

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.05.001

液黏传动双圆弧油槽摩擦副油膜剪切转矩研究

崔红伟¹, 姚寿文², 邓元元¹

(1. 太原理工大学 煤矿综采装备山西省重点实验室, 太原 030024;

2. 北京理工大学 车辆传动国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 双圆弧油槽摩擦副广泛应用于液黏传动, 为了研究油槽结构参数对油膜剪切转矩的影响, 对摩擦副间流体的流动特性进行数值模拟, 得到了油膜剪切转矩。建立了集流场参数化建模 (CAD)、数值模拟 (CFX)、试验设计方法 (DOE) 及响应曲面法 (RSM) 为一体的油槽参数影响分析平台, 分析了油槽深度、油槽宽度和油槽数目对油膜剪切转矩的影响并建立了近似响应曲面模型。搭建转矩性能试验台进行试验验证, 结果表明: 油膜剪切转矩随着油槽深度、宽度和数目的增大均减小, 而油槽宽度对转矩的影响最大, 油槽深度影响次之, 油槽数目影响最小。通过理论和试验研究, 应用 CFX 数值模拟和建立摩擦副油槽参数影响分析平台实现了 CAD、CFX、DOE 及 RSM 等技术的高度融合, 可以准确地分析摩擦副油槽参数对油膜剪切转矩的影响。

关键词: 液黏传动; 摩擦副; 双圆弧油槽; 油膜剪切转矩

中图分类号: TH137.33

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2016)05-001-09

Study on fluid torque by shear stress of double arc oil groove friction pairs in hydro-viscous drive

CUI Hongwei¹, YAO Shouwen², DENG Yuanyuan¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Fully Mechanized Coal Mining Equipment, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P.R.China; 2. National Key Laboratory of Vehicular Transmission, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P.R.China)

Abstract: The double arc oil groove friction pairs are widely used in hydro-viscous drive (HVD). In order to study the influence of oil groove parameters on fluid torque by shear stress, the flow characteristics of oil film was carried out by using the software CFX. The shear torque of film was obtained. An analysis platform, which was built to discover the influence of oil groove parameters on shear torque, was designed based on the flow field parametric modeling, numerical stimulation, design of experimental (DOE) and response surface methodology (RSM). The effects of the depth, the width and the number of the oil groove on shear torque were analyzed and an approximate response surface methodology model was then set

收稿日期: 2016-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275039); 山西省煤基重点科技攻关资助项目(MJ2014-06); 煤矿综采装备山西省重点实验室开放基金资助项目(2014-01); 太原理工大学青年基金资助项目(2014TD038)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51275039), Shanxi Coal-Based Key Scientific & Technological Projects(MJ2014-06), Open Foundation of Shanxi Key Laboratory of Fully Mechanized Coal Mining Equipment(2014-01) and Staring Project of Youth Team of Taiyuan University of Technology(2014TD038).

作者简介: 崔红伟(1986-), 男, 太原理工大学讲师, 北京理工大学博士, 主要从事机械设计及理论、流体传动与控制研究, (E-mail) cuihongwei@tyut.edu.cn.

up. And a test rig of torque performance was set up. The results indicate that the shear torque decreases with the depth, the width and the number of oil grooves increasing. Meanwhile, the influence of width is the most, and that of the number is the smallest. Through both theoretical and experimental study, the effect of oil groove parameters on fluid torque by shear stress could be much more precisely achieved by CFX numerical simulation and the platform which combine the CAD, CFX, DOE and RSM technology.

Keywords: hydro-viscous clutch; friction pairs; double arc oil grooves; fluid torque by shear stress

液黏传动利用油膜剪切传递功率,具有无级调速传动、软起动、过载保护、启动冲击小、效率高、寿命长、可靠性高等优点,目前广泛应用于风机、水泵、带式输送机和刮板输送机 etc 机械设备,是实现机械设备节能降耗的有效手段,一直是世界各国研究的热点^[1]。

液黏传动摩擦副由摩擦片和对偶钢片组成,工作过程通过改变摩擦副间隙实现调速和软起动。为了避免摩擦副有较大的热变形甚至导致失效,通常在表面加工一定数量和形状的冷却油槽,同时油槽还起到改变摩擦副摩擦性能和排屑等作用^[2-4]。双圆弧油槽为液黏传动常用的一种油槽结构形式,其过油能力与旋转方向无关,但结构比较复杂。

双圆弧油槽摩擦副的参数主要有油槽宽度、油槽深度和油槽数目。油槽的结构形式和几何参数对摩擦副间流体的流场特性和油膜剪切转矩会产生较大的影响。由于结构较复杂,直接分析流场及转矩性能比较困难,在设计过程中一般由经验值来确定。准确地分析流体的流场特性和油槽结构参数对油膜剪切转矩的影响是转矩特性预测、调速性能改善和油槽结构参数设计的关键^[5]。

