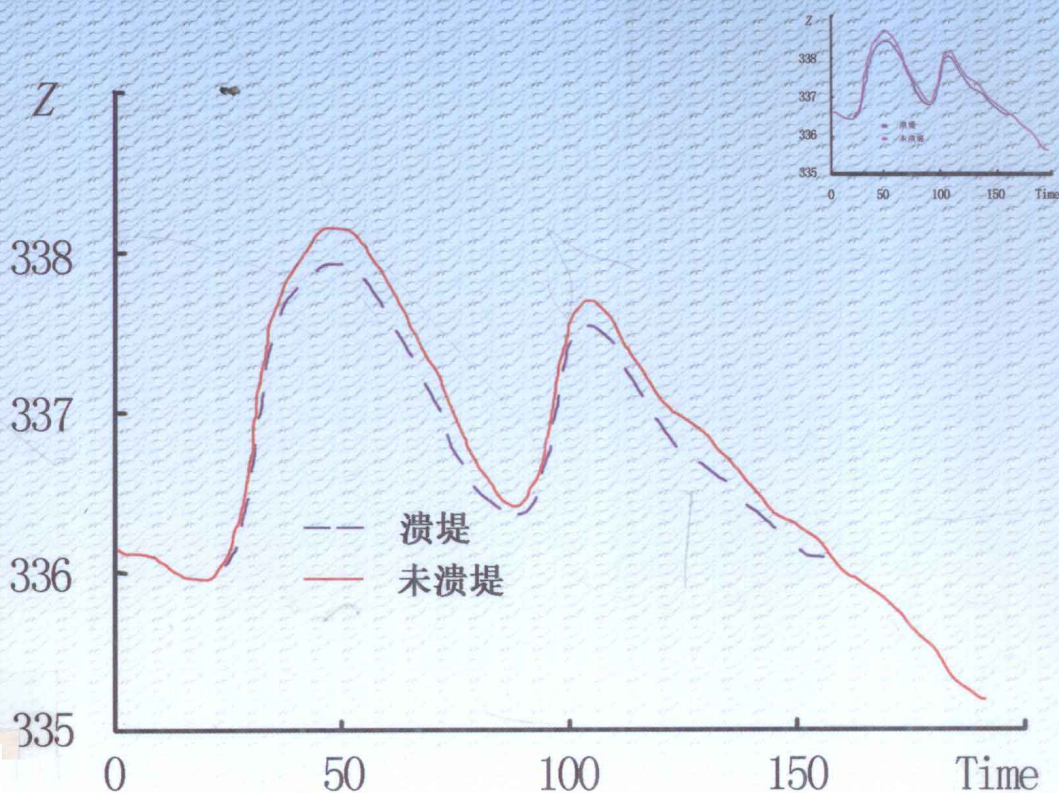


河渠非恒定流

及其物质运输的数值模拟

冯民权 赵明登 郑邦民 编著



科学出版社

河渠非恒定流 及其物质运输的数值模拟

冯民权 赵明登 郑邦民 编著

西安理工大学环境工程学科陕西重点学科建设项目资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

河渠非恒定流是现代水力学的重要研究内容之一,也是生产实践中经常遇到的问题,如河流洪水演进、河口潮流、水电站引水和尾水渠的波动、船闸充泄水对上下游水流造成的影响、污染物输移扩散等。电子计算机的出现与发展使求解复杂的非恒定流问题成为可能。

本书的基本内容包括波、河渠非恒定流基本方程、河渠非恒定流处理方法、河渠非恒定流数值解法,同时给出应用方面的各种计算实例,并对特殊的非恒定流问题与河口潮汐进行论述。本书的内容包括河渠非恒定流的基本原理和数值模拟方法,同时包括编者的科研成果,如温差热排水、溃坝洪水等。

本书可供河口和海岸整治、农田水利、水力发电、水运、防洪、环境工程等专业的科研、设计及管理人員阅读,也可供高等学校相关专业的教师 and 研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

河渠非恒定流及其物质运输的数值模拟 / 冯民权, 赵明登, 郑邦民编著.
—北京: 科学出版社, 2012.2

ISBN 978-7-03-033291-2

I. 河… II. ①冯… ②赵… ③郑… III. 渠道流动: 非定常流动-数值模拟 IV. TV133.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 004244 号

责任编辑: 罗吉尚 雁卜新/责任校对: 刘小梅
责任印制: 赵博/封面设计: 许瑞

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社编务公司排版制作
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 2 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2012 年 2 月第一次印刷 印张: 20

字数: 383 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

冯民权、赵明登、郑邦民三位教授通力合作的新书《河渠非恒定流及其物质运输的数值模拟》即将问世，这是一件可喜的事。

前两位编者都是郑邦民教授的弟子。上溯 56 年前，当风华正茂的郑邦民从清华大学毕业来到刚成立不久的武汉水利学院水力学教研室时，著名学者姚琢之教授是这里的第一代掌门人。姚琢之英年早逝，接下来是徐正凡教授领导着几十位生气勃勃的年轻人。尽管 1871 年已经提出一维圣维南方程，但百年以后，徐正凡教授在这里坚持推动明渠非恒定流的研究。

