

文章编号:1000-6893(2009)08-1537-07

主动电磁轴承失效后柔性转子坠落在备用轴承上的瞬态响应实验研究

祝长生

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

Experimental Investigation into the Transient Response of a Flexible Rotor Dropping on a Back-up Bearing After Active Magnetic Bearing Failure

Zhu Changsheng

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

摘要: 测量了主动电磁轴承支承的柔性转子系统在主动电磁轴承失效后转子坠落在带有固定间隙滚动型备用轴承上的瞬态响应,分析了转子的工作转速、转子不平衡量以及备用轴承碰撞面上的润滑条件等对转子瞬态响应的影响。结果表明,大多数情况下在主动电磁轴承失效后转子系统出现了在间隙圆底部的摆动以及在整个间隙圆范围内的碰撞型回转运动。主动电磁轴承失效后转子系统瞬态响应的大小与转子在电磁轴承失效前的振动、转子的工作转速以及备用轴承碰撞面上的润滑条件等密切相关。通过适当改变备用轴承碰撞面上的润滑状态,可以有效地控制电磁轴承失效后转子系统瞬态响应的大小,降低电磁轴承失效后转子在整个间隙圆范围内的碰撞型回转运动以及全间隙圆范围内的摩擦型回转运动的可能性,从而减小碰撞对转子及其备用轴承的影响。

关键词: 转子动力学; 主动电磁轴承; 备用轴承; 瞬态响应; 碰撞实验

中图分类号: TH113 **文献标识码:** A

Abstract: The transient responses of a rotor dropping on a rolling element back-up bearing with a fixed radial clearance after the active magnetic bearing (AMB) failure are measured in a flexible rotor on the AMBs, and the effect is investigated of rotational speed, rotor imbalance and lubrication condition in the contact surfaces of the back-up bearing on the transient response of the rotor system. It is found that in most cases, the motion of the rotor system after the AMB failure is a back-and-forth oscillation motion with bounces in the bottom half of the clearance circle and a full clearance whirl motion with impact. The transient motion of the rotor system after the AMB failure depends greatly on the vibration of the rotor system, rotational speed at dropping, and lubrication condition in the contact surfaces of the back-up bearing. Changing the lubrication condition in the contact surfaces of the back-up bearing can effectively affect the transient response of the rotor system after the AMB failure, significantly reduce the possibility of the occurrence of full clearance whirl motion with impact and full clearance whirl motion without impact, and reduce the effect of the impact on the rotor and the back-up bearing.

Key words: rotordynamics; active magnetic bearings; back-up bearing; transient response; impact testing

主动电磁轴承(Active Magnetic Bearing, AMB)具有许多显著的特点,但由于 AMB 在线圈断电的情况下将失去对转子的支承能力,一旦高速旋转的转子坠落在定子上,将导致严重的后果,因此为了弥补 AMB 这一严重的不足,在实际使用中都要增设一套备用轴承,以保证在 AMB 失效的情况下转子系统还能够在短时可靠工作。为了研发高性能的备用轴承,必须深入研究 AMB

失效后备用轴承的动力特性。

在 AMB 备用轴承的研究方面,目前主要是提出一些可以作为备用轴承的结构,其中由滚动轴承组成的在轴承内环和轴颈表面之间形成固定间隙的滚动型备用轴承是最为常用的一种形式。对这种滚动型备用轴承动力特性的研究主要集中在理论方面^[1-7]。由于滚动轴承特性的复杂性,难以建立一个准确的模型,因此有必要以实验为基础开展转子-备用轴承动力特性的研究。

在 AMB 失效后转子坠落在滚动型备用轴承上的动力特性实验方面,虽然进行了一些工

收稿日期:2008-06-16; 修订日期:2008-10-10

基金项目:国家“863”计划(2006AA05Z201);国家自然科学基金(10772160);浙江省自然科学基金(R104129)

通讯作者:祝长生 E-mail: cszhu@hotmail.com

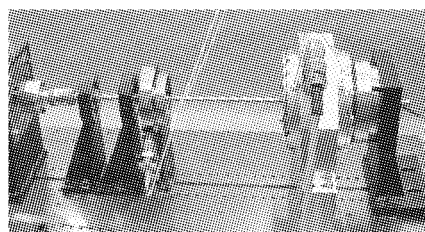
作^[7-10],但实验结果的重复性很差,因此为了获得满意的实验结果,必须发展能够获得高重复性实验结果的实验方法。

