

GMA 椭圆油膜轴承性能实验

尹雪梅¹, 张一魁², 姬帅城², 吴超², 马明飞²

(1. 郑州轻工业大学 能源与动力工程学院, 郑州 450002;

2. 郑州轻工业大学 机电工程学院, 郑州 450002)

摘 要: 为研究超磁致伸缩驱动器(GMA)椭圆油膜轴承性能, 搭建了三自由度可控椭圆轴承实验装置, 利用 GMA 动态控制了椭圆轴承所支撑转子的轴心轨迹, 观察了椭圆轴承油膜形成和破裂过程, 考察了轴径转速、进油压力、偏心率等参数对椭圆轴承油膜气穴位置的影响。实验结果表明: 椭圆轴承动态气穴内存在润滑油丝, 逆着旋转油流方向移动; 随着转速升高或者偏心率增加, 椭圆轴承圆周方向油膜破裂边提前; 随着转速增加或者进油压力减少, 椭圆轴承气穴位置逆着轴向油流方向移动。利用 GMA 合理控制椭圆轴承短轴油膜间隙, 可以更好的抑制转子系统的工频振动。研究结果可为椭圆油膜轴承的稳定性提供参考。

关 键 词: 椭圆油膜轴承; 振动控制; 气穴; 超磁致伸缩驱动器; 三自由度

中图分类号: V232.2; TH133.3

文献标志码: A

Experiment on performance of elliptic oil-film bearing with GMA

YIN Xuemei¹, ZHANG Yikui², JI Shuaicheng², WU Chao², MA Mingfei²

(1. School of Energy and Power Engineering,

Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering,

Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A three degree of freedom experimental device for a controllable elliptical bearing with the giant magnetostrictive actuator (GMA) was set up to investigate the performance of the bearing. The orbit of the rotor supported by the elliptical bearing was dynamically controlled by GMA, and the process of oil film formation and rupture of elliptical bearing was also observed. The influences of the parameters such as shaft rotational speed, oil inlet pressure and bearing eccentricity on the position of oil film cavitation in elliptical bearings were investigated. The experimental results showed that there were obvious lubrication silks in the dynamic cavitation of elliptical bearing, which moved against the direction of the rotating oil flow. With the increase of shaft rotational speed or bearing eccentricity, the rupture edge of oil film in the circumferential direction of the elliptical bearing was advanced, and with the increase of shaft rotational speed or the decrease of oil inlet pressure, the cavitation position of the elliptical bearing moved against the direction of axial oil flow. The working frequency vibration of the rotor system can be better suppressed by properly controlling the oil-film clearance of the short axis of the elliptical bearing with

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(U1404515); 河南省科技攻关项目(202102210071); 河南省高等学校重点科研项目(20A460028)

作者简介: 尹雪梅(1979—), 女, 副教授, 博士, 主要从事流体传热性能的研究工作。

通信作者: 吴超(1978—), 男, 教授, 博士, 主要研究轴承-转子系统动力学的工作。E-mail: wuchao7379@163.com

引用格式: 尹雪梅, 张一魁, 姬帅城, 等. GMA 椭圆油膜轴承性能实验[J]. 航空动力学报, 2021, 36(10): 2072-2079. YIN Xuemei, ZHANG Yikui, JI Shuaicheng, et al. Experiment on performance of elliptic oil-film bearing with GMA[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(10): 2072-2079.

GMA. The research results can provide reference for the stability of the elliptical oil film bearing.

Key words: elliptic oil-film bearing; vibration control; cavitation;
giant magnetostrictive actuator; three degrees of freedom

随着旋转机械技术向前发展,对滑动轴承支承精度要求更高。研究者相继提出了新型滑动轴承,来减小转子系统的振动,如超磁致伸缩驱动器(giant magnetostrictive actuators, GMA)轴承^[1]、压电陶瓷驱动器轴承^[2]、柔性铰链轴承^[3]、可变椭圆度轴承^[4]。这些新型轴承通过控制轴瓦位置,改变油膜形状,提高了滑动轴承的旋转精度,同时也容易在油膜内产生气穴^[5]。关于气穴对轴承性能影响的理论研究大多是基于 Navier-Stokes 方程和质量守恒边界条件建立模型,考察进油压力、转速、润滑油黏度、气化压力等参数对气相体积分数、油膜特性参数及所支撑转子系统性能的影响^[6-8];轴承气穴的实验研究一般是利用 CCD(charge coupled device)拍摄有机透明玻璃轴承油膜图像,如一些学者以圆柱轴承、挤压油膜轴承、螺旋油楔滑动轴承作为研究对象,观察油膜气穴的形成与破裂的影响因素^[9-11]。研究结果表明气穴对滑动轴承性能参数以及所支撑转子系统的稳定性有影响^[12-13]。椭圆滑动轴承由于在轴瓦上部和下部都能形成油楔,具有良好的稳定性,在大、中容量汽轮机组中得到了广泛应用^[14-16]。而关于椭圆轴承气穴理论研究较多,实验研究相对较少^[17-18]。

