



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405270

引用格式:聂卫健, 杨晓光, 李坚, 等. 中国航空发动机新型结构挤压油膜阻尼器研究进展[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(19): 7909-7919.

Nie Weijian, Yang Xiaoguang, Li Jian, et al. Research progress on new structural squeeze film dampers of aero-engine in China[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(19): 7909-7919.

航空、航天

# 中国航空发动机新型结构挤压油膜 阻尼器研究进展

聂卫健<sup>1,2,3</sup>, 杨晓光<sup>1</sup>, 李坚<sup>2,3</sup>, 刘飞春<sup>2,3</sup>, 陈亚农<sup>2,3</sup>

(1. 北京航空航天大学能源与动力工程学院, 北京 100191; 2. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002;

3. 中国航空发动机集团航空发动机振动技术重点实验室, 株洲 412002)

**摘要** 挤压油膜阻尼器(squeeze film damper, SFD)是航空发动机等旋转机械中常用的减振装置。随着航空科学技术的发展,衍生并发展了很多新型结构的挤压油膜阻尼器。从结构特点、减振特性、减振效果、应用情况等方面,归纳了新型结构挤压油膜阻尼器的类别,总结了目前中国新型结构挤压油膜阻尼器近年来的研究现状,指出了当前中国新型挤压油膜阻尼器研究的不足,对未来新型结构挤压油膜阻尼器的研究提出了方向和展望,说明了新型挤压油膜阻尼器的应用前景。研究结果为新型挤压油膜阻尼器在航空发动机等旋转机械的转子系统减振设计中的应用和选型提供了参考。

**关键词** 航空发动机; 新型挤压油膜阻尼器; 研究进展; 减振设计

中图分类号 V231;

文献标志码 A

## Research Progress on New Structural Squeeze Film Dampers of Aero-engine in China

NIE Wei-jian<sup>1,2,3</sup>, YANG Xiao-guang<sup>1</sup>, LI Jian<sup>2,3</sup>, LIU Fei-chun<sup>2,3</sup>, CHEN Ya-nong<sup>2,3</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Bei Hang University, Beijing 100191, China;

2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;

3. Key Laboratory of Aero-engine Vibration Technology, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou 412002, China)

**[Abstract]** Squeeze film damper (SFD) is a commonly used vibration reduction device in rotating machinery such as aero-engine. With the development of aviation science and technology, many new structures of SFD have been derived and developed. The categories of new structural squeeze film dampers from the aspects of structural characteristics, vibration reduction characteristics, vibration reduction effects, and application situations were summarized. Besides, the current research status of new structural squeeze film dampers in China in recent years were also summarized. The shortcomings of current research on new structural squeeze film dampers were pointed out, and an outlook of proposes directions and prospects for future research on new structural squeeze film dampers was made. Besides, the application prospects of new structural squeeze film dampers were pointed out. The results provides a reference for the application and selection of new squeeze film dampers in the vibration reduction design of rotor systems in rotating machinery such as aero engines.

**[Keywords]** aero-engine; new structural squeeze film damper; research progress; anti-vibration design

转子系统是航空发动机等旋转机械十分重要的部件,很多学者开展了相关研究,包括动力学分析<sup>[1-3]</sup>、故障研究<sup>[4]</sup>以及动力特性试验<sup>[5]</sup>等内容。转子系统中受到外部激励和不平衡冲击等附加载荷,容易引发振动故障,随着航空科学技术的发展和对航空发动机性能要求的提高,转子系统需要跨弯曲临界转速工作,使得转子系统在过临界

时的振动问题尤为突出,极易因振动过大导致转静碰磨,从而引发危及航空发动机运行安全的故障。因此,在转子系统设计中,常需要进行专门的减振设计。挤压油膜阻尼器(squeeze film damper, SFD)因结构简单,可以有效降低转子系统的振动响应<sup>[6-7]</sup>,广泛应用于高速永磁电机<sup>[8]</sup>、火箭发动机<sup>[9]</sup>、航空发动机<sup>[10-12]</sup>、燃气轮机<sup>[13]</sup>、化工机械<sup>[14]</sup>、

收稿日期: 2024-07-13 修订日期: 2025-01-24

基金项目: 中国航发创新基金(CXPT-2022-031)

第一作者: 聂卫健(1991—),男,汉族,江西抚州人,博士研究生,高级工程师。研究方向:航空发动机转子动力学。E-mail: nieweijianwj@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

兆瓦级涡轮机械<sup>[15]</sup>等旋转机械的减振设计中。影响 SFD 动力特性和减振效果的因素众多,黄延忠等<sup>[16]</sup>通过试验研究了不同油槽结构参数对 SFD 动力学特性的影响;陈亚龙等<sup>[17]</sup>研究了油膜端封的开口角度对 SFD 的影响;崔颖等<sup>[18]</sup>和邱凯<sup>[19]</sup>则开展了密封形式对 SFD 的特性对比研究,获取了涨圈密封 SFD 的流场和阻尼特性;赵项伟等<sup>[20]</sup>、徐伟文等<sup>[21]</sup>和李宇等<sup>[22]</sup>则采用数值仿真方法,分析了静偏心对 SFD 减振特性的影响。然而,由于 SFD 在工作中油膜力的非线性,由此带来带 SFD 的转子系统强非线性问题,主要表现为双稳态响应及非协调进动等非线性特性<sup>[23-25]</sup>。

早期 SFD 多采用鼠笼的结构形式,该结构形式占用空间大,偏心率大,非线性问题突出,逐渐不再得到应用。与此同时,为改善 SFD 的非线性,一些新型结构的 SFD 得到关注、研究和发展。现归纳新型结构的 SFD 类型,对中国新型 SFD 的结构特点、减振特性、减振效果及应用情况等研究内容进行总结,指出当前中国新型 SFD 研究的不足,对未来新型结构 SFD 的研究提出方向和展望,为新型 SFD 在航空发动机等旋转机械的转子系统减振设计中的应用提供参考。

## 1 新型挤压油膜阻尼器分类

SFD 是常见的减振结构装置,主要通过油膜阻尼来降低支承支反力,提升转子系统过临界时和运转过程中抑制振动响应的能力,最终实现减振的目的。新型结构的 SFD 结构简单、占用空间小、减振效果优,得到广泛关注。根据结构特点对新型结构 SFD 进行了分类,归纳主要新型结构 SFD 类型,如表 1 所示。

表 1 新型结构 SFD

Table 1 New structural SFD

序号	中文名称	英文名称
1	多孔介质挤压油膜阻尼器	PSFD (porous squeeze film damper)
2	自适应金属橡胶外环挤压油膜阻尼器	ASFD/MRR (adaptive squeeze film damper with metal rubber outer ring)
3	动静压挤压油膜阻尼器	HSFD (hybrid squeeze film damper)
4	浮环式挤压油膜阻尼器	FRSFD (floating ring squeeze film damper)
5	弹性环式挤压油膜阻尼器	ERSFD (elastic ring squeeze film damper)
6	整体式挤压油膜阻尼器	ISFD (integral squeeze film damper)
7	非同心型挤压油膜阻尼器	n-CSFD (non-concentric squeeze film damper)

