

# 导叶可调式液力变矩器流场模拟与 PTV 验证

马文星, 刘浩, 刘春宝

(吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘 要:** 为研究导叶可调式液力变矩器的内部流动特性, 以循环圆直径为 320 mm 导叶可调式液力变矩器作为研究对象. 采用计算流体动力学 (CFD) 方法对其不同开度、不同工况下的内部流动状态进行数值模拟, 并对相应的透明模型进行粒子跟踪测速 (PTV) 试验验证. 同一开度下, 随着转速比的增加, 可调导轮内部液流速度增加, 液流方向与叶片进口方向的夹角增大; 在制动工况时, 叶片工作面有漩涡现象, 而空载工况时, 叶片非工作面有漩涡产生. 对比试验与数值模拟内流场结果, 发现后者可以比较准确地预测导叶可调式液力变矩器的内部流动特性. 该结论为研究导叶可调式液力变矩器内部流动状态, 预测外特性及其设计优化提供了方法和依据.

**关 键 词:** 导叶可调式液力变矩器; 内流场; 工况; 开度; CFD; PTV

**中图分类号:** TH 137.332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)03-0397-06

## Flow Filed Simulation and PTV Verification of the Hydrodynamic Torque Converter with Adjustable Guide Vanes

MA Wen-xing, LIU Hao, LIU Chun-bao

(School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China. Corresponding author: LIU Chun-bao, E-mail: liuanbc@126.com)

**Abstract:** In order to study the internal flow characteristics of a hydrodynamic torque converter with adjustable guide vanes, the hydrodynamic torque converter with 320 mm circular diameter was selected as the research subject. The computational fluid dynamics (CFD) method was applied to calculate the internal fluid flows at different openings and working conditions. Meanwhile, a prototype made by plexiglass was tested by PTV. Then, the internal flows were both obtained using CFD and PTV. Under the same opening, the flow velocity increased with the speed ratio, and the angle between the flow direction and the inlet angle direction of the adjustable guide vane increased as well. In the stall condition, the vortex phenomenon was observed near the vane's working surface. However, at the no-load condition, the vortex phenomenon emerged in the vane's non-working surface. The results showed that the numerical simulation method can perform a comparatively accurate prediction of the internal flow characteristics of the hydrodynamic torque converter with adjustable guide vanes in comparison with the test, which can provide a method and basis for the research on its internal flow state, and the performance prediction and design optimization of the hydrodynamic torque converter with adjustable guide vanes.

**Key words:** hydrodynamic torque converter with adjustable guide vanes; internal flow field; working condition; opening; CFD (computational fluid dynamics); PTV (particle tracking velocimetry)

随着液力传动技术和控制技术的发展和导叶可调式液力变矩器作为调节单元组成的液力控制系

统在风力发电等领域应用日益广泛, 通过调节导轮叶片的角度可以实现对整个传动系统的控制<sup>[1-2]</sup>.

收稿日期: 2015-02-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2014AA041502).

作者简介: 马文星(1962-), 男, 吉林梨树人, 吉林大学教授, 博士生导师.

在液力变矩器早期研究阶段,主要基于一维束流理论对液力变矩器的性能进行研究,通过简化流动模型结合一些经验或半经验计算式来预测液力变矩器的特性.随着液力传动技术的发展,液力变矩器的性能研究已经发展到了三维流动理论阶段<sup>[3]</sup>,同时较多的学者采用 CFD 的方法,对液力变矩器内流场进行研究<sup>[4-6]</sup>.哈尔滨工业大学毕强采用 CFX 软件对导叶可调 LB46 型液力变矩器的单流道模型进行了内流场数值计算<sup>[7]</sup>;重庆大学谢清乐采用 Fluent 软件对 LB46 型液力变矩器的全流道模型进行数值模拟,并与试验测得的原始特性进行比较<sup>[8]</sup>.已有文献只是对导叶可调式液力变矩器的内部流场进行了 CFD 数值模拟,缺乏内流场试验验证,无法证明其计算结果的准确性.目前对导叶可调式液力变矩器多开度、多工况下的内流场进行分析的文献较少.

