

桥梁水力学

陆 浩 高 冬 光 编 著

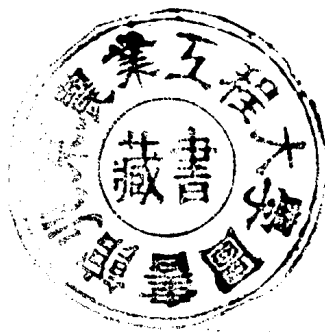


人民交通出版社

桥梁水力学

Qiaoliang shuixue

陆 浩 高冬光 编著



人民交通出版社

(京)新登字091号

内 容 提 要

本书对桥梁水力学基本理论和计算方法作了比较全面地论述,其中包括:建桥前后河段水流与河床变化特征、桥梁与路堤壅水、桥孔一般冲刷、桥梁墩台和调治建筑物局部冲刷、特殊条件下水力计算、水流相似理论和模型设计及其数学模型与电子计算机应用等。可作为道路、桥梁、河工与水工建筑专业教学参考书,亦可供道路、桥梁、厂矿和水工工程设计、施工与技术管理人员参考。

本书第一、三、四、八及第二章第1、3~5节由陆浩编写,第五、六、七及第二章第2节由高冬光编写,全书策划及统稿由陆浩担任。

EQ75/07

桥 梁 水 力 学

陆 浩 高冬光 编著

插图设计:裘琳 正文设计:周元 责任校对:张建设

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:20.25 字数:499千

1991年10月 第1版

1991年10月 第1版 第1次印刷 /

印数:0001—3000册 定价:21.05元

ISBN7-114-00967-4

U·00625

致 谢

在本书编写期间，承蒙国内外专家、教授、学者提供了不少宝贵的研究成果和图片、资料，如美国加利福尼亚圣迭各州立大学土木系主任张海燕教授（H.Chang）、新西兰奥克兰大学土木系梅尔维尔博士（B.W.Melville）、加拿大运输与道路工程协会奈尔教授（C.R.Neill）以及国内有关同行专家和同事们，在此特致以衷心的感谢！

编者

1991.8

目 录

第一章 绪论	1
第一节 桥梁水力学的定义和内容.....	1
第二节 桥梁水力学研究方法.....	3
第三节 编写原则与章节安排.....	5
第二章 桥位河段水流特征	7
第一节 桥位河段水流分区.....	7
第二节 建桥河段水面曲线.....	15
第三节 桥位河段水流重新分配.....	23
第四节 桥位河段环流运动.....	36
第五节 桥位河段水流运动参数.....	43
第三章 桥梁与路堤壅水	54
第一节 桥梁壅水概述.....	54
第二节 国内外现有桥梁壅水计算公式.....	56
第三节 现有壅水计算公式的分析比较.....	62
第四节 桥梁壅水计算方法.....	65
第五节 路堤水力计算方法.....	80
第六节 导流堤形状和尺寸的确定.....	91
第四章 特殊条件下桥梁水力计算	105
第一节 旧桥流量验算.....	105
第二节 宽河多桥流量分配.....	111
第三节 特殊条件下水力计算.....	123
第五章 桥位河段河床变形	148
第一节 桥下河床一般冲刷.....	148
第二节 按洪水过程线计算桥下一般冲刷.....	159
第三节 桥墩局部冲刷.....	167
第四节 桥台、丁坝和导流堤局部冲刷.....	184
第六章 桥孔整体水力计算	188
第一节 桥梁孔径计算概述.....	188
第二节 桥位河段水力计算模型.....	195
第三节 桥孔整体水力计算基本公式.....	200
第四节 桥孔泄水能力和流速系数.....	204
第五节 桥孔整体水力计算实例.....	209
第六节 桥孔设计.....	215
第七章 数学模型和电子计算机的应用	219
第一节 苏联综合电算程序 Гидрам-3	219

第二节	美国水面曲线电算程序HEC-2	230
第三节	桥梁壅水二元流有限元模型	241
第四节	河床变形模型	247
第五节	桥位河段冲刷过程和壅水过程整体计算模型	256
第八章	桥位河段模型试验	266
第一节	模型种类与应用范围	266
第二节	水流相似理论基础	279
第三节	概化模型试验	280
第四节	系列模型延伸试验	290
第五节	桥位河段洪水演进试验	304

第一章 绪 论

科学技术是人类认识自然和改造自然的手段，是人类文明的重要组成部分。人类在长期生产实践中，不断积累工作经验和提高劳动技能，同时又不断运用这些经验和技能，改进并创造新的生产工具和劳动方法。这种生产经验和劳动技能的积累与提高过程以及在认识上的不断总结和深化过程，就是人类对自然规律的发现过程，同时也是科学技术的进步和提高过程。

在人类生产与生活斗争中，交通运输是不可缺少的活动环节。就交通而言，地球表面岗峦起伏，江河纵横，造成难以克服而又必须克服的种种困难。所谓“逢山开道，遇水架桥”，正是反映了交通运输建设的困难所在。

天然水流运动规律本身十分复杂。为道路跨河兴建的桥梁、河滩路堤以及其他附属建筑物，如导流堤、丁坝、顺坝、截水和防洪工程等等，必然对水流与河床产生巨大的影响。河滩路堤伸入河槽，侵占了河谷一部分或大部分过水面积，障碍并干扰了天然水流的正常运动，使桥前水面明显抬高（壅水），在壅水区段河床发生泥沙淤积；同时桥下水流比降变陡，流速急剧增大，大量泥沙被水流带到下游，河床高程大大降低（冲刷）。壅水和冲刷现象出现以后，又反过来进一步恶化了水流与河床变形条件，考验并威胁桥梁建筑物的安全与稳定。水流—河床—桥梁建筑物三者之间的运动制约，构成了桥梁水力学内容十分丰富、矛盾非常复杂的力学关系。