## 2 研究进展

### 2.1 多孔介质挤压油膜阻尼器

为了改善传统鼠笼式挤压油膜阻尼器在高转速大载荷下的双稳态非线性行为,早在 20 世纪 90 年代,晏砺堂等<sup>[26]</sup>和张世平等<sup>[27-28]</sup>就开发了多孔介质挤压油膜阻尼器 (porous squeeze oil film damper, PSFD),其结构示意图如图 1 所示<sup>[27]</sup>。这种阻尼器的外环设计有大量微小的孔,工作时油膜压力将滑油通过小孔渗入或渗出油膜环,从而起到油膜减振的作用。此外,他们还针对采用 PSFD 的刚性转子的稳定性以及不平衡量的承载能力进行了研究,表明相比于传统的挤压油膜阻尼器,PSFD 具有更优越的减振能力,可使转子系统工作的稳定性和可靠性得到有效提升。然而,实际工程应用中由于试验成本原因,润滑油需要重复使用,使得润滑油会存在一些杂质,造成介质孔堵塞,从而大大降低了滑油的渗透率,导致减振效果无法保证,因此,很少在工程实践中应用。也正因为如此,近年来关于 PSFD 的研究公开报道也非常少。

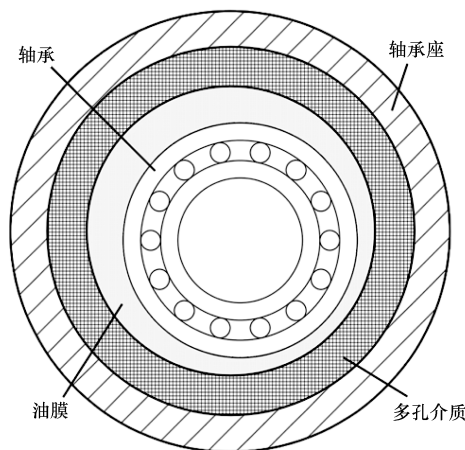
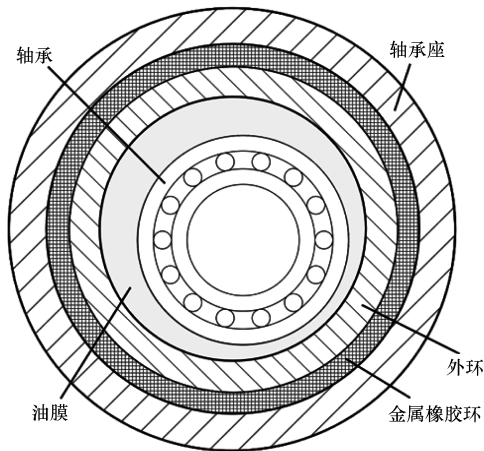


图 1 PSFD 结构示意图<sup>[27]</sup>

Fig. 1 Schematic of PSFD<sup>[27]</sup>

### 2.2 自适应金属橡胶外环挤压油膜阻尼器

中国的马艳红等<sup>[29-31]</sup>率先提出并研究自适应金属橡胶挤压油膜阻尼器 (adaptive squeeze film damper with metal rubber outer ring, ASFD/MRR),其结构如图 2 所示<sup>[31]</sup>,在油膜外环和轴承座之间增加了金属橡胶层,该金属橡胶为特殊的金属材料,转子系统在受到很大的冲击力时,金属橡胶发生弹性变形,从而实现调节油膜厚度的目的,最终起到减振的作用。此外,该材料本身具有一定的阻尼,在一定程度上有效抑制了挤压油膜阻尼器的振动。马艳红等<sup>[31]</sup>针对 ASFD/MRR 开展了减振机理理论分析,以带 ASFD/MRR 或 SFD 的刚性转子为实验研

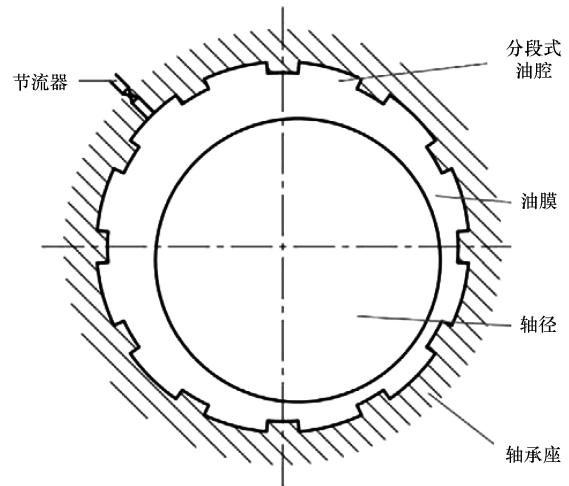
图2 ASFD/MRR结构示意图<sup>[31]</sup>Fig. 2 Schematic of ASFD/MRR<sup>[31]</sup>

研究对象,通过实验对比了ASFD/MRR和传统SFD抑制非协调响应和双稳态跳跃等非线性振动的能力,实验结果表明,在高转速且不平衡量较大的情况下,相比于传统的SFD,ASFD/MRR能更好地抑制转子的非协调响应和双稳态跳跃现象的发生,并且在更大的不平衡量范围内具有良好的减振性能。

此外, Ma等<sup>[32-33]</sup>还研究了金属橡胶材料相对密度和填充情况对ASFD/MRR特性的影响,并提出了在ASFD/MRR中采用气体箔片轴承的设计思想,该设计思路采用空气进行润滑,金属橡胶的变形根据气膜压力进行调节,以达到调节气膜厚度的目的,从而避免因气膜厚度较小引发碰磨。然而,这种思路以空气作为润滑和工作介质,阻尼系数无法得到保证,难以满足工程实际的需求。

### 2.3 动静压挤压油膜阻尼器

20世纪90年代末,祝长生<sup>[34]</sup>提出动静压挤压油膜阻尼器结构(hybrid squeeze film damper, HSF D),如图3所示<sup>[34]</sup>,与传统鼠笼式SFD不同,HSFD中的油膜被分为多个周向均布的分段式的小油腔。随后,祝长生等<sup>[35-37]</sup>还针对HSFD油膜力的动力特性以及其对转子系统振动<sup>[35]</sup>、减振特性<sup>[36]</sup>和非协调响应抑制能力<sup>[37]</sup>等进行了理论分析和实验研究。研究发现,相比于传统鼠笼式SFD,HSFD能够使转子系统振动得到有效控制,可以改善非协调响应、双稳态的非线性振动问题,并且具有良好的减振性能,研究提供了一种新型结构SFD的设计思路,并初步分析了其减振特性,对航空发动机转子系统减振设计有一定理论指导意义。但由于研究还不够深入和系统,近年来针对HSFD的研究也鲜有报道,并且早期研究的实验对象为简单结构的单盘柔性转子,与真实航空发动机转子结构和工况

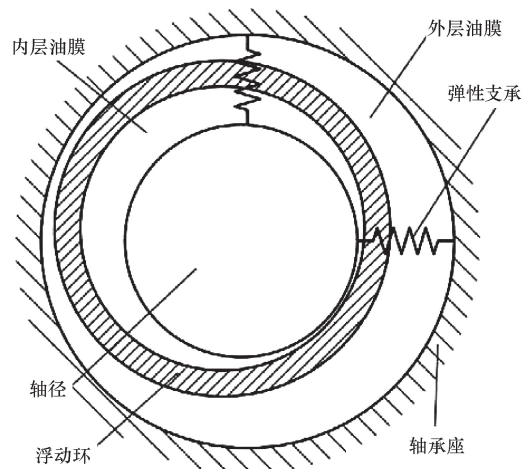
图3 HSF D结构示意图<sup>[34]</sup>Fig. 3 Schematic of HSF D<sup>[34]</sup>

