

文章编号: 1000-8055(2002) 02-0205-07

双盘转子碰摩的弯曲和扭转振动实验研究

邓小文¹, 廖明夫¹, Robert Liebich², Robert Gasch²

(1. 西北工业大学 旋转机械与风能装置测控研究所, 陕西 西安 710072;

2. 柏林工业大学 宇航研究所, 德国 柏林)

摘要: 设计了 1 个新型多自由度的双盘转子动静件碰摩实验器。应用该实验装置, 重点研究了转子动、静碰摩后的转子弯曲和扭转振动。实验结果表明, 转静件碰摩主要激起系统扭转自然频率振动; 同时, 弯曲振动复杂。不同情况下的转静件碰摩, 转子具有不同的弯曲和扭转振动响应。根据转子扭转振动的变化可诊断转静件碰摩故障, 与理论研究的结果相吻合。

关键词: 碰摩; 转子; 扭转振动; 弯曲振动

中图分类号: V 231. 96

文献标识码: A

Experimental Research of Bending and Torsional Vibrations of a Double Disc Rotor Due to Rotor-to-Stator Contacts

DENG Xiao-wen¹, LIAO Ming-fu¹, Robert Liebich², Robert Gasch²

(1. Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China;

2. Aerospace Institute of Technical University of Berlin, Berlin Germany)

Abstract: In this paper, a new rotor-to-stator contact test-rig, which consists of a rotor with two discs mounted on a shaft and a stator, is well built and used to investigate the bending/torsion coupled vibrations of a rotor and an elastic stator due to contacts. The test-rig is able to demonstrate partial rub and also the heavily destructive dry-friction-whip when the rotor rolls on the stator's inner surface in the real rotating machinery. Both the bending and torsional vibration of rotor and stator vibration are monitored and analysed during the test. Many different kinds of rotor-to-stator contacts are experimentally simulated with this test-rig, such as different rotor imbalance attributing to sudden blade loss, stator support and clearance between rotor and stator, etc. The results show that the torsional vibration of the system reveals very important characteristic of the vibration of rubbing rotor. Rotor-to-stator contact provokes mainly torsional natural frequency vibration and many phenomena predicted by theoretical studies are found in those experiments. The rotor-to-stator contact problem can be detected by monitoring the torsional vibration signals.

