

沉管隧道水中浮运施工的数值模拟研究

朱升 毛军

北京交通大学土木建筑工程学院 北京 100044

摘要：沉管隧道水中施工要进行浮运、沉放等复杂的作业，受力情况与传统的水底隧道的施工方法有很大差异。浮运施工的研究方法主要为模型试验和数值模拟。数值模拟有其独特的优势，但如何建立起准确的数值模拟计算模型是关键。本文的目标工程为即将开工的广州洲头咀沉管隧道，利用著名的 CFD 软件 STAR-CCM+，选取已经顺利完工的珠江沉管隧道进行工程类比，以确定计算模型的适用性。

关键词：沉管隧道 浮运 数值模拟 STAR-CCM+

Abstract : Immersed tunnel's construction includes the process of pipe's transporting on water, stopping on water and going down in water. The mechanical situation is different from the traditional tunnels'. The research about the process of pipe's transporting on water is modeling test and numerical simulation. Numerical simulation whose linchpin is exact computational modeling has its unique advantage. This article takes "Zhujiang Immersed Tunnel Project" which has completed as a compare for our target project "Guangzhou Zhoutouzui Immersed Tunnel Project" to test the computational modeling by STAR-CCM+.

Key words: Immersed Tunnel, Transporting on water, Numerical simulation, STAR-CCM+

1 前言

随着内河及航运事业的发展，水底隧道因能很好地解决水域的跨越问题，同时又降低了对周围环境的影响，解决了大面积水域的航运问题，成为一种跨越江河和海湾（峡）的新方式，逐渐在世界范围和我国得到应用。修建水底隧道已逐渐成为工程界普遍认同的跨越航运繁忙的河道的第一选择。

在目前修建水下隧道的施工方法中，沉管隧道施工具有对地层条件要求不高、沉管埋设较浅、受力明确、断面形式灵活、防水性能好、工序可平行进行、总工程量较小、作业安全等优势^[1]。因此，沉管法已成为跨越江河（海）通道的主要经济技术比选的工法。

根据国际隧道协会（ITA）成立的沉管隧道和悬浮隧道特别工作组于 1993 年提供的报告^[2]，一种当今被普遍认可的沉管隧道定义为：沉管隧道是由若干预制的管段，分别浮运到现场，一个接一个地沉放安装，在水下将其互相连接并正确定位在已经开挖的水下沟槽内，其后辅以相关工程施工，使这些管段组合体成为连接水体两端陆上交通的隧洞型交通运输载体。

作者简介：朱升(1984-)，男，北京交通大学硕士研究生，主要从事土木工程数值模拟研究，13810873760

沉管隧道的施工要经过大量复杂的水中作业，如浮运、沉放、对接就位等，各阶段荷载、荷载组合及施工工况与用其它施工方法修建的隧道相比有很大的差异，首先应进行理论分析。

2 理论分析

2.1 数学模型及外力分析

为建立浮运管节与拖轮等构成的组合体在水面运动的数学模型，选取图 1 所示坐标系。图中 $o_0x_0y_0z_0$ 为空间固定的坐标系， o_0 为坐标系原点， o_0x_0 为水平面纵轴， o_0y_0 为横轴， o_0z_0 轴垂直于水平面，指向地心为正。 $oxyz$ 为固结在管节上的动坐标系， o 为管节长度中心， ox 为管节对称轴方向， oy 垂直 ox ， oz 垂直 oxy 平面，指向地心为正。将 o_0x_0 与 ox 两轴的夹角 ψ 作为管节的首向角。管节组合体在水面运动方程组为：

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr - x_G \dot{r}^2) &= X \\ m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) &= Y \\ I_z \dot{r} + mx_G(v + ur) &= N \end{aligned} \quad \dots(1)$$

式中， m 为管节组合体质量； x_G 为管节组合体重心 G 纵坐标； I_z 为管节组合体对 z 轴的转动惯量； \dot{u} 、 \dot{v} 、 \dot{r} 为动坐标系 x 、 y 轴的加速度以及对 z 轴的回转角加速度； u 、 v 、 r 为动坐标系 x 、 y 轴的速度分量以及对 z 轴的回转角速度； X 、 Y 、 Z 为作用在沉管组合体上的沿动坐标系 x 、 y 轴向的外力以及绕 z 轴的力矩。