在以上研究的基础上,本文给出 GMA 可控椭圆轴承的基本组成,介绍其工作原理,搭建实验台,观察转速、偏心率、进油压力等参数对椭圆轴承油膜破裂边位置的影响,并利用 GMA 动态控制转子轴心轨迹,考察控制参数对转子系统工频振动的影响,为 GMA 椭圆油膜轴承的稳定性提供参考。

1 GMA 椭圆油膜轴承组成及工作原理

GMA 椭圆油膜轴承由椭圆轴承、2 个 GMA 和 2 个弹簧组成,其结构简图如图 1,其中, O_1 代表转子中心, O_b 代表轴承中心。2 个 GMA 分别安装在椭圆轴承长轴端(y 轴)和短轴端(x 轴);一直处于压缩状态的弹簧,与 GMA 相对安装于椭圆轴承两侧,给 GMA 提供合适的预应力,保证 GMA 和轴承座不分离,使 GMA 产生的微位移和作用力完全传递给椭圆轴承座。

GMA 椭圆油膜轴承的工作原理为:利用传

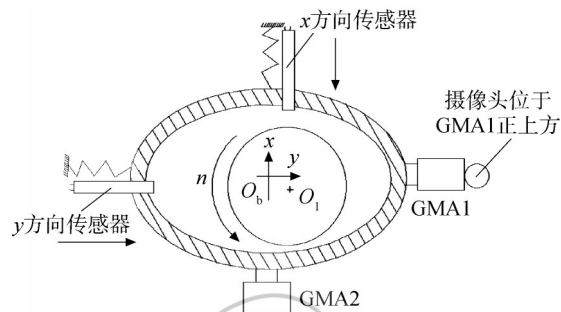


图1 GMA 椭圆油膜轴承结构图及传感器、CCD 安装位置
Fig.1 Structure diagram of GMA elliptical bearing and installation position of sensor and CCD

感器测得的主轴(转速 n)振动信号,改变 GMA 电流,控制 GMA 内线圈产生的磁场,改变超磁致伸缩棒的伸缩位移,反向控制椭圆轴承座位置,强制改变油膜形状,并通过油膜力调整主轴轴心位置,减小主轴的振动,提高椭圆轴承的旋转精度。

2 GMA 椭圆油膜轴承实验台结构简介

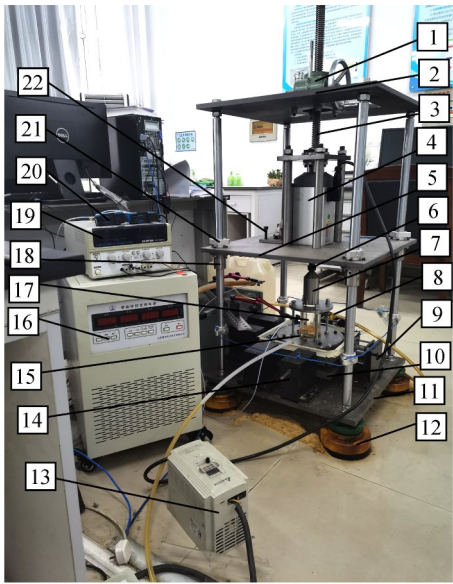
2.1 实验台总体结构

GMA 椭圆油膜轴承实验台^[19]由实验主轴、实验椭圆轴承、电主轴、十字燕尾槽移动导轨平台、液压系统等组成,实验台照片如图 2。实验台采用四柱螺旋升降滑台结构。上支撑板安装蜗杆涡轮;导向支撑板安装电主轴;底层安装 GMA、椭圆轴承、模具弹簧和十字燕尾槽移动导轨平台。

实验主轴由安装在电主轴伸出端的铣床夹头夹持,另一端由固定在底板上的 GMA 椭圆油膜轴承支承。实验主轴竖直位置可利用四柱螺旋升降滑台调整,实验轴承在水平面内的位置利用带有细牙螺纹调整装置的 GMA 调整,因此,实验台具有三个自由度。实验时,用锁紧卡扣锁死导向支撑板,减少导向支撑板振动对实验结果的影响。

2.2 GMA 径向椭圆轴承支承

作为实验台关键部件的 GMA 径向椭圆轴承支承照片如图 3。为观察油膜图像,椭圆轴承材料采用高强度有机玻璃。为减小温升对有机玻璃轴承变形的影响,实验轴承采用较大半径间隙。进油口开在实验轴承下面的非承载腔,回油孔开在上面的非承载腔。表 1 为径向椭圆轴承参数。



1 蜗杆涡轮减速器; 2 上支撑板; 3 传动丝杠; 4 电主轴;
5 导向支撑板; 6 铣床夹头联轴器; 7 实验主轴; 8 出油孔;
9 GMA; 10 十字燕尾槽移动导轨平台; 11 底板; 12 可调底座;
13 变频器; 14 模具弹簧装置; 15 进油孔; 16 GMA可调变频电源;
17 实验轴承; 18 导套; 19 传感器电源; 20 传感器变送器;
21 锁紧卡扣; 22 垂直度细牙调整螺钉。

