

多流动区域耦合算法在液力元件中的应用

刘春宝¹, 马文星¹, 褚亚旭²

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022; 2. 北华大学 机械学院, 吉林省 吉林市 132011)

摘要: 讨论了多流动区域耦合算法及其在液力元件中的具体应用, 给出了液力变矩器和液力耦合器的不同转速、多叶轮流场耦合计算的应用实例。计算结果表明: 多流动区域耦合算法比液力元件通过上下游传递边界条件的单个叶轮算法更为先进。基于三维流场数值解计算出液力变矩器与液力耦合器特性, 将其与试验结果进行对比后可知, 多流动区域耦合算法具有更高的计算精度。

关键词: 流体传动与控制; 液力元件; 计算流体力学; 耦合算法; 液力变矩器; 液力耦合器

中图分类号: TH137.332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2008)06-1342-06

Application coupling algorithm for multi-flow-region in hydrodynamic components

LIU Chun-bao¹, MA Wen-xing¹, CHU Ya-xu²

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Mechanical, Beihua University, Jilin 132011, China)

Abstract: The coupling algorithms for multi-flow regions and its application in the hydrodynamic components are discussed. As application examples, the coupling algorithm was used in calculation of flow field in the multi-impeller of the torque converter and the hydrodynamic coupling under different rotation speeds. It was shown that for the hydrodynamic components, the multi-flow-region coupling algorithm is better than the single-impeller algorithm supported by up-stream and down-stream boundary conditions. The performances of the torque converter and the hydrodynamic coupling were calculated based on numerical solutions of 3-dimensional flow field, and their results were compared with test results, showing that the coupling algorithm is superior in calculation precision.

Key words: fluid transmission and control; hydrodynamic component; computational fluid dynamics (CFD); coupling algorithm; torque converter; hydrodynamic coupling

液力变矩器、液力耦合器中叶轮转速不同、叶片及流道形状复杂、动叶轮与静叶轮相互影响等因素造成其内部流动极其复杂, 利用数值模拟进行研究是较为现实与经济的方法。随着多流动区

域耦合算法的出现, 使得液力元件内部流场整体模拟成为可能^[1-3]。作者利用多流动区域耦合算法中的混合平面法和滑动网格法分别对液力变矩器和液力耦合器内部流场进行数值计算, 基于三

收稿日期: 2007-09-21.

基金项目: “863”国家高技术研究发展计划项目(2007AA05Z256)。

作者简介: 刘春宝(1980-), 男, 博士研究生。研究方向: 液力传动与自动变速。E-mail: liuanbc@126.com

通信作者: 马文星(1962-), 男, 教授, 博士生导师。研究方向: 液力传动与自动变速。E-mail: mawx@jlu.edu.cn

维流动计算结果预测液力变矩器与液力偶合器的性能,将计算性能与试验性能比较后验证了所采用的耦合算法具有较高的准确度。

1 多流动区域耦合算法

1.1 多运动参考系法

多运动参考系法是稳态算法,它根据不同的转速或移动速度,将整个求解域划分成不同子域,然后在子域建立各自的运动参考坐标系,子域的控制方程也关于对应运动参考坐标系建立。在两子域间的边界,子域控制方程的扩散项及其他项需要邻近子域的速度值,因此在子域的交接面上强制流动速度的连续,以进行子域间信息传递。多运动参考系方法属于近似算法,但在很多时均流场的计算中它提供了合理的模型,如文献[4]中推进叶片和导向叶片之间交互作用相对较弱、无大范围瞬态作用的搅拌器流场计算;文献[5]中转子和定子之间交互作用相对较弱的涡轮机械流场计算。多运动参考系法还可用于滑动网格法的初始条件。由于强制流动速度一致,多运动参考系法主要用于计算相邻的子区域边界上的流动状况接近一致的情况,否则用该方法求解将没有意义。

1.2 混合平面法

当子域边界流动不一致,且应用精确瞬态模拟的滑动网格法不可行时(如多级透平机械、叶轮中具有多种叶片),可应用混合平面法。它也属于稳态算法。计算时,不同子域具有独立的网格,子域间流动信息通过在相邻子域边界设置的混合平面进行传递。对于多级透平机械的流场数值模拟,混合平面法比较适合。

在指定的迭代间隔里,混合平面法通过对设置混合平面的上游出口与下游入口的流动数据做周向平均将时变性去除,以进行稳态计算,计算顺序可描述为:

