

风扇转子动特性试验与分析

葛向东, 高强, 路阳, 杨雷, 安中彦
(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 转子不平衡是引起发动机振动的主要原因。针对风扇转子工艺状态平衡良好, 但工作状态不平衡量较大所引起振动偏大的现象, 对其变化规律及影响因素开展转子动特性试验。采用卧式转子试验器测量风扇转子在工作转速范围内各截面的振动响应, 利用三圆法测算出转子动不平衡量在高、低转速间存在的明显差异, 主要是套齿连接结构刚度变化及叶片工作状态差异引起。通过窄带跟踪滤波提取出转子在各典型转速下基波弹性线, 发现风扇转子本身未发生较大挠曲变形, 为准刚体状态。其相位测试结果表明: 风扇转子与多功能轴间存在明显的非同步振动规律。

关键词: 风扇转子; 不平衡量; 动特性; 三圆法; 弹性线; 相位; 航空发动机

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.02.012

Test and Analysis of Dynamic Characteristic of Fan Rotor

GE Xiang-dong, GAO Qiang, LU Yang, YANG Lei, AN Zhong-yan
(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Unbalanced rotor was the main cause of engine vibration. In view of the phenomenon that the process state of the fan rotor was well balanced, but the vibration caused by the large amount of unbalanced working state was large, the dynamic characteristic test of the rotor was carried out for the variation law and influencing factors. A horizontal rotor tester was used to measure the vibration response of each section of the fan rotor in the working speed range. The three circles method was calculated by obvious difference between the rotor dynamic unbalance values at high and low rotational speed, which was mainly caused by the change of the structural stiffness of the socket connection and the difference of the blade working state. The fundamental elastic line of rotor at each typical rotational speed was extracted by narrow-band tracking filter. It was found that no large flexure deformation occur in the fan rotor itself, the fan rotor was quasi-rigid state. The phase test results show that there is obvious non-synchronous vibration law between the fan rotor and the multi-function shaft.

Key words: fan rotor; values of unbalance; dynamic characteristic; three circles method; elasticity line; phase; aeroengine

0 引言

随着旋转机械的飞速发展, 转子动力学的研究也在不断深入^[1-3], 但受客观条件的限制, 研究大多集中在理论分析、数值模拟和模拟转子的试验验证方面^[4-5], 对工程中航空发动机真实转子的试验研究很少, 且仅停留在转子超转、破裂、疲劳等强度试验层面, 而对于全尺寸航空发动机转子动力学试验研究尤为匮乏^[6-7]。航空发动机是1种复杂的高速旋转流体机械, 各部分无论在构造、材料、工艺以及运动形态上存在很大差别, 要从理论上做出严格、精确的动力学特性分析具

有很大难度^[8-9]。

本文利用卧式转子试验器, 测量风扇转子的振动响应, 评估工作转速区间内转子不平衡量变化规律, 分析得到风扇转子在典型转速下的工作弹性线, 研究风扇转子工作状态下动力学特性及结构影响因素^[10-11], 可为风扇转子振动控制研究提供借鉴。

1 试验方案

1.1 试验件

本次试验以风扇转子为试验件, 共分4种状态:

收稿日期: 2019-04-25 基金项目: 国防科技重点工程项目资助

作者简介: 葛向东(1986), 男, 高级工程师, 从事航空发动机整机振动及转子动力学试验测试工作; E-mail: usa29569721@126.com。

引用格式: 葛向东, 高强, 路阳, 等. 风扇转子动特性试验与分析[J]. 航空发动机, 2020, 46(2): 66-70. GE Xiangdong, GAO Qiang, LU Yang, et al. Test and analysis of dynamic characteristic of fan rotor[J]. Aeroengine, 2020, 46(2): 66-70.

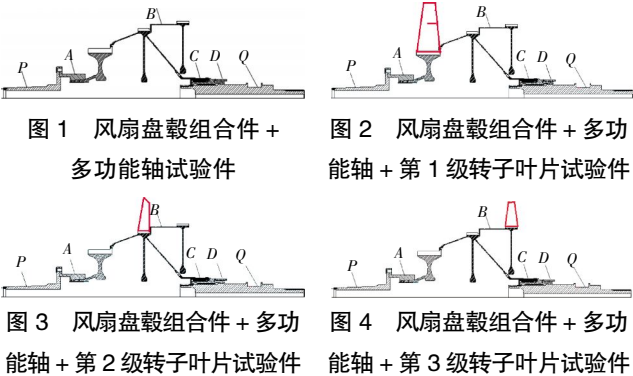
状态 1: 风扇盘毂组合件 + 多功能轴, 如图 1 所示;

