

文章编号: 0258-0926(2019)04-0127-07; doi:10.13832/j.jnpe.2019.04.0127

# 基于核主泵性能预测的数值模拟精度研究

胡晓东, 王秀勇\*, 刘在伦, 张潇飞, 黎义斌

兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州, 730050

**摘要:** 为提高核主泵在全工况点的数值模拟精度, 研究了数值模拟过程中近壁面网格尺度、湍流模型、流动状态 3 种因素对计算精度的影响。结果表明, 在定常状态下, 重整化群 (RNG)  $k-\varepsilon$  湍流模型和标准壁面函数法在近壁面网格尺度 ( $y^+$ ) 为 50 左右时具有较高的计算精度, 并且其计算精度高于 RNG  $k-\varepsilon$  增强壁面函数法、低雷诺数  $k-\varepsilon$  和剪切应力传输 (SST)  $k-\omega$  这 3 种湍流模型的计算精度, 但上述不同网格尺度和湍流模型的计算结果均存在较大的计算误差; 采用非定常计算时的计算精度明显高于定常计算, 能够反映出扬程曲线在关死点附近的驼峰现象, 效率的计算精度也有一定改善, 更适合于对核主泵进行性能预测。

**关键词:** 核主泵; 网格尺度; 湍流模型; 流动状态; 预测精度

中图分类号: TH311 文献标志码: A

## Research of Numerical Simulation Accuracy Based on Performance Prediction of Nuclear Main Pump

Hu Xiaodong, Wang Xiuyong\*, Liu Zailun, Zhang Xiaofei, Li Yibin

College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China

**Abstract:** In order to improve the numerical simulation accuracy of the nuclear main pump at all the working points, three factors affecting the numerical simulation results, i.e., the near-wall mesh scale, turbulence model and flow state are comprehensively studied. The results show that the RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model and the standard wall function method have higher calculation accuracy when  $y^+=50$ , and the calculation accuracy is also higher than that of three kinds of turbulence models, i.e., the RNG  $k-\varepsilon$  enhanced wall function method, low Reynolds number  $k-\varepsilon$  and SST  $k-\omega$ . However, the calculation results of the above-mentioned different grid scales and turbulence models have large errors. Under the unsteady state calculation, the calculation accuracy of the unsteady state calculation method is significantly improved compared with the steady state calculation method, which can reflect the hump phenomenon of the head curve near the dead point, and the calculation accuracy of efficiency is also improved. The unsteady calculation method is more suitable for performance prediction of nuclear main pump.

**Key words:** Nuclear main pump, Mesh size, Turbulence model, Flow state, Prediction accuracy

## 0 引 言

近年来, 计算流体力学 (CFD) 和计算机技术不断发展和完善, 其中 CFD 数值模拟技术已

被广泛应用于流体机械的设计和研究工作中, 在性能预测、流场分析、优化设计等方面均有出色表现<sup>[1-2]</sup>。在泵类产品的研发前期, 采用 CFD 数

收稿日期: 2018-08-02; 修回日期: 2018-09-03

基金项目: 国家自然科学基金 (51866009); 甘肃省科技计划资助项目 (145RJZA047)

