

文章编号: 1000-8055(2023)11-2639-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220112

航空发动机拍振问题研究与验证

丁小飞^{1,2}, 廖明夫¹, 彭丹阳³, 韩方军²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015;

3. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

摘 要: 结合拍振理论仿真分析、实测振动信号分析和工程实际拍振总结, 讨论了航空发动机存在的 3 种多源拍振模式; 建立了拍振故障识别流程和排除方法。工程试验验证表明: 对于航空发动机常见的 3 种多源耦合拍振模式, 当激励频率相差大于 3% 时, 即可消除多源拍振及其引起的振动值波动问题。所建立的流程和方法在某型发动机振动波动问题排故中进行了应用验证, 准确识别出低压转子 2 倍频-高压转子基频耦合拍振。通过控制规律微调低压转子转速, 使低压转子 2 倍频和高压转子基频相差 3%, 消除了拍振引起的振动波动, 验证了研究结论的正确性。

关 键 词: 振动; 多源激励; 拍振; 振动波动; 激励频率

中图分类号: V231.96

文献标志码: A

Experimental validation of the beat vibration of aero-engine

DING Xiaofei^{1,2}, LIAO Mingfu¹, PENG Danyang³, HAN Fangjun²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;

3. Shenyang Liming Aero Engine Corporation Limited,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110043, China)

Abstract: Combined with theoretical simulation of the beat vibration, analysis of the measured vibration signal and summary of the actual vibration elimination experience, three multi-source beat vibration modes of aero-engines were discussed. The identification process and the elimination method of the beat vibration fault were established. Experimental verification showed that for the three common multi-source coupling beat modes, the multi-source beat vibration and the vibration fluctuation could be eliminated when the multi-source excitation frequency differed by more than 3%. The proposed process and method were implemented and verified in engine beat vibration and fluctuation trouble-shooting, and the low-pressure rotor 2 times frequency-high-pressure rotor fundamental frequency coupled beat vibration was accurately identified. The low-pressure rotor speed was well-tuned through the control schedule to separate the above two frequencies by 3%. The vibration fluctuations caused by beat vibration was eliminated and the proposed method was validated.

Keywords: vibration; multi-source excitation; beat vibration; vibration fluctuation; excitation frequency

收稿日期: 2022-03-04

作者简介: 丁小飞(1987—), 男, 研究员, 博士生, 主要从事航空发动机整机振动分析和故障诊断的研究。

引用格式: 丁小飞, 廖明夫, 彭丹阳, 等. 航空发动机拍振问题研究与验证[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2639-2647. DING Xiaofei, LIAO Mingfu, PENG Danyang, et al. Experimental validation of the beat vibration of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11): 2639-2647.

现代涡喷或涡扇发动机都采用双转子甚至三转子结构^[1], 这导致发动机存在多个转子激振源。同时航空发动机结构形式复杂, 工作环境恶劣, 引起航空发动机整机振动的振源极其复杂, 有转子系统、气流、轴承、齿轮和结构共振等^[2-3]。针对单一激振源引起的航空发动机振动问题, 国内外学者在转子不平衡^[4-5]、不对中^[6-7]、热变形^[8-10]、碰摩^[11-12]、积油^[13]等引起的发动机振动问题开展了大量的仿真和试验研究, 但当前的研究多基于理论和试验器开展的单一影响因素的分析研究, 与航空发动机实际差距较远。

航空发动机实际工作过程中, 两个激振源振动频率接近时, 发动机就会出现拍振现象, 继而引发发动机振动值的异常波动。针对航空发动机拍振问题, 韩军等^[14]研究了双转子系统的拍振产生机理和特征, 研究表明拍振与双转子转速差和不平衡量的相位因素有关, 当转速差小于工作转速的 20% 时, 双转子系统拍振信号的强度较大。钱征文等^[15]研究了某型航空发动机拍振振动值摆动故障机理和排除方法, 研究表明发动机低压转子振动与附件传动轴的振动频率接近, 形成了拍振。马进锐^[16]针对双源拍振的故障预测进行了研究, 提出了预测流程并进行了试验验证。陈茉莉等^[17]研究了多源拍振的主要特性, 提出了多维图形法对二拍和三拍系统进行测试, 以实现小频差的拍振测试。在航空发动机实际工作过程中, 因激振因素复杂和非线性因素影响, 导致其存在转子倍频、分频的非线性振动。同时发动机又存在复杂的附件传动系统振动, 在特定的工况下, 会出现发动机转子基频、倍频、分频以及附件传动振动频率相互耦合^[18], 形成多源拍振, 导致发动机振动监测值振动出现异常的周期性波动。不同的多源拍振, 其特征表现类似, 但排故思路却完全不同。

本文首先分析了航空发动机多源拍振的机理和典型特征, 针对航空发动机实际工作转速线, 讨论了可能发生拍振的条件和模式, 建立了航空发动机多源拍振故障识别流程和排除方法, 并以某型发动机低压转子 2 倍频-高压转子基频拍振引起的振动波动诊断为案例进行了详细说明, 证

