

# 航空发动机转子不平衡量突增的自动识别

马会防<sup>1</sup>, 张执南<sup>2</sup>, 万 召<sup>1</sup>, 陈亚龙<sup>1</sup>, 虞 磊<sup>1</sup>

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:**为实现在航空发动机振动信号分析时因封严胶条脱落发生的转子不平衡量突增的自动识别, 采用多傅里叶变换(FFT)滤波技术获得转速跟踪滤波后的基频振动时域信号, 提出了振幅突增和突增后振幅稳定的转子不平衡量突增的 2 种特征, 通过应用案例对振动信号的程序化进行处理, 得到转速跟踪滤波后的基频振动时域信号及转子不平衡量突增的识别参数, 数据结果中振幅增大比例系数达到 3.75, 且突增后振幅稳定。结果表明: 采用 FFT 滤波技术, 实现了转子不平衡量突增的自动识别, 并验证了识别方法的有效性。转子不平衡量突增的识别技术应用用于在线监测系统时, 能及时识别故障并发出报警信息, 保证设备运转的安全; 应用于离线振动信号分析系统时, 缩短了人工数据分析时间, 提高了工作效率。

**关键词:** 转子; 不平衡量突增; 振动特征; 多傅里叶变换滤波; 振幅突增; 振幅稳定; 自动识别; 航空发动机

中图分类号: V247.5

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.02.020

## Automatic Recognition for Aeroengine Rotor Unbalance Surge

MA Hui-fang<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-nan<sup>2</sup>, WAN Zhao<sup>1</sup>, CHEN Ya-long<sup>1</sup>, YU Lei<sup>1</sup>

(1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to realize automatic identification of rotor unbalance surge in the aeroengine, firstly, multiple FFT filtering technology was used to obtain the time-domain signal of fundamental frequency vibration after speed tracking filtering; secondly, two characteristics of rotor unbalance surge were proposed: amplitude surge and amplitude stabilized after the surge, and the vibration signals were processed through programming. In the application case, by using the time-domain signal of fundamental frequency vibration and the identification parameters of rotor unbalance surge, it was found that the amplitude scaling coefficient reached 3.75 at a certain time, then stabilized after the surge, by which the unbalance surge event was identified. The results show that the method can realize automatic identification of rotor unbalance surge by using multiple FFT filtering technology and the programmed characteristic parameter identification, and its effectiveness is verified. When the identification technology of rotor unbalance surge is applied to the online monitoring system, it can timely identify faults and send out alarm messages to ensure the safety of equipment operation; when applied to off-line vibration signal analysis systems, it can shorten manual data analysis time and improve work efficiency.

**Key words:** rotor; unbalance surge; vibration characteristics; multiple FFT filtering; vibration amplitude surge; vibration amplitude stabilization; automatic identification; aeroengine

## 0 引言

随着超临界旋转机械技术的发展, 转子不平衡量突增现象备受关注。其中包括几个原因: (1) 设备转速逐渐提高, 在高转速、高离心力下转子叶片断裂、飞脱的可能性增大; (2) 设备内部温度逐渐提高, 高温条件下转子材料性能下降, 转子叶片断裂、飞脱的可能

性增大; (3) 有些设备如航空发动机在其服役期间遭受吞冰、鸟撞等较恶劣的工况, 引起转子叶片断裂、飞脱。在高转速条件下转子不平衡量突增可引起高能载荷, 造成设备动力学特性恶化及关键构件的损伤。

Laaradj S H 等<sup>[1-2]</sup>通过对振动信号的深入分析认识到振动对机器状态监测的重要性, 振动不仅用来表征振动水平, 还能完成机械故障的监测及转子不平衡

收稿日期: 2022-08-09 基金项目: 国家自然科学基金(12072191)资助

作者简介: 马会防(1980), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 马会防, 张执南, 万召, 等. 航空发动机转子不平衡量突增的自动识别[J]. 航空发动机, 2024, 50(2): 147-152. MA Hui-fang, ZHANG Zhi-nan, WAN Zhao, et al. Automatic recognition for aeroengine rotor unbalance surge[J]. Aeroengine, 2024, 50(2): 147-152.

