

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.09.006

基于 ADAMS 的滚滑轴承摩擦力矩研究*

卢黎明, 李 夫, 李中豪

(华东交通大学 机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对在高速、重载的情况下轴承摩擦力矩较大, 极易发热和磨损, 导致使用寿命大大降低的问题, 基于轴承摩擦力矩测量原理建立了滚滑轴承的摩擦力矩数学模型, 并以此为基础利用 ADAMS 软件建立了滚滑轴承的动力学仿真模型。考虑到摩擦力矩数值的波动性, 对变化规律进行了分析, 并给出了滚滑轴承启动摩擦力矩和动摩擦力矩在仿真试验中的提取方法; 研究了不同径向载荷、转速、滚子与滑块之间的间隙和径向游隙对摩擦力矩的影响; 借助 SKF 轴承摩擦力矩计算器, 验证了仿真模型的正确性。研究结果表明: 4 种不同工况结构参数对滚滑轴承启动摩擦力矩和动摩擦力矩都有一定影响, 该结果可为滚滑轴承降低摩擦力矩设计提供参考依据。

关键词:滚滑轴承; 摩擦力矩; ADAMS; 动力学

中图分类号: TH133.3; TH113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2020)09-1026-06

Friction torque for roller-sliding bearing based on ADAMS

LU Li-ming, LI Fu, LI Zhong-hao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiao Tong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Aiming at the problem that the friction torque of the bearing was large, very easy to heat and be worn down, resulting in a greatly reduced service life in the case of high speed and heavy load, based on the principle of bearing friction torque measurement, the friction torque mathematical model of roller-sliding bearing was established. Based on this, the dynamic simulation model of roller bearing was established by using ADAMS software. Considering the fluctuation of friction torque, the variation law was analyzed and the extraction method of starting friction torque and dynamic friction torque of roller-sliding bearing was given. The effects of radial load, speed, clearance between roller and slider and radial clearance on friction torque were studied. The correctness of the simulation model was verified by SKF bearing friction torque calculator. The results indicate that the structural parameters of four different working conditions have a certain influence on the starting friction torque and the dynamic friction torque of the roller bearing, providing a reference for the design of reducing friction torque of the roller bearing.

Key words: rolling-sliding bearing; friction torque; ADAMS; dynamics

0 引 言

滚滑轴承是一种由内圈、外圈、圆柱滚子和滑块组成的新型轴承。该轴承具有承受循环载荷冲击、振动能力强及拆卸方便的优点, 而且能有效降低圆柱滚子的接触应力, 以及具有良好的散热性能, 可以大大延长圆柱滚子的使用寿命^[1-2]。

自从 1945 年 PALMGREN^[3] 提出了较为准确的轴承摩擦力矩计算公式以来, 研究人员即以此为基础对其进行了大量的研究。TODD 等^[4] 研究了角接触球轴承沟曲率半径系数对摩擦力矩的影响, 并且进行了试验验证; 邓四二等^[5] 基于轴承动力学理论, 建立了推力球轴承动力学模型和摩擦力矩数学模型, 得出了不同工况和结构对轴承摩擦力矩的影响; 朱春熙等^[6] 基

收稿日期: 2019-11-30

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(2016BAB206155)

作者简介: 卢黎明(1963-), 男, 江西高安人, 教授, 研究生导师, 主要从事轴承动力学方面的研究。E-mail: luliming@ecjtu.jx.cn

于 ANSYS 软件,求出了负游隙转盘轴承的启动摩擦力矩数值,并且用试验进行了验证;莫易敏等^[7]以轮毂轴承为研究对象,对摩擦力矩的影响因素进行了分析,且采用轮毂轴承摩擦力矩试验机,测出了不同状态下的摩擦力矩;张占立等^[8]建立了 YRT 转台轴承在轴向载荷、径向载荷和倾覆力矩共同作用下的摩擦力矩平衡方程,且通过试验分析了不同工况和机构参数对摩擦力矩的影响;于东等^[9]基于达朗贝尔原理的拟静力学模型,给出了更准确的基于纯滚动线位置的摩擦力矩计算公式;邢化友等^[10]采用单摆原理径向加载的方式,基于能量守恒定律得出了轴承摩擦力矩与摆角的关系式;张辛等^[11]基于力矩平衡的测量原理,采用测量仪测出了超越离合器轴承的动摩擦力矩。

