

文章编号: 1000-8055(2003) 01-0119-05

金属橡胶外环自适应式 挤压油膜阻尼器实验研究

郭宝亭, 马艳红, 赵福安, 洪杰
(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 为改善挤压油膜阻尼器(SFD)油膜力高度非线性不足, 提出了一种新型的金属橡胶外环自适应式挤压油膜阻尼器(ASFD/MRR), 利用金属橡胶(MR)的弹性变形来调整油膜间隙, 与 SFD 相比, ASFD/MRR 能明显抑制双稳态跳跃等非线性振动现象的发生, 具有良好的减振性能。

关键词: 航空、航天推进系统; 阻尼器; 转子; 金属橡胶

中图分类号: V 231. 96

文献标识码: A

Experimental Investigation of an Adaptive Squeeze Film Damper with Metal Rubber Outer-Ring

GUO Bao-ting, MA Yan-hong, ZHAO Fu-an, HONG Jie

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In this thesis an advanced Adaptive Squeeze Film Damper with Metal Rubber outer-Ring (ASFD/MRR) is designed to improve high non-linearity of oil film force in conventional Squeeze Film Damper (SFD). It has optimal effect of reducing vibration because it can automatically adjust the film clearance by elastic deformation of the metal rubber. The results of experiments indicate that ASFD/MRR could control the clearance of the film, and the characteristics of oil film force of ASFD/MRR are better than these of SFD. ASFD/MRR could markedly restrain the occurrence of the nonlinear vibration phenomenon such as bistable characteristic, lock-up and non-synchronous motion and ASFD/MRR can be suitable for wider range of unbalanced level.

Key words: aerospace propulsion; squeeze film damper; rotor; metal rubber

1 前言

SFD^[1]因结构简单可靠、成本低廉、减振效果显著等优点, 广泛应用于航空发动机等高速旋转机械中。但 SFD 外环是刚性的, 油膜刚度随轴颈偏心率的增大呈现出高度非线性, 从而发生双稳态^[2]等非线性系统典型特性。为了在大不平衡量

时使转子偏心率保持在一定允许范围内, 从而改善 SFD 的油膜刚度的高度非线性特性, 本文设计研究了 ASFD/MRR, 通过调整金属橡胶刚度, 使转子系统的等效支承刚度由 SFD 时高度非线性变为线性, 同时, 与纯弹支转子系统相比, ASFD/MRR 中的挤压油膜和金属橡胶都能够提供较大的阻尼, 因此 ASFD/MRR 能适合更大的转速范

收稿日期: 2001- 12- 19; 修订日期: 2002- 04- 01

作者简介: 郭宝亭(1963-), 男, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 北京航空航天大学动力系博士生, 主要从事转子动力学、结构强度及振动试验技术研究。

围和更大的不平衡量。

2 结构设计

考虑到阻尼器参数对 SFD 特性的影响, 本文将 SFD 的不动外环改为带有金属橡胶的弹性外环, 设计了如图 1 所示的结构, 沿径向由里到外依次为阻尼器轴颈、外环、金属橡胶、支承环。支承环用螺栓固定在轴承座上, 为获得更大的外阻尼, 实验时给金属橡胶充油, 使金属橡胶变形时挤压滑油而消耗更多的能量。在阻尼器外环的设计上, 由于增加了环形金属橡胶, 供油方式改为侧向供油, 除此之外其他同 SFD 外环的设计。

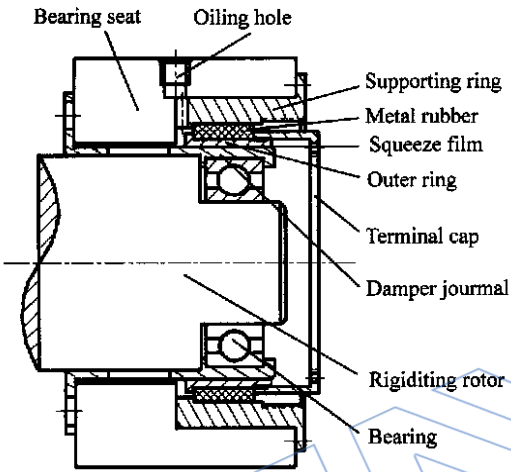


图 1 ASFD/MRR 结构示意图

Fig.1 The struture of ASFD/MRR

ASFD/MRR 减振机理为: 由于 ASFD/MRR 的弹性外环具有一定的刚度和阻尼, 在不平衡量较小时, 阻尼器轴颈位移较小, 挤压油膜力小, 外环基本不动, 接近于 SFD 的情况; 在不平衡量较大时, 轴颈位移增大, 油膜力增大, 金属橡胶产生变形, 使油膜厚度相应增大, 直至达到某一个平衡状态, 其实质是油膜力和外环弹支流固耦合作用的结果。

