



船闸输水系统多孔相向紊动射流研究综述*

陈明^{1,2}, 陶园园¹, 张星星¹, 黄海津¹, 牛万芬¹

(1. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点试验室, 重庆 400074;

2. 通航建筑物建设技术交通行业重点试验室, 江苏南京 210029)

摘要: 多孔相向紊动射流是船闸输水过程中一种重要的流动现象, 基于国内外大量研究资料, 从多孔紊动射流流动性、多孔紊动射流消能机理、船闸输水系统多孔相向紊动射流等研究方面对多孔相向紊动射流的研究进行了系统的论述和评析, 并对船闸输水系统多孔相向紊动射流需进一步研究的课题进行探讨。

关键词: 船闸; 多孔射流; 相向射流; 流动特性; 消能机理

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0047-04

Review of multiple turbulence jets in opposite direction in filling and emptying system of ship lock

CHEN Ming^{1,2}, TAO Yuan-yuan¹, ZHANG Xing-xing¹, HUANG Hai-jin¹, NIU Wan-fen¹

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

Abstract: Multiple turbulence jets in opposite direction are the important flow phenomenon in filling and emptying system of ship lock. Based on the large amount of research achievements, the flow characteristics and energy dissipation mechanism of multiple turbulence jets, multiple turbulence jets in opposite direction in filling and emptying system of ship lock are systematically discussed. Moreover, the relevant future studies have been explored.

Keywords: ship lock; multiple jets; jets in opposite direction; flow characteristics; energy dissipation mechanism

通航船闸是内河水运中实现河流渠化、沟通不同水系的重要建筑物形式之一, 在水运交通中占有十分重要的地位。保证船闸高效安全的运行, 关键在于输水系统的水力性能。多孔相向紊动射流普遍存在于各类船闸输水系统中, 如闸墙长廊侧支孔输水系统、闸墙长廊道多支管输水系统、闸底长廊道短支管输水系统等。掌握该水动力学问题, 关键在于流动特性和消能机理。笔者基于国内外大量研究资料, 对多孔紊动射流流动性、多孔紊动射流消能机理、船闸输水系统多孔相向紊动射流等研究方面进行概述, 并提出需进一步研究的问题。

1 多孔紊动射流流动性

船闸输水系统多孔射流是典型的三维壁面射流, 经支孔分流后的每股水流在闸室水体形成三维壁面射流状态^[1]。许多学者针对各种形状射孔产生的三维壁面射流进行了试验, 得到射流流动结构(如中心竖直面和展向流速分布特性、速度半值宽随纵向距离的变化关系、中线流速衰减规律)及漩涡结构等, 并针对盐热三维壁面射流与周围静止水体的掺混特性和射流近区流场进行数值模拟研究。通过对黏附长度、羽流轨迹、温度掺混稀释、温度场和流速分布与已有试验成果的对比分析, 发现 realizable $k-\varepsilon$ 和 RSMs (LRR 模

收稿日期: 2016-09-16

*基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402001); 国家自然科学基金项目(51509027); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400322)

作者简介: 陈明(1983—), 男, 博士, 副教授, 从事通航水力学教学与研究。

型)模拟精度较为理想^[2-5]。上述研究主要是针对单孔流场的平均特性,对于瞬态特性、紊动结构等尚未涉及,而多孔三维壁面射流是研究船闸输水系统水动力学的基础。Robert等^[6]对一排多孔三维壁面射流进行试验研究,得出在强烈的二次流和进口条件以及雷诺应力各向异性的作用下,射流横向扩散十分强烈,从而加快了掺混速度。Perumal等^[7]针对多孔三维壁面自由射流,着重研究了壁面效应下的射流衰减、掺混以及扩散特性,同时与单孔进行了对比分析。