徐正凡教授特别关注非恒定流中一个没有深究过的假定，即阻力本构问题，他质疑将均匀流阻力规律引申到非恒定流的正确性。然而，限于当时的设备条件，未能展开实验研究。1958 年底，钱学森教授讲授水动力学课，在讲到洪水波时提到这个问题，他认为：“计算中阻力用了定常流的结果，原因是水流变化不是太快，是几个钟头，而不是几秒。”1981 年，专业面很广、有许多重要贡献的著名水文气象学家 Brutsaert 教授表示，他弟弟在撰写博士学位论文时曾对此做过实验研究，但并未发现相反的情况。看来，徐正凡教授的忧虑没有成为实际问题。快速变化的往复流动会形成 S 形速度剖面，均匀流阻力假设是一个成功的逻辑推广例子。

在华人中，不乏在非恒定流研究中做出贡献的学者。林秉南教授最先提出特征差分方法，易家训在分层流研究中做了开辟性工作，出生在武昌同仁医院的梅强中教授如今是海洋波动研究的泰斗。

1948 年，Courant 和 Friedrichs 出版经典名著《超声速流与激波》(*Supersonic Flow and Shock Waves*)，后来这本书一再被重印。这本书阐述“浅水理论”：在“浅水”意义下，空气动力学和水动力学的数学形式完全一致，物理现象也相互对应，这就是所谓“水-气比拟”。超声速气流对应于急流(超临界流)，亚声速流对应于缓流(亚临界流)，马赫数对应于弗劳德数，声波的传播速度对应于河渠中小扰动波的传播速度，激波对应于水跃，这是完美的相似。这样，将率先发展起来的空气动力学方法移植过来，解决水动力学问题就成为可能。1951 年，美国土木工程师学会会刊发表《明渠高速水流论丛》，在理论上介绍空气动力学中已经熟知的小扰动波传播、特征线、激波极线、玻尔兹曼椭圆等基本概念以及手算和图解的方法，并且介绍这些方法在平面二维渠道扩散段、收缩段和弯道设计中的应用。水-气比拟的受益方并非是单向的，1958 年，钱学森教授在讲授水动力学时说，对于大攻角薄翼和较粗的细长体，空气动力学的计算方法不是很准。“有人因此想利用水流现象来进行高速气流的模拟实验。”他举例说明，如果水深为 5cm，浅水波速将是

0.7m/s, 即使马赫数(弗劳德数)等于 4, 水流速度也不过是: $4 \times 0.7 = 2.8\text{m/s}$ 。这比较容易办到, 但在超声速风洞中就成为大事。不足的是, 空气动力学中绝热指数对双原子气体恰好是 1.4, 而对应水流中则为 2, 因此这种做法只在工作初期有用。钱学森说: “它只能定性, 不能定量。”

河渠非恒定流是浅水问题的一个方面, 广义浅水问题还包含海啸、海洋近岸流甚至大气层中的流动。当发达国家将更多的注意力转向后者时, 河渠非恒定流的应用研究在中国却方兴未艾。中国缺水, 且水量在时间和地区的分配上极不均衡。中国自古以来就深受洪水之害, 1975 年 8 月板桥等大型水库连锁垮坝更是惨烈之痛。中国主要河流的梯级开发是为了能源, 更是为了控制洪水和调节径流。南水北调工程总干渠本身就是巨大的、长距离的、跨流域重新分配水量的人工河流。所有这些河渠都伴随各种类型的水工建筑物, 河流与建筑物的作用相互耦合。这些情况决定了中国有着大量的、特殊的、有待解决的河渠非恒定流实际问题。此外, 黄河的高含沙水流和冬季冰塞、冰坝, 长江的滑坡、泥石流, 南水北调总干渠的冬季结冰等重大问题, 都不是单相水流问题, 而是有着可动边界或相变过程的液体-固体两相非恒定流问题。进一步, 众多工程的兴废对未来全国乃至邻国环境的长期影响, 也是非恒定流研究必将面临的重大课题。非恒定流研究在现在和将来都是大有用武之地的。

河渠非恒定流的理论研究多年来似乎没有多少令人印象深刻的进展, 由于方程的非线性和区域几何形状的不规则, 一般只好用数值求解。半个世纪前, 主要借助手算, 受到很大限制。随着电子计算机的飞速发展和普及, 计算速度和容量极大提高, 过去无法想象的具有庞大计算工作量的问题, 已经可以借助计算机轻易解决, 各种各样的计算方法和离散格式应运而生。其中, 首先是手算时代发展起来的特征线方法和差分方法。

