

明渠非恒定流传播规律及 阻力特性的试验研究

MINGQU FEI HENG DING LIU CHUAN BO GUI LÜ JI
ZULI TEXING DE SHIYAN YANJIU

胡江 杨胜发 周华君 付旭辉 兰艳萍 王涛 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

明渠非恒定流传播规律及 阻力特性的试验研究

胡江 杨胜发 周华君 付旭辉 兰艳萍 王涛 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书建立了一套先进的明渠非恒定流测控系统,通过理论分析和水槽试验相结合的方法,系统研究了特殊条件下的明渠非恒定流(光滑明渠内正坡条件下正弦型非恒定流)传播规律和阻力特性。

相对于目前已有的研究来说,本书提供了一种有别于以往的明渠非恒定流研究思路,且研究成果给出了明渠非恒定流传播过程中的一些参数变化规律的物理图示,对于水利工程实践和明渠非恒定流特性的认识及进一步的研究具有参考作用,可作为水利工程相关专业研究生及科技人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

明渠非恒定流传播规律及阻力特性的试验研究 / 胡江等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2013.5
ISBN 978-7-5170-0863-7

I. ①明… II. ①胡… III. ①明渠流动—非定常流动—试验研究②明渠流动—流动阻力—试验研究 IV. ①TV133

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第093461号

书 名	明渠非恒定流传播规律及阻力特性的试验研究
作 者	胡江 杨胜发 周华君 付旭辉 兰艳萍 王涛 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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 6.75印张 160千字
版 次	2013年5月第1版 2013年5月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	22.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

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问题。

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。均匀流对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、水面坡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，非恒定流可以近似为恒定流处理。但在某些特殊条件下，如水电站运行、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，则可能导致如泥沙运动、河床演变等一系列问题的差异。

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，而对明渠非恒定流问题的研究则较少，且进展缓慢。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，都没有得到被广泛认可的结论。

本书建立了先进的明渠非恒定流试验系统，并通过理论分析和水槽试验相结合的方法，研究了明渠非恒定流的传播规律及阻力特性，给出了明渠非恒定流运动规律的多个参数变化过程的物理图像，获得的相关成果对明渠非恒定流运动的认识及以后开展相关的研究均具有一定的参考意义。

明渠非恒定流种类较多，问题本身较为复杂，本书只是探索性研究了正坡条件下光滑壁面的正弦非恒定流情况，研究内容着重于对明渠非恒定流运动特性的认识，至于明渠非恒定流运动的内在机理还有待进一步深入研究。限于作者的学识及写作水平，书中难免存在不足、遗漏甚至错误之处，敬请批评指正。

研究及写作过程中获得了河海大学严以新教授、清华大学王兴奎教授、北京尚水信息技术有限公司曲兆松博士、TSI亚太公司吴嘉博士等人的指导和帮助，在此表示衷心的感谢！

作者

2012年11月于重庆

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 基本情况	1
1.2 研究现状	2
1.3 研究思路	10
1.4 主要工作	10
第 2 章 水槽试验布置	12
2.1 非恒定流控制系统	12
2.2 非恒定流测量系统	15
2.3 系统稳定性检验	17
2.4 本章小结	20
第 3 章 光滑床面恒定均匀流试验研究	22
3.1 试验条件	22
3.2 均匀紊流试验数据的分析方法	23
3.3 摩阻流速的确定	26
3.4 流速分布试验结果分析	29
3.5 紊流度试验结果分析	34
3.6 本章小结	36
第 4 章 非恒定流试验数据的分析方法	37
4.1 传统分析方法	37
4.2 本研究的处理方法	40
4.3 本章小结	45
第 5 章 明渠非恒定流的传播特性	46
5.1 试验条件	46
5.2 非恒定流传播速度	51
5.3 周期对波峰、波谷水深的影响	53
5.4 周期对波峰、波谷流量的影响	58
5.5 非恒定流波的变形特征	61
5.6 非恒定流水深及出口流量的计算	63
5.7 本章小结	66
第 6 章 非恒定流的床面剪切力	67
6.1 非恒定流床面剪切力的确定方法	67
6.2 非恒定流床面剪切力公式的导出	68

6.3 床面剪切力的计算	71
6.4 本章小结	76
第7章 明渠非恒定流的垂线流速分布	77
7.1 非恒定流摩阻流速的确定	77
7.2 非恒定流的垂线流速分布	80
7.3 水位流量的绳套现象	90
7.4 本章小结	90
参考文献	92

第1章 绪 论

1.1 基 本 情 况

非恒定流（又称不恒定流、不定常流，英文名称 Unsteady Flow）指运动要素随时间过程而变化的流体运动，它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、空气流动及机翼绕流等都是典型的非恒定流问题。Telionis (1981)、童秉纲 (1993) 认为非恒定流可分为两类：第一类为流动在外边界条件改变下的响应；第二类为流动本身的不恒定性，即边界条件没有发生变化而流动自身所产生的非恒定流现象。

在明渠恒定均匀流中，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。恒定均匀流对一般流动问题大为简化，从而使得问题的研究变得容易，因而水力学及河流动力学的多数问题的解决基本上都是在恒定均匀流的基础上建立起来的。