迄今为止,关于轴承摩擦力矩的研究已取得较好的进展,但基本上都是针对滚子轴承和球轴承的摩擦力矩进行的研究,很少对它们的启动摩擦力矩和动摩擦力矩进行对比分析。

鉴于此,基于轴承动力学理论和摩擦理论,笔者采用 ADAMS 软件对滚滑轴承的摩擦力矩进行仿真分析,分析不同结构参数和工况条件对滚滑轴承动摩擦力矩的影响,为探索一种滚滑轴承低摩擦力矩的控制方法奠定基础。

1 轴承摩擦力矩计算理论

1.1 滚动轴承摩擦力矩测量方法

启动摩擦力矩测量原理:当轴承一套圈相对于另一固定的套圈启动,并维持转到规定的弧度,测到的摩擦力矩即为启动摩擦力矩。

转动力矩(动摩擦力矩)测量原理:在规定的载荷条件下,轴承以固定转速旋转,在规定时间段内得到的摩擦力矩即为转动力矩。

1.2 滚滑轴承摩擦力矩数学模型

根据轴承摩擦力矩曲线图,选取轴承速度达到稳定值的一段时间,对这段时间内的摩擦力矩求均值,该值即为动摩擦力矩。

根据动力学理论,可得到内圈上力矩的数学模型为:

$$M_q = M_l + M_p \quad (1)$$

$$M_l = M_g + M_h + M_0 \quad (2)$$

式中: M_q —驱动轴给内圈的驱动力矩; M_l —内圈的摩擦力矩; M_g —滚子阻碍内圈运动的摩擦力矩; M_h —滑块阻碍内圈运动的摩擦力矩; M_p —内圈的惯性力矩; M_0 —其他因素引起的摩擦力矩。

1.3 SKF 滚动轴承摩擦力矩数学模型

在 SKF 滚动轴承摩擦力矩数学模型中,认为摩擦力矩主要是由 M_r 、 M_{sl} 、 M_m 和 M_z 构成的^[12],其计算公式为:

$$M = M_r + M_{sl} + M_m + M_z \quad (3)$$

式中: M_r —滚动摩擦力矩; M_{sl} —滑动摩擦力矩; M_m —密封件的摩擦力矩; M_z —其他因素产生的摩擦力矩。

2 滚滑轴承动力学模型

2.1 三维模型

参照 NU2214 型圆柱滚子轴承,笔者对滚滑轴承进行三维建模,假定径向游隙为 0,并且忽略档边。

具体的几何参数如表 1 所示。

表 1 滚滑轴承的几何参数

参数	数值
轴承内径/mm	70
轴承外径/mm	125
轴承宽度/mm	31
内圈滚道直径/mm	83.5
外圈滚道直径/mm	111.5
滚子直径/mm	14
滚子长度/mm	31
滚子个数	14
滑块外圆弧半径/mm	47.5
滑块内圆弧半径/mm	55.5

2.2 材料属性与约束设置

材料选择:将轴承零件定义为线弹性材料,全部选择渗碳轴承钢 G20CrNi2Mo,密度为 7.8 g/cm³,弹性模量为 213 000 MPa,泊松比为 0.3。

约束设置:笔者根据滚滑轴承实际工作情况,对外圈施加固定约束,限制内圈轴向位移,并对内圈施加绕轴线的转速 3 000 r/min;其中,匀加速时间为 0.01 s,匀速转动 0.09 s,总旋转时间为 0.1 s。

