

横流中水平浮射流三维运动轨迹测量方法

肖 洋^{1,2},朱小连²,李开杰²,王乃茹²,韩柯尧²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:横流条件下水平浮射流的运动轨迹线为三维、扭曲的曲线,通过设计一种可确定射流轨迹空间坐标的三维图像测量技术,实现了横流条件下水平浮射流的三维运动轨迹测量。实验结果表明,受横流的作用,三维轨迹线在水平面上的投影轨迹线显示了与横流中水平动量射流轨迹线相近的特性,受浮力的作用,在铅垂面上的投影轨迹线在垂向随着距孔口距离的增大逐渐呈线性抬升的趋势。
关键词:横流;水平浮射流;射流轨道线;三维图像测量技术
中图分类号:TV132.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)03-0001-04

A measuring method of three-dimensional trajectory of a horizontal buoyant jet in cross flow//XIAO Yang^{1,2}, ZHU Xiaolian², LI Kaijie², WANG Nairu², HAN Keyao²(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)
Abstract: The trajectory of a horizontal buoyant jet in cross flow is a three-dimensional and skewed curve. In order to measure the curve, a three-dimensional flow visualization system, which can determine the spatial coordinates of a horizontal buoyant jet trajectory, was designed. The test results show that the horizontal projection trajectory of the three-dimensional trajectory is similar to the trajectory of a momentum jet because of the cross flow. Due to the influence of the buoyancy force, the xOz plane projection trajectory of the three-dimensional trajectory is an increasing curve.
Key words: cross flow; horizontal buoyant jet; jet trajectory; three-dimensional flow visualization system

射流轨迹线是描述射流运动特性的基本参数之一,受到了研究者的广泛重视,已采用多种方法进行研究,如平面激光诱导荧光技术(PLIF)^[1-3]、粒子图像测速技术(PIV)^[4-5]和数值模拟^[6-8]等。然而上述研究多关注在静止水流环境或者均匀流动环境下,射流轨迹线为二维曲线这类相对简单的情况。

对于实际工程中较常出现的射流现象——具有三维运动轨迹的横流中水平浮射流(环境流体速度 U_a 、动量 M 和浮力通量 B 分别在 x 、 y 、 z 3个不同的方向,射流轨迹线是三维、扭曲的曲线,见图1。图中, h_k 为羽流元的厚度; b_k 为羽流元的半径; V_k 为射流流速; φ_k 为射流流向与水平面 xOy 的夹角; θ_k 为射流流向在水平面 xOy 的投影与 x 轴的夹角^[9]),由于测量手段的局限,相应的实验数据较少。文献[9]使用盐水作为示踪物研究了横流中水平浮射流的三维运动轨迹(密度弗劳德数 Fr 的变化范围为

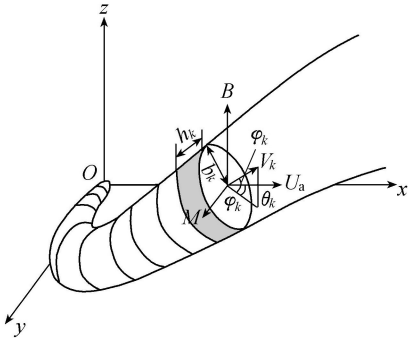


图1 横流中水平浮射流流动示意图

15~90),将三维浮射流运动轨迹线向 xOy 平面和 xOz 平面上投影,其中 xOy 平面为水平平面(动量), xOz 平面为垂直平面(浮力通量),分别研究三维浮射流运动轨迹线在 xOy 平面和 xOz 平面的运动规律。文献[10]基于文献[9]的实验数据,建立了动量作用远区内的三维运动轨迹和中心线稀释度的关

系。文献[11]采用光衰减技术(light attenuation technique)示踪最大浓度位置的方法确定了三维射流轨迹线(实验中 Fr 分别为64.8和77)。然而,对于 Fr 较小的区域($1 < Fr < 15$),由于浮力的作用增强,一方面使射流轨迹线的三维特性更加明显,另一方面实验中的射流流体难以制备,相应的研究报道很少。

