

Numerical Simulation Study on Wind Resistance Characteristics for Spar Platform

Wenjun Shen

Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry Communications, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin
Email: bettyshen1984@126.com

Received: May 22nd, 2017; accepted: Jun. 5th, 2017; published: Jun. 8th, 2017

Abstract

Based on Navier-Stokes equation, CFD software is used in the numerical wind tunnel simulation of the upper Spar platform module by three dimensional static implicit methods. The second order upwind scheme is used to discretize the governing equations, and SIMPLE algorithm is used in pressure and speed coupling. The wind loads are obtained under different direction and velocities. Finally, comparison is made between numerical results and empirical formula.

Keywords

Wind Loads, CFD, Spar Platform, Numerical Wind Tunnel

Spar平台抗风特性数值模拟研究

沈文君

交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津
Email: bettyshen1984@126.com

收稿日期: 2017年5月22日; 录用日期: 2017年6月5日; 发布日期: 2017年6月8日

摘要

本文基于Navier-Stokes方程, 采用CFD仿真分析软件对Spar平台上部模块的外流场进行了数值风洞模拟。选用三维稳态隐式解法, 通过二阶迎风格式对控制方程进行离散, 压力和速度耦合采用SIMPLE算法, 针对不同风向和不同风速的工况组合, 得到了Spar平台整体所受的风载荷, 并与采用经验公式计算该平台的风载荷进行了对比分析。

关键词

风载荷, CFD, Spar平台, 数值风洞

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

Spar 平台是一种移动式平台, 凭借其优良的性能和相对较低的造价, 已经成为世界深海油气开采生产、处理加工和储存的主力平台类型之一[1] [2]。目前已经进行采油作业的 Spar 平台, 一般可以分为四部分: 上部、主体、系泊系统和生产立管系统, 2~4 层的矩形甲板结构组成了 Spar 平台的上部部分, 上部结构主要进行钻探以及油井维修等作业, 中间位置为井口, 见图 1 所示。在上部模块中, 包括生活区、油气处理装置以及直升机甲板等, 并可以根据开采作业的要求, 将钻塔安装在顶层甲板上, 以进行石油的钻探、完井以及修井作业。

目前国内外研究海洋平台风载荷的常用方法主要有现场观测、数值模拟[3] [4] [5] [6]和风洞实验。对于海洋平台的风载荷, 工程界一般采用规范中的经验公式来进行计算, 比如《CCS 海上移动平台入级规范-2012》[7]中第 2 章第 2 节, 对风载荷的计算公式进行了详细说明。但规范在计算风载荷时采用面积投影法, 构件形状系数和高度系数采取经验值, 不考虑各构件之间的遮蔽效应和加速效应, 因此计算结果比实际值偏大。对于复杂模型的风载荷则主要采用风洞试验来测算风阻力的合力, 然而风洞试验的成本高、周期长。而随着大容量、高速度计算机的普及以及计算流体动力学的发展, 三维粘性流动数值模拟方法逐渐成为风载荷计算的重要辅助手段, 因此本文采用基于 Navier-Stokes 方程的数值模拟方法, 对某 Spar 平台的抗风特性进行研究。



Figure 1. The diagram of Truss spar

图 1. Truss spar 平台示意图

2. 数值计算方法

2.1. 控制方程与湍流模型

由于平台各局部构件均为钝体。钝体绕流问题的控制方程为粘性不可压 N-S 方程，基于雷诺平均的控制方程为：

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j' \phi'} \right) + S \quad (3)$$

其中， ρ 为空气密度， $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ； μ 为动力粘性系数， $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

