

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0302

不同进水压力下水润滑轴承润滑
特性试验研究

郑建波, 叶晓琰*, 胡敬宁, 余旭南

(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)



郑建波

摘要: 针对海水淡化高压泵水润滑轴承-转子系统在运行过程中由于进水压力的改变而带来的安全、可靠和稳定性等问题,以轴心轨迹以及周向压力脉动为主要研究目标,对干、湿转子在不同进水压力下水润滑轴承轴心轨迹数值模拟,并通过前期设计研制的海水淡化高压泵用水润滑轴承试验台对干、湿转子在不同进水压力下水润滑轴承运行过程中轴心轨迹及周向压力脉动进行试验研究。从计算和试验结果的总体变化趋势可以得知,进水压力对干转子情况下液膜形成的影响较大,而湿转子由于转子系统阻尼因素影响,进水压力对轴心轨迹影响变小,但整体变化趋势与干转子变化趋势相近,对系统整体而言在进水压力为0.2 MPa时,系统运行较为稳定,文中为进一步提高万吨级海水淡化高压泵系统稳定运行提供了一定的研究基础。

关键词: 海水淡化高压泵;水润滑轴承试验台;轴心轨迹;压力脉动

中图分类号: S277.9; TH313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2018)07-0599-08

郑建波, 叶晓琰, 胡敬宁, 等. 不同进水压力下水润滑轴承润滑特性试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(7): 599-606.

ZHENG Jianbo, YE Xiaoyan, HU Jingning, et al. Study on lubrication characteristics of water lubricated bearings under different inlet pressures[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2018, 36(7): 599-606. (in Chinese)

Study on lubrication characteristics of water lubricated
bearings under different inlet pressures

ZHENG Jianbo, YE Xiaoyan*, HU Jingning, SHE Xunan

(National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: The variation of inlet pressure can affect the safety, reliability and stability of the water lubricated bearing rotor system in a seawater desalination high-pressure pump. In this study, numerical simulations were carried out on the shaft orbits of dry and wet rotors under different inlet pressures to clarify the axial force and circumferential pressure distributions. Additionally, the shaft orbits and circumferential pressure fluctuation were measured when the water lubrication bearings were in operation at different inlet pressures based on a water lubricated bearing test stand for seawater desalination high-pressure pumps designed and developed in the first-phase of a project. The simulated and measured results show that the influence of inlet pressure on the liquid film formation is more substantial in the dry rotor. For the wet rotor system, however, due to the damping factor in the system, the influence of the inlet pressure on the axis orbit is smaller, but the overall variation trend is similar to that of the dry rotor. For the system as a whole, the operation of the rotor system is stable as the inlet pressure was at 0.2 MPa. This study has provided some research basis for improving the operational stability of the ro-

收稿日期: 2016-12-06; 修回日期: 2017-02-13; 网络出版时间: 2018-05-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180521.1606.014.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAB08B01, 2013BAB08B02); 国家自然科学基金资助项目(51276083)

第一作者简介: 郑建波(1989—), 男, 浙江衢州人, 硕士(zhengjb1988@163.com), 主要从事流体机械与工程研究。

通信作者简介: 叶晓琰(1963—), 女, 安徽合肥人, 研究员(yexiaoyan@ujs.edu.cn), 主要从事流体机械与工程研究。

tor system in a seawater desalination high - pressure pump further.

Key words: seawater desalination high pressure pump; water lubricated bearing test bench; axis locus; pressure pulsation

随着反渗透海水淡化相关关键技术的逐步成熟,其经济可行性成为能否大规模推广应用的一个重要指标. 高压泵是反渗透海水淡化系统的关键设备和主要能耗设备,是影响淡化水成本的重要因素^[1-3]. 采用轴向吸入、两端水润滑轴承支承的泵结构型式,不仅可以有效简化泵体结构、降低设备投资费用,还可以极大的提高高压多级泵的运行效率、节约总成本.

水润滑轴承作为轴向吸入型海水淡化高压泵的唯一转动支承部件,其稳定性直接对海水淡化系统的可靠性和稳定性造成影响^[4]. 在不同操作压力下要保证系统恒定产水量的特殊要求,使得海水淡化高压泵多工况变换频繁,进水压力的不同使得水润滑轴承多工况稳定性问题被极大地放大.

