悬跨海管外部流场的数值模拟*

李磊　林缅

(中国科学院力学研究所，北京，100190)

摘要： 本研究采用三维大涡数值模拟的方法建立了计算悬跨海管外部流场的数值模型，计算有底床存在情况、不同间隙比时悬跨海管附近的外部流场．通过与前人的研究结果比较表明，该模型能够更好地模拟悬跨海管的水动力环境，为分析底床对悬跨海管受到的水动力载荷的影响奠定基础。

关键词： 底床；　悬跨海管；　大涡模拟；　流场

1　引言

海管是海洋油气开采、运输系统中的重要组成部分，海管的安全是工程师们历来关注的问题。由于海底底床崎岖不平或海流的冲刷作用而出现悬跨的海管，在涡脱落带来的脉动水动力载荷作用下可能导致的涡激振动现象是海管安全的最大威胁。现行海管设计规范和最近的相关研究中，对于水动力载荷的处理方式大多为“水动力系数法”，即将无底床圆柱绕流实验中测得水动力系数代入海管振动方程的外激励项中计算。

然而，与其他海洋工程结构不同，底床对海管受到的水动力载荷有很大影响（Zdravkovich[1]，Buresti[2]）。目前基于实验研究的水动力系数法并不能描述实际中具有一定形貌的底床对海管水动力载荷分布的影响；数值模拟方面有关海管水动力载荷的研究也仅限于二维情况(C. Lei 2000[3])。

本研究拟采用三维大涡数值模拟方法建立能够计算存在底床的悬跨海管外部流场的数值模型。计算了两种不同间隙比下的流场情况。

2　数值方法和模型

2.1　控制方程和差分格式

采用动态 Smagorensky 亚格子模式，将三维不可压缩流体 Navier-Stokes 方程和连续性方程作滤波运算后，可解尺度量的控制方程为：

*中国科学院知识创新工程重要方向项目（项目编号 KZCX2-YW-212-2）资助

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t}+u_j\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}=-\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i}+(\upsilon+\upsilon_t)\bullet\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i}=0$$

其中，u_i 为 i 方向的速度分量，p 为压力，下标 i、j 表示坐标轴方向，$i,j=1,2,3$，上划线表示可解尺度运动分量。

Smagorinsky 模式中定义涡黏系数 υ_t：

$$\upsilon_t=(C_s\Delta)^2\sqrt{2\overline{S}_{ij}\overline{S}_{ij}}$$

其中，C_s 为 Smagorinsky 常数，采用 Germano 等式来确定(张兆顺等 2008[4])，Δ 为滤波带宽，一般取最小网格尺寸，$\overline{S}_{ij}=0.5\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)$ 为可解尺度的应变率张量。

时间项采用二阶隐式向后差分，对流项采用二阶非耦合线性差分，耗散项采用二阶非耦合守恒差分。

2.2 网格划分和初、边值条件

根据现有的平底床圆柱绕流实验数据确定算例的间隙比为 0.1 和 0.3，雷诺数 $Re=0.86\times10^5$。为得到流动的三维效应，网格的设计需考虑流动中剪切层分离和流向涡结构尺寸。圆柱近尾迹区流向结构的展向波长 λ_z 可由经验关系（Kravchenko，2000[5]）得到

$$\lambda_z/D\sim25Re^{-0.5}$$

由此可估算出圆柱下游尾迹大尺度脉动的展向波长约为 $\lambda_z/D\approx0.2$，可以确定计算域的展向长度为 $L_z/D=0.6$。

网格单元类型为结构型六面体网格，近圆柱区域三个方向的网格分辨力见表 1。

表 1 近圆柱区网格分辨力和网格总数目

算例	e/D	x	y	z	网格总数目
1	0.1	222	134	10	188, 080
2	0.3	214	122	10	194, 400

计算域左半柱面和顶面为速度入口，右面为压力出口，圆柱和下底面为壁面条件，两侧面为对称边界条件。初值给定来流速度和压强。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

