

多工况液力耦合器流场仿真及试验验证

The Flow Field Simulation and Test Validation of Fluid Couplings under Multi-loading Cases

侯天柱 吴凡 李松山

(中国船舶重工集团公司第七一一研究所, 上海 200090)

摘要: 液力耦合器是利用液体动能进行能量传递的一种液力传动机械, 掌握液流在其内部的流动规律对提高其性能有着至关重要的作用。本文对液力耦合器流场仿真技术进行了深化研究, 以 SRAR-CCM+ 软件为后台软件, 二次开发液力耦合器流场仿真专用软件, 以提高液力耦合器流场分析效率。然后进行 JO65XR 液力耦合器输入转速 500 r/min ~ 1500 r/min , 滑差为 1.0%、1.5%、1.7%、2.0%、2.5%、3.0%、5.0% 共 51 种工况的流场仿真, 并与试验结果进行对比验证, 两者吻合较好。

关键词: 液力耦合器; 流场仿真; 多工况; STAR-CCM+ 软件二次开发

Abstract: Fluid coupling is a hydraulic transmission machine which transmits the energy by liquid. It's important to control the flow field inside the fluid coupling for improving its performance. This article made an intensive study on the flow field simulation method of the fluid coupling. Based on the SRAR-CCM+ software, a special interface for the flow field simulation of fluid couplings was developed to increase the simulation efficiency. The flow fields of the JO65XR fluid coupling under 51 work conditions that the input torsional speed ranged from 500 r/min to 1500 r/min and the slip was 1.0%, 1.5%, 1.7%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 5.0% were simulated respectively. Validation tests showed that the simulation results agree well with the test results.

Key words: fluid coupling; flow field simulation; multi-loading cases; further development of the STAR-CCM+ software

0 前言

液力耦合器是利用液体动能进行能量传递的一种液力传动机械, 广泛应用于船舶、冶金、发电、矿山等重型工业。液力耦合器性能的优劣, 主要取决于工作腔模型及内部流场的流动情况, 工作腔的几何尺寸与形状对液力耦合器的传递扭矩和功率特性有决定性的影响。液流在工作型腔内部的流动情况是比较复杂的三维流动, 掌握其流动规律对提高液力耦合器的性能有着至关重要的作用。

随着计算流体力学 (CFD) 技术的推广, 精确求解流体机械内的复杂流动成为可能, 计算机仿真不仅可以精确的预测流体机械的转矩、能头、功率等外部特性, 而且还可以获得与这些外特性相对应的流场内部机制, 如速度场分布、压力场分布、流动的分离等内特性。七一一研究所长期从事液力传动技术的基础研究和产品研制开发, 在液力耦合器流场仿真分析研究方面做了大量研究工作, 通过深入分析液力耦合器内部流场的三维流动理论, 建立了用 STAR-CD 软件进行液力耦合器整体流

场仿真分析的方法^[1], 为满足研发设计工作的需要, 简化、固化操作步骤, 进一步完善仿真分析方法, 七一一研究所编制了液力偶合器流场仿真专用软件, 并进行了多工况的液力偶合器流场仿真分析和试验验证。

1 STAR-CCM+软件二次开发

STAR-CD/STAR-CCM+作为通用流体分析软件, 具有十分强大的功能, 但针对液力偶合器流场分析而言, 众多功能模块则显得复杂, 针对性不够强; 在进行多次液力偶合器流场分析时, 每次都需要重新设置物理模型参数, 重复工作量大, 影响液力偶合器的研发效率。

因此, 我们以 STAR-CCM+为后台软件, 专门针对液力偶合器流场分析进行二次开发, 编写液力偶合器流场仿真专用软件。该软件能够使初学者上手容易, 在液力偶合器流场分析时起到帮助提示操作流程, 并自动设置缺省物理模型参数的作用, 以提高液力偶合器流场分析效率。STAR-CCM+二次开发软件界面如图 1 所示。