作者简介: 胡晓东 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事核主泵水力优化研究

\*通讯作者: 王秀勇, E-mail: m05wangxiuyong@zju.edu.cn

值模拟技术能够有效降低试验成本、缩短研发周期并提高产品性能,已成为泵水力设计与分析的重要工具和手段。

虽然 CFD 数值模拟技术已在与流体相关的问题研究中大规模普及,但其数值计算的可信度仍是备受关注的重要问题<sup>[3-4]</sup>。文献[5]列举了几类影响数值计算结果的因素,包含几何模型的简化、计算网格的划分、湍流模型的选取、边界条件的设置、数值算法的应用等。由于壁面附近流动的特点是由近壁区域的低雷诺数流动过渡到核心区的高雷诺数湍流流动,在计算此类问题时主要涉及到近壁面的处理问题,包括边界层网格划分和湍流模型选取两个方面。研究表明,边界层网格对计算结果影响较大,尤其是壁面法向第一层网格尺度对数值计算结果有明显影响<sup>[6-8]</sup>。李晓俊等研究了离心泵内边界层网格质量及拓扑块的生成方法,认为湍流模型与边界层网格质量密切相关,不同的湍流模型对应不同的近壁面网格尺度( $y^+$ )范围<sup>[9]</sup>。湍流模型对计算结果准确性的影响也较大<sup>[10-11]</sup>,张德胜等用 3 种湍流模型预测了轴流泵的性能,发现在设计工况点处,3 种湍流模型均具有较好的适用性,但在非设计工况时预测误差较大<sup>[12]</sup>。综上,网格划分和湍流模型的选取对泵类产品的数值计算精度具有重要影响。核主泵作为核电厂一回路设备,对反应堆安全和高效运行起着重要作用,但目前关于其性能预测的数值模拟精度的研究还较少。

本文以某型号核主泵为研究对象,基于水力性能预测过程中的 FLUENT 软件,结合工程问题中常用的 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型,研究了近壁区域网格划分中第 1 层网格尺度对数值模拟精度的影响;对近壁区域网格划分较精细的几种湍流模型进行应用对比分析,研究在同一网格中不同湍流模型的模拟精度和适用性;针对叶轮和导叶相互干涉时具有明显的非定常流动特征<sup>[13]</sup>,研究数值模拟过程中流动状态对计算精度的影响。通过上述数值模拟方法的探讨,为核主泵数值模拟中出现的不足和解决方法提供理论支撑。

## 1 计算模型与网格划分

### 1.1 计算模型

以某型号核主泵原型样机为研究对象,其设计工况点的参数为:工况点流量  $Q_d=630 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H=35 \text{ m}$ ,转速  $n=990 \text{ r/min}$ ,比转速  $n_s=105$ 。

叶轮叶片数  $Z=6$ ,导叶叶片数  $Z_d=10$ 。整个计算域包括进口段、叶轮、导叶、压水室、前腔、口环间隙及后腔等内部完整的过流区域,计算模型如图 1 所示。

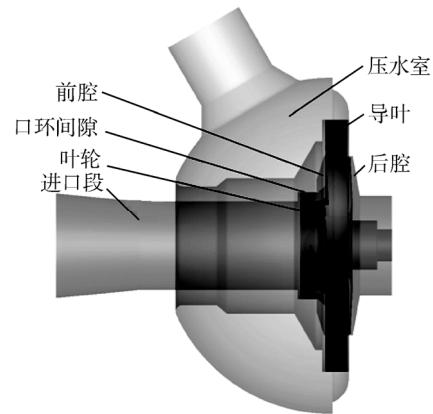


图 1 计算模型  
Fig. 1 Computational Model

### 1.2 网格划分

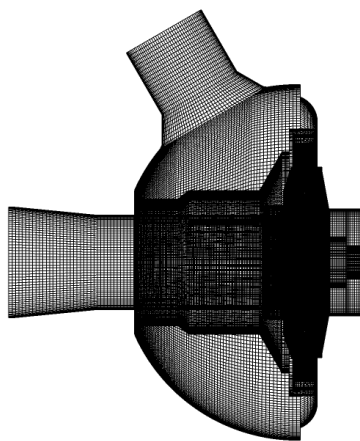
网格划分是数值模拟的一项重要工作,直接影响数值计算的精度和效率。根据各过流部件的几何结构特点,对各计算域进行分块并划分为六面体结构化网格。其中,叶轮和导叶采用外 O 型拓扑结构,其余过流区域均采用内 O 型拓扑结构,网格划分结果如图 2 所示。

为尽可能减小网格数量对计算结果的影响,需进行网格无关性验证。设定第 1 层网格尺度为  $0.2 \text{ mm}$ ,并划分 4 种不同数量的网格,各方案在设计工况点的计算结果如表 1 所示。当网格数为 919 万和 1145 万时,扬程和效率的计算结果变化非常小,可认为当网格数量为 919 万时满足网格无关性要求。最终在方案 3 网格数量的基础上划分出 6 套网格,壁面法向第 1 层网格尺度( $\Delta y$ )分别取  $0.05$ 、 $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.4$ 、 $0.8$ 、 $1.6 \text{ mm}$ 。近壁面网格尺度也可以通过无量纲壁面函数  $y^+$  表示:

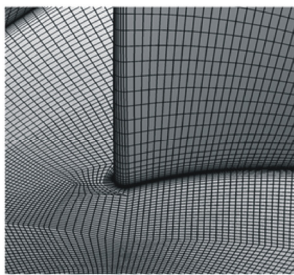
$$y^+ = \frac{\Delta y}{\mu} \sqrt{\rho \tau_w} \quad (1)$$

式中, $\mu$  为动力粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\tau_w$  为壁面切应力,  $\text{N}/\text{m}^2$ 。

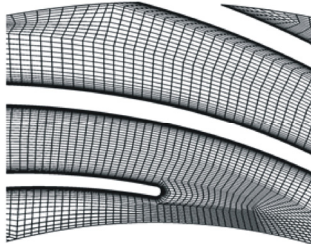
由于核主泵中各过流部件几何尺寸相差较大,泵内流动情况复杂,即使将近壁面网格尺度控制在同一数值,在不同空间位置处的  $y^+$  值也不相同。不同  $y^+$  值区间内近壁面网格数量分布的统



a 整体网格



b 叶轮网格



c 导叶网格

图2 计算域网格

Fig. 2 Mesh in Computational Domain

表1 网格无关性验证

Table 1 Grid Independence Verification

网格划分	方案1	方案2	方案3	方案4
网格数量/ $10^4$	505	706	919	1145
扬程/m	36.52	36.87	37.03	36.97
效率/%	83.96	84.37	84.53	84.64

计结果如图3所示。由图3可知， $\Delta y$ 较小时， $y^+$ 值也较小且分布范围集中，随着 $\Delta y$ 的增大， $y^+$ 值变大且分布区间逐渐变宽，集中度下降。当 $\Delta y=0.05$  mm时， $y^+$ 值主要分布于1~20区间，其中5~15区间内网格数量的比例为80.61%；当 $\Delta y=0.1$  mm时， $y^+$ 值主要分布于1~40区间，其中10~30区间内的网格数量比例为80.96%； $\Delta y=0.2$  mm时， $y^+$ 值主要分布于2~70区间，其中20~55

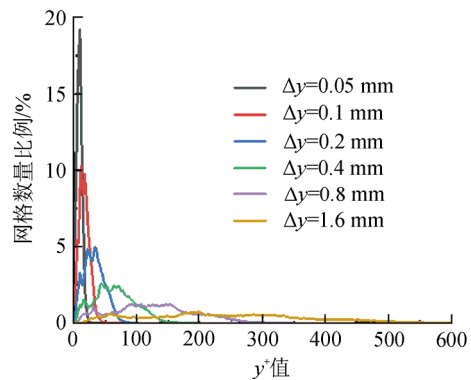


图3 近壁面网格数量分布

Fig. 3 Distribution of Grid Number near-Wall

区间内的网格数量的比例为70.78%； $\Delta y=0.4$  mm时， $y^+$ 值主要分布于8~150区间，其中30~100区间内的网格数量的比例为69.63%； $\Delta y=0.8$  mm时， $y^+$ 值主要分布于10~300区间，其中在50~200区间内网格数量的比例为71.43%； $\Delta y=1.6$  mm时， $y^+$ 值主要分布于25~600区间，在该区间的大部分区域内网格数量分布的比例比较均匀，没有明显的集中分布状态。

## 2 数值计算方法

利用连续性方程和雷诺时均N-S方程(RANS方程)求解整个流场，根据不同目的分别采用重整化群(RNG)  $k-\varepsilon$  湍流模型、低雷诺数  $k-\varepsilon$  湍流模型(AKN)、剪刀应力传输(SST)  $k-\omega$  湍流模型<sup>[14-16]</sup>进行研究。控制方程的离散采用有限体积法计算，压力与速度的耦合采用SIMPLEC算法计算，压力方程的离散采用标准格式计算，动量、湍动能与耗散率输运方程的离散均采用二阶迎风格式计算。

