

文章编号:1006-1355(2015)04-0124-05

高速气体轴承—转子系统转速飞升故障的试验

付忠广¹, 边技超¹, 杨金福², 韩东江², 王正威¹, 于明涛¹

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206;

2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190)

摘要: 为了分析研究气体轴承—转子系统的转速飞升故障, 在基于气体静压径向—止推联合轴承支承的高速透平发电机试验台上开展试验研究。采用时间三维谱图、轴心轨迹、频谱分析及分岔图等非线性振动测试及分析方法, 给出转速飞升故障的特征及其发生条件, 并研究轴承供气压力及驱动气流量特性对转速飞升的影响。试验结果表明, 在一定范围内, 提高轴承供气压力能够推迟转速飞升, 在转速飞升过程中, 减小驱动气输入流量能够提前终止转速飞升, 提高轴承—转子系统稳定性。

关键词: 振动与波; 气体轴承—转子系统; 转速飞升; 轴心轨迹; 分岔图; 三维谱图

中图分类号: TH113.1; TH113.2

文献标志码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2015.04.028

Experimental Study on Speed Rise Faults of a High-speed Aerostatic Bearing-rotor System

FU Zhong-guang¹, BIAN Ji-chao¹, YANG Jin-fu², HAN Dong-jiang²

WANG Zheng-wei¹, YU Ming-tao¹

(1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Institute of Engineering Thermo Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract : In order to analyze speed rise faults of a gas bearing - rotor system, an experimental study on a high speed turbine generator was completed. The rotor was supported by aerostatic radial-thrust bearings. Using the methods of time-frequency-amplitude waterfall diagrams, shaft trajectory, frequency spectrum character analysis and bifurcation diagram, the typical features of the fault of the speed rise and its occurrence conditions were obtained. In addition, the influence of bearing gas supply pressure and flow rate characteristic on the speed rise was studied. Experimental results show that within a certain range, higher bearing gas supply pressure can put off the occurrence of the speed rise. In the process of speed rising, reduction of the drive-gas flow rate can terminate the speed rise earlier and raise the stability of the gas bearing rotor system.

Key words : vibration and wave ; gas bearing-rotor system ; speed rise ; shaft trajectory ; bifurcation diagram ; 3D spectrum diagram

分布式供能系统以小规模、小容量、模块化、分散式的方式布置在用户附近^[1], 可应用于学校、医

院、重要政府部门、边防哨所、海岛、坦克环控等领域。其关键技术之一为微小型动力技术^[2], 包括微小型燃气轮机技术、内燃机等。高速透平发电机作为分布式供能系统的核心机, 在发电的同时, 能够为用户供热和提供冷量, 应用前景广阔, 而其关键技术之一就是高速气体轴承—转子系统的稳定性研究。

国内对于电厂汽轮机飞升故障研究较多, 在发电厂汽轮机运行过程中, 会由于机组甩负荷等原因发生飞升故障, 国内的很多学者针对其进行了数值仿真、调节阀操作、计算及实验等方面的研究^[3-7], 但是针对高速气体轴承—转子系统飞升的研究较少。

收稿日期: 2014-11-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAA11B02);

中央高校基本科研业务费专项资金资助(13XS10);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014ZZD04)

作者简介: 付忠广(1963—), 男, 博士生导师。

E-mail: fzg@ncepu.edu.cn

通讯作者: 边技超(1987—), 男, 河北任丘人, 博士生, 主要研究方向: 旋转机械非线性振动及故障诊断。

E-mail: bianjichao111@163.com

而在高速气体轴承—转子系统稳定性研究领域,杨金福^[8]通过气动轴承与轴系耦合调频技术,使得高速压气机涡轮转子结构的空气循环制冷机轴系的工作转速大幅提高。韩东江^[9-11]通过大量试验,研究了轴承供气压力、升速率及气膜约束对轴承—转子系统振动特性的影响。王天煜^[12,13]通过理论分析及试验验证,分析了高速永磁电机振动产生的主要原因及应对措施,并计算了由柔性联轴器耦合的多跨转子轴系临界转速及振动模态。张亚飞^[14]则对燃气轮发电机组压气机喘振故障的原因及机理进行了详细分析,介绍了相应的表现特征及解决措施。葛向东^[15]针对某型航改燃气轮机压气机机匣振动超限故障,通过时频和振动幅值趋势分析,找出了碰摩的原因并得出了相应的力学模型机运动方程。钱强^[16]对振动监测技术的原理及典型振动故障的表现形式进行介绍。徐涛等人^[17]提出一种基于谐波小波的振动信号分析方法来解决航空发动机的整体振动分析问题。