位置的跨域深度传递识别等。不平衡突增是机械转子动力学系统常见的一种故障,目前对转子不平衡量突增的研究可分为力学机理分析、数值仿真和试验等<sup>[3-5]</sup>。数值仿真主要研究仿真算法及其与试验结果的一致性,其中,洪杰等<sup>[6]</sup>研究了叶片丢失激励下整机力学行为及其动力特性,熊雨浓等<sup>[7-9]</sup>研究了突加不平衡激励下转子系统的响应;试验研究主要分为试验方法、振动响应规律及特点等<sup>[10-12]</sup>。

关于转子不平衡量突增的振动特征,王珏<sup>[12]</sup>通过试验表明,在大突加不平衡发生时频谱出现超次谐波,且冲击系数由挤压油膜阻尼器限幅作用并不呈线性关系;叶冬<sup>[13]</sup>通过试验表明,飞脱转速越高、飞脱质量越大,振动响应越大;Xu等<sup>[14]</sup>设计了一种能够量化转子不平衡程度的健康指标,成功地检测和量化了现场风力机叶片裂纹引起的转子不平衡。上述文献针对转子不平衡激励下的振动特征进行了研究,但对转子不平衡量突增的自动识别研究尚未开展。

多傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)滤波是一种改进的数字滤波技术,通过“分段复用”得到高质量的时域信号,从而减小滤波后的信号误差。本文采用多FFT滤波实现振动信号的转速跟踪滤波,得到滤波后的基频振动时域信号,提出了转子不平衡量突增的2种振动特征,并采用一些列子程序判断振动信号是否具有这2种振动特征,实现对转子不平衡突增的自动识别。

## 1 多FFT滤波技术

### 1.1 数字滤波的频域方法

数字滤波的频域方法<sup>[15]</sup>是将时域信号段进行FFT变换得到1组复数,将需要滤去频率所对应的复数置零,保持需要保留频率对应的复数不变,再用快速傅里叶反变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)对复数组变换,得到时域信号,即为经过滤波的时域信号。

该滤波方法对频率过滤精度高,但滤波后的时域信号在前后两端信号段误差较大。

下面通过实例说明该滤波方法及其特点。设 $x_1 = \sin(100\pi t)$ ,其频率为50 Hz,幅值为1 mm;  $x_2 = \sin(160\pi t)$ ,其频率为85 Hz,幅值为1 mm;  $x_3 = x_1 + x_2$ 。则 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 的时域信号及其FFT如图1所示。

