

文章编号:1000-6893(2004)02-0168-04

# 基础横向振动对电磁轴承转子系统动力特性影响的实验研究

祝长生

(浙江大学 电机工程系, 浙江 杭州 310027)

## Experimental Investigation on Dynamic Behaviour of Active Magnetic Bearing-Rotor System Subject to Base Vibration

ZHU Chang-sheng

(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**摘要:** 从实验上研究了电磁轴承基础的横向振动对电磁轴承转子系统动力特性的影响。结果表明电磁轴承的控制器对电磁轴承基础横向振动的抑制能力是非常有限的,在控制器的设计过程中必须考虑基础振动的影响,否则较大的基础振动会使电磁轴承系统不能稳定地工作,甚至失去支撑转子的能力。

**关键词:** 电磁轴承; 基础振动; 转子动力学; 振动; 转子; 控制器

**中图分类号:** TH133.3; TB114.2 **文献标识码:** A

**Abstract:** When an active magnetic bearing (AMB) is used in advanced jet aero-engines, the base of the AMB system in flight will vibrate at the same frequency as the wing of the airplane and endure an impact load in landing. In these cases, the base vibration and the impact load not only have a great effect on the dynamic behaviour of a rotor system supported on AMBs, but also possibly make the rotating shaft contact with the back-up bearing of the AMB system or make the AMB system fail. The effect of the sinusoidal base vibration at different exciting frequencies and amplitudes on the dynamic behaviour of a rotor system supported on the AMB is experimentally studied in this paper. It is shown that the capability of the AMB's controller for suppressing the base vibration is very limited and that the effect of the base vibration on the dynamic behaviour of the AMB-rotor system must be considered in designing the AMB's controller, otherwise, the AMB will lose its support capability. The higher the amplitude of the base vibration, the greater the effect of the base vibration on the AMB and the higher the possibility of the AMB system failure.

**Key words:** active magnetic bearing; base vibration; rotor-dynamics; vibration; rotor; controller

在航空发动机上使用主动电磁轴承(Active Magnetic Bearing 以下简称为 AMB),可以简化发动机的结构、减轻重量、提高效率、消除由润滑系统引起的故障,已成为航空多电发动机转子支承结构的首选方案<sup>[1]</sup>。然而,要在工作环境和条件十分恶劣的航空发动机上使用 AMB,不仅要研究诸如高温 AMB、小型化控制系统、高可靠性辅助轴承等问题,而且还需要研究发动机的基础在各种运动状态下 AMB 转子系统可能遇到的一些特殊的动力学问题。目前高温 AMB、高可靠性辅助轴承、小型化控制系统等问题已经引起了人们的广泛注意,但对发动机在各种运行状态下 AMB 转子系统动力特性的研究还远远不够。

发动机的运行状态包括飞机在正常飞行、机动飞行以及在起飞和着陆过程中的运动状态。

Suzuki<sup>[2]</sup>在不明显影响主要控制性能指标的条件下提出了一种基于加速度反馈的控制方法以减小基础振动对 AMB 转子不平衡响应的影响。Kasarda 等<sup>[3]</sup>从实验上研究了基础激励对 AMB 转子系统动力特性的影响,但没有考虑转子的旋转效应。Cole 等<sup>[4,5]</sup>提出了能够对基础受冲击和受振动具有良好抑制效果的控制策略,但缺乏对系统基本特性的研究。本文从实验上研究了 AMB 的基础在作单频正弦横向振动时 AMB 转子系统的动力特性,详细地分析了基础振动的频率和振幅对 AMB 转子系统动力特性的影响。

### 1 AMB 转子系统实验装置

AMB 转子系统实验装置如图 1 所示。一个长为 372.5mm,重为 3.43kg 的转子由 2 个径向和 1 个推力 AMB 支承。径向 AMB 的内径为 40mm,外径为 90mm,单边间隙 0.4mm,最大载荷 120N,偏置电流 2A 时的位移和电流刚度分别为 123N/mm 及 27N/A。推力 AMB 的内径为

