文章编号:1001-2060(2011)03-0290-05

半开式离心泵内部流场的数值模拟研究

邵杰1,张桂英1,吴玉林2

(1.国核电力规划设计研究院,北京 100094,2清华大学 热能工程系,北京 100084)

摘 要:采用标准 k ← Φsilq, SST以及 DES 3种湍流模型对 小流量工况下半开式离心泵的流量 扬程曲线和内部流场进 行了数值模拟。为了验证模拟结果,应用二维粒子图像测速 技术(PV)对离心泵的内部流场进行了实验测量。研究证 明:对于半开式离心泵流量 扬程曲线的预测,3种数值方法 都能比较准确的进行预测;而对于内部流场的预测,标准 k - ePsilon和 SST湍流模型不能得到准确全面的结果,而 DES 方法则可以较为准确的预测出内部流场细节。

关 键 词: 半开式离心泵叶轮; ^PⅣ测量; 内部流动细节; 湍流模型对比

中图分类号: TH311 文献标识码: A

引 言

离心泵的用途较为广泛,其设计需要针对需求 来进行。传统的"设计一实验一设计"的设计方法 已经逐渐被成本低、效率高的 CFD设计方法所取 代^[1~3]。如何正确有效地对泵的性能及流场进行预 测,是泵设计过程的重要问题。

目前,利用 CFD软件已能对泵的性能做出较为 准确的预测,而对于泵内流场,逐渐采用可视化试验 的方法来揭示离心泵的内部流动特征。粒子成像测 速仪 PV(Particle Image Velocimenty)是近年来兴起 的瞬态流动结构测量技术,它可以对整个流场进行 切片式量化测量,显示流场的结构状态。研究证明 PN实验是一种可靠的内流场测试手段,可为离心 泵内部流场的数值预测的准确性提供判断 依据^[3~5]。

由于决定离心泵性能的主要部件还是叶轮,因此本研究采用不同的湍流模型对某半开式离心泵的性能和内部流场进行全流道三维模拟,同时通过 PN实验观测不同流量情况下泵内的流场状态,并 以 PN实验结果作为评判标准,对采用不同湍流模 型的流场预测结果进行评价。 1 试验及测量装置

1.1 试验泵叶轮

试验所采用的叶轮是半开式的,由 6个二维后 弯叶片组成。叶片进水边和出水边都使用简单的圆 弧过渡,叶轮的主要参数见文献 [6]。

1.2 试验用离心泵

试验用离心泵是为方便 PIV测量而专门设计的,如图 1所示。整个泵都是用有机玻璃制造,泵蜗 壳的进口直径与出口直径比为 1.50。



图 1 全透明离心泵

1.3 试验泵循环系统



图 2 试验循环系统

作者简介: 邵杰(1982-), 男, 安徽天长人, 国核电力规划设计研究院工程师.

收稿日期: 2010-06-23 修订日期: 2010-06-29

^{?1994-2016} China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

试验泵循环系统如图 2所示。流量大小由进口 阀门和出口阀门控制,通过安装在出口下游的电磁 流量计进行测量。泵的转速由变频器控制,试验中 转速被固定在 1 000 ^{r/m in} 由两个压力传感器完 成扬程的测量。

1.4 PN测量系统

PN系统如图 3所示,由一台功率为 0 12 J/ ^{pu ke}的双腔 Nd YAG激光器、一台 1.3 K×1 K像 素的 PCO互相关 CCD像机、一台同步器、一台光电 式轴脉冲同步器及数据处理系统组成。示踪粒子是 直径为 10~40 μ^m的荧光粒子。光电式轴脉冲同 步器用于对泵的轴相位进行同步锁定。



图 3 PN系统

因为在泵叶轮后部是轴承箱,没有安放 CCD的 空间,所以将一个反光镜放在泵体后部,其安放角度 与泵轴线呈 45°,这样可以通过反射来实现 CCD像 机对拍摄区域的无畸变成像。试验观测部分如图 4 所示。测量平面为一半的叶片出口宽度处。对两次 曝光得到的粒子图像进行互相关计算,得到拍摄区 域的速度矢量。