明渠非恒定流中的情况与明渠均匀流并不一样。涨水过程中，同一水位下非恒定流的水面坡度比恒定流时大，因而其流量也要大；在落水过程中，同一水位情况下非恒定流水面比降要比恒定流时小，因而流量也小。由于同一水位下水面坡度具有多值关系，使得流量与水位相应地具有多值关系。同时，在非恒定流的情况下，过水断面上的水面坡度、流速、流量、水位的最大值可能并不在同一时刻出现 (French 1985、Hayashi T 1988、Tu 1991、Song 1994、Westphal 1999、Perumal 2004)，在涨水过程中，由于非恒定流的传递，水面坡度增加较快而首先出现最大值，而后依次出现流速最大值、最大流量、最大水位；落水过程中，则先出现最小流量，然后出现最低水位，而且同一断面上不同水深的流速达到最大值的时间也是不同步的 (Song and Graf 1996、Nezu 1997、Nezu and Nakagawa 1995)。Qu (2003) 结合自己和他人的研究详细分析了明渠非恒定流的流量、水位、流速之间的关系，认为一般非恒定流传播时，流速通常先达到最大值，随后是流量，其次才是水深的最大值，而其他水力参数如阻力系数、摩阻流速等都不是同步的。刘春晶 (2004) 认为不同高程水深的流速最大值的不同步现象可能是存在的，但是也可能是测量和分析手段造成的，具有不确定性。宋志尧和严以新 (2006) 研究潮汐非恒定流的对数流速分布规律认为，由于非恒定性影响，其摩阻流速 u_* 和对数流速分布参数不同于恒定流。由此可见，明渠非恒定流问题要比恒定流复杂得多。

天然河道中的水流通常都是非恒定流，当流量随时间的变化非常缓慢时，则非恒定流可以近似为恒定流处理 (V. 叶夫耶维奇)。然而，在某些特殊条件下，诸如电站运行，水库调度削峰等情况时，由于非恒定流变化过程较快，此时水流的非恒定性较强，如果再用

恒定流条件来研究非恒定流状态下的问题,则可能导致如泥沙运动、河床冲刷等一系列问题的差异,甚至带来错误的结果(Wang Z 1997)。

当前,随水利开发建设步伐的加快,河道非恒定流问题日益突出。上游下泄的非恒定流到底对下游河道的防洪、通航条件及河道的演变等会产生什么影响,要清楚回答这些问题还需要非恒定流运动特性的进一步明确。由于明渠非恒定流问题本身较为复杂,受测量手段的限制,该方面的研究一直未能有较大突破。发展更为先进的测量手段、寻求新的思路来研究明渠非恒定流的传播规律及运动特性,对于水利学科的发展以及港口、航运及城市防洪等实际问题的解决,都具有重要的理论和工程意义。

1.2 研究现状

相对于明渠非恒定流来说,非恒定管流及明渠均匀流更容易控制,因而相关方面的研究远远走在了明渠非恒定流的前面,其中的诸多方法以及结论是可以为明渠非恒定流研究所借鉴的。

1.2.1 非恒定管流研究现状

非恒定管流的理论及试验研究主要包括震荡流、往复流以及脉冲流动,在这方面作出过研究的主要包括 Womersely (1955)、Uchida (1956)、Daily (1956)、Carstens (1959)、Tu (1983)、Ramaprian (1983, 1984)、Shemer (1984)、Sleath (1987)、Jensen (1989)、Tardu (1993, 1994)、Shuy (1995)、Gundogdu (1999a, 1999b)、Wosnik (2000)、Bergant (2001)、Ghidaoui (2002)、Chen Huiqing (2005) 等,多数研究在理论分析时都基于了一些假定,比如黏性底层的紊动分布同恒定流一致等。

在非恒定管流中,壁面切应力通常都不是直接测量,而是通过测量压力梯度和平均流速的当地加速度,利用一维运动方程来计算:

$$\tau_0 = \frac{D}{4} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho \frac{\partial U}{\partial t} \right) \quad (1.1)$$

式中: D 为管道内径; U 为管道横截面的平均流速。

Uchida (1956)、Womersely (1955) 曾给出过圆管震荡流层流运动的精确解,结果表明圆管震荡流中的压力梯度与流量之间存在相位差,而且距离中心不同位置的流动也不相同,靠近中心的流动滞后于近壁区的流动。建议采用如下形式的非恒定摩擦系数:

$$f_w = f_s + k_f \frac{D}{U^2} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (1.2)$$

式中: k_f 为经验性质的常数; f_s 为恒定流摩擦系数。

由于摩擦系数 f 又和摩擦流速 u_* 通过 $f = 8(u_*/U)^2$ 有关联,因而非恒定流的摩擦流速可以表示为

$$u_*^2 = u_{*s}^2 + k_f \frac{D}{8} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (1.3)$$

