

文章编号: 1672-9897(2006)03-0053-06

# 矩形渡槽槽体结构绕流流场数值模拟研究

黄林, 廖海黎

(西南交通大学风工程试验研究中心, 四川 成都 610031)

**摘要:** 基于二维非定常不可压缩雷诺平均 N-S 方程, 采用 RNG(renormalization group)  $k-\epsilon$  两方程湍流模型, 对矩形渡槽在空槽和满槽情况下的二维绕流特性进行了分析。计算网格为四边形结构网格, 采用有限体积法对微分方程进行离散, 应用 SIMPLE 算法解决压强-速度耦合关系。引入空腔流动研究成果对空槽和满槽风载体形系数基本相同的原因进行了理论分析, 揭示了空槽时槽体内复杂的旋涡流动结构。

**关键词:** 空腔流; 旋涡; 矩形渡槽; 数值模拟

**中图分类号:** V211      **文献标识码:** A

## Numerical study on flow structure around the rectangular aqueduct

HUANG Lin, LIAO Hai-li

(Research Center for Wind Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

**Abstract:** Flow characteristics of the rectangular aqueduct was numerically studied using two-dimensional unsteady Reynolds averaged incompressible Navier-Stokes equations combined with the RNG(renormalization group)  $k-\epsilon$  turbulence model. Two situations are considered including empty and full depth of the aqueduct. Quadrilateral grid was used to divide the computational domain. The finite volume technique was adopted to discretize the governing differential equations. The pressure-velocity field was coupled using the SIMPLE algorithm. The reason for wind load shape coefficients are very close under previous two conditions is explained by introducing the research results of driven cavity flows. Also we obtain the vortex structure in the aqueduct for empty condition.

**Key words:** driven cavity flows; vortex; rectangular aqueduct; numerical simulation

## 0 引言

渡槽是一种重要的水工建筑物, 由于其具有结构相对简单, 施工方便, 输水能力大, 造价比较低等优点, 在我国各地有着广泛的应用。渡槽有多种不同的结构型式, 其中建造比较多的是简支梁型式的渡槽<sup>[1]</sup>。渡槽的槽体部分也有多种不同的型式, 但最具代表性的是矩形和 U 型槽体。我国的渡槽风毁事件发生比较多, 但对于渡槽抗风问题的研究比较少。渡槽槽体形状比较特殊, 在风洞实验研究方面比较

少<sup>[2~4]</sup>。渡槽绕流特性的数值模拟研究对于设计、研究都会有较大的帮助。文献[2~4]根据风洞实验结果得出了空槽和满槽时槽体的风载体形系数基本相同的结论, 但无法从理论上加以解释。本文拟从空腔流的角度对文献[2~4]的结论加以解释。近 40 多年来二维空腔流一直受到研究者们的关注。研究者主要采用涡-速度和双谐波方法得到了雷诺数高达 10000 的稳态解<sup>[5]</sup>。目前, 在研究空腔流旋涡随时间的演化<sup>[6]</sup>、利用 Hopf 分叉技术研究存在 Hopf 分叉的临界雷诺数<sup>[7,8]</sup>方面较多。本文选用矩形渡槽作为

• 收稿日期: 2006-03-15; 修订日期: 2006-07-04

基金项目: 西南交通大学博士生创新基金

作者简介: 黄林(1973-), 男, 四川安岳人, 工程师, 博士生, 研究方向: CFD 计算、车桥耦合振动。

基本的槽体型式,考虑文献[2,4]采用的3种高宽比。采用不可压缩假设,基于二维非定常雷诺平均N-S方程,结合RNG(renormalization group)k-ε两方程湍流模型,运用大型流体计算商业软件FLUENT对渡槽空槽和满槽两种情况进行了二维绕流特性分析。数值模拟时利用有限体积法对微分方程进行离散,采用SIMPLE算法解决压强-速度耦合关系。引入二维空腔流的研究成果对空槽和满槽时槽体风载体形系数基本相同的原因进行了理论分析;揭示了空槽时槽体内复杂的旋涡流动结构。

## 1 数值模拟基本方程及湍流模型

### 1.1 基本方程

基本方程采用二维非定常不可压缩雷诺平均N-S方程,并对雷诺应力采用Boussinesgue假设:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( p + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_{ef} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

式中: $u_i$ 为 $x_i(i=1,2)$ 方向空气的平均速度; $\rho$ 为空气密度; $p$ 为静压; $\mu_{ef}$ 为有效粘性系数, $\mu_{ef} = \mu + \mu_t$ ,其中, $\mu$ 为空气的动力粘性系数, $\mu_t$ 为湍流粘性系数; $k$ 为湍流动能。