特征线在物理上是小扰动波传播的路线。在数学上, 特征线上原来的偏微分方程变成常微分方程, 这当然比偏微分方程好办。但是, 不能事先知道特征线的形状和位置, 要随着求解的过程才能逐渐得出, 这会带来麻烦。并且, 由于双曲型方程天生会产生强间断, 即激波或水跃, 对于脱体激波或移动水跃, 如溃坝波和河口涌潮, 无法事先知道强间断的位置, 特征线在这里会挤成一堆, 不适合激波捕捉。随着各种各样更有效的方法出现, 特征线方法已经较少应用, 但在其他方法里都可以看到特征线方法的影响, 如迎风格式。

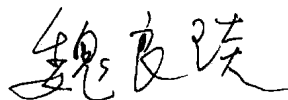
在各种方法中, 差分方法的研究最深入, 而且几乎所有其他方法如有限元方法、谱方法等都可以化为对应的差分形式。遗憾的是, 这些格式的误差和稳定分析主要借助线性方法, 不完全适合非线性浅水流动, 而非线性数学分析本身尚在发展之中, 远水不解近渴。因此, 数值方法并非一部万能解题机, 可以到处套用, 而是要结合实际问题具体处理, 如减小时间步长, 否则可能得不出结果或者得出

虚假的结果。编者在这方面的努力值得称道。

编者提到由众多作者参与、1975年出版的 *Unsteady Flow in Open Channels* (《明渠不恒定流》)第一卷中译本(林秉南等译,1987),著名的非恒定流学者 J. A. Liggett 写了其中重要的三章,从建立方程到数值解法,但是在我 1981年起与 Liggett 合作的两年中,除了讲课涉及非恒定流以外,Liggett 似乎不再进行这方面的工作,而是转向边界积分方程法(BIEM,即边界元方法)的研究,主要的应用是多孔介质渗流,目标是与压裂有关的流体-固体耦合问题,这与河渠非恒定流相去甚远。除了康奈尔大学,其他如明尼苏达大学、艾奥瓦大学等原来以水利闻名的大学似乎也把主要兴趣转移到环境和海岸工程方面。

该书反映此后的进展以及不同数值方法在中国的广泛应用,包括洪水演进、溃坝波、河口潮流、河道冲淤、温排水、水库水质、电站引渠及船闸中的波动等丰富内容,这是编者亲身工作成果的总结。编者对数值计算中的相容、收敛和稳定性问题采取“从实际应用中提出并在实际中解决”的途径,因而对类似的实际问题会更加实用,这是编者工作的一大特色,无疑会引起与此有关的工程界人士和学者的极大兴趣。

中国有漫长的海岸线和较多的海洋岛礁,随着中国的高速发展和融入世界,中国对海岸港口建设、海洋能源开发、风暴潮、海洋环境与国家安全将会有越来越高的要求,以浅水为标志的非恒定流研究必将迈上新的台阶。中国的空间研究正在大步前进,以月球探索为基础,进一步走向深空。火星沙尘暴、木星大红斑已经有当做浅水问题的探索性研究。随着国力和研究水平的不断提高,中国定将为全人类做出重大贡献。



2011年9月23日

前 言

河渠非恒定流不论在理论、方法上，还是在应用上，都是现代水力学的重要研究领域，河渠非恒定流涉及水利工程的所有方面，如河流洪水演进，河口潮汐，水电站引渠和尾水渠的波动，船闸充放水时水位波动，暴雨洪水对火电站、核电站的影响，溃坝水流，分滞洪区，大型河网，水沙运动，污染输移的环境问题，热对流扩散，等等。

随着电子计算机的出现与发展，河渠非恒定流是应用最早、发展最快、成效最多的领域。

目前还没有一本对非恒定流从理论到应用做详细介绍的专著。在《明渠不恒定流》三卷中，只将第一卷译出；第二卷为应用领域，可惜未能出版；第三卷为注释文献。在其他书中，只有个别章节论述非恒定流，既未反映近期发展，也未反映国内外大量工作。

希望给出一本能反映近半个世纪以来河渠非恒定流基本原理和多种方法及广泛应用进展方面的书，以供有兴趣的读者和工程技术人员参考。

本书的内容有以下特色：

(1) 从物理学波动概念入手研究，河渠非恒定流是浅水长波，并且是有输运流量的移动波、变位波，既有连续微幅波波形，也有间断的特点。

强调河渠非恒定流是一种波动现象，它自然具有信息传播特点，存在着依赖区间和影响区域，从而得到特征线概念以及“迎风”(Upwind)特性，差分计算中出现“迎风”“上风”格式就很自然。一维是非恒定流基础。本书主要关注二维、三维，尤其是对平面二维问题应用叙述较多。它不是特征线，而是特征锥。非恒定流二维波的传播非齐头并进。浅滩与深槽不同，河中传得快，边岸传得慢，横波波速引起岸边掏刷等，这些在早先书中都是未曾论及的。

(2) 应用广泛，包括二三十年来各领域实际运用中的问题。

在河道、水库非恒定流方面，从一维到二维乃至三维，包括长江洪水、芜湖江段桥渡冲刷、黄河北金堤滞洪区洪水演进、某供水水库(400 万 m^3)失事对核岛影响、某核电站暴雨洪水评价、海河口潮汐流、珠江口八大口门洪潮交汇、大型河网计算等。我们采用一般的分级解法，解大型稀疏阵(Sparse Matrix)，采用基于图论的关联矩阵和邻接影响矩阵的 Monte-Carlo 方法，成果已用于珠江防洪系统。

