

DOI: 10.7652/xjtuxb201501022

利用改进牛顿-拉夫逊法的高速圆柱滚子轴承打滑分析

金海善, 朱爱斌, 陈渭

(西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 在考虑油气阻力和保持架与滚子之间的摩擦力的基础上, 推导了圆柱滚子轴承拟动力学分析模型。提出采用改进的牛顿拉夫逊法求解大规模非线性方程组, 可以克服传统算法对初值要求较高、方程组规模较大时迭代很难收敛的问题, 在分析高速滚子轴承打滑时具有较好的效果。通过与已有的分析和实验结果进行对比后发现: 滚动轴承保持架打滑与轴承所受径向载荷有关, 在一定范围内增大径向载荷, 可明显抑制打滑现象; 在高速滚动轴承非承载区, 滚子转速与保持架转速相关, 且随保持架转速的增加而增加, 而当保持架转速接近理论转速时, 滚子打滑程度与径向载荷无关。

关键词: 大规模非线性方程组; 圆柱滚子轴承; 拟动力学; 打滑分析

中图分类号: TH113.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)01-0133-06

Skidding Analysis of High-Speed Cylindrical Roller Bearings Using Improved Newton-Raphson Method

JIN Haishan, ZHU Aibin, CHEN Wei

(Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Considering the roller pocket friction and churning loss, a roller bearing quasi-dynamics model was established. An improved Newton-Raphson method was proposed to solve the large-scaled nonlinear equations. This method can overcome the difficulty of conventional method in finding an appropriate initial value and accelerating the iteration converge when the nonlinear equation is in a large scale. Compared with the experimental results in a literature, the proposed method gives better results than other methods in analyzing the skidding of high-speed roller bearing. It is found that: 1) the cage skidding is related to the radial load, and in a certain range, increasing the radial load can significantly suppress skidding; 2) the unloaded rollers' rotational speed is related to the cage speed, and the unloaded rollers' rotational speed accelerates when the cage speed increases, while the unloaded rollers' speed is unrelated to the radial load when the cage speed is close to the theoretical speed.

Keywords: large-scaled nonlinear equations; roller bearing; quasi-dynamics; skidding analysis

滚动轴承是一种应用极为广泛的机械零部件。现代工业对滚动轴承的要求越来越高, 在转速较高的情况下, 轴承打滑失效已成为滚动轴承的主要失

近年来, 伴随着航空航天、核能、装备制造业的发展,

收稿日期: 2014-04-23。 作者简介: 金海善(1989—), 男, 硕士生; 朱爱斌(通信作者), 男, 副教授。 基金项目: 国家“973计划”资助项目(2011CB706601)。

网络出版时间: 2014-10-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20141023.1635.011.html>

效形式之一。所谓轴承打滑,是指在轴承运转过程中,由于转速和载荷等其他因素的作用,轴承零件实际转速小于理论转速的一种现象,轴承打滑会使轴承内部摩擦生热加剧,造成打滑蹭伤,缩短轴承的寿命。随着轴承工业的发展,国内外各种轴承动力学模型也日趋完善,其中以 Gupta 提出的完全动力学模型^[1]最为突出,然而该模型考虑的因素众多,结构极为复杂,计算时间较长。Harris 提出的拟动力学分析方法^[2],在预测滚动轴承打滑方面得到了广泛的应用,而且分析结果较易得到实验验证,例如:Boness 首次测得了滚动体的转速^[3];Poplawski 试图给出与 Boness 实验相符的计算结果,在他的模型中计入了油气阻力、保持架偏心旋转及残余不平衡量的影响,能够计算滚子与保持架之间的相互作用力^[4];Rumbarger 等用该模型分析了由滚子轴承支撑的轴承-转子系统^[5];陈国定等采用多重网格法对油膜牵拽力进行了分析,并且通过实验证明,Harris 的模型经改进之后也适用于高速轻载的状况^[6];胡绚等将 Harris 模型应用于航空发动机中介轴承滚子的打滑及受力分析^[7];陈渭等在 Harris 模型的基础上分析了高速轴承保持架涡动对滚子打滑的影响^[8]。以上这些研究充分说明,Harris 模型具有较大的潜在应用价值。事实上,虽然 Harris 模型给出了一个看似完美的非线性动力学平衡方程组,但由于该方程组规模较大,如果采用传统的牛顿-拉夫逊法,即使经对称简化之后,迭代仍然很难收敛,因此 Harris 不得不采用更加简化的模型,以便取得方程组的收敛解。