我国幅员辽阔，江河密布，交通线路（铁路、国家公路、地方道路与城市道路，以及各种类型的专用线路等）四通八达。线路跨河的主要方法是在河流上修建各种类型的桥梁。要建桥就必不可免地会碰到各种各样的水力学问题，诸如束水、截水、分水、引水、消能、导流、防洪、排涝、防冲与排淤等等。在解决形形色色的水力学问题中，不断总结成功经验和失败教训，同时又不断提高理论认识和实践水平，并孕育着一门新兴学科——桥梁水力学。

第一节 桥梁水力学的定义和内容

从科学分类上讲，水力学属于基础科学与工程之间的边缘科学，它比理论流体力学更接近于实际应用。在水力学发展过程中，一方面根据数学和力学基本原理建立自身的理论基础，同时又密切联系工程实践发展与丰富它的科学内容。

桥梁水力学，是研究桥梁所在河段水流、河床与桥梁建筑物之间运动制约关系的科学，或者说，是研究桥梁水流及其边界相互作用的科学。它是普通水力学在桥梁水流中的应用和发展，也是水力学的一个重要分支。因此，桥梁水力学研究内容主要包括：水流运动、河床变形、桥梁及其附属建筑物几何特征以及它们之间相对变化关系。此外，如果桥梁河段水流遭受上下游其他水工建筑物干扰，还要研究这些建筑物与桥梁水流的相互作用。

水流运动的研究，包括水流表面形态变化、水漏斗与水丘存在的形式与状况，上游压缩与下游扩散水流的特征与边界形状，环流、回流形成条件、地点与作用范围等。除了研究水

流形态特征（现象）之外，还要进一步分析研究这些现象反映的实质，即水流内部结构。例如，动能与位能相互转化，作用力与反作用力平衡条件，流速与切应力分布，紊动与旋涡作用以及种种原因造成的能量损失等。

河床变形的研究，包括河床泥沙粒径、颗粒级配及其运动规律，河床冲刷与淤积过程，冲刷位置、尺寸、速度与发展趋向。就冲刷而言，又分天然河流洪水冲刷、路堤压缩水流产生的桥下一般冲刷、桥墩桥台与导治建筑物附近出现的局部冲刷三种。淤积主要发生在桥梁上游回水区与下游水流扩散区边缘以外区域。由悬移细颗粒泥沙沉淀造成的河床淤高，桥梁水力学一般不进行专门的研究。水库大坝上游河床淤高和下游水流下切，通常参照水利部门的研究成果加以具体处理。

桥梁及其附属建筑物的几何特征研究，主要包括：桥位、桥长、孔跨布置以及桥孔在河谷中的相对位置（偏心率）；桥墩、桥台、导流堤、丁坝、护岸、河床铺砌的平面与断面形式和基础类型；线路、水流与河床相对方向（夹角）；一河一线多桥与一河多线多桥布置方式和相对距离等等。

其他影响水流的水工建筑，系指已有铁路和公路桥、城市桥和大型专用线桥，水库、闸坝和堤防工程，引水和分洪工程，水力输送管道和高压电线跨河工程，航道与河港工程，渔业与环卫工程，城市防洪与给水排水工程，农田排灌工程等等。如果桥梁所在河段已经存在或计划修建上述一项或几项工程，必须考虑它们同桥梁水流的相互干扰，提出相应的处理办法，达到兴利除弊的共同目的。

必须指出，上述的水流运动、河床变形、桥梁建筑物几何特征以及其他水工建筑物之间的相互影响不是单一的，而是相互联系的。一座桥梁上存在的水力学问题，往往就是这几方

桥梁水力学的相关学科与研究内容和目的一览表

表1-1-1

相关学科	研究内容	研究目的
桥渡设计理论与治河工程学 水力学与工程流体力学 河床演变理论与泥沙工程学 有关水利工程与防洪工程学 工程数学与计算数学	桥梁水力学 桥渡特征 — 建筑物平面布置、几何形式，桥梁孔跨，桥长，桥墩桥台结构形状与尺寸，桥孔偏心与斜交等 水流运动 — 水量分配，纵剖面与横断面变化形状，能量转化与损失，剪力与流速分布，环流、回流与漩涡强度和范围等 河床边界 — 泥沙运动规律，冲刷与淤积位置、大小和强度，河床演变过程、速度和趋势，变形预报方法等 相关工程 — 已有桥梁、闸、坝、堤、取水工程、水力输送管道与高压电线跨河工程，航道、河港、环卫、渔业与城市防洪工程 勘测设计 — 根据试验研究成果，制订设计标准、细则、规程、公式或图表等 防洪抢险 — 根据试验研究成果，制订洪水抢险措施，确保运输安全 养护维修 — 根据试验研究成果，对已有桥渡建筑物进行检算、鉴定，制订日常养护维修计划，保证设备完好	提高泄洪能力，保证线路畅通无阻 防止水害事故，保证运输安全 节约工程投资，取得经济效益

面问题构成的矛盾统一体，应通过全面地调查分析和细致地实验研究，把其中矛盾关系理清了，桥梁水力学问题也就迎刃而解了。

桥梁水力学是一门实用性很强的学科，它的基本原理和主要内容均来自生产实践和科学实验。桥梁工程中经常碰到的水力学问题，概括起来大致分为以下五个方面：

- 一、桥梁或河道过水能力；
- 二、桥梁建筑物与河床上力的作用；
- 三、水流形态特征与内部结构变化；
- 四、水流能量分配、转化与消耗；
- 五、建桥前后河床变形过程、变化速度和趋向。