明了本文结论的正确性。

1 研究对象

本文研究的对象为典型的小涵道比航空发动机, 如图 1 所示, 发动机为带有中介轴承的双转子结构, 是典型的盘、鼓筒和轴组成的混合式转子。发动机共有 5 个支点, 其中 K1 支点和 K3 支点为滚珠轴承, K2 支点和 K5 支点为滚棒轴承, K4 支点为中介轴承, 其外环支承在高压转子后轴上, 内环支承在低压转子轴上。

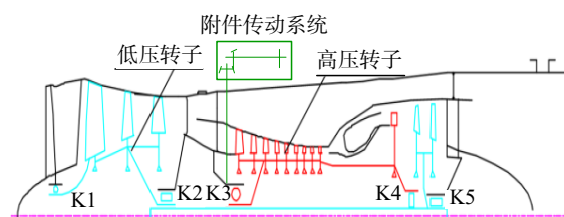


图 1 某航空发动机结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of an aero-engine structure

低压转子轴向支点跨度大, 由风扇轴与低压涡轮轴连接而成, 采用 3 个支点支承, 为 1-1-1 支承方式(K1、K2 和 K5); 高压转子为刚性转子, 高压压气机和涡轮采用螺栓止口连接, 采用 2 个支点支承, 为 1-0-1 支承方式(K3 和 K4)。

发动机附件传动系统与高压转子通过中央传动系统连接, 由高压转子输出功率驱动, 附件传动系统中存在多个传动轴, 利用复杂的齿轮传动系统进行传动。

2 航空发动机拍振分析

2.1 航空发动机拍振响应

多频、多源耦合振动是航空发动机整机振动的显著特点, 转子的不平衡、不对中、松动和碰摩都会产生激振力, 当 2 个激振力比较接近时, 发动机就会出现拍振现象^[16]。设 2 个独立激振的振动响应分别为

$$\begin{cases} x_1 = B_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \\ x_2 = B_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中 B_1 、 B_2 为 2 个振动响应的振幅; ω_1 、 ω_2 为 2 个激振的频率; ϕ_1 、 ϕ_2 为初始相位。

在机匣测振点上, 两个振动响应耦合表现为

$$X = x_1 + x_2 = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2]} \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} + \Delta\phi\right) \quad (2)$$

其中

$$\tan (\Delta \phi)=\frac{B_1+B_2}{B_1-B_2} \cot \left[\frac{\left(\omega_1-\omega_2\right) t+\phi_1-\phi_2}{2}\right]$$

可以看出拍振发生后, 振动响应幅值出现波动的现象。

2.2 发动机双转子拍振仿真

为深入分析某型航空发动机拍振问题, 以高压转子和低压转子不平衡激励代表 2 个激振源, 开展了双转子拍振仿真分析。

根据某发动机结构特征和参数, 建立了双转子动力学分析模型, 如图 2。转子采用一维梁单元建模; 支撑系统刚度采用弹簧单元建模。

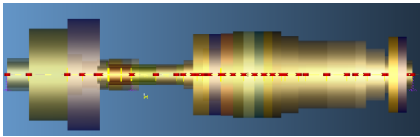


图 2 双转子动力学分析模型

Fig. 2 Dynamic analysis model of dual rotor

为研究双转子系统的拍振, 仿真分析了表 1 中两个状态下振动响应, 表中 f_h 为高压转子激振频率, f_l 为低压转子激振频率。

表 1 仿真计算状态		
Table 1 State of the simulation calculation		
状态	f_l /Hz	f_h /Hz
1	221.2	220.3
2	183.4	208.3

在高压转子和低压转子上施加不平衡量, 不平衡量加载位置及大小具体如表 2, 利用瞬态响应计算双转子系统的振动响应。

表 2 不平衡量位置和大小	
Table 2 Unbalance size and location	
施加位置	大小 $\angle$ 相位/(g·mm, (°))
风扇 3 级盘	100 $\angle$ 0
低压涡轮 1 级盘	100 $\angle$ 0
高压转子 9 级盘	100 $\angle$ 0
高压涡轮盘	100 $\angle$ 0

仿真得到了状态 1 和状态 2 下 K3 支点的振动时域波形和频谱, 如图 3、图 4 所示。仿真分析结果表明, 在状态 1 时 f_h 和 f_l 发生了明显的拍振现象, 状态 2 未发生拍振。