本文提出一种改进的牛顿-拉夫逊法,无需对模型进行简化即可求得方程组的收敛解;在求得各滚动体转速的基础上,对高速滚子轴承的打滑状况进行了计算分析,并与已有的分析和实验结果进行了对比。

1 理论分析

1.1 轴承零件之间的运动关系

为了分析轴承各零件间的受力情况,有必要先弄清楚它们之间的运动关系。在通常情况下,轴承内圈旋转、外圈固定,若各零件之间的运动关系是理想的,即不存在相对滑动,则滚子自转速度 ω_{jm} 和保持架公转速度 ω_{cm} 与内圈转速 ω 有如下关系^[9]

$$\omega_{jm} = \frac{1}{2}\omega(1 - \gamma^2)/\gamma \quad (1)$$

$$\omega_{cm} = \frac{1}{2}\omega(1 - \gamma) \quad (2)$$

但是在实际工作过程中,保持架和滚子的自转速度一般会小于理论转速,从而产生打滑现象,这就需要建立新的运动学模型。以滚子为参照物时^[2],滚子与内、外圈滚道之间的相对滑动速度分别为

$$V_{ij} = \frac{1}{2}(d_m - D_w)(\omega - \omega_c) - \frac{1}{2}D_w\omega_j \quad (3)$$

$$V_{oj} = \frac{1}{2}(d_m + D_w)\omega_c - \frac{1}{2}D_w\omega_j \quad (4)$$

滚子和内、外滚道对润滑油的卷吸速度分别为

$$U_{ij} = \frac{1}{2}(d_m - D_w)(\omega - \omega_c) + \frac{1}{2}D_w\omega_j \quad (5)$$

$$U_{oj} = \frac{1}{2}(d_m + D_w)\omega_c + \frac{1}{2}D_w\omega_j \quad (6)$$

式中: d_m 为节圆直径; D_w 为滚子直径; ω_c 为保持架实际工作转速; ω_j 为滚子实际工作时的自转速度。

求得滚子和滚道之间的相对滑动速度和卷吸速度之后,可用 Dowson-Higginson 弹流润滑经验公式求得两零件表面间的相互作用力。在引入经验公式之前,需要对速度进行归一化处理,具体过程详见文献^[2]。

1.2 力学模型

本文的力学理论模型仍然采用 Harris 的经典拟动力学模型^[2],不同的是本文计入了保持架与滚子间的摩擦力以及油气阻力对滚子转速的影响。轴承的载荷分布如图 1 所示,图中 F_r 为外载荷, $Q_{\varphi j}$ 为角度 φ_j 处滚子的载荷。由力学平衡条件^[10]可得

$$F_r = Q_{\varphi 0} + 2 \sum Q_{\varphi j} \cos \varphi_j \quad (7)$$

$$Q_{\varphi j} = K \delta_{\varphi j}^a \quad (8)$$

式中: K 为滚子的刚度系数,对于钢质滚子和滚道, $K = 1.14 \times 10^7 l^{8/9}$,其中 l 为滚子的长度; $\delta_{\varphi j}$ 为第 j 个滚子与滚道之间的接触变形

$$\delta_{\varphi j} = (Pd/2 + \delta_0) \cos \varphi_j - Pd/2$$

将 K 和 $\delta_{\varphi j}$ 的表达式代入式(7)、式(8)中,即可得到各个滚子与内圈之间的接触负荷。

根据 $Q_{\varphi j}$ 是否大于 0,将滚子分为承载区和非承载区 2 种受力情况,分别见图 2、图 3。图中: Q_{yij} 、 Q_{yoj} 为内、外圈滚道作用在滚子上的法向作用力,其中 $Q_{yij} = Q_{\varphi j}$; F_{ij} 、 F_{oj} 为油膜牵拽力; Q_{xij} 、 Q_{xoj} 为套圈和滚子之间产生的流体动压作用力的切向分量; F_{dj} 为保持架对滚子的作用力; f_{dj} 为保持架与滚子之间的摩擦力; F_{ω} 为滚子的离心力; $F_{\omega a}$ 为滚子所受的油气阻力。对于非承载区,由于滚子受到内圈的油膜牵拽力及摩擦力较小,故假设滚子由保持架驱动,而对于承载区滚子,则假设滚动体驱动保持架旋转。

