

考虑粗糙效应的航空高速滚子轴承动态模拟*

西北工业大学 陈国定** 李建华 张成铁

【摘要】 耦合高速滚动轴承动力学理论和部分弹性流体动力润滑(PEHL)理论,提出了考虑轴承元件表面粗糙效应的高速滚动轴承动态特性分析方法。分析结果表明,轴承元件表面粗糙度和表面粗糙纹理方向对高速轴承的动力学特性有较大的影响,提高轴承元件表面加工质量可以抑制高速轴承元件在运行中出现的动态不稳定性现象;实验工作不仅支持了本文的分析,而且支持了高速滚动轴承是在混合润滑状态下工作的结论。

主题词: 高速轴承 粗糙度效应 动力学分析
分类号: TH133.33

1 动力学模型及计算方法

近年来的实验工作表明,以航空发动机主轴轴承为代表的高速轴承是在润滑油膜和表面粗糙微峰共同作用的部分弹流状态下工作的^[1]。因此,高速轴承的动态分析是应考虑表面粗糙效应影响的。根据高速滚子轴承运动的情况^[2],假设滚子运动具有 3 个自由度:滚子绕自身轴线的运动(自转转速为 ω);滚子质心绕轴承轴线的运动(公转转速为 ω);滚子轴向移动。假设保持架作平面运动,也具有 3 个自由度:保持架质心在 X 、 Y 平面的运动和保持架绕其轴线的运动(转速为 ω)。这样,滚子轴承的总自由度数为 $3z+3$,其中 z 为滚子个数。

文献[2]给出的受载滚子和非受载滚子的动态方程分别为方程组(1)和方程组(2),即:

$$\left. \begin{aligned} Q_{yij} + F_{ij} - Q_{yoj} - F_{oj} - F_{dj} &= M_j(D_b + D_e)/2 \cdot \partial \omega_j / \partial t \\ (F_{ij} + F_{oj} - F_{vj})D_b/2 &= I_j \cdot \partial \omega / \partial t \\ Q_{zij} + F_{\omega} - Q_{zaj} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{yij} + F_{oj} - F_{dj} &= M_j \cdot (D_b + D_e)/2 \cdot \partial \omega_j / \partial t \\ (F_{oj} - F_{vj})D_b/2 &= I_j \cdot \partial \omega / \partial t \\ F_{\omega} - Q_{zaj} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: Q_{yij} 和 Q_{yoj} 为内外套圈挡边通过油膜作用于滚子的切向力, F_{ij} 和 F_{oj} 为内外套圈滚道通过润滑油膜作用于滚子的摩擦牵引力; Q_{zij} 和 Q_{zaj} 为滚子与内外套圈接触处通过润滑油膜作用的法向力; F_{dj} 和 F_{vj} 分别是保持架作用于滚子的法向力和切向力; F_{ω} 是滚子公转运动产生的滚子离心力。式中 I_j 和 M_j 分别为滚子的转动惯量和质量; D_e 为内圈直径, D_b 为滚子直径; 下标 i

和 o 分别表示内圈与滚子和外圈与滚子的作用, 下标 j 表示第 j 个滚子。

设保持架的转动惯量和质量分别为 I_c 和 M_c , 则保持架动态方程组为:

$$F_x = M_c \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}, \quad F_y = M_c \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad \sum_{j=1}^z F_{dj} \frac{D_b + D_c}{2} = I_c \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (3)$$

式中的 F_x 和 F_y 可由文献[2]提供的公式计算。

设 F_{Jc} 为滚子端面与导引套圈档边之间的接触力, S_j 为滚子轴向窜动位移, 则滚子轴向窜动动态方程为:

$$F_{Jc} = M_j (\partial^2 S_j / \partial t^2) \quad (4)$$

用于部分弹流分析的平均 Reynolds 方程为:

$$d[\Phi(h^3/12\eta)(dp_h/dx)]/dx = [(u_1 + u_2)/2](\partial h/\partial x) \quad (5)$$

式中: h 和 h_T 分别为名义油膜厚度和局部(当地)油膜厚度; η 为润滑油粘度; p_h 为流体动压力; u_1 和 u_2 是两接触表面的滚动速度; Φ 为压力流量因子, 有关 h , h_T , Φ , η 和粗糙微峰接触压力 p_c 的计算可参阅文献[3]。

