

# 液力耦合器三维瞬态流场大涡模拟与特性预测<sup>\*</sup>

褚亚旭 刘春宝 马文星

**【摘要】** 采用大涡模拟、流动控制方程耦合求解法及多可动区域计算的滑动网格法,对液力耦合器内部瞬态三维流动控制方程组进行了耦合求解。对三维流场模拟结果进行深入分析,以进一步了解耦合器内部流动规律,优化设计其结构。同时,根据三维流场数值解计算了各个工况下液力耦合器叶轮转矩,进而预测其性能,将性能预测结果与实验结果进行比较,二者误差在7%以内,验证了大涡模拟方法及特性预测的准确,说明采用的液力耦合器流场的模拟方法具有良好的工程应用价值。

**关键词:** 液力耦合器 大涡模拟 特性预测

**中图分类号:** TH137.331

**文献标识码:** A

## Large Eddy Simulation of the 3 - D Transient Flow Field in Hydrodynamic Coupling and Characteristics Prediction

Chu Yaxu<sup>1</sup> Liu Chunbao<sup>2</sup> Ma Wenxing<sup>2</sup>

(1. Beihua University, Jilin 132021, China 2. Jilin University, Changchun 130025, China)

### Abstract

The transient control equations of 3 - D flow in hydrodynamic coupling were coupled calculated by using the methods of large eddy simulation (LES), flow control equation coupled solution, and sliding mesh method for multi-flow regions in CFD software. In order to learn the flow laws of flow field deeply and optimize the structure, the numerical solution of the 3 - D flow field has been analyzed. The torque in each impeller of hydrodynamic coupling was figured out based on the numerical solution of the 3 - D flow field. Then the characteristic of hydrodynamic coupling was predicted. The prediction characteristic has been compared with the experimental result; it is found that the error between them is less than 7%, which could prove the effectiveness of the numerical simulation method and characteristic prediction. Then the conclusion has been drawn that the numerical simulation method for the flow field of hydrodynamic coupling has applicable value in engineering.

**Key words** Hydrodynamic coupling, Large eddy simulation, Characteristic prediction

### 引言

液力耦合器具有轻载起动、过载保护、减缓冲击等优点,应用于大惯量、难启动机械上时节能显著。液力耦合器内部流动为非常复杂的黏性、三维、非定常流动,其存在的分离流动、漩涡运动等流动现象对自身性能及安全性都有较大影响<sup>[1]</sup>,因此深入认识

其内部真实流动发生、发展规律,对于缩短设计周期、降低设计风险、改善及提高性能具有重要意义。液力耦合器流场实验测试费用昂贵,利用数值模拟进行流场研究是比较经济的途径。目前,数值模拟常用的湍流模型多以雷诺时间平均为基础得到,而雷诺时均的过程忽略了湍流若干细节,所以封闭的雷诺时均方程对于模拟流动分离、涡旋、扩散等现象

收稿日期: 2007 - 07 - 12

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50175042)

褚亚旭 北华大学机械工程学院 教授, 132021 吉林省吉林市

刘春宝 吉林大学机械科学与工程学院 博士生, 130025 长春市

马文星 吉林大学机械科学与工程学院 教授 博士生导师

功能有限<sup>[2]</sup>。

本文结合计算机技术及计算流体动力学(CFD)发展,基于CAD/CFD技术平台对具有平板叶片的普通型液力耦合器内部流场进行三维瞬态模拟。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 大涡模拟法

大涡模拟是介于直接数值模拟(DNS)与雷诺平均法(RANS)之间的一种湍流数值模拟方法,目前,其研究与应用为国内外CFD领域的研究热点<sup>[3]</sup>,其基本思想是:放弃对全尺度范围上涡的瞬时运动的模拟,而用瞬时的N-S方程组直接模拟湍流中的大于所用网格尺度的涡;不直接模拟小尺度涡,而小尺度涡对大尺度涡运动的影响通过一定的模型在针对大尺度涡瞬时的N-S中体现出来。