Daily (1956) 建议 k_f 在加速流中取 1.2, 在减速流中取 0.02, 而 Carstens and Roller

(1959) 建议加速阶段和减速阶段统一取为 0.449。尽管不同的学者建议的 k_f 取值相差较大, 但基本上都认为在加速阶段摩阻损失会增大, 而在减速阶段摩阻损失会减少。但是, Shuy (1995) 的试验研究却提出了与此相反的结论, 壁面摩阻在加速阶段减小而在减速阶段增大, 他建议的 k_f 值在加速流中取 -0.33, 在减速流中取 -0.52。Brunone and Golia (1990), Greco (1990), Brunone (1991, 1995) 通过试验提出了利用平均流速的当地导数和随体导数计算摩阻损失的公式:

$$u_*^2 = u_{*s}^2 + k_f \frac{D}{8} \left(\frac{\partial U}{\partial t} - c \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad (1.4)$$

式中: c 为压力波的波速。

随后, Axworthy (2000) 利用 EIF 模型计算一维非恒定管流的能量损失, 其提出的计算壁面剪切应力的公式为

$$u_*^2 = u_{*s}^2 + f_r \frac{D}{4} \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad (1.5)$$

式中: f_r 为代表试验中的某一频率参数, 受非恒定剪切应力的影响。若 $f_r = 0.5k_f$, 而且压力波的传播速度 $c = -U$, 则式 (1.5) 同式 (1.4) 是一致的。

基于对非恒定管内 N-S 方程的理论解的分析, Zielke (1968) 建立了一个水头损失公式。他发现非恒定流的剪切应力是流速随时间变化率的复杂积分:

$$u_*^2 = \nu \frac{4}{D} \int_0^T W_f \frac{\partial U}{\partial t} dt^* \quad (1.6)$$

其中 $t^* = T - t$, W_f 是一个重力函数, 主要表达过去的加速度, 是 t^* 的函数。Tripathi (1975) 简化了 W_f , 提高了上式的计算效率。Vardy (1993) 把上述模型延伸到一般的紊流和非恒定流, 随后 Vardy and Brown (1995, 1996) 又将其延伸至高雷诺数紊流, 实际上这就把水流的运动分为了外区 (管流的层流区) 和内区 (管流的紊流区), 式 (1.6) 最终发展成如下形式:

$$u_*^2 = u_{*s}^2 + \nu \frac{4}{D} \int_0^T W_f \frac{\partial U}{\partial t} dt^* \quad (1.7)$$

Ghidaoui and Mansour (2002) 又改进了式 (1.7), 使得其计算效率更高, 而改进后的式子和式 (1.7) 计算结果比较, 两式的符合程度较好。Vitkovsky (2006) 先是对上述理论的误差进行了分析, 随后又对一维非恒定管流摩阻的计算公式进行了较为系统的评价。Adamkowski (2006) 基于以上对于非恒定管流的摩阻计算模式的分析, 通过试验提出了自己的计算方法。Viola (2004) 对于管道内的非恒定紊流从层流向紊流转变过程中摩阻的变化情况进行了研究。上述这些针对非恒定流摩阻的研究只限于一维的非恒定管流, 对于二维流动的情况, Vardy (1991)、Eichinger (1992)、Silva Araya (1997, 1998, 2001)、Pezzinga (1999, 2000) 都曾进行过专门的讨论, 并且提出了一些管道甚至是管网的计算模型。

对于非恒定管流的流速分布, Kita (1980) 利用热膜流速仪测量了圆管振荡流的平均流速。Schemer (1985) 也利用热膜流速仪测量了圆管内脉冲气流的平均流速和紊动流速, 认为除了从层流到紊流的转变, 叠加的脉冲流对流动无显著的影响, 紊动响应较平均流速

的变化有所滞后。Mao (1986, 1994) 利用压力传感器测量圆管非恒定流的沿程压力变化, 认为当 $\tilde{\omega}^+ = 2\pi f\nu/u_*^2$ (f 为振荡频率) 较大时, 脉冲运动与紊动之间存在相互作用。Fredsoe (2003) 曾在封闭的 U 形水槽内进行过试验, 并且测得了一个周期内的流速分布变化过程, 从其试验结果来看, 非恒定流的平均流速在一个周期内由小变大时会依次出现层流、层流到紊流的过渡以及完全紊流阶段, 而且层流运动也和精确解符合很好, 这一认识在 Akhavan (1991) 等人的研究中得到证实。当进入紊流阶段以后, 其流速分布可用对数流速分布公式来表示, 卡门常数 k 和恒定流时一样, 为 0.4, 但是积分常数 C 与恒定流不同。其试验结果还表明, 在非恒定管流中, 床面剪切力 τ_0 的变化先于平均流速 U , 而且紊动增强, 摩阻系数也会增加。

近年来, 随着人们对各方面非恒定流问题认识的加深, 针对实际应用的或是理论探索的非恒定管流的研究较以往更加频繁, 有试验的, 也有从理论分析以及数学模型等方面的, 都得出了一些有意义的结论 [Jia Jiuhong (2007)、Szymkiewicz (2005)、Yin Jianan (2004)、Deng Songsheng (2004)、Zhu Weiping (2005)、Attia (2006)、Tong Dengke (2005)、Novikovs (2007) Szymkiewicz (2007)、Seo E R (2004)、Hellstrom (2007)、Zhao M (2007)、Letelier (2004)、Brereton G J (2006)、Tamura (2007)、Brereton (2005)、Derevich I. V (2005)、Meccanica (2005)、Davis (2006) 李进平 (2000)、Vijapurapu (2004)]。