全面掌握射流间及其与周围流体的动力作用和掺混特性是深入分析流动结构的形成机制、揭示多孔射流消能机理的关键。Isaac等^[8]对多孔横向射流进行了理论研究,提出采用动量积分方法分析射流间作用,得到了在 $7.5D$ (孔直径)范围内下游孔射流受上游孔射流影响较大。Lai等^[9-10]针对横流玫瑰族射流间的相互作用进行试验和理论研究,并提出了相应的半解析模型。之后,Lai等^[11]试验得出了玫瑰型布置的相邻浮射流间的动力作用并不明显。基于此,提出了采用射流融合的叠加原理,采用拉格朗日VISJET模型(拉格朗日积分模型JETLAG的改进形式),预测了射流轨迹及射流族稀释过程。Lee^[12]提出了一个半解析模型,用于预测静止流体中多孔浮射流的动力相互作用。通过对一个射流积分模型和外部无旋流的迭代求解得到了射流轨迹,预测结果与组合式射流族、双羽流紊动射流、错流扩散器以及玫瑰型射流族的试验成果较为吻合,且该求解方法亦可用于多孔横向射流中。Xiao等^[13]利用模型试验和数值模拟方法,对串行多孔横向射流的相互作用特征、掺混特性和流动结构进行系统研究,得到了较多有益成果。Chu等^[14]对横向浮射流的研究发现,远离射孔的射流间相互作用主要依靠涡旋对的作用。因此,研究漩涡结构对深入理解多孔射流间、射流与周围流体间的相互作用及掺混具有重要作用。李少华等^[15]采用realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型,并结合两层模型的壁面函数法,通过涡量大小、总涡量的研究,分析了双射流和四孔射流

空间变化中的各种涡结构(剪切层涡、马蹄形涡和反向涡旋对)的产生、发展和形成及脱落、掺混过程。Quinn等^[16]针对十字形自由紊动射流的三维平均流速、雷诺准则下的主剪切应力、平均静压等进行试验研究,得到沿射流方向的涡流场分布特性。肖洋^[17]通过分析多孔横向水平动量射流的漩涡的发生、发展及形成原因,揭示了多个射流与横流之间的掺混机理。实际上,多孔射流的流动特性除了受射流进口条件影响外,还与入射间距、水深、射流动量通量比等因素息息相关^[18-22],许多学者对该方面的研究做了大量工作,得到了较多有价值的成果。

2 多孔紊动射流消能机理

由于多孔射流之间、射流与周围流体之间存在复杂的相互作用,其流动规律不同于单孔射流^[23],其消能特性自然较单孔复杂许多。Kolar等^[24]针对并行和串行双孔射流,试验研究了横流中的紊动统计参数分布特性。Li等^[25]采用大涡模拟方法对壁面射流和离壁射流间的流动结构进行数值模拟,分析了紊动强度分布、脉动流动的密度分布函数,并揭示相应的紊动机理。借助多孔射流消能特点,在水利工程中陆续推出了不同的新型消能结构。芦绮玲等^[26]针对压力管道出口提出了一种多喷孔淹没式套筒阀的新型消能形式,采用RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型进行三维数值模拟研究,对不同喷孔个数对应的流场时均特性和紊动特性进行比较,分析并讨论了多孔淹没射流进入消力池后的水流运动规律和消能机理。四川大学有关学者^[27-31]在对多孔射流消能机理较深认识的基础上,提出了一种既有高消能率又能明显减小消力池底板冲击压力及临底流速的新型消力池布置形式——多股多层水平淹没射流,并做了系列模型试验研究。同时,他们结合理论分析和数值模拟方法对消力池中的流速分布、漩涡结构、消能效果及消能机理进行系统研究,得出的成果为高坝枢纽建设做出了重大贡献。