湍流模型中常用的模型之一为标准的 $k-\varepsilon$ 两方程模型，标准 $k-\varepsilon$ 模型是在湍流模型中的一方程模型的基础上，通过引入关于湍流耗散率 ε 的方程后得到的。该模型是目前最广泛使用的湍流模型。通过推导 k 方程和 ε 方程可分别写成如下形式[8]：

$$\frac{\partial(kU_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

其中， $\nu_t = c'_\mu k^{0.5} l = (c'_\mu \cdot c_D) \cdot k^2 \cdot \frac{l}{c_D k^{1.5}} = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ，且经验系数取值为， $c_\mu = 0.09$ ， $c_1 = 1.44$ ， $c_2 = 1.92$ ，

$\sigma_1 = 1.0$ ， $\sigma_2 = 1.3$ ； P_k 为湍流动能生成项。 $k-\varepsilon$ 两方程模型由于考虑了湍流脉动速度的输运和湍流脉动长度的输运，更符合实际情况，因此得到了广泛的应用。

2.2. 计算工况的选取

本文根据《CCS 海上移动平台入级规范-2012》规范，选取了自存工况(51.5 m/s)和正常作业工况(36 m/s)对应的风速值，同时又增加了 20.8 m/s 和 41 m/s 的风速两种工况，见表 1。

风向根据如下图 2 定义，分别采用 FLUENT 软件和规范计算了不同风向角度作用下的风载荷。

3. 有限元模型的建立

3.1. 几何模型建立

采用 Design Modeler(DM)模块建立了海洋平台的几何模型，实际平台上的结构繁多，在数值模型中进行了适当的简化，略去了细小结构以及对气动力与水动力影响不大的构件，简化结果如图 3 所示，其中主要包括 Spar 平台主体部分的水上结构、中间双层甲板、上层甲板上的建筑群、生活楼、直升机平台、起重机以及工作吊车等。

外流场的尺寸选取不易过小，如果流场边界与平台外表面距离太近，将会导致局部流场扰动较大。经过多次试算，本计算所选取的流体计算域尺寸为 $2000 \text{ m} \times 500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ ，将几何模型进行切分 Slice，以便生成可扫略的体，从而易于生成六面体网格。

