

网格划分对多级离心泵水力性能计算精度的影响

刘志远, 王秀勇*, 杜永峰, 汪东山, 吕雪

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为提高多级离心泵在多工况条件下水力性能的计算精度, 分别将计算域划分为四面体、混合型和六面体网格, 采用 RNG κ - ϵ 湍流模型进行数值计算, 与试验结果作对比, 从计算曲线与试验曲线的吻合度上综合评判网格划分对计算精度的影响。研究表明: 混合型和六面体网格在多工况条件下的综合计算精度高于四面体网格, 而六面体网格的综合计算精度又明显优于混合型网格; 六面体网格对各性能参数的最大相对计算误差不超过 2.44%, 效率的计算曲线和试验曲线吻合度较高。综合来看, 六面体网格更适用于多级离心泵的水力性能预测。

关键词: 多级离心泵; 性能预测; 计算精度; 网格类型

中图分类号: TH311 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2021)03-0083-07

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.3572

Research on the Influence of Grid Division on the Hydraulic Performance Calculation Accuracy of Multistage Centrifugal Pump

LIU Zhiyuan, WANG Xiuyong*, DU Yongfeng, WANG Dongshan, LV Xue

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

Abstract: In order to improve the calculation accuracy of the hydraulic performance of multistage centrifugal pump under multiple working conditions, the calculation domain was divided into tetrahedral, mixed and hexahedral grids respectively. RNG κ - ϵ turbulence model was used for numerical calculation and compared with the test results. The influence of grid division on the calculation accuracy was comprehensively evaluated from the coincidence of the calculation curve and the test curve. The results show that the comprehensive calculation accuracy of hybrid and hexahedral grid schemes is higher than that of tetrahedral grid under multi-working conditions; the comprehensive calculation accuracy of hexahedral grid is significantly better than that of hybrid grid type, especially that the maximum relative calculation error of performance parameters under multi working conditions is less than 2.44%, and the efficiency calculation

收稿日期: 2020-01-15

基金项目: 甘肃省科技攻关资助计划(145RJZA047)。

第一作者: 刘志远(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为离心泵水力性能优化。

ORCID: 0000-0002-1925-222X E-mail: 756359905@qq.com

*通信作者: 王秀勇(1978—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为流体机械流动分析及性能优化。

ORCID: 0000-0003-3035-2511 E-mail: m05wangxiuyong@zju.edu.cn

引用格式: 刘志远, 王秀勇, 杜永峰, 等. 网格划分对多级离心泵水力性能计算精度的影响[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 83-89.

LIU Zhiyuan, WANG Xiuyong, DU Yongfeng, et al. Research on the Influence of Grid Division on the Hydraulic Performance Calculation Accuracy of Multistage Centrifugal Pump[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2021, 40(3): 83-89.

curve and test curve are in good agreement. In general, hexahedral grid is suitable for the prediction of the hydraulic performance of multistage centrifugal pump.

Keywords: multistage centrifugal pump; performance prediction; calculation accuracy; grid type

近年来,CFD 技术在泵的性能预测、流场分析和水力优化方面被广泛应用,并取得了良好的效果^[1-7],同时在提高泵水力性能方面发挥了较大的作用。目前,提高 CFD 的计算精度依然是研究的重点内容,其影响因素众多,其中一个重要因素就是计算域的网格划分。

网格划分是进行 CFD 计算的关键一步,是保障数值计算精度的重要一环^[8-9]。文献 [10] 探究了不同计算网格对离心泵数值计算精度的影响,结果表明计算网格中含有近壁面网格时计算精度最高,流场结构更符合实际流动情况。文献 [11] 以核主泵为研究对象,基于六面体网格,探究了影响核主泵计算精度的因素,结果表明合理的近壁面网格尺度能有效提高水力性能的计算精度。从目前已有研究来看,多级离心泵的研究主要集中在对泵内部流场的优化与分析中^[12-15],而关于多级离心泵计算精度的研究还比较少,尤其是关于网格划分对多级离心泵计算精度影响的研究更少,因此有必要研究不同网格划分对多级离心泵水力性能计算精度的影响。