对于一个滚子而言,有如下平衡方程:

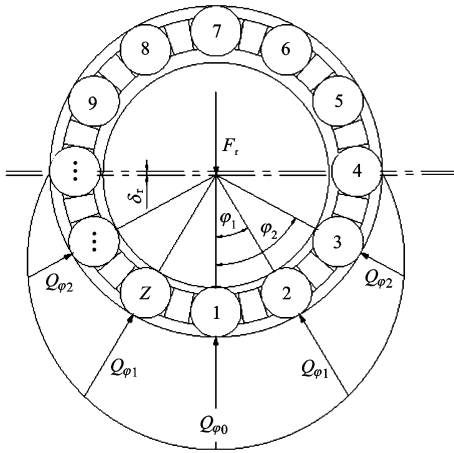


图 1 滚子轴承内部载荷分布示意图^[10]

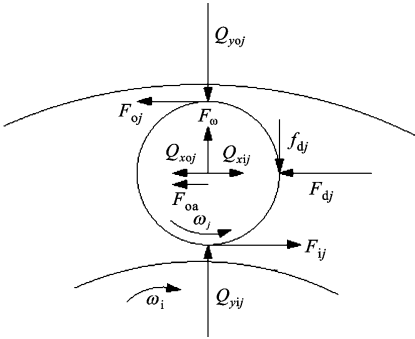


图 2 承载区滚子受力

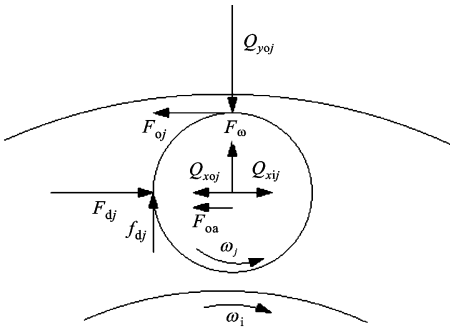


图 3 非承载区滚子受力

力平衡

$$Q_{yij} + F_{\omega} - Q_{yij} - f_{dj} = 0 \tag{9}$$

$$F_{ij} + Q_{xij} - Q_{xoj} - F_{oj} - F_{oa} \pm F_{dj} = 0 \tag{10}$$

式中: F_{dj} 对于承载区滚子取负号,对于非承载区滚子取正号。

力矩平衡

$$(F_{oj} + F_{ij} - f_{dj})D_m = J_w \frac{d\omega_i}{dt} \tag{11}$$

式中: J_w 为滚子绕轴线的转动惯量。

保持架受力平衡

$$\sum_{j=1}^Z F_{dj} = 0 \tag{12}$$

对式(9)~式(12)中的各个力进行归一化^[2,11],可以得到如下方程:

滚子受力平衡

$$\bar{Q}_{yij} + \left(\frac{R_o}{R_i}\right)(\bar{F}_{\omega} - \bar{Q}_{yij} - \bar{f}_{dj}) = 0 \tag{13}$$

$$\bar{F}_{ij} + \bar{Q}_{xij} - \left(\frac{R_o}{R_i}\right)(\bar{Q}_{xoj} + \bar{F}_{oj} + \bar{F}_{oa} \pm \bar{F}_{dj}) = 0 \tag{14}$$

力矩平衡

$$\bar{F}_{ij} + \left(\frac{R_o}{R_i}\right)(\bar{F}_{oj} - \bar{f}_{dj}) = \bar{J}_w \frac{d\omega_j}{d\varphi} \tag{15}$$

保持架受力平衡

$$\sum_{j=1}^Z \bar{F}_{dj} = 0 \tag{16}$$

式(13)~式(15)中

$$\bar{F}_{ij} = -9.2G^{-0.3}\bar{U}_{ij}^{0.7} + \bar{V}_{ij}I_{ij}/H_{ij} \tag{17}$$

$$\bar{F}_{oj} = -9.2G^{-0.3}\bar{U}_{oj}^{0.7} + \bar{V}_{oj}I_{oj}/H_{oj} \tag{18}$$

