

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.04.003

基于数值模拟的高海拔地区离心泵性能分析

罗红英

(西藏大学农牧学院水利土木工程学院,西藏 林芝 860000)

摘要: 为了解高海拔地区离心泵的运行特点,采用 Fluent 软件中的 MRF 模型,以离心泵在 3 000 m 的实际运行参数为输入量,对不同海拔高度(0 m、1 000 m、2 000 m、3 000 m、4 000 m、5 000 m)情况下离心泵的内部流场进行数值模拟,探讨其压强、速度的变化规律。结果表明:海拔高度为 5 000 m 时离心泵内部流场的平均压强为 47 672.15 Pa,是平原上平均压强的 50%;海拔高度对离心泵内部速度场以及速度矢量场的影响作用很小,可忽略不计。

关键词: 离心泵性能;流场;压强;平均流速;高海拔地区;Fluent 软件;MRF 模型;数值模拟

中图分类号: TH311

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2015)04-0294-06

Performance analysis of centrifugal pump in high-elevation area using numerical simulation

LUO Hongying

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Agricultural and Animal Husbandry College of Tibet University, Linzhi 860000, China)

Abstract: In order to obtain the operational characteristics of centrifugal pumps in a high-elevation area, the flow field inside a centrifugal pump at different elevations (0 m, 1 000 m, 2 000 m, 3 000 m, 4 000 m, and 5 000 m) was simulated numerically using the MRF model within the Fluent software with the actual operational parameters at an elevation of 3 000 m as input. The change rules of pressure and velocity in the flow field inside the centrifugal pump were examined. The results show that while the elevation is 5 000 m, the average pressure in the flow field inside the centrifugal pump is 47 672.15 Pa, which is half of the average pressure in plain areas. The influence of the elevation on the velocity field and velocity vector field is small, and can be negligible.

Key words: performance of centrifugal pump; flow field; pressure; average velocity; high-elevation area; Fluent software; MRF model; numerical simulation

离心泵是一种依靠叶轮旋转时产生离心力来输送液体的泵。采用 Fluent 软件对离心泵内流场的研究一直是流体机械研究的热点。例如,马和军^[1]利用 Fluent 软件对某型号的离心泵进行二维流场区域的数值模拟,实现了对压力场、速度场、速度矢量分布及湍流强度分布的可视化,为离心泵的优化提供了一定的指导作用。汪德志等^[2]建立了二维离心泵的几何模型,并利用 Fluent 软件模拟该离心泵内的二维流动,所得结果表明,采用标准模型模拟得到的结果可以真实地反映离心泵内部的复杂流动,为离心泵的设计改良提供了可靠依据。张峥^[3]基于三维雷诺时均 Navier-Stokes 方程和标准 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型,采用三维无结构网格及压强连接的隐式修正 SIMPLEC 算法,利用 Fluent 中提供的多重参考系(MRF)模型,对 IB 型离心泵进行内部流动数值模拟,结果表明,离心泵内存在漩涡、二次流等不良流动现象。王洋等^[4]选取 IS50-32-200 低比转速离心泵作为研究对象,通过 Pro/e 建立三维模型,利用 Fluent 对不同叶片数离心泵进行数值模拟,揭示了低比转速离心泵叶片数对流量、扬程和性能的影响,

收稿日期:2014-11-24

基金项目:西藏自治区高校重点实验室建设项目(20140012)

作者简介:罗红英(1970—),女(门巴族),西藏墨脱人,副教授,博士研究生,主要从事高原水力机械及其控制工程研究。E-mail:57902322@qq.com

给出低比转速离心泵叶片数的选取原则。Shi 等^[5]基于求解纳维-斯托克斯方程的三维不可压缩稳态流动,利用 CFD 软件对 4 种不同叶轮出口宽度的深井离心泵进行数值研究,结果表明,叶轮出口宽度越大则泵性能越差。Cui 等^[6]基于 κ - ε RNG 湍流模型和滑移网格模型,对离心泵非定常流动在低比转速离心流场进行了数值模拟,结果表明,流体的不稳定流动引起压力分布不均匀,且较大的波动现象出现在蜗舌附近。Li 等^[7]基于固液两相混合物的运输试验,以及重整化群(RNG) κ - ε 紊流模型对离心泵内固液两相湍流进行模拟,揭示了泵内部流的流动特征,为提高离心泵的耐磨性找到有效途径。Zhang 等^[8]基于两相流混合模型和 RNG、 κ - ε 双方程湍流模型,利用 CFD 软件对低比转速离心泵固液两相流动进行了数值模拟和分析,结果表明,泵的扬程和效率随着固相粒径或浓度降低,颗粒密度对泵性能的影响比较小。综上所述,前人研究颇为丰富,但考虑海拔变化的离心泵流场数值计算方面的研究还处于空白阶段,笔者认为对不同海拔条件下离心泵流场以及速度场进行研究十分必要。