3 实验设备及测试系统

本文通过实验重点考察 ASFD/MRR 转子系统的稳态动力特性和 ASFD/MRR 的自适应性。

阻尼器参数为: 外环内径 $D = 80.16\text{ mm}$, 直径间隙 $\Delta D = 0.16\text{ mm}$, 间隙比 $\Delta D/D = 0.2$, 长度 $L = 27\text{ mm}$, 鼠笼定心弹支实测刚度 $K_j = 2.43 \times 10^6\text{ N/m}$ 。

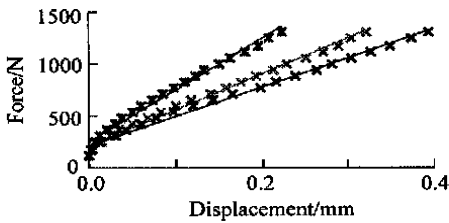


图 2 金属橡胶的静刚度曲线

Fig.2 Curve of static stiffness of MR

共加工了 3 个结构尺寸相同, 密度不同的环形金属橡胶, 参数见表 1(丝径 $d_s = 0.13\text{ mm}$, 宽 $L = 21\text{ mm}$, 大径 $D_w = 100\text{ mm}$, 小径 $D_n = 86\text{ mm}$), 图 2 为金属橡胶环静刚度的实验测定曲线。由图可知, 金属橡胶基本工作在线性段, 金属橡胶的静刚度随着金属橡胶密度的增大而增大。

表 1 金属橡胶参数表

Table 1 Parameter of MR

Number	1	2	3
M ass/g	53.2	69.2	96.0
Density/ $10^3(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.24	1.61	2.24
Static stiffness/ $10^6(\text{N}/\text{m})$	3.36	4.85	8.01

为了考察转子系统的稳态动力特性, 本文在实验台上建立了如图 3 所示的转子及测试系统, 转子实验台由 34 kW 的直流电机驱动, 通过增速比为 11.05 的增速器带动, 最高转速可达 30000

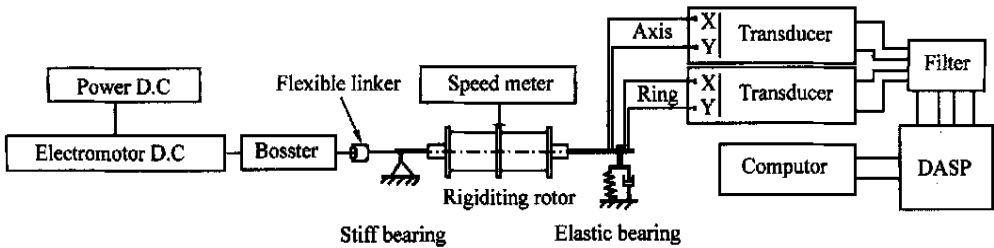
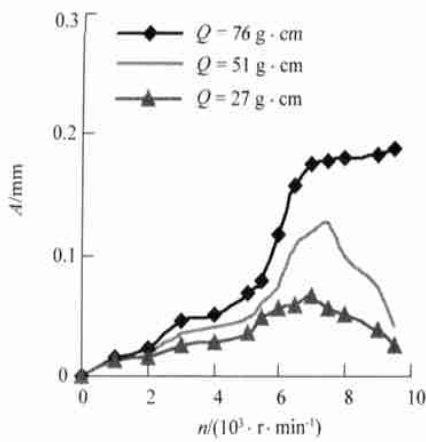
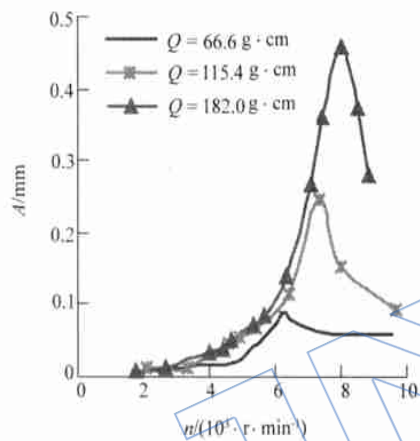


