

基于结构化网格的低比转数离心泵性能数值模拟*

周水清¹ 孔繁余¹ 王志强² 易春龙³ 张 勇¹

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 上海凯泉泵业(集团)有限公司, 上海 200436;
3. 河北工业大学土木工程学院, 天津 300401)

【摘要】 针对复杂模型生成的非结构网格质量差、计算难收敛问题,以一低比转数离心泵为例对其进行整体结构化网格划分,将结构与非结构两种不同类型网格导入 CFX 软件,进行多个工况点下的流场模拟。分析表明,结构化网格收敛速度快、收敛精度高,得到压力云图分布更为均匀,压力更接近设计值,小叶片绕流区分离涡更明显。模拟计算结果与试验数值的对比验证了结构化网格模拟计算值的可行性和准确性。

关键词: 离心泵 结构网格 流场 数值模拟
中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0066-04

Numerical Simulation for Low Specific-speed Centrifugal Pump with Structured Grid

Zhou Shuiqing¹ Kong Fanyu¹ Wang Zhiqiang² Yi Chunlong³ Zhang Yong¹

(1. Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. Kaiquan Shanghai Pump Co., Ltd., Shanghai 200436, China
3. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract

Aimed at some complex CFD models which may generate very poor grid by using unstructured grid, and is bound to increase the difficulty of calculating, numerical simulation of a low specific-speed centrifugal pump was carried out between the unstructured grid and structured grid at the different operating points in CFX software. The results of simulation show that the pressure distributions of structured grid model is closer to the design value and separated vortex is more obvious near short blade surface region. Compared the simulation results with the experimental values, it is found that the result of structured grid can meet the design requirement. That confirms the numerical simulation computation is feasible with accuracy.

Key words Centrifugal pump, Structured grid, Flow field, Numerical simulation

引言

网格是 CFD 模型的几何表达形式,也是模拟与分析的载体。网格质量对 CFD 计算精度和计算效率有重要影响。网格分为结构网格和非结构网格两大类:非结构网格(unstructured grid)中,节点的位置无法用一个固定的法则予以有序地命名,这种网格

一般通过专门的程序或软件来生成,如 GAMBIT、TGrid 等;结构网格(structured grid),即网格中节点排列有序、邻点间的关系明确。对于复杂的几何区域,结构网格是分块构造的,这就是块结构网格(block-structured grid)。如今,国内大多数学者进行网格划分时通常采用非结构网格,这种网格生成速度快,适应性强,较为智能化。但遇到结构较为复杂

收稿日期: 2010-07-18 修回日期: 2010-08-12
* 国家自然科学基金资助项目(50509009)和“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAF34B10)
作者简介: 周水清,硕士生,主要从事流体机械研究,E-mail: zsqwh986@139.com
通讯作者: 孔繁余,研究员,博士生导师,主要从事流体机械研究,E-mail: kongfy2918@sohu.com

的 CFD 模型时,生成的非结构网格往往质量差、局部坏点多、难收敛,严重时根本无法进行求解。到目前为止,国内外部分学者对结构化块网格作了相应研究^[1~2],但利用结构化网格对离心泵进行流场数值模拟的文献未见报道。

本文采用 ICEM 软件,对低比转数离心泵水力模型进行整体结构化块网格划分,导入 CFX 软件进行流场数值模拟计算。将泵的外特性计算值与非结构网格计算值、试验结果进行比较,对两种网格的差异性进行分析,同时验证结构网格模拟结果的可信度。

1 计算模型

计算对象是一台比转数 20 的特低比转数离心泵,主要包括进口段、叶轮、蜗壳 3 部分。模型泵设计流量 $Q_d = 8 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程 $H_d = 70 \text{ m}$,转速 $n = 2\,900 \text{ r/min}$,叶轮外径 $D = 236 \text{ mm}$ 。流道中设置了短叶片,如图 1 所示。

