

# 100MD60Y4 电主轴油气润滑系统建模 及空气流场分析

张珂,王小康,张丽秀

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究不同转速条件下电主轴内部空气流场分布情况. 方法 建立100MD60Y4 电主轴油气润滑流道有限元模型,对不同转速的电主轴内部空气流场进行仿真模拟. 结果 空气流体在流经轴承时,并排安装的两个轴承有一个不能得到充分润滑;随着电主轴转速的增加,流体在电主轴前、后端的出口流速均随之增大,且前端出口速度变化剧烈,后端出口变化平稳;分析电主轴前后两端出口压力云图发现,前端出口存在回流现象,回流现象随着转速的增加变得更为剧烈;随着电主轴转速的升高,电主轴轴承等关键部位冷却效果有明显提高. 结论 转速增加,电主轴前后两端出口处流体流速增大,前端出口处回流严重,关键部位冷却效果有明显提高.

**关键词** 电主轴;油气润滑;流场分析;回流

中图分类号 TH16;TB35 文献标志码 A

## Modeling and Air Flow Field Analysis of 100MD60Y4 Motorized Spindle Oil-Air Lubrication System

ZHANG Ke, WANG Xiaokang, ZHANG Lixiu

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** Finite element model for oil and gas lubrication flow of 100MD60Y4 Spindle was built to study the distribution airflow field of motorized spindle under different rotational speed. The flow field of the spindle with two bearings installed side by side was simulated under different rotational speeds. The result shows that one of the two bearings cannot be adequately lubricated when the air fluid flows through the bearings; With the increase of the electric spindle speed, the flow velocity of the fluid in both exit end of the electric spindle increases, and the front exit speed changes drastically, and the rear end exit changes smoothly; Pressure cloud map of the front and rear ends of the spindle is analyzed and found that there is a reflow phenomenon in the front exit end, the reflow phenomenon becomes more intense with the increase of the speed; With the increase of the spindle speed, the cooling and sealing effect of electric spindle bearings and other key parts has improved significantly.

收稿日期:2017-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(5135317,51675353);辽宁省自然科学基金项目(2015020122);教育部长江学者"创新团队发展计划项目"(IRT\_15R45)

作者简介:张珂(1969—),男,教授,博士研究生导师,主要从事数控机床主轴系统关键技术方面研究.

**Key words:** motorized spindle; oil and gas lubrication; flow field analysis; backflow

随着机床向高速高精度方向发展,电主轴以其结构紧凑、重量轻、振动小、响应快、效率高等诸多优点被广泛应用于车辆、航空、模具等行业<sup>[1]</sup>. 作为机床的核心功能部件,高速电主轴已成为决定数控机床发展的关键,电主轴性能的优劣直接影响加工的精度和效率<sup>[2]</sup>. 由于电主轴工作时转速较高,电主轴内部轴承由于摩擦会产生很高的热量,电主轴内部温度的升高会引起电主轴内部转子、轴承等部件的热变形,影响机床加工精度和电主轴使用寿命. 因此,对电主轴冷却润滑的研究显得尤为重要. 目前国内通用的电主轴润滑方式主要有脂润滑、油气润滑、油雾润滑. 油气润滑是一种新型润滑方式,通过压缩空气带动少量润滑油在管道内壁波浪形的向前移动,形成一层薄薄的连续油膜,最终将润滑油以连续的油滴的形式喷射到润滑点,这种润滑方式润滑油利用率高、无污染,是目前广泛应用的润滑方式;油雾润滑是一种集油润滑方式,利用压缩空气产生的高速气流将油滴雾化为微小的油颗粒,形成空气、油雾颗粒的混合气体进入摩擦副,弥散于各个部位<sup>[3-6]</sup>. 空气流体在油气润滑和油雾润滑中都起到了至关重要的作用,一方面高速流动的空气带走了大量的热,降低电主轴内部温度;另一方面,压缩空气使润滑部位保持着一定的正压,可以很好地阻止水分和灰尘颗粒进入电主轴内部,起到了很好的密封作用<sup>[7-15]</sup>. 鉴于空气流体在电主轴油气润滑系统中的重要作用,笔者利用有限元仿真软件<sup>[16-18]</sup>建立 100MD60Y4 型电主轴油气润滑系统仿真模型. 通过对电主轴内部空气流场的速度云图和压力场分布的分析,对不同转速条件下电主轴冷却密封效果进行研究.