收稿日期:2003-01-07; 修订日期:2003-06-02  
基金项目:欧共体第四框架“AMBIT”和国家人事部留学回国人员基金资助项目

46mm, 外径为 82mm, 间隙 0.5mm, 最大载荷 135N, 偏置电流 2A 时的位移和电流刚度分别为 86N/mm 及 30N/A。转子由一个交流异步电机拖动, 能在 0~500Hz 频率范围内的任意转速下稳定运行。在每个 AMB 内部的水平和垂直方向上安装了电涡流传感器来测量转子相对于定子的振动。自由状态下转子的一阶弯曲固有频率为 1344Hz。

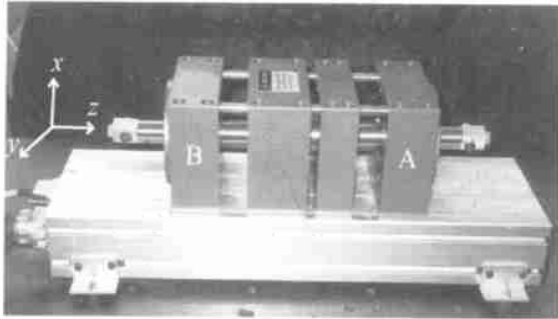


图1 AMB 转子系统实验装置

Fig. 1 Test rig of AMB-rotor system

AMB 的控制器采用了常见的 PID 控制策略, 并通过数字信号处理器 TMS 320C50 来实现, 在控制器的设计中没有考虑基础振动的影响。此外, 为了减小由转子不平衡引起的同步振动, 控制器中带有对转子的不平衡进行在线补偿的策略。AMB 支撑条件下转子系统的一阶临界转速约为 55Hz。

考虑到飞机机翼的固有频率都很低, 实验中将整个 AMB 转子系统的基础固定在低刚度的弹性元件上。基础在水平  $y$  方向的横向振动固有频率为 4.86Hz、绕转轴  $z$  和垂直轴  $x$  的扭转振动固有频率分别为 10Hz 和 22Hz。激振器安装在基础绕转轴  $z$  和垂直轴  $x$  扭转振动的节点上, 以得到基础  $y$  方向的单模态横向振动。实验中对激振力进行了反馈控制以保证激振力恒定不变。

## 2 实验结果及分析

当转子系统恒速稳定运转时, 在 AMB 的基础上施加给定频率和大小激振力, 等系统稳定后再测量 AMB 位置处转子相对于定子的振动。由于基础只在  $y$  方向作横向振动, 2 个 AMB 处转子的运动规律和大小基本相同, 本文将以 A 端 AMB 处的结果进行分析。试验中以激振器所施加力的大小作为控制参数, 而不是以基础的振动幅度。其原因主要有两点: 一是试验中不易对基础振动幅度进行准确地控制; 二是在基础只受到

$y$  方向的单模态激励情况下, 基础可简化为一个单自由度系统, 在同一激振频率的情况下, 基础的振动幅度与激振力的大小之间成线性关系, 激振力的大小也表示了基础振动幅度的大小。在不同激振频率的情况下, 只要按照单自由度系统受迫振动的响应曲线进行转换, 就可以得到基础振动的幅度。激振器的输出灵敏度为 7.2N/V。

(1) 基础振动对转子运动轨道的影响 图 2 为基础振动频率为 22Hz、转速为 150Hz 时转子轴心运动轨迹随激振水平的变化以及水平方向振动信号的频谱图。图 3 给出了基础的振动频率为 22Hz 时在相同激振水平条件下转子轴心运动轨迹随转速的变化。当 AMB 基础没有振动时, 由于控制器中对转子的不平衡进行了在线补偿, 所以转子的振动很小, 转子的运动与转速同步, 振动信号中只有转速频率。当 AMB 的基础在水平方