本文在一个AMB支撑的柔性转子系统上研究了AMB失效后转子坠落在带有固定间隙滚动型备用轴承上的瞬态动力学特性。为了获得具有高重复性的实验结果,介绍了一种能够准确控制转子坠落位置的方法,然后系统地研究了转子的转速、转子不平衡量以及备用轴承碰撞面上的润滑条件等对AMB失效后转子系统瞬态响应的影响。

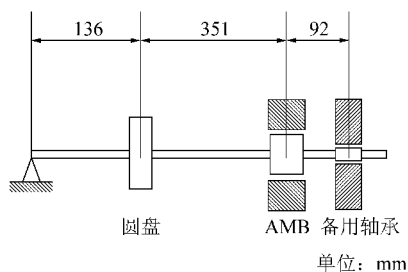
1 实验转子系统及特性

1.1 转子系统

实验转子系统如图1(a)所示。它由一个长700 mm、直径8 mm的均质柔性轴、圆盘、AMB、备用轴承、电机及联轴节等组成。驱动端支承在一个具有较大角变形的球轴承上,非驱动端支承在AMB上。均质圆盘位于两个支承之间,圆盘的外径为100 mm,质量为0.68 kg。在AMB的外侧安装有一滚动轴承形式的备用轴承。备用轴承位置处轴颈的外径为25.0 mm,质量为0.103 kg,半径间隙为0.35 mm。实验转子的基本尺寸如图1(b)所示。由于圆盘、AMB轴颈以及备用轴承轴颈的质量相对较大,因此实验转子系统实际上是一个具有3个集中质量的柔性转子系统。



(a) 实验转子系统



(b) 转子基本尺寸

图1 AMB-转子系统基本结构及尺寸

Fig. 1 Structure and main size of AMB-rotor system

1.2 主动电磁轴承

实验中的AMB为图2所示的8极结构,磁极的中心线并不在垂直或水平方向,而是与垂直或水平方向成 45° 的夹角,系统的坐标以同样的方式选择。这样可以使转子系统在图2所示的X和Y坐标方向上的特性相同,便于控制器的设计。

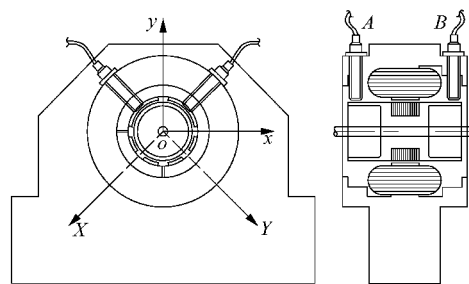


图2 AMB的基本结构

Fig. 2 Structure of AMB

转子的位移传感器同样也与垂直或水平方向成 45° 夹角。由于不能够直接测量AMB轴颈中心位置的位移,所以在AMB的两端分别安装了4只同型号的电涡流传感器。然后对这些传感器的信号进行简单的处理,以得到AMB轴颈中心位置的位移信号。

AMB的基本参数为:单极面积 290 mm^2 、磁极内径 57.6 mm 、轴颈外径 56.0 mm 、半径间隙 0.8 mm 、轴向长度 66.0 mm 、绕组电阻 0.35Ω 。AMB轴颈部分的总质量为 1.06 kg 。

AMB的功率放大器是一个高性能的开关功率放大器,8个通道的特性基本一致,最高截止频率可达 2.0 kHz 。

1.3 测量及控制系统

AMB-转子系统的测量及控制系统基于d-SPACE控制平台和PC机,其基本结构如图3所示。通过PC对d-SPACE进行控制。d-SPACE控制平台主要由MUX-ADC DS1103输入板、MUX-DAC DS1103输出板和DS1103控制板硬件以及基于MATLAB工作的软件等组成。只需在PC机的MATLAB状态下完成控制系统Simulink程序的设计,然后转换为d-SPACE执行文件,就可以对系统进行控制。正常工作时,AMB的控制由d-SPACE独立完成,PC机仅对d-SPACE控制平台进行监控和进行必要的的数据交换。