非恒定管流虽然较明渠非恒定流简单, 二者有所差别, 但是这些研究为明渠非恒定流的认识和研究也提供了重要的参考价值。

1.2.2 明渠均匀流研究现状

1.2.2.1 明渠均匀流的流速分布

在明渠均匀紊流中, 内区 (也称为近壁区) 范围为 $0 \leq y/H \leq 0.2$, 其内流速分布可以分为三层 [I. Nezu and Rodi (1986)]。

(1) 黏性底层, $0 \leq y^+ \leq (5 \sim 10)$, 流速分布呈线性分布:

$$u^+ = y^+ \quad (1.8)$$

式中: $u^+ = \frac{u}{u_*}$; $y^+ = \frac{yu_*}{\nu}$; u 为距离床面 y 处的流速; u_* 为摩阻流速; ν 为水流运动黏性系数。

(2) 过渡区, $(5 \sim 10) \leq y^+ \leq 30$, 流速分布用式 (1.9) 计算

$$u^+ = \int_0^{y^+} \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 4l^{+2}}} dy^+ \quad (1.9)$$

式中: $l^+ = \frac{lu_*}{\nu}$, 为无量纲混掺长度, 采用范德里斯特公式计算。

(3) 对数区 (又叫紊流充分发展区), $30 \leq y^+ \leq 0.2R_{e*}$:

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln y^+ + C \quad (1.10)$$

式中: k 为卡门常数; C 为积分常数; $R_{e*} = Hu_* / \nu$ 。

对于 k 和 C 的取值, Schlichting (1968) 认为 k 跟壁面情况无关, 无论是光滑还是粗糙都是一个常数, 而 C 则是受壁面影响的常数。从 Nikuradse (1932) 的水力光滑管内的试验来看, $k = 0.4$, $C = 5.5$, Keulegan (1938) 的研究也认同 Nikuradse 的结果。其余一些研究者则通过试验研究得到了不同的值 [Klebanoff (1954), Townsend (1956), Huffman and Bradshaw (1972), Steffler (1985), I. Nezu and Rodi (1986), Kirkgoz (1989)], 但基本在 0.40 和 5.0 附近。

对于外区 ($y/H > 0.2$), 自科尔干以来, 多数认为对数律仍然适用, 但卡门常数和积分常数需作一些调整, 以使试验数据与对数公式符合。I. Nezu and Rodi 认为, 在明渠流动中的外区存在一个尾流区, 这一区域中流速分布与对数流速分布的式 (1.10) 有一差值, 可用科尔斯 (Coles) 的尾流律来进行计算:

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln y^+ + C + W(\eta) \quad (1.11)$$

尾流律计算公式为

$$W(\eta) = \frac{2\Pi}{k} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{y}{\delta}\right) \quad (1.12)$$

式中: $\eta = y/H$; δ 为边界层厚度。

根据 I. Nezu and Rodi (1986) 的试验, 当 $k = 0.412$ 、 $C = 5.29$ 时, Π 值与明槽流动的雷诺数 ($R_{\text{eff}} = \frac{4HU}{\nu}$, U 为断面平均流速) 有关, 当 $R_{\text{eff}} > 10^5$ 时, $\Pi = 0.2$ 。目前, 对这一区域的流速分布, 试验结果并不一致。A. H. Cardoso and W. H. Graf (1989) 的试验结果表明, 在 $0.2 \leq y/H \leq 0.7$ 的区域内 $k = 0.413$, $\Pi = 0.08$ 。

边界层厚度 δ 通常为床底距最大流速位置处的距离, 在二维明渠流动中常取为水深 H , 但是当宽深比较小、明渠流不满足二维水流时, 其最大流速通常出现在水面以下, 胡春宏 (1985) 认为只有宽深比在 7.5 以上时才出现二维流动, 随着边壁糙率的增加这一值还会继续增加, 而在实际的河流中, 如 Mississippi 河最大流速的位置出现在 $1/3$ 水深处。就目前的多数研究成果来看, 在光滑水槽内, 当宽深比 (B/H) 大于 5 时即可认为存在二维性 (Nezu and Nakagawa, 1993)。当宽深比小于 5 时, 边界层厚度为

$$\frac{\delta}{H} = 0.44 + 0.106 \frac{B}{H} + 0.05 \sin\left(\frac{2\pi}{5.2} \frac{B}{H}\right) \quad (1.13)$$

在距离水面更近的区域, 一般认为在 $0.8 \leq y/H \leq 1.0$, 其流速分布尚无明确的表达式。A. H. Cardoso and W. H. Graf 认为在自由水面附近, 由于微弱的二次流动所产生的对流动的阻滞作用, 使外区流速分布并不像尾流律发展, 实际流速分布更接近于对数分布。从工程实践的角度, 可以认为流速在整个断面上呈对数分布。而早期的研究资料也表明, 对数流速分布对于明渠流的全水深都可以应用 (Eindtein and El-Samni 1949, Keulegan 1938)。王殿常等人根据试验结果认为, 由于明渠流动理论床面和最大流速位置的不确定性, 增加尾流函数比对数流速公式没有明显的优越性。