实现大涡模拟须先建立数学滤波函数,将湍流瞬时运动中比滤波函数尺度小的涡滤掉。滤波后变量 $\bar{\phi}$ 为

$$\bar{\phi} = \int_D \phi G(x, x') dx \quad (1)$$

式中  $\phi$ ——滤波前变量  $D$ ——流动区域  
 $x'$ ——实际流动区域中空间坐标  
 $x$ ——滤波后大尺度空间上的空间坐标  
 $G(x, x')$ ——滤波函数  
 一般将 $G(x, x')$ 定义为

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V & (x' \in v) \\ 0 & (x' \notin v) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $V$ ——计算单元体积

将式(2)代入式(1),得

$$\bar{\phi} = \frac{1}{V} \int_D \phi dx' \quad (3)$$

经滤波函数式(2)处理后的瞬时N-S方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $i, j = 1, 2, 3$ , 表示空间中3个方向;  $\tau_{ij}$ 为亚格子尺度应力,简称SGS应力,其体现了小尺度涡的运动对求解运动方程的影响。

为使方程封闭,须用相关物理量来构造SGS应力的数学表达式,即亚格子尺度模型,最早的也是最基本的模型为Smagorinsky模型,其仍然沿用涡粘性的概念,假设

$$\tau_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

其中  $\mu_t$ ——亚格子尺度的湍动粘度。

根据Smagorinsky-Lily模型定义, $\mu_t$ 表达式为

$$\mu_t = \rho L_S^2 |\bar{S}| \quad (6)$$

式中  $L_S$ ——网格滤波宽度

$L_S$ 定义为

$$L_S = \min(kd, C_S V^{1/3}) \quad (7)$$

式中  $k$ ——Von Karman常数,设定 $k = 0.4187$

$C_S$ ——Samagorin常数,设定 $C_S = 0.1$

$d$ ——到最近壁面的距离

### 1.2 控制方程的耦合求解法

流场数值模拟的本质

是对空间离散后的控制方

程组的求解,求解方法一

般可分为耦合式解法和分

离式解法。耦合式解法同

时求解离散化的连续性方

程和动量方程,联立解出

各个变量,其单个时间步

的求解过程如图1所示。

耦合式解法可以分为

所有变量整场联立求解

(隐式解法)、部分变量全

场联立求解(显隐解法)、

局部地区所有变量联立求

解(显式解法),其中隐式解

法应用普遍,求解速度较

快<sup>[4]</sup>,本文采用该方法进行

计算。当计算中流体动量、

能量等参数存在相互依赖

关系时,耦合式解法具有

很大优势,有更高的准确

度,其缺点是计算效率较

低、内存消耗大。

### 1.3 计算模型及可动区域计算的滑动网格法

计算液力耦合器,最大有效直径 $D = 355$  mm,泵轮与涡轮形状相同。其内部循环流动方向如图2b所示。工作时,液力耦合器泵轮与涡轮转速不同,且其循环流动会造成工作介质在叶轮交接面上流进、流出都存在,导致数值计算中无法设定固定的进出口边界条件,这使液力耦合器瞬态流场整体模拟造成困难,而滑动网格法的出现将使上述问题得到解决。滑动网格法属于瞬态计算方法,在计算子域间设置网格分界面,计算中相邻子域将按照各自运动定义沿网格分界面进行滑移。不同子域间的流动参数传递通过网格分界面完成,计算中网格是滑移的,分界面也就随时间变化。为实时求解界面流动,在每一新的时间步长内需确定子域间新的网格