### 1.2 湍流模型

湍流动能 $k$ 、湍流耗散率 $\epsilon$ 由RNG k-ε两方程湍流模型<sup>[9]</sup>确定:

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{ef} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_\epsilon \mu_{ef} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (5)$$

式中: $\alpha_k, \alpha_\epsilon$ 分别为 $k, \epsilon$ 的逆有效普朗特数; $G_k$ 为平均速度梯度引起的湍流动能生成项; $R_\epsilon$ 代表平均应变率对 $\epsilon$ 的影响; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ 为常数。 $G_k = \mu_r S^2$ ,  $R_\epsilon = C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2 / (1 + \beta \eta^3) k$ , 其中 $\eta = Sk/\epsilon$ ,  $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ ,  $S_{ij}$ 为平均应变张量。 $\mu_{ef}$ 由 $d(\rho^{0.5}k/\sqrt{\epsilon\mu}) = 1.72\nu d\nu / \sqrt{\nu^3 - 1 + C_v}$ 确定,其中 $\nu = \mu_{ef}/\mu$ 。由 $(\alpha - 1.3929)/(\alpha_0 - 1.3929) |^{0.6321} + (\alpha + 2.3929)/(\alpha_0 + 2.3929) |^{0.3679} = \mu/\mu_{ef}$ 确定 $\alpha_k, \alpha_\epsilon$ 。在

高雷诺数条件下( $\mu/\mu_{ef} \ll 1$ ), $\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.393$ , $\mu_t = \rho C_\mu k^2/\epsilon$ 。相关常数: $C_{1\epsilon} = 1.42$ , $C_{2\epsilon} = 1.68$ , $C_\mu = 0.0845$ , $\eta_0 = 4.38$ , $\beta = 0.012$ , $C_v \approx 100$ , $\alpha_0 = 1.0$ 。

## 2 计算模型

渡槽计算模型采用断面如图1。对空槽计算考虑缩尺比1:15(与实验模型一致)和1:1(原型)两种情况;对满槽仅考虑缩尺比1:15(与实验模型一致)。模型表面均为光滑表面。当计算满槽时封闭顶面即计算矩形断面,以便接近试验模型满槽时水波纹上表面。均匀来流速度为13m/s,迎角为0°,来流湍流强度取0.5%。模型表面采用无滑移边界条件。计算网格为四边形结构网格,对空槽原型情况为满足边界层需要进行了网格加密,有部分非结构网格。缩尺比1:15时,入口边界 $x = -0.8$ m,出口边界 $x = 1.6$ m,上边界 $y = 0.896$ m,下边界 $y = -0.8$ m;缩尺比1:1时,入口边界 $x = -12$ m,出口边界 $x = 24$ m,上边界 $y = 13.44$ m,下边界 $y = -12$ m。计算模型的相关参数见表1。

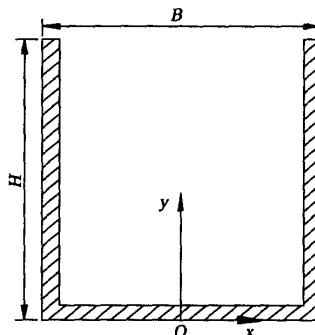


图1 渡槽计算模型

Fig.1 Computational model of aqueduct

表1 计算模型相关参数

Table 1 Parameters of computational model

$H/B$	$H$ (m)	$Re$ ( $\times 10^4$ )	计算网格 (个)	缩尺比
空槽	0.048	4.272	14545	1:15
	0.720	64.077	46606	1:1
	0.072	6.407	14875	1:15
	1.080	96.116	55570	1:1
满槽	0.096	8.543	15271	1:15
	1.440	128.155	138010	1:1
	0.6	4.272	13789	
	0.9	6.407	13687	1:15
1.2	0.096	8.543	13615	

### 3 计算结果

为便于分析, 所给结果均为时间平均值。

#### 3.1 流场静压平均值等值线

各高宽比下缩尺比 1:15 的静压分布如图 2 所示。缩尺比 1:15 和 1:1 时空槽的外部静压分布几乎相同。图 3 显示了缩尺比 1:15 和 1:1 时空槽内部静压对比。图中的值为静压与来流动压之比。