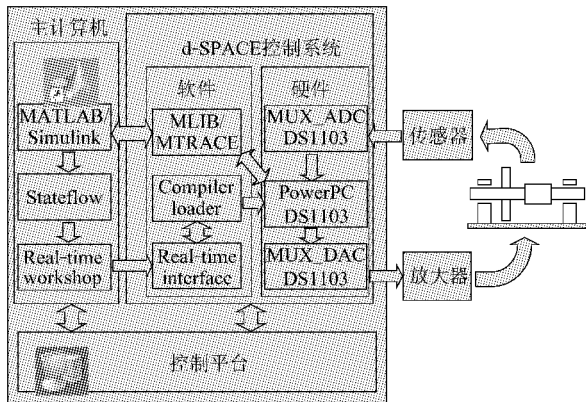


图 3 测量及控制系统结构

Fig. 3 Basic structure of measurement and control systems

由于本实验的主要目的是考察 AMB 断电后转子坠落在备用轴承上的瞬态动力特性，所以 AMB 的控制器采用了简单的 PID 控制策略。

控制系统 Simulink 主程序结构如图 4 所示。它由 Error, PID 和 Current 这 3 个部分组成。Error 在于计算轴颈实际振动的大小，并与设定的轴颈中心位置进行比较，得到误差信号。PID 是对轴颈中心位置的误差信号进行 PID 控制。Current 是按照控制电流和偏置电流的大小计算出在 AMB 的各绕组中需要施加的电流大小。由于传感器以及转子系统在 X 和 Y 方向上的所有特性是相同的，所以 PID 控制器具有相同的结构和控制参数。如果不进行转子的坠落实验，则电流控制信号就直接驱动功率放大器来使转子悬浮。

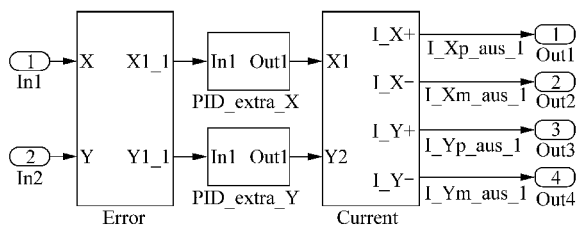


图 4 控制系统 Simulink 主程序结构

Fig. 4 Simulink structure of control system

1.4 转子坠落位置的控制方法

进行 AMB 突然失效实验的关键是在不同次的实验中如何能够精确地控制 AMB 失效时转子开始坠落的位置以及确保 AMB 所有线圈同时断电(当然也可以按照要求对各线圈进行分时断电)，以保证在相同的实验条件下不同次坠落实验的结果具有极高的重复性。因为只有相同的开始坠落位置和线圈同时断电的条件下才可以对转

子在坠落过程中的特性进行比较，否则实验结果难以进行比较。这是目前进行 AMB 突然失效实验的难点所在。

为了使转子在给定的位置上开始坠落，需要 AMB 所有线圈上的电流在转子通过给定位置时同时变为零。为了实行这样的要求，实验中对多种断电方法进行了研究，结果发现采用图 5 中向量合成-向量与常系数相乘-向量分解的方法可以获得满意的效果。首先把 Current 后的 4 个电流信号利用 Simulink 中的 Mux 形成矢量，然后对矢量同时乘以常系数 K ，再利用 Demux 功能将矢量转换为对应的电流信号。在 AMB 正常工作时常系数 K 为 1，在 AMB 失效时常系数 K 为 0。当 K 从 1 变为 0，就表示电磁轴承从正常工作状态变为失效状态；当 K 从 0 变为 1，就表示电磁轴承从失效状态变为正常工作状态。因此只要能够按照转子的位置来确定出 K 从 1 变为 0 的时间，就能够实现对 AMB 中所有线圈的电流实行同步控制。

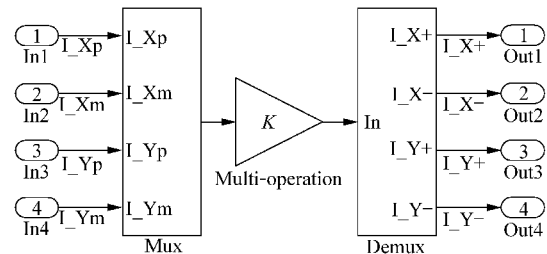


图 5 转子坠落位置控制结构

Fig. 5 Drop position control system

常系数 K 从 1 变为 0 的切换时间是利用电涡流传感器测量出的转子位移信号来确定。如在 AMB 中心截面，利用轴颈在 X 和 Y 方向上的位移信号，容易得到轴颈在常规的直角坐标系 xoy 中的运动轨迹。图 6 为轴颈稳态的运动轨道示意图。如果希望轴颈在经过 0° 位置时开始坠落，那么可以把垂直方向的位移信号 y 作为参考信号，在参考信号 y 从正变为负的那一个时刻使常系数 K 从 1 突变为 0，转子就在 0° 位置开始坠落。在同样转速和振动等实验条件下，不同次坠落的位置误差仅为 1 个采样间隔时间内轴颈转过的角度，这个误差是十分小的。如在采样频率为 8 192 Hz，转速为 3 000 r/min 的转速下每次坠落实验中轴颈位置的角度误差仅为 2.2° 。

