

9-1-2020

Large Eddy Simulation of Effect of Geometric Parameters on Low Pressure of Turbulent Flow over Gate Slot

Shihua He

1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650500, China;;

Lixiang Zhang

2. Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650500, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Large Eddy Simulation of Effect of Geometric Parameters on Low Pressure of Turbulent Flow over Gate Slot

Abstract

Abstract: The turbulent flow over the hydraulic plane gate slot was studied using large eddy simulation method. The effects of geometric parameters including width-to-depth ratio, stagger ratio, slope ratio and fillet ratio on hydraulic characteristics within and near the gate slot were simulated systematically. According to the vulnerable cavitation locations of the flow over the slot, *the pressure distributions in swirl area and the separation zone at the rear of downstream corner of the slot were investigated emphatically. The results show that the effects of width-to-depth ratios and stagger ratios on the pressure distribution of the flow are significantly. The change of the width-to-depth ratio will affect the conversion of extremely low pressure area of the flow. The appropriate stagger ratio can eliminate the negative pressure of the separation zone. The settings of slopes and fillets can improve flow state and the pressure distributions to a certain extent.*

Keywords

gate slot, large eddy simulation, geometric parameters, negative pressure

Recommended Citation

He Shihua, Zhang Lixiang. Large Eddy Simulation of Effect of Geometric Parameters on Low Pressure of Turbulent Flow over Gate Slot[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 1081-1086.

门槽几何参数对湍流场低压效应的大涡模拟

何士华¹, 张立翔²

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 650500)

摘要: 采用大涡模拟方法对水工平面闸门门槽区湍流场进行了计算分析。系统地模拟了门槽的宽深比、错距比、斜坡比及圆角比等几何参数变化对门槽内部及其附近水流的水力特性的影响, 结合门槽水流空化的易发生部位, 重点探讨了门槽内部漩涡区和门槽下游角隅后侧分离区的低压分布。结果表明: 门槽宽深比和错距比的变化对门槽水流的压力分布作用效应明显, 宽深比的大小变化会影响到门槽水流极低压力区的转换, 错距可消除分离负压区; 设置斜坡和圆角能在一定程度上改善门槽水流流态和压力分布。

关键词: 门槽; 大涡模拟; 几何参数; 负压

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 05-1081-06

Large Eddy Simulation of Effect of Geometric Parameters on Low Pressure of Turbulent Flow over Gate Slot

He Shihua¹, Zhang Lixiang²

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650500, China;

2. Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science & Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The turbulent flow over the hydraulic plane gate slot was studied using large eddy simulation method. The effects of geometric parameters including width-to-depth ratio, stagger ratio, slope ratio and fillet ratio on hydraulic characteristics within and near the gate slot were simulated systematically. According to the vulnerable cavitation locations of the flow over the slot, the pressure distributions in swirl area and the separation zone at the rear of downstream corner of the slot were investigated emphatically. The results show that the effects of width-to-depth ratios and stagger ratios on the pressure distribution of the flow are significantly. The change of the width-to-depth ratio will affect the conversion of extremely low pressure area of the flow. The appropriate stagger ratio can eliminate the negative pressure of the separation zone. The settings of slopes and fillets can improve flow state and the pressure distributions to a certain extent.

Keywords: gate slot; large eddy simulation; geometric parameters; negative pressure

引言

平面直升闸门是水利工程中最为广泛使用的



收稿日期: 2014-07-17 修回日期: 2014-11-03;
基金项目: 国家自然科学基金(51369013); 昆明理工大学自然科学基金(KKZ3201304016);
作者简介: 何士华(1963-), 男, 湖北天门人, 博士, 教授, 硕士, 研究方向为计算流体力学与水利工程流固耦合; 张立翔(1959-), 男, 云南石屏人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为流体结构互动理论及其应用。