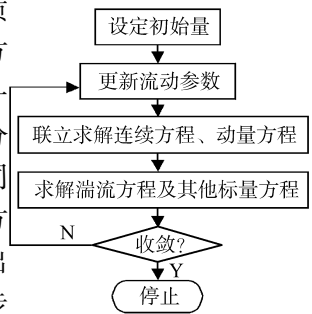


图1 耦合求解法

计算流程图

Fig.1 Flow chart of coupled method

分界面,通过实时的新分界面的通量传递实现不同子域间实时耦合。

计算中在泵轮与涡轮交接面设置为网格分界面。为减小计算量,视每个流道中流动完全一致,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,其余边界都为与流动区域相对静止的壁面条件。图 2 为计算域几何模型,图 3 为全六面体网格模型。

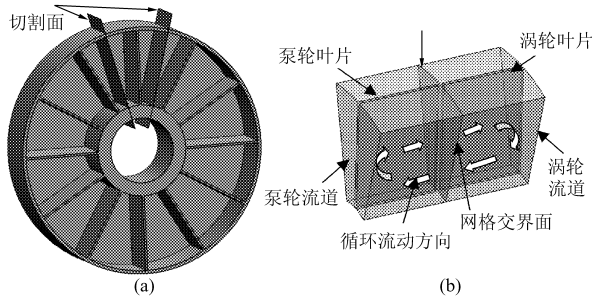


图 2 液力耦合器流场计算几何模型

Fig. 2 Geometrical model of hydrodynamic coupling

滑动网格模拟的瞬态问题大部分是时间周期性的,即计算区域的速度是周期复现的。设  $T$  是瞬态计算的周期,在计算区域的一些流动特性函数  $\Phi$  为

$$\Phi(t) = \Phi(t + nT)$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

选择耦合器为 12 个叶片,定义计算域在一个周期  $T$  内运动  $\pi/6$ ,其额定转速为 3 000 r/min,计算周期  $T$  为

$$T = \theta/\omega = \frac{\pi/6}{2\pi n_B/60} = 1/600 \text{ s}$$

设周期  $T$  内有 30 个时间步,则时间步长  $t$  为

$$t = T/30 = 5.555\ 556 \times 10^{-5} \text{ s}$$

图 4 为计算域一个周期后的位置变化。

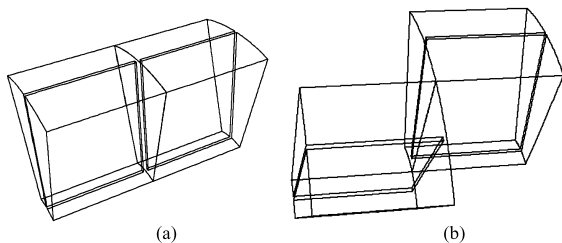


图 4 周期  $T$  内计算域的滑动情况

Fig. 4 Computational zones sliding in a period

(a) 初始位置 (b) 滑移一个周期后位置

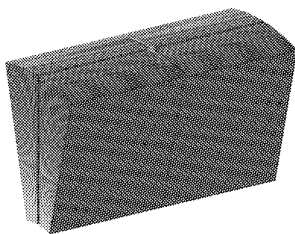


图 3 液力耦合器流道网格模型

Fig. 3 3-D computational meshes model of hydrodynamic coupling

## 2 流场计算结果及分析

为便于分析流道内流动情况,在计算流道中选 5 个径向平面和 6 个轴向平面,其位置如图 5 所示。

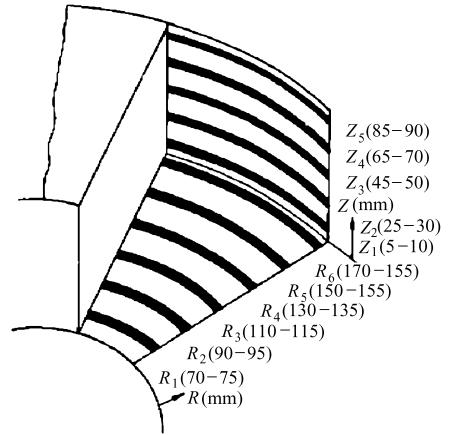


图 5 切面图

Fig. 5 Position of cross sections

对耦合器牵引及制动工况流场进行了数值计算,以其典型的制动工况 ( $i = 0$ ) 为例对内部流场进行详细分析。

图 6、7 为制动工况时间步长为  $5.555\ 556 \times 10^{-5} \text{ s}$ , 计算至  $3.344\ 5 \times 10^{-2} \text{ s}$  时刻时 ( $n_B = 3\ 000 \text{ r/min}$ ) 的计算流道整体速度、压力分布。如图所示,泵轮流动中速度与压力明显大于涡轮,在离心力与哥氏力作用下,泵轮流道内压力与速度基本沿径向逐步增加,工作介质在流道上部沿叶片旋转方向流入涡轮流道,在流道下部,涡轮流道压力高于泵轮流道,工作介质由涡轮流入泵轮,工作介质在两叶轮中循环流动。液体在进入涡轮时速度相当大,之后由于液体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。