为克服强脉冲激光对近壁区域测量的影响,采 用内嵌荧光剂的聚苯乙烯颗粒作为示踪粒子(自 制、亲水性粉体),粒径约10~40^μ,叶中值粒径约 25^μ^m,颗粒密度约1.048×10³ kg/m³。粒子中的荧 光激发波长为535^m,荧光发射波长为580^m, CCD像机成像时采用545^m长波通滤色片(自制, 透光率约85%,截止率万分之一)。由于壁面反光、 气泡等产生的散射光会被滤色片滤去,因此CCD成 像时仅留下颗粒的荧光成像,而脉冲激光导致的其 它背景光则被完全消除,保证了近壁区和角区附近 流场测量的准确性。并且采用 Na和 NaHCQ 配制 的混合溶液作为折射率匹配溶液(自制,该溶液的 折射率与制造离心泵的有机玻璃的折射率相近), 消除光线折射出现的测量偏差。同时,溶液的密度 与荧光粒子的密度相近,因此荧光粒子在此溶液中 具有良好的跟踪性,能够满足测量精度要求。



图 4 试验观测区域

试验采用自制的光电式轴脉冲同步器对叶片的 相位进行精确锁定,实现在叶片不同相位角时的流 场测量。

2 数值计算方法

采用标准 k— epsilon SST和 DES3种湍流模型 对试验泵的性能和内部流场进行数值模拟,计算区 域为离心泵的全流道。三维模型的建立和网格划分 使用商业软件 Gambi来完成,全流道用三维非结构 化网格来划分,划分后的网格数为 204万。网格划 分如图 5所示。



图 5 全流道网格

选用商业软件 Fluen 求解不可压缩 N-S方程。对于标准 k-epsilor和 SSI湍流模型控制方程的求解方法可以参阅文献[8]。

DES是将雷诺平均与大涡模拟相结合的方法, 基本思想为:在近壁面的附面层内采用雷诺平均方 法,用湍流模型模拟其中的小尺度脉动运动;在远 离物面的区域,将湍流模型耗散项中的湍流尺度参 数用网格尺度与一常数的乘积代替,起到大涡模拟 的亚格子雷诺应力模型的作用。DES方法既可以 在附面层内发挥雷诺平均方法计算量小的优势,又 可以在远离物面的区域对大尺度的脱体分离涡进行 ing House. All rights reserved. http://www.cnki.net 较好地模拟。

DES模型方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + 4 \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_{i}} = P_{k} - \frac{\rho k^{5}}{k_{-\omega}} + \frac{\partial}{\partial x_{i}} [(\mu_{1} + \frac{\mu_{\tau}}{\sigma_{k}}) \frac{\partial k}{\partial x_{i}}]$$
(1)

$$\frac{\partial(\rho_{\omega})}{\partial t} + q \frac{\partial(\rho_{\omega})}{\partial x_{1}} = C_{\omega} P_{\omega} - \beta_{\omega} \rho_{\omega}^{2} + \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left[(\mu_{1} + \frac{\mu_{1}}{\sigma_{k}}) \frac{\partial W}{\partial x_{1}} \right] + 2\rho(1 - F_{1}) \frac{1}{\sigma_{w_{2}}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_{1}} \frac{\partial \omega}{\partial x_{1}}$$
(2)

涡粘性系数计算式为:

$$\mu_{t} = m i \eta \frac{\rho k}{\omega} \frac{\rho k}{\Omega F_{2}}$$
(3)

式中: P₆、P₉—湍流生成项,具体定义及模型中的常数根据参考文献 [7]给出。

计算边界条件设置为:进口边界条件为压力入口,出口边界条件为流量出口。在固定边壁的近壁 区使用壁面函数,而壁面处则设为无滑移边界条件。 如果边界是运动边界,运动速度设为相对坐标系的 速度,值为零。

3 结果与讨论

3.1 流量扬程曲线计算与试验对比

使用不同的湍流模型对 8种工况下的流动状况 进行了模拟,模拟工况流量参数为:0 52、0 82、 1.01、1.50、1.62、2 01、2 51和 2 99 ⁿ³ / b转速均 为 1 000 ^{r/min}。其中,流量 2 01 ⁿ³ / b为设计工况。 泵的流量 扬程曲线如图 6所示。从图中可以看出, 3种湍流模型都能较好的预测离心泵的流量 扬程 曲线。其中,标准 k— epsilon误差最大,可达 8%。 在设计工况下,3种湍流模型都能较准确的预测扬 程,标准 k— epsilon在小流量工况下误差最大,这可 能是由于 k— epsilon本身无法预测回流 (小流量工 况下入口处存在回流) 导致 k— epsilon模型无法准确预测扬程。而 SSI和 DES方法则能较准确预测 小流量工况的扬程,相对 SST模型, DES方法的计 算结果更接近试验值,这是由于 DES是非定常数值 模拟,而泵本身的运行是非定常的,所以 DES更加 真实的再现了泵的运行状态。