本文利用 CFD 数值模拟方法,结合试验验证,对导叶可调式液力变矩器多开度、多工况下的内部流场进行分析.选择标准  $k-\varepsilon$  湍流模型,对循环圆直径为 320 mm 的导叶可调式液力变矩器进行 CFD 数值模拟,揭示不同开度、不同工况下,其内部流动状况,分析可调导轮的内部流动规律,结合 PTV 试验验证数值仿真结果的准确性,能够为导叶可调式液力变矩器结构参数优化和性能提高提供依据.

## 1 导叶可调式液力变矩器工作原理

可调式液力变矩器是一种人为或自动调节叶片进出口安装角(叶片转动)而改变其外特性的一类液力变矩器.常用的调节方式有两种,一种是改变泵轮叶片的角度,另一种是改变导轮叶片的角度.导叶可调式液力变矩器是采用调节导轮叶片的方式,改变整个导叶可调式液力变矩器内部流场分布,最终改变其外特性.图 1a 为导叶可调式液力变矩器结构简图,其循环圆直径为 320 mm,与一般的向心涡轮式液力变矩器不同,该导叶可调式液力变矩器由离心式泵轮、离心式涡轮、轴流式固定导轮以及向心式可调导轮构成.向心式可调导轮的叶片能够通过内调节式调节机构,实现可调导叶的自由转动,如图 1b 所示.

## 2 模型建立及仿真

### 2.1 模型建立及网格划分

根据所设计的导叶可调式液力变矩器结构参

数进行三维建模,抽取三维流道模型,如图 2a 所示.非结构网格采用随机的数据结构,有利于网格自适应,容易控制网格的大小和节点的密度,生成高质量的网格.因此,本文采用非结构化网格方法划分网格,如图 2b 所示.泵轮、涡轮、固定导轮和可调导轮的网格数量分别为 390 228, 159 019, 619 152, 1 907 579.

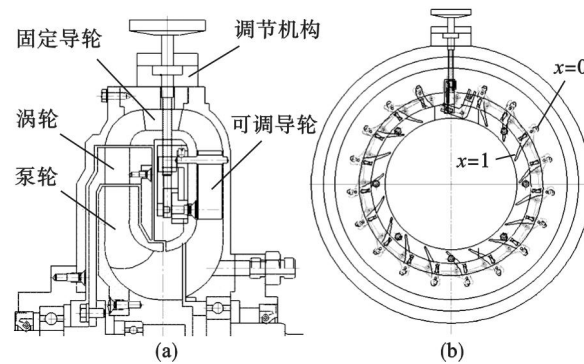


图 1 导叶可调式液力变矩器结构简图  
Fig. 1 Structure diagram of the hydrodynamic torque converter with adjustable guide vanes  
(a)—结构简图; (b)—调节机构.

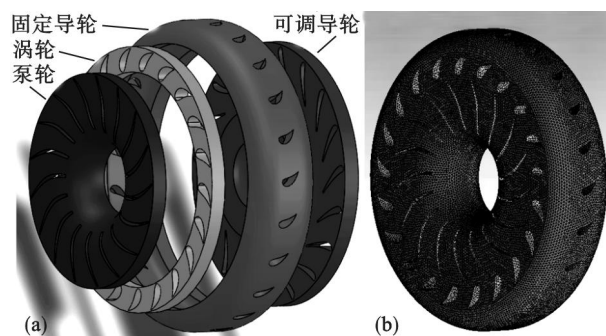


图 2 仿真模型及网格模型  
Fig. 2 Simulation models and meshes  
(a)—流道模型; (b)—网格模型.

普通三元件的液力变矩器,其内部流场只随着工况的变化而变化.导叶可调式液力变矩器,其内部流场除了随着工况的变化外,还随可调导叶的角度变化而变化.目前,对导叶角度变化过程中的液力变矩器内流场进行动态数值模拟还难以实现,只能选定某一固定的导叶角度,然后对其各个工况下的内部流场进行数值模拟.设  $x$  为可调导轮的开度,  $\theta$  为叶片的开启角,  $\theta_{\max}$  为最大开启角,定义开度  $x = \theta / \theta_{\max}$ , 且  $\theta_{\max} = 40^\circ$ . 本文选取两个开度,即  $\theta = 20^\circ, x = 0.5$ , 与  $\theta = 40^\circ, x = 1$ , 如图 3 所示.

