

文章编号: 1673-4599(2011)04-0050-05

## 转子动静碰摩故障试验研究

曲秀秀, 陈 果, 乔保栋

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 为了研究转子碰摩时非线性动力学行为, 设计了一种可以模拟单点、多点、局部、整周碰摩的转子碰摩实验装置, 并且在ZT-3型多功能转子试验器上进行了碰摩故障试验研究, 通过改变转子转速和转静件间隙来观察碰摩转子在不同条件下的振动情况, 同时运用波形图、频谱图、轴心轨迹分析了转子系统碰摩时的非线性响应。试验结果表明, 本文设计的碰摩装置较传统碰摩螺钉更能真实的模拟转静碰摩故障, 对提升碰摩故障试验研究提供了一定的方法手段。

**关键词:** 碰摩故障; 转子系统; 混沌; 非线性振动

中图分类号: V231.96

文献标识码: A

## Experimental Study of Rotor Rub-impact Fault

QU Xiu-xiu, CHEN Guo, QIAO Bao-dong

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to study the nonlinear dynamics of a rubbing rotor system. An special device were designed to simulate the single point rubbing, multi-point rubbing, local rub-impact, and even full rubbing. The ZT-3 rotor experimental rig is used to simulate the rubbing fault. The vibration of the rubbing rotor was observed for different conditions which caused by change the speed of rotor and the gap between rotor and stator. The vibration waveforms, spectrums, orbits were used to analyze the nonlinear responses. The experimental results show that the new rubbing device can better simulate the real rubbing of the rotor and stator, and it is helpful to promote the observations of rub-impact fault.

**Key words:** rubbing fault; rotor system; chaos; nonlinear vibration

转静碰摩是旋转机械常见故障, 特别是大型旋转机械, 如航空发动机, 随着对航空发动机高转速、高效率的要求, 转静间隙越来越小, 导致了转子和静子间的摩擦事故经常发生, 同时由于工况变动或过大的轴向推力, 都有可能导致碰摩。转静件间的碰摩是一类常见的旋转机械故障, 通常表现为其他故障的间接结果, 例如转子

质量不平衡、热弯曲、轴系不对中以及转子的涡动失稳等都可能最终表现为转静碰摩, 造成机器剧烈振动、磨损甚至破坏。碰摩发生时, 一般都是先有局部碰摩, 这时在一个周期内, 转子与定子发生一次或数次碰撞。同时伴有非常复杂的振动现象, 在某些条件下还出现混沌运动。局部碰摩的不断加剧最后导致整周碰摩, 剧烈的振动使

收稿日期: 2010-07-15; 修订日期: 2011-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(50705042)资助项目, 航空科学基金(2007ZB52022)资助项目

得机器无法正常运转。有时甚至会引发灾难性后果<sup>[1]</sup>。因此,分析旋转机械转静碰摩故障机理,提取故障特征,对碰摩故障诊断具有重要意义<sup>[2-5]</sup>。目前研究转静间碰摩主要从以下几个方面着手:采用直接数值积分法研究碰摩时的非线性振动行为与特征;采用基于轴承间隙的碰摩模型进行理论与数值分析;碰摩故障的检测、测试与试验研究等<sup>[6]</sup>。

现有的研究多以理论仿真为主,旋转机械碰摩动力学行为的实验研究还不是很充分,虽然现有的试验台很多使用一个碰摩螺钉与转轴接触来模拟故障,这种方法仅能实现单点碰摩,不能模拟多点碰摩、局部碰摩和整周碰摩的情况,而且还会损伤转轴<sup>[7]</sup>。因此为了更加准确观察碰摩转子行为和不破坏转轴的前提下,设计了一个可以模拟多种碰摩的机构,以观察和分析碰摩转子在不同条件下的非线性振动。

## 1 试验装置

ZT-3转子碰摩故障试验台如图1所示,该试验台主要由调速电机、半柔性联轴器、转子、转子圆盘、碰摩装置及转速控制系统等组成。转轴上安装两个圆盘,其中一个嵌套在碰摩装置中,另一个圆盘用来测量位移,转轴两端由滑动轴承支撑,圆盘质量 $m=0.6\text{ kg}$ ,圆盘的外径为 $76\text{ mm}$ ,两个轴承之间的距离 $L=0.380\text{ m}$ 。