Nezu and Nakagawa (1993) 建议根据明槽流动的紊流特征, 将明渠流分为以下三个区:

- (1) 壁面区, $y/H < 0.15 \sim 0.2$ 。

(2) 半深度区, $0.15 \sim 0.2 \leq y/H \leq 0.6$ 。

(3) 自由水面区, $0.6 < y/H \leq 1.0$ 。

前者相当于边界层流动的内区, 而后两者则相当于边界层流动的外区。

1.2.2.2 明渠均匀流的紊动强度

明槽均匀紊流中切应力由黏性切应力和紊动切应力组成:

$$\tau = -\rho \overline{u'v'} + \nu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1.14)$$

由于流速梯度只是在壁面附近较大, 而在距离壁面较远处迅速减小, 因而雷诺应力 ($-\rho \overline{u'v'}$) 在断面上的分布除壁面附近外为线性分布。

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{H}\right) \quad (1.15)$$

众多的研究成果 (Donald W. Knight 1984、I. Nezu and W. Rodi 1986、Nikora. V and Goring. D 2000、Poggi. D 2002、Song 1994) 都说明, 不管是哪一种流动情况, 在距离壁面一定距离以后 (一般是 0.2 倍的水深), 雷诺应力呈线性分布。

I. Nezu and W. Rodi (1986) 根据实测资料得到明渠均匀流的紊流度:

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{u_*} = D_u \exp(-C_k \eta) \quad (1.16)$$

$$\frac{\sqrt{v'^2}}{u_*} = D_v \exp(-C_k \eta) \quad (1.17)$$

$$\frac{\sqrt{w'^2}}{u_*} = D_w \exp(-C_k \eta) \quad (1.18)$$

式中: D_u 、 D_v 、 D_w 和 C_k 均为经验常数, $\eta = y/H$ 。各经验常数取值为: $D_u = 2.30$, $D_v = 1.27$, $D_w = 1.63$, $C_k = 1.0$ 。

1.2.3 明渠非恒定流的研究现状

人们对于明渠非恒定流问题的研究可以追溯至 200 多年以前 Laplace 和 Lagrange 的研究工作, 而在这方面取得重大突破的是 Saint - Venant 方程的建立。在这以后, 随着对非恒定流问题认识的不断深入, 一系列的试验被开展, 主要集中于研究非恒定流的传播特性、流速分布、紊动特性以及非恒定输沙等问题。20 世纪中后期, 随着电子计算机技术的发展, 数学模型开始大量应用于非恒定流研究。但总体来说, 受制于试验研究手段, 多年来这方面的研究进展缓慢, 一直未能有较大的突破, 而且对于目前已经取得成果的认识也存在一些分歧, 相对于均匀流的研究来说, 明渠非恒定流还有许多工作要做。

1.2.3.1 基本方程

图 1.1 所示的二维明渠非恒定流中, 通过 Navier - Stokes 方程可以推导出一维的非恒定明渠流控制方程即 Saint - Venant 方程组:

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1.19)$$

$$\text{动量方程} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial UQ}{\partial x} + gA \frac{\partial (z_b + H)}{x} = -\frac{B}{\rho} \tau_0 \quad (1.20)$$

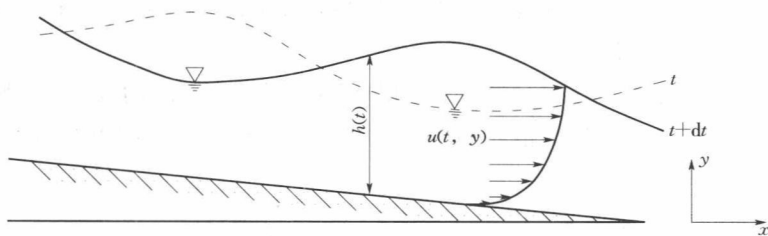


图 1.1 明渠非恒定流示意图

式中: U 、 Q 、 A 分别为 x 方向的断面平均流速、流量和过水面积, H 、 z_b 分别为水深和床面高度。

Saint - Venant 方程在河道非恒定流包括溃坝洪水演算上面得到了广泛的应用 [Garcia - Navarro (1992)、D. Ambrosi (1996)、Jin and Fread (1997)、Delis (1998)、Kotaro Onizuka (1998)、Tseng (2000)、Wang (2000)、Burguete (2001)、诸裕良、严以新 (2001)、Tsai (2003)、赵克玉 (2004)、Wu Weiming (2004)、Ying Xinya (2004)、Chanson H. (2006)、Maurizio Venutelli (2011)]。

在多年的研究中, 尽管大家都试图找到更好的方式修正或者完善 Saint - Venant 方程, 使其更好的符合实际情况, 但实际上并没有改变 Saint - Venant 方程本身。而且, 在这些应用之中, 基本上都假定明渠非恒定流的床面切应力 $\tau_0 = \gamma H J$, 仍然和明渠均匀流分布一致。这些应用研究没有涉及关于非恒定流内部紊动结构或是流速分布等深层次问题的探讨, 对于明渠非恒定流的传播特性仍然是不清楚的。