1 离心泵模型建立及网格划分

1.1 模型的建立

选择塑料耐腐蚀离心泵作为模型泵,型号为 FS103#-2,扬程为 11 m,进口直径为 32 mm,功率为 550 W,流量为 4.5 m³/h,出口直径为 25 mm,转速为 2840 r/min。因离心泵叶片的翼型曲线以及蜗壳部分的螺旋线模型较难建立,所以利用 AutoCAD 2004 对该离心泵建模。模型包括进口、交界面、叶片和蜗壳 4 个部分,进口直径为 32 mm,叶片数为 6 片。为了便于用 Fluent 中的 MRF 模型进行计算,同时建立交界面(图 1)。

1.2 网格划分

网格划分分 2 步进行:首先对转动区域进行网格划分,再对离心泵整体进行网格划分。网格划分时采用非结构化的三角形网格单元,最终生成的网格有 34 853 个节点、57 386 个三角形网格单元。网格分布如图 2、图 3 所示。

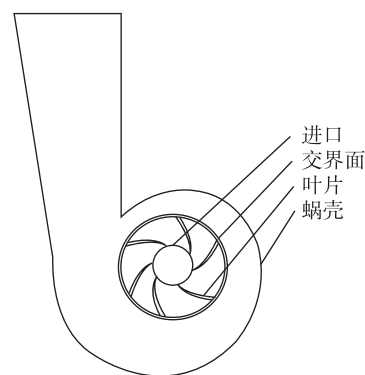


图 1 离心泵模型示意图

Fig. 1 Sketch of model of centrifugal pump

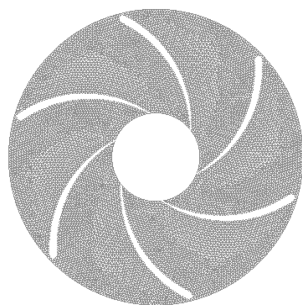


图 2 离心泵转动区域网格划分示意图

Fig. 2 Sketch of mesh in rotating region

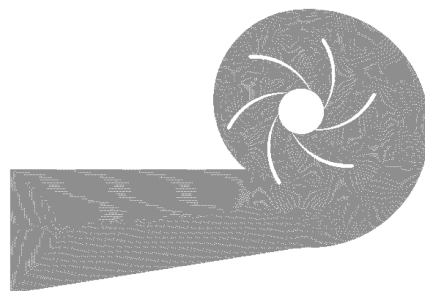


图 3 离心泵整体网格划分示意图

Fig. 3 Sketch of whole mesh of centrifugal pump

1.3 网格无关性验证

进行数值计算,计算结果往往与网格质量、数量有很大关系,所以对数值计算结果需要进行网格无关性验证。为使本次计算结果能够尽量排除网格数量对高原离心泵流场数值计算的影响,对不同海拔的每个模型分别进行网格质量相同情况下,网格数量分别为 31 250 个、42 610 个、57 386 个、69 556 个、78 760 个的计算,对比最终的计算结果,发现在网格数量为 57 386 个及以上时数值计算结果相差不大,说明该情况对应的计算结果与数量无关。

2 求解控制方程及 MRF 模型

2.1 控制方程

离心泵内的流动为不可压缩流动,内部流动遵循质量守恒定律以及动量守恒定律。其连续性方程(见

式(1))和动量守恒方程(见式(2)、式(3))^[9]为

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} u_i u_j \right) \quad (2)$$

$$-u_i u_j = \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\kappa + \nu \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

式中符号意义见文献[9]。

RANS 方程组本身是不封闭的,为了使方程组封闭,引入 κ - ε 湍流模型:

湍动能输运方程

$$\frac{\partial(\kappa U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \frac{G_\kappa - \rho \varepsilon}{\rho} \quad (4)$$

湍动耗散率输运方程

$$H \frac{\partial(\varepsilon U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\rho \kappa} G_\kappa - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (5)$$