Key words: test-rig for rubbing; rotors; bending vibration; torsional vibration

1 引言

到目前为止, 国内外有许多学者对旋转机械

转静件碰摩问题进行了研究^[1~5]。然而, 对于碰摩转子扭转振动实验研究的文献很少见。李舜酩^[6]理论研究了单盘转子弯扭耦合振动的动力学特

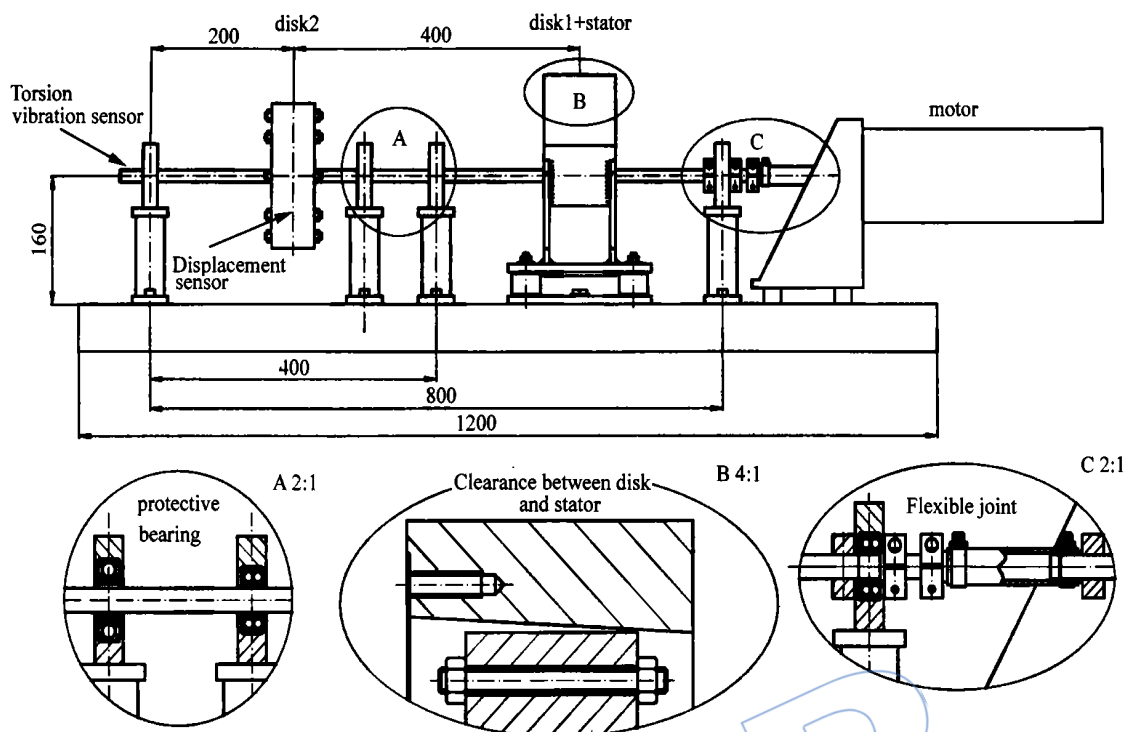


图 1 双盘转子碰摩实验器

Fig. 1 Test rig of rotor-stator contact

性;白英等^[7]提出了通过测量线加速度,再经过换算来测量转子系统扭振参数的方法。本文描述了作者利用一双盘转子碰摩实验装置所进行的实验研究工作。所设计的实验装置能很好地模拟转静间间歇式碰摩及部分碰摩,并且设计了 1 个脉冲电路,能准确地跟踪显示和标识碰摩过程。实验中对转子的弯曲和扭转振动以及静子的振动同时进行了监测和分析。结果表明转子的扭转振动凸显了转静件碰摩的重要特征信息。

2 转静件碰摩实验装置及测试系统

根据文献[8]的理论数学模型,本文设计了图 1 所示的转静件碰摩实验装置。它由 1 根长为 800 mm 直径 15 mm 的转轴、2 个转盘和 1 个静子组成(均为 45# 钢)。转子支承在 3 个球轴承上。每个盘上都有 8 个平衡螺拴,单盘重 12 kg。静子总重 21.6 kg;为了能模拟不同转静间隙下转静件碰摩,静子内环特殊设计成一个倾斜度约 5% 的锥形筒(见图 1 的椭圆 B),它能沿转轴中心线来回移动,实验中转静间隙可在 0~5 mm 之间调节。同时静子弹性安装在基座上,可以通过更换静子支承的材料来研究不同静子支承刚度对转静件

碰摩的影响。整个系统由一直流电机驱动,转速可达 4000 r/min。为减少由于电机转轴与转子中心不对中所带来的影响,电机和转子采用柔性连接(图 1 的椭圆 C)。为安全起见,在转子中间靠近盘 2 处安装了 1 个保护轴承(图 1 的椭圆 A)。

利用转子几何参数,可理论求得系统无阻尼时的弯曲振动和扭转振动的一、二阶临界转速,即弯曲振动 $\omega_{B1} = 1731$ r/min, $\omega_{B2} = 2617$ r/min 和扭转振动 $\omega_{T1} = 0$, $\omega_{T2} = 1948$ r/min。实测值稍稍偏大,因为实际系统或多或少存在一点阻尼,但它不影响分析结果。

图 2 为 1 个专门设计的传感器用以测量转静件碰摩接触的时刻及时长的信息,它由 1 个简单电路来实现。通过安装在转轴上的 1 个弹性接触装置,将转轴、盘及静子都串在 1 个回路中,实验中只需测量电阻两端即 AB 间的电压值。根据该值大小可判断出转静件碰摩与否。系统正常工作时,没有转静件碰摩,电路断开,AB 间为零电压,即输出低电平信号(图 3(a));转静件碰摩接触时,电路为闭合连接,它输出 3.5 V 的高电平(图 3(b))。这个电压值也是时间函数,根据高电平出现的时刻,可跟踪转静件碰摩接触的位置及接触