旋转区域与静止区域之间的耦合采用多重参考系模型，各计算区域之间通过交界面传递数据。进口边界条件采用速度进口，假定来流方向垂直于入口截面，给定速度大小；出口选择自由流出条件；壁面满足无滑移边界条件。在计算过程中，当泵出口监测面上的静压变化趋于稳定时认为计算收敛。

## 3 计算结果分析

### 3.1 近壁面网格尺度对性能预测的影响

首先，采用工程问题数值模拟中常用的RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和标准壁面函数法，探讨近壁区域网

格尺度对核主泵性能预测精度的影响,并假设流动定常。图4为近壁面采用不同网格尺度时核主泵在全工况条件下的扬程计算结果。总体来看,扬程的计算值与试验值相差较大。随着流量的增大,扬程的计算曲线整体呈现单调下降的趋势,下降速度比试验曲线缓慢;和实验曲线相比,计算曲线没有“关死点附近有驼峰、 $0.6Q_d$ 流量之前扬程变化较小、 $0.6Q_d$ 流量之后扬程下降较快”的主要流动特征;在关死点处,扬程的计算值整体偏高;(0.2~0.8) $Q_d$ 工况点处的扬程计算值小于试验值,而0.8 $Q_d$ 工况点后扬程的计算值大于试验值。

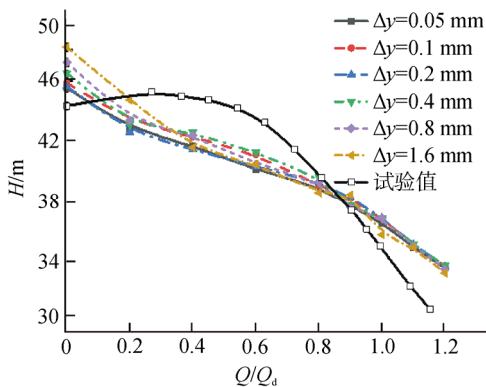


图4 近壁面不同网格尺度下的扬程计算结果  
Fig. 4 Calculation Results of Head with Different Near-Wall Mesh Sizes

从不同工况点扬程计算误差的角度分析,在(0.8~1.0) $Q_d$ 工况点内,近壁面不同网格尺度下扬程的计算误差整体相对较小,最大计算误差在设计工况点,其中 $\Delta y=(0.05\sim 0.8)$  mm时的计算误差均约为5.50%, $\Delta y=1.6$  mm时计算误差相对较小,约为2.34%。在(0~0.8) $Q_d$ 工况点,扬程的计算误差较大,最大计算误差在0.6 $Q_d$ 工况点附近,其中 $\Delta y=0.05$  mm时计算误差最大,约为7.82%, $\Delta y=0.4$  mm时计算误差相对较小,约为5.23%。在(1.0~1.2) $Q_d$ 工况点,扬程的计算误差随流量的增加而增大,各方案的计算误差差异很小,最大计算误差在1.2 $Q_d$ 工况点;根据扬程试验曲线的变化趋势来判断,在1.2 $Q_d$ 工况点的扬程值约为30 m,则各方案的计算误差在12.67%左右。

从近壁面不同网格尺度下扬程计算结果之间

的差异分析,流量越小,计算结果之间的差异越明显;在关死点,各网格尺度下计算扬程的最大差异为5.93%,随着流量的增大,不同网格尺度之间的计算差异逐渐减小,除 $\Delta y=1.6$  mm时的计算扬程变化趋势不稳定外,其余各网格尺度在高于设计工况点处的计算扬程最大差异均不超过0.9%。

综合所有工况点,当近壁面网格尺度 $\Delta y=0.4$  mm时,扬程的整体计算误差相对较小,由图3可知,此时 $y^+$ 值集中分布在50附近。 $\Delta y$ 值过大或过小都会引起扬程计算误差的增大,而 $\Delta y$ 值过大会同时引起计算扬程曲线变化趋势不稳定。