本文采用密度可调的酒精与水混合物作为射流流体,设计出一种可确定射流轨迹空间坐标的三维图像测量技术,实现了低密度弗劳德数下横流中水平浮射流的三维运动轨迹测量。

1 实验装置和率定

实验水槽为长15 m、宽0.4 m、高0.5 m的变坡玻璃水槽,最大流量约为50 L/s。水槽时均流速采用Sontek 微型声学多普勒流速仪 ADV 测量,流量采用超声波流量计测量,水深采用不锈钢钢尺测量。为保证进流条件的均匀性,所有实验均在水槽中部进行。

射流系统由射流排放物质容器、水泵、平水塔、2个并排布置的转子流量计(最大量程分别为40 L/h和250 L/h)和1个射流口组成(两种实验工况下,射流口直径分别为2.02 cm和1.35 cm)。射流物质采用酒精、水和有色染料(brilliant scarlet 4R 542)的混合物,当射流物质从射流口排放出来以后,采用注射器从射流管内抽取部分溶液,使用DA-300 电子密度计测量其密度和环境水体的密度,同时使用FLUKE 54II 温度计测量射流物质和环境水体的温度,以确定其密度差。

三维流动显示系统由Sony XC75CE CCD 摄像机(2台)、图像采集卡、聚光灯(2盏)、示踪物、蠕动泵(用于注射示踪物进入浮射流)和图像处理软件组成,系统布置示意图见图2。

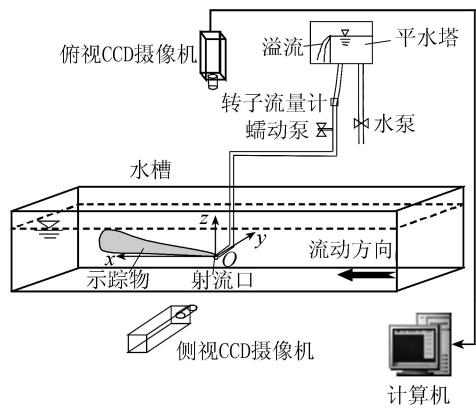


图2 三维流动显示系统示意图

由于横流条件下单孔水平浮射流同时受到横流和浮力的作用,射流运动轨迹是一条扭曲的三维曲线,为了定量研究其运动轨迹的变化,将三维运动轨迹进行分解,即将其运动轨迹向水平平面(xOy 平面)和铅直平面(xOz 平面)进行投影,采用CCD摄像

机俯视和侧视同时记录其运动图像(图像大小均为768×576 像素)。由于2台CCD摄像机距射流口的距离不一致,且对于三维运动轨迹上的不同截面,其距CCD摄像机的距离也是变化的,为了将图像的像素值转换为实际大小,每次实验前均需进行图像的率定,率定步骤如下:

准备两块绘有网格(已知网格实际尺寸)的有机玻璃板(简称网格板),用于将图像的像素值转换为实际尺寸,并将水槽中充满水以模拟实际的实验环境。率定实验的坐标定义见图2,坐标原点位于射流口的中心。

对于水槽中的 xOy 水平平面(俯视平面),当水平放置的网格板与射流口水平中心平面位于同一平面时,即 $z=0$ 时,由俯视CCD摄像机记录网格板图像,通过网格板实际尺寸计算出图像上1 cm长度对应的像素值 T_0 和网格板平面距水槽底部的距离 z_0 ;抬高网格板至 $z=z_1$,记录另一幅网格板图像,计算出图像上1 cm长度对应的像素值 T_1 和网格板平面距水槽底部的距离 Z_1 ,此时 $z_1=Z_1-z_0$;再抬高网格板至 $z=z_2$,记录第3幅网格板图像,计算出图像上1 cm长度对应的像素值 T_2 和网格板平面距水槽底部的距离 Z_2 ,此时 $z_2=Z_2-z_0$ 。对于同一台CCD摄像机,其记录的图像上1 cm长度对应的像素值应与其距摄像机的距离成正比,则可建立对于任意 xOy 水平平面图像上1 cm长度对应的像素值 T 随坐标 z 的线性变化关系,即

