

文章编号: 1004-4353(2021)04-0370-05

基于 RANS、LES 和 HRL 方法的 YJ280 液力变矩器的数值模拟

戴虎¹, 袁哲^{1,2}, 宋斌¹, 张鑫涛¹

(1. 杭州前进齿轮箱集团股份有限公司, 杭州 311203;

2. 吉林大学 机械与航空航天工程学院, 长春 130022)

摘要: 为了提高液力变矩器的 CFD 计算精度, 采用不同湍流模型对液力变矩器的内流场进行了数值模拟, 并从内流场流动细节的捕捉精度和外特性的预测精度两方面对液力变矩器的性能进行了对比分析. 结果显示: 在内流场流动结构捕捉精度方面, 5 种湍流模型中的 LES-KET 模型捕捉涡结构的能力最强; 5 种湍流模型均可实现对液力变矩器外特性的准确预测, 其中 RANS 中的 SST $k-\omega$ 模型的预测精度最高. 该研究结果可为正确选择湍流模型进行液力变矩器的外特性和内流场的高精度预测提供参考.

关键词: 液力变矩器; 数值模拟; 内流场; 速度场

中图分类号: TH137

文献标识码: A

Numerical simulation of YJ280 hydrodynamic torque converter based on RANS, LES and HRL

DAI Hu¹, YUAN Zhe^{1,2}, SONG Bin¹, ZHANG Xintao¹

(1. Hangzhou Advance Gearbox Group Co., Ltd., Hangzhou 311203, China;

2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to improve the CFD calculation accuracy of hydrodynamic torque converter, different turbulence models were used to simulate the internal flow field of the hydrodynamic torque converter. Then, the performance of the hydrodynamic torque converter was compared and analyzed from the capture accuracy of the flow details of the internal flow field and the prediction accuracy of the external characteristics. The results of comparative analysis showed that LES-KET had the strongest ability to capture vortex structure among the five turbulence models. The five turbulence models could accurately predict the external characteristics of hydrodynamic torque converter, especially the SST $k-\omega$ model in RANS. The results of this paper could provide a reference for the correct choice of turbulence model for the high-precision prediction of external characteristics and internal flow field of hydrodynamic torque converter.

Keywords: hydrodynamic torque converter; numerical simulation; internal flow field; velocity field

近年来,随着计算机性能的快速提高,采用 CFD 计算叶轮机内流场的方法越来越受到学者们的关注,尤其是对液力传动元件的内流场数

值模拟和外特性预测. 例如: Liu 和 Bu 等研究了传动油属性对液力缓速器外特性和内流场的影响^[1-3]; Liu 等研究表明大涡数值模拟 LES 可以

收稿日期: 2021-07-20

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20200953KJ);浙江省博士后科研项目(ZJ2020069)

第一作者: 戴虎(1983—),男,硕士,高级工程师,研究方向为机械传动装置设计.

通信作者: 袁哲(1984—),男,博士,高级工程师,研究方向为液力传动与自动变速.

提高液力变矩器外特性的预测精度^[4-5]. 刘春宝等设计了一种仿生双曲叶片, 该叶片具有良好的流动减阻功能^[6]. 闫清东等研究了传动油密度和黏度对液力变矩器外特性的影响, 结果显示在不影响油液寿命和密封要求的前提下, 提高油温可改善变矩器的性能^[7]. Wu 等研究发现双导轮结构可以较好地提升液力变矩器在低速比下的外特性^[8]. 目前, 基于不同尺度解析方法对液力变矩器内流场和外特性捕捉能力进行比较的研究较少, 为此本文对比分析了 RANS、LES、HRL 下的 5 种模型对液力变矩器流场的解析能力, 以期为提高旋转机械内流场及外特性的预测精度提供参考.

1 CFD 计算模型

1.1 计算域模型

本文选取国内某厂 YJ280 液力变矩器作为研究对象, 其叶轮均为铝轮铸造件. 液力变矩器的三维模型通过扫描叶轮实物生成, 如图 1(a) 所示. 由于叶轮模型中包含许多铸造倒角, 因此在进行 CFD 计算之前需要对叶轮模型的倒角进行简化. 简化倒角后抽取出的叶轮全流道模型如图 1(b) 所示.