图 2 实验台照片

Fig.2 Photo of experimental device

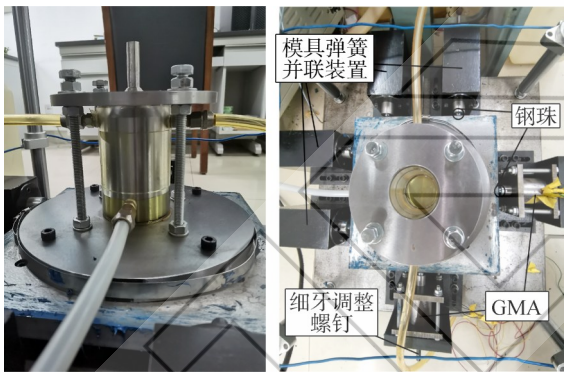


图 3 GMA 径向椭圆轴承支承照片

Fig.3 Photo of radial elliptical bearing with GMA

表 1 椭圆轴承结构参数

Table 1 Main structure parameters of elliptical bearing

直径/mm	长径比	最小相对间隙	椭圆比	轴承材料
60	0.8	0.002	2/3	透明玻璃

径向椭圆轴承固定在十字燕尾槽移动导轨平台上,GMA 和一直处于压缩状态的模具弹簧装置,相对安装在十字燕尾槽移动导轨平台两侧,避免 GMA 直接控制轴承套引起有机玻璃轴承变形。GMA、模具弹簧装置与十字燕尾槽移动导轨平台通过钢球连接,避免十字燕尾槽移动导轨平

台不同方向的运动干涉。轴承毛坯加工前,用磨削后的平行压板固定,并用四根立柱联接、压紧毛坯,减少轴承加工和实验过程中有机玻璃变形。利用文献[20]的加工参数和方法,得到满足实验透光度要求的轴承试件。

根据椭圆轴承参数和表 2 的 GMA 参数,设计了两个模具弹簧并联装置给 GMA 提供预应力,能够使 GMA 具有好的输出特性,又能保证在实验转速范围内模具弹簧装置刚度大于椭圆轴承油膜刚度、小于 GMA 刚度,确保 GMA 和十字燕尾槽移动导轨平台不脱离。GMA 具体结构见文献[21]。

表 2 GMA 参数和控制电压

Table 2 Parameters of GMA and control voltage

参数	交流线圈	直流偏置线圈	超磁致伸缩棒
匝数	1 000	2 000	
电压/V	20	20	
直径/mm			10.7
长度/mm			30

实验轴承安装后,可调整电主轴伸出端、实验主轴与移动导轨平台的垂直度以及主轴与实验轴承的同轴度,直到精度满足实验要求为止。

3 实验条件和方法

实验条件:主轴材料选用 45 号钢;润滑系统采用进油压力(0~1.0 MPa)、流量(0~16 L/min)连续可调的液压系统,润滑油采用 32 号液压导轨油;实验室温度为 10 ℃;实验转速为 500~6 000 r/min。实验时没有考虑转子倾斜,测控系统见参考文献[21]。

实验方法:通过闭环控制系统,采用变频器改变电主轴转速,利用 GMA 可调变频电源给 GMA 提供交流电源,控制 GMA 的动态位移输出,调整轴承座位置,考察不同转速、不同进油压力下椭圆轴承所支撑转子的轴心轨迹和气穴位置。

根据图 1,转子沿逆时针方向旋转,高速 CCD 正对着椭圆轴承长轴安装,拍摄主承载瓦油膜破裂边气穴图像(另一破裂边气穴有相似性质);两个电涡流位移传感器垂直安装在椭圆轴承短轴(x 轴)、长轴(y 轴)处,用来测量转子轴心轨迹。随 GMA 控制电压增大,GMA 输出位移增加,推动轴承座向传感器方向移动,并通过油膜力推动转子沿相同方向移动,使转子轴心靠近传感器,传

感器读数减小;反之,传感器读数增加。

4 实验结果分析

4.1 油膜气穴现象观察

气穴在油膜中的位置变化和尺寸大小是描述气穴效应的关键参数,也是影响轴承承载性能和稳定性的关键参数。通过改变实验主轴转速 n ($0\sim 4\,000\text{ r/min}$)、进油压力 p_{in} ($0\sim 0.4\text{ MPa}$)和偏心距 ϵ ($0\sim 10\text{ }\mu\text{m}$),利用高速 CCD 拍摄椭圆轴承油膜视频,观察不同条件下椭圆轴承中主承载油膜破裂情况。