图 6 试验泵的外特型曲线

3.2 内部流动计算与试验对比

采用 PIV试验方法对离心泵的内部流场进行了 测量,每个工况都拍摄了 400对 PIV底片,处理后得 到该工况下的定常流场测量结果。内部流场计算和 试验结果如图 7~图 9所示。由于试验装置以及拍 摄位置的影响,无法测出泵轴位置处的流场,所以处 理结果的中心处无法显示流速的测量结果。

图 7为小流量工况下 (50%设计流量)的计算 和 PN试验结果。可以看出,对于出口处低速区的 流场分布的计算,标准 k— epsilon模型和 SST模型 的结果比较靠近上沿,而 DES则在喉舌区域,这与 试验结果吻合。测量结果的速度分布也显示出 DES 模拟结果更加接近 PN的实测结果。



图 7 50%设计流量工况下 (1.01 m³ / h)转轮内的速度分布(m/s)



图 8 设计流量工况下 (2.01 m³/h)转轮内的速度分布 (m/S)



图 9 150% 设计流量工况下 (2.99 m³/h)转轮内的速度分布 (m/S)

图 8为设计工况下转轮内的速度分布。对于设 计工况下扬程的计算,虽然 3种计算模型都很接近 试验结果,但是从流场分布来说,标准 k— ePsipn模 型和 SSI模型在出口喉舌处模拟出了低速区,而 DES的计算并不存在这个低速区,此结果和试验实 测结果吻合。大流量工况(150%设计流量)下也出 现了类似的结果,如图 9所示。

通过以上分析可以看出:对于半开式离心泵流 量一扬程曲线的预测,3种数值方法都能比较准确 的得到预测结果。而对内部流场的试验和计算结果 表明,标准 k— epsilon和 SST湍流模型都无法得到 相对准确的流场结果,而 DES方法则可较为准确地 预测出内部流场细节。

4 结 论

第 3期

(1)对于半开式离心泵流量一扬程曲线的预测,使用标准 k- epsilen, SSI湍流模型以及 DES方法对于各种流量工况下扬程的预测与试验结果均比较符合,而 DES方法的预测误差最小。

(2)对于半开式离心泵的内流场预测,定常的标准 k- epsilon和 SST湍流模型进行流场计算,所得结果会忽略一些流场的流动细节,算出了实际并

不存在的低速区,所以对于预测半开式离心泵的内 部流场来说,标准 k— epsilon和 SST湍流模型并不 合适。而使用非定常的 DES方法,则能比较准确的 把握流动细节,获得较为准确的流场预测结果。

综上所述,对于半开式离心泵流量 —扬程曲线 的预测,可以使用标准定常的标准 k— @silor和 SST 湍流模型来进行,虽然 DES结果更为精确,但是考 虑到计算成本和计算时间来说, DES方法并不是最 佳选择。但是对于泵内的流场预测,只有非定常的 DES方法才能很好的得出符合实际情况的模拟 结果。

参考文献:

- BURGREEN G W, ANTAK I J F CFD-based design optinization of a three_dimensional rotaty blood pump//American Institute of A exonautics and A stronautics [C]. WA NASA 1996 1773 - 1778.
- [2] BURGREEN GW, ANTAKI JF BUILER K C CFD-based design optimization of the outlet stator of a rotodynamic cardiac assist de vice//American Institute of Aeronautics and Astronautics Q. St Louis NASA 1998 818-824
- [3] LI JNWEJ LU SHUHONG IUO XIANWU et al Viscous flow field in amini pump []. Journal of Tsinghua University (Sci &

得结果会忽略一些流场的流动细节,算出了实际并, ^{Tech}», 2007, 47, 682—685. 第1994—2016 Clima Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- [4] PEDERSEN NUHOLAS Flow in a centrifugal pump impeller at design and off-design conditions part I particle image velociments (PN) and laser doppler velociments(IDV) measurements[J. Journal of Fluids Eng 2003, 125, 61-72
- [5] KADAMBIJR Investigations of particle velocities in a slurry pump using PM part 1 the tongue and adjacent channel flow [J]. Journal of Energy Resources Technology 2004, 126, 271 -278
- [6] 袁辉靖, 邵 杰, 刘树红, 等. 小流量工况下微 小型泵内部流场数值模拟及 LIF-PIV实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008 29 (11): 1852-1856.
- [7] FLORIAN R Menter zonal tow equation k on ga tuthulence models for aerodynamic flow//American Institute of Aeronautics and A stronautics [9], FL AIAA 1993, 435-529
- [8] 邵 杰.小型离心模型泵非定常流动试验研究及数值模拟
 [1].北京:清华大学,2009

