

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.05.015

限矩型液力偶合器全充液工况的流固耦合研究^{*}

任豪宗^{1,2}, 王时英^{1,2*}, 吕 明^{1,2}, 张嘉华¹

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024; 2. 精密加工山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要:针对限矩型液力偶合器在正常工况下出现破损的问题,对偶合器的速度、压力以及矢量进行了分析,对偶合器叶轮的受力特性进行了研究。以 D483 限矩型液力偶合器为基础,分别建立了偶合器的周期性几何模型和流道模型;利用 ANSYS Fluent 对偶合器的制动工况、牵引工况及额定工况这 3 种典型工况下流体区域的速度和压力进行了仿真分析,并得到了不同转速比的涡轮转矩;利用 ANSYS Workbench 静力学分析软件,采用单向耦合的流固耦合方法将流体区域的计算数据传递给了叶片结构,并对泵轮和涡轮施加离心载荷,最后得到了 3 种工况下偶合器叶片的总体变形量和等效应力。研究表明:偶合器工作时工作腔内的旋涡、二次流以及回流等会消耗偶合器的能量,可为偶合器的结构优化以及提高其工作效率提供一种有效途径;通过流固耦合的方法得到了叶片的受力特性和变形情况,排除了偶合器因为工作液的正应力而破损的可能。

关键词:限矩型液力偶合器; Fluent; 流固耦合; 受力特性

中图分类号: TH137.331

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2020)05-0542-05

Analysis of fluid-structure coupling of torque limited hydrodynamic coupling under full filling condition

REN Hao-zong^{1,2}, WANG Shi-ying^{1,2}, LV Ming^{1,2}, ZHANG Jia-hua¹

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the problem that the torque-type coupling is damaged under normal working conditions, the speed, pressure and vector of the coupling were analyzed, and the force characteristics of the coupling impeller were studied. Based on the D483 torque-type fluid coupling, the periodic geometric model and flow path model of the coupling were established. The ANSYS Fluent was used to simulate the speed and pressure of the fluid region in the typical working conditions of the clutch, traction and rated conditions of the coupling, and the turbine torque of different speed ratios was obtained. The static analysis software of ANSYS Workbench was used, the unidirectionally coupled fluid-solid coupling method was used to transfer the calculated data of the fluid region to the blade structure, and the centrifugal load was applied to the pump wheel and the turbine. Finally, the overall deformation and equivalent stress of the blades was obtained under three working conditions. The results show that the vortex, secondary flow and reflow in the working cavity consume the energy of the coupling, which provides an effective way for the structural optimization of the coupling and the improvement of its working efficiency. The force characteristics and deformation of the blade are obtained by fluid-solid coupling method, and the possibility that the coupling is broken due to the normal stress of the working fluid is eliminated.

Key words: torque limited hydrodynamic coupling; Fluent; fluid-structure coupling(FSI); force characteristics

收稿日期: 2019-07-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575375)

作者简介: 任豪宗(1995-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事液力传动与设计方面的研究。E-mail: 1043458072@qq.com

通信联系人: 王时英, 男, 博士, 教授。E-mail: 602974482@qq.com

0 引言

液力偶合器是一种以液体为工作介质来传递能量的动力装置,主要分为普通型、限矩型和调速型。限矩型偶合器又被称作安全型偶合器,主要用于解决启动困难、过载保护和减缓冲击等问题。如果设备在在高速运转过程中,出现突然卡住的现象,会产生瞬时的过载,此时动力机和工作机所有的动能都被突然释放出来,将造成原动机和工作机的破坏。因此,就需要限矩型偶合器来进行过载保护,避免原动机和工作机受破坏。另外,原动机经常有载甚至重载启动,采用偶合器可大大改善电动机和工作机的启动性能^[1]。