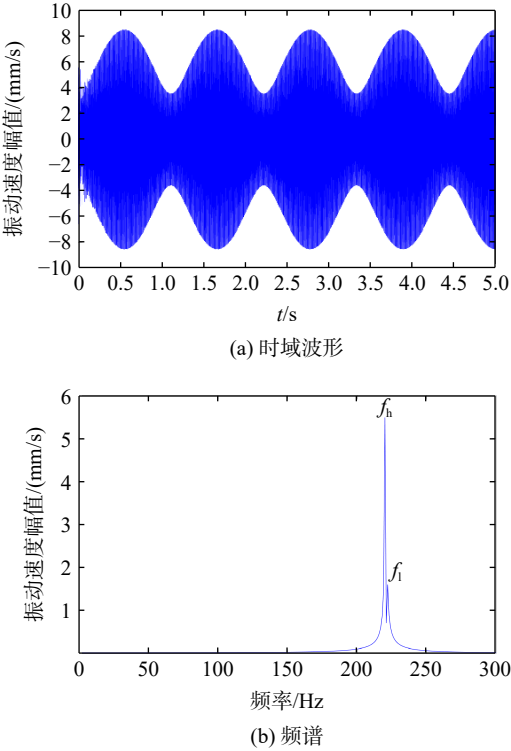


图 3 状态 1 振动响应

Fig. 3 Vibration response of state 1

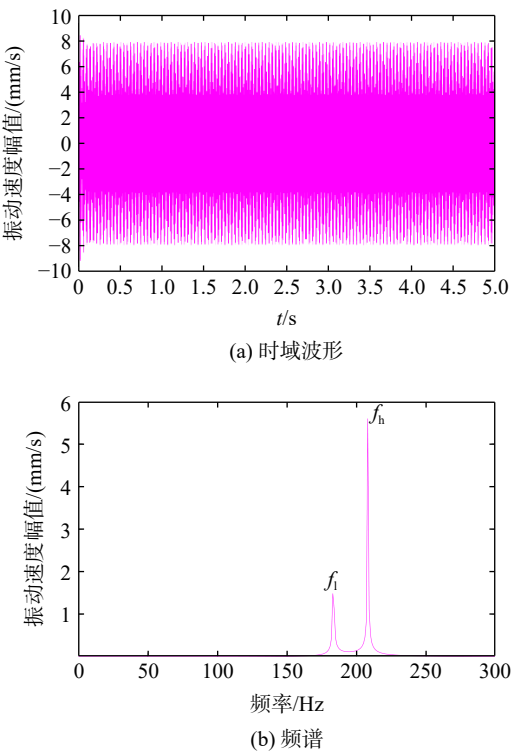


图 4 状态 2 振动响应

Fig. 4 Vibration response of state 2

3 航空发动机多源拍振模式

实际工作过程中的航空发动机的高、低压转

子转速比并不是一个定值,而是根据控制规律变化在一定范围内变化的。文献[19]建议为了避免发动机高、低压转子出现拍振,高、低压转子转速差不应小于 10%。对于现代先进小涵道比发动机,低压转子工作转速范围为 3 000~9 000 r/min,高压转子工作转速范围为 7 000~15 000 r/min^[2]。定义高、低压转子转速比 $R = N_2/N_1$,其中 N_2 为高压转子转速, N_1 为低压转子转速,图 5 所示为本文研究的某航空发动机某次试车过程中高低压转子转速比曲线。从图中可以看出,在发动机工作转速范围内,高、低压转子转速比 R 在 1.5~3 之间,其转差较大,故高、低压转子之间发生拍振的可能性不大。

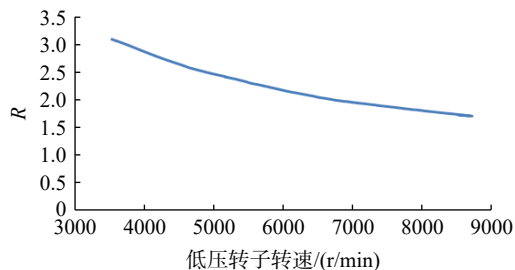


图 5 高、低压转子转速比曲线

Fig. 5 Speed ratio curve of high pressure rotor and low pressure rotor

发动机存在多源激振耦合问题,除高低压转子基频振动外,还存在不对中、碰摩、松动等非线性故障引起的倍频振动;油膜涡动、叶尖间隙激振等引起的分频振动;附件传动系统轴的振动等。在特定的转速工况下,可能会出现这些频率与基频接近的情况,引起耦合拍振问题的发生,常见的 3 种耦合拍振模式为:模式 1,低压转子倍频-高压转子基频耦合拍振;模式 2,高压转子分频-低压转子基频耦合拍振;模式 3,附件系统传动频率-低压转子基频耦合拍振。

以下将对航空发动机工作过程中这 3 种可能的多源耦合拍振模式进行详细探讨。

3.1 低压转子倍频-高压转子基频耦合拍振

航空发动机至少具有 5 个支点,各支点在工作过程中可能存在松动和不对中的可能性,从而激发转子 2 倍频、3 倍频等振动成分,在特定工作转速工况下,低压转子的倍频可能与高压转子基频接近,引起耦合拍振的发生。如图 6 所示,低压转子的 2 倍频、3 倍频在特定的工况下与发动机高压转子转速相当,当发动机在该特定工况或者附近工作时,低压转子 2 倍频或 3 倍频与高压转

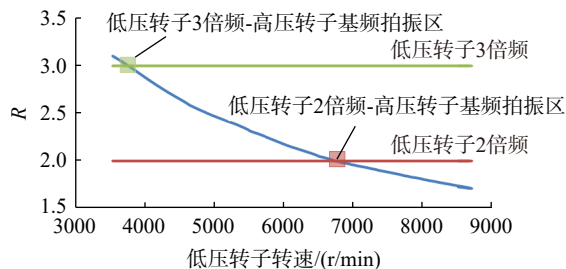


图 6 低压转子倍频与工作转速线关系

Fig. 6 Relationship between frequency multiplication of low pressure rotor and working speed line