本文以节段式多级离心泵为研究对象,采用 ICEM 软件将计算域分别划分为四面体网格、混合网格和六面体网格 3 种网格方案,在网格无关性的基础上,采用 FLUENT 软件在多流量工况点进行数值计算,并对各网格划分方案的计算精度进行综合分析,以期在网格划分方面为提高多级离心泵的水力性能计算精度提供参考。

1 计算模型与网格划分

1.1 计算模型

计算模型为 13 级节段式离心泵,其设计参数为:流量 $Q_d=90 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=1\ 500 \text{ m}$,转速 $n=2\ 980 \text{ r/min}$,首级叶轮的叶片数为 5 枚,次级为 6 枚,正导叶和反导叶的叶片数均为 9 枚。计算域主要包括吸水室、首级叶轮、次级叶轮、导叶、压

水室、叶轮前后腔体及各级口环间隙。

1.2 网格划分

为了研究计算域网格划分的不同对多级离心泵水力性能计算精度的影响,分别采用 3 种网格划分方案来进行定性分析。一是全计算域均采用四面体网格,其中导叶、压水室和吸水室的网格尺度为 4 mm,叶轮的全局网格尺度为 2 mm,叶片表面网格尺度为 1 mm,网格总数为 $3\ 740 \times 10^4$;二是采用混合网格,即核心过流部件叶轮采用六面体网格,其第一层网格高度为 0.4 mm,网格增长比率为 1.2,其余各过流部件采用四面体网格,网格尺度与方案一相同,网格总数为 $3\ 078 \times 10^4$;三是全计算域均采用六面体网格,各过流部件近壁面第一层网格的高度均为 0.4 mm,网格增长比率为 1.2,网格总数为 $2\ 408 \times 10^4$ 。各方案的网格划分情况如图 1 所示。经网格无关性计算验证,上述各方案的网格数量均满足要求。



图 1 多级泵网格划分

图 2 所示为四面体网格和六面体网格无量纲壁面距离 y^+ 的分布情况。其中四面体网格 y^+ 值的

分布区间较宽,集中度不高,主要分布在500~900区间范围内;六面体网格 y^+ 值分布较为集中,主要集中在0~300的区间范围内。很显然,采用六面体网格划分方案时,由于在近壁面处对网格进行加密处理较为方便,能够明显降低全计算域的 y^+ 值,可以更好地满足湍流模型对近壁面网格尺度的要求。

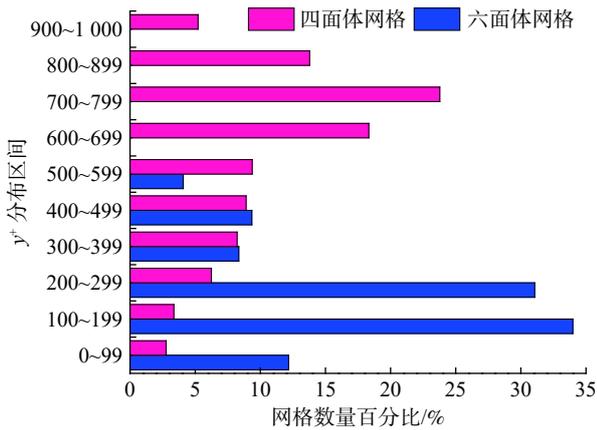


图2 近壁面 y^+ 的分布情况

2 数值计算方法与求解设置

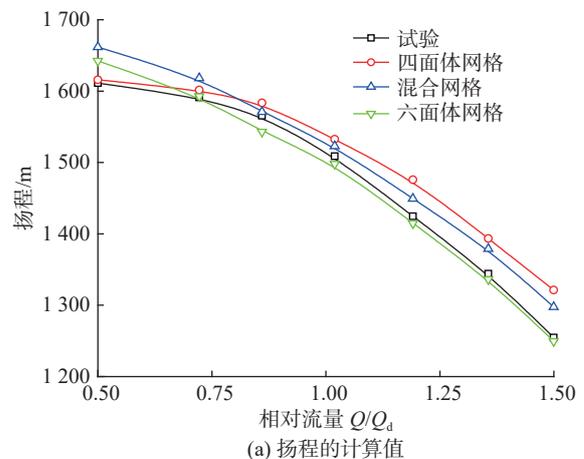
湍流模型选择工程中常用的RNG κ - ε 模型和标准壁面函数组合,压力与速度的耦合采用SIMPLEC算法。计算域中静止和旋转过流区域之间采用多重参考系模型,各个过流部件之间通过Interface边界条件进行数据传递。泵的进出口分别设定为速度入口和自由出流边界条件,壁面设置为无滑移壁面条件。当泵出口处的静压变化趋于稳定时即认为计算收敛。