(1)获得混合平面上游出口和下游入口区域的流场求解结果;

(2)对上游出口和下游入口区域的边界流动参数作周向平均,获得用于更新边界条件的流动信息;

(3)将获得的流动信息传递给混合平面上游出口和下游入口作为新的边界条件;

(4)重复(1)~(3)步直到计算收敛。

只要混合平面附近没有明显的回流,混合平面法就可以合理近似地求解流体问题。

1.3 滑动网格法

滑动网格法属于瞬态计算方法。滑动网格法需要在不同计算子域间设置网格分界面,计算时相邻子域将按照运动定义沿网格分界面进行滑动。该方法非常适合模拟定子/转子类的运动^[6]。如果子域同时平移和旋转,只有在旋转轴或平移方向一致时才能模拟。子域间的流动参数传递通过设置网格分界面完成。计算中网格是滑移的,分界面也就随时间变化,在每一新的时间步长内需确定子域间新的网格分界面,通过实时的新的分界面的通量传递实现不同子域间实时耦合。图1说明了有相同旋转轴的两子域滑移前后分界面变化情况。

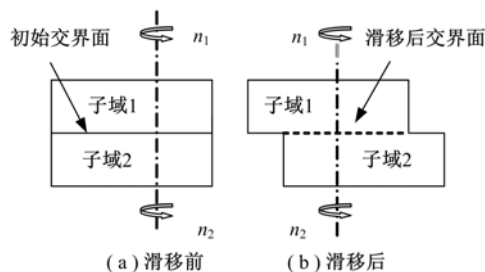


图1 滑动网格示意图

Fig. 1 Schematic illustrating the sliding meshes

滑动网格模拟的瞬态问题大部分是时间周期性的,即计算区域的流动参数是周期复现的。设 T 是瞬态计算的周期,则计算区域的一些流动特性函数 Φ 为

$$\Phi(t) = \Phi(t + nT), n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

当一个求解域的解在相邻周期内变化很小($<5\%$)或没有变化,就达到了时间周期的求解。

文献[7]分别应用三种方法对离心泵内流场进行了计算,可得三种方法的一些特点:多运动参考系法是最简单的方法,计算容易实现,但其强制速度连续限制了应用;混合平面法计算时混合平面上的回流造成不容易收敛,周向平均也去掉了混合平面附近的流场梯度,但其有良好的工程应用价值;滑动网格法可以捕捉到流场随时间变化的信息,也可对问题进行深入细致的研究,但其瞬态计算非常耗费时间和计算机资源。

2 混合平面在液力变矩器中的应用

2.1 计算方法

以YJ350液力变矩器为计算模型,其主要角度参数如表1所示。

表 1 YJ350 液力变矩器几何参数
Table 1 Geometrical parameters for torque converter YJ350

参数	泵轮	涡轮	导轮
进口角度/(°)	133	46	103
出口角度/(°)	90	152	30
叶片数/个	21	25	17

液力变矩器中三个不同转速的叶轮同时工作,定义流道网格分界面及确定计算周期困难,难以应用滑动网格法,因此应用混合平面法进行计算。计算中假设叶轮各个流道流动情况相同,按照绕流法取出单个流道作为计算模型,在流道切割面定义周期性边界条件。计算中混合平面定义见图 2,在泵轮、涡轮和导轮的边界都设置混合平面,以进行叶轮间流动参数的传递。图 3 为计算流道的网格模型。

在流道入口设置速度边界条件,出口为压力边界条件,流道的叶片表面以及内、外环表面为相

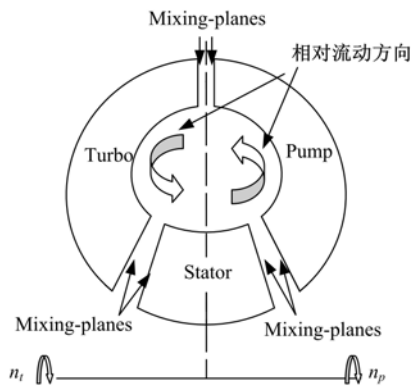


图 2 液力变矩器计算中混合平面设置示意图

Fig. 2 Schematic illustrating the mixing planes in torque converter



图 3 液力变矩器计算流道网格模型

Fig. 3 Three-dimensional computational meshes model of torque converter

对边界内部网格无滑移的壁面条件。对近壁面的附面层采用壁面函数法处理。压力-速度耦合算法选用 SIMPLE 算法,湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型。对于控制方程的离散格式,对流项选择二阶上游迎风格式,而有限体积法对扩散项总是采用中心差分格式。