1 电主轴油气润滑工作原理

电主轴油气润滑是利用经过处理的压缩空气将润滑油以一股极其精细的连续油滴流喷射到润滑点的润滑方式,是气液两相流冷

却润滑技术的典型应用<sup>[19]</sup>. 油气润滑是润滑油消耗量最少的润滑方法之一<sup>[20-25]</sup>,油气润滑系统如图 1 所示. 润滑油经递进式分配器精确计量和分配后被输送到与压缩空气网络相连的油气混合块,并且和经过处理的压缩空气在油气混合块中形成油气流. 油气流在油气管道中高速向前流动,润滑油以油膜形式粘附在管壁四周,并以缓慢的速度向前移动,在将要到达油气流出口时,油膜变得越来越薄,且连成一片,最后以极其精细的连续油滴流喷射到润滑点. 当油气混合物进入油气管道时,由于压缩空气的作用,起初,润滑油是以较大的颗粒粘附在管道内壁四周,当压缩空气快速向前运动时,油滴也随之向前移动,并逐渐被压缩空气吹散、变小和变得越来越扁平. 在即将到达管道末端时,原先是间断地粘附在管壁四周的油滴已连成一片,形成了连续油膜,被压缩空气以精细的油滴喷入润滑点. 连续油膜的形成要有一个过程,因此要求油气管道的长度不得小于 0.5 m.

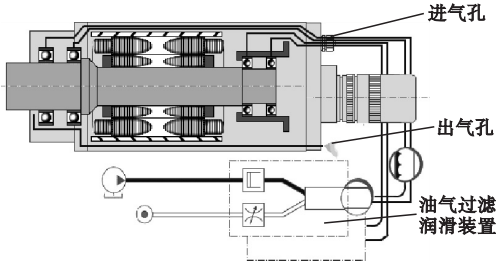


图 1 电主轴油气润滑系统

Fig. 1 Oil and gas lubrication system for motorized spindle

2 电主轴润滑系统有限元模型

2.1 模型控制方程

在有限元仿真软件中选用旋转机械湍  $k-\varepsilon$  流物理场,物理场主要依据描述黏性不可压缩流体动量守恒原理的 Navier - Stokes 方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [ -p\mathbf{I} + (\mu + \mu_T) \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) ] + \mathbf{F}, \tag{1}$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2}$$

式中: $\rho$  为流体密度; $\boldsymbol{u}$  为流体速度矢量; $p$  为流体压力; $\boldsymbol{I}$  为冲量; $\mu$  和  $\mu_T$  分别为流体动力黏度和湍流黏度; $\boldsymbol{F}$  为流体体积力矢量; $C_\mu$  为湍流模型常数; $k$  为湍流动能; $\varepsilon$  为湍流耗散率; $\nabla$ 为拉普拉斯算子.

湍流粘度的计算使用  $k-\varepsilon$  模型中湍流动能  $k$  传递方程和湍流耗散率  $\varepsilon$  传递方程.

湍流动能  $k$  传递方程:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\boldsymbol{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + p_k - \rho \varepsilon \tag{3}$$

湍流耗散率  $\varepsilon$  传递方程:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(\boldsymbol{u} \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} p_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

$$p_k = \mu_T [\nabla \boldsymbol{u} : (\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T)] \tag{5}$$

式中: $p_k$  为生成项; $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$  均为湍流模型常数(见表1).

表1 湍流模型常数

Table 1 Turbulence model constant				
$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_\mu$
1	1.3	1.44	1.92	0.09

2.2 电主轴有限元仿真模型

为了准确研究高速电主轴油气润滑的流场分布,在有限元仿真软件中创建了100MD60Y4电主轴三维有限元模型,表2为该型号电主轴主要工作参数.模型中参数设置如表3所示.

表2 电主轴参数

Table 2 Motorized spindle parameters				
输出功率/	最大转速	额定电压	额定电流	额定频率
kW	$n/(r \cdot \min^{-1})$	U/V	i/A	f/Hz
2.5~4	60 000	350	6.3~10	1 000

选取100MD60Y4电主轴内部空腔作为计算区域.油雾颗粒经由压缩空气传输,从进气口进入电主轴内部,流经前后轴承、定转子

间隙,最后从电主轴后端出气口以及前端间

表3 模型参数

Table 3 Model parameters			
入口流速	空气密度		
	$p/\text{MPa}$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
2.5~4	0.3	3.5	$1.8\times 10^{-3}$

隙流出电主轴.在分析计算的过程中,需要保证整个模型的封闭性,流场的真实性,并且为了提高模型的收敛性,在保证精度的前提下对模型进行适当的简化,简化后的模型缩短了定转子间隙的长度,同时省略了轴承滚珠(见图2).在求解的过程中,对计算区域采用自由四面体网格的划分方法,在网格剖分的过程中对局部尺寸较小的边界进行细化处理.

