

离心泵叶轮内二维 PIV 非定常流动测量*

杨 华¹ 汤方平¹ 刘 超² 周济人² 徐浩然¹

(1. 扬州大学能源与动力工程学院, 扬州 225127; 2. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009)

【摘要】 采用二维 PIV 对离心泵蜗舌附近旋转叶轮内的流场进行了测量, 获得了 5 个不同相位的二维相对速度场。结果显示: 在流量 $Q/Q_{\text{bep}} = 0.52$ 时, 叶轮内压力面存在逆时针方向的回流, 叶片在靠近蜗舌时, 吸力面存在顺时针方向的回流。在流量 $Q/Q_{\text{bep}} = 1.0$ 时, 叶轮出口存在射流/尾迹现象。研究表明: 小流量工况下, 蜗舌对叶轮内的相对速度场有显著影响, 而在最优工况下影响较弱。

关键词: 离心泵 叶轮 PIV 测量 非定常

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)07-0056-05

2-D PIV Measurements of Unsteady Flow Field inside the Rotating Impeller of Centrifugal Pump

Yang Hua¹ Tang Fangping¹ Liu Chao² Zhou Jiren² Xu Haoran¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China

2. College of Water Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract

The flow fields in a rotating impeller, near the volute tongue of a centrifugal pump, were measured by the 2-D PIV technique. At the flow rate of $Q/Q_{\text{bep}} = 0.52$, a counter clockwise recirculation flow existed on the blade pressure-side, when the blade was close to the volute tongue, a clockwise recirculation flow occurred on the blade suction-side. At the flow rate of $Q/Q_{\text{bep}} = 1.0$, a jet/wake flow existed at the exit of the impeller. The results show that the effects of the volute tongue on the relative velocity distribution are more significant at the low flow rate condition than at the best efficiency point.

Key words Centrifugal pump, Impeller, PIV measurements, Unsteady

引言

离心泵叶轮内的流场具有典型的非定常性。首先叶轮与蜗壳的动静干涉将产生粘性流动响应的非定常流动; 其次, 粘性流体的边界层在离心力、科氏力等力的作用下, 会发生转捩、流动分离和旋涡脱落等现象, 形成了由流动自身决定的非定常性。

激光多普勒仪(LDV)作为一种单点流场测量工具, 曾广泛应用于离心泵内部流动测量研究^[1~4]。由于离心泵旋转叶轮内的流动具有复杂的非定常性, 传统的单点测量难以反映叶轮内旋涡的结构与

特征。粒子图像速度场仪(PIV)作为一种场的测量工具, 在定性、定量地研究旋转叶轮内大尺度湍流结构方面具有独特的优势。Akin 和 Rockwell 采用 PIV 详细研究了径流泵内尾迹结构、涡量场以及流动的分离与再附现象^[5]。Shepherd 等对离心泵和轴流风机的内部流场和涡量场进行了测量研究^[6]。Wuibaut G 等对离心泵叶轮出口和无叶扩压器内的流场进行了二维 PIV 测量分析^[7]。文献[8]对离心泵进行改型设计, 运用二维 PIV 获得了离心泵全叶槽内的流场, 本文将利用该装置, 着重研究叶轮与蜗壳处于不同相对位置时, 叶轮内的相对速度场分布。

收稿日期: 2010-09-27 修回日期: 2010-11-26

* 国家自然科学基金资助项目(50706041)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2007558)和江苏省高校自然科学基金资助项目(07KJB570130)

作者简介: 杨华, 副教授, 博士, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: yzdx_yh@163.com

1 试验与测试装置

1.1 试验装置和模型泵

试验在江苏省水利动力工程重点实验室透明离心泵试验台上完成的,试验装置如图 1 所示。为了便于照相机拍摄叶轮内部的全部流动,叶轮和蜗壳均为机玻璃材料,其余为不锈钢,水泵轴设置在进水侧。试验时通过变频器对电动机进行无级调速。扬程、流量、转矩、转速分别采用差压变送器、涡轮流量计、转矩转速仪进行测量。模型泵叶轮如图 2 所示,共有 5 张单圆弧圆柱形叶片,进口宽度 13.7 mm,出口宽度 8 mm,比转数约为 93。