$$\bar{Q}_{xij} = 18.4(1 + \gamma)G^{-0.3}\bar{U}_{ij}^{0.7} \tag{19}$$

$$\bar{Q}_{xoj} = 18.4(1 + \gamma)G^{-0.3}\bar{U}_{oj}^{0.7} \tag{20}$$

$$\gamma = D_w/d_m$$

将式(17)~式(20)代入滚子的归一化受力平衡方程(13)、(14)中,可以求得滚子与滚子保持架之间的归一化作用力 $\bar{F}_{dj}$ 和 $\bar{f}_{dj}$ 的表达式,然后再将 $\bar{F}_{ij}$ 、 $\bar{F}_{oj}$ 、 $\bar{F}_{dj}$ 、 $\bar{f}_{dj}$ 代入式(15)、式(16),即可得到由保持架公转速度 ω_e 及滚子自转速度 ω_j 共 $Z+1$ (Z 为滚子数量)个未知量构成的非线性方程组,求解该方程组即可得到保持架和滚子的转速。

1.3 算法说明

由式(15)、式(16)组成的方程组非线性较强,当滚子数量较多时,该非线性方程组的规模较为庞大,采用牛顿-拉夫逊法迭代时收敛较为困难。为了简化计算,通常采用 2 种方法:一种是胡绚等提出的方法,将滚动轴承沿受载方向视为对称的情况,同时假定非承载区滚子受力情况相同,将未知参数的数量减少到只剩 $(Z_1+1)/2+2$ 个 (Z_1 为承载区滚子的数量)^[7];另一种是 Harris 采用的更为简化的模型,假定承载区各滚子与保持架之间受力大小相同,非承载区各滚子与保持架之间的受力大小也相同,同时假定非承载区滚子以理论速度自转,即非承载区滚子和滚道之间没有打滑现象产生,最后仅剩 ω_e 及最大承载滚子转速 ω_1 2 个参数^[2]。本文认为,实际上不需要进行上述简化,使用改进的牛顿-拉夫逊法^[12]即可对式(15)、式(16)进行分析。将由式(15)、式(16)构成的非线性方程组记为如下的形式

$$F(\mathbf{X}) = \mathbf{0} \tag{21}$$

其中 $\mathbf{X} = (\omega_c, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_z)$, 则传统牛顿-拉夫逊法的迭代格式为

$$\mathbf{X}^{k+1} = \mathbf{X}^k - \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{X}^k) \mathbf{F}(\mathbf{X}^k) \quad (22)$$

式中: $\mathbf{X}^k$ 为第 k 次迭代之后的值; $\mathbf{X}^{k+1}$ 为第 $k+1$ 次迭代之后的值; $\mathbf{J}(\mathbf{X}^k)$ 为第 k 次迭代时的雅可比矩阵。

式(22)可以写为如下形式

$$\Delta \mathbf{X}^k = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{X}^k) \mathbf{F}(\mathbf{X}^k) \quad (23)$$

参考文献[12]对牛顿-拉夫逊法进行改进, 其一维迭代格式为

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k - \frac{\mathbf{f}[\mathbf{x}^k - \mathbf{f}(\mathbf{x}^k)/\mathbf{J}(\mathbf{x}^0)]}{\mathbf{J}[\mathbf{x}^k - \mathbf{f}(\mathbf{x}^k)/\mathbf{J}(\mathbf{x}^0)]} \quad (24)$$

推广到高维, 可以得到

$$\left. \begin{aligned} -\mathbf{J}(\mathbf{X}^0) \Delta \mathbf{X}^k &= \mathbf{F}(\mathbf{X}^k) \\ \tilde{\mathbf{X}}^k &= \mathbf{X}^k + \Delta \mathbf{X}^k \\ -\mathbf{J}(\tilde{\mathbf{X}}^k) \Delta \tilde{\mathbf{X}}^k &= \mathbf{F}(\tilde{\mathbf{X}}^k) \\ \mathbf{X}^{k+1} &= \tilde{\mathbf{X}}^k + \Delta \tilde{\mathbf{X}}^k \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

即将迭代分 2 步进行: 对初值 $\mathbf{X}^k$ 进行预估得到 $\tilde{\mathbf{X}}^k$; 校正 $\tilde{\mathbf{X}}^k$ 得到下一次迭代的初值。该方法能降低因初值偏差给收敛性带来的影响。为了进一步降低改进算法对初值的敏感性, 提高改进算法的收敛性, 参考文献[13], 对校正公式作进一步改进^[13]

$$\mathbf{X}^{k+1} = \mathbf{X}^k + \lambda \Delta \tilde{\mathbf{X}}^k \quad (26)$$