$$T = A_1 z + T_0 \quad (1)$$

式中: A_1 为直线的斜率。

同样,对于水槽中的 xOz 铅直平面(侧视平面),可建立对于任意 xOz 铅直平面图像上1 cm长度对应的像素值 S 随坐标 y 的线性变化关系,即

$$S = A_2 y + S_0 \quad (2)$$

式中: A_2 为直线的斜率; S_0 为 $y=0$ 铅直平面图像上1 cm长度对应的像素值。

根据上述率定曲线,便可将水平浮射流三维运动轨迹在 xOy 平面和 xOz 平面投影的坐标统一起来,并将对应的像素值转换为实际大小(图3)。

在图3中,首先定义2套坐标系,即(x, y, z)坐标是以像素为单位的坐标系(下称像素坐标),(X, Y, Z)坐标是以实际尺寸cm为单位的坐标系(下称实际坐标)。对于三维运动轨迹上的任一点 C ,其像素坐标为(x_c, y_c, z_c),此时,在 XOZ 平面内,其对应的实际坐标为(X_c, Z_c),在 XOY 平面内,其对应的实际坐标为(X_{c1}, Y_c),由于侧视CCD摄像机距过 C 点垂直于 x 轴平面的距离与俯视CCD摄像机距过 C 点垂直于 z 轴平面的距离是不相等的,对于

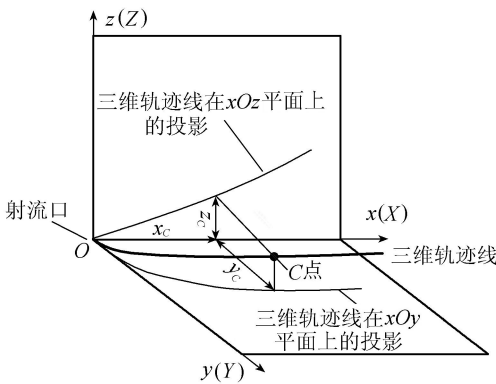


图3 三维轨迹线投影关系及坐标系示意图

同一点 C , 相同的像素坐标 x_c 对应了不同的实际坐标 X_c 和 X_{c1} 。对于 $y=y_c$ 平面, 图像上 1 cm 长度对应的像素值 $x_c/X_c=z_c/Z_c$, 由式(2)可表示为

$$x_c/X_c = z_c/Z_c = A_2 y_c + S_0 \quad (3)$$

同理, 对于 $z=z_c$ 平面, 由式(1), 图像上 1 cm 长度对应像素值 $x_c/X_{c1}=y_c/Y_c$ 可以表示为

$$x_c/X_{c1} = y_c/Y_c = A_1 z_c + T_0 \quad (4)$$

通过解式(3)和式(4), 便可求出三维轨迹线上任意一点 C 的实际坐标值(X_c/X_{c1} , Y_c , Z_c)。

图像处理步骤如下:

a. 图像的数字化。流动图像和背景图像(没有

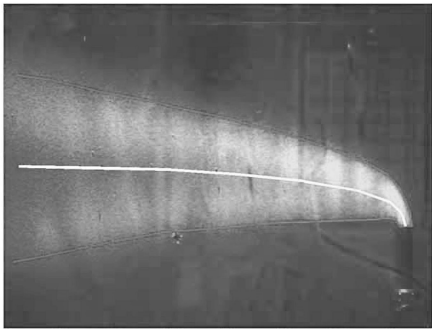
射流时的图像)的数字化采用单色图像采集卡(DT 3155)采集, 数字化图像大小为 768×576 像素的灰度图像, 灰度级变化从 0 到 255。对于每一次三维流动显示实验, 采集 200 幅射流图像和 10 幅的背景图像, 采样时间间隔为 0.1 s。

b. 图像的优化。由于存在背景图像, 原始的射流图像可能是不清楚的, 通过将背景图像从原始射流图像中减去的方法, 以消除背景图像的影响。

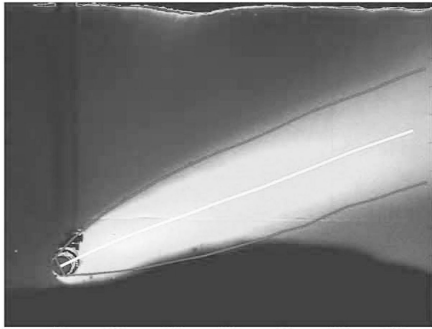
c. 射流边界线和射流中心轨迹线的确定(图4)。通过射流的俯视图和侧视图人工识别射流边界线, 而后取射流边界线的中点连线, 即为射流中心轨迹线。这样便可得到射流中心轨迹线的像素坐标(在俯视图和侧视图上, 其像素坐标是相同的), 再通过式(3)和式(4), 则可得到射流中心轨迹线的实际坐标。