3 计算结果分析

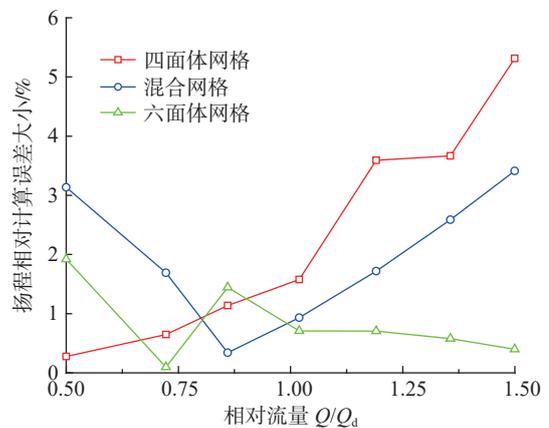
3.1 不同网格的水力性能计算结果对比分析

图3所示为不同网格划分方案在多工况条件下对多级离心泵扬程的计算结果。从扬程计算曲线和试验曲线在多工况范围内的对比来看,各网格方案基本能够计算出扬程随流量增加时的变化趋势,均能够反映出 $1.0Q_d$ 工况点之前扬程下降较慢, $1.0Q_d$ 工况点之后扬程下降较快的曲线特征。由3种网格方案扬程的计算值和试验值之间的比较来看,六面体网格扬程的计算值在 $0.5Q_d$ 工况点

明显高于试验值,在 $0.72Q_d$ 工况点与试验值相当,在其余工况点则均低于试验值;而四面体网格与混合网格扬程的计算值在 $(0.5\sim 1.5)Q_d$ 流量工况区间内均明显高于试验值,随着流量的增大,混合网格扬程的计算值与试验值之间的偏差呈现先减小后增大的趋势,而四面体网格的偏差则持续增大。由各网格划分方案扬程计算曲线的对比来看,混合网格和六面体网格的计算曲线除在 $0.72Q_d$ 工况点之前比四面体网格的偏高且明显偏离试验曲线外,在其余工况点均偏低且更接近试验曲线;在 $(0.5\sim 0.9)Q_d$ 工况区间内,随着流量的增大,四面体网格扬程计算曲线的变化趋势与试验曲线吻合度较好,而混合网格和六面体网格扬程计算曲线的下降速度较快;在 $0.9Q_d$ 工况点之后,六面体网格扬程计算曲线随流量增大时的变化趋势与试验曲线几乎一致,混合网格和四面体网格扬程计算曲线的下降速度相对较慢,其中四面体网格扬程计算曲线与试验曲



(a) 扬程的计算值



(b) 扬程的相对计算误差

图3 不同网格的扬程计算结果

线之间的差异最大。从多工况点综合来看,六面体网格的扬程计算曲线与试验曲线之间的吻合度最高,其次是混合网格,而四面体网格扬程计算曲线与试验曲线之间的吻合度相对较低。

从扬程相对计算误差的角度来看,随着流量的增加,3种方案相对计算误差变化趋势各不相同。在多流量工况条件下,四面体网格方案相对计算误差变化呈现逐渐增大的趋势,最大误差值出现在 $1.5Q_d$ 工况点,为5.31%,其余工况点计算误差均在3.67%以内;混合网格方案相对计算误差在 $0.9Q_d$ 工况点之前呈现单调下降的趋势,在 $0.9Q_d$ 工况点之后随着流量增加逐渐增加,最大误差同样出现在 $1.5Q_d$ 工况点,为3.41%;而六面体网格方案在多流量工况下,相对计算误差变化趋势不稳定,但整体计算误差不大,相对计算误差最大值出现在 $0.5Q_d$ 工况点处,为1.90%,其他工况点相对计算误差位于0.10%~1.44%之间。