Razzaque 等^[6]发表了关于摩擦副油槽对黏性离合器转矩特性影响的文章。Miyagawa 等^[7]指出在结合过程中湿式离合器摩擦副表面同时有径向油槽和周向油槽时摩擦副的表面温度能有效地得到降低。Aphale 等^[8]讨论了摩擦副表面油槽几何形状的设计以减小湿式离合器的黏滞转矩,实现节能。Meng^[9]和 Xie^[10]等对液黏软起动装置中液黏调速器摩擦副表面的油槽结构进行了研究。Yuan^[11]和 Hu^[12-13]等通过理论和试验研究对带油槽湿式离合器的油膜剪切转矩进行了研究。Iqbal 等^[14]建立了湿式离合器带排转矩计算模型。黄家海等^[15]分析了液黏调速离合器油膜剪切传动的热特性和油槽的影响。但上述文献很少以双圆弧油槽摩擦副为研究对象,综合考虑所有油槽结构参数对液黏传动摩擦副油膜剪切转矩的影响进行研究,目前对摩擦片油槽参数的设计主要是经验设计。

因此,应用计算流体动力学软件 CFX,对摩擦副间流体的流动特性进行数值模拟研究,建立摩擦副流场参数化建模、流场数值分析、试验设计方法和响应曲面法为一体的摩擦副油槽参数影响分析平台,自动执行实现 CAD、CFX、DOE、RSM 等技术的高度融合,分析油槽深度、油槽宽度和油槽数目对油膜剪切转矩的影响,为研究油槽参数对双圆弧油槽油膜剪切转矩的影响和油槽参数设计提供理论基础。

1 摩擦副流场数值模拟

液黏传动摩擦副在纯油膜剪切阶段的流场特性包括内特性和外特性,内特性是指在一定的工况下内部流体的流动速度和压力等分布特性;外特性是指油膜剪切转矩随着油膜厚度、输入转速以及流体温度的变化关系。内特性是外特性的内在原因,外特性是内特性的外在体现。因此,深入分析内、外特性及其之间的关系对能否准确地预测摩擦副的剪切转矩进行起着重要的作用^[16]。

CFX 的基本思想是把原来在时间域及空间域上连续的物理量用一系列有限个离散点上的变量值来代替,通过一定的方法建立关于这些离散点上变量之间关系的代数方程组,然后求解代数方程组得到变量的近似值。液黏传动主要靠摩擦片和对偶钢片的相对运动引起流体相对剪切来传递转矩,CFX 模型中摩擦副间隙中的流体为黏性流体,内摩擦剪应力与速度变化率的关系符合牛顿流体,可以通过 CFX 数值模拟的方法来计算纯油膜剪切阶段摩擦副间流体的流动状态及转矩传递特性。

摩擦副的内径 $D_1=86$ mm,外径 $D_2=123$ mm,摩擦副的主动边即摩擦片表面开有双圆弧油槽,油槽结构参数:油槽宽度 $b=1.5$ mm,油槽深度 $h_2=0.4$ mm,油槽数目 $n=20$,有效面积系数即非油槽面积与总面积之比 $\psi=0.68$ 。

考虑到摩擦副结构循环对称的特征,为减小计算量,加快计算速度,建立摩擦副间隙内流体流场的 1/20 单周期模型,通过给定周期性边界条件模拟整个摩擦副的流动情况。图 1 为 Pro/E 中建立的流场几何模型。

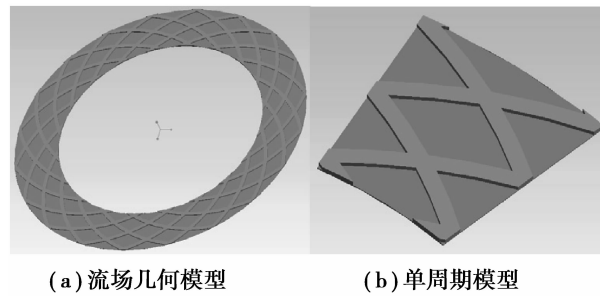


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometry model

在 ICEM CFX 中采用适应性较强的非结构网格进行流场模型的网格划分,由于流场模型在径向和周向的尺寸远大于膜厚方向,因此取较小的网格结构单元以满足油膜厚度方向多层网格的要求,网格总数大约在 1 115 000 左右。