图5为近壁面采用不同网格尺度时核主泵在全工况条件下的效率计算结果。总体上看,在(1.0~1.2) $Q_d$ 工况点处,效率的计算值与试验值吻合度很高;在小流量工况点内,计算值均明显低于试验值,存在较大计算误差。效率计算曲线的高效区位于(1.0~1.2) $Q_d$ 工况点,试验曲线的高效区位于(0.7~1.0) $Q_d$ 工况点,计算曲线的高效区明显比试验曲线窄,并且其高效区向大流量工况点偏移。

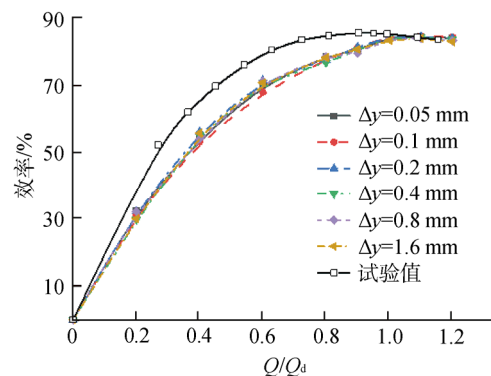


图5 近壁面不同网格尺度效率计算结果  
Fig. 5 Calculation Results of Efficiency with Different Near-Wall Mesh Sizes

从不同工况点效率计算误差的角度分析,在(1.0~1.2) $Q_d$ 工况点内,近壁面不同网格尺度效率的计算误差较小,除设计工况点的最大计算误差为1.46%外,其他工况点的最大计算误差不超过1%。在(0~1.0) $Q_d$ 工况点内,效率的计算误差较大,最大计算误差在0.4 $Q_d$ 工况点附近,约为16.45%。

从近壁面不同网格尺度下效率计算结果的差异分析,除了在0.6 $Q_d$ 工况点且 $\Delta y=0.1$  mm时的

效率明显偏低外（计算效率最大差异为 5.24%），其他各网格尺度下的效率计算结果差异较小，最大差异均在 1% 左右。

综上，当近壁面网格尺度  $\Delta y=0.2$  mm 时，效率的整体计算误差相对较小， $\Delta y=0.4$  mm 时次之，前者在设计工况点之前的计算精度较高，后者在设计工况点之后的计算精度较高，总体来看差异不大。除个别工况点之外，近壁面不同网格尺度的计算效率具有良好的相似性。

由上述研究分析可知，没有一种近壁面网格尺度能够同时满足对扬程和效率的精确预测，并且对于本文所研究的问题，在小流量工况点和大流量工况点各网格尺度均存在较大的预测误差，对初始水力设计进行性能预测时要通过合理的误差评估对计算结果进行修正。综合近壁面不同网格尺度下扬程和效率的计算结果，单从计算误差最小的角度来考虑，虽然  $\Delta y=0.2$  mm 时对效率的预测精度比  $\Delta y=0.4$  mm 具有微弱优势，但前者对扬程的预测精度比后者低很多，所以当近壁面网格尺度  $\Delta y=0.4$  mm 时的综合预测精度是最高的，即针对于 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和标准壁面函数法而言，壁面  $y^+$  值集中分布在 50 左右时具有最好的预测精度。

### 3.2 湍流模型对性能预测的影响

由于采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和标准壁面函数法（SWF）预测核主泵的全工况性能时存在较大的计算误差，分析其主要原因可能是未充分考虑边界层对流动的影响，因此，将 RNG  $k-\varepsilon$  标准壁面函数法替换为几种能够对近壁边界层流动直接进行计算的湍流模型，如 RNG  $k-\varepsilon$  增强壁面函数法（EWF）、AKN 和 SST  $k-\omega$  这 3 种湍流模型，并假设流动定常。由于网格划分的局限性，能够保证所采用的三维模型网格质量较高的最小网格尺度为  $\Delta y=0.05$  mm，此时  $y^+$  值主要集中于 1~15，基本满足各湍流模型对网格的要求，可以进行探讨性研究，更细致的研究工作将持续展开。

