

高效油膜阻尼器的研究与开发*

北京航空航天大学 张世平 晏砺堂

【摘要】 本文根据高速旋转机械振动控制发展的需要, 研制、开发了一种基于挤压油膜阻尼器 (SFD) 的更有效的新型阻尼器, 即多孔环挤压油膜阻尼器 (PSFD)。从理论和实验两方面研究了 PSFD 和 SFD 对转子振动的控制效能。研究表明 PSFD 具有更有效的控振作用, 能大大提高转子系统的不平衡承载能力及工作的稳定性和可靠性。

一、前言

挤压油膜阻尼器具有结构简单、体积小、重量轻、减振效果好等显著优点, 已广泛应用于航空发动机等高速旋转机械^[1]。但如果转子系统不平衡量较大, 则可能导致减振失败^[2]。转子系统会出现双稳态跳跃现象或振动随着转速增大“通不过”临界转速现象, 还可能出现非协调响应等不利的振动特性。这些缺点的产生主要原因是油膜刚性系数对阻尼器轴颈振动偏心率的变化为高度的非线性。而目前主动控振方法因其结构与设备复杂、重量大等不利因素尚难在高速机械中推广应用^[3]。因此在 SFD 基础上研究开发具有良好的线性油膜特性, 能承受更大转子不平衡量的高效阻尼器, 具有重要的实际意义。

本文研制出一种具有渗透性的油膜外环的挤压油膜阻尼器或称多孔环挤压油膜阻尼器 (PSFD)。油膜外环由粉末冶金压制、烧结而成, 含有大量微小的充满滑油的贯通孔径。工作时部分滑油可以渗入或渗出油膜环。这种渗透作用改变了阻尼器的油膜力特性。研究表明 PSFD 大大改善了 SFD 的油膜刚性的高度非线性特性, 可以获得更大的油膜阻尼力。还能根据需要设计成具有不同数量孔隙或渗透度的油膜环, 以获得最佳的油膜力特性。本文从理论和实验两方面进行了油膜力特性和带定心弹支刚性转子系统的不平衡响应研究。研究表明, 与 SFD 相比, PSFD 在很大不平衡量范围不出现双稳态和临界转速“通不过”现象。PSFD 具有更有效的减振效果, 使转子系统工作更加平稳、可靠。

二、PSFD 的雷诺 (Reynolds) 方程

PSFD 的宏观结构与 SFD 相同, 不同之处仅是 PSFD 的油膜外环是由粉末冶金压制、烧结而成, 环中含有大量细小的充满滑油的贯通孔径。故可在 SFD 的雷诺方程基础上加以修改导出 PSFD 的雷诺方程。参考图 1, 用圆柱坐标, O_b 为原点, z 为轴向, y 为径向, θ 为切向, 得出雷诺方程:

$$\frac{1}{6\mu}\left[\frac{1}{R^2}\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial\theta}\right)+\frac{\partial}{\partial\alpha}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial\alpha}\right)\right]=2\Phi\frac{\partial h}{\partial\theta}+2\frac{\partial h}{\partial\alpha}\tag{1}$$

式中: $h = C(1 + \epsilon \cos \theta)$ 为油膜厚度, μ 为滑油动力粘度, p 为油膜压力, C 为油膜间隙, e 为阻尼器轴颈偏心距, $\epsilon = e/C$ 为偏心率。

PSFD 中滑油以一定速率 V_o 流入外环表面。以 q_y 表示单位面积流量, 由 Darcy 定律得:

$$V_o = - \left. \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right|_{y=R_b} \frac{\Phi}{\mu} = q_y \tag{2}$$