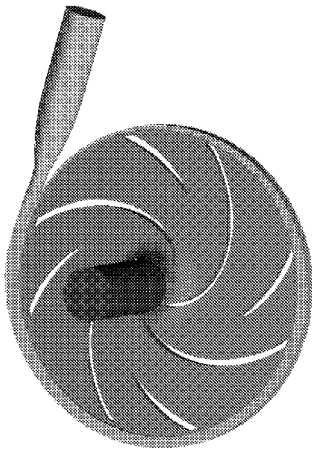


图 1 模型泵三维造型
Fig.1 Model 3-D modeling pump

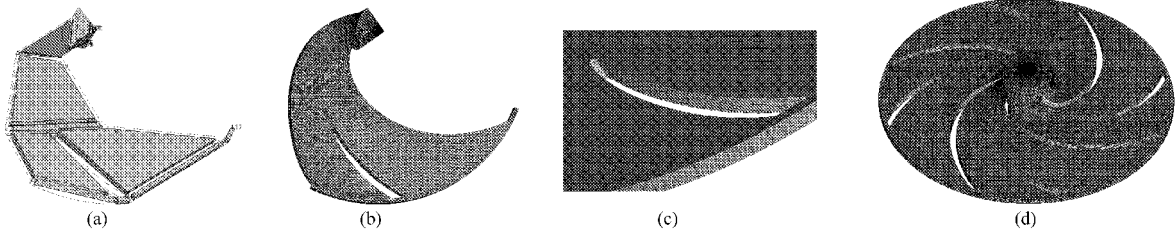


图 2 叶轮结构网格
Fig.2 Structural grid of the impeller
(a) 与实体相似的块结构 (b) 1/4 实体网格划分 (c) H 型网格 (d) 叶轮结构化网格

质量雅克比高出 20 个百分点。

进口段采用 O 型网格,O 型网格像一个变形的圆,一圈一圈地包围着翼型,进口段网格划分如图 4 所示。

结构网格的另一优势是利用操作的灵活性调节各个节点的密度和聚类调整边界层(即近壁面的网

2 网格生成

如果计算区域的各边界是一个与坐标轴都平行的规则区域,则可以很方便地划分该区域,快速生成均匀网格^[3]。但实际工程问题的边界不可能与各坐标系正好相符,于是,需要采用数学方法构造一种坐标系,其各坐标轴恰好与被计算物体的边界相适应,这种坐标系就称为贴体坐标系^[3]。ICEM 结构块网格的划分就是基于这一思想。首先,创建矩形块,经过一系列的切割、点、线、面关联操作后得到与实体相似的块结构,如图 2a 所示,调整节点数目后由块生成结构网格。本例中,划分叶轮网格时利用叶轮结构的对称性,先对 1/4 的实体进行网格划分,如图 2b 所示。网格区域(cell zone)分为单连域和多连域两类。所谓单连域是指求解区域边界线内不包含有非求解区域的情景。多连域是指在求解区域内包含有非求解区域^[3]。对于绕流问题的多连域内网格,有 H 型、Y 型、O 型和 C 型多种。H 型就是对现有块进行切割,然后删除多出的绕流部分。如图在划分偏置叶片网格过程中,采用的就是 H 型网格,如图 2c 所示。最后对其进行旋转复制就得到整个叶轮的结构化网格,如图 2d 所示。

对蜗壳的结构化网格划分难点在于隔舌周围,该模型第一端面最小边边长 0.4 mm,如果采用非结构难以生成质量较好的网格,即使局部细化网格质量也难以提高,反而制约整体网格数量^[4]。且隔舌部位角度倾斜,非结构网格易产生坏点,处理不当易导致求解发散。本例对隔舌处网格进行分块处理,调整了最小边节点数目,进行了结构细化。隔舌部采用 C 型网格处理,如图 3a 所示,用 ICEM 软件检查网格质量可知,比相同数目非结构的网格(图 3b)