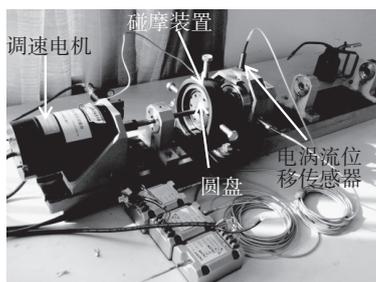
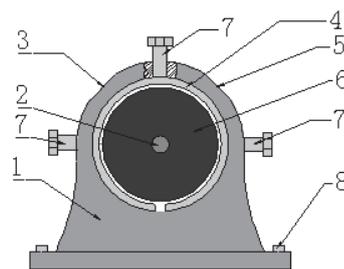


图1 ZT-3转子碰摩试验台

以往的碰摩试验多以点接触碰摩为主,即在某一位置固紧碰摩螺钉支架,然后启动电机在所需转速运行,调节碰摩螺钉和转轴在一个合适距离,就发生了碰摩,再锁紧翼形防松螺母。但是,这种碰摩与大多数实际转子与静子的碰摩情况不吻合,也无法实现整周碰摩的情况,并且这样的碰摩很容易损伤轴,碰摩试验也只能短时间进行。

为了很好的模拟实际转子的碰摩过程,专门设计了一个有可能产生整周碰摩的机构,新型转子碰摩装置结构图如图2所示。静子内套4采用铜套制作,铜套是非整圆周的,而具有缝隙,当调节螺栓7时铜套与转动件接触。从而实现转静碰摩。静子内套容易更换,且可以根据不同的材料进行加工制作,已灵活地实现多种碰摩刚度的碰摩试验研究。静子内径分别比转盘外径大 $1\text{ mm}$ ,支撑架1采用钢结构以增加静子的刚度。用3个螺栓7可以调节静子和转盘之间的间隙,从而调节碰摩发生的时间和碰摩的程度。另外还能通过更换静子内套来实现不同碰摩刚度下的试验。图2中平面3和平面5相互垂直,用来放置ICP加速度传感器。振动位移试验数据通过电涡流传感器测量并经前置放大器后,经数据采集卡NI9234传送到计算机。



1-支座; 2-转轴; 3、5-平台; 4-静子内套;  
6-转盘; 7-碰摩螺栓; 8-紧固螺钉

图2 新型碰摩装置结构图

## 2 转子碰摩试验及结果分析

影响碰摩转子系统运动的因素很多,如不平衡量、转速、系统的刚度和阻尼、转静间隙等。在本文中,主要通过改变转速和转静间隙来研究碰摩转子的运动特性。

该转子系统一阶临界转速约为 $4\ 200\text{ r/min}$ ,系统工作在一阶临界转速时振动非常剧烈,因此试验时工作转速低于 $4\ 200\text{ r/min}$ 。调节螺栓7使静子内套与转盘间隙为 $1\text{ mm}$ ,稳定转子转速 $n=3\ 936\text{ r/min}$ ,此时转子系统没有发生碰摩,通过电涡流位移传感器测得转子系统不发生碰摩时的振动响应如图3所示。此时振动波形是标准的正弦曲线,轴心轨迹是一个规则的椭圆,频谱图上也只在转速频率为 $1X$ ( $X$ 表示倍频)的位置有一根谱线,其他位置的数值基本上为零。图中 $y_p$ (纵坐标)为振

动位移的幅值。

调节碰摩装置上的螺栓改变碰摩间隙, 实现转子系统由不碰摩到轻微碰摩。再通过调节电机转速实现转子系统发生轻微碰摩时随转速变化振

动响应, 振动响应情况如图4所示, 由图可以看出: 当转子系统发生轻微碰摩时, 从波形上可以看出, 随着转速的增加, 振动幅值增加, 波形不再是标准的正弦曲线; 从频谱上可以看到, 除了

