

文章编号: 1000 8055(2008)11-1988-05

转静件碰摩状态下的叶片振动载荷 和振动特性测试分析

李 勇¹, 姜广义², 王德友², 李其汉¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 研究转静件碰摩状态下叶片载荷测试方法, 测试叶片在碰摩力的冲击与摩擦力作用下的振动特性, 给出叶片和机匣受冲击力的时间载荷和频谱, 证明叶片在各种碰摩力作用下不发生共振, 只受弯矩作用等现象, 为旋转机械转静件碰摩作用下叶片的强度分析提供依据。

关 键 词: 旋转机械; 转静件碰摩; 应力; 载荷

中图分类号: V231.92

文献标识码: A

Test analysis of blades vibration load and vibration characteristics on the condition of rotor and stator rubbing

LI Yong¹, JIANG Guang-yi², WANG De-you², LI Qi-han¹

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shenyang Aero Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The blade load test method on the condition of rotor and stator rubbing was studied, the vibration characteristics of blade under rub impact forces and friction forces were tested, and the time load and frequency spectrum of blade and casing under walloping were presented. This proves that, under different rub impact forces, the blade doesn't generate sympathetic vibration, and is only subject to bending moment. All these provide a basis for intensity analysis of rotating machine on the condition of rotor and stator rubbing.

Key words: rotating machine; rotor and stator rub impact; stress; load

航空发动机转静件碰摩是一种经常发生的故障现象,随着发动机性能的不提高,要求转静件间隙越来越小,更加加剧了碰摩的可能性。

长期以来,转子碰摩故障的研究成果很多^[1-6]。人们重点研究了转子系统碰摩故障的振动特征、理论、实验及转子系统碰摩故障的诊断技术。对转子碰摩故障下的运动规律进行了仿真和实验,总结了转子系统碰摩故障时的运动规律并得出碰摩转子故障诊断的依据,即故障特征。然而,转静件碰摩时,对叶片振动载荷和振动特性研

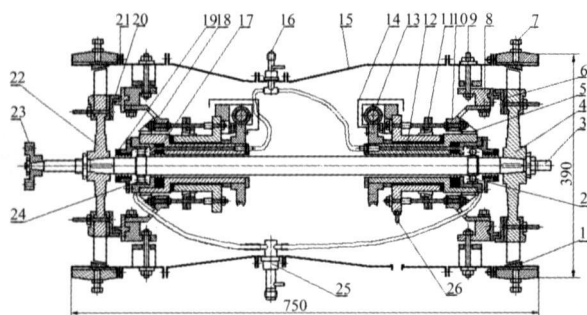
究的却很少。

在航空发动机中,转静件碰摩,包括单点碰摩、局部碰摩、整圈碰摩、多点碰摩等,可以归纳为粘着型(两种硬材料间)、刮除型(软硬材料间)两种典型碰摩类型。不同碰摩类型所产生的叶片与机匣间的碰摩力大小和碰摩面积不同,特别是相应的叶片振动应力和振型特征不同。叶片振动应力和振型特征决定了叶片承载模式和对整机振动的贡献,在碰摩不可避免的情况下,必须对叶片进行振动载荷和振动特性分析,从而能够进行磨损

程度控制和激发振动抑制, 实现对整机振动和叶片强度损坏性因素的定量评估。

利用带机匣航空发动机模型转子, 在机匣上安装有力传感器; 将一周转子叶片的其中两个加工成稍长, 并粘贴有应变计, 应变信号通过引电器、放大器记录于磁带机; 稍长叶片靠转子偏心与装有力传感器机匣部位发生碰摩, 其力信号与应变信号同时记录于磁带上。

为了制造两点以上碰摩的物理现象, 在机匣与碰摩环之间安装有 4 个顶紧螺栓, 旋转顶紧螺栓使其碰摩环向内凸起变形, 此时的碰摩形式是点接触。其结构简图如图 1 所示。



