

文章编号:1000-8055(2011)10-2200-07

高速压气机涡轮转子结构轴系非线性 振动性能试验

杨金福¹, 陈 策², 刘玉晗^{1,3}, 韩东江¹

(1. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190;

2. 中国人民解放军 总参陆航研究所, 北京 101121;

3. 辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要: 基于气动轴承与轴系耦合调频技术,对高速压气机涡轮转子结构的空气循环制冷机轴系进行非线性振动性能的试验研究,进一步分析了柔性轴系存在转子运动、轴承失稳及碰摩故障的一些非线性特征. 研究表明:在保证转速设计裕度的前提下,工作转速由 40 000 r/m 提高到了 60 000 r/m.

关 键 词: 高速空气循环制冷机; 气动轴承; 轴系稳定性; 耦合调频技术; 非线性振动

中图分类号: TH133.3

文献标志码: A

Experimental on nonlinear vibration characteristics of high-speed rotor bearings system with compressor and turbine structure

YANG Jin-fu¹, CHEN Ce², LIU Yu-han^{1,3}, HAN Dong-jiang¹

(1. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Research Institute of Army Aviation, The General Staff Headquarters,

The Chinese People's Liberation Army, Beijing 101121, China;

3. College of Petroleum Engineering,

Liaoning Shihua University, Fushun Liaoning 113001, China)

Abstract: Based on gas-dynamic bearings and frequency coupled modulation of rotor-bearing system, the characteristics of rotor bearing system's nonlinear vibration experimental investigations were applied to high-speed air cycle refrigerator. Furthermore, some nonlinear characteristics, for example, the motion of rotor, bearings instability and rub-impact which always happen on the flexible shaft, were analyzed. The results show that, if the design margin of safe speed is guaranteed, the steady running speed of the rotor-bearings system can be effectively increased from 40 000 r/min to 60 000 r/min above.

Key words: high-speed air cycle refrigerator; gas-dynamic bearings; steady characteristic of the rotor-bearings; frequency coupled modulation; nonlinear vibration

气体润滑轴承与滚动轴承或滑动轴承相比,具有转速高、结构简单、使用寿命长等性能优势。

因此在飞机环控系统、低温工程、微型燃气轮机等领域得到了广泛的应用^[1-5]。空气循环制冷机属于

收稿日期:2010-11-07; 修订日期:2011-02-24

作者简介:杨金福(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,研究员、博士生导师,博士,主要从事转子动力学研究。

高速旋转的涡轮机械. 近年来, 由于飞机、坦克等领域制冷技术进步与应用条件的需求, 对制冷机性能要求也越来越高, 逐渐向转速高、微型轻结构等方向发展, 但是, 在提高性能的同时, 柔性轴系设计与制造的难度也逐步增加, 尤其是轴系非线性振动失稳等问题更为突出^[6-7].

本文根据气体轴承润滑理论与轴系耦合调频技术, 采用新型气动轴承及压气机涡轮转子结构的轴系, 进行了较深入的非线性振动性能的试验研究, 其目的就在于研制高速压气机涡轮转子结构能够尽可能地避开耦合共振频率, 有效地抑制、消除或控制气膜涡动及振荡特性的轴系结构.

1 气动轴承性能与轴系耦合调频技术

空气循环制冷机在飞机、车载、船舶等交通领域的性能优化主要体现在质量、体积、系统及工作环境等指标. 通常在选择合理的压气机压比与涡轮膨胀比的前提下, 转速越高、体积越小、质量越轻, 并且制冷机效率越高, 整个制冷系统性能越好. 因此, 提高空气制冷机转速的关键技术是取决于轴承润滑与轴系稳定性^[8-10].

文献[11]针对三种典型的滑动轴承、滚动轴承及自润滑轴承的结构、性能及其特点的对比, 成功研制出了石墨合金轴瓦形式的气体润滑轴承. 这种新型轴承与滚动轴承或滑动轴承相比, 一般具有结构简单、功耗低、工作环境适应性好的特点, 不但克服了常规油质润滑轴承在耐磨、环境等性能指标方面的不足, 而且在高转速、高精度、长寿命、抗冲击性能强、温度适用范围广($-50 \sim 500^{\circ}\text{C}$)等方面具有十分显著的性能优势. 但是针对轴系稳定性难以控制的缺点, 还需要采用轴系耦合调频技术与非线性振动分析及故障诊断技术来解决.

