

突加不平衡下弹性环挤压油膜阻尼器 减振性能实验

张广辉¹, 黄延忠¹, 陈亚龙², 王震林³, 徐科繁¹, 冯 磊¹

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241;

3. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为了研究在瞬态冲击(突加不平衡)下弹性环挤压油膜阻尼器(elastic ring squeeze film damper, ERSFD)对转子系统突增振动的抑制效果, 设计并搭建带 ERSFD 的转子动力学实验台, 开展突加不平衡动力学实验, 获取阻尼器供油和不供油下转子系统升速及降速过程中的振动响应规律。结果表明 ERSFD 供油后有效地抑制了突加不平衡引起的瞬态响应, 降低了突加不平衡引起的额外振动 74.39%, 同时抑制了转子经过临界转速的基频振动(幅值最大降低了 62.18%); ERSFD 供油后会在转子系统中引入额外的刚度和阻尼, 其综合效果表现为转子的临界转速较 ERSFD 不供油的状态下, 1 阶临界转速降低 2.39%。

关 键 词: 突加不平衡; 弹性环挤压油膜阻尼器; 瞬态响应; 临界转速; 减振效果

中图分类号: V216.2⁺1; TK14

文献标志码: A

Experiment on vibration reduction performance of elastic ring squeeze film damper under sudden unbalance

ZHANG Guanghui¹, HUANG Yanzhong¹, CHEN Yalong², WANG Zhenlin³,

XU Kefan¹, FENG Lei¹

(1. School of Energy Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Commercial Aircraft Engine Company Limited,

Aero Engine Corporation of China, Shanghai 200241, China;

3. General Engineering Research Institute,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: In order to study the suppression effect of elastic ring squeeze film damper (ERSFD) on vibration of rotor system under transient impact (sudden unbalance), the rotor dynamics experiment rig with ERSFD was designed and assembled to carry out the experiment of sudden unbalance and obtain the experimental results of the spectrum response at the speed up and down of the rotor under oil free and oil supply states. Results showed that ERSFD can effectively suppress the fundamental frequency vibration at the critical speed and transient response caused by sudden unbalance, and reduce the vibration amplitude at critical speed and additional vibration by 62.18% and 74.39% respectively; the combined effect indicated that the first critical speed of the rotor was 2.39% lower than that of the ERSFD oil free when

收稿日期: 2021-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(11572098); 国家“两机”重大专项基础研究(2017-IV-0008-0045)

作者简介: 张广辉(1981—), 男, 教授, 博士, 主要从事箔片轴承以及挤压油膜阻尼器机理和实验研究。

引用格式: 张广辉, 黄延忠, 陈亚龙, 等. 突加不平衡下弹性环挤压油膜阻尼器减振性能实验[J]. 航空动力学报, 2023, 38(1): 32-40. ZHANG Guanghui, HUANG Yanzhong, CHEN Yalong, et al. Experiment on vibration reduction performance of elastic ring squeeze film damper under sudden unbalance[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(1): 32-40.

additional stiffness and damping were introduced into the rotor system.

Keywords: sudden unbalance; elastic ring squeeze film damper; transient response; critical speed; vibration suppression

高速运转的航空发动机转子-轮盘-叶片结构往往会由于发动机叶片断裂导致突加不平衡,此时转子会产生相当大的瞬态冲击载荷经过机匣传递至机舱。美国航空管理局规定^[1]航空发动机均要通过突加不平衡测试,即在发生叶片飞失后在一定时间内(根据发动机具体型号)仍能安全工作而不发生灾难性事故。为了提高发动机稳定性和安全性,抑制突加不平衡时峰值振动,会对发动机某些支点位置加装挤压油膜阻尼器(squeeze film damper, SFD),并与弹性支承配合装配,该装置可以显著降低转子突加不平衡时的振动峰值,确保发动机平稳地继续工作。

弹性环挤压油膜阻尼器(ERSFD, 后文也简称阻尼器)是一种发动机结构中用于减振抑振的装置,弹性环将阻尼器内环(一般是轴承)和阻尼器外环(一般指轴承室)之间的油膜分割成内外两层,弹性环可以在外部载荷(转子外传力)下产生变形从而自适应地调节内外油膜厚度,所以大大降低了高载荷下油膜力非线性,同时 ERSFD 结构相对紧凑,在航空发动机中得到了很好的应用。

在转子突加不平衡研究方面: Zhang 等^[2]针对 PSFD (多孔 SFD) 支承地 Jeffcott 转子开展了突加不平衡响应的研究,验证了 PSFD 可以稳定工作在突加不平衡条件下; Tyapin 等^[3]在优化目标函数过程考虑叶片丢失的突加不平衡因素对某型喷气发动机结构进行了初步设计优化研究; Ramanadham 等^[4]提出多种仿真方法研究叶片飞失下机匣包容性能,仿真研究并证明转子不平衡对叶片飞失影响十分显著; Roy 等^[5]以燃气轮机为研究对象,将叶片飞失视为厚度随转速减小的弹性 Timoshenko 梁,获得突加不平衡导致瞬态响应的解析解,结果表明梁的厚度分布对突加不平衡响应有重要影响;何文博等^[6]针对带传统挤压油膜阻尼器的双盘转子开展了突加不平衡响应实验并且仿真验证模型正确性,探究了系统及油膜参数的影响,结果表明在突加不平衡下油膜间隙与振动响应呈正相关,油膜长度与振动响应呈负相关,而支承刚度比与振动响应关系不确定;李超、刘棣等^[7-8]研究了转子突加不平衡下阻尼支承结构的安全性,提出一种可以大幅降低突加不