本文通过搭建气体轴承—转子系统试验台,应用时间三维谱图、轴心轨迹、频谱分析及分岔图等非线性振动测试分析方法,给出了转速飞升故障的特征及其发生条件,并研究了轴承供气压力及驱动气流量特性对转速飞升的影响。

1 试验系统及测试方案

1.1 试验系统

高速透平发电机试验台布置如图1所示。试验

台本体即为高速透平发电机,为压气机轮与透平轮同轴、单跨、四磁盘结构,通过在磁盘之间布置线圈来实现发电功能。系统的动力源为空气压缩机提供的常温、高压气源,其能够提供轴承支路用气及透平轮驱动气。控制系统能够对试验过程进行远程控制,远程调节轴承气供气压力及驱动气流量。数据采集及分析系统能够对试验过程中产生的振动数据进行实时监测并提供实验数据分析平台。

通过在涡轮端与压气机端尾部分别布置两个相互垂直的电涡流位移传感器,测量水平和垂直方向的振动幅值,在压气机端开键相槽并布置电涡流位移传感器测量转速。

1.2 测试方案

首先,通过时间三维谱图、轴心轨迹、频谱分析及分岔图等非线性振动分析方法,给出了转速飞升故障的特征及其发生条件。

其次,在发生转子转速飞升故障时,通过调整驱动气流量(如表1)、调节轴承供气压力(如表2)来对飞升过程进行有效控制。

表1 第1与第2次试验驱动气流量对比

试验编号	驱动气流量(发生飞升时刻)
第1次	385.98 N·m ³ /h
第2次	298.45 N·m ³ /h(减小6%开度)

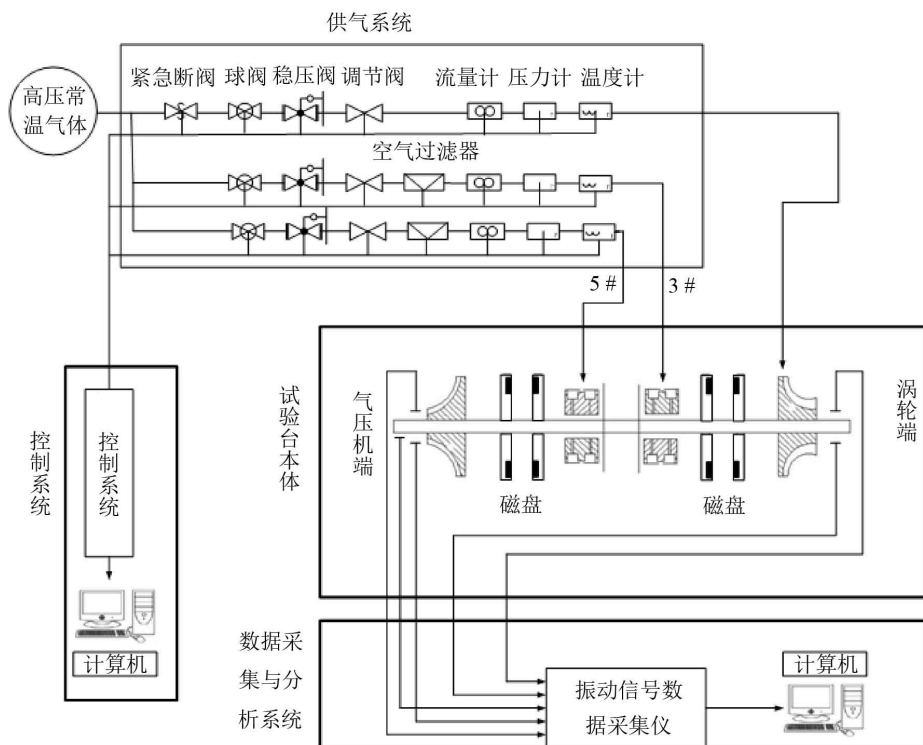


图1 试验台总体布置图

表2 第3与第4次试验轴承供气压力对比

试验编号	轴承供气压力
第3次	0.75 MPa
第4次	0.78 MPa

2 转速飞升机理分析

高速透平发电机飞升故障发生时一般有以下两个特点中的一个或者全部。

(1) 转速飞升前存在半速涡动或者低频振荡等低频振动现象;