通常在高速旋转机械的轴系设计及工程实践中, 往往低频涡动耦合振动频率是轴系产生运动失稳的条件, 耦合振动幅值导致轴颈偏心率大于工程允许或规定的最大安全值 $\epsilon_{\max}$ 的结果才是判别轴承或轴系运动失稳的依据. 例如在升速过程中, 如果轴承低频涡动频率不在转子临界转速区域就不会发生油膜振荡现象; 如果采取转子快速通过临界转速区域, 只要是振动的幅值不超过规程的规定值, 那么轴系仍然是安全稳定的. 所以根据转子临界转速产生横向自由振动与低频谐波耦合共振的机理, 有效地控制轴系外载荷扰动、结构设计、轴承润滑剂的物性和转子运动行为等参数

对轴承或轴系运行稳定性的影响, 满足偏心率应当小于轴承或轴系设计的最大安全值 $\epsilon_{\max}$, 就能实现对轴系运动稳定性的有效控制. 因此文献[12]结合工程实际提出的轴承或轴系工程稳定性判别的准则: 轴系无论是转子在涡动、振荡, 还是处于混沌状态下工作, 只要根据设备的具体情况有效调整外扰动载荷、结构、物性和转子运动行为等参数的合理匹配, 有效地控制转子运动的位移边界 ($\epsilon \leq \epsilon_{\max}$), 确保偏心率小于最大安全值 $\epsilon_{\max}$, 轴系则仍能稳定工作. 因此, 耦合调频技术是利用 2 个(或 2 个以上)振动频率之间通过相互作用而彼此影响的机理, 实现轴承或轴系频谱振动能量优化的一种调整方法, 其目的是提高轴承或轴系稳定工作转速与设计裕度.

2 转子性能试验方案及测试系统

采用高压空气直接驱动涡轮膨胀制冷转子, 相应的高速循环制冷机控制与振动测试分析系统如图 1. 由空气压缩机提供压力为 $0.7 \sim 0.85 \text{ MPa}$ 、温度为 $21 \sim 26^{\circ}\text{C}$ 的气源, 经过滤稳压阀降到 0.6 MPa 和 0.7 MPa 后, 分别为动力涡轮与空气轴承供气, 并且利用主调节阀控制高压空气流量来调整动力涡轮带动转子旋转; 在压气机与涡轮端部分别布置两个电涡流传感器来测量 X 和 Y 方向的振动幅值, 另外在压气机端部或在涡轮端部, 布置一个转速测量传感器. 各传感器采集到的信号都传送到数据采集仪, 再经过抗滤波放大器将信号输入到计算机中. 试验重点研究轴系非线性振动特性与稳定运行的设计裕度.

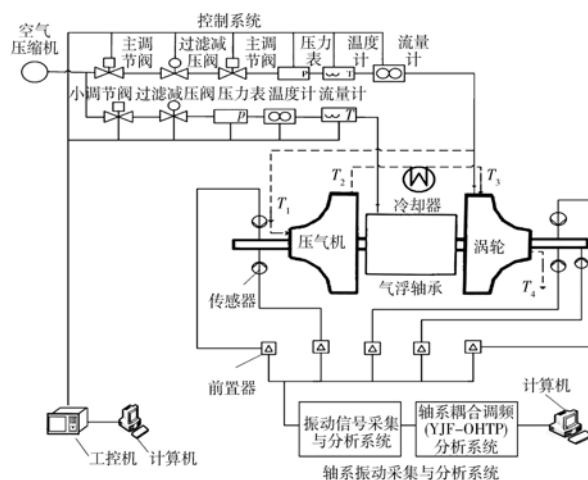


图 1 高速循环制冷机控制与转子振动测试分析系统
Fig. 1 Rotor vibration test and measurement system and the structure of high speed air cycle refrigerator

3 轴系振动性能试验结果及分析

3.1 转子振动失稳特征及工作转速的安全裕度

由表1可见,在升速过程中,压气机端出现两次振动失稳现象,前者是工频振动失稳,而后者是低频耦合振动失稳.试验结果表明:转子设计工作转速的安全裕度为26.67%,能够满足不小于20%的设计要求.