桥梁水力学的基本任务，就是研究解决这几方面的具体问题，为工程勘测、设计、施工和营运管理服务。它的最终目的是，提高和保证桥孔泄洪能力，减少并尽可能防止水害事故发生，在可能的条件下使工程投资最少，达到运输畅通、工程安全与造价合理的经济效果。

如把本节内容概括起来，可得表1-1-1。

第二节 桥梁水力学研究方法

水力学应用于各种具体工程，就产生工程特殊需要的专门水力学，如潮汐水力学、闸坝水力学、水库水力学、截流水力学、管道输送水力学、水力机械水力学、环卫水力学、计算水力学以及桥梁水力学等等。上一节谈到的水力学问题，在桥位河段水流运动中几乎全部存在，仅在具体表现形式上程度有所不同而已。所以说，桥梁水力学是水力学在桥梁工程上的具体应用和发展。或者说，桥梁水力学是水力学在桥梁工程应用中发展起来的学科。实际上，桥梁水力学的发展历史，从它诞生那天起，就同水力学发展历史紧紧地联系在一起。

从公元前2205年大禹治理黄河起，到最近完工的长江葛洲坝工程，水力学在我国有它光辉的发展历史。我国古代人民在治水、修渠、筑堰等方面积累了非常丰富的实践经验，修建了不少举世闻名的水利工程。战国时在成都平原修建的都江堰，隋代开凿横跨四省的南北大运河，曾给人类文明历史写下了光辉的篇章。

由于一切水利工程都离不开交通运输，而且道路跨河工程又同水利工程有许多类似要求，所以桥梁工程往往成为水利工程的重要组成部分。据历史记载：公元前450年左右，战国初期的魏国县令西门豹“引漳水灌邺”，在河北省临漳县境内曾开凿12条渠道，由于这些渠道与交通干线（古驰道）交叉，修建了12座跨渠桥梁，一直沿用到汉朝。又如，秦朝李冰父子在四川成都平原修建中外闻名的都江堰工程，曾在内、外江及其支流上共建桥梁七座，名为七星桥。这项工程直到今天还巍然屹立，为当地人民造福。这两个例子说明，在应用水力学基本知识和原理为人类造福方面，二者早已相互依托、彼此渗透，以达共同驯服洪水的目的。这两项灌溉工程，不但在我国水利史上占有十分重要的地位，而且早已为世界各国水利专家所瞩目，然而作为其组成部分的桥梁工程成就，却很少有人提及。

在水利工程和治河工程上，我国古代水利专家早已发现同洪水作斗争必须“顺应水性”的客观规律。跨河桥梁是一种水工建筑物，建设中当然也必须“顺应水性”。翻开我国古代桥梁建筑史，有许多著名的古桥，正是顺应水性修建的，符合水流运动规律，所以才蟠踞江河千年而不毁。例如，隋朝工匠李春设计建造的河北省赵县洨河上的赵州桥（图1-2-1），已使用1380多年，现状依然良好。同时，也有许多历史名桥，如陕西省西安附近的灞河桥，

在历时1800多年中屡建屡毁，屡毁屡建，这座桥梁的反复毁建过程，反映了人们对水性（水流运动规律）的认识过程。

公元前541、287、257年，秦国为了征战需要，曾先后三次在黄河中游的山西省临晋地区架设军用浮桥。公元274年晋朝在河南孟津、公元637年唐朝在山西平陆，也先后修建过黄河浮桥。可是，由于对黄河“善淤、善决、善徙”的水性认识不足，这些浮桥都寿命短暂，很快就被洪水冲毁了。

最能说明问题的是，前面提到的西安灞河桥的毁建史。灞河桥始建于汉朝，经过隋、唐、宋、元、明、清等七个朝代，历时1800多年，前后遭十几次洪水毁坏，进行十几次大修或重建，直到公元1833年（清道光13年），重建的桥梁（长400m、宽7m，共67孔）才比较完整地保存下来。原因何在呢？据《西安府志》记载：“桥自宋以来率六十年一成败，若有数焉”。现在看来，这个“数”就是历史洪水的重现周期，它是我国古代桥梁专家用劳动和智慧总结出来的洪水运动规律，可惜由于时代局限性，当时并不能从理论上加以阐明。

在以系统研究自然现象运行规律为直接目标的科学实验出现以后，大大促进了理论研究和生产实践向更深更广的领域飞跃，并在这个基础上诞生了不少科学分支，如桥梁水力学。水力学原理的应用，我国古代已经取得了辉煌成就，成千上万座石桥完整地保存下来，就是铁的例证。然而，还应当看到，这些成就并非完全自觉地在科学理论指导下取得的。当时人们的认识基本上还属于必然领域而未进入到自由境界。千百年来大量宝贵的实践经验，所以迟迟不能上升到理论高度，重要的原因之一，是缺乏系统的科学实验。

桥梁水力学的科学实验和试验观测，包括以下四个方面：

一、原型观测和野外调查

对桥梁所在河段，进行天然洪水现象的直接观测，或在洪水前后进行野外调查，搜集掌握洪水与河床变化的第一手材料，是进行科学研究、检验科研成果的基础，也是研究自然水流现象的最好手段。

二、室内系统试验

由于种种客观原因，野外资料往往无法取得，或取得的部分数据不能充分地反映原型现象的规律性，此时可在实验室内模拟原型水流进行系统的实验和观测。实验中先假定一部分因素不变，研究某些因素的相对变化关系；再控制另一些因素不变，观察另外一些因素的相对变化关系；最后全面揭露各个变化因素之间的内在联系，建立现象变化规律的一般性函数表达式。系统实验资料，是原型观测和野外调查资料的补充和完善，是研究现象的第二手资料，但却是认识和发现水流运动规律必不可少的基础资料。