子转速接近,产生拍振,即低压转子倍频-高压转子基频耦合拍振模式。

3.2 高压转子分频-低压转子基频耦合拍振

航空发动机激振因素复杂,存在油膜涡动、叶尖间隙激振、碰摩等引起的分频次谐波振动的可能性,产生如 1/3 倍频、1/2 倍频等,在特定工作转速工况下,高压转子的分频振动可能与低压转子基频接近,引发耦合拍振。如图 7 所示,高压转子的 1/3 倍频、1/2 倍频在特定的工况下与发动机低压转子转速相当,当发动机在该特定工况或者附近工作时,高压转子分频与低压转子转速频率接近,产生拍振,即高压转子分频-低压转子基频耦合拍振模式。

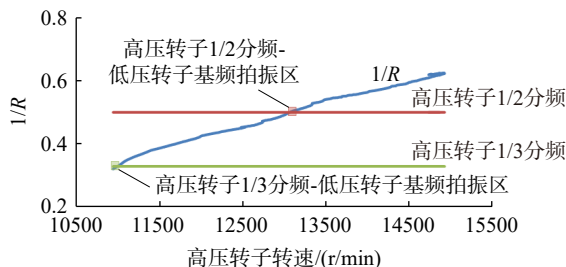


图 7 高压转子分频与工作转速线关系

Fig. 7 Relationship between frequency division of the high pressure rotor and the working speed line

3.3 附件系统传动频率-低压转子基频耦合拍振

航空发动机上需要传动很多附件系统,附件系统直接安装在发动机上。所有附件均由高压转子输出功率驱动,即所有附件系统的传动轴与高压转子转速成固定比值关系,这些附件系统在工作过程中不可避免地产生振动。在特定的工况下,附件传动振动频率与发动机低压转子转速相当,当发动机在该特定工况或者附近工作时,附件传动频率与低压转子转速频率接近,就会产生拍振,即附件传动频率-低压转子基频耦合拍振模式。如图 8 所示,某发动机发附机匣传动柔轴的转速

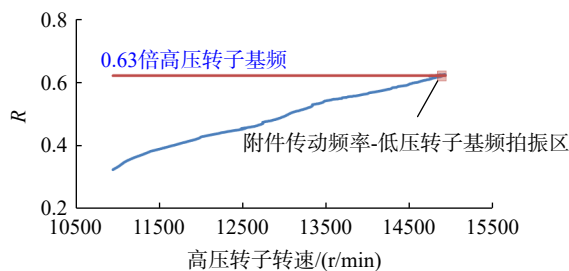


图 8 附件传动频率与工作转速线关系

Fig. 8 Relationship between the transmission frequency of the accessory system and the working speed line

为 $0.63N_2$, 在特定工作转速下, 该振动频率与低压转子基频接近, 产生拍振。

4 多源拍振识别流程和排除方法

在航空发动机试验和使用过程中, 为保障试验运转的安全, 需监测发动机振动。目前发动机多数从发动机机匣上安装加速度传感器来测量振动, 发动机上各处的振动均可由不同的传递路径传至机匣^[20]。通常情况下, 会在发动机主承力机匣上布置多个测点, 分别监测发动机一定带宽范围内的振动速度总量、高压转子基频分量、低压转子基频分量。

拍振理论表明, 拍振会引起振动出现周期性的波动。在航空发动机工作过程中可能存在不同模式的多源拍振, 笔者在工程实际中对大量工程试验分析发现, 不同模式的拍振会引起不同监测振动值的波动, 根据拍振理论和工程上拍振诊断和排除经验总结, 制定了航空发动机多源拍振识别流程和排除方法。

当航空发动机试验和使用过程中, 其振动监测值出现近似于周期性的正弦波动时, 通过图 9 流程判断其是何种多源拍振模式。

1) 判断振动值呈周期性正弦波动: 当航空发动机试验和使用过程中, 通过振动监测曲线观察到其振动监测值出现近似于周期性的正弦波动, 振动波动模式 1 为振动速度总量和低压转子基频振动周期性波动, 模式 2 为振动速度总量和高压转子基频振动周期性波动。