本软件具有界面友好, 操作简单, 结果清晰等一系列优点。由于 STAR-CCM+软件是采用 JAVA 语言开发, 且有大量的类库可直接调用, 且 JAVA 语言易于后期软件功能的扩展, 所以本软件采用 JAVA 语言编写。本软件起流程提示、操作帮助作用。本软件可将液力偶合器流场分析步骤明确化, 提供每一分析步骤的帮助提示、参数设置快捷键, 并自动设置缺省物理模型参数。初学者经简单培训后即能完成操作, 软件易用性强。本软件还具有和 STAR-CCM+软件的交互功能, 可以实现和 STAR-CCM+软件的对等操作, 对于某个固定的操作既可以在本软件中完成, 也可以在 STAR-CCM+软件中完成, 例如分析过程中需对模型、网格、边界条件等进行特殊的细节处理, 可直接在 STAR-CCM+软件中实施操作, 大大提高了软件的适用性。

本软件针对液力偶合器流场分析过程而开发, 界面清晰地表达了导入 CAD 数据、生成面网格、生成体网格、设置参数及边界条件、计算、后处理的操作流程, 如图 2 所示。通过本软件一步步操作流程的指导提示可以轻松完成液力偶合器流场仿真分析。

本软件具有良好的后期扩展性能。如需要扩展某项功能, 只需用记事本打开源程序修改保存后重新运行即可。因此, 可以根据液力偶合器流场分析需要的变化, 适时快捷的修改和扩展本软件, 本软件具有很强的后续开发潜力。

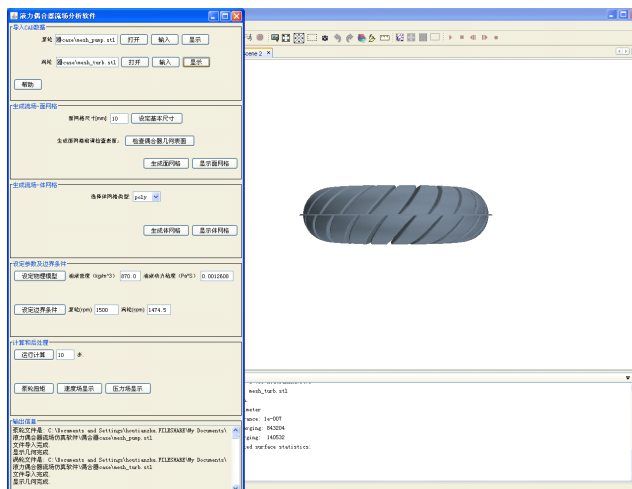


图 1 STAR-CCM+二次开发软件界面

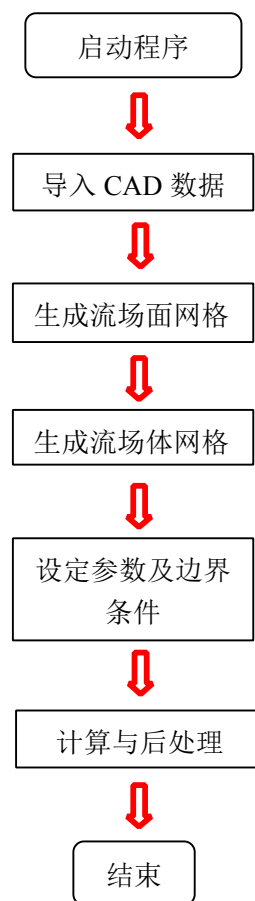


图 2 液力偶合器流场仿真分析流程

2 JO65XR 型液力耦合器多工况流场仿真

在 STAR-CCM+二次开发软件的帮助下，我们进行液力耦合器多工况仿真，本文的计算实例为 JO65XR 型液力耦合器，为普通型液力耦合器，循环圆有效直径为 650mm，泵轮和涡轮均为斜叶片，叶片数分别为 23、22，叶轮间距为 4mm。

2.1 计算条件

JO65XR 液力耦合器的工作介质可视为不可压流体，在计算不同工况下的稳态流动时，所有外表面处理成无滑移边界，不考虑流体的进出，整个工作腔作为一个封闭区域进行计算，详细参数如下表 1。

表 1 JO65XR 液力耦合器计算条件

计算工况温度	40 °C
工作介质密度	870 kg/m^3
工作介质粘度	$0.02175 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
输入转速	1300 r/min 等
滑差率	1.7%等
求解算法	SIMPLE
紊流模型	$k-\varepsilon$ 模型
求解变量	泵轮转矩 $N\cdot m$
旋转坐标系	隐式多旋转坐标系 MRF
流动状态	稳态

