

DOI: 10.19666/j.rlfed.202503063

# 重型燃气轮机压气机动叶片的 模态分析和测试验证

周莉莉, 张山子, 赵连会  
(上海电气燃气轮机有限公司, 上海 200240)

**[摘要]** 某重型燃气轮机压气机第1级叶片为全新自主开发设计, 采用了先进三维造型技术设计的高性能叶型, 须掌握其振动特性来验证叶片的可靠性。采用有限元方法分析了动频测试工况以及实际运行工况下叶片的振动频率, 并通过无线电遥测技术进行叶片的动频测试验证, 同时考虑叶片材料与加工公差以及装配公差引起的分散度影响。结果表明, 叶片振动频率的理论分析与测试特性一致, 结果偏差不大于1.2%。压气机叶片在运行工况下的理论频率避开裕度能够满足数值分析方法与试验测试方法的偏差及材料、加工制造与装配因素引起的频率影响后仍具有较大安全余量。研究结果可为后续进行燃气轮机压气机叶片的开发以及全生命周期的升级改进与振动监测提供指导。

**[关键词]** 重型燃气轮机; 压气机叶片; 振动分析; 动频测试; 分散度

**[引用本文格式]** 周莉莉, 张山子, 赵连会. 重型燃气轮机压气机动叶片的模态分析和测试验证[J]. 热力发电, 2025, 54(12): 39-45. ZHOU Lili, ZHANG Shanzi, ZHAO Lianhui. Modal analysis and test verification of moving blades of the compressor in a heavy-duty gas turbine[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(12): 39-45.

## Modal analysis and test verification of moving blades of the compressor in a heavy-duty gas turbine

ZHOU Lili, ZHANG Shanzi, ZHAO Lianhui  
(Shanghai Electric Gas Turbine Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The first stage blades of a heavy-duty gas turbine compressor are newly independently developed and designed, which use the advanced 3D modeling technology to design high-performance blade profiles. It is necessary to master the blades' vibration characteristics to verify the reliability of the blades. The finite element method was used to analyze the vibration frequency of the blades under dynamic frequency testing conditions and actual operating conditions. Meanwhile, the radio telemetry technology has been introduced to verify the dynamic frequency of the blade. The dispersion effects caused by blade material and processing tolerances, as well as assembly tolerances were also considered. The results indicate that the theoretical analysis of blade vibration is consistent with the test characteristics, with a deviation of no more than 1.2%. The theoretical frequency avoidance margin of compressor blades under operating conditions can meet the deviation between numerical analysis methods and experimental testing methods, as well as the frequency influence caused by material, processing, and assembly factors, and still have a large safety margin. The research results provide guidance for the development of gas turbine compressor blades, as well as the upgrading, improvement, and vibration monitoring of blades throughout their entire lifecycle.

**Key words:** heavy-duty gas turbine; compressor blades; vibration analysis; dynamic frequency test; dispersion

随着全球对清洁能源和高效能源转换设备的需求不断增加, 燃气轮机(燃机)凭借其高效、清

收稿日期: 2025-03-04 网络首发日期: 2025-10-09

基金项目: 上海市国资委企业创新发展和能级提升项目(2024003)

Supported by: Enterprise Innovation Development and Energy Level Enhancement Project of Shanghai State Owned Assets Supervision and Administration Commission (2024003)

第一作者简介: 周莉莉(1993), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为燃气轮机部件强度校核与振动分析, zhoul3@shanghai-electric.com。

洁、成本较低的优势,在能源转换和电力供应领域起到至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。但其存在的叶片振动问题是导致燃机故障的主要原因之一<sup>[3-4]</sup>,压气机叶片作为燃机中的核心部件,承受着离心载荷、气动压力载荷以及振动交变载荷等作用,在叶片设计阶段必须对叶片的振动特性进行充分研究,掌握叶片的共振特性以保证结构可靠性。

针对叶片的振动特性,大量学者开展了一些相关研究。付娜等<sup>[5]</sup>和王春洁等<sup>[6]</sup>采用 ANSYS 软件对非旋转态和旋转态下叶片-轮盘耦合系统的振动固有特性进行了计算分析。杨博宇等<sup>[7]</sup>研究了 3 种不同转速产生的离心力对叶片频率的影响趋势。张亮等<sup>[8]</sup>基于 ANSYS Workbench 对某燃机叶片的主要振动阶次进行了详细的模态及应力分析。然而,现有燃机压气机叶片的振动特性分析主要集中在航空发动机领域,对重型燃机压气机叶片的振动分析较少。重型燃机与航空发动机由于在运行规律、工作环境和寿命等方面均有较大不同,在结构的设计上存在较大的差异。重型燃机对结构的长寿命与耐久性结构的可靠性具有更高的要求<sup>[9]</sup>。在进行重型燃机压气机叶片的设计时,往往需要对叶型进行定制化设计,以满足气动与强度振动的需求。