状态 2: 风扇盘毂组合件 + 多功能轴 + 第 1 级转子叶片, 如图 2 所示;

状态 3: 风扇盘毂组合件 + 多功能轴 + 第 2 级转子叶片, 如图 3 所示;

状态 4: 风扇盘毂组合件 + 多功能轴 + 第 3 级转子叶片, 如图 4 所示。

为对比多功能轴安装紧度对转子动力学特性的影响, 将状态 1 又分为转子 2 级盘轴与多功能轴间 0.08 mm 和 0.13 mm 2 个过盈配合状态。



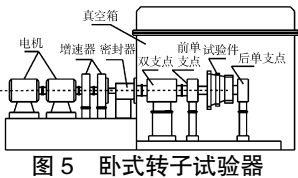
其中对状态 1 的试验件(风扇盘毂组合件 + 多功能轴)进行 800 r/min 低速工艺动平衡时, 应尽可能将其平衡量控制在 100 g·mm 以内。

在完成低速动平衡以后, 在平衡机上参照如图 1 所示位置测量 A、B、C 和 D 4 个位置的径向跳动值, 各测量面及基准面位置定义见表 1。

表 1 测量面和基准面位置说明		
位置	位置说明	备注
A	风扇第 1 级盘前	试验器状态下
B	风扇第 2 级盘后	
C	风扇第 2 级盘轴	
D	多功能轴	
P	平衡支撑面 1	试验器支撑
Q	平衡支撑面 2	试验器支撑

1.2 测试方案

本次试验在卧式转子试验器上进行。旋转试验器由动力电控系统、增速器、密封器、真空箱、试验转子支承系统、真空润滑系统、真空系统、液压开盖系统、冷却系统、电加热装置、测试系统等组成, 如图 5 所示。



风扇转子动特性参数测试系统如图 6 所示。

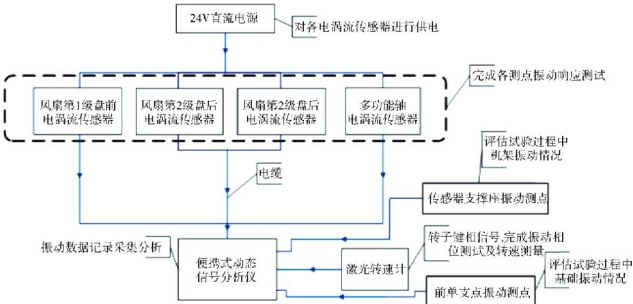


图 6 风扇转子动特性参数测试系统

在试验中, 应用位移传感器(电涡流传感器)测量各截面的振动响应, 传感器支撑座和单前支点布置加速度传感器用于评估试验中试验器基础振动环境。试验安装及测试如图 7 所示。

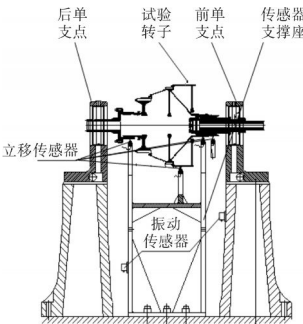


图 7 试验安装及测试

1.3 试验流程

- (1) 完成状态 1 转子试验件(风扇盘毂组合件 + 多功能轴)的平衡及径向跳动测量工作。
- (2) 将试验件安装到卧式转子试验器上, 首先进行重复性验证试验, 按调试转速谱开车 2 次, 对比 2 次开车的振动响应(如图 8 所示), 并记录设备支点振动、温度等参数。

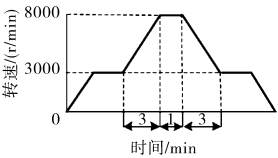


图 8 调试转速谱

- (3) 重复性试验验证通过后, 按转速谱进行正式试验, 如图 9 所示。每个台阶停留 1~2 min, 测量转子 A、B、C 和 D 位置的振动响应, 并记录设备支点振动、温度等参数。

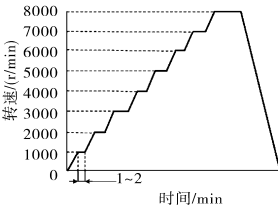


图 9 试验转速谱

- (4) 每个状态采用三圆法对风扇转子进行试重(3300 g·mm), 在配重面(配重面为第 1 级盘前和第 3 级盘后)3 次施加试配重(O 为不加配重情况), 试重位置 F、S、T 如图 10 所示。