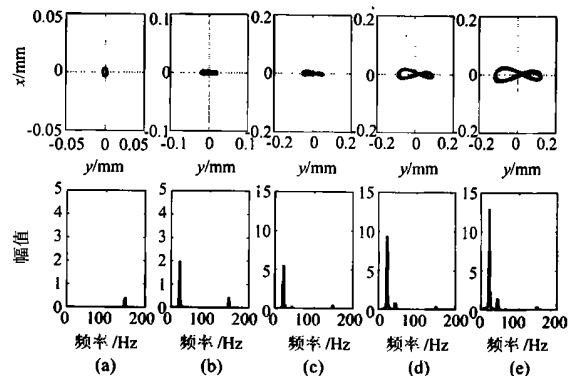


图2 激振频率为 22Hz、转速为 150Hz 时转子涡动轨道随激振水平的变化及信号的组成

(a) 0V; (b) 1V; (c) 3V; (d) 5V; (e) 7V

Fig. 2 Variation of rotor orbits with base exciting force at base motion frequency of 22Hz and rotational speed of 150Hz

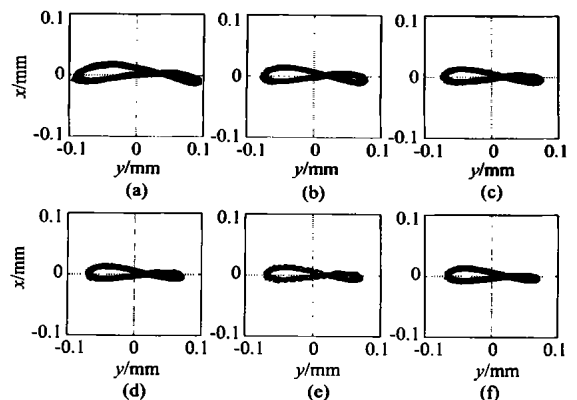


图3 激振频率为 22Hz、恒激振水平条件下转子涡动轨道随转速的变化

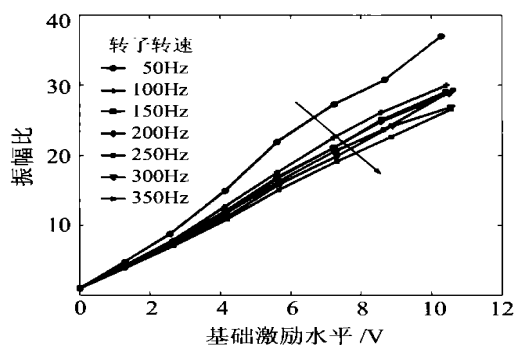
(a) 50Hz; (b) 100Hz; (c) 150Hz;

(d) 200Hz; (e) 250Hz; (f) 300Hz

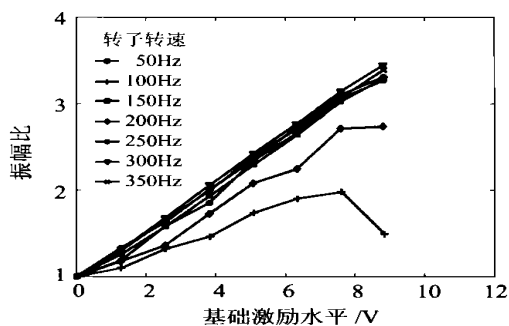
Fig. 3 Variation of rotor orbits with rotational speed at base motion frequency of 22Hz and same base exciting force

向发生振动时,水平方向上转子的振动迅速增大,垂直方向上转子的振动变化不大。另外,由于基础运动与转子运动之间的相互作用,基础振动的频率也出现在转子的振动信号中。随着基础振动幅度的增大,振动信号中激振频率对应的幅值明显增大,而转速频率对应的幅值几乎没有变化,转子的运动由原来协调的椭圆轨道变为一个在倒8字形上迭加有高频运动的非协调轨道。在相同的激振频率和幅度的条件下,转子在高速运行时的振动幅值虽然有所减小,但转子的运动轨道仍为倒8字形。

(2) 基础振动对转子振幅的影响 图4和图5分别为不同转速和基础振动频率下,基础的振动幅度对转子振动的影响。振幅比定义为基础振动时转子的最大振幅与基础固定不动时转子的最大幅值之比。