溃坝洪水中的间断波、渭河溃堤、澜沧江梯级溃坝、葛洲坝溃坝，既有山谷段，也有二维平坝区，还有大江、宽河大基流，流量级达 30 万 m^3/s 至每秒百万

立方米,包括瞬间全溃与局部溃、土石坝渐溃。编者将其与各家经验公式及物理模型实验结果做了对比。

火电、核电热污染温度流是二三十年来发展的新课题,我们做了平顶山姚孟电厂有限元计算,九江火力发电厂、汉川电厂各种情况计算。方法包括有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)、有限体积法(FVM)、随机游动法(RWM),与中国水利水电科学研究院、广东省水利水电科学研究院冷却水物理模型实验相互验证。

研究包括黄河小浪底及长江水沙运动、三峡船闸充放水非恒定流、三峡库区污染物扩散、黄河河曲段冰凌生成的水力热力学模拟等。

(3) 流体中物质传输是普遍存在的物理现象。物质是广义的,包括质量(浓度、含沙量)、动量或能量(温度),它们可以是标量、向量或张量,受制于对流扩散方程,对流项具有波动方程特性,扩散项带有椭圆形方程特点。一般的抛物型方程又称发展方程,计算方法上这些特点都要顾及。

求解方法包括有限差分法、有限元法、有限体积法、有限分析法(FAM)、随机游动法等。有限差分法只求离散网格点上的值,区域(单元)内点的值是不知的。有限元法是给出单元内点的插值近似解。有限体积法要给通量(Flux)以一点假设,又叫通量体积法(Flux Volume Method)。有限分析法是结合分析解、单元内解析解,在单元边界及总体边界上近似的一种数值方法,用它解过 2-D、3-D 问题,但随之发现当雷诺数 Re 高时,其权系数即丧失自动“迎风”性,变为简单迎风。如果 3-D 不采用标准 27 点格式,2-D 不采用 9 点格式,如混合有限分析(19 点、21 点等),则斜迎风(Skew-upwind)不能处理。为此,我们对 FA 权系数进行改善。在 2-D、3-D 计算中采用加权迎风式,保证其自动迎风性。原来用有限分析法, Re 上千、上万,就不行了。随机游动法对物质运动给予概率描述,不需要计算整个求解区域,能适应复杂边界条件,计算结果比较稳定。事实上,采用网格雷诺数 $Re-\Delta$,如用紊流 0.05 ~ 0.2,将 ν 加大 10^4 倍,水流就变为假紊流、真层流。我们较早采用 FEM,但发现,由于时间也是均匀的,FEM 占不到什么便宜。目前,在非恒定领域计算中,仍以 FDM 为主流,其余都是由 FDM 延伸、演变出来的。随着电子计算机的应用,Lagrange 法(质点法)受到重视。我们在二维扩散中用 3×10^6 个质点,在泥沙群体沉降中用 10^{12} 个质点,对其进行分布模拟。

本书叙述河渠非恒定流多方面的理论问题、方法问题和多领域的应用问题。非恒定流所遇到的有关问题,几乎都能在本书中找到。本书提出许多新发现与新见解。本书物理概念与数学严谨性并重。我们对适宜性、相容性、收敛性,不从概念到概念,而是从实际应用中提出并在实际中解答。在小浪底水库洪水中,上游给流量过程,下游同时给水位、泄流量,发现边界条件提得不适宜。在北金堤计算中,就平面二维浅水模型而言,并不如一些人所说,散度型就是守恒型。在 10 天洪水过程中,可以差到 2 亿 m^3 ,水量是不守恒的。经过我们改进,精度达 5%。

另外,并非如 Partankar 所说,非用交错(Stagger)网格,才能保持计算稳定。普通网格、交错网格均可。“算子分裂”格式是有条件的 M.B.Abbott 格式。在计算上,稳定性出现波动。调整松弛因子后,波动有所改善,但精度出现问题。Ritter 溃坝理论解只是一种简单概化模拟,我们发现溃坝初瞬几个 Δt ,由于水流是急变流,其压强分布不符合直线分布(静压分布),溃口水深不等于 $\frac{4}{9}h_0$,流速也非 $\frac{2}{3}\sqrt{gh_0}$,这样就限制 Saint-Venant 方程的应用范围。

河渠非恒定流历史有几百年,随着电子计算机的产生,近半个世纪可以说是其发展最快、应用最广的时期,但远未迈入成熟阶段,还有大量工作可做。

感谢魏良琰教授为本书作序,研究生田志静、杜献梅、张海鸥、董丽丽为本书打印、整理付出辛勤劳动。本书参考有关书籍、论文、报告等,在主要参考文献中尽量注明著者、出版年、文献名、出版机构等著录项目,有些著录项目难以列全。很多文献缺失,在参考文献中无法列出著录项目,只能在正文中以著者-出版年的简单形式表明出处。在此,编者向所有文献作者表示感谢。感谢科学出版社罗吉、尚雁、卜新等编校人员为本书出版所做的一切工作。

