

# 有障碍圆形浮力射流的绕流流态研究

槐文信<sup>1</sup>, 方神光<sup>2</sup>

(1. 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉大学, 武汉 430072;

2. 清华大学 水利系, 北京 100084)

(林建忠推荐)

**摘要:** 针对静止环境中障碍圆形浮力射流出现的正常绕流现象与非正常绕流现象(反射与分叉现象), 分析了其主要的 3 个影响因素: 障碍盘直径  $D/d$  ( $D$  和  $d$  分别是障碍盘和射流出口的直径), 射流出口密度 Froude 数以及障碍盘离射流孔口的距离  $H/d$  与发生非正常绕流之间的相互关系 得到了  $H/d = 2, 4, 6, 8$  在不同  $D/d$  值时发生非正常绕流的临界密度 Froude 数 对直径为  $D/d$  的障碍盘, 当其离射流孔口的距离  $H/d$  达到某一值时, 流动仅为正常绕流流态 基于大量计算给出了不同障碍盘所要求的  $H/d$  值, 综合以上因素得到了临界密度 Froude 数的拟合公式 对非正常绕流中射流出现反射与分叉的规律性进行了探讨 对  $D/d = 1$  的有障碍浮力射流进行的数值计算表明, 所有工况下的流态均为正常绕流, 并得到了不同  $H/D$  条件下的轴线稀释度

**关键词:** 有障碍浮力射流; 圆形射流; 数值模拟; 绕流流态; 稀释度

**中图分类号:** O358      **文献标识码:** A

## 引 言

浮力射流的实质是自然卷吸环境流体使污染物得到稀释, 对其相关的机理研究已取得了重大进展(Chen 和 Rodi<sup>[1]</sup>, Noutsopoulos 和 Yannopoulos<sup>[2]</sup>, Lee 和 Jirka<sup>[3]</sup>, Lee 和 Cheung<sup>[4]</sup>, Li 和 Huai<sup>[5]</sup>, 曾玉红和槐文信<sup>[6]</sup>), 但如何进一步提高射流的稀释度, 国外学者也做了一些探索性的工作 如 Neece 等人<sup>[7]</sup> 研究了在靠近污水放流管出口的前段设置吸孔以对污水在排放之前进行预稀释, 通过实验验证了其效果; Agg 和 White<sup>[8]</sup> 研究了不同形状的喷口情形的射流的稀释特性; Sharp<sup>[9]</sup> 研究了沿一水平固壁边界水平排放的浮力射流, 并通过实验证实了其在提高表面稀释度方面时该设计的有效性; Fukushima<sup>[10]</sup> 研究了一倾斜固壁排放污水的浮力射流特性; Noutsopoulos 等人<sup>[11]</sup> 通过实验研究了有障碍同心圆盘圆形垂向紊动浮力射流的稀释特性; 槐文信等人<sup>[12, 13]</sup> 研究了有障碍同心方盘正方形垂向紊动浮力射流的稀释特性 诸多探索都证明了各自设施均能有效地增加射流近区的稀释度 本文对有障碍圆形浮力射流的绕流特性进行了研究, 给出其绕流流态的判据

收稿日期: 2005\_04\_02; 修订日期: 2006\_05\_12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479038)

作者简介: 槐文信(1963), 男, 陕西乾县人, 教授, 博士(联系人, Tel: + 86\_27\_68772206; Fax: + 86\_27\_68772310; E\_mail: wxhuai@whu.edu.cn)