图 6 为采用不同湍流模型时核主泵在全工况条件下的扬程计算结果。从 3 种湍流模型的计算结果与试验结果的比较来看，在小流量工况点和大流量工况点仍然存在较大的计算误差，无法实现对核主泵扬程在全工况条件下的精确预测。相比较而言，增强壁面函数法在全工况点具有相对

较高的计算精度，SST  $k-\omega$  湍流模型次之，而低雷诺数  $k-\varepsilon$  湍流模型不仅计算精度较低，并且所预测的扬程性能曲线波动厉害，趋势变化的稳定性较差。

由扬程的计算结果来看，网格尺度较小时（如  $\Delta y=0.05$  mm），增强壁面函数法比标准壁面函数法具有更高的计算精度，但是当采用标准壁面函数法进行数值计算时的近壁面网格尺度划分合理时（如  $\Delta y=0.4$  mm），2 者之间在全工况条件下的计算结果基本一致，由于增强壁面函数法对网格划分要求更高，网格划分更困难，因而增强壁面函数法已失去其在计算精度上的优势。

图 7 为采用不同湍流模型时核主泵在全工况条件下的效率计算结果。从计算结果与试验结果的对比来看，3 种湍流模型在大流量工况附近的计算精度较高，在小流量工况点仍然较低，同样无法实现对核主泵效率在全工况条件下的精确预测。

由效率的计算结果来看，各湍流模型相互之

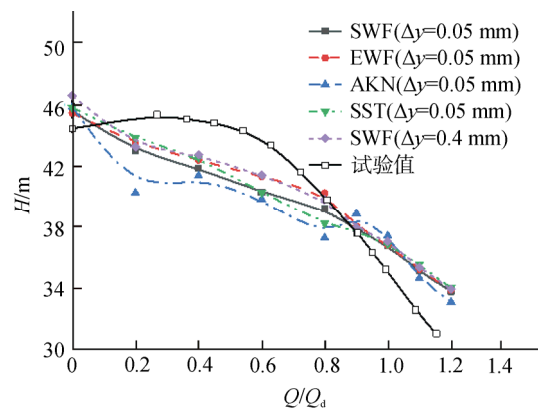


图 6 不同湍流模型扬程计算结果  
Fig. 6 Calculation Results of Head with Different Turbulence Models

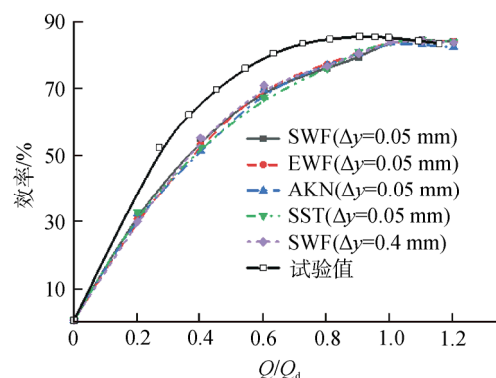


图 7 不同湍流模型效率计算结果  
Fig. 7 Calculation Results of Efficiency with Different Turbulence Models

间的计算结果差异较小, 在各个工况点未出现明显的背离情况。在上述 3 种对近壁面网格尺度要求较高的湍流模型中, 增强壁面函数法对效率的计算精度整体相对较高; SST  $k-\omega$  湍流模型在大流量工况点附近的计算精度较高, 在小流量工况点相对较低; 而低雷诺数  $k-\epsilon$  湍流模型在全工况点的表现不稳定, 计算精度忽高忽低, 在大流量工况点整体偏低。与标准壁面函数相比较而言, 增强壁面函数、低雷诺数  $k-\epsilon$  和 SST  $k-\omega$  这 3 种湍流模型对效率的计算精度并没有表现出明显的优势, 甚至后 2 种湍流模型还要略低一些, 尤其是当近壁面网格尺度划分合理时 (如  $\Delta y=0.4$  mm), 标准壁面函数在全工况点的计算精度更高。