表1 转子升速过程振动测试结果

Table 1 Results of the vibration test during run-up

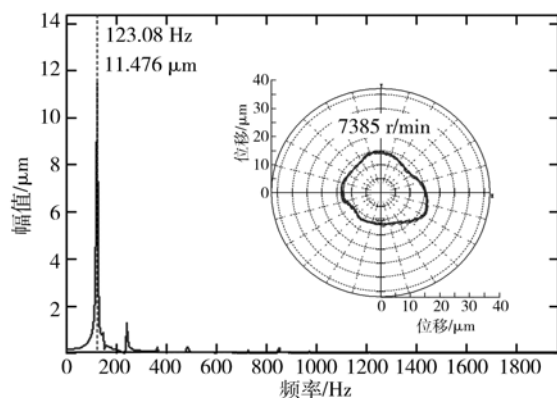
测点	转子临界振动		转子振动失稳		
	转速/ (r/min)	工频幅 值/ μm	转速/ (r/min)	工频幅 值/ μm	低频幅 值/ μm
涡轮端 X	12941	72	>76000	92	100
涡轮端 Y	13396	42		82	97
压气机端 X	12984	131		12	130
压气机端 Y	13396	114		14	132

3.2 转子动力特性分析

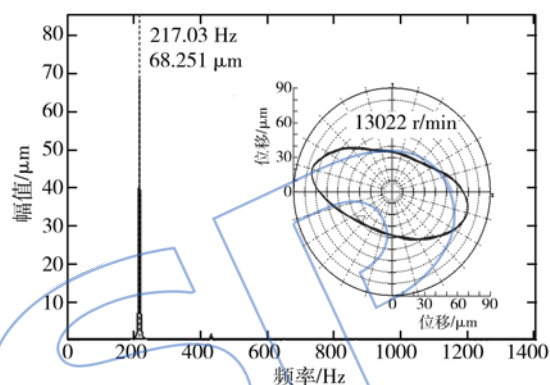
转子在转速为7385 r/min、临界转速为13022 r/min与0.2倍低频耦合共振转速为76154 r/min时测得的典型轴心运动轨迹与幅频特性如图2.显然,转速为7385 r/min与13022 r/min运行时的轴心轨迹为周期1,0.2倍低频耦合共振转速为76154 r/min时的轴心轨迹,具有准周期1特征.

转子在临界转速前,压气机端轴颈振动一直保持周期1的运动行为及特征,但是在涡轮端轴承却产生了气膜半速涡动现象(工频为156.59 Hz,低频为76.92 Hz).图3是转速为9368 r/min时压气机端与涡轮端转子运动的时域、幅频及轴心轨迹对比的行为特征.显然,由于气膜半速涡动的影响,涡轮端转子运动呈现典型周期2的轴心轨迹特征,时域波形与幅频特性也都明确地给出了低频振动的耦合特征,并且振动的幅值明显大于压气机端.这说明由于轴承与转子轴颈之间的流固耦合作用,涡轮端转子的振动行为是在轴承气膜涡动幅值的基础上,又叠加了轴颈横向自由振动的运动效果,并且两侧振动相互影响使得压气机端也存在低频振动特征如图4,从而导致转子具有气膜涡动增幅的动力学特性.

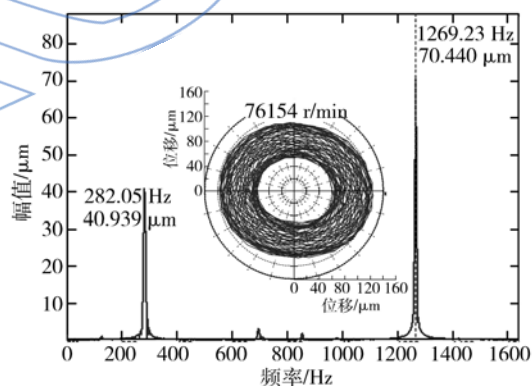
图5是方案一测得的典型转子升速过程振动的三维谱图,其中横坐标为频率,纵坐标为时间,该谱图颜色的深浅变化代表振幅值大小,颜色越