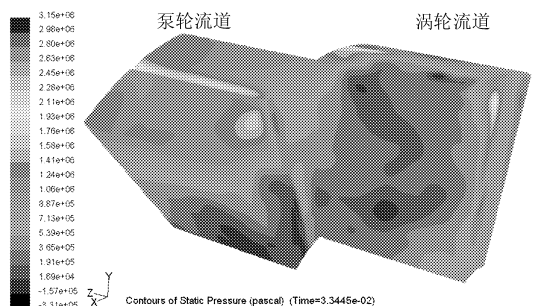


图 6  $i = 0$  时耦合器计算流道压力分布图

Fig. 6 Speed ratio = 0 pressure of flow field

图 8、9 为各轴向平面速度、压力分布图,图 10、11 为各径向平面速度、压力分布图。

从图中可以看到,工作介质在  $R_6$  与  $Z_1$  交接面附近流入涡轮,并高速冲击涡轮叶片,形成高压区。

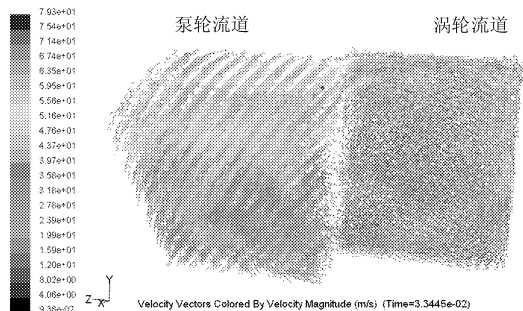


图7  $i = 0$  时耦合器计算流道速度分布图

Fig.7 Speed ratio=0 velocity of flow field

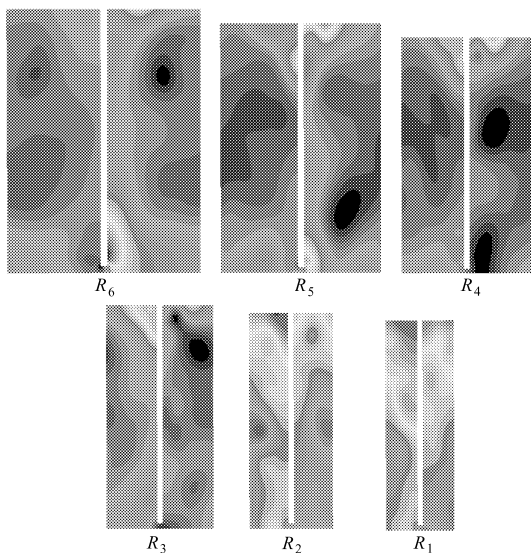


图8 各轴向切面压力分布图

Fig.8 Pressure in planes of axial section

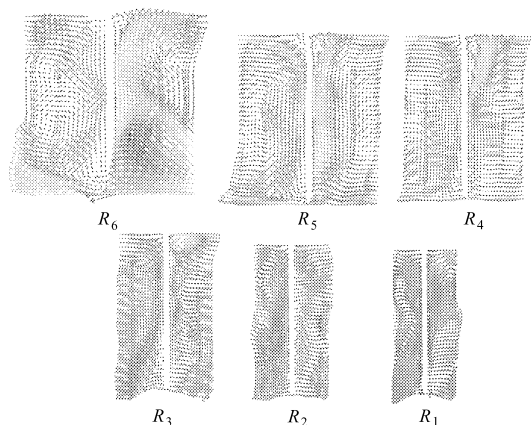


图9 各轴向切面速度分布图

Fig.9 Velocity in planes of axial section

然后,由于涡轮静止,工作介质主要沿叶片方向流动,就会形成如  $R_6$  及  $R_5$  涡轮叶片工作面附近压力、速度比其他区域高。轴向各个面在靠近涡轮后壁处都出现了较高的压力、速度分布,这是由于流入的工作介质冲击后壁且会沿涡轮径向流动,并最终沿与入流的相反方向流回泵轮。制动工况下,流道中的流动情况非常复杂,出现了较多的漩涡流动及二次流动等典型的流动现象,这些流动现象消耗了