2.2 流场计算结果

计算中泵轮输入转速保持 2000 r/min 不变。图 4 为速比 $i=0.8$ 时计算流道整体速度分布,图 5 为 $i=0.8$ 工况压力分布,计算结果清楚地说明了液力变矩器能量的循环传递过程:具备一定速度和压力的工作介质首先进入泵轮,泵轮与发动机相连,获得发动机输出的能量,工作介质获得动能、压能,速度与压力相应地增大;工作介质从泵轮进入涡轮,高速地冲击涡轮叶片使其旋转对负载做功,能量输出,因此在涡轮流道中工作介质速度与压力逐步下降;导轮固定不动,在导轮中没有能量传递,只是改变了工作介质的运动方向,因此在导轮中工作介质速度值和压力变化很小。工作

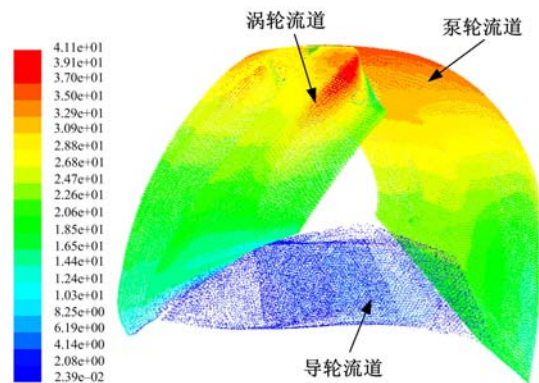


图 4 计算流道整体速度分布图 ($i=0.8$)

Fig. 4 Velocity of flow field when speed ratio ($i=0.8$)

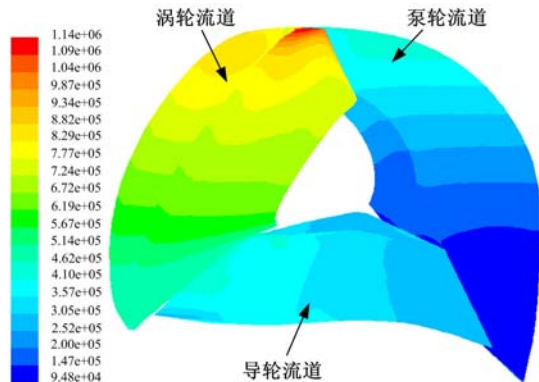


图 5 计算流道整体压力分布图 ($i=0.8$)

Fig. 5 Pressure of flow field when speed ratio ($i=0.8$)

介质在由导轮流回泵轮,不断完成上述能量传递过程。图 6 为数值模拟出的计算流道中的流线图。

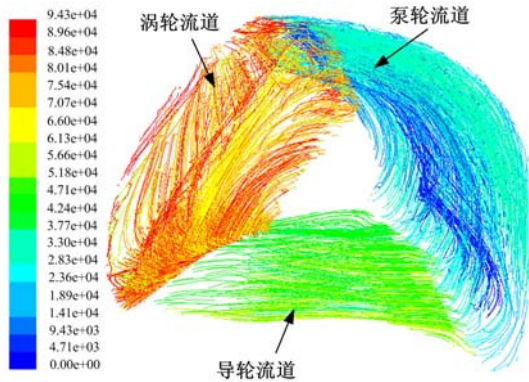


图 6 流道中流线图

Fig. 6 Stream lines in torque converter

2.3 计算结果与试验结果对比

性能计算的关键是求得各叶轮的转矩,基于流场数值模拟得到的流场压力和速度解,可求得计算域壁面网格单元上压力与黏性力等,在对所有叶片表面单元上的力矩(相对于旋转轴)进行积分可得到叶轮转矩。

计算出叶轮转矩后,根据以下公式计算变矩器特性参数,然后绘制出原始特性曲线。

$$\begin{cases} K = -T_T / T_B \\ C = n_B / \sqrt{T_B} \\ \eta = K \cdot i \end{cases} \quad (2)$$

式中:K 为变矩比;C 为容量系数; η 为效率。

如图 7 所示,将特性预测曲线与变矩器性能实验曲线进行对比后可知,二者误差不超过 7%。产生误差的原因有:计算模型对实际情况进行了一定的简化,而混合平面法本身也是稳态近似计