平衡引起的支点动载荷的设计规则,最大限度保证结构安全; Xia 等^[9]对不同突加不平衡响应参数转子启动过程瞬态响应进行了研究,为实现转子自身不平衡量的识别提供了一种新途径; Wang 等^[10]建立了双转子-叶片-机匣动力学模型,数值计算了突加不平衡下转子振动位移和机匣振动加速度响应变化,证明静叶与转子发生碰摩会约束转子瞬态振动幅值,且机匣加速度响应对振动的高频分量更敏感; Zhang 等^[11]针对悬臂转子突加不平衡动力学特性进行了仿真研究,结果表明突加不平衡会导致瞬时冲击载荷,同时伴随不平衡引起的转子振动。

在 ERSFD 的研究方面, Wang 等^[12]建立了考虑 Greenwood-Williamson 接触力的 ERSFD 分析模型,并与其他模型对比验证了提出模型的准确性; 2019 年 Han 等求解 Reynolds 方程计算油膜压力,然后通过有限元法计算了弹性环变形,最后数值求解动力学方程,利用该思路研究了 ERSFD 支承的转子动力学特性,随后 2020 年提出一种半解析法分析 ERSFD 支承的转子系统动力学特性,并将数值模拟和实验进行对比,证实了该方法在保证计算精度后大大提高计算效率^[13-14]; Chen 等^[15]采用半解析法计算弹性环变形并将 ERSFD 应用在螺旋锥形齿轮支承; Lu 等^[16]实验研究了 IERSFD (整体式 ERSFD) 对齿轮系统振动的抑制性能并取得了较好的效果;李岩等^[17]研究了弹性环凸台配合关系对 ERSFD 减振效果的影响,结果表明内凸台采用间隙配合时阻尼器减振效果最好,外凸台对阻尼器减振效果没影响;赵璐等^[18]实验研究了 ERSFD 减振效果,结果表明 ERSFD 油膜不会显著改变转子模态且减振效果明显; Zhao 等^[19]对 ERSFD 支承的转子系统稳态不平衡响应进行了研究,对比数值计算与实验结果,相对误差小于 15%,认为轴颈偏心较小时可以认为 ERSFD 是线性单元。

为了掌握 ERSFD 对突加不平衡的振动抑制效果,补充 ERSFD 突加不平衡实验研究,量化性能指标,本文设计搭建了带 ERSFD 的转子弹性支承系统实验台,在该实验装置实现了突加不平衡过程,获得 ERSFD 阻尼器-转子系统在发生突加

不平衡时振动响应的变化;对比阻尼器无油和供油时转子振动幅值,研究 ERSFD 对突加不平衡瞬态冲击振动的抑制效果,为 ERSFD 在航空发动机中的应用提供技术支持。

1 实验装置描述

1.1 实验测试台架描述

本文设计了四轮盘(外径均为 340 mm、厚度均为 50 mm)单跨转子实验台,总跨距为 1 060 mm,具体装配示意图如图 1 所示。该实验台主要包括转子-支承系统和附属系统(驱动控制、油路、数据采集)。根据图 1 所示,转子采用两端鼠笼弹性支承方式,为了后续描述方便,此处规定靠近驱动电动机的支承端为 A 端(1#、2#),而另一侧为 B 端(3#、4#)。转子上 4 个轮盘由 A 端至 B 端分

别编号 No.1、No.2、No.3 和 No.4,每个轮盘周向均匀布置 36 个平衡孔,用来安装质量块,轮盘通过锥套与转子进行装配,模拟突加不平衡的质量块安装于 No.4 轮盘上。两端是箱体轴承座,每个轴承箱体有一个竖直肋板,上边用于固定鼠笼弹支或刚性阻尼盘,深沟球轴承内环与转子过盈配合,外环与鼠笼过盈装配,并搭配防止轴承轴向窜动的挡环。本次实验采用的是功率为 55 kW 的三相同步电动机作为驱动源,通过增速齿轮箱向转子传输扭矩,增速齿轮箱增速比为 13;为了避免电动机影响转子振动,转子与电动机采取柔性连接,通过变频器对转子转速进行控制,其中 ~ 220 V 为计算机与前置器供电,24 V 直流电源(-DC)为激光测速传感器供电, ~ 380 V 为驱动系统与供油系统供电。