2) 计算高、低压转子转速比: 计算出现振动波动时转速比 $R = N_2/N_1$ 。

3) 判断 R 是否为整数: 确定 R 大小, 判断其是否为整数或接近整数。

4) 判断振动波动模式: 在确定 R 大小后, 通过振动监测曲线, 确认振动波动模式。若 R 为整数,

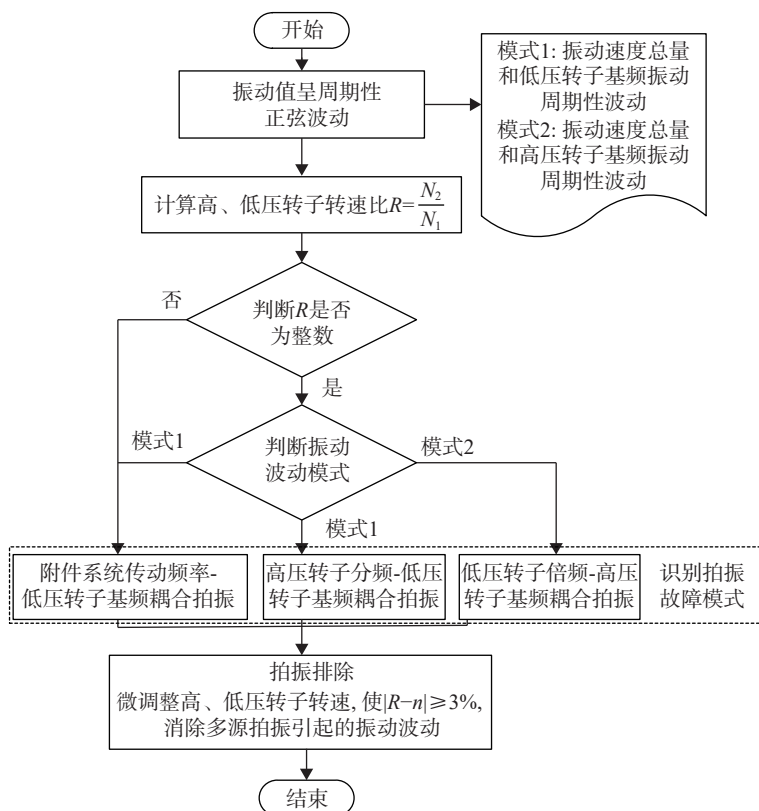


图 9 拍振引起的振动波动故障识别和排除流程

Fig. 9 Identification process and the method of eliminating the beat vibration fault

振动波动为模式 1, 可判断其为高压转子分频-低压转子基频耦合拍振; 若 R 为整数, 振动波动为模式 2, 可判断其为低压转子倍频-高压转子基频耦合拍振; 若 R 为非整数, 振动波动为模式 1, 可判断其为附件传动频率-低压转子基频耦合拍振。

5) 拍振排除: 在确认拍振模式后, 可通过微调高、低压转子转速实现消除多源耦合拍振, 工程上因发动机性能控制规律要求, 高、低压转子转速调整的范围相对较小, 需结合不同的多源拍振模式进行针对性的调整。一般为模式 1 振动波动时, 保持低压转子转速不变, 调整高压转子转速; 模式 2 振动波动时保持高压转子转速不变, 调整低压转子转速; 工程试验验证表明, 当 $|R-n| \geq 3\%$ 时, 即可消除多源拍振引起的振动值波动问题, 其中 $n=2, 3, 4, \dots$ 。

5 试验验证

本文研究的某航空发动机在试验过程中, 在特定转速工况下出现监测振动值波动的异常现象。利用所建立的多源耦合拍振识别流程, 准确识别出该异常振动波动为低压转子 2 倍频-高压转子基频耦合拍振引起的。后续试验过程中, 通过调整高、低压转子转速, 消除了异常振动波动问题。

5.1 振动测点布局

发动机在台架试车时, 在发动机进气机匣、中介机匣和涡轮机匣 3 个承力机匣上共布置 5 个振动测点监测发动机振动, 各测点安装示意图见图 10, 具体信息如表 3 所示。

采用窄带滤波跟踪基频分量 A_1 、 V_2 、 V_3 和 A_4 , 滤波范围为 $(f \pm 3)$ Hz, f 为跟踪的频率。其中 A_1 和 A_4 监测低压转子基频振动位移分量; V_2 和 V_3 监测高压转子基频振动速度分量。 B 为 20~500 Hz 范围内的振动速度总量。

振动测试时, 采用定采样率采集, 采样率为

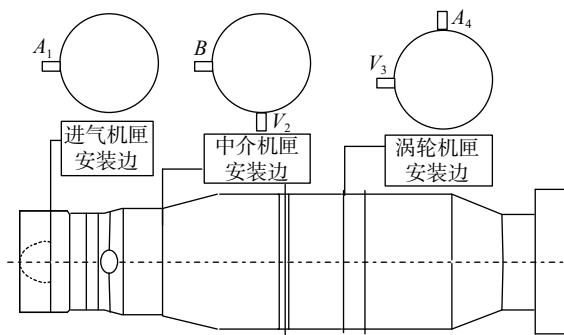


图 10 振动测点位置

Fig. 10 Location of vibration measuring points

表 3 振动测点信息

Table 3 Information of vibration measuring point

监测量	位置	测振方向
低压转子基频 振动位移 A_1 /mm	进气机匣	水平
高压转子基频 振动速度 V_2 /(mm/s)	中介机匣	垂直
振动 速度总量 B /(mm/s)	中介机匣	水平
高压转子基频 振动速度 V_3 /(mm/s)	涡轮机匣	水平
低压转子基频 振动位移 A_4 /mm	涡轮机匣	垂直

12.8 kHz。软件频谱分析分辨率为 0.25 Hz, 能够满足工程振动测试需求。

5.2 振动波动现象

某发动机在台架试车时, 在某稳态工况, 发动机测量的振动速度总量和高压转子基频振动均出现了周期性波动, 如图 11 所示。具体情况为在高压转子转速 $N_2=13\ 220$ r/min 稳态转速台阶, 振动速度总量 B 、高压转子振动分量 V_2 和 V_3 均呈现出周期性的近正弦波动情况, 其中:

1) 振动速度总量 B 最大波动范围为 11~21 mm/s, 且波动幅值呈现出增大的趋势, 最大波动量为 10 mm/s。

2) 高压转子基频振动分量 V_2 最大波动范围为 7~17 mm/s, 最大波动量为 10 mm/s; V_3 最大波动范围为 9~15 mm/s, 最大波动量为 6 mm/s。