# 1 绕流流型

图 1 为有障碍圆形浮力射流流态图 图中  $c$  是横断面上某一位置处的浓度;  $D$  为障碍盘的直径;  $d$  为射流孔口的直径;  $H$  是障碍盘距射流孔口的距离;  $\rho_a$  为环境水体的密度,  $\rho_0$  为射流密度 ( $\rho_0 < \rho_a$ ),  $x$  是射流的方向, 它与重力的方向相反, 即与浮力的方向相同,  $y$  为径向; 有效重力加速度为  $g = g(\rho_a - \rho_0) / \rho_a$ ,  $\rho_0 = \rho_a - \rho_0$ ,  $g$  为重力加速度; 密度 Froude 数定义为  $Fr_0 = v / \sqrt{gd}$ , 轴线上的浓度定义为  $c_m = (\rho_a - \rho_m) / (\rho_a - \rho_0)$ , 轴线上的稀释度为浓度的倒数,  $\rho_m$  为轴线上的密度 Noutsopoulos 等人<sup>[11]</sup>的试验参数的取值范围为:  $D/d = 2, 4, 6; H/D = 1, 2, 3, 4, 6, 10$ ; 密度 Froude 数  $Fr_0$  的范围是 3 到 25, 得到的盘后轴线浓度 ( $S_D$ ) 公式如下:

当  $X \leq X_u$  时:

$$S_D = [4.8 - 2.92e^{-0.03(H/D)^2}] X^{-5/4}; \quad (1)$$

当  $X > X_u$  时, 可以使用无障碍时的浓度表达式:

$$S_D = S = 9.4X^{-5/3}, \quad (2)$$

这里  $X_u = 5[1 - 0.608e^{-0.03(H/D)^2}]^{-12/5}$ , (3)

$X_u$  为有障碍和无障碍时的浓度分布线的交点 式

(1)、(2) 和 (3) 中  $X$  和  $S_D$  采用了 Chen 和 Rodi<sup>[17]</sup> 对长度和浓度的定义方法, 即长度:  $X = (x/d) Fr_0^{-1}$ , 浓度:  $S_D = c_m Fr_0$

槐文信和方神光<sup>[14-16]</sup> 采用 RNG 湍流模型通过数值计算验证了 Noutsopoulos 等人<sup>[11]</sup> 的有障碍浮力射流的轴线稀释度公式 文献[11] 给出了有障碍圆盘浮力射流的流场特性 文献[14] 建立了 RNG 的紊流模型对该类流动进行了数值模拟, 采用 Noutsopoulos 等人<sup>[11]</sup> 的实验工况验证了公式(1)~(3)的正确性 然而文献[14] 将 Noutsopoulos 等人<sup>[11]</sup> 的实验工况参数拓宽, 数值模拟发现射流无法发生正常绕流(如图 2(a)) 的情况, 即射流有可能在绕过障碍盘之前发生反射(如图 2(b)) 或者绕过障碍盘后发生分叉(如图 2(c)) 出现非正常绕流时, 已有的轴线浓度公式不再适用, 因此 Noutsopoulos 等人<sup>[11]</sup> 得到的轴线稀释度公式存在着一个应用范围 实际上障碍盘直径  $D$  的大小对能否发生正常绕流有着决定性的影响 可推测, 障碍盘直径极小时, 近似等同于自由浮力射流; 障碍盘直径无限大时, 则任何工况下的射流绕过盘时都会分叉 为了确定不同障碍盘直径  $D$  条件下绕流的性质及障碍盘直径  $D$  的大致范围, 本文在文献[14, 15] 的基础上, 采用数学模型<sup>[14]</sup> 和计算方法<sup>[17]</sup> 及作者编制的 FORTRAN 计算程序, 对该范围进行研究, 以期得出流型的判据, 即 Noutsopoulos 等人<sup>[11]</sup> 公式的适用条件 鉴于有障碍圆形浮力射流流态的主要影响参数为盘直径  $D/d$ , 射流密度 Froude 数  $Fr_0$  以及障碍盘离射流孔口的距离  $H/d$ , 因此该稀释度公式的应用范围将采用此 3 个参数来表示; 同时对非正常绕流发生反射和分叉的规律予以分析