(a) 过临界转速前7385 r/min



(b) 临界转速13022 r/min



(c) 0.2倍低频耦合共振转速76154 r/min

图2 升速过程典型轴心运动轨迹与幅频特性

Fig. 2 Typical rotor motion orbits and the frequency and amplitude characteristics during run-up

亮表示振幅越大.从图5可看出,在转子升速过程中,转子工作频率由207.69 Hz(12461 r/min)升高到1269.23 Hz(76154 r/min),低频振动的频率则由215.38 Hz(12923 r/min)增加到284.62 Hz(17077 r/min),同时低频振幅逐渐增加.这说明转子转速增加直接导致了轴承内气膜的动压及其刚度的升高,从而提高了轴系的固有频率.由图5还可看出,在6692~76154 r/min的升速区间,低频振动频率突增,轴系呈现变刚度的支撑特性.

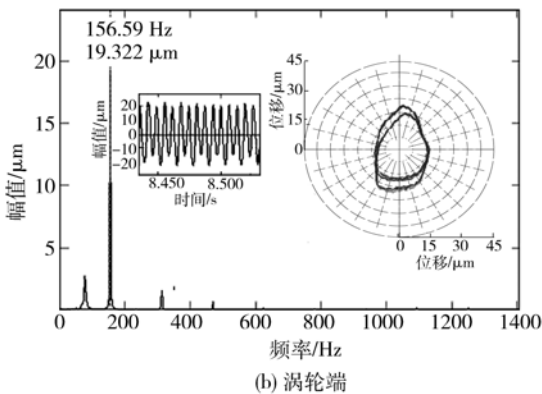
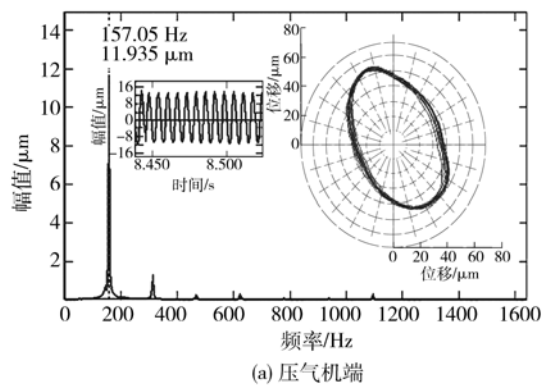


图 3 转速为 9368 r/min 时转子运动的行为特征
Fig. 3 Rotor motion characteristics at 9368 r/min

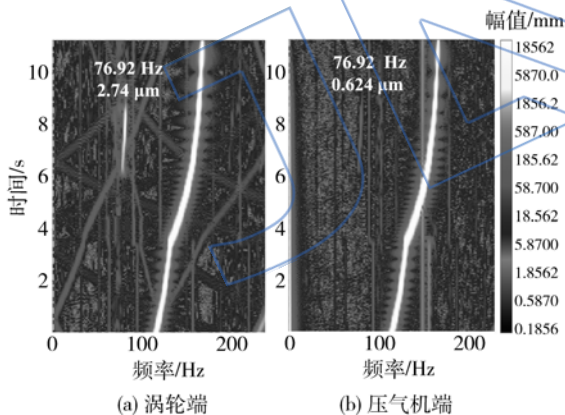


图 4 转子 0.5 倍频耦合振动的幅频特征
Fig. 4 Amplitude and frequency characteristics of rotor coupling vibration with half frequency

3.3 转子振动失稳及碰摩故障特征

图 6 是转子通过临界转速时,涡轮端无碰摩(图 6(a))与压气机端发生 1 个接触点(图 6(b))、2 个接触点(图 6(c))碰摩的典型轴心轨迹与振动分岔特征,图 7 也给出了低频耦合共振导致碰摩故障与将要退出碰摩过程中出现的典型特征.显然,临界转速碰摩特征是转子周期 1 运动的横向自由振动,并且碰摩瞬间轴颈被弹回导致振动位