时长。

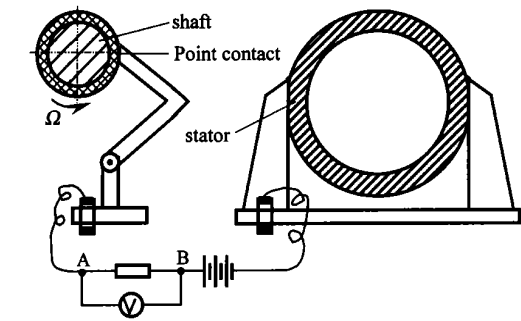


图 2 转静碰摩实验跟踪装置

Fig. 2 Tracing rig of rotor-stator contact

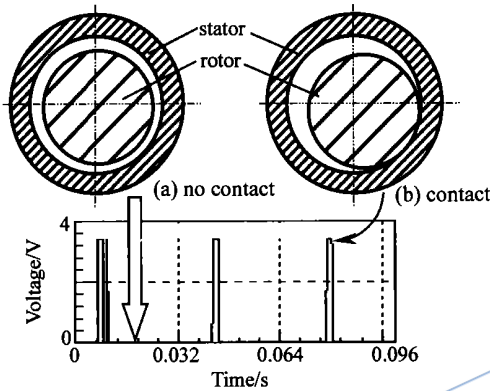


图 3 碰摩跟踪传感器信号输出实例

Fig.3 Signal output of contact tracing sensor

图 1 还示意了系统所用传感器的安装位置。系统共用了 6 个电涡流位移传感器测量转子及静子的弯曲振动, 1 个扭振传感器(转轴左端) 测量转子扭转振动; 1 个光电传感器测量转子转速以

及 1 个自制转静件碰摩跟踪传感器。采用笔者所在研究所自行研制的 CAMD-6100 型状态监测与故障诊断系统采集振动数据并进行分析。采样方式为多通道同步、整周期采样, 每次连续采集 16 周的数据且每周采 128 个数据点。整个信号采集分析过程为传感器信号拾取、信号预处理、A/D 采集及计算机分析处理并打印。

测试时, 用一带质量橡皮泥粘在盘 1 上来模拟真实转子的叶片掉块。转子正常运行时, 突然去掉橡皮泥, 转子不平衡突增, 导致振动剧增, 当转子振动超过转静件径向之间最小间隙时, 转静件碰摩发生。后面实验中的叶片掉块所引起的突增转子不平衡量, 均为盘 1 的这种橡皮泥掉块所致, 而盘 2 为正常运行。分别改变不平衡大小、转静间隙大小和静子支承, 重复实验, 并对结果进行比较分析。

3 实验结果

为了比较转子碰摩与不碰摩时系统响应的不同之处, 图 4 显示了系统原始平衡转态下的转子振动。转子正常工作时, 转静没有碰摩, 弯曲振动基本为一正弦曲线, 频谱图中也只有 1 倍频成份(图 4a), 轨迹为一椭圆, 静子基本不振(图 4c); 转子几乎没有扭转振动(图 4b)。

图 5 显示了转子叶片掉块瞬间的弯曲振动和扭转振动情况。叶片掉块瞬间, 弯曲振动增加, 但由于弯曲振动仍以 1 倍频为主(图 5a), 此时, 转静件碰摩没有马上发生(图 5c)。但是, 突发转子不平衡, 导致扭转振动变化明显, 且仅为扭转自振

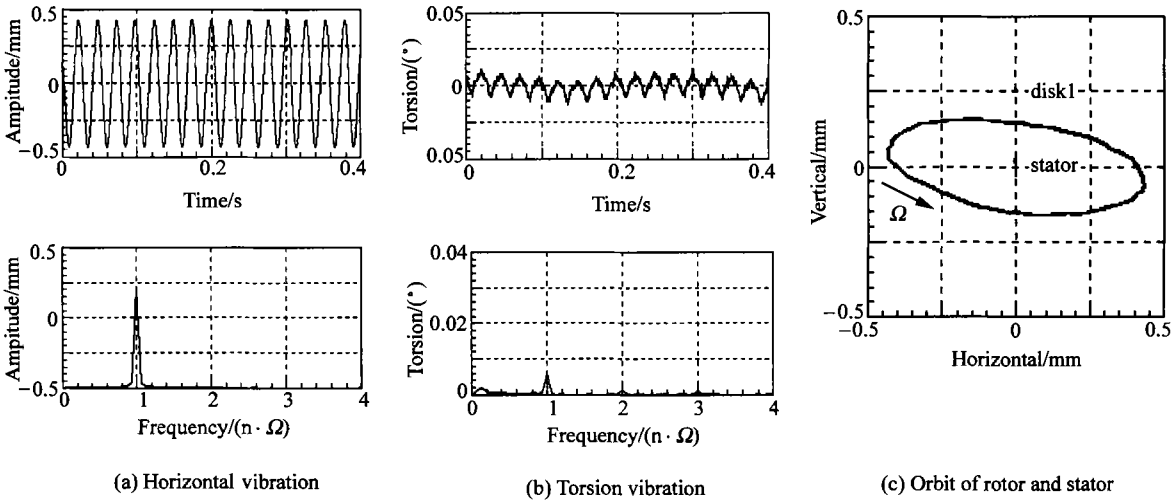
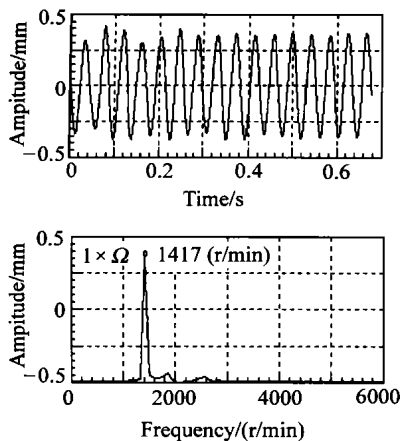


