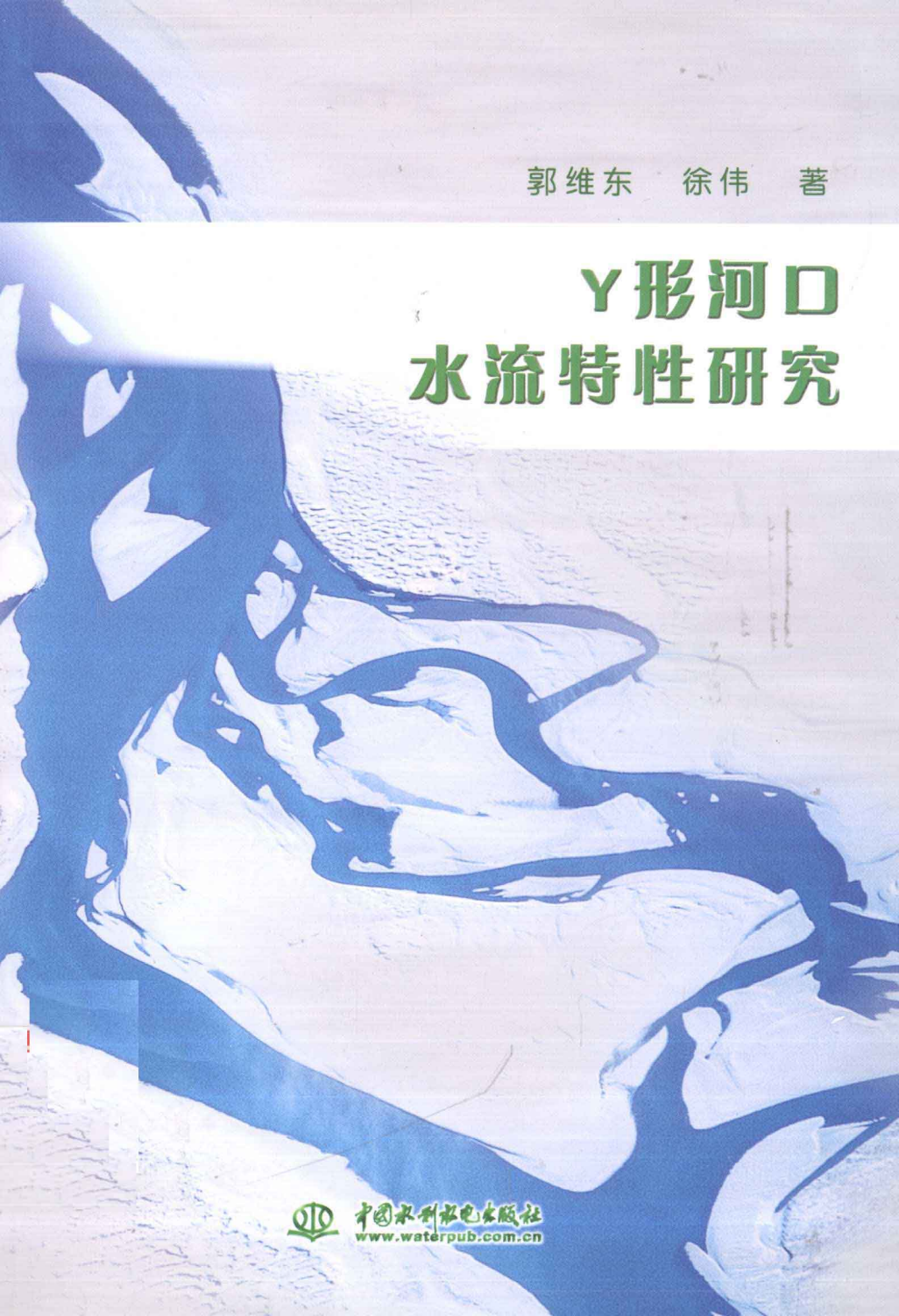


An aerial photograph of a river delta, showing a large Y-shaped confluence of water channels into a larger body of water. The land is a light tan color, and the water is a darker blue-grey. The Y-shape is very distinct, with one main channel splitting into two branches.