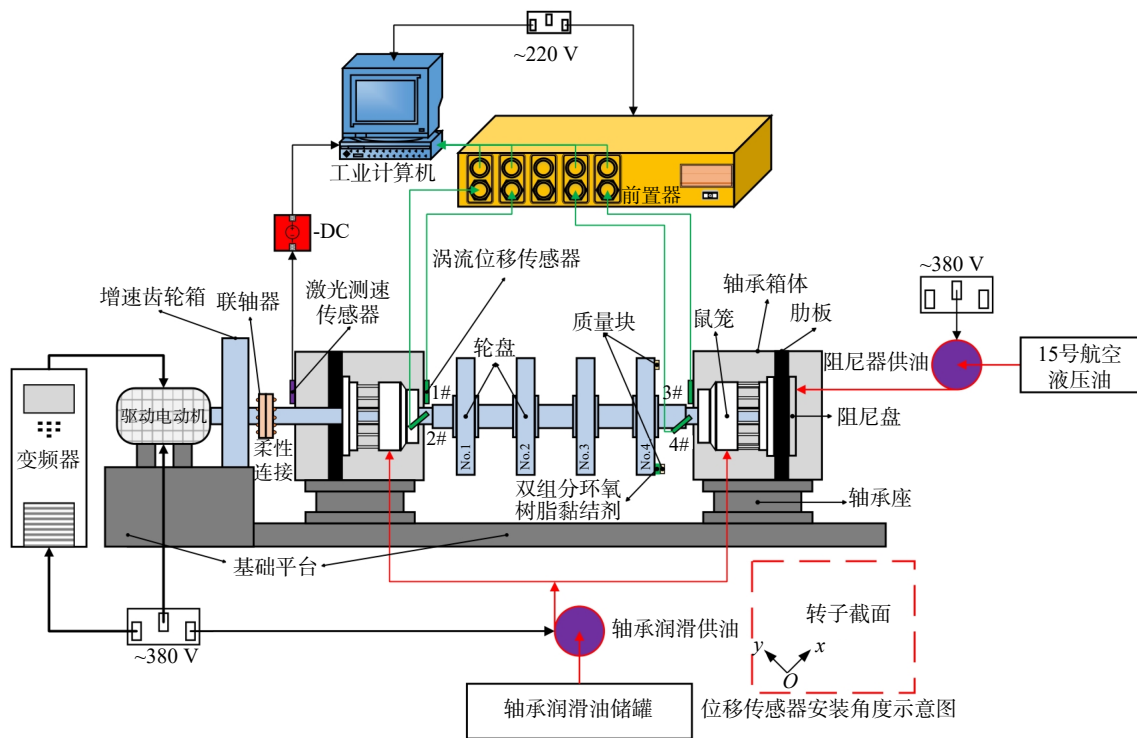


图 1 ERSFD-转子动力学实验台

Fig. 1 ERSFD-rotor dynamics experiment rig

实验台包括两条供油油路,一条油路给滚动轴承供油,确保轴承的润滑和安全工作温度;一条油路给 ERSFD 供油,其中 ERSFD 采用双孔供油,实际安装见图 2 所示。两支供油孔相距 180° ,滑油是 15 号航空液压油,为了控制和监测阻尼器供油压力,在油泵与阻尼器之间加装压力表和压力调节阀。

表 1 给出了 15 号航空液压油主要参数。

实验过程中监测转子转速和径向振动位移,图 1 的实验台示意图给出了传感器布置位置。其中光电测速传感器在前轴承座附近,图 1 中右下角子图给出了位移传感器布置的角度,两支位移传感器互成 90° 进行布置。如图 3 所示,图 3(a)是光电测速传感器,固定置于转子一侧,探头截面与转子表面平行;图 3(b)和图 3(c)分别给出了 A 端(1#、2#)和 B 端(3#、4#)传感器的布置照

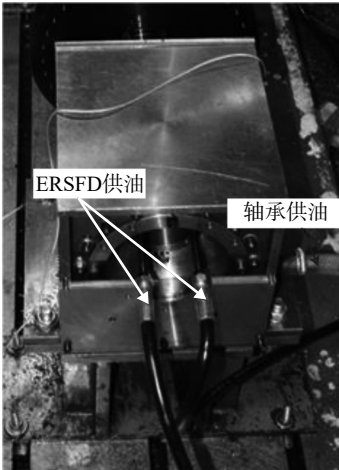


图 2 挤压油膜阻尼器和轴承供油管路照片
Fig. 2 Photograph of oil supply for squeeze film damper and bearings

表 1 15 号航空液压油主要参数
Table 1 Principal parameters of 15# aviation hydraulic oil

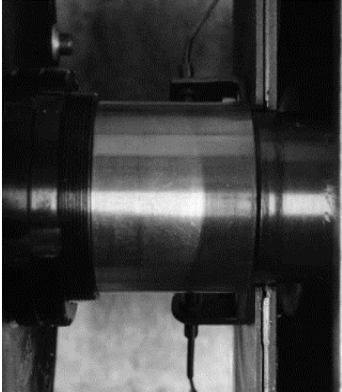
参数	数值
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	872
动力黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.019 5



(a) 光电测速传感器



(b) 1#与2#电涡流位移传感器



(c) 3#与4#电涡流位移传感器

图 3 传感器布置照片

Fig. 3 Photograph of sensors assembling

片,其中每端两个传感器,布置角度互成 90° ;通过固定在轴承箱侧面盖板上的角铁支架实现对转子径向位移的监测。光电测速传感器由直流电源供电,直接与采集设备连接,位移传感器通过前置器供电,然后与采集设备相连,共同记录转子转速和振动位移信息。