不同工况下椭圆轴承气穴照片如图 4 和图 5。油膜破裂边圆周位置 ϕ 和气穴中心轴向位置 L 随实验工况的变化关系如图 6。油膜破裂边的圆周角度坐标是以图 1 中椭圆轴承短轴的传感器位置为 0° 位置、逆时针方向为角度增加方向;气穴中心轴向位置坐标是以椭圆轴承的下端面作为起点

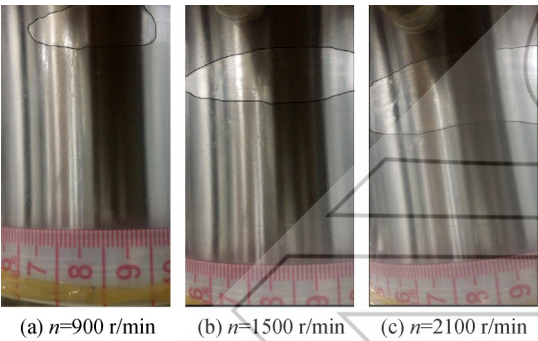


图 4 气穴大小和位置随转速变化($p_{\text{in}}=0.2\text{ MPa}$)
Fig.4 Cavitation size and position vary with rotational speed ($p_{\text{in}}=0.2\text{ MPa}$)

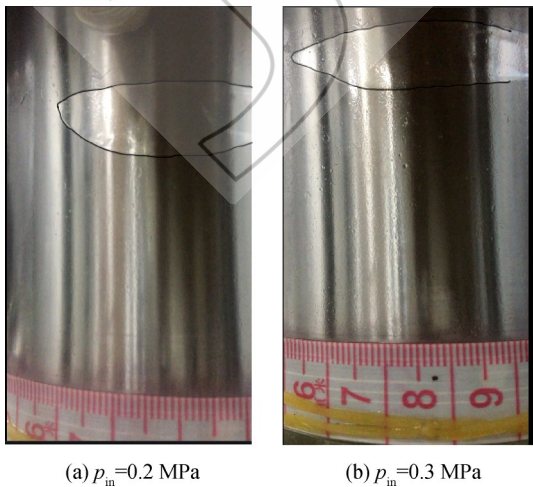
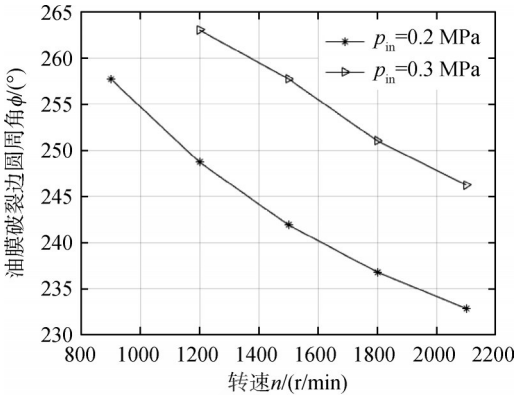
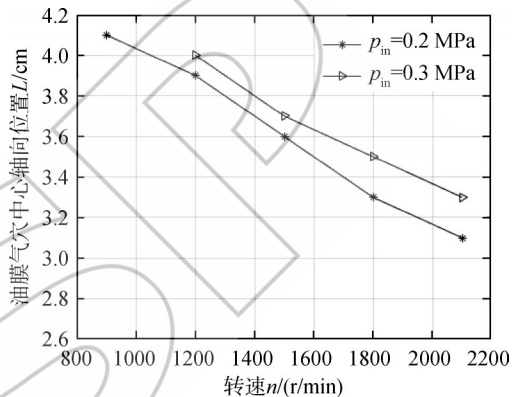


图 5 气穴大小和位置随进油压力的变化($n=1\,500\text{ r/min}$)
Fig.5 Cavitation size and position vary with oil inlet pressure ($n=1\,500\text{ r/min}$)



(a) 油膜破裂边圆周角



(b) 气穴中心轴向位置

图 6 转速和进油压力对气穴位置的影响
Fig.6 Influence of rotational speed and oil inlet pressure on cavitation position

0 cm 位置、向上(油流方向)为正坐标方向。
实验结果表明:椭圆轴承气穴内存在润滑油丝,逆着旋转油流方向移动;随着主轴转速、进油压力、GMA 控制参数的改变,气穴位置发生变化;当利用 GMA 动态控制轴承座时,在连续油膜位置处也会出现一些小气泡。

图 4 和图 6 表明,在相同进油压力下,随转速升高,气相体积增大,气穴面积增加,油膜圆周方向的破裂边提前,气穴轴向位置逆着轴向油流方向逐渐向轴承中间移动。因为在相同条件下,转速越高,油膜挤压效应越强,油膜最大负压越大,这就需要更多地润滑油汽化来抵消负压,导致气穴面积越大。这与文献[8,17]的理论计算结果相似。

图 5 和图 6 说明随进油压力增大,气穴面积减小,气穴轴向位置沿轴向油流方向移动。这是因为较大的进油压力可以补偿部分负压,导致汽化比例下降,气穴面积减小;随进油压力增大,供油更充足,推动气穴沿轴向油流方向移动。