总体来看, 即使加强对边界层内部流动的处理, 增强壁面函数、低雷诺数  $k-\epsilon$  和 SST  $k-\omega$  这 3 种湍流模型对核主泵性能的预测精度也没有达到预期效果。只要近壁面网格尺度合理, 采用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型和标准壁面函数法对核主泵性能的预测具有更高的精度, 并且由于标准壁面函数法对近壁面网格尺度要求相对较低, 网格划分更容易实现, 网格质量更高, 有利于数值计算的顺利进行。

### 3.3 流动状态对性能预测的影响

由于核主泵内叶轮和导叶的相互干涉具有明显的非定常流动特征, 在采用定常计算的方法时产生了较大的计算误差, 因而考虑采用非定常计算的方法对核主泵的性能进行预测。由上述分析可知, 当采用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型和标准壁面函数法, 且  $\Delta y=0.4$  mm 时的数值预测精度相对较高, 在此基础上, 将叶轮每旋转  $3^\circ$  所需要的时间作为 1 个时间步长, 时间步长为  $5 \times 10^{-4}$  s, 每旋转 1 圈需要迭代 120 个时间步。叶轮旋转 4 圈后监测点的压力值呈现稳定的周期性特征, 取第 5 圈数据的算术平均值进行性能分析。

图 8 为不同流动状态下核主泵在全工况处的扬程计算结果。总体来看, 随着流量的增加, 扬程的非定常计算曲线与试验曲线变化趋势大致相同。相比于定常计算结果, 非定常计算曲线能预测出关死点附近有驼峰、 $0.6Q_d$  流量之前扬程变化较小、 $0.6Q_d$  流量之后扬程下降较快等流动特性; 在  $(0 \sim 0.6)Q_d$  工况点的扬程计算值略小于试验值, 关死点扬程计算误差最大, 为 1.42%; 在  $0.6Q_d$  工况点之后扬程的计算值大于试验值, 且计算误

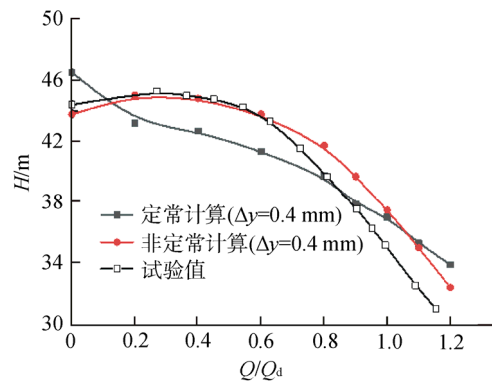


图 8 不同流动状态扬程计算结果  
Fig. 8 Calculation Results of Head with Different Flow States

差随流量的增加而增大, 在  $1.2Q_d$  工况点的误差最大, 为 8.77%。在关于扬程的数值计算中, 非定常计算方法的预测精度比定常计算精度更高, 能够反映出扬程曲线的一些主要特征。

图 9 为不同流动状态时核主泵在全工况条件下的效率计算结果。在全工况范围内, 效率的非定常计算结果低于试验值。相对于定常计算结果, 非定常计算的效率曲线走势与试验曲线更吻合, 其高效区范围与试验曲线一致, 最高效率点与试验结果大致相同; 在设计工况点之前, 效率的非定常计算精度比定常计算有所提高, 设计工况点之后计算精度有所降低, 2 者的计算值最大相差 2.48%。

综上, 虽然非定常计算所消耗的时间约为定常计算的 4 倍, 但其数值计算精度明显高于定常计算, 能够反映出性能曲线的主要变化特征, 在核主泵的水力设计过程中可发挥重要作用。

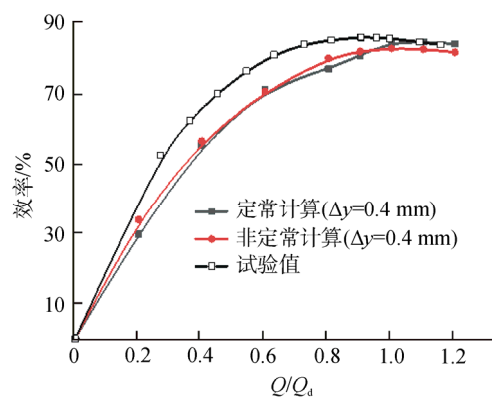


图 9 不同流动状态效率计算结果  
Fig. 9 Calculation Results of Efficiency with Different Flow States