2 实验工况

本实验的坐标系定义为: x 向为沿水流方向即纵向(横流方向); y 向为沿水槽的横向(射流方向); z 向为垂向, 向上为正, 坐标原点位于射流口的中心, 则俯视平面为 xOy 平面, 侧视平面为 xOz 平面。各实验工况见表 1。



(a) 俯视



(b) 侧视

图4 射流边界线和射流中心轨迹线的确定

表1 横流中单孔水平浮射流三维轨迹线实验参数

实验工况	D/cm	$U_0/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$U_a/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho_a/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	R	l_b/cm	l_m/cm	Fr
HB1J11	2.02	12.5	5.3	975.6	996.3	2.38	5.6	1.9	2.4
HB1J12	2.02	17.7	5.3	969.8	995.9	3.40	9.9	6.0	2.5
HB1J13	2.02	24.6	5.1	975.5	996.5	4.90	12.6	8.7	3.8
HB1J14	2.02	12.5	8.5	967.2	995.0	1.47	1.8	1.7	1.5
HB1J15	2.02	17.7	8.0	966.8	994.6	2.23	3.1	2.4	2.2
HB1J16	2.02	24.6	8.2	967.0	994.2	3.00	3.9	3.3	3.0
HB1J21	1.35	10.5	5.4	967.3	996.5	1.94	2.8	2.3	1.7
HB1J22	1.35	29.9	5.2	966.5	996.1	5.70	8.7	6.8	4.8
HB1J23	1.35	39.6	5.4	966.4	996.8	7.40	10.8	8.8	6.2
HB1J24	1.35	10.5	8.3	967.5	995.9	1.26	0.7	1.5	1.7
HB1J25	1.35	29.9	8.1	968.7	995.6	3.67	2.1	4.4	5.0
HB1J26	1.35	49.4	8.1	968.1	995.3	6.12	3.6	7.3	8.2

注: D 为射流口直径; U_0 为射流初始速度; U_a 为环境流体速度; ρ_0 为射流初始密度; ρ_a 为环境流体密度; R 为射流与横流速度比; $l_b = B_0/U_a^3$ 为浮力长度尺度, 其中 B_0 为射流初始浮力通量; $l_m = M_0^{1/2}/U_a$ 为动量长度尺度, 其中 M_0 为射流初始动量; Fr 为密度弗劳德数。

3 实验结果分析

各工况横流中单孔水平浮射流三维运动轨迹线实验结果见图 5 和图 6,从图 5 可以看出,射流的轨迹线显示了与横流中水平动量射流轨迹线相近的特性,即当射流从射流口喷出后,可分为近区、弯曲段和随流扩散区。在射流近区,受射流动量的作用,射流轨迹线在 y 向快速抬升;随后,在横流的作用下,逐渐发生弯曲,进入弯曲段,且随着射流与横流速度比 R 的增大,射流的弯曲程度逐渐减小;最后进入射流扩散区,该区内射流的运动方向趋于与环境水体的流动方向一致。随着射流与横流速度比 R 的增大,射流轨迹线弯曲程度逐渐增大,与射流的密度无关。

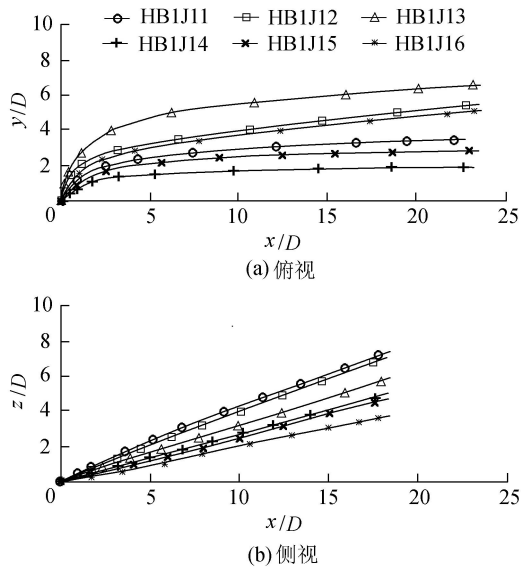


图 5 横流条件下单孔水平浮射流三维运动轨迹线 ($D=2.02\text{ cm}$)