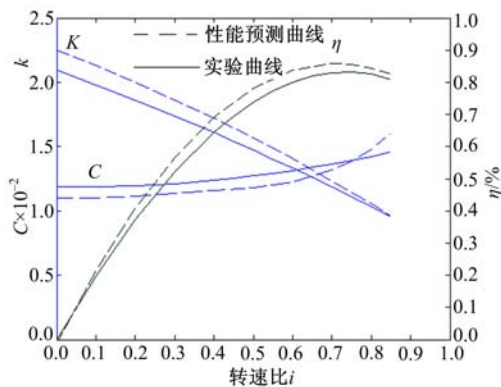


图 7 性能比较曲线

Fig. 7 Comparison of prediction characteristics with experimental results

算;对湍流控制方程的数值模拟依靠湍流模型封闭,而现有湍流模型还不能考虑到所有非定常因素对湍流结构影响;计算域形状复杂,网格间尺寸差异造成网格单元间数据传递时通常有数值损失等。

3 滑动网格在液力偶合器中的应用

3.1 计算方法

计算中液力偶合器几何参数为:长方形循环圆,最大有效直径 $D=355$ mm,内径 $d=120$ mm;平板直叶片、厚度 3 mm,叶片数 12;泵轮与涡轮形状相同。同样按照绕流法取出单个流道作为计算域,相应地在流道切割面定义周期性边界条件。图 8 为计算域几何模型,图 9 为网格模型。

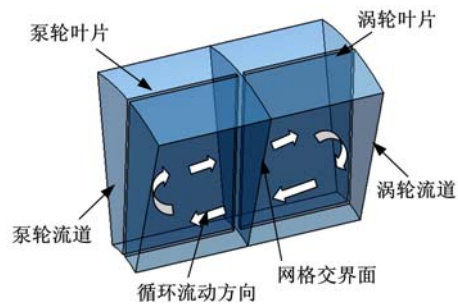


图 8 液力偶合器流道几何模型

Fig. 8 Geometrical model of hydrodynamic coupling

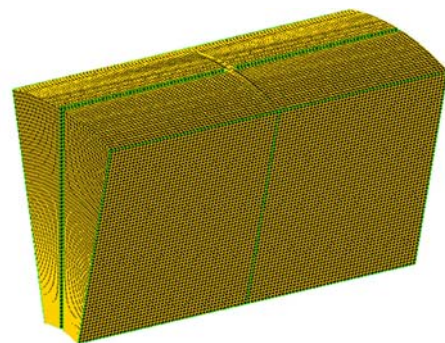


图 9 液力偶合器流道网格模型

Fig. 9 Three-dimensional computational meshes model of hydrodynamic coupling

液力偶合器叶片虽然是平面直叶片,但其内部为复杂的三维流动,循环流动方向如图 8 所示。偶合器循环流动会造成叶轮交接面上工作介质流进、流出都存在,导致无法设定固定的进口、出口边界条件,也就不能应用多运动参考系法和混合平面法,因此,用滑动网格法进行液力偶合器流场计算较为适合和准确,其在计算中只需在泵轮与

涡轮交接面设置网格分界面,其他边界都为壁面条件。

计算时定义计算域在一个周期 T 内运动 $\pi/6$,根据泵轮、涡轮转速设定不同的时间步数,进而确定时间步长。例如,泵轮转速 $n_B=800 \text{ r/min}$ 、 $n_T=0$,则 T 为

$$T = \theta/\omega = \frac{T}{(2\pi n_B)/60} = 0.00625 \text{ s}$$

设周期 T 内有 30 个时间步,则时间步长 t 为

$$t = T/30 = 2.083 \times 10^{-4} \text{ s}$$

图 10 为计算域一个周期内位置变化。

压力-速度耦合算法选择 SIMPLE 算法、湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型、离散格式选择一阶上迎风格式进行计算。

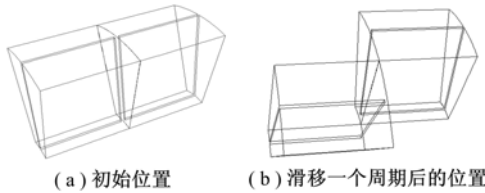


图 10 周期 T 内计算域的滑动情况

Fig. 10 Computational zones sliding during a period

3.2 计算结果

图 11、图 12 为起动工况 ($i=0, n_B=3000 \text{ r/min}$) 耦合器计算流道的速度与压力分布图。如图所示,泵轮流动中速度与压力明显大于涡轮。因为泵轮高速旋转,泵轮叶片对工作介质做功,其速度、压力增高,同时在离心力作用下高速流从交界面上部进入涡轮。图 12 中压力出现负值是正常的,因为液力耦合器工作中没有备压,高速旋转时可能产生负压。