总体来看,在多工况条件下,六面体网格方案扬程计算曲线与试验曲线之间的吻合度远高于其他两种网格方案,在扬程性能预测中具有一定的优势。

图4所示为在多工况条件下不同网格划分方案的轴功率计算结果。从3种网格划分方案轴功率的计算值和试验值之间的对比来看,各方案的计算值除了在 $0.5Q_d$ 工况点略高于试验值外,在其他工况点均低于试验值;混合网格和六面体网格的轴功率计算值与试验值之间的吻合度要明显高于四面体网格,其中混合网格的计算值除了在 $0.5Q_d$ 工况点略高于六面体网格外,在其余工况点均偏低;六面体网格的轴功率计算值在各个工况点与试验值之间的吻合度最高。从轴功率的计算曲线和试验曲线在多工况条件下的总体对比来看,各网格方案均能够计算出轴功率随流量增加时的变化趋势,有所不同的是,随着流量的增加,四面体网格和混合网格轴功率计算曲线的斜率增长速度在 $1.0Q_d$ 工况点之前明显慢于试验曲线,而在 $1.0Q_d$ 工况点之后则快于试验曲线,导致四面体网格和混合网格的轴功率计算曲线与试验曲线之间有较大的偏差,其中四面体网格的偏差最大;六面体网格的轴功率

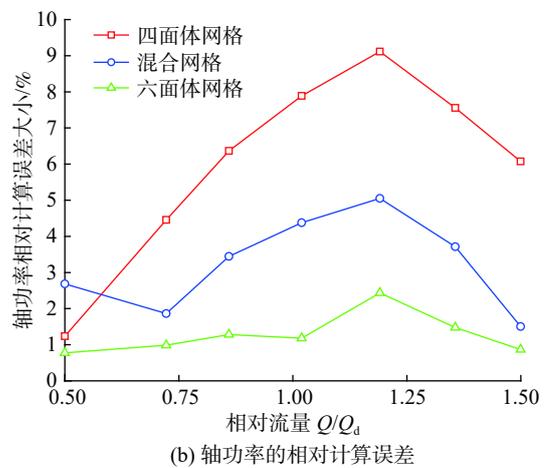
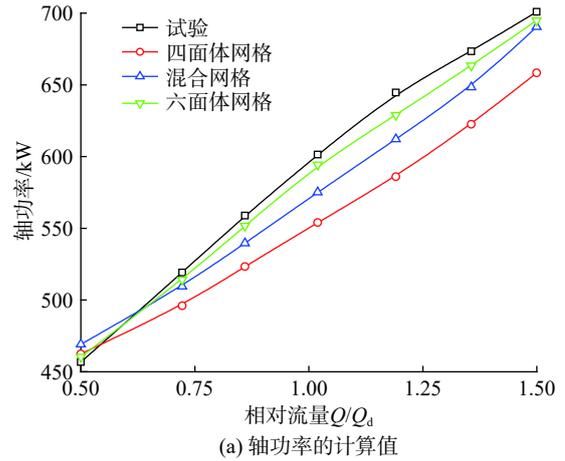


图4 不同网格的轴功率计算结果

计算曲线随流量增加时的变化趋势与试验曲线之间具有良好的吻合度,其吻合度是3种网格划分方案中最高的。

由各网格划分方案对轴功率相对计算误差的大小来分析,四面体网格除了在 $0.5Q_d$ 工况点轴功率相对计算误差比较小外,其余工况点的相对计算误差均明显较大,远超过其他两种方案,其最大误差出现在 $1.2Q_d$ 工况点,为9.12%,随着流量的进一步增加,相对计算误差又呈现递减的趋势;混合网格与六面体网格相对计算误差的变化趋势基本类似,均在 $1.2Q_d$ 工况点出现最大计算误差,分别为5.05%和2.44%,最小相对误差均在 $1.5Q_d$ 工况点,分别为0.87%和0.22%;六面体网格在各个工况点的轴功率相对计算误差均明显小于其他两种网格划分方案,其计算精度是最高的。