式中: κ ——湍动能; ε ——湍动耗散率; G_κ ——由于平均流速梯度引起的 κ 产生项。其余符号意义见文献[9]。

2.2 MRF 模型

Fluent 软件对于旋转模型的计算,可以利用 MRF 模型。MRF 是一种稳态的求解方法,在每个移动区域采用移动参考坐标系方程单独求解,固定区域则采用固定坐标系方程求解,在交界面则实现从一个区域的边界通量传递给另外一个区域的通量,进行流动信息交换。笛卡尔张量形式的相对运动方程如下^[10]:

$$\frac{\partial p U_i}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

$$U_j \frac{\partial p U_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} - 2p \varepsilon_{ijk} \Omega_j U_k + p \Omega_j (\Omega_j x_i - \Omega_i x_j) \quad (7)$$

式中: τ_{ij} ——应力张量; ε_{ijk} ——置换张量; Ω ——转速; $2p \varepsilon_{ijk} \Omega_j U_k$ ——科氏加速度; $p \Omega_j (\Omega_j x_i - \Omega_i x_j)$ ——由于坐标旋转而出现的离心力对流体作用项。

2.3 参数及求解方法

为了保证计算结果的可比性,参数以及求解方法设置尽量保持一致,因而选择离心泵在额定工况下的参数。求解器都采用压力求解法,MRF 选择稳态求解法,湍流模型均采用 Realizable κ - ε 湍流模型,依据不同海拔地带设置对应的操作压力,大气压随海拔高度的变化见表 1,其中大气压根据海拔高度设定^[11-13]。边界条件设置时叶片转动区域角速度为 -2840 r/min ,进口速度为 3.8 m/s ,出口压力均采用当地大气压。求解时选择压力速度耦合的 Simple 算法,松弛因子均为默认值,对压力动量、湍动能、湍动耗散率的离散方法均采用一阶离散方法,设置完成后进行迭代。

表 1 不同海拔下离心泵内部流场主要参数变化情况

Table 1 Main parameters of flow field inside centrifugal pump at different elevations

海拔/ m	大气压/ Pa	平均压强/ Pa	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	速度矢量夹角/ ($^\circ$)
0	101 325	93 947.91	6.447 547	47.361 126
1 000	95 060	87 623.68	6.450 149	47.390 229
2 000	79 380	72 127.23	6.449 429	47.368 666
3 000	70 700	63 460.46	6.450 115	47.389 454
4 000	61 740	54 736.61	6.448 934	47.388 068
5 000	54 880	47 672.15	6.448 007	47.406 198

注:平均速度矢量夹角是指与 x 轴的夹角。

3 结果对比与分析

3.1 压强分析

根据计算结果,得出不同海拔高度时离心泵内部流场压强分布云图(图 4)。图 4 结果表明:(a)在叶轮

进口附近压力小,甚至出现了一定的真空度。因为在叶轮进口处,刚进入的水在此被高速旋转的叶轮甩出去,造成局部低压,利于将水吸入离心泵。(b)沿着叶轮流道水的压力快速增大。原因是在水被甩出叶轮流道的过程中,叶轮对水流做功,将旋转的机械能转化为水流的静压能,使水流压力增大,静压能最大处也就是压力最大处(分布在每个叶片背面出口处)。(c)液体流出叶轮流道,到了蜗壳以及出口段压力下降并且压力分布均匀,该情况与离心泵在额定工况下实际工作时的流场压力分布吻合。

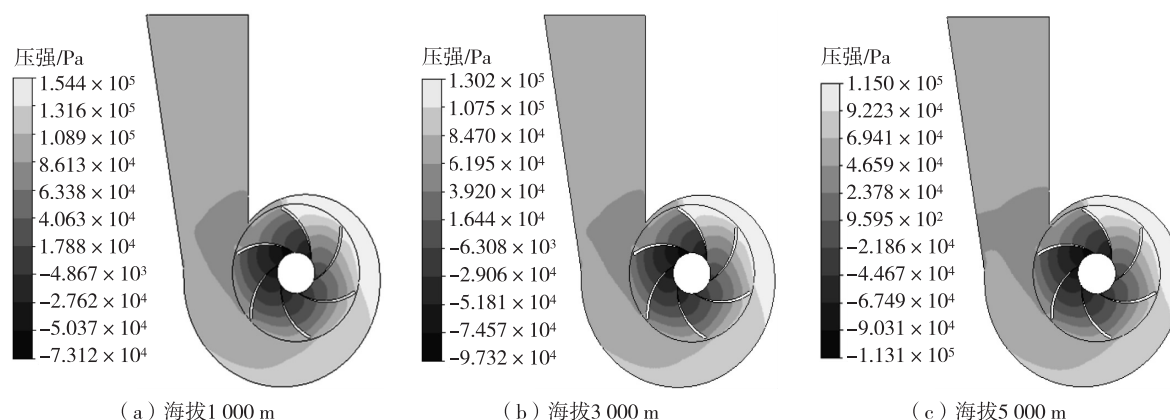


图4 不同海拔高度时离心泵内部流场压强分布云图

Fig. 4 Distribution of pressure in flow field inside centrifugal pump at different elevations