闸门形式之一。当水流越过门槽时, 槽内强烈的漩涡和水流与边壁间的分离共存致使门槽区水流运动结构复杂化, 如果门槽体形设计不当, 容易发生水流空化和结构空蚀。国内外门槽受空蚀破坏的实例很多, 一直以来受到水利工程界的广泛关注。在通过水力学模型试验研究门槽体形参数对门槽水流空化和水力特性影响的同时^[1], 随着现代计算流体力学技术的不断发展, 门槽湍流的数值模拟方

法也得到逐步改进和应用。文献[2]采用 $k-\varepsilon$ 湍流模式, 计算了雷诺数为 1×10^4 及 2×10^4 两种情况下平面闸槽区的平均湍流场。文献[3]采用 $k-\varepsilon-E$ 湍流模式和有限解析法, 对雷诺数为 5.5×10^5 , 宽深比分别为 1 和 2 的二维方角门槽的水力特性进行了计算和探讨。文献[4]采用各向异性 $k-\varepsilon$ 湍流模式对五种不同宽深比和两种不同错距比门槽流场特征进行了二维数值研究。与此同时, 将 VOF 方法和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模式相结合进行实际工程泄洪洞门槽水流的数值模拟也被证明是可行的[5]。

尽管空化的初生和发展受到多种因素的影响, 但主要原因在于流体的局部压力过低。因此, 流体压力场尤其是极低压力的分布将直接影响到空化

的初生。水利工程中常见的门槽水流的漩涡型空化和分离型空化[6]与槽内漩涡中心低压的存在和门槽下游角隅后侧分离区的压力陡降直接相关。区别于针对特定几何尺寸矩形门槽流场的一般水力特性的研究, 本文借助湍流大涡数值模拟技术[7-9], 根据门槽水流空化的易发生部位和宽深比、错距比、斜坡比、圆角比(见图1)等门槽几何参数大小的可能变化范围, 系统地模拟不同几何参数的门槽内部及其附近水流压力场分布, 重点获取门槽几何参数变化对槽内漩涡区和门槽下游角隅后侧分离区极低压力的影响规律, 为水利工程实践和有效减免门槽水流空化提供参考。

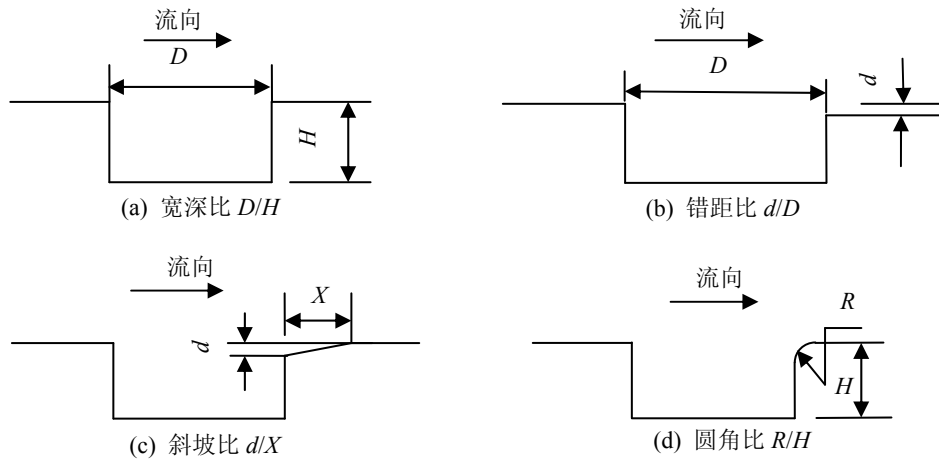


图 1 门槽几何参数示意图

1 计算模型与方法

采用Box滤波函数, 对不可压缩粘性流体运动的连续方程和Navier-Stokes方程组作滤波处理后得

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad i, j = 1, 2 \quad (2)$$

其中: t 为时间; ρ 为密度; ν 为运动粘性系数; \bar{u}_i 和 \bar{p} 分别为过滤后的速度分量与压力。定义亚

格子尺度应力

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j = (\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) + (\overline{u_i u_j} + \bar{u}_i \bar{u}_j) + \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3)$$