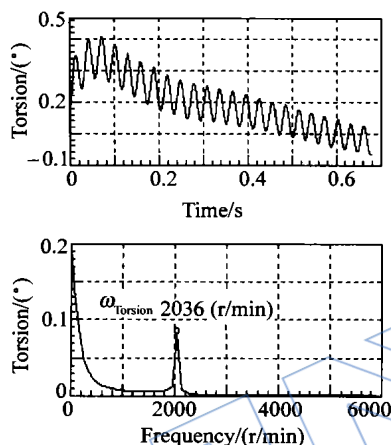
图 4 转子正常状态振动(转速为 $\Omega= 2360 \text{ r/min}$)

Fig. 4 Normal vibration of rotor (rotating speed is $\Omega= 2360 \text{ r/min}$)

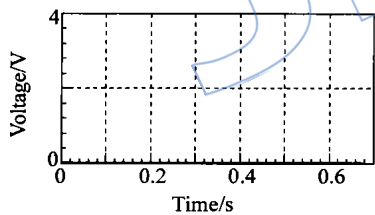
频率振动成份(图 5b)。



(a) Horizontal vibration



(b) Torsion vibration



(c) Signal of contact

图 5 转盘掉片瞬间的转子振动

(转速为 $\Omega = 1417$ r/min)

Fig. 5 Vibration of rotor when blade breaking off

(rotating speed is $\Omega = 1417$ r/min)

图 6 显示了转子叶片掉块后转静件碰摩的弯曲和扭转振动情况。叶片掉块引起的不平衡量为 $120 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 。图 6(a) 中间曲线为盘 1 连续 16 周的振动时域波形, 下端为转静件碰摩接触随时间变化的脉冲信号, 时域波形上的黑点表示碰摩发生的位置。图 6(c) 为其中一周的转子轨迹, 粗黑线为跟踪到的碰摩位置。转静件碰摩后, 转子振动具有几个周期内多点碰摩, 几个周期内摩擦分离, 后

又摩擦的多周期跳跃碰摩行为, 其转子响应历程为振幅增大—碰摩—衰减—慢慢增大—碰摩等等。它与以往所定义的碰摩中跳跃现象所不同的是, 本文所揭示的这种跳跃现象是发生在多个周期内, 而非单一周期内。Weigel^[9]在 1997 年对 1 台汽轮发电机组的故障诊断时测量到了这种类似振动信号^[8]。本文作者在理论研究中也曾观察到这种信号。这主要是由于转子、静子的振动形成了 1 个动态变化的转静间隙, 使得碰摩运动变得复杂和非线性。快速傅里叶分析结果显示转子弯曲振动中除了工频振动外, 还有其它亚谐波振动和超谐波振动(图 6b)。由于碰摩力的作用, 静子也跟着振动, 它具有与转子振动相似的趋势(图 6d)。转静件碰摩时, 扭转振动明显增加, 且仅激起扭转自振频率振动, 图 6(e) 中的小频率扭振成份来自异步电机的抑制作用。由于是钢对钢的直接碰撞, 碰摩会同时产生噪音和火花, 对于大型工业转子系统来说, 这是相当危险的, 应加以避免。

图 7 和图 8 分别显示了转速为 2407 r/min, 2467 r/min 和 2509 r/min 时转静件碰摩的弯曲和扭转振动情况。碰摩引起转子反进动, 且转速越高转子轨迹越复杂。除工频振动外, 同时还伴有亚谐波和超谐波振动, 此谐波频率与工频相当接近, 其幅值随转速的增大而增加。反进动量并不总是随转速增加而增大, 例如 2509 r/min 时的反进动量比 2467 r/min 时的反进动量要小, 这主要是由于后者碰摩次数多, 碰摩力约束也多。尽管 3 转速差异不大, 但扭转振动变化相当明显, 并且只有扭振自振频率成份, 没有直接与转速相关的振动成份。随着转速的增大, 碰摩引起的扭振似有某种线性增加的趋势。频谱图中还有 1 个由电机控制作用引起的低频分量, 其幅值随转速的增大基本保持恒定, 实测中, 这个分量并不重要。由于碰摩力的测量比较困难, 因此, 实验中要绝对比较碰摩强度与转速的关系, 再不能简单套用理论计算中直接比较正向碰撞力大小的方法了, 不过, 可通过静子振动大小和碰摩信息等来间接定性比较。实验发现, 转子工作条件一定时, 转速越大碰摩越强。这和理论研究结果相符^[8]。

