

明渠流淹没丁坝周围流场特性的实验

张冠卿, 林鹏智

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 为了研究淹没丁坝对水流的影响, 对单丁坝周围水流结构进行了定床实验研究, 采用粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV), 获得了丁坝周围水流的流速信息, 从多方面对水流结构进行分析, 在此基础上分析了淹没丁坝的绕流机理。结果表明, 淹没丁坝周围的水流结构具有强三维非恒定特性, 在瞬时流场下, 丁坝后的尾流紊动强烈, 丁坝坝头和坝顶是涡旋的发源地, 在坝后流速梯度较大的区域, 紊动强度值和平均涡量值均偏大。

关键词: 淹没丁坝; 粒子图像测速技术; 水流结构; 紊动强度; 涡量

中图分类号: TV133.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2012)S2-0031-03

在航道整治和防洪护岸工程中, 丁坝是一种常用的整治建筑物, 其坝根与河岸连接, 坝头伸向河心, 坝轴线与水流的方向正交或斜交, 在平面上与河岸构成“丁”字形, 形成横向阻水的整治建筑物。丁坝对水流产生两种作用^[1-4]: 首先是对主流时均运动的作用; 其次是涡旋的扩散传播对紊动场的作用。丁坝诱发的剪切涡带在其向下游传播过程中与主流叠加, 形成一条狭长的高能量强冲刷带向下游延伸^[5-6]。

对于丁坝周围水流结构的研究, 以往主要关注的是非淹没丁坝的回流区结构, 并且测量手段多为点测量, 但是对于淹没工况下丁坝周围的全场测量比较少。部分学者^[7-8]采用声学多普勒流速仪对非淹没丁坝进行了弯道水槽和动床水槽的实验研究, 对回流区的流场结构和紊动特性进行了分析, 结果显示较强的紊动主要分布在坝头和冲刷坑范围内, 在水流紊动强烈的区域切应力值也较大; 于守兵等^[9-11]应用采用旋浆流速仪和三维激光颗粒动态分析仪等测量手段, 对丁坝周围流场进行了精细的点测量, 系统分析了丁坝下游时均流场和紊动速度分布规律; 彭静等^[12-13]利用流动显示技术、油膜技术和片光源技术对丁坝的绕流流动进行了可视化实验研究, 重点观测分析了坝头分离漩涡在河床底部及边壁分布形态, 结果表明, 丁坝坝前坝后各有一个漩涡, 尾涡是由于坝头的紊流所造成的, 但是缺乏定量的研究分析。

针对淹没丁坝周围水流强烈的三维特性, PIV测量技术有着独特优势, 无接触式的全场测量可以实现对流场的零干扰, 为研究丁坝水流的结构和绕流机理提供参考依据。

1 实验概述

实验在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室进行。实验水槽长 5 m、高 0.6 m、宽 0.366 m, 是断面为矩形的明渠, 槽底及边壁的材料是玻璃, 在水槽出口采用不同高度的薄壁堰控制水深, 实验采用自循环供水系统。丁坝模型为正挑丁坝, 坝长 50.0 mm、宽 10.0 mm、高 60.0 mm, 固定在水槽的左岸 (顺水流方向), 距离进口断面 2.1 m。入流水深 $H = 100.0$ mm; 入流流速 $u = 0.1011$ m/s, 入流雷诺数 $Re = 6550.14$ 。

实验应用美国 TSI 公司生产的粒子图像测速系统 (particle image velocimetry, PIV), 实验装置如图 1 所示。光学照明系统采用 Nd:YAG 双脉冲激光器, 可见波长 532 nm, 每个脉冲能量为 120 mJ, 最大频率为 15 Hz, 脉冲宽度为 3 ~ 5 ns; 示踪粒子采用 10 μ m 级的聚苯乙烯颗粒, 其相对密度为 0.98; 图像记录系统包括 CCD 相机、同步器、数据采集卡和计算机, 其中 CCD 分辨率为 2048 像素 \times 2048 像素; 分析软件使用 Insight 3G。