于是可将渗透度表示为 $\Phi = -\mu V_o / (\partial p / \partial y)$ 。渗透度可通过实验测定。根据连续条件, 对多孔的油膜外环可得: $\nabla q = (\Phi / \mu) \nabla^2 p = 0$, 由于 $\Phi / \mu \neq 0$, 所以 $\nabla^2 p = 0$ 。于是问题成为在修正雷诺方程的同时, 还需以共同的 $\partial p / \partial y$ 边界值求得多孔外环的 Laplace 方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{6\mu}\left[\frac{1}{R^2}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial\theta}\right)+\frac{\partial}{\partial\alpha}\left(h^3\frac{\partial p}{\partial\alpha}\right)\right] &= -2\Phi\frac{\partial h}{\partial\theta}+2\frac{\partial h}{\partial\alpha}+2\frac{\Phi}{\mu}\frac{\partial p}{\partial y}\bigg|_{y=R_b} \\ (\partial^2 p / \partial \alpha^2) + (\partial^2 p / \partial y^2) + (\partial^2 p / \partial \alpha^2) &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

下面我们以短轴承近似来求解, 并假定横穿油膜环的压力梯度 $\partial p / \partial y$ 为线性变化, 在油膜外表面 $\partial p / \partial y = 0$ 。由此可得短轴承解雷诺方程:

$$(h^3 + 12\Phi H) \partial^2 p / \partial \alpha^2 = 12\mu(e\Phi \sin \theta + e \cos \theta) \tag{4}$$

式中: Φ 为油膜环的渗透度, H 为外环壁厚。

三、弹支定心 PSFD 刚性转子系统运动方程

由达朗贝尔原理可得弹支定心 SFD 和 PSFD 的运动方程²⁾:

$$\left. \begin{aligned} m(\ddot{e} - e\ddot{\Phi}) &= F_u \cos(\omega - \Phi) - K \cdot e - F_r \\ m(e\ddot{\Phi} - 2\dot{e}\dot{\Phi}) &= F_u \sin(\omega - \Phi) - F_t \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中: m 为转子在弹支处的等效质量, F_u 为不平衡力, K 为弹支刚性, F_r 、 F_t 分别为径向和切向油膜力。为便于理论分析, 式 (5) 除以 $m\omega^2 C$ 得无量纲运动方程:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon'' - \epsilon\Phi'' &= U \cos(\omega - \Phi) - F_r - \epsilon \delta^2 \\ \epsilon\Phi'' - 2\epsilon\dot{\Phi}' &= U \sin(\omega - \Phi) - F_t \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式中: 上标 “ $\cdot$ ” 表示对 ω 求导, U 为不平衡质量偏心率, $\delta = \omega / \omega_r$, $\omega_r = \sqrt{k/m_o}$ 。 F_r 和 F_t 由雷诺方程短轴承解求出。用 π (半) 油膜和供油压力为环境压力的假设, 则 F_r 、 F_t 表示为:

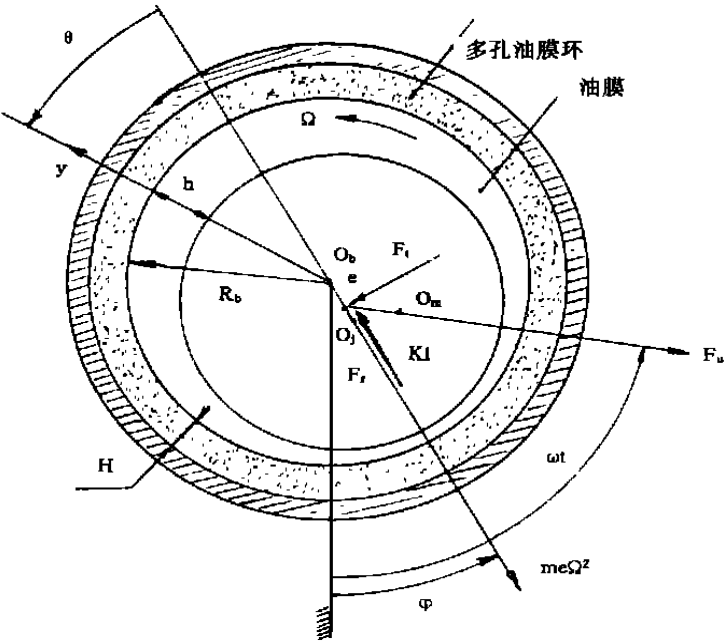


图 1 座标系

$$\left. \begin{aligned} F_r &= B(\epsilon \Phi' I_1 + \epsilon' I_2) / \delta_r \\ F_t &= B(\epsilon \Phi' I_3 + \epsilon' I_1) / \delta_r \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $B = \mu R L^3 / (m C^3 \omega_r)$ 为轴承参数

$$I_1 = \int_{\theta_1}^{\theta_1 + \pi} \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta}{(1 + \epsilon \cos \theta)^3 + \alpha} d\theta, \quad I_2 = \int_{\theta_1}^{\theta_1 + \pi} \frac{\cos^2 \theta}{(1 + \epsilon \cos \theta)^3 + \alpha} d\theta$$

$$I_3 = \int_{\theta_1}^{\theta_1 + \pi} \frac{\sin^2 \theta}{(1 + \epsilon \cos \theta)^3 + \alpha} d\theta, \quad \theta_1 = \tan^{-1}(-\epsilon' / \epsilon \Phi')$$

$\alpha = 12 \Phi H / C^3$ 为外环渗透参数。

四、PSFD 和 SFD 的油膜力特性

表征油膜力特性的重要参数是油膜刚性系数 K_o 和阻尼系数 C_o , 它们可表示为:

$$\left. \begin{aligned} K_o &= F_r / e = F_r(\epsilon C) = (\mu R L^3 \Omega C^3) \cdot I_1 \\ C_o &= F_t(e \Omega) = F_t(\epsilon \Omega C) = (\mu R L^3 / C^3) \cdot I_3 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $\Omega = \Phi_o$ 。为便于理论分析, 将 K_o 、 C_o 无量纲化, 令:

$$\left. \begin{aligned} \bar{K}_o &= K_o / (\mu R L^3 / C^3) = I_1 \\ \bar{C}_o &= C_o / (\mu R L^3 / C^3) = I_3 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