## 4 结 论

通过改变近壁面网格尺度、选取不同的湍流模型以及考虑流动状态是否定常,对影响核主泵性能计算精度的3种因素进行了综合性探讨,结论如下:

(1) 近壁面网格尺度的变化对计算精度有明显影响,对于 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和标准壁面函数法,当近壁面网格尺度  $y^+$  约为 50 时能够获得最高的计算精度,过大或过小的网格尺度都会降低计算精度。

(2) 湍流模型的不同对计算精度有明显的影响, RNG  $k-\varepsilon$  增强壁面函数法、低雷诺数  $k-\varepsilon$  模型和 SST  $k-\omega$  模型均是能够直接求解边界层流动的湍流模型,其中,增强壁面函数法计算精度较高,而低雷诺数  $k-\varepsilon$  湍流模型计算精度较低,计算性能曲线振荡明显,不适合对核主泵进行性能预测。

(3) 对于标准壁面函数法和增强壁面函数法,  $y^+=50$  左右时的标准壁面函数法比  $y^+<10$  时的增强壁面函数法具有更高的计算精度,并且针对于标准壁面函数法的网格划分更容易实现,因而 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和标准壁面函数法更适合于对核主泵进行性能预测。

(4) 定常计算在小流量工况点和大流量工况点均存在较大的计算误差,而采用非定常计算时,计算精度有了明显的提高,并且能够反映出性能曲线的主要特征,非定常计算方法更适合于对核主泵进行性能预测。

### 参考文献:

[1] 蒋鸿, 黄伟. 基于 CFD 方法的核级轴流泵水力性能研究[J]. 核动力工程, 2013, 34(6): 61-65.  
 [2] 王春林, 彭娜, 康灿, 等. 模型泵内部流场的数值模拟[J]. 核动力工程, 2009, 30(4): 81-85.  
 [3] STERN F, WILSON R V, COLEMAN H W, et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations—Part 1: methodology and procedures [J]. Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(4): 792-802.

[4] WILSON R V, STERN F, COLEMAN H W, et al. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations—Part 2: application for rans simulation of a cargo/container ship[J]. Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(4): 803-810.  
 [5] DENTON J D. Some limitations of turbomachinery CFD[C]. UK: ASME Turbo Expo, 2010.  
 [6] SALIM S M, CHEAH S C. Wall  $y^+$  strategy for dealing with wall-bounded turbulence flows[C]. Hong Kong: IMECS, 2009: 2165-2170.  
 [7] SALIM S M, ARIFF M, CHEAH S C. Wall  $y^+$  approach for dealing with turbulent flows over a wall mounted cube[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2010, 10(5): 341-351.  
 [8] ZHOU L, SHI W, LU W, et al. Numerical investigations and performance experiments of a deep-well centrifugal pump with different diffusers[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7): 071102.  
 [9] 李晓俊, 袁寿其, 潘中永, 等. 离心泵边界层网格的实现及应用评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 67-72.  
 [10] KALITZIN G, MEDIC G, IACCARINO G, et al. Near-wall behavior of RANS turbulence models and implications for wall functions[J]. Journal of Computational Physics, 2005, 204(1): 265-291.  
 [11] TOMINAGA Y, STATHOPOULOS T. Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Comparison of various types of  $k$ -models[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(20): 3200-3210.  
 [12] 张德胜, 施卫东, 张华, 等. 不同湍流模型在轴流泵性能预测中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(01): 66-71.  
 [13] 江伟, 李挺, 王玉川, 等. 导叶式离心泵内部流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2017, (9): 121-128.  
 [14] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence I. basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3-51.  
 [15] ABE K, KONDOH T, NAGANO Y. A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows—I. Flow field calculations[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1994, 37(1): 139-151.  
 [16] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity transport turbulence model for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.

(责任编辑: 周 茂)