Table 1. Calculation conditions
表 1. 计算工况

	自存工况	作业工况 1	作业工况 2	补充工况
风速(m/s)	51.5	36	20.8	41

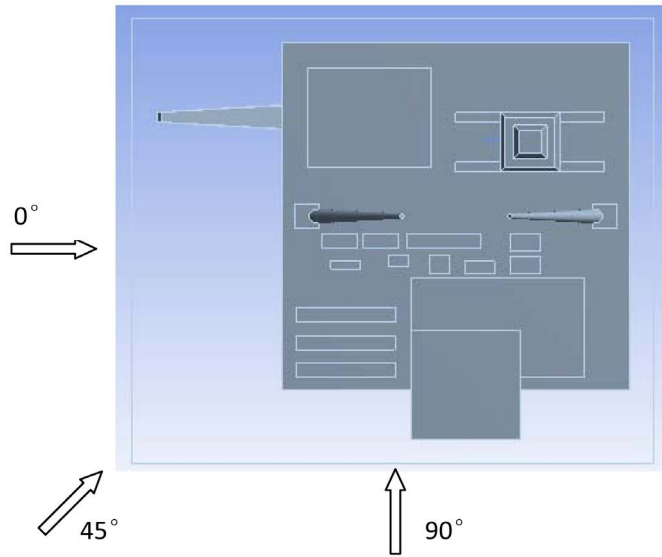


Figure 2. The diagram of wind angle
图 2. 风向角度示意图

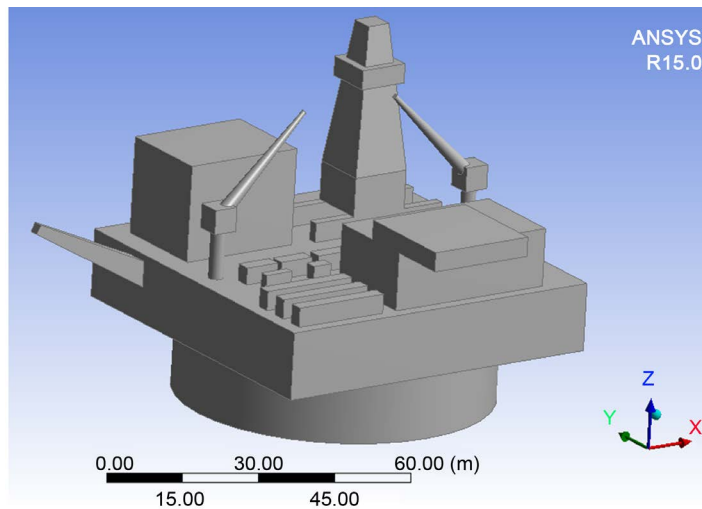


Figure 3. The geometric model of topside for Spar platform
图 3. 海洋平台上部模块几何模型

利用 ANSYS Meshing 模块对海洋平台外流场进行网格划分。首先对于外部的可扫略体，采用 Sweep 方法生成六面体网格，单元尺寸设置为 6 m；中间计算域形状复杂，为不可扫略体，因此采用四面体单元填充，单元尺寸设置为 2 m，且指定内部各面为流体边界层，边界层最大设置为 5 层。从内部到外部的区域设置过渡区域，大小为长度 500 m，宽度 300 m，高度 200 m，网格尺寸设置为 2~4 m。生成的网格如图 4 所示。

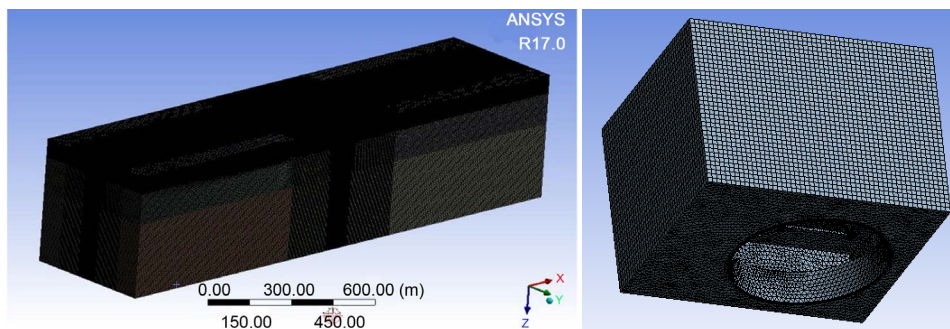


Figure 4. The mesh model

图 4. 网格模型

总单元数 1300 万，网格平均畸变度[1]为 0.136；说明网格质量非常高。备注[1]：ANSYS 单元畸变度为 0~1 之间的数值，0 表示完美的单元质量；1 表示糟糕的单元质量。

3.2. 求解方法及边界条件的设定

求解方法：由于该结构的风载荷受力主要来源于压差阻力，摩擦阻力所占比重较小，在这种前提下，而不同湍流模型计算精度的差别就在于边界层的模拟，而边界层主要影响摩擦阻力，因此不同湍流模型对结果的影响不大。

所以在本次计算中，风载荷的计算采用三维稳态隐式解法，离散方法为二阶迎风格式，压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法，选用 Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型；

定义边界条件：1) 流场入口选择速度入口，采用 UDF (User Defined Function) 定义速度函数；这里采用 API 风谱经验公式，速度为高度分布的函数：

$$V = V_0 \left(\frac{Z}{10} \right)^{0.125}$$

- 2) 出流面采用压力出口边界条件，设置出口表总压为 0。
- 3) 流域顶部和两侧采用对称边界条件，等价于自由滑移的界面。
- 4) 建筑物表面采用无滑移的壁面条件。

4. 数值结果分析

将入口条件作为初始条件进行初始化，迭代步设置为 3000 步进行求解计算。通过 CFD-POST 进行后处理，得到了海洋平台外流场的流线图，如图 5 所示，以及风压分布图(如图 6 所示)，针对某一剖面给出了 0° 和 90° 风作用下的风压分布图，见图 7。