式(3)中, 右端第 1 项称为 Leonard 应力, 第 2 项为交叉应力, 第 3 项为雷诺应力。Leonard 应力和交叉应力影响较小, 一般忽略不计。由此, 式(2)又可表达为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

值,说明漩涡型空化起主导作用。在 $0.8 \leq D/H \leq 1.4$ 范围内,尽管分离区负压较小,但强烈的漩涡或者漩涡型空化不仅会导致空蚀破坏,而且还容易激发闸门振动,为不利的宽深比范围;当门槽宽深比 $D/H \geq 1.6$ 时,最大负压出现在门槽下游角隅后侧,分离型空化起主导作用,并且随着门槽宽深比的增大,涡心负压变化较为平缓,而门槽下游角隅后侧分离区负压不断上升,在宽深比 $D/H \geq 2.0$ 后,分离区负压的增长趋于平缓,但明显大于宽深比在 1.6~1.8 之间时的负压值。从最大负压出现的区域及压力分布范围来看, $D/H \leq 1.4$ 和 $D/H \geq 1.8$ 对避开漩涡性空化区和谋求较大的门槽分离型空化的压力值都是不利的。这一数值模拟结果与水工模型试验结果和实际工程的运行情况^[1]基本一致。

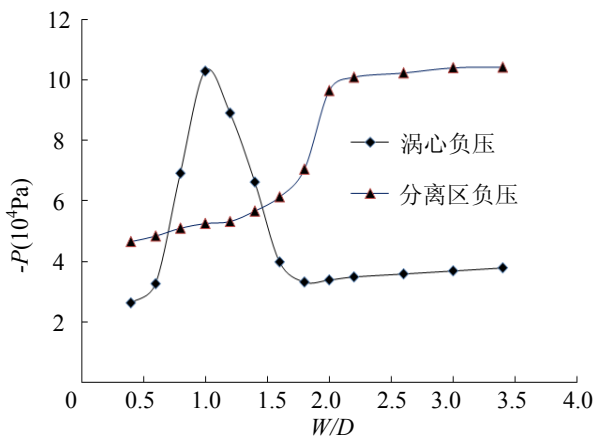


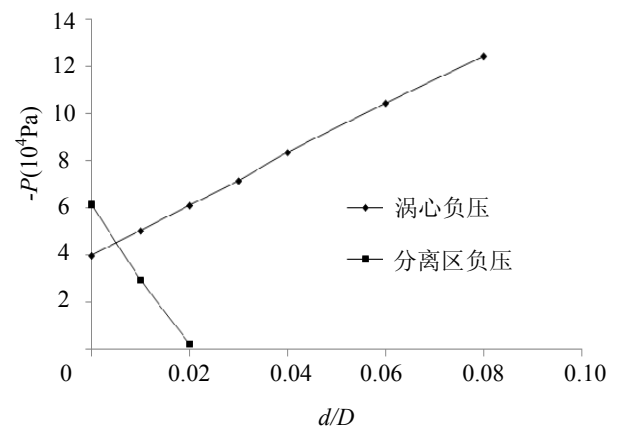
图 4 $u_0=30\text{m/s}$ 矩形方角门槽水流低压宽深比效应曲线

对上游来流速度 $u_0=15\text{m/s}$ 进行数值模拟,当宽深比分别为 0.6, 1.0, 1.6, 2.0, 2.2 时,矩形方角门槽水流涡心压力大小依次为 $-0.93 \times 10^4\text{Pa}$, $-1.7 \times 10^4\text{Pa}$, $-1.1 \times 10^4\text{Pa}$, $-0.98 \times 10^4\text{Pa}$, $-0.99 \times 10^4\text{Pa}$, 下游角隅后侧分离区压力大小依次为 $-1.2 \times 10^4\text{Pa}$, $-1.28 \times 10^4\text{Pa}$, $-1.3 \times 10^4\text{Pa}$, $-1.6 \times 10^4\text{Pa}$, $-1.7 \times 10^4\text{Pa}$ 。随宽深比变化,其最大负压区和次大负压区的位置以及负压分布的变化趋势与 $u_0=30\text{m/s}$ 是一致的。但对同一宽深比, $u_0=15\text{m/s}$ 较 $u_0=30\text{m/s}$ 时的负压值明显减小。