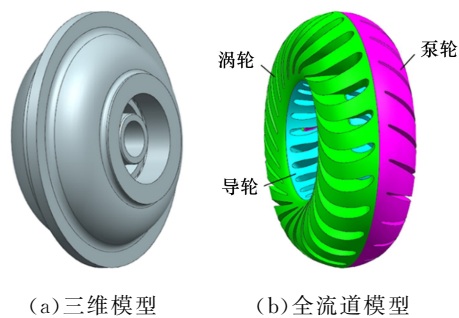


图 1 YJ280 液力变矩器的三维模型和叶轮的全流道模型

根据全流道模型建立的 YJ280 液力变矩器的网格模型如图 2 所示.

液力变矩器的网格模型的划分流程为:

- 1) 提取每个叶轮全流道模型的最小周期单元流道模型.
- 2) 利用网格无关性确定单元流道远场区域的网格尺寸^[9]. 由于整体网格约为 400 万个(全局网格尺寸为 3 mm), 因此现有计算机的计算能力能够满足要求.

- 3) 划分近壁面(叶片周围)网格. 为了保证 y^+ 值小于 2, 将第 1 层的网格高度设置为 0.03 mm, 网格增长率设置为 1.2(共 12 层网格).
- 4) 使用 Quality 准则判断网格质量. 由于本文的 Quality 值大于 0.39, 因此该值可保证网格单元的有效迭代.
- 5) 获取叶轮的全流道网格. 叶轮的全流道网格由划分好的每个叶轮流道的周期单元网格得到. 本文共获得 420 万个网格, 其中泵轮的网格数为 150 万个, 涡轮的网格数为 150 万个, 导轮的网格数为 120 万个.

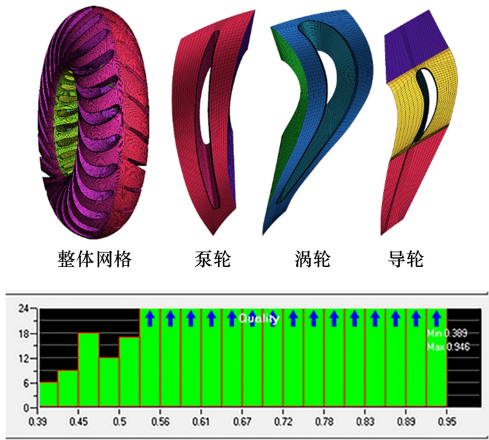


图 2 YJ280 液力变矩器的网格模型及其网格质量

1.2 CFD 数值计算时的参数设置

YJ280 液力变矩器的全流道瞬态 CFD 数值计算的参数设置如表 1 所示.

表 1 CFD 数值计算时的参数设定

参数	参数值
计算类型	瞬态模拟
湍流模型	SST $k-\omega$, LES-KET, SBES, LES-WALE, DES-IDDES
压力-速度耦合方式	SIMPLEC
空间离散格式	二阶迎风
工作介质	8# 液力传动油
传动油密度/(kg/m^3)	860
传动油黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	0.025 8
泵轮状态/(r/min)	2 000
涡轮转速/(r/min)	0~1 600
导轮状态	静止

为了模拟液力变矩器的不同工况, 本文将泵轮转速设定为 2 000 r/min , 将涡轮转速设定在 0~1 600 r/min 范围内(间隔为 200 r/min), 将导

轮设置为静止状态. 泵轮、涡轮内外环壁面及叶片表面采用旋转壁面, 叶轮流道之间采用 Interface 面传递流动信息, 其余壁面均采用静止墙. YJ280 液力变矩器的叶轮叶片数量见表 2.

表 2 液力变矩器的叶轮叶片数量

参数	泵轮	涡轮	导轮
叶片数量	27	26	17

2 内流场机理分析

2.1 压力场分析

利用表 1 中所示的 5 种湍流模型对 YJ280 液力变矩器在零工况 ($i=0$) 时的内流场进行迭代计算. 计算所得数值达到收敛后, 泵轮和涡轮交界处的压力流线分布如图 3 所示. 由图 3 可以看出: 5 种湍流模型对压力场分布的捕捉能力基本相似 (都可以很好地捕捉压力场的瞬态变化, 且在泵轮和涡轮交界处出现了多块低压区分布), 且均优于 SST $k-\omega$ 模型; 但 LES-KET 模型出现了过度的压力分布预测, 该现象会导致液力变矩器的预测误差变大.