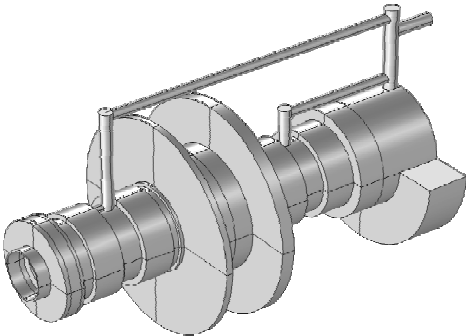


图2 简化后的流场计算区域

Fig. 2 Simplified flow field calculation area

3 仿真模拟结果与分析

3.1 电主轴润滑系统速度场分析

3.1.1 电主轴两端出口流场速度分析

图3、图4分别为不同转速时流体流出前后两端出口的速度云图.从图3可以看出,随着转速的增加,电主轴前端出口空气流体流速随之增加.低转速条件下,前端出口流体较为集中,随着转速增加,流体沿圆周分散,并且在径向形成速度梯度,流体分布均匀.均匀分布的流体有助于电主轴内部热量的散发,并且对整个前端出口产生很好的密封效应.从图4可以看出,电主轴后端出口空气流体流速变化相对平缓;随着转速的增加,后端出口空气流体形成稳定的低速区域,高速流

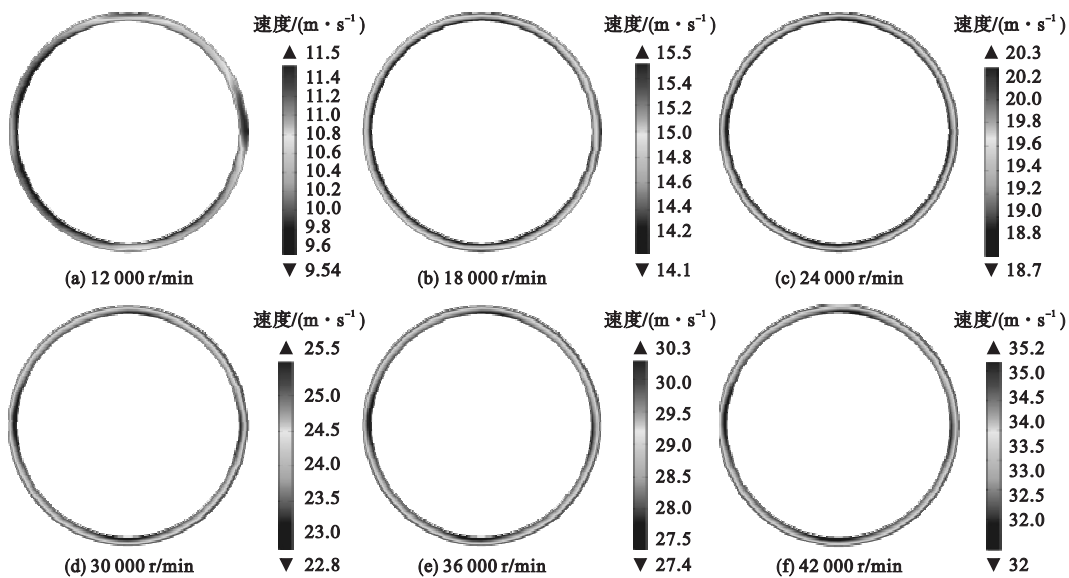


图3 不同转速下流体在前端出口处的速度云图

Fig. 3 Speed cloud map of the fluid at the front end outlet for different speeds

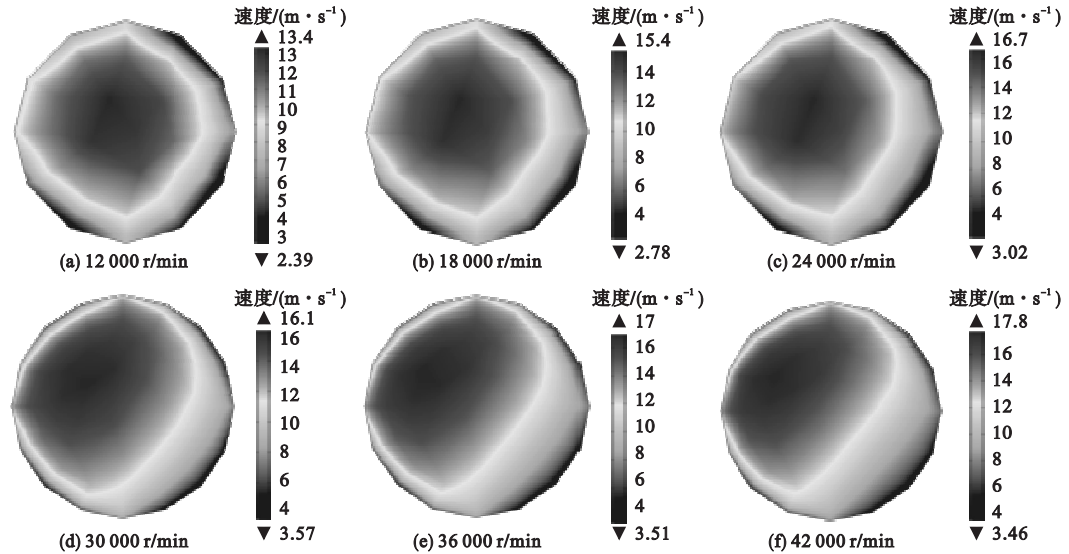


图4 不同转速下流体在后端出口处的速度云图

Fig. 4 Speed cloud map of the fluid at the rear end outlet for different speeds

体区域位置发生偏移,并且速度极值不断增高;后端出口法向流速变化较为平缓,但是旋转产生的高速区域带来变化剧烈的切向速度矢量,后端出口端面速度为法向速度和切向速度的矢量和,所以导致高速区域位置的偏移.