3 船闸输水系统多孔相向紊动射流

不难看出,上述研究主要针对多孔单向射流,而在船闸输水系统中,出流是通过连接两侧廊道的多孔相向射入闸室或下游引航道的水体中,这与多孔单向射流存在较大差异,不仅需考虑孔宽、孔间距、射流动量、射流动量通量比、闸室水深,还需研究闸室宽度(相向孔间距)及错位孔间距对射流流动的影响。因此,深入研究多孔相向紊动射流流动结构,需对整场进行分析。但限于量测手段和量测方法的困难性,目前关于船闸输水系统多孔射流流动机理的模型试验研究仍主要集中在单侧支孔射流,对整场分析主要依靠数值模拟。黎贤访等对单侧支孔射流水力学进行了试验研究,得出了无槛条件下断面最大流速及最大流速点相对高度的沿程变化规律,拟合得到了设槛条件下沿射流中心线的速度数学表达式。Stockstill等^[32]针对船闸输水系统多支孔出流情况,将廊道中的每个支孔作为一个离散单元,开发研究了一套用于确定廊道及支孔射流流量及压力分布的水力计算程序,得出了各支孔的流量及分配情况。杨朝东等^[33]采用数值模拟手段,计算时考虑支孔形式尺寸、间距、阀门开启时间及廊道阻力对支孔流量分配规律的影响,得出了船闸输水过程的支孔流量分配及演化规律。Stockstill等^[34]采用RANS方程,通过自适应水力特性的数值计算方法(ADH法)和滑移网格技术的自由水面捕捉方法,对韦伯福尔斯船闸(Webbers Falls)的整体输水系统水动力学进行了三维数值模拟。黎贤访^[35]通过建立闸室廊道侧支孔输水系统闸室整体水动力学三维数学模型,对闸室非恒定流灌水过程进行模拟,得到了相应的总体水力学参数和细部流场特征。陈明等^[36-38]以“带格栅消能室的环绕短廊道输水系统”为研究对象,采用数值模拟方法和动网格技术,对船闸输水全过程的三维流动进行研究,获得双侧廊道多孔对冲射流流动特性、格栅消能室的消能机理、最优格栅消能室体积及格栅孔流量分布。以上研究虽对多孔相向射流的整场进行了一定分析,但对射流间及射流与周围水

体间的相互作用和消能机理的研究不够深入、全面,且尚未涉及孔间距、射流动量通量比、闸室水深、闸室宽度(射孔相向间距)等因素对流动结构的影响。船闸输水系统设计规范^[39]针对闸室长廊道侧支孔输水系统,规定支孔间距宜为闸室宽度1/4的相关关系,为孔间距的选取提供依据。而实际上,孔间距的选择应基于对射流流动结构、掺混高度的分析。所以选择符合实际的孔间距,应综合考虑闸室宽度、射流动量通量比、射流动量、闸室水深、孔尺寸等影响因素。此外,尽管国内外研究人员对多孔紊动射流的数值模拟成果逐渐增多,但限于多孔射流自身的复杂性,所采用的紊流模型并未统一。因此,选择适用于多孔相向紊动射流的紊流模型进行数值计算是关键。

4 研究展望

综上所述,关于多孔相向紊动射流的研究尚不充分。一方面,现有的研究成果主要集中在多孔单向紊动射流,相比之下,考虑相向布置的多孔紊动射流相关报道较少;另一方面,涉及船闸输水系统的多孔相向紊动射流,不仅具有多孔射流的复杂特征,更为重要的是需考虑淹没条件和复杂几何边界条件下的射流相向碰撞、错流等复杂的流动特性,势必加大了研究难度。因此,笔者认为可着重从以下几方面进行更为深入的研究:

- 1) 通过时均流速分布特性、射流扩展范围和规律、流动结构的影响因素等方面,阐明多孔相向紊动射流流动结构;
- 2) 利用多种科学研究手段,研究射流轨迹线、混合点距离、掺混高度以及涡动力学特征,明确多孔相向紊动射流掺混特性及作用机制;
- 3) 基于对轴向和展向脉动速度的概率分布、紊动强度、紊动能、紊动能耗散率、能量谱分布特性等方面的研究,揭示多孔相向紊动射流消能机理。

参考文献:

- [1] 黎贤访,李云,王勇.船闸闸室廊道侧支孔射流研究[J].水利水运工程学报,2011(1):97-102.