对 $x_3$ 进行带通滤波,频率为40~60 Hz,滤波过程

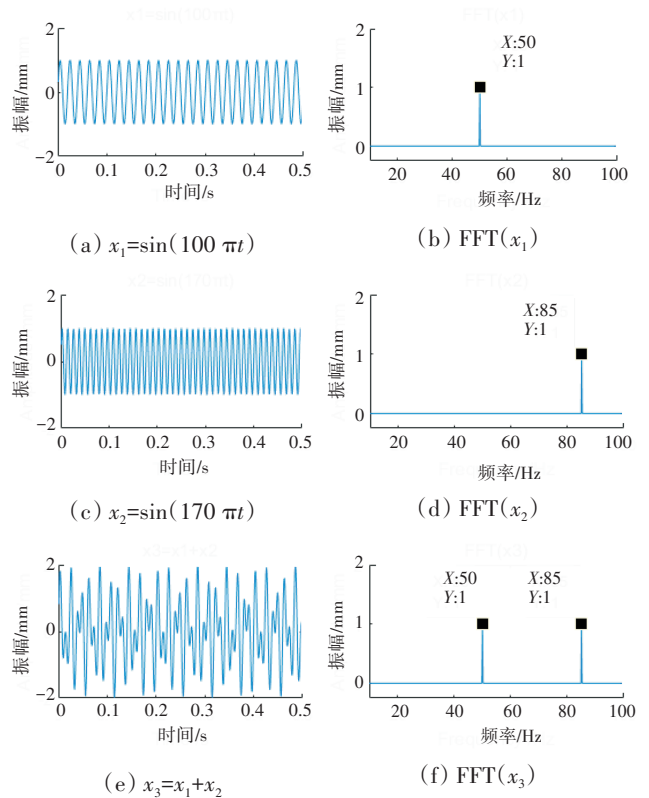


图1  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 的时域信号及其FFT

如下:(1)对 $x_3$ 的信号段进行FFT变换,得到1组复数,数组中的每个数对应1个频率;(2)保持复数组中40~60 Hz对应的复数不变,将

40~60 Hz之外对应的复数置零;(3)对更改后的复数组进行IFFT变换,取其实部,即得到滤波后的信号,如图2所示。

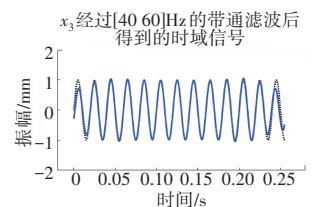


图2 滤波后的信号及其理论值对比

$x_3$ 滤波后得到的信号理论上就是 $x_1$ ,通过对比理论值(虚线表示)和滤波后的实际值(实线表示),发现在信号两端误差较大,在信号中部误差较小(图2)。

误差产生的原因是由于滤波过程中的“置零”截断导致频域能量泄漏引起的,FFT滤波技术引起滤波后的信号产生一定的误差,为减少这种误差,需要对FFT滤波方法进行改进。

### 1.2 多FFT滤波方法

整周期能较好地解决能量泄漏问题,但无键相位信号,无法实现整周期采样。本文提出多FFT滤波方法,利用了“滤波后信号与理论信号值在信号两端误差较大”的特点,进行多个不同时刻为起始点的FFT滤波,最终的滤波信号在多个FFT滤波信号中分段取

用,即在一个较短的时段内从误差较小的滤波信号中取用,在下一个较短的时段内从另一个误差较小的滤波信号中取用,最终实现滤波后的信号在各时段内的误差都较小。

以 2 个 FFT 滤波为例,对同一个信号,采用不同的起点时刻进行分段(将一个 FFT 数据块的起点时刻/终止时刻设置在另一个 FFT 数据块的 1/2 处),具体操作如图 3 所示。

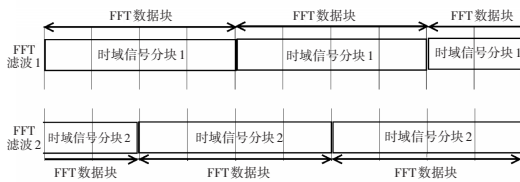


图 3 采用 2 个 FFT 滤波时的信号分段

对各时段的 FFT 数据块分别进行 FFT 滤波,由于采用了 2 个 FFT 滤波,得到了 2 个 FFT 滤波后的信号,每个 FFT 滤波信号的中间段信号误差较小,可取中间段信号组成最终的滤波信号,如图 4 所示。

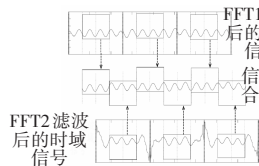


图 4 采用 2 个 FFT 滤波时的最终滤波信号

除了采用 2 个 FFT 滤波,还可采用 3、4 个等多个 FFT 进行滤波,数量不同的 FFT 采用不同的时刻进行滤波信号分段。多 FFT 滤波方法可减少滤波后的信号误差,提高信号质量。

### 2 转子不平衡量突增的振动特征

在转子不平衡量突增试验中的振动位移信号如图 5 所示。

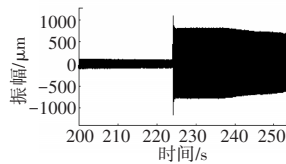


图 5 转子质量飞脱的振动位移信号

在转子不平衡量突增前,转子系统处于较好的平衡状态,振动较小;在转子质量飞脱后的瞬间,转子系统不平衡量由小变大,突增会形成 1 个类似“冲击”的效应,使振幅出现 1 个瞬态的、较大的振动峰值,随后转子振动趋于振幅稳定状态,整个过程转子质量飞脱前后 1 s 内的振动信号如图 6 所示。