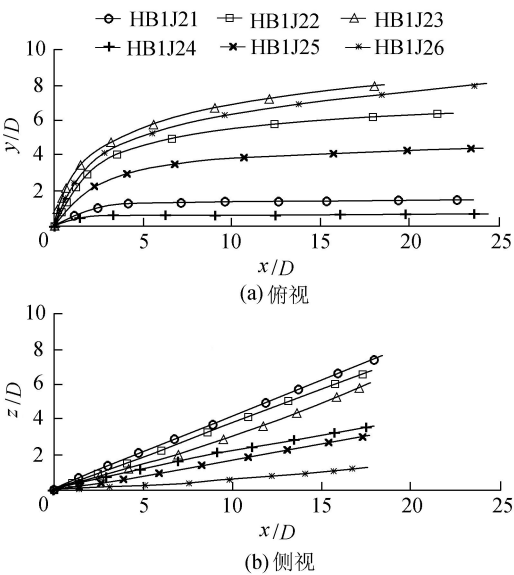


图 6 横流条件下单孔水平浮射流三维运动轨迹线 ($D=1.35\text{ cm}$)

由图 6 可以看出,当射流从射流口射出后,在浮力的作用下,射流轨迹线在 z 向随着距孔口距离 x 的增大逐渐呈线性抬升的趋势,且对于相近的横向流速条件,其射流轨迹线的抬升高度随密度弗劳德数的增大而降低,说明随着密度弗劳德数的增加,射流动量的作用增强,从而射流的卷吸强度增大,更多的环境水体被卷吸进入射流,导致射流与环境水体的密度差减小,射流轨迹线的抬升高度也随着降低;同时,对于不同横向流速情况,随着横向流速的增大,射流轨迹线的抬升高度明显降低,说明横向流速的增大对增强射流的卷吸强度有着明显的作用。

4 结 语

横流条件下单孔水平浮射流是其中较常见的一种流动现象,其射流轨迹线为三维、扭曲的曲线,流动现象非常复杂。本文根据其射流轨迹线的运动特点,构建了三维流动显示系统,对较小密度弗劳德数变化范围内,横流条件下单孔水平浮射流的三维运动轨迹进行了测量,结果表明,三维轨迹线在水平面上的投影轨迹线显示了与横流中水平动量射流轨迹线相近的特性,在铅垂面上的投影轨迹线在 z 向随着距孔口距离 x 的增大逐渐呈线性抬升的趋势。

参考文献:

[1] 黄真理,李玉梁.平面激光诱导荧光技术测量横流中射流浓度场的研究[J].水利学报,1994(11):1-7. (HUANG Zhenli, LI Yuliang. Study on the concentration measurement by a PLIF in a cross flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(11):1-7. (in Chinese))

[2] SMITH S H, MUNGAL M G. Mixing, structure and scaling of the jet in crossflow[J]. J Fluid Mech, 1998, 357: 83-122.

[3] 肖洋,唐洪武,华明,等.同向圆射流混合特性实验研究[J].水科学进展,2006,17(4):512-517. (XIAO Yang, TANG Hongwu, HUA Ming, et al. Experimental investigation on mixing characteristics of a round jet in co-flow[J]. Advance in Water Science, 2006, 17(4): 512-517. (in Chinese))

[4] 姜国强,张晓元,李炜. PIV 在横流中的湍射流实验研究中的应用[J].水科学进展,2002,13(5):588-593. (JIANG Guoqiang, ZHANG Xiaoyuan, LI Wei. Study on round turbulent jet in a cross flow with PIV[J]. Advance in Water Science, 2002, 13(5): 588-593. (in Chinese))

[5] 肖洋,雷鸣,李开杰,等.横流中多孔射流流动特性实验研究[J].水科学进展,2012,23(3):393-398. (XIAO Yang, LEI Ming, LI Kaijie, et al. An experimental study on hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow[J]. Advance in Water Science, 2012, 23(3): 393-398. (in Chinese))

(下转第 22 页)

口密度相匹配且通畅的交通道路及快捷的逃生工具作为重要的非工程防洪措施,是防洪减灾中堤防溃口人员伤亡事故防范的侧重点及主要控制方向。

c. 确定基本事件的发生概率是定量分析的基础,而基本事件的发生概率缺乏统计资料,文中样本数据不足,只能做假设性计算。建议建立堤防溃口人员伤亡事故基本事件发生概率数据库。

参考文献:

[1] 董哲仁. 堤防除险加固实用技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.