图 2 和图 3 分别给出 $\bar{K}_o$ 和 $\bar{K}_o / \bar{C}_o$ 在不同渗透参数 α 下随 ϵ 变化的曲线, 即油膜力特性

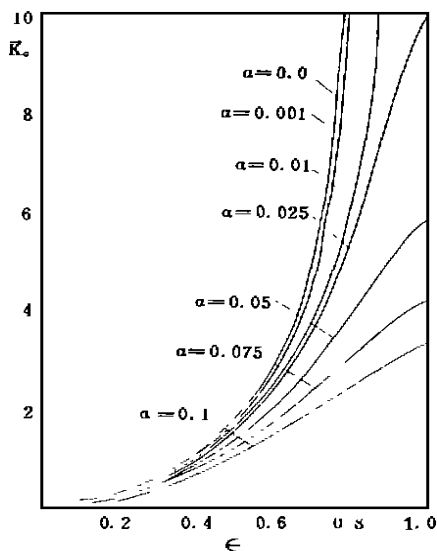


图 2 $\bar{K}_o$ 在不同 α 下随 ϵ 变化曲线

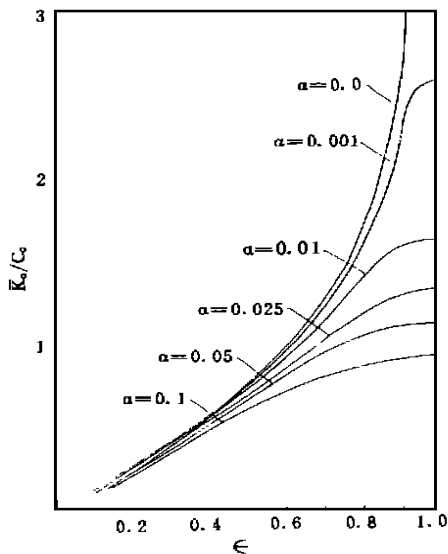


图 3 $\bar{K}_o / \bar{C}_o$ 在不同 α 下随 ϵ 变化曲线

线。图中 $\alpha = 0$ 的曲线代表 SFD 的油膜力特性线。在 $\epsilon \leq 0.4$ 时, $\bar{K}_o$ 和 $\bar{K}_o / \bar{C}_o$ 均接近线性。在 $\epsilon > 0.4$ 后, ϵ 值增加, $\bar{K}_o$ 和 $\bar{K}_o / \bar{C}_o$ 均大大增加, 可见 $\bar{K}_o$ 比 $\bar{C}_o$ 增加得快, 使 $\bar{K}_o$ 与 $\bar{C}_o$ 以及 $\bar{K}_o / \bar{C}_o$ 均为 ϵ 的高阶非线性函数。为了避免转子工作中出现各种有害的非线性特性^[5], 所以设计 SFD 时要求保证 $\epsilon \leq 0.4$ 。这在大不平衡量和 (或) 高转速时往往会有困难。而 PSFD 则随着 α 值的增大, $\bar{K}_o$ 和 $\bar{C}_o$ 以及 $\bar{K}_o / \bar{C}_o$ 均下降。 ϵ 越大它们下降得越多。可见 PSFD 油膜环的渗透效应显著地降低了 SFD 的 $\bar{K}_o$ 、 $\bar{C}_o$ 和 $\bar{K}_o / \bar{C}_o$ 的非线性程度。使油膜力特性的线性范围大为加宽。此外还可

根据具体情况的需要选取不同的 α 值的外环来调整 PSFD 的 K_o 和 C_o 特性以获得满意的转子系统动力特性。而 SFD 的 K_o/C_o 对 ϵ 的变化特性是不能改变的, 设计时只能通过改变阻尼器尺寸来调整 K_o 或 C_o , 如果想增大阻尼, 则必然同时增大油膜刚性, 反之如要降低油膜刚性就不得不同时减小油膜阻尼。PSFD 的应用使得设计人员能更有效地调整和控制油膜刚性和油膜阻尼之间的关系, 从而较容易达到更满意的控制转子系统振动的目的。

五、PSFD 与 SFD 转子系统的不平衡响应

图 4 示出带同样尺寸 PSFD 和 SFD 刚性转子的典型不平衡响应曲线。不平衡小 $U=0.25$ 时, PSFD 系统临界转速略低于, 最大振幅略高于 SFD 系统的, 这是因为 PSFD 的外环有渗透作用, 阻尼略小。两种阻尼系统均不会出现双稳态。当不平衡量增大例如 $U=0.35、0.4、0.45$ 时, 带 SFD 的转子系统出现了明显的双稳态特性。不平衡量增大时振幅增大, 出现双稳态的转速亦增高。从图中还可看到在 $\epsilon \leq 0.4$ 范围带 PSFD 和 SFD 转子系统有相近的振幅, 而在 $\epsilon > 0.4$ 的范围由于油膜环的渗透效应增强, PSFD 转子系统的响应特性大大优于 SFD 转子系统的。PSFD 系统不会出现双稳态。图 4 为 SFD 与 PSFD 具有同样尺寸的情况。如 PSFD 采用较大一些的 L/D 值。其 $K_o、C_o$ 均可增大一些, 则在小不平衡量 $U=0.25$ 时, 带 PSFD 和 SFD 转子系统在临界转速附近的振幅就会非常接近。