图7给出了利用GMA控制椭圆轴承短轴间隙时的油膜气穴变化情况。通过使轴承短轴处的GMA伸长量 λ 分别为3、6 μm 和9 μm ,增加椭圆轴承的偏心距,考察油膜破裂边的情况。图7表明随着偏心距增大,油膜破裂边提前。这是因为随着偏心率增加,减小了椭圆轴承油膜间隙,加剧了转子对油膜的挤压效应,出现与转速增加相同的效果,导致了油膜汽化比例提高,油膜破裂边提前。

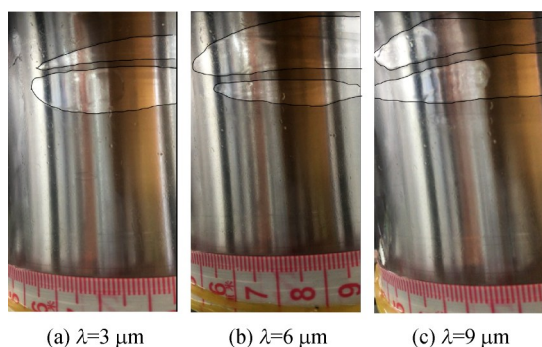


图7 气穴位置随偏心率的变化

($n = 900 \text{ r/min}$, $p_m = 0.2 \text{ MPa}$)

Fig.7 Cavitation position varies with eccentricity

($n=900 \text{ r/min}$, $p_m=0.2 \text{ MPa}$)

4.2 动态轴心轨迹控制分析

滑动轴承的旋转精度和稳定性,一般可通过所支撑转子系统的振动幅值来表征。GMA椭圆油膜轴承实验是通过电涡流位移传感器测量转子轴心轨迹,利用FFT(fast Fourier transform),分析转子振动的主要成分,采用GMA反向控制椭圆轴承座,抑制转子振动。为避免GMA出现倍频现象,给GMA直流线圈施加偏置电流。GMA控制电压 U 见表2。其中,给GMA线圈施加交流电频率与转子旋转频率一样。下面以转子转速2700 r/min进行分析。

图8给出了进油压力0.2 MPa时,GMA椭圆油膜轴承控制前后的转子轴心轨迹。可以看出,控制前轴心轨迹散乱,控制后轴心轨迹近似一个收敛椭圆。

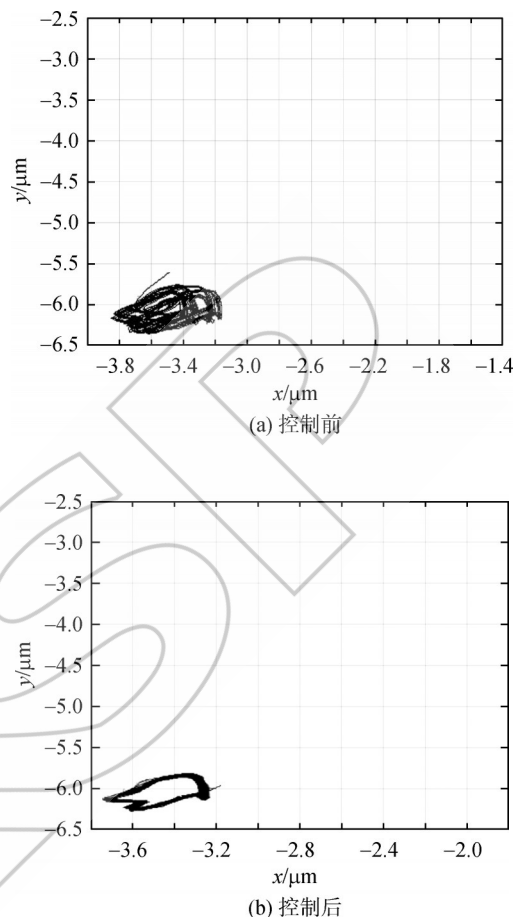
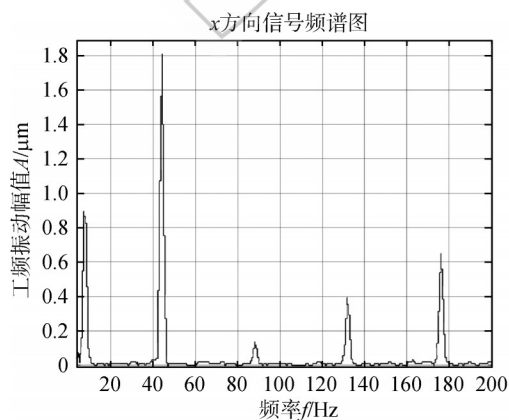