三、相似模型试验

相似模型试验，又称比尺模型试验，是把原型水流及其河床边界特征按照相似理论和相

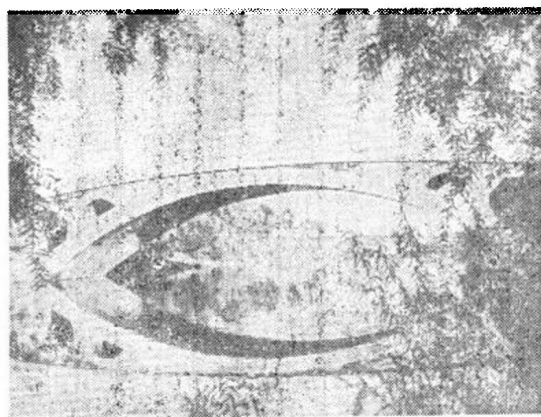


图1-2-1 河北赵县赵州桥

似比尺关系缩制成模型, 预演或重演自然洪水现象, 进行观测分析, 再把试验观测结果通过相似比尺换算, 应用到原型水流, 以解决生产实践中的具体问题。相似模型试验的目的, 在于用模型实验代替原型观测, 不证实模型现象与原型是否相似, 就不能实现预期目的。为此而进行的证实试验, 叫做验证试验。

四、概化模型试验

对类型相同、大小不等的许多条河流, 进行水力因素与河床因素的概化或典型化。选取各个相关因素的代表值进行相似模型设计, 并按相似水流条件系统试验, 取得该类型许多条河流的一般性试验成果。

上述三种试验性质和作用是不同的。系统试验不是针对某一具体河流的洪水现象, 而是研究一般水流运动的共同规律, 即研究水流现象的共性。相似模型试验是针对某条河流的具体水流现象, 研究其洪水现象的特殊变化规律, 即研究一条具体河流的个性。概化模型试验介于所述二者之间, 研究一部分或一批河流运动的一般规律, 这些河流属于相同的变化类型。

上述的科学实验和试验观测目的, 在于充分掌握水流现象在时间和空间上的变化过程, 以便剖析这些现象变化所反映的内在实质。有了足够的观测和调查数据, 就可运用流体力学基本原理和数学分析手段。建立理论的或经验的函数表达式, 明确各有关因素的相互关系。当然, 实践是检验真理的标准, 所建立的函数关系是否能符合客观实际情况, 还要在生产实践中进一步考验和订正。

一谈到模型实验, 也许有人很快会想到管流和风洞实验, 因为这两种实验在流体力学研究中开展的最早, 广为人知。其实, 只要原型现象在时间和空间上能够有规律的数量化, 且在数量化的变数之间存在因果关系, 就有模型化的可能性。所以, 不难想象模型实验在水力学中具有广阔的应用范围。

在桥梁水力学发展中, 生产实践是重要的, 没有它便没有发展基础; 但理论认识同样是重要的, 没有它便缺少灵魂和方向。在理论认识和生产实践相互作用过程中, 科学实验的纽带和桥梁作用是必不可少的。通过它, 实践经验可以得到提炼、深化而上升为科学理论; 通过它, 科学理论又可以得到应用、推广, 进一步指导生产实践。在解决工程实践碰到的桥梁水力学问题时, 单纯强调某一方面的作用都是片面的, 甚至是行不通的。

电子计算机的出现, 不但极大地提高了人类认识与改造世界的能力, 而且广泛渗透与影响人类社会各个领域。随着电子计算机在桥梁水流与河床变形计算中的应用, 70年代初又出现一种新的理论分析手段——桥梁水流数学模型, 而把传统的水流模型叫做物理模型。由于数学模型经常需要物理模型提供计算条件和检验标准, 所以近来在解决具体生产问题时, 把二者结合成数学物理模型, 或称混合模型。这是值得重视的新动向。

第三节 编写原则与章节安排

本书编写的首要原则是, 在内容上立足国内的科研成果, 着重论述桥渡冲刷学术讨论会议(1964年, 北京)、大中桥孔研究资料汇总会议(1977年, 南宁)以及大中桥水工水文学术讨论会议(1983年, 武汉)上提出的报告、试验和调查分析成果, 达到总结过去、立足当前、面向未来, 把我国桥梁水力学理论和实践水平提高一步。

本书编写的另一原则是，在简要阐明传统理论和方法的同时，全面介绍国内外70~80年代的成果以及正在发展中的新理论和新方法，达到新旧结合、洋为中用的目的。

理论与实践结合，是编写本书的第三条原则。作为桥梁水力学理论基础，在第二章和第七章进行了水流一般原理介绍，在第五章又补充介绍河床变形与桥渡冲刷的基本知识，并在第八章介绍了水流相似理论和模型设计方法。第三、六两章系桥孔设计中常用的水力计算方法。设计中常用的计算方法和经验公式，分别插入各个章节。

在水力学发展中，描述水流运动的一般规律或理论公式，都是在一个个具体问题得到解答之后，总结概括出来的。所以，本书除在各章节介绍桥梁水力学一般计算方法外，还在第四章专门介绍特殊条件下水力计算方法，实现一般与特殊结合的第四个编写原则。