欢迎读者对书中不足之处批评、指正。

编 者

2011年10月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 河渠非恒定流研究目的与意义	1
1.2 河渠非恒定流的特点	2
1.3 河渠非恒定流的主要研究方法	4
1.4 国内外研究进展	5
1.5 我们的认识和工作	9
第 2 章 关于“波”	13
2.1 波的特性、要素与分类	13
2.2 明渠浅水波波速	15
2.3 浑水中的波速	16
第 3 章 河渠非恒定渐变流的基本方程	18
3.1 连续方程(水量平衡方程).....	18
3.1.1 单式断面情况	18
3.1.2 复式断面情况	20
3.2 河渠非恒定渐变流动量方程	22
3.2.1 作用于微段水体上水流方向的外力	22
3.2.2 明槽非恒定流 Δx 段内水体在水流方向的动量变化率	26
3.2.3 有旁侧入流情况下非棱柱形明槽一元非恒定渐变流的动量方程式	27
3.3 河渠非恒定渐变流圣维南方程组	28
3.4 河渠非恒定流控制方程的张量形式	29
3.4.1 质量守恒——连续性方程	29
3.4.2 动量方程	30
3.5 河渠非恒定流物质运输的对流扩散方程	32
3.6 河渠非恒定流物质运输方程及其坐标变换	33
3.6.1 控制方程	33
3.6.2 坐标变换	36
3.6.3 一般曲线坐标下的方程	37
第 4 章 河渠非恒定流求解方法	41

4.1	理论解法	41
4.1.1	波动方程解法	41
4.1.2	微幅波法	46
4.1.3	瞬态法	47
4.2	特征线法	47
4.2.1	特征线法的基本思想	48
4.2.2	圣维南方程组的特征线方程和特征方程的建立	50
4.2.3	圣维南方程组的特征线解法	58
4.2.4	特征线法的算例和程序	72
4.2.5	长波传播的特征线法程序	75
4.3	有限差分法	82
4.3.1	差分、差商与截断误差	82
4.3.2	差分方程的基本问题	84
4.3.3	显式差分格式	92
4.3.4	隐式差分格式	101
4.3.5	长波传播的显式、隐式差分程序	111
4.3.6	Preissmann 格式计算程序	119
4.4	有限体积法	128
4.4.1	有限体积法的基本思想	128
4.4.2	有限体积法的基本法则	132
4.4.3	平面二维非恒定流的有限体积法	135
4.5	随机游动法	147
4.5.1	随机游动与扩散理论	147
4.5.2	随机游动法解方程	151
4.5.3	随机游动程序	163
第 5 章	河渠非恒定流的实际应用	184
5.1	水库、河道洪水演进	184
5.1.1	某水库溃坝洪水演进	184
5.1.2	北金堤二维洪水演进	192
5.1.3	浑水洪水演进	213
5.1.4	暴雨洪水对核电站厂区的影响	219
5.2	电站日调节引渠中的波动	228
5.3	船闸充放水时的非恒定流波动	233
5.3.1	工程概况	234
5.3.2	数值模拟	236

5.3.3	结语	244
5.4	长江武汉河段非恒定流动床数值模拟	245
5.4.1	概况	245
5.4.2	数学模型及计算方法	245
5.4.3	计算成果	250
5.5	淹没式温排水三维紊动扩散的数值模拟	253
5.5.1	有限分析解	253
5.5.2	淹没式温排水紊动扩散的算例模拟	256
5.6	珠江河口狮子洋水道潮流模拟	260
5.6.1	概况	260
5.6.2	数学模型及计算方法	261
5.6.3	计算条件与计算成果	263
第 6 章	特殊的非恒定流问题	264
6.1	溃坝理论解、急变流动、间断波	264
6.1.1	溃坝坝址处流量水位分析的理论解	264
6.1.2	瞬间全溃坝址处最大流量的经验公式	267
6.1.3	溃坝间断波数值解法	268
6.2	水库溃坝洪水对核电站的影响	280
6.2.1	概况	280
6.2.2	数学模型及计算方法	280
6.2.3	成果分析	282
6.3	某水库溃坝洪水演进模拟	288
6.3.1	模拟方法	288
6.3.2	洪水演进模拟的边界条件	289
6.3.3	高程、糙率数据提取	291
6.3.4	淹没范围	293
6.3.5	蓄洪区蓄水量校核	297
6.4	三峡库区河道二维水质模型	297
6.4.1	概况	297
6.4.2	数学模型及计算方法	298
6.4.3	可溶性污染物计算实例	299
	主要参考文献	302