通过选择不同的参考信号，就可以实现在轴颈不同位置使 AMB 同时失效的目的。表 1 分别给出了在几个典型位置坠落的条件。

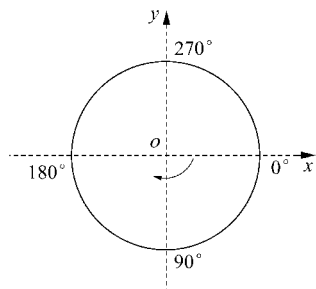


图6 转子坠落位置确定方法

Fig 6 Determining drop position of rotor

表1 转子开始坠落位置及条件

Table 1 Rotor dropping position and its conditions

转子坠落位置	系数常量 K 从 1 变为 0 的条件
0°	$x(i) > 0, y(i) > 0, x(i+1) > 0, y(i+1) \leq 0$
90°	$x(i) > 0, y(i) < 0, x(i+1) \leq 0, y(i+1) < 0$
180°	$x(i) < 0, y(i) < 0, x(i+1) < 0, y(i+1) \geq 0$
270°	$x(i) < 0, y(i) > 0, x(i+1) \geq 0, y(i+1) > 0$

实验中具体的实现方法为:当 AMB 转子系统在给定的转速下进入稳态工作后,利用 PC 机给 d-SPACE 发送一个实行 AMB 失效的指令,然后 d-SPACE 按照上面转子坠落位置的确定方法来确定满足条件的坠落时间并实现对 AMB 的电流进行同步切换。如果在转子坠落后希望恢复 AMB 到正常的工作状态,只需从 PC 机上发送另外一条使 K 变为 1 的指令即可。

在采用了上述的线圈电流同步切换以及转子坠落位置控制方法后,所进行的大量 AMB 失效后转子的坠落实验表明,可以得到十分满意的实验结果,特别是在转子的轨道比较规则时,转子坠落实验的重复性可以达到 95% 以上。

实验中转子的振动信号先存在 d-SPACE 中,然后通过 PC 机将数据传回到硬盘,实验结束后通过对实验数据进行处理,以得到转子在备用轴承失效前后的瞬态动力学特性。

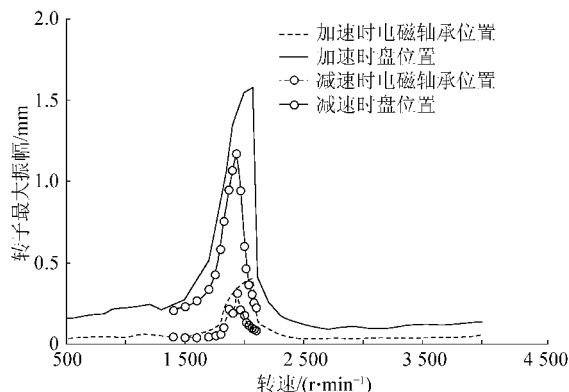
2 实验结果及分析

2.1 AMB 在正常工作条件下的不平衡响应

在转子的一端支承在球轴承、另一端支承在正常工作状态 AMB 上时,转子系统在水平和垂直方向上的前二阶临界转速相差不大,分别在 2 058~2 133 r/min 及 5 040~5 130 r/min 范围内。

为了掌握 AMB 转子系统的基本特性,在进行转子坠落实验前,首先测量了 AMB 转子系统在转速逐渐增加和减小过程中的不平衡响应。图 7 所示为转子系统的不平衡响应曲线。由于转子

系统的阻尼较小,即便是采用了较小的不平衡量,在转子系统的一阶临界转速区备用轴承已经开始工作,轴颈处的最大振幅约为 0.4 mm,所以在转子的不平衡响应曲线上出现了具有硬力特性的非线性现象,转子在增速和减速过程的不平衡响应曲线也不重合。AMB 转子系统在 2 100 r/min 的转速前后出现了明显的共振现象,在共振转速区盘的最大转幅超过 1.5 mm。