本书掌握普及与提高相结合的原则。主要对象是，从事桥渡设计、施工、养护管理和科研工作的技术人员以及有关专业的大学生、研究生和中等专业学校的师生。在他们日常工作与学习中，既可从本书中找到一般设计手册中常见的公式和图表，又可在应用这些公式和图表时，加深理解，明确物理概念，了解国内外近年来科研成果及其发展方向，达到知其然而又知其所以然的自由境界。

限于水平，在编写过程中，笔者经常感到力不从心，但每想到我国古代桥梁水力工程成就早已举世瞩目，而当代科学实验和理论分析水平也不应当落伍于世界潮流，作为从事这方面工作的成员理应全力一搏。正是在这一精神的鼓舞下，经过三年努力，今天本书终于同读者见面了。

为了共同目标，书中谬误之处，欢迎各界同行专家批评指正。

第二章 桥位河段水流特征

水流与河床泥沙长期的相互作用，塑造了河床的形态，形成了河道的水力特征。修建桥梁以后，桥梁墩台、导流调治建筑物等压缩、干扰了水流，在桥位上下游附近的河段，引起水流和泥沙运动一系列变化。在进行桥梁水力计算与河床冲刷计算之前，必须对这种人工压缩水流特征有比较清晰的了解。

第一节 桥位河段水流分区

明渠断面突然改变（扩大或缩小）的过渡段水流特征，在分析方法上，给桥位河段水流分析工作提供了范例和启示。以后几节将在明渠过渡段水流已有分析成果的基础上，进一步引深讨论桥位河段水流运动的基本特征，这里首先介绍桥梁河段水流分区。

一、水流分区问题的提出

桥位河段水流的变化特征，随其所处的具体位置而不同。图2-1-1为桥位河段水流概化模型上实测的水面形态特征图，模型宽8.40m、长26.60m，是根据57条天然河流野外调查资料分析汇总表，按水流相似原理设计出来的。从图2-1-1上水面随位置变化的趋势看来，无论沿纵向（顺水流方向）或是沿横向（垂直水流方向），水面高程都在变动，只是变动程度大小不同、有缓有急而已。

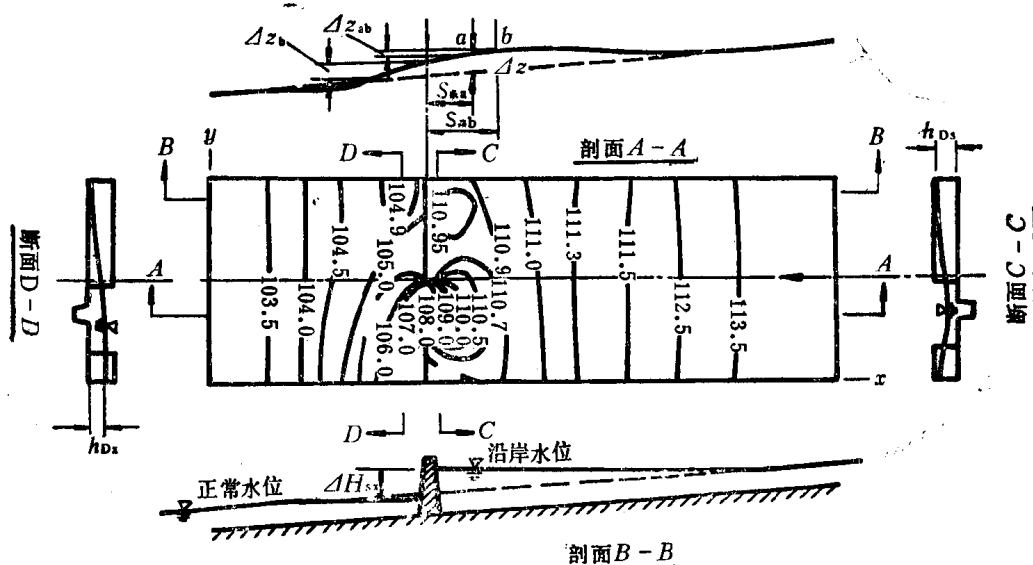


图2-1-1 桥位水流水面变化状态

在图2-1-1中，平面图上的曲线表示水面等高线。如顺主槽方向取横坐标 x ，垂直 x 方向为纵坐标 y ，则水面高程随位置而变化的函数关系式为 $z = f(x, y)$ 。在主流中心线上， $y = y_A$ ，断面 $A-A$ 表示水面沿中心线的变化情况，水面升高值 $\Delta z_a = \Delta z_b$ ，为桥梁上游壅水高度。沿水流边壁， $y = y_B$ ，断面 $B-B$ 代表水面沿边壁的变化情况，图示水面壅起最高处在路堤上游一侧，这也是路堤上游最大壅水高度所在处。另外，在 $x = x_C$ 和 $x = x_D$ 处，横断面 $C-C$ 水面从两端向中心凹陷， $D-D$ 水面从两端向中心凸起，显示出上游水漏斗和下游水丘的特征。

从图2-1-1的平面、纵剖面 and 横断面总体趋向看，不仅水面随位置变化是非常明显的，其他水力因素（比降、水深与流速等等）也相应随之变化。在水力计算中，主观地假定某处水位不变或某段水面是水平的，这样处理问题显然是与客观实际情况不符。在图 2-1-1 中还可看出，各处水位变化之间又有差别，例如纵剖面 $A-A$ 和 $B-B$ 、横断面 $C-C$ 和 $D-D$ 之间以及它们自身的变化趋势，都存在显著的差异，这种差异（现象）具体地反映了水流内部结构不同的实质。为了透过现象认识水流运动实质，在分析计算中，必须针对不同位置的水流具体情况，采取具体的处理措施。解决所述问题的较好方式，是根据平面上水流流动特征，把桥位水流划分成若干区域，然后按照生产实践需要和问题性质，分别拟订具体的计算办法。