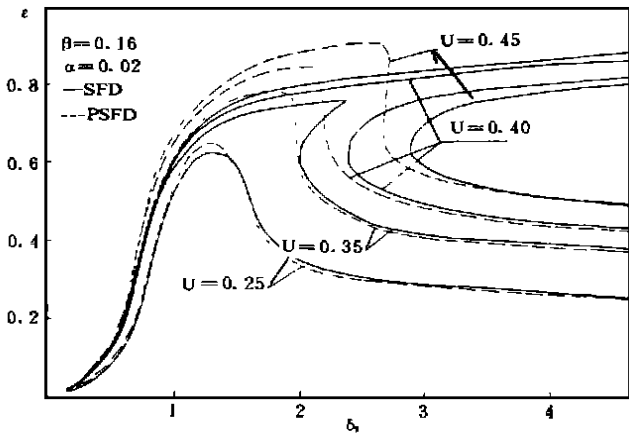


图 4 不平衡响应曲线

传递率响应特性与振幅偏心率响应特性类似, 限于篇幅未给出, 不拟详述。
航空发动机转子结构复杂, 工作条件恶劣, 运转过程或工作一段时间后往往不平衡量要增大, SFD 在此情况下不能满意工作, 甚至起到很坏的作用。应用 PSFD 就可放宽对不平衡量的要求, 不论转子的不平衡量小或大均能使转子工作具有更高的稳定性和可靠性。

六、实验研究

进行过系统的带弹支 PSFD 与 SFD 转子不平衡响应实验对比研究, 限于篇幅只给出典型结果。

图 5 所示为光线记录示波仪录下的带 PSFD 和 SFD 的刚性转子不平衡响应振幅波形。实验转子系统数据如后: $m=7.3\text{kg}$, $C=0.2\text{mm}$, $K=820\text{kg/cm}$, $U=0.41$ 。PSFD 的 $\alpha=0.016$ 。实验时缓慢增速, 过临界或振幅跃降后不久即降速。由图 5 看出 SFD 转子系统增速过程振幅在很大转速范围持续很高, 直到转速为 6000r/min 时才突降。随后降速时, 振幅又跃升然后渐降。这是典型的双稳态现象。而带 PSFD 转子系统则在升速时转速为 3600r/min 时即顺利通过临界。大振幅范围很窄, 没有跳跃现象, 降速时也是顺利通过临界。在临界附近带 PSFD 转子振幅比带 SFD 的转子略大, 原因是同样尺寸时, PSFD 油膜阻尼略低。实验研究结果与理论

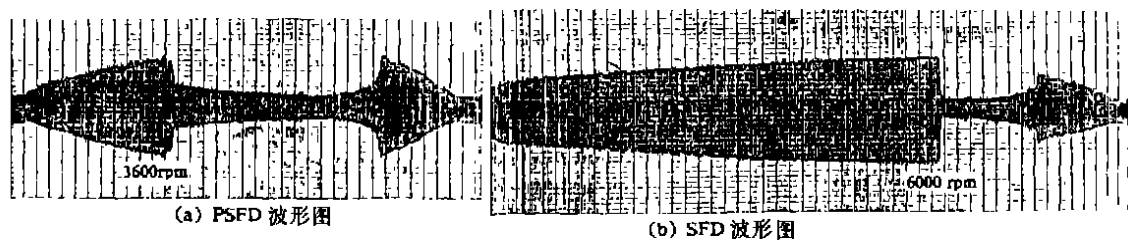


图 5 不平衡响应振幅波形

分析结果具有良好的一致。

七、结 论

(1) PSFD 具有与 SFD 相同的宏观结构, 因而保留了 SFD 的结构简单, 体积小, 重量轻, 造价低等优点。

(2) PSFD 的油膜外环的渗透性可以降低油膜刚性的高度非线性。改变渗透参数 α 可调整油膜无量纲刚性 K_o 、阻尼 C_o 和它们的比值 K_o/C_o 。设计时可根据需要调整 PSFD 的 α 值和尺寸以获得满意的油膜力特性。