(2) 转速飞升前工频振幅非常高或者发生在临界转速后。

除以上两个特点外,飞升故障发生前都存在的现象是提高驱动气输入流量,转子转速上升较小的现象。图2轴承—转子系统能量的传递转化关系,可以看出转子的输入能量主要分布于转子旋转的动能、低频涡动及振荡的能量、发生碰摩时机械能转化的热能以及流体润滑的阻尼耗散能量等等^[17]。

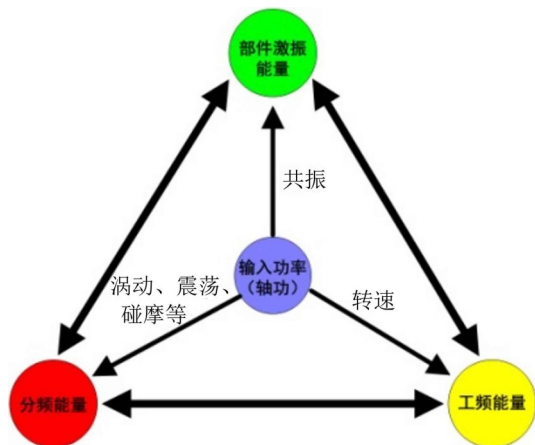


图2 轴承—转子系统能量的传递转化关系

根据能量守恒定律,增加主气路开度,即增加了输入功率,如果转子转速没有升高或者升高不明显,那么输入的能量就会聚集在分频或者工频振幅中,并且随着输入功率的增加,其积蓄的能量也不断增加,使得工频涡动振幅增大、低频振动能量积聚增加。

当到达一定程度后,由于涡动能量过大,将导致振幅超标,引起碰摩或者积蓄的能量在短时间内释放,导致转子转速在很短的时间内大幅升高。转速飞升后,随着能量的释放,低频消失,工频振幅下降。当积蓄的能量释放完毕后,转子升速率下降,飞升趋于结束,工频振幅重新开始增加。飞升转速的大小与飞升之前低频振动及同频涡动积蓄的能量大小相关。

3 转速飞升试验结果及分析

3.1 驱动气流量特性对转速飞升影响

图3为对飞升过程不采取任何措施的第一次试验的时间—转速—幅值三维谱图,其中的横坐标为频率,纵坐标为时间,而谱图中的颜色深浅代表振动幅值的大小,颜色越亮代表该处振幅越大。从图中可以看出,此次试验转速飞升发生在18 633 r/min,由图3与图4也可以看出,飞升之前的振幅一直较大,且随着输入功率的增加,转速上升缓慢。当给开度38%后,流量基本按照线性变化,最高到385.98 Nm³/h,而此时转速却18 633 r/min 飞升到38 320 r/min,飞升率为3 433.98 (r/min)/s。