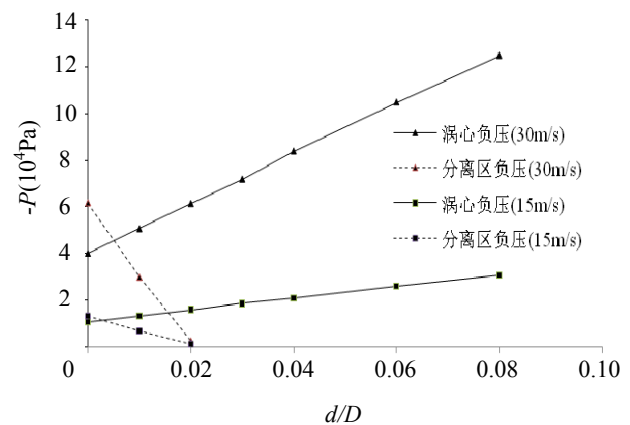
2.2 错距比效应

设定错距比分别为 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.06, 0.08, 图 5(a)所示为上游来流速度为 $u_0=30\text{m/s}$, 宽深比为 1.6 时的门槽水流涡心负压和下游角隅后侧分离区负压与错距比的关系曲线,图 5(b)为 $u_0=30\text{m/s}$ 和 $u_0=15\text{m/s}$, 其他参数相同时的对比曲线。

由图5可以看出,设定错距比后,最大负压出现在槽内漩涡中心;错距比越大,门槽下游角隅后侧分离区负压越小,直至完全消失(当错距比 $d/D \geq 0.03$ 时),表明设置一定大小的错距比可以有效减小门槽下游角隅后侧负压,但槽内漩涡中心负压则不断增大。随错距比的增加,来流速度越大,涡心负压的增加和分离区负压的下降也越快。并且,对于同一错距比, $u_0=15\text{m/s}$ 较 $u_0=30\text{m/s}$ 时的负压值明显下降。对于实际工程而言,应在 $d/D > 0.03$ 的范围根据工程布置要求设置错距比。



(a) $u_0=30\text{m/s}$



(b) $u_0=30\text{m/s}$ 和 $u_0=15\text{m/s}$

图5 $D/H=1.6$ 门槽水流低压错距比效应曲线

2.3 斜坡比效应

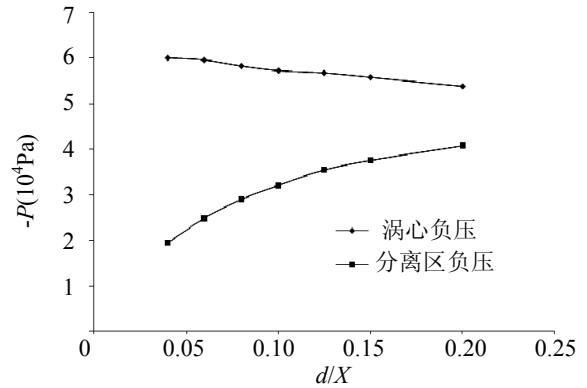
设定斜坡比依次为0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.125, 0.15, 0.20, 图6(a), (b)所示分别为 $u_0=30\text{ m/s}$, $D/H=1.6$, $d/D=0.03$ 和 $u_0=15\text{ m/s}$, $D/H=1.6$, $d/D=0.06$ 时门槽下游角隅后侧分离区负压和槽内漩涡中心负压随斜坡比变化的关系曲线。从图可以看出, 斜坡门槽水流的负压均出现在漩涡中心; 随着斜坡比增大, 门槽下游角隅后侧分离区负压也越大而涡心负压呈微弱下降趋势, 表明斜坡比越小, 斜坡坡度越缓, 门槽下游角隅后侧分离区负压越小, 门槽的抗分离型空化效果越好, 但漩涡中心负压有所增强。对比图6(a)和图4可以看出, 相对于无错距、无斜坡的矩形方角门槽水流的负压大小(如当 $u_0=30\text{ m/s}$, $D/H=1.6$ 时, 分离区负压为 $-6.15\times 10^4\text{ Pa}$, 涡心负压为 $-3.99\times 10^4\text{ Pa}$), 不同斜坡比门槽下游角隅后侧分离区负压普遍减小而槽内漩涡中心负压普遍增加; 对比图6和图5可以看出, 相对于错距无斜坡门槽水流压力大小(如当 $u_0=30\text{ m/s}$, $D/H=1.6$, $d/D=0.03$ 时, 分离区压力为正, 涡心负压为 $-7.17\times 10^4\text{ Pa}$), 不同斜坡比门槽分离区出现负压而漩涡中心负压均有所减小。