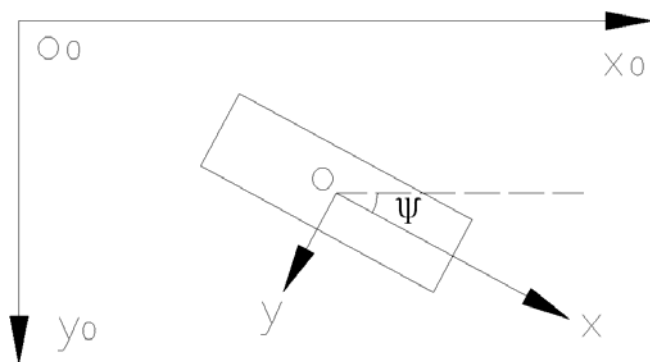


图 1 管段水面运动坐标系

对管节组合体的外力 X 、 Y 、 N ，估算如下：

假定绳索与管节连接处在管节中心线前端 p 处，则

$$\begin{aligned} X &= X^* + T \cos \theta, \quad Y = Y^* + T \sin \theta \\ N &= N^* + T x_p \sin \theta \end{aligned} \quad \dots(2)$$

式中， θ 为 ox 轴与绳索内夹角； x_p 为系缆点 p 距动坐标系原点距离； X^* 、 Y^* 、 N^*

为沉管管节组合体所受流体作用力及对动坐标原点流体动力矩； T 为拖索的张力，是拖索材料、截面积及变形的函数，可写为 $T = 9.78\phi^{1.93}S_b^2$ (ϕ 为绳索伸长率， S_b 为绳索断面面积)^[3]。

对组合体水动力 X^* 、 Y^* 、 N^* 的具体分析，请参阅相关文献^[4]。

2.2 阻力性能

管段水动力特征是选择合适的管段拖运和系泊方案的重要技术指标。确定管段的水动力特征可以弄清楚需要的管段定位操纵力的量级，进一步也可以粗略确定相关设备的参数。

管段在水面附近拖航时所遭受的阻力包括粘性阻力和兴波阻力，前者与雷诺数有关，后者与傅汝德数有关。由于管段是方形钝体，粘性阻力中的主要成分是形状阻力（或称压差阻力或漩涡阻力），摩擦阻力所占比重较小^[5]。此外，试验的速度较低，傅汝德数仅在0~0.05之间，兴波阻力也很小，在总阻力中将占非常次要的成分。

1. 形状阻力（压差阻力）

形状阻力是管段钝体迎水面阻挡水流并使之分离后形成的，在迎水面上的水流速度瞬时为零而转化为压力，此时迎水面面积上的压力即成为形状阻力。

$$R_c = C_E \cdot A \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \quad \dots(3)$$

其中， C_E ——形状阻力系数

A ——沉管的纵向或横向迎流面积

ρ ——水流密度

V ——沉管在纵向或横向上与水流的相对速度

2. 摩擦阻力

摩擦阻力的计算可按下式计算：

$$R_f = C_f \cdot S \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \quad \dots(4)$$