1.2 ERSFD 实验件描述

突加不平衡实验中 ERSFD 安装于 B 端,A 端无阻尼器,图 4 和图 5 分别给出了阻尼器装配示意图和实物图,鼠笼弹支自身作为阻尼器外环,内部配合套装的刚性阻尼盘作为阻尼器内环,内外环之间安装弹性环,且通过两个止旋螺钉固定弹性环防止其周向蹿动,弹性环周向相邻内外凸台沿轴向分布 2 个油孔,用于连通内外油膜。转子传力路径见图 4 中红色箭头。

弹性环挤压油膜阻尼器详细参数见表 2。
阻尼器半径间隙为 1.32 mm,阻尼器有效油

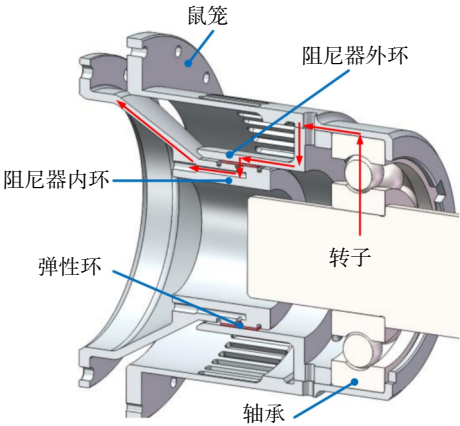


图 4 阻尼器-鼠笼弹性支承结构图
Fig. 4 Structure diagram of elastic supporting of damper-squirrel cage

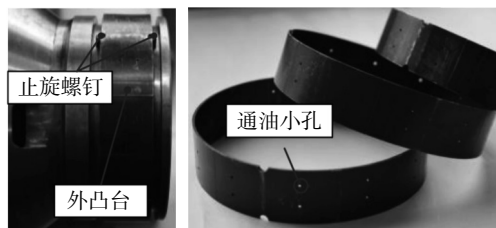


图 5 弹性环挤压油膜阻尼器装配示意图

Fig. 5 Assembling sketch of elastic ring squeeze film damper

表 2 挤压油膜阻尼器参数

Table 2 Squeeze film damper parameters

参数	数值
阻尼器内环直径/mm	106.6
油膜长度/mm	24
供油压力/MPa	0.3
内(外)油膜厚度/mm	0.16(0.16)
弹性环厚度/mm	1
内(外)凸台高度/mm	0.16(0.16)
内(外)凸台数量	6(6)
内(外)凸台宽度/mm	6(6)

膜长度为 24 mm, 内外油膜厚度相同均为 0.16 mm, 实验过程供油压力 0.3 MPa, 弹性环厚度为 1 mm, 内外凸台数量均为 6, 宽度均为 6 mm, 内外凸台高度与内外油膜厚度相同, 为 0.16 mm。

2 突加不平衡实验

为了模拟实现叶片飞失突加不平衡效果, 在实验转子编号 No.4 轮盘(靠近 B 端)0°和 180°相位(从实验台 B 端向 A 端看)布置质量相同的质量块(均为 5.47 g), 见图 1 所示, 0°位置的质量块通过螺栓固定在轮盘上, 180°质量块通过双组分环氧树脂黏结剂固定于轮盘上, 两个位置不平衡量相等, 均为 930 g·mm, 可参见图 6, 转子逆时针旋转。

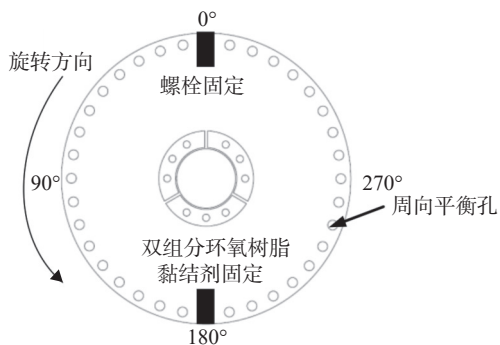


图 6 No.4 轮盘突加不平衡示意图(从 B 端方向看)

Fig. 6 Sketch of sudden unbalance on No.4 disk
(from view of B end)

转子转速为 ω (单位为 rad/s), 固定的质量块质量为 m (单位为 kg), 质量块的向心半径为 r (单位为 m), 转子达到一定转速 ω 时质量块所受离心力为

$$F = m\omega^2 r \quad (1)$$

对于双组分环氧树脂黏结剂来说, 黏结剂切向黏结强度为 X (单位为 Pa), 黏结剂与不平衡质量块的黏结面积为 s (单位为 m^2), 质量块在黏结剂固定下, 能承受的最大剪力载荷为

$$F_{\max} = Xs \quad (2)$$

所以当

$$F > F_{\max} \quad (3)$$

质量块会飞出, 此处 $m=5.47 \times 10^{-3}$ kg, 经过计算得知本次实验当转子转速达到 2 800 r/min (约为 293 rad/s) 质量块飞出, 实现瞬时突加不平衡。当黏结剂固化 24 h 再进行实验, 实验时阻尼器首先不供油, 采集升速过程转子振动位移, 运行至质量块飞出; 然后去除黏结剂清理黏贴表面, 重新将原质量块固定在原位置, 对阻尼器供油再进行同样的升速实验, 获取转子振动响应。