方程组(1)和(2)中的 F_{ij} , F_{qj} , F_{dj} , F_{vj} , Q_{vij} 和 Q_{voj} , 在求解以平均 Reynolds 方程为核心的部分弹流方程组、得到油膜压力分布, 粗糙微峰接触压力分布, 油膜厚度分布以及摩擦牵引力后, 可通过有关计算公式获得^[2]。然后以文献[3]给出的拟动力学解作为初值, 采用阿当姆斯公式反复迭代, 直至获得在一个时间周期内任一时刻每个滚子的自转转速, 公转转速, 轴向窜动速度, 保持架质心速度, 保持架转速以及各自的位移等动态解, 详细求解方法见文献[2]。

2 结果及分析

本文计算和实验所采用轴承型号为 D32214, 轴承主要参数有: 滚子长度 $l_c = 13$ mm; 中心圆直径 $d_m = 97.5$ mm; 内圈直径 $D_c = 84.5$ mm; 滚子直径 $D_b = 13$ mm; 滚子数目 $z = 16$; 径向游隙 $w = 0.05$ mm。其它工况参数有: 轴承径向载荷 $F_r = 1500$ N; 轴承内圈转速 $n = 5000$ r/min; 采用 HP-8 航空润滑油润滑。

本文的实验工作是在文献[4]所介绍的实验装置上进行的。有关实验装置的结构、功能以及实验测试方法均可参阅文献[4]。

本文的分析表明, 在考虑表面粗糙效应影响的条件下, 滚子在受载区域的公转转速要比在非受载区域的公转转速大, 而且处于受载区不同位置的滚子其公转转速动态变化是不同的, 其原因在于当滚子承受较大摩擦牵引力时, 它的公转转速相应也高。

以轴承元件接触表面的粗糙纹理参数 γ 和名义油膜厚度与表面粗糙度均方根值的比值 h/σ (h/σ 简称膜厚比) 为代表的表面粗糙影响参数对滚子轴向窜动位移亦有较大影响。本文的分析表明, 膜厚比越小, 也即表面粗糙度越大, 滚子轴向窜动位移越小, 这是因为较粗糙的表面能够提供更大的摩擦力阻碍滚子轴向窜动。本文的分析还表明, 当接触表面呈现纵向纹理特征 ($\gamma > 1$) 时, 滚子的轴向位移较之横向纹理特征 ($\gamma < 1$) 和各向同性纹理特征 ($\gamma = 1$) 时要小, 这是因为纵向纹理表面由于泄漏作用难以形成较厚的油膜厚度, 导致粗糙效应加强而提供了更大的摩擦力, 阻碍滚子的轴向窜动。

图 1 上图是表面粗糙纹理参数 $\gamma = 1$ 时, 不同膜厚比条件下保持架转速的动态模拟, 下图是膜厚比 $h/\sigma = 2.12$ 时, 不同 γ 值条件下保持架转速的动态模拟。显然, 膜厚比越大, 也即表面粗糙度越小, 轴承保持架转速越高, 因此, 提高轴承元件表面光洁度有助于减小保持架打滑程

度。此外,从图上还可以看出,横向纹理粗糙表面条件下的保持架转速较之纵向纹理粗糙表面条件下的保持架转速要高,这也可以归因于纵向纹理表面因泄漏作用造成粗糙效应加强所致。

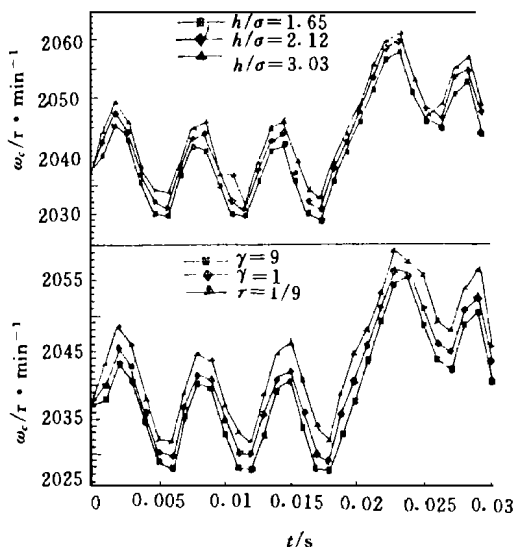


图1 表面粗糙影响参数对轴承保持架转速的影响

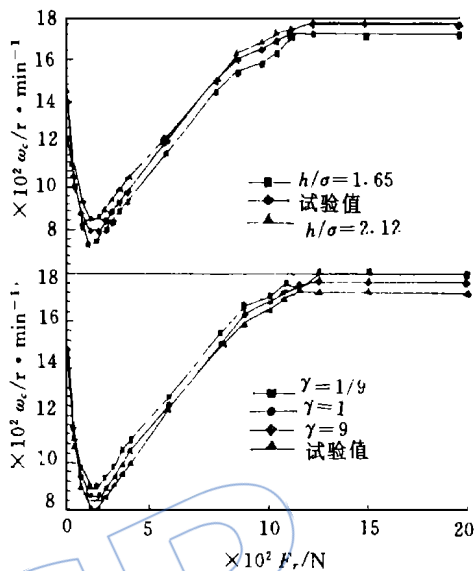


图2 保持架转速计算与实验的对比($n = 4000 \text{ r/min}$)