2.2 计算网格

本文采用的网格方案为：Surface Remesher +Tetrahedral Mesher +Prism Layer Mesher。

表 2 模型网格参数

项目	尺度参数名称	尺度参数数值	生成网格数量(总数)	叶轮	网格数量
Surface mesh	Base size	20mm	571894	Pump	289466
	Min size	2.5mm		Turb	282428
	Max size	30mm			
Volume mesh	同上		3146528	Pump	1557124
				Turb	1589404
Prism layer	Num of layer	3			
	Stretching	1.5			
	Thickness	4mm			

主要网格尺度和生成的网格数量如表 2 所示。网格模型如图 3 所示。

2.3 仿真结果

STAR-CCM+软件中提供了多种选择,通常是以标准化残差为主,但我们更关心输出扭矩是否稳定收敛。所以本文采用扭矩监测为主,标准化残差为辅的收敛准则。首先,检测计算过程中 100 个迭代步内,如果扭矩波动不大于 $1\text{ N}\cdot\text{m}$ 则停止计算,认为计算初步达到收敛。然后监视标准化残差包括速度(x, y, z 分别为三个方向的速度)、连续性(Continuity)、湍流脉动动能(T_{ke} , Turbulent kinetic energy)、脉动动能耗散率(T_{dr} , Turbulent dissipation rate)的收敛曲线来评估计算收敛的效果,如果标准化残差保持在较小的水平,没有较大震荡,可认为计算结果已经收敛。

如图 4 所示的曲线,就可以认为循环收敛,仿真计算完成。

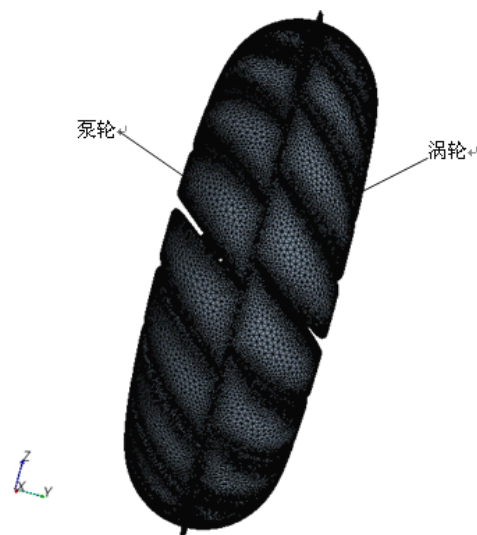
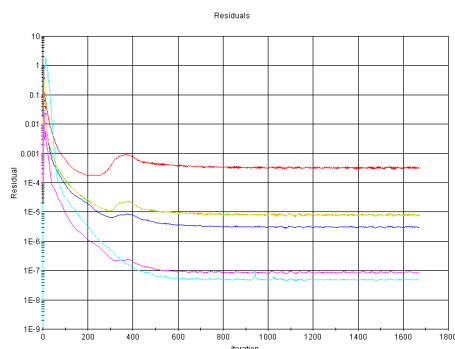
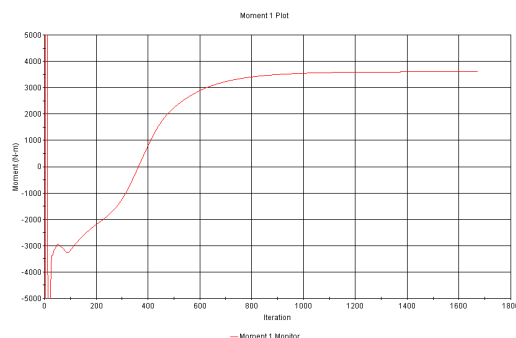


图 3 JO65XR 液力耦合器的计算网格模型



(a) 残差曲线



(b) 扭矩收敛曲线

图 4 仿真计算收敛曲线

本文进行 JO65XR 液力耦合器输入转速 $500\text{ r/min} \sim 1500\text{ r/min}$, 滑差为 1.0%、1.5%、1.7%、2.0%、2.5%、3.0%、5.0% 共 59 种工况传递扭矩仿真。仿真工作在双核 CPU(Intel Q8200 2.33GHz)的条件下进行,完成一次计算需要耗时 20 小时左右,迭代次数大约 4000 步,总计耗时一个半月左右完成全部仿真工作。最终获得液力耦合器多工况的传递扭矩曲线如图 5 所示。