摩擦副工作时摩擦片转速较高,且油槽的结构比较复杂,流场内部流动为湍流流动,为有效获取流场中细微涡流和边界层现象以及更为精确的计算结果,选择切应力输运 SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$ 湍流模型对摩擦副流场模型进行分析。SST 湍流模型综合了 $k-\epsilon$ 模型在外部区域计算和 $k-\omega$ 模型在近壁模拟的优点。该模型包含了自动壁面函数,能精确地模拟边界层现象,并在湍流黏度的计算中考虑到湍流剪切应力的输运,不但能够对各种流体流动进行准确的预测,还能在各种压力梯度下精确地模拟分离现象,因而对流场中细微涡流的捕捉更有效,适用范围更广。由于液黏传动摩擦副通过油膜剪切传递转矩,黏性生热的发热量较大,传热模型选择 Thermal Energy,此模型求解能量方程,但是忽略流体密度变化的影响,并且考虑黏性发散项。

摩擦副间工作油液为不可压缩黏性流体,流体摩擦副入口温度 T 为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时动力黏度 μ 为 $0.093\text{ Pa}\cdot\text{s}$,摩擦副壁面采用恒温边界条件。摩擦副的流体入口采用流量边界条件,单周期摩擦副流量 Q 为 $0.1\text{ L}/\text{min}$,不考虑油膜厚度和摩擦副转速的变化时摩擦副入口流量不足导致摩擦副出现油膜收缩对油膜剪切转矩的影响。出口采用压力边界条件,由于与大气压相通,压力近似为大气压 $p_{R2}=0\text{ MPa}$ 。摩擦片和对偶钢片的表面近壁处速度场计算采用速度无滑移边界条件,摩擦副的摩擦片采用旋转壁面条件。摩擦片输入转速 $n_1=4\ 200\text{ r}/\text{min}$,由于对偶钢片的转速影响剪切转矩,而笔者主要研究油槽结构参数对剪切转矩的影响,因此计算模型中设定对偶钢片为固定边界 $n_2=0\text{ r}/\text{min}$ 。

CFX 采用有限体积法对控制方程作离散化处理,应用 CFX 特有的先进全隐式多网格耦合算法对计算模型进行黏性剪切流动计算。

取油膜厚度 $h=0.1\text{ mm}$,通过 CFX 仿真计算,在 CFX 后处理中,提取一对摩擦副 $1/n(n=20)$ 部分的油膜剪切转矩,则总的油膜剪切转矩为

$$T' = T_n \cdot n. \quad (1)$$

2 分析平台流程设计

基于商业软件 Isight 实现对整个几何建模、网格划分、CFX 仿真以及后处理、试验设计和响应曲面模型构建,平台设计流程图如图 2 所示。

由于油膜剪切转矩和油槽结构参数没有确定的函数解析关系式,因此通过集成多个仿真分析模块使输入参数和输出参数一一对应,所有环节均由试验设计方法集成控制并通过批处理命令自动执行,通过此平台分析液黏传动摩擦副油槽参数对油膜剪切转矩的影响。

先进行试验设计,采用有限个样本点进行计算,改变、组合设计参数生成参数表,建立参数化几何模型,经过网格划分,在 CFX 循环计算模块对各种组合模型进行流场计算,经过数据提取获得液黏传动的转矩性

能数据库,对参数进行敏感性数值分析及主效应分析,再利用回归、拟合和插值等方法构造自变量与因变量的近似响应曲面模型。

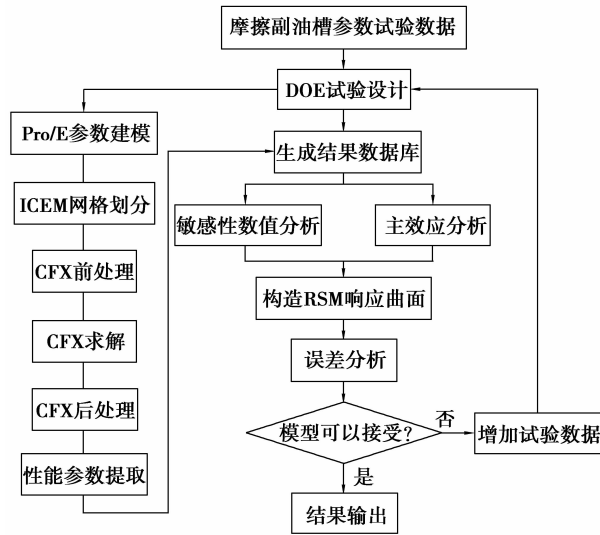


图 2 分析平台设计流程图

Fig. 2 Process of simulation

在几何建模阶段,通过将 DOE 的试验设计参数应用轨迹文件导入至 Pro/E 软件中,建立不同油槽参数的液黏传动摩擦副流场模型,完成摩擦副流场几何模型的完全参数化。通过 Pro/E 的 Interface 模块并与 ICEM 连接,在 Pro/E 中完成几何模型的各个边界定义,直接生成 ICEM 所需的几何模型,不需要中间格式文件的导出与导入,实现 Pro/E 和 ICEM 的无缝连接。再将几何模型直接传递至 ICEM 软件中进行网格划分后,在 CFX 前处理中对模型的初始条件、边界条件和流场特性参数进行设置,最后完成模型的求解和后处理,应用 Data Exchanger 组件读取摩擦副的油膜剪切转矩。