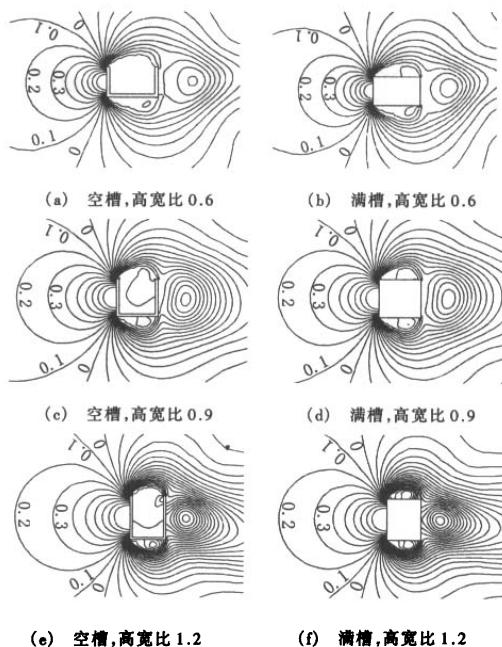
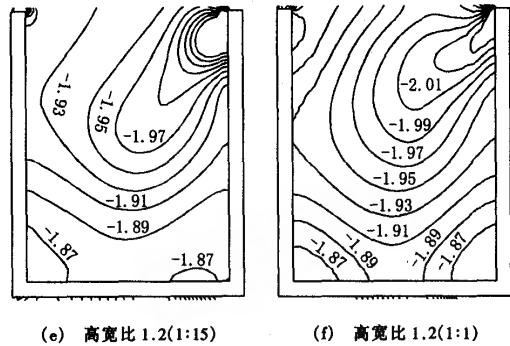
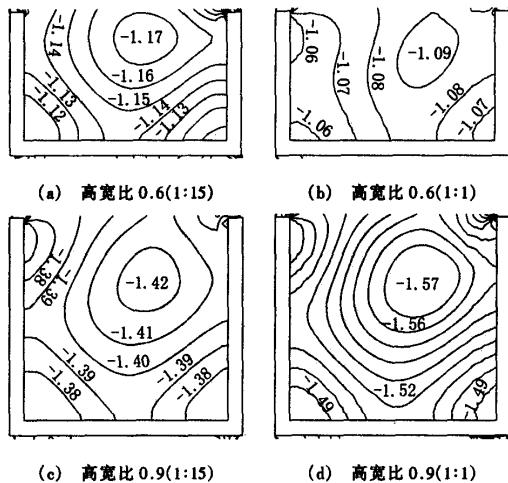


Fig.2 Contours of mean pressure magnitude



(e) 高宽比 1.2(1:15) (f) 高宽比 1.2(1:1)

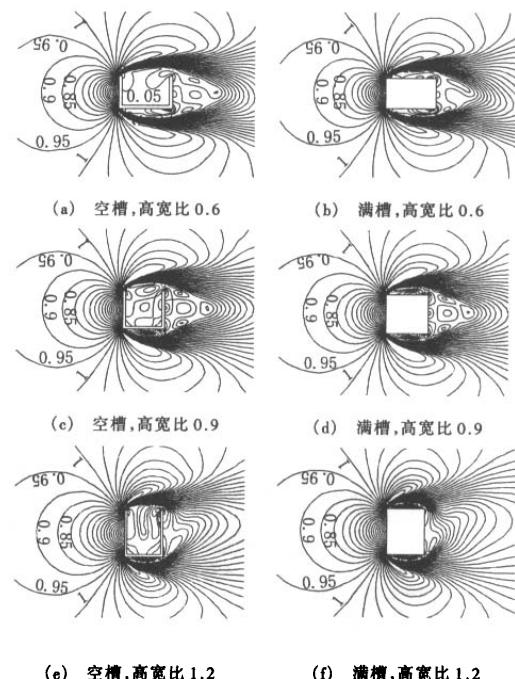
Fig.3 Contours of mean pressure magnitude in adqueduct

#### 3.2 流场速度平均值等值线

各高宽比下缩尺比 1:15 的速度分布如图 4 所示。缩尺比 1:15 和 1:1 时空槽的外部速度分布几乎相同。图 5 显示了缩尺比 1:15 和 1:1 时空槽内部速度对比。图中的值为速度与来流速度之比。