3.1.2 电主轴定转子间隙内流场及转子冷却效应分析

电主轴模型中定转子间隙极小,转子及

转轴的高速旋转会对间隙内流体产生巨大的扰动作用.空气流体从进气口进入电主轴内部,分别从前后轴承流体入口流经轴承后从两端同时进入定转子间隙.定转子间隙内流体速度为流体从两端进入定转子间隙的初始速度以及转子转速的矢量和.

图5 为了不同转速条件下定转子间隙内流场分布,可以明显看出,定转子间隙内流场分布并不均匀,流速较大的区域主要集中分

布在前端轴承润滑流体入口方向,但是随着转速的增加,流速较大区域的面积逐渐增加,流场逐渐分布均匀,空气流体对定转子间隙的冷却效果逐渐增强。

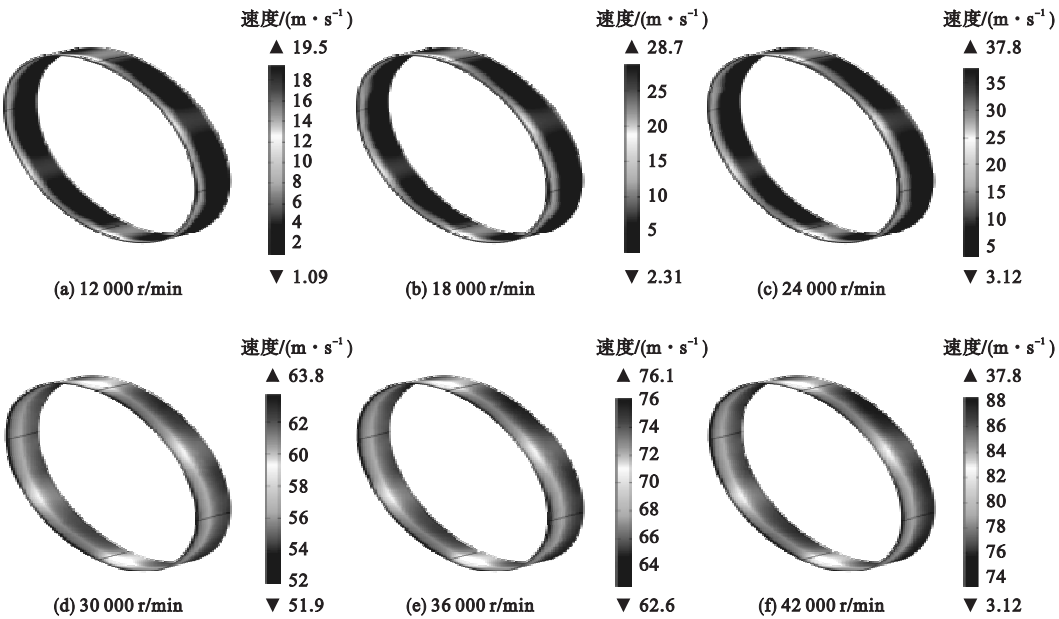


图5 不同转速条件下定转子间隙内流场分布

Fig. 5 Flow field distribution in the gap between stator and rotor under different rotational speed conditions