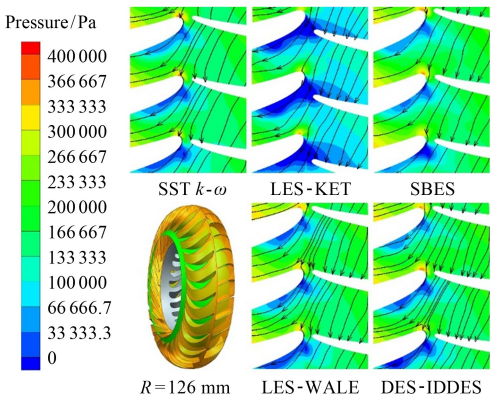


图 3 泵轮-涡轮交界处的压力流线分布图

2.2 速度场分析

利用表 1 中所示的 5 种湍流模型对 YJ280 液力变矩器的零工况进行 CFD 数值计算, 由此得到的液力变矩器的导轮速度场分布如图 4 所示. 由图 4 可以看出: SST $k-\omega$ 模型对流场涡旋结构的捕捉能力最差, 难以观察到叶轮之间由动静干涉所引起的流场瞬态效应的变化特性; 而其余 4 种模型均能对导轮吸力面的涡旋结构进行很好的表达, 且均能捕捉到二次涡旋结构.

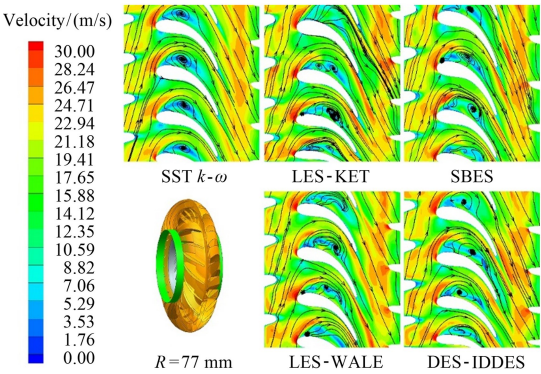


图 4 导轮的速度流线分布图

2.3 涡量场分析

利用表 1 中所示的 5 种湍流模型对 YJ280 液力变矩器的零工况进行 CFD 数值计算, 由此所得的导轮的涡量分布如图 5 所示. 由图 5 可以看出: SBES、DES-IDDES 和 LES-KET 模型可捕捉到丰富的流场涡量细节, 特别是 LES-KET 模型还可以捕捉到在导轮吸力面由逆压梯度引起的“O”型涡量结构; 而 SST $k-\omega$ 和 LES-WALE 模型捕捉到的导轮尾迹涡量细节显著低于上述 3 种模型, 即捕捉能力相对较差.

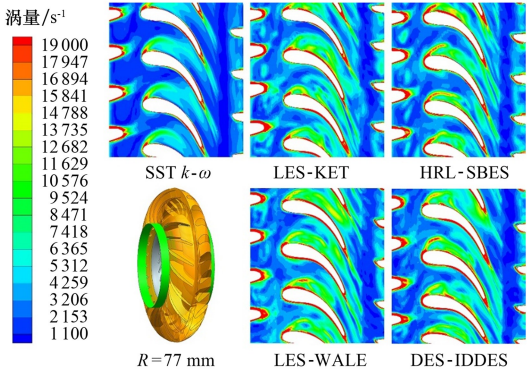


图 5 5 种模型的导轮涡量分布图

3 不同尺度解析方法的外特性比较

3.1 YJ280 液力变矩器的外特性台架试验

试验所用的 YJ280 液力变矩器的叶轮实物如图 6 所示.



图 6 YJ280 液力变矩器的叶轮

YJ280 液力变矩器的外特性台架试验在杭州前进齿轮箱集团股份有限公司的测试所车间内进行,试验台如图7所示.试验内容包括测量液力变矩器的泵轮转速转矩、涡轮转速转矩.



(a) 试验台架



(b) 数据采集仪

图7 液力变矩器的试验台

3.2 试验结果对比

不同速比 i 下液力变矩器的泵轮转矩 T_P 和涡轮转矩 T_T 通过台架测试获得,变矩器的外特性参数由以下公式计算得到: $i = \frac{n_T}{n_P}$, $K = \frac{T_T}{T_P}$,

$\eta = K \times i$, $MB_g = T_P / (\frac{n_P}{1000})^2$, 其中 MB_g 为泵轮公称转矩, η 为效率, K 为变矩比.