1 碰摩环; 2 球轴承; 3 轴; 4 涡轮盘; 5 间隙调节环; 6 涡轮端封严齿环; 7 碰摩环点变形顶螺栓; 8 中心调整环; 9 中心调整螺栓; 10 碗形支承架; 11 变刚度组件; 12 偏心轴; 13 蜗轮蜗杆传动付; 14 偏转指针; 15 机匣; 16 进油嘴; 17 后螺旋密封; 18 绝缘套; 19 前螺旋密封; 20 压气机端封严齿环; 21 机匣法兰边垫片; 22 压气机轮盘; 23 绳传动联轴器; 24 滚柱轴承; 25 回油嘴; 26 垂直激振头(水平激振头在同一截面的水平位置)

图 1 试验件结构简图

Fig. 1 Sketch of structure for experiment component

1 试验方案

大中型航空发动机转子大多设计为准刚性转子, 相应支撑系统为弹性, 因此在发动机工作转速范围内存在有支承临界转速, 即俯仰和平移振型。本文将要讨论的是在支承临界转速附近发生转静件碰摩情况下, 其叶片受冲击载荷和切向载荷的受力分析。首先在转子支承刚度最弱、不发生碰摩的前提下, 预先测出转子的俯仰临界转速是 1380 r/min。然后在此转速的上下各 2 Hz, 3 Hz, 5 Hz 和 10 Hz 的转速下进行各项碰摩试验, 分别测试碰摩冲击载荷和叶片动应力。其中碰摩冲击载荷是指机匣与转子叶片撞击时的载荷, 由机匣上安装的力传感器测得。叶片与机匣撞击时会受到弯曲载荷作用, 通过测试叶片的弯曲应力加以分析, 其测试方法是由叶片上粘贴的应变计并通过集流环测得。

试验工况主要是在转子系统支承刚度最强和最弱两种情况下, 进行单点碰摩、多点碰摩、偏摩故障的测试, 实测记录碰摩力和叶片振动应力数据。进而分析碰摩力大小对叶片振动应力的影响、碰摩面积与叶片振动应力之间的关系等。

在进行冲击载荷测试和动应变测试时, 需要根据力传感器和应变计测得的电信号进行冲击力 and 应变值的换算, 即需要确定传感器标定值。具体如下:

1) 用于冲击载荷测量的力传感器标定公式

对于质量 m 的弹性小球, 其自由落体撞击力传感器后并向上反弹, 记录得到冲击力的电压波形信号。设自由下落的高度为 H 、反弹的高度为 h , 则由动量原理得冲击力为 $F = m(\sqrt{2gH} - \sqrt{2gh})/dt$ 。其中, dt 为撞击作用时间, 可在冲击信号波形的时间轴上量取。设冲击信号波形的最大峰值电压为 U , 则力传感器的灵敏度为 $K = F/U$ 。在本试验中, 有 $m = 51.6 \text{ kg}$, $H = 556 \text{ mm}$, $h = 175.6 \text{ mm}$, $dt = 0.104 \text{ ms}$, $U = 7.949 \text{ V}$, 得到力传感器的灵敏度是 $K = 90.2482 \text{ N/V}$ 。

2) 应变计输出标定与叶片应力分解

实验中, 采用的 2311 型放大器的标定系数是 $B = 0.222 \mu\epsilon/\text{V}$ 。

在碰摩过程中, 叶片受到机匣的正压力和摩擦力的作用, 产生压缩和弯曲两种变形的组合。应变片贴在叶片的根部, 所测得的应变是正压力和摩擦引起的最大弯曲应变之和。考虑到由正压力引起的应变远小于弯曲应变, 认为试验测得的应变近似是叶片的弯曲应变 ϵ , 并可以根据 $\sigma = E\epsilon$ 计算得到叶片的振动应力。