3 油槽参数影响因素分析

试验设计是以概率论和数理统计为理论基础,经济科学地安排试验的一项技术,是研究和处理多因子与响应变量关系的一种科学方法。油槽结构设计涉及到油槽宽度、油槽深度和油槽数目等多个参数,需要进行由各个参数构成的多因子试验设计,以考察各个油槽参数对油膜剪切转矩的主效应及交互效应。构造出各个油槽参数的析因设计试验表,如表 1 所示,摩擦副的其他结构参数和 CFX 仿真的边界条件和前文保持一致。

表 1 摩擦副参数试验表

Table 1 Test table of parameters of friction pairs

参数	设计值	下限	上限	数值类型
油槽宽度 b/mm	1.5	0.5	2.5	实型
油槽深度 h_2/mm	0.4	0.2	0.6	实型
油槽数目 n	20	10	30	整形

油槽参数对油膜剪切转矩的影响是一个多因子多水平的设计问题,采用拉丁方试验方法构造出三因子 80 水平试验,通过设计平台对集成程序的反复迭代和对模型的不断更新实现摩擦副油槽参数对油膜剪切转矩的影响分析,80 个样本点总共耗时约 40 h。

利用搭建的仿真平台,经过几何模型的建立、网格划分以及 CFX 数值模拟计算和结果提取,在其他参数一定的情况下,以摩擦副油槽参数为自变量,主要有油槽宽度、油槽深度和油槽数目,摩擦副油膜剪切转矩为

因变量,经过试验设计计算后获得自变量对因变量影响的 Pareto 图和主效应图。Pareto 图表征自变量对因变量的影响程度,主要有线性相关程度、平方相关程度、自变量交互影响程度,主效应图为因变量随自变量的变化关系。

摩擦副各个油槽参数对油膜剪切转矩影响的 Pareto 图如图 3 所示。由图 3 可得,油槽宽度、油槽深度和油槽数目对摩擦副油膜剪切转矩的影响均有较大的一次线性相关关系,二次相关性均较小,且油槽宽度和油槽数目的交互影响较大。同时在各自参数设定的范围内,油槽宽度对油膜剪切转矩的影响最大,油槽深度的影响次之,而油槽数目的影响最小。

摩擦副各个油槽参数对油膜剪切转矩影响的主效应分析如图 4 所示。由图 4 可得,随着油槽宽度、油槽深度的增大和油槽数目的增多,摩擦副的油膜剪切转矩均呈现下降的趋势,同时油膜剪切转矩随着油槽宽度的增大下降较快,而油槽厚度和油槽数目对其影响较小。

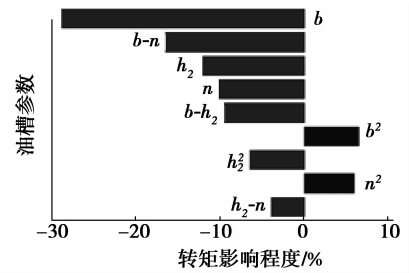


图 3 Pareto 图
Fig. 3 Pareto

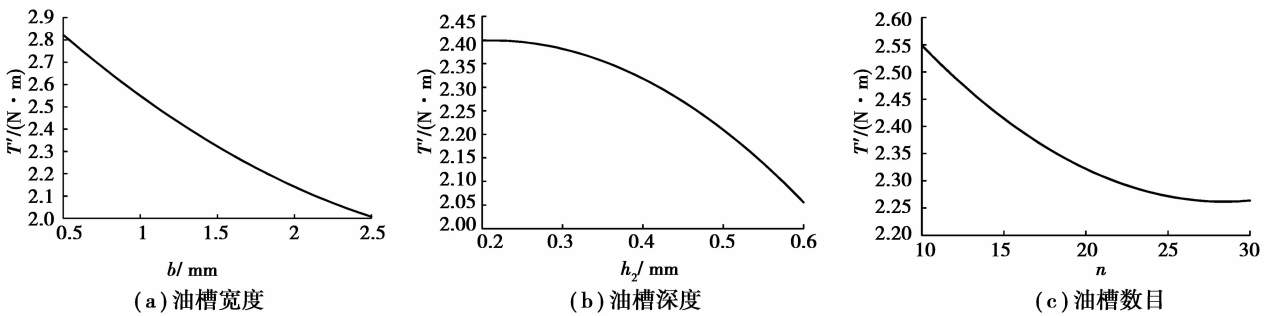


图 4 油槽参数主效应
Fig. 4 Main effect of groove parameters

结合前文的数值模拟研究,以上结果的主要原因是油槽参数影响摩擦副的有效面积系数进而影响油膜剪切转矩。摩擦副油槽部分的油膜厚度较大,油膜剪切应力小于非油槽部分,随着油槽深度的增大,油槽部分的油膜剪切应力减小,因此油膜剪切转矩会随着油槽深度的增大而减小。与此同时,由于油槽宽度和油槽数目共同影响有效面积系数,所以其交互影响较大,当油槽宽度和油槽数目增大时,摩擦副油膜剪切的有效工作面积减小导致摩擦副的黏性剪切转矩减小。