图 13、图 14 为 $i=0.8$ 时计算的流道速度与

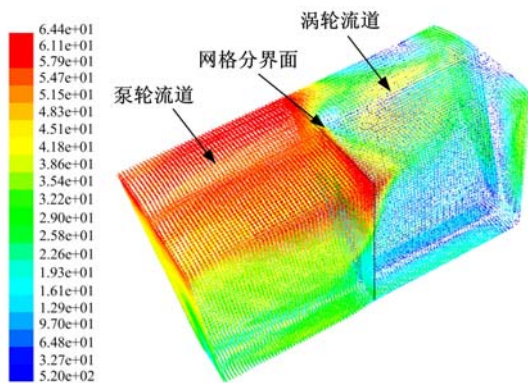


图 11 耦合器计算流道速度分布图 ($i=0, n_B=3000 \text{ r/min}$)

Fig. 11 Speed ratio $i=0$ velocity of flow field

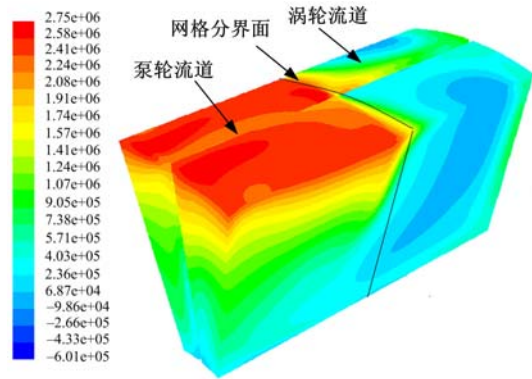


图 12 耦合器计算流道压力分布图 ($i=0, n_B=3000 \text{ r/min}$)

Fig. 12 Speed ratio $i=0$ pressure of flow field

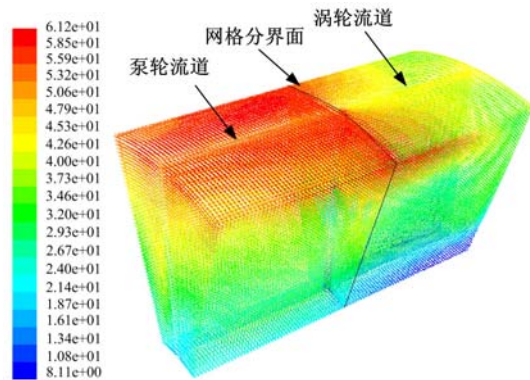


图 13 耦合器计算流道速度分布图 ($i=0.8$)

Fig. 13 Speed ratio $i=0.8$ velocity of flow field

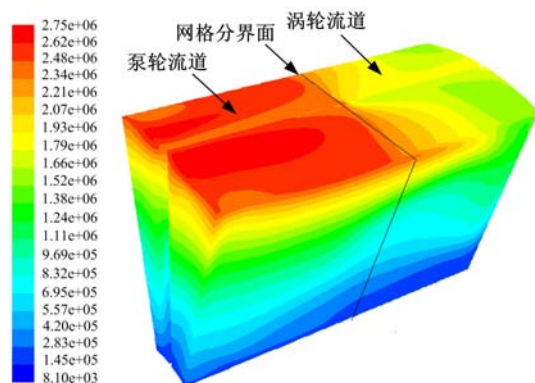


图 14 耦合器计算流道压力分布图 ($i=0.8$)

Fig. 14 Speed ratio $i=0.8$ pressure of flow field

压力分布。与起动工况相比,涡轮流道中速度、压力明显增大,且此时压力分布中已经没有负值。工作介质进入涡轮时速度较大,之后由于受到涡轮叶片的阻力速度迅速下降,但是在靠近涡轮后壁的液流速度又迅速增大,这是由于一部分液流直接冲击到后壁所致。