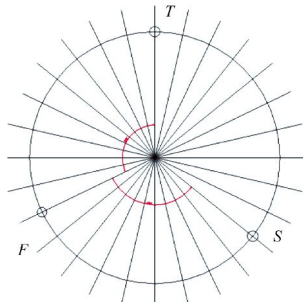


图 10 试重位置

(5)每次试配重均按要求运转,测量转子 A、B、C 和 D 位置的振动响应,采用三圆法计算风扇转子动不平衡量。

(6)完成上述全部试验后,对试验件进行平衡及跳动检查工作。

2 试验结果及分析

2.1 数据可信度分析

重复性验证试验结果如图 11 所示。

从图中可见,风扇转子盘毂 2 次开车振动重复性较好,数据可信度较高。

当转速为 4000 r/min 时,传感器测振支架存在共振,在后续试验分析中剔除该转速数据,在其他转速下试验器支撑及测振支架垂向振动远小于风扇转子振动,测试结果真实可用,见表 2。

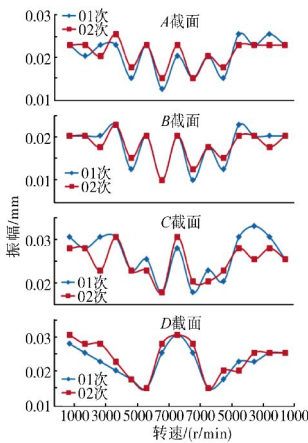


图 11 2 次开车过程中各截面振动响应

表 2 传感器支承座振动情况

$N/(r/min)$	A_{pk}/mm	$N/(r/min)$	A_{pk}/mm
1000	0.00033	5000	0.00330
2000	0.00051	6000	0.00203
3000	0.00356	7000	0.00191
4000	0.01448	8000	0.00081

注: N 为转速; A_{pk} 为传感器支承座振动最大点的峰值。

2.2 不平衡量计算

试验按照上述试验方案中试验件的状态顺序依次进行,测量转子 A、B、C 和 D 位置的振动响应,采用三圆法计算风扇转子动不平衡量,其试验中发现在 3300 g·mm 试重条件下^[12-13],在转速为 1000~2000 r/min 的范围内转子不平衡响应变化不敏感,故分析中剔除该转速,计算测试结果见表 3,并如图 12 所示。

从风扇转子在 5 种状态典型转速下不平衡量计算结果及趋势分析可知:在不同转速下,转子未带叶片状态不平衡量差异较小;风扇盘毂+第 1 级转子叶片状态不平衡量变化差异最大,高/低差大于 5000 g·mm。因第 1 级转子叶片尺寸最大,在工作状态下力学边界(如叶片凸肩、叶根配合状态或罩量)易发生变化,导致第 1 级转子叶片对不平衡量的影响明显大于第 2、3 级

表 3 动不平衡量测试结果

	$N/(r/min)$	$U_{m1}/(g \cdot mm)$	$U_{m3}/(g \cdot mm)$
风扇+多功能轴 (0.08 mm 过盈)	3000	4700 $\angle$ 107°	4500 $\angle$ 75°
	5000	1776 $\angle$ 141°	1570 $\angle$ 82°
	6000	1442 $\angle$ 91°	1070 $\angle$ 56°
	7000	1041 $\angle$ 170°	1090 $\angle$ 120°
	8000	1311 $\angle$ 196°	2200 $\angle$ 167°
风扇+多功能轴+ 第 1 级转子叶片	3000	6091 $\angle$ 60°	6482 $\angle$ 64°
	5000	6564 $\angle$ 65°	5870 $\angle$ 10°
	6000	2148 $\angle$ 58°	1269 $\angle$ 327°
	7000	755 $\angle$ 203°	1954 $\angle$ 193°
	8000	2623 $\angle$ 233°	4385 $\angle$ 158°
风扇+多功能轴+ 第 2 级转子叶片	3000	6233 $\angle$ 170°	5923 $\angle$ 65°
	5000	1919 $\angle$ 116°	1503 $\angle$ 60°
	6000	1063 $\angle$ 34°	760 $\angle$ 351°
	7000	548 $\angle$ 304°	1028 $\angle$ 261°
	8000	1150 $\angle$ 236°	2757 $\angle$ 225°
风扇+多功能轴+ 第 3 级转子叶片	3000	5819 $\angle$ 54°	2619 $\angle$ 60°
	5000	3173 $\angle$ 82°	1683 $\angle$ 60°
	6000	1020 $\angle$ 120°	565 $\angle$ 18°
	7000	1157 $\angle$ 259°	1264 $\angle$ 265°
	8000	1846 $\angle$ 247°	2211 $\angle$ 222°
风扇+多功能轴 (0.13 mm 过盈)	5000	1968 $\angle$ 60°	1935 $\angle$ 48°
	6000	2327 $\angle$ 39°	1316 $\angle$ 13°
	7000	1392 $\angle$ 46°	1221 $\angle$ 15°
	8000	1537 $\angle$ 73°	1213 $\angle$ 30°