本文采用多 FFT 滤波方法,完成振动信号的基频跟踪滤波,得到滤波后的时域信号,在转子不平衡量突增前后 1 s 的信号段如图 7 所示。

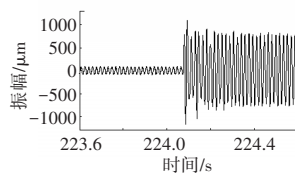


图 6 转子质量飞脱前后 1 s 内的振动信号

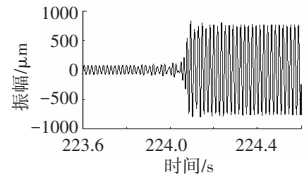


图 7 转子不平衡量突增前后 1 s 的信号段

滤波后的振动信号特点:(1)冲击效应弱化:如原始信号(图 5),转子不平衡突增后产生“冲击”最大幅值约为 1200  $\mu\text{m}$ ,振幅相比在稳定时段(幅值为 800  $\mu\text{m}$ ) 增大约 50%,而滤波后冲击效应被完全弱化;(2)振动信号变得较“光滑”:由于滤波后的振动信号其振动频率较单一,时域信号更光滑、连续,消除了高频信号导致的“毛刺”现象,及 2 倍频等其他倍频与基频合并引起的振幅波动,使振幅增大后趋于稳定,如图 8 所示,除在第 223.8~224.3 s 这 0.5 s 时段内振幅不稳(飞脱前后转子轻重点有变化),其他时刻振幅稳定。

基于滤波后的振动信号,本文归纳出转子不平衡突增的 2 种振动信号特征:振幅突增和突增后振幅稳定。

所谓的“突”是指时间短暂,振幅的变换相对转子在 1~3 个旋转周期内能完成;所谓的“增”是在转子质量飞脱后,转子将获得 1 个稳定、较大的不平衡量后产生稳定、较大的基频振动,这是转子质量飞脱的 1 个重要振动特征;所谓的“稳定”,即振幅增大后,若干个周期内的振幅最大值、最小值都相差不大,由其他载荷引起的基频振动,具有明显振幅波动,不符合“稳定”的特点,如图 9 所示。

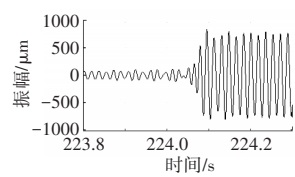


图 8 转子不平衡突增前后 0.5s 内的基频滤波振动信号

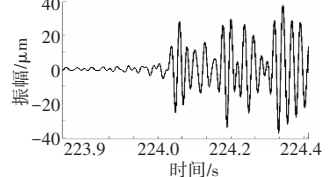


图 9 基频幅值波动的振动信号

这 2 种特征是基于位移信号得出的,同样也适用于速度信号、加速度信号,在转子不平衡突增时,加速度、速度振动信号也具有振幅突增和增后稳定的特点。

### 3 基于振动特征的自动识别方法

#### 3.1 信号分段

为实现转子不平衡突增的自动识别,还需要将 2

种振动特征进一步量化,转化为程序可识别的参数特征。

基于滤波后的信号比较“光滑”、无“毛刺”的特点,提出“零点”的概念。在一段正/负连续信号中,两端最接近于零的点为“零点”,由零点将信号分成基本的信号段,如图10所示,图中零点用“·”表示,并将信号分为11个基本信号段。

通过程序识别零点的算法很多如图11所示,图中 $X(N)$ 为基频振动序列值; $N$ 为数据点数; $m$ 、 $n$ 为计数器。从第1个小于0的零点开始,分别存储了第1、3、5个……零点对应的数据序列号在 $Y(m)$ 之中,可根据 $Y$ 中的值将信号分为若干个基本信号段,以便处理。

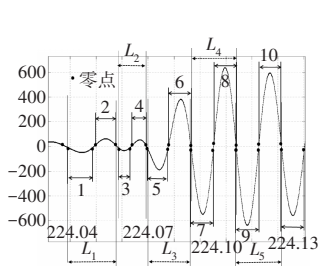


图10 零点及基本信号段

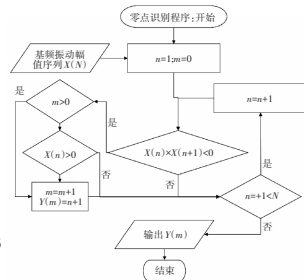


图11 零点识别运算程序

### 3.2 振幅突增识别

振幅突增识别的基本方法是将转子旋转若干转时间设为 $\Delta t$ ,将 $\Delta t$ 前后的振幅相比,比值明显增大的,则可识别为振幅突增,识别程序如图12所示。