由于叶片的理论计算频率与真实频率往往存在偏差。同时,叶片在加工和装配过程中的公差会影响叶片的固有频率<sup>[10]</sup>。因此,开展叶片的固有频率试验对掌握叶片的振动特性具有重要的意义。叶片的固有频率测试主要分为静频测试(非旋转状态)和动频测试(旋转状态)2种。马义良等<sup>[11]</sup>对带围带和凸台阻尼拉筋的汽轮机叶片开展了动频测试,并对叶片进行了调频优化。葛存飞等<sup>[12]</sup>基于 WiFi 通信的动态应变遥测方法和基于单喷嘴压缩空气射流激振方法的汽轮机叶片动频试验系统,对整圈自锁阻尼围带和拉筋的汽轮机低压末级叶片进行了动频测试,并探索了围带厚度对动频分散度的影响。谷伟伟等<sup>[13]</sup>采用无线电非接触测试方法在动平衡舱内测试了带凸肩自锁结构汽轮机低压末级长叶片的振动频率,并采用有限元计算了不同凸肩接触状态下叶片频率。钟小萍等<sup>[14]</sup>通过无线电遥测技术对 300 MW 等级汽轮机低压转子末级自由叶片和整圈连接叶片进行了动频测试试验。王斌等<sup>[15]</sup>对发动机压气机叶片的振动特性进行了研究,并对叶片进行了静频测试验证。付曦等<sup>[16]</sup>通过静频试验验证 3 种不同拟合精度叶片的可靠性。

虽然已有关于叶片振动频率测试的研究,但测试研究对象多数是带凸肩或围带的汽轮机叶片,对燃气轮机压气机叶片的振动测试多以静频试验为主,动频测试较少。本文采用数值模拟与试验验证相结合的方式研究某重型燃机新设计压气机第 1 级叶片的振动特性,通过有限元方法计算叶片在动频测试工况及实际运行工况下的频率,并借助无线电遥测技术对压气机叶片在动频测试工况下的频率值进行验证,进一步结合静频测试结果考虑了叶片材料、加工制造、装配等因素的分散度影响。结果表明,新设计的压气机叶片满足振动设计要求。

## 1 叶片振动特性数值分析

为了适应大流量、跨音速的流动特点,同时满足进口级压气机叶片的气动性能及振动强度要求,某重型燃机压气机第 1 级叶片采用先进的叶片设计技术进行了全新自主开发,叶片为自由叶片,叶型采用了跨音叶型设计以及三维复合弯掠与端弯的设计技术,叶身最大高度为 658 mm,叶根采用燕尾型结构,在满足灵活拆装的同时适应检修周期长的特点,叶根沿轴向的长度接近 320 mm。压气机第 1 级叶片几何模型如图 1 所示。叶根与轮盘通过锁片进行限位固定,确保了整体结构的稳定与可靠。

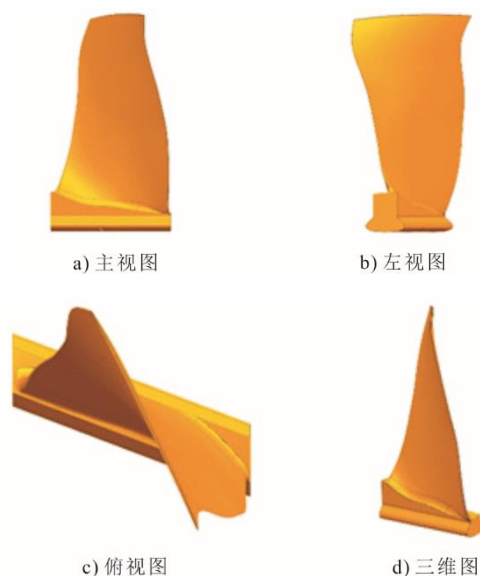


图 1 压气机第 1 级叶片几何模型  
Fig.1 Geometric model of the first stage blade of the compressor