3) 低压转子基频振动分量 A_1 和 A_4 均未表现

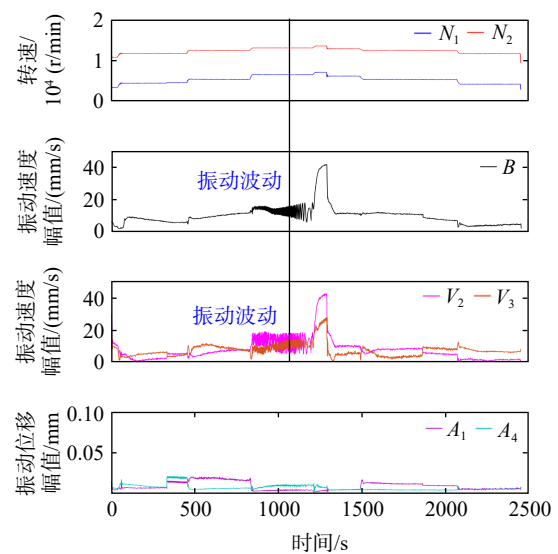


图 11 振动曲线

Fig. 11 Vibration curves

出振动波动。

详细数据分析表明,在该转速台阶,高压转子转速 N_2 基本未变化,维持在 13 200 r/min,而低压转子转速 N_1 略有变化,从 6 684 r/min 逐渐降低到 6 608 r/min,随着 N_1 的降低,振动速度总量 B 振动波动现象越明显。

5.3 拍振识别

从振动波动现象可以看出,振动波动表现为周期性正弦波动。对试车振动数据进行了分析,振动波动台阶的高、低压转子转速分别为 $N_2=13\ 220$ r/min, $N_1=6\ 608$ r/min,计算高、低压转子转速比 $R=N_2/N_1=2$ 。同时振动波动表现为振动速度总量和高压转子基频振动分量波动,低压转子基频振动分量未表现出振动波动。

按照多源拍振识别流程,可判断振动波动的主要原因是低压转子 2 倍频-高压转子基频耦合拍振引起。

为进一步确认振动波动的机理和多源拍振识别流程的准确性,对振动原始信号和频谱进行了详细分析,以振动速度总量 B 的振动信号为例进行说明。

图 12 给出了振动速度总量 B 在振动波动工况台阶(定义其为工况 1)和其前一工况台阶(定义其为工况 2)的频谱云图。从图中可以看出,主要振动频率成分为低压转子基频 f_1 、高压转子基频 f_2 和低压转子 2 倍频 $2f_1$ 。在转速升转过程中 $2f_1$ 逐渐逼近 f_2 ,在振动波动工况台阶,两者基本重合。

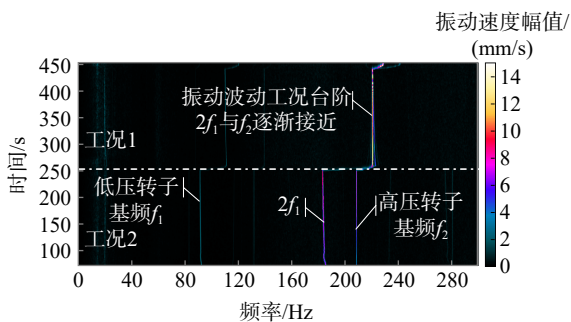


图 12 振动速度总量 B 的频谱云图

Fig. 12 Spectrogram of total vibration velocity B

1) 在工况 1 下, $2f_1=221.2$ Hz, 振动速度幅值为 4.8 mm/s; $f_2=220.3$ Hz, 振动速度幅值为 11.3 mm/s; $2f_1$ 和 f_2 两个频率基本相当, 发生拍振引起波动, 振动波动的单峰值与 $2f_1$ 振动速度幅值相当。

2) 在工况 2 下, $2f_1=183.4$ Hz, 振动速度幅值为 13.3 mm/s; $f_2=208.3$ Hz, 振动速度幅值为 11 mm/s;

$2f_1$ 和 f_2 两个频率相差较大, 不会引起拍振, 故工况 2 振动未出现波动。

对工况 1 和工况 2 原始波形进行带通滤波, 滤波范围为 $(f_2 \pm 3)$ Hz。图 13 和图 14 分别给出了工况 1 和工况 2 滤波后的波形, 从波形可以看出, 工况 1 发生了明显的拍振现象。