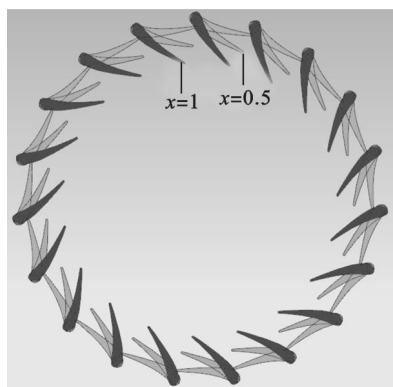


图3 不同开度下的可调导叶

Fig. 3 Adjustable guide vanes at different openings

## 2.2 计算模型及边界条件设置

运用 CFD 数值模拟方法对导叶可调式液力变矩器进行内部流场数值模拟时,由于算法的选择对模拟的效率以及其正确性有很大的影响,因此需要选择合适的算法. 雷诺平均模型中的标准  $k-\varepsilon$  模型,在工程上应用广泛,能够用于模拟导叶可调式液力变矩器三维内部流场<sup>[9-10]</sup>.

本文选用 SIMPLE 算法,湍流模型选择标准  $k-\varepsilon$  模型. 采用滑移网格方法在导叶可调式液力变矩器的各个叶轮进、出口面上都设置为 interface,各自分界面也随时间相应转动,能量通过分界面实时传递,从而实现叶轮间流动参数的实时耦合,其他边界都为 wall. 计算时各叶轮转速按照实际的运动情况定义. 采用非稳态求解器收敛计算,时间步长为  $5 \times 10^{-2} \text{ s}$ ,收敛精度为  $10^{-4}$ . 为便于 CFD 数值模拟结果与 PTV 试验结果对比,CFD 数值模拟时液体介质为水. 定义流体介质水的属性: 密度  $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ,黏度  $\mu = 0.001\,003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,参考压力为  $0.1 \text{ MPa}$ .

## 3 内部流场分析

根据 CFD 计算结果,重点对可调导轮在制动、设计、空载三种典型工况下的流场进行分析;在同一工况下,对比分析了开度变化对可调导轮内部流场的影响.

### 3.1 制动工况

图4为制动工况下,CFD数值模拟所得的不同开度可调导轮内部速度矢量图. 制动工况  $i=0$  时,涡轮静止不动,液流经过固定导轮后冲击可调导轮的工作面,与叶片进口角方向形成一定的正冲角,液流从入口至出口液流方向变化程度较小. 开度  $x=0.5$  时,流道入口处流动状况比较紊乱,有漩涡现象产生,而流道出口处流动分布均匀. 由

于液流进入叶片时冲击叶片产生冲击损失,在叶片进口处形成一个阻滞区,并且延伸到流道内部,阻滞区的高压作用使得液体在叶片工作面入口处形成漩涡现象.

随着开度的增加(开度  $x=1$ ),可调导轮叶片的进出口角均增大,进口液流方向与导轮叶片骨线的夹角减小;由于开度增大使过流面积增大,液流出口速度降低,出口液流角随着开度的增加而增大. 由于开度增大,流道内的液流速度降低,流动情况得到改善,漩涡区域明显减小.

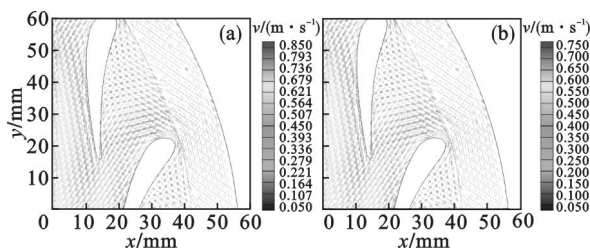


图4 制动工况

Fig. 4 Stall condition

(a)—开度  $x=0.5$ ; (b)—开度  $x=1$ .