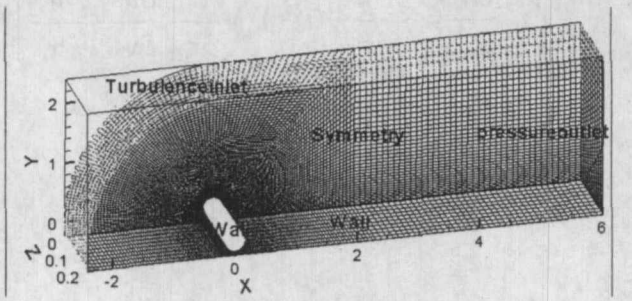

图 1a 求解域网格划分情况

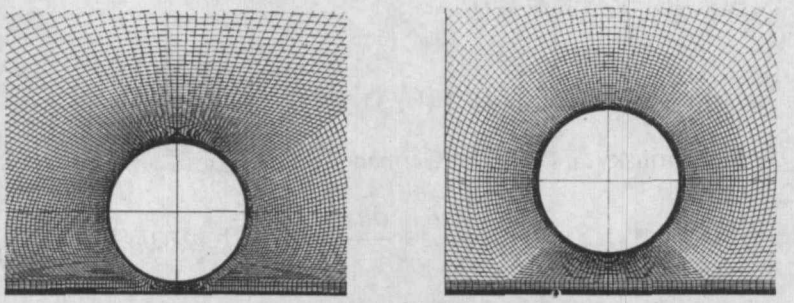

图 1b 算例 1 和 2 的圆柱和近底床区域网格正视放大图

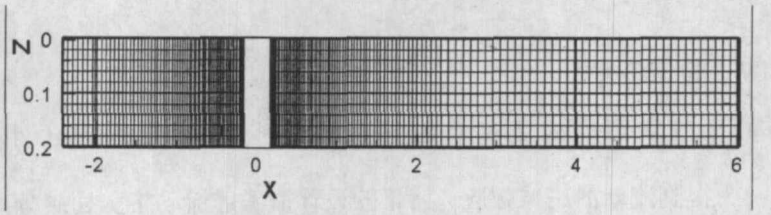

图 1c 圆柱和近底床区域网格俯视放大图

3 计算结果

当间隙比 e/D=0.1 时，计算得到的 z=0 截面处的涡量等值线图、并与 C. Lei 的二维计算结果对比见图 2：

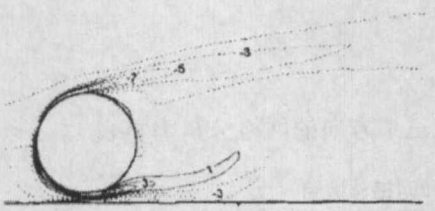

图 2a e/D=0.1 时 C. Lei 的计算结果

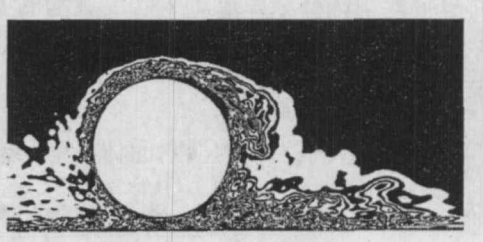

图 2b e/D=0.1 时本模型计算结果

图 2 中可以看出，本模型计算结果比起二维模型，能够在圆柱的近壁和近底床处计算出更为复杂、细致的涡结构，包括间隙内的强剪切涡带、圆柱上脱落的湍流涡街、下游底床上的分离涡、以及这几种涡的相互诱导作用和掺混运动。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

当 e/D=0.3 时，计算得到的某一时刻 x、y、z 方向三个速度分量的等值面见图 3。从中可以看出流体运动在三个方向上发生明显的掺混，体现出显著的大尺度湍流特征。