- [2] Rajaratnam N, Pani B S. Three-dimensional turbulent wall jets[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1974, 100: 69-83.
- [3] Launder B E, Rodi W. The turbulent wall jet measurements and modelling[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003, 15(15): 429-459.
- [4] Herlina. An experimental study on turbulent circular wall jets[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 182(2): 161-174.
- [5] Gildeh H K, Mohammadian A, Nistor I, et al. Numerical modeling of turbulent buoyant wall jets in stationary ambient water[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 140(6): 213-226.
- [6] Kunz R F, D'Amico S W, Vassallo P F, et al. LDV measurement on confined parallel jet mixing[J]. *Journals of Fluids Engineering*, 2001, 123(3): 567-573.
- [7] Perumal G M, Sridhar B T N. Effect of wall on mixing of low speed multiple rectangular jets[C]. USA: 10th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments and Second NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration, 2006: 1-10.
- [8] Isaac K M, Schetz J A. Analysis of multiple jets in a cross flow[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1982, 104(4): 489-492.
- [9] Lai A C H, Lee J H W. Dynamic interaction in a rosette buoyant jet group[C]. Hong Kong: Proceedings Second International Symposium on Shallow Flows, 2008.
- [10] Lai A C H. Mixing of a rosette buoyant jet group[D]. Hong Kong: University of Hong Kong, 2009.
- [11] Lai A C H, Yu D, Lee J H W. Mixing of a rosette jet group in a crossflow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(8): 787-803.
- [12] Lee J H W. Mixing of multiple buoyant jets[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(12): 1 008-1 021.
- [13] Xiao Y, Tang H W, Liang D F, et al. Numerical study of hydrodynamics of multiple tandem jets in cross flow[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, 23(6): 806-813.
- [14] Chu P C K, Lee J H W, Chu V H. Spreading of turbulent round jet in coflow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(2): 193-204.
- [15] 李少华, 袁斌, 刘利献, 等. 多孔横向紊动射流涡量场的数值分析[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(23): 100-104.
- [16] Quinn W R, Azad M. Mean flow and turbulence measurements in a turbulent free cruciform jet[J]. *Flow Turbulence & Combust*, 2013, 91(4): 773-804.
- [17] 肖洋. 横向流动条件下多孔水平动量射流掺混特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [18] Yu D, Ali M S, Lee J H W. Multiple tandem jets in cross-flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(9): 971-982.
- [19] Sequeiros O E, Nino Y, Garcia M H. Erosion of finite thickness sediment beds by single and multiple circular jets[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2007, 133(5): 495-507.
- [20] Karimpour A, Kaye N B, Khan A A. CFD study of merging turbulent plane jets[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(3): 381-385.
- [21] Li Z W, Huai W X, Qian Z D. Study on the flow field and concentration characteristics of the multiple tandem jets in crossflow[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2012, 55(10): 2 778-2 788.
- [22] Bijankhan M, Kouchakzadeh S. Free hydraulic jump due to parallel jets[J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2014(4): 1-9.
- [23] 肖洋, 雷鸣, 李开杰, 等. 横流中多孔射流流动特性试验研究[J]. *水科学进展*, 2012, 23(3): 390-395.
- [24] Kolar V, Takao H, Todoroki T, et al. Vorticity transport within twin jets in cross flow[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27(5): 563-571.
- [25] Li Z W, Huai W X, Han J. Large eddy simulation of the interaction between wall jet and offset jet[J]. *Journal of hydrodynamic*, 2011, 23(5): 544-553.
- [26] 芦绮玲, 陈刚, 黄君瑶. 多孔淹没紊动射流三维流场模拟及消能分析[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(5): 217-222.
- [27] 李艳玲, 杨永全, 华国春, 等. 多股多层水平淹没射流的试验研究[J]. *四川大学学报: 工学版*, 2004, 36(6): 32-36.
- [28] 张建民, 王玉蓉, 杨永全, 等. 水平多股淹没射流水力特性及消能分析[J]. *水科学进展*, 2005, 16(1): 18-22.