程序中有 $N_{bn1}$ 和 $R_0$ 2个关键参数, $N_{bn1}$ 是指将多个基本信号段组成1个长信号段,并进行数值统计,推荐 $N_{bn1}$ 取4~6, $N_{bn1}$ 取值太小则增加了局部信号对识别的影响, $N_{bn1}$ 取值太大则降低识别速度的敏感性; $R$ 为振幅增大比例系数,用于反映振幅增大的情况, $R_0$ 是大于1的振幅增大比例系数阈值(推荐取2及以上),其具体取值同样影响识别结果的敏感性和可靠性, $R_0$ 取值可与长信号的统计方法和当时的转速相关。

长信号数值特征的统计方法可采用取最大值和取最大绝对值等方法。

由于振幅突增识别程序中的阈值参数 $N_{bn1}$ 、 $R_0$ 关

系到转子质量飞脱识别的灵敏度、快速性和正确性等。因此阈值的取值至关重要,在实践中可结合实际物理意义不断优化。以 $R_0$ 为例,其物理意义是转子质量飞脱后与飞脱前的振幅比,飞脱后的振幅增量与在飞脱发生时的转速等有关,可将 $R_0$ 设置为与转速相关的阈值,该设置更为合理。

### 3.3 振幅稳定性判别

振幅稳定性判别的基本方法:先记录突增时刻之后的转子每1~2转的振幅,依次记录转子十几转或几十转内的振幅,比较这些振幅记录值,如果数值相差不大,则认为振幅稳定。振幅稳定性判别程序如图13所示。

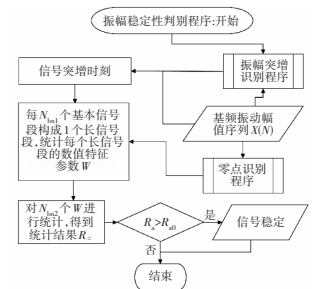


图13 振幅稳定性判别程序

程序中有 $N_{bn1}$ 、 $N_{bn2}$ 和 $R_{a0}$ 3个关键参数。 $N_{bn2}$ 是指采用多个长信号进行稳定性判别,理论上转子质量飞脱后产生的不平衡量是稳定的,即采用更多的长信号不影响对振幅稳定性的判定,但会影响判别的快速性。采用太少的信号则容易使判别结果不稳定,甚至误判,因此需合理取值,一般取 $N_{bn2}=10$ 。

$R_a$ 为振幅稳定性判别变量, $R_{a0}$ 为振幅稳定性判别变量的阈值,其具体值与采用的统计方法相关。如设 $W$ 为长信号中绝对值的最大值,计算各长信号 $W$ 的平均值,统计平均值在0.9~1.1倍内 $w$ 的个数 $n_w$ ,令 $R_a = n_w/N_{bn2}$ ,如 $R_a > R_{a0}$ 时,振幅在指定范围内的百分比超过一定值,则认为信号振幅稳定。这种算法中 $R_{a0}$ 为关于百分比的1个阈值。同时也可以采用其他算法,如统计指定振幅范围内的长信号数量,则 $R_{a0}$ 为关于该数量的1个阈值。