台架试验所得的液力变矩器外特性参数和利用5种模型计算所得的液力变矩器外特性参数如图8所示.由图8可以看出,5种模型均能实现对液力变矩器外特性的预测,其中对变矩比和效率的预测精度在10%以内,对泵轮公称转矩的预测精度约为14%.另外,在5种模型中 SST $k-\omega$ 模型对变矩比、效率和低速比的泵轮公称转矩的预测精度相对最好,而 LES-WALE 模型对高速比的泵轮公称转矩的预测精度相对最好.由以上可以看出, SST $k-\omega$ 模型预测液力变矩器外特性的精度相对最佳.

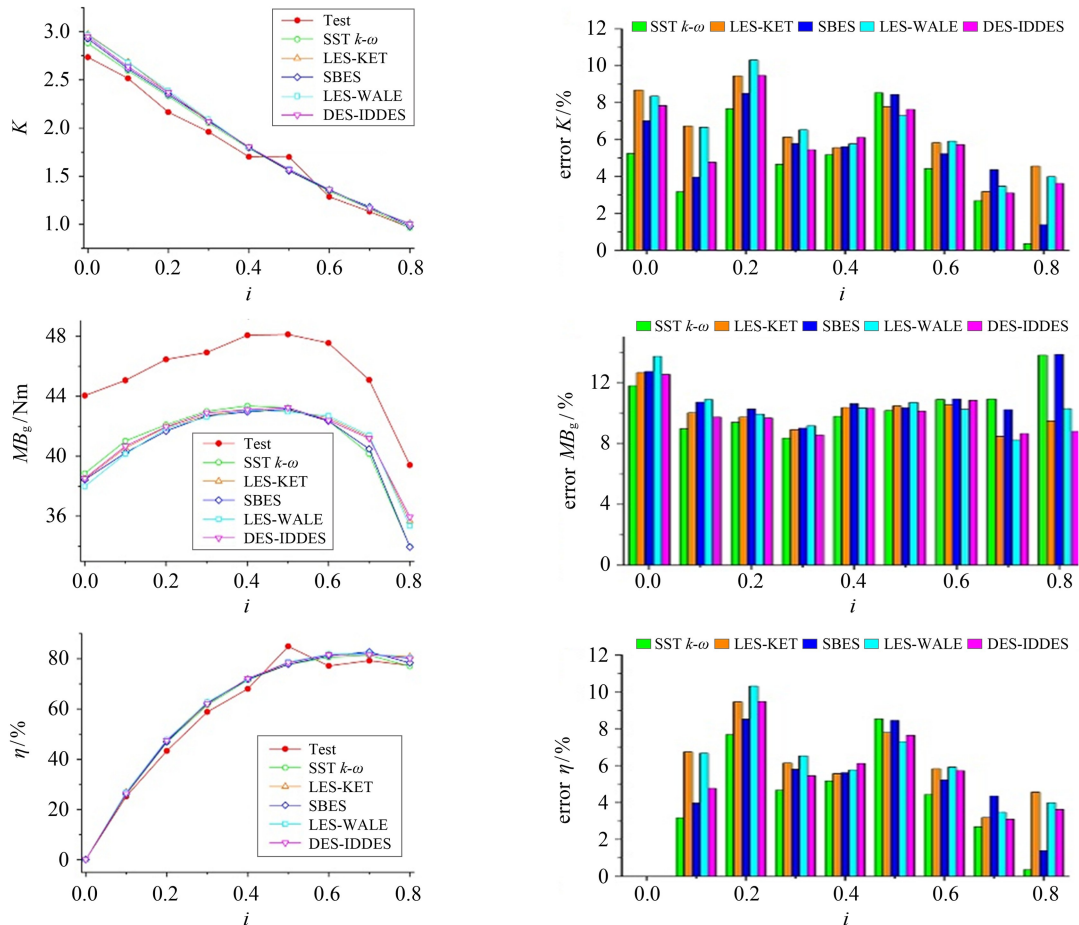


图8 不同模型预测液力变矩器外特性的结果

4 结论

本文利用 5 种模型对 YJ280 液力变矩器的内流场和外特性进行了 CFD 计算,并将其结果与台架试验结果进行了对比分析.结果表明:SBES、DES-IDDES 模型可捕捉到丰富的液力变矩器内流场涡结构的细节信息,而 LES-KET 模型捕捉到的涡结构相对最为完整.5 种模型对变距比和效率的预测精度均在 10% 以内.在不同速比工况下 SST $k-\omega$ 模型的预测精度在各模型中相对最佳.本文研究结果可为正确选择湍流模型预测液力变矩器的外特性和内流场的精度提供参考.