第 1 章 绪 论

1.1 河渠非恒定流研究目的与意义

河、渠中过水断面上的水力要素如流量 Q 、平均流速 v 及水位 z 等随时间不断变化的流动称为河渠非恒定流。

河流中的洪水涨落过程，各种节制闸门开启和关闭过程中的流动，水电站运行过程中因流量变化而引起的上、下游水位波动，溃坝后水体的突然泄放过程，船闸的充水和放水，暴雨期城市河渠排水系统的流动，滨海地区的河流及灌溉排水渠道因潮汐影响而发生的水位波动，等等，都属于河渠非恒定流。

河渠非恒定流(不恒定流)在理论和实际应用方面都有重要意义。例如，在河流洪水涨落过程中，通过洪水演进计算，确定洪水沿河道向下游传播时各断面出现洪峰的大小和时间，作为洪水预报、水库调度、河道整治、堤防与分蓄洪区等防洪基础设施建设的重要依据。水电站上、下游水面波动计算所得到的最大和最小水深直接关系到堤岸顶高、压力钢管进口和尾水管出口高程的确定。大坝、堤防和其他挡水建筑物的瞬间溃决与逐渐溃决，航道、运河及灌溉沟渠的闸门启闭，水电站、水泵站运行过程中工作状态的改变，都会导致引水渠和尾水渠内水位和流量关系的变化，形成向上游运动的负波和向下游运动的正波，这些问题都属于河渠非恒定流。

我国是一个具有众多高含沙河流的国家，由泥沙带来的问题十分突出，黄河、长江等大河大江的泥沙问题尤为严重。例如，逐年的泥沙冲刷和淤积导致河床演变和整个流域地形地貌的改变；水库中泥沙的淤积使水库的有效库容减小，缩短水库的使用寿命，等等。对这些问题的研究依赖于对河渠水流运动规律的研究。

随着人民生活水平的提高和工业的发展，越来越多的生活污水和工业废水排入江河，水污染的现象十分严重，水污染的传播和控制与减轻水污染的研究对下游生活用水和工业用水的取水是十分迫切的。随着火电事业的飞速发展，火电厂冷却水使用后热水的排放极大地影响了水域及其四周的生态环境。这些属于传热运动方面的研究，密切地建立在河渠非恒定流运动规律研究的基础上。

船闸作为水利枢纽工程的一个重要组成部分，包括上、下游引航道和闸室三个部分。引航道的合理布置决定了航运的安全运营，而这种合理布置只有通过研究和评价众多方案下的河渠非恒定流运动规律才可以获得。

丁坝是河道整治工程中常见的水工建筑物之一，它对水流运动的影响无疑是

十分巨大的。为了验证丁坝建成后能否达到预期的河道整治目的，只有通过研究丁坝修筑前后河渠非恒定流运动规律的改变来加以证实。

入海河口附近的潮汐现象，潮汐引起的海水倒灌直接影响着江河入海口附近生活淡水的取用，潮汐水力计算是进行河口整治、三角洲开发和海涂围垦等规划研究时必不可少的工作。

近些年来，随着桥梁的建设而在河道中修筑的桥墩，对水流运动和泥沙运动的重要影响逐渐被人们认识，对这种影响的考虑已经成为现代桥墩设计中的组成部分。桥墩的修筑除应满足其支撑桥梁的结构要求外，还应满足种种水力学要求。要实现这些水力学要求，只有通过研究桥墩对水流运动和泥沙运动的影响。显然，这种研究属于河渠非恒定流运动规律的研究范畴。

如果再扩展至水环境中浓度变化，多相流如泥沙、分层异重流及水电站、核电站的热污染、冷却水问题，则几乎包括了水动力学问题的各个方面。

总之，河渠中的水流运动非恒定是绝对的、一般的，而恒定只能是一种近似、一种概化。

随着我国经济水平的提高、水利事业的不断发展，河渠非恒定流理论被广泛用于水利工程的各个方面。例如，长江和黄河等大、中型干支流的洪水演进计算，长江、钱塘江和珠江的河口整治，潮汐水力计算等，都基于河渠非恒定流理论和计算方法，利用电子计算机模拟，解决了实际问题，取得了不少成果。

综上所述，河渠非恒定流运动规律的研究范围是十分广泛的。因此，研究河渠非恒定流的特性、运动规律及其计算方法具有重要的实际意义。

1.2 河渠非恒定流的特点

非恒定流是指流动中的运动要素，如水位 z 、水深 h 、压强 p 、流速 u 、流量 Q 或总流的过水断面 A 、水面宽度 B 、水力半径 R ，包括其浓度 C 、温度 T 、能量 E ，在动河床时还有河床高程 z_b 等，都是时间 t 及空间坐标 x_j 的函数，随时间及空间位置不同而变化，写做

$$F = F(t, x_j) \quad (1.2.1)$$

其中， $F = F(z, h, p, u, Q, A, B, R, C, T, E, z_b)$ 。这就是河渠非恒定流基础特性之一。

实际上，流动的非恒定性、三维性应当是经常性的、一般的。作为恒定流，在有些情况如非洪水期，忽略时间的影响，视为定常现象。按总流(一维流)或二维流(平面二维或垂向二维)处理，只是一种概化分析。