相差太大,暂无法满足其减振设计的要求,也无法在航空发动机上进行工程应用。

### 2.4 浮环式挤压油膜阻尼器

传统的SFD外环是固定在轴承座上的,早在1995年,国外提出一种外环可浮动的SFD,故称为浮环式挤压油膜阻尼器(floating ring squeeze film damper, FRSFD)。该新型SFD通过浮动环将油膜分为外层油膜和内层油膜,外环通过弹簧与轴承座相连,同时在浮动环的周向加工若干小孔,以方便内外层油膜相互流动。如图4所示<sup>[11]</sup>,FRSFD主要包括内、外油膜和浮动环,与传统的SFD相比,这种挤压油膜阻尼器的外环可以在油膜压力的作用下运动。

关于FRSFD的研究,主要集中于高校。例如,罗贵火等<sup>[38-41]</sup>针对FRSFD开展了较为深入的研究,包括FRSFD的减振机理分析<sup>[38-39]</sup>、动力学建模和非线性分析<sup>[40-41]</sup>、FRSFD-转子系统的动力特性与振动

图4 FRSFD结构示意图<sup>[11]</sup>Fig. 4 Schematic of FRSFD<sup>[11]</sup>

响应分析<sup>[42-44]</sup>以及突加不平衡响应分析<sup>[45]</sup>。大量的研究表明:①FRSFD的减振性能与浮环质量、油膜间隙、油膜宽度和滑油黏度均有密切关系;②在相同条件下,相比于传统的鼠笼式SFD,转子系统过临界时FRSFD具有更好地抑制振动能力。

此外,夏冶宝等<sup>[46]</sup>针对FRSFD对模拟低压转子突加不平衡响应的影响开展了研究,表明FRSFD可有效地抑制转子系统过临界时的瞬态振动和降低转子的突加不平衡响应振动。为了更好地抑制突加不平衡响应的瞬态响应,可通过增大浮动环与轴承质量的比值、减小弹支刚度、减小油膜厚度来实现;随着浮动环与轴承的质量比增大,转子系统的双稳态大振幅区域会减小,随油膜厚度的减小反而增大。

## 2.5 弹性环式挤压油膜阻尼器

弹性环式挤压油膜阻尼器(elastic ring squeeze film damper, ERSFD)最早由俄罗斯提出并设计应用于航空发动机减振设计中,这种挤压油膜阻尼器将弹性环与SFD有效结合,使其具有良好的承载能力和阻尼特性,常用于航空发动机主轴承支承,以降低极端工况下的高动载荷。常见的ERSFD结构示意图如图5所示<sup>[47]</sup>,主要由内、外油膜层和弹性环组成,弹性环周向内、外交错均布设计有凸台,分别与转子轴颈和轴承座接触配合,根据凸台的几何参数和数量可以确定弹性环的支承刚度。弹性环上设置有导流小孔,工作时滑油经过小孔进入弹性环内侧,形成内层油膜,外层油膜由弹性环外侧与轴承座之间充满的滑油形成。

中国关于ERSFD的研究起步较晚,在20世纪90年代才开始。早期,曹磊等<sup>[48]</sup>通过对ERSFD开展动力特性研究,初步获取了ERSFD的减振机理,但由于研究不够深入,早期在航空发动机上的应用较少。随着航空科学技术的快速发展,近年来ERSFD

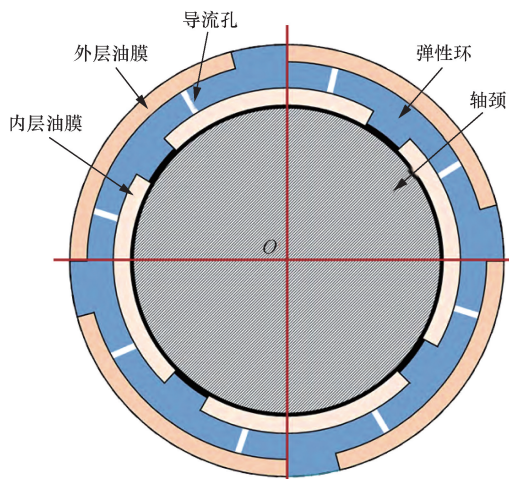


图5 ERSFD结构示意图<sup>[47]</sup>

Fig. 5 Schematic of ERSFD<sup>[47]</sup>

在中国受到广泛关注。在动力学建模和分析方面,孙凯等<sup>[49]</sup>建立了考虑配合关系的ERSFD流固耦合模型,研究了配合关系对动态特性的影响;李盛翔等<sup>[50]</sup>利用有限元方法和有限体积法建立了弹性环和油膜的仿真分析模型,通过分域耦合的迭代方法求解得到弹性环应变的动力响应,并针对应变特性开展了实验研究;任鸿飞等<sup>[51]</sup>在广义雷诺方程的基础上建立了引入ERSFD的弧齿锥齿轮系统双向流固耦合动力学模型并开展动态特性分析,研究表明ERSFD可有效改善弧齿锥齿轮系统的动态特性;赵先锋等<sup>[47]</sup>也采用双向流固耦合模型获取了ERSFD油膜压力的分布,并开展ERSFD-柔性转子系统动力学分析;韩知非<sup>[52]</sup>提出有限元和流体理论相结合的流固耦合计算方法,分析了弹性环参数对ERSFD油膜压力的影响,基于转子动力学响应影响因素分析结果,通过实验表明ERSFD具有更好地抑制双稳态响应的能力;周海仑等<sup>[53]</sup>建立ERSFD双向流固耦合模型,通过数值模拟分析了弹性环参数对阻尼器动力学特性的影响,为ERSFD的结构设计提供了参考;王震林等<sup>[54-55]</sup>则考虑气穴效应建立了ERSFD流固耦合模型,分析了ERSFD动力学特性变化规律,在正交简谐激振试验器上开展ERSFD动力学特性实验,实验验证了ERSFD的减振效果,识别了油膜和弹性环动力学特性参数,研究表明随着凸台高度的变大,油膜阻尼和刚度系数迅速减小,但弹性环的阻尼和刚度变化很小;张晨帅<sup>[56]</sup>采用动网格技术建立了ERSFD双向流固耦合数值仿真模型,研究了弹性环内外侧凸台均接触的情况;向风光等<sup>[57]</sup>基于阻尼器的流固耦合交互作用,提出了考虑弹性环变形的转子系统动力学响应仿真方法。此外,为研究ERSFD的油膜压力特性,杨小民等<sup>[58]</sup>建立了薄环-紊动射流小孔模型,开展了弹性环柔度、阻尼孔直径及进动角变化对油膜压力特性的影响分析。

另外,在关于ERSFD的减振效果和应用也开展了很多有益的研究。例如,赵璐等<sup>[59]</sup>开展了ERSFD的减振效果实验研究,指出ERSFD的减振效果与其参数密切相关,并且针对转子不同阶次模态其减振效果也不尽相同;王树涵等<sup>[60]</sup>将ERSFD应用于航空发动机滚动轴承系统减振设计中,建立ERSFD与轴承的耦合动力学模型,开展轴承保持架振动特性研究,表明ERSFD可提高轴承保持架的稳定性,轴承径向载荷和工作转速对稳定性有显著的影响;李岩等<sup>[61]</sup>基于带ERSFD-转子系统,针对配合关系和转子不平衡量大小对ERSFD减振特性的影响开展了实验研究,并给出了弹性环与转轴之间应设计为间隙配合的建议;张广辉等<sup>[62]</sup>在图6所示的ERSFD-