总体来看,在进行多级泵的轴功率性能预测时,六面体网格方案具有较高的计算精度,不论是

在轴功率的相对计算误差上还是计算曲线与试验曲线的吻合度上均具有一定的优势。

图5所示为不同网格划分方案在多工况条件下对多级离心泵效率的计算结果。从各方案效率的计算值和试验值之间的对比来看,除了在 $0.5Q_d$ 工况点各网格的计算值与试验值非常接近外,在其他工况点都高于试验值,其中四面体网格的效率计算值在 $0.5Q_d$ 工况点之后明显高于混合网格和六面体网格,并且该偏差值随着流量的增加逐渐加大;而混合网格效率的计算值虽比四面体网格小,但也同样明显大于六面体网格;六面体网格效率的计算值在各个工况点只是略微大于试验值。从效率计算曲线和试验曲线在多工况条件下的对比来看,六面体网格的计算曲线和试验曲线之间的吻合度较高,能够较为准确地反映出效率在 $(0.5\sim 1.0)Q_d$ 工况区间内快速提升、在 $(1.0\sim 1.4)Q_d$ 工况区间内增速放缓并且在 $1.4Q_d$ 工况点附近达到最高值

之后又缓慢下降的变化趋势;混合网格的效率计算曲线也基本能够反映出效率随流量增加时的变化趋势,但在 $1.0Q_d$ 工况点之前计算曲线的斜率大于试验曲线,其计算精度不如六面体网格;而四面体网格的效率计算曲线随流量增加时的变化趋势和试验曲线之间存在较大差异,在 $1.2Q_d$ 工况点之前计算曲线的斜率明显大于试验曲线,在 $(1.2\sim 1.5)Q_d$ 工况区间内则比较平坦,反映出的高效区宽于试验曲线,计算精度较低。

从各网格划分方案的效率相对计算误差大小来分析,四面体网格的计算误差除了在 $0.5Q_d$ 工况点相对比较小外,在其余工况点均较大,且明显高于其他两种方案,最大误差出现在 $1.2Q_d$ 工况处,为13.81%,之后相对误差随着流量进一步的增加而逐渐减小;混合网格的计算误差在 $(0.5\sim 1.2)Q_d$ 工况内呈现单调递增的变化趋势,在 $1.2Q_d$ 工况点处出现最大相对计算误差,为6.97%,随着流量的进一步增加相对计算误差再次递减;六面体网格相对计算误差的最大值在 $1.2Q_d$ 工况点,为1.62%,其余工况点的相对计算误差均未超过1.4%,在多工况条件下表现出了较高的计算精度。

总体来看,在对多级离心泵的效率进行性能预测时,六面体网格方案具有较高的计算精度,能够获得较为准确的效率计算曲线。

综上所述,对多级离心泵进行性能计算时,全局采用六面体网格并在近壁区域对局部网格进行加密处理的网格划分方法,其计算精度最高;其次是混合网格,也就是旋转部件采用六面体网格、静止部件采用四面体网格的网格划分方法,能够获得相对较高的计算精度;而全局为四面体网格的网格划分方法,计算精度最低。对过流部件合理的网格划分是保障计算精度的关键。

3.2 不同网格的计算误差综合分析

计算精度是判断各方案优劣的重要标准之一。在多工况条件下,将单一工况点计算结果连接成线,此时计算精度的高低就体现为计算曲线和试验曲线的吻合度上。而相对计算误差大小的平均值和相对计算误差的均方差是影响吻合度的主要因素。相对计算误差的平均值反映的是计算值和