### 3.2 设计工况

图5为设计工况下,CFD数值模拟所得的不同开度可调导轮内部速度矢量图. 设计工况  $i=0.5$  时,可调导轮内部流动状态比较理想,流道内的流场分布比较均匀,流动方向基本上是从进口到出口,整个流道内没有出现漩涡等复杂流动现象. 开度  $x=0.5$  时,液体冲击叶片的工作面,流速较低,压力较高,而非工作面流速较高,压力较低,速度变化大.

随着开度的增加(开度  $x=1$ ),可调导轮叶片的进、出口角均增大,可调导轮进口速度变化较小;出口液流角随着叶片出口角的增大而增大,出口液流速度明显降低.

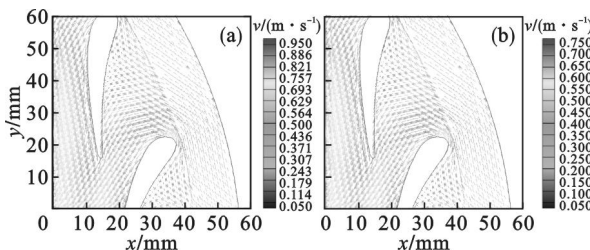


图5 设计工况

Fig. 5 Design condition

(a)—开度  $x=0.5$ ; (b)—开度  $x=1$ .

### 3.3 空载工况

图6为空载工况下,CFD数值模拟所得的不同开度可调导轮内部速度矢量图. 空载工况  $i=1$  时,叶片非工作面出现了明显的漩涡现象,叶片工



作面的流动则相对均匀,叶片入口处液流的冲角较大,液流从进口至出口的液流方向变化程度最大.开度  $x=0.5$  时,液流以较大的流速经过叶片入口处的圆头时,在叶片非工作面产生分离,使得叶片非工作面入口处的压力较小,附近液流相对压力较高从而导致漩涡的产生.在叶片中段以后,由于叶栅的作用逐渐加强,漩涡规模受到抑制不能扩展,从叶片中段到出口流道内液流趋向平缓.

随着开度的增加( $x=1$ ),可调导轮叶片的进、出口角均增大,出口液流角随着开度的增加而增大;液流进口速度变化较小,出口速度明显降低.随着开度的增加,叶片非工作表面的漩涡区域明显增大.

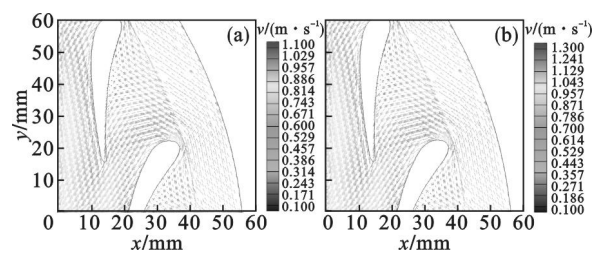


图 6 空载工况

Fig. 6 No-load condition

(a)—开度  $x=0.5$ ; (b)—开度  $x=1$ .

根据上述三种典型工况下的流场分析结果,在同一工况下,随着开度的增加,液流通过固定导轮后,进入可调导轮的速度基本不变,出口速度降低,出口速度的方向随着叶片角度的变化而变化.同一工况下,不同开度可调导轮内部流场结构类似.

## 4 仿真与试验对比分析

### 4.1 PTV 试验测试

粒子跟踪测速 (particle tracking velocimetry, PTV) 作为一种先进的非接触测量手段,已经被广泛应用于复杂元件的内部流场试验研究<sup>[11-13]</sup>. 试验测试不仅能了解液力变矩器流场的基本流动过程,还能为数值计算提供边界条件,并对数值计算结果的可靠性、准确性进行验证<sup>[14-15]</sup>.

对所设计的透明导叶可调式液力变矩器进行了 PTV 内流场试验. 根据图 1 所示导叶可调式液力变矩器结构图,按 1:1 比例制作了相应的实物模型,如图 7 所示. 其循环圆直径为 320 mm,壳体及叶片材料均为有机玻璃,其余为不锈钢 1Cr13. 导叶可调式液力变矩器运转时,液流在泵轮、涡轮、固定导轮及可调导轮间循环流动. 具体测试方法、过程和结果参见文献[16].