[2] 解家毕,孙东亚. 全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J]. 水利水电技术, 2009, 40 (12): 124-128. (XIE Jiabi,SUN Dongya. Statistics of dam failures in China and analysis on failure causations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40 (12): 124-128. (in Chinese))

[3] 方崇惠,段亚辉. 溃坝事件统计分析及其警示[J]. 人民长江, 2010, 41 (11): 96-101. (FANG Chonghui, DUAN Yahui. Statistical analysis of dam-break incidents and its cautions[J]. Yangtze River, 2010, 41 (11): 96-101. (in Chinese))

[4] 盛金保,冯靖宇,彭雪辉. 小型水库风险分析方法研究[J]. 水利水运工程学报, 2008 (1): 28-35. (SHENG Jinbao, FENG Jingyu, PENG Xuehui. Research on risk analysis of small reservoir dams [J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(1):28-35. (in Chinese))

[5] 徐波,包腾飞. 大坝安全监控中定性指标的定量综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (5): 59-63. (XU Bo, BAO Tengfei. Quantitative and comprehensive evaluation of qualitative index in dam safety monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (5): 59-63. (in Chinese))

[6] POLL H G, ZANUTTOB J C, PONGE-FERREIRA W. Hydraulic power plant machine dynamic diagnosis[J]. Shock and Vibration, 2006(13): 409-427.

[7] HONG Yingyi, LEE Lunhui, CHENG Henghsing. Application of fuzzy fault-tree analysis to assess the reliability of a protection system for a switchyard [J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2008, 9(4): 1-6.

[8] 倪绍徐,张裕芳,易宏,等. 基于故障树的智能故障诊断方法[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42 (8): 1372-1386. (NI Shaoxu, ZHANG Yufang, YI Hong, et al. Intelligent fault diagnosis method based on fault tree[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42 (8): 1372-1386. (in Chinese))

[9] RAUZY A. New algorithms for fault tree analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1993, 40 (3): 203-211.

[10] 曹庆贵. 安全系统工程[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1993.

[11] 杨梦云. 基于事故树分析法的重大险情溃口事故防范分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30 (12): 55-57. (YANG Mengyun. Analysis on prevention of dike dangers based on the fault tree analysis [J]. Water Resources and Power, 2012, 30 (12): 55-57. (in Chinese))

[12] 盐见弘,岛岗淳. 故障模式和影响分析与故障树分析的应用[M]. 许凤璋, 高金钟, 译. 北京:煤炭工业出版社, 1987.

[13] 吴月龙,陈海军,李旺林. 搅拌桩防渗墙法的事故树分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7 (1): 107-109. (WU Yuelong, CHEN Haijun, LI Wanglin. Fault tree analysis of mixing pile impermeable wall [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7 (1): 107-109. (in Chinese))

[14] 陶勇剑,董德存,任鹏. 故障树分析的二元决策图方法[J]. 铁路计算机应用, 2009, 18 (9): 4-7. (TAO Yongjian, DONG Decun, REN Peng. Fault tree analysis based on binary decision diagrams[J]. Railway Computer Application, 2009, 18 (9): 4-7. (in Chinese))

(收稿日期:2012 - 07 - 12 编辑:骆超)

(上接第 4 页)

[6] SYKES R I, LEWELLEN W S, PARKER S F. On the vorticity dynamics of a turbulent jet in a cross flow[J]. J Fluid Mech, 1986, 168:393-413.

[7] 槐文信,李炜,彭文启. 横流中单圆孔紊动射流计算与特性分析[J]. 水利学报, 1998 (4): 7-14. (HUAI Wenxin, LI Wei, PEN Wenqi. Calculation and behavior analysis on turbulent jets in cross-flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(4): 7-14. (in Chinese))

[8] XIAO Yang, TANG Hongwu, LIANG Dongfang, et al. Numerical study of hydrodynamics of multiple tandem jets

in cross flow [J]. J of Hydrodynamics; Series B, 2011, 23 (6): 806-813.

[9] AYOUB G M. Dispersion of buoyant jets in a flowing ambient fluid[D]. London: University of London, 1971.

[10] LEE J H W. Note on Ayoub' s data of horizontal round buoyant jet in cross-flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 115 (7): 969-975.

[11] KIKKERT G A, DAVIDSON M J, NOKES R I. Buoyant jets with three-dimensional trajectories [J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48 (3): 292-301.

(收稿日期:2012 - 06 - 25 编辑:熊水斌)