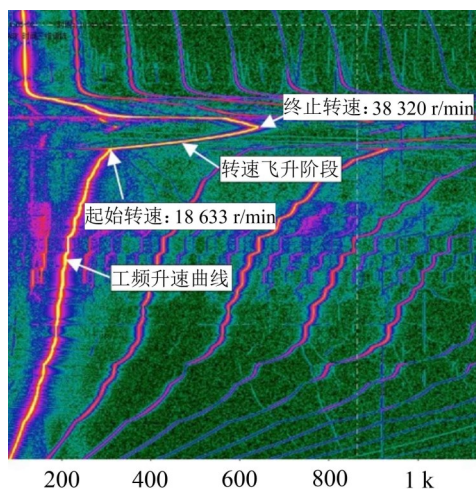


图3 第1次试验时间三维谱图

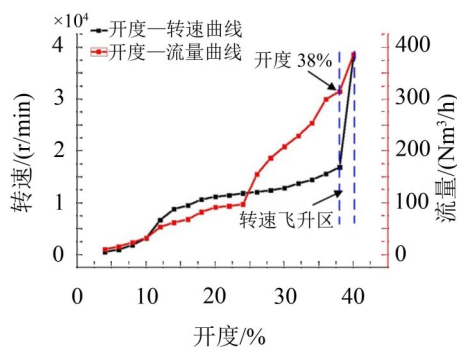


图4 第1次试验开度—转速—流量曲线

在飞升过程中,轴心轨迹基本按照周期一运行,频谱结构除工频外,基本没有其它频谱成分,工频振幅的变化规律为随着转速的飞升,工频振幅降低,当到达飞升末期时,工频振幅重新增加。典型轴心轨迹及频谱结构如图5所示。

从分岔图中,也可以看出,在转速飞升开始前,工频振幅是较大的,随着飞升的进行,工频振幅下降,到飞升末期,振幅重新增加,整个过程中除了飞升末期分岔图并没有发散,代表着转子是按照周期一运行。

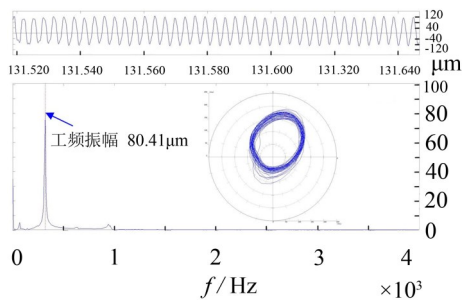


图5 第1次试验飞升前轴心轨迹及频谱结构

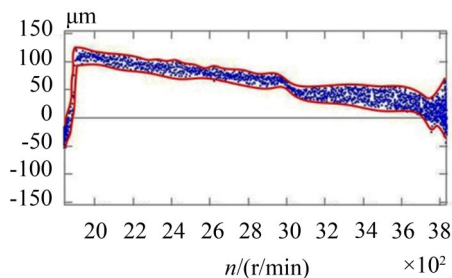


图6 第1次试验飞升过程分岔图

在相同的工况条件下,进行第2次试验,如图7所示,飞升前的时间三维谱图与第1次基本一致,即工频振幅较大,转速随着流量的增加而上升缓慢,同样在转速18 676 r/min,驱动气阀门开度38%时发生转速飞升。而在本次试验中,当转速开始飞升后,通过降低驱动气阀门开度(由38%降低到32%),将驱动气流量由第1次试验中的385.98 Nm³/h降低到298.45 Nm³/h。本次试验飞升终止转速为32 132 r/min,飞升率为3 371.59 r/min/s,飞升结束转速比第1次试验提前6 188 r/min。从图8可以看出,振幅的变化趋势与第1次试验基本一致,随着飞升的进行,振幅逐渐降低,到飞升后期,振幅重新开始增加。

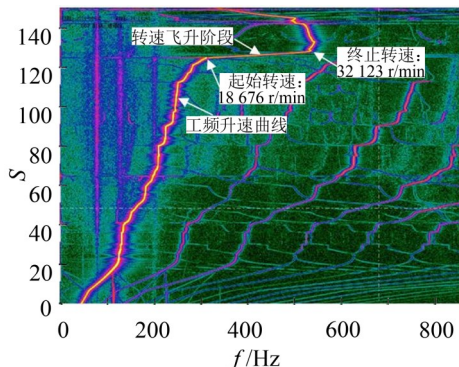


图7 第2次试验飞升阶段时间三维谱图

表3是两次试验飞升数据的对比,由表可以看出,在相同工况下,两次试验的飞升起始转速基本一致,由于飞升时输入流量的降低,第2次试验提前6 188 r/min飞升结束,两次试验的飞升率也基本一致。

3.2 轴承供气压力对转速飞升影响

第3次与第4次试验的飞升故障发生在临界转

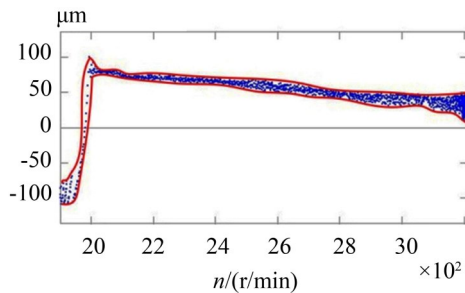


图8 第2次试验飞升过程分岔图

表3 两次试验飞升转速对比

试验编号	飞升开始转速	结束转速	飞升率
1	18 633 r/min	38 320 r/min	3 433.98 (r/min)/s
2	18 676 r/min	32 132 r/min	3 371.59 (r/min)/s

