

自由射流出口临界雷诺数的确定

徐世凯,王 勇

(南京水利科学研究院水工研究所,江苏 南京 210029)

摘要 将圆形自由射流按重力相似准则设计成 6 个系列模型,利用 PIV 测速系统,对射流模型相应不同出口雷诺数的流场、浓度场形态分布特征进行了试验研究,分析了射流流场及淌量场、轴线时均流速、断面流速分布、射流起始段长度等,得出圆形自由射流出口临界雷诺数 $Re_k \geq 2\,000$,以及雷诺数 $Re < 2\,000$ 时射流起始段长度 L_0 与出口雷诺数 Re 的关系为 $L_0 = kRe^{-0.57}d_0$ 。
关键词 自由射流;PIV 测速系统;模型试验;临界雷诺数
中图分类号 TV132+ .12 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2007)06-0699-05

自由射流在受纳水体中的扩散受对流及紊动输移的控制。紊动是由黏性和惯性的相互作用引起的,因而由雷诺数 Re 来表征。射流出口的临界雷诺数 Re_k 定义如下:

$$Re_k = \frac{u_0 d_0}{\nu}$$

式中: u_0 ——射流出口平均流速, m/s ; d_0 ——射流出口的特征长度,本文试验研究的射流出口为圆形,特征长度用直径表示, m ; ν ——运动黏滞系数, m^2/s 。

在重力相似模型研究中,要正确模拟自由射流物质输运过程,除了充分考虑环境流体的输运相似外,还必须考虑射流本身的紊动扩散相似。这在以往的研究中往往容易被忽视或没有统一的标准。文献[1]认为,重力相似模型中,为满足射流紊动扩散相似,射流 Re 近似取 2000;文献[2-3]认为,从窄长的缝隙或孔口喷出的射流一般出口 $Re > 30$ 时可认为射流是紊动的;文献[4]据过去经验认为,当模型 Re 不小于 600 时,模型成果就可应用于原型,但这种经验没有理论依据。因此,合理确定自由射流出口 Re_k 具有理论和实用价值。

本文在试验研究中通过 PIV 测速系统^[5-6]观测不同模型比尺及相应 Re 下的圆形自由射流不同出口 Re 的流场、浓度场形态分布特征,并通过试验成果分析确定自由射流出口 Re_k 。

1 模型设计

1.1 试验工况

本文试验相应的原型为:一圆形喷嘴以自由射流的方式排入无限水域的静止水体中,圆形喷嘴的直径 1.2 m,出口平均流速 2.18 m/s,原型射流 $Re = 2.62 \times 10^6$ 。模型按 6 种比尺设计成系列模型,相应射流出口 $Re = 700 \sim 2\,500$ 。模型共进行了 6 组不同出口 Re 的试验,试验参数见表 1。

1.2 试验装置

试验装置为钢化玻璃循环水槽,有效试验段 2.0 m $\times$ 25 cm $\times$ 44 cm(长 $\times$ 宽 $\times$ 高),见图 1。射流排水由循环恒温箱经转子流量计至自由射流排水口。PIV 测速系统形成水平片光源,水平片光源位于自由射流排水口中心平面,CCD 摄像头布置在水槽底部。

表 1 模型试验参数

Table 1 Test parameters of jet flow models				
出口 Re	出口直径 d_0/mm	出口平均流速 $u_0/(m \cdot s^{-1})$	模型比尺 λ_l	出口流量 $Q/(L \cdot h^{-1})$
700	6	0.154	200.0	15.67
1 300	9	0.189	133.3	43.26
1 600	10	0.199	120.0	56.24
2 000	12	0.218	100.0	88.71
2 300	13	0.227	92.3	108.41
2 500	14	0.235	85.7	130.17