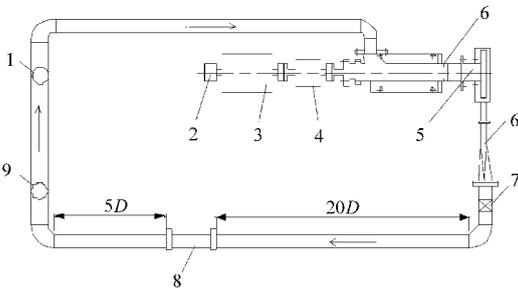


图 1 水泵试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of pump test

- 1. 进水管 2. 编码器 3. 电动机 4. 扭矩仪 5. 水泵 6. 测压孔 7. 闸阀 8. 涡轮流量计 9. 排水管

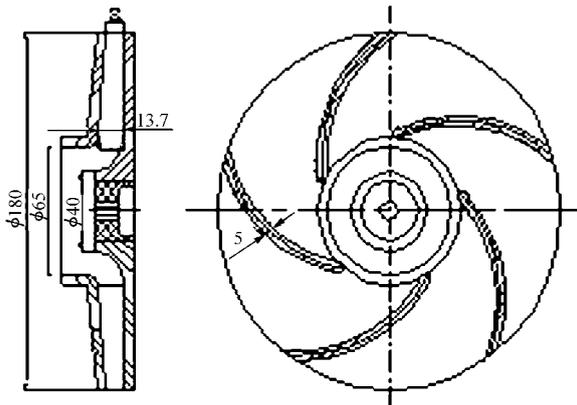


图 2 模型泵叶轮结构图

Fig. 2 Centrifugal pump impeller

1.2 PIV 测试系统

本文所采用的流场测试仪器是美国 TSI 生产的立体 PIV 系统,其组成如图 3 所示。其中编码器固定在电动机的轴端,每转一周编码器发出一个脉冲信号触发同步器,然后同步器将激光器和摄像机匹配工作。激光器和摄像机的工作方式、脉冲的延迟时间与双脉冲的时间间隔等可以通过软件进行设置。为了减小有机玻璃反光所产生的噪声干扰,将叶片及蜗壳反光强烈的非测试区域进行涂黑处理。试验所用的示踪粒子是白色 Al_2O_3 粉末。

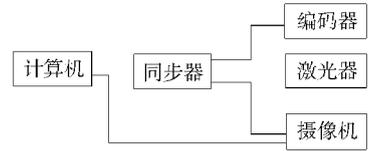


图 3 PIV 组成示意图

Fig. 3 Diagram of PIV composition

2 试验方法与测试方案

2.1 叶轮内的相对速度测量

叶轮内的流场测量常用方法有时间平均法和相位平均法,时间平均法是在极长周期下的采样平均,其结果与起始时刻无关,不能反映叶轮内有序的非定常流动特征。为了研究叶轮与蜗壳在不同相位时的有序非定常流动,需要采用相位平均法。该方法将叶片的干扰视为周期性的扰动,采用二维 PIV 测得具有时间序列的速度场: $f(x, y, t_0), f(x, y, t_0 + \tau), f(x, y, t_0 + 2\tau), \dots, f(x, y, t_0 + n\tau)$,其中 (x, y) 为二维流场的空间坐标, t_0 为初始时刻,可以通过 PIV 软件系统的脉冲延迟量进行设置, τ 为叶轮的旋转周期, n 为拍摄的流场图像的数目。此 n 幅图像中的叶轮与蜗壳均处于同一相对位置,速度场间的时间间隔为叶轮旋转周期的整数倍,将这 n 幅流场对应坐标的瞬时流速 u, v 进行算术平均,即得到相应点的平均流场。

采样数 n 的取值对平均速度具有一定的影响, n 值取得太小,则不能反映该相位的平均速度场; n 值取得太大,则会增加数据处理的工作量。为了合理确定 n 值,对某一相位、某一工况,连续采样得到的 300 幅流场,选取测量区域内的某一点,得到如图 4 所示瞬时流速 u, v 及平均流速 u_a, v_a 随采样数增加的变化趋势。由图可见当 $n < 100$ 时,平均流速 u_a, v_a 受到采样数的影响显著;当 $n > 100$ 时,平均流速 u_a, v_a 受采样数的影响很小,平均流速值几乎恒定。因此试验中将 n 设为 100。平均流速 u_a, v_a 为