二、已有的水流分区方法

桥位水流分区，是由俄国工程师弗罗洛夫于 1908~1912 年首先提出的。当时弗氏曾对伏尔加河三角洲多座桥渡进行了实地观测，对过桥水流水面形态作了分析研究，最后把水流划分为四个区域：上游水面壅高区和水漏斗区；下游水丘区和扩散区（图 2-1-2）。同水面变形相适应，离桥梁上下游较远处河床发生泥沙沉积，而在桥址附近则发生河床冲刷。桥下水位可能高于、等于或低于建桥前的天然水位，此取决于水流颈口开始的扩散段上的摩阻比降与天然比降之差（ $J_w - J_0$ ）以及颈口流速水头与扩散段终点断面流速水头之差的相对大小。在桥梁上游附近的漏斗进口与下游水丘上，水位较天然水位大大抬高；过了水丘，再次降低；此后，逐渐拉平（增高）到天然水位。

弗罗洛夫的水流分区法，是依沿中心线的纵剖面水面与河底变化情况进行的，没有计及路堤上下游侧水面横向变化特征，且限于当时水力学发展水平，对纵向水位变化的计算没有也不可能提出具体方法。

弗罗洛夫的水流分区法，是依沿中心线的纵剖面水面与河底变化情况进行的，没有计及路堤上下游侧水面横向变化特征，且限于当时水力学发展水平，对纵向水位变化的计算没有也不可能提出具体方法。

劳尔森研究了平原宽滩桥址处水流平面流动，把水流也分为四个流区，如图2-1-3所示。劳氏对各个区域水流运动特征描述如下：

I 区：位于桥梁上游（但不靠近桥孔），水流特征由纵向壅水和横向汇流组成。前者表

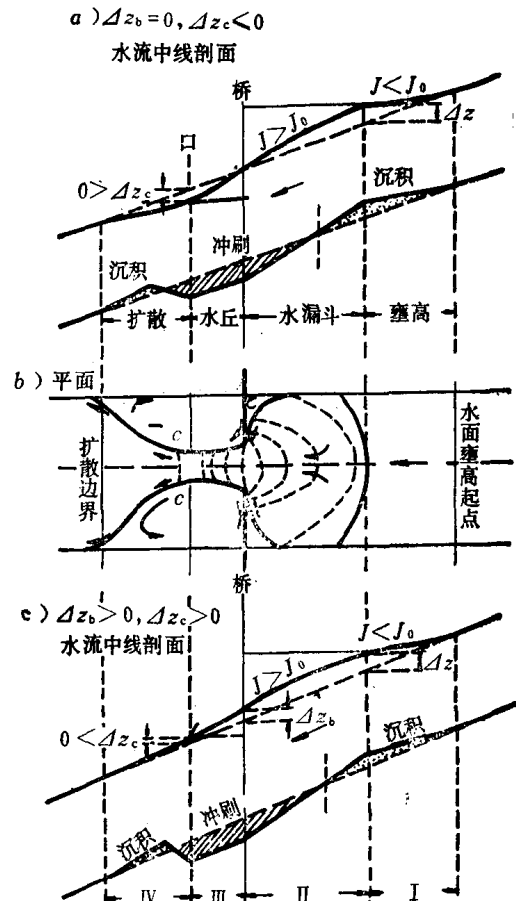


图2-1-2 弗罗洛夫水流分区图

现为壅起的最高水面向上游缓慢地降低到远离桥梁的正常水深；后者反映水流从洪水河滩横向汇入河槽或临近河槽区域。根据这一特征，劳氏认为 I 区或许还可细分成两个小区，两个小区中的流动状态尽管对水流纵剖面有相反的影响，但水流现象在许多方面是类似的，而且在空间上可能是重叠的。

II 区：紧靠桥梁上游并跨越桥孔，水流呈压缩性水流，近似于孔口二元无旋流型。实际上，该区水流既不是二元的，也不是无旋的。行近桥梁的水流流型，因受桥头路堤的压缩，显著地受到扭曲。在相当短的流段内，II 区的能量损失大于正常水流损失，而且由于水流紊动和喷射作用，部分能量消耗在扩散性的下一个流区之中。

III 区：是这样的流区，这里由压缩水流产生的喷射扩散，因素动和混合而加剧。同时，由于巨大河床切力产生高速度水流紊动和旋涡运动，该区能量损失大于任何一个流区的损失。必须强调指出，通常因实验室模型宽深比不能充分的大，所以一般水槽试验水流图仅反映 II 区和 III 区的情况。

IV 区：位于桥位下游河段上，情况同 I 区恰恰相反，水流从河槽沿不同方向涌向河滩，为了克服横向水流运动阻力，就需要有一个相应的横向比降，才能使沿路堤下游侧并平行于路堤坡脚线流动的水流顺利地达到泛滥边界，最后在桥梁下游某一距离处重新恢复正常流态。如果河槽岸坝不明显，且洪水河滩又不太宽阔，则正常水流流态完全可能出现在 III 区，这样就使四个流区变成三个流区了。

III 区和 IV 区水流中都存在水流扩散现象，一方面是紊动的旋涡水流混合支配着扩散过程；另一方面，扩散水流运动受到阻碍，形成显著的压力梯度，使泛滥边界滩地水面高程低于主流中线上的水面高程。