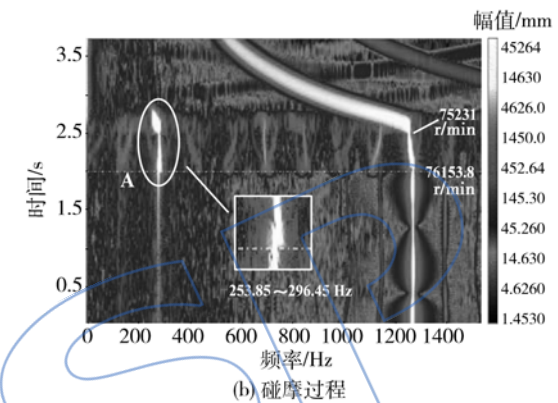
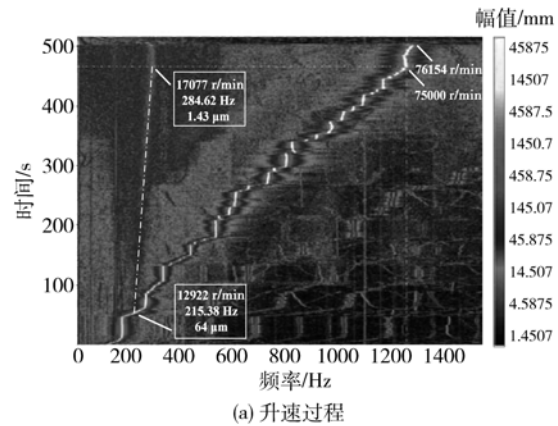
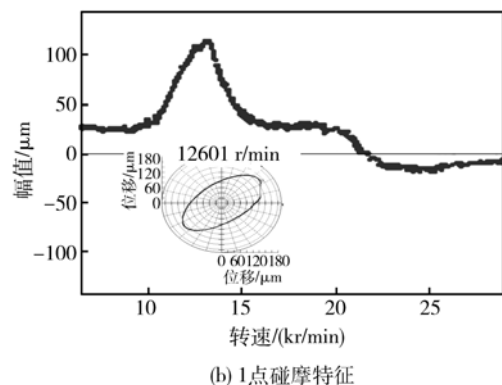
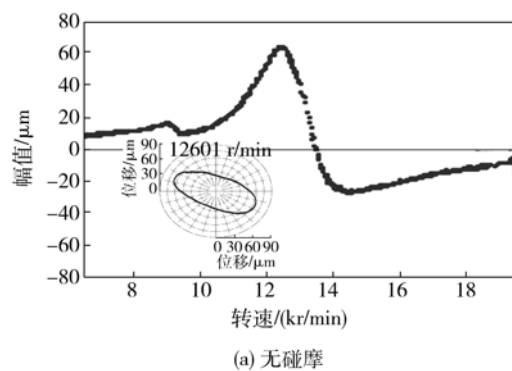


图 5 转子升速及碰摩过程振动的三维谱图
Fig. 5 Vibration three-dimensional chromatogram during run-up and rubbing



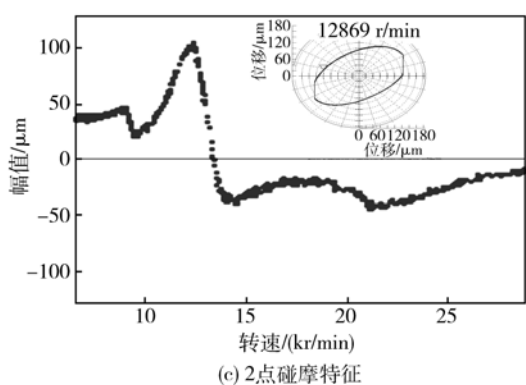


图6 临界转速碰摩的轴心轨迹与振动分岔特征
Fig. 6 Rotor rubbing orbits and bifurcation vibration characteristics at critical speed