3 阻尼器无油时突加不平衡振动响应分析

为了研究突加不平衡效应对转子振动幅值影响规律以及当前设计在突加不平衡响应下能否安全运行, 在安装 ERSFD 后不供油开展转子升速实验, 获得频响和振幅数据。

3.1 频响分析

分别提取转子 B 端两个测点在 1 阶临界转速和最高转速(2 910 r/min) 处的转子振动数据频域分析结果, 如图 7 所示, 由图可知, 最高转速处由于突加不平衡引起的额外基频(1 $\times$)振动幅值远高于 1 阶临界转速的振幅, 实验过程 2 倍频(2 $\times$)、3 倍频(3 $\times$)成分不明显, 保证了突加不平衡实验的控制变量准确性。

在阻尼器无油状态下开展突加不平衡实验较危险, 由于基频振动幅值剧增至 300 μm 以上, 接近 ERSFD 最大间隙为 320 μm , 所以升速暂停被迫降速, 获取最高转速 2 910 r/min 时突加不平衡引起的附加振动。

3.2 振动响应分析

实验过程中采集转子升速过程振动曲线, 由于挤压油膜阻尼器安装在 B 端, 由于 B 端 y 方向

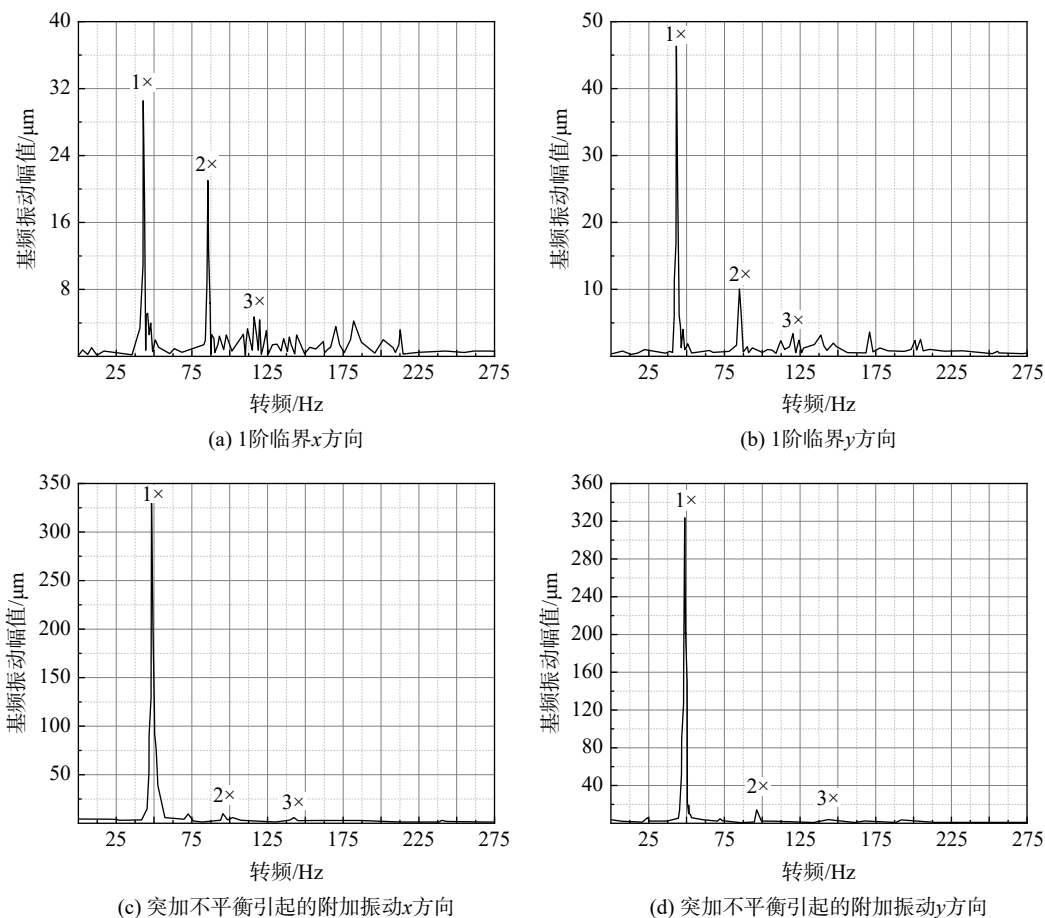


图7 阻尼器无油时转子典型转速处基频振动幅值

Fig. 7 Fundamental frequency vibration amplitude at typical speeds of rotor with damper oil free

数据振动峰值较大,所以对 y 方向振动数据进行对比分析。为了探究突加不平衡对转子振动有何影响,将实验获得的基频振动幅值绘制成全转速曲线,见图8所示。

由图8可知,阻尼器无油状态下转子转速从0 r/min升至近2700 r/min,由于转子自身平衡状

态较好,因此在升速过程中临界转速处未出现明显振动峰值;在转速升至2800 r/min左右时质量块飞出,此时转速未明显增高,但是基频振动幅值由于不平衡量的突然增大而迅速增加到100 μm 左右;而后转子在该大不平衡量下随着转速的升高基频振动幅值急剧增加至300 μm 以上,触发振动过大报警而停止升速,所以达到最高转速2910 r/min时开始降速,随着转速下降,振幅急剧降低,在降速过程中经过1阶临界转速(2419 r/min)时,由于不平衡量的增大而再次增高至50 μm ;因此降速过程中振动明显高于升速过程中振动幅值。