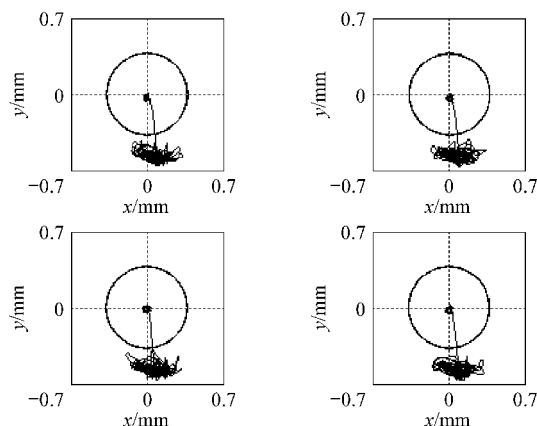
图7 AMB-转子系统不平衡响应曲线(不平衡量 $32 \text{ g} \cdot \text{mm}$)Fig. 7 Unbalanced response of AMB-rotor system (rotor imbalance is $32 \text{ g} \cdot \text{mm}$)

2.2 AMB 失效后的转子坠落实验

实验中,AMB 均在轴颈经过 0° 位置时失效,转子开始坠落。在每一种条件下,给出了连续 4 次坠落实验测量到的瞬态运动轨迹。由于滚动轴承的油隙以及备用轴承基础的柔性较大,所以当转子坠落在备用轴承上时,轴颈的运动幅度最大达到 0.7 mm。

(1) 转速的影响

转速对转子在坠落过程中轴颈运动轨道的影响如图 8 所示。图中的圆圈表示备用轴承的间隙圆。 x 和 y 分别表示水平方向和垂直方向的振动。



(a) 转速 1 600 r/min

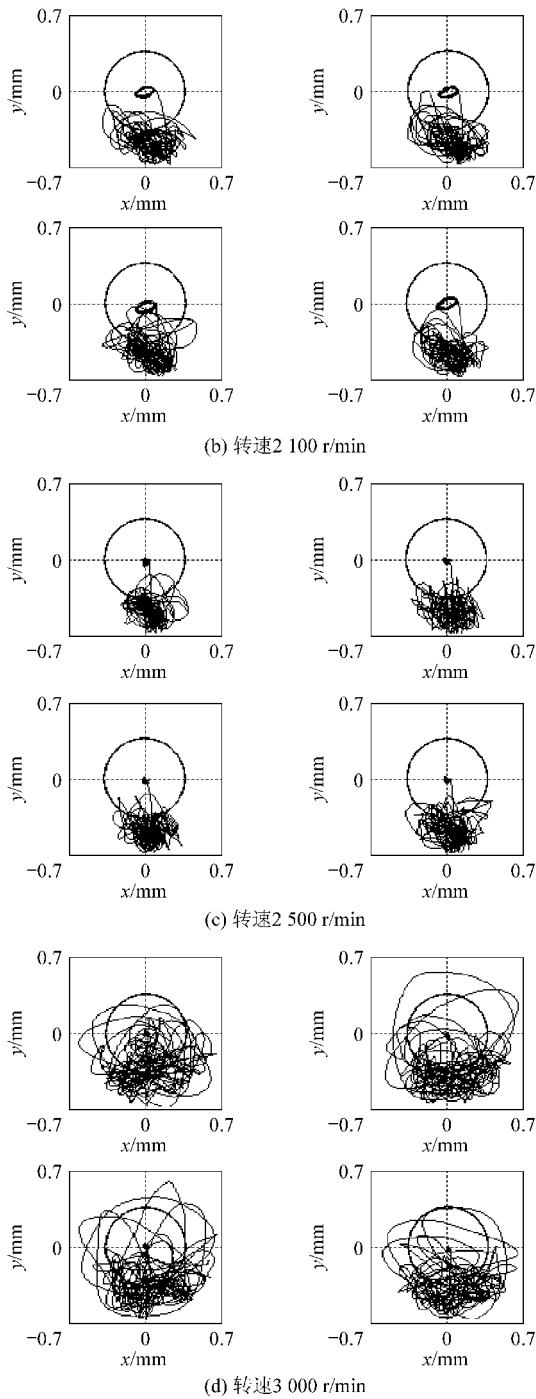


图 8 不同转速对转子坠落过程中轴颈运动轨迹的影响 (不平衡量 32 g · mm)