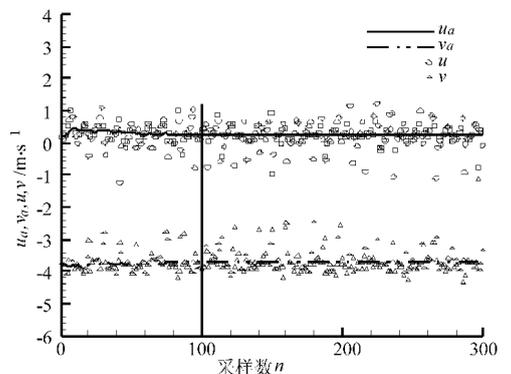


图 4 某点平均速度随采样数的变化

Fig. 4 Average velocity at one point variation with the sample number

$$u_a(x, y) = \frac{1}{100} \sum_{n=0}^{99} u(x, y, t_0 + n\tau) \quad (1)$$

$$v_a(x, y) = \frac{1}{100} \sum_{n=0}^{99} v(x, y, t_0 + n\tau) \quad (2)$$

2.2 试验方案

离心泵运行时,叶轮与蜗舌发生很强的非定常相互作用,在蜗舌附近,蜗壳与叶轮内的流场尤为复杂,本文对全透明的离心泵在叶片靠近蜗舌时,旋转叶轮内的流场进行试验测量,测量断面位置如图5所示,激光所在的平面为叶轮出口宽度的中间截面。通过脉冲延迟时间的设置,将一个叶槽划分为5个不同的相位,分别记为 $T/5$ 、 $2T/5$ 、 $3T/5$ 、 $4T/5$ 、 T ,各位置的相位差约为 14.4° ,如图6所示。在转速为

$n = 1\ 125\ \text{r/min}$ 时,分别对流量 $Q/Q_{\text{bep}} = 0.52$ 和 $Q/Q_{\text{bep}} = 1.0$ 两个工况下叶轮内流场进行了试验测量, Q_{bep} 为最高效率点的流量。