坐标系设置如图 2 所示, 顺水流方向为 x 方向, 水平垂直于水流方向为 y 方向, 垂直于水平面方向

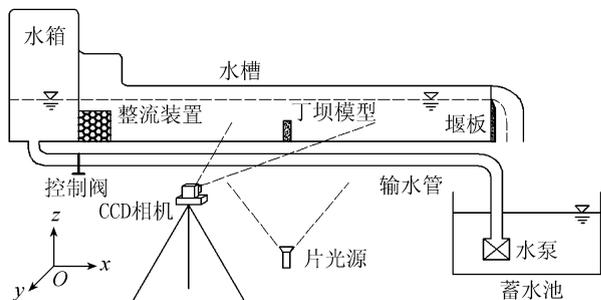


图1 实验装置示意图

为 z 方向;丁坝坝根处(丁坝下游面)为起始断面,起始断面上游记为负,下游记为正。在实验段 xOy 平面和 xOz 平面分成若干区域进行拍摄测量,统一采用 1.04 Hz 进行拍照采样。

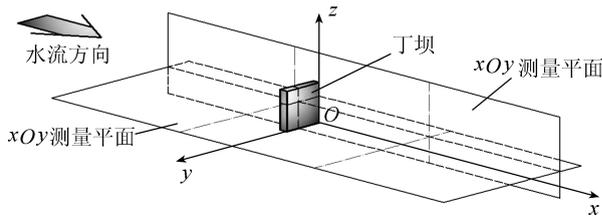


图2 实验坐标系设置

2 实验结果与分析

在各态遍历假说成立的前提下,时均法是研究紊流的基本方法。根据实验要求,实验结果主要关注平均流速、平均涡量、紊动强度等物理量。

2.1 平均流速

平均流速是研究紊动水流的一种基本物理量。由于丁坝附近水流瞬时流态紊乱无规则,很难通过瞬时流速场直接得出其运动规律,且瞬时流速场无法进行拼接处理。所以在充分采样后,求得平均流速场过滤掉紊动信息,通过拼接处理得到较直观的全场流速信息。

速度场量的平均值采用节点处数据的样本平均计算:

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n u_i \quad \bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n v_i \quad \bar{w} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n w_i \quad (1)$$

式中: $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 分别为纵向、横向、垂向平均流速; u_i, v_i, w_i 分别为纵向、横向、垂向瞬时流速; n 为样本数。

由于丁坝的存在,水流的速度场和压力场均发生变化,流态变得复杂紊乱。从图3可看出,在丁坝上游的阻水区域和水流绕过丁坝的区域流速梯度均较大,是涡旋产生的区域。在完全淹没的工况下,来流受到丁坝的阻挡作用,一部分水流越过丁坝坝顶下泄,另一部分水流绕过丁坝坝头下泄。在上游坝

根处形成一个小尺度的角涡,其流速不大,作用范围也较小;在丁坝下游的回流区域掺混作用强烈,三维紊动较强;由于丁坝的束窄作用,主流经过丁坝后流速明显增加,在主、回流交界的区域形成明显的流速梯度变化。

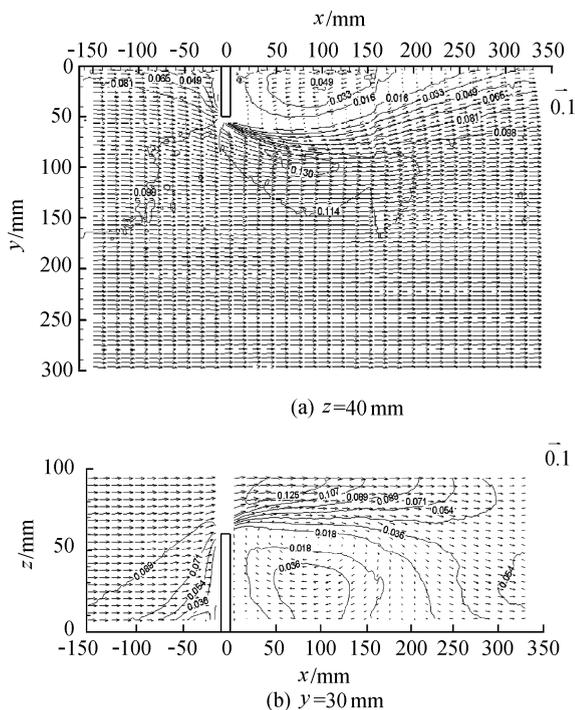


图3 平均流速等值线(单位:m/s)