在滚子与滑块之间、滚子与内外圈、滑块与内外圈分别建立体接触,并且约束滚子与滑块的轴向位移。

2.3 接触碰撞力学模型的创建

在 ADAMS 中,一共有两种模型可以设置接触碰撞,一种是 Impact 冲击函数模型,该模型基于 Hertz 理论;另一种是 restitution 函数泊松模型。

笔者选用 Impact 冲击函数模型来模拟接触;摩擦力采用库仑法来进行计算,根据两接触物体的相对滑移速度不一样,静摩擦会逐渐转化为动摩擦。

摩擦系数随相对滑移速度的变化曲线如图 1 所示。

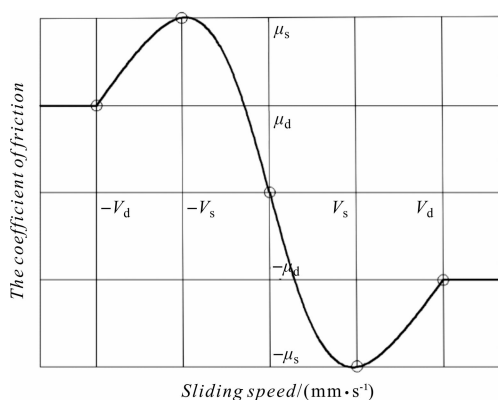


图 1 摩擦系数与滑移速度关系曲线图

摩擦系数的表达式为:

$$\mu = \begin{cases} 0 & v = 0 \\ -\mu_d & v = v_d \\ -\mu_s & v = v_s \\ \mu_d & v = -v_d \\ \mu_s & v = -v_s \\ -\text{sign}(v) \cdot \mu_d & |v| > v_d \\ -\text{step}(|v|, v_d, \mu_d, v_s, \mu_s) \cdot \text{sign}(v) & v_d > |v| > v_s \\ \text{step}(v, -v_s, \mu_s, v_s, -\mu_s) & -v_s < v < v_s \end{cases} \quad (4)$$

式中: v_s —静摩擦转换速度; v_d —动摩擦转换速度; μ_s —最大静摩擦系数; μ_d —动摩擦系数。

在 ADAMS 中,笔者设置静摩擦系数为 0.1,动摩擦系数为 0.05,静摩擦转换速度为 100 mm/s,动摩擦转换速度为 1 000 mm/s。

2.4 载荷的设置

为了尽可能模拟滚滑轴承工作中真实的受载情况,笔者在内圈上施加一个 Y 轴承受方向 30 kN 的载荷,即径向载荷,以保证内圈旋转时,内圈下表面始终受载;同时,给整个模型施加重力加速度 9.8 N/kg。