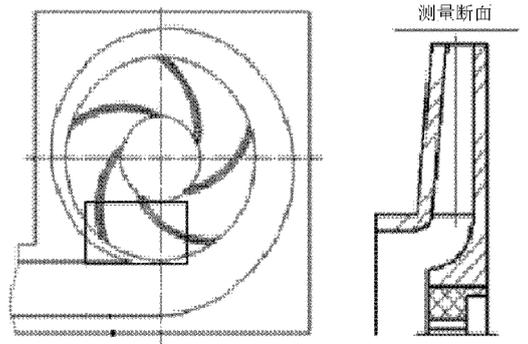


图5 叶轮内的测量断面示意图

Fig. 5 Position of the measurement section

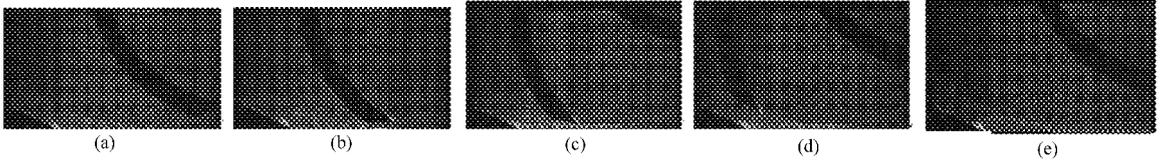


图6 叶片所处5个周向位置

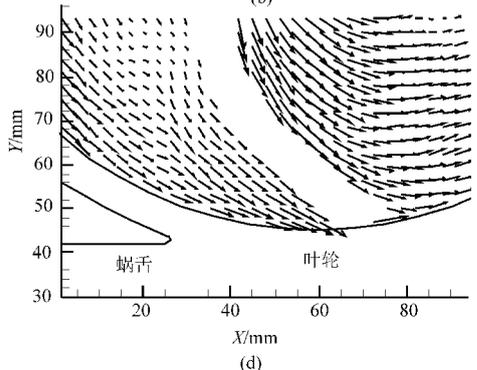
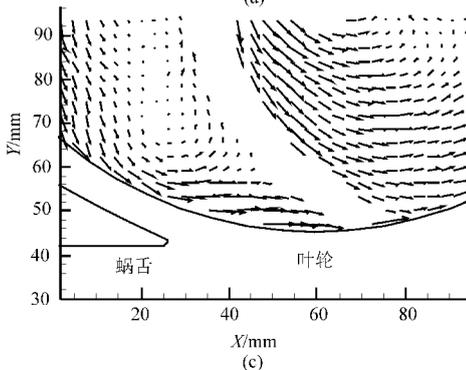
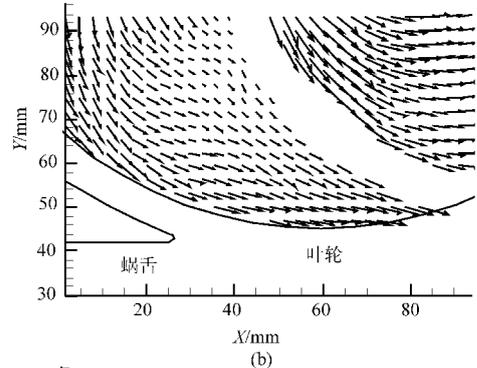
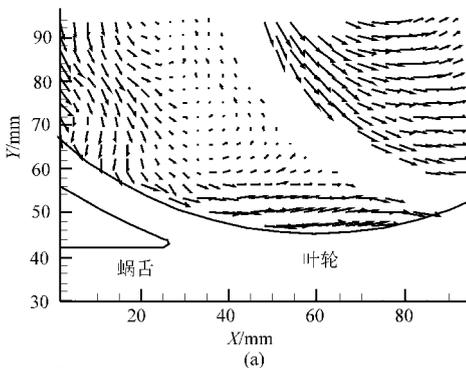
Fig. 6 Five azimuthal positions of a blade

(a) $T/5$ (b) $2T/5$ (c) $3T/5$ (d) $4T/5$ (e) T

3 叶轮内相对速度试验结果与分析

图7为离心泵叶轮内的相对速度图,在图7a相位处,叶片的压力面的中部有低速区且形成回流,在叶片的压力面出口为高速区。在图7c相位处,除叶片的压力面有回流外,吸力面附近也有回流,吸力面的回流区呈狭长形。主流在叶槽的中部。随着叶轮

的旋转,叶片向蜗舌运动,在图7e、7g、7i相位,回流区分布在压力面的进口部位和叶片的吸力面,且吸力面的回流呈顺时针方向,压力面的回流呈逆时针方向。在叶轮的旋转过程中,压力面的大旋涡区始终存在。只有当叶片靠近蜗舌时,叶片吸力面才出现狭长回流区,远离蜗舌时吸力面的回流区消失,这表明吸力面回流区的出现受到蜗舌的影响。