2.2 平均涡量

涡量定义为流体速度的旋度,单位为 rad/s,涡旋通常用涡量来量度其大小和方向,其矢量表达式为

$$\begin{aligned} i\xi_x + j\xi_y + k\xi_z = & i\left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}\right) + \\ & j\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{w}}{\partial x}\right) + k\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right) \quad (2) \end{aligned}$$

针对二维流场,其涡量向量垂直于流体平面,其涡量为

$$\omega_y = \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \quad \omega_z = \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (3)$$

借助于二维有限差分的中心差分格式,可以由流场网格点速度计算出流场的涡量,网格点 (i, j) 的涡量 $\omega(i, j)$ 为

$$\begin{aligned} \omega(i, j) = & \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right)_{i, j} - \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right)_{i, j} = \\ & \frac{\bar{u}(i+1, j) - \bar{u}(i-1, j)}{2\Delta x} - \\ & \frac{\bar{v}(i, j+1) - \bar{v}(i, j-1)}{2\Delta y} \quad (4) \end{aligned}$$

式中: $\Delta x, \Delta y$ 分别为 x, y 方向上的网格步长。

一般认为,涡强可以用局部的涡量与涡量等值

线所包围的面积之乘积估算,其变化趋势可以用峰值涡量定性近似表示。

绕流水流在涡旋的主要发源地即丁坝坝头和坝顶处发生边界层分离。如图4所示,在丁坝上游坝根处存在一个小范围的角涡,虽然此处的流速较上游来流减小了很多,但是流线偏转角度较大,流速梯度增大,涡量绝对值也增大;较大的涡量绝对值出现在坝头和坝顶处,这些部位受到损坏的可能性较大。在时均的条件下,越过坝顶的水流并没有俯冲至床底,而是与主流区的水流共同作用在丁坝下游形成两个涡旋:一个远离丁坝较大的涡体和一个在丁坝下游坝跟处的较小的涡体。较大的涡体主要是由于水流的剪切作用形成的,较小的涡体主要是由于丁坝阻碍回流而产生的再次分流。

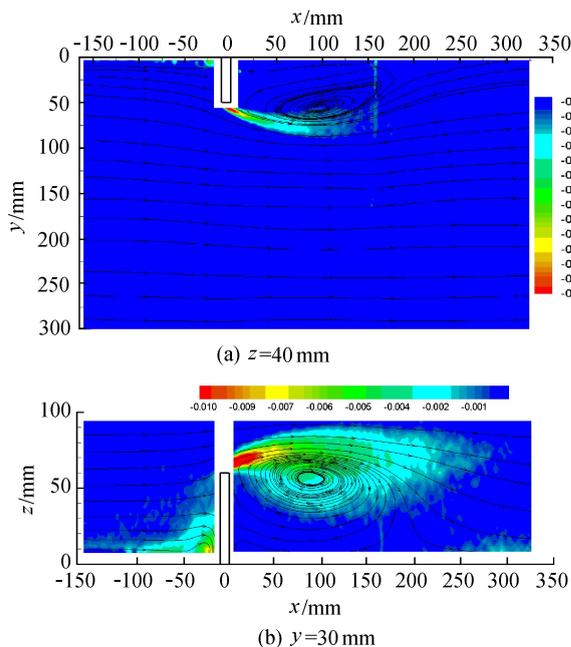


图4 平均涡量等值云图(单位:rad/s)