其中， $C_f = 0.75 \times (\log R_e - 2)^{-2}$ （国际船模试验池会议公认的ITTC公式）

C_f ——表面的摩擦阻力系数

R_e ——雷诺数， $R_e = Vd / \nu$

ν ——水的运动粘性系数

d ——管段迎流断面的水力直径

S ——管段的湿表面面积

V ——沉管在纵向或横向上与水流的相对速度

3. 总阻力

$$R_t = R_c + R_f \quad \dots(5)$$

4. 阻力系数的计算

控制管段在浮运过程中做匀速运动,则可以给出沉管在水平面上的受力分析,假设管段浮运过程受力如图 2 所示。

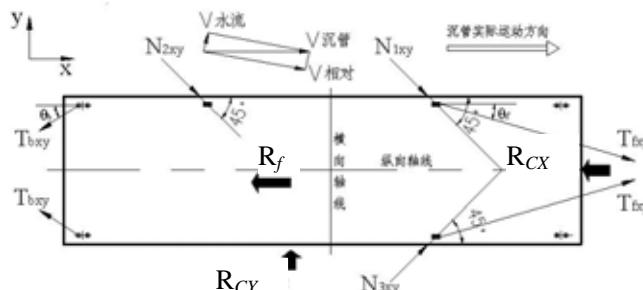


图 2 管段浮运水平面受力分析图

管段在拖运过程中,风流和浪流对其受力影响比较小,可以得到简化的力平衡方程(力矩平衡方程此处略去不列):

X 方向:

$$2T_{fxy} \cos \theta_f - R_{CX} - D - 2T_{box} \cos \theta_b = 0 \quad \dots(6)$$

y 方向:

$$N_{3xy} \sin \theta_3 + R_{CY} - N_{1xy} \sin \theta_1 - N_{2xy} \sin \theta_2 = 0 \quad \dots(7)$$

则可得纵向水流压差阻力:

$$R_{CX} = 2T_{fxy} \cos \theta_f - 2T_{box} \cos \theta_b - R_f \quad \dots(8)$$

横向水流压差阻力:

$$R_{CY} = N_{1xy} \sin \theta_1 + N_{2xy} \sin \theta_2 - N_{3xy} \sin \theta_3 \quad \dots(9)$$

其中,纵向摩擦力 R_f , 用公式(4)计算求出。

缆索拉力和拉力角 T_{fxy} 、 T_{box} 、 N_{1xy} 、 N_{2xy} 、 N_{3xy} 、 θ_f 、 θ_b 均由实测给出,故 R_{CX} 和 R_{CY} 均可求出。从而得到管段在浮运过程中的纵向阻力系数。

3 数值模拟

目前研究管段浮运的主要方法有模型试验(缩尺模型和准1:1模型)和数值模拟。水池缩尺模型试验难以准确给出水文条件和气象条件的相似参数,且不能穷尽实际工程中可能遇到的各种工况,因此,难以很好地符合实际工程。而在施工现场进行的准1:1模型试验虽然数据准确度非常高,但仅能获得实际施工过程的数据,不可能对多种条件进行试验,因此工况更少。而数值模拟可以弥补这些不足。

流体流动要受物理守恒定律的支配。在恒温、低速、不可压缩流动中，控制方程只涉及到质量守恒方程（连续性方程）和动量守恒方程（Navier-Stokes方程）^[6]。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots(10)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\eta \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \quad (i=1, 3) \quad \dots(11)$$

4 珠江隧道数值模拟试验

浮运工况选择 STAR-CCM+ 软件进行数值模拟试验。因为软件本身的功能复杂，尤其涉及到自由面的问题，应对计算模型的合理性进行充分的论证。通过对已有文献报道的模型试验进行数值模拟计算，并将计算结果与模型试验的测试数据相比较，验证数值模拟计算的适用性。

选择与目标工程洲头咀隧道相距不远、环境条件相近、同样采用沉管法建造的珠江隧道进行工程类比分析。珠江隧道是我国最早建成的沉管隧道，在建造过程中积累了大量的模型试验数据和工程施工技术资料。

4.1 水池试验的基本参数

珠江隧道的浮运模型试验^[7]，在原华南工学院（华南理工大学）船舶与海洋工程研究所进行。试验水池的长度为200m，宽度为6m。模型缩尺比为1/50，模型的具体尺寸为：长L=2.0m，宽B=0.674m，高H=0.156m。这可使试验中模型与实物几何相似而且模型与河床在相对深度与相对宽度两方面均能几何相似。

该模型试验的工况比较多，本文仅选择其中的6个工况进行数值模拟（见表1）。

表1 珠江隧道模型试验部分工况

水深 0.34m，沉深 0.136m，模型处于自由状态					
纵拖拖速 / (m/s)			横拖拖速 / (m/s)		
0.295	0.406	0.546	0.205	0.248	0.297