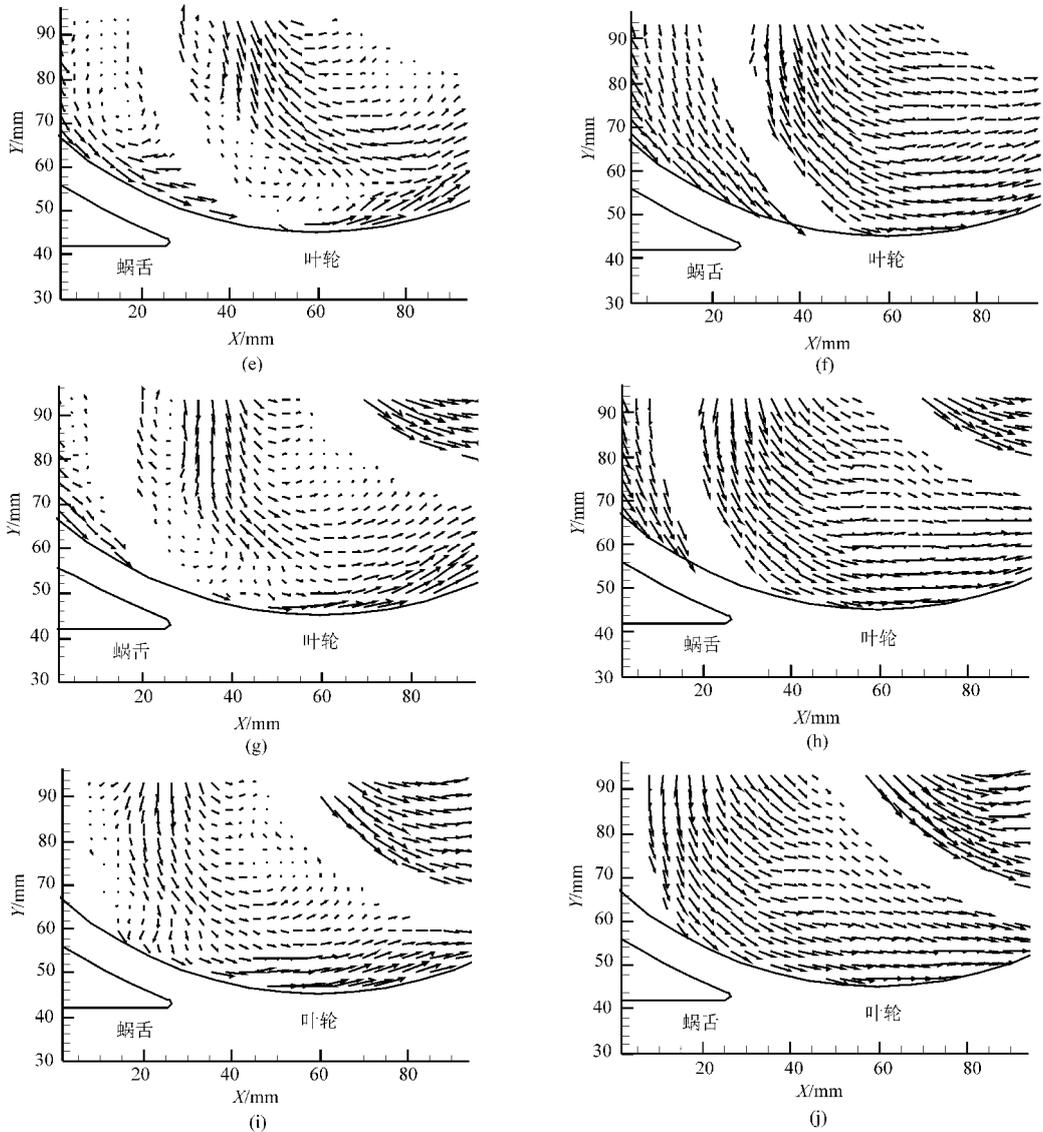


图7 离心泵叶轮内的相对流速图

Fig. 7 Distribution of relative velocity in the impeller

(a) $Q/Q_{\text{bep}} = 0.52, T/5$ (b) $Q/Q_{\text{bep}} = 1.0, T/5$ (c) $Q/Q_{\text{bep}} = 0.52, 2T/5$ (d) $Q/Q_{\text{bep}} = 1.0, 2T/5$ (e) $Q/Q_{\text{bep}} = 0.52, 3T/5$
 (f) $Q/Q_{\text{bep}} = 1.0, 3T/5$ (g) $Q/Q_{\text{bep}} = 0.52, 4T/5$ (h) $Q/Q_{\text{bep}} = 1.0, 4T/5$ (i) $Q/Q_{\text{bep}} = 0.52, T$ (j) $Q/Q_{\text{bep}} = 1.0, T$

由图7b、7d、7f、7h、7j可见,在最优流量工况点,叶片在不同相位时,叶轮内均未出现回流区,但在叶片的压力面靠近进口处有低速区,在叶片的吸力面靠近进口处相对速度最大。在叶轮旋转过程中,这种流动结构没有明显的变化,说明在最优工况点蜗舌对叶轮内的流场影响较小。图7d、7f显示:在叶轮出口处,叶片压力面的相对速度与吸力面的相对速度相差较大,叶片吸力面与压力面流体流出叶轮时将产生剪切混合。

4 结论

(1) 采用PIV对离心泵蜗舌附近旋转叶轮内的

流场进行了试验测量,获得了叶片5个不同周向位置时的二维相对速度场。

(2) 在流量 $Q/Q_{\text{bep}} = 0.52$ 时,叶片压力面始终存在逆时针方向的回流,当叶片靠近蜗舌时,吸力面存在顺时针方向的回流。在流量 $Q/Q_{\text{bep}} = 1.0$ 时,叶轮处于某些位置时,叶片出口的压力面与吸力面的相对速度相差较大。

(3) 在小流量工况下,只有当叶片靠近蜗舌时,叶片吸力面才出现狭长回流区,远离蜗舌时吸力面的回流区消失,表明蜗舌对叶轮内的相对速度场有显著地影响,而在最优工况下影响较弱。

参 考 文 献

- 1 Abramian M, Howard J H G. Experimental investigation of the steady and unsteady relative flow in a model centrifugal impeller passage[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1994, 116(2): 269 ~ 279.
- 2 Liu C H, Vafidis C, Whitelaw J H. Flow characteristics of a centrifugal pump [J]. ASME Journal of Fluid Engineering, 1994, 116(2): 303 ~ 309.
- 3 刘超, Deotte R E, Rashid K M. 离心泵叶轮内旋转流场激光测量研究[J]. 江苏农学院学报, 1994, 15(4): 64 ~ 71.
Liu Chao, Deotte R E, Rashid K M. Study on laser velocimeter measurements of rotational flow field in a centrifugal pump [J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1994, 15(4): 64 ~ 71. (in Chinese)
- 4 李文广. 离心油泵蜗壳与叶轮内部流动 LDV 测量与数值计算[D]. 北京: 中国石油大学, 1996.
Li Wenguang. LDV measurements and calculations of internal flows in the volute and impellers of a centrifugal oil pump[D]. Beijing: China University of Petroleum, 1996. (in Chinese)
- 5 Akin O, Rockwell D. Flow structure in a radial flow pumping system using high-image-density particle image velocimetry[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1994, 116: 538 ~ 544.
- 6 Sheperd I C, La Fontaine R F, Welch L W, et al. Velocity measurement in fan rotors using particle imaging velocimetry [C] // Proceedings of the 1994 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Part 9, 1994: 179 ~ 183.
- 7 Wuibaut G, Bois G, Dupont P, et al. PIV measurements in the impeller and the vaneless diffuser of a radial flow pump in design and off-design operating conditions [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 791 ~ 797.
- 8 杨华, 刘超, 汤方平. 离心泵有盖板叶轮内部流场的 PIV 测量[J]. 农业机械学报, 2003, 34(2): 27 ~ 29.
Yang Hua, Liu Chao, Tang Fangping. PIV measurement of flow fields inside a shrouded impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(2): 27 ~ 29. (in Chinese)
- 9 杨华. 基于整机率流模拟的离心泵叶型优化方法与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
Yang Hua. A new method of blade profile optimization for centrifugal pump based on numerical simulation and experimental study[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2005. (in Chinese)

(上接第 31 页)

- 6 车得福, 李会雄, 解茂昭. 多相流及其应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- 7 赵亚丽. 高速撞击过程的液滴数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
- 8 Bourlioux A. A coupled level-set volume-of-fluid algorithm for tracking material interfaces [C] // Proceedings of Sixth International Symposium on Computational Fluid Dynamics, Lake Tahoe, USA, 1995: 15 ~ 22.
- 9 Sussman M, Puckett E G. A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D axisymmetric incompressible two-phase flows [J]. Journal of Computational Physics, 2000, 162(2): 335 ~ 354.
- 10 Son G, Hur N. A Coupled level set and volume-of-fluid method for the buoyancy-driven motion of fluid particles [J]. Numerical Heat Transfer, Part B, 2002, 42(6): 523 ~ 542.
- 11 Son G. Efficient implementation of a coupled level-set and volume-of-fluid method for three-dimensional incompressible two-phase flows [J]. Numerical Heat Transfer, Part B, 2003, 43(6): 549 ~ 565.
- 12 Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension [J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(2): 335 ~ 354.
- 13 Van Der Vorst H A. BI-CGSTAB: a fast and smoothly converging variant of BI-CG for the solution of non-symmetric linear systems [J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1992, 13(2): 631 ~ 644.
- 14 Van Der Vorst H A. Efficient and reliable iterative methods for linear systems [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2002, 149(1): 251 ~ 265.
- 15 Rudman M. Volume-tracking methods for interfacial flow calculations [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1997, 24(7): 671 ~ 691.
- 16 Rudman M. A volume-tracking method for incompressible multi-fluid flows with large density variations [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1998, 28(2): 357 ~ 378.
- 17 Zalesak S T. Fully multi-dimensional flux corrected transport algorithms for fluid flow [J]. Journal of Computational Physics, 1979, 31(3): 335 ~ 362.