2.4 圆角比效应

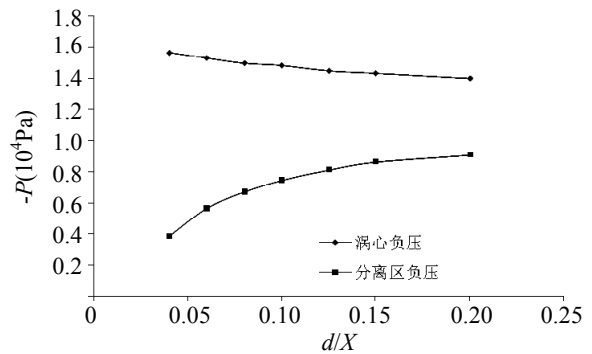
设定圆角比分别为0.0(即方角), 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.4, 图7(a), (b)分别为来流速度为 15 m/s , 宽深比分别为1.6和2.2时门槽下游角隅后侧分离区负压和槽内漩涡中心负压随圆角比变化的关系曲线。

从图7可以看出, 将门槽下游方角变为圆角, 槽内漩涡中心负压变化很小, 随着圆角比增大, 漩涡中心的负压只呈现微小的波动, 表明圆角比大小变化对槽内漩涡中心负压影响很小; 而相对方角门槽而言, 设置不同大小的圆角比均在一定程度上降低了门槽下游角隅后侧分离区负压。并且, 随着圆角比增大, 分离区负压呈现减小的趋势, 当圆角比 $R/H\leq 0.1$, 随圆角比增大, 分离区负压下降幅度较大, 效果较为显著, 随后下降幅度减缓, 说明选择