### 3.4 转子不平衡突增的自动识别

基于基频跟踪滤波、振幅突增识别、振幅稳定性判别,实现了转子不平衡突增的程序自动识别,其识别程序如图14所示。

转子不平衡突增程序可根据突增后振幅的增量进行不平衡量的级别评估,并对其发生概率进行级别评估等,从而增强、扩展程序功能。

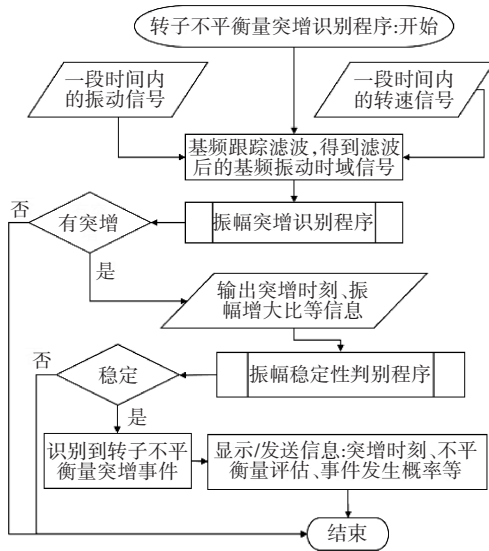


图 14 转子不平衡量突增识别程序

## 4 转子不平衡量突增自动识别的应用

### 4.1 应用实例

使用转子不平衡量突增识别程序对试验件的振动信号进行处理。在试验件缓慢增速过程中,在接近第 600 s 的时刻,当振幅增大比例系数达到 3.75 时,振动信号由 0.4 mm/s 突增到 1.5 mm/s,如图 15 所示,振幅增大比例系数超过阈值 2,且增大后振幅稳定,可识别到转子质量飞脱事件。

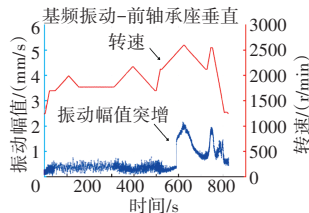


图 15 振动突增

停车后对试验件转子进行检查,发现用于密封叶片与盖板间隙的胶条已发生较大的变形和移位。胶条原本位于盖板下面,在振动、压力和离心力等作用下从盖板下面沿盖板与叶片的间隙挤出来,如图 16 所示。同时,在流道下游发现从转子上飞脱出来的部分胶条,如图 17 所示。

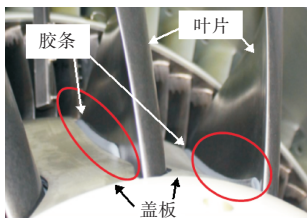


图 16 胶条变形和位移

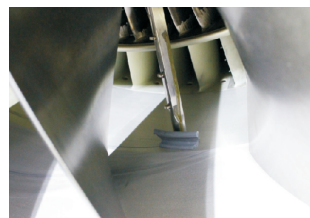


图 17 部分飞脱出的胶条

通过转子不平衡量突增程序可及时、快速地识别振动故障类型,为制定整改行动项及后续试验等提供了支撑。

转子不平衡量突增的自动识别技术能识别的振动故障类型比较单一,具有专一性和对转子不平衡量突增振动故障识别的准确性。针对转子不平衡量突增识别技术的识别率,在 5 次风扇增压级试验应用中,其识别率为 100%。目前应用数据偏少,需大量积累数据,再进行统计识别率,使识别算法有待进一步优化与改进。

### 4.2 应用场景

转子不平衡量突增识别程序同时应用在发动机的实时在线监控系统及地面离线系统中。

由于振动数据采样率较高,易积累较大的数据文件,当转子不平衡量突增识别程序应用于在线实时监测系统时,一旦识别出转子不平衡量突增事件,尤其在较严重的不平衡量突增事件中,除了显示、发送识别结果外,还可触发振动数据存储、振动数据传送等动作,有利于保证设备运转的安全性,以及当发生危险时报警的及时性和准确性。

当转子不平衡量突增识别程序应用于地面离线系统时,由程序自动处理发动机运行时获得的大量数据,当程序识别出转子不平衡量突增事件时,由人工介入进行研究和分析振动信号,大大减少人工工作时间,提高了整个数据分析的工作效率。

## 5 结论

(1)采用多 FFT 滤波技术,得到了高质量转速跟踪的基频振动时域信号;(2)归纳了转子不平衡量突增的振幅突增和突增后振幅稳定的 2 个振动信号特征;(3)程序化识别了 2 个振动信号特征,从而实现转子质量飞脱事件的程序自动识别。

转子不平衡量突增的自动识别,可应用于在线监测系统,能及时识别故障后发出报警信息,确保设备运转的安全性,同时也可应用离线振动信号分析系统,减少了人工分析时间,提高了数据分析的工作效率。