4 近似响应曲面模型

响应曲面法是利用合理的试验设计方法并通过试验得到一定数据,采用多元回归方程来拟合因素与响应值之间的函数关系,解决多变量问题的一种统计方法。笔者采用响应面近似模型,通过较少的试验数据就可以获得设计变量与目标之间准确的关系,并且可以用简单的多项式表达,从而降低计算成本,给设计者带来很大的方便。

经过对摩擦副油槽参数试验设计以及对油膜剪切转矩的主效应分析,油槽宽度、油槽深度和油槽数目对摩擦副油膜剪切转矩产生不同的影响,为了构造各个油槽参数和油膜剪切转矩的近似响应曲面模型,分别采用 1~4 阶 RSM 响应面近似模型对试验结果进行拟合,并随机抽取 10 个点对近似模型进行平均误差、最大误差、误差均方根和 R^2 拟合度等误差分析,如表 2 所示,可见利用三元三次回归方程进行响应面拟合具有较高精度,平均误差、最大误差、误差均方根和 R^2 拟合度等指标均优于许用值。其中,均方根值是用于工程设计领域的经验值,拟合度是拟合中用于表征拟合模型与实际数据吻合程度的量,其值在 0~1 之间,越高表明吻合程度越好。

表 2 油槽参数 RSM 曲面误差分析
Table 2 RSM curved error analysis of groove parameters

阶数	平均误差	最大误差	误差均方根	R^2 拟合度
1	0.13	0.28	0.14	0.81
2	0.10	0.23	0.11	0.84
3	0.08	0.15	0.09	0.93
4	0.09	0.19	0.10	0.88
许用值	<0.2	<0.3	<0.2	>0.9

为了获得较好的拟合效果,提高寻优精度和简化近似模型,采用三元三次回归方程来构造油膜剪切转矩关于油槽参数的响应曲面,构造方程为

$$T' = 2.018 2 - 0.222 6b + 0.189 6n - 2.570 2h_2 + 0.297 3b^2 - 0.009 3n^2 + 10.497 6h_2^2 - 0.023 9bn - 0.650 7bh_2 - 0.020 6nh_2 - 0.044 2b^3 + 0.000 2n^3 - 10.497 9h_2^3。 \quad (2)$$

5 试验验证

为了对液黏传动摩擦副油膜剪切转矩特性进行更深入的研究,验证数值模拟的准确性,搭建了摩擦副转矩性能试验台,试验台组成示意图如图 5 所示。

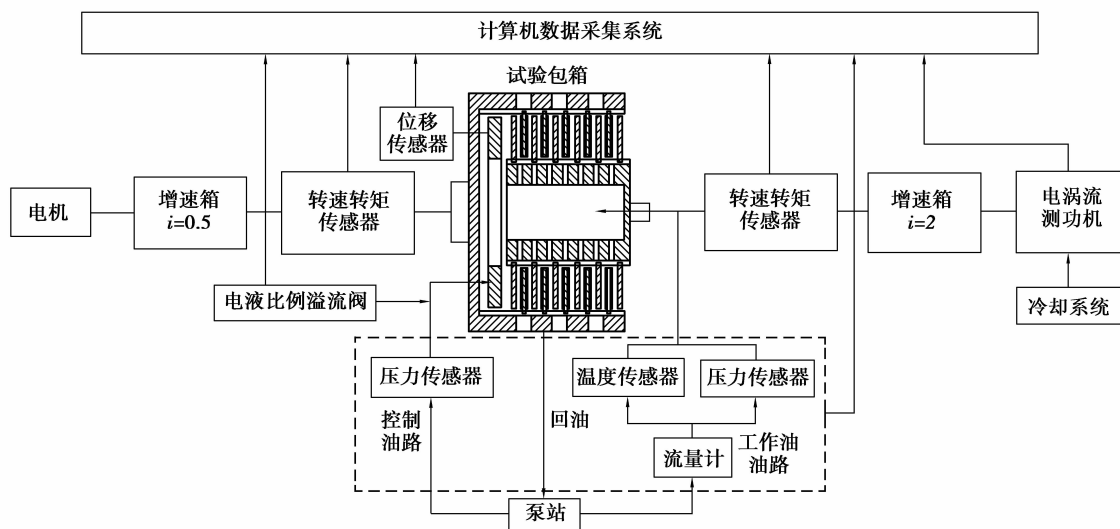


图 5 试验台组成示意图

Fig. 5 The test rig

试验台由机械系统、液压系统和测试系统组成,机械系统主要由动力、增速箱、试验包箱、减速箱和负载构成,电机为液黏传动提供动力,电涡流测功机为加载装置。包箱的试验转速比较高,在包箱的输入端增加一个增速箱,同时为了使液黏传动和电涡流测功机更好地匹配,包箱输出端增加一个减速箱。

