

动静压挤压油膜阻尼器 对非协调响应的抑制能力*

浙江大学 祝长生**

【摘要】以小孔节流的动静压挤压油膜阻尼器为例,从理论上研究了这种新型阻尼器对柔性转子系统非协调响应的抑制能力,并与传统挤压油膜阻尼器转子系统的特性进行了比较。

主题词: 转子 阻尼器 非线性 动力特性

分类号: TH 113.1

1 引言

传统挤压油膜阻尼器(SFD)的动力特性具有高度的非线性,在一定的条件下,系统会产生非协调响应^[1,2]。当转子以非协调轨道运行时,转子作异步涡动,转轴上会产生一个交变的附加应力,将直接影响到转子系统的疲劳寿命,对转子系统产生不良的影响,是SFD使用过程中的一种潜在危害。因此在传统SFD的基础上研究和开发具有良好动力特性的高效阻尼器具有重要的实际意义。对传统SFD的结构进行局部改动而形成的动静压挤压油膜阻尼器(HSFD)是一种新型的阻尼结构,旨在改善SFD油膜力的高度非线性。新型HSFD的结构与SFD的不同之处只是把原来双承载区结构的SFD的周向供油槽在周向划分为若干个相互独立的油腔,在每个油腔上连接一个节流器,通过节流器对其进行供油。稳态特性的研究结果^[3]已经表明了这种新型的阻尼器具有良好的减振能力,但是对在阻尼器中引入静压作用能否改善SFD对非协调响应的抑制能力还未曾讨论过。本文以小孔节流的深油腔HSFD为例,从理论上研究了HSFD对非协调响应的抑制能力。

2 理论分析模型

以Jeffcott转子为模型,在一系列的简化假设下^[2],可以得到支承在非同心型HSFD/SFD上的Jeffcott转子系统无量纲形式的运动微分方程为:

$$Z_D'' + (1/\Omega^2)(Z_D - Z_B) + (2\xi/\Omega)Z_D' = (W/\Omega^2) + Ue^{\tau} \quad (1)$$

$$Z_B'' + (1/2\alpha\Omega^2)(Z_B - Z_D) = (W/\Omega^2) + (1/m_B C \omega^2)(F_r + iF_t)e^{i\varphi} \quad (2)$$

其中: ξ 为无量纲阻尼比, α 为质量比, W 为重力参数, m_B 为轴颈处的质量, C 为径向间隙, ω 为转子转速, Ω 为转速比, F_r 及 F_t 分别为阻尼器在 r 及 t 方向上的油膜分力, φ 为轴颈处的位置角, $\tau = \omega t$ 为无量纲时间。

图 1 是本文研究的 N 个沿周向均匀分布的小孔节流无周向回油槽深油腔的 HSFD 结构 (只画出一个节流器)。设每个油腔所对应的中心角为 β , 单个周向封油面的中心角为 φ , 第 i 个油腔的位置由其油腔中心处的位置角 φ_i 来表示。第 i 个油腔的压力为 P_i , 相邻油腔的压力分别为 P_{i-1} 及 P_{i+1} , 且 $P_i > P_{i+1}$, $P_i > P_{i-1}$ 。其它参数如图 1 所示。

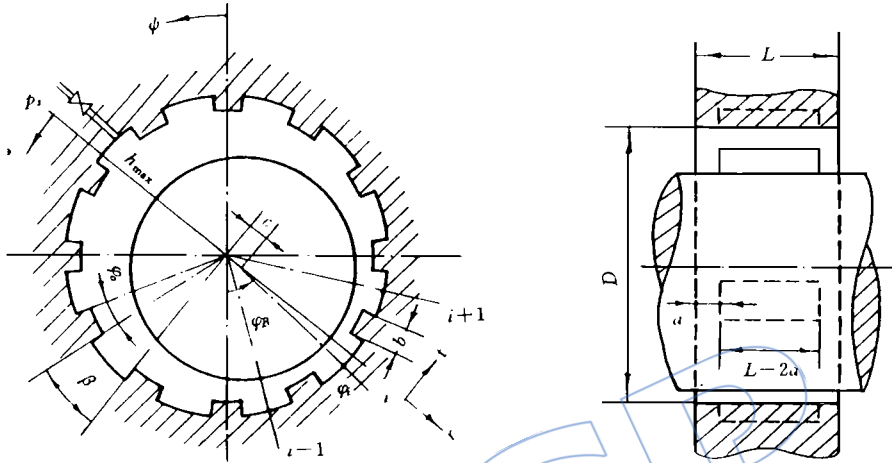


图 1 本研究的 HSFD 结构

在不可压粘性流体等简化假设下, 可以推导出 HSFD 的油膜力为^[3]:

$$F_r = - (L - 2a)R \sum_{i=1}^N P_i [\sin A - \sin B] - \frac{2\mu R a^3}{C^2} [\dot{\mathbf{G}} I_3^{02} + \dot{\mathbf{G}} \dot{\mathbf{P}} I_3^{11}] - (L - 2a)R \sum_{i=1}^N \left\{ C \cos \theta_i \theta + C_{i1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} J_3^{00} \cos \theta_i \theta + C_{i2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta_i \theta \right\} \quad (3)$$

$$F_t = - (L - 2a)R \sum_{i=1}^N P_i [\cos A - \cos B] - \frac{2\mu R a^3}{C^2} [\dot{\mathbf{G}} I_3^{11} + \dot{\mathbf{G}} \dot{\mathbf{P}} I_3^{20}] - (L - 2a)R \sum_{i=1}^N \left\{ C \sin \theta_i \theta + C_{i1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} J_3^{00} \sin \theta_i \theta + C_{i2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta_i \theta \right\} \quad (4)$$

式中: $A = \varphi_i + \beta/2 - \varphi$, $B = \varphi_i - \beta/2 - \varphi$, $C = \frac{12\mu R}{C^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [\dot{\mathbf{G}} J_3^{10} - \dot{\mathbf{G}} \dot{\mathbf{P}} J_3^{01}]$

$P_i (i=1, \dots, N)$ 为第 i 个油腔的压力, 它由下面的流量连续方程来确定:

$$\bar{Q}_{i, in} = \bar{Q}_{i, out1} + \bar{Q}_{i, out2} + \bar{Q}_{i, out3} + \bar{Q}_{i, out4} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

其中: $\bar{Q}_{i, in}$ 为通过小孔节流器流入第 i 个油腔的无量纲流量

$$\bar{Q}_{i, in} = (3\sqrt{2\mu\pi\alpha}d_o^2/\sqrt{\rho P_s C^3}) \sqrt{1 - \bar{P}_i} = \lambda_0 \sqrt{1 - \bar{P}_i}$$

$\bar{Q}_{i, out1}$ 为通过两端轴向封油面流出的无量纲流量

$$\bar{Q}_{i, out1} = \left(\frac{D}{a} \right) \bar{P}_i \int_{\varphi}^{\varphi+\pi/N} [1 + \dot{\mathbf{G}} \cos(\varphi - \varphi_i)]^3 d\varphi$$

$\bar{Q}_{i, out2}$ 为第 i 个油腔经过周向封油面流入第 $i+1$ 腔中的无量纲流量

$$\bar{Q}_{i, out2} = -m \left(\frac{D}{a} \right) (\bar{P}_i - \bar{P}_{i+1}) \left[1 + \frac{2\dot{\mathbf{G}}}{\varphi} \cos \left(\varphi_i + \frac{\pi}{N} - \varphi \right) \sin \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right]^3$$

$\bar{Q}_{i, out3}$ 为第 i 个油腔经过周向封油面流入第 $i-1$ 腔中的无量纲流量

$$\bar{Q}_{i, out3} = -\bar{m} \left(\frac{D}{a} \right) (\bar{P}_i - \bar{P}_{i-1}) \left[1 + \frac{2\epsilon}{Q_0} \cos \left(\varphi_{i-1} + \frac{\pi}{N} - \varphi \right) \sin \left(\frac{Q}{2} \right) \right]^3$$

$\bar{Q}_{i, out4}$ 为第 i 腔的无量纲挤出流量。

$$\bar{Q}_{i, out4} = \frac{12\mu\alpha(L-a)}{P_s C^2} \left(\frac{D}{a} \right) \sin \frac{\pi}{N} [\epsilon \cos(\varphi_i - \varphi) + \epsilon \dot{\varphi} \sin(\varphi_i - \varphi)]$$

$\bar{P}_i = P_i/P_s$ 为油腔的无量纲压力, λ_0 为小孔节流器的设计参数, $\bar{m} = (D-2a)/Db$ 为油腔的形状比系数, α 为小孔节流器的流量系数, d_0 为小孔的直径, μ 及 ρ 分别为油的动力粘度及密度。

将 HSFD 的油腔在周向连通则得到了具有相同外形尺寸的中央周向槽供油的双承载区结构的 SFD, 这时油膜力的计算公式(3)和(4)可以简化为:

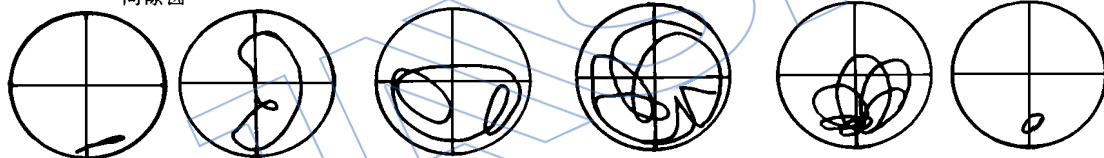
$$F_r = -\frac{2\mu R a^3}{C^2} [\epsilon I_3^{02} + \epsilon \dot{\varphi} I_3^{11}] \quad , \quad F_t = -\frac{2\mu R a^3}{C^2} [\epsilon I_3^{11} + \epsilon \dot{\varphi} I_3^{20}] \quad (6)$$

在以上公式中, $(\cdot)$ 表示对 t 的导数, 而 $(\dot{})$ 表示为对 τ 的导数。

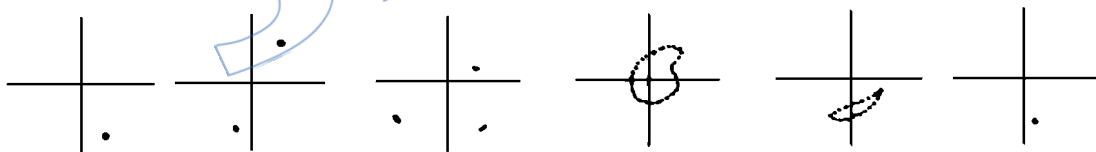
3 计算结果及讨论

为了研究转子系统的非协调特性, 对方程(1)和(2)进行时间向前数值积分, 以得到其稳态解。在进行数值积分的同时对稳态响应的结果作 Poincare 映射, 消除转子运动中的过程效应, 以识别和确定各种复杂轨道的非线性特性。

间隙图

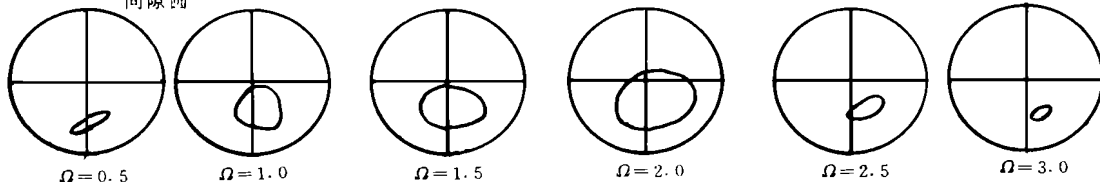


(a) SFD 系统轨道



(b) SFD 系统 Poincare 图

间隙图



(c) HSFD 系统

图2 SFD/HSFD 转子系统非协调轨道的对比

图2给出了一组不同转速下分别支承在非同心型 SFD 及 HSFD 上的转子系统涡动轨道的典型结果 ($\xi = 0.0005$, $\alpha = 0.25$, $m_B = 3.0 \text{ kg}$, $U = 0.3$, $N = 4$, $a = 12 \text{ mm}$, $L = 40 \text{ mm}$, $R = 30$)

mm, $W = 0.2$, $C/R = 0.7\%$, $d_o = 0.6$ mm, $\varphi = 80^\circ$, $\rho = 850$ kg/m³, $\mu = 0.8 \times 10^{-2}$ Pa · s, $P_s = 2.0$ MPa)。对于支承在非同心型 SFD 上的转子系统, 由于 SFD 本身没有静承载能力, 当转速较低时, 如 $\Omega = 0.5$, 不平衡激励力并没有使轴颈充分晃动, SFD 所产生的油膜力不足以将轴颈抬起而沉在间隙圆的底部, 系统未达到稳态。随着转速的增大, 轴颈才浮起来, 并形成了稳定的协调圆轨道。在 $\Omega = 1.0$ 时转子系统出现了 $1/2$ 阶亚谐波轨道, Poincare 截面上只有 2 个不动点。接着转子系统又在 $\Omega = 1.5$ 处出现了 $1/3$ 阶亚谐波轨道, 对应的 Poincare 截面上也只有 3 个不动点。当转速继续增大到 $\Omega = 2.0$ 及 2.5 时, 转子的涡动轨道变得更为复杂, Poincare 截面上的映射点不再是几个不动点而是一系列互不重合的可动点, 在计算周期足够长时, 映射点将变为一条封闭的曲线。这说明系统的响应不再为一个简单的周期运动而是一种概周期运动。在转子的涡动轨道上则表现为整个非协调轨道以极慢的速度进动。这种概周期运动主要是由低频分量所致, 其低频分量随轨道的非协调特性发生变化, 并不始终保持为一个常数。当转速很高时转子的涡动轨道又变为协调轨道。在不同阶非协调轨道之间协调轨道交替出现。