### 1.1 叶片计算模型

基于叶片与轮盘周期对称的特点,采用单个叶片与对应的轮盘扇区作为研究对象来分析整圈叶片

轮盘系统的振动特性。采用全四面体单元 SOLID 187 划分网格，网格模型如图 2 所示，叶盘扇区模型共 54 万节点。轮盘的扇区面施加周期对称边界条件，轮盘进气端截面施加轴向与周向约束。

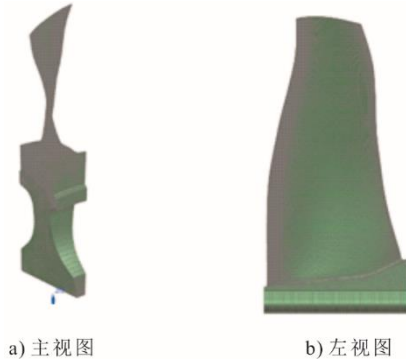


图 2 压气机叶盘扇区网格模型

Fig.2 Grid model of blade-disk sector of the compressor

### 1.2 模态计算结果

采用 ANSYS 软件开展动频测试工况（室温，不考虑压力载荷）和机组实际运行工况下的叶片模态分析。对叶片在实际运行工况下的振动频率进行考核，该燃气轮机设计转速为 50 Hz，考虑电网频率波动，要求叶片在 95%~103%转速内关键振型避开相应的激振频率并保持一定的安全裕度。

压气机叶片低阶模态振型如图 3 所示。根据压气机叶片振动考核标准，进入考核范围的关键振型为前 3 阶振型，分别为一阶弯曲（第一阶）、二阶弯曲（第二阶）和一阶扭转（第三阶）振型，叶片对应的坎贝尔图如图 4 所示，运行工况下压气机动叶的频率分析结果及避开裕度见表 1。由图 4 和表 1 可见，压气机动叶在满足振动设计要求后仍具有较大的频率裕度。其中，第三阶频率对应的下裕度为 10.3 Hz，上裕度极大。动频测试工况下，叶片的模态振型与运行工况下一致，在不同转速下压气机动叶的频率分析结果见表 2。由表 2 可见，叶片的频率随着转速的增加而增大。这是由于在离心力作用下，叶片产生动力钢化效应<sup>[7]</sup>所致。

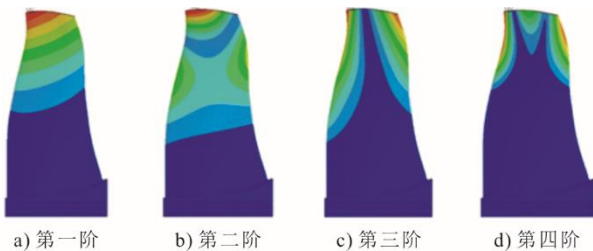


图 3 压气机叶片低阶模态振型

Fig.3 Low order mode diagram of the compressor blades

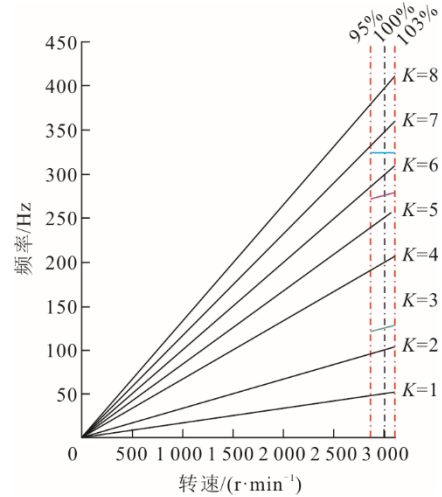


图 4 压气机动叶坎贝尔图

Fig.4 Campbell diagram of the compressor blade

表 1 运行工况下压气机动叶的频率分析结果及避开裕度  
Tab.1 Frequency analysis results and safety margin of the compressor blades under operating conditions

转速/(r·min <sup>-1</sup> )	频率/Hz		
	第一阶	第二阶	第三阶
2 850	120.6	270.9	323.9
3 000	124.2	275.3	324.2
3 090	126.4	278.0	324.3
上安全裕度	16.9	9.1	
下安全裕度	18.4	15.5	10.3

表 2 动频测试工况下压气机动叶的频率分析结果  
Tab.2 Frequency analysis results of compressor blade under dynamic frequency test condition