不同的静子支承对于碰摩转子的影响是不一样的。图 9 和图 10 分别给出了橡胶、PVC(聚氯乙烯)和杉木 3 种静子支脚下转静发生碰摩后的系统弯曲和扭转振动情况。这 3 种材料的刚性依次增加, 而阻尼则依次减少。PVC 和杉木支脚对静子有较大的约束, 特别是在垂直方向, 它们的反

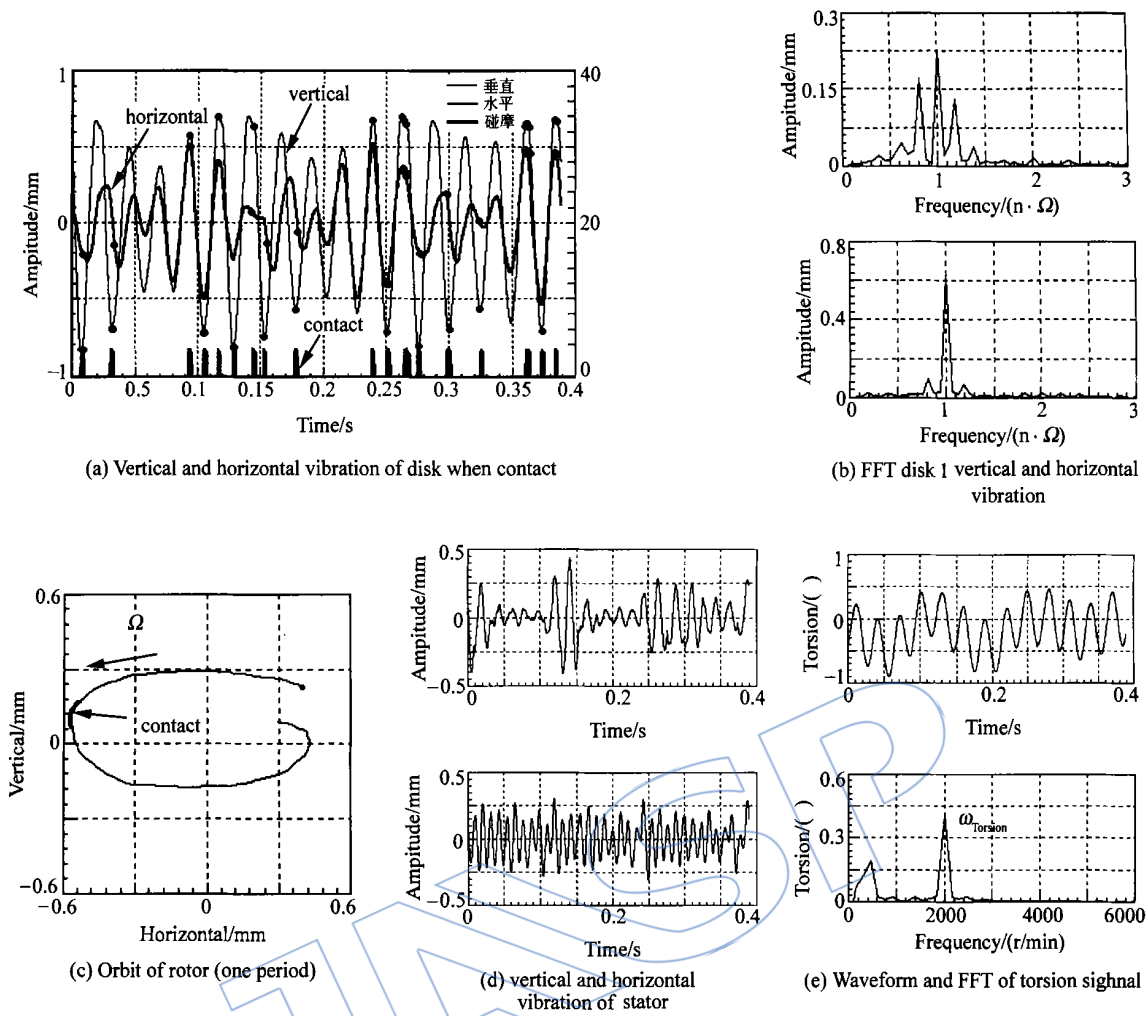


图 6 转静件碰摩时的系统振动(转速为 $\Omega=2400\text{ r/min}$)
Fig.6 Vibration when rotor-stator contact (rotating speed is $\Omega=2400\text{ r/min}$)