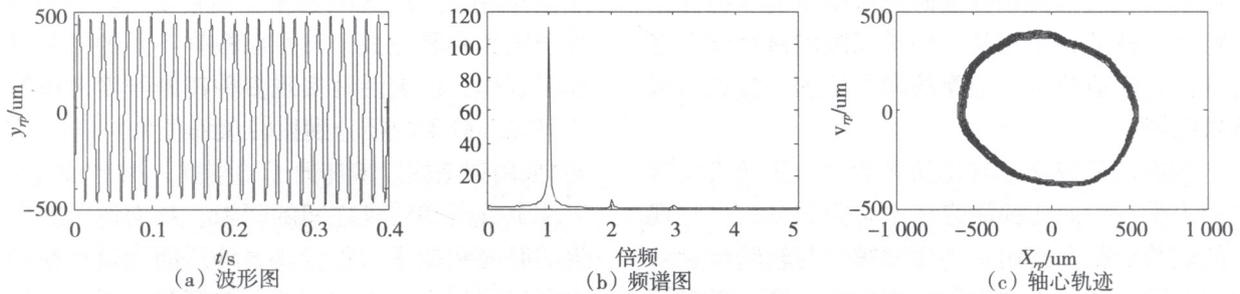


图3 转子系统不发生碰摩时的振动响应

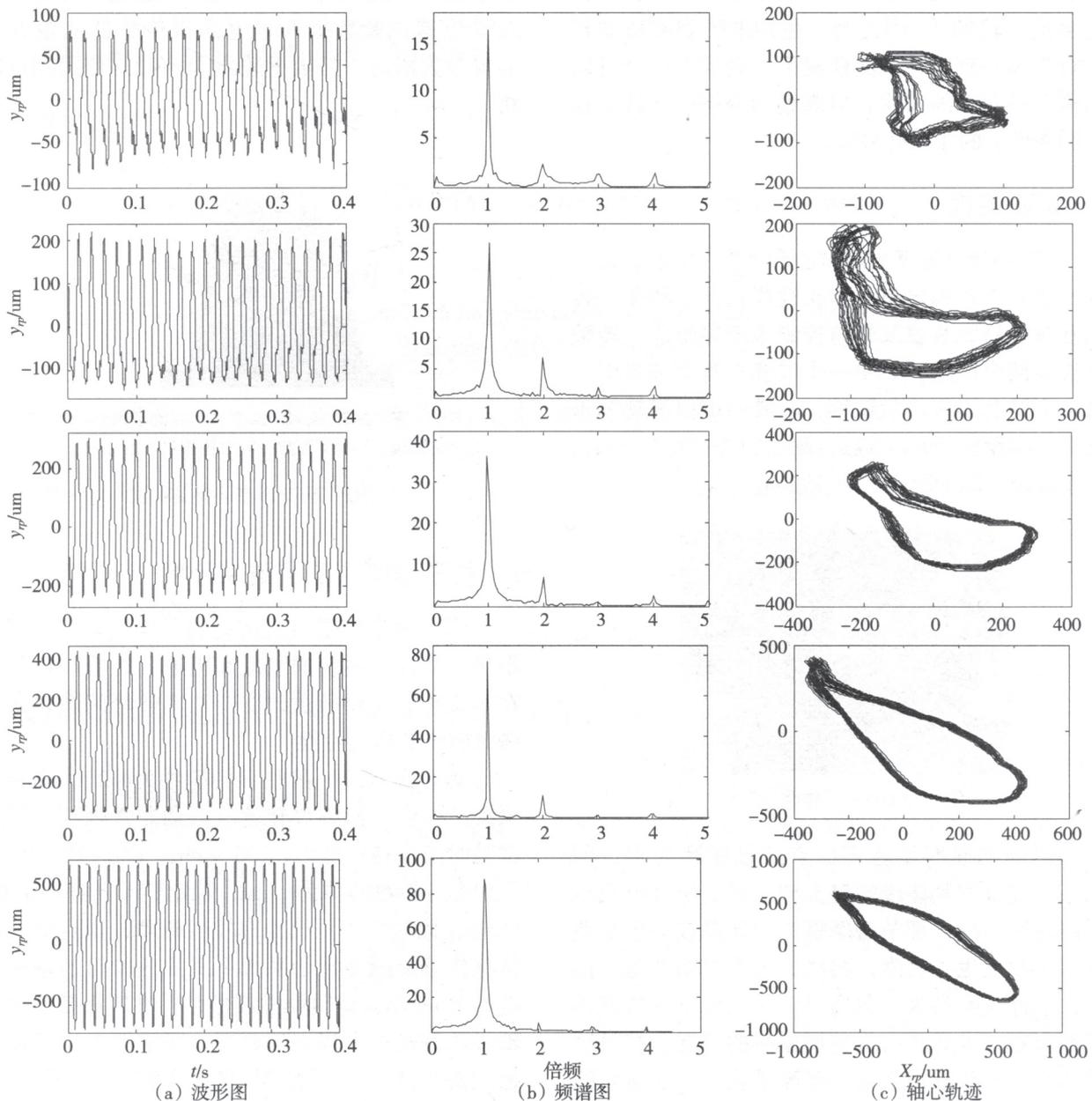


图4 转子系统发生轻微碰摩时随转速变化的振动响应

1X成分外, 还出现了很明显的2X, 3X, 4X等高倍频成分, 并且随着转速增加, 高倍频成分不再明显, 此时主要表现为转子的不平衡作用; 从轴心轨迹上可以看到, 轴心轨迹上都有“尖角”, 轨迹线总是向左方倾斜。