3.1.3 电主轴前轴承流场及转子冷却效应分析

图6为轴承中面流场分布.从图8可看出,随着电主轴转速的增加,流体速度极大值

基本保持不变,极值区域面积逐渐减小,流场内整体流速变的均匀;轴承内部流体流速逐渐增加,冷却效果逐渐增强;两个轴承中,靠近气隙(右侧)一侧的轴承内流体流速要明

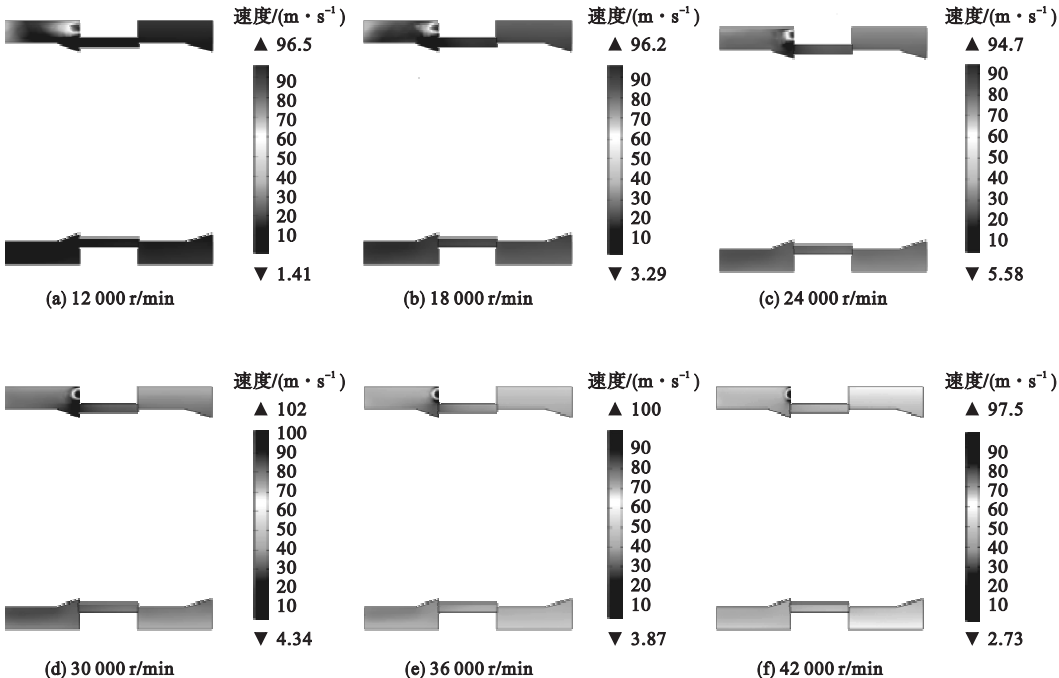


图6 轴承中面流场分布

Fig. 6 Surface flow field distribution in bearings



显高于另外一侧,冷却效果更明显;从模型整体来看,这是由于前端流道狭窄,变化剧烈,流体受到较大的阻滞,后端流道简单、宽阔,对流体的阻滞作用较小。

3.2 电主轴润滑系统压力场及密封效应分析

为研究电主轴转速变化与密封效果的关系,分析电主轴前端出口的压力场,图7为不同转速下流体在前端出口处的压力云图。

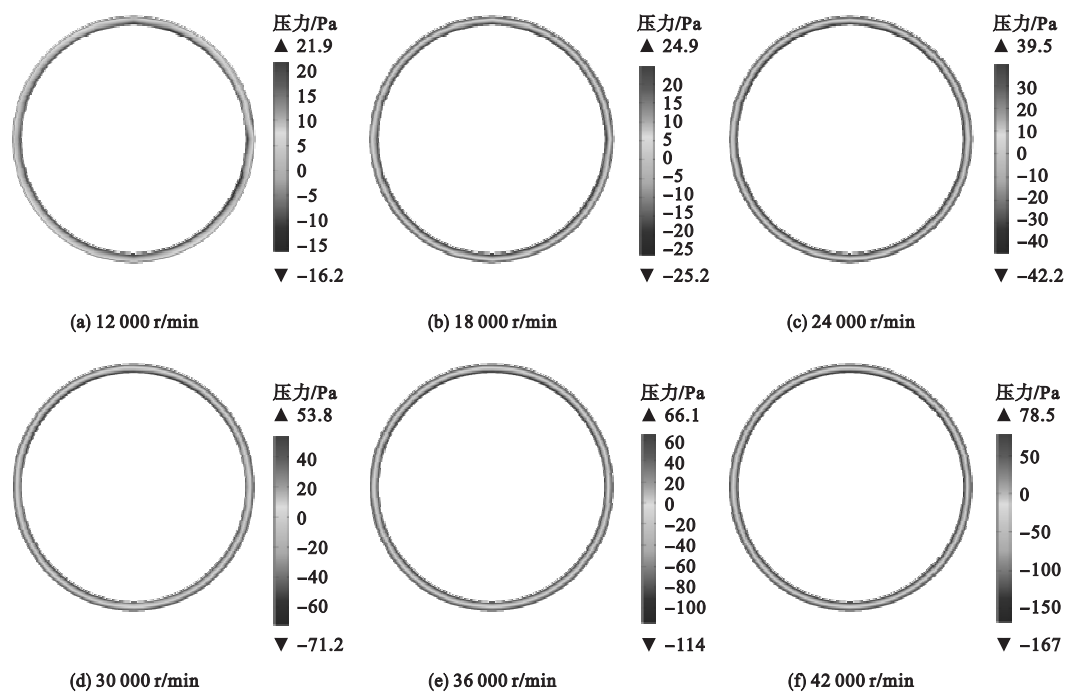


图7 不同转速下流体在前端出口处的压力云图

Fig. 7 Pressure cloud diagram of fluid at the front end outlet at different rotational speeds

从图7中可以看出,随着电主轴转速的增加,在前端出口处回流现象逐渐严重。这是由于电主轴流体前端出口流道狭小且变化剧烈,因此在电主轴运行过程中,会在前端出口处形成负压,使得前端出口内侧压力小于外部环境压力,在前端出口形成回流,电主轴密封性变差,对电主轴造成损伤。为了减轻前端出口的回流现象,在电主轴运行过程中尽量选择合适的转速,避免高转速。

像。由于被测流体密度变化较小,所以在测试区域加入自然降落的流沙,增强被测区域密度变化,以便于刀口照相记录系统记录流动图像。试验装置如图8所示。

4 电主轴前后出口流速试验

4.1 试验装置

试验采用的HGD-SD100纹影仪,是以平行光束通过含有可压缩流场的试验段,通过空气流体密度和温度的改变引起的折射率的变化,摄取电主轴前后两端出口流体密度变化资料以提供被测空气流体的真实流动图