水润滑轴承稳定性问题属于转子 - 液膜流固耦合润滑特性问题,其主要判定依据为轴承轴心轨迹和轴承周向压力分布^[5-6]. 其中轴心轨迹作为轴承系统运动状态的一种重要的图形特征,是滑动轴承润滑状态的直观反映,有助于判定滑动轴承的润滑状态和故障情况. 而轴承周向压力分布情况是轴承转子系统振动和稳定性能的显性表示,主要是反映其结构振动情况,有助于判定系统的振动和噪声情况及可能引起共振的极端情况.

目前,国内外已有不少学者针对轴承液膜压力和轴心轨迹展开了相关研究. 多数研究人员使用 Reynolds 方程进行对应的离散化分析,使用迭代算法进行方程组求解,通过计算求解轴承在额定载荷下的轴心轨迹、压力分布情况等重要性能参数^[7-10]. 还有越来越多的学者利用试验法来研究水润滑轴承的液膜特性^[11-14]. 张国渊等^[15]设计了专门针对航天发动机吸气端前置涡轮增压器的高转速水润滑轴承试验装置,并据此设计了针对此类高速滑动轴承情况的方案进行试验研究.

文中通过对水润滑轴承进行 CFD 数值模拟,计算不同进水压力下轴心轨迹的主要特性及变化规律,并通过试验,实测不同进水压力下干、湿转子轴心轨迹和轴承周向压力分布,对比分析模拟结果和试验结果,研究不同进水压力对轴承液膜压力脉动及其变化规律的影响,为判定水润滑轴承系统稳定性提供依据.

1 数值模拟

1.1 水润滑轴承物理模型

文中采用的是典型圆柱轴承、轴颈和液膜组成的耦合系统,并假设从观察的方向看转子以逆时针方向旋转,随着转速的不断上升,轴承和转子间逐渐形成动压液膜,其物理模型如图 1 所示.

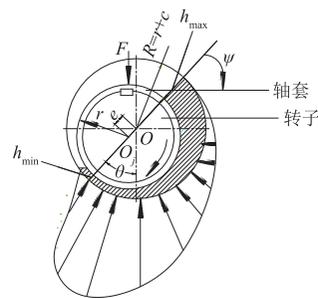


图 1 楔形润滑液膜原理图

Fig. 1 Wedged liquid film of lubrication

由于在外载荷作用下,轴承转子整体产生一定的偏心距 e 以及偏位角 θ , 因此对应的半径间隙 $c = R - r$, R 为轴瓦半径, r 为轴套半径. 则对应的轴承最大间隙为 $h_{\max} = c + e$, 最小间隙为 $h_{\min} = c - e$.

1.2 计算模型及网格划分

图 2 为 ANSYS 软件进行的有关液膜网格. 具体参数如下:轴瓦内径 $D = 43$ mm, 初始偏位角设置为 45° , 偏心率为 60%. 在长径比 (L/D) 等于 1.0 时, 半径间隙 c 选取 0.1 mm, 进水压力分别为 0.1, 0.2, 0.3 MPa.

由于液膜具有径向厚度很小的特点,采用 ANSYS ICEM 软件进行高密度 (200 000 左右)、高质量 (0.95 以上) 的结构化液膜网格划分.

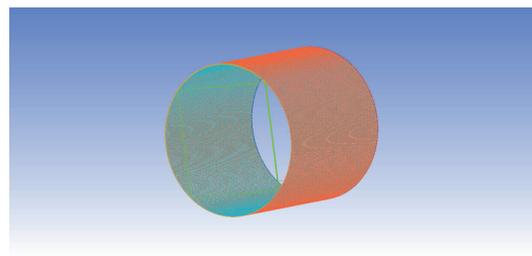


图 2 结构化网格划分

Fig. 2 Structured mesh in water film

1.3 网格独立性分析

对液膜进行 CFD 计算时,网格数量对流体仿真计算结果的精确性有较大影响,因此文中对有关网格进行独立性分析.文中通过改变液膜3个方向(径向、周向、轴向)的层数来改变网格总数如表1所示,在6种不同的方案中, X 方向承载力和 Y 方向承载力的差别随着网格数量的增多逐渐减小.可以看出6种方案的承载力误差小于0.5%,误差在可接受范围之内.在考虑充分利用有限的计算资源的条件下,最终将网格总数控制在200 000内,选取方案3.