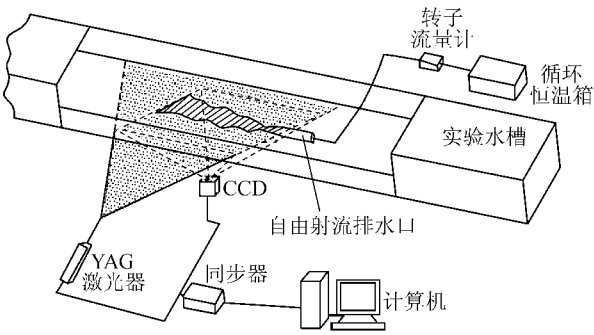


图 1 试验装置简图
Fig.1 Sketch of test device

- PIV 测速系统由 3 个主要子系统组成:光路成像系统、图像记录系统和数字图像分析显示系统,它们分别采用粒子图像激光成像技术和数字图像自动判读技术加以实现.
- a. 光路成像系统.其主要任务是获得流场中双曝光单幅粒子图像或 2 个以上多幅图像.本文试验中采用的是 2 台 YAG 激光器,激光器的工作频率为 15 ~ 200 Hz,激光波长 532 nm,激光束直径 5 mm,脉冲宽度 3 ~ 5 ns.每个脉冲最大能量 200 mJ.2 台激光器脉冲时间间隔可以调整范围为 200 ~ 0.1 ns,可以满足从低速到高速流动的测量要求.
- b. 图像记录系统.本文试验中所使用的 CCD 的分辨率为 2048×2048 像素,每幅图像占 8MB 存储空间.采集速度为 7.5 帧/s,结合跨帧技术和数据矩阵快速传输技术,所用的图像采集板支持 80MB/s 的传输速率,为实时采集、传送和存储 PIV 的瞬时数据提供了重要手段.由于互相关处理需要 2 帧图像来进行图像分析,这样系统最大采样速度为每秒 3.75 个速度场图像;CCD 2 次曝光的时间分别为 $250\ \mu\text{s}$ 和 $125\ \mu\text{s}$.试验采用 1 个球面镜和 1 个柱面镜组成的光学组件,将激光变为所需要的片光.在 CCD 的采集区域内,片光源的厚度约为 1.0 mm,CCD 采集区域大小约为 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$.
- c. 数字图像分析显示系统.本文试验中,PIV 测速系统的控制和图像分析由 Insight6.0 软件实现,其工作平台是 Windows NT.该软件具备连续捕获 1000 帧高分辨率(2048×2048 像素)图像的能力,基于 32 像素的查问区可达到每秒 1000 个矢量的处理速度,该软件同时又具有批处理、均值化、二次插值等功能,并与 Tecplot 软件匹配形成了较强的后处理功能,包括核查数据、流动特性的计算和显示,对多个图像中的矢量进行统计分析等.

1.3 试验方法

将示踪粒子投放在循环恒温箱中,使每组试验均具有相同的粒子浓度.转子流量计根据不同射流出口 Re 试验的要求控制流量.利用 PIV 测速系统观测自由射流流场及浓度场形态分布特征,并对每一种试验工况连续拍摄 30 幅图像进行分析研究^[7-9].

2 试验成果分析

试验成果分析包括以下几个方面 (a)图像处理 (b)平面二维射流流场及涡量场分析 (c)射流轴线流速分布及断面流速紊动强度 (d)射流起始段长度.为便于比较,将模型试验结果全部转换到原体,坐标均采用无量纲化,坐标尺度 $(l,d) = \frac{(x,y)}{d_0}$,其中 l,x 为横坐标,垂直射流出流方向; d,y 为纵坐标,与射流出流方向一致.

2.1 图像处理

将 $Re = 700 \sim 2500$ 相应的射流浓度场形态分布特征按相似比尺换算至原体,如图 2 所示.随着 Re 的增大,射流从层流射流形态向紊流射流形态过渡,射流形态发生较大变化.从图 2 可定性看出,当 $Re < 2000$ 时,射流可认为层流或不能充分发展的紊流射流;当 $Re > 2000$ 时,射流转换为自相似紊流射流.同时也说明了在弗劳德相似模型中,比尺效应的影响不容忽视,尤其对受射流动量影响的研究区域.

Re_k 定量结果最终通过射流流场分析、轴线流速分布及断面流速分布和射流起始段长度确定.

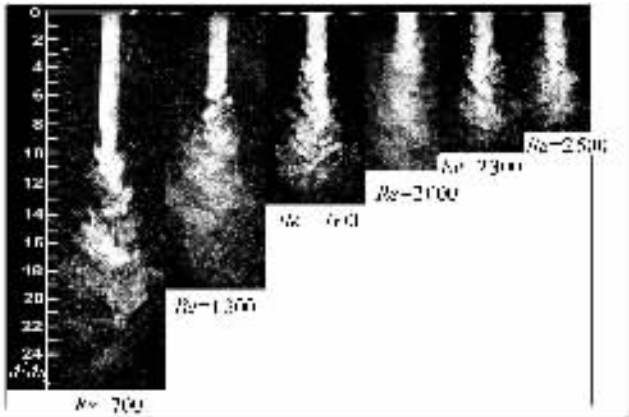


图 2 不同出口 Re 时射流粒子图像
Fig.2 Particle image for jet flows with different Reynolds numbers at outlets

2.2 平面二维射流流场及涡量场

由图 3 可见, $Re = 700$ 与 $Re = 2\,500$ 的平面流场及涡量场均有明显差异,小 Re 射流紊动仅发生在射流外边缘,而且紊动强度较小,在较长的范围内紊动才发展到射流轴线. $Re = 2\,500$ 时的涡量强度约是 $Re = 700$ 时的涡量强度的 1.5 倍,由于紊动强度的不同,从而导致了流场分布的不同.