1.2.3.2 非恒定参数

水流的非恒定性通过非恒定参数来描述, 水流非恒定性越强, 则传播过程中对河道输沙及航道条件影响越大。为了更合理、更全面地描述非恒定流的非恒定性, 不同的学者采用了不同参数。Suszka (1987)、Tu (1991)、Song (1994) 建议采用如下形式的非恒定参数:

$$\Gamma = \frac{1}{u_{*b}} \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad (1.21)$$

式中: u_{*b} 为非恒定流基流的摩阻流速; Δh 为水深的变幅; ΔT 为周期。

Nezu (1997) 采用的非恒定参数为:

$$\alpha = \frac{1}{U_m} \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad (1.22)$$

式中: $U_m = (U_b + U_p)/2$, 表示水流的对流速度, 等于非恒定流基流流速和最大流速的平均值。

从 Song (1994) 的试验结果来看, Γ 值的量级为 $O(10^{-3})$, 在 Nezu 的试验中, 非恒定参数的量级也在 $O(10^{-3})$, Qu (2003) 认为, 用式 (1.21) 和式 (1.22) 描述的非恒定参数值在 $O(10^{-3})$ 量级上, 因而提出采用另外一个参数来表达:

$$\Omega = \frac{1}{u_{*b}^2} \frac{\Delta q}{\Delta T} \quad (1.23)$$

式中: Δq 为流量变幅。

Qu 利用上式计算 Song、Nezu 和自己的试验结果, Ω 表示的非恒定参数量级均在 $O(1)$, 因而认为较 Γ, α 更适合。

刘春晶 (2004) 对比了 Song 和 Nezu 的非恒定流参数, 认为 Γ 和 α 的物理意义虽然稍有差异, 但是二者在数值上具有很好的相关关系, 都能在一定程度上表示非恒定流的非恒定程度。

1.2.3.3 水位—流量关系

在明渠均匀流中, 可用 Manning、Chezy 公式计算均匀流的流速和水深:

$$U = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad (1.24)$$

式中: n 为边壁糙率系数; $R = \frac{BH}{B+2H}$ 为水力半径; S_f 为水面坡度即能坡, 均匀流时即为底坡 J 。

从式 (1.24) 可知, 均匀流的流量与水深之间成一对应的单值关系。

然而, 在非恒定流中, 由于同一水位下水面坡度具有多值关系, 使得流量相应地具有多值关系。根据一维的 Saint-Venant 方程:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - J + S_f = 0 \quad (1.25)$$

假定非恒定流下 Manning、Chezy 公式仍然适用, 则可以写出

$$Q = Q_0 \sqrt{1 - \frac{\partial h}{S_0 \partial x} - \frac{1}{S_0 g} \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x}} \quad (1.26)$$

根据式 (1.26), Perumal (2004) 提及的水深与流量间的公式如下:

$$Q = Q_0 \sqrt{1 + \frac{1}{S_0 c} \frac{\partial h}{\partial t}} \quad (1.27)$$

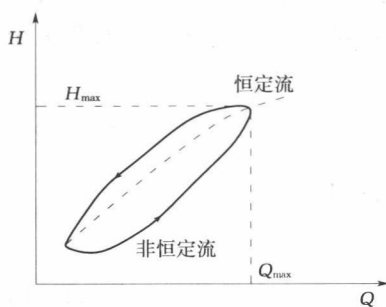


图 1.2 非恒定流的绳套现象

式 (1.26) 和式 (1.27) 表明, 非恒定流的流量—水位关系是一个绳套形的曲线 (图 1.2) [Henderson (1966)、Jansen (1979)、French (1985)]。而且式 (1.26) 联合连续方程, 还可以得到 Q, H, U, u_* 等水力参数到达最大值的先后顺序 [Forchheimer (1914)、Flamant (1923)、Coleman (1962)、Tu (1993)、Graf (1995)、Song and Graf (1996)、Song (1997)、刘春晶 (2004)]。Qu (2003) 结合试验认为, 如果上述假定正确的话, 则各水力参数到达最大值的先后次序为: 首先

先达到最大值的是能坡 $S_{f\max}$, 其次是摩阻流速 $u_{* \max}$, 再次是平均流速 $U_{\max}$, 然后是 Chezy 系数 $C_{\max}$, 之后才是流量 $Q_{\max}$, 最后到达最大值的是水深 $H_{\max}$ 。

1.2.3.4 非恒定流波的变形特征

众多的试验研究和实测资料都表明, 非恒定流在传播过程中会发生波的衰减和变形, 不但沿时间存在变形, 而且在纵向波高上也存在变形。通常来说, 非恒定流在传播时, 随着传播距离的增加, 其上升段往往越来越陡, 下降段越来越缓, 甚至出现波的破碎现象 (Lamberti and Pilati 1996); 而且波幅随着传播距离增加存在坦化现象, 越来越小。

Kundzewicz and dooge (1989)、Mishra and Singh (2003) 给出的不变形单谐波在明渠中的运动表达式为

$$f(x, t) = f_0 \cos(\tilde{\omega}_R t + \beta_R t) \quad (1.28)$$

式中: f_0 为变量的半幅值; t 为时间; x 为传播距离; $\tilde{\omega}_R = 2\pi/T$ 为角频率; T 为周期; $\beta_R = 2\pi/\lambda$ 为波数; λ 为波长。