式中: λ 为迭代修正系数。如果

$$|\mathbf{F}(\mathbf{X}^{k+1})| > |\mathbf{F}(\mathbf{X}^k)| \quad (27)$$

则 λ 减半。但是, 这种方法的计算量比经典牛顿-拉夫逊法的要大, 影响了计算速度, 因此只在前几步使用。改进的牛顿-拉夫逊法降低了初值误差对计算收敛性产生的影响, 同时保留了传统牛顿-拉夫逊法迭代收敛速度快的优点。

2 结果分析

2.1 保持架打滑分析

轴承打滑是高速滚动轴承的主要破坏形式之一, 而评判轴承打滑情况的重要指标是保持架的打滑程度。本文以 Harris 采用的高速轴承^[2]为例进行计算, 并与其计算结果和实验结果进行对比, 此外还给出了 Harris 模型未经简化的计算结果。具体的轴承参数如下:

滚子数量 $Z=32$; 节圆直径 $d_m=182.88$ mm; 滚子长度 $l=20$ mm; 滚子直径 $D_w=14$ mm; 径向游隙 $P_d=0.0635$ mm; 内圈转速为 6 500 r/min; 润滑油牌号为 MIL-L-7808。

图 4 给出的是对原方程组未经简化、并且考虑

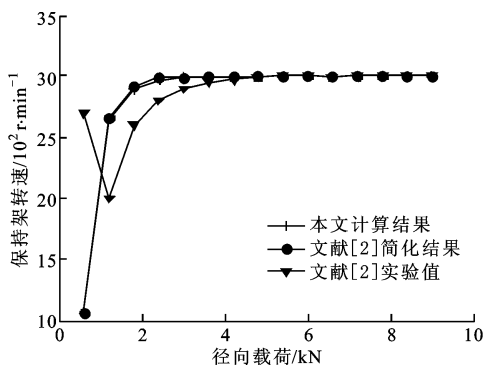


图4 保持架转速与径向载荷的关系

油气阻力和滚子与保持架的摩擦力时, 保持架转速随载荷的变化情况, 从中可以看出, 随着径向载荷的不断增大, 保持架的转速也越来越高, 这是因为载荷越大, 内圈对承载区滚子的摩擦力和油膜牵拽力也越大, 相应地通过滚子施加于保持架的作用力就越大, 当载荷达到一定值时, 保持架打滑率几乎为 0。本文的计算结果和 Harris 的简化计算结果差异很小, 说明了本文所用方法的正确性。

2.2 滚子打滑分析

由于 Harris 的简化模型^[2]无法给出各滚子的转速情况, 为了与现有分析结果进行对比, 本文采用文献[7]中使用的航空发动机中介轴承, 型号为 D1002928 NQK, 轴承的具体结构参数及所用润滑油见文献[14]。轴承外圈固定, 内圈转速为 24 873 r/min, 各滚子的转速见图 5(滚子的编号规则如图 1 所示, 最大承载滚子的编号为 1, 采用逆时针编号)。

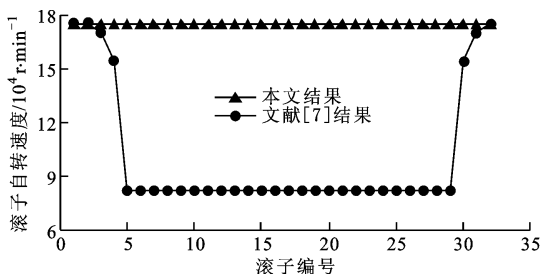


图5 载荷为 6 kN 时各滚子的转速

从图 6 中可以看出, 本文的计算结果与文献[7]的计算结果在非承载区存在较大差别。在文献[7]给出的计算条件下, 由于径向载荷较大, 为 6 kN, 而此时保持架的转速较高(超过 10 000 r/min, 几乎不打滑), 所以滚子离心力极大(几乎等于内圈和最大承载滚子之间的作用力, 见图 7)。在非承载区, 滚子不受内圈的作用, 滚子自转主要来自于滚子和外圈之间的油膜牵拽力。由归一化油膜牵拽力 $\bar{F}_{ij}$ 、 $\bar{F}_{oj}$ 的表达式(18)和(19)可知, 当载荷较大时, 归一