由于各个结构之间存在干扰作用，使得流场和压力场产生变化，导致结构受风面压力分布不同。从图 6 和图 7 可知，由于风的直接撞击作用，迎风面压力数值较大，背风面较大区域压力为负值，“遮蔽”效应明显。同时可以看出，在直接受风面上压力较大，比如平台的底部圆柱面、甲板侧面以及上层建筑的受风面等。图 8 给出了载自存工况条件下分别通过数值模拟方法和经验公式获得的 Spar 平台在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 入射风向角时平台上部结构所受的风载荷，图 9 为计算工况下不同风向角作用时的风载荷。

从图中可以看出，两种方法所得的结果趋势类似，当入射风向角为 45° 时，Spar 平台的风载荷达到最大值。数值计算的结果比经验公式的结果偏小，可能是由于遮蔽效应会降低作用在下风构件上的风压，从而使整体风载荷有所降低；而经验公式未考虑遮蔽效应的影响，对风载荷进行了偏保守估计。经统计分析，数值计算的风载荷比经验公式所得的风载荷偏小 14%~26%。其中 90° 风向角时，二者的偏差最大，

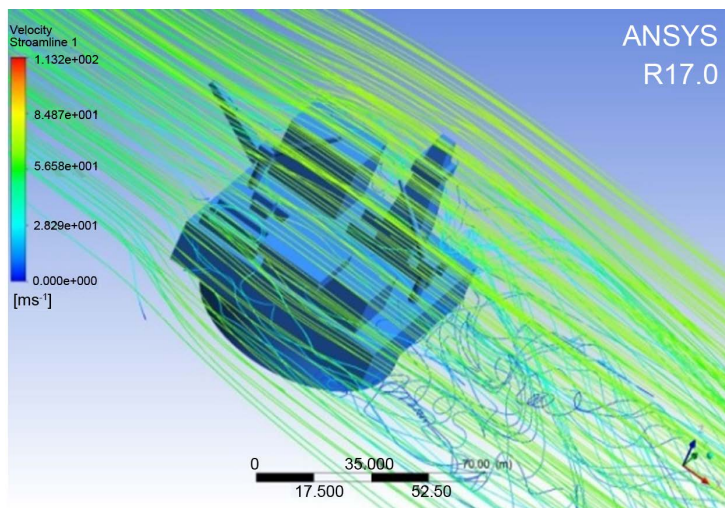


Figure 5. The flow chart for outflow field of Spar platform (Survive condition direction 0°)

图 5. 平台外流场流线图(自存风向 0°)

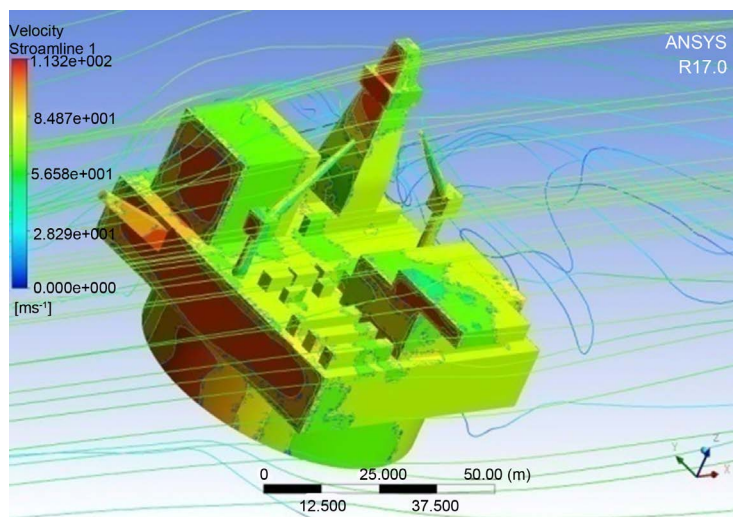


Figure 6. The wind pressure-distributing map (Survive condition direction 0°)