调节碰摩装置上的螺栓改变碰摩间隙, 实现转子系统由轻微碰摩到严重碰摩。调节电机转速实现转子系统发生严重碰摩时随转速变化振动响应, 振动响应情况如图5所示, 由图可以看出, 转子系统发生严重碰摩时, 当 $n=1\ 895\ \text{r/min}$ 时从波形上可以看出发生明显的波峰“削波”现象, 频谱上除了1X成分外, 还出现了很明显的2X, 3X, 4X等高倍频成分, 轴心轨迹不规则;

当 $n=2\ 264\ \text{r/min}$ 时, 时域波形严重削波, 频谱上不仅有1X, 2X, 3X, 4X等高倍频出现, 并且在1X, 2X, 3X, 4X附近频谱也有连续迹象, 轴心轨迹变得紊乱, 此时转子系统运动属于混沌运动; 当 $n=2\ 700\ \text{r/min}$ 时, 时域波形不规则, 频谱上2X幅值大于1X, 同时在2X, 3X频谱上出现涡动频率与旋转频率的和频与差频, 轴心轨迹比较紊乱; 当 $n=3\ 345\ \text{r/min}$ 时, 时域波形严重削波, 频谱上1X幅值最大, 同时在1X, 2X, 3X频谱上出现涡动频率与旋转频率的和频与差频, 轴心轨迹比较紊乱; 当 $n=3\ 762\ \text{r/min}$ 时, 时域波形严重削波, 频谱上除了1X, 2X等高倍频外, 还出现了明显的 $X/2$ ,  $3X/2$ ,  $5X/2$ 等分数倍频, 轴心轨迹比较紊乱。