4.2 几何模型

参考有关文献^[8, 9]，计算域的选取为：

1. 沿管段拖运前进的方向延伸一个管段长度（2m），沿管段拖运前进的反方向延伸两个管段长度（4m）；
2. 纵拖时，与管段拖运方向垂直的方向上取3m宽；横拖时，取水池宽6m；
3. 铅垂剖面的几何尺寸按照模型试验的实际情况选取，水面上方取0.2m高度的计算域充满空气。

纵拖、横拖的几何模型分别如图 3、4 所示(图中的空心箭头代表管段拖运的前进方向,单位为 m)。

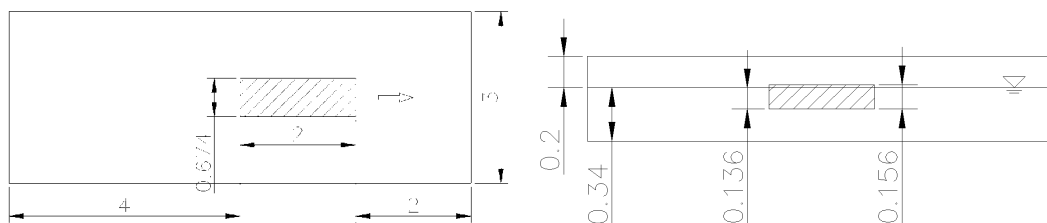


图 3 珠江隧道纵拖几何模型

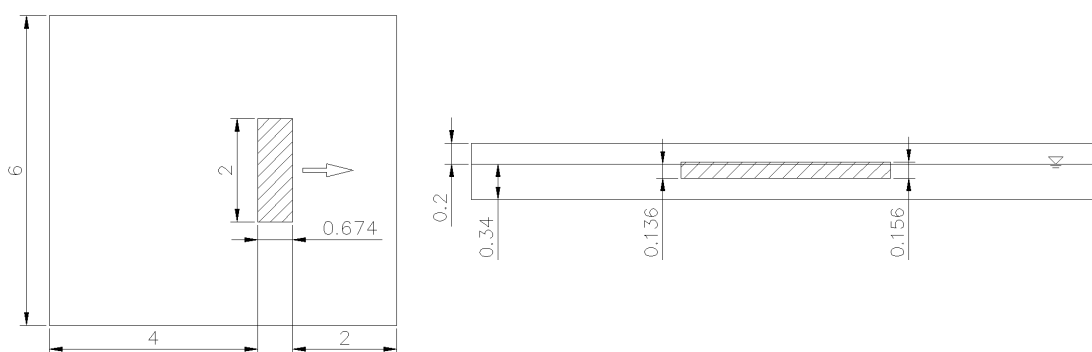


图 4 珠江隧道横拖几何模型

4.3 参数设置

计算模型的三个坐标方向如图 5、7 所示。

1. 网格

由于管段及计算域均为规则的长方体,故选用结构化网格。在管段面上进行了网格的加密;由于管段尾部有绕流,流场比较复杂,故将面 II 的网格进一步加密;边界层也相应调整。网格划分见图 5、7,部分参数见表 2。

表 2 珠江隧道数值模拟部分网格参数

拖拽方式	面网格尺寸			面网格总数	体网格总数
	计算域	管段面 I	管段面 II		
纵拖	0.078	0.039	0.02	281436	64013
横拖	0.06			700242	145441

注: 以-x方向为外法线方向的管段面为 II,其余的五个管段面为 I;

网格尺寸单位为 m。

2. 物理模型

结合实际工况，选用 6-DOF Motion、VOF (Volume of Fluid)、紊流等。

因为实际工况中，管段为六自由度的运动体，故选用 6-DOF Motion。

因为涉及到自由水面、风、浪等自然条件，故选用 VOF。在该模块中，定义水面的位置，使管段的干舷为 0.02m（如图 6、8 所示）。实际工况为管段以一定拖速 v （见表 1）在静水中沿 x 方向前进，由于软件该版本暂无动网格功能，故采用相对运动：假设管段不动，水流以速度 v 沿 $-x$ 方向流动。由于拖速较低，干舷较小，故不考虑风的影响。