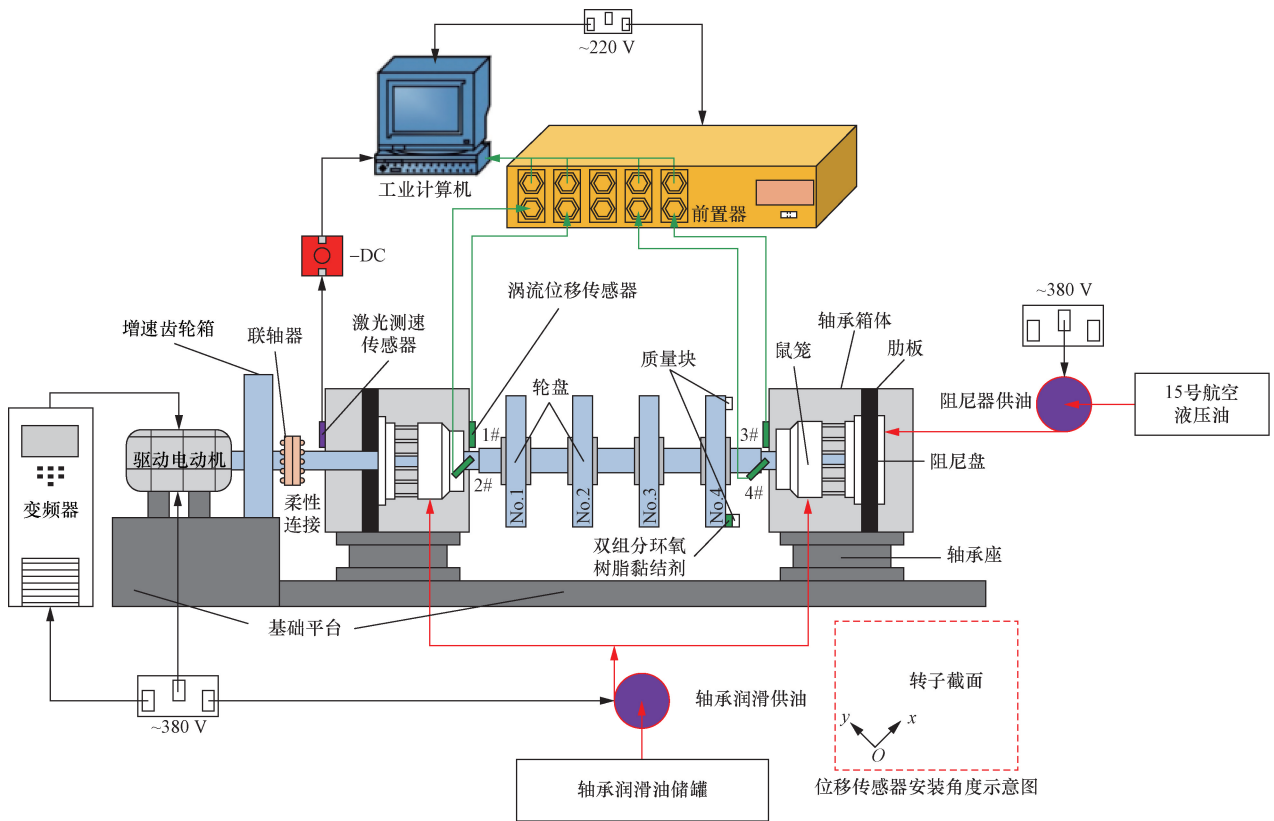


图6 ERSFD-转子系统动力学实验台<sup>[62]</sup>

Fig. 6 ERSFD-rotor system dynamics experiment rig<sup>[62]</sup>

转子系统动力学实验台上研究了供油和不供油条件下,转子系统在受到瞬态冲击时 ERSFD 的振动抑制作用,结果表明供油条件下 ERSFD 能有效抑制突加不平衡产生的振动响应。

### 2.6 整体式挤压油膜阻尼器

整体式挤压油膜阻尼器 (integral squeeze film damper, ISFD) 最早由国外科学家提出的分段式挤压油膜阻尼器演变发展而来,采用电火花线切割加工方式在轴承座加工弹性体和油膜充斥空间。其结构如图7所示,主要由弹性体、内圈、外圈和挤压油膜组成。由于采用整体式结构,ISFD 具有良好的同心度,在一定程度上可减少出现不对中的振动故障,同时,其具有占用空间小、装拆便捷、质量轻等优点,在叶轮机械领域应用较广。

如图7所示,ISFD 中的4组弹性体将内外圈连成一体,由弹性体提供一定支承刚度,同时将内、外圈之间的挤压油膜分成4部分,这种结构可以防止滑油发生环向流动,使得 ISFD 具有良好的线性阻尼特性。根据弹性体的形状,ISFD 大体分为 C 型、L 型和 S 型 ISFD。近年来中国学者针对 ISFD 开展了很多有意义的研究,主要集中于北京化工大学,内容包括减振机理、对不平衡的抑制效果、转子过临界减振效果以及在旋转机械中的应用研究等。在 ISFD 减

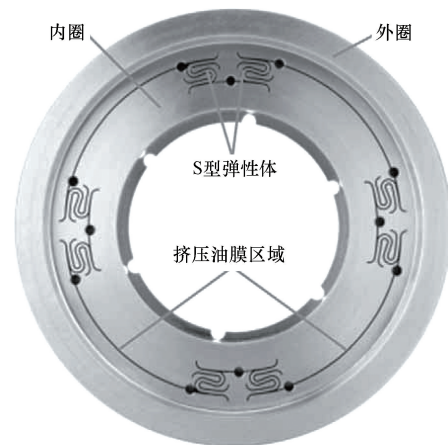


图7 ERSFD 结构示意图<sup>[63]</sup>

Fig. 7 Schematic of ERSFD<sup>[63]</sup>

振机理及不平衡抑制效果方面,陈钊等<sup>[63]</sup>分析了 ISFD 提高转子系统稳定性的机理;张力豪等<sup>[64]</sup>通过力学模型分析了 ISFD 减振机理,并利用单盘 Jeffcott 转子实验研究了带 ISFD 的转子临界时的振动响应情况,结果表明 ISFD 能够有效降低转子在临界下的振动。不平衡振动是转子系统常见的振动故障,路凯华<sup>[65]</sup>采用单盘 Jeffcott 转子研究了不平衡状态下 ISFD 对转子振动响应的抑制作用,并将 ISFD 应用于齿轮系统的减振中,拓宽了 ISFD 的应

用领域。此外,路凯华等<sup>[66]</sup>开展了 ISFD 对滑动轴承-转子系统不平衡响应的抑制效果试验研究,验证了 ISFD 良好的阻尼特性,能够较好地抑制转子系统不平衡响应;万方腾等<sup>[67]</sup>同样开展了 ISFD 对转子不平衡振动的抑制作用研究,表明转子系统不平衡响应大小与转子系统模态刚度及 ISFD 支承刚度的之间的比值有关。在 ISFD 的减振效果和应用方面,万方腾等<sup>[68]</sup>以带 ISFD 的双盘悬臂转子系统为研究对象,研究了进油方式对 ISFD 减振效果的影响;闫伟<sup>[69]</sup>针对叶轮机械转子系统振动问题提出基于 ISFD 的减振技术,对其动力学特性和减振效果开展了数值分析和实验研究,并衍生一种弹性体为 G 型的 ISFD;侯启扬<sup>[70]</sup>开展了 ISFD 在管道中的阻尼减振应用,并得到工程验证;丁继超等<sup>[71]</sup>研究了 ISFD 对管道振动的影响,安装 ISFD 后的振动大幅降低;马靛等<sup>[72]</sup>开展了 ISFD 在锥齿轮传动系统的减振研究,验证了 ISFD 在较宽的转速范围内,对锥齿轮均有良好的减振效果。此外,路凯华等<sup>[73]</sup>通过研究发现,ISFD 可以有效降低齿轮箱的冲击振动。