圆角比为 $R/H=0.1$ 附近较为合适。

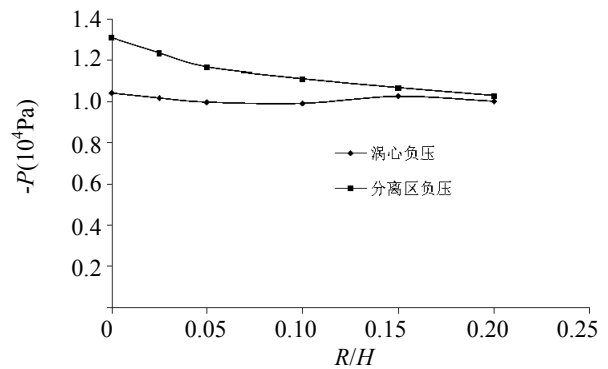


(a) $u_0=30\text{ m/s}$, $D/H=1.6$, $d/D=0.03$

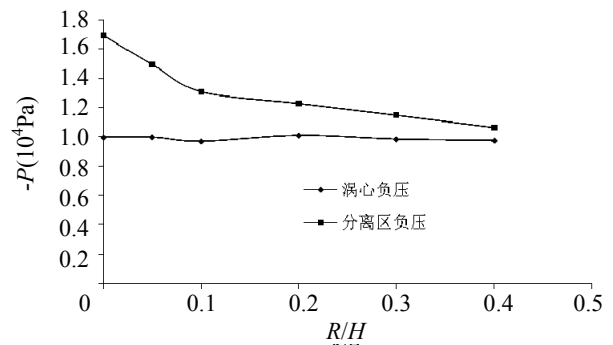


(b) $u_0=15\text{ m/s}$, $D/H=1.6$, $d/D=0.06$

图6 门槽水流低压斜坡比效应曲线



(a) $u_0=15\text{ m/s}$, $D/H=1.6$



(b) $u_0=15\text{ m/s}$, $D/H=2.2$

图 7 门槽水流低压圆角比效应曲线

3 结论

(1) 门槽水流是一种分离流与剪切驱动腔体涡流^[12]共存的水力现象, 门槽几何参数的变化调整会同时影响到槽内漩涡区压力和门槽下游角隅后侧分离区压力的大小与分布。面对大量形状和尺寸不同的门槽几何外形, 数值模拟方法较模型试验途径能更方便和系统地考虑门槽几何参数对流场压力的作用效应。

(2) 门槽宽深比和错距比的变化对门槽水流的压力分布作用效应明显, 是影响门槽水流空化的主导几何参数, 宽深比的大小会影响到门槽水流最大负压区位置的转换和极低压力的分布, 存在有一个对工程运行较为有利的宽深比范围。错距比对减弱分离区负压效应明显, 随错距比增大, 漩涡中心负压几乎成直线上升, 分离区负压几乎成直线下降。当错距比在 0.03 以上时, 分离负压区消失。

(3) 门槽下游角隅后侧设置斜坡和圆角能在一定程度上缓减门槽水流空化, 相对于宽深比和错距比而言, 斜坡比和圆角比为影响门槽水流压力分布的次要几何参数。斜坡越缓, 门槽下游角隅后侧分离区负压越小而涡心负压呈微弱上升趋势。圆角对于槽内漩涡中心负压的影响并不明显, 但能在一定程度上减弱门槽下游角隅后侧的分离区负压, 改善门槽水流流态。

参考文献:

- [1] 金泰来, 刘长庚, 刘孝梅. 门槽水流空化特性的研究 [C]// 水力水电科学研究院研究论文集, 北京: 水利水电出版社, 1983: 57-78.
- [2] 何子干, 倪汉根. 平面闸槽区湍流场计算[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 1988, 3(1): 18-26.
- [3] 陈大宏, 李炜. 二维方角门槽的数值模拟[J]. 武汉水利电力学院学报, 1989, 22(1): 87-96.
- [4] 张云, 杨永全, 吴持恭, 等. 平面闸槽区湍流场的数值模拟[J]. 水利学报, 1994(9): 47-60.
- [5] 沙海飞, 吴时强. 泄洪洞有压段体型优化的三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2004, 19(S): 942-947.
- [6] 陈霞, 李忠义, 王永生. 表孔门槽的空化特性分析[J]. 水利学报, 1998 (6): 21-27.
- [7] 王文全, 张立翔, 闫妍, 等. 混流式水轮机导叶叶道内湍流场的大涡模拟[J]. 热能动力工程, 2009, 24(2): 257-260.
- [8] Kulyakhtin A, Shipilova O, Muskulus M. Numerical Simulation of Droplet Impingement and Flow around a Cylinder Using RANS and LES Models [J]. J. Fluids and Structures (S0889-9746), 2014, 48: 280-294.
- [9] Rieth M, Proch F, Stein OT, *et al.* Comparison of the Sigma and Smagorinsky LES Models for Grid Generated Turbulence and a Channel Flow [J]. Comput. Fluids (S0045-7930), 2014, 99: 172-181.
- [10] 岳元璋. 矩形方角门槽水流流谱和空化特性的研究 [C]// 水力水电科学研究院研究论文集, 北京: 水利水电出版社, 1985, 21.
- [11] 何士华. 腔体涡流结构演化机理与应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [12] 何士华, 张立翔. 矩形腔反向驱动流流型分析与数值模拟[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(6): 1170-1174.