计算得这几个工况均为紊流，纵拖选用通用的 $k-\epsilon$ 湍流模型，默认湍流强度 0.01，湍流粘性率 10；横拖选用文献^[9]推荐的 $k-\epsilon$ 湍流模型，湍流强度 0.03，湍流粘性率 20。

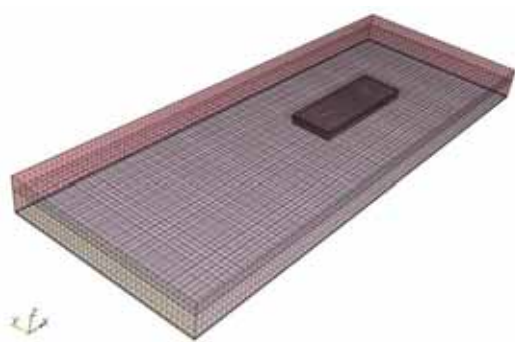


图 5 珠江隧道纵拖—网格划分

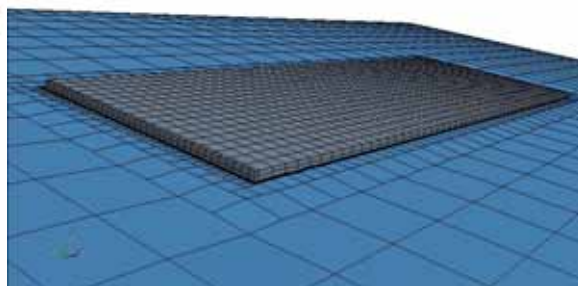


图 6 珠江隧道纵拖—水面

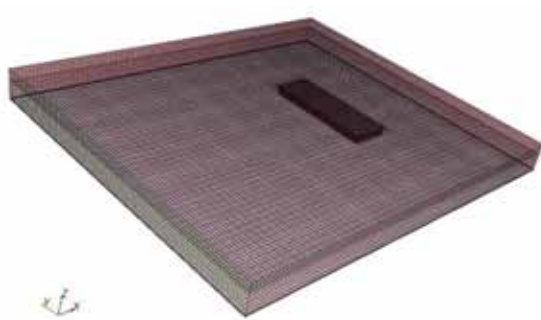


图 7 珠江隧道横拖—网格划分

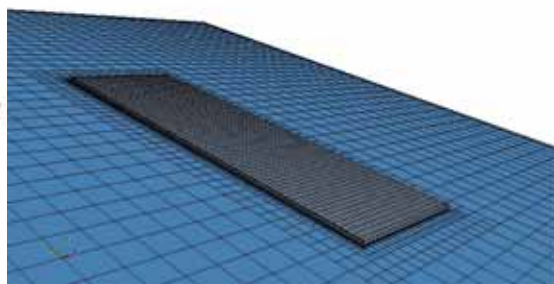


图 8 珠江隧道横拖—水面

3. 边界条件

入口为速度入口，调用软件根据 VOF Wave 自动生成的速度函数“Velocity of Vof Wave 0”；

出口为压力出口，调用软件根据 VOF Wave 自动生成的压力函数“Hydrostatic Pressure of Wave”；

水池底部、管段本身的边界条件采用默认的 Wall。

4. 迭代设置

时间步长为 0.001s，最大内迭代步数为 10，精度为 0.001（即残差稳定在 0.001 及以

下时，便停止运算)。

5. 目标物理量

在 Report 中，添加本文所关心的 x 方向的总阻力系数 C_x 和总阻力 F_x ，并监控它们随迭代的变化情况。

4.4 计算结果

计算完成后，过管段的形心做一个以 y 轴为法线的切面。分别得出 6 个工况的切面上的压强、速度分布， C_x 、 F_x 随迭代变化情况的曲线图。由于篇幅有限，仅列出横拖拖速 0.297 m/s 的计算结果图，如图 9~12。