大部分的能量。

由图 10 径向各个平面的压力分布同样可见由涡轮内工作介质流动造成的压力变化情况,由最初流入直接冲击的较小高压区域( $Z_1$  中叶片工作面靠近外环处),随着流动深入高压区域范围在轴向沿叶片逐渐扩大。

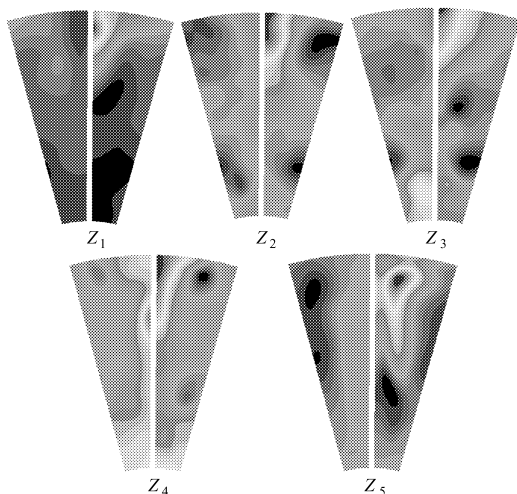


图10 各径向切面压力分布图

Fig.10 Pressure in plances of radial section

由图 11 径向各个平面的速度分布可知,数值计算模拟出了  $Z_3$  中叶片吸力面侧由于径向压差作用产生的范围较大的二次流动。同样也模拟出了产生的漩涡流动。对于  $Z_4$ ,在横向压差的作用下,截面上产生横向流动,由于横向流与主流之间的速度梯度,截面上产生了更大范围的漩涡流动。

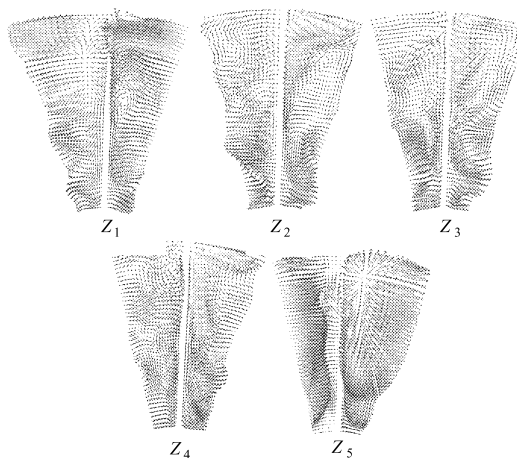


图11 各径向切面速度分布图

Fig.11 Velocity in planes of radial section

采用大涡模拟的方法模拟出了液力耦合器内部流动的典型流动状况,同时三维数值模拟得到的压力、速度数值解,是进行特性预测的基础。

### 3 性能预测与实验对比

液力耦合器流场计算中通过对所有叶片表面单

元上的力矩(相对于旋转轴)进行积分从而得到流体作用在各叶轮上的转矩。滑动网格模拟的瞬态问题大部分是时间周期性的,图 12 为制动工况转矩计算过程随时间变化的曲线,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。