试验包箱内部,在压盘和活塞之间安装轴向推力球轴承,调速过程中活塞周向不旋转,油缸为固定油缸,消除控制油缸内油液离心力的变化对调速过程的影响,用活动卡套将位移传感器安装在包箱上,精确地测量调速过程中活塞移动的位移,如图 6 所示。

液压系统分为工作油油路和控制油油路,液压泵站一方面为液黏传动摩擦副的间隙提供工作介质形成

工作油膜,并强制冷却由于相对剪切和摩擦产生的热量,以保证液黏传动正常工作;另一方面控制油路根据电气控制系统的指令,通过电液比例溢流阀调节控制油缸的油压,改变油膜厚度,从而达到改变从动轴输出转速和扭矩的目的,进而实现液黏传动的功能。

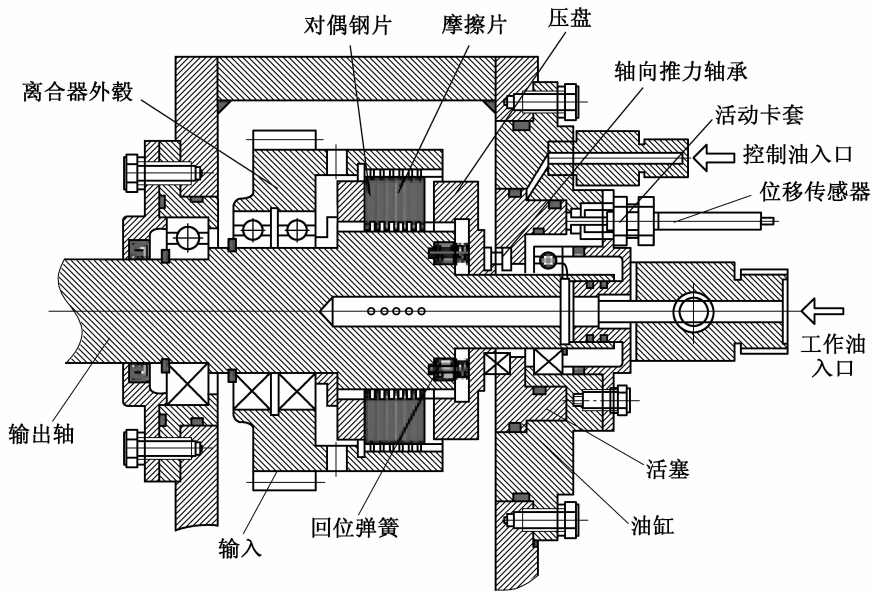
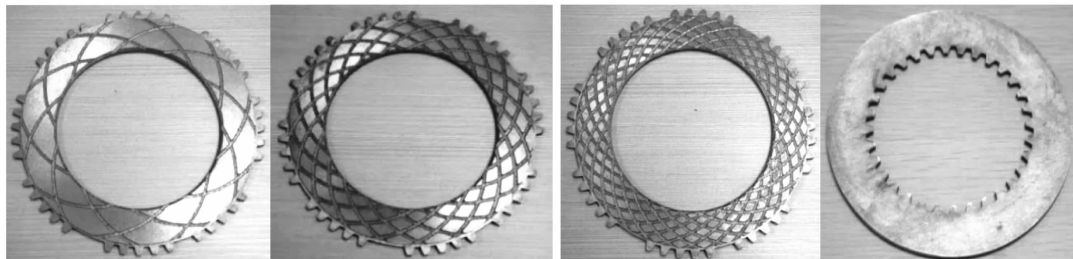


图 6 液黏传动结构

Fig. 6 Structure of HVD

测试系统包括测量摩擦副输入和输出转速与转矩的转速转矩传感器,测量工作油流量、温度和压力的流量传感器、温度传感器和压力传感器,测量控制油油压的压力传感器,测量活塞移动的位移进而推算摩擦副间油膜厚度的位移传感器。