通过仿真计算获得 JO65XR 型液力耦合器额定工况 ($i=0.97$, 输入转速 1300 r/min) 下的流场特性如下图 6~图 11 所示。

通过观察分析认为在全充液的额定工况下,液力耦合器流场的速度、压力分布比较规则。

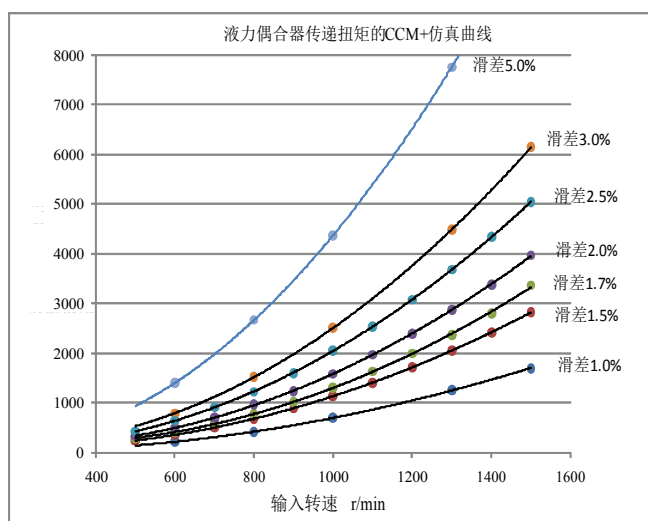


图 5 液力耦合器多工况传递扭矩仿真

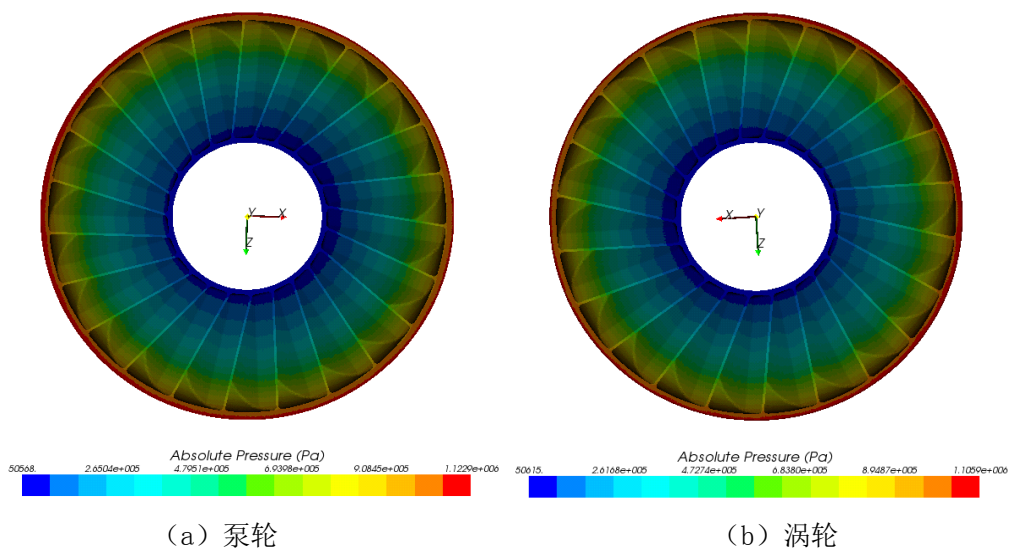


图 6 整体壁面流场压力分布图

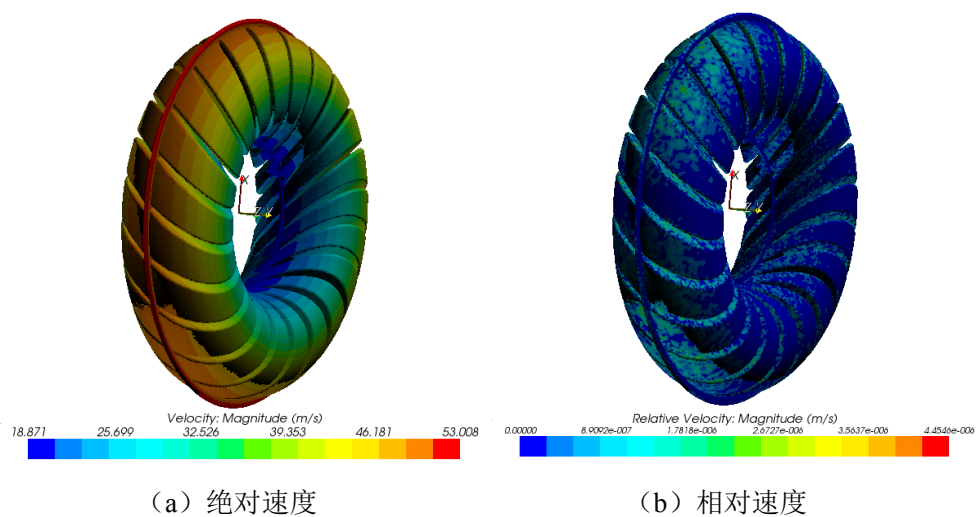


图 7 整体壁面流场速度分布图

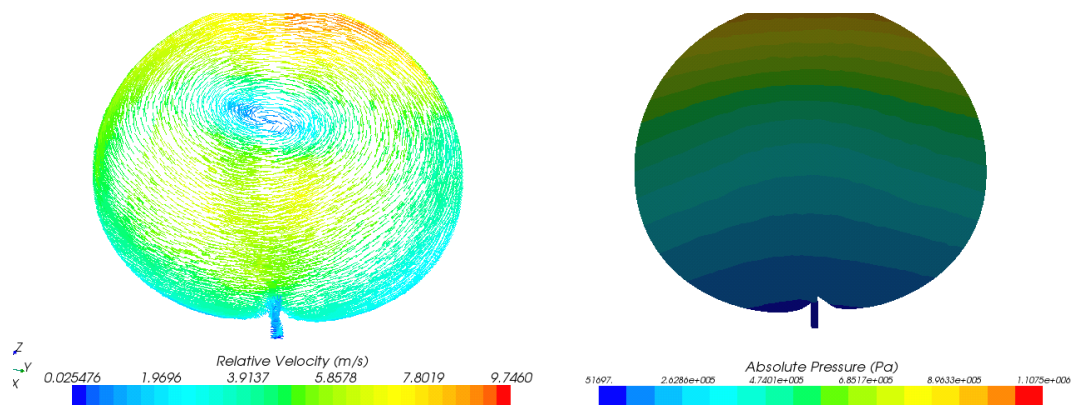


图 8 中间轴面压力分布图