图 6. 平台表面压力云图(自存风向 0°)

从图 2 和图 3 也可以看出，这与上层甲板上的建筑群、生活楼以及直升机平台的布置相关。同时，从图 9 可以看出，由于非线性原因，不同风速下的载荷并不是与风速的平方呈线性关系，但各个计算工况下均是 45° 对应的风载荷最大。

5. 结论

1) 从表中数据可看出，在不同的入射风向角时，规范计算结果都要比数值模拟结果偏大，这是由于规范计算时没有建筑物之间的遮蔽效应，导致结果偏于保守。

2) 数值模拟计算结果和规范计算结果表明，两种方法计算的平台风载荷均在 45° 风向入射角时达到最大值，不同风向角时风载荷的变化趋势大体相同。

3) 由于非线性原因，不同风速下的载荷并不是与风速的平方呈线性关系，但各个计算工况下均是 45°

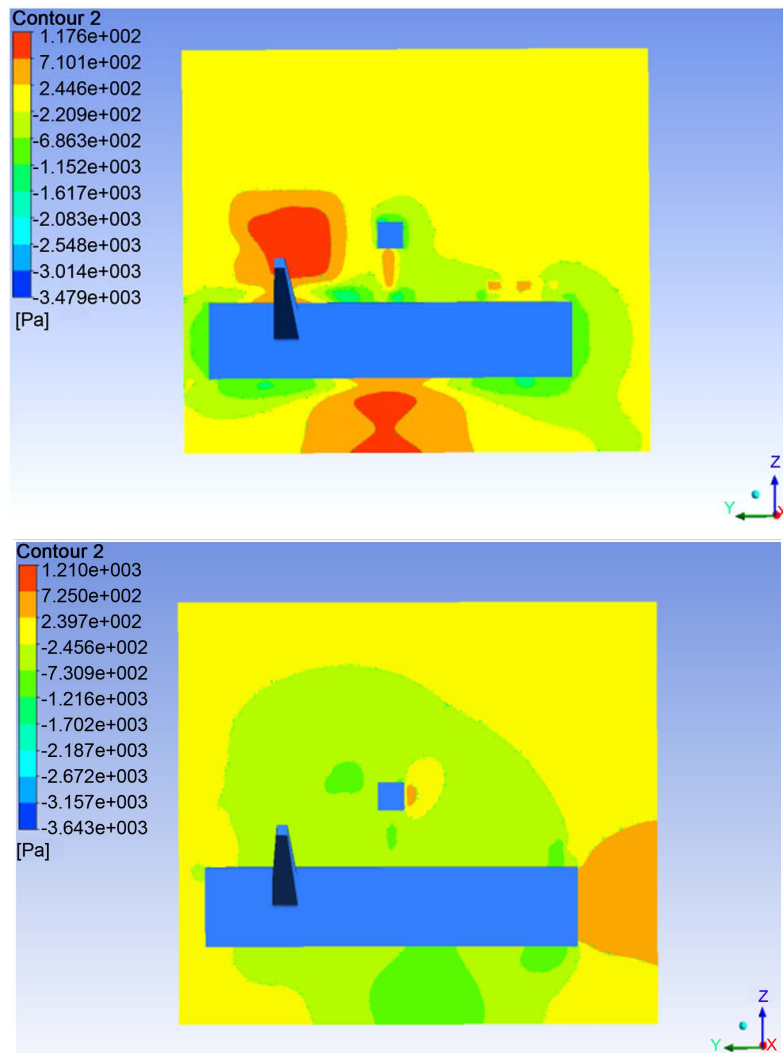


Figure 7. The comparison of wind pressure-distributing map (0° and 90°)
 图 7. 0°和 90°风作用下的压力分布对比图