#### 3.3 流线图

图 6 为缩尺比 1:15 的流线图, 图 7 为空槽缩尺比 1:1 的流线图。



(e) 空槽, 高宽比 1.2 (f) 满槽, 高宽比 1.2

图 4 速度平均值等值线

Fig.4 Contours of mean velocity magnitude

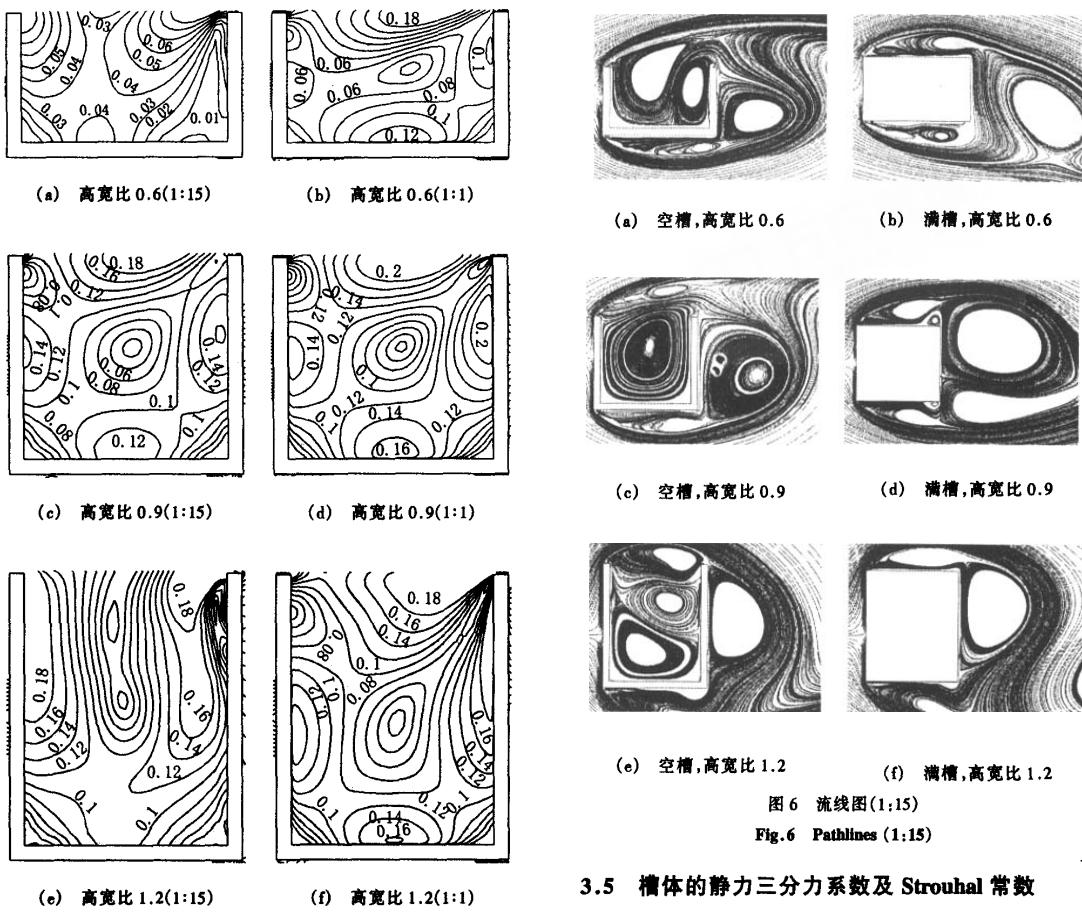


图 5 空槽内速度平均值等值线  
Fig.5 Contours of mean velocity magnitude in adqueduct

### 3.4 平均风压系数分布

平均风压系数分布的计算值与均匀流场中的试验结果对比如图 8 所示。平均风压系数取值:满槽时为渡槽外侧面上的值,空槽时为渡槽内外侧面上的值之和。风压方向以向渡槽内部为正。风向从左至右。图中标注的平均风压系数为缩尺比 1:15 的计算结果。

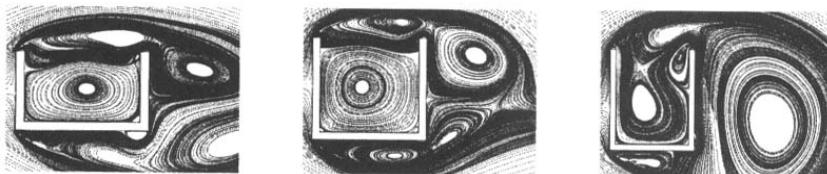


图 6 流线图(1:15)  
Fig.6 Pathlines (1:15)