化载荷分布系数的积分与归一化油膜厚度的比值 I_{ij}/H_{ij} 、 I_{oj}/H_{oj} 也很大(超过 10^9),此时若滚子与滚道之间的归一化速度差 $\bar{V}_{ij}$ 、 $\bar{V}_{oj}$ 有微小波动,就会对 $\bar{F}_{ij}$ 、 $\bar{F}_{oj}$ 的值产生较大的影响,而且 I_{ij}/H_{ij} 、 I_{oj}/H_{oj} 的值随着载荷的增加还会不断增大。如果滚子与滚道之间的相对滑动速度较大,那么滚子和外圈之间的油膜牵拽力会急剧增大,阻止滚子和滚道之间的相对滑动。因此,当径向载荷较大时,滚子和滚道之间的相对滑动速度很小,即 $V_{oj} \approx 0$ 。由式(4)可知,滚子自转速度与保持架转速之间的比值固定。当径向载荷超过一定范围后,保持架转速随着载荷的增加变化很小,近似等于理论转速(如图 5 所示),所以非承载区滚子的转速也基本恒定,与理论转速近似相等。

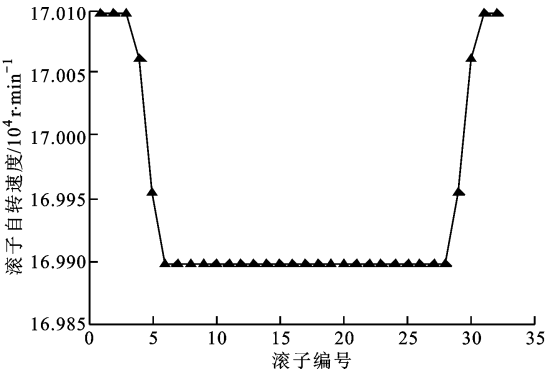


图 6 图 5 中本文计算结果的局部放大图

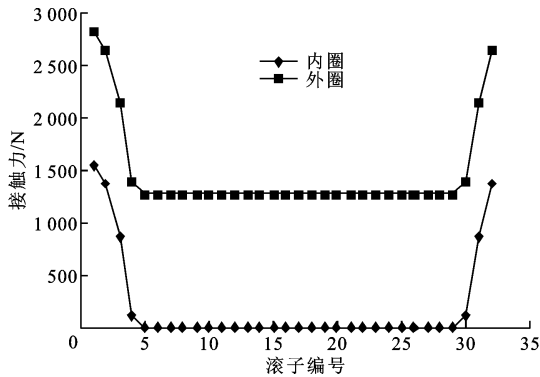


图 7 滚子与套圈之间的接触力

图 7 中编号为 1~3 的滚子在载荷为 2~6 kN 的情况下,虽然径向载荷增加了 2 倍(可参见文献[7]中的图 7),但自转速度变化极小。此现象和分析结果也可从 Crecelius 的技术报告^[15]中得到印证。因此,本文的分析所得到的结果更符合高速重载圆柱滚子轴承的实际情况。

3 结 论

(1)本文提出的改进的牛顿-拉夫逊法克服了传

统算法对初值要求较高、方程组规模较大时迭代很难收敛的问题,可以用来求解大规模非线性方程组,特别是在求解滚动轴承拟动力学平衡方程组时应用效果良好。

(2)滚动轴承保持架打滑与轴承所受径向载荷有关,在一定范围内增大径向载荷可明显抑制打滑现象。

(3)在高速滚动轴承的非承载区,滚子转速与保持架转速相关,随着保持架转速增加,滚子转速也相应增加,而在保持架转速接近理论转速时,高速滚动轴承非承载区的滚子转速与径向载荷无关。

本文方法在轻载状况下的应用受到了限制(如图 4 中载荷为 500 N 时的情况),主要是由于拟动力学计算中采用了 Dowson-Higginson 油膜厚度经验公式,该经验公式在轻载的状况下对油膜牵拽力的估算存在较大偏差(Dowson 等建议仅当归一化油膜厚度 $H < 10^{-5}$ 时适用该经验公式),因此需要引入弹流润滑理论重新进行分析。

参考文献:

[1] GUPTA P K. Advanced dynamics of rolling elements [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1984: 6-7.

[2] HARRIS T A. An analytical method to predict skidding in high speed roller bearings [J]. ASLE Transactions, 1966, 9(3): 229-241.