郭维东 徐伟 著

Y形河口 水流特性研究



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

Y形河口 水流特性 研究

郭维东
徐伟
著



内 容 简 介

本书是关于 Y 形交汇河口水流特性问题的专著, 其内容共分为 3 章, 包括 Y 形交汇河口水流特性试验研究, Y 形交汇河口水流的数值模拟研究和浑河鲍家河口至黑虎山段洪水特性数值分析。

本书可作为水利、环保及相关专业人员的参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

Y 形河口水流特性研究 / 郭维东, 徐伟著. — 北京:
中国水利水电出版社, 2011.5
ISBN 978-7-5084-8659-8

I. ①Y… II. ①郭… ②徐… III. ①河口—水文地理
学—研究 IV. ①P343.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 102013 号

书 名	Y 形河口水流特性研究
作 者	郭维东 徐伟 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 (营销中心) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	140mm×203mm 32 开本 6.375 印张 171 千字
版 次	2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前 言

天然河流中存在着大量的干支流交汇河口，根据汇流河口的几何形态，大致可将其分为两类：支流斜接干流型河口和 Y 形交汇型河口。据资料统计结果表明这两种交汇河口形式在数量上的比例为 1：1。交汇河口处由于干流与支流相互顶托和水流离心旋转等因素的作用，使水流在汇流口处发生强烈的紊流掺混，水流能量损失很大，流速急剧变化，流场变化相当复杂，进而引起河床的冲淤或者污染物的滞留，长期发展可能会使河道变形或者形成江心洲及河口拦门沙汇流河口，甚至引起冰坝阻塞和污染加剧，是河道防洪、航道疏浚及污染治理的难点部位。因此，对于交汇河口水流水力特性的研究具有重要的现实意义。

目前对于交汇河口水流特性的研究主要集中在支流斜接干流型河口方面，从研究深度上来看，受试验条件和观测资料等因素的制约，研究成果局限于现象描述和定性分析居多，对 Y 形流口研究较少。本书采用模型试验、数值模拟的方法对矩形断面和现实断面 Y 形河口进行了研究，尝试系统研究和定量分析 Y 形河口的水力特性，以便发现一些规律。本书分为 3 章，第 1 章为 Y 形交汇河口水流的特性试验研究，第 2 章为 Y 形交汇河口水流的数值模拟研究，第 3 章为浑河鲍家河口至黑虎山

段洪水特性数值分析。

本书是作者多年来在 Y 形交汇河口水流特性方面的研究成果总结，有些内容曾分别以不同形式公开发表过。王晓刚、吴迪、冯亚辉和于冰参与了部分试验、计算和报告的撰写工作，康国亮、谢方芳、孙磊、李晓东、彭炜森、高宇和胡艳参与文字校对和插图制作，在此表示诚挚感谢。

由于作者水平所限，缺点和错误在所难免，诚挚期盼得到读者的批评指正。

作者

2010 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 Y 形交汇河口水流特性试验研究	1
1.1 绪论	1
1.1.1 问题的提出与研究意义	1
1.1.2 汇流口水流水力特性研究现状综述	2
1.1.3 ADV 测速技术简介	9
1.1.4 主要研究内容及技术路线	13
1.2 模型实验设计及 ADV 仪器调试	14
1.2.1 模型设计与制作	14
1.2.2 ADV 仪器调试	21
1.3 实验数据的 Tecplot 处理	25
1.3.1 Tecplot 介绍	25
1.3.2 Tecplot 数据处理	27
1.4 数据结果图的分析与讨论	34
1.4.1 汇流口水流三维流场的总体描述	34
1.4.2 汇流比对汇流口水流水力特性的影响	47
1.4.3 干支流河床高差对汇流口水流水力特性的影响	60
1.5 结论与展望	70
1.5.1 结论	70
1.5.2 展望	71
第 2 章 Y 形交汇河口水流的数值模拟研究	73
2.1 绪论	73
2.1.1 问题的提出与研究意义	73