6 个工况的 C_x 、 F_x 数值模拟计算结果见表 3。

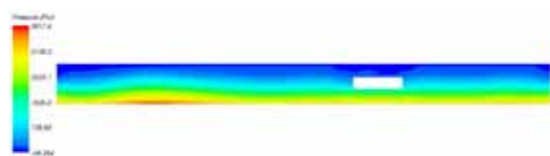


图 9 横拖拖速 0.297 m/s—P 分布图



图 10 横拖拖速 0.297 m/s— V_x 分布图

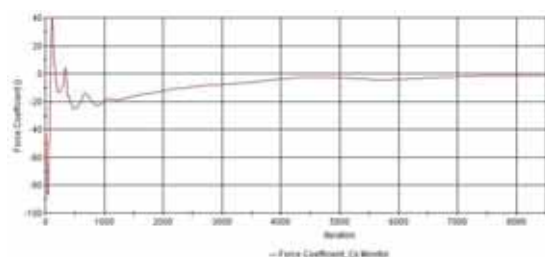


图 11 横拖拖速 0.297 m/s— C_x 曲线

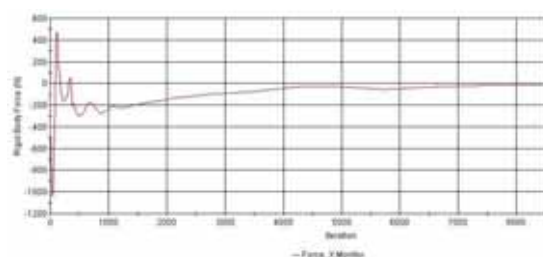


图 12 横拖拖速 0.297 m/s— F_x 曲线

表 3 珠江隧道 6 个工况的数值模拟试验结果

纵拖 (k-)			横拖 (k-)		
拖速/(m/s)	阻力/N	阻力系数	拖速/(m/s)	阻力/N	阻力系数
0.295	3.89	0.98	0.205	8.04	1.41
0.406	10.47	1.38	0.248	13.91	1.45
0.546	21.38	1.56	0.297	19.50	1.63

4.5 对比分析

珠江隧道模型试验中，对应的 6 个工况的试验结果，相关文献^[7]已给出（见表 4）。将表 3、4 的数据，拟合成曲线进行更加直观地对比，如图 13~16 所示。

表 4 珠江隧道 6 个工况的模型试验结果

纵拖			横拖		
拖速/(m/s)	阻力/N	阻力系数	拖速/(m/s)	阻力/N	阻力系数
0.295	3.92	0.98	0.205	7.16	1.25
0.406	7.85	1.03	0.248	10.98	1.31
0.546	17.45	1.28	0.297	19.60	1.63