Fig. 8 Effect of rotational speed on journal motion orbits during dropping (rotor imbalance is 32 g · mm)

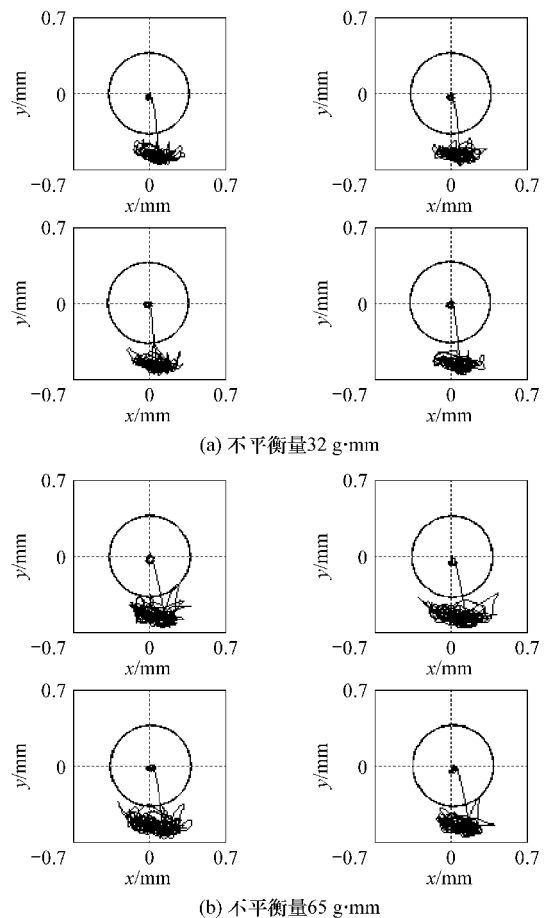
当转速较低时,由于转子开始抛出时的能量不足,AMB 失效后轴颈在间隙圆的下部摆动,出现了以自由落体-碰撞弹起-自由落体为特征的在间隙圆底部的摆动运动,这时除了轴颈的振动较小之外,碰撞所产生的冲击力也不大,是 AMB 失效后转子理想的运动形式。在转子的临界转速区,由于轴颈的稳态运动幅度增大,如果转子的不

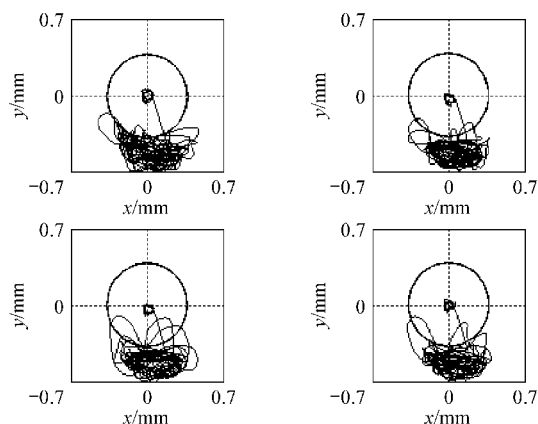
平衡量较小,AMB 失效后轴颈一般也在间隙圆下部摆动,但轴颈摆动的幅度增大。如果转子的不平衡量很大,轴颈的运动可能变为以碰撞-分离-再碰撞为特征的在整个间隙圆范围内的碰撞型回转运动^[7]。

在转子的临界转速区之后,轴颈的稳态运动轨道迅速减小,虽然转子的转速有所增大,但是由于转子开始抛出时的能量减小,所以轴颈在 AMB 失效后的振动反而减小,如果转子的不平衡量不是很大,轴颈的运动同样为在间隙圆下部的摆动。此后随着转速的增大,AMB 失效后转子开始被抛出时的能量也逐渐增大,轴颈振动增大,会出现在整个间隙圆范围内的碰撞型回转运动。

(2) 转子不平衡量的影响

在相同坠落位置和转速的条件下,转子不平衡量对转子在坠落过程中的轴颈运动轨道的影响如图 9 所示。当转子的不平衡量较小时,AMB 失效后轴颈的运动主要为在间隙圆下部的摆动。随着不平衡量的增大,AMB 失效后轴颈做摆动运动的幅度也随之增大。在转子的不平衡量大于某一定值之后,转子在坠落后出现在整个间隙圆范围内的碰撞型回转运动。如果转子的不平衡量很