河渠非恒定流的特点是具有自由表面，作为力学特性，作用力主要是重力，伴有压力与摩阻力。

非恒定流是一种波动。波(Wave)是物质存在的主要形式。形成这一随时而变的因素或断面是一种干扰、扰动，波传到之处，水面起了变化，高于或低于原水面，波体的前锋称为波锋(波前, Wave Front), 如图 1.2.1 所示。波锋前进的速度称为波速 c ，它不同于原来水流平均速度 u 。

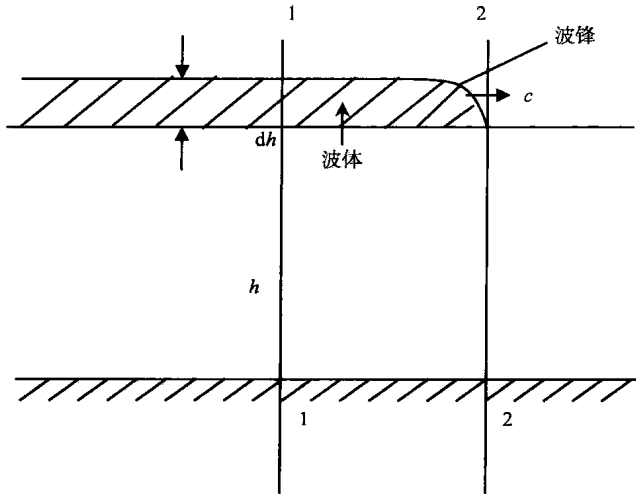
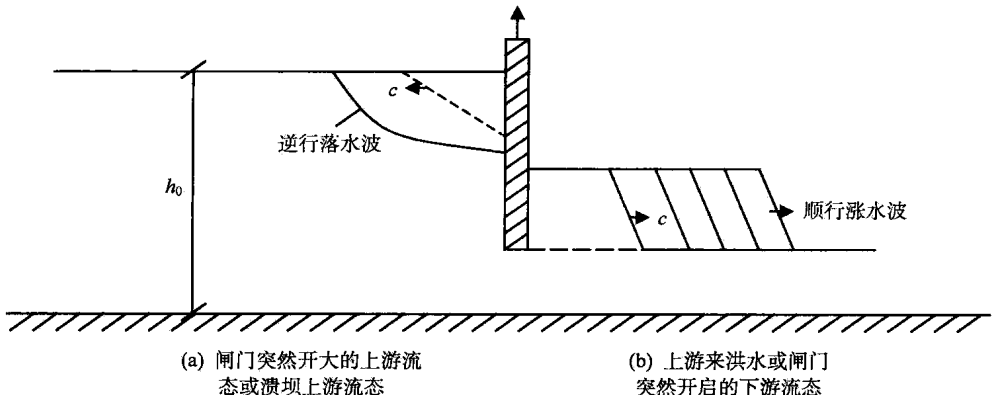


图 1.2.1 波体示意图

湖中、海中风生成的波浪，其质点在一定范围振动，称为振动波，而洪水波带走大量水体，输送流量称为变位波或移动波。

湖水中波的质点振动，波则向四方传播，称为横波。声波为弹性波，其质点运动方向与波传播的方向一致，称为纵波。

河渠非恒定的波动如果只涨不落或只落不涨称为单向波。如波传播沿流下行，则称为顺行波(下行波)，波在相反的方向传播，则称为逆行波(上行波)。水位涨高的波称为涨水波。反之，如系水位降落，称为落水波。涨水或落水都可以顺行或逆行[图 1.2.2(a)~(d)]。



(a) 闸门突然开大的上游流态或溃坝上游流态

(b) 上游来洪水或闸门突然开启的下游流态

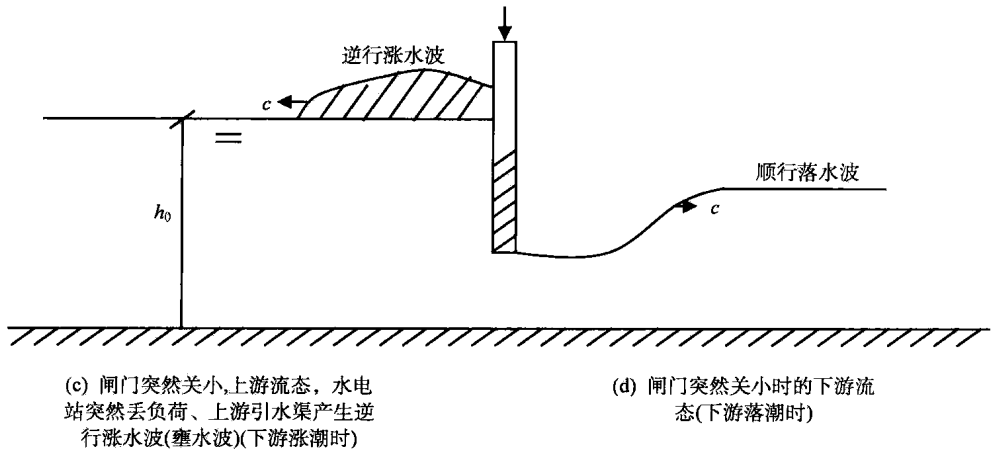


图 1.2.2 四种类型的运行波

涨水波往往具有十分陡峻的波锋。这是“后浪快过并赶上前浪所致”，这种形成间断波锋的波称为间断波、不连续波，它与空气动力学中的激波(Shock Wave)相似。落水波波锋则比较平缓，为连续波波形。