图 9 中间轴面相对速度矢量分布图

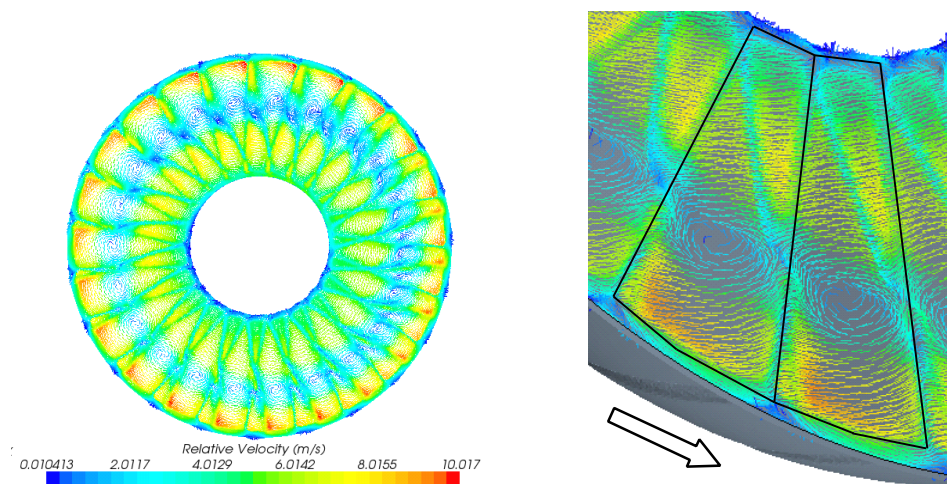


图 10 Interface 面相对速度矢量分布图和局部放大图

绝对速度分布主要受轴向旋转的影响，泵轮涡轮分布一致，沿径向成比例逐渐增加，具体表现为圆周速度。相对速度分布呈现一个漩涡状流场，液流从泵轮上部流出，进入涡轮流道，然后从涡轮下部流出，流回泵轮重复循环；在泵轮出口处流速最高，泵轮入口处流速最低。涡轮入口和出口的速度差越大，流体能量交换越充分，流体循环效率越高。

压力场呈现沿径向成比例递增的圆环状分布，涡轮泵轮压力分布没有明显差别。影响压力分布的因素中离心力起主导作用，即液力耦合器的转速，转速越高，离心力越大，液体向外圆方向挤压越大，压力越大。

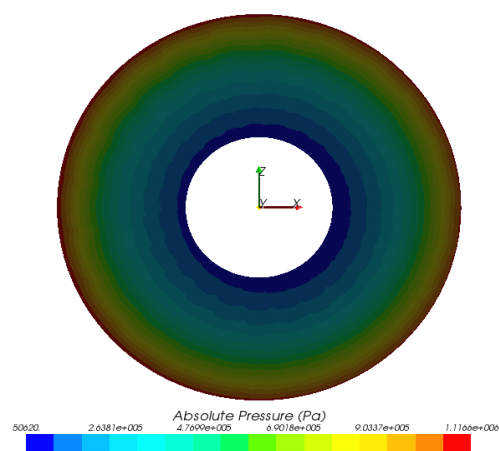
