

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.001

# 离心泵内流场空化特性的数值模拟研究\*

明廷锋<sup>1</sup>, 郭井加<sup>2</sup>, 曹玉良<sup>1</sup>, 章 军<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 91656 部队 装备质量控制室, 上海 200136)

**摘要:**针对离心泵内流场特性分析困难的问题,对离心泵流场数值模拟的几何模型建立、模型网格划分和边界条件设定进行了研究,采用计算流体力学方法,获取了在敞水性能条件下离心泵的扬程-流量、效率-流量的变化关系;结合 Zwart 空化模型,重点对不同有效汽蚀余量时离心泵的空化流场进行了数值模拟,得到了离心泵的内部流线和空泡分布的情况,并与该离心泵机组进行了性能测试实验,最后在此基础上进行了对比分析。研究表明,所采用的数值模拟方法和空化模型合理有效,此结果可为进一步开展离心泵空化监测技术研究提供借鉴。

**关键词:**离心泵;空化特性;计算流体力学;数值模拟;流场

中图分类号:TH311

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)06-0643-05

## Numerical simulation on cavitation characteristics of flow field in centrifugal pump

MING Ting-feng<sup>1</sup>, GUO Jing-jia<sup>2</sup>, CAO Yu-liang<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>

(1. Power Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Equipment Quality Control Office, Unit 91656, Shanghai 200136, China)

**Abstract:** Aiming at the difficult problem of the characteristics analysis of the flow field in the centrifugal pump, the numerical simulation method was proposed, which was based on the Geometric model established, the mesh generation and boundary conditions set. By using the computational fluid dynamics method, the relation between the head capacity and the flow, the efficiency and the flow of the centrifugal pump were found respectively in open water performance conditions. On the basis of the Zwart cavitation model, the cavitation flow field was numerical simulated under different NPSH of centrifugal pump. The streamline distribution and the cavitation bubbles distribution were obtained. The result indicates that through the comparison of experiment performance and cavitation numerical simulation of centrifugal pump, the numerical method and cavitation model is reasonable and effective, it can provide reference for further research on the technology of centrifugal pump cavitation monitoring.

**Key words:** centrifugal pump; cavitation characteristics; computational fluid dynamics(CFD); numerical simulation; flow field

## 0 引 言

在离心泵运行过程中,很多因素都会导致离心泵空化现象的发生。空化会导致离心泵的性能下降,引起机组的振动和噪声,并导致过流金属部件的腐蚀和破坏,甚至还会导致各种灾难性事故的发生<sup>[1-2]</sup>。为了防止空化造成灾难性事故,需要对离心泵空化进行监测诊断和预警<sup>[3-5]</sup>。通过掌握空化时离心泵内流场的

特性,并且深入了解空化特点,能够为离心泵空化的监测诊断提供依据。

掌握内流场特性常采用的方法有数值模拟法和高速摄影法。高速摄影方法虽然能够提高可靠的观测结果,但是该方法需要高速摄像机和专用的可观测实验设备,实验难度大、费用高,在生产实际中很难适用。CFD 数值模拟方法已能够较准确地预测各种复杂的流动和气液传质现象,并能够提供可视化的结果,已成

收稿日期:2016-02-17

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51306205);湖北省自然科学基金资助项目(2015CFB700)

作者简介:明廷锋(1975-),男,湖北武汉人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事设备状态监测与故障诊断方面的研究。E-mail:hgming@126.com

为空化流动研究的重要方法<sup>[6-7]</sup>。

当前,很多研究人员都利用 CFD 数值模拟方法对离心泵的空化进行研究,并得到了一定的研究成果<sup>[8-9]</sup>。张文军<sup>[10]</sup>对离心泵叶轮通道内的空化进行了预测,得到了空化流场的压力分布、空泡体积分数等;王洋等<sup>[11]</sup>分析了不同工况时离心泵叶轮中间流面空泡体积分数的变化规律;然而,上述研究对于空化性能的计算结果均未得到实验验证。谭磊等<sup>[12]</sup>运用 Zwart 空化模型对离心泵内部空化进行了数值模拟,但计算得出的临界汽蚀余量与实验结果存在一定差别;杨孙圣等<sup>[13]</sup>利用 CFX 软件,分析了一台离心泵在临界汽蚀余量时叶轮内空泡分布规律及扬程下降的原因,但计算结果与实验结果在小流量时差别较大。