支承在 HSFD 上的转子系统, 由于在 HSFD 中存在着静压作用, 具有一定的静承载能力, 因而即便在很低的转速区, 轴颈已经浮起, 并不沉在间隙圆的底部。随着转速的提高轴颈处的振动也增大, 但是转子的涡动轨道不仅比 SFD 情况下的涡动轨道小, 而且还始终保持为协调的, Poincare 截面上始终只有一个不动点。由于系统重力因素的影响, HSFD 转子系统的涡动轨道一般都向下偏置, 涡动轨道偏置量的大小还随 HSFD 供油压力的增加而减小。因而在一般的 SFD 中引入静压作用而形成的 HSFD 明显地改善了传统 SFD 油膜力的高度非线性特性, 使所支承的转子系统具有一般线性系统的特点。HSFD 的使用不仅可以抑制非同心型 SFD 系统中非协调轨道, 还有利于轴颈的浮起。

虽然我们未进行具有相同参数条件下 SFD/HSFD 转子系统非协调响应的对比性实验, 但通过对 SFD/HSFD 转子系统在不同不平衡量及阻尼器参数下得到的大量实验结果的分析, 发现 HSFD 系统的轨道基本上都是协调的, 而 SFD 系统极易出现非协调轨道, 从而验证了上述的理论分析结果。

4 结 论

(1) 在一般的 SFD 中引入静压作用不仅能够明显地改善 SFD 油膜力的高度非线性特性, 而且还可以抑制系统中的非协调轨道, 克服了 SFD 在较大不平衡量及小的轴承参数情况下容易出现非协调轨道的不足。(2) HSFD 具有一定的静承载能力, 因而无需定心弹簧就可以使轴颈在静态时浮起, 并可借助于供油压力的变化来对转子进行预调中。因而为了消除定心弹簧疲劳寿命所带来的问题及进一步节省空间起见, 在 HSFD 的使用中可不再使用定心弹簧。

参 考 文 献

- 1 祝长生等 柔性转子—挤压油膜阻尼器系统中的非协调轨道的实验研究 航空动力学报, 1987, 2(4): 323- 327
- 2 孟光, 祝长生等 柔性转子—同心型挤压油膜阻尼器系统的非协调响应分析 航空动力学报, 1987, 2(2): 121- 125
- 3 Zhu C S, et al Development of an Advanced Hybrid Squeeze Film Damper for Rotor Vibration Control Proc 4th Conf on Rotordynamics, Chigiao, USA, 1994: 341- 349

CALCULATION OF THERMAL RATE IN ANALYZING THERMAL STRESSES

Zhang Jiazhong, Xia Songbo, Zhang Ying

(Power Engineering Dept Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

ABSTRACT The real- time monitoring of rotor life consumption makes urgent demands on exact real- time calculation of the thermal rate in analyzing thermal stresses. In order to eliminate the data fluctuation in temperature sampling and meet the demands of real- time calculation, the zone linear regression is adapted to accomplish the data filtering of thermal rate curves instead nonlinear regression, and the time subdomains are so divided, that the later one covers as much as possible the data of former one except first sampling data. As a result, a recurrence formula of the regression has been worked out. The exactness of the formula has been verified by numerical simulation. The convergence and filtering efficiency of the method are very well.

Key Words Thermal rate Thermal stress Regression analysis

RESEARCH ON BENDING FATIGUE LIFE PREDICTION METHOD OF AIRCRAFT GEARS

Xu Yingqiang, He Dawei, Qian Guanliang

(7th Dept Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT The limitations of the conventional bending fatigue life prediction method for aircraft gears are investigated and the applicability of local stress- strain approach to the gear bending fatigue life analysis is researched. Some valuable conclusions have been drawn from comparison between the computational results and experimental data.

Key Words Gears Lifetimes Prediction technique

EFFECTIVENESS OF AN ADVANCED HYBRID SQUEEZE FILM DAMPER ON NONSYNCHRONOUS RESPONSE SUPPRESSION

Zhu Changsheng

(Dept of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

ABSTRACT The effectiveness of an advanced Hybrid Squeeze Film Damper (HSFD) without the retainer springs on suppressing the nonsynchronous response of the rotor system was studied theoretically. A flexible rotor supported on the orifice- compensated HSFD is taken as an example. It is shown that the HSFD is able not only to improve obviously the highly nonlinear behaviours of the conventional squeeze film dampers, but also to enhance its capability of nonsynchronous response suppression greatly.

Key Words Rotors Dampers Non- linear Dynamic properties

A RING- LIKE METAL RUBBER DAMPER

Wang Xin and Zhu Zigen

(4th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT A new kind of rotor damper, Ring- like Metal Rubber Damper (RMRD), has been invented. Its application to a rotor rig shows that RMRD has excellent damping property and linear characteristics. RMRD has better damping effects and can with-