3.3 计算结果与试验结果对比

液力偶合器性能计算同样要求得叶轮上转矩。液力偶合器中泵轮、涡轮转矩数值几乎相等、方向相反。图 15 为起动工况、泵轮输入转速 3000 r/min、时间步长 2.7778×10^{-5} s 情况下,数值计算的泵轮转矩。如图所示,经过一定时间步数计算后,转矩 T 已经随时间进行周期性的变化,可以进行数据采集。

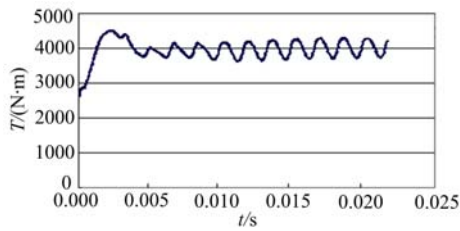


图 15 计算的泵轮转矩

Fig. 15 The torque in pump passage of hydrodynamic coupling

液力偶合器泵轮转矩系数 λ_B 为

$$\lambda_B = \frac{T_B}{\rho g n_B^2 D^5} \quad (3)$$

式中: T_B 为泵轮转矩, $N \cdot m$; n_B 为泵轮转速, r/min ; D 为偶合器最大有效直径, m 。

将三维流动计算得到的偶合器转矩系数与试验结果进行对比,验证了数值计算方法及计算结果的准确性。如图 16 所示,起动工况二者最大误差不超过 9%,其他工况二者误差小于 5%。

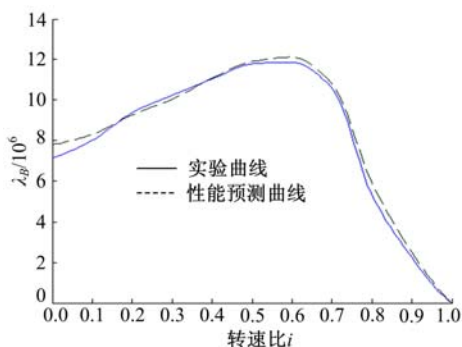


图 16 液力偶合器性能比较曲线

Fig. 16 Comparison of prediction characteristic with experimental result

4 结束语

应用 CFD 多流动区域耦合计算方法中的混合平面法、滑动网格法分别对液力变矩器、液力偶合器内部三维黏性流动进行了数值求解,得到了

内部流场的速度、压力数值解。基于三维流动计算结果计算出液力变矩器及液力偶合器叶轮转矩,进而计算出性能。分别将液力变矩器、液力偶合器预测性能与试验性能进行对比,二者误差在许可范围内,说明了多流动区域耦合算法在液力元件中应用的有效性。

参考文献:

- [1] Yang Seung-han, Shin Seh-yun, Incheol Bae, et al. A computer-integrated design strategy for torque converters using virtual modeling and computational flow analysis[C]//SAE 1999-01-1046.
- [2] Lee C W, Jang W K, Lee J M, et al. Three-dimensional flow field simulation to estimate performance of a torque converter[C]//SAE 2000-01-1146.
- [3] 李雪松. 车辆液力减速器三维流场分析与特性计算[D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2006. Li Xue-song. Analysis on three-dimension flow field and characteristics calculation of vehicular hydrodynamic retarder[D]. Changchun: College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, 2006.
- [4] 包雨云, 高正明, 施力田. 多相流搅拌反应器研究进展[J]. 化工进展, 2005, 24(10): 1124-1130. Bao Yu-yun, Gao Zheng-ming, Shi Li-tian. Recent research progress of multiphase stirred reactors[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2005, 24(10): 1124-1130.
- [5] 杨军虎, 张炜, 王春龙, 等. 潜水轴流泵全流道三维湍流数值模拟及性能预估[J]. 排灌机械, 2006, 24(4): 5-9. Yang Hu-jun, Zhang Wei, Wang Chun-long, et al. Numerical simulation of turbulent flow through full passage of submersible axial pump and performance predictions[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2006, 24(4): 5-9.
- [6] 周莉, 席光, 邱凯, 等. 搅拌器内动/静叶相干非定常流场的数值分析[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(9): 907-911. Zhou Li, Xi Guang, Qiu Kai, et al. Numerical analysis of the unsteady rotor/stator interaction flow in an agitator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(9): 907-911.
- [7] 唐辉, 何枫. 离心泵内流场数值模拟[J]. 水泵技术, 2002(3), 3-7. Tang Hui, He Feng. Numerical simulation of three-dimension flow in centrifugal pump[J]. Pump Technology, 2002(3), 3-7.