数值模拟和试验研究中液黏传动铜基粉末冶金材料摩擦副的摩擦片和対偶钢片如图 7 所示,摩擦片基片为 65Mn,表面为烧结铜基粉末冶金材料,对偶钢片材料为合金钢 32CrMnSiA。为了研究摩擦副有效面积系数以及油槽结构参数对油膜剪切转矩的影响,加工 3 种双圆弧油槽摩擦片,图 7(a)有效面积系数 $\psi = 0.814$,油槽宽度 $b = 1.5$,油槽数目 $n = 10$;图 7(b)有效面积系数 $\psi = 0.444$,油槽结构为宽而少, $b = 2.5, n = 20$;图 7(c)有效面积系数 $\psi = 0.496$,油槽结构为窄而多, $b = 1.5, n = 30$,3 种摩擦片的其他油槽参数相同。



(a) $\psi = 0.814$ (b) $\psi = 0.444, b = 2.5, n = 20$ (c) $\psi = 0.496, b = 1.5, n = 30$ (d) 对偶钢片

图 7 不同油槽结构参数摩擦片和対偶钢片

Fig. 7 Friction pairs of different groove parameters

研究摩擦副输入转速恒定,通过电液比例溢流阀调节控制油缸的压力进而改变油膜厚度,分析不同油槽结构参数条件下油膜剪切转矩随着油膜厚度的变化情况。试验中为了消除负载特性即对偶钢片的转速对转矩传递的影响,对摩擦副输出端进行制动即 $n_2 = 0$ r/min,摩擦副输入转速 $n_1 = 4\ 000$ r/min,单摩擦副入口工作油流量 $Q_0 = 0.1$ L/min,工作油入口温度 $t_1 = 40$ °C,通过增加控制油压力来调节摩擦副间油膜厚度(范

围 $h=0.02\sim 0.3$ mm), 得到以上 3 种结构形式摩擦副油膜剪切转矩随着油膜厚度的变化关系如图 8 所示。

固定某一油膜厚度, 通过调节摩擦副输入端的转速, 研究不同油槽结构参数条件下油膜剪切转矩随着输入转速的变化情况, 试验中 $n_2=0$ r/min, 单摩擦副入口工作油流量 $Q_0=0.1$ L/min, 工作油入口温度 $t_i=40$ °C, 油膜厚度 $h=0.2$ mm, 调节摩擦副输入转速 $n_1=250\sim 4\ 000$ r/min 范围内变化, 得到 3 种结构形式摩擦副油膜剪切转矩随着输入转速的变化关系如图 9 所示。

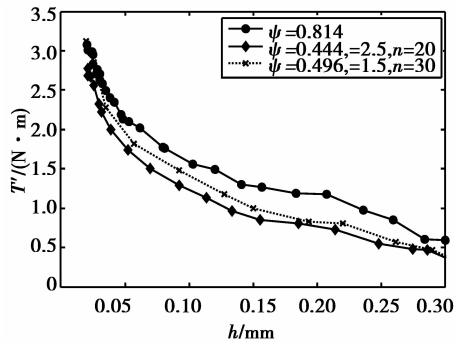


图 8 不同油槽参数油膜剪切转矩随着油膜厚度的变化

Fig. 8 Film shear torque change with film thickness in different groove parameters

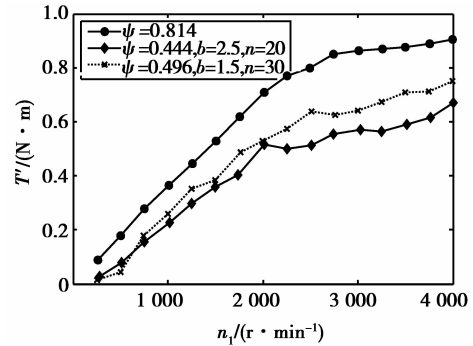


图 9 不同油槽参数油膜剪切转矩随着输入转速的变化

Fig. 9 Film shear torque change with input rotation speed in different groove parameters

由图 8 和图 9 可得, 由于 $\psi=0.814$ 摩擦片有较大的有效面积系数, 油膜剪切的有效工作面积较大, 在整个转速范围和油膜厚度范围内均有较大的油膜剪切转矩, 因此, 摩擦副油槽结构参数主要影响摩擦副有效面积系数进而影响油膜剪切转矩。

同时, 忽略 $\psi=0.444$ 和 $\psi=0.496$ 的两种摩擦片有效面积系数对剪切转矩的影响, 由图 8、9 可得, 结构形式为“窄而多 ($b=1.5, n=30$)”的摩擦片较“宽而少 ($b=2.5, n=20$)”的摩擦片在整个转速范围和油膜厚度范围均有较大油膜剪切转矩。由于油膜剪切转矩随着油槽宽度或油槽数目的增大均减小, 在相同有效面积系数的条件下, “窄而多”比“宽而少”的摩擦副虽然数目增多, 但是油膜剪切转矩由于油槽变窄而增大。因此, 试验验证了油槽宽度对油膜剪切转矩的影响程度大于油槽数目。