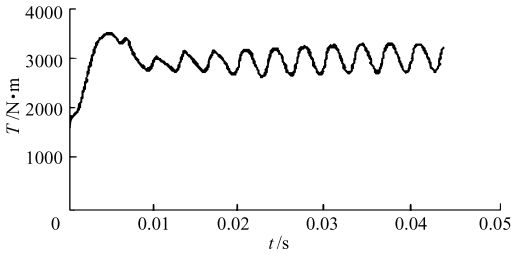


图 12 制动工况计算的转矩随时间变化曲线

Fig. 12 Braking torque of hydraulic coupler

液力耦合器泵轮转矩系数  $\lambda_B$  为评价耦合器性能的重要参数,其表达式为

$$\lambda_B = \frac{T_B}{\rho g n_B^2 D_1^5} \quad (9)$$

式中  $T_B$ ——泵轮转矩,  $N \cdot m$

$n_B$ ——泵轮转速,  $r/min$

$D_1$ ——耦合器最大有效直径,  $m$

$n_B = 3\ 000\ r/min$  时,牵引及制动工况下泵轮计算转矩与实验结果对比如表 1 所示。

由表 1 及图 13 可知,基本三维瞬态流场数值解转矩计算结果与实验测试结果误差在 7% 以内,说明了采用的数值计算方法的正确性,且可以比较准确预测设计液力耦合器的性能。

表 1 转矩对比

Tab.1 Comparison of the torques

$i$	计算转矩/ $N \cdot m$	实验转矩/ $N \cdot m$	误差/%
0	2 880	2 780	3.59
0.1	3 302	3 094	6.72
0.2	3 730	3 677	1.14
0.4	4 319	4 439	2.70
0.5	4 678	4 574	2.27
0.6	4 881	4 798	1.72
0.7	4 267	4 126	3.42
0.8	2 498	2 355	6.07
0.97	236	224	5.56

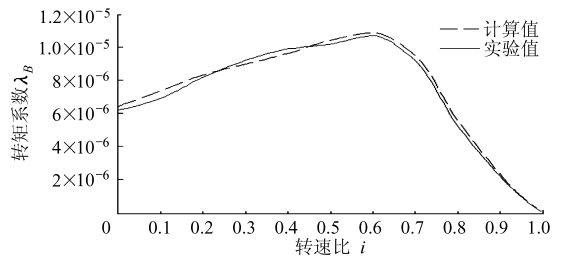


图 13 液力耦合器性能比较曲线

Fig. 13 Comparison of prediction characteristics with experimental results

## 4 结论

(1)采用大涡模拟法、耦合求解法数值求解液力耦合器三维流动控制方程,并应用滑动网格法处理泵轮与涡轮流动参数传递,可以比较准确模拟出流场中的流动状态,并预测液力耦合器性能。

(2)基于 CAD/CFD 技术平台进行液力耦合器设计,可以未制造而预知其性能,可以快速、经济地设计或优化液力耦合器。

## 参 考 文 献

- 1 吴玉林. 流体机械及工程[M]. 北京:中国环境科学出版社,2003.
- 2 才委,马文星,褚亚旭,等. 液力变矩器导轮流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2007,38(8):11~14.  
Cai Wei, Ma Wenxing, Chu Yaxu, et al. Numerical simulation and experimental research on flow field in the stator of a torque converter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(8):11~14. (in Chinese)
- 3 黄思,吴玉林. 离心泵全三维流场的大涡模拟[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(4):111~114.  
Huang Si, Wu Yulin. Large-eddy numerical simulation of three-dimension flow in centrifugal pump[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 2006,34(4):111~114. (in Chinese)
- 4 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件的理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.