对  $D/d = 2, 3, 4, 6, 8, 2 \leq H/d \leq 80$  以及密度 Froude 数  $2 \leq Fr_0 \leq 120$  的范围内进行大量的数值模拟, 横坐标采用  $D/d$ , 纵坐标采用密度 Froude 数  $Fr_0$ , 图 3 给出了障碍盘距射流孔口

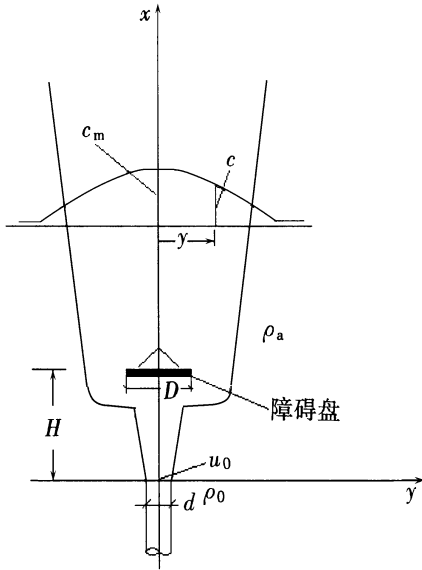
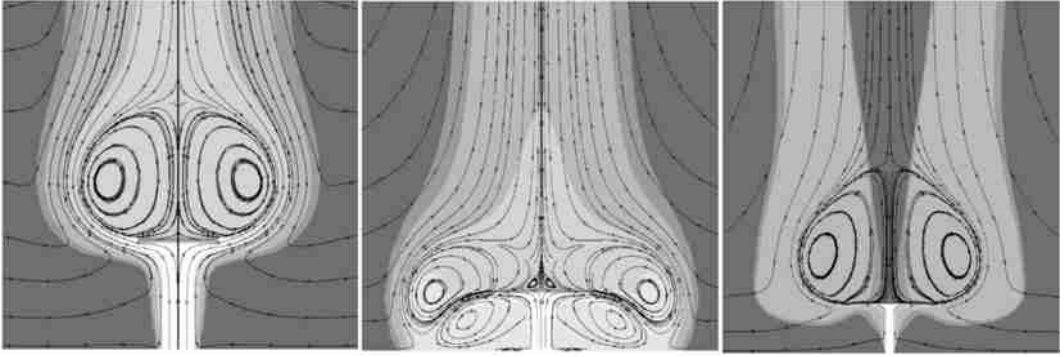


图 1 有阻力圆盘浮力射流示意图

分别为  $H/d = 2, 4, 6, 8$  位置处不同障碍盘直径下的临界密度 Froude 数的拟合分布曲线, 该曲线上方为非正常绕流区域, 下方即正常绕流发生区域。由图可见, 同一位置 ( $H/d$ ) 处的临界密度 Froude 数随障碍盘的直径增加而减小; 而某一直径的障碍盘 ( $D/d$ ) 的临界 Froude 数随该盘距射流孔口距离的增加而增加。各位置处的临界密度 Froude 数曲线的曲率随  $H/d$  的增加而增大, 当  $H/d = 2$  时的变化相当平缓, 主要是由于障碍盘离射流孔口太近, Froude 数的增加容易导致射流首先被反射的缘故。