2.1.2	交汇口水力特性研究现状	74
2.1.3	数值模拟关键技术的研究现状	77
2.1.4	主要研究工作及技术路线	93
2.2	流场数值模拟的基本原理	95
2.2.1	基本方程	95
2.2.2	有限体积法	100
2.2.3	基于交错网格的 SIMPLE 算法	103
2.3	Y 形交汇河口水流的数值计算	105
2.3.1	物理模型试验简介	105
2.3.2	紊流模型的选择	106
2.3.3	CAD 三维建模	107
2.3.4	网格布置	108
2.3.5	初始条件和边界条件	110
2.4	计算结果与试验结果的对比	111
2.4.1	水面形态的对比	112
2.4.2	交汇口流速分布	113
2.4.3	误差分析	119
2.5	Y 形交汇河口水流的特性分析	120
2.5.1	水面形态特征	120
2.5.2	不同交汇角条件下的流速分布特征	130
2.5.3	Y 形交汇河段的分离区研究	136
2.5.4	干支流汇入断面上的动量修正系数和动能修正系数	140
2.5.5	干支流平均汇入角的变化规律	144
2.5.6	雷诺应力分析	147
2.6	结论及展望	151
2.6.1	结论	151
2.6.2	展望	153
第 3 章	浑河鲍家河口至黑虎山段洪水特性数值分析	154
3.1	绪论	154
3.1.1	问题的提出与研究意义	154

3.1.2	洪水演进数值模拟的研究现状	154
3.1.3	主要研究内容及技术路线	158
3.1.4	特点和创新	160
3.2	浑河抚顺段流域概况	160
3.2.1	流域概况	160
3.2.2	气象水文	161
3.2.3	流域洪水特征	162
3.2.4	防洪工程概况	163
3.3	交汇河口水流的数学模型	163
3.3.1	数学模型的建立及求解	164
3.3.2	紊流模型的选择	166
3.3.3	二维建模及网格布置	168
3.3.4	初始条件和边界条件	169
3.3.5	模型验证	170
3.4	计算结果分析	171
3.4.1	水面形态特征	171
3.4.2	流速分布特征	179
3.4.3	雷诺应力分析	187
3.4.4	河床剪力特征	188
3.5	结论与展望	193
3.5.1	结论	193
3.5.2	展望	194
	参考文献	195

第1章 Y形交汇河口水流特性试验研究

1.1 绪论

1.1.1 问题的提出与研究意义

天然河流中存在着大量的干支流交汇河口。干支流交汇形成水道河网,交汇河口处水流流态险恶多变,难于预测,许多大中城市坐落于交汇河口附近,自然交汇河口是发展水运的关键部位。干支流汇合处水流紊动掺混剧烈,支流水流受干流顶托,常形成河口滩,所以交汇河口又是航道整治的难点部位。对于寒冷地区,汇流河口又是冰阻塞严重的河段,汇流河口对污染物输移有较强的滞留作用,因此这也是环保部门关注的重点。结合辽宁省河流状况,发现汇流河口众多,汇流河口也常会出现诸多问题,如辽河与柳河交汇河口历来就存在着严重的泥沙问题,一直未能妥善解决。因此,研究汇流河口水流水力特性具有很大的现实意义。

干支流来水来沙往往不同步,而且两河地形地质条件差异很大,从而使得交汇口水沙运动情况复杂多变。想要恰当描述明槽水流交汇混掺而产生的复杂流动现象具有相当的难度。由于边界几何形状的复杂性和存在自由水面,目前,明槽交汇口的水流特性绝大多数情况下,很难由理论分析的方法解决。而且常常遇到的另一个难题是交汇口流动的非恒定性,这给理论分析和数值模拟都带来较大的困难。

交汇河口分为两类:①支流斜接干流型;②Y形交汇型。现有统计结果表明这两种交汇形式在数量上的比例基本上是1:1。目前国内对干支流交汇问题的研究还很少,发表论文不多。各个

论文对相关内容的表述存在一些分歧,如汇流比、汇流角的定义不一致等。国外对河道汇流问题已做了较多的工作,但也集中在对支流斜接干流形河口的研究,对 Y 形交汇河口水力特性研究也很少。分析其原因,除了交汇河口本身水力特性复杂多变外,试验仪器的局限性也是一个重要的原因。鉴于此,本章采用美国 SonTec 公司生产的声学多普勒流速仪 ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) 对 Y 形交汇口水流水力特性进行试验研究,旨在为这类交汇河口的科学研究、工程设计及其他特性研究提供参考。

本章是一项基础性研究,通过对汇流口概化模型的试验研究,探求 Y 形汇流口水流的基本水力特性,对实际工程具有一定的参考价值;就理论而言,通过对汇流口水流水力现象的描述、解释,对目前尚不成熟的汇流口水流交汇理论具有促进作用。