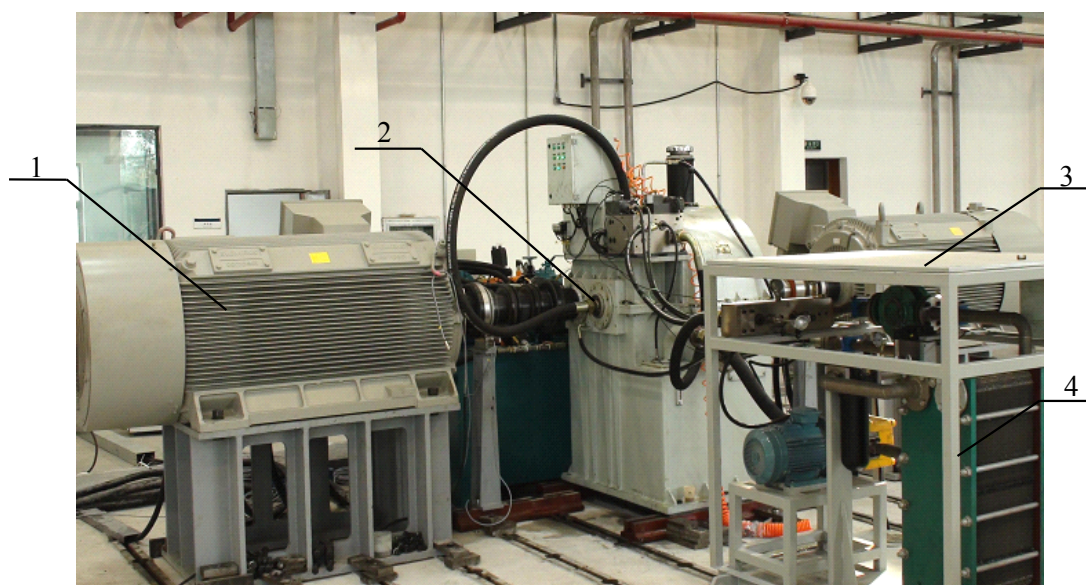


图 11 Interface 面压力分布图

3 JO65XR 型液力耦合器试验与仿真验证分析



1-加载电机，2-被测液力耦合器，3-驱动电机，4-液压泵站和冷却器

图 12 液力耦合器试验台实图

本试验是在七一一研究所传动试验室液力偶合器性能试验台(图 12)上进行的,在试验台的测试系统等都可可靠工作的前提下,完成了 JO65XR 型液力偶合器的性能试验。本文进行了泵轮输入转速为 $500\text{ r/min} \sim 1500\text{ r/min}$,滑差为 1.0%、1.5%、1.7%、2.0%、2.5%、3.0%、5.0% 共 51 种工况下的液力偶合器传递扭矩试验。