注: U_{m1} 为第 1 级盘前动不平衡量; U_{m3} 为第 3 级盘后动不平衡量。

转子叶片的^[14-15]。综上所述,实际发动机风扇转子动不平衡量非恒定不变,而是存在随转速明显变化的特征。

2.3 转子弹性线

从转子弹性线能非常明显地看出转子在工作状态下弹性变形沿轴向的分布情况,也能看出在不同转速下转子连接刚性的变化规律,对转子的振动特性分析具有重要意义。

通过窄带跟踪滤波提取出转子在各典型转速下的基频时域波形,画出转子弹性线。

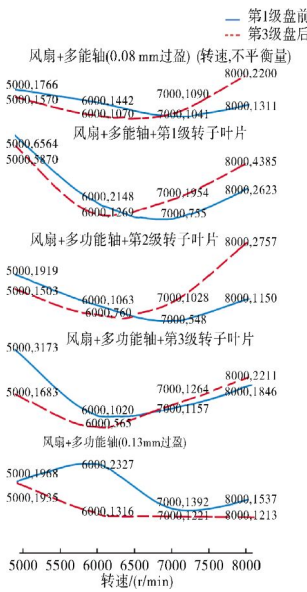


图 12 典型转速下不平衡量变化趋势

不同紧度过盈条件下风扇转子转速为 6000 r/min 时的转子弹线对比如图 13~16 所示。

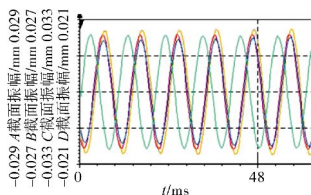


图 13 0.08 mm 过盈配合
6000 r/min 时转子基频振动
时域波形

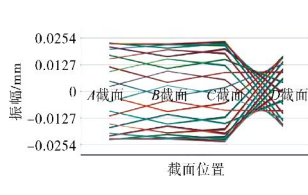


图 14 0.08 mm 过盈配合
6000 r/min 时转子弹线

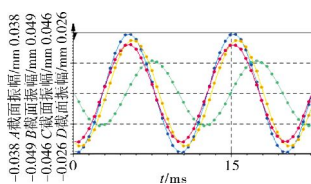


图 15 0.13 mm 过盈配合
6000 r/min 时转子基频振动
时域波形

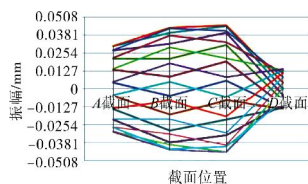


图 16 0.13 mm 过盈配合
6000 r/min 时转子弹线

不同紧度过盈条件下风扇转子转速为 7000 r/min 时的转子弹线对比如图 17~20 所示。

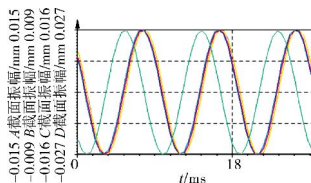


图 17 0.08 mm 过盈配合
7000 r/min 时转子基频振动
时域波形

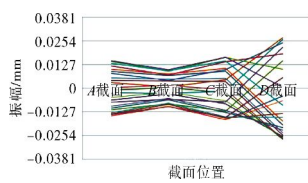


图 18 0.08 mm 过盈配合
7000 r/min 时转子弹线

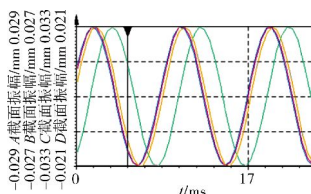


图 19 0.13 mm 过盈配合
7000 r/min 时转子基频振动
时域波形

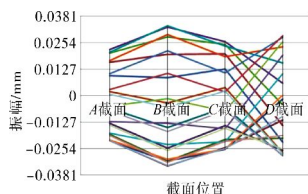


图 20 0.13 mm 过盈配合
7000 r/min 时转子弹线

从以上对比分析可知:在风扇转子盘毂未加试重状态下,风扇转子(不含多功能轴)在全转速范围内以平动及俯仰等刚体振型为主,转子本身无挠曲变形。

第 2 级盘轴与多功能轴为套齿连接结构,在理想工作状态下二者应配合良好,无相对振动,但实际上多功能轴与第 2 级盘轴配合处于 1 种“非同步”振动状态,随转速提高,二者之间均存在明显等效连接刚