1.1.2 汇流口水流水力特性研究现状综述

1.1.2.1 国内研究现状

1994 年,周华君研究了长江嘉陵江交汇口水力特征,提出交汇口干支流水面坡降与汇流比及水流流量有关,河流掺混区水面坡降随干流流量、汇流比变化而变化。1994 年,罗保平对汇流河段干支流分界线进行了研究,讨论分析了支流对干流的入侵情况。1994 年,胡明做了矩形汇流室水流性态模型实验研究,提出汇流室水流流态非常复杂,不易描述,而其水流自由表面形状大致上是相对稳定的,而且大体上可以反映出水流的形态,能通过水流的局部颈缩现象宏观上反映水流的紊乱程度及其能量损失情况。1994 年,黄金堂利用水流动力轴线及河段汇流区汇流点位置分析了长江马鞍山河段河势控制及应急工程,认为水流动力轴线是影响河床演变的最主动、最活跃的动力因素,水流动力轴线稳定则河道形态稳定。1996 年,刘建新利用水面坡降线分析了干支流的顶托与被顶托关系,并讨论了汇流比与水面坡降及

汇流角（干支流水流动力轴线交角）的关系。1996 年，许光祥对长江嘉陵江交汇口汇流特性进行了统计分析，统计了汇流比分布长年浮动范围，干支流流量的长年变化范围，并定性分析了汇流比与总流量的关系。1997 年，王义安提出了汇流口河段干流对支流形成壅水，影响支流的正常航运问题。1997 年，兰波通过研究干支流交汇水面的形态特征，把交汇河段分为三个区域：壅水区、合流区、集流区（杨胜发在 2002 年研究支流入汇干流交界面数值模拟方法时再度使用这种交汇河段分区形式），认为合流掺混区水面横比降并非单一，而是中间高两边低的凸起断面，汇流比 R_Q （支流流量与干支流总流量之比）越大，交汇角（干支流几何轴线交角）越大，干流流量越大，凸起程度越大，向下游方向环流逐渐消失，凸起程度逐渐减缓。纵断面壅水区与合流区水面坡降变化规律不同。1998 年，兰波对山区河流交汇河口进行了统计分析，依据其交汇形式及平面形态将干支流的交汇形式概括为支流斜接干流形及 Y 形交汇两类，并分析了交汇河口形态及干支流流量的季节变化。1998 年，陆永军以长江上游的嘉陵江河口为例研究了支流河口水沙运动的二维数学模型，分析水沙特性及浅滩成因的基础上，采用适合多连通域的贴体正交曲线坐标，克服了干支流汇合处河道边界形状复杂的困难，给出了正交曲线坐标系下二维全沙模型的基本方程、数值解法及动边界技术，模拟了支流嘉陵江口上游约 715km，干流重庆河段约 15km 的水面线、流场、含沙量浓度场及河床变形，并提出汇流比与河床冲淤直接相关，与汇合口支流流速及回流区大小有关。2000 年 7 月伍超研究了洪水演进中的支流倒回灌问题，提出在处理洪水演进过程中支流与干流洪水相互影响时，以前的模型仅将支流流量叠加到干流流量上，但事实必须考虑支流倒回灌的问题。杨胜发在 2002 年研究支流入汇干流交界面数值模拟方法时认为干支流交汇口局部水头损失较大，并修正了水面线计算方法，还提出在二维流场计算时，交界面的岸边界按开边界处理，虚拟网格内流速与交界面流速相等，求解三对角矩阵法以支

流汇入方向为标准的交界面处理方法。2003 年 6 月茅泽育应用 DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) 数字粒子图像处理技术对明渠交汇口流场进行了实验研究。其试验结果表明, 对于给定交汇口形状及尺寸, 分离区的大小主要随主支渠水流的流量比发生变化, 但其形状基本保持不变。2003 年奚斌利用模型试验研究了较为合理的满足通航要求的 T 形河道交汇口布置形式和交汇角度, 以及交汇口冲刷的护砌范围和防止淤积的管理措施。2003 年茅泽育通过数值计算, 研究了明渠交汇口水流及污染物输移问题, 描述了交汇口水流分离区及污染混合区的形状及大小。