(a) 激励频率为 7 Hz



(b) 激励频率为 100 Hz

图4 不同转速下基础的激励水平对转子振幅的影响

Fig. 4 Effect of the base exciting force on unbalance response of AMB-rotor system at different rotational speeds

一般情况下,对于具有不平衡自动补偿功能的 AMB 转子系统,如果转子的转速不是基础振动频率的整倍数,则转子的振动随基础振动幅度的增大而线性增大;如果转子的转速为基础振动频率的整倍数,转子的振动虽随基础振动幅度的增大而增大,但不是一个线性关系,其变化幅度小于转速不是基础振动频率整倍数情况下的变化幅

度。在较低的基础振动频率范围内转子的振动随转速的增大而减小,但在较高的基础振动频率范围内转子的振动基本受转速的影响不明显。试验中由于 AMB 基础水平方向的固有频率为 4.86 Hz,在相同激振力的条件下,7 Hz 激振时基础的振动幅度最大,所以基础振动对转子振动的影响也最明显,转子的振动成几十倍的增大。随着激振频率远离基础的固有频率,基础运动幅度迅速减小,基础振动对转子振动的影响也减弱。可见不论在什么状态下,只要基础振动的幅度超过一定值,将对 AMB 转子系统产生严重的影响,使转子的振动急剧增大,从而导致转子与备用轴承相撞,引起 AMB 系统不能稳定地工作。

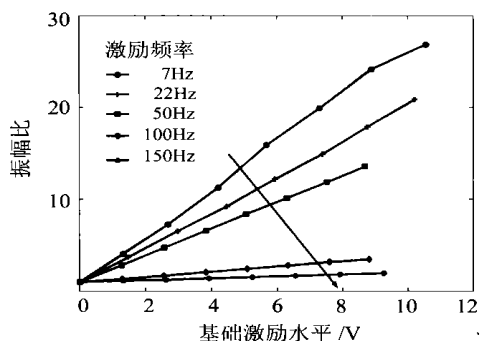


图5 不同激励频率下基础的激励水平对转子振幅的影响

Fig. 5 Effect of the base exciting force on unbalance response of AMB-rotor system at rotational speed of 300 Hz at different base exciting frequencies

(3) 基础振动对转子系统不平衡响应曲线的影响 为了全面地了解基础振动对带有不平衡补偿功能的 AMB 转子系统动力特性的影响,在恒激振水平条件下,测量了转子的不平衡响应曲线。图6为基础不动及基础以不同的频率振动时,转子的不平衡响应曲线。

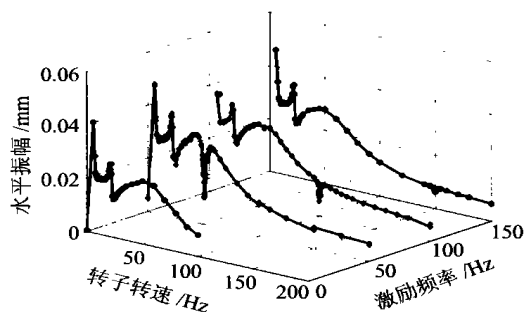


图6 不同激励频率条件下转子系统的不平衡响应

Fig. 6 Unbalance response of AMB-rotor system at different base exciting frequencies

在 AMB 的基础为柔性的情况下,虽然基础不受外激励作用,但由于不平衡力的作用,基础的

共振频率同样在转子的不平衡响应中有所反映,所以在低频区出现了多个峰。由于AMB对不平衡进行了在线补偿,所以AMB转子在55 Hz附近的临界转速并没有出现明显的共振现象,在高转速区,转子的振动逐渐减小。当AMB的基础受外激励发生振动时,在转子不平衡响应曲线上除了在基础不受外激励时出现的现象之外,当转子的转速等于基础的振动频率时,转子的振动很小,出现了类似于“反共振”的现象。“反共振”的频率随转子的转速的增大而同步增大。随基础振动频率的增高,“反共振”现象减弱。除“反共振”点之外,不同基础振动频率下转子系统的不平衡响应曲线基本一致。这种“反共振”现象在转速恒定、基础振动频率发生变化的响应曲线上也同样出现,其变化规律和特性与图6相似。因此在研究基础的振动对AMB转子系统动力特性的影响时,必须考虑转子旋转的影响。