转速/(r·min <sup>-1</sup> )	频率/Hz		
	第一阶	第二阶	第三阶
500	77.0	225.0	324.8
1 000	82.7	230.3	324.9
1 500	91.1	238.7	325.2
2 000	101.4	249.8	325.5
2 500	112.7	262.9	326.0
3 000	124.5	275.2	326.6

## 2 叶片振动特性测试

### 2.1 测试系统

采用无线电遥测技术开展燃机压气机叶片的动频测试，测试在全尺寸燃机转子上进行。整圈叶片在装配前首先进行称重排序，选择 4 片叶片作为测试叶片。根据有限元分析得到的叶片振型，确定电阻丝应变片的数量和布置位置。图 5 为其中 1 片测试叶片上应变片和引线端子的理论设计方案与实际布置情况。使用应变片电测法进行试验测试，该方法是叶片振动试验中广泛使用且成熟的方法<sup>[17-22]</sup>。将电池、发射天线与发射机制成的微型发报机安装在前轴头平衡孔中，通过引线将应变片与微型发报

机连接，形成工作电路。在旋转状态下，使用氮气喷枪激励叶片，叶片振动并产生应变，从而造成感应元件阻值发生变化，经过变换电路产生电压信号，经发报机调制发射。该频射信号由固定在动平衡台轴承座挡油板上的天线环接收，并经由高频电缆传送至接收机。通过示波器、频谱分析仪等设备对叶片振动数据进行存储、显示与分析<sup>[11]</sup>。转子的转速数据通过转速表收集。试验相关设备如图 6 所示，放置于动平衡试验舱中的带测试叶片的燃机转子如图 7 所示。

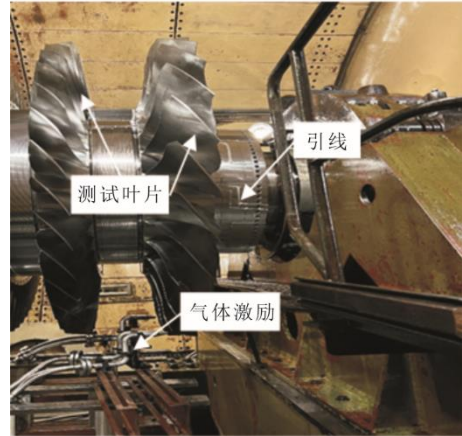


图 7 带测试叶片的燃机转子  
Fig.7 Gas turbine rotor with test blades

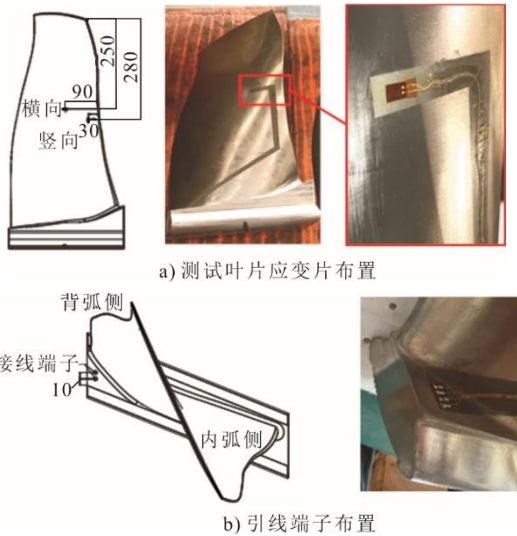


图 5 应变片粘贴及引线端子布置示意 (mm)

Fig.5 Layout of strain gauge paste and lead terminal (mm)



图 6 动频试验的测试设备

Fig.6 Experimental equipment for dynamic frequency test

### 2.2 测试过程

测试开始前，对动平衡室抽真空。真空度达到要求后转子开始升转速，保证升速率不高于 130 r/min。在转速达到 500 r/min 时稳定片刻，确认数据采集设备的信号稳定。继续升转速并开启氮气激励，达到 3 000 r/min 后维持转速并关闭激励，检查设备与信号状态。随后打开氮气激励并开始降转速，降至 500 r/min 时关闭激励。继续将转速降至零后，动平衡室破真空，完成叶片动频率测试过程。

### 2.3 测试结果分析

通过频谱分析仪对升转速与降转速过程的测试数据进行分析，叶片的某阶共振频谱如图 8 所示。图 8 上下部分峰值点分别显示了该阶对应的共振频率与共振转速，及相应的响应值与阻尼衰减系数。不同转速下的叶片振动频率列于表 3。由表 3 可见，在相同转速下，叶片在升速过程中的频率值略高于降速过程，这是由于在降速过程中环境温度升高，对叶片刚度产生了一定影响。