1.1.2.2 国外研究现状

早在 1944 年, 泰勒 (Taylor) 就认识到了汇流口横向水流分离区的重要性, 并开始研究汇流河口水力特性。1981 年莫迪 (Modi) 等人依据摩擦力损失, 也发现了分离区的重要性。1976 年莫斯利 (Mosley), 1986 年阿什莫尔 (Ashmore) 和帕克 (Parker) 等人通过一系列的实验, 认为汇流角及流速比对汇流河段的水流结构及河床地形发展有控制作用; 1987 年百斯特 (Best) 对汇流河段提出了一个概化模型, 将汇流河段分为六个区: 滞流区、水流偏向区、分离区、最大流速区、流动恢复区及剪切层区。另外, 1991 年百斯特 (Best) 和罗伊 (Roy)、1996 年布里翁 (Brion) 等人及 1995 年格罗蒂特 (Groudet) 和罗伊 (Roy) 都发现干支流河床的高差对汇流区流动结构及水流掺混过程有重要影响。1988 年百斯特 (Best) 研究了汇流河口的泥沙运移问题。他认为汇流河口河床形态有三个特点: 各支流汇流口均有塌落面; 汇流口中央有一个较深的冲刷坑; 下游汇流角处分离区内有江心洲形成。而这些河床形态主要由汇流角 (干支流几何轴线交角) 及汇流比 (支流流量与干流流量之比) 控制。随着汇流角及汇流比的增大, 干流与支流泥沙在汇流口下游有分离运动趋势, 泥沙在汇流区两岸传输而不是在汇流口中央运动, 干流泥沙沉积在一岸, 而支流泥沙则沉积在有分离区的另一岸。这种泥沙的分离运动伴随着主流塌落面后移, 汇流口中央的冲刷深

度增加,冲刷方向变化,分离区的江心洲尺寸变大。1996年王可汗(K. H. Wang)等人利用数值模拟方法模拟了洪水在汇流河道的演进。1996年布里翁(Biron)通过水槽实验,讨论了干支流河床高程不一致对明渠汇流流动特性的影响。他发现,较浅的支流近河床水流会在汇合口上升至水面,而且加强汇流口水流紊动强度,这也致使河床附近分离区消失及下游近河床水流流速加速区消失,而水流表面依然有分离区及流速加速区。由于干支流高程差的存在加强了水流紊动,使得掺混很快结束,掺混长度变短。1998年徐永杰(Chung-Chieh Hsu)等人对 90° 交汇的等宽明渠进行了研究,提出了 90° 交汇的等宽明渠汇流为缓流时,求上游水深及最大流动收缩区收缩系数的一维方法,并定量计算了最大流动收缩区能量及动量修正系数。同时也得到了支流汇入干流的断面平均入射角,分离区形状系数的一些关系式。2000年萨姆帕斯库马尔古若姆(Sampath Kumar Gurram)和卡拉姆卡其(Karam S. Karki)对缓流明渠汇流进行了研究,讨论了能量、动量修正系数及其他一些水力要素的定量关系,但仅限于交汇水流为缓流情形。2001年布拉德布鲁克(Bradbrook)等研究了干支流河床高程不一致对河段汇流口的影响。提出干支流河床高程不一致对汇流河口水力特性有重要影响。河床高程不一致会使次生环流加强,分离区增大,而分离区的存在会增加河床横向压力梯度,减少支流中央水面超高及支流汇流角处的水面降落。即使是支流深度的一个很小的变化(10%)也会使次生环流强度发生强烈变化。2001年河伊特姆(R. Ettema)等人研究了汇流口河道的冰阻塞问题,讨论了影响汇流河道口发生冰阻塞现象的控制因素问题。

1.1.2.3 小结

目前国内对干支流交汇问题的研究还很少,仅重庆交通学院和清华大学对支流斜接干流形汇流河口研究多一点,其他水利院校及科研机构对此仅做了少量的研究工作,且都集中于对支流斜接干流形交汇河口的研究。未考虑河床高差这一重要控制因素对

水流结构的影响,大多数研究仅停留在对水面形态的研究,对交汇河口水流内部结构研究很少,这和国外当前的研究有很大的差距。2004年茅泽育利用五孔测球对明渠交汇口三维水力特性进行了试验研究,他的研究还是以支流斜接干流形交汇口为研究对象,其测速仪器在测量精度上还是有较大缺陷的。