(a) 正常绕流 (b) 射流发生反射 (c) 绕流发生分叉

图2 不同密度 Froude 数条件下的绕流流场

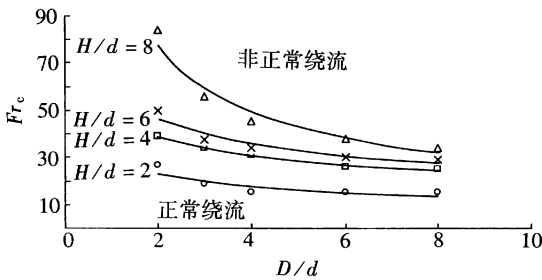


图3 不同直径障碍盘条件下的正常绕流分界线

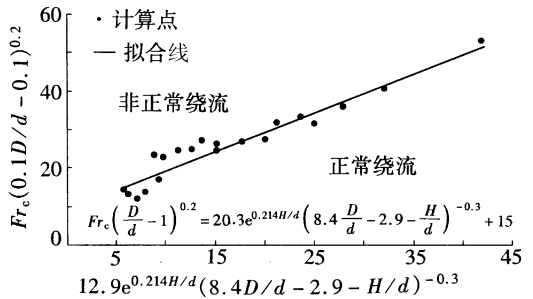


图4 正常绕流的拟合临界分布线

计算中得出, 对任一直径的障碍盘  $D/d$ , 当其离射流孔口的距离  $H/d$  达到某一值时, 流动仅为正常绕流流态, 即临界密度 Froude 数为无穷大, 并且障碍盘直径越大, 所要求的  $H/d$  也越大, 为得到其规律, 计算得到了直径  $D/d = 2, 3, 4, 6, 8$  各自的临界密度 Froude 数达到无穷大时所要求的  $H/d$ , 其拟合公式如下:

$$\left(\frac{H}{d}\right)_{Fr_c} = 8.4 \frac{D}{d} - 2.9 \tag{4}$$

同时计算中还得出: 若  $D/d < 1$  时, 流动不可能出现非正常绕流流态, 即此时临界密度 Froude 数亦为无穷大。

综合以上分析, 可得出临界 Froude 数的拟合曲线(图4), 其拟合公式为:

$$Fr_c \left(\frac{D}{d} - 1\right)^{0.2} = 20.3e^{0.214H/d} \left[8.4 \frac{D}{d} - 2.9 - \frac{H}{d}\right]^{-0.3} + 15 \tag{5}$$

基于公式(5)可得出不同工况下的临界 Froude 数

## 2 出现反射与分叉的规律性分析

对有障碍浮力射流的大量数值计算结果的分析得出,在非正常绕流中,射流碰撞到障碍盘后出现反射和绕过障碍盘后出现分叉具有一定的规律性。图5给出了静水环境中沿水深方向的无障碍自由浮力射流的示意图,射流的宽度 $b$ 是线性扩展,各不同高度位置上横截面的流速分布(起始段除外)都为Gauss分布。根据障碍盘半径 $D/2$ 与自由浮力射流厚度 $b$ 间的大小关系,可以将整个区域分为两个部分:射流容易发生反射的区域和绕流容易出现分叉的区域(如图5所示), $b = D/2$ 的位置(2\_2断面)为此两个区域的分界线。如果障碍盘位于在图5中1\_1的位置,此时 $b < D/2$ ,所有的射流流体都被障碍盘挡住。如果射流出口流速 $u_j$ 不断增大,则射流首先出现的是被反射回来,在障碍盘下形成漩涡(如图2(b)),因此 $H/D$ 较小时的临界Froude数均较小。如果障碍盘位于图5中位置3\_3处,此时 $b > D/2$ ,一部分射流流体直接从障碍盘的周围通过而不会受障碍盘的阻挡,若出口流速增大到某一值或达到临界Froude数,射流在障碍盘后将首先出现分叉(如图2(c)),而不会在障碍盘下形成漩涡。

## 3 障碍盘直径 $D/d = 1$ 时的轴线浓度分布

在障碍盘直径为 $D/d = 1$ 时对以上 $H/D$ 和密度Froude数 $Fr_0$ 的组合工况进行数值模拟,在非极端情况(如障碍盘几乎完全盖住射流孔口)下,射流流体总能克服障碍盘的作用,而不会出现反射或分叉。但得到的盘后轴线浓度是否会有所不同呢?为验证其障碍盘后的轴线浓度是否仍然符合