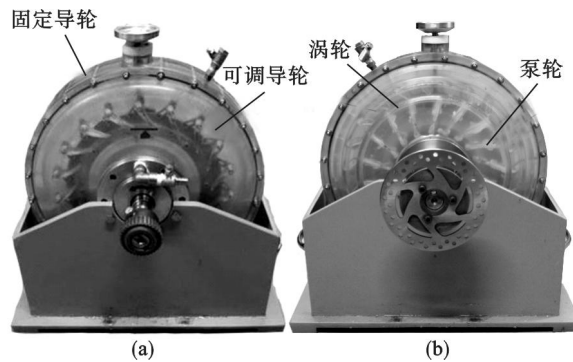


图 7 透明导叶可调式液力变矩器

Fig. 7 Transparent hydrodynamic torque converter with adjustable guide vanes

(a)—输入端; (b)—输出端.

试验测量系统由机械部分、光学部分、图像采集与显示部分组成. 机械部分由交流电机、盘式制动器、齿轮泵、转速测量仪等组成. 光学部分由 300 mW 氩离子激光器、光学组件、调速电机和脉冲盘等组成,用于产生宽为 1~2 mm 的连续可调激光脉冲片光源. 通过调节调速电机控制脉冲盘能够调控示踪粒子在流场中的曝光时间. 选用铝粉作为示踪粒子,粒径约为 0.04 mm. 图像采集与显示部分包括高清摄像机、图像采集卡和与之配套的采集软件.

### 4.2 CFD 仿真结果与 PTV 试验对比分析

由于同一工况下,不同开度可调导轮内部流动规律类似,在进行 CFD 仿真与 PTV 试验对比分析时,只选取开度  $x=0.5$  为例进行对比分析.

#### 4.2.1 制动工况

图 8 为制动工况下开度  $x=0.5$  时,CFD 数值模拟与 PTV 试验所得的可调导轮内部速度矢量图对比. 比较发现其内部流动规律基本相符:入口液流冲击可调导叶的工作面,与叶片进口角方向形成一定的正冲角,流道入口处流动状况比较紊乱,而流道出口处流动分布均匀. 在 CFD 仿真速度矢量图 A 处,液体流动较为紊乱,形成漩涡,对应的试验速度矢量图 B 处也有明显的漩涡现象.

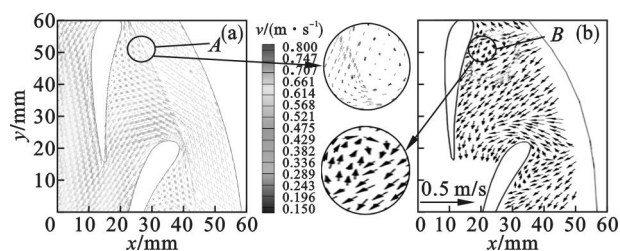


图 8 制动工况试验和计算结果对比

Fig. 8 Comparison of experimental and computational results in the stall condition

(a)—计算结果; (b)—试验结果.

### 4.2.2 设计工况

图9为设计工况下开度 $x=0.5$ 时,CFD数值模拟与PTV试验所得的可调导轮内部速度矢量图对比.比较发现其内部流动规律基本相符:入口液流冲击可调导叶的工作面,沿着叶片弯曲方向,由叶片入口流向叶片出口,流道内速度分布比较均匀,液流的冲击较小,没有出现漩涡等复杂流动现象.在CFD数值模拟速度矢量图C处,流动分布均匀,与对应的PTV试验速度矢量图位置D处流动现象一致.

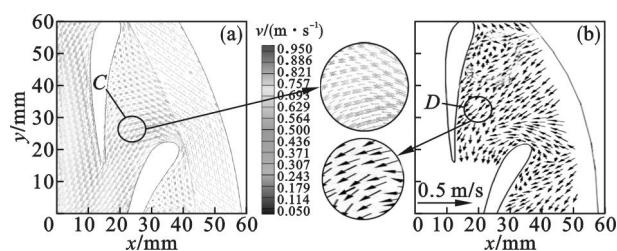


图9 设计工况试验和计算结果对比

Fig. 9 Comparison of experimental and computational results in the design condition

(a)—计算结果; (b)—试验结果.