综上所述,由于 ISFD 能够为转子系统提供准确的刚度和阻尼,解决了传统 SFD 中油膜力非线性振动问题,有助于提高转系系统的稳定性,抑制振动。然而,ISFD 结构的支承刚度主要由弹性体提供,相对较小,容易产生变形,尤其是在反复受到突加不平衡或者瞬时冲击载荷时,弹性体容易发生疲劳,给弹性体结构的性能带来考验,为此,应尽快开展 ISFD 弹性体的疲劳性能研究。

### 2.7 非同心型挤压油膜阻尼器

按照是否带有弹性支承结构,SFD 可分为同心型 SFD 和非同心型 SFD (non-concentric squeeze film damper, n-CSFD),区别在于:同心型 SFD 通过定心弹簧将轴径固定于油膜环中心,具有一定承静载能力,也可通过弹性支承调整临界转速,而 n-CSFD 无弹性支承,不具备静载能力,并且油膜必须在转子运转状态下才起作用;目前,n-CSFD 在航空发动机中应用较少,且多用于转子辅助支承的减振。n-CSFD 的结构示意图如图 8 所示。

近几年中国关于 n-CSFD 的研究较少,在理论研究方面,夏南等<sup>[74]</sup>研究了带 n-CSFD 的柔性转子系统的非线性和非协调响应;崔颖等<sup>[75]</sup>建立了三维非定常空化流场数值模型,计算分析了 n-CSFD 的空化流场特性;试验研究方面,祝长生等<sup>[76]</sup>开展了同心与非同心 SFD 在不同不平衡量大小及油膜径向间隙条件下的减振特性对比实验;冯义等<sup>[77]</sup>则以某低压模拟转子为对象,开展了同心 SFD 与 n-CSFD 减振特性对比试验研究,结果表明同心 SFD 可

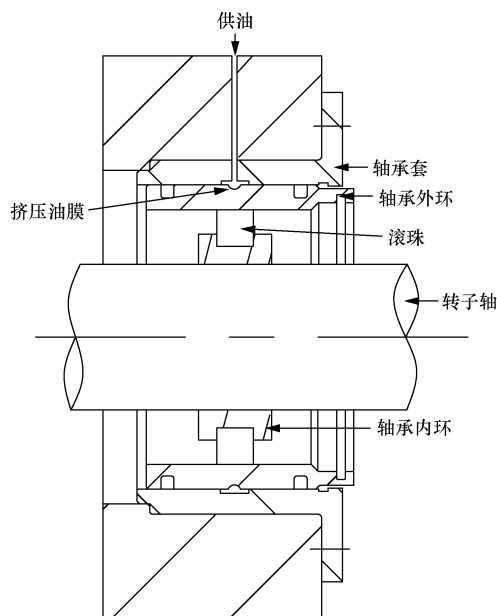


图 8 n-CSFD 结构示意图

Fig. 8 Schematic of n-CSFD

承受比 n-CSFD 更大的转子不平衡量,但在较小的不平衡量范围内,n-CSFD 的减振效果更好。聂卫健等<sup>[78-79]</sup>针对带 n-CSFD 的转子开展了动力学与试验研究,并研究了油膜间隙对非同心型 SFD-转子系统动力特性的影响;卢愈等<sup>[80]</sup>则考虑 n-CSFD 的油膜力,建立了多支点高速柔性转子-n-CSFD 系统非线性动力学模型,采用数值方法开展转子不平衡响应特征、分岔图、庞家莱截面及频谱分析;路亿星等<sup>[81]</sup>基于高速转子试验台,以供油压力和供油孔为研究变量,开展了非定心 SFD 的动力学试验,结果表明转子响应随变量变化而改变,并得到了 SFD 阻尼特性较好的供油压力和供油孔数量。

## 3 总结与展望

针对航空发动机新型 SFD 的结构特点、减振特性、减振效果及应用研究等内容进行了归纳,总结了国内相关研究成果,指出了当前中国航空发动机新型 SFD 研究的不足,对未来新型结构 SFD 的研究提出了方向和展望,为新型 SFD 在航空发动机等旋转机械的转子系统减振设计中的应用和选型提供了参考。新型 SFD 可在航空发动机、风电、高速电机等透平机械领域开展应用,工程应用前景广阔。总结和展望如下。

(1) 大多数新型结构 SFD 的研究还停留在理论阶段,且实验对象多为实验室简单结构的转子,针对航空发动机上的应用很少,应加强 SFD 在航空发动机转子系统上的应用研究。