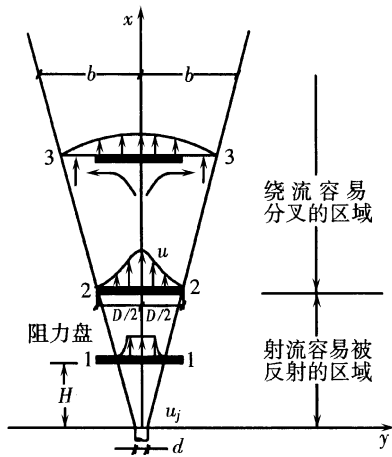


图5 自由浮力射流与阻力盘位置间的关系示意图

Noutsopoulos 等人<sup>[11]</sup>通过试验得到的浓度分布公式,图6给出由数值模拟得到的不同 $H/D$ 在不同Froude数条件下的盘后轴线浓度,同时给出相应 $H/D$ 条件下Noutsopoulos 等人<sup>[4]</sup>给出的障碍盘后轴线浓度分布以及Chen和Rodi<sup>[11]</sup>给出的无障碍自由射流轴线浓度分布。

从图6中可以看到,除 $H/D = 6$ 的轴线浓度外,其他 $H/D$ 条件下计算得到的轴线浓度点都处于无障碍射流浓度分布线和有障碍射流浓度分布线之间,这说明当障碍盘直径 $D/d = 1$ 时得到的轴线浓度都要比Noutsopoulos 等人<sup>[11]</sup>通过试验得到的浓度要大,即所获得的轴线稀释度要小。虽然 $H/D = 6$ 时轴线浓度已符合

Noutsopoulos 等人<sup>[11]</sup>的有障碍射流轴线浓度分布线,但可以看到有障碍轴线浓度分布线与无障碍轴线浓度分布线已经很接近,实际取得的稀释效果很有限。因此可以得到的结论是 $D/d = 1$ 时障碍盘取得的稀释效果较 $D/d = 2, 3, 4$ 时要差。其原因主要是由于障碍盘直径偏小,射流流体在障碍盘下没有得到充分混合和稀释就直接绕过障碍盘。

## 4 结 论

对不同障碍盘直径下出现正常绕流与非正常绕流的条件进行了系统研究,得到以下结论:

1. 对于有障碍浮力射流的流态,给出了障碍盘分别位于 $H/D = 2, 4, 6, 8$ 处临界Froude数

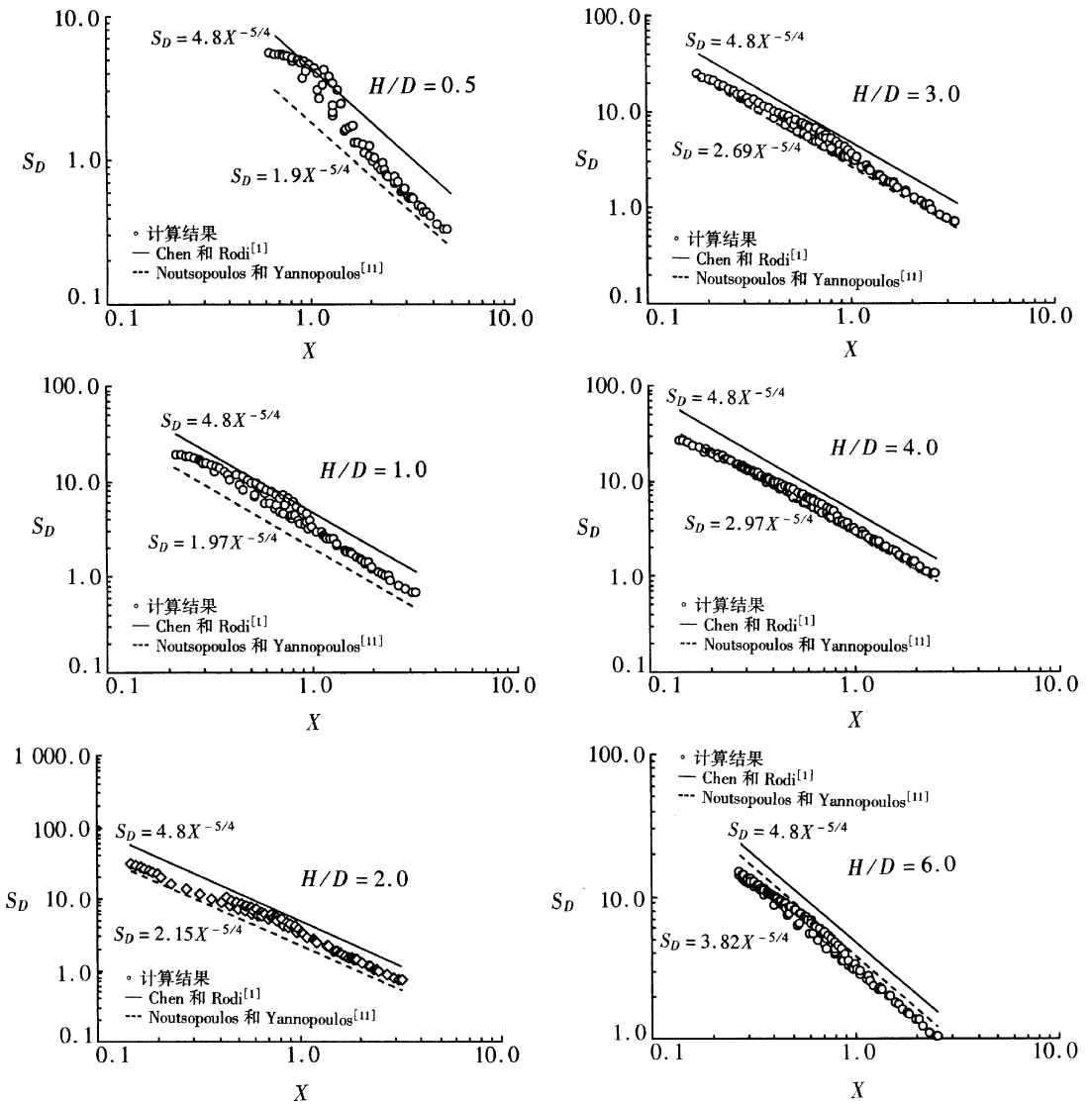


图6  $D/d = 1$  时在不同  $H/D$  与密度 Froude 数  $Fr_0$  条件下的盘后轴线浓度分布

$Fr_c$  随障碍盘直径的变化曲线, 结果表明临界 Froude 数随阻力盘的直径增加而减小, 但对某一阻力盘直径而言, 是随障碍盘离射流孔口的距离增加而增加, 并分析了其物理原因;

2. 基于对 3 种控制流态参数的综合分析, 得到区分绕流流态的临界密度 Froude 数的拟合公式, 利用该公式可以判别绕流的流态, 对出现非正常绕流的两种类型进行了物理解释;

3. 数值模拟表明, 对直径为  $D/d = 2$  障碍盘, 当  $H/d$  大于 12 后, 不论密度 Froude 数多大, 出现的都是正常绕流流态, 对其他直径的障碍盘存在同样的现象, 但要求  $H/d$  不同, 针对本文研究的参数范围, 给出了  $H/d$  随  $D/d$  变化的经验公式;

4. 对  $D/d = 1$  的有障碍浮力射流, 不存在非正常绕流流态, 但获得的轴线稀释度比 Noutsopoulos 等人由试验得到的稀释度要小, 而比 Chen 和 Rodi 的无障碍浮力射流的稀释度要大, 说明障碍盘太小而没有发挥其应有的作用