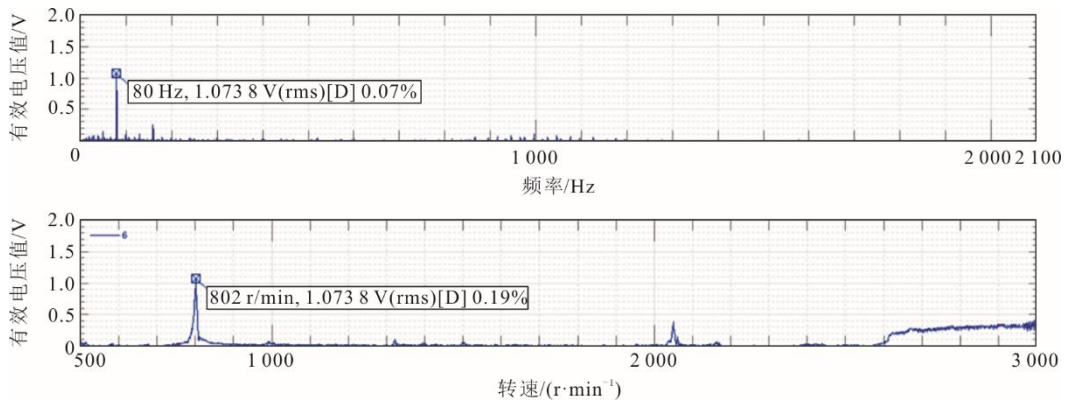


图 8 叶片的某阶共振频谱

Fig.8 A certain order resonance spectrum of the blade

表 3 压气机动叶的动频测试结果  
Tab.3 Dynamic frequency test results of the compressor blades

阶次	升转速过程		降转速过程	
	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	频率/Hz	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	频率/Hz
第一阶	2 051	102.6	2 029	101.5
	1 320	88.0	1 305	87.0
	802	80.2	794	79.4
	514	77.1	509	76.4
第二阶	2 674	267.4	2 658	265.8
	2 175	253.8	2 164	252.5
	1 606	240.9	1 596	239.4
	1 163	232.6	1 157	231.4
第三阶	2 787	325.2	2 778	324.1
	2 439	325.2	2 423	323.1
	1 951	325.2	1 936	322.7
	1 501	325.2	1 489	322.6

### 3 对比验证

#### 3.1 动频测试工况

对比分析动频试验结果与动频测试工况的模拟结果，不同转速对应的叶片理论模态频率值由数值计算结果线性插值获得，图 9 为压气机动叶在升、降转速过程的频率测试结果与理论分析结果。由图 9 可见，叶片振动的理论分析与测试特性一致，结果相对偏差不大于 1.2%，这是数值计算方法与试验测试方法综合影响的结果。数值计算方面，对边界条件进行了一定程度的简化，模态分析中接触刚度和实际叶片与轮盘之间的接触刚度存在差异。动频试验方面，信号噪声影响、传感器精度以及数据处理方法等因素会对测试结果产生影响。

在升转速过程中，压气机动叶前三阶模态频率的测试值与理论值的相对偏差均不超过 0.4%。其中，第一阶频率最大绝对偏差为 0.3 Hz；第二阶频率最大绝对偏差为 0.6 Hz；第三阶频率最大绝对偏差为 1.2 Hz。在降转速过程中，第一阶频率最大相对偏差为 1.2%；第二阶和第三阶频率相对偏差均不超过 1.0%。其中，第一阶频率最大绝对偏差为 1.0 Hz，第二阶频率最大绝对偏差为 1.7 Hz，第三阶频率最大绝对偏差为 3.1 Hz。

在设计转速（3 000 r/min）状态下，叶片频率的测试结果与理论分析结果的对比，及允许的频率范围见表 4。其中，第一阶频率的最大绝对偏差为 1.0 Hz，第二阶频率最大绝对偏差为 4.3 Hz，第三阶频率最大绝对偏差为 1.8 Hz。频率的偏差均在运行工况下的设计裕度内。