国内外许多学者已对偶合器进行了广泛的研究。何延东等^[2]利用 UG 和 CFD,针对调速型液力偶合器的 3 种结构优化方案进行了数值模拟,将结果与基型进行对比得到了合理的优化方案;刘春宝等^[3]采用液力变矩器瞬态模型以及多流动区域的耦合算法,深入分析了液力变矩器的流动特性并分析了原因;邹波等^[4]为了分析液力减速器在高转速下的叶片强度,采用单向耦合技术和全局守恒差值法,对减速器全充液工况进行了流固耦合分析,得到了减速器应力分布云图和变形云图,为液力元件的有限元分析提供了有效的方法;魏巍等^[5]研究了变矩器叶片强度,采用流固耦合的方法分析了工作液体对叶片产生的应力与应变情况,并根据材料特性对某型液力变矩器失效情况进行了预测。

本文将在 D483 限矩型液力偶合器的基础上对偶合器全充液工况下 3 种典型转速比工况各自的流场情况和叶片受力特性进行分析,并将叶片工作时的最大受力值与叶片材料的极限强度进行对比,以排除偶合器因为工作液的正应力而破损的可能,并为偶合器的改进提供一种有效途径。

1 流固耦合的分析流程

流固耦合流程图如图 1 所示。

图 1 中的具体流程:

- (1) 首先利用 SolidWorks 建立偶合器几何模型,运用布尔运算提取几何模型的互补模型作为流道模型;
- (2) 然后对流道模型进行网格划分,利用 ANSYS Fluent 进行流场数值模拟得出速度、压力场及矢量图;
- (3) 再将流场分析数据导入静力学分析软件中,对叶轮几何模型进行网格划分、边界条件的设置以及离心载荷的加载;

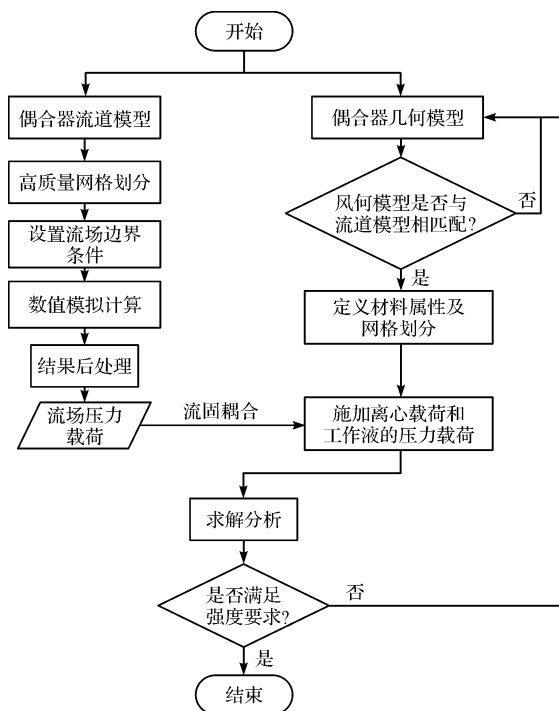


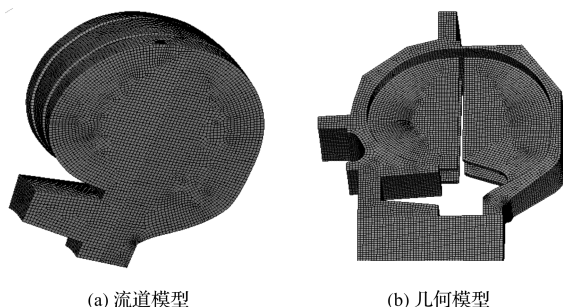
图 1 流固耦合流程图

(4) 最后通过耦合求解,得出各工作轮叶片所受到的应力和应变情况,并根据耦合结果对各工作轮叶片的强度进行对比分析。

2 流道模型与几何模型建立

根据已有的偶合器模型,笔者建立限矩型液力偶合器几何模型,并提取流道。考虑到偶合器的循环结构,选取周期性模型作为计算区域,并对偶合器模型作一定的简化。

流道模型和几何模型的网格划分如图 2 所示。



(a) 流道模型

(b) 几何模型

图 2 流道模型和几何模型的网格划分

为保证计算的准确度,笔者采用高质量六面体网格作为网格单元。流道模型的网格数目为 116 226,几何模型的网格数目为 85 103。

3 流场数值模拟

3.1 基本假设和边界条件

基本假设如下:

(1) 液力偶合器工作温度为等温工况, 液体的内能不变;

(2) 工作腔完全封闭, 工作液不发生泄露;

(3) 相同工况, 叶轮的每个流道特性相同^[6-9]。

边界条件如下:

(1) 根据实际工作情况, 泵轮转速恒为 1 900 r/min;

(2) 由于偶合器循环结构, 流道的循环切割面采用周期性边界条件, 其他表面均采用壁面边界条件;

(3) 采用 SIMPLE 算法和一阶上游迎风格式, 计算收敛准则设置为迭代的残差小于 10^{-3} 。

3.2 仿真及结果分析

笔者对制动工况 $i = 0$ 、牵引工况 $i = 0.5$ 、额定工况 $i = 0.97$ 这 3 种典型工况的瞬态特性进行了仿真分析, 得到了速度和压力分布。

压力云图如图 3 所示。

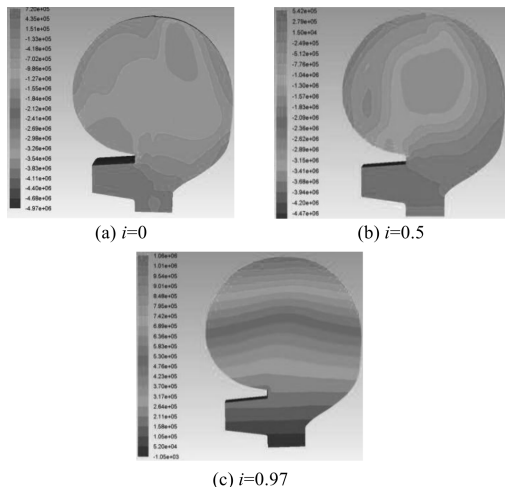


图 3 压力云图

由图 3 可知:

(1) 偶合器在转速比 $i = 0$ 时, 其工作特点是: 涡轮不转动, 不输出动力, $\eta = 0$ 。从压力云图可知: 此时工作腔内压力分布没有规律, 出现大面积负压区域, 这是造成能量耗散以及效率低的主要原因, 也是偶合器结构优化的重点方向;

(2) 随着转速比的提高, 泵轮与涡轮的转速差减小, 涡轮对来自泵轮的高速工作液的阻滞作用减弱, 使得流动更加趋于规律性, 因此, 在牵引工况 $i = 0.5$ 时, 流道内的压力出现较均匀的压力梯度分布;

(3) 当转速比 $i = 0.97$ 时, 泵轮和涡轮都具有较高转速, 产生较大的离心力, 压力场逐渐增大并出现层状分布, 且越靠近流场外环产生的压力越大。

速度及矢量云图如图 4 所示。

由图 4 可知:

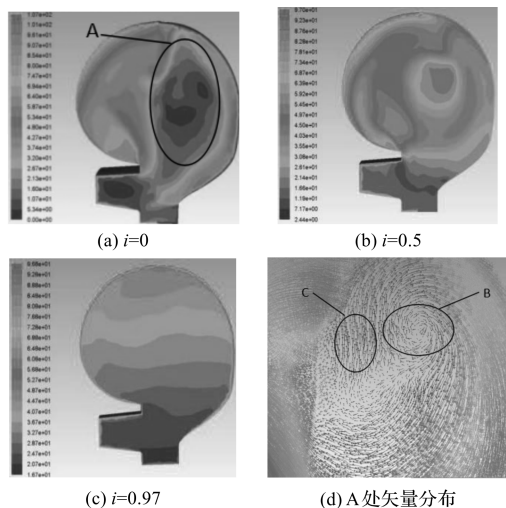


图 4 速度及矢量云图

(1) $i = 0$ 时, 工作液体在离心力的作用下沿泵轮壁面向外环作高速运动, 之后进入处于静止状态的涡轮, 在涡轮处受到运动阻滞, 只有一部分工作液沿着涡轮壁面运动, 速度有所降低, 而涡轮内远离壁面的工作液速度急剧降低, 并且出现回流、旋涡以及大面积的低速区, 无法参与到液力传动的大循环中, 导致能量损失, 效率低。如图 4(a) 中的 A 处出现了回流、旋涡等;