图 3 刚性转子及测量系统

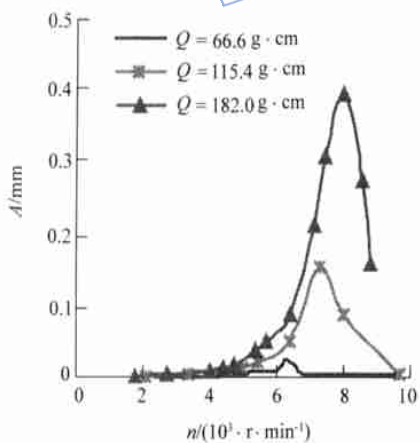
Fig.3 Rigiditing rotor and measure system



(a) Journal of SFD



(b) Journal of ASFD/MRR



(c) Outer-ring of ASFD/MRR

图 4 刚性转子系统位移响应曲线

Fig.4 Displacement response curve of rigidity rotor system

($k_b=8.01\times10^6\text{ N/m}$, $k_j=2.43\times10^6\text{ N/m}$)

r/min。直流电动机由可控硅直流电源供电,可控制转速和加速度,增速器输出轴和转子系统由柔性联轴器联结。实验中的刚性转子靠近电机的一端采用刚性支承,另一端采用弹性阻尼支承,即带定心弹支SFD 或 ASFD/MRR 系统。

本实验中供油压力为环境压力,供油温度为室温,滑油动粘度为 $1.884\times10^{-2}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,两端不封油。用 4 个电涡流位移传感器,同时测量轴颈和外环 x 及 y 方向的四路振动信号,实验的记录分析仪器为 DASP 数据采集和信号分析系统。

4 刚性转子 ASFD/MRR 及 SFD 系统稳态响应的对比研究

在相同的工况下,转子的弹性支承端分别采用 SFD 和 ASFD/MRR 作对比实验,控制转子转速 n 均匀增大或减小,以金属橡胶刚度 $k_b=8.01\times10^6\text{ N/m}$ 的 ASFD/MRR 为例,考察 ASFD/MRR 减振的有效性。

因为水平方向和垂直方向位移响应曲线的规律是一致的,只是幅值大小略有差异,篇幅所限本文只列出水平方向位移响应曲线。

图 4(a) 为刚性转子 SFD 系统轴颈水平方向位移响应曲线, (b) 和 (c) 是在相同的工况下刚性转子 ASFD/MRR 系统轴颈、外环水平方向位移响应曲线。由图 4(a) 可知,当外加不平衡量 $Q=27\text{ g}\cdot\text{cm}$, $51\text{ g}\cdot\text{cm}$ 时 SFD 转子系统都能以较小的振幅 A 越过一阶临界转速,但临界区转速范围较宽。随着不平衡量的增大,振幅增大较快,振峰值点向高速区移动(右移),当 $Q=76\text{ g}\cdot\text{cm}$ 时,振动随转速的增加持续增大,转子无法通过临界转速。对比(a)及(b)可知, $Q=182\text{ g}\cdot\text{cm}$ 时 ASFD/MRR 系统仍能顺利通过临界转速,而且 ASFD/MRR 系统的临界转速区较窄,过临界后振幅很快降了下来,因而 ASFD/MRR 能比 SFD 承受更大的不平衡量范围,减振更有效。由图 4(c) 可以看出外环的振动响应特性与轴颈相似,当转速较低时,由于轴颈振幅较小,油膜力较小,外环基本不动;随着转速的继续升高,轴颈振幅增大,油膜力增大,外环开始振动,并与轴颈振幅同时达到响应峰值点。过了临界转速区后,轴颈振幅迅速降了下来,外环又保持基本不动。ASFD/MRR 系统在整个实验转速范围内外环振幅都小于轴颈振幅。

图 5 为 $Q=115.4\text{ g}\cdot\text{cm}$ 时均匀升速、降速

对 ASFD/MRR 转子系统动力特性的影响, (a) 和 (b) 分别为 ASFD/MRR 轴颈、外环水平位移响应

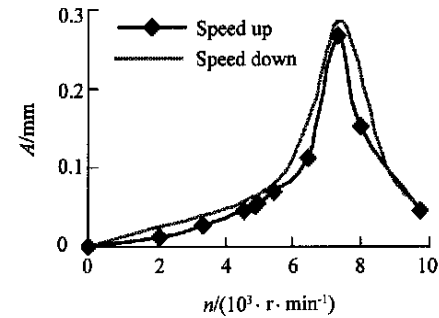
即使 ϵ 较大时, 由于 k_0 远大于 k_b , 则式(1)化简为:

$$k_e \approx k_b + k_j$$

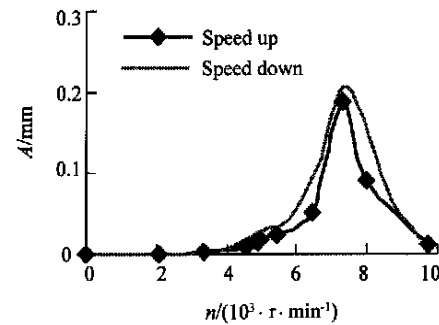
从而通过优化设计刚性转子 ASFD/MRR 系统的等效支承刚度始终处于一个增长率较低的线性变化区域内。