本研究通过建立几何模型、网格划分和设置合理的边界条件,利用 CFX 软件和 Zwart 空化模型对离心泵内部流场的空化特性进行三维数值模拟;通过将计算得到的扬程-有效汽蚀余量曲线与实验结果对比,验证所用数值模拟方法的可信性,进而分析空化导致离心泵扬程下降的原因,给出不同汽蚀余量时离心泵内部流场空泡的分布规律。

## 1 实体建模与分析

### 1.1 模型建立

对离心泵进行 CFX 建模时,需要对叶轮和泵蜗壳,叶轮和离心泵泵体、泵盖之间的前后腔体的流道进行建模,计算模型中需要对离心泵进、出口做一定的延伸。在对离心泵建模过程中,泵叶片和泵蜗壳的曲线形状比较复杂,是建模的难点。本研究采用先建叶轮和进口,略去轴部分,倒角部分尽量忽略,以实现模型的简化。

本研究使用三维造型软件 UG NX 8.0 建立离心泵全流场计算模型,该模型如图 1 所示。

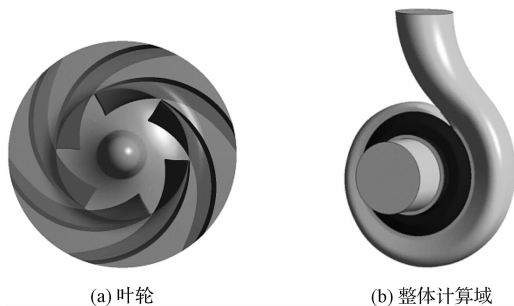


图 1 离心泵数值模拟实体模型

叶轮的主要几何参数如下:

进口直径:126 mm;

出口直径:100 mm;

叶片数:6 片;

叶轮出口宽度:26.5 mm;

转速:1 480 r/min。

### 1.2 网格划分

笔者将 UG NX 8.0 建立的模型导入 ANSYS-CFX 前处理软件 ICEM-CFD 进行网格划分。

在划分网格过程中,笔者首先利用 ICEM-CFD 对离心泵进行网格划分,叶轮划分六面体网格,网格数为 148 万,第一层网格厚度设为 0.01 mm,控制所有壁面的  $y^+$  均小于 50,蜗壳划分四面体网格,网格数为  $2.61 \times 10^6$ ,整个域内的总的网格数为  $4.30 \times 10^6$ 。

为了适应复杂边界的内流场区域,可对已经生成的网格进行自适应性加密,有利于保证其内流场模拟结果的准确性;并在网格划分完成之后,检查网格质量,去掉一些多余节点,以保证网格质量符合计算要求。

离心泵叶轮和蜗壳的网格划分如图 2 所示。

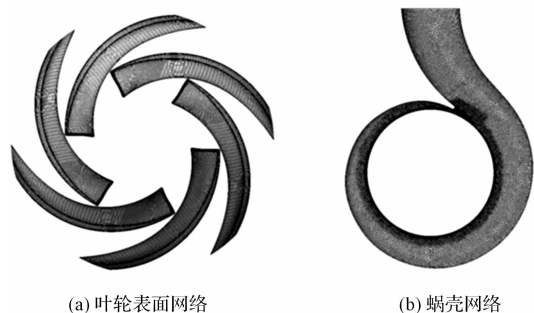


图 2 离心泵的网格划分

很多学者在进行离心泵性能的 CFD 数值模拟时,未考虑其口环间隙的影响。为了更加真实地反映离心泵内的流动情况,必须要考虑离心泵口环的泄露问题。

本研究所用离心泵的口环间隙为 0.5 mm,前口环间隙和前腔室一起划分网格,后口环间隙和后腔室一起划分网格,均为六面体网格,前口环间隙及腔室的网格数为  $2.0 \times 10^5$ ,后腔体及后口环间隙的网格为  $1.4 \times 10^5$ 。

### 1.3 边界条件

计算流体区域可分为以叶轮为代表的转子和以蜗壳为代表的定子两个主体部分,首先设定离心泵的进、出口流道;其次,设置泵内部流场边界条件,对流体、流速、水温、大气压强等参数进行详细设置。两流体区域之间的定子和转子耦合交界面采用 Frozen Rotor 类型。各固体壁面都采用无滑移(no slip)壁面边界条件。