(2) 针对新型 SFD 的应用范围研究不够系统和

深入,应加强新型 SFD 的应用范围数据库和体系建设,以期根据不同旋转机械类型直接从数据库中选择匹配对应的 SFD,无需事先再进行大量的理论和验证。

(3)加强新型 SFD 在突加基础冲击载荷、叶片丢失、碰磨等突加复杂载荷下的减振机理和减振效果研究,为航空发动机转子在受到复杂瞬时冲击载荷下的减振设计提供参考。

(4)中国新型 SFD 研究起步较晚,研究内容多为定性分析,应尽快从定性分析转为定量分析,为航空发动机等旋转机械减振设计提供量化的数据支持。

(5)关于 SFD 油膜压力测量技术的公开报道尚少,十分有必要开展相关研究,以期掌握油膜压力测量技术,为实际油膜压力下的 SFD 动力特性分析提供技术支持。

(6)建议进一步加强低刚度的弹性体在突加不平衡及瞬时冲击载荷下的疲劳性能研究。

#### 参 考 文 献

- [1] 崩腾飞,赵吕方,夏文嘉,等. 含裂纹转子系统动力学建模与实验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(8): 58-64.  
Kuai Tengfei, Zhao Lufang, Xia Wenjia, et al. Dynamic modeling and experimental study of cracked rotor system[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(8): 58-64.
- [2] 张文卓,李明. 船舶垂荡运动下转子-隔振系统的非线性动力学分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(34): 13971-13976.  
Zhang Wenzhuo, Li Ming. Nonlinear dynamic analysis of rotor-vibration isolation system under ship heaving motion [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(34): 13971-13976.
- [3] 姚星宇,程涵. 谐调螺栓连接对转子系统动力学特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 4229-4236.  
Yao Xingyu, Cheng Han. Influence of tuned bolted joints on dynamic characteristic of rotor system[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(10): 4229-4236.
- [4] 石怀涛,袁振明,佟圣皓. 基于观测器的转子系统不对中早期故障[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2747-2753.  
Shi Huaitao, Yuan Zhenming, Tong Shenghao. Early misalignment faults of rotor system based on observer[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2747-2753.
- [5] 王康,张一凡,孙天翔,等. 自制旋转机械故障模拟试验台的转子振动特性研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(4): 1480-1487.  
Wang Kang, Zhang Yifan, Sun Tianxiang, et al. Rotor vibration characteristics of self-made rotating machinery fault simulation test bench[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(4): 1480-1487.
- [6] 白杰,潘豹,何文博. 带挤压油膜阻尼器悬臂转子系统的突加不平衡响应分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(24): 299-305.  
Bai Jie, Pan Bao, He Wenbo. Sudden unbalance response analysis of cantilever rotor system with squeeze film damper [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(24): 299-305.
- [7] 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]. 燃气涡轮试验与研究, 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.
- [8] 韩雪岩,李晓健,高俊. 挤压油膜阻尼器高速永磁电机转子动力学分析及优化设计[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(10): 74-84, 95.  
Han Xueyan, Li Xiaojian, Gao Jun. Rotor dynamics analysis and optimization design of squeeze oil film damper for high speed permanent magnet motor[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(10): 74-84, 95.
- [9] 侯理臻,王珺,黄金平,等. 挤压油膜阻尼器在 ART 发动机中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 25(S1): 94-99.  
Hou Lizhen, Wang Jun, Huang Jinping, et al. Application of squeeze film damper in ATR engine[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S1): 94-99.
- [10] 张羽薇,王四季,张晋琪,等. 变转速动力涡轮转子模拟系统设计及试验[J]. 航空动力学报, 2025, 40(1): 333-345.  
Zhang Yuwei, Wang Siji, Zhang Jinqi, et al. Design and experiment of variable speed power turbine rotor simulation system[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(1): 333-345.
- [11] 武洪凯. 基于挤压油膜阻尼器的减振轴承设计与分析[D]. 大连:大连理工大学, 2022.  
Wu Hongkai. Design and analysis of damping bearing based on squeeze film damper [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [12] 邢彬,王秋菊,牟佳信,等. 挤压油膜阻尼器在锥齿轮系统中减振特性分析[J]. 航空发动机, 2021, 47(4): 114-122.  
Xing Bin, Wang Qiuju, Mu Jiaxin, et al. Analysis of vibration attenuation characteristics of squeeze film damper in bevelgear systems[J]. Aeroengine, 2021, 47(4): 114-122.
- [13] 马存. 鼠笼式挤压油膜阻尼器减振效果研究[D]. 石家庄:河北科技大学, 2022.  
Ma Cun. Research on vibration reduction effect of squirrel cage squeeze film damper [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2022.
- [14] 杨扬. 基于整体式挤压油膜阻尼器的搭接结构转子振动控制及管道阻尼减振研究[D]. 北京:北京化工大学, 2021.  
Yang Yang. Vibration control of lapped rotor based on integrated squeeze film damper and damping vibration reduction of pipeline [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [15] 王建伟,李航,吴元辉,等. 联封闭式挤压油膜阻尼器的多孔质可倾瓦轴承性能分析与试验验证[J]. 机械工程学报, 2023, 59(1): 151-161.  
Wang Jianwei, Li Hang, Wu Yuanhui, et al. Performance analysis and test verification of porous tilting pad bearings with hermetically sealed squeeze film damper in parallel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(1): 151-161.
- [16] 黄延忠,张广辉,马会防,等. 不同油槽结构挤压油膜阻尼器动力学特性试验[J]. 航空动力学报, 2024, 39(6): 42-54.  
Huang Yanzhong, Zhang Guanghui, Ma Huifang, et al. Experimental on dynamic characteristics of squeeze film damper with different groove [J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39

- (6): 42-54.
- [17] 陈亚龙, 马会防, 黄延忠, 等. 端封开口角度对挤压油膜阻尼器影响试验[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2629-2638.  
Chen Yalong, Ma Huifang, Huang Yanzhong, et al. Experiment on the effect of piston ring gap angle on the performance of squeeze film damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11): 2629-2638.
- [18] 崔颖, 罗乔丹, 邱凯, 等. 涨圈密封挤压油膜阻尼器流场与阻尼特性[J]. 航空动力学报, 2021, 36(12): 2474-2481.  
Cui Ying, Luo Qiaodan, Qiu Kai, et al. Flow field and damping characteristics of piston ring sealed squeeze film damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(12): 2474-2481.
- [19] 邱凯. 两种密封型挤压油膜阻尼器动力特性对比研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.  
Qiu Kai. Comparative study on the dynamic characteristics of two types of sealed squeeze film dampers[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.
- [20] 赵项伟, 罗贵火, 王飞. 静偏心对挤压油膜阻尼器减振特性影响的数值分析[J]. 航空发动机, 2018, 44(3): 42-48.  
Zhao Xiangwei, Luo Guihuo, Wang Fei. Numerical analysis for effects of static eccentricity on vibration characteristics of squeeze film damper[J]. Aeroengine, 2018, 44(3): 42-48.
- [21] 徐伟文, 张大海, 王平, 等. 转子挤压油膜阻尼器静偏心对减振效果的影响[J]. 振动与冲击, 2021, 40(21): 55-61.  
Xu Weiwen, Zhang Dahai, Wang Ping, et al. Effects of static eccentricity of squeeze film damper on vibration reduction effect of rotor system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(21): 55-61.
- [22] 李宇, 王四季, 李川, 等. 考虑静偏心的挤压油膜阻尼器模型及减振特性分析[J]. 航空动力学报, 1-12 [2025-03-26]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240282>.  
Li Yu, Wang Siji, Li Chuan, et al. Model and study on vibration damping characteristics of squeeze film damper considering static eccentricity[J/OL]. Journal of Aerospace Power, 1-12 [2025-03-26]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240282>.
- [23] 孟光. 非线性柔性转子-同心型挤压油膜阻尼器系统稳态及双稳态响应的稳定性分析[J]. 航空学报, 1990, 11(7): 330-340.  
Meng Guang. Stability analysis on the steady state and bistable responses of flexible rotor supported in squeezed film dampers[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1990, 11(7): 330-340.
- [24] 杨坤, 李宇, 潘豹, 等. Muszynska 模型第一类参数对转子系统双稳态响应的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(24): 86-93.  
Yang Kun, Li Yu, Pan Bao, et al. The influence of Muszynska model's first parameter on the bistable response of rotor system[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(24): 86-93.
- [25] 陈钊, 何立东, 路凯华. 挤压油膜阻尼器非线性振动机理及结构创新综述[J]. 机电工程, 2019, 36(4): 343-351.  
Chen Zhao, He Lidong, Lu Kaihua. Reasons of nonlinear vibration of squeeze film damper and summary of its structural innovation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(4): 343-351.
- [26] 晏砺堂, 张世平, 李其汉. 高效多孔环挤压油膜阻尼器的减振特性研究[J]. 航空动力学报, 1993(3): 225-233.  
Yan Litang, Zhang Shiping, Li Qihan. Vibration characteristics of rotor systems with porous squeeze film damper supports[J]. Journal of Aerospace Power, 1993(3): 225-233.
- [27] 张世平, 晏砺堂. 高效油膜阻尼器的研究与开发[J]. 航空动力学报, 1991, 6(2): 180-184.  
Zhang Shiping, Yan Litang. Development of an efficient oil film damper for improving the control of rotor vibration[J]. Journal of Aerospace Power, 1991, 6(2): 180-184.
- [28] Zhang S P, Yan L T, Li Q H. 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.
- [29] 郭宝亭, 马艳红, 赵福安, 等. 金属橡胶外环自适应式挤压油膜阻尼器实验研究[J]. 航空动力学报, 2003(1): 119-123.  
Guo Baoting, Ma Yanhong, Zhao Fu'an, et al. Experimental investigation of an adaptive squeeze film damper with metal rubber outer-ring[J]. Journal of Aerospace Power, 2003(1): 119-123.
- [30] 马艳红, 洪杰, 赵福安. 自适应挤压油膜阻尼器减振机理研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(2): 173-177.  
Ma Yanhong, Hong Jie, Zhao Fu'an. Vibration attenuation mechanism investigation of a adaptive squeeze film damper[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(2): 173-177.
- [31] 马艳红, 王虹, 洪杰. 带金属橡胶油膜环的自适应挤压油膜阻尼器非协调响应研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(2): 390-395.  
Ma Yanhong, Wang Hong, Hong Jie. Investigation of non-synchronous response of adaptive squeeze film damper with metal rubber oil film ring[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(2): 390-395.
- [32] Ma Y H, Scarpa F, Zhang D Y, et al. A nonlinear auxetic structural vibration damper with metal rubber particles[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(8): 84012.
- [33] Ma Y H, Liang Z C, Wang H, et al. Theoretical and experimental steady-state rotor dynamics of an adaptive air film damper with metal rubber[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(22): 5710-5726.
- [34] 祝长生. 新型动静压挤压油膜阻尼器对转子系统振动的控制能力[J]. 航空学报, 1996(2): 227-233.  
Zhu Changsheng. Ability of an advanced hybrid squeeze film damper to control rotor system vibration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996(2): 227-233.
- [35] 祝长生, 汪希萱. 新型动静压挤压油膜阻尼器对柔性转子系统振动的控制[J]. 机械工程学报, 1996(3): 76-83.  
Zhu Changsheng, Wang Xixuan. Ability of an advanced hybrid squeeze film damper to control flexible rotor system vibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 1996(3): 76-83.
- [36] 祝长生, 汪希萱. 新型动静压挤压油膜阻尼器减振特性的实验研究[J]. 振动工程学报, 1995(3): 281-285.  
Zhu Changsheng, Wang Xixuan. An experimental investigation on the effectiveness of advanced hybrid squeeze film damper[J]. Journal of Vibration Engineering, 1995(3): 281-285.
- [37] 祝长生. 动静压挤压油膜阻尼器对非协调响应的抑制能力[J]. 航空动力学报, 1997(2): 28-31, 106.  
Zhu Changsheng. Effectiveness of advanced hybrid squeeze film damper on nonsynchronous response suppression[J]. Journal of