利用 Fluent 软件的报告功能依次计算出离心泵整体内部流场平均压强,绘制出的压强与海拔高度关系曲线见图 5。

研究表明,随着海拔高度的上升,离心泵内部流场的平均压强逐渐降低,在平原上其平均压强为 93 947.906 Pa,而在海拔高度为 5 000 m 时其内部平均压强为 47 672.145 Pa,约为在平原上的平均压强的 50%。根据图 5 拟合直线的线性函数表达式 ($y = -9.6773x + 94121$, $R^2 = 0.9856$) 可以计算任意海拔的离心泵内部流场平均压强。而压力的减少将会增加离心泵的空化现象,导致效率降低,经济性能指标下降等影响^[14-16]。

3.2 流速分布分析

额定工况下离心泵的流速分布见图 6。图 6(a)(b)(c) 显示的速度分布相对应,都是水流从叶轮进口处被吸进来以后,随着叶轮对其做功以及水流随着叶轮一起旋转,导致水流速度突然增加,等速度线的分布近似呈现绕进口圆的圆心环状分布,液流被甩出蜗壳后速度急剧下降,并均匀地流向出口处,速度最大处位于叶轮正面出口处,此处液流被充分加速。从压强分布云图和流速分布云图都可以明显看出不同海拔时离心泵内部流场压强分布和流速分布都是很均匀的,原因在于所选择的计算工况是额定工况,流场分布均匀,使离心泵效率增高,不会有太大的压力脉动和震动。另一方面也说明模拟比较精确,与实际离心泵的工作情况接近。

利用 Fluent 软件的报告功能依次计算出离心泵整体内部流场平均速度以及平均速度矢量夹角见表 1。从表 1 可以看到随着海拔高度的增加,平均速度以及速度矢量夹角几乎不变,平均速度保持在 6.45 m/s 左右,而平均速度矢量夹角保持在 47.4° 左右,这说明海拔高度的上升导致大气压的降低对于离心泵内部流场的流速以及速度矢量变化不大。

3.3 试验与数值计算结果对比分析

数值计算结果与试验值一般都会有一定的误差,因此需要对数值计算结果与试验值进行对比,以验证计算结果的准确性。因试验条件的限制,只对比海拔 3 000 m 时的试验结果。在离心泵综合试验台上所测得数据见表 2。

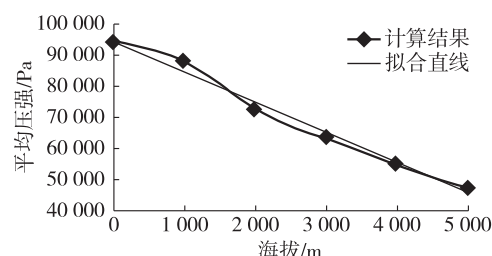


图5 离心泵内部流场平均压强随海拔变化曲线

Fig. 5 Variation of average pressure in flow field inside centrifugal pump with elevation

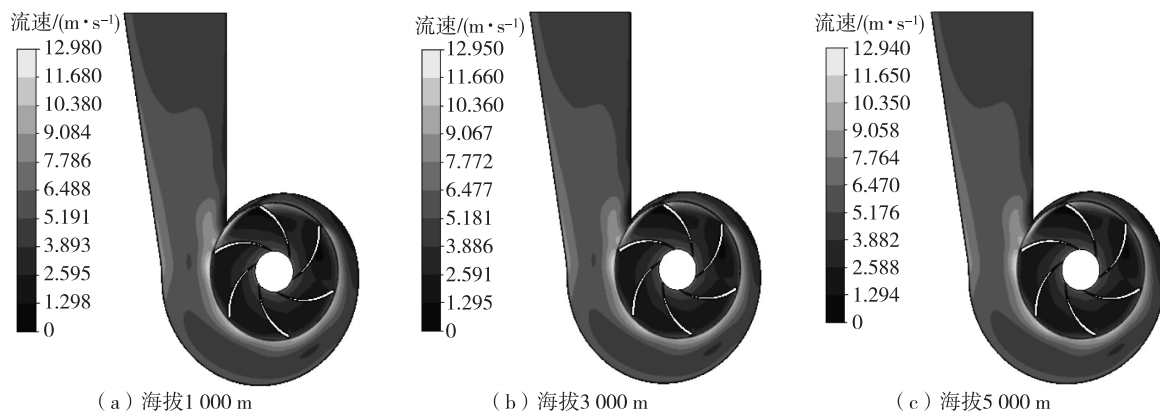


图 6 离心泵的流速分布云图

Fig. 6 Distribution of velocity in flow field inside centrifugal pump at different elevations