4 阻尼器供油时突加不平衡下 ERSFD 减振效果分析

为了研究突加不平衡效应下,ERSFD的减振效果,在相同实验条件下对阻尼器进行供油,获得频响和振动变化曲线,并且与文中第3节的阻尼器无油数据进行对比,量化ERSFD对突加不平衡振动抑制效果。

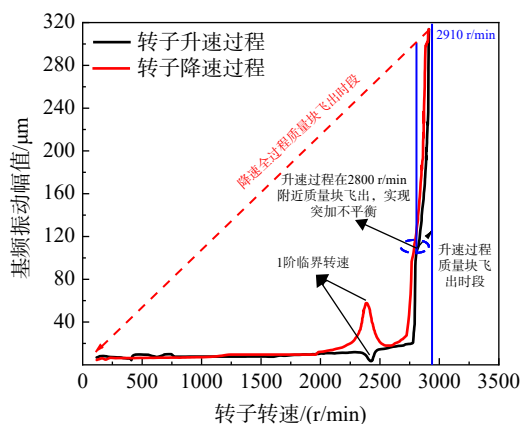


图8 阻尼器无油时转子基频振动幅值变化

Fig. 8 Variation of fundamental frequency vibration amplitude of rotor with damper oil free

4.1 频响分析

由于阻尼器供油后发现升速过程突加不平衡振幅并没有显著增加, 获得转子在 1 阶临界转速基频振动以及后边突加不平衡引起的附加振动频域分析结果, 如图 9 所示给出了阻尼器供油时 1

阶临界转速与突加不平衡时 B 端 x 方向和 y 方向基频振动幅值, 由图可知突加不平衡引起的附加振动在 3 020 r/min 附近达到峰值, 对比阻尼器无油时振动峰值明显很小。

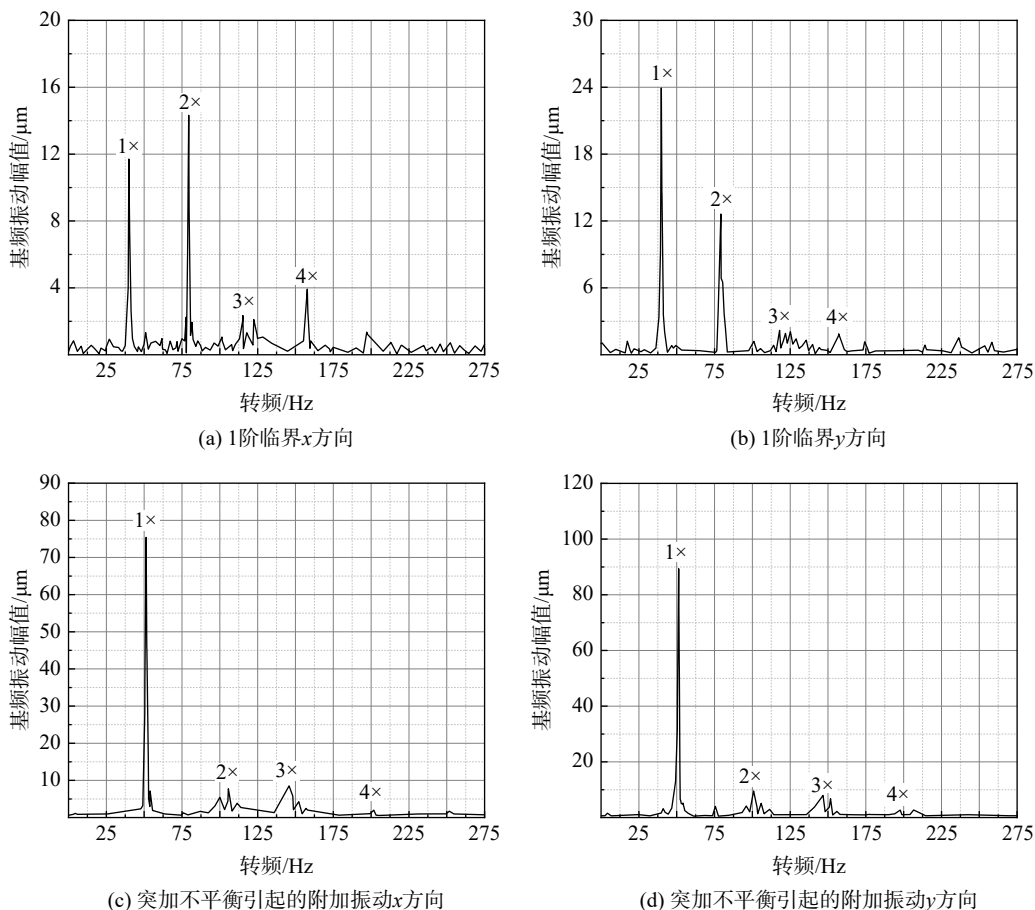


图 9 阻尼器供油时转子典型转速处基频振动幅值

Fig. 9 Fundamental frequency vibration amplitude at typical speeds of rotor with damper oil supply