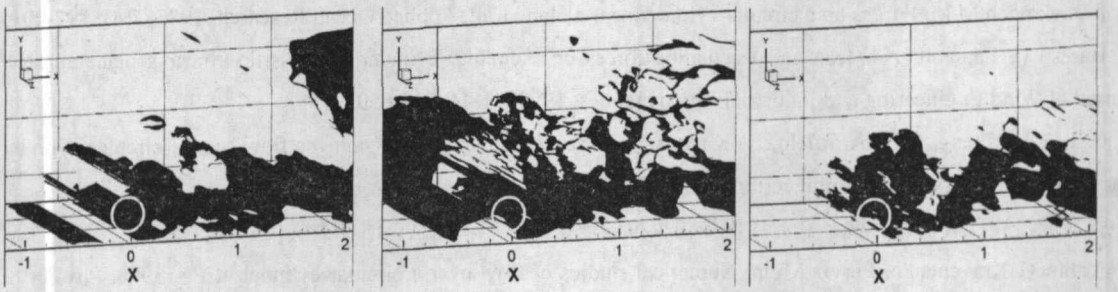

图 3 x、y、z 方向三个速度分量的等值面图

图 4 和图 5 为不同展向位置的横截面上的涡量等值云图和 Kravchenko 的无底床圆柱绕流计算结果。

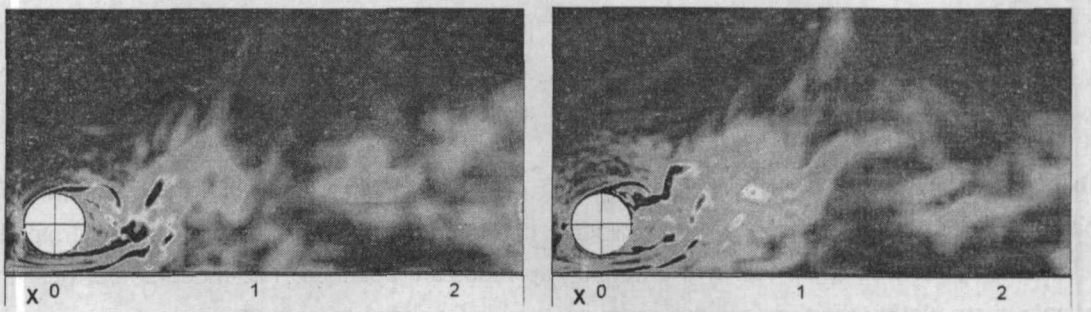

图 4a z=0 和 z=0.2 截面上的涡量图

图 5b Kravchenko 的无底床圆柱绕流涡量图

两者对比发现，本模型得到了分辨程度与 Kravchenko 类似的涡流场，从中看出本模型能够计算出海管展向涡结构的三维效应。定性地验证了模型的准确度。

4 结论

本研究建立了能够计算存在底床影响悬跨海管外部流场的三维大涡数值模拟模型，得到了不同间隙比时海管和近底床附近丰富的湍流场信息。为下一步流场分析和模拟真实环境中的海管水动力载荷分布、修正“水动力系数法”奠定基础。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参 考 文 献

1 Zdravkovich M M. Forces on a circular cylinder near a plane wall. Applied Ocean Research. 1985, 7(4): 197-201.

2 Buresti G, Lanciotti A. Mean and fluctuating forces on a circular cylinder in cross-flow near a plane surface. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992: 41-44, 639-650.

3 C. Lei, L. Cheng, S.W. Armfield, K. Kavanagh, Vortex shedding suppression for flow over a circular cylinder near a plane boundary. Ocean Engineering. 2000, 27: 1109-1127.

4 张兆顺，崔桂香，许春晓。湍流大涡数值模拟的理论和应用。北京：清华大学出版社，2008。

5 Arthur G. Kravchenko, Parviz Moin, Numerical studies of flow over a circular cylinder at *Re*=3900, Physics of Fluids, 2000, 12(2): 403-417.

Numerical simulation of flow around a free spanning pipeline

LI Lei LIN Mian

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: A numerical model is established to calculate the external flow field around a free spanning pipeline using three dimensional large eddy simulation in this paper. The external flow fields outside the free span with two different gap ratios are obtained. The model is verified more delicate in simulating the dynamic environment outside free span by comparing the former research results. The foundation is laid for analyzing the influence of seabed to dynamic loads on free span.

Key words: seabed, free span, large eddy simulation, flow field

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net