### 3.5 槽体的静力三分力系数及 Strouhal 常数

静力三分力系数按下式计算:阻力系数  $C_D = 2F_x/\rho V^2 H$ ,升力系数  $C_L = 2F_y/\rho V^2 B$ ,力矩系数  $C_m = 2M_z/\rho V^2 B^2$ 。其中, $F_x, F_y, M_z$  分别为阻力、升力、力矩(简化到外轮廓中心)的时间平均值, $\rho$  为空气密度, $V$  为来流风速, $H, B$  分别为渡槽高度、宽度。此处计算的阻力系数与文献[2,4]中的结构风载系数是一致的。渡槽 Strouhal 常数  $St = fH/V$ , 其中  $f$  为旋涡脱落频率,由升力系数经 FFT 变换得到。

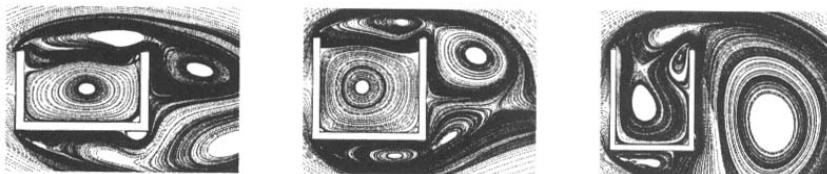
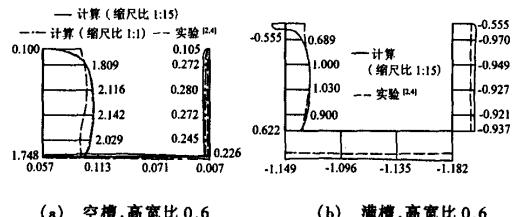


图 7 流线图(1:1)  
Fig.7 Pathlines(1:1)

## 4 计算结果分析

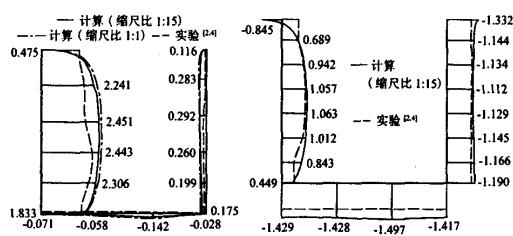
### 4.1 缩尺比 1:15

从图 2 和 4 可以看到, 在时间平均意义上空槽和满槽时渡槽外部的流场是基本相同的, 从图 6 的流线图进一步看到空槽和满槽的旋涡脱落也是基本相同的, 除空槽时槽体内有旋涡外。图 8 的平均风压系数分布显示本文计算结果与试验结果吻合良好。表 2 中阻力系数计算值与试验结果也有良好的一致性, 除高宽比 1.2 时阻力系数计算值偏大外。可以看出本文的计算方法和结果是可靠而合理的。



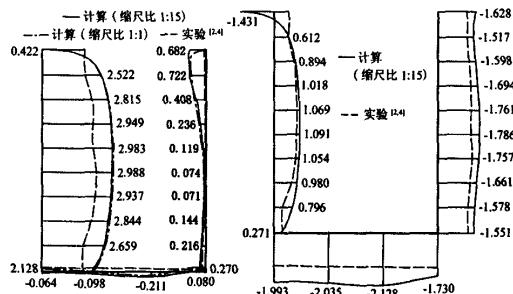
(a) 空槽, 高宽比 0.6

(b) 满槽, 高宽比 0.6



(c) 空槽, 高宽比 0.9

(d) 满槽, 高宽比 0.9



(e) 空槽, 高宽比 1.2

(f) 满槽, 高宽比 1.2

图 8 风压系数分布对比图

Fig.8 Contrast of pressure coefficient

文献[2~4]根据风洞实验结果得出了空槽和满槽时槽体的风载体形系数基本相同的结论, 但无法从理论上加以解释。本文以矩形渡槽为例, 引入空腔流的理论成果解释如下。

表 2 静力三分力系数及  $S_t$  数Table 2 Aerodynamic force coefficients and  $S_t$ 

$H/B$	$C_D$	$C_L$	$C_m$	$S_t$	缩尺比		
	计算	实验 <sup>[2,4]</sup>	计算	计算			
空	1.643	1.61	0.098	-0.011	0.097	1:15	
	1.684		-0.079	-0.009	0.098	1:1	
	1.933	1.88	-0.071	0.005	0.119	1:15	
槽	1.966		-0.106	0.001	0.122	1:1	
	2.442	2.07	0.001	0.018	0.137	1:15	
	2.386		0.027	0.066	0.146	1:1	
满	0.6	1.719	1.64	-0.160	-0.004	0.083	
	0.9	1.940	1.87	-0.083	0.001	0.112	1:15
	1.2	2.422	2.16	-0.021	-0.037	0.139	