(3) 带 PSFD 的转子系统不论在小不平衡量或大不平衡量均有良好的不平衡响应特性, 不会象带 SFD 转子系统那样在大不平衡量时发生双稳态等有害响应。因而 PSFD 具有更有效的减振作用, 可使对转子的不平衡量的要求放宽。

(4) PSFD 的多孔油膜外环已作为含油轴承在许多机器的滑动轴承中应用, 未闻因此而影响机器寿命或工作可靠性问题。此外, 多孔油膜环即使油孔部分堵塞, PSFD 的油膜力性能也优于 SFD 的, 万一发生多孔环的孔径全部堵塞 (这是不大可能的事), PSFD 即相当于 SFD, 也不致于因此出现不安全、不可靠、减少工作寿命等问题。

参 考 文 献

- [1] Vance, J. M., "A Current Review of Rotordynamic Problems in High Speed Light Weight Turbomachinery and Power Shafting", Proc. of Conference of the Stability and Dynamic Response of Rotor with Squeeze Film Bearings, US Army Research Office, Charlottesville, Va. May, 1979.
- [2] 张世平, "高速旋转机械新型阻尼器", 北京航空航天大学, 博士论文, 1989 年 4 月。
- [3] Schweitzer, G., Lange, R., "Characteristics of A Magnetic Rotor Bearing For Active Vibration Control", I. Mech, E. Conf. on Vibrations in Rotor Machinery, Chambrige Sept. 1976, C239/76.

DEVELOPMENT OF AN EFFICIENT OIL FILM DAMPER FOR IMPROVING THE CONTROL OF ROTOR VIBRATION

Zhang Shiping and Yan Litang (*Beijing University of Aeronautics & Astronautics*)

ABSTRACT

An efficient oil film damper, known as Porous Squeeze Film Damper (PSFD) is developed from the normal squeeze film damper (SFD) for effective and reliable rotor vibration control. The outer race of the PSFD is made of permeable sintered porous metal materials. The permeability of PSFD under squeeze effect makes it possible for the oil to permeate through the porous outer race, so that the characteristics of squeeze film forces are improved, in particular, as the amplitude of eccentricity is rather great. The nonlinearity of squeeze film forces could be reduced due to PSFD permeability, and the relations between oil film stiffness coefficient and damping coefficient of squeeze film forces could be improved. Investigation demonstrates that: The cavitated SFD high nonlinear oil film stiffness forces, which lead to many undesirable nonlinear vibration characteristics, lessen due to the permeability of PSFD, and the damping forces are relatively enhanced by PSFD. The nonlinear vibration characteristics of SFD system such as bistable jump phenomenon are greatly improved and even eliminated at higher unbalance level with the PSFD system. The PSFD can operate effectively under greater unbalance loads as compared with the SFD system.

TECHNICAL NOTES

CORRELATION BETWEEN CONDENSED PHASE REACTION AND BURNING RATE OF AP/HTPB PROPELLANT

Zhang Wei and Zhang Ren (*National University of Defense Technology*)

ABSTRACT

The effects of transition metal oxides TMO on the thermal decomposition characteristics of AP and AP/HTPB propellants and on the burning rates of AP/HTPB and AP/Al/HTPB propellants are studied. The results show that the burning rate of AP/Al/HTPB/TMO propellant depends on the thermo-decomposition characteristics of AP/TMO and burning rate of AP/HTPB/TMO propellant depends on the thermo-decomposition characteristics of itself. The results also indicate that the aluminum decreases the burning rate of the propellant. It is suggested that the aluminum reduce the rate of condensed phase reactions and the stress effect of AP thermal decomposition properties on the burning rate of aluminized propellant.

A NEW DISTORTION SCREEN AND ITS APPLICATION

Ma Jiaju (*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT

A new distortion screen, "simulation poles", is proposed for simulation of steady state pressure distortion patterns. It is composed of a number of round poles with same diameter, the depth inserted into flow field may be adjusted steplessly during the test. The author applied it to scale simulator of an axisymmetrical random frequency