表1 网格独立性分析
Tab.1 Mesh size independence analysis

方案	网格总数	径向、周向、轴向节点数	F_x/N	F_y/N
1	158 384	6:200:100	1.589 1	10.283 7
2	166 868	6:240:100	1.590 7	10.285 1
3	197 074	7:240:100	1.591 5	10.284 5
4	214 540	8:240:100	1.591 6	10.284 6
5	223 024	7:280:100	1.591 5	10.284 6
6	255 344	7:320:100	1.591 6	10.284 5

1.4 稳态数值模拟

建立液膜三维模型并进行液膜有关结构化网格划分后,将水润滑轴承液膜网格文件导入 CFX-Pre 进行前处理工作,首先设置边界条件,液膜两端分别设为进口和出口面,为了避免回流将出口面设为 opening 面,压力为0.进口设为压力进口,不同工况时可任意改变进口的压力数值,内、外壁面分别设为旋转面和静止面,计算域设为 mesh motion,湍流模型使用 $k-\varepsilon$ 模型, Z 轴为旋转轴,刚体只存在 X, Y 方向平动;重力的方向为 Y 轴负方向;再进行 Interface 面的设定,运动方式选取为 rigid body solution 形式,其中的 rigid body 为上面对应的刚体;最后设置求解器中的有关轴心位移和液膜承载力等的的数据监测.

文中进行流固耦合计算时,对应的液膜支承力作用在转子上,可计算出相应的轴心位置情况,反过来转子的移动也造成其液膜压力分布发生变化而改变液膜支承力,液膜支承力的改变又会导致转子轴心位置发生改变,从而计算出在计算时间内的轴承轴心轨迹的变化规律.对于干、湿转子情况的流场分析,主要通过不同外部载荷来加以描述系统阻尼情况.通过施加一定大小的三角函数外部载荷来实现转子在干、湿情况下的瞬态计算,如图3所示.具体参数值 F 通过标准试验测量得到,其中干转子情况下 F 值的变化为3~5;湿转子情况下的 F

值的变化为10~15.

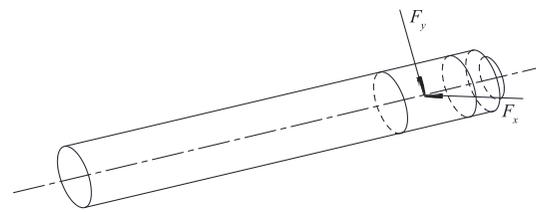


图3 外部载荷情况
Fig.3 External load conditions

1.5 模拟结果和分析

在转速为2 500 r/min,半径间隙为0.1 mm,长径比为1.0的条件下,选取3种不同的进水压力分别进行轴心轨迹进行数值计算,分析不同进水压力条件对轴心轨迹的影响规律,结果如图4所示.

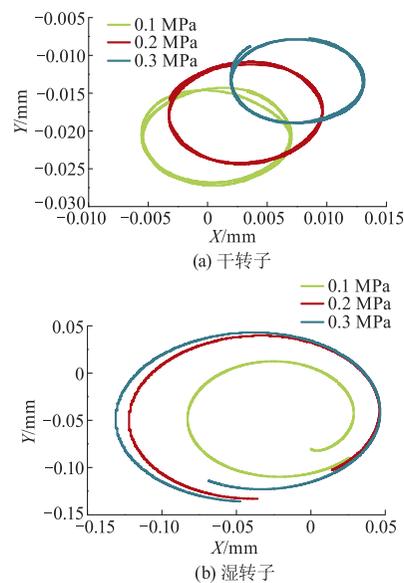


图4 不同进水压力条件下的轴心轨迹
Fig.4 Shaft orbits at different inlet pressures

由图4可以看出,在干、湿转子2种情况下水润滑轴承轴心轨迹随着进水压力的改变呈现较为明显的差异.其中,干转子情况下振幅随进水压力的增大逐渐减小,但是在湿转子情况则相反.干转子情况下涡动中心向 X, Y 正方向漂移,而湿转子情况下漂移情况不是十分明显,这可能是由于干转子情况下液膜支承力是主导因素,而湿转子情况下转子系统阻尼占据主导位置.

2 试验研究

2.1 试验台总体设计

文中以单机1万t高压泵4级转子的滑动轴承

为研究对象,设计并制造了干、湿转子水润滑轴承 试验台如图5所示.