(c) 不平衡量94 g·mm

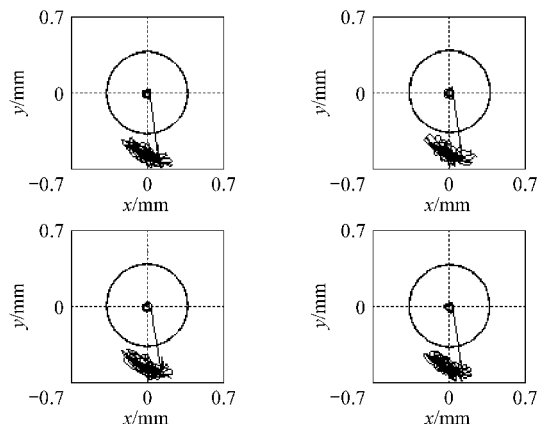
图9 不平衡量对转子坠落过程中轴颈运动轨迹的影响 (转速1600 r/min)

Fig. 9 Effect of rotor imbalance on journal motion orbits during dropping (rotational speed is 1600 r/min)

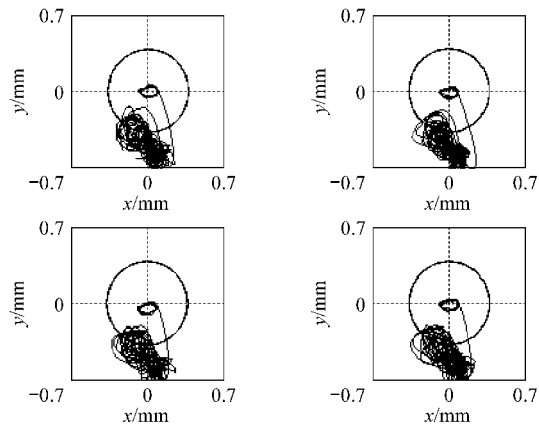
大,转子将与备用轴承始终接触,形成摩擦型回转运动。可见从减小AMB失效后转子坠落过程中的冲击响应的角度来看,在AMB系统中也必须对转子提出一定的动平衡要求。

(3) 碰撞面润滑条件的影响

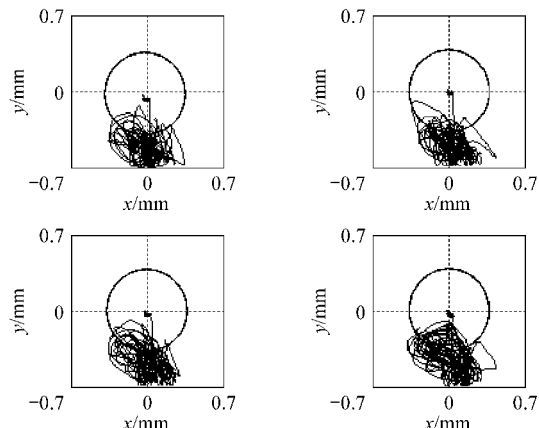
如何减小AMB失效后转子坠落在备用轴承上瞬态运动的大小以及备用轴承上的碰撞力是设计备用轴承时必须考虑的主要问题。为此可以采用多种方法,如采用金属润滑材料、润滑脂、柔性备用轴承等。实验中给备用轴承碰撞面上涂了少量的润滑油,测量了AMB失效后转子坠落在碰撞面有润滑油的备用轴承上的运动特性。图10为与图8对应条件下转子坠落在碰撞面具有润滑油的备用轴承上时轴颈的运动轨道。结果清楚地说明了,给备用轴承碰撞面上涂有润滑油,可以明显改善碰撞面间的摩擦学特性,使转子在坠落过程中的运动振幅明显减小,特别是减小了系统出



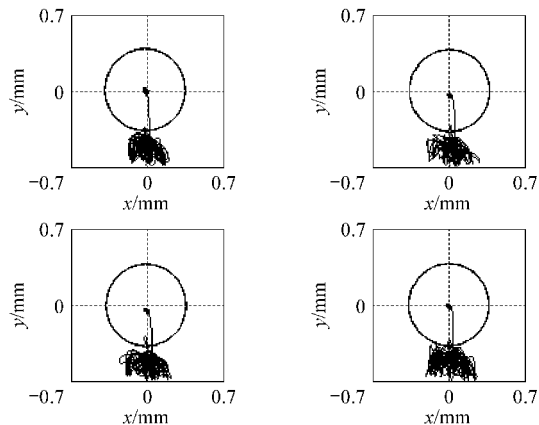
(a) 转速1600 r/min



(b) 转速2100 r/min



(c) 转速2500 r/min



(d) 转速3000 r/min

图10 润滑条件下不同转速对转子坠落过程中轴颈运动轨迹的影响(不平衡量32 g·mm)