设置好的滚滑轴承动力学模型如图 2 所示。

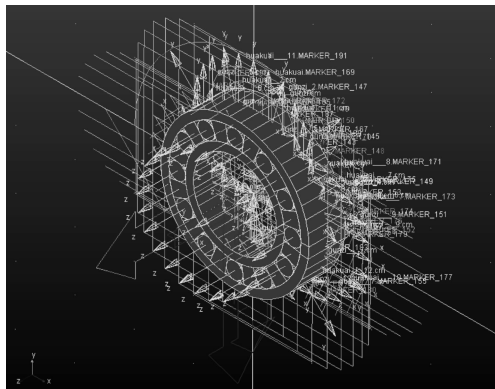


图 2 滚滑轴承动力学模型

3 仿真及结果分析

3.1 摩擦力矩分析

要进行摩擦力矩分析,首先要通过 ADAMS 后处理模块,在整个运动过程中,本研究提取滚滑轴承摩擦力矩曲线数据。

为了更清楚地显示摩擦力矩曲线图,笔者将曲线数据导入 MATLAB 中进行绘图。

摩擦力矩曲线图如图 3 所示。

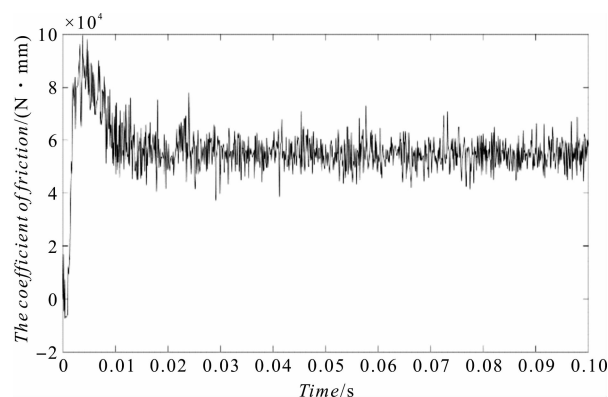


图 3 摩擦力矩曲线图

由图 3 可知:随着内圈转速的不断增加,滚滑轴承在启动阶段(0 ~ 0.01 s),摩擦力矩值越来越大,在 0.003 8 s 时达到最大值 99 734.48 N·mm,随后摩擦力矩值不断减小,当转速达到稳定值之后,摩擦力矩在一个稳定值上下波动。

根据文献[13-14]可知,当轴承从静止开始启动,随着轴承内圈转速的不断提升,静摩擦力逐渐转化为动摩擦力。在此过程中,必然存在一个最大摩擦力,即最大静摩擦力。同样,对应存在一个最大摩擦力矩,即启动摩擦力矩。笔者将轴承启动加速过程中最大摩擦力矩定义为启动摩擦力矩,在轴承转速达到稳定值后,取摩擦力矩较稳定的一端时间为动摩擦力矩的测量时间段,并求出该时间段摩擦力矩的平均值作为动摩擦力矩。

选取运行平稳数据的平均值作为动摩擦力矩,本文选取 0.06 s ~ 0.1 s 时间段内所有摩擦力矩数据来求平均值,求得动摩擦力矩值为 54 571.02 N·mm。

选取启动加速过程中,最大摩擦力矩值为启动摩擦力矩,即 99 734.48 N·mm。下文启动摩擦力矩与动摩擦力矩数值的提取同理。

3.2 径向载荷对滚滑轴承摩擦力矩的影响

径向载荷对轴承的摩擦特性有很大的影响,包括轴承的噪声,旋转精度以及整体应力分布。笔者分别

选取径向载荷 $Fr = 10\text{ kN}$ 、 20 kN 、 30 kN 、 40 kN ，转速为 $3\ 000\text{ r/min}$ ，滚子与滑块之间的间隙为 0 ，径向游隙为 0 ，研究不同径向载荷对轴承摩擦力矩的影响。

启动摩擦力矩和动摩擦力矩具体数值如表 2 所示。

表 2 启动摩擦力矩和动摩擦力矩具体数值

径向载荷 /kN	启动摩擦力矩 /(N·mm)	动摩擦力矩 /(N·mm)
10	34 475.46	21 684.20
20	74 044.76	38 782.46
30	99 734.48	54 571.02
40	151 055.70	70 735.93