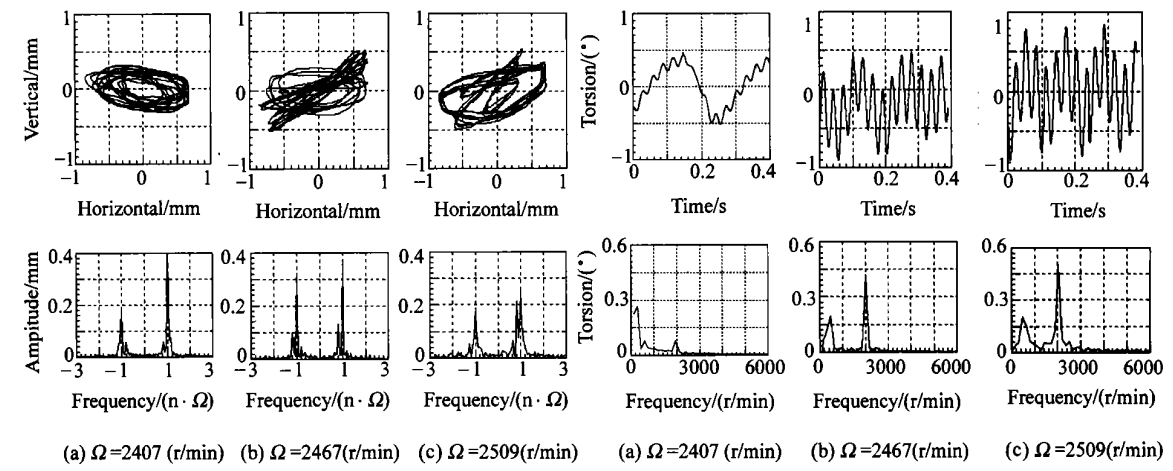


图 7 不同转速下转子轨迹及进动分析

Fig.7 Orbit and whirl analyze at different speed

图 8 不同转速下转子扭转振动

Fig.8 Torsion vibration at different speed

进动逐渐增强。不同类型的静子支承对扭转振动的影响也较明显。由于刚性的增加,限制了转子的

振动,扭转振动逐渐减少,这一点符合逻辑。

图 11 显示了不同突增不平衡量下转静件碰

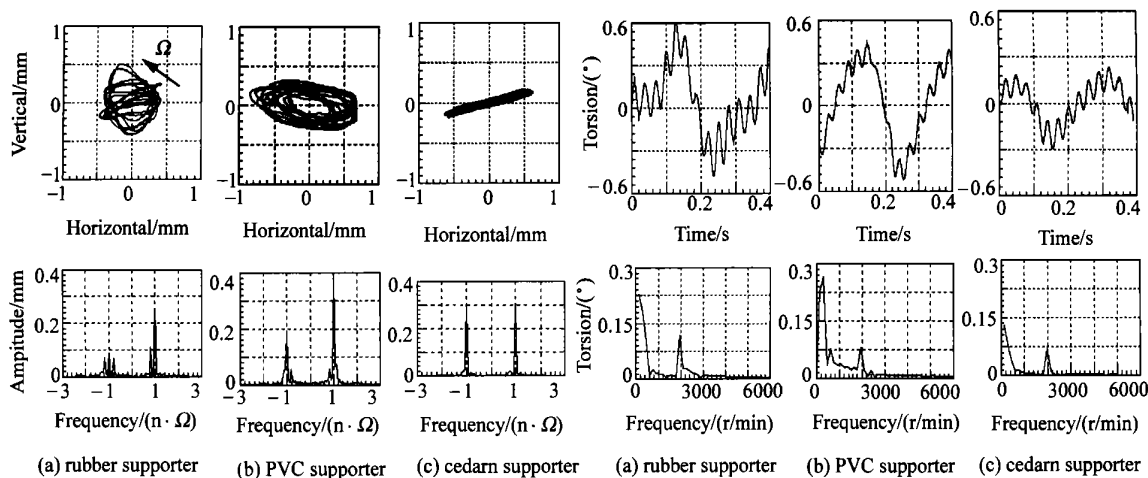


图 9 不同静子支脚时转静件碰摩的转盘 1 轨迹及进动分析
Fig. 9 Orbit and whirl analyze of disk 1 with different supporter at contact