1.3 河渠非恒定流的主要研究方法

河渠非恒定流研究和其他水动力学问题一样，有理论分析、借助电子计算机的数学模型法、大比例尺的实体物理模型法以及电拟模型法等。

理论分析有线性化法和幂级数法。历史上研究圣维南方程组的求解时，曾采用线性化法简化其中的非线性项(如微幅波法等)，从而可解析地进行积分，但这种解析解在应用上受到严格的限制。幂级数法适用于求解线性或非线性微幅波。

由于实际几何边界的复杂性、边界形状的不规则、可动边界以及问题的非线性，除了极少数的情形外，只有简化为线性问题，才有理论解。实验受到场地和技术条件的限制，目前还很难做一条河、某一长段河的洪水模型(物理模型)，就是对不恒定流的水位 $z-t$ 的观测尤其是流量 $Q-t$ 过程的较精确、全面的观测记录也是近十几年的事，实验中要启闭闸门放一个给定的流量过程都很难。因此，河渠非恒定流研究主要依赖于数值分析。

在电算普及使用以前，非恒定流的数值计算规模都比较小。有些方法将基本方程做了大量简化，最后实际只由连续方程来体现流动的非恒定性质，如马斯京根法、瞬态法等。在不做方程简化的方法中，有图解法、诺模图法、逐步逼近法等。这些方法或者适用于特殊情况，或者需要试算，或者须花费较多时间用于准备工作曲线。当时试算相对较少，工作曲线相对简单一些的方法也许是等时段法。1950年林秉南提出等时段法或指定时段法以前，人们对特征线网格是不加控制

的。特征线的起点一经选定，特征线的发展就听其自然了。等时段法的主要内容之一是指定计算时段，然后反求相交于指定时段的特征线。计算点的分布因而有一定程度的控制。由于使用了固定时段，计算中的试算工作大部分可以避免。等时段法包括半图解法、图解法。等时段法也有适用于电算的计算方法，其中哈特里所建议的方法主要采用便于计算机操作的插值法。然而手算法不论如何改进，终究不能免除人工计算速度低的根本局限性。因此，随着电子计算机的逐渐普及，手算法逐渐被淘汰。

数值分析有各种方法：有限差分法(FDM)、特征线法(MOC)、有限元法(FEM)、控制体法(FVM)、随机游动法(RWM)等以及它们派生出来的一些分支。目前，占主导地位的仍是有限差分法(特征线法也是一种特殊的差分法)，它物理概念明确，理论历史久远，方法简便易行。有限差分法分为显式、隐式两种。显式根据前一时瞬的已知量求解下一时瞬的未知量时，是逐点分别求解的；隐式则需要求解一群差分方程，将下一时瞬的未知量同时求出。显式差分由于有稳定条件的限制，时间步长不能过大，因而较宜用于计算急速变化的水流现象；隐式差分在适当选定权参数后，可达到无条件稳定，因而时间步长可远大于显式情况。当水流变化缓慢时，如大江大河的洪水，应用隐式进行计算，最为相宜。特征线法反映了双曲问题中信息沿特征传播的性质，算法符合水流的物理机制，是一种更合理的迎风格式，具有优良的精度。有限元法在适应边界空间处理上有其方便之处，但依赖于时间的发展方程解上突进不大，其基本原因在于时间是均匀的，有限元对此无甚特长。控制体法在物理上通量守恒，意义明确，工程上用得较多。它吸取了有限差分一些特点。随机游动法不受维数限制，可作为时空域处理，网络不需要全场求解，可以单求所关心的点。我们用它解珠江河网 2973 个断面、230 条河，与有限差分法解大型稀疏阵对比是成功的，在姚孟电站白龟山冷却池温度流计算中与实验及有限元法对比亦是成功的。

目前数值计算的众多格式、方法仍在发展中。

1.4 国内外研究进展

拉普拉斯和拉格朗日(1775)对明渠非恒定流进行研究。圣维南(1843)提出黏性不可压缩流体运动基本方程，1870 年研究了河口潮汐波速问题，1871 年给出了河口潮汐波速公式和明渠非恒定流的理论和通用方程(圣维南非恒定流偏微分方程)，并试图对连续方程和动量方程进行积分求解。比利时马素(1900)研究了采用特征线理论求解河渠非恒定流方程。Richardson(1910)发表了采用偏微分方程数值分析的论文，被认为是数值模拟方法应用于水力学的一个开端。加拿大浦特曼(1948)翻译马素的著作出版，特征线理论在河渠非恒定流分析中的应用得以推广。