仿真过程中,通过改变进口流速的大小来实现空化模拟,从而计算出离心泵处于不同流量工况条件下的内流场分布状况。

### 1.4 离心泵非空化性能模拟

本研究在进行离心泵敞水性能(非空化、均匀来

流)计算时,将出口设为流量,采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型。

设计流量  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  时离心泵内部流线图如图 3 所示。



图3 设计流量  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  时离心泵内部流线图

从图 3 中可以看出,离心泵内部流动平顺,无漩涡和流动分离。离心泵的扬程-流量、效率-流量的变化关系,CFX 计算值与该泵机组实验值吻合良好,实验过程参见文献[14]。

在设计流量时,实验扬程是 13.51 m,效率为 80.6%,CFX 计算值是 13.5 m,效率为 83.2%,误差分别为 0.7% 和 2.6%。

## 2 离心泵空化性能数值分析

### 2.1 空化模型

本研究采用 Rayleigh-Plesset 方程描述空泡的生长和破灭。

模型如下:

$$R_b \frac{d^2 R_b}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR_b}{dt} \right)^2 + \frac{4v dR_b}{R_b dt} + \frac{2S}{\rho_l R_b} = \frac{P_v - P}{\rho_l} \quad (1)$$

式中:  $R_b$ —空泡半径,  $S$ —表面张力,  $P_v$ —水的饱和压力,  $P$ —空泡周围液体压力,  $\rho_l$ —液体密度,  $v$ —液体的粘性系数。

忽略方程的二阶项、粘性项和表面张力项,可得:

$$\frac{dR_b}{dt} = \sqrt{\frac{2 |P_v - P|}{3 \rho_l}} \quad (2)$$

假设单位流体体积中有  $N_b$  个空泡,则空泡体积分

$$\alpha_v = \frac{4}{3} \pi R_b^3 N_b \quad (3)$$

Zwart-Gerber-Belamri 认为单位体积内气相和液相的交换速率可由单个空泡的相变得出,即:

$$\dot{m} = N_b \times 4\pi R_b^2 \rho_v \frac{dR_b}{dt} = 4\pi R_b^2 N_b \rho_v \sqrt{\frac{2 |P_v - P|}{3 \rho_l}} \quad (4)$$

相交换速率也可表示为:

$$\dot{m} = F \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_b} \sqrt{\frac{2 |P_v - P|}{3 \rho_l}} \quad (5)$$

式中:  $F$ —经验系数。

上式假设空泡均由不可压汽核发展而来,未考虑空化气泡之间的相互影响,仅适用于空化发展的最初阶段。

随着空化的发展,空化核的数量也会随之减少,为了模拟这一过程,Zwart-Gerber-Belamri 提出用  $\alpha_{nuc}$  ( $1 - \alpha_v$ ) 代替  $\alpha_v$ ,故这种空化模型的最终形式为:

(1) 当  $P < P_v$  时:

$$\dot{m}_{\text{cond}} = F_{\text{vap}} \frac{3\alpha_{nuc} (1 - \alpha_v) \rho_v}{R_b} \sqrt{\frac{2 |P_v - P|}{3 \rho_l}} \quad (6)$$

(2) 当  $P > P_v$  时:

$$\dot{m}_{\text{cond}} = F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_b} \sqrt{\frac{2 |P - P_v|}{3 \rho_l}} \quad (7)$$

式中:  $F_{\text{vap}}$ —空化系数,  $F_{\text{vap}} = 300$ ;  $F_{\text{cond}}$ —空泡凝结速率,  $F_{\text{cond}} = 0.03$ ;  $\alpha_{nuc}$ —汽核体积分数,  $\alpha_{nuc} = 5 \times 10^{-4}$ 。

在空化计算时考虑湍流压力脉动  $P_{\text{turb}}$  对汽化压力的影响,故对饱和压力  $P_v$  修正如下:

$$P'_v = P_v + \frac{P_{\text{turb}}}{2} = P_v + 0.195 \rho_m k \quad (8)$$

式中:  $k$ —湍动能,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $\rho_m$ —混合密度。

### 2.2 空化性能分析

在进行空化数值计算时,笔者采用流量出口、总压进口,保持离心泵出口流量不变,不断降低泵进口的压力使泵内水体产生汽化。在数值计算时,笔者先进行非空化数值计算,然后以非空化计算结果为初值进行空化性能计算,以缩短计算时间。