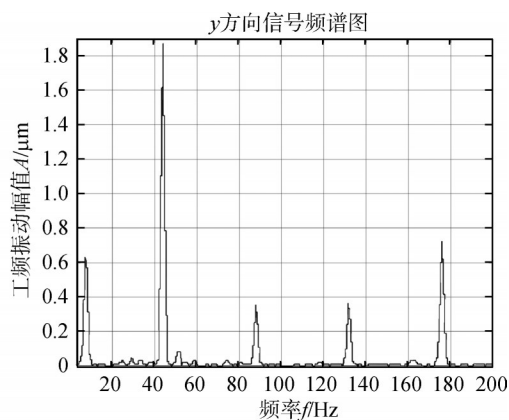
图8 控制前后转子轴心轨迹对比

Fig.8 Comparative diagram of rotor axis orbit before and after control

为更好观察转子振动控制效果,图9给出了控制前后转子在椭圆轴承短轴(x)方向和长轴(y)



(a) 不加控制



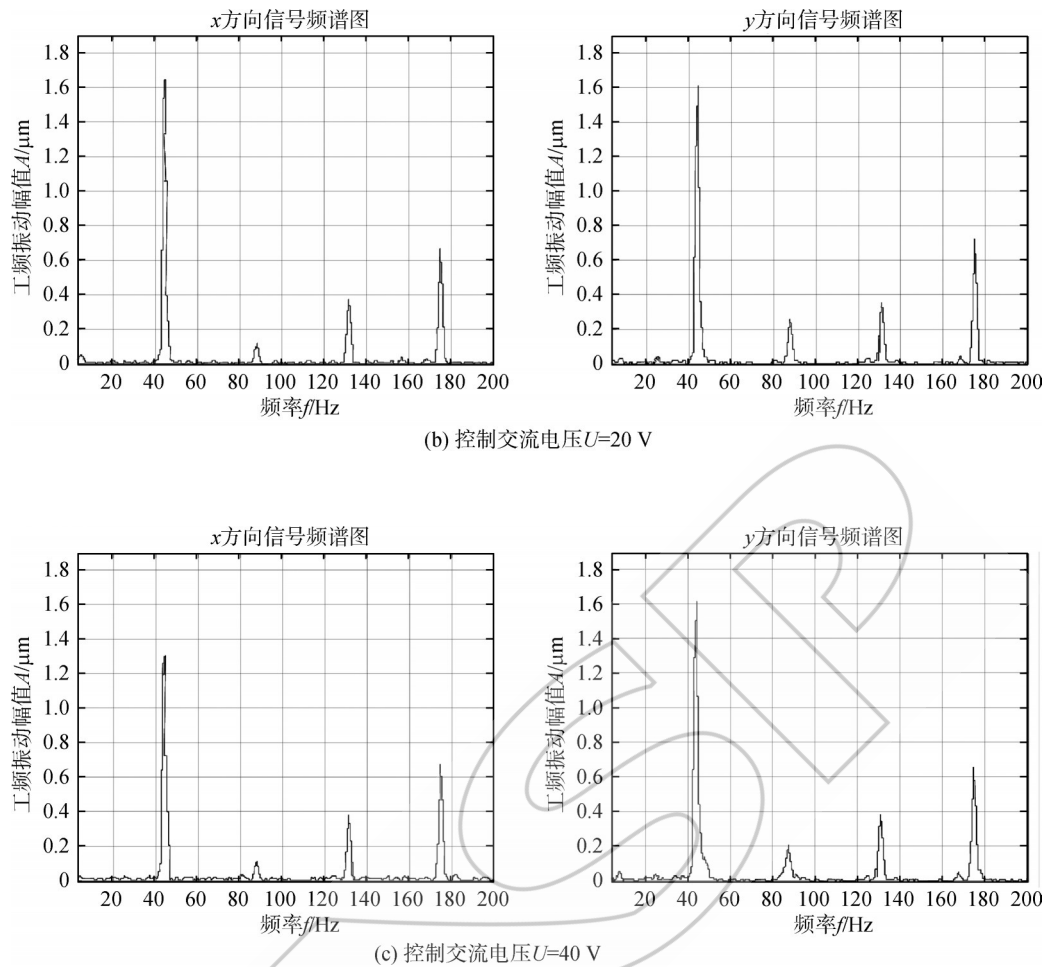


图9 控制前后转子振动信号的频谱图

Fig.9 Spectrum diagram of the rotor vibration signal before and after the control

方向上振动信号的频谱图。可以看出,反馈控制后转子工频振动幅值 A 在两个方向上均变小,且不同的控制电压 U ,系统工频振动幅值减小不同。图9还可以看出,控制前振动信号包含低频杂波成分,控制后低频杂波振动消失,转子系统稳定性更好。

椭圆轴承所支撑转子在 x 方向和 y 方向上工频振动幅值 A 与控制电压 U 之间的关系如图10。根据GMA结构,当交流控制电压达到60 V时,产生的磁场会使超磁致伸缩材料达到磁滞饱和状态,因此GMA最大交流控制电压设置为50 V。图10说明使用GMA控制椭圆轴承座能够明显降低系统的工频振动幅值,并随着控制电压增加, x 方向上的振动幅值减小明显, y 方向上的振动幅值略有减小。这是因为 x 轴为椭圆轴承短轴方向,油膜间隙小、刚度大,通过GMA控制椭圆轴承短轴油膜,椭圆轴承顶隙改变明显,抑制转子振动效果更好,说明椭圆轴承顶隙对椭圆轴承-转子