Fig. 10 Effect of lubrication condition on journal motion orbits during dropping (rotor imbalance is 32 g·mm)

现在整个间隙圆范围内的碰撞型回转运动的可能性。因此适当地在备用轴承与转子的碰撞面上增设润滑材料,对于减小AMB失效后转子坠落在备用轴承上的冲击载荷,提高备用轴承的可靠性是非常有利的,这也是R. G. Kaur和H. Heshmet^[10]研发高性能备用轴承的依据。

3 结 论

采用信号合成和分解实行多个线圈同时断电, 以及利用转子运动跟踪来确定转子坠落位置的方法能够获得高重复率的转子坠落实验结果。

转子坠落后瞬态运行的形式和振动的大小由转子坠落前的振动、工作转速以及备用轴承碰撞面上的润滑条件等条件来确定。转子坠落前的振动越大, 转子的转速越高, 那么转子坠落后的振动越大, 出现碰撞型回转运动以及摩擦型回转运动的可能性就越大。

通过改变备用轴承碰撞面上的润滑条件能够明显地减小转子坠落后的瞬态振动, 降低出现碰撞型回转运动以及摩擦型回转运动的可能性, 减小转子与备用轴承间的碰撞对转子和备用轴承的影响。

参 考 文 献

- [1] Gelin A, Pugent J M, Hagopian J D. Dynamic behavior of flexible rotors with active magnetic bearings on safety auxiliary bearings[C]//Proceedings of 3rd International Conference on Rotordynamics. 1990; 503-508.
- [2] Fumagalli M, Varadi P, Schweizer G. Impact dynamics of high speed rotors in retainer bearings and measurement concepts[C]//Proceedings of 4th International Symposium on Magnetic Bearings. 1994; 239-244.
- [3] Fumagalli M, Schweizer G. Motions of a rotor in retainer bearings[C]//Proceedings of 5th International Symposium on Magnetic Bearings. 1998; 509-514.
- [4] Ishii T, Kirk R G. Transient response technique applied to active magnetic bearing machinery during rotor drop[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1996, 118(2): 155-163.
- [5] 季进臣, 虞列. 电磁轴承转子系统中高速不平衡转子跌落过程的非线性动力学[J]. 机械工程学报, 1999, 35(5): 62-66.
Ji Jinchun, Yu Lie. Nonlinear dynamics of high speed unbalanced rotor drop in rotating machinery equipped with active magnetic bearings[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(5): 62-66. (in Chinese)
- [6] 祝长生. 电磁轴承支承的柔性转子在轴承失效后坠落过程中的瞬态响应[J]. 航空学报, 2005, 26(3): 349-355.
Zhu Changsheng. Transient response of rotor drop on a rolling element backup bearing in a flexible rotor supported on active magnetic bearings[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(3): 349-355. (in Chinese)
- [7] Kirk R G, Swanson E E, Karavana F H, et al. Rotor drop test stand for AMB rotating machinery[C]//Proceedings of 4th International Symposium on Magnetic Bearings. 1994; 207-212.
- [8] Kirk R G, Raju K V S, Ramesh K. Evaluation of AMB rotor drop stability[C]//Proceedings of Rotordynamic Instability Problems in High-performance Turbomachinery. 1996; 197-208.
- [9] Reitsma T W. Development of long-life auxiliary bearings for critical service turbomachinery and high-speed motors [C]//Proceedings of 8th International Symposium on Magnetic Bearings. 2002; 507-515.
- [10] Kaur R G, Heshmet H. 100 mm diameter self-contained solid/powder lubricated operated at 30 000 rpm[J]. Tribology Transition, 2002, 45(1): 76-84.

作者简介:

祝长生(1963—) 男, 博士, 教授。主要研究方向: 转子动力学、磁悬浮技术、振动主动控制等。

Tel: 0571-87983515

E-mail: cszhu@hotmail.com

(编辑: 蔡斐)