参考文献:

- [1] LIU C B, BU W Y, XU D, et al. Application of hybrid RANS/LES turbulence models in rotor-stator fluid machinery: a comparative study[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2017, 27(12): 2717-2743.
 - [2] LIU C B, BU W Y, WANG T J. Numerical investigation on effects of thermophysical properties on fluid flow in hydraulic retarder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 114: 1146-1158.
 - [3] BU W Y, SHEN G, QIU H F, et al. Investigation on the dynamic influence of thermophysical properties of transmission medium on the internal flow field for hydraulic retarder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 1367-1376.
 - [4] LIU C B, LI J, BU W Y, et al. Large eddy simulation for improvement of performance estimation and turbulent flow analysis in a hydrodynamic torque converter[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2018, 12(1): 635-651.
 - [5] LIU C B, LI J, BU W Y, et al. Application of scale-resolving simulation to a hydraulic coupling, a hydraulic retarder, and a hydraulic torque converter[J]. Journal of Zhejiang University: Science A (Applied Physics & Engineering), 2018, 19(12): 904-925.
 - [6] LIU C B, SHENG C, YANG H L, et al. Design and optimization of bionic janus blade in hydraulic torque converter for drag reduction[J]. Journal of Bionics Engineering, 2018, 1: 160-172.
 - [7] 闫清东, 李晋, 魏巍. 工作油液温度对液力变矩器性能影响计算流体力学分析及试验研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(12): 118-125.
 - [8] WU G Q, WANG L J. Application of dual-blade stator to low-speed ratio performance improvement of torque converters[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2016, 29(2): 293-300.
 - [9] 徐志轩. 液力变矩器内流场尺度解析求解方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
-
- (上接第 313 页)
- [13] HU G Q, YI S P, FANG Z X, et al. Luminescence properties of high thermal stability $\text{Sr}_2\text{LaNbO}_6: x\text{Ln}^{3+}$ ($\text{Ln}^{3+} = \text{Eu}^{3+}/\text{Sm}^{3+}$) phosphors with double-perovskite structures[J]. Optical Materials, 2019, 98: 109428.
 - [14] PAVITRA E, RAJU G S R, GHOREISHIAN S M, et al. Novel orange-emitting $\text{Ba}_2\text{LaNbO}_6: \text{Eu}^{3+}$ nanophosphors for NUV-based WLEDs and photocatalytic water purification[J]. Ceram Int, 2019, 45: 4781-4789.
 - [15] GANGULI A K, GROVER V, THIRUMA M. New double perovskites having low dielectric loss: LaBaZnTaO_6 , LaSrZnNbO_6 , and $\text{Ba}_2\text{Zn}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{TaO}_6$ [J]. Materials Research Bulletin, 2001, 36: 1967-1975.
 - [16] LIU M L, TIAN L H. Luminescence characteristics and energy transfer of $\text{CaSnO}_3: \text{Pr}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$ phosphors[J]. Optik, 2021, 242: 166866.
 - [17] RAN W G, WANG L L, LI H B, et al. Luminescence properties and energy transfer of $\text{CdWO}_4: \text{Sm}^{3+}, \text{Bi}^{3+}, \text{M}^{3+}$ ($\text{M} = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$) phosphors for white LEDs[J]. Ceram Int, 2015, 41: 4301-4307.
 - [18] NATARAJAN V, DHOBAL A R, LU C H. Preparation and characterization of tunable $\text{YVO}_4: \text{Bi}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$ phosphors[J]. J Lumin, 2009, 129: 290-293.
 - [19] LI Q F, ZHANG S A, LIN W X, et al. A warm white emission of $\text{Bi}^{3+}-\text{Eu}^{3+}$ and $\text{Bi}^{3+}-\text{Sm}^{3+}$ codoping $\text{Lu}_2\text{Ge}_2\text{O}_7$ phosphors by energy transfer of Bi^{3+} -sensitized $\text{Eu}^{3+}/\text{Sm}^{3+}$ [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 228: 117755.
 - [20] CAO R P, XU H D, LUO W J, et al. Synthesis, energy transfer and luminescence properties of $\text{Ca}_2\text{MgWO}_6: \text{Sm}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$ phosphor[J]. Materials Research Bulletin, 2016, 81: 27-32.
 - [21] CHEN H, WANG Y H. Energy transfer and photo/cathodoluminescence performances investigation of a luminescent material $\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ co-doped $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ for multifunctional applications[J]. J Alloys Compd, 2020, 847: 156530.