2.3 紊动强度

紊动强度是描述水流紊乱程度的物理量,单位为 m/s。对于丁坝导致的紊动水流,通常采用脉动流速的均方根来作为水流紊动强度,用来表示脉动幅度的大小,3个主方向的紊动强度分别为

$$\begin{aligned}
 |u'| &= \sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(u_i - \bar{u}_i)^2]}{N}} \\
 |v'| &= \sqrt{v'^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(v_i - \bar{v}_i)^2]}{N}} \\
 |w'| &= \sqrt{w'^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(w_i - \bar{w}_i)^2]}{N}} \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中: $|u'|$ 、 $|v'|$ 、 $|w'|$ 分别为纵向、横向、垂向紊

动强度; u' 、 v' 、 w' 分别为纵向、横向、垂向脉动流速,即瞬时流速与时间平均流速的差值。

如图5所示,水流的紊动主要由绕坝水流控制,紊动强度最大值出现在坝头和坝顶处。在坝后涡旋延伸方向,即主、回流交界处紊动强度较大,在丁坝下游形成了“包围式”的三维强紊动带,虽然强紊动带范围较小,但是其内部水流结构复杂紊乱。丁坝坝顶及坝头周围的压力梯度、流速梯度、涡量值、紊动强度均较大。

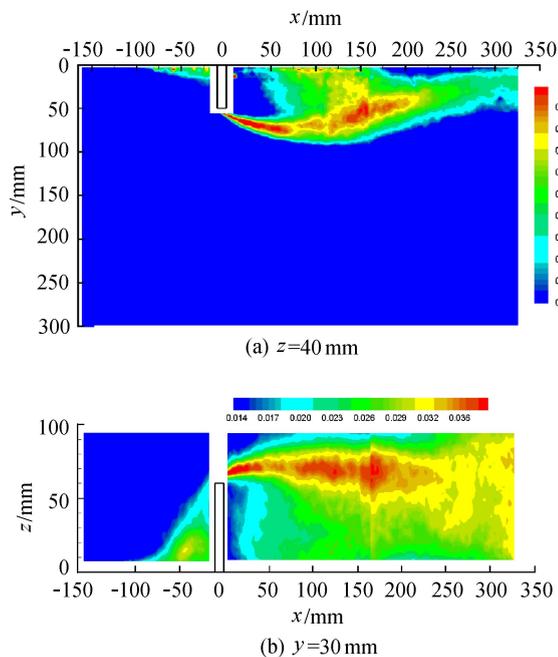


图5 紊动强度等值云图(单位:m/s)

3 结论

丁坝在完全淹没条件下,下游的回流区的形成受制于丁坝的绕流,以垂向的回流为主,同时也受到坝头侧向分离水流的影响,产生倾斜和扭转。由于丁坝的阻水作用,绕坝水流在较高的流速梯度下会产生较大的剪切应力,导致边界层分离,涡旋每隔一段时间产生并向下游移动,在一系列向下游运动的涡旋之间,频繁发生相互碰撞、破碎、合并的现象。涡旋的移动路径及它们的排列都是随机的,它们既可能侵入回流区,又可以楔入主流区。根据涡的串级理论,大尺度的涡旋从基本流动中获得较大的能量,并且在回流区末端以下的一段距离内才会耗散,由于紊流的脉动和掺混,在丁坝下游一个较大的范围内,流速、压强、涡量等物理量的脉动量都较大,致使动量和能量的扩散传递大大增强,使得丁坝下游较大的范围内都有明显的紊动现象,主、回流边界不能够保持稳定。

(下转第43页)

定量评价增强效果,表1同时给出了对图2和图3中各种增强方法得到的图像进行定量评价的结果。对比度测量值越大,图像的对比度越好,表1的定量数据表明,本文提出的方法的评估值均高于另外几种方法。

表1 各增强算法定量对比度测量值评价

实验图	直方图均衡化增强	多尺度 Retinex 增强	小波变换增强	本文方法增强
图1	0.0860	0.0978	0.1023	0.1176
图2	0.0863	0.0876	0.0908	0.1109