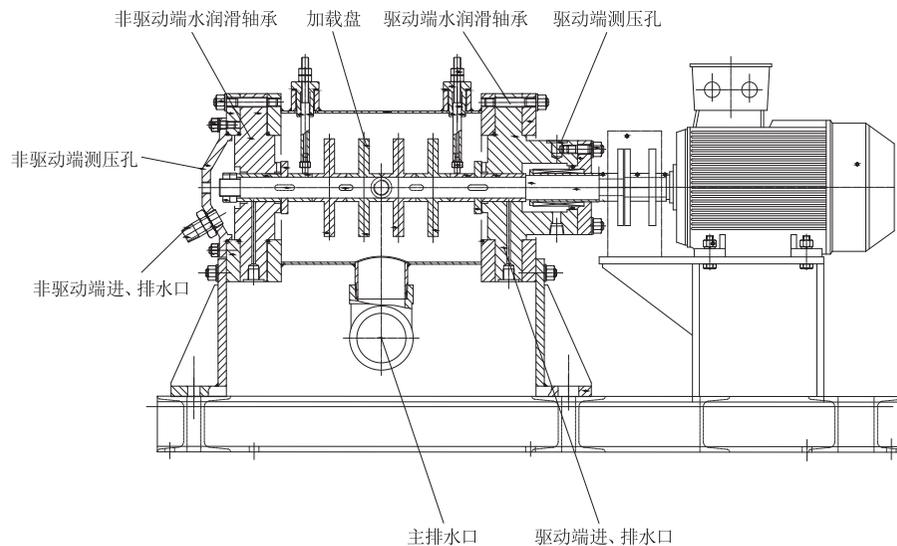


图5 水润滑轴承试验台

Fig. 5 Water lubricated bearing test stand

试验台主要包括变频电动机、信号采集系统和机械部件等部分. 在干转子条件下,从两端进水孔分别对2个轴承压力供水,水润滑轴承的间隙内充满黏性流体,然后从轴承间隙的另一端流出主排水口,如此实现干转子条件,模拟空转时海水淡化高压泵的运行情况,在湿转子条件下,堵住主排水口,从中间进水口压力供水形成湿转子状态,然后充满水润滑轴承间隙,最后从两端的排水孔排出,模拟海水淡化高压泵的实际运行状态,如图6所示.

互垂直的2个位移传感器,编号为1和2,通过测量相对位置的变化情况,描述水润滑轴承的轴心轨迹情况,具体如图7所示.

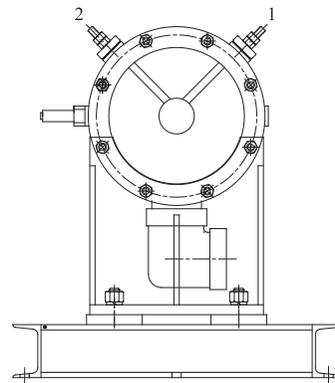
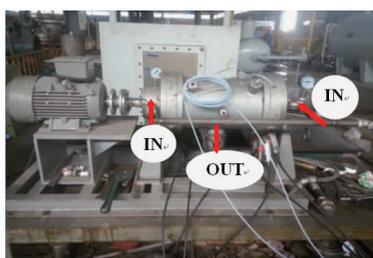


图7 位移传感器安装位置

Fig. 7 Installation locations of displacement sensors



(a) 干转子



(b) 湿转子

图6 试验装置

Fig. 6 Experimental rigs

轴承周向压力分布监测通过沿着主轴转动方向依次布置的6个压力脉动传感器,具体编号从1到6,具体如图8所示.

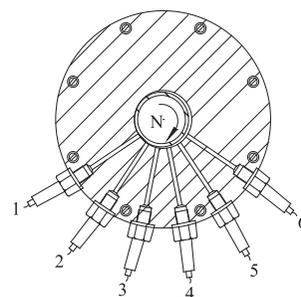


图8 压力传感器布置

Fig. 8 Schematic diagram of pressure sensor arrangement

轴心轨迹的监测通过在试验台筒体上安装相

2.2 试验方案

2.2.1 轴承参数

文中试验轴承直径为 $D = 43 \text{ mm}$, 轴承半径间隙 $c = 0.1 \text{ mm}$, 轴承长径比 $L/D = 1.0$.

2.2.2 试验方案设计

具体的试验方案如表2所示, p_{in} 为进口压力.

表2 试验方案
Tab.2 Experimental cases

试验方案	转子状态	p_{in}/MPa	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	c/mm	L/D
1	干	0.1	2 500	0.1	1.0
2	干	0.2	2 500	0.1	1.0
3	干	0.3	2 500	0.1	1.0
4	湿	0.1	2 500	0.1	1.0
5	湿	0.2	2 500	0.1	1.0
6	湿	0.3	2 500	0.1	1.0

2.3 试验测试结果及分析

2.3.1 进水压力对轴心轨迹的影响

图9为干、湿转子2种情况下不同进水压力下的轴心轨迹图.