6 结 论

笔者对液黏传动双圆弧油槽摩擦副油膜流场特性和油膜剪切转矩进行了数值模拟研究, 建立了油槽参数影响分析平台, 通过理论和试验手段分析了油槽参数对油膜剪切转矩的影响, 得出以下结论:

1) 应用计算流体动力学软件 CFX 可以对液黏传动摩擦副流体流场特性和油膜剪切转矩特性进行预测。

2) 基于三维参数化建模、流场数值分析、试验设计方法及响应曲面法为一体的液黏传动摩擦副油槽参数影响因素分析方法能准确地分析摩擦副油槽结构参数对油膜剪切转矩的影响, 该方法同样适用于其他类型油槽结构摩擦副的性能预测和结构参数设计。

3) 通过理论分析和试验验证, 随着油槽宽度、油槽深度和油槽数目的增大, 油槽参数影响油膜剪切厚度和油膜剪切有效面积系数, 摩擦副的油膜剪切转矩均呈现下降趋势。在各自设定的范围内, 油槽宽度对油膜剪切转矩的影响最大, 油槽深度的影响次之, 而油槽数目的影响最小。

参考文献:

- [1] 魏宸官, 赵家象. 液体黏性传动技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
WEI Chenguan, ZHAO Jiexiang. Technology of hydro-viscous drive[M]. Beijing: Defence Industry Press, 1996.(in Chinese)
- [2] Cui Hongwei, Yao Shouwen, Yan Qingdong. Mathematical model and experiment validation of fluid torque by shear stress under influence of fluid temperature in hydro-viscous clutch[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(1): 32-40.

- [3] 魏振华, 侯红伟. 液黏传动摩擦油液压力分布的新算法[J]. 机床与液压, 2014, 42(19): 82-84.
WEI Zhenhua, HOU Hongwei. New algorithm of pressure distribution of oil within liquid viscous friction drive[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(19): 82-84. (in Chinese)
- [4] 张先俊, 谢方伟, 王存堂, 等. 油槽形式对摩擦副温度场影响的数值模拟[J]. 机床与液压, 2015, 43(23): 16-20.
ZHANG Xianjun, XIE Fangwei, WANG Cuntang, et al. Simulation study on effects of oil grooves on temperature field of friction pairs[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(23): 16-20. (in Chinese)
- [5] 崔红伟. 液黏调速离合器转矩特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
CUI Hongwei. Research on the torque characteristic of friction pairs in hydro-viscous clutch[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] Razzaque M M, Kato T. Effects of a groove on the behavior of a squeeze film between a grooved and a plain rotating annular disk[J]. Journal of Tribology, 1999, 121(4): 808-815.
- [7] Miyagawa M, Ogawa M, Okano Y, et al. Numerical simulation of temperature and torque curve of multidisk wet clutch with radial and circumferential grooves[J]. Tribology Online, 2009, 4(1): 17-21.
- [8] Aphale C R, Schultz W W, Ceccio S L. The influence of grooves on the fully wetted and aerated flow between open clutch plates[J]. Journal of Tribology, 2010, 132(1): 011104.
- [9] Meng Q R, Hou Y F. Effects of friction disc surface groove on speed-regulating start[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2009, 61(6): 325-331.
- [10] Xie Fangwei, Hou Youfu. Oil film hydrodynamic load capacity of hydro-viscous drive with variable viscosity[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2011, 63(3): 210-215.
- [11] Yuan Shihua, Peng Zengxiong, Jing Congbo. Experimental research and mathematical model of drag torque in single-plate wet clutch[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(1): 91-97.
- [12] Hu Jibin, Peng Zengxiong, Wei Chao. Experimental research on drag torque for single-plate wet clutch[J]. Journal of Tribology, 2012, 134(1): 97-104.
- [13] Wu W, Xiong Z, Hu J B, et al. Application of CFD to model oil - air flow in a grooved two-disc system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 91: 293-301.
- [14] Iqbal S, Al-Bender F, Pluymers B, et al. Model for Predicting Drag Torque in Open Multi-Disks Wet Clutches[J]. Journal of Fluids Engineering, 2013, 136(2): 122-136.
- [15] 黄家海, 魏建华, 邱敏秀. 液黏调速离合器传动特性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(11): 1927-1933.
HUANG Jiahai, WEI Jianhua, QIU Minxiu. Investigation on the transmission characteristics of hydroviscous drive[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(11): 1927-1933. (in Chinese)
- [16] 邹波. 车用液力减速器性能预测设计方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2012.
ZOU Bo. Research on brake performance prediction design method of vehicular hydraulic retarder[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012. (in Chinese)

(编辑 张 苹)