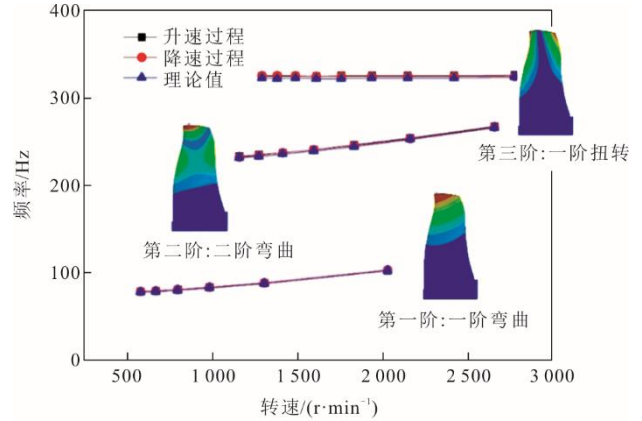


图 9 压气机动叶在升、降转速过程频率测试结果与理论分析结果对比

Fig.9 Comparison of frequency test results and theoretical analysis results of the compressor blade during the process of increasing and decreasing speed

表 4 设计转速下叶片理论频率与测试频率对比 单位: Hz

Tab.4 Comparison of theoretical frequency and test frequency of blades at design speed

项目	第一阶	第二阶	第三阶
理论设计值	124.5	277.2	326.6
测试频率（升速）	125.5	275.5	325.1
测试频率（降速）	124.3	272.9	324.8
测试-理论（升速）	1.0	-1.7	-1.5
测试-理论（降速）	0.2	-4.3	-1.8
理论设计裕度	[-18.4, 16.9]	[-15.5, 9.1]	[-10.3, +∞)
允许频率范围	>106.1 <141.4	>261.7 <286.3	>316.3

#### 3.2 材料与加工分散度影响

以上结果考虑了理论设计方法与动频试验方法之间的差异，以及叶片与轮盘真实接触状态与设计接触状态之间的偏差。实际上，叶片材料偏差、加工公差以及装配公差会使叶片的实际频率存在一定的分散度。

叶片的频率分散度  $\Delta f$  定义为：

$$\Delta f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{(f_{\max} + f_{\min})/2} \quad (1)$$

式中： $f_{\max}$  和  $f_{\min}$  分别为叶片相应振型对应的振动静频最大值和最小值<sup>[23-24]</sup>。规定叶片的频率分散度  $\Delta f < 8\%$  为合格<sup>[25]</sup>。

表 5 列出了压气机动叶通过静频测试方法测量得到的静频结果及分散度。由表 5 可见，压气机动叶的频率分散度满足要求。同时，对叶片的频率波动范围进行统计分析，波动范围上限设定为频率最大值与平均值的偏差，下限设置为频率最小值与平均值的偏差。压气机动叶的频率波动范围分别为：第一阶[-0.5, 0.5] Hz，第二阶[-2.1, 1.6] Hz，第三阶[-1.7, 10.2] Hz。

因此, 叠加整圈叶片材料与加工分散度, 以及叶片与轮盘装配公差的影响后, 压气机叶片在设计转速下频率范围分别为: 升转速过程, 第一阶 [125.0, 126.0] Hz, 第二阶 [273.4, 277.1] Hz, 第三阶 [323.4, 335.3] Hz; 降转速过程, 第一阶 [123.8, 124.8] Hz, 第二阶 [270.8, 274.5] Hz, 第三阶 [323.1, 335.0] Hz。均符合表 4 列出的设计转速下允许频率范围, 叶片满足振动设计要求。

表 5 压气机动叶的静频测试结果

Tab.5 Static frequency test results of the compressor blade

项目	第一阶	第二阶	第三阶
静频范围/Hz	[74.5, 75.5]	[218.8, 222.5]	[323.0, 334.9]
整圈静频均值/Hz	75.0	220.9	324.7
静频分散度/%	1.4	1.7	3.6
频率波动范围/Hz	[-0.5, 0.5]	[-2.1, 1.6]	[-1.7, 10.2]

## 4 结 论

本文通过数值模拟结合频率测试技术研究了某重型燃气自主开发压气机第一级动叶的振动特性, 主要结论如下。

1) 在动频测试工况下, 压气机第一级叶片在升转速和降转速过程中的频率理论值与测量值随转速的变化趋势一致, 结果相对偏差不大于 1.2%。升转速过程中, 叶片前三阶模态频率的测试与理论值的相对偏差均不超过 0.4%; 在降转速过程中, 第一阶频率最大相对偏差为 1.2%, 第二阶和第三阶频率相对偏差均不超过 1.0%。