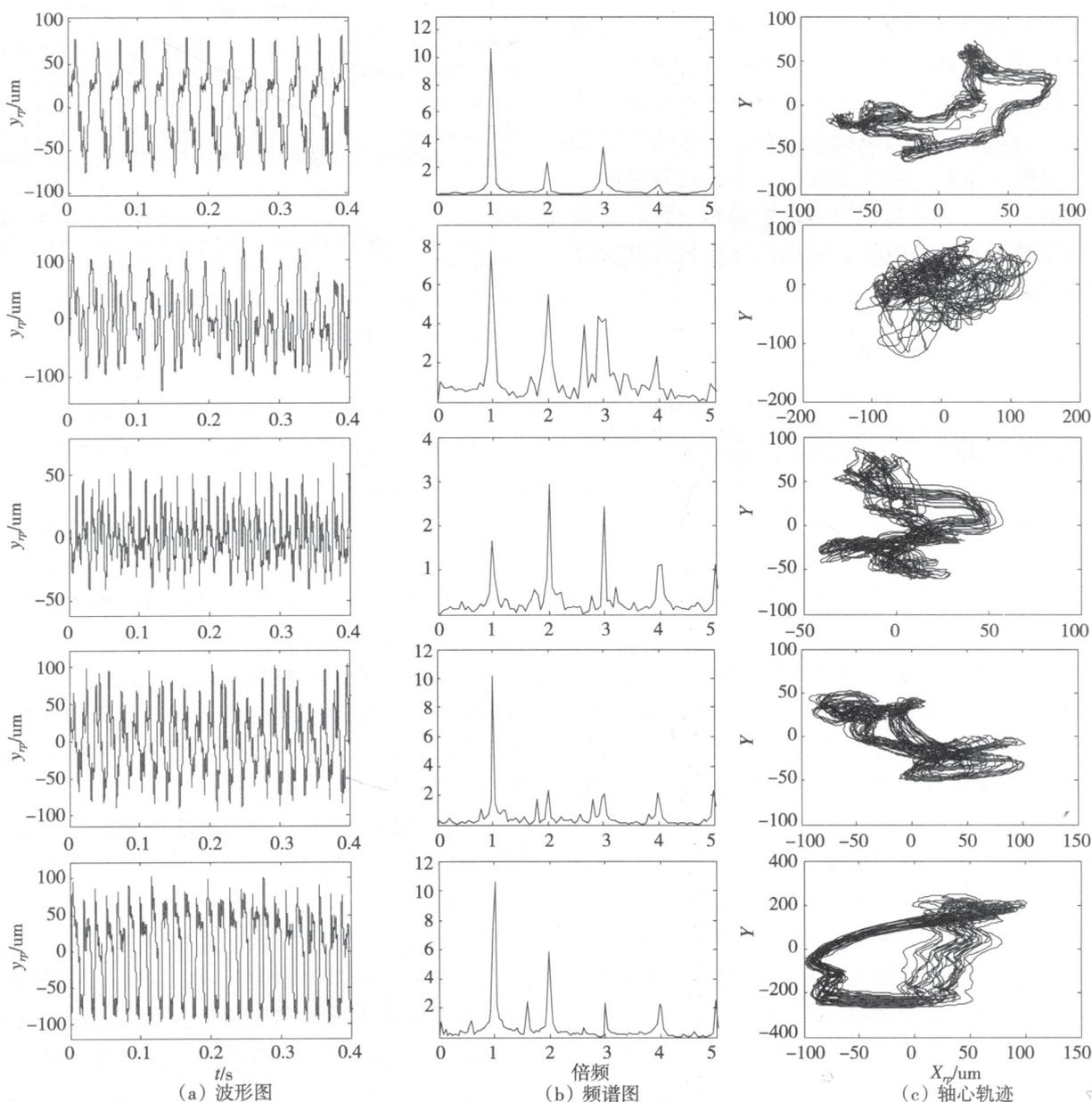


图5 转子系统发生严重碰摩时随转速变化的振动响应

文献[8]指出,转静间严重碰摩时,在波形图上会发生波形“削波”现象,频谱上出现涡动频率与旋转频率的和频与差频。试验结果与该结论充分吻合,从而验证了本文试验中碰摩装置的有效性。

### 3 结 论

本文运用ZT-3转子碰摩故障试验台,设计了一种可以模拟多种碰摩形式的机构,观察碰摩转子发生碰摩时的振动情况。同时利用波形图、频谱图、轴心轨迹图分析了系统在碰摩发生后的非线性响应,而且通过改变转速来研究碰摩转子系统的振动。从实际系统中观察到了倍频和分频振动现象,在某些情况下,除了会出现 $X/2$ ,  $3X/2$ 等 $1/2$ 分数倍频成分以及 $2X$ ,  $3X$ 等高倍频谱成分外,还会出现 $X/3$ ,  $2X/3$ 等 $1/3$ 分数倍频成分。随着碰摩的加剧,频谱成分更复杂,分布范围也更广,碰摩严重时,会发生混沌现象,此时频谱是连续的。这一现象与理论仿真结果相一致,说明了该碰摩装置的有效性,对提高碰摩故障试验研究有一定的积极意义。

### 参 考 文 献

[1] Chen G. A new rotor-ball bearing-stator coupling dynamic model for whole aero-engine vibration [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2009, 131(6): 061009-1-061009-9.

[2] Ma H, Yu T, Hana Q, et al. Time-frequency features of two types of coupled rub-impact faults in rotor systems [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, (321): 1109-1128.

[3] Chu F, Lu W. Experimental observation of nonlinear vibrations in a rub-impact rotor system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, (283): 621-643.

[4] 刘耀宗, 胡笃庆. Jeffcott转子碰摩故障试验研究[J]. 振动工程学报, 2001, 14(1): 96-99.

[5] 周海伦, 陈果, 李飞敏. 转子-滚动轴承耦合系统的转静碰摩故障分析与智能诊断[J]. 振动与冲击, 2008, 27(10): 90-94.

[6] 胡笃庆, 温熙森. 转子碰摩故障振动特征的数值分析与辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 71-73.

[7] 卢文秀, 褚福磊. 转子系统碰摩故障的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(5): 71-73.

[8] 盛兆顺, 尹琦岭. 设备状态监测与故障诊断技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

### 作 者 简 介

曲秀秀(1985—),女,山东德州人,硕士研究生,主要从事航空发动机状态监测与故障诊断、非线性转子动力学等领域研究。

陈果(1972—),男,四川武胜人,教授、博士生导师,主要从事航空发动机状态监测与故障诊断、非线性转子动力学、智能诊断与专家系统、机器学习与知识获取、图像处理及模式识别等领域研究。

乔保栋(1985—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事航空发动机状态监测与故障诊断、非线性转子动力学等领域研究。