速后,且飞升前存在半速涡动现象。图9为第三次试验的时间三维谱图,本次试验的轴承供气压力为0.75 MPa,可以看到飞升的起始转速为7 696 r/min,终止转速为13 578 r/min,飞升率为466.09 r/min/s。半速涡动对应的轴心轨迹及频谱结构如图10所示。

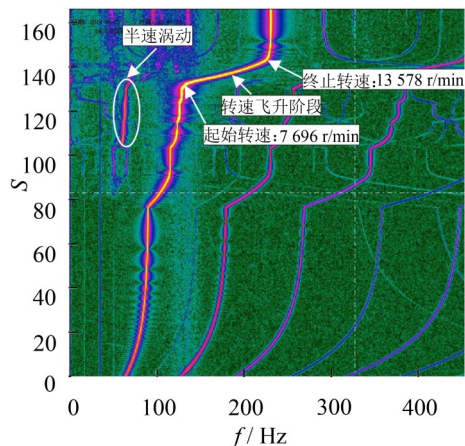


图9 第3次试验飞升阶段时间三维谱图

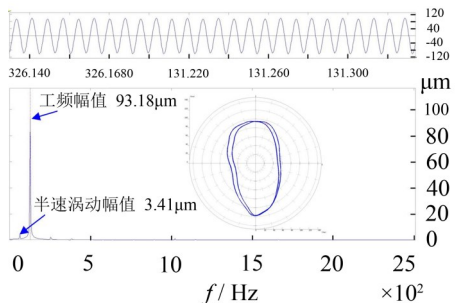


图10 第3次试验飞升前轴心轨迹及频谱结构

第4次试验是在第3次试验的基础上,其他工况条件不变,轴承供气压力由0.75 MPa增加到0.78 MPa。轴承转子系统的动态特性是有轴承的刚度和阻尼决定的,其中刚度影响的是共振频率,而阻尼则限制着涡动振幅。在第4次试验中,提高轴承供气压力消除了半速涡动现象,推迟了共振发生频率,降

低了共振振幅,即最终减小了飞升前能量的积聚,最终会影响到飞升的起始和终止转速。从图11与图12中可以看到,第四次试验中飞升起始转速为8 046 r/min,较第三次试验推迟了350 r/min。终止转速为13 359 r/min,较第三次试验提前了219 r/min,飞升率为397.74 (r/min)/s。且飞升前的振幅较第三次试验降低。两次试验的飞升数据对比见表4。

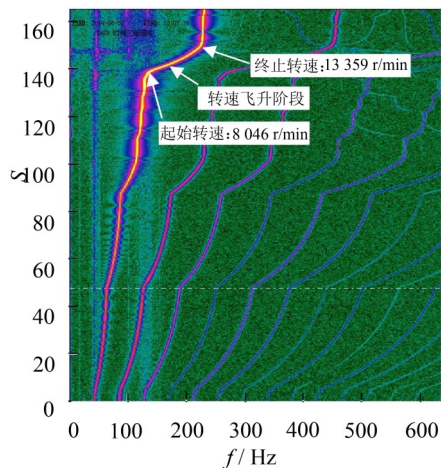


图11 第四次试验飞升阶段时间三维谱图

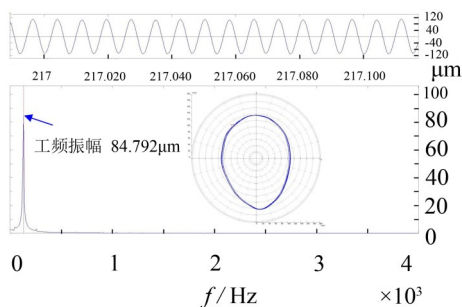


图12 第4次试验飞升前轴心轨迹及频谱结构

表4 两次试验飞升转速对比

试验编号	飞升开始转速	结束转速	飞升率
3	7 696 r/min	13 578 r/min	466.09 (r/min)/s
4	8 046 r/min	13 359 r/min	397.74 (r/min)/s