5 ASFD/MRR 自适应性的实验研究

图 6 为不平衡量 $Q = 115.4 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 时 ASFD/MRR 实际油膜厚度 h 的变化曲线, 由图可见, 转子系统在振动过程中, 阻尼器实际的油膜厚度在一个很小的范围内波动, 这是由于当转速较低, 转子不平衡力较小时, 轴颈对油膜略有挤压, 但产生的油膜力较小, 尚未使外环运动, 因而油膜厚度略有减小; 随着转速的增大, 转子不平衡力增大很快, 轴颈振幅增大, 挤压油膜产生很大的油膜力, 在它的作用下, 外环的金属橡胶产生弹性变型, 相当于增大了油膜厚度, 从而使阻尼器的实际油膜厚度保持在一个很小的范围内波动。



(a) Journal of ASFD/MRR



(b) Outer-ring of ASFD/MRR

图 5 均匀升降速对 ASFD/MRR 转子系统动力特性的影响

Fig.5 The effect of even accelerating & reducing to ASFD/MRR rotor dynamic characteristic
($k_b = 8.01 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_j = 2.43 \times 10^6 \text{ N/m}$,
 $Q = 115.4 \text{ g} \cdot \text{cm}$)

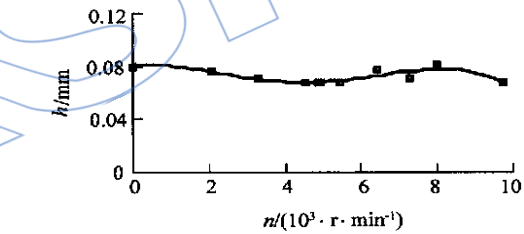


图 6 油膜厚度变化曲线

Fig.6 Changing curve of film thickness
($k_b = 8.01 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_j = 2.43 \times 10^6 \text{ N/m}$,
 $Q = 115.4 \text{ g} \cdot \text{cm}$)

曲线, 由图可知, 均匀升速、降速时 ASFD/MRR 转子系统动力特性曲线趋势基本相同, 均在转速为 7100 r/min 时出现振动峰值, 可见, ASFD/MRR 转子系统在大不平衡量 $Q = 115.4 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 时仍能保持线性振动。这是因为 ASFD/MRR 转子系统的等效支承刚度为:

$$k_e = \frac{k_0 k_b}{k_0 + k_b} + k_j \tag{1}$$

其中: 油膜刚度 $k_0 = \frac{\mu \Omega R L^3}{C^3} \frac{2\epsilon}{(1 - \epsilon^2)^2}$
式中: μ 为滑油动力粘度, Ω 为轴颈相对外环的进动速度, R 为阻尼器半径, L 为阻尼器长度, C 为阻尼器半径间隙, ϵ 为轴颈偏心率。

当 k_b 取合适的值使 ϵ 较小时, 由于 k_0 远小于 k_b , 所以式(1)化简为:

$$k_e \approx k_0 + k_j$$

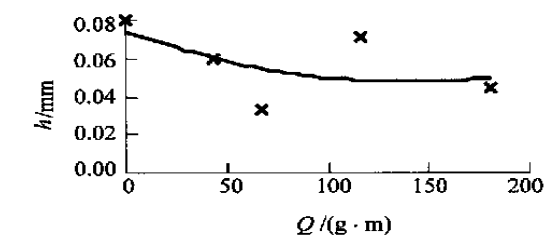


图 7 油膜厚度随不平衡变化曲线
Fig.7 Changing curve of film thickness with unbalance
($k_b = 8.01 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_j = 2.43 \times 10^6 \text{ N/m}$)

图 7 为 ASFD/MRR 实际油膜厚度随不平衡量变化的曲线, 由图可知, 油膜的实际厚度随平

衡量增大的变化很小,从而改善了传统 SFD 油膜刚度的高度非线性,由此,验证了 $ASFD/MRR$ 的自适应性。

6 金属橡胶环的刚度对 $ASFD/MRR$ 转子系统动力特性的影响

在相同的工况下,分别采用 1 号、2 号、3 号金属橡胶组成 $ASFD/MRR$ 系统作对比实验,稳态响应曲线如图 8,转速较低时,金属橡胶外环刚度对 $ASFD/MRR$ 系统振动特性的影响不大,转速增高,影响逐渐增大,随着金属橡胶环刚度的增大,振幅峰值点向高速区移动(右移),由于此时阻