在设计流量时的“扬程-汽蚀余量(H-NPSH)”曲线如图 4 所示。

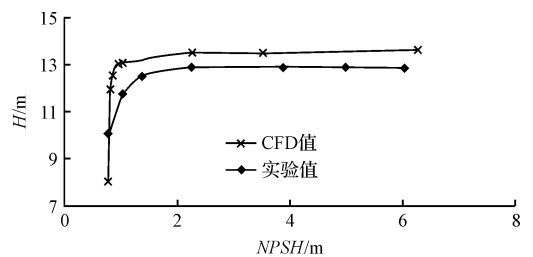


图4 离心泵的“扬程-汽蚀余量”曲线图

CFX 计算得出的扬程汽蚀余量曲线与实验曲线趋势一致、符合良好,随着汽蚀余量的减小,扬程先慢慢减小,当汽蚀余量减小到某一个阈值之后,扬程会突然减小。主要原因是随着汽蚀余量的降低,泵内空化越来越剧烈,空化产生的大量气泡堵塞了过流通道,使叶轮的做功能力降低,导致离心泵的扬程急剧下降。

离心泵汽蚀余量  $NPSH$  指在水泵进口断面,单位重量的液体所具有的超过汽化压头的剩余能量,其大

小用米水柱来表示。

汽蚀余量  $NPSH$  分别为 2.35 m、1.12 m 和 0.9 m 时,空泡体积分数为 0.2 的等值面,不同汽蚀余量时叶轮空泡分布如图 5 所示。



图 5 不同汽蚀余量时叶轮空泡分布

当进口汽蚀余量从 2.35 m 减小到 0.9 m 时,叶轮内的空泡体积大量增加,大量的空泡堵塞了过流通道,从而导致离心泵的扬程下降。

不同汽蚀余量时叶轮表面空泡体积分布如图 6 所示(图中纵坐标表示空泡体积分数)。

从图 6 中可以看出,叶轮空化区域主要在叶轮吸力面靠近进口边的部分,随着有效汽蚀余量的减小,叶轮上空泡区的面积逐渐增大,有效有效汽蚀余量  $NPSH = 0.9\text{ m}$  时,叶片上的空泡面积是  $NPSH = 2.35\text{ m}$  时的 8 倍,说明  $NPSH = 0.9\text{ m}$  时,叶轮空化十分严重。

不同汽蚀余量时叶轮中心截面上空泡分布如图 7 所示。

从图 7 中叶片中心截面上空泡体积分数的分布可以更清楚地看出,空化主要发生在叶轮吸力面,随着有效汽蚀余量的减小,中心截面上空泡区的面积逐渐增大,而压力面上几乎没有空化区域。

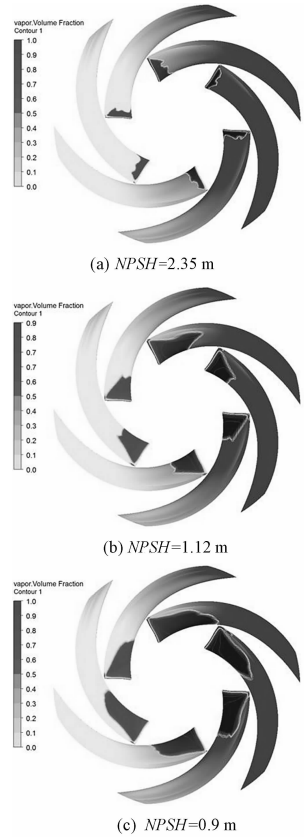


图 6 不同汽蚀余量时叶轮表面上空泡分布

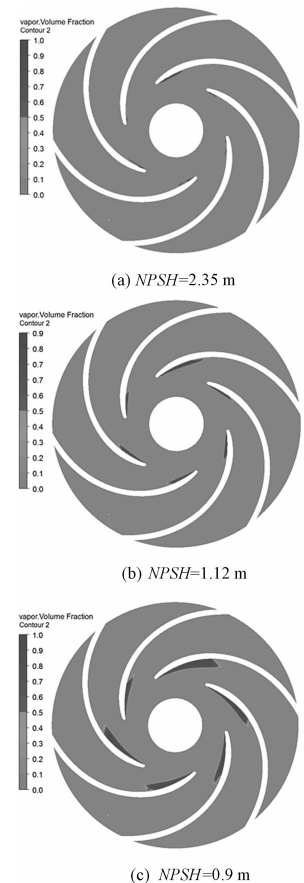


图 7 不同汽蚀余量时叶轮中心截面上空泡分布

### 3 结束语

针对离心泵内流场特性分析困难的问题,本研究对离心泵流场空化特性进行了数值模拟,得到如下结论:

(1)离心泵水力性能的数值模拟计算结果与实验结果比较可知,两者误差较小,尤其是在设计流量条件下,两者基本吻合。

(2)本研究中离心泵实体模型建立方法、空化性能数值计算模型合理,基于 ANSYS-CFX 的离心泵内流场空化数值模拟结果有效。

(3)通过内流场数值模拟可知,离心泵正常工作时,内部流动平顺,无漩涡和流动分离;当发生空化现象时,叶轮上的空泡体积将不断增加,大量的空泡会堵塞过流通道,导致扬程下降。叶轮空化区域主要在叶轮吸力面靠近进口边的部分,随着空化数的减小,叶轮上空泡区的面积将逐渐增大。

#### 参考文献 (References):

- [1] JOHANN F G. Centrifugal Pumps (Third Edition) [M]. Berlin: Springer, 2014.
- [2] KI-HAN KIM, GEORGES CHAHINE, JEAN-PIERRE FRANC, et al. Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2013.
- [3] GRUBER P, ODERMATT P, ETTERLIN M, et al. The Detection of cavitation in hydraulic machines by use of ultrasonic signal analysis [J]. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science, 2014, 22(5): 5-14.
- [4] BRAZ J, CARDOSO FILHO, CARLOS B. Incipient detec-

tion of cavitation phenomenon in centrifugal pumps [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2014, 1(50): 120-126.

- [5] SURENDRA N. G., KANAKASABAI V. Using vibration signatures analysis to detect cavitation in centrifugal pumps [C]//Society for Experimental Mechanics Series. Berlin: Springer, 2011: 499-507.
- [6] 张德胜,潘大志,施卫东,等.轴流泵空化流及其诱导压力脉动的数值模拟[J].华中科技大学学报:自然科学版, 2014, 42(1): 34-38.
- [7] MITJA MORGUT, ENRICO NOBILE, IGNACIJO BILUŠ. Comparison of mass transfer models for the numerical prediction of sheet cavitation around a hydrofoil [J]. **International Journal of Multiphase Flow**, 2011, 37(6): 620-626.
- [8] 刘宜,陈建新,宋怀德,等.离心泵内部空化流动的定常数值模拟及性能预测[J].西华大学学报:自然科学版, 2010, 29(6): 80-84.
- [9] 杨敏官,孙鑫恺,高波,等.离心泵内部非定常空化流动特征的数值分析[J].江苏大学学报:自然科学版, 2012, 33(4): 408-413.
- [10] 张文军.离心泵全流道内空化流场的数值模拟及预测[D].兰州:兰州理工大学能源与动力工程学院, 2008.
- [11] 王洋,王振伟,陈超,等.基于 Fluent 的离心泵空化流场数值模拟[J].农机化研究, 2012, 34(11): 59-64.
- [12] 谭磊,曹树良,孟根其其格,等.基于输运方程空化模型的离心泵空化数值模拟[C]//中国机电工程学会水电设备专业委员会.第十九次中国水电设备学术讨论会论文集.北京:中国水电水利出版社, 2012: 407-414.
- [13] 杨孙圣,孔繁余,周水清.离心泵气蚀性能的数值计算与分析[J].华中科技大学学报, 2012, 38(10): 93-95.
- [14] 夏远志,明廷锋,苏永生,等.离心泵空化现象模拟试验研究[J].机电工程, 2015, 32(11): 1433-1437.

[编辑:李辉]

#### 本文引用格式:

明廷锋,郭井加,曹玉良,等.离心泵内流场空化特性的数值模拟研究[J].机电工程, 2016, 33(6): 643-647.

MING Ting-feng, GUO Jing-jia, CAO Yu-liang, et al. Numerical simulation on cavitation characteristics of flow field in centrifugal pump [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(6): 643-647.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>