3) 叶片与碰摩环的碰摩面积计算方法

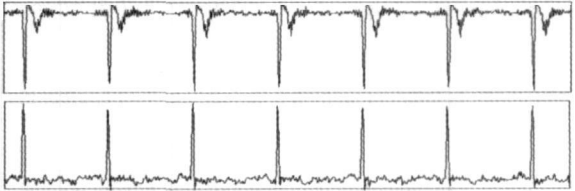
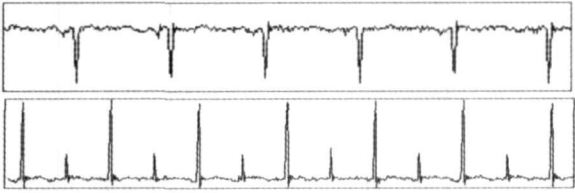
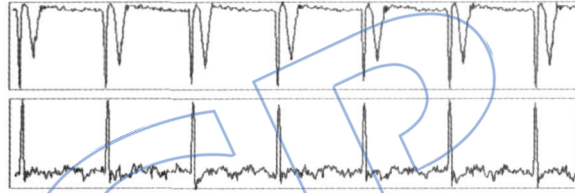
根据叶片与碰摩环发生碰摩时所测得的脉冲应变信号的持续长度来确定两者之间的碰摩面积。设采样频率为 f_s , 计数得到组成应变脉冲峰值的采样点数为 n , 则叶片与碰摩环发生碰摩时的接触时间为 n/f_s 。设转子回转周期为 T , 则碰摩面积所对应的角度为: $\alpha = 2\pi n/(Tf_s)$ 。考虑叶片叶尖的长度 B 和碰摩环内径 R , 便可计算出碰摩面积为 $S = BR\alpha$ 。在本实验中, $B = 14.7 \text{ mm}$, $R = 173 \text{ mm}$ 。

2 试验结果分析

2.1 实测碰摩力和弯曲应变的比较

对于支承刚度最弱的情况, 单点碰摩、两点碰

表 1 三种碰摩形式的实测碰摩力和弯曲应变
Table 1 Rub force and bending strain of three types of rubbing test

碰摩形式	实测参数	实测值	波形图
单点碰摩	碰摩力/N	21.11	
	弯曲应变 $\mu\epsilon$	12	
两点碰摩	碰摩力/N	19.91	
	弯曲应变 $\mu\epsilon$	13.2	
偏摩	碰摩力/N	18.85	
	弯曲应变 $\mu\epsilon$	9.0	

摩和偏摩三种典型故障的实测碰摩力和弯曲应变的波形及其计算值如表 1 所示.

2.2 叶片在俯仰临界转速附近不同转速下的碰摩力和弯曲应力分析

在转子俯仰临界转速 1 380 r/min 附近, 设计 780, 1020, 1200, 1260, 1380, 1500, 1560, 1680, 1980 r/min 9 个工作点, 由力传感器直接测得碰摩力波形曲线, 并由上节方法计算出碰摩力的大小. 由应变片测得弯曲应变曲线, 并由上节方法计算碰摩面积以及相应的振动应力大小. 此外还考

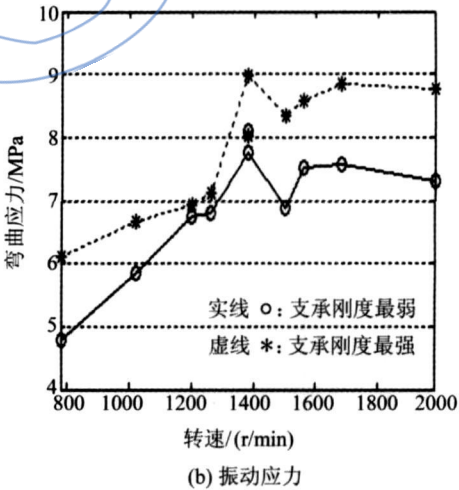


图 2 不同转速下的碰摩力和振动应力

Fig. 2 Rub force and vibration stress at various speed

虑了支承刚度最强和最弱两种情况. 表 2 列出了不同碰摩试验的碰摩力、碰摩面积和振动应力, 图 2 给出单点碰摩下的转速与碰摩力、振动应力的关系曲线.

由表 2 可以看出, 当叶片的振动应力相近的情况下, 转子支承刚性变强后, 单点碰摩和两点碰摩的碰摩面积变小, 而偏摩时面积要变大.