在河流桥位处，河床冲刷和泥沙堆积可能成为影响水流运动的重要因素，然而，在水流分区中作者并未加以考虑，原因是桥下河床冲刷固然可以减轻桥孔对水流的压缩，降低上游水位高程，使壅水高度减小。在岸坝较高、滩地植物茂密之处，冲刷也能妨碍水流扩散，使桥下断面及其上游附近壅水增高。上游与下游的河床淤积对过桥水流水面形态的影响，同样是相互矛盾的，无论是河床冲刷或是泥沙淤积，只能简单地改变河床几何条件，均不会改变包括壅水在内的水流实质。

根据畅通水流断面比能 $E = h + \frac{v^2}{2g}$ 的变化特征，罗坚布尔格在平面上把过桥水流分成三区（图2-1-4），各区的水流运动情况与弗罗洛夫的描述有所不同。

I 区：位于桥梁上游，在建筑物影响所及的上游起始断面 a 和圆柱曲线过水断面 $H-B$ 之间的路堤上游侧 H 点形成最高壅水。在桥孔之前直线水流流束上的壅水峰水面高程，通常低于 H 点的高程。该区比能 $h + \frac{v^2}{2g}$ 沿程增大，从天然条件的 a 断面 E_0 逐步增加到圆

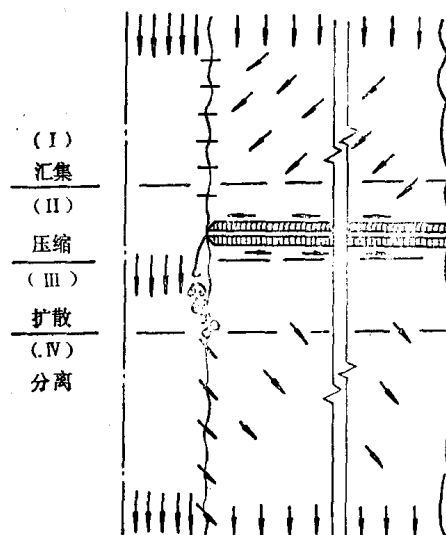


图2-1-3 劳尔森水分分区图

柱曲线断面上的 E_M ，所以在此区中 $dE/ds > 0$ (s 为流程中心距离)，与此相应的水力摩阻能量损失以及沿流束的能线梯度比水流受建筑物压缩前的要小。

II区：也位于桥梁上游，处于圆柱曲线断面与桥孔最大压缩水流断面之间。在此区中，水流主要特征是平面上受压缩，断面比能从断面 $H-B$ 上的最大值沿程向下减小，所以这里的

$\frac{dE}{ds} < 0$ 。II区中的水力摩阻能量损失比天然条件下损失为大，而且能线梯度大于天然水流比降 J_0 。在大多数情况下，I区和II区中旋涡水流所占的范围不大，仅在路堤终点和导流堤后面出现范围较小的旋涡运动。因此，II区水力阻力比能损失可以按一般摩擦损失计算。

III区：位于桥梁下游，在最大压缩断面到水流恢复天然状态的终点断面之间。在此区中，畅通水流边界两侧形成平面上范围较大的回流区域，回流区中水流平静，流速很小。该区域的水力摩阻能量损失大于天然水流的损失，同II区类似，III区中 $\frac{dE}{ds} < 0$ 。然而，在确定水力摩阻能量损失时，与回流有关的能量损失比II区具有更重要的作用。

I、II两区的分界线是圆柱形过水断面，同时它也是水漏斗的进口边缘线，在该分界线上 $dE/ds = 0$ ，即每条流束上的比能均达到了极大值。

以上介绍的三个水流分区方法，归纳起来可概括为以下三点：

1. 所述分区方法，均是以桥孔范围内纵向畅通水流，或者是以主流中心线纵剖面形状作为划分对象的，关于路堤上下游水流以及沿路堤流动的水流都没有涉及。因此，这些分区方法，无论分成三区（罗坚布尔格）或四区（弗罗洛夫和劳尔森），均属于纵向水流分区性质。三个方法的区域划分方式相同，但是各区的分界线位置和形状却不完全一样。弗氏和罗氏认为，II、III区的分界线是桥梁轴线断面，而劳氏却把下游水流颈口断面作为这两个区域的边界。弗氏把水流颈口断面当作III、IV区的分界，劳氏却用主体水流有无向河滩显著分离的条件作为区分这两个流区的标志。值得注意的是，罗氏把圆柱曲线断面 $H-b$ 定为I、II区的边界，这是具有特殊意义的。

2. 劳尔森在分析密西西比河天然桥渡观测资料中指出，在宽滩河流中，洪水相当大的一部分要从河滩上通过。跨越河谷的路堤好象一座壁障，迫使滩地水流必须从两侧进入桥孔。为了估算路堤上游水流汇集数量，劳氏引用了汇流率（Accretion rate）的概念。汇流率 $Acr = \Delta Q / \Delta L$ ($m^3/m \cdot s$) 为单位长度上从两侧或一侧河滩向河槽汇入流量的多少。同上游水流情况相反，通过桥孔的下游水流必须从主槽向河滩上分离、扩散。为了估算单位长度上水流分离的多少，劳氏还采用了分流率（Abstraction rate）的概念，分流率 $Abr = \Delta Q / \Delta L$ ($m^3/m \cdot s$) 的计算方法与汇流率类似。