国外对汇流问题的研究远比我国早,对河道汇流问题已做了较多的工作,但也集中在对支流斜接干流形河口的研究,且多数也只能做到对水流二维结构的研究,对三维水流特性的研究也很少,同国内一样,国外对Y形交汇口水流三维水力特性试验研究依然是空白。

非常值得注意的是,现今国内外本就不多的研究成果却存在着很大的分歧,概括起来主要有以下几个方面:汇流比、汇流角的定义不一致;汇流口的分区形式不一致;汇流口横向水面形态及纵向水面形态研究都存在分歧。具体表现在如下几个方面。

(1) 汇流比、汇流角的定义不一致。对于汇流角,一种观点认为交汇角应为干支流水流动力轴线的夹角,另一种观点认为交汇角为干支流几何轴线的夹角。笔者认为对于汇流河口,采用干支流几何轴线的夹角定义汇流角更为直观,而且这个夹角也确实能体现汇流河口的大体特性,以它为定义更有利于研究。而用干支流水流动力轴线的夹角来定义虽然抓住了其力学本质,但实质上,这个夹角是一个波动较强烈的变数,其量测也存在一定的难度,不易把握。

对于汇流比,有人将其定义为支流流量与总流量的比,还有人定义为干流流量与支流流量的比、支流流量与干流流量的比等。这种定义的不统一容易让人产生误解,建议采用统一定义,采用国外一般定义方法,把支流流量与干流流量之比定义为交汇河口汇流比。

(2) 国内外对汇流口的分区形式不一致。1997年兰波把交汇河口段分为三个区域:壅水区(Ⅰ区)、合流区(Ⅱ区)、集流区(Ⅲ区),如图1.1-1所示。杨胜发在2002年研究支流入汇干流交界

面数值模拟方法时再度使用这种交汇河段分区形式，并进一步给出了这三个区的定义。壅水区：壅水较为明显的地方。汇合区：干、支流交汇处。集流区：支流流速对干流流速影响甚小处。而1987年 Best 通过研究将交汇河口段分为六个区：①滞流区；②水流偏向区；③分离区；④最大流速区；⑤流动恢复区；⑥剪切层区，如图 1.1-2 所示。前者分区过于简单，对水流内部结构未进行深入研究，而后者则较为细致深入。从国内外论文也可看出，国内目前对水流结构的研究与国外还是有一定差距的。

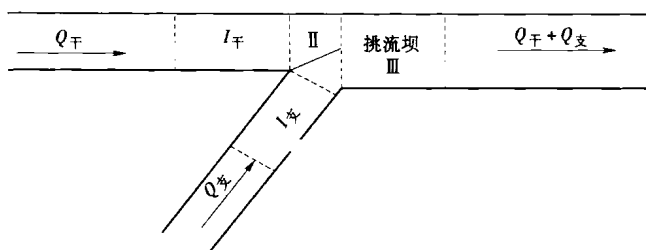


图 1.1-1 国内水流分区图

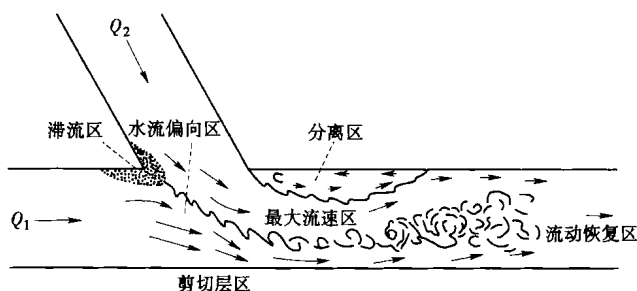


图 1.1-2 国外水流分区图

(3) 国内外对汇流口横向水面形态的研究存在分歧。1997年 兰波通过研究干支流交汇水面的形态特征，总结出合流掺混区水面横比降并非单一，而是中间高两边低的凸起断面的结论，而2001年 Bradbook 研究成果如图 1.1-3 所示，汇合口水流更像弯道水流，凸岸有超高，凹岸有水面降落。由此看来，对汇流口水