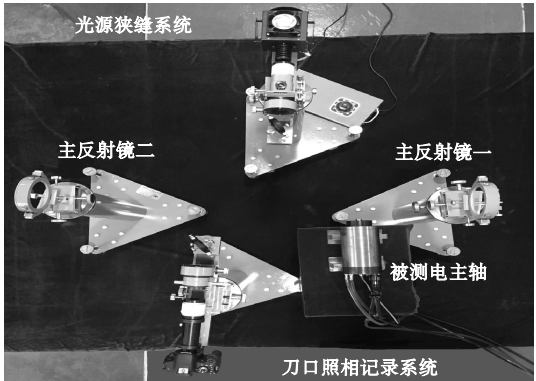


图8 试验装置图

Fig. 8 Test device

4.2 试验结果分析

试验以6 000 r/min为间隔,采集电主轴

转速为 12 000 ~42 000 r/min 时前后两端流体出口处图像, 每个转速条件下图像记录时间为 1 min, 图像选取记录时间内的 30s

处. 图 9、图 10 分别为不同转速条件下电主轴前端出口流体流动图像和电主轴后端出口处流体流动图像.

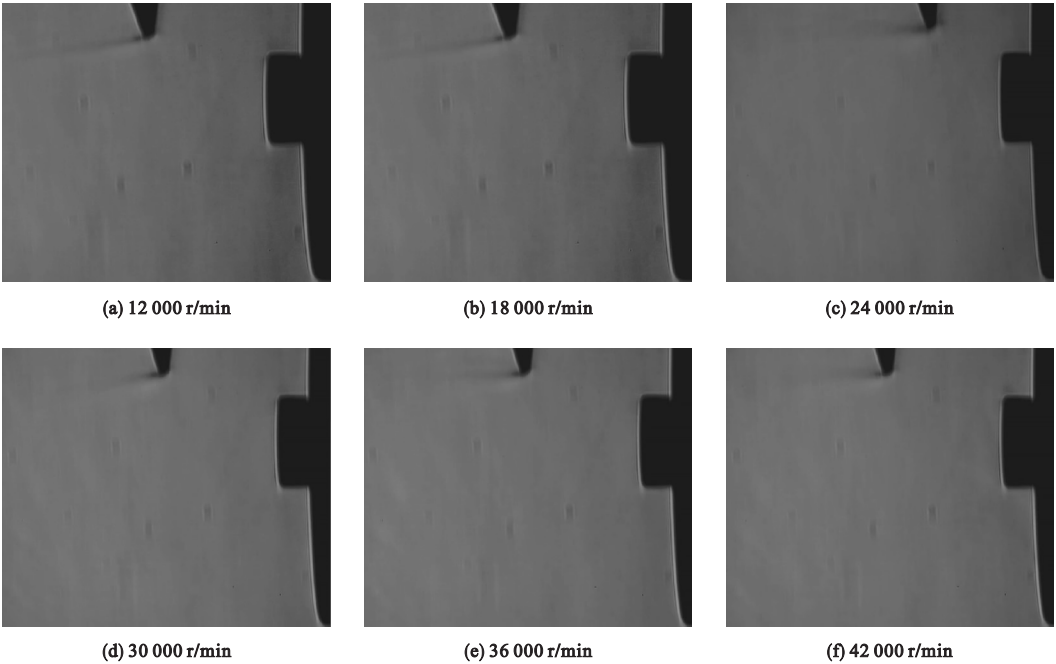


图 9 电主轴前端出口流体流动图像

Fig. 9 Flow image of fluid in the spindle front outlet

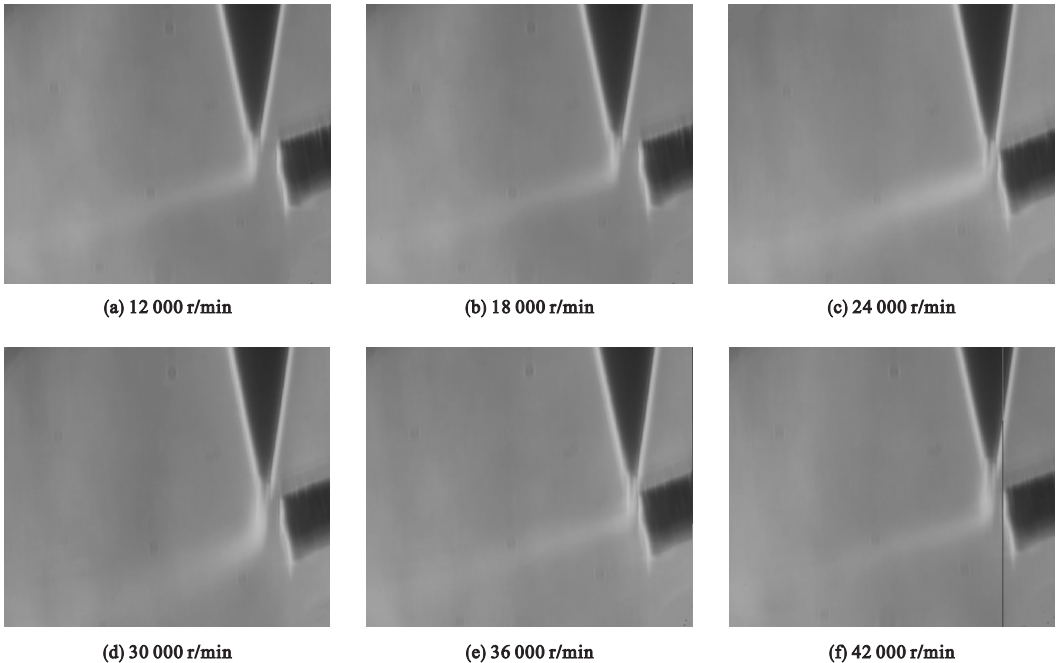


图 10 电主轴后端出口流体流动图像

Fig. 10 Flow image of fluid in the spindle rear outlet

由于流沙颗粒受重力的影响,在没有空气流体的扰动下,从流沙出口自然降落的流沙垂直向下降落。电主轴两端出口流出的空气流体对流沙施加横向的力,使流沙产生横向的位移,并且流沙流出方向与垂直向下方向的夹角随着电主轴两端出口流出的空气流体的变化而变化:电主轴前后两端出口流出空气;流体流速越高,流沙横向位移越大,纹影仪呈现出的实验结果中流沙流出方向与垂直向下方向夹角越大。

从图9可以看出,随着转速的增加,流沙流出方向与垂直向下方向夹角越来越大,前端出口流体流速越来越高;同时随着转速的增加,前端出口处流沙流逐渐变得分散,这是受前端出口回流现象的影响,部分流沙倒流回前端出口,导致流沙降落点处变得分散。

图10表明,随着转速增加后端出口处流沙流出方向与垂直向下方向夹角逐渐增大,表明转速增加时后端出口处流体流速也在不断增加,但是流沙流出方向与垂直向下方向夹角明显小于前端出口夹角,表明后端出口流体流速整体小于前端出口。试验通过定性分析电主轴前后两端出口流体流动状态,结果和仿真结果吻合,证明仿真结果真实可靠。

## 5 结 论

(1)随着转速的增加,电主轴前后两端出口空气流体流速增加,前端出口的流速受转速影响较大,变化剧烈。电主轴后端出口空气流体流速变化相对平缓。

(2)电主轴转速升高,电主轴轴承和定转子间隙内流场流体流速增高,冷却效果增强。

(3)电主轴运行过程中前端出口产生回流,随转速的增加,回流现象逐渐严重,密封效应减弱。为了有效保护电主轴,应该尽量避免电主轴在高转速下长时间运行。

## 参考文献

[1] 左涛涛,李松生,毛华伟,等.基于油雾润滑的

高速电主轴断油性能试验研究[J].润滑与密封,2008,33(10):20-23.

(ZUO Taotao, LI Songsheng, MAO Huawei, et al. Experimental study on interruption of oil supply about a high-speed spindle based on oil-mist lubrication[J]. Lubrication engineering, 2008, 33(10): 20-23.