### 4.2.3 空载工况

图10为空载工况下开度 $x=0.5$ 时,CFD数值模拟与PTV试验所得的可调导轮内部速度矢量图对比.比较发现其内部流动规律基本相符:入口液流冲角较大,液流以较大的速度流过叶片入口处时,在CFD仿真速度矢量图E处产生明显的漩涡流动现象.随着液流由入口流向出口,叶栅的作用逐渐加强,叶片工作面的流动则相对均匀.在对应的PTV试验速度矢量图F处同样可以看到叶片非工作面入口附近的漩涡现象.

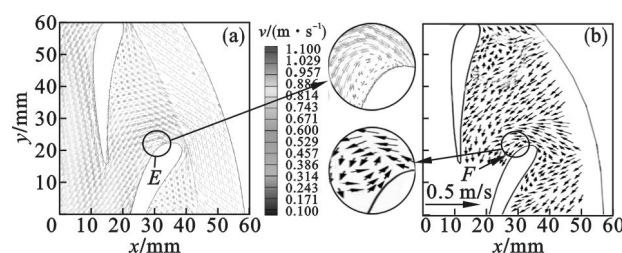


图10 空载工况试验和计算结果对比

Fig. 10 Comparison of experimental and computational results at no-load condition

(a)—计算结果; (b)—试验结果.

对比结果表明,采用雷诺平均模型中标准 $k-\varepsilon$ 模型的CFD方法可以准确预测导叶可调式液力变矩器内部流场分布情况.通过观察内部流场的复杂流动情况,诸如紊流、漩涡等,分析得到了流场能量损失原因.可以通过改变其结构参数、

减小内部流场损失来提高液力变矩器性能.由于液力变矩器内特性决定了其外特性,CFD数值模拟方法能够为优化导叶可调式液力变矩器结构参数,提高其外特性提供指导.

## 5 结 论

1) 通过对CFD计算结果分析可知:制动工况下,随着开度增大,漩涡流动区域变小;设计工况下,开度变化对流动状态影响较小;空载工况下,随着开度增大,漩涡流动区域明显增大.

2) 将PTV试验与CFD数值模拟对比分析发现,在制动工况和空载工况下,CFD数值模拟速度矢量图和PTV试验结果矢量图均能观察到明显的漩涡现象,而设计工况流动状态比较稳定.两种方法得到的可调导轮内部流动变化趋势基本相同,故CFD数值模拟方法可以有效预测导叶可调式液力变矩器的内部流动规律,为其结构设计优化提供理论依据.

## 参考文献:

- [1] Vries E O. Drive and innovation; the DeWind D8. 2 with Voith WinDrive[J]. *Renewable Energy World*, 2007, 10(2): 55.
- [2] Muller H, Poller M, Basteck A, et al. Grid compatibility of variable speed wind turbines with directly coupled synchronous generator and hydro-dynamically controlled gearbox[C]//The Sixth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms. Delft; Brussels, 2006: 307-315.
- [3] 马文星,何延东,刘春宝.液力传动研究现状分析与展望[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(7): 51-55.  
(Ma Wen-xing, He Yan-dong, Liu Chun-bao. Situation and prospects of research on hydrodynamic transmission[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(7): 51-55.)
- [4] Kim B S, Ha S B, Lim W S, et al. Performance estimation model of a torque converter part I: correlation between the internal flow field and energy loss coefficient[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2008, 9(2): 141-148.
- [5] Jung J H, Kang S, Hur N. A numerical study of a torque converter with various methods for the accuracy improvement of performance prediction[J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 2011, 11(3): 261-268.
- [6] Wozniak M, Pawelski Z, Dela F P, et al. The mutual influence and blade-row interaction between pump and turbine in a hydrodynamic torque converter[J]. *Archiwum Motoryzacji*, 2012(1): 83-93.
- [7] 毕强. LB46型可调式离心涡轮变矩器内流场数值计算及