- Aerospace Power, 1997(2): 28-31, 106.
- [38] 周海仑, 冯国全, 罗贵火, 等. 浮环式挤压油膜阻尼器的减振机理[J]. 航空动力学报, 2015, 30(4): 966-971.  
Zhou Hailun, Feng Guoquan, Luo Guihuo, et al. Damping mechanism of floating ring squeeze film damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(4): 966-971.
- [39] 陈以彪, 罗贵火. 浮环式挤压油膜阻尼器减振机理研究[J]. 现代机械, 2015(4): 49-53.  
Chen Yibiao, Luo Guihuo. Mechanism study of the floating ring squeeze film dampers[J]. Modern Machinery, 2015(4): 49-53.
- [40] Zhou H L, Luo G H, Chen G, et al. Two dynamic models of dual clearance squeeze film damper and their verification[J]. Tribology International, 2013, 66: 187-193.
- [41] Zhou H L, Luo G H, Chen G, et al. Analysis of the nonlinear dynamic response of a rotor supported on ball bearings with floating-ring squeeze film dampers[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 59: 65-77.
- [42] 周海仑, 罗贵火, 冯国全, 等. 含浮环式挤压油膜阻尼器的转子系统响应分析[J]. 航空动力学报, 2012, 27(3): 644-650.  
Zhou Hailun, Luo Guihuo, Feng Guoquan, et al. Dynamic response analysis of a rotor supported on floating ring squeeze film dampers[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3): 644-650.
- [43] 周海仑. 含浮环式挤压油膜阻尼器的转子系统动力特性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
Zhou Hailun. Dynamic response analysis of rotor supported on floating ring squeeze film dampers[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [44] 陈以彪. 浮环式挤压油膜阻尼器动力特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.  
Chen Yibiao. Research on dynamic characteristics of floating ring squeeze film damper[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [45] 周海仑, 罗贵火, 艾延延, 等. 含浮环式挤压油膜阻尼器转子系统的突加不平衡响应分析[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 578-584.  
Zhou Hailun, Luo Guihuo, Ai Yanyan, et al. Sudden unbalance response analysis of rotor system supported on floating ring squeeze film damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3): 578-584.
- [46] 夏冶宝, 任兴民, 秦卫阳, 等. 浮环挤压油膜阻尼器对模拟低压转子突加不平衡响应影响分析[J]. 航空动力学报, 2015, 30(11): 2771-2778.  
Xia Yebao, Ren Xingmin, Qin Weiyang, et al. Analysis of the effect of floating ring squeeze film damper on sudden unbalance response of low pressure rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(11): 2771-2778.
- [47] 赵先锋, 杨洋, 王子尧, 等. 弹性环挤压油膜阻尼器支撑下的柔性转子系统动力学分析[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(1): 43-51.  
Zhao Xianfeng, Yang Yang, Wang Ziyao, et al. Dynamic characteristics of flexible rotor system supported by elastic ring squeeze film damper[J]. Journal of Dynamic and Control, 2024, 22(1): 43-51.
- [48] 曹磊, 高德平, 江和甫. 弹性环式挤压油膜阻尼器减振机理初探[J]. 振动工程学报, 2007, 20(6): 584-588.  
Cao Lei, Gao Deping, Jiang Hefu. Damping mechanism of elastic ring squeeze film damper[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(6): 584-588.
- [49] 孙凯, 罗忠, 李雷, 等. 带弹性环式挤压油膜阻尼器转子系统装配特性及试验研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(23): 118-131.  
Sun Kai, Luo Zhong, Li Lei, et al. Assembly characteristics and experimental study of rotor system with elastic ring squeeze film damper[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(23): 118-131.
- [50] 李盛翔, 杨明林, 宋儒佳, 等. 弹性环阻尼器应变特性分析及实验研究[J]. 推进技术, 2025, 46(1): 280-289.  
Li Shengxiang, Yang Minglin, Song Rujia, et al. Strain characteristics analysis and experimental study of elastic ring squeeze film damper[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(1): 280-289.
- [51] 任鸿飞, 王三民, 邹浩然, 等. 带有 ERSFD 的航空弧齿锥齿轮动态特性[J]. 航空动力学报, 2024, 39(2): 20220240.  
Ren Hongfei, Wang Sanmin, Zou Haoran, et al. Dynamic characteristic of aviation spiral bevel gear with ERSFD[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(2): 20220240.
- [52] 韩知非. 弹性环挤压油膜阻尼器-转子系统动力学特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.  
Han Zhifei. Dynamical analysis of elastic ringsqueeze film damper-rotor system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [53] 周海仑, 张晨帅, 艾延延, 等. 弹性环式挤压油膜阻尼器的流固耦合建模及动力特性分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(20): 195-205.  
Zhou Hailun, Zhang Chenshuai, Ai Yanyan, et al. Study on dynamic characteristics and modeling of elastic ring squeeze film damper based on fluid-structure interaction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(20): 195-205.
- [54] 王震林, 徐宁, 刘占生, 等. 弹性环式挤压油膜阻尼器动力学特性系数测试[J]. 航空动力学报, 2019, 34(7): 1542-1550.  
Wang Zhenlin, Xu Ning, Liu Zhansheng, et al. Experiments on forc coefficients identification of elastic ring squeeze film damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(7): 1542-1550.
- [55] 王震林. 弹性环式挤压油膜阻尼器动力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
Wang Zhenlin. Research on dynamic characteristics of elastic ring squeeze film damper[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [56] 张晨帅. 弹性环式挤压油膜阻尼器流固耦合动力学特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.  
Zhang Chenshuai. Study on dynamic characteristics of elastic ring squeeze film damper based on fluid-structure interaction[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019.
- [57] 向风光, 陈曦, 洪亮, 等. 考虑弹性环变形的挤压油膜阻尼器-转子系统动力响应仿真方法[J]. 推进技术, 2024, 45(10): 205-217.  
Xiang Fengguang, Chen Xi, Hong Liang, et al. Simulation method for dynamic responses of squeeze film damper-rotor system considering elastic ring deformation[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(10): 205-217.
- [58] 杨小民, 杨海生, 崔永存, 等. 薄环-紊动射流小孔挤压油膜阻尼器压力特性[J]. 振动与冲击, 2023, 42(9): 151-160.