图 4 中, u_m 为射流轴线处 ($l/b_e = 0$) 流速; u 为 l/b_e 相应流速; b_e 为特性半厚度. $Re = 2\,000$ 和 $Re = 2\,500$ 时射流断面速度分布与高斯正态分布^[2]基本吻合,说明当 $Re \geq 2\,000$ 时,在 $d/d_0 = 6$ 和 $d/d_0 = 8$ 断面处射流已经达到充分发展的紊流射流. 但 $Re = 700$ 和 $Re = 1\,300$ 时射流断面速度分布与高斯正态分布具有明显差别,进一步说明,在 $Re < 2\,000$ 时,射流形态可认为是层流或不能充分发展的紊流射流.

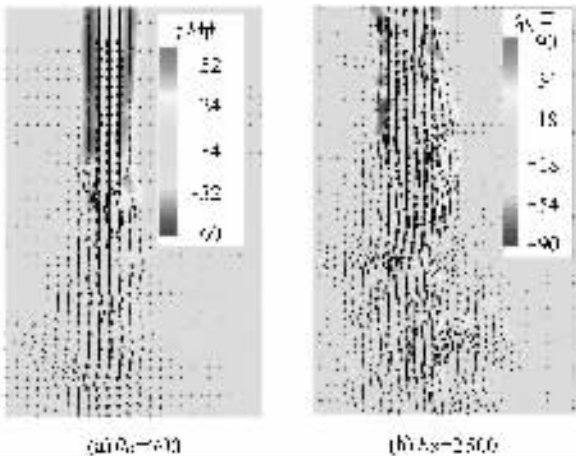


图 3 不同 Re 时射流流场及涡量场
Fig.3 Flow field and vortex field for jet flows with different Reynolds numbers

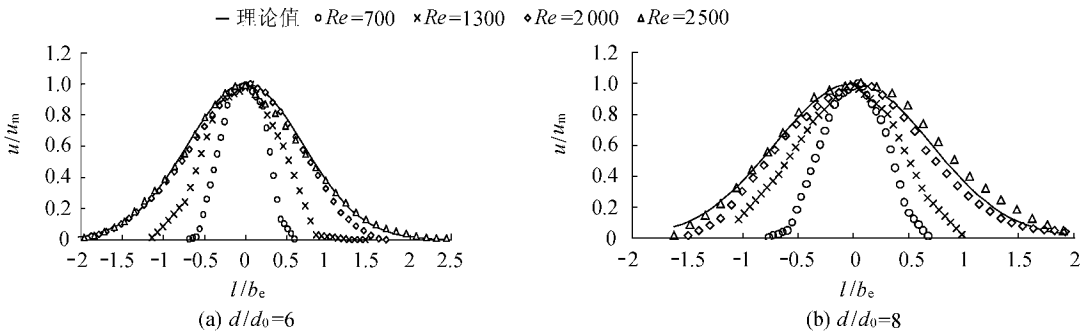


图 4 不同 d/d_0 时射流断面流速分布
Fig.4 Flow velocity distribution in cross-sections of jet flows with different d/d_0

2.3 射流轴线流速分布

以 $Re = 2\,000$ 和 $Re = 2\,500$ 为例,对平面二维射流流速场进行分析. 根据文献 [2],阿勃拉摩维奇、拉贾拉南、阿尔伯逊射流轴线流速公式分别为

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{1.2}{\sqrt{(2\alpha d/d_0) + 0.41}} \tag{1}$$

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{3.5}{\sqrt{2d/d_0}} \tag{2}$$

$$\frac{u_m}{u_0} = 2.28 \sqrt{d_0/d} \tag{3}$$

式中: α ——反映紊动性质的系数, $\alpha = 0.09 \sim 0.12$, 本文取 0.10; u_m ——射流轴线流速, m/s.