通过数学分析, Kundzewicz and dooge (1989) 写出非恒定流波的衰减幅度的表达式:

$$\delta = 2\pi(\tilde{\omega}_I/\tilde{\omega}_R + \beta_I/\beta_R) \quad (1.29)$$

其中, $\tilde{\omega}_I$ 、 β_I 分别表示非恒定流波随时间及空间的变形。从式 (1.29) 可以看出, 非恒定流运动必然会发生变形。

Tu (1991) 根据天然河流的实测资料分析认为, 当非恒定流传播距离达到一个波长以后, 上升段所花时间约占周期的 1/3。

刘春晶 (2004) 用式 (1.30) 表示非恒定流波的变形:

$$T_{nd} = T_r/T_d \quad (1.30)$$

T_r 、 T_d 分别表示涨水时段和落水时段所花的时间, 刘春晶的试验结果表明, 当非恒定流传播距离为半个波长时, 上升段所花时间约 0.35 个周期, 当非恒定流传播距离达到一个波长以后, 上升段所花时间约 0.27 个周期。Hu Jiang (2012) 试验研究结果表明, 非恒定流波的变形率不仅和传播距离有关, 还和非恒定流的周期、相对流量变幅等参数有关。

1.2.3.5 明渠非恒定流的垂线流速分布

以往对于明渠非恒定流的研究中, 摩阻流速 u_* 不是一个单独确定的数, 而是通过事先假定流速的垂线分布形式, 再通过实测数据来反算。根据明渠均匀流在对数区内流速分布呈对数分布的规律以及非恒定管流的经验, 多数研究均假定非恒定流仍然遵循 $k = 0.41$ 的对数律, 然后试算 u_* 和积分常数 C 。

Nezu and Nakagawa (1993) 认为, 在恒定流状态下, 不管是明渠流, 还是有压管流或者是边界层流动, 卡门常数均为固定值 $k = 0.41$, 而积分常数 C 在 5.0~5.5 之间, 但是对于非恒定流, 这两个数仍然是不确定的。Jensen (1989) 研究振荡流发现, 除了在早期的加速阶段和末期的减速段, 整个过程中流速分布均遵守对数律。Akhavan (1991) 的试验结果认为管道内非恒定流仍然存在流速的 3 个分区, 对数区内 $k = 0.41$, 而 C 值在 2.5~4.5 之间。Brereton and Mankbadi (1995) 推断对数律仍然适合非恒定流。Nagano (1993) 利用热线测量了非常靠近壁面的压力梯度, 发现 $k = 0.41$ 而 C 随压力变化而变化, Spalart (1987)、Spalart P. R. and Watmuff (1993) 通过边界层理论的直接数值计算也获得同样的结果。这些研究成果对于以后的非恒定流研究具有较大的启发作用, Nezu (1993, 1994) 即利用 $k = 0.41$ 而 C 值变化讨论明渠非恒定流 u_* 的变化过程。

在明渠非恒定流的研究中, u_* 的确定是关键和难点。Tu (1991)、Song (1994) 和 Rowinski (2000) 都认为非恒定流的 u_* 计算方法不同于恒定流, 而且提出了可以用 Saint-Venant 方程计算, 但是在参数的选择上差异颇大。而且由于方程中各项参数不易确定, 因而本身并没有得到很好的结果。Nezu (1997) 认为二维非恒定流紊流运动方程中, 非恒定时变项占主导地位, 而对流项可以忽略不计; 而 Qu (2003) 通过试验认为 Saint-Ve-

nant 方程在某些时段会低估底部剪切力, 而某些时段出现负的剪切力, 同样的观点出现在刘春晶 (2004) 的研究中, 所以无法用 Saint - Venant 方程获得底部摩阻 u_* 。因此, 目前的研究基本上还是采用对数律反算 u_* , 同时试算积分常数 C 值。但是, 明渠非恒定流的流速分布到底如何, 没有人从理论上或者是一个系统试验中直接获得, 因而以往研究思路导致试验结果差异很大。根据 Nezu 的结果, 积分常数在涨水阶段开始时刻最大, 然后减小, 当过了波峰以后再增大, 至一定值以后又减小至整个过程的最小值, 最后又呈上升趋势, 但积分常数 C 逐波减小, 落水段明显小于涨水段, 而且在一个周期内不封闭。而刘春晶 (2004) 的研究则认为 C 值在非恒定流传播中没有明显规律可循。总的来看, 目前对于明渠非恒定流流速的研究中, 大多并不是一个完整的体系, 非恒定流过程中的 u_* 、 k 和 C 值的变化规律仍然不明确。

由于对非恒定流内部结构的研究需要较高的试验条件, 因而近几年来在这方面进展不大, 除了一部分试验外, 众多的研究集中于数学模型上, 而且主要针对于实际应用。很明显, 要想弄清楚明渠非恒定流的特性, 还是要依靠更为先进的试验手段并摆脱固有思路的束缚, 对其进行系统的研究。