格间隔)。边界层的分解在计算壁面剪切应力和热传递系数的准确性方面起着很重要的作用。网格邻近壁面的层流满足

$$y_p \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} \leq 1$$

式中 y_p ——邻近单元的中心到壁面的距离

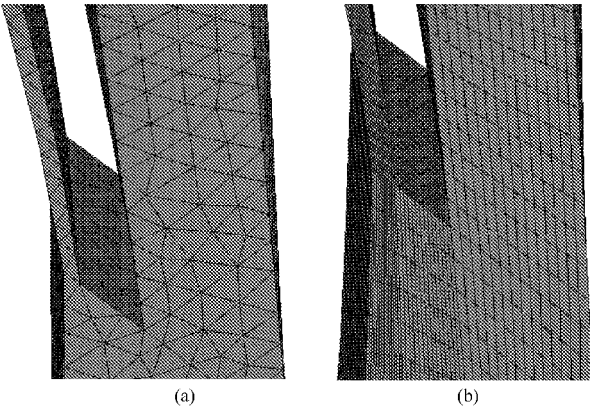


图 3 蜗壳网格分化
Fig. 3 Volute grid generation

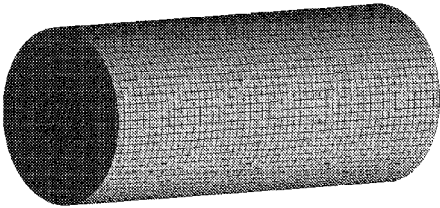


图 4 进口段网格划分
Fig. 4 Entrance grid generation

u_{∞} ——自由流速度
 ν ——流体的运动粘性系数
 x ——从边界层的始点沿壁面的距离

通过控制以上数值关系可以手动、快捷、准确地处理边界条件。

3 求解及后处理

将画好的网格导入 CFX-pre,设置求解域、初始条件、结合面、求解参数。本例设置速度进口、压力出口条件,求解精度为 10^{-5} ,保存 .def 文件后求解。在数值模拟过程中,选择工况点分别为 $0.4Q_d$ 、 $0.6Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 Q_d 、 $1.2Q_d$ 、 $1.4Q_d$ 和 $1.6Q_d$ 。

设计工况点下结构网格与非结构网格中间截面静压分布云图分别如图 5 所示,压力单位为 Pa。从图中可以看出,两者的共同点:泵内部静压的分布基本合理;叶轮流道内流体静压的趋势是随着叶轮半径的增大而增大,随着叶轮半径的增大而周向分布变得不均匀,局部出现高压;叶轮末端流道的中间压力较低,压力面和吸力面附近压力较高,隔舌附近局部高压明显。两者的不同点:图 5b 中静压分布较为均匀,静压沿蜗壳断面依次增高,蜗壳出口静压值满足设计要求,图 5a 中蜗壳出口压力偏低,与设计值差距较大,综合分析可知主要原因是由于隔舌处非结构网格质量较差,收敛精度较低引起的。

由图 6 可看出,图 6b 中分离涡现象更加明显。分析可知,通过结构网格控制近壁面网格间隔,可以

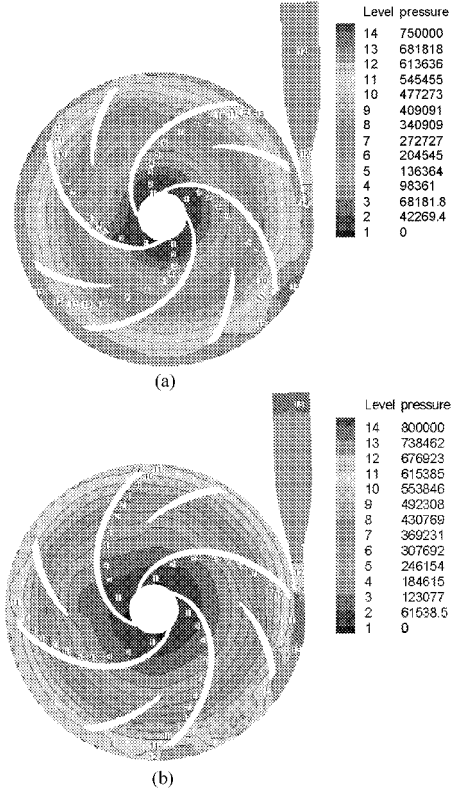


图 5 模型泵中间截面压力云图
Fig. 5 Static pressure distribution on middle face
(a) 非结构网格 (b) 结构网格

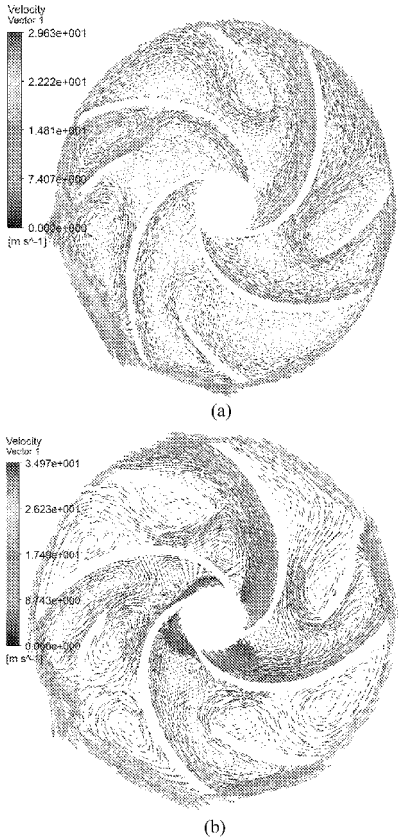


图 6 模型泵相对速度矢量图
Fig. 6 Relative velocity vector distribution
(a) 非结构网格 (b) 结构网格

实现壁面边界层从进口到出口的不断增厚,较非结构网格模型具有更好的边界层边界。真实情况下,由于设置短叶片后起到了分流作用,在叶轮内由于逆向压力梯度的作用,使壁面边界层从进口到出口不断增厚,在离心力和哥氏力的作用下产生分离涡。说明结构网格模拟结果与设置短叶片后真实流动情况比较接近。