系统的旋转精度和稳定性影响更大,这与文献[14]的理论计算结果一致。

因为在椭圆轴承短轴方向上转子振动控制效果明显,只利用GMA控制椭圆轴承短轴(x)油膜间隙来考察转子工频振动幅值 A 与GMA控制电

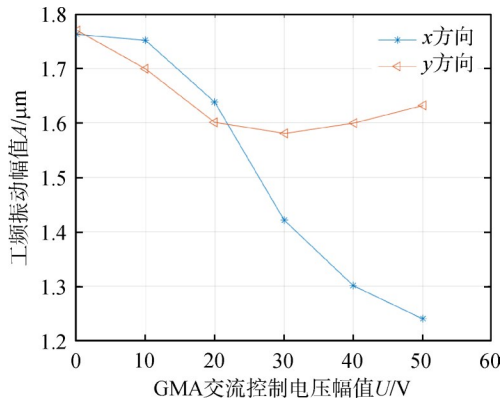


图10 双向控制下工频振动幅值随电压的变化

Fig.10 Power frequency vibration amplitude varies with voltage in bidirectional control

压 U 之间的关系,如图11。结果表明随控制电压增加,转子在 x 方向上的振动幅值降低明显, y 方向上的幅值也有所降低但不明显,这与图10利用GMA对椭圆轴承两个方向的油膜进行控制的效果差不多。因此,对椭圆轴承-转子系统来说,只对椭圆轴承短轴方向油膜间隙进行控制,就能获得较好减振效果。这与文献[4]中改变椭圆轴承的椭圆度来抑制转子系统的振动机理一样。

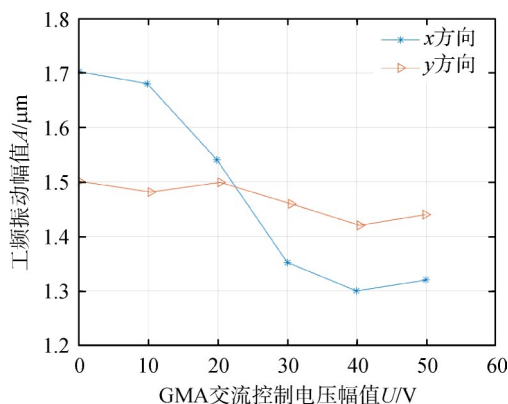


图11 在 x 方向控制下工频振动幅值随电压的变化

Fig.11 Power frequency vibration amplitude varies with the control voltage in the x direction

5 结 论

1) GMA可控椭圆轴承能够抑制所支撑转子系统的振动,提高椭圆轴承-转子系统的旋转精度和稳定性。

2) 利用GMA控制椭圆轴承短轴油膜来抑制转子系统的振动,比控制椭圆轴承长轴效果要好。

3) 椭圆轴承油膜气穴内存在润滑油丝,逆着旋转油流方向移动;随着偏心率或者转速增加,椭圆轴承圆周方向油膜破裂边提前。

4) 随着转速增加,椭圆轴承气穴位置逆着轴向油流方向移动;随着进油压力增大,气穴位置沿轴向油流方向移动。

参考文献:

- [1] 李国顺,文振华,傅勤毅,等.主动控制空气支承动态特性的研究与优化[J].机械工程学报,2002,38(5):27-29.
LI Guoshun, WEN Zhenhua, FU Qinyi, et al. Analysis and optimization of the dynamic characteristics in a active controlled air bearing system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(5): 27-29. (in Chinese)
- [2] 吴超,尹雪梅,马明飞,等.基于超磁致伸缩驱动器的油膜轴承-转子系统的稳定性研究[J].振动与冲击,2020,39(1): 57-61.

WU Chao, YIN Xuemei, MA Mingfei, et al. Stability of oil film bearing-rotor system based on GMA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(1): 57-61. (in Chinese)