在试验过程中采用的是定转速试验方法,即在测试中液力偶合器的输入转速不变,控制泵轮输入转速的波动范围为 $\pm 1\text{ r/min}$ 。测试时偶合器空载启动,当涡轮转速稳定后开始加载,每次加载待仪器仪表指针稳定后记录测试值。测定液力偶合器的泵轮转速(r/min)、涡轮转速(r/min)、泵轮转矩($\text{N}\cdot\text{m}$)、涡轮转矩($\text{N}\cdot\text{m}$)、偶合器内部流场油温($^{\circ}\text{C}$)。

将采集到的试验数据处理,并与 STAR-CCM+软件的仿真值比较,得到液力偶合器多工况下传递扭矩的仿真与试验对比曲线族,如图 13 所示。可以看出各工况下仿真曲线和试验曲线比较相吻合。

针对 JO65XR 型液力偶合器一共进行了 11 个不同输入转速、7 个滑差点共 51 种工况的仿真与试验,平均仿真误差为 8.79%。

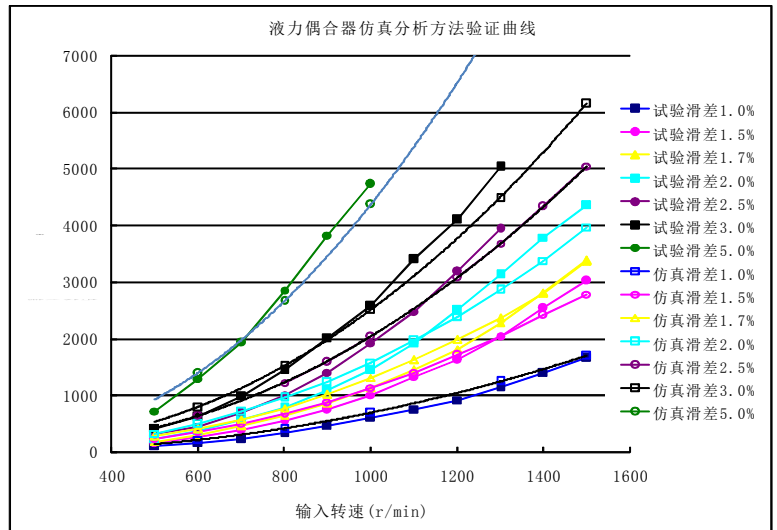


图 13 各工况下传递扭矩的仿真与试验对比曲线族

4 结论

本文对液力偶合器流场仿真技术进行了深化研究,以 SRAR-CCM+软件为后台软件,二次开发液力偶合器流场仿真专用软件,该软件使初学者上手容易,在液力偶合器流场分析时起到帮助提示操作流程、自动设置缺省物理模型参数、简化操作的作用,以提高液力偶合器流场仿真效率。

本文进行 JO65XR 液力偶合器输入转速 $500\text{ r/min} \sim 1500\text{ r/min}$,滑差为 1.0%、1.5%、1.7%、2.0%、2.5%、3.0%、5.0% 共 51 种工况传递转矩仿真。并通过进行液力偶合器试验研究,获得各工况下仿真扭矩与试验扭矩的对比曲线族,观察两者吻合较好,平均仿真误差为 8.79%。因此认为多工况的液力偶合器流场仿真结果是正确的,进一步验证和完善了液力偶合器流场仿真分析方法。

5 参考文献

- [1] 杨伟菟,吴凡,虞俊.液力偶合器流场的技术仿真.机械设计与研究,2009,25(2),79~82.
- [2] 马文星.液力传动理论与设计.北京:化学工业出版社,2004.
- [3] 陆肇达.液力传动原理及液力传动工程.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1994.
- [4] 刘应诚.液力偶合器应用与节能技术.北京:化学工业出版社,2006.
- [5] 杨乃乔.液力调速与节能.北京:国防工业出版社,2000.