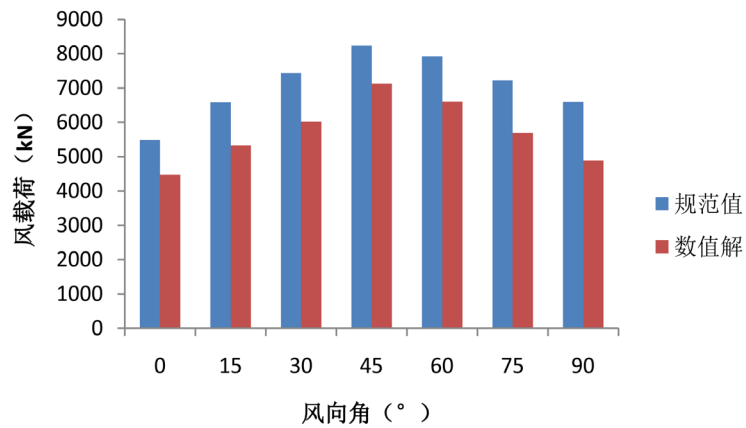


Figure 8. Wind loads under the action of different wind angle for survive condition
 图 8. 自存工况下不同风向角时平台所受的风载荷

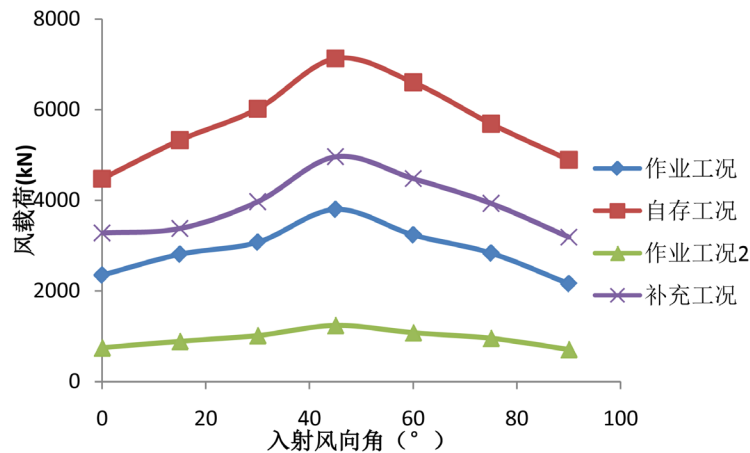


Figure 9. Wind loads under the action of different wind angle for all calculation conditions

图9. 所有计算工况下不同风向角时平台所受的风载荷

对应的风载荷最大。

4) 通过数值风洞所得的风载荷与规范值相比, 降低幅度在 14%~26%之间, 该平台未做风洞物理模型试验, 但与其他平台的风洞物理模型试验相比, 降低幅度接近[2] [6], 该计算结果可为 Spar 平台的风载荷研究提供参考依据。

基金项目

国家自然科学基金青年基金项目(51309127)。

参考文献 (References)

- [1] 杨雄文, 樊洪海. Spar 平台结构型式及总体性能分析[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(5): 32-35.
- [2] 石红珊, 柳存根. Spar 平台及其总体设计中的考虑[J]. 中国海洋平台, 2007, 22(2): 1-4.
- [3] 朱航, 马哲, 翟钢军, 谢彬, 付英军, 欧进萍. HYSY-981 半潜式平台风载荷数值模拟与风洞实验[J]. 船海工程, 2009, 38(5): 149-152.
- [4] 黄滢. 基于 Fluent 软件的建筑物风场数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [5] 时军. 海洋平台上的风载荷计算研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [6] 林一, 胡安康, 熊飞. 自升式平台风载荷数值模拟与实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2012, 27(2): 208-214.
- [7] 中国船级社. 海上移动平台入级规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [8] 王瑞金, 张凯, 王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.