4.2 振动响应分析

将阻尼器供油时转子振动幅值绘制成全转速曲线如图 10。

根据图 10 转子全转速振动结果可知, 阻尼器供油后, 阻尼器内外环形成双层挤压油膜, 突加不平衡之前振动幅值小且平稳, 在转速达到 2 800 r/min 左右时质量块飞出, 接着转速继续增加, 由于突加不平衡导致 2 阶临界转速(3 020 r/min)的振动峰值急剧增加, 此时振动幅值较小并未触发系统报警, 通过 2 阶临界转速后振动下降但是幅值仍高于突加不平衡之前振动, 达到最高转速 3 530 r/min 后降速, 由于突加不平衡导致转子通过 1、2 阶临界转速时振动峰值很高, 峰值振动达到 94 μm , 安装 ERSFD 后转子突加不平衡引起的

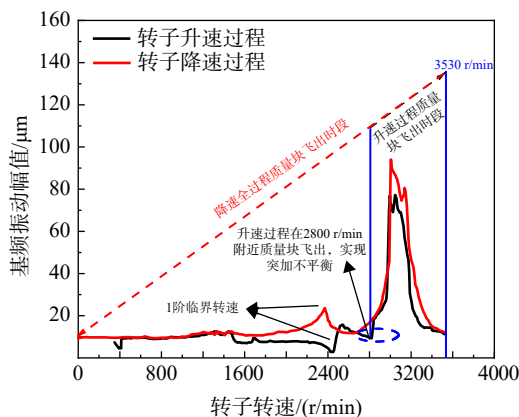


图 10 阻尼器供油时转子基频振动幅值变化

Fig. 10 Variation of fundamental frequency vibration amplitude of rotor with damper oil supply

振动峰值降低至阻尼器无油时振动幅值的 1/3 还要多, 证明了 ERSFD 对转子突加不平衡响应的抑制作用较强, 在 ERSFD 合理设计装配下可以保证转子在发生叶片飞失的突加不平衡时安全低振动运行。对比阻尼器不供油的实验数据, 可以发现除临界转速和突加不平衡处之外其他转速时, ERSFD 并未体现出较强减振能力。

4.3 减振效果分析

将上述识别的频域结果振幅总结在表 3 和表 4, 对应突加不平衡后转子降速过程中 1 阶临界处振动结果。

表 3 阻尼器无油与供油时 1 阶临界转速处基频振幅

Table 3 Fundamental frequency vibration amplitude at first critical speed of the damper with oil free and supply

实验条件	1 阶临界转速处基频振动幅值/ μm	
	x 方向	y 方向
阻尼器无油 (转速为 2 419 r/min)	31.2	46.2
阻尼器供油 (转速为 2 361 r/min)	11.8	23.4

表 4 阻尼器无油与供油时突加不平衡处基频振幅

Table 4 Fundamental frequency vibration amplitude at condition of sudden unbalance for the damper with oil free and supply

实验条件	突加不平衡引起额外基频振动幅值/ μm	
	x 方向	y 方向
阻尼器无油 (转速为 2 910 r/min)	304.6	302.2
阻尼器供油 (转速为 3 020 r/min)	78.0	94.0

根据表 3 与表 4 中数据可以简单量化 ERSFD 减振效果, 采用如下方式:

$$\eta = \frac{u_{\text{free}} - u_{\text{supply}}}{u_{\text{free}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中 η 为阻尼器减振效果百分比, 单位为 %; u_{free} 为阻尼器无油时转子基频振动峰值, 单位为 μm ; u_{supply} 为阻尼器供油时转子基频振动峰值, 单位为 μm 。

借助式(4)对阻尼器减振效果进行量化, 基频振动峰值分别取 1 阶临界转速与突加不平衡处结果, 分别得到阻尼器在临界与突加不平衡下的减振效果。对于 1 阶临界转速处(无突加不平衡时) x 和 y 方向 ERSFD 的减振效果 η 分别达到 62.18%

和 49.35%; 对比突加不平衡引起的附加振动下阻尼器无油与供油条件实验结果可知, x 和 y 方向减振效果 η 分别达到 74.39% 和 68.89%, 所以突加不平衡引起的附加振动幅值越大其 ERSFD 的减振效果越明显。

此外根据表 3 与表 4 数据对比了阻尼器无油和供油时临界转速变化, 当阻尼器供油后, 转子的 1 阶临界转速降低, 这是因为阻尼器无油时弹性环连接鼠笼衬套与阻尼盘, 但是阻尼器供油后间隙形成油膜, 引入了额外油膜阻尼, 故改变了转子系统的临界转速。

5 结 论

本文设计了弹性环挤压油膜阻尼器-转子实验台, 开展了转子突加不平衡实验测试, 详细介绍了实验装置与突加不平衡实验过程, 为阻尼器突加不平衡实验设计提供参考。同时实验还获得如下结论:

1) ERSFD 对于转子过临界时振动有显著抑制效果, 安装 ERSFD(阻尼器供油)后 1 阶临界转速附近振动最大降低了 62.18%。

2) 当转子支承系统未安装 ERSFD(阻尼器未供油)时, 突加不平衡会引起极大附加基频振动, ERSFD 供油后 x 方向与 y 方向振动降低约为 74.39% 和 68.89%, 验证了弹性环挤压油膜阻尼器(ERSFD)对瞬态冲击载荷引起的振动有较好抑制作用。

3) 阻尼器供油后由于内外油膜存在引入了额外阻尼导致转子系统临界转速略微下降, 1 阶临界转速降低 2.39%。

参考文献:

- [1] Federal Aviation Administration. Aircraft engines airworthiness standards: Regulations 14 CFR Part 33 [S]. Washington: Federal Aviation Administration, 1964: 7453-7458.
- [2] ZHANG Shiping, YAN Litang, LI Qihan. Development of porous squeeze film damper bearings for improving the blade loss dynamics of rotor-support systems[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1992, 114(3): 347-353.
- [3] TYAPIN I, SANDBERG M, KOKKOLARAS M, et al. Jet engine design optimization using a knowledge-based master model[C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. Copenhagen, Denmark: ASME, 2012: 41-47.
- [4] RAMANADHAM K S, KASINA L, BOMMISSETTY K, et al. A study of multiple techniques to simulate blade out event[C]// Proceedings of the ASME Gas Turbine India Conference. Bangalore, India: ASME, 2017: 1-7.
- [5] ROY P A, MEGUID S A. Nonlinear transient dynamic response of a blade subject to a pulsating load in a decaying centrifugal force field[J]. *International Journal of Mechanics and Materials in De-*

- sign, 2018, 14(4): 709-728.
- [6] 何文博, 潘豹, 白杰. 挤压油膜阻尼器转子系统突加不平衡瞬态响应分析[J]. 燃气涡轮实验与研究, 2020, 33(1): 36-40.
HE Wenbo, PAN Bao, BAI Jie. Transient response analysis of squeezed film damper rotor system under sudden unbalance load[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2020, 33(1): 36-40. (in Chinese)
- [7] 李超, 刘棣, 马艳红, 等. 叶片飞失转子动力特性及支承结构安全性设计[J]. 航空动力学报, 2020, 35(11): 2263-2274.
LI Chao, LIU Di, MA Yanhong, et al. Dynamic characteristics of rotor and safety design of support structure with fan blade off[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(11): 2263-2274. (in Chinese)
- [8] 刘棣, 李超, 马艳红, 等. 柔性转子动力学特性及支承结构安全性设计[J]. 航空发动机, 2021, 47(2): 45-51.
LIU Di, LI Chao, MA Yanhong, et al. Aeroengine flexibility rotor dynamics and support structure safety design[J]. Aeroengine, 2021, 47(2): 45-51. (in Chinese)
- [9] XIA Yebao, REN Xingmin, QIN Weiyang, et al. Investigation on the transient response of a speed-varying rotor with sudden unbalance and its application in the unbalance identification[J]. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2020, 39(4): 1065-1086.
- [10] WANG Nanfei, LIU Chao, JIANG Dongxiang. Prediction of transient vibration response of dual-rotor-blade-casing system with blade off[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 233(14): 5164-5176.
- [11] ZHANG Xi, LI Fucui. Simulation of cantilever rotor system dynamic characteristics under the excitation of blade out[R]. Kunming: the 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), 2017.
- [12] WANG Zhenlin, LIU Zhansheng, ZHANG Guanghui. Dynamic characteristics of elastic ring squeeze film damper[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2019, 71(10): 1144-1151.
- [13] HAN Zhifei, DING Qian, ZHANG Wei. Dynamical analysis of an elastic ring squeeze film damper-rotor system[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 131: 406-419.
- [14] HAN Zhifei, MA Zhisai, ZHANG Wei, et al. Dynamic analysis of an elastic ring squeeze film damper supported rotor using a semi-analytic method[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2020, 14(1): 1263-1278.
- [15] CHEN Weitao, CHEN Siyu, HU Zehua, et al. A novel dynamic model for the spiral bevel gear drive with elastic ring squeeze film dampers[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 98(2): 1081-1105.
- [16] LU Kaihua, HE Lidong, YAN Wei. Experimental study of IERSFDs for vibration reduction of gear transmissions[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2019, 21(2): 409-419.
- [17] 李岩, 廖明夫, 王四季. 配合关系对弹性环式挤压油膜阻尼器减振特性的影响[J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 232-238.
LI Yan, LIAO Mingfu, WANG Siji. Effect on vibrating attenuation by the fit of elastic ring squeeze film damper[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(11): 232-238. (in Chinese)
- [18] 赵璐, 廖明夫, 王四季, 等. 弹性环式挤压油膜阻尼器减振实验研究[J]. 推进技术, 2021, 42(5): 1129-1137.
ZHAO Lu, LIAO Mingfu, WANG Siji, et al. Experimental study on vibration reducing effect of elastic ring squeeze film damper[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(5): 1129-1137. (in Chinese)
- [19] ZHAO Lu, LIAO Mingfu, NIU Jihui. Investigation on steady state unbalance response of rotor with elastic ring squeeze film damper[J]. *Materials Science and Engineering*, 2020, 751(1): 012043.1-012043.11.

(编辑: 王碧珺)