图2上图是 $\gamma = 1$ 时,不同膜厚比情况下,和下图是 $h/\sigma = 2.12$ 时,不同 γ 值条件下,保持架转速随径向载荷变化的计算及实验分析结果。从图中可以看出,保持架转速实验值介于膜厚比为1.65和2.12的保持架转速值之间,这表明实验工况是处于部分膜润滑状态。此外,因为轴承元件加工时造成的表面结构走向具有极强的纵向纹理特性,所以,实验值甚至低于 $\gamma = 9$ 时理论计算值。图2的结果表明了计算分析和实验分析的良好吻合性。

3 结 论

本文在考虑表面粗糙效应条件下,进行了航空高速滚子轴承动力学分析,着重讨论了高速轴承在运行过程中,膜厚比和表面粗糙纹理参数对轴承元件动力学特性的影响。本文的分析表明,轴承润滑状态好,轴承元件表面光洁度高以及使得轴承元件接触具有横向纹理特征均有助于提高轴承元件运动的动态稳定性,减小发生打滑擦伤等高速轴承早期失效的机率。

参 考 文 献

- 1 Averbach B L, et al. Analysis of Bearing Incidents in Aircraft Gas Turbine Mainshaft Bearings. Tribology Trans., 1991, 34(2): 241- 247
- 2 张成铁. 部分弹流状态下航空高速滚动轴承动力学分析: [学位论文]. 西北工业大学, 1997
- 3 徐建东. 高速滚动轴承拟动力学分析与弹流润滑理论的耦合研究: [学位论文]. 西北工业大学, 1994
- 4 徐建东, 陈国定等. 圆柱滚子轴承运动关系的试验研究. 摩擦学报, 1995, 15(4): 373- 375

engine gas path component faults is investigated. By organizing the fault samples quantitatively, the construction of BPN is built and applied to the fault diagnosis of a low bypass ratio turbofan engine. The diagnostic results show that BPN can not only isolate the gas path component faults, but also identify the severity of component performance deterioration. It is proved that the BPN is adaptive to random errors in measure system and different engine operation regimes for a control plan. But the construction of BPN must be rebuilt under the condition of different engine control plans. Because it has a little ability of self-organization, it is difficult for BPN to isolate the engine faults quantitatively when several faults occur at the same time.

Key Words Aircraft engine Network Fault diagnosis

DYNAMIC SIMULATION OF AVIATION HIGH- SPEED ROLLER BEARINGS WITH SURFACE ROUGHNESS EFFECT

Chen Guoding, Li Jianhua, Zhang Chenglie

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

ABSTRACT A new dynamic analysis method for high-speed roller bearings is put forward by coupling dynamic theory of high-speed roller bearing with Partial Elasto-Hydrodynamic Lubrication (PEHL) theory. With taking the surface roughness effects of bearing components into consideration, the dynamic characteristics of high-speed roller bearings are analysed in detail. The results indicate that the surface roughness and surface roughness texture of bearing component exert a considerable influence on the dynamic characteristics of the high-speed roller bearings. The improvement of the surface manufacturing quality of the bearing components can suppress the dynamic instability of bearing components in operation. Our experimental work verifies not only our analysis, but also the conclusion made by Averbach^[1] that high-speed roller bearings operate in mixture lubrication state.

Key Words High-speed bearing Roughness effect Dynamic analysis

RESIDUAL VIBRATION FATIGUE LIFE OF COMPRESSOR BLADE DAMAGED BY FOREIGN OBJECT

Kang Jidong, Chen Shixuan, Xu Zhihui

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT The residual vibration fatigue life of TC4 plate blade subjected to Foreign Object Damaged (FOD) is investigated by means of eddy current excited vibration fatigue tests. The results show that the extent of FOD depends on both impact energy E and geometric scale S . There exists a critical damage for a given blades. Repairing of the damaged parts and lowering of the vibration stress in the blade are effective measures to improve the resistance of the blade to FOD. Moreover, the comparison of the titanium and steel blades indicates that the excessive fatigue strength of the steel blade is more than that of the titanium