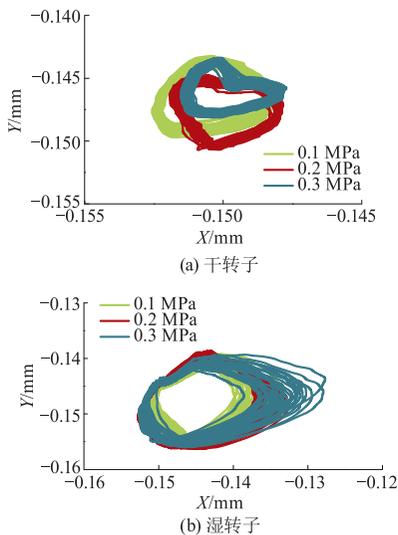


图9 不同进水压力时的轴心轨迹
Fig.9 Shaft orbits at different inlet pressures

由图9a可以看出,当进水压力逐渐增大,干转子的轴心轨迹涡动中心向 X, Y 轴的正方向小幅漂移,轴颈涡动振幅略有减小,进水压力为 0.2 MPa 时,轴向轨迹圆度较好,当进水压力升高至 0.3 MPa 时,轴心轨迹的圆度规律变差.

由图9b可以看出,当进水压力逐渐增大,湿转子的轴心轨迹涡动中心没有明显漂移,轴颈涡动振幅呈小幅增大,轴心轨迹整体情况较为发散,当进水压力升高至 0.3 MPa 时,由于受到轴承内轴向流动和系统阻尼变大的影响而出现了轨迹发散现象.

图10为干、湿转子2种情况下不同进水压力下的涡动中心分布和轴心轨迹振幅 A 和圆度误差 δ .

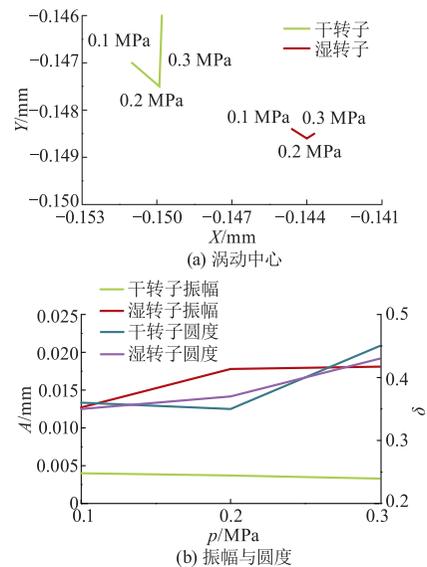


图10 不同进水压力下的涡动中心、振幅和圆度误差图
Fig.10 Whirl orbit, amplitude and roundness error at different inlet pressures

对比干、湿转子在不同压力下的涡动中心漂移情况,随着进水压力的逐渐增大,涡动中心均向 X 轴的正方向小幅漂移, Y 轴方向先负后正,湿转子情况下的涡动中心漂移更不明显,当进水压力为 0.2 MPa 时涡动中心最低,此时干、湿转子2种情况系统都相对稳定.

对比干、湿转子不同压力下轴心轨迹振幅,干转子情况下的振幅明显小于湿转子的,且干转子振幅随着进水压力的增大逐渐减小而湿转子情况与之相反.这是因为湿转子工况转子系统受到的不平衡载荷随着进口压力的增大而增大,系统通过增大液膜刚度来抵消这部分不平衡载荷,即通过增大轴颈涡动的振幅来实现.

对比干、湿转子不同压力下轴心轨迹的圆度误差,随着进水压力的增大,轴心轨迹圆度误差值基本趋于增大,干、湿转子的轴心轨迹在进水压力为 0.1 和 0.2 MPa 时圆度误差值变化不大且数值相对较小,此时较为稳定.随着进水压力上升达到 0.3 MPa 情况,轴心轨迹圆度误差值明显增大,此时容易引起滑动轴承的液膜振荡,系统运行较不稳定.

2.3.2 进水压力对压力脉动的影响规律

图11—13分别为干、湿转子2种情况下不同进水压力时的时域图、均值对比图和频域图.由图11, 12可得,随着系统进水压力由 0.1 MPa 逐渐升高到 0.3 MPa ,对比干、湿转子的压力脉动均值可以发

现,干转子情况下均值相对湿转子情况下略高,其主要原因为受到轴承内轴向流动及系统阻尼的影响.压力均值从监测点1到6的变化趋势都为先逐

渐增大再逐渐变小,且随着进水压力的改变,监测点3的压力均值与对应的进水压力值基本接近,而监测点1始终为各进水压力下的最小压力点.