移减小;低频耦合共振碰摩特征是转子呈现准周期1的高低频叠加运动,低频振动幅值急剧增大导致轴心轨迹运动存在严重的削峰现象。

压气机端转子由于低频耦合共振导致碰摩故障过程的典型轴心运动轨迹与幅频特征如图8。

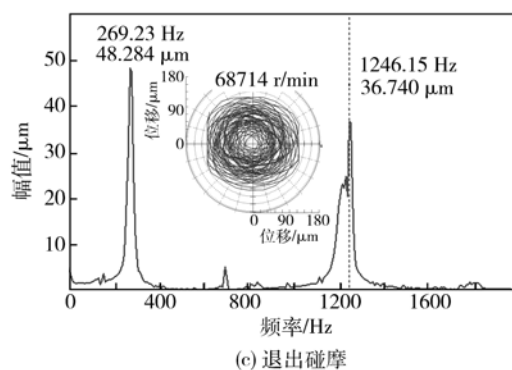
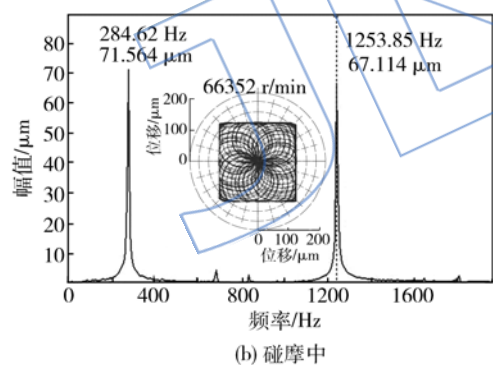
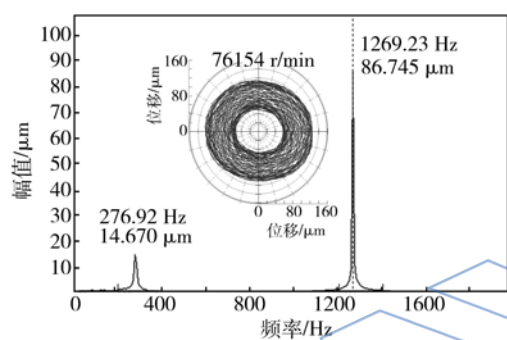


图7 低频谐波耦合振动碰摩过程及特征
Fig. 7 Sub-synchronous harmonic coupling vibration rubbing process and characteristics

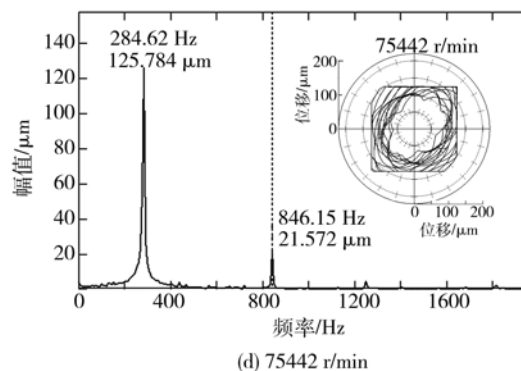
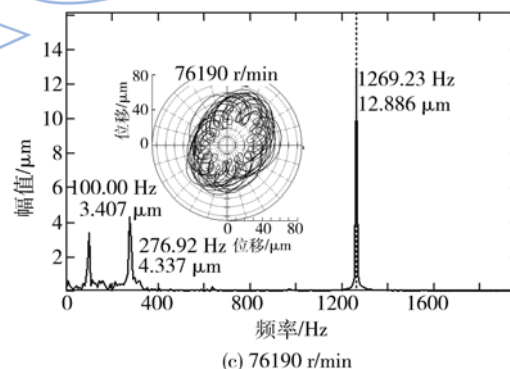
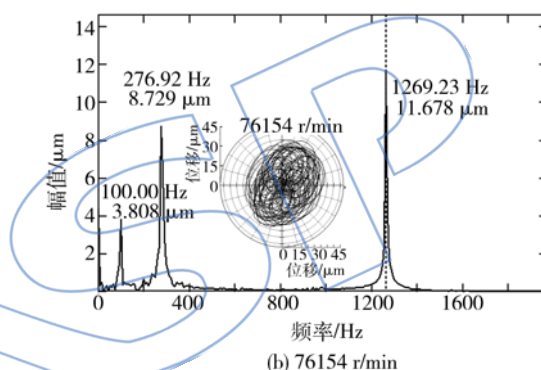
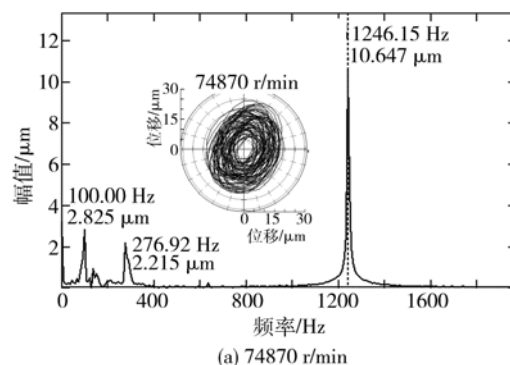
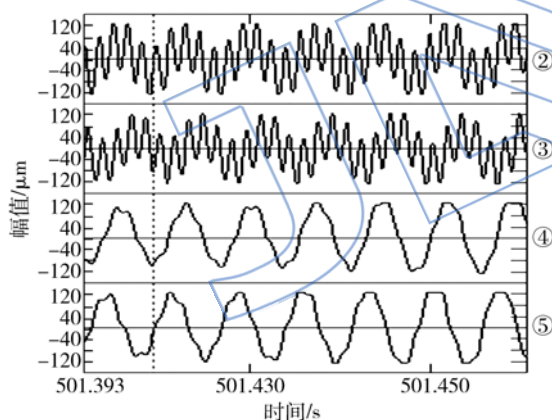