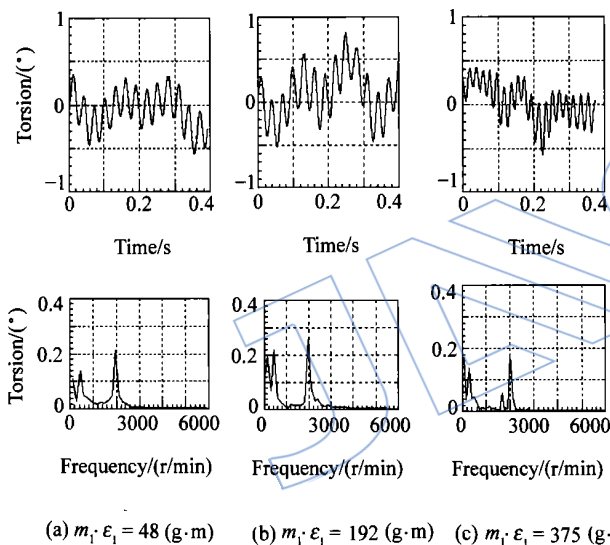


图 11 不同不平衡量下转子扭振情况
Fig. 11 Torsion vibration with different unbalance

摩时的扭转振动。由图可知, 扭转振动以自振频率振动为主, 并伴有电机的低频扭振。当不平衡量绝对值较小时, 扭振大小随不平衡量的增大而增大; 但当由叶片掉块所引起的不平衡量特别大时, 转子振动剧增, 转静之间发生多点碰摩, 扭振成份复杂, 除了扭振自振频率和电机的低频分量振动外, 还出现了次谐波振动成份。

转静间隙的大小对碰摩有着直接的影响, 本文的转子实验器在设计之初就充分考虑到了这个因素。如前所述, 静子内环特别设计成锥形斜面(详见图 1 椭圆 B), 它可以沿着轴向来回移动, 进而改变转静径向之间的间隙大小。静子朝电机方

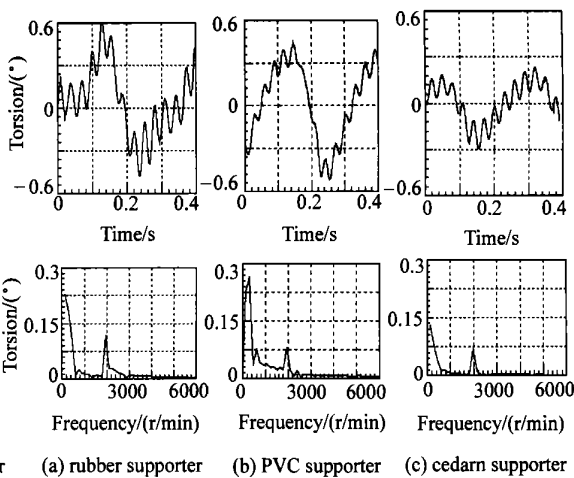


图 10 不同静子支脚时转静件碰摩的扭转振动
Fig. 10 Torsion vibration for disk with different supporter at at contact

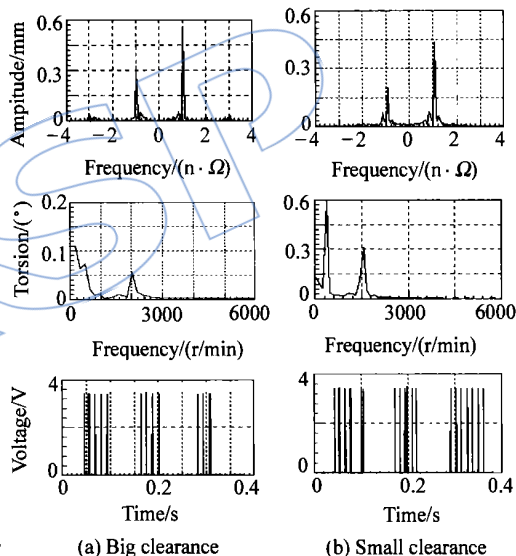


图 12 大、小转静间隙的系统振动
Fig. 12 Vibration with different clearance

向移动, 转静间隙增大; 反之, 远离电机, 间隙减少。由于本文转子振动最大幅值也不过 1 mm, 故只研究了转静间隙在 0~2 mm 变化情况, 同时考虑到制造、安装误差和难以准确测量的现实, 本文没有作具体的定量研究, 仅仅粗略的从相对的大间隙和小间隙来研究转静间隙对碰摩影响的趋势, 大、小间隙可通过观察静子沿轴向移动的方向来比较确定。图 12 比较了相对大、小转静间隙下发生转静件碰摩的转子轨迹进动分析、扭振及碰摩作用情况。转速为 2447 r/min, 不平衡量为 120 gcm。由图示知, 大的转静间隙, 一旦碰摩发生, 转子将发生较大的弯曲振动。大的转静间隙, 使得转