表 2 中第 12 组为额定工况时的数据,试验结果表明压强值为69 001. 80 Pa,与数值计算的海拔3 000 m时的平均压强相比较,通过计算发现其误差为 8. 7%,在可接受范围,表明此次数值计算结果较准确。

4 结 语

a. 计算结果表明:海拔对离心泵内流场的分布影响不大;但是对比不同海拔对离心泵的影响,平原至海拔 5 000 m 范围内,海拔对离心泵压力场的影响很大,随着海拔高度的升高,离心泵内部压力场逐渐减小,并且在海拔 5 000 m 时其平均压力场几乎为平原时的 50%。对比不同海拔对速度场以及速度矢量场的影响,发现海拔高度对其影响很小,几乎可以忽略不计。研究得出离心泵内平均压强随海拔高度变化的数学模型为 $y = -9. 677 3x + 94 121$, $R^2 = 0. 985 6$ 。

b. 对海拔 3 000 m 的离心泵试验结果与数值计算结果进行误差分析,其误差为 8. 7%,误差较小,说明数值计算结果可信。

表 2 离心泵综合试验数据

Table 2 Experimental data for centrifugal pump

试验组	压力表 读数/Pa	真空表 读数/Pa	电机功率/ W	流量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	99 974. 20	5 978. 85	378. 20	
2	101 052. 35	6 076. 86	380. 70	67. 34
3	94 975. 49	6 174. 88	386. 00	200. 85
4	93 015. 21	6 272. 89	392. 20	267. 84
5	91 054. 93	6 664. 95	403. 20	441. 59
6	88 996. 64	8 135. 16	418. 30	597. 63
7	84 978. 07	8 331. 18	422. 60	664. 65
8	83 017. 79	8 429. 20	425. 20	736. 71
9	79 979. 36	8 821. 25	429. 60	823. 84
10	76 058. 80	9 997. 42	439. 30	927. 73
11	72 040. 23	10 977. 56	440. 10	1 049. 42
12	69 001. 80	13 035. 85	450. 90	1 105. 28
13	62 042. 81	14 015. 99	458. 20	1 261. 66
14	54 985. 81	14 996. 13	462. 10	1 331. 40
15	49 987. 10	15 976. 27	480. 20	1 495. 94
16	44 988. 39	18 034. 56	486. 20	1 607. 64

注:第 1 组为空载试验。

参考文献:

- [1] 马和军. 基于 FLUENT 的离心泵内部流场数值分析[J].江西建材,2013(4):108-109. (MA Hejun. Numerical analysis by FLUENT of internal flow field in centrifugal pump[J].Jiangxi Building Materials,2013(4):108-109.(in Chinese))
- [2] 汪德志,李红梅,胡家顺. 离心泵内二维流场的数值模拟[J].科协论坛(下半月),2007(8):5-6. (WANG Dezhi, LI Hongmei, HU Jiashun. 2-D flow field in the centrifugal pump by numerical simulation[J]. Association for Science and Technology Forum (second half), 2007(8):5-6. (in Chinese))
- [3] 张峥. 基于 FLUENT 的离心泵内部流动的数值模拟[J].科技信息,2008(26):93,331. (ZHANG Zheng. Numerical simulation of the internal flow of centrifugal pump based on FLUENT[J].Science and Technology Information, 2008(26):93,331. (in Chinese))
- [4] 王洋,王维军,刘洁琼. 基于 Fluent 的叶片数对低比转速离心泵内部流场的影响[J].中国农村水利水电,2011(12):148-150,155. (WANG Yang, WANG Weijun, LIU Jieqiong. Influence of fluent based blade number on the internal flow field of low specific speed centrifugal pump[J]. Chinese Rural Water Conservancy and Hydropower, 2011(12):148-150, 155. (in Chinese))
- [5] SHI Weidong, ZHOU Ling, LU Weigang, et al. Numerical prediction and performance experiment in a deep-well centrifugal pump with different impeller outlet width[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013(1):46-52.