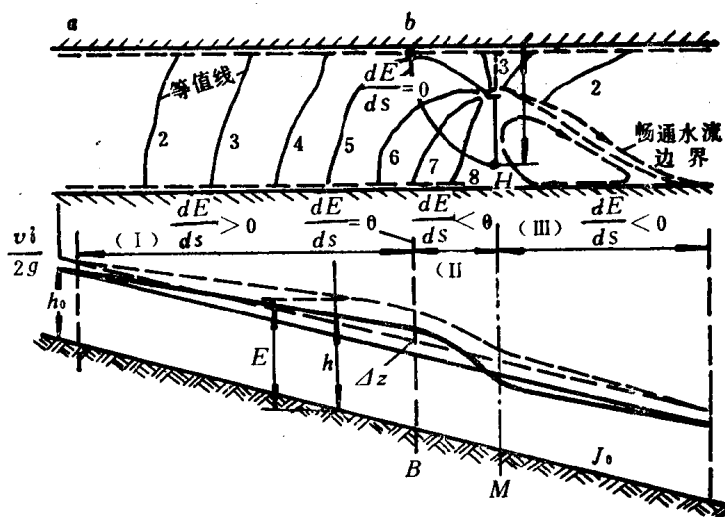


图2-1-4 罗坚布尔格水流分区图

劳氏还指出,从现有桥梁实地观测中发现,桥址断面及其下游附近均能发生水面壅高现象。劳氏提供的密西西比河上桥梁壅水典型剖面如图2-1-5所示。

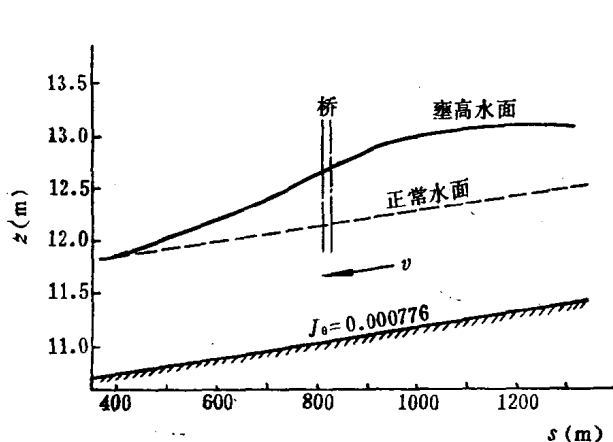


图2-1-5 密西西比河桥梁壅水剖面

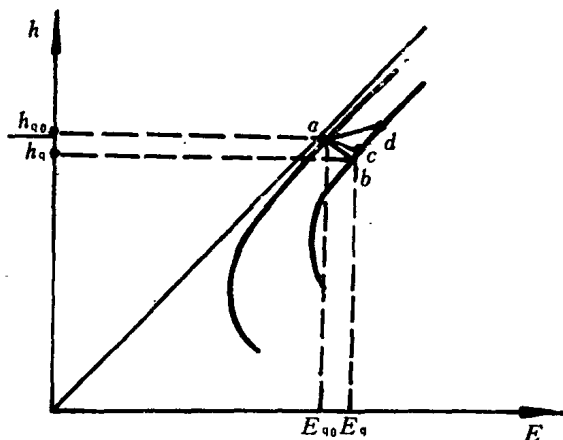


图2-1-6 桥下断面 $E = f(h)$ 曲线图

3. 罗坚布尔格在流区划分上, 引用断面比能 $E = h + \frac{v^2}{2g}$ 沿程变化的概念, 把 $\frac{dE}{ds} < 0$ 或 > 0 作为确定流区边界的条件; 在最高壅水断面 $\frac{dE}{ds} = 0$ 处, 从物理概念上对流区边界条件给出了新的定义。不过, 罗氏利用比能曲线对桥址断面水面高程所作的分析, 却提出了一个很有趣的问题, 值得进一步讨论。

大家知道, 水流运动是遵循水力摩阻中比能损失最小的方式进行的。根据这一原则, 罗氏认为压缩断面水流比能的大小, 将由桥断面水流比能与桥孔范围内天然水流断面比能之差 $(E_q - E_{q_0})$ 的最小值所确定。因为此时桥梁下游扩散段上水力摩阻中比能损失最小。由图2-1-6可见, 在 $\triangle abd$ 中, $ab < ac < ad$, 故 ab 距离最短, 它相应于最小的比能差 $(E_q - E_{q_0})$ 。在此情况下, $h_q < h_{q_0}$, 即压缩断面的水位低于相应的未压缩水流的水位 (图2-1-6)。罗氏的结论恰好同劳氏的分析结果 (图2-1-5) 是相互矛盾的。

三、桥位河段水流分区说明

为了更全面地揭示桥位水流形态变化规律, 并针对不同区段水流特征拟订相应的计算方法, 本书作者根据多年从事桥渡水流试验研究工作经验, 参考已有的水流分区资料, 提出桥位河段水流新的分区方法——两区四段法, 或称为八区段法。

在图2-1-7中, NN' 为桥梁水流主流中心线, 自桥台台面平行 NN' 向上下游引直线 MM' , 则 $NN'M'M$ 所围成的区域为 A 区; $AA'M'M$ 所包围的区域为 B 区。换句话说, A 区为桥孔宽度范围内上下游水流畅通区; B 区为路堤宽度范围内上下游水流绕行区。在桥头附近, B 区上游水流借道 A 区绕过桥台进入该区下游。由于水流绕行中 A 、 B 二区相交 (重叠), 两区水流在相互挤压和混流中通过桥下, 使桥台附近河床发生剧烈冲刷, 并形成桥址下游最大压缩断面 FK , 该断面通常称为颈口断面。 A 、 B 两区水流各分为四段小区, 其划分方式, 在 A 区沿畅通水流中心线流束 NN' 上进行。根据水流纵剖面形态特征, A 区的四段或四个小区为: A_I (壅高) 区、 A_{II} (压缩) 区、 A_{III} (扩散) 区和 A_{IV} (恢复) 区。这样划分同劳尔森的分区法是类似的。 B 区划分, 沿边缘流束 AA' 进行。四个小区是: B_I