- [3] 李昊,陈淑江,马金奎,等.传递函数法轴承-转子系统不平衡响应抑制[J].西安交通大学学报,2017,51(12):1-7.
LI Hao, CHEN Shujiang, MA Jinkui, et al. Transfer function method for suppressing of unbalance response of rotor-bearing system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(12): 1-7. (in Chinese)
- [4] ZHANG Shenglun, XU Hua, ZHANG Lei, et al. Vibration suppression mechanism research of adjustable elliptical journal bearing under synchronous unbalance load[J]. Tribology International, 2019, 132: 185-198.
- [5] WANG W, CAI S Z, WU C, et al. Vibration suppression evaluation of smart journal bearing using giant magnetostrictive actuators[J]. Key Engineering Materials, 2015, 642: 323-327.
- [6] KNIGHT J D, GHADIMI P. Analysis and observation of cavities in a journal bearing considering flow continuity[J]. Tribology Transactions, 2001, 44(1): 88-96.
- [7] DING Aoshuang, REN Xiaodong, LI Xuesong, et al. Numerical investigation for characteristics and oil-air distributions of oil film in a tilting-pad journal bearing[J]. Journal of Engineering Tribology, 2020, 234(2): 193-204.
- [8] 李亚静,丁水汀,杜发荣,等.基于两相流的涡轮增压器轴承油膜特性分析[J].航空动力学报,2018,33(3):752-762.
LI Yajing, DING Shuiting, DU Farong, et al. Analysis on oil film characteristics of turbocharger bearing based on two-phase flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 752-762. (in Chinese)
- [9] 陈滢,孙美丽,房超峰,等.动载滑动轴承油膜分布及压力同步采集研究[J].润滑与密封,2006,31(10):157-160.
CHEN Ying, SUN Meili, FANG Chaofeng, et al. Simultaneous pressure measurement and high speed photography study of cavitation in a dynamically loaded journal bearing[J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(10): 157-160. (in Chinese)
- [10] SUN Meili, ZHANG Zhiming, CHEN Xiaoyang, et al. Experimental study of cavitation in an oscillatory oil squeeze film[J]. Tribology Transactions, 2008, 51(3): 341-350.
- [11] 王丽丽,路长厚,张建川,等.高速螺旋油楔滑动轴承空穴机理的实验研究[J].振动与冲击,2012,31(5):1-5,20.
WANG Lili, LU Changhou, ZHANG Jianchuan, et al. Experimental investigation on cavitation mechanism of a high speed spiral oil wedge journal bearing[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(5): 1-5, 20. (in Chinese)
- [12] SUN D C, BREWE D E, ABEL P B. Simultaneous pressure measurement and high-speed photograph study of cavitation in a dynamically loaded journal bearing[J]. Transaction of the ASME, 1993, 115(1): 88-95.
- [13] 房超峰,孙美丽,王贤刚,等.动载滑动轴承瞬态油膜的全景实验研究[J].润滑与密封,2007,32(7):54-58.
FANG Chaofeng, SUN Meili, WANG Xiangang, et al. Ex-

- perimental investigation of dynamically loaded journal bearing with panoramic view of transient oil film[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(7):54-58. (in Chinese)
- [14] 李强, 马龙, 许伟伟, 等. 椭圆轴承-转子耦合系统动力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(11):174-179.
LI Qiang, MA Long, XU Weiwei, et al. Dynamic characteristics analysis of an elliptical bearing-rotor coupled system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(11):174-179. (in Chinese)
- [15] 于桂昌, 刘淑莲, 郑水英. 扰动情况下双油槽圆形轴瓦滑动轴承性能分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(5):46-49, 54.
YU Guichang, LIU Shulian, ZHENG Shuiying. Double oil grooved round sliding bearing performance analysis with disturbance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(5):46-49, 54. (in Chinese)
- [16] SINGLA A, CHAUHAN A. Experimental study for performance evaluation of steadily loaded true elliptical and orthogonally displaced non-circular journal bearing profiles[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2016, 68(6):702-711.
- [17] 张楚, 杨建刚, 郭瑞, 等. 基于两相流理论的滑动轴承流场计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(29):80-84.
ZHANG Chu, YANG Jiangang, GUO Rui, et al. Simulation of journal bearing flow field using computational fluid dynamics two phase flow theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(29):80-84. (in Chinese)
- [18] 吉宏斌, 王建梅, 麻扬. 考虑气穴影响的椭圆轴承油膜压力场研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(1):64-69.
JI Hongbin, WANG Jianmei, MA Yang. Research on oil-film pressure field of elliptic oil-film bearings with considering cavitation effect[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(1):64-69. (in Chinese)
- [19] 尹雪梅, 姬帅城, 吴超, 等. 三自由度 GMA 轴承可视化实验装置[J]. 航空动力学报, 2021, 36(8):1749-1755.
YIN Xuemei, JI Shuaicheng, WU Chao, et al. Investigation on 3-DOF visualization experimental device of GMA oil film bearing[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(8):1749-1755. (in Chinese)
- [20] 梁存真, 夏伯乾, 郭红, 等. 基于有机玻璃切削透光度的工艺参数试验研究[J]. 机械设计与制造, 2014(9):19-21, 25.
LIANG Cunzhen, XIA Boqian, GUO Hong, et al. Experimental investigation of process parameters based on plexiglass cutting transmittance[J]. Machinery Design and Manufacture, 2014(9):19-21, 25. (in Chinese)
- [21] 吴超, 李奕君, 马明飞, 等. 基于 LabVIEW 的 GMA 测控系统设计及实验研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(1):47-50.
WU Chao, LI Yijun, MA Mingfei, et al. Design and experimental study of GMA detection and control system based on LabVIEW[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2021, 49(1):47-50. (in Chinese)

(编辑:张 雪)