将 $Re = 2\,000$ 和 $Re = 2\,500$ 试验值与经验公式 (1)~(3) 计算值进行比较,见表 2. $Re = 2\,000$ 和 $Re = 2\,500$ 射流轴线流速基本吻合,说明两者具有相同或接近的流动形态. 当 $d/d_0 > 4$ 时,试验值与经验公式计算值吻合良好,说明 $Re = 2\,000$ 和 $Re = 2\,500$ 射流接近或成为充分发展的紊流射流.

表 2 也反映了射流的分区情况,当 $d/d_0 < 6$ 时为射流起始段,当 $d/d_0 \geq 6$ 时为射流主体段. 在射流主体段,试验值与经验公式计算值吻合良好,而对射流起始段,经

表 2 u_m/u_0 试验值与经验公式计算值比较

Table 2 Comparison of test data u_m/u_0 with calculated result from empirical formula

d/d_0	$Re = 2\,000$ 试验值	$Re = 2\,500$ 试验值	公式 (1) 计算值	公式 (2) 计算值	公式 (3) 计算值
1	1.7	1.7	1.56	2.47	2.28
2	1.7	1.7	1.36	1.75	1.61
4	1.4	1.4	1.12	1.23	1.14
6	0.9	1.1	0.98	1.01	0.93
8	0.7	0.8	0.88	0.88	0.81

验公式的适用性较差 经验公式之间以及经验公式与试验值之间都存在较大的差异. 公式(1)~(3)主体段的这些关系式严格说来应该是在紊动充分发展的相似性区域内才是正确的, 因此可以认为 $Re = 2\,000$ 和 $Re = 2\,500$ 射流主体段基本达到了相似性区域.

2.4 射流起始段长度

自由射流由起始段、过渡段、主体段 3 部分组成, 起始段由 u_m/u_0 来表征, 定义为 $u_m/u_0 = 1$ 的距离为起始段长度 L_0 .

图 5 为不同 Re 射流轴线的时均流速分布, 当 $Re < 2\,000$ 时, L_0 与 Re 成反比关系; 当 $Re \geq 2\,000$ 时, L_0 趋于恒定值. 因此可以认为, 超过 Re_k 的 L_0 可用出口特征参数 d_0 表示, 而低于 Re_k 的 L_0 与相应出口 Re 相关. 试验得出的不同 Re 时 L_0 见表 3.

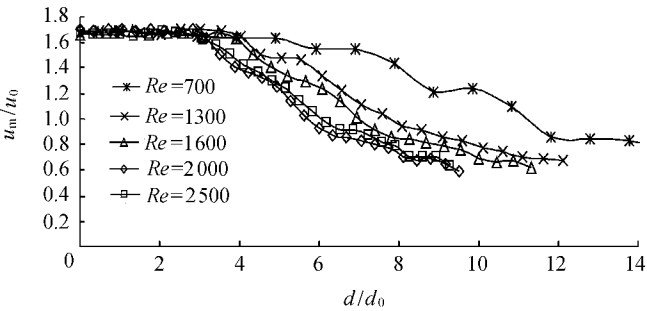


图 5 不同 Re 时射流轴线流速分布

Fig.5 Flow velocity distribution along axial direction for jet flows with different Reynolds numbers

$Re \geq Re_k$ 时 ,

$$L_0 = kd_0 \tag{4}$$

式中 k 为系数, 由试验得出 $k = 6.0$. 文献 [2-3] 中 $k = 5.2 \sim 6.2$, 说明试验结果的合理性.

$Re < Re_k$ 时 ,

$$L_0 = kRe^{-0.57}d_0 \tag{5}$$

由试验得出系数 $k = 472.0$.

需要说明的是, 公式(5)是根据试验结果得出的, 由于试验 Re 的研究区间有限 ($700 \leq Re \leq 2\,500$), 其合理性和适用范围未得到相关研究的验证, 本文列出公式(5), 说明 L_0 与 Re 的关系, 用以确定重力相似模型中射流动量影响的区域.

表 3 不同 Re 时 L_0

Table 3 Length of initial sections of jet flows with different Reynolds numbers

Re	L_0/d_0	Re	L_0/d_0
700	11.2	2 000	6.0
1 300	7.8	2 500	6.0
1 600	7.0		

3 自由射流出口 Re_k 确定

由图 2 射流图像定性判断, $Re_k \geq 2\,000$ 较为合适; 从流速场分布及 L_0 分析, $Re = 2\,000$ 与 $Re = 2\,500$ 具有较为接近的试验结果, 而且主体段轴线流速试验结果与充分发展的紊流主体段流速吻合良好, 因此也应 $Re_k \geq 2\,000$; $Re = 2\,000$ 时 L_0 正好同时满足公式(4)与公式(5), 说明 $Re = 2\,000$ 恰好为转捩点. 由此可得出自由射流出口 $Re_k \geq 2\,000$.