- Yang Xiaomin, Yang Haisheng, Cui Yongcun, et al. Pressure characteristics of squeeze film damper with thin-walled ring-turbulent jet orifice [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(9): 151-160.
- [59] 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.
- [60] 王树涵, 杨海生, 唐瑞, 等. 弹性环式挤压油膜阻尼器一体化圆柱滚子轴承保持架振动特性分析[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(5): 302-314.
- Wang Shuhan, Yang Haisheng, Tang Rui, et al. Vibration characteristics of cage of cylindrical roller bearing integrated with elastic ring squeeze film damper[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(5): 302-314.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 陈钊, 何立东, 路凯华. 挤压油膜阻尼器非线性振动机理及结构创新综述[J]. *机电工程*, 2019, 36(4): 343-351.
- Chen Zhao, He Lidong, Lu Kaihua. Reasons of nonlinear vibration of squeeze film damper and summary of its structural innovation [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(4): 343-351.
- [64] 张力豪, 何立东, 陈钊, 等. 整体式弹性环挤压油膜阻尼器结构设计及转子过临界实验研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(18): 72-78, 108.
- Zhang Lihao, He Lidong, Chen Zhao, et al. Structure design of an integral elastic ring squeeze film damper and experiments on the rotor passing through critical speed[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(18): 72-78, 108.
- [65] 路凯华. 基于整体式挤压油膜阻尼器的转子及齿轮系统振动控制研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- Lu Kaihua. Research on vibration control of rotor and gear system based on integral squeeze film damper[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019.
- [66] 路凯华, 耿斌斌, 何立东, 等. 基于ISFD的滑动轴承转子系统不平衡振动抑制研究[J]. *机电工程*, 2023, 40(11): 1768-1775.
- Lu Kaihua, Geng Binbin, He Lidong, et al. Unbalanced vibration suppression of sliding bearing rotor system with integral squeeze film damper[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023, 40(11): 1768-1775.
- [67] 万方腾, 何立东, 李志炜, 等. 整体式挤压油膜阻尼器抑制转子不平衡振动研究[J]. *化学工程与装备*, 2019(8): 1-5.
- Wan Fangteng, He Lidong, Li Zhiwei, et al. Research on the suppression of rotor unbalanced vibration by integral squeeze film damper[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2019(8): 1-5.
- [68] 万方腾, 何立东, 范文强, 等. 整体式挤压油膜阻尼器减振双盘悬臂转子系统研究[J]. *机电工程*, 2019, 36(12): 1266-1270, 1281.
- Wan Fangteng, He Lidong, Fan Wenqiang, et al. Processing technology of double station time-sharing complementary wire electrical-discharge machining[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(12): 1266-1270, 1281.
- [69] 闫伟. 基于整体式挤压油膜阻尼器的转子系统振动控制研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2022.
- Yan Wei. Research on vibration control of rotor system based on integral squeeze film damper[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [70] 侯启扬. 基于整体式挤压油膜阻尼器的转子振动控制及管道阻尼减振研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- Hou Qiyang. Research on rotor vibration control and pipeline damping vibration reduction based on integral squeeze film damper [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.
- [71] 丁继超, 何立东, 冀沛尧. 整体式挤压油膜阻尼器对管道振动抑制试验[J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(3): 535-540.
- Ding Jichao, He Lidong, Ji Peiyao. Experimental study on controlling vibration of pipeline with integral squeeze film damper[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(3): 535-540.
- [72] 马靓, 何立东, 路凯华, 等. 整体式挤压油膜阻尼器抑制锥齿轮振动的研究[J]. *机械传动*, 2019, 45(6): 100-105.
- Ma Liang, He Lidong, Lu Kaihua, et al. Study on vibration suppression of bevel gear with integral squeeze film damper[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2019, 45(6): 100-105.
- [73] 路凯华, 何立东, 闫伟, 等. 整体式挤压油膜阻尼器在齿轮箱中的应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(4): 765-774.
- Lu Kaihua, He Lidong, Yan Wei, et al. Application of integral squeeze film damper in gearbox [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(4): 765-774.
- [74] 夏南, 孟光. 双盘转子-非同型SFD系统的非协调响应和分叉特性[J]. *西北工业大学学报*, 2000, 18(2): 216-220.
- Xia Nan, Meng Guang. Non-synchronous response and bifurcation character of two-diskrotor system with a non-centralized SFD[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2000, 18(2): 216-220.
- [75] 崔颖, 王清智, 王永亮, 等. 非同型挤压油膜阻尼器空化流场特性数值模拟[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(7): 978-984.
- Cui Ying, Wang Qingzhi, Wang Yongliang, et al. Numerical simulation on cavitation flow field characteristics of nonconcentric squeeze film damper[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(7): 978-984.
- [76] 祝长生, 毛川, 李鹏飞. 同心与非同心型挤压油膜阻尼器减振能力的实验比较[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(11): 2672-2679.
- Zhu Changsheng, Mao Chuan, Li Pengfei. Experimental comparison of vibration isolation ability of centralized squeeze film damper[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(11): 2672-2679.

- [77] 冯义, 邓旺群, 刘文魁, 等. 同心与非同心挤压油膜阻尼器减振特性对比试验研究[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(6): 978-984.  
Feng Yi, Deng Wangqun, Liu Wenkui, et al. Comparative experimental investigation on vibration attenuating characteristics of concentric and non-concentric squeeze film damper[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(6): 978-984.
- [78] 聂卫健, 邓旺群, 卢艳辉, 等. 带非定心挤压油膜阻尼器柔性转子动力学与试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 35(4): 35-39.  
Nie Weijian, Deng Wangqun, Lu Yanhui, et al. Dynamic and experiment of a flexible rotor with non-centering squeeze oil film damper[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2022, 35(4): 35-39.
- [79] 聂卫健, 李坚, 唐广, 等. 油膜间隙对非同心型SFD-变转速转子系统动力特性的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2024, 37(6): 1-8.  
Nie Weijian, Li Jian, Tang Guang, et al. Effect of oil film clearance on dynamic characteristics of variable speed rotor with non-concentric SFD [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2024, 37(6): 1-8.
- [80] 卢愈, 唐振寰, 成晓鸣, 等. 高速柔性转子-非定心SFD系统响应特征分析与试验验证[J]. 振动与冲击, 2023, 42(17): 114-120.  
Lu Yu, Tang Zhenhuan, Cheng Xiaoming, et al. Analysis and test verification for response characteristics of high-speed rotor-non centered SFD system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(17): 114-120.
- [81] 路亿垦, 母博伟, 谢子强, 等. 挤压油膜阻尼器动力学特性试验[J]. 海军航空大学学报, 2024, 39(6): 701-706.  
Lu Yiken, Mu Bowei, Xie Ziqiang, et al. Experiment on dynamic characteristics of squeeze film dampers[J]. Journal of Naval Aviation University, 2024, 39(6): 701-706.