### 参考文献:

[1] Laaradj S H, Abdelkader L, Mohamed B, et al. Vibration-based fault diagnosis of dynamic rotating systems for real-time maintenance monitoring [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(7-8): 3283-3296.  
 [2] Han S, Yang T G, Zhu Q Y, et al. Unbalance position of aeroengine flexible rotor analysis and identification based on dynamic model and deep

- learning [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2023, 237(19): 4410-4429.
- [3] 候理臻, 廖明夫, 黄巍, 等. 突加不平衡下熔断机理研究[J]. 航空发动机, 2021, 47(5): 41-46.  
HOU Lizhen, LIAO Mingfu, HUANG Wei, et al. Study of fuse mechanism caused by sudden unbalance [J]. Aeroengine, 2021, 47(5): 41-46. (in Chinese)
- [4] 陈伟, 刘璐璐, 宣海军, 等. 突加高能载荷作用下航空发动机结构动态响应及安全性综述[J]. 推进技术, 2020, 41(9): 2099-2199.  
CHEN Wei, LIU Lulu, XUAN Haijun, et al. Review on dynamic response and safety of engine structure under sudden high energy load [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(9): 2099-2199. (in Chinese)
- [5] 马艳红, 梁智超, 王桂华, 等. 航空发动机叶片丢失问题研究综述[J]. 航空动力学报, 2016, 31(3): 513-526.  
MA Yanhong, LIANG Zhichao, WANG Guihua, et al. Review on the blade loss of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3): 513-526. (in Chinese)
- [6] 洪杰, 郝勇, 张博, 等. 叶片丢失激励下整机力学行为及其动力特性[J]. 航空动力学报, 2014, 40(2): 19-23.  
HONG Jie, HAO Yong, ZHANG Bo, et al. Mechanical behaviors and dynamic characteristics of turbofan engine due to fan blade off [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 40(2): 19-23. (in Chinese)
- [7] 洪杰, 栗天壤, 王永锋, 等. 叶片丢失激励下航空发动机柔性转子系统的动力学响应[J]. 航空动力学报, 2018, 33(2): 257-264.  
HONG Jie, LI Tianrang, WANG Yongfeng, et al. Dynamic response of the aero-engine flexible rotor system under the blade off [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(2): 257-264. (in Chinese)
- [8] 熊雨浓. 叶片飞脱下转子动力学响应研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.  
XIONG Yunong. Study on dynamic response of rotor with blade off [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017. (in Chinese)
- [9] 徐雪, 李宏新, 冯国全. Trent900发动机风扇叶片飞失后低压转子动力学行为仿真[J]. 航空动力学报, 2020, 35(4): 744-756.  
XU Xue, LI Hongxin, FENG Guoquan. Low pressure rotor dynamic behavior simulation of Trent 900 engine after fan blade out [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(4): 744-756. (in Chinese)
- [10] 洪杰, 陈成, 王永锋, 等. 突加不平衡激励下高速柔性转子系统振动特性试验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(1): 15-23.  
HONG Jie, CHEN Cheng, WANG Yongfeng, et al. Vibration test of high speed flexible rotor due to the sudden-unbalance[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(1): 15-23. (in Chinese)
- [11] 侯理臻, 廖明夫, 王卫国, 等. 叶片飞脱下转子动力学响应实验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(5): 1010-1019.  
HOU Lizhen, LIAO Mingfu, WANG Weiguo, et al. Experiment of rotor dynamics under fan blade off [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(5): 1010-1019. (in Chinese)
- [12] 王珏. 转子突加不平衡冲击响应的实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.  
WANG Jue. Experimental study on the response of rotor with sudden unbalanced impact[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017. (in Chinese)
- [13] 叶冬. 高速柔性转子突加大不平衡响应研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2014.  
YE Dong. Study on response of high speed flexible rotor with a lot of sudden unbalance [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [14] Xu J, Ding X, Gong Y L, et al. Rotor imbalance detection and quantification in wind turbines via vibration analysis [J]. Wind Engineering, 2022, 46(1): 3-11.
- [15] 王济, 胡晓. MATLAB在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 83-117.  
WANG Ji, HU Xiao. Application of MATLAB in vibration signal processing [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2006: 83-117. (in Chinese)

(编辑: 贺红井)