(2) $i = 0.5$ 时, 涡轮与泵轮的转速差减小, 涡轮对来自泵轮的高速工作液的阻滞减弱, 同时涡轮产生一定的离心力, 大部分的液体能够参与到液力传动的大循环中, 仅在涡轮中间位置出现小面积的低速区, 能量损耗小, 传动效率提高;

(3) $i = 0.97$ 时, 涡轮与泵轮的转速基本一致, 涡轮入口的速度与泵轮出口相同, 因此工作腔内的速度沿径向层状分布, 且越靠近外环压力越大^[10-11];

(4) 在制动工况时涡轮工作腔内的矢量图如图 4(d) 所示。由图 4(d) 可知: B 处和 C 处分别出现了旋涡以及回流等损耗能量的现象, 这些现象导致了偶合器工作效率的降低, 可以通过改变叶轮的数目、辅腔的体积以及过流孔的数目和直径等, 来优化偶合器的结构, 提高偶合器的限矩性能。

4 叶轮强度分析

4.1 网格划分及边界条件的设定

本文模型为限矩型液力偶合器, 具体参数为:

泵轮叶片数为 46, 涡轮叶片数为 46, 叶轮材料为铝合金 (ZL101A), 工作液为水, 密度 $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$, 泵轮恒转速为 1 900 r/min。

液力偶合器为循环结构, 只需取周期结构边界条件作分析。为了计算结果的准确性, 笔者同样选取高

质量的六面体网格。

在全充液工况时,高转速液力偶合器的工作载荷主要来自流体作用下的壁面正压力、在高速旋转下叶轮产生的离心载荷以及工作液在能量转化过程中消耗能量产生的热量。由于偶合器在稳定的工况下的温度基本不变,产生的热量可以忽略不计。

对限矩型液力偶合器的叶轮结构进行强度分析,常采用流固耦合(FSI)的分析方法。流固耦合法一般分为两种:单向流固耦合和双向流固耦合。单向流固耦合是指在液力传动过程中,只考虑工作液运动对叶片的作用,而不考虑工作液体与结构相互之间的作用,即在耦合界处的数据传递是单向的;同理,双向流固耦合要考虑流固耦合的相互作用,即耦合界处的数据传递是双向的。

本研究主要研究工作液对叶片的影响,因此,选用单向流固耦合分析。

设置边界条件:
在偶合器几何模型的循环切割面施加循环约束;分别在制动工况 $i=0$ 、牵引工况 $i=0.5$ 以及额定工况 $i=0.97$ 下,施加泵轮和涡轮对应的离心载荷;

载荷施加:
在限矩型液力偶合器全充液工况下,对转速比 $i=0$ 、 $i=0.5$ 、 $i=0.97$ 这3种工况进行CFD数值模拟,得到液力偶合器内部流场的压力和速度分布,接下来将计算数据导入,并施加于液力偶合器,对其进行强度计算。

4.2 仿真及结果分析

笔者在Workbench的Static Structural中进行流固耦合的仿真分析,得到了3种典型工况下叶轮的总体变形量和等效应力。

总体变形量和等效应力如图5所示。
根据图5,从3种工况下的总体变形量和等效应力的对比可以分析出:

- (1)制动工况时,最大等效应力为33.87 MPa;
- (2)牵引工况时,最大等效应力为19.55 MPa;
- (3)制动工况时,最大等效应力为12.65 MPa。