根据能量守恒定律,转子飞升的过程也是能量释放的过程,飞升之前积蓄的能量越多,飞升前后的速度差越大,转子飞升时的升速率越高,其过程也越难控制,不可控风险也越大。另外,转速短时间内的飞升也会导致轴向力瞬时的变化,可能导致轴承与转子止推面的碰摩,破坏轴承—转子系统稳定性,损坏轴承。所以通过调整轴承供气压力,控制主气路流量输入等措施来推迟或者提前主动结束飞升,最大限度的使飞升过程可控,可增加轴承—转子系统稳定性。

4 结语

对气体轴承—转子系统的转速飞升故障进行了

试验研究,分析了驱动气流量特性变化及轴承供气压力对转子飞升故障的影响,得出如下结论:

(1) 从时间三维谱图、轴心轨迹及频谱分析、分岔图等图谱上给出了转速飞升故障发生的条件及对应的特征;

(2) 在飞升过程中,降低驱动气输入流量,能够降低飞升的终止转速;

(3) 在转速飞升之前,提高轴承供气压力,能够推迟飞升起始转速,降低飞升终止转速,并降低飞升率,提高轴承—转子系统稳定性。

参考文献:

- [1] 王顺康,周荣成,任浩瀚. 分布式供能系统的运行分析及优化研究[J]. 华东电力,2012,40(12):2311-2313.
- [2] 隋军,金红光. 我国分布式供能关键技术研究进展[J]. 发电与空调,2012(4):1-4.
- [3] 阚伟民,胡鹏飞,谢诞梅,等. 1 000 MW 机组甩负荷转速飞升特性仿真研究[J]. 中国电力,2014,47(4):22-26+47.
- [4] 韩中合,赵志勇,吴瑞涛. 机组甩负荷中调节阀的动作过程对转速飞升的影响[J]. 汽轮机技术,2011,53(1):63-65+58.
- [5] 赵志勇. 汽轮发电机组甩负荷转速飞升特性的理论与实验研究[D]. 保定:华北电力大学,2011.
- [6] 房德明,张亚夫,李明亮. 汽轮机蒸汽容积对转速飞升影响的计算分析[J]. 汽轮机技术,1989,31(6):39-44+33.
- [7] 赵志勇,吴瑞涛,韩中合. 甩负荷试验中汽轮机最高飞升转速的预测方法与探讨[J]. 华北电力技术,2010,(10):17-19+26.
- [8] 杨金福,陈策,刘玉晗,等. 高速压气机涡轮转子结构轴系非线性振动性能试验[J]. 航空动力学报,2011,26(10):2200-2206.
- [9] 韩东江,杨金福,耿加民,等. 高速永磁电动机气体轴承—转子系统振动特性[J]. 航空动力学报,2013,28(8):1791-1796.
- [10] 韩东江,杨金福,张占一. 气膜约束对轴系固有频率影响的试验[J]. 航空动力学报,2012,27(7):1646-1651.
- [11] 韩东江,杨金福,陈昌婷,等. 轴承供气压力对静压气体轴承—转子系统动力学特性影响[J]. 推进技术,2014,35(9):1265-1270.
- [12] 王天煜,王凤翔. 高速永磁电机机组轴系临界转速及振动模态[J]. 工程力学,2012,29(7):264-269.
- [13] 王天煜,王凤翔,方程. 高速永磁电机机组轴系振动研究[J]. 振动与冲击,2011,30(9):111-115.
- [14] 张亚飞,张巍. 燃气轮机喘振故障诊断方法研究[J]. 华东电力,2013,41(2):475-477.
- [15] 葛向东,张德平,张东明,等. 燃气轮机刷丝与平衡盘碰摩的振动故障诊断[J]. 航空发动机,2014,40(1):17-21.
- [16] 钱强. 振动监测技术在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 噪声与振动控制,2014,34(2):164-168.
- [17] 徐涛,金艳. 航空发动机整机振动信号分析[J]. 噪声与振动控制,2012,32(6):184-188+207.