4 试验对比

由图 7 可知,结构网格模拟结果与试验值较为接近,非结构网格计算值所得扬程与试验值相差较大,分析看出由于模型泵非结构划分的网格质量较差,影响了收敛精度,从而导致模拟结果的差异性。

5 结论

(1) 通过比较两种网格模拟的外特性云图及曲线,可知结构网格模拟结果达到设计要求,叶轮流道

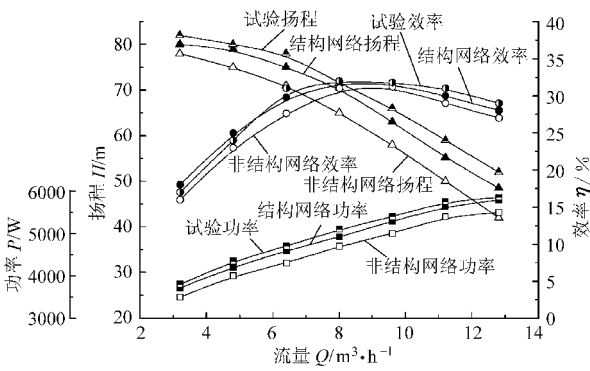


图 7 模型泵数值模拟性能曲线

Fig. 7 Performance curves of model pump

内特征更接近真实流动情况。

(2) 利用结构网格技术对三维泵模型进行整体块网格划分,与非结构网格模拟结构比较可知,在结构较复杂情况下,采用结构网格技术可以获得更高的网格质量,保证收敛精度、模拟的准确性。

参 考 文 献

1 Lin Hongwei, Tang Kai, Ajay Joneja, et al. Generating strictly non-self-overlapping structured quadrilateral grids [J]. Computer-aided Design, 2007, 39(9): 709 ~ 718.

2 Rantakokko J. Partitioning strategies for structured multiblock grids[J]. Parallel Computing, 2000, 26(12): 1 661 ~ 1 680.

3 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

4 Victor Yakhot, Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence. I: basic theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1):3 ~ 51.

5 Miguel Asuaje, Farid Bakir, Smaïne Kouidri, et al. Numerical modelization of the flow in centrifugal pump: volute influence in velocity and pressure fields[J]. Interactional Journal of Rotating Machinery, 2005(3): 244 ~ 255.

6 Farrant T, Tan M, Price W G. Cell boundary element method applied to laminar vortex shedding from circular cylinders[J]. Computers and Fluids, 2001, 30(2):211 ~ 236.

7 Issa R I. Solution of implicitly discredited fluid flow equations by operator splitting[J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62(1):40 ~ 65.

8 Nere N K, Patwardhan A W, Joshi J B. Prediction of flow pattern in stirred tanks: new constitutive equation for eddy viscosity [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2001, 40(7):1 755 ~ 1 772.

(上接第 40 页)

6 Zheng Ping, Liu Ranran, Wu Qian, et al. Magnetic coupling analysis of four-quadrant transducer used for hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43 (6): 2 597 ~ 2 599.

7 SAE J1939. Recommended practice for a serial control and communication vehicle network [S]. 2010-02-15.

8 张彤,朱磊,王存磊,等. 混合动力汽车集成式多能源管理监控平台[J]. 农业机械学报,2008,39(7): 42 ~ 46.

Zhang Tong, Zhu Lei, Wang Cunlei, et al. Monitoring platform of integrated multi-energy management system for PHEV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39 (7): 42 ~ 46. (in Chinese)

9 Walter Möller-Nehring, Wolfgang Bohrer. Siemens universal serial specification interface protocol, [EB/OL] SIEMENS Edition 09.94[M].

10 Feng An, Matthew Barth, George Scora. Impacts of diverse driving cycles on electric and hybrid electric vehicle performance [C]. SAE Paper 972646, 1997.