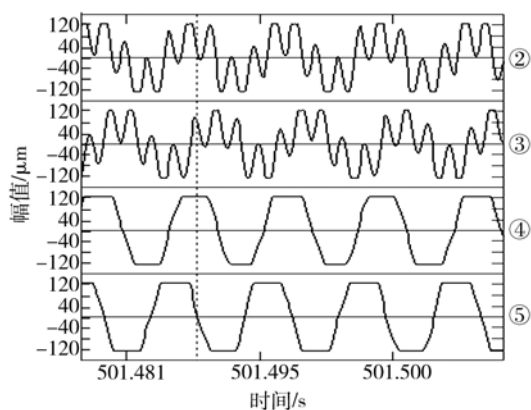
图8 低频谐波耦合振动的碰摩特征
Fig. 8 Sub-synchronous harmonic coupling vibration rubbing characteristics

转子在升速(74 870~76 266 r/min)过程中,低频耦合振动的幅值明显增大,轴心轨迹运动由周期 1 发展到准周期 1,振动频率是以工频为主,幅值逐渐增大;转子在碰摩导致降速过程中,振动频率是以低频为主,幅值逐渐减小. 同时在升速过程中,还存在 100.00 Hz 与 276.92 Hz 的双低频现象,其中 100.00 Hz 的频率与转速的变化无关,这是由于系统气流、管路结构等扰动因素引起的.

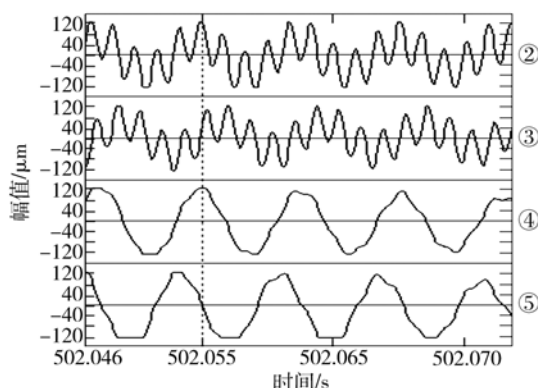
在转子低频谐波耦合碰摩振动过程的时域特征中如图 9 所示. 图 9(a)是在 501.393 s 转速升到 76 266 r/min 时轴系进入碰摩情况,图 9(b)是在 501.638 s 转速为 75 665 r/min 时轴系发生严重碰摩情况,图 9(c)则是在 502.046 s 转速降至 70 939 r/min 时轴系将要退出碰摩情况. 显然,压气机端(②和③)与涡轮端(④和⑤)分别测得振动波形存在明显的振动削峰特征,同时压气机侧、涡轮侧也分别呈现低频与工频耦合共振的失稳特征. 由此也进一步说明涡轮端工频碰摩现象是在压气机端发生低频碰摩波形基础上叠加的振动行为.



(a) 进入碰摩



(b) 严重碰摩



(c) 退出碰摩

图 9 低频谐波耦合振动碰摩过程的典型时域特征

Fig. 9 Sub-synchronous harmonic coupling vibration rubbing process and typical time domain characteristics

4 结 论

1) 针对气动轴承与压气机涡轮转子结构的轴系,应用轴系耦合调频技术与非线性振动测试及分析技术,既能能够合理地避开耦合共振频率,也能够有效地抑制、消除或控制气膜涡动及振荡特性.