1.3 研究思路

在明渠非恒定流传播过程中, 包含流速 U 和水面坡度 S_f 的各项确定较为困难, 因而 u_* 难以独立确定。

但是, 水流运动时流量 Q 和水深 H 始终是一个连续的过程, 都是一个可以确定的连续函数。根据式 (1.19) 和式 (1.20), 可以写出如下的床面剪切应力表达式:

$$\frac{B}{\rho}\tau_0 = gAJ - \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{Q^2}{A^2} \left(1 - \frac{gA^3}{Q^2 B}\right) \frac{\partial A}{\partial x} \quad (1.31)$$

可见, 只要能够确定非恒定流传播过程中的 Q 、 A 的函数表达式, 那么式 (1.31) 中的各项无论是对时间的导数, 还是对距离的导数, 都可以直接计算得到, 则床面剪切力 τ_0 和摩阻流速 u_* 就能够独立确定。在确立了 u_* 的基础上, 通过精细的测量非恒定过程的流场分布, 则非恒定流传播过程中各项水力参数的变化规律将是明确的。

本书的研究思路是: 从研究正坡条件下正弦型非恒定流的传播特性开始, 通过多组试验, 获得非恒定流传播过程中流量、过水面积的变化规律, 进一步探讨床面剪切力 τ_0 和摩阻流速 u_* 的变化过程, 再研究非恒定流垂线流速分布规律。

1.4 主要工作

针对目前明渠非恒定流研究中存在的问题, 本研究利用水槽试验, 首先研究光滑明渠内正坡条件下正弦非恒定流的传播特性, 得到非恒定流传播过程中波速 C_0 、水深 H 和流量 Q 的表达式, 在此基础上讨论非恒定流传播过程中床面剪切力 τ_0 和摩阻流速 u_* 的变化规律, 最后利用 PIV 测量非恒定流的流速分布, 讨论明渠非恒定流过程中的卡门常数和积分常数 k 、 C 的变化规律, 主要工作及研究内容包括:

(1) 建立长度分别为 5m、28m 的两套高精度非恒定流试验水槽，由变频器控制水泵转速产生连续的稳定的非恒定流过程，通过电磁流量计测量流量、超声水位计测量水位、PIV 测量流场，并开发同步控制程序实现流量、水深和流场的同步测量。

(2) 在 5m 水槽内进行光滑明渠均匀流试验，通过 PIV 测量均匀流的流场，研究均匀流的垂线流速分布及紊动特性，同时验证整套系统的稳定性。

(3) 在 28m 水槽内进行光滑明渠非恒定流的传播特性试验，研究非恒定流的传播速度、非恒定流波的变形特征以及流量 Q 和水深 H 的变化规律。

(4) 建立流量 Q 和水深 H 的表达式，利用流量、水深表示的 Saint - Venant 方程式 (1.31) 求解非恒定流传播过程中解床面床面剪切力 τ_0 和摩阻流速 u_* 。

(5) 理论分析推导明渠非恒定流流速分布，在 5m 水槽内进行明渠非恒定流流速分布的试验，研究非恒定流传播过程中卡门常数和积分常数 k 、 C 的变化规律，并与理论推导结果进行对比验证。

本研究技术路线如图 1.3 所示。

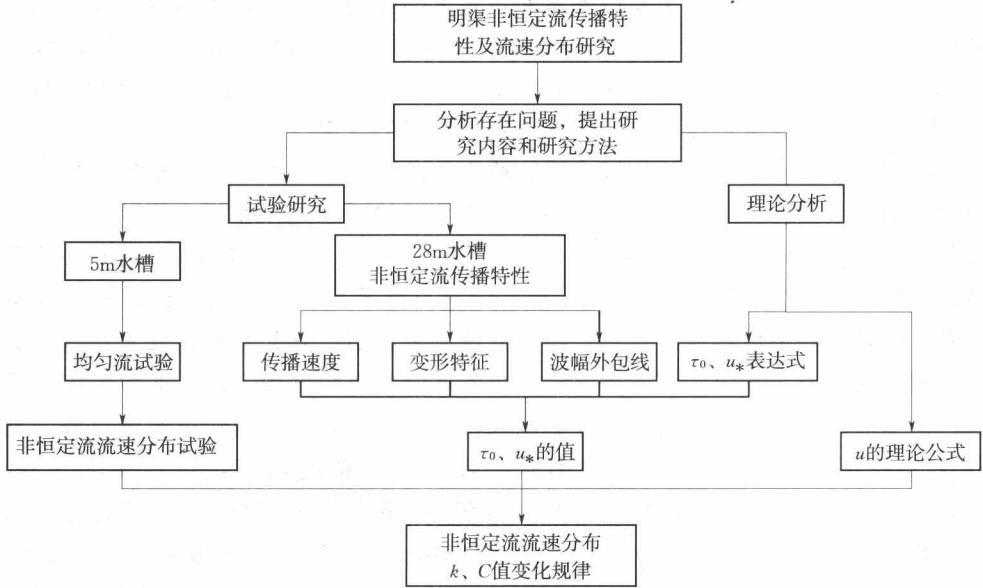


图 1.3 本研究技术路线图