2) 在运行转速工况下, 叠加叶片材料与加工公差、叶片与轮盘的安装公差, 以及理论设计与试验测试方法的偏差影响之后, 叶片的频率仍有足够的安全裕度, 叶片满足振动设计要求。

3) 本研究相应的压气机叶片设计方法及振动分析与测试验证方法, 对重型燃气轮机压气机叶片的开发设计及全生命周期的升级改进和振动监测具有重要的指导意义。

### [参 考 文 献]

[1] 束国刚, 余春华, 沈国华, 等. 新时期我国重型燃气轮机发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 184-192.  
SHU Guogang, YU Chunhua, SHEN Guohua, et al. Development of heavy-duty gas turbines in China in the new era[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 184-192.

[2] GUPTA K K, REHMAN A, SARVIYA R M. Bio-fuels for the gas turbine: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 2946-2955.

[3] COWLES B A. High cycle fatigue in aircraft gas turbines: an industry perspective[J]. International Journal of

Fracture, 1996, 80: 147-163.

[4] CHANG J C I. An integrated research approach to attack engine HCF problem[C]. American Society of Mechanical Engineers. ASME 1996 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Atlanta, Georgia, USA, 1996.

[5] 付娜, 王三民, 郭伟超. 某燃气轮机叶片-轮盘耦合振动特性研究[J]. 汽轮机技术, 2005, 47(5): 45-47.  
FU Na, WANG Sanmin, GUO Weichao. Calculation of the blade-disc coupled vibration characteristics of a gas turbine[J]. Turbine Technology, 2005, 47(5): 45-47.

[6] 王春洁, 宋顺广, 宗晓. 压气机中叶片轮盘耦合结构振动分析[J]. 航空动力学报, 2007(7): 1065-1068.  
WANG Chunjie, SONG Shunguang, ZONG Xiao. Vibration analysis of the blade-disc coupled structure of compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2007(7): 1065-1068.

[7] 杨博宇, 殷鸣, 向召伟, 等. 离心力场作用下的燃气轮机压气机叶片振动模态分析[J]. 机械, 2018, 45(11): 31-36.  
YANG Boyu, YIN Ming, XIANG Zhaowei, et al. The vibration modal analysis of compressor blades of gas turbines under the influence of centrifugal force fields[J]. Machines, 2018, 45(11): 31-36.

[8] 张亮, 初曙光, 来亮, 等. 某燃气轮机压气机叶片振动特性研究[J]. 热能动力工程, 2019, 34(1): 34-39.  
ZHANG Liang, CHU Shuguang, LAI Liang, et al. Vibration analysis of the compressor blade in a gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(1): 34-39.

[9] 余春华, 阙晓斌, 吴宏. 重型燃气轮机压气机技术发展趋势[J]. 动力工程学报, 2024, 44(9): 1317-1327.  
YU Chunhua, QUE Xiaobin, WU Hong. Technology development trend of heavy-duty gas turbine compress[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(9): 1317-1327.

[10] 方林宏, 王红斌, 吴浩. 浅析汽轮机叶片静频特性及其影响因素[J]. 中国计量, 2023(1): 66-68.  
FANG Linhong, WANG Hongbin, WU Hao. Analysis of static frequency characteristics and influencing factors of turbine blades[J]. China Metrology, 2023(1): 66-68.

[11] 马义良, 王学成, 李宇峰, 等. 某调峰汽轮机叶片动频率测试及调频优化[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(2): 101-103.  
MA Yiliang, WANG Xuecheng, LI Yufeng, et al. Dynamic frequency testing and adjustment optimization of peak-regulating turbine blades[J]. Turbine Technology, 2023, 65(2): 101-103.

[12] 葛存飞, 庄达明, 隋永枫, 等. 汽轮机低压末级叶片动频试验研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 56-63.  
GE Cunfei, ZHUANG Daming, SUI Yongfeng, et al. Study on dynamic frequency test of low-pressure last stage blade of steam turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 56-63.

[13] 谷伟伟, 张永海, 李园, 等. 带凸肩自锁结构汽轮机低压末级长叶片动频率数值分析和测试[J]. 热力发电, 2022, 51(12): 79-85.  
GU Weiwei, ZHANG Yonghai, LI Yuan, et al. Numerical analysis and test of dynamic frequency for low pressure last stage long turbine blade with self-locking shoulder[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(12): 79-85.

[14] 钟小萍, 危奇, 蔡步君. 300 MW 汽轮机低压转子叶片动频试验[J]. 热力透平, 2007(1): 15-18.