[3] BONESS R J. The effect of oil supply on cage and roller motion in a lubricated roller bearing [J]. Journal of Lubrication Technology, 1970, 92(1): 39-51.

[4] POPLAWSKI J V. Slip and cage forces in a high-speed roller bearing [J]. Journal of Lubrication Technology, 1972, 94(2): 143-150.

[5] RUMBARGER J H, GUBERNICK D, FILETTI E G. Gas turbine engine mainshaft roller bearing-system analysis [J]. Journal of Lubrication Technology, 1973, 95(4): 401-416.

[6] 陈国定, 李建华, 徐建东, 等. 高速滚子轴承运动学与弹流理论的耦合分析 [J]. 西北工业大学学报, 1996, 14(1): 91-94.

CHEN Guoding, LI Jianhua, XU Jiandong, et al. Coupling kinematics with EHL theory in analysis of high-speed roller bearing [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1996, 14(1): 91-94.

[7] 胡绚, 罗贵火, 高德平. 圆柱滚子中介轴承拟静力学分析 [J]. 航空动力学报, 2007, 21(6): 1069-1074.

HU Xuan, LUO Guihuo, GAO Deping. Quasi-static analysis of cylindrical roller intershaft bearing [J].

- Journal of Aerospace Power, 2007, 21(6): 1069-1074.
- [8] 陈渭, 李军宁, 张立波, 等. 考虑涡动工况的高速滚动轴承打滑失效分析 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 38-43.
- CHEN Wei, LI Junning, ZHANG Libo, et al. Skidding analysis of high speed rolling bearing considering whirling of bearing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 38-43.
- [9] HARRIS T A, KOTZALAS M N. Essential concepts of bearing technology [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [10] 万长森. 滚动轴承的分析方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 74-77.
- [11] 张立波. 圆柱滚子轴承打滑失效分析 [D]. 西安: 西安交通大学, 2009.
- [12] 胡健, 杨宣访, 陈帆. 基于牛顿-拉夫逊电力系统潮流计算的改进算法 [J]. 计算技术与自动化, 2013, 32(4): 41-44.
- HU Jian, YANG Xuan-fang, CHEN Fan. Improved power flow calculation method based on Newton-Raphson method [J]. Computing Technology and Automation, 2013, 32(4): 41-44.
- [13] 宫贺, 王锡淮. 基于改进牛顿-拉夫逊法的电力系统潮流计算 [C]//第19届中国过程控制会议论文集. 北京: 中国自动化学会, 2008: 422-425.
- [14] 胡绚. 反向旋转双转子系统动力学特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007: 84-85.
- [15] CRECELIUS W J, PIRVICS J. Computer program operation manual on SHABERTH: a computer program for the analysis of the steady state and transient thermal performance of shaft-bearing systems [R]. King of Prussia, PA, USA: SKF Industries Inc. Engineering and Research Center, 1976.
- (编辑 葛赵青)

(上接第111页)

- [13] 董小萌, 张平. 反正切形式跟踪微分器设计及相平面分析 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(4): 533-537.
- DONG Xiaomeng, ZHANG Ping. Design and phase plane analysis of an arctangent-based tracking differentiator [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(4): 533-537.
- [14] 陆启韶. 常微分方程的定性方法和分叉 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 182-230.
- [15] 王新华, 刘金琨. 微分器设计与应用-信号滤波与求导 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 53-106.
- (编辑 赵炜)

(上接第117页)

- [7] MOORE A P, PRINCE S, WARRELL J, et al. Superpixel lattices [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [8] WANG J, WANG X. Vcells: simple and efficient superpixels using edge-weighted centroidal Voronoi tessellations [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(6): 1241-1247.
- [9] ACHANTA R, SHAJI A, SMITH K, et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(11): 2274-2281.
- [10] HOU X, HAREL J, KOCH C. Image signature: highlighting sparse salient regions [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(1): 194-201.
- [11] MARTIN D, FOWLKES C, TAL D, et al. A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics [C]//Proceedings of Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 416-423.
- [12] SHOTTON J, WINN J, ROTHER C, et al. Text on boost for image understanding: multi-class object recognition and segmentation by jointly modeling texture, layout, and context [J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(1): 2-23.
- [13] GOULD S, RODGERS J, COHEN D, et al. Multi-class segmentation with relative location prior [J]. International Journal of Computer Vision, 2008, 80(3): 300-316.
- (编辑 赵炜)