为了解释“反共振”现象,利用系统提供的频响函数在线测量功能,测量了转子系统在恒速运行时的频响函数。频响函数在线测量的原理是基于在AMB对转子进行稳定运行的基础上,通过改变AMB的电流来给转子施加一个已知频率和大小的附加激励力,然后通过对测量到的系统响应进行处理得到附加激励力所引起的响应,从而得到转子系统的频响函数。图7为基础固定不动、不同稳态转速下转子系统的频响函数。结果说明了由于试验中AMB的控制器对转子的不平衡进行了自动补偿,所以当转子的旋转转速等于基础的激励频率时,AMB明显抑制了转子的振动,出现了类似于“反共振”的现象。“反共振”的频率就是转子的转速频率,与前面不平衡试验中的现象完全一致。AMB控制器中对不平衡进行自动补偿是AMB转子系统出现“反共振”现象原因。

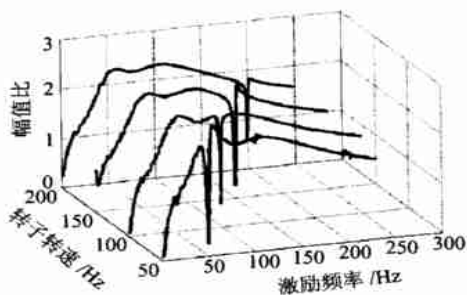


图7 不同转速下AMB转子系统的传递函数曲线

Fig. 7 Frequency response function of AMB-rotor system measured on-line at different rotational speeds

### 3 结论

电磁轴承的基础在水平或垂直方向上的振动只对该方向上转子的振动有明显的影 响,而对其它方向上的振动影响不大。AMB转子系统的振动幅值随基础振动幅度的增大而迅速增大。过大的基础振动不仅会使高速旋转轴与备用轴承接触,而且也会使系统不能稳定的工作,甚至失去支撑转子的能力。在航空用AMB控制器的设计过程中必须考虑基础振动的影响,以增大AMB系统对基础振动的抑制能力。

对于具有不平衡自动补偿功能的AMB转子系统,在转子的不平衡响应曲线上,当转子的转速等于基础振动的频率时,出现类似于“反共振”的现象。在转子运行转速为基础振动频率的整倍数时,转子的振动随基础振动幅度增大的幅度减小。

### 参 考 文 献

- [1] Storace A F, Sood D, Lyons J P, *et al.* Integration of magnetic bearings in the design of advanced gas turbine engine[J]. *J of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1995, 117(4): 655 - 665.
- [2] Suzuki Y. Acceleration feedforward control for active magnetic bearing systems excited by ground motion[J]. *IEE Proc Control Theory Appl*, 1998, 145(2): 113 - 118.
- [3] Kasarda M E, Clements J, Wicks A L, *et al.* Effect of sinusoidal base motion on a magnetic bearing[A]. *Proc of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications* [C]. USA, Alaska, 2000. 144 - 149.
- [4] Cole M O T, Keogh P S, Burows C R. Control and non-linear compensation of a rotor/magnetic bearing system subject to base motion[A]. *Proc 6<sup>th</sup> Int Symp on Magnetic Bearings* [C]. Cambridge, 1998. 618 - 627.
- [5] Cole M O T, Keogh P S, Burows C R. Vibration control of a flexible rotor/magnetic bearing system subject to direct forcing and base motion disturbances [A]. *Proc Instn Mech Engrs* [C]. 212(c), 1998. 535 - 546.

作者简介:



祝长生(1963 - ) 教授、博士生导师,1996 - 1998 德国洪堡学者,1998 - 2001 在英国帝国理工学院从事欧共体项目的研究工作。主要研究方向:转子动力学、磁悬浮技术、智能材料及结构、振动主动控制等。E-mail: czshu@hotmail.com

(责任编辑:李铁柏)