- ZHONG Xiaoping, WEI Qi, CAI Bujun. Dynamic frequency test of LP rotor blades in 300 MW steam turbine[J]. *Thermal Turbine*, 2007(1): 15-18.
- [15] 王斌, 张奇, 农斌, 等. 压气机应力测试的叶-盘耦合分析方法[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(27): 12217-12222.
- WANG Bin, ZHANG Qi, NONG Bin, et al. A blade-disc coupling analysis method for dynamic stress test of compressor[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(27): 12217-12222.
- [16] 付曦, 张俊红, 刘萌, 等. 某航空发动机压气机叶片振动分析[J]. *机械设计*, 2018, 35(5): 7-13.
- FU Xi, ZHANG Junhong, LIU Meng, et al. Vibration analysis of aero-engine compressor blade[J]. *Journal of Machine Design*, 2018, 35(5): 7-13.
- [17] 胡伟, 王德友, 杜少辉, 等. 非接触式数字光纤叶片测振系统研究及应用[J]. *航空发动机*, 2010, 36(1): 38-41.
- HU Wei, WANG Deyou, DU Shaohui, et al. Investigation and application of non-contact digital optical fiber rotor blade vibration measurement system[J]. *Aeroengine*, 2010, 36(1): 38-41.
- [18] 卢艳辉, 梅庆, 雷沫枝, 等. 高转速压气机转子叶片的动应力测试与动力学设计评估[J]. *推进技术*, 2014, 35(10): 1398-1403.
- LU Yanhui, MEI Qing, LEI Mozhi, et al. Vibration stress test and dynamical evaluation for high rotational speed compressor blades through numerical and experimental method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(10): 1398-1403.
- [19] 郝兵, 李成刚, 王德友. 900 °C 动态应变计的研制与应用[J]. *航空发动机*, 2005, 31(2): 24-27.
- HAO Bing, LI Chenggang, WANG Deyou. Development and application of 900 °C dynamic strain gage[J]. *Aeroengine*, 2005, 31(2): 24-27.
- [20] 刘美茹, 滕光蓉, 肖潇, 等. 基于叶尖定时的航空发动机涡轮叶片振动测量[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(9): 1954-1963.
- LIU Meiru, TENG Guangrong, XIAO Xiao, et al. Vibration measurement of turbine rotor blades of aero-engine based on blade tip-timing[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(9): 1954-1963.
- [21] 吴琼, 邓瑛, 邓武警, 等. 一种航空发动机转子叶片振动特性及疲劳试验方法[J]. *理化检验-物理分册*, 2024, 60(10): 57-61.
- WU Qiong, DENG Ying, DENG Wujing, et al. A method for vibration characteristics and fatigue test of aero-engine rotor blades[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)*, 2024, 60(10): 57-61.
- [22] 肖潇, 刘美茹, 焦江昆, 等. 基于叶尖定时原理的叶尖振幅与叶根动应变关系的试验研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2021, 34(6): 6-11.
- XIAO Xiao, LIU Meiru, JIAO Jiangkun, et al. Experiment on the relationship between blade tip vibration amplitude measured by blade tip timing and by blade root dynamic strain[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2021, 34(6): 6-11.
- [23] 郭江龙, 李琼, 李祎, 等. 汽轮机低压转子叶片静态频率试验研究[J]. *电站系统工程*, 2010, 26(6): 19-20.
- GUO Jianglong, LI Qiong, LI Yi, et al. Study of static frequency testing of the low-pressure rotor for steam turbine[J]. *Power System Engineering*, 2010, 26(6): 19-20.
- [24] 柴保桐, 张东兴, 吴峥峰. 汽轮机动叶片静频测试与振动安全性分析[J]. *设备管理与维修*, 2018, 13(7): 49-50.
- CHAI Baotong, ZHANG Dongxing, WU Zhengfeng. Static frequency test and vibration safety analysis of turbine blade[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2018, 13(7): 49-50.
- [25] 倪秋华, 高伟, 张华芳, 等. 某台 600 MW 汽轮机叶片静频测试及振动安全性分析[J]. *机械工程师*, 2019(2): 28-30.
- NI Qiuhua, GAO Wei, ZHANG Huafang, et al. Static frequency test and vibration safety analysis of a 600 MW steam turbine blade[J]. *Mechanical Engineer*, 2019(2): 28-30.

(责任编辑 杜亚勤)