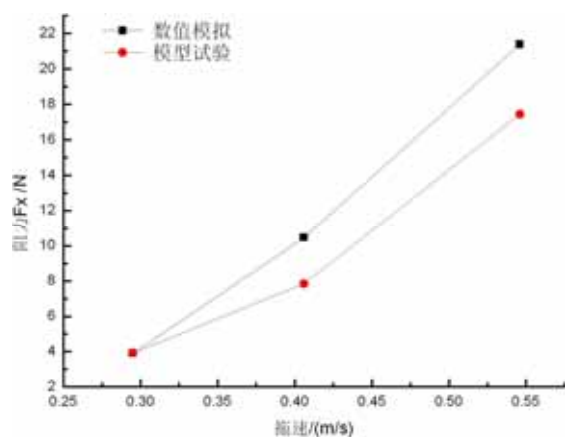


图 13 纵拖 Fx-V 曲线

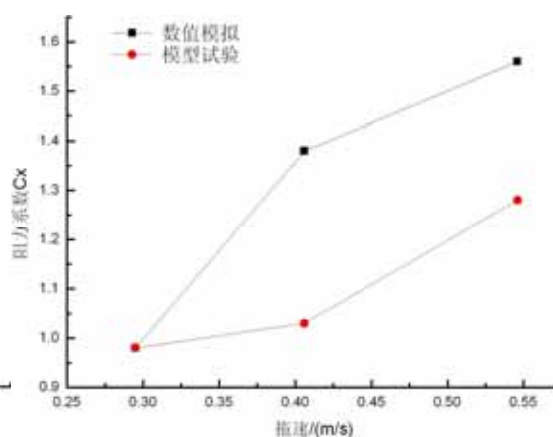


图 14 纵拖 Cx-V 曲线

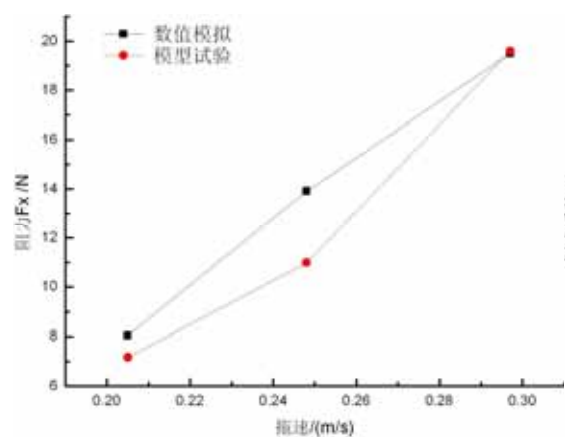


图 15 横拖 Fx-V 曲线

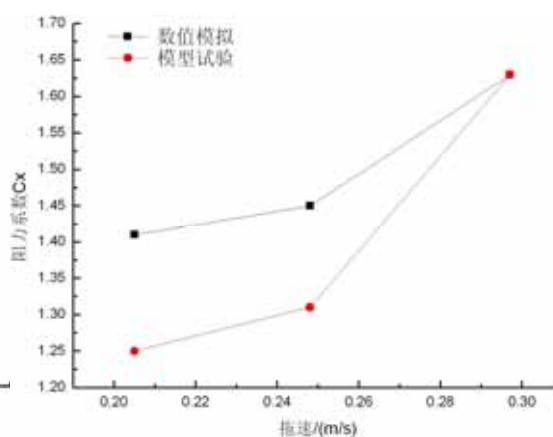


图 16 横拖 Cx-V 曲线

5 结论

通过以上对比分析,我们可以看到,本数值模拟计算模型,具有一定的准确性。在这 6 个工况中, $k-\epsilon$ 湍流模型比 $k-\omega$ 湍流模型能更快更好地达到精度要求;一定范围内,将网格细化能提高计算的准确性;将湍流强度和粘性率适当提高,能使残差曲线收敛较好。应该进行更多的数值模拟试验,并利用动网格的功能模拟绝对运动,进一步提高计算模型的准确性。

6 参考文献

- [1] 管敏鑫. 沉管隧道在越江工程中的地位以及有关的新认识[J]. 现代隧道技术. 2004. 41(1). 1~2
- [2] Jan Saveur, Walter C. G-rantz. Structural Design of Immersed Tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology. 1993. 8(2). 123~133
- [3] 詹德新, 张乐文等. 大型管节水面浮运及沉放数值模拟和可视化实现[J]. 武汉理工大学学报. 2001. 25(1). 16~20
- [4] 吴秀恒, 张乐文等. 船舶操纵性与耐波性[M]. 北京. 人民交通出版社. 1988
- [5] 高卫平. 沉管隧道浮运与沉放阶段受力性态研究[学位论文]. 同济大学硕士学位论文. 2004
- [6] 张也影. 流体力学[M]. 第二版. 北京. 高等教育出版社. 1999. 143~148, 161~162
- [7] 陈韶章. 沉管隧道设计与施工[M]. 北京. 人民交通出版社. 2002
- [8] 马健, 高高. 基于 NURBS 高阶面元法的浅水船舶兴波阻力计算[J]. 武汉理工大学学报. 2006. 30(3). 444~447
- [9] 张志荣, 赵峰等. k- 湍流模式在船舶粘性流场计算中的应用[J]. 船舶力学. 2003. 7(1). 33~37