面形态的研究依然存在一定的问题，有待进一步更全面的研究。

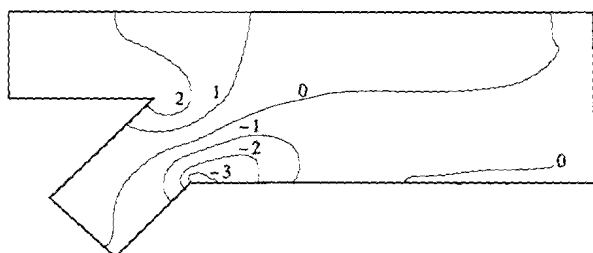


图 1.1-3 45°汇流河口水面高程等值线图

(4) 对汇流口纵向水面形态的研究存在分歧。据某些文献研究，干支流在汇合口上游由于水流相互顶托，都应形成壅水区，也有不同的见解，认为依据水面连续性，支流较高的水面对干流水面造成壅水作用，同时干流较低的原始水面促使支流水面跌落，如图 1.1-4 所示，即会出现一个壅水一个跌水的情况。这可能是由于水面涨落的过程是一个动态的过程，使水流非恒定性产生了这样的不同结果。这一点分歧也有待于进一步研究。

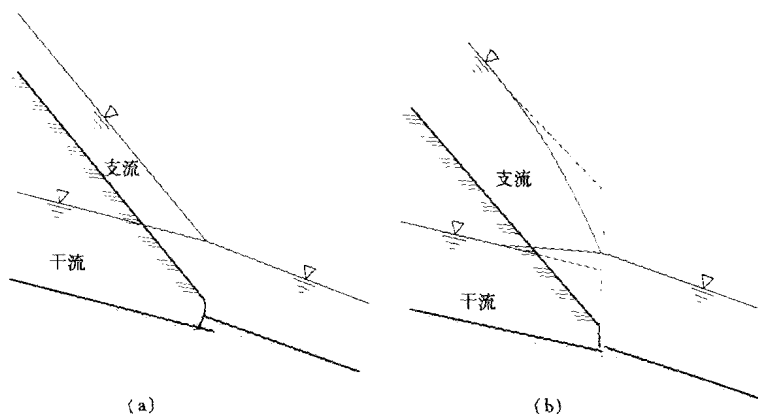


图 1.1-4 交汇口水面变化状态示意图
(a) 水面平衡状态；(b) 水面非平衡状态

1.1.3 ADV 测速技术简介

在水动力学研究中, 试验是其理论发展的基础, 试验手段直接影响研究成果的深度。流速是水动力学中一个重要的参数, 研究者为了精确测定, 研制了多种流速仪, 如毕托管、光电旋浆流速仪、热线流速仪、激光流速仪等, 它们发挥了各自不同的作用。毕托管、光电旋浆流速仪的使用较为方便, 主要用于平均流速的测量; 缺点在于它是一种接触式流速仪, 对水流的干扰大, 测量的精度不高。而热线流速仪和激光流速仪的测量精度高, 对水流无干扰或干扰很小 (激光流速仪属于非接触式测量, 对水流没有干扰), 主要用于平均流速和脉动流速的测量, 近几十年来, 它们用于紊流的研究已经取得了丰硕的成果; 其缺点在于操作复杂、维护困难和价格昂贵, 给它们的广泛应用带来了很大的困难。Sortek 公司的声学多普勒流速仪 (ADV) 能直接测量单点的三维流速, 对水流干扰小、测量精度高、无需率定、操作简便, 流速资料后处理功能强, 极具推广应用前景。

本章研究用的是 SonTek 16-MHz Micro ADV, 一套设备共有 3 个探头: 俯视探头、仰视探头、侧视探头, 其外形如图 1.1-5~图 1.1-8 所示。

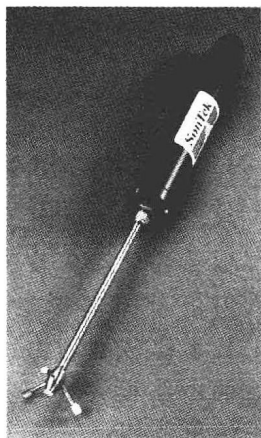


图 1.1-5 SonTek 16-MHz Micro ADV 测速仪

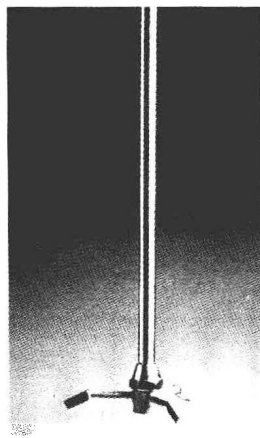


图 1.1-6 三维俯视探头