[2] 张珂,佟俊,吴玉厚,等.陶瓷轴承电主轴的模式分析及其动态性能实验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2008,24(3):490-493.

(ZHANG Ke, TONG Jun, WU Yuhou, et al. Model analysis and dynamic characteristic experiment of the ceramic bearing motorized spindle[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2008, 24(3): 490-493.

[3] 任福琳,王彦林,陈建文,等.影响油雾润滑系统油耗主要因素的探讨[J].冶金设备,2003(3):37-39.

(REN Fulin, WANG Yanlin, CHEN Jianwen, et al. Discussion of influencing the main factors of oil consumption in oil mist lubrication system[J]. Metallurgical equipment, 2003(3): 37-39.)

[4] 胡建洲.油雾润滑系统的应用及存在问题的改进建议[J].天然气与石油,2008,26(6):46-48.

(HU Jianzhou. Oil and gas treating and processing[J]. Natural gas and oil, 2008, 26(6): 46-48.)

[5] 汪晓云,金龙.油雾润滑在轴承润滑中的应用研究[J].武汉船舶职业技术学院学报,2004(3):20-21.

(WANG Xiaoyun, JIN Long. Application research of oil spray lubrication on bearing lubrication[J]. Journal of Wuhan institute of ship-building technology, 2004(3): 20-210.

[6] 李东亚,杨浩亮,肖汝锋,等.高速电主轴油雾润滑改为油脂润滑的可行性分析[J].机电工程技术,2015(4):94-96.

(LI Dongya, YANG Haoliang, XIAO Rufeng, et al. Feasibility analysis of grease lubrication instead of oil-mist lubrication for high-speed motorized spindle[J]. Electromechanical engineering technology, 2015(4): 94-96.

[7] MOON J H, LEE H D, KIM S I. Lubrication characteristics analysis of an air-oil lubrication system using an experimental design method[J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2013, 14(2): 289-297.

[8] KORETA N, ARIO H, SASAKI M. Lubrication mechanism by oil-mist lubrication and oil-air lubrication to spindle bearing and its effect on thermal displacement[C]//The seventh international conference on progress of machining



- technology. Beijing: Aviation industry press, 2004;442-447.
- [9] PASCHALL T W, GAYNOR P A. Oil mist lubricated bearings [J]. Industry applications magazine IEEE, 2005, 11(6): 25-31.
- [10] RAHMAN M, KUMAR A S, SALAM M U. Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2002, 42(5): 539-547.
- [11] FUKADA S, FANG B, SHIGENO A. Experimental analysis and simulation of nonlinear microscopic behavior of ball screw mechanism for ultra-precision positioning [J]. Precision engineering, 2011, 35(4): 650-668.
- [12] CHEN M R, TSAI P J, CHANG C C, et al. Particle size distributions of oil mists in workplace atmospheres and their exposure concentrations to workers in a fastener manufacturing industry[J]. Journal of hazardous materials, 2007, 146(1/2): 393-398.
- [13] 赵威, 何宁, 李亮, 等. 微量润滑系统参数对切削环境空气质量的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(13): 184-189.  
(ZHAO Wei, HE Ning, LI Liang, et al. Investigation on the influence of system parameters on ambient air quality in minimum quantity lubrication milling process[J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(13): 184-189.)
- [14] CHANG C C, KUO S C, HUANG C K, et al. The investigation of motor cooling performance[J]. Proceedings of world academy of science engineering and technology, 2008(4): 230-236.
- [15] 张淑华. 油雾润滑中残雾回收的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.  
(ZHANG Shuhua. The research of collection of residual oil mist in the oil mist lubrication [D]. Shenyang: Northeastern University, 2006.)
- [16] YANG B, XU G, WU H. Heat transfer measurements on a rotating film cooling model[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2009, 30(10): 1809-1815.
- [17] 王海冰, 王攀达, 李文华, 等. 基于 COMSOL 液节流阀内部流场数值模拟研究[J]. 液流与气动, 2015(8): 26-29.  
(WANG Haibing, WANG Panda, LI Wenhua, et al. Numerical simulation of flow field inside throttle valve based on COMSOL[J]. Chinese hydraulics & pneumatics, 2015(8): 26-29.)
- [18] 张丽秀, 刘腾, 李超群. 冷却水流速对电主轴电机温升的影响分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(8): 36-38.  
(ZHANG Lixiu, LIU Teng, LI Chaoqun. Research on the effects of cooling water velocity on temperature rise of the water-cooled motor in motorized spindle[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2015(8): 36-38.)
- [19] 夏粉玲, 周应昌. 高速主轴轴承的油气润滑系统分析[J]. 机械, 2007(9): 28-30.  
(XIA Fenling, ZHOU Yingchang. Analysis on system of the aerosol lubrication system of spindle bearing[J]. Machinery, 2007(9): 28-30.)
- [20] 李志恒, 马洪伟, 郭峰, 等. 圆锥滚子轴承油气润滑试验研究[J]. 轴承, 2016(8): 42-45.  
(LI Zhiheng, MA Hongwei, GUO Feng, et al. Experimental research on oil-air lubrication for tapered roller bearings[J]. Bearing, 2016(8): 42-45.)
- [21] 李松生, 周鹏. 基于油气润滑的超高转速电主轴轴承润滑性能的试验研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(10): 25-28.  
(LI Songsheng, ZHOU Peng. Experimental study of the lubricating performances for electric spindle bearings running in ultrahigh speed lubricated by oil-air[J]. Lubrication engineering, 2011, 36(10): 25-28.)
- [22] 陈建文, 宋锦春. 关于油雾润滑中油雾浓度的影响因素分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(4): 566-568.  
(CHEN Jianwen, SONG Jinchun. Influencing factors on oil-mist concentration during atomized lubrication[J]. Journal of northeastern university(natural science), 2007, 28(4): 566-568.)
- [23] MAYER E. Theory of liquid atomization in high velocity gas streams[J]. ARSJ, 1961, 31: 1783-1785.
- [24] 康宁, 曾文彬. 空气压力对油雾发生器雾化特性的影响[J]. 润滑与密封, 2009, 34(8): 14-16.  
(KANG Ning, ZENG Wenbin. Effect of air pressures on mist characteristics of oil mist lubrication device[J]. Lubrication engineering, 2009, 34(8): 14-16.)
- [25] 蔡斌, 李磊. 液滴在气流中破碎的数值分析[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(4): 613-616.  
(CAI Bin, LI Lei. Numerical analysis of liquid drop breakup in airflow[J]. Journal of engineering thermophysics, 2003, 24(4): 613-616.)