4 结 论

- 本文首次采用 PIV 测速系统研究自由射流出口 Re , 通过观测流场及浓度场分布特征, 得出以下结论:
- a. 自由射流出口 $Re_k \geq 2\,000$.
 - b. 重力相似模型中研究自由射流物质输运问题时, 除考虑环境流体 Re 影响外, 在射流动量影响的区域内还须考虑射流出口 Re 的影响.
 - c. 当 $Re \geq 2\,000$ 时, $L_0 = kd_0$, $k = 6.0$, 该系数与前人研究的成果 $k = 5.2 \sim 6.2$ 基本一致.
 - d. 当 $Re < 2\,000$ 时, $L_0 = kRe^{-0.57}d_0$, 其中 $k = 472.0$. 该关系式在 $Re < 700$ 时未得到验证.

参考文献：

[1] KOBUS H. 水力模拟 [M]. 北京 清华大学出版社 ,1988 :75.
[2] 余常昭. 环境流体力学导论 [M]. 北京 清华大学出版社 ,1992 :201.
[3] 余常昭. 紊动射流 [M]. 北京 高等教育出版社 ,1993 :25-33.
[4] 张书农. 环境水力学 [M]. 南京 河海大学出版社 ,1998 :238.
[5] 陈向阳 , 邹介棠. 使用 PIV 技术测量喷嘴附壁射流的冷态流场 [J]. 流体机械 , 2003 , 31(9) :5-7.
[6] 熊霏 , 姚朝晖 , 郝鹏飞 , 等. 冲击射流的 PIV 实验研究 [J]. 流体力学实验与测量 , 2004(3) :68-72.
[7] 梁文 , 汪德 . 粒子图像测速技术应用于热射流流场的测定 [J]. 水电站设计 , 2005 , 21(4) :41-43.
[8] 赵清华 , 全学军. 轴对称射流研究进展 [J]. 重庆工学院学报 , 2003 , 17(4) :38-41.
[9] 余常昭 , 李春华. 圆形断面自由湍动射流卷吸的实验研究 [J]. 流体力学实验与测量 , 1996 , 10(1) :31-38.

Determination of critical Reynolds number at outlets of free jet flows

XU Shi-kai , WANG Yong

(Hydraulic Engineering Department , Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China)

Abstract : Six series models for free round jet flows were designed according to the gravity similarity criterion. An experimental study was performed on the forms of flow fields and concentration fields of the jet flow models with different Reynolds numbers at outlets by use of the PIV system , and some factors , such as the flow field , vortex field , time-average velocity along the axial direction , flow velocity distribution in cross-sections , and the length of initial sections of jet flows , were analyzed. The conclusion of critical Reynolds number at outlets of free round jet flows $Re_k \geq 2000$ and the relationship between the length of initial sections of jet flows L_0 and Reynolds number at outlets Re , i. e. $L_0 = kRe^{-0.57} d_0$ for $Re < 2000$, were finally drawn.

Key words : free jet flow ; PIV system ; model test ; critical Reynolds number

《水利经济》征订启事

中国科技核心期刊 全国水利系统优秀期刊 全国农业系统优秀期刊

(邮发代号 28-252 , CN32-1165/F , 双月刊)

《水利经济》是河海大学与中国水利经济研究会共同主办的以技术性为主、兼顾学术性和管理性的科技期刊。《水利经济》1983 年创刊 , 是全国水利经济研究领域唯一的专业期刊 , 国内外公开发行。

主要刊登内容 : 水利经济学基本理论 , 水利水电建设中的经济效益、社会效益和环境效益分析 , 工程经济评价和财务评价 , 工程投资的筹集与费用分摊研究 , 以及水利工程的经济管理研究 ; 水库移民及土地淹没赔偿中的经济问题研究 ; 水利事业在社会经济发展中的作用和地位研究 ; 水利事业和水利建设的管理体制体制改革研究等。

主要读者对象 : 从事水利经济工作的水利行业、环保行业、农业行业的有关工程技术人员、科研人员、管理人员以及大专院校师生。

订阅办法 : 读者可通过邮局订阅 , 也可直接汇款至编辑部订阅 , 每期定价 6 元 , 全年 6 期共计 36 元。

编辑部地址 : 210098 南京西康路 1 号 河海大学《水利经济》编辑部

联系电话 (025) 83786350

传真 (025) 837876350

E-mail : jj@hhu.edu.cn