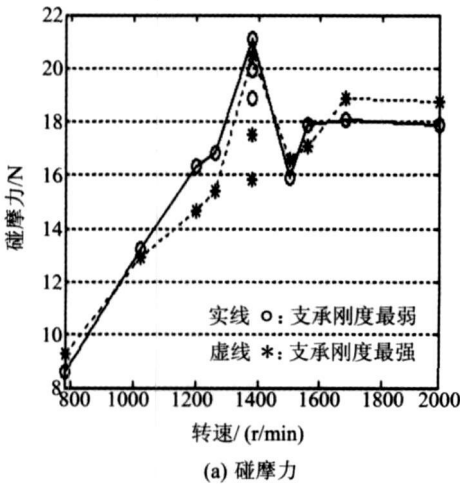


表 2 各种碰摩试验的碰摩力、碰摩面积和振动应力

Table 2 Rub force, rub area and vibration stress at different rubbing test					
支承情况	故障种类	转速/ (r/min)	碰摩力/ N	碰摩面积/ mm ²	振动应力/ M Pa
刚性最弱	单点碰摩	780	8.57	829.62	4.77
		1020	13.26	845.43	5.85
		1200	16.32	833.46	6.74
		1260	16.79	887.70	6.80
		1380	21.11	873.83	7.76
		1500	15.89	847.35	6.86
		1560	17.86	840.98	7.50
		1680	18.05	823.64	7.56
		1980	17.85	907.88	7.31
	两点碰摩	1380	19.91	792.33	8.11
刚性最强	偏摩	1380	18.84	1978.63	5.78
	单点碰摩	780	9.27	734.26	6.10
		1020	12.94	776.45	6.67
		1200	14.66	773.56	6.92
		1260	15.40	787.71	7.12
		1380	20.47	798.93	8.96
		1500	16.58	791.47	8.33
		1560	17.08	802.12	8.58
		1680	18.85	811.48	8.83
		1980	18.747 4	827.85	8.77
	两点碰摩	1380	17.52	765.16	8.01
		偏摩	1380	15.85	1985.63

2.3 碰摩程度逐渐加重时的碰摩面积和振动应力分析

在同一转速和支承刚度最弱的情况下, 单点碰摩的碰摩程度逐渐加重的试验中, 选取所测的碰摩面积和相应的振动应力进行分析. 随着碰摩程度逐渐加重, 碰摩面积随着增加, 振动应力也不断增大. 如图 3 所示反映了碰摩面积和振动应力随碰摩程度逐渐加重的变化趋势, 随着碰摩程度逐渐加重, 振动应力的上升明显快于碰摩面积的变化.

2.4 各碰摩状态下的叶片振动特性分析

本次试验在设计碰摩叶片时比其他叶片要长, 以使所测应变的叶片与碰摩叶片对应. 两点碰摩状态下叶片对称安装, 以保证在转速为 1560 r/min 时激振频率等于叶片固有频率. 碰摩叶片的一阶弯曲固有频率为 52 Hz. 在上述试验中, 记录下叶片的应变信号并进行分析, 其波形如图 4、5

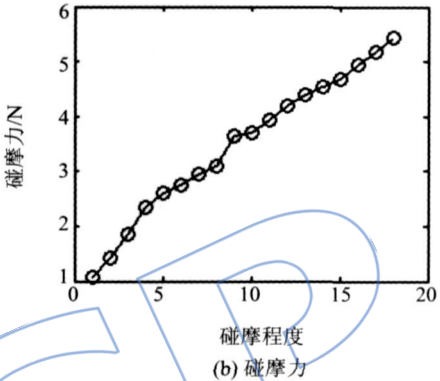
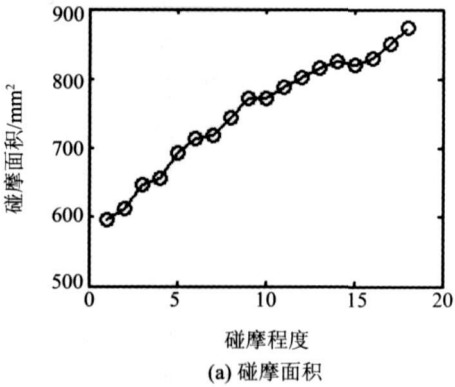