不同载荷下滚滑轴承摩擦力矩曲线如图 4 所示。

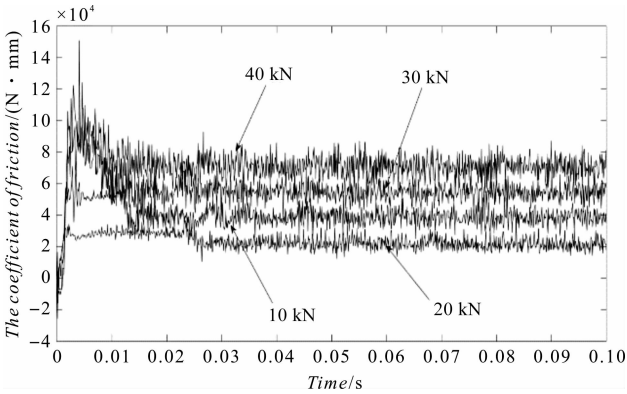


图 4 不同径向载荷下摩擦力矩曲线图

由表 2 和图 4 可知：随着径向载荷的增加，启动摩擦力矩和动摩擦力矩都随之增加。这表明径向载荷对摩擦力矩的影响很大。

3.3 转速对轴承摩擦力矩的影响

转速对轴承的摩擦特性也有一定的影响，转速过快，滚子和滑块的离心力变大，可能使滚子产生滑动，导致摩擦力矩变大，温度过高，磨损加剧，破坏轴承的稳定性。

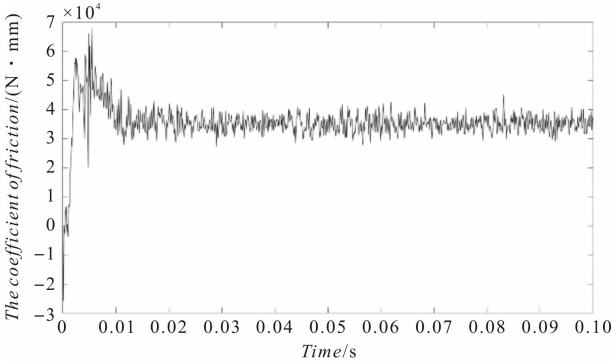
笔者分别选取内圈转速为 $1\ 500\text{ r/min}$ 、 $2\ 200\text{ r/min}$ 、 $3\ 000\text{ r/min}$ ，径向载荷都为 20 kN ，滚子与滑块之间的间隙为 0 ，径向游隙为 0 ，研究不同转速对轴承摩擦力矩的影响。

启动摩擦力矩和动摩擦力矩具体数值如表 3 所示。

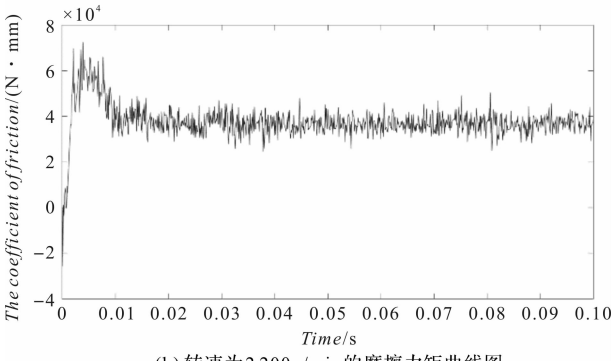
表 3 启动摩擦力矩和动摩擦力矩具体数值

转速 /(r·min ⁻¹)	启动摩擦力 /(N·mm)	动摩擦力矩 /(N·mm)
1 500	68 048.15	35 176.34
2 200	72 516.52	36 775.41
3 000	74 044.76	38 782.46

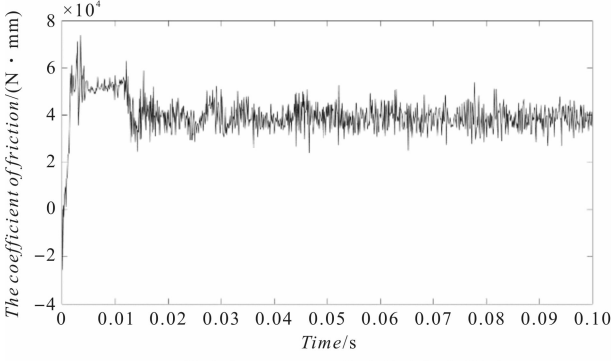
不同转速下轴承摩擦力矩曲线如图 5 所示。



(a) 转速为 $1\ 500\text{ r/min}$ 的摩擦力矩曲线图



(b) 转速为 $2\ 200\text{ r/min}$ 的摩擦力矩曲线图



(c) 转速为 $3\ 000\text{ r/min}$ 的摩擦力矩曲线图

图 5