新技术、新设计

空气参数和燃气 空气的气动阻力对燃气轮机 装置和蒸燃联合循环装置经济性的影响

《Энеретика》2009年11~12月号分析了 ПУ 燃气轮机装置的燃气 空气通路中气动力阻力、大气压力、湿度和外部空气温度对发电用燃气轮机装置和 ППУ 的参数、经济性和特性的影响。针对包含在明斯克第三热电厂 ППУ -230 蒸燃联合装置中的 Alston GTl3 E2燃气轮机,完成了计算和分析。

气候因素对 ΓTV 和 ΠTV 运行时的经济性和输出功率具有相当大的影响。与设计工况比较,功率的变化可以达到 15%和更多, FTV 的效率最多可变化 4% (相对值)。

ΓΤУ 燃气 空气通路的阻力首先与余热锅炉 (KV)的阻力和空气净化装置回路 (KBOY)及过滤器堵塞有关。在 KBOY 的阻力增加时, ΓΤУ 电功率的降低可以达到 1.3%, ΓΤУ 效率降低达到 0.5% (相对值)。ΠΤΥ - 230余热锅炉的气动力阻力使 ΓΤУ 电功率减少 1.1%, 使 ΓΤΥ 效率降低 0.7% (绝对值)。

对于无补燃余热锅炉的联合循环装置,在外部空气温度降低时,虽然燃气轮机装置的效率增加,但是由 于汽轮机循环初参数大幅度的降低,使联合循环装置总的经济性恶化。在外部空气温度接近计算值时,ⅢIV 效率具有最大值。

在热电厂应用 ΠIV 的情况下,在外部空气温度降低时,提高 ΠIV 汽轮机抽汽热功率的方法之一是应用 余热锅炉内的补燃。在这种情况下,可以认为能使高压回路蒸汽参数稳定,并提高到标准值(565 ℃,13 MPa),这种补燃是最佳的。

(吉桂明 摘译)

old value treatment of the wavelet coefficients of the decomposed signals with a criterion for evaluating noise reduction based on measure of quasi-separability being introduced. It was used for analyzing and evaluating the simulation signals and actually measured signals. The research results show that the method integrates the merits of the second generation wavelets and the improved threshold value function, thus capable of better eliminating noise Key words vibration signal second generation wavelet threshold value function, threshold value noise reduction quasi-separability

半开式离心泵内部流场的数值模拟研究 = Num er ical Sim ulation Study of the Flow Field Inside a Sem i open Type Centrifugal Pum P[刊,汉] SHAO Jie ZHANG Gui ying (Guohe Electric Power Planning and Designing Institute Beijing China PostCode 100094), WU Yuulin (Department of Thermal Energy Engineering Tsing hua University Beijing China PostCode 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power – 2011, 26(3). -290~294

The standard $\mathbf{k} - \mathbf{\varepsilon}$, SST (shear stress transport) and DES (detached eddy simulation) three turbulent flow models were used to numerically simulate the flow rate lift curves and inner flow field of a sem i open type centrifugal pump operating under a small flow rate condition. To verify the simulation result the two dimensional PIV (particle inage velocimenty) technology was employed to conduct an experiment and measurement of the inner flow field of the pump. It has been found that with respect to the prediction of the flow lift curves of the pump all the three numerical simulation methods can predict relatively accurately. As for the prediction of the inner flow field the standard $\mathbf{k} - \mathbf{\varepsilon}$ and SST turbulent flow models can not provide an overall and accurate result while the DES method can relatively accurately predict the details of the inner flow field. Keywords semi-open type centrifugal pump impeller, PIV (Particle In age Velocimetry) measurement inner flow detail turbulent flow model contrast

离心泵内部非定常数值模拟与压力脉动研究 = Study of the Non_steady Num erical Simulation and Pressure Pulsation Inside a Centrifugal Pum P[刊,汉] QUAN Liang gui XU Haiming III Jin xi et al Jiangsu Zhen hua Pump Industry Manufacturing Co Ltd, Taizhou China Post Code 225500)// Journal of Engineering for Themal Energy& Power - 2011, 26 (3). -295~298

By using the Reynolds number time average equation and the dual equation turbulent flow model in combination with the SMPLEC algorithm numerically simulated was the three dimensional non-compressible turbulent flow field inside a centrifugal pump. Furthermore, the internal pressure distribution and pulsations at various monitoring points were obtained. On the basis of the simulation, an outer characteristic experiment was conducted proving that the simulation results are correct. The research results show that the asymmetry of the volute makes the flow in side the centrifugal pump be of asymmetrical and non-steady characteristics and force the pressure to change peri odically at the frequency of the rotating blades. At the rated flow rate, the pressure fluctuation amplitude at themo ?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net