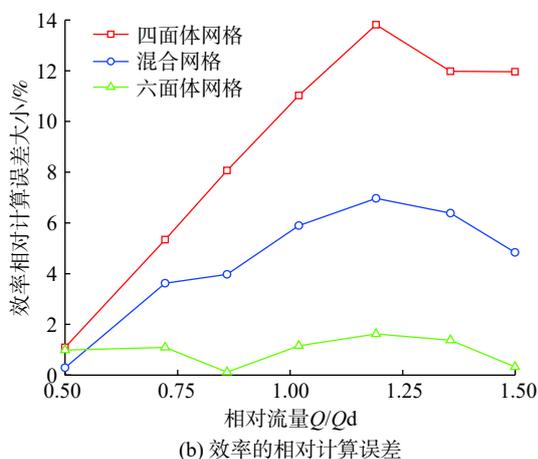
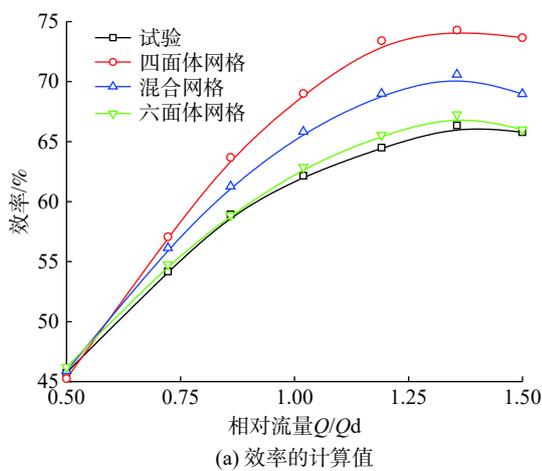


图5 不同网格的效率计算结果

试验值之间的偏差大小,而均方差反映的则是计算曲线与试验曲线在曲线形状上的相似程度。当平均值和均方差都较小时,此时性能计算曲线与试验曲线之间的吻合度较高,表明计算精度也较高。

表1所示为在多工况条件下3种网格划分方案相对计算误差的综合统计结果。从表1可知,在多工况条件下,四面体网格对各性能参数的计算误差最大,计算曲线与试验曲线之间的吻合度也最低;而将叶轮划分为六面体网格并对近壁面区域的网格进行加密处理后,上述两个问题得到了明显的改善,尤其是效率相对计算误差的平均值减小了4个多百分点,相对计算误差的均方差也减小了2个多百分点;当将计算域全局划分为六面体网格并对近壁区域的网格进行加密处理后,各性能参数相对计算误差的平均值和均方差进一步减小,均未超过1.29%和0.99%。由此可知,在数值计算方法不变的前提下,网格划分方案能否准确解析近壁面区域低雷诺数的流动特征是提高数值计算精度的关键。

表1 多工况点计算误差分析 %

方案	扬程		轴功率		效率	
	平均值	均方差	平均值	均方差	平均值	均方差
四面体	2.32	1.75	6.10	3.16	9.04	4.79
混合	1.97	1.05	3.23	2.41	4.57	2.09
六面体	0.84	0.99	1.29	0.89	0.95	0.56

在工程应用过程中,设计工况点通常是泵类产品正常运行的工况点,对泵进行水力优化时,通常也是根据设计工况点的参数要求进行水力设计和数值分析,所以有必要单独在设计工况点对3种网格划分方案的计算精度进行分析比较。表2所示为在设计工况点3种网格划分方案计算误差的统计结果。从表2可知,在设计工况点,六面体网格划分方案不论是在扬程、轴功率和效率等单个性能参数的计算误差大小方面,还是在3个性能参数综合计算误差的平均值和均方差方面,最大值均未超过1.2%,其中扬程相对计算误差的大小仅为0.71%,各方面均表现出了很高的计算精度;混合网格方案关于3个性能参数计算误差的平均值和均

方差分别比六面体网格高出了2.72和3.19个百分点,而四面体网格方案则比六面体网格分别高出了5.81和6.72个百分点。可见,在设计工况点对多级离心泵进行水力性能计算时,采用六面体网格划分方案更加合理,可以获得较高且相对可靠的计算精度,从而为提高产品性能、缩短设计周期、节约加工制造成本奠定良好的基础。

表2 设计工况点计算误差分析 %

方案	扬程	轴功率	效率	平均值	均方差
四面体	1.58	7.89	11.02	6.82	7.72
混合	0.93	4.38	5.90	3.73	4.19
六面体	0.71	1.18	1.15	1.01	1.00