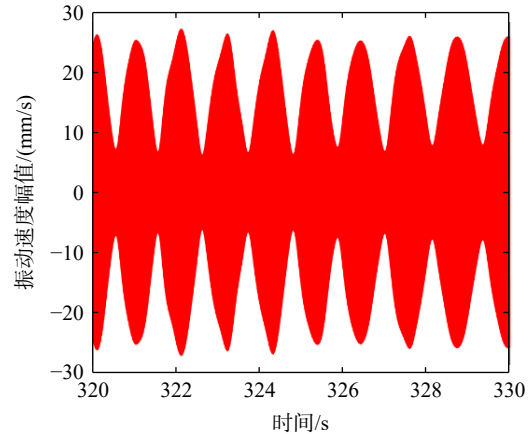


图 13 工况 1 波形

Fig. 13 Waveform of working condition 1

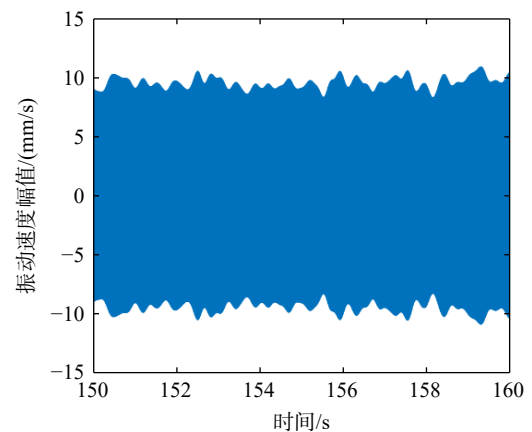


图 14 工况 2 波形

Fig. 14 Waveform of working condition 2

5.4 拍振排除

通过文中第 5.3 节分析, 识别出试车过程中振动波动的主要原因是低压转子 2 倍频-高压转子基频耦合拍振引起。为避免试车过程中再次出现振动波动, 在后续的试车过程中, 对发动机性能控制规律进行了微调, 降低同一工况下低压转子转速 N_1 , 高压转子转速 N_2 基本维持不变, 以此改变转速比 R , 避免该工况下出现低压转子 2 倍频-高压转子基频耦合拍振现象。

在验证试车过程中, 将 $N_2=13\ 210$ r/min 转速台阶下的 N_1 调整为 6 505 r/min, 此时高、低压转子转速比 $R=2.03$, f_2 与 $2f_1$ 的频率差为 3.2 Hz。从图 15

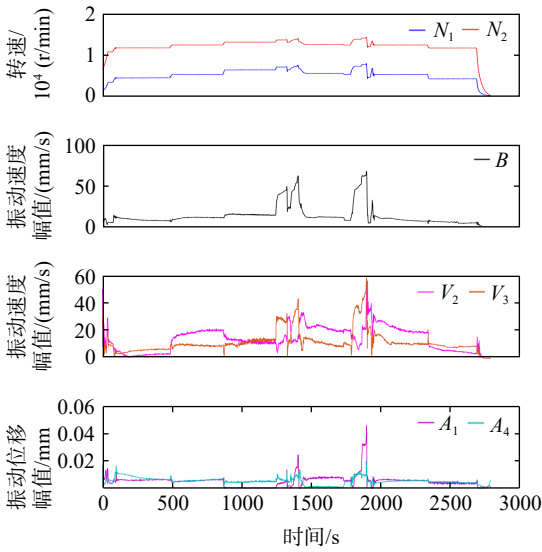


图 15 验证试车振动曲线

Fig. 15 Vibration curves for verification test

验证试车振动曲线图可以看出,经调整后,发动机全程未出现振动波动现象,排除了发动机拍振问题。

对 3 个型号多份航空发动机或航改燃机工程试验过程中出现拍振现象进统计,其中型号 A 为本文研究对象。拍振类型包含了本文所述的 3 种类型拍振,利用本文方法进行排故后,均有效消除了拍振引起的振动波动现象,验证了该方法的正确性。对发动机拍振排故前后的高、低压转子转速和转速比进行统计对比,如表 4 所示。工

表 4 拍振发生前后 N_2 和 N_1 统计

Table 4 Information of N_2 and N_1 before and after beat vibration occurred

型号	序号	拍振模式	N_2	N_1	R
A	1	1	13 245	6 618	2.001
		拍振排除后	13 243	6 802	1.947
	2	1	12 914	6 482	1.992
		拍振排除后	12 900	6 550	1.969
	3	1	13 552	6 795	1.994
		拍振排除后	13 576	6 993	1.941
	4	1	10 975	3 680	2.98
		拍振排除后	10 936	3 460	3.16
	5	1	10 779	3 591	3.001
		拍振排除后	10 801	3 481	3.102
B	6	1	11 728	5 952	1.97
		拍振排除后	12 217	5 978	2.04
C	7	2	8 865	4 442	1.99
		拍振排除后	9 047	4 431	2.04

程统计结果表明当 $|R-n|\geq 3\%$ 时,可有效改善发动机多源频率之间出现耦合拍振现象。

6 结 论

针对航空发动机存在多个激励源的振动特征,分析了多源耦合拍振引起发动机振动波动问题,经分析得到如下结论:

1) 航空发动机工作过程中,在特定工况下可能出现多源激振频率相近而激发出拍振现象;可能出现的拍振模式分别为低压转子倍频-高压转子基频耦合拍振、高压转子分频-低压转子基频耦合拍振和附件系统传动频率-低压转子基频耦合拍振,发生拍振时会引起振动监测值出现周期性波动。

2) 多个型号发动机工程试验和经验参数统计表明,当发动机 2 个激振频率在 3% 以内时,易产生拍振。

3) 结合理论和发动机实际使用情况,建立了拍振故障识别流程,并在发动机振动排故中进行了应用,验证了流程的准确性和适用性。

4) 在发动机设计和工作过程中,应合理配置高、低压转子转速关系,尽量减少发动机两个振动激励频率差在 3% 以内长期工作,减少多源耦合拍振现象的发生。

参考文献:

[1] 廖明夫,于潇,王四季,等.双转子系统的振动[J].机械科学与技术,2013,32(4):475-480.
LIAO Mingfu, YU Xiao, WANG Siji, et al. The vibration features of a twin spool rotor system[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(4): 475-480. (in Chinese)

[2] 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):1-8,13.
LIU Yongquan, WANG Deyou, HONG Jie, et al. Analysis of whole aeroengine vibration control technology[J]. Aeroengine, 2013, 39(5): 1-8, 13. (in Chinese)

[3] 艾延廷,周海仑,孙丹,等.航空发动机整机振动分析与控制[J].沈阳航空航天大学学报,2015,32(5):1-25.
AI Yanting, ZHOU Hailun, SUN Dan, et al. Study on the control of the whole aero-engine vibration[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2015, 32(5): 1-25. (in Chinese)

[4] 陈曦,廖明夫,张霞妹,等.大涵道比涡扇发动机低压转子现场动平衡技术[J].航空动力学报,2017,32(4):808-819.
CHEN Xi, LIAO Mingfu, ZHANG Xiamei, et al. Field balancing technology for low pressure rotors of high bypass ratio turbofan engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(4): 808-819. (in Chinese)

[5] PENNACCHI P, VANIA A, BACHSCHMID N. Increasing the robustness of fault identification in rotor dynamics by means of M-estimators[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(8): 3003-3029.

- [6] 李全坤, 廖明夫, 蒋云帆. 双转子不对中故障振动特性分析[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(12): 1916-1920.
LI Quankun, LIAO Mingfu, JIANG Yunfan. The vibration features analysis of twin spool rotor with misalignment fault[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(12): 1916-1920. (in Chinese)
- [7] 张宏献, 李学军, 蒋玲莉, 等. 航空发动机双转子系统不对中研究进展[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 022717.
ZHANG Hongxian, LI Xuejun, JIANG Lingli, et al. A review of misalignment of aero-engine rotor system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(6): 022717. (in Chinese)
- [8] 马艳红, 刘海舟, 邓旺群, 等. 具有初始热变形的转子系统振动响应分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(2): 227-233.
MA Yanhong, LIU Haizhou, DENG Wangqun, et al. Vibration response analysis of rotor system with initial thermal deformation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(2): 227-233. (in Chinese)
- [9] BACHSCHMID N, PENNACCHI P, VANIA A. Thermally induced vibrations due to rub in real rotors[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299(4/5): 683-719.
- [10] PENNACCHI P, VANIA A. Accuracy in the identification of a generator thermal bow[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 274(1/2): 273-295.
- [11] 廖明夫, 宋明波, 张霞妹. 转子/机匣碰摩引起的转子弯扭耦合振动[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5): 1009-1017, 1031.
LIAO Mingfu, SONG Mingbo, ZHANG Xiamei. Coupled bending and torsional vibration due to rotor-casing contact[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5): 1009-1017, 1031. (in Chinese)
- [12] 王俨凯, 王理, 廖明夫, 等. 双转子发动机转子-机匣碰摩振动特征研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(4): 614-620.
WANG Yankai, WANG Li, LIAO Mingfu, et al. Exploring vibration characteristics of dual-rotor engine's rotor-to-case rub-impact[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(4): 614-620. (in Chinese)
- [13] 丁小飞, 曹航, 冯国全, 等. 航空发动机转子盘腔积液振动故障分析[J]. 航空动力学报, 2021, 36(2): 341-351.
DING Xiaofei, CAO Hang, FENG Guoquan, et al. Vibration fault analysis of aeroengine rotor disk cavity filled with oil[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(2): 341-351. (in Chinese)
- [14] 韩军, 高德平, 胡绚, 等. 航空发动机双转子系统的拍振分析[J]. 航空学报, 2007, 28(6): 1369-1373.
HAN Jun, GAO Deping, HU Xuan, et al. Research on beat vibration of dual-rotor for aero-engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1369-1373. (in Chinese)
- [15] 钱征文, 程礼, 范家栋, 等. 某型航空发动机振动值摆动故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2): 208-213, 339.
QIAN Zhengwen, CHENG Li, FAN Jiadong, et al. Fault diagnosis of vibration amplitude swing for some kind of aeroengine[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2): 208-213, 339. (in Chinese)
- [16] 马进锐. 航空发动机故障诊断与振动预测技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
MA Jinrui. Aero engine fault diagnosis and vibration prediction[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015. (in Chinese)
- [17] 陈茉莉, 李舜酩, 温卫东, 等. 多源拍振分析方法与试验[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(2): 202-206, 267.
CHEN Moli, LI Shunming, WEN Weidong, et al. Analysis and experiment on multi-source beat vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(2): 202-206, 267. (in Chinese)
- [18] 王俨凯, 廖明夫, 丁小飞. 航空发动机故障诊断[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [19] 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.
- [20] 王俨凯, 张占升, 廖明夫, 等. 基于动力学分析的发动机测振截面选取[J]. 航空动力学报, 2018, 33(6): 1446-1455.
WANG Yankai, ZHANG Zhansheng, LIAO Mingfu, et al. Section selecting for engine vibration measurement based on dynamic analysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(6): 1446-1455. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)