图 3 碰摩面积和振动应力随碰摩逐渐加重的变化趋势

Fig.3 Trend of rub area and rub force with gradually serious rubbing

所示. 图中横座标代表时间, 纵座标代表测量电压值. 图 4 应变为 37.698 με, 图 5 应变 39.552 με;

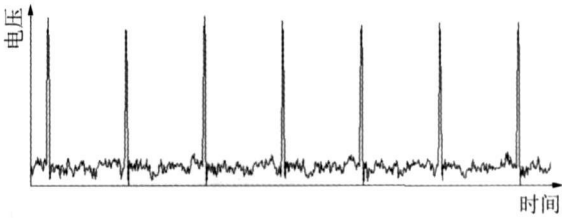


图 4 单点碰摩应变信号波形(1560 r/min)

Fig.4 Strain signal wave at one point rub(1560 r/min)

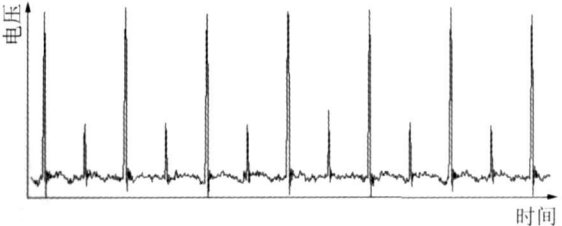


图 5 两点碰摩应变信号波形图(1560r/min)

Fig.5 Strain signal wave at two point rub(1560r/min)

叶片在与机匣碰摩过程中承受正压力和切向

力弯矩,对叶片的振动只有切向力的贡献.由上图和试验过程中表明,在叶片与机匣发生碰摩的各转速下,没有发生叶片共振现象.特别是转速在1560 r/min时(其两点碰摩的激振频率等于叶片的固有频率),也没发现叶片共振现象.

3 结 论

1) 在碰摩力接近相同的情况下,两点碰摩时叶片的振动应力要大于单点碰摩的振动应力,而偏摩由于是局部叶片的连续碰摩,其振动应力偏小.当支承刚性变强时,在相同的碰摩力作用下,振动应力随之变大.

2) 在单点碰摩时,叶片振动应力的变化随转速的升高有逐渐下降的趋势;在相同的转速下,随着碰摩力的增大,叶片振动应力也随着增大,并且响应脉冲信号宽度也在逐渐增大;在相同的转速下,随着碰摩程度的逐渐加重,叶片振动应力的变化明显快于碰摩面积的变化.

3) 转子在两种支承刚性情况下,其两点碰摩由轻到重的过程中(激振频率等于转子叶片的固有频率时),振动应力信号的频谱分析表明并没有出现叶片的共振频率.

参考文献:

[1] Choy F K, Padovan J, Batur C. Rub interactions of flexi-

ble casing rotor systems[J]. Transactions of the ASME, 1989, 111: 652-658.

[2] 王德友. 发动机转静件碰摩振动特征提取与理论研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1995.

WANG Deyou. Draw and theory analysis of fault character on rotor/stator rub vibration of engine[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1995. (in Chinese)

[3] 向玲, 唐贵基. 旋转机械动静碰摩故障特征研究[J]. 煤矿机械, 2005, (5): 33-35.

XIANG Ling, TANG Guiji. Study on fault characteristics of rotor to stator rub impact for rolling mechanism[J]. Coal Mine Machinery, 2005, (5): 33-35. (in Chinese)

[4] 李晓峰, 曹鹏举. 转子系统碰摩故障的理论与实验研究[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(1): 37-42.

LI Xiaofeng, CAO Pengju. Theoretic and experimental research on rub fault of rotor system[J]. Turbine Technology, 2007, 49(1): 37-42. (in Chinese)

[5] 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): 614-618.

LU Wenxiu, CHU Fulei. Experimental investigation of rotor rubbing faults[J]. J Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(5): 614-618. (in Chinese)

[6] 胡芑庆, 张雨. 转子系统动静件间尖锐碰摩时的振动特征试验研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(9): 777-779.

HU Niaoqing, ZHANG Yu. Experimental research on vibration characteristics of sharp rub impact between rotor and stator of a rotor system[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(9): 777-779. (in Chinese)