- [6] CUI Baoling, CHEN Desheng, XU Wenjing, et al. Unsteady flow characteristic of low-specific-speed centrifugal pump under different flow-rate conditions[J]. Journal of Thermal Science, 2015(1):17-23.
- [7] LI Yi, ZHU Zuchao, HE Zhaohui, et al. Abrasion characteristic analyses of solid-liquid two-phase centrifugal pump[J]. Journal of Thermal Science, 2011(3):283-287.
- [8] ZHANG Yuliang, LI Yi, CUI Baoling, et al. Numerical simulation and analysis of solid-liquid two-phase flow in centrifugal pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013(1):53-60.
- [9] 谭宗荣, 叶惠军, 李灿灿. 基于 Fluent 的离心泵二维流场数值模拟[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2011(6):54-56. (TAN Zongqi, YE Huijun, LI Cancan. Numerical simulation of two dimensional flow field of centrifugal pump based on Fluent[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Science Edition, 2011(6):54-56. (in Chinese))
- [10] 王欢, 吴光强. 多参考坐标系模型在液力变矩器稳态内流场分析中的应用研究[J]. 液压气动与密封, 2011(3):27-30. (WANG Huan, WU Guangqiang. Application of multi reference frame model in the analysis of steady flow field of hydraulic torque converter[J]. Hydraulic Pneumatic and Seal, 2011(3):27-30. (in Chinese))
- [11] 张林夫, 夏维洪. 空化与空蚀[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989.
- [12] 余强, 罗红英, 刘威. 高原压力钢管内部流场模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014(4):153-156. (YU Qiang, LUO Hongying, LIU Wei. Simulation of internal flow field of high altitude pressure steel tube[J]. Water Conservancy and Construction Engineering, 2014(4):153-156. (in Chinese))
- [13] 余强, 罗红英. 基于 FLUENT 的电站压力钢管内部流场模拟研究[J]. 西藏科技, 2014(9):67-69. (YU Qiang, LUO Hongying. Simulation of internal flow field of power station pressure pipe based on FLUENT[J]. Tibet Technology, 2014(9):67-69. (in Chinese))
- [14] 刘厚林, 刘东喜, 王勇, 等. 三种空化模型在离心泵空化流计算中的应用评价[J]. 农业工程学报, 2012(16):54-59. (LIU Houlin, LIU Dongxi, WANG Yong, et al. Evaluation of the application of three cavitation models in the calculation of cavitation flow in centrifugal pump[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2012(16):54-59. (in Chinese))
- [15] 杨正军, 王福军, 刘竹青, 等. 基于 CFD 的轴流泵空化特性预测[J]. 排灌机械工程学报, 2011(1):11-15. (YANG Zhengjun, WANG Fujun, LIU Zhuqing, et al. Based on CFD axial flow pump cavitation characteristics prediction[J]. Drainage and Irrigation Machinery Engineering Journal, 2011(1):11-15. (in Chinese))
- [16] 杨琼方, 王永生, 张志宏. 非均匀进流对螺旋桨空化水动力性能的影响[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2011, 26(5):538-550. (YANG Qiongfang, WANG Yongsheng, ZHANG Zhihong. The effect of the non-uniform inflow on the hydrodynamic performance of the propeller cavitation[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(5):538-550. (in Chinese))

· 简讯 ·

2015 全国基础设施安全科学和技术研讨会在河海大学召开

2015 年 6 月 6-7 日, 由江苏省重大基础设施安全保障协同创新中心、江苏省力学学会和河海大学力学与材料学院联合主办的 2015 全国基础设施安全科学和技术研讨会在河海大学召开。河海大学副校长、江苏省重大基础设施安全保障协同创新中心主任朱跃龙教授出席开幕式并致辞。

会议邀请了 20 多位国内外基础设施安全领域的知名专家学者做大会主题报告, 研讨本领域的学术发展动态、最新研究成果和工程技术创新。与会专家还围绕重大基础设施安全保障的关键科学问题、复杂环境下混凝土结构的侵蚀过程与高效防治方法等进行了专题研讨, 形成组织、策划重大项目初步框架。

清华大学、Lille 大学、华盛顿州立大学、同济大学、北京工业大学、中国长江三峡集团公司、南京水利科学研究院、江苏省交通科学研究院、深圳信息学院、东华测试公司等单位的代表及河海大学的教师、研究生代表共 100 余人参加会议。

(本刊编辑部供稿)