4 结论

基于 Curvelet 变换的边缘表示优势,结合非线性增益函数提出了一种边缘保护的低能见度水下图像增强方法。实验结果表明,与经典方法相比,本文方法得到的增强图像具有更好的视觉效果和对对比度评价指标,在有效提高图像整体对比度、抑制水下背景噪声的同时,更好地保护了目标的边缘细节。文中同时给出了具体的实验参数和部分参数选取的一般规律,其中,增益速率、增益调节因子等参数还需要根据经验手动设置,如何自适应地确定相关参数以推广方法的适应性是需要进一步深入研究的问题。

参考文献:

[1] 金伟其,王霞,曹峰梅,等.水下光电成像技术与装备研究进展[J].红外技术,2011,33(3):125-132.
 [2] 边信黔,王晓娟.基于散射模型的水下图像复原[J].机器人,2010,32(6):721-725.
 [3] 陈从平,王健,邹雷,等.一种有效的低对比度水下图像

增强算法[J].激光与红外,2012,42(5):567-571.
 [4] CHEN S D, RAMLI A R. Minimum Mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(4):1310-1319.
 [5] POLESEL A, RAMPONI G, MATHEWS V J. Image enhancement via adaptive unsharp masking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(3):505-510.
 [6] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3):451-462.
 [7] JOBSON D J. A multiscale Retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7):965-976.
 [8] 吴颖谦,施鹏飞.基于小波变换的低对比度图像增强[J].红外与激光工程,2003,32(1):3-7.
 [9] CANDÈS E J, DONOHO D L. Curvelets [R]. Stanford, California: Department of Statistics, Stanford University, 1999.
 [10] CANDÈS E J, DEMANET L, DONOHO D L, et al. Fast discret curvelet transforms [R]. Pasadena, California: Applied and Computational Mathematics, California Institute of Technology, 2005.
 [11] DONOHO D L. Denoising by Soft Thresholding [J]. IEEE Transactions On Information Theory, 1995, 41(3):613-627.
 [12] 石丹,李庆武,倪雪,等.基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法[J].光学学报,2009,29(2):342-346.

(收稿日期:2012-07-10 编辑:熊水斌)

(上接第33页)

参考文献:

[1] ETTEMA R, MUSTE M. Scale Effects in flume experiments on flow around a spur dike in flatbed channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2004, 130(7):635-646.
 [2] ELAWADY E, MICHIEU M, HINOKIDANI O. Experimental study of flow behavior around submerged spur-dike on rigid bed [J]. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 2000, 44:539-544.
 [3] 韩玉芳.丁坝的造床作用研究[D].南京:南京水利科学研究院,2003.
 [4] 应强.淹没丁坝附近的水流流态[J].河海大学学报,1995,23(4):62-68.
 [5] 李洪.丁坝水力学特性研究[D].成都:四川大学,2003.
 [6] 曹棉.丁坝的水毁机理及稳定计算[D].重庆:重庆交

通大学,2006.
 [7] 曹艳敏,张华庆,蒋昌波,等.丁坝冲刷坑及下游回流区流场和紊动特性实验研究[J].水动力学研究与进展: A辑,2008,23(5):560-569.
 [8] 周阳.丁坝对弯道水流流态影响的实验研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2006.
 [9] 于守兵.淹没丁坝对水流结构的调整作用研究[D].南京:南京水利科学研究所,2010.
 [10] 黑鹏飞.丁坝回流区水流特性的实验研究[D].北京:清华大学,2009.
 [11] 高桂景,王平义,杨成渝,等.丁坝附近水流动能分布研究[J].水运工程,2007(11):75-79.
 [12] 彭静,河原能久.丁坝群近体流动结构的可视化实验研究[J].水力学,2000(3):42-45.
 [13] 张柏山,吕志咏,祝立国.绕丁坝流动结构实验研究[J].北京航空航天大学学报,2002,28(5):585-588.

(收稿日期:2012-07-31 编辑:熊水斌)