## [参 考 文 献]

- [1] Chen C J, Rodi W. A Review of Experimental Data of Vertical Turbulent Buoyant Jets [M]. Oxford: Pergamon Press, 1978.
- [2] Noutsopoulos G C, Yannopoulos P C. The round vertical turbulent buoyant jet [J]. Journal of Hydraulic Research, 1988, **25**(4): 481-502.
- [3] Lee J H W, Jirka G H. Vertical round buoyant jet in shallow water [J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 1982, **107**(12): 1651-1675.
- [4] Lee J H W, Cheung W L. Inclined plane buoyant jet in stratified fluid [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1986, **112**(2): 580-589.
- [5] LI Wei, HUAI Wen\_xin. Calculation of whole field for vertical round buoyant jet in stratified environment [J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, **33**(6): 865-876.
- [6] 曾玉红, 槐文信. 圆形垂直浮力射流的稳定性与混合特性研究 [J]. 应用数学和力学, 2005, **26**(1): 83-91.
- [7] Nece R E, Goldstem P P, Block J L. Single\_port suction manifolds [J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 1966, **92**(1): 43-64.
- [8] Agg R A, White R W. Devices for the predilection of sewage at submerged outfalls [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1974, **57**(1): 1-20.
- [9] Sharp J J. The use of a buoyant wall jet to improve dilution of a submerged outfall [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1975, **58**(3): 527-534.
- [10] Fukushima Y. Numerical simulation of gravity current front [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, **124**(6): 572-578.
- [11] Noutsopoulos G C, Yannopoulos P C. Axial dilution in obstructed round buoyant jet [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, **115**(1): 71-81.
- [12] 槐文信, 方神光, 戴会超. 静水中正方形孔口有障碍浮力射流的研究( ) 数学模型及计算方法的验证 [J]. 应用数学和力学, 2006, **27**(5): 571-578.
- [13] 槐文信, 方神光, 戴会超. 静水中正方形孔口有障碍浮力射流的研究( ) 流场特性分析 [J]. 应用数学和力学, 2006, **27**(5): 579-587.
- [14] 槐文信, 方神光. 静止环境中有限力圆盘浮射流特性的研究( ) 数学模型及计算方法的验证 [J]. 水科学进展, 2004, **15**(5): 549-554.
- [15] 方神光, 槐文信. 静止环境中有限力圆盘浮射流特性的研究( ) 流场特性分析 [J]. 水科学进展, 2004, **15**(5): 555-560.
- [16] HUAI Wen\_xin, FANG Shen\_guang. Numerical simulation of obstructed round buoyant jets in a static uniform ambient [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2006, **132**(4): 428-431.
- [17] HUAI Wen\_xin, Komatsu T, ZENG Xiao\_hui. Numerical simulation of residual circulation due to bottom roughness variability under tidal flows in a semi\_enclosed bay [J]. China Ocean Engineering, 2005, **19**(4): 601-612.

# Research on Rounded Flowing States of Obstructed Buoyant Jet

HUAI Wen\_xin<sup>1</sup>, FANG Shen\_guang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,

Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China ;

2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University,

Beijing 100084, P. R. China)

**Abstract:** The mutual relationships of three effective factors, the diameter  $D/d$  ( $d$  is the diameter of exit) of obstructed plate, exit densimetric Froude number and the distance  $H/d$  of the plate from jet orifice for obstructed buoyant jet in static ambient, were analyzed to explain normal and abnormal rounded flowing (reverberated and bifurcated flowing). The critical Froude numbers for obstructed buoyant jets with  $H/d = 2, 4, 6, 8$  which distinguished normal and abnormal flowing pattern were obtained. Normal rounded flowing is found only for a plate under a special value of  $H/d$ . A fitted formula of critical Froude numbers with  $H/d$  and  $D/d$  was presented to distinguish rounded flowing types. The occurring of reverberated or bifurcated flowing in abnormal rounded flow was analyzed. Based on the results of obstructed buoyant jets with  $D/d = 1$ , normal rounded flowing occurred only for all conditions and axial dilution behind the plate under different  $H/D$  is obtained.

**Key words:** obstructed buoyant jets; round jets; numerical simulation; rounded flowing pattern; dilution