度损失现象,配合不协调。其中在 6000 r/min 附近最差。如图 21、22 所示。

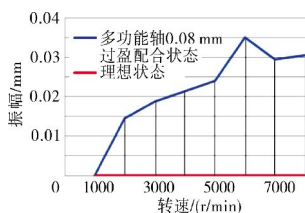


图 21 多功能轴(0.08 mm
过盈配合)与第 2 级盘轴在
不同转速下振动差值

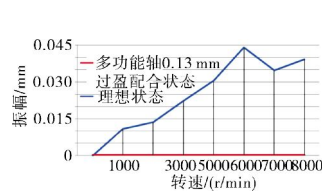


图 22 多功能轴(0.13 mm
过盈配合)与第 2 级盘轴在
不同转速下振动差值

结合整机试车风扇振动情况,得知转速为 6000 r/min 是风扇转子的临界转速,通过计算进一步获得该振型为风扇转子俯仰振型。因转子过临界振动大主要与转子不平衡量偏大相关,通过风扇转子本机平衡试验得以充分验证,如图 23 所示。

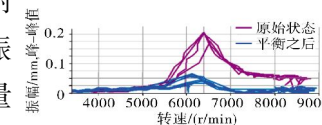
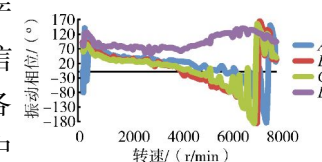


图 23 风扇转子本机平衡
试验前后结果

虽预设风扇转子第 2 级盘轴与多功能轴 2 种过盈配合状态,但二者间振动差值未发生明显变化,表明该调整不足以影响风扇转子动力学特性,其结果对结构的深度改进提供了支持和借鉴。

2.4 转子动特性相位分析

在试验中通过键相产生每圈 1 个转速脉冲信号,以此为基准可以测出各测点在同一次试验过程中的相位变化,如图 24 所示。图 24 风扇转子振动高频曲线



从图中可见,转速在 3000 r/min 以上,多功能轴截面振动超前于风扇转子达到振动高点,随转速增加,相位超前量增大。从转子振动特性曲线可知,此现象为转子振动相位滞后导致,多功能轴截面振动相位未发生明显变化,带叶片状态与未带叶片状态变化趋势相同。

3 结论

(1)通过风扇转子在 5 种状态下不平衡量研究表明,发动机风扇转子不平衡量存在随转速明显变化的规律。在中、高转速下风扇盘毂+第 1 级转子叶片状态不平衡量变化差异最大,其影响明显大于第

2、3级转子叶片的。分析认为该现象可能与第1级转子叶片尺寸过大,导致其工作状态力学边界易发生变化相关。

(2)通过转子弹性线研究结果发现,风扇转子(不含多功能轴)在全转速范围内沿轴线方向未发生较大挠性变形,不同转速下风扇转子以准刚体形式存在,表明该转子为刚体型转子。

(3)多功能轴与第2级盘轴配合状态随转速加快,等效连接刚度逐渐变小,且在2种过盈配合状态下差异不大。在转速为6000 r/min时最差,通过本机平衡试验进一步验证了该转速为发动机临界转速特征。

(4)从转子振动特性曲线可知,多功能轴振动相位明显领先风扇转子,主要为转子振动相位滞后导致,其规律与叶片状态无关。

本文所述试验方法可系统地研究航空发动机风扇转子动力学特性,包括不平衡量变化规律、结构变量因素影响、转子弹性线、转子相位等,具有重大工程意义,其试验方案、测试方案、数据分析方案均可在其他转子件动特性试验上推广应用。

参考文献:

- [1] 邓旺群,唐广,舒斯荣,等. 对转发动机模拟低压转子高速动平衡试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2010,23(4):5-9.
DENG Wangqun,TANG Guang,SHU Sirong,et al. High speed dynamic balance experiment research on an simulated low pressure rotor of a counter rotating engine [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2010, 23(4): 5-9.(in Chinese)
- [2] 闻邦椿,顾家柳,夏松波. 高等转子动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2000:194-198.
WEN Bangchun,GU Jialiu,XIA Songbo. Advanced rotor dynamics[M]. Beijing:China Machine Press, 2000:194-198. (in Chinese)
- [3] 钟一鄂. 高等转子动力学 [M]. 北京:清华大学出版社,1987:233-237.
ZHONG Yie. Higher rotor dynamics[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1987:233-237. (in Chinese)
- [4] 刘永泉,王德友,洪杰,等. 航空发动机整机振动控制技术分析[J]. 航空发动机,2013,39(5):7-8.
LIU Yongquan,WANG Deyou,HONG Jie,et al. Analysis of whole aeroengine vibration control technology [J]. Aeroengine,2013,39(5): 7-8.(in Chinese)
- [5] 马艳红,王虹,洪杰. 带气膜阻尼环的转子系统动力特性试验[J]. 航空动力学报,2013,28(6):1-2.
MA Yanhong,WANG Hong,HONG Jie. Experiment on rotor dynamics of rotor system with air film damper [J]. Journal of Aerospace Power, 2013,28(6):1-2.(in Chinese)
- [6] 陈曦,廖明夫,邓旺群,等. 柔性转子动平衡测试数据库系统开发与验证[J]. 测控技术,2015,34(11):24-28.
CHEN Xi,LIAO Mingfu,DENG Wangqun,et al. Development and validation for flexible rotor balancing test database system[J].Measurement & Control Technology,2015,34(11):24-28.(in Chinese)
- [7] 廖明夫. 航空发动机转子动力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2015:50-56.
LIAO Mingfu. Aeroengine rotor dynamics [M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press,2015:50-56.(in Chinese)
- [8] 闻邦椿. 机械振动学[M]. 北京:冶金工业出版社,2000:110-120.
WEN Bangchun. Mechanical Vibration[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press, 2000:110-120.(in Chinese)
- [9] 邓旺群. 航空发动机柔性转子动力特性及高速动平衡试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
DENG Wangqun. Experiment investigation of dynamic characteristics and high speed dynamic balance of a aeroengine flexible rotor[D].Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2006. (in Chinese)
- [10] 洪杰,王华,肖大为. 转子支承刚度对转子动力特性的影响分析[J]. 航空发动机,2008,34(1):23-27.
HONG Jie,WANG Hua,XIAO Dawei. Analysis of influence of rotor support dynamic stiffness on dynamic characteristics of rotor[J]. Aero-engine,2008,34(1): 23-27.(in Chinese)
- [11] 邓旺群,高德平,廖学军,等. 汽轮机转子高速动平衡技术研究[J]. 汽轮机技术,2004,46(1):49-51.
DENG Wangqun,GAO Deping,LIAO Xuejun,et al. High speed dynamic balance technique research of a turbine rotor[J]. Turbine Technology,2004,46(1): 49-51.(in Chinese)
- [12] 姜广义. 大型发动机转子本机平衡技术试验研究[J]. 航空发动机,2008,34(1):19-23.
JIANG Guangyi. Experimental investigation of local balanced technique for large aeroengine rotor [J]. Aeroengine, 2008, 34(1): 19-23.(in Chinese)
- [13] 李洪升,刘丹,朱世林,等. 利用三圆法处理压缩机驱动侧振动问题[J]. 风机技术,2017,59(2A):64-66.
LI Hongsheng,LIU Dan,ZHU Shilin,et al. Deal with vibration on driven side of centrifugal compressor based on three circle method[J]. Chinese Journal of Turbomachinery,2017,59(2A):64-66.(in Chinese)
- [14] 葛向东,张德平,张东明,等. 燃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):2-3.
GE Xiangdong,ZHANG Deping,ZHANG Dongming,et al. Vibration failure diagnose of fraction between gas turbine brush and balance plate[J]. Aeroengine,2014,40(1): 2-3.(in Chinese)
- [15] 屈维德,唐恒龄. 机械振动手册[M]. 北京:北京机械工业出版社,2000:157-159.
QU Weide,TANG Hengling. Mechanical vibration manual [M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2000:157-159.(in Chinese)

(编辑:贺红井)