2) 通过对气动轴承与压气机涡轮转子结构轴系的非线性振动性能进行分析,在保证转速设计裕度的前提下,能够有效地提高转子稳定运行的工作转速. 同时进一步阐述了高速空气循环制冷机柔性轴系存在转子运动、轴承失稳及碰摩故障的机理及一些典型的非线性特征.

参考文献:

- [1] 陈汝刚,侯予,袁秀玲,等. 气体轴承在高速透平机械中的应用[J]. 流体机械,2007,35(4):28-32.
CHEN Rugang, HOU Yu, YUAN Xiuling, et al. Application of gas bearings on high speed turbo-machinery[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(4): 28-32. (in Chinese)
- [2] 陈策. 轴承-转子系统非线性动力学行为及其耦合调频技术研究[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所,2008.
CHEN Ce. Research on rotor-bearings system nonlinear dynamics behaviors fluid-solid interaction and its frequency modulations[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [3] 杜建通. 空气制冷循环的特性及其在制冷空调中的应用的关键技术[J]. 低温与超导, 1999, 27(3): 33-39.
DU Jiantong. Characteristics and key technologies for air cycle refrigerating[J]. Cryogenics and Superconductivity, 1999, 27(3): 33-39. (in Chinese)
- [4] 林韶宁,夏葵,李军,等. 空气制冷机在飞机空调系统中的

- 应用[J]. 流体机械, 2004, 32(10): 46-49.
- LIN Shaoning, XIA Kui, LI Jun, et al. Application of air refrigerator in aircraft air condition system[J]. Fluid Machinery, 2004, 32(10): 46-49. (in Chinese)
- [5] 张振迎, 杨永, 陈艳华, 等. 空气制冷机在列车空调中的应用分析[J]. 制冷技术, 2009, 37(5): 57-65.
- ZHANG Zhenying, YANG Yong, CHEN Yanhua, et al. Analysis of air cycle refrigerator used in train's air conditioning system[J]. Refrigeration Cryo. and Supercond, 2009, 37(5): 57-65. (in Chinese)
- [6] 顾诵芬, 解思适. 飞机总体设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001: 224-229.
- [7] 王湘卿, 李中华. 装甲车辆空气循环空调系统的概况与发展[J]. 车辆与动力技术, 2006(1): 52-57.
- WANG Xiangqing, LI Zhonghua. Survey and development of air refrigeration conditioning for the armored vehicle[J]. Vehicle and Power Technology, 2006(1): 52-57. (in Chinese)
- [8] 陈元先. 旅客机环境控制系统的发展[J]. 航空学报, 1999, 20(Suppl.): S7-S9.
- CHEN Yuanxian. Aircraft environmental control system for the development and prospect[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(Suppl.): S7-S9. (in Chinese)
- [9] 苏兵, 侯予, 赵红利, 等. 飞机空调系统采用动压气体轴承的性能分析[J]. 低温工程, 2008(3): 50-54.
- SU Bing, HOU Yu, ZHAO Hongli, et al. Feasibility analysis on self-acting gas bearings of air condition system of plane[J]. Cryogenics, 2008(3): 50-54. (in Chinese)
- [10] Osborne D A, Andres L S. Experimental response of simple gas hybrid bearings for oil-free turbomachinery[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(3): 626-633.
- [11] 刘玉晗, 刘宝玉, 杨金福, 等. 高速空气循环制冷机转速性能的试验研究[J]. 化工学报, 2010, 61(S2): 183-186.
- LIU Yuhan, LIU Baoyu, YANG Jinfu, et al. Experimental investigation on rotor-dynamics performance for high-speed air cycle refrigerator[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2010, 61(S2): 183-186. (in Chinese)
- [12] 杨金福, 杨晟博, 陈策, 等. 滑动轴承-转子系统的稳定性研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(8): 1420-1426.
- YANG Jinfu, YANG Shengbo, CHEN Ce, et al. Research on sliding bearings and rotor system stability[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(8): 1420-1426. (in Chinese)