综上所述,从网格划分难易程度、网格数量、近壁区域网格尺度和多级离心泵水力性能的计算精度等方面进行综合分析可知,对全流场进行四面体网格划分的难度最小,但网格数量较多,尤其是对近壁面区域的四面体网格进行加密后网格数量更多,即使如此其计算精度仍然是最低的,可见使用四面体网格对近壁面区域加密后并没有起到提高计算精度的作用,加密后庞大的网格数量反而过度占用了计算机资源;混合网格划分方案虽然在网格划分难易程度上较四面体网格偏难,但可以有效控制叶轮的网格数量和近壁面网格无量纲距离 y^+ 的值,同时其计算精度比四面体网格明显提高;全流场采用六面体网格划分方案,从网格划分的难易程度和时间耗费来看,六面体网格划分难度最大,耗费时间多,但可以合理控制全流场近壁面区域网格尺度 y^+ 值的分布,有效地反映了壁面对流动核心区的影响,使各项性能参数的计算精度明显高于其他两种网格划分方案,同时采用六面体网格后还可以减少全流场的网格数量,节约计算时间。在多级离心泵水力性能计算过程中,全流场网格划分方案采用六面体网格,能有效地保障数值计算的精度,提高理论指导实践的可靠性。

4 结论

1)无论是多工况条件下还是在设计工况点,全流场采用六面体网格的计算精度明显高于混合网

格,而混合网格的计算精度又明显高于四面体网格。

2)近壁面网格尺度是否达到湍流模型的要求是影响多级泵水力性能计算精度的重要因素,全流场采用六面体网格可以有效控制近壁面网格尺度,更适合于对多级泵进行水力性能计算。

参 考 文 献

[1] 黎义斌,李仁年,王秀勇,等.核主泵水力性能数值预测的缩比效应研究[J].原子能科学技术,2015,49(4):609-615.

[2] 周佩剑,刘涛,牟介刚,等.单叶片离心泵蜗壳内二次流的非定常特性研究[J].农业机械学报,2018,49(1):130-136.

[3] 饶昆,聂小林,涂必成,等.多级离心泵内部流动分析及性能预测[J].浙江理工大学学报(自然科学版),2016,35(3):385-391.

[4] 徐磊,陈二云,李国平,等.叶轮进口边型线对两级离心泵空化及非定常流动特性的影响[J].热能动力工程,2016,31(7):80-85.

[5] 朱慈东,李志鹏,张森,等.口环密封对高压多级离心泵临界转速的影响[J].流体机械,2019,47(1):31-35.

[6] 杨军虎,王弼,张学光,等.喉部面积对切线泵性能的影响[J].西华大学学报(自然科学版),2017,36(5):17-21.

[7] 马希金,张耘,刘晓睿.基于CFD的轴流式油气混

输泵动叶优化设计[J].西华大学学报(自然科学版),2020,39(1):100-105.

[8] MONTOMOLI F, CARNEVALE M, D'AMMARO A, et al. Limitations in turbomachinery CFD[M]// Uncertainty Quantification in Computational Fluid Dynamics and Aircraft Engines. [S. l]:Springer, Cham, 2015: 21-32.

[9] 王福军.流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J].农业机械学报,2016,47(2):1-14.

[10] 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.

[11] 胡晓东,王秀勇,刘在伦,等.基于核主泵性能预测的数值模拟精度研究[J].核动力工程,2019,40(4):127-132.

[12] 杨从新,富友.径向导叶式多级泵单级叶轮切割的三维数值模拟[J].西华大学学报(自然科学版),2015,34(3):77-82.

[13] 钱晨,杨从新.高压端出流条件对多级泵径向力的影响[J].西安交通大学学报,2019,53(1):106-113.

[14] 马新华,冯琦,蒋小平,等.导叶叶片数对多级离心泵压力脉动的影响[J].排灌机械工程学报,2016,34(8):665-671.

[15] 丛小青,张啸,袁丹青,等.多级中开式离心泵级间过水流道的流场分析[J].排灌机械工程学报,2015,33(10):840-845.

(编校:夏书林)