随着涡轮转速的提高,泵轮和涡轮的转速差变小,转速比变大,叶轮对工作液的阻滞作用越来越弱,工作液对叶轮壁面产生的正应力逐渐减弱,叶轮的最大变形量和等效应力逐渐减小。同时,偶合器内部的压力趋于均匀,并且沿径向出现层状分布特性,越靠近外环,压力越大,D处泵轮出口和涡轮进口的交界,此处为较大应力区,是最容易发生损坏的部位;涡轮E处一直都是受工作液应力较大位置,并且随转速比的提高,应力越来越大。

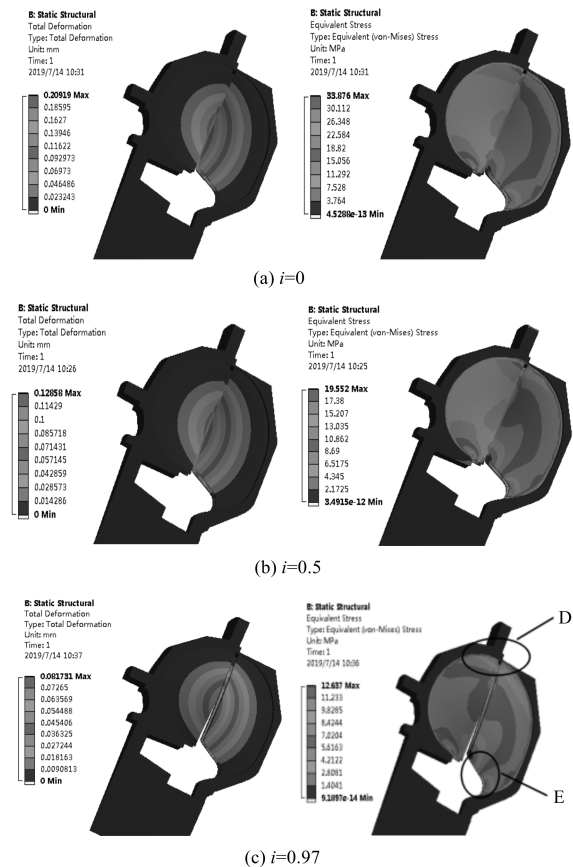


图5 总体变形量和等效压力

从流固耦合的结果可知:在制动工况 $i=0$ 时,整个叶珊系统的等效应力最大,最大等效应力为33.87 MPa。
液力偶合器的正常工作温度为90℃~100℃,经查阅相关材料手册,可得叶轮材料的强度极限 σ_b 为270 MPa,循环交变载荷下叶轮的疲劳强度为119.5 MPa。将其与最大等效应力对比可得:叶轮材料的强度能够满足正常工作要求。

泵轮局部破损图如图6所示。

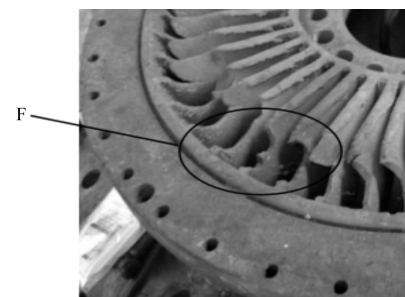


图6 泵轮局部破损

图6中,F处为叶轮由于某种原因破损的位置。此位置与叶片制动工况 $i=0$ 所受到的应力最大位置D是同一位置;通过对比D处的所受应力与叶片材料的极限强度,可以排除偶合器正常工作情况下,因为工作液对叶片的应力而导致叶轮破损的可能^[12-15]。

5 结束语

针对限矩型液力耦合器在正常工况下出现破损的问题,笔者对耦合器的速度、压力以及矢量进行了分析,对耦合器叶轮的受力特性进行研究,通过 CFD 软件和静力学分析软件,对限矩型液力耦合器的内部工作液分布和叶片强度进行了研究,得到了耦合器内部的速度、压力分布情况以及叶轮结构的总体形变量和等效压力。

研究表明:

(1)通过 Fluent 流场分析可知:速比低时,泵轮和涡轮的转速差大,涡轮对来自泵轮的高速液体的阻滞作用强,在涡轮中央产生大区域的回流、旋涡以及低速负压区,这是造成能量损失、效率低的主要原因,可以通过改变容腔的结构来减弱回流、旋涡以及缩小低速负压区的面积,为耦合器的结构优化提供了一种有效途径;

(2)通过采用单向耦合的耦合方式,求解计算了 3 种典型工况下的叶片的受力和变形,得出结论,即在正常工况下泵轮出口、涡轮入口以及涡轮出口受到工作液的正压力最大,容易造成叶轮的破损;

(3)通过流固耦合的结果可知:在制动工况 $i = 0$ 时耦合器叶片受到应力最大,并且叶片最大应力位置 D 处与叶片损坏位置 F 处为同一位置;通过对比材料的强度与叶片受力的最大值,得到结论,即耦合器叶片在正常工作情况下 F 处的受力情况满足叶片材料的强度要求,因此,可以排除叶片 F 处因为工作液作用而破坏的可能。

参考文献 (References):

[1] 马文星. 液力传动理论与设计[M]. 北京:化学工业出版社

社,2004.

- [2] 何延东,马文星,邓洪超. 基于 CFD 的调速型液力耦合器设计方法[J]. 农业机械学报,2010,41(6):31-36.
- [3] 刘春宝,马文星,朱喜林. 液力变矩器三维瞬态流场计算[J]. 机械工程学报,2010,46(14):161-166.
- [4] 李雪松,邹波,朱海峰,等. 车用大功率液力减速器叶栅结构强度流固耦合分析[C]. 兵工企业数字化技术发展学术研讨会,厦门:中国兵工学会,2012.
- [5] 魏巍,闫清东,朱颜. 液力变矩器叶片流固耦合强度分析[J]. 兵工学报,2008,29(10):1158-1162.
- [6] 柴亚龙. 动态调速工况大功率液力耦合器流场瞬态特性研究[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院,2018.
- [7] 张明宇,王永生,林瑞霖,等. 船用液力耦合器内部流场的 CFD 数值模拟[J]. 海军工程大学学报,2017,29(1):24-28,40.
- [8] 刘丹丹,刘朝霞,邵万珍,等. 基于 CFD 的 YOTCGP650 型液力耦合器流场仿真分析[J]. 液压气动与密封,2015(7):22-25.
- [9] 高海司,裴吉,袁寿其,等. 蜗壳式混流泵叶轮部件湿模态流固耦合分析[J]. 流体机械,2018,46(1):46-51,5.
- [10] 李帅,王彪,张建军,等. 煤矿用限矩型液力耦合器数值模拟与特性分析[J]. 煤矿机械,2018,39(8):82-85.
- [11] 何小笛,纪爱敏,彭利平,等. 离心通风机内部流场的数值分析[J]. 机电工程,2018,35(6):566-571.
- [12] 周勃,张亚楠,王琳,等. 基于流固耦合的风力机叶片裂纹扩展机理研究[J]. 流体机械,2017,45(8):19-23.
- [13] 张健,邱雪红. 调速型液力耦合器叶片有限元分析[J]. 液压气动与密封,2019,39(2):36-38.
- [14] 桑勇,邵利来,王旭东. 基于 ANSYS 大流量管路流固耦合振动分析[J]. 液压气动与密封,2018(7):8-12.
- [15] 金连根,毛建生,方兵. 混流式水轮机转轮流场单向、双向流固耦合数值的分析比较研究[J]. 机电工程,2014,31(12):1564-1568.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

任豪宗,王时英,吕明,等. 限矩型液力耦合器全充液工况的流固耦合研究[J]. 机电工程,2020,37(5):542-546.

REN Hao-zong, WANG Shi-ying, LV Ming, et al. Analysis of fluid-structure coupling of torque limited hydrodynamic coupling under full filling condition[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(5):542-546.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>