子在碰摩发生前允许振动范围大, 相对碰摩次数要少, 同时即使碰摩, 其作用也较轻, 振动频率仅为 $+1\Omega - 1\Omega$ 但一旦碰摩, 由于振动幅值大, 引起的反进动量值大。相反, 小的转静间隙, 转静件碰摩很容易发生。同样大的不平衡量, 小转静间隙发生碰摩的程度要严重得多。一圈内可能发生多点碰摩接触, 碰撞所产生的碰摩力的约束也要强烈, 反映在转子振动上就是转子在静子中间来回弹性碰撞, 弯曲振动幅值受到限制, 但振动成份复杂, 除 $+1\Omega - 1\Omega$ 振动外, 还出现其它次谐波和超谐波振动, 且扭转振动增大。

4 结 论

本文设计了 1 个新型多自由度转子碰摩实验器, 利用该实验器可以模拟真实转子的转静径向多点碰摩和局部碰摩, 同时还可研究不同不平衡量、静子弹性支承和转静件间隙对转子碰摩的影响。通过大量实验, 得到如下结论:

- (1) 碰摩发生时, 由于碰摩同时引起静子振动, 即相应地产生 1 个动态变化的动静件间隙, 碰摩转子会呈现很强的非线性动力学特性, 响应中同时出现次谐波和超谐波振动成份。
- (2) 不平衡量越大, 所激发的碰摩越严重, 严重的叶片掉块会导致系统振动复杂; 不同静子弹性支承碰摩后转子响应也不一样, 刚性强阻尼大的静子支承引起的转子弯曲振动反进动大, 而扭转振动小; 不同的转静间隙, 碰摩后对系统的影响也不一样, 小间隙, 易发碰摩。
- (3) 碰摩后, 主要激起扭转自振频率振动, 由于电机的抑制控制作用, 同时产生一较小的低频扭振, 但其幅值基本保持不变; 扭振中没有直接与

工频振动相关的振动成份。通过观察扭转振动的变化, 可以有效地诊断转子系统转静件碰摩故障。

参考文献:

- [1] 褚福磊, 张正松, 冯冠平. 碰摩转子系统的混沌特性[J]. 清华大学学报, 1996, 36(7): 52- 57.
- [2] Rietz P, Segebart P, Liao M F. Diagnosehinweise aus der numerischen Simulation von Anstreifvorgaengen rotierender Wellen [A]. VDI - Schwingungstagung'99 [C]. : 261- 274.
- [3] Fangsheng Wu, George T Flowers. An Experimental Study of the Influence of Disk Flexibility and Rubbing on the Dynamics[A]. ASME Vibration of Rotating System[C]. DE- 60, 1993: 19- 25.
- [4] 刘献栋, 李其汉, 杨绍普. 质量偏心旋转机械整圈碰摩的稳定性及其 Hopf 分叉[J]. 振动工程学报, 1999, 12(1): 40- 46.
- [5] Choi Y S. Experimental Investigation of Partial Rotor-Rub Against a Non-Rotating Part [A]. Proc. of the 7th Int. Conf. on Vibrations in Rotating Machinery [C]. IMechE, 2000: 281- 290.
- [6] 李舜酩, 李香莲. 碰摩转子弯扭耦合振动特性分析[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(1): 1- 3.
- [7] 白英, 闫任建. 扭转振动测试方法及参数识别的研究[J]. 内蒙古林学院学报(自然科学版), 1998, 20(4): 42- 46.
- [8] Deng X, Liebich R, Gasch R. Coupled Bending and Torsional Vibrations Due to Rotor-to-Stator Contacts[A]. Proc. of the 7th Int. Conf. on Vibrations in Rotating Machinery[C]. IMechE, 2000: 291- 300.
- [9] Weigel M. Dokumentation Des Maschinenzustandes Mittels Schwingungsdiagnostischer Ueberwachungs-Systeme [A]. Schwingungen in Rotierenden Maschinen IV [C]. 1997: 73 - 85.

(责任编辑 王震华)