- 分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- (Bi Qiang. Numerical analysis on LB46 adjustable guide vane centrifugal turbine hydrodynamic torque converter [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2011.)
- [8] 谢清乐,李奇敏. 导叶可调式液力变矩器的内流场数值分析[J]. 计算机仿真,2013,30(8):135-138.
- (Xie Qing-le, Li Qi-min. Numerical analysis on internal flow field of adjustable guide turbine torque converter [J]. *Computer Simulation*,2013,30(8):135-138.)
- [9] 刘春宝,马文星,朱喜林. 液力变矩器三维瞬态流场计算[J]. 机械工程学报,2010,46(14):161-166.
- (Liu Chun-bao, Ma Wen-xing, Zhu Xi-lin. 3D transient calculation of internal flow field for hydrodynamic torque converter[J]. *Journal of Mechanical Engineering*,2010,46(14):161-166.)
- [10] Fuente P D L, Stoff H, Volgmann W, et al. Numerical analysis into the effects of the unsteady flow in an automotive hydrodynamic torque converter [C]// Proceedings of the World Congress on Engineering. London: Newswood Limited,2011:2405-2410.
- [11] Mikheev A V, Zubitsov V M. Enhanced particle-tracking velocimetry (EPTV) with a combined two-component pair-matching algorithm [J]. *Measurement Science and Technology*,2008,19(8):817-822.
- [12] Stanislas M, Okamoto K, Kahler C J, et al. Main results of the second international PTV challenge [J]. *Experiments in Fluids*,2005,39(2):170-191.
- [13] Kreizer M, Ratner D, Liberzon A. Real-time image processing for particle tracking velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*,2010,48(1):105-110.
- [14] Adrian R J. Particle image velocimetry: a practical guide [M]. Berlin: Springer-Verlag,2007:90-99.
- [15] Cavazzini G. The particle image velocimetry-characteristics, limits and possible applications[EB/OL]. (2012-05-23) [2016-03-15]. <http://www.intechopen.com/books/the-particle-image-velocimetry-characteristics-limits-and-possible-applications>.
- [16] Ma W X, Liu H, Liu C B, et al. Measurement and analysis of the internal flow field in the hydrodynamic torque converter with adjustable guide vanes [J]. *Advances in Mechanical Engineering*,2015,7(6):1-13.

(上接第 396 页)

#### 参考文献:

- [1] Luiz F P F. A bit-rock interaction model for rotary-percussive drilling [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*,2011,48(5):827-835.
- [2] Bu C G, Qu Y G, Cheng Z Q, et al. Numerical simulation of impact on pneumatic DTH hammer percussive drilling [J]. *Journal of Earth Science*,2009,20(5):225-232.
- [3] Tanaino A S, Lipin A A. State and prospects of the percussive-rotary blasthole drilling in quarries[J]. *Journal of Mining Science*,2004,40(2):188-198.
- [4] Yin Q L, Peng J M, Bo K, et al. Study on dust control performance of a hammer drill bit[J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*,2013,27(6):393-406.
- [5] Kirk G, Muzondo T, Hamey D. Improved grade control using reverse circulation drilling at Mogalakwena Platinum Mine, South Africa [C]// Proceedings of the 8th International Mining Geology Conference 2011. Queenstown: Australasian Institute of Mining and Metallurgy,2011:329-340.
- [6] Potts J D, Reed W R. Field evaluation of air-blocking shelf for dust control on blasthole drills[J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*,2011,25(1):32-40.
- [7] 殷其雷,殷琨,柳鹤,等. 潜孔锤反循环钻进技术在某水电站的试验应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2014,44(3):961-968.
- (Yin Qi-lei, Yin Kun, Liu He, et al. Application test of DTH hammer reverse circulation drilling technique in a hydropower station [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*,2014,44(3):961-968.)
- [8] Rusly E, Aye L, Charters W W S, et al. CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system [J]. *International Journal of Refrigeration*,2005,28(7):1092-1101.
- [9] 范黎明,殷琨,张永光,等. 基于引射原理的侧吸式反循环钻头结构参数数值研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(1):220-226.
- (Fan Li-ming, Yin Kun, Zhang Yong-guang, et al. Numerical investigation of geometry parameters on side-ejector DTH hammer RC bit [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*,2011,42(1):220-226.)