渡槽内的空气流动是由于外围气流扰动作用而产生的。类比空腔流问题(顶部壁面作匀速移动驱动空腔内部空气流动), 可以将空槽内空气流动看作外围气流扰动引起的空腔流。由图 6 的流线图可以看到: 空槽高宽比 0.6 时槽内存在两个并排的主涡(旋涡在迎风侧随外围绕流而脱落), 空槽高宽比 0.9 时存在一个主涡(未见脱落现象), 空槽高宽比 1.2 时存在两个上下叠放的主涡(旋涡在迎风侧随外围绕流而脱落)。在旋涡脱落周期内大部分时间由一个主涡占据渡槽空间。渡槽内旋涡结构受外围绕流影响较小, 仅在渡槽上侧旋涡结构受外围绕流较大, 渡槽内旋涡周围的静压基本围绕涡核呈圆周递增。从时间平均角度看, 渡槽内的主涡与稳定的空腔流的主涡是基本相同的。由空腔流的研究知道, 在主涡的作用下渡槽两内侧壁的静压相同。这样, 空腔内主涡对渡槽的阻力系数基本没有影响, 即文献[2~4]得到的空槽和满槽风载体形系数基本相同。从图 3 也可以看到渡槽内两侧壁的静压几乎相同, 同时基本呈同心圆分布的态势。

### 4.2 缩尺比 1:1

缩尺比的影响主要对高宽比 0.6 的空槽内部流场影响较大, 缩尺比 1:1 空槽内部主涡结构更加稳定, 但缩尺比对静力三分力系数基本没有影响。缩尺比 1:1 和 1:15 时空槽内部旋涡结构差别较大, 可能在这两个计算雷诺数间存在一分叉点。方腔流的分叉点雷诺数与高宽比有关, 如高宽比为 2 的空腔雷诺数在 2000~5000 存在分叉点<sup>[7]</sup>, 方腔流雷诺数在 10000~10500 及 15000~15500 存在分叉点<sup>[8]</sup>。因此, 为保证实验结果更好地逼近真实结果, 有必要对高宽比 0.6 的渡槽采用更大的实验模型。

## 5 结 论

- (1) 用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型计算渡槽这类含空腔的钝体结构的绕流可以得到精度较高的计算结果。
- (2) 应用空腔流的研究成果解释了空槽和满槽结构风载体形系数基本相同的内在本质,揭示了空槽时槽体内部复杂的旋涡流动现象。
- (3) 缩尺比 1:1 和 1:15 计算模型的计算结果基本一致,高宽比 0.6 的渡槽无水时缩尺比 1:1 和 1:15 之间可能存在一分叉点,试验时有必要采用更大的实验模型。

### 参考文献:

- [1] 赵文华,陈德亮. 渡槽 [M]. 北京:水利电力出版社, 1993.
- [2] 李正农,楼梦麟,宋锦忠,等. 渡槽槽体结构风载体形系数的风洞试验研究 [J]. 水利学报, 2000, (9): 15~19.
- [3] 李正农,楼梦麟,宋锦忠,等. U 形渡槽槽体结构风载体形系数的风洞试验研究 [J]. 空气动力学学报, 2002, 20 (2): 233~238, 245.
- [4] 李正农,吴红华,楼梦麟. 湍流对于渡槽槽体结构风载体形系数的影响 [A]. 第六届全国风工程及工业空气动力学学术会议论文集, 北京, 2002: 55~60.
- [5] SCHREIBER R, KELLER H B. Driven cavity flows by efficient numerical techniques [J]. Journal of Computational Physics, 1983, 49(2): 310~333.
- [6] CHEN Ching-jen, CHEN Hamn-ching. Finite analytic numerical method for unsteady two-dimensional Navier-Stokes equations [J]. Journal of Computational Physics, 1984, 53(2): 209~226.
- [7] SHEN Jie. Hopf bifurcation of the unsteady regularized driven cavity flow [J]. Journal of Computational Physics, 1991, 95 (1): 228~245.
- [8] AUTERI F, PAROLINI N, QUARTAPELLE L. Numerical investigation on the stability of singular driven cavity flow [J]. Journal of Computational Physics, 2002, 183(1): 1~25.
- [9] YAKHOT V, ORSZAG S A, THANGAM S, et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique [J]. Physics of Fluids A, 1992, 4(7): 1510~1520.