尼也增大,因而临界峰值振幅略有减小。过了临界转速区后,金属橡胶外环刚度对 $ASFD/MRR$ 系统振动特性的影响又逐渐减小。

由式(1)可知,当 $k_b \rightarrow \infty$ 时, $k_e \rightarrow k_0 + k_j$ 即 SFD 转子系统的等效支承刚度,也就是说,金属橡胶刚度过大时,即使轴颈振动较大,外环也保持基本不动,此时系统的振动特性类似于 SFD ; 金属橡胶刚度过小时,过临界时峰值振幅会较大,有可能超过鼠笼弹支的弹性范围,造成事故,所以对于一定的阻尼器设计参数和鼠笼弹支刚度,金属橡胶的刚度有一个最佳的范围,在此范围内,刚性转子 $ASFD/MRR$ 系统才能够有效的减振。

7 结 论

(1) 刚性转子 $ASFD/MRR$ 系统的等效支承刚度基本呈线性变化,与 SFD 相比,减振效果更明显,尤其在大不平衡量时也能保持良好的减振效果,能有效的抑制双稳态跳跃等非线性振动的发生。

(2) 本文所设计的 $ASFD/MRR$ 具有“自适应”功能,其弹性外环能在大振动时产生弹性变形,随着偏心率的变化调节油膜厚度在一个较小的范围内波动,直至达到某一个平衡状态。

(3) $ASFD/MRR$ 对油膜阻尼器安装时产生的偏差有一定的调节作用,不会使挤压油膜阻尼器失效。

(4) 对于一定的阻尼器设计参数和鼠笼弹支刚度,金属橡胶外环的刚度有一个最佳的范围,在此范围内,刚性转子 $ASFD/MRR$ 系统才能够有效的减振。

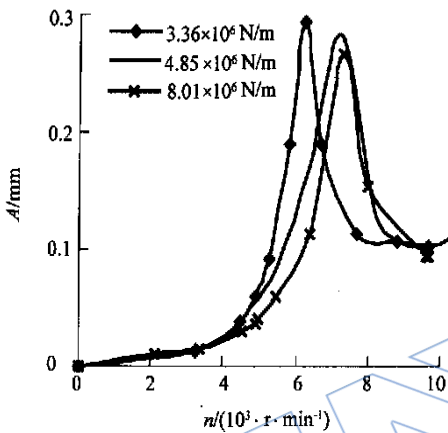
(5) 对于在高速旋转机械上的应用,还需要更理想化的设计,金属橡胶外环在不同条件下的特性还要进行更进一步的研究。

参考文献:

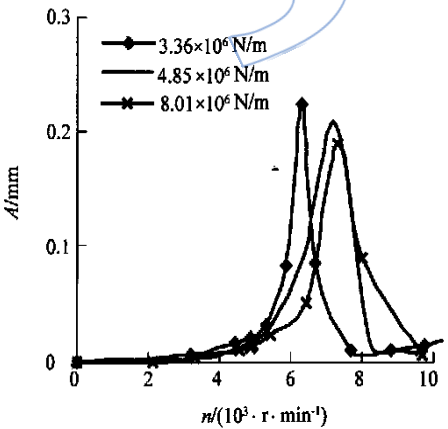
[1] 周明. 弹性环式挤压油膜阻尼器理论与实验研究[D]. 北京: 航空航天大学, 1996.

[2] 晏砺堂, 朱梓根, 宋兆泓, 等. 结构系统动力特性分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989.

[3] Eyad M AL-Khateeb, John M Vance. Experimental Evaluation of a Metal Mesh Bearing Damper in Parallel With a Structural Support[R]. New Orleans, Louisiana, Proceedings of ASME TURBO 2001 June 4- 7, 2001.



(a) Displacement response curve of Journal



(b) Displacement response curve of Outer-ring

图 8 金属橡胶对 $ASFD/MRR$ 转子系统动力特性的影响

Fig. 8 The effect of static stiffness of MR to $ASFD/MRR$ rotor dynamic characteristic

($k_b=8.01 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_j=2.43 \times 10^6 \text{ N/m}$, $Q=115.4 \text{ g} \cdot \text{cm}$)