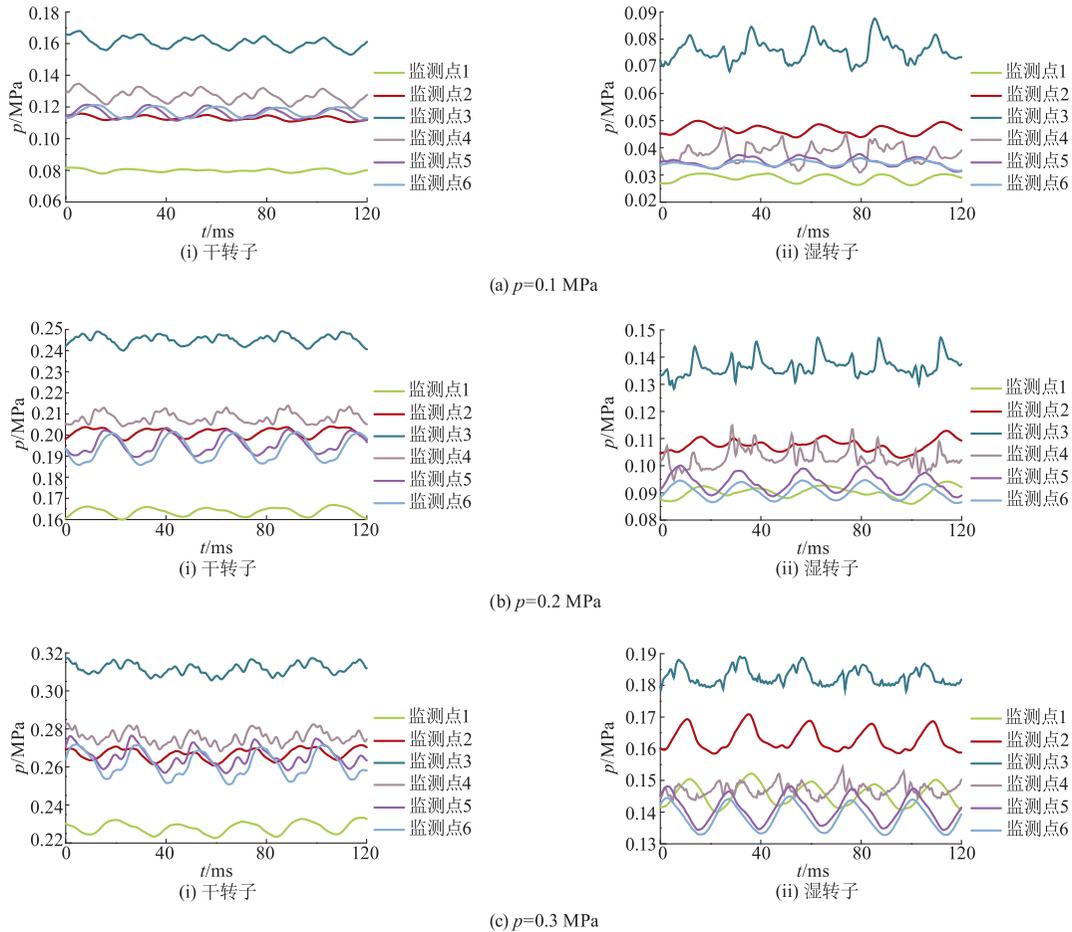


图 11 不同进水压力时的时域图

Fig. 11 Pressure in time domain at different inlet pressures

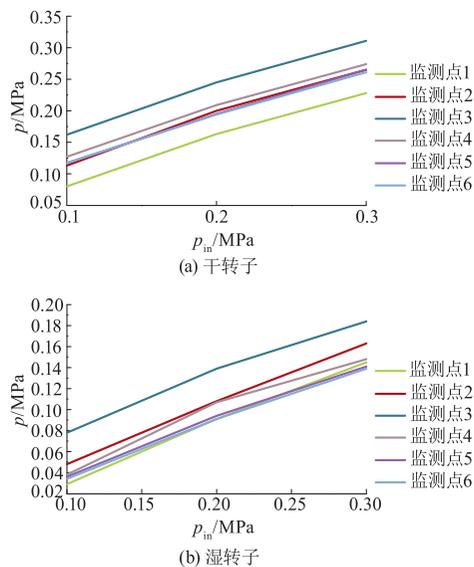


图 12 不同进水压力时的均值对比图

Fig. 12 Time-averaged pressure at different inlet pressures

由图 13 可以看出,干、湿转子 2 种情况下,随着进水压力的增大,压力脉动频率都没有变化,主频始终等于转子转频的 1 倍,这说明水润滑轴承液膜压力脉动主要由转子转速决定,在转速不变时压力脉动频率不随进水压力的改变而改变.干、湿转子 2 种情况下压力脉动主频幅值在进水压力值为 0.1 MPa 时都为最小,且 2 种情况下监测点 1—6 主频幅值的变化规律都为先增大后减小,这是因为在进水压力较小时系统没有形成良好的动压润滑,液膜润滑处于不稳定状态;在进水压力逐渐增大至 0.2 MPa 和 0.3 MPa 时,监测点 1—6 主频幅值的变化规律为逐渐减小再逐渐增大,且进水压力为 0.2 MPa 时干、湿转子的主频幅值整体都相对较小,这是由于进水压力的增大润滑状态逐渐提升,系统处于稳定状态;在进水压力值为 0.3 MPa 时主频幅值最大,系统振动加剧.

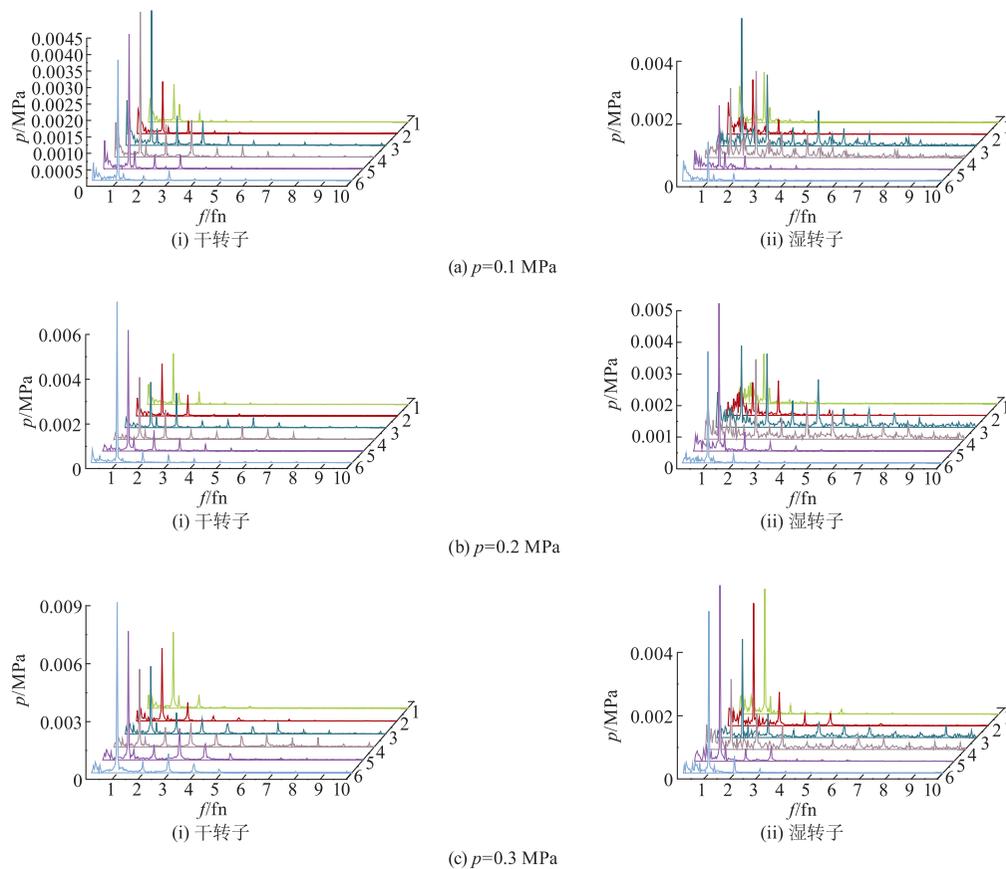


图13 不同进水压力下周向压力频域图

Fig. 13 Pressure in frequency domain at different inlet pressures

综上所述,由干、湿转子在不同进水压力下的周向压力脉动时域和频域分析可以看出,水润滑轴承在干、湿转子情况下变化趋势相似,随着进水压力的逐渐增大,水润滑轴承液膜逐渐形成,系统动压润滑状态逐渐变好,系统逐渐趋于稳定.在进水压力为0.2 MPa的情况下运行较为稳定,在进水压力增大到0.3 MPa时,主频幅值逐渐增大,系统振动有所加剧.

3 结论

对比干、湿转子情况下3种不同进水压力下的模拟与试验的轴心轨迹图、压力脉动对水润滑轴承稳定性的影响可以发现:

1) 模拟结果与试验结果中轴心轨迹的变化趋势基本相近,干转子在进水压力为较小时,处于液膜形成阶段,系统润滑状态一般,随进水压力增大,水润滑轴承液膜逐渐形成,系统动压润滑逐渐变好,系统逐渐趋于稳定,湿转子情况下轴心轨迹变化趋势与干转子情况下类似,虽然湿转子情况下转子系统受到的不平衡载荷的影响,轴向轨迹振幅随

着进口压力的增大而增大,这与干转子变化趋势相反,但干、湿转子系统在进水压为0.2 MPa都较为稳定.

2) 对比干、湿转子情况下在不同的进水压力下对压力脉动的试验结果,表明干、湿转子情况不同进水压力对压力脉动整体变化趋势相近,随着进水压力的逐渐增大,水润滑轴承液膜逐渐形成,系统动压润滑状态逐渐变好,系统逐渐趋于稳定.在进水压力为0.2 MPa的情况下运行较为稳定.

参考文献 (References)

- [1] SHAHABI M P, MCHUGH A, ANDA M, et al. Environmental life cycle assessment of seawater reverse osmosis desalination plant powered by renewable energy [J]. *Renewable energy*, 2014, 67(4):53-58.
- [2] 杨尚宝. 中国海水淡化年鉴 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [3] GRÜNDISCH A, SCHNEIDER B P. Optimising energy consumption in SWRO systems with brine concentrators [J]. *Desalination*, 2001, 138(1):223-229.
- [4] 蒋小平, 施卫东, 李伟, 等. 泵水润滑轴承-转子系统

- 的动力学特性研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 62-66.
- JIANG Xiaoping, SHI Weidong, LI Wei, et al. Rotor dynamic characteristics of water lubricated bearing for pumps[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(1): 62-66. (in Chinese)
- [5] 史冬岩, 张成, 任龙龙, 等. 滑动轴承压力分布及动特性系数[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(9): 1134-1139.
- SHI Dongyan, ZHANG Cheng, REN Longlong, et al. Research on the oil film pressure and dynamic coefficient of a sliding bearing[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(9): 1134-1139. (in Chinese)
- [6] 胡敬宁, 薛岩, 张德胜, 等. 海水淡化高压泵水润滑轴承液膜压力分布[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(3): 235-241.
- HU Jingning, XUE Yan, ZHANG Desheng, et al. Pressure distribution in liquid film in water lubricated bearings of high-pressure pump for desalination[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2014, 32(3): 235-241. (in Chinese)
- [7] TOWER B. First report on friction experiments[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1883, 34(1): 632-659.
- [8] CONWAY H D, ENGEL P A. The elastohydrodynamic lubrication of a thin layer[J]. Journal of tribology, 1973, 95(3): 381-385.
- [9] ROY L, LAHA SK. Steady state and dynamic characteristics of axial grooved journal bearings[J]. Tribology international, 2009, 42(5): 754-761.
- [10] 邓玫, 孙军, 符永红, 等. 计及轴受载变形的粗糙表面轴承热弹性流体动力润滑分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 95-101.
- DENG Mei, SUN Jun, FU Yonghong, et al. Thermoelastohydrodynamic lubrication analysis of bearing consider shaft deformation and surface roughness[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(15): 95-101. (in Chinese)
- [11] CABRERA D L, WOOLLEY N H, ALLANSON D R, et al. Film pressure distribution in water-lubricated rubber journal bearings[J]. Journal of engineering tribology, 2005, 219(2): 125-132.
- [12] 黄蕾, 腾勤, 孙军. 多功能滑动轴承试验台测控系统设计[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(3): 92-96.
- HUANG Lei, TENG Qin, SUN Jun. Design of measurement and control system for multi-functional journal bearing test bed[J]. Machine design and research, 2013, 29(3): 92-96. (in Chinese)
- [13] DIMOND T, ROCKWELL R D, SHETH P N, et al. A new fluid film bearing test rig for oil and water bearings[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air, 2008.
- [14] 刘慧. 传动轴轴心轨迹测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [15] 张国渊, 袁小阳, 苗旭升, 等. 水润滑高速动静压轴承试验研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(3): 238-241.
- ZHANG Guoyuan, YUAN Xiaoyang, MIAO Xusheng, et al. Experimental for water-lubricated high-speed hydrostatic journal bearing[J]. Journal of tribology, 2006, 26(3): 238-241. (in Chinese)

(责任编辑 谈国鹏)