

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.013

# 叶片式混输泵气液两相非定常流动特性分析<sup>\*</sup>

余志毅 刘 影  
(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:** 基于细胞状流动假设,采用双流体模型对一叶片式混输泵叶轮内的气液两相流动进行定常和非定常数值模拟。计算中,进口含气率为15%,湍流模型采用基于 $k-\omega$ 模型的SST模型,相间作用力考虑了阻力和附加质量力。通过分析流域的含气率及两相速度矢量分布,探讨了混输泵内气液两相非定常流动特性。结果显示,混输泵叶轮内的两相输运过程出现“不连续气团运动”现象。该现象的形成与气泡尺寸及气体所受的相间作用力有关,并且只有在非定常计算中才能得到清晰展现。计算还发现,气相轴面涡的位置与高含气率区几乎完全对应,说明气相旋涡是造成气体局部聚集的主要因素之一。通过对比外特性计算和实验结果,验证了所用数值模型和方法的可靠性。

**关键词:** 叶片式混输泵 非定常流动 气液两相流 不连续气团 相间作用力

**中图分类号:** TH311      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0066-04

## Characteristic Analysis of Unsteady Gas-liquid Two-phase Flow in a Multiphase Rotodynamic Pump

Yu Zhiyi Liu Ying  
(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on the assumption of tiny bubbly flow, the gas-liquid two-phase flow in a multiphase rotodynamic pump was numerically simulated with two-fluid model in both steady and unsteady modes. In the simulation, the inlet gas volume fraction was 15%. The  $k-\omega$  based SST model was used for turbulence. The drag force and the added mass force were accounted for in the interfacial momentum transfer terms. Through the analyses of the distribution of gas volume fraction and velocity vectors, the unsteady flow characteristic in the multiphase pump was explored. The results demonstrated that a phenomenon named “discontinuous air mass movement” would occur in the two-phase transport process. The formation of this phenomenon was related to the bubble size and the interfacial forces acting on the gas, and only in unsteady simulation could this phenomenon be observed. Also, it was found that the locations of gas vortexes in meridional plane were almost fully corresponding to the regions of high gas volume fraction, which illustrated that gas vortex was one of the main factors that led to gas accumulation. In addition, through comparison of the external characteristics between the simulation and the experiment, the reliability of the numerical method was validated.

**Key words:** Multiphase rotodynamic pump Unsteady flow Gas-liquid two-phase flow Discontinuous air mass Interfacial force

### 引言

叶片泵内的气液两相流动行为是备受关注的热点问题之一。为了预测此类泵的性能,人们尝试通

过数值计算的方法对其内部流动进行模拟。Tremante 对 NACA65 轴流泵叶栅气液两相流的模拟发现,在大冲角情况下,气团随着冲角的增大由叶片前缘扩展至整个压力边,且叶轮流道产生分层

收稿日期: 2012-12-18 修回日期: 2012-12-27  
<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51009003)和水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放研究基金资助项目(SKLHSE-2013-E-01)  
作者简介: 余志毅,副教授,博士,主要从事多相流动理论及数值模拟方法研究, E-mail: yuzhiyi@bit.edu.cn

流<sup>[1]</sup>；卢金铃采用欧拉模型对离心泵内气液两相泡状流进行模拟,发现叶轮流道靠近轮盖处含气率较高,当进口含气率达14%时,该处将产生严重的相态分离<sup>[2]</sup>；笔者通过自编的气液双流体模型程序对混输泵内三维两相湍流进行模拟,发现叶轮进口部分的旋涡区同时也是高含气区,并建议改进口区的水力设计<sup>[3]</sup>。总体而言,目前关于泵内气液两相流动的分析主要针对气团的分布特征,缺乏对气团形成过程及原因的探讨,而后者对充分认识泵内气液两相分离机制,进而采取有针对性的措施改进叶轮流道设计将起到更为直接的推动作用。为此,采用CFD计算软件ANSYS CFX12.1对叶片式混输泵叶轮内的气液两相流动进行非定常模拟,以探讨气液混合介质在混输泵内的基本流动过程及特点。

## 1 数值计算方法

### 1.1 控制方程

以水和空气为两相介质,假定混输泵叶轮内部气液两相流型为泡状流。在笛卡尔坐标系 $(x, y, z)$ 中,考虑到 Boussinesq 涡粘性模型<sup>[4]</sup>,非定常不可压湍流流动的连续方程和动量方程可表示为:

连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{w}_k) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \mathbf{w}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k - \alpha_k \boldsymbol{\tau}) = -\alpha_k \nabla p + \mathbf{M}_k + \mathbf{f}_k \quad (2)$$

式中  $\rho_k$ —— $k$ 相密度  $p$ ——压强  
 $\alpha_k$ —— $k$ 相体积分数,满足  $\alpha_g + \alpha_l = 1$   
 $\mathbf{w}_k$ —— $k$ 相相对速度  
 $\mathbf{M}_k$ —— $k$ 相所受的相间作用力  
 $\mathbf{f}_k$ ——与叶轮旋转有关的质量力,包括离心力和科氏力  
 $\boldsymbol{\tau}$ ——粘性应力张量

下标  $k$  代表任意一相( $l$ 为液相, $g$ 为气相)。

对湍流的模拟采用均相 SST 模型。这一模型在 BSL  $k-\omega$  模型基础上考虑了湍流剪切应力的输运,可对逆压梯度下的流动分离现象给出更精确的预测<sup>[5]</sup>。在该模型下,涡粘性系数计算式为

$$\mu_t = \frac{\rho_{\text{mix}} a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (3)$$

式中  $\rho_{\text{mix}}$ ——混合密度,即  $\rho_{\text{mix}} = \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g$   
 $a_1$ ——模型常数,  $a_1 = 5/9$   
 $S$ ——应变率的不变测度  
 $F_2$ ——混合函数  $k$ ——湍动能

$\omega$ ——湍流频率

### 1.2 相间作用力

忽略相界面的表面张力,根据牛顿定律,气液两相所受的界面作用力大小相等,方向相反,即  $\mathbf{M}_l = -\mathbf{M}_g$ 。对于细泡状流,相间作用力主要考虑相间阻力和附加质量力。单位体积的相间阻力为<sup>[6]</sup>

$$\mathbf{M}_{l,D} = -\mathbf{M}_{g,D} = 0.75 C_D \frac{\rho_l}{D_b} \alpha_g \alpha_l |\mathbf{w}_R| \mathbf{w}_R \quad (4)$$

$$\text{其中 } C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_b} (1 + 0.15 Re_b^{0.687}) & (Re_b \leq 1000) \\ 0.44 & (Re_b > 1000) \end{cases} \quad (5)$$

$$Re_b = \rho_l D_b |\mathbf{w}_R| / \mu_l$$

式中  $\mathbf{w}_R$ ——相间滑移速度矢量

$D_b$ ——气泡直径  $C_D$ ——阻力系数

$Re_b$ ——气泡雷诺数

附加质量力是由两相间的相对加速引起的。Abdullah 给出附加质量力的计算公式为<sup>[7]</sup>

$$\mathbf{M}_{l,VM} = -\mathbf{M}_{g,VM} = \rho_l C_{VM} \alpha_g \mathbf{a}_{VM} \quad (6)$$

$$\text{其中 } \mathbf{a}_{VM} = \frac{\partial \mathbf{w}_R}{\partial t} + (\mathbf{w}_g \cdot \nabla) \mathbf{w}_g - (\mathbf{w}_l \cdot \nabla) \mathbf{w}_l \quad (7)$$

式中  $C_{VM}$ ——附加质量系数,对球形气泡可取 0.5  
 $\mathbf{a}_{VM}$ ——附加质量加速度矢量

## 2 场计算结果与分析

两相计算的基本参数为:进口含气率为15%,总流量  $Q$  为  $35.45 \text{ m}^3/\text{h}$ ,转速  $n = 1500 \text{ r/min}$ 。假设叶轮内各流道的流动为轴对称,数值计算可采用单流道方法。为合理给定边界条件,对流道进出口区分别沿轴向作了延长。采用 ICFM CFD12.1 对流域作非结构化网格划分,计算网格如图1所示,网格单元总数为184 973。非定常计算时,初始流场根据纯水工况的稳态计算解给定,时间步长取为5 ms,每个时间步迭代最多20次。

为了更充分了解混输泵内两相非定常流动的特点,掌握非定常计算的基本方法,同时对混输泵内流动作了定常计算与非定常结果对比。定常计算所采

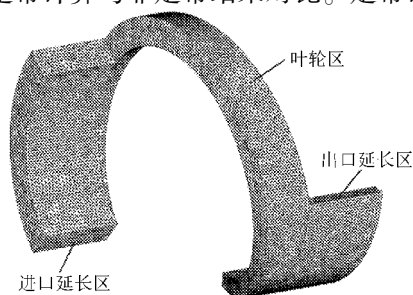


图1 计算区域三维网格

Fig. 1 Computational grid for flow analysis

用的数学模型与上述非定常计算模型类似,只是控制方程中去掉了时间相关项。

图2和图3分别为数值计算获取的轴面平均含气率分布和半叶高处的周面含气率分布,其中图2f和图3f为定常计算解,其余为非定常计算解。定常及非定常计算结果均显示,气体进入叶轮区后将主要分布在轮毂面及吸力面附近。轮毂面附近气体较多与两相因叶轮旋转所受的离心力不同有直接联系。液相密度较大,因此受到较大的离心力而主要分布于流道外侧,气相则受液相排挤而更多地聚集在半径较小的轮毂面附近。吸力面附近气体较多则主要是因为此处的压强较低,气体受压强梯度力的驱动作用容易往此处聚集。

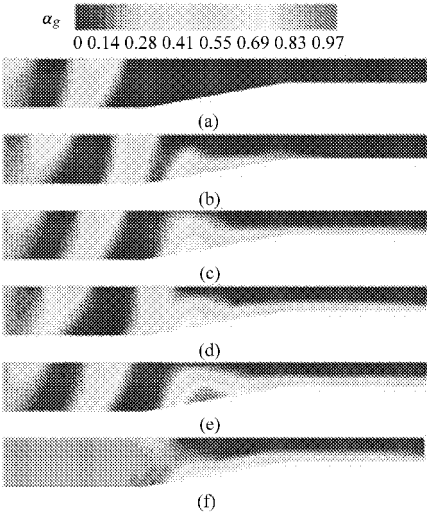


图2 轴面平均含气率分布

Fig. 2 Contour distribution of average gas volume fraction in meridional surface

(a)  $t=0.10\text{ s}$  (b)  $t=0.20\text{ s}$  (c)  $t=0.30\text{ s}$   
(d)  $t=0.40\text{ s}$  (e)  $t=0.80\text{ s}$  (f) 定常解

从两图的非定常结果可明显地发现,气体从流域进口到出口的输运过程中并不是连续的,而是形成一个个相隔一定距离的气团逐渐向出口方向移动,这可能与气体所受相间作用力有关。由于本研究假定泵内两相流为细胞状流动,其中气泡直径假设为1 mm,根据式(4),进入流域的气泡将受到较大的相间阻力,因此其速度将发生很快的衰减;随后进入的气泡由于速度相对较大而与较早进入的气泡聚集在一起形成气团。气团可被看作直径较大的气泡,因此其受到的来自液相的阻力将变小,气团得以继续向出口方向移动,并且其速度将比后续的受到较大阻力的小气泡的速度要大,导致气团与小气泡的分离。如此反复,从而形成图2和图3所示的“不连续气团运动”现象。对比定常和非定常计算结果可知,这一现象只有通过非定常计算才能清晰地捕捉到。显然,定常计算中对时间项的忽略是其中的

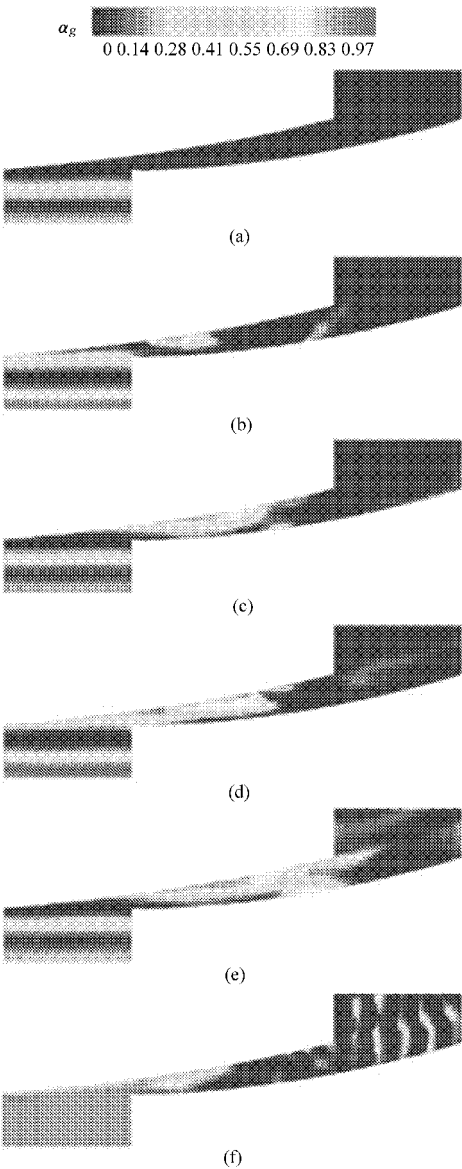


图3 半叶高处周面含气率分布

Fig. 3 Contour distribution of gas volume fraction in circumferential surface

(a)  $t=0.10\text{ s}$  (b)  $t=0.20\text{ s}$  (c)  $t=0.30\text{ s}$   
(d)  $t=0.40\text{ s}$  (e)  $t=0.80\text{ s}$  (f) 定常解

主要原因,这在进口延长段流场中表现得尤为明显。当气团进入叶轮区后,在离心力的作用下,气团被排挤至轮毂面附近,并在叶轮和周围液体的带动下继续向出口方向运动。

值得注意的是,上述“不连续气团运动”现象在实际流动过程中可能有不同的表现形式,这与气泡直径大小、叶轮流道形状和气液相间作用机制等有密切联系,有待下一步对非定常计算模型作更深入的研究。

图4显示了 $t=0.80\text{ s}$ 时刻的气相和液相速度矢量分布。可以发现,气液两相在流道中均形成了一个或多个轴面涡,其中叶轮轮毂面附近的轴面涡最明显。对比图2e的含气率分布图可发现,气相轴



面涡的位置与高含气率区几乎完全对应,说明气相旋涡是造成气体局部聚集的主要因素之一。从两相速度矢量的方向,尤其是叶轮区后半部及出口延长区的速度矢量方向还可看出,液相速度受气团现象的干扰较小,其轴向分量占了主要比例;而气相速度的径向分量比例较大,并指向含气率较高的区域。气液两相的运动所受干扰不同与两相密度的差异有关,液相由于密度较大而具有更大的惯性,因而对外界因素的抗干扰能力也更强。

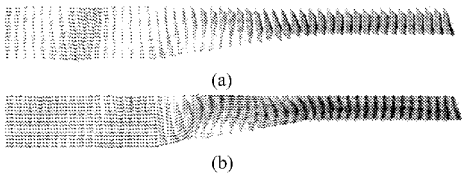


图4 两相速度矢量分布( $t=0.80\text{ s}$ )  
Fig.4 Distribution of two phase velocity vector  
(a) 气相 (b) 液相

3 外特性性能预测

气液两相流动条件下,泵的外特性性能计算必须考虑气相含量的影响<sup>[8]</sup>。令  $x$  为气相的质量流量比例,混输泵扬程计算公式为

$$H_{tp} = (1 - x) H_l + x H_g \tag{8}$$

其中 
$$H_g = \frac{p_2 - p_1}{\rho_g g} + \frac{c_{2g}^2 - c_{1g}^2}{2g} \tag{9}$$

$$H_l = \frac{p_2 - p_1}{\rho_l g} + \frac{c_{2l}^2 - c_{1l}^2}{2g} \tag{10}$$

式中  $H_g$ 、 $H_l$ ——气相和液相的扬程  
 $p_1$ 、 $p_2$ ——进口断面和出口断面的压强  
 $c_{1g}$ 、 $c_{2g}$ ——气相的进口断面和出口断面的绝对速度  
 $c_{1l}$ 、 $c_{2l}$ ——液相的进口断面和出口断面的绝对速度

根据叶片式水力机械的基本方程<sup>[9]</sup>,混输泵的水力效率为

$$\eta = H_{tp} / H_{th} \times 100\% \tag{11}$$

其中 
$$H_{th} = (1 - x) H_{th,l} + x H_{th,g} \tag{12}$$

$$H_{th,g} = \frac{n}{2\pi g} (\Gamma_{2g} - \Gamma_{1g}) \tag{13}$$

$$H_{th,l} = \frac{n}{2\pi g} (\Gamma_{2l} - \Gamma_{1l}) \tag{14}$$

式中  $H_{th}$ ——混输泵的理论扬程  
 $H_{th,g}$ 、 $H_{th,l}$ ——气相和液相的理论扬程  
 $n$ ——泵的转速  
 $\Gamma_{1g}$ 、 $\Gamma_{2g}$ ——气相的进口和出口的环量  
 $\Gamma_{1l}$ 、 $\Gamma_{2l}$ ——液相的进口和出口的环量

根据上述公式,可得出定常和非定常计算中混输泵单级叶轮的扬程和水力效率。其中,非定常情况下采用各个时间步的平均值。表1对比了实验<sup>[10]</sup>和数值计算获取的外特性参数。可以看出,定常及非定常数值计算所得结果与实验值是比较接近的,说明所采用的数值计算模型和方法基本可靠。由于数值计算得出的效率是水力效率,而实验测得的效率是总效率,即水力效率和容积效率、机械效率的乘积,所以数值计算得出的效率比实验值大是合理的。

表1 外特性结果对比  
Tab.1 Comparison of external characteristics

| 方式       | 扬程 $H_p/\text{m}$ | 效率 $\eta/\%$ |
|----------|-------------------|--------------|
| 实验值      | 13.2              | 76.1         |
| 非定常计算平均值 | 12.0              | 80.8         |
| 定常计算值    | 13.6              | 84.4         |

4 结束语

非定常流动计算是分析叶片式混输泵内气团形成过程及原因的重要手段。为此,采用了双流体模型对一叶片式混输泵叶轮内气液两相流动进行了定常和非定常数值模拟,根据结果分析了混输泵内两相非定常流动特性。分析表明,气体进入叶轮区后主要分布在轮毂面和吸力面附近;气体从流域进口到出口的输运过程将出现“不连续气团运动”现象,即形成一个相隔一定距离的气团逐渐向出口方向移动。该现象的出现与气泡大小和气体所受的相间作用力有关,并且只有通过非定常数值计算才能得到清晰体现,充分表明了非定常计算在气液混输泵内流动现象分析中的必要性。计算还发现,气相轴面涡的位置与高含气率区几乎完全对应,说明了气相旋涡是造成气体局部聚集的主要因素之一。

参 考 文 献

1 Tremante A, Moreno N, Rey R, et al. Numerical turbulent simulation of the two-phase flow (liquid/gas) through a cascade of an axial pump [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 371 ~ 376.  
2 卢金铃,席光,祁大同. 离心泵叶轮内气液两相三维流动数值研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2): 237 ~ 240.  
Lu Jinling, Xi Guang, Qi Datong. Numerical study on the gas-liquid two-phase 3-D flow in the impeller of a centrifugal pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(2): 237 ~ 240. (in Chinese)  
3 Yu Zhiyi, Wang Guoyu, Cao Shuliang. Extended two-fluid model applied to analysis of bubbly flow in multiphase rotodynamic pump impeller [J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2009, 4(1): 53 ~ 59.

- hybrid rice as affected by different soil types[J]. China Journal Rice Science,2010,24(2):183~188. (in Chinese)
- 23 肖小平,彭科林,周孟辉. 城市郊区水稻土重金属污染状况调查与评价—以湘潭市郊响水乡为例[J]. 中国生态农业学报,2008,16(3):680~685.
- Xiao Xiaoping, Peng Kelin, Zhou Menghui. Investigation and evaluation of heavy metal pollution in suburban paddy soils—a case study of Xiangshui Town ship, Xiangtan City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2008,16(3):680~685. (in Chinese)
- 24 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,1999.
- 25 钟晓兰,周生路,李江涛,等. 长江三角洲地区土壤盐酸可提取态重金属含量的空间变异特征[J]. 农业工程学报,2007,23(10):71~78.
- Zhong Xiaolan, Zhou Shenglu, Li Jiangtao, et al. Spatial variability of soil hydrochloric acid extractable heavy metals in the Yangtze River Delta[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(10):71~78. (in Chinese)
- 26 Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. Microchemical Journal,2010,94(2):99~107.
- 27 严连香,黄标,邵学新,等. 不同工业企业周围土壤-作物系统重金属 Pb、Cd 的空间变异及其迁移规律[J]. 土壤学报,2009,46(1):52~62.
- Yan Lianxiang, Huang Biao, Shao Xuexin, et al. Spatial variability and transfer of Pb and Cd in soil-crop system around different types of factories[J]. Acta Pedologica Sinica,2009,46(1):52~62. (in Chinese)
- 28 成杰民,潘根兴,郑金伟. 太湖地区水稻土 pH 及重金属元素有效态含量变化影响因素初探[J]. 农业环境保护,2001,20(3):141~144.
- Cheng Jieming, Pang Genxing, Zheng Jinwei. Factor affecting pH and availability of heavy metals in paddy soils in Taihu Lake area[J]. Agro-environmental Protection, 2001,20(3):141~144. (in Chinese)
- 29 王志刚,赵永存,廖启林,等. 近 20 年来江苏省土壤 pH 值时空变化及其驱动力[J]. 生态学报,2008,28(2):720~727.
- Wang Zhigang, Zhao Yongcun, Liao Qilin, et al. Spatio-temporal variation and associated affecting factors of soil pH in the past 20 years of Jiangsu Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(2):720~727. (in Chinese)
- 30 郑明霞,黄斌,陈明,等. 土壤中铬对油菜生物有效性的研究[J]. 有色金属,2007,59(2):95~99.
- Zheng Mingxia, Huang Bin, Chen Ming, et al. Research on bioavailability of chromium in soil to cole plant[J]. Nonferrous Metals,2007,59(2):95~99. (in Chinese)
- 31 Hocking P J, McLaughlin M J. Genotypic variation in cadmium accumulation by seed of linseed, and comparison with seeds of some other crop species[J]. Australian Journal of Agricultural Research,2000,51(4):427~433.
- 32 Yuruk A, Bozkurt M A. Heavy metal accumulation in different organs of plants grown under high sewage sludge doses[J]. Fresenius Environmental Bulletin,2006,15(2):107~112.
- 33 Basta N T. Examples and case studies of beneficial reuse of municipal by-products[M]//Power J F, Dicte W A, Kashmanian R M, et al. Land application of agricultural, industrial, and municipal by-products. Wisconsin: Soil Science Society of America, 2000: 481~504.
- 34 吴花,李伏生,莫江华.  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  配比对土壤镉和锌形态及其生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报,2007,26(5):1865~1869.
- Wu Hua, Li Fusheng, Mo Jianghua. Effect of the ratio of  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  on the form and bioavailability of Cd and Zn in soil[J]. Journal of Agro-Environment Science,2007,26(5):1865~1869. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 69 页)

- 4 Gray D D, Giorgin A. The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, 19(5): 545~551.
- 5 Menter F. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598~1605.
- 6 Clift R, Grace J, Weber M. Bubbles, drops and particles [M]. New York: Academic Press, 1978.
- 7 Abdullah A K. The virtual mass of a rotating sphere in fluids [J]. Journal of Applied Mechanics, 2005, 72(5): 801~802.
- 8 余志毅. 叶片式气液混输泵叶轮内部流场分析及试验研究[D]. 北京:清华大学, 2005.
- Yu Zhiyi. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow and experimental study on a multiphase rotodynamic pump [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- 9 张克危. 流体机械原理(上册) [M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- 10 曹树良,余志毅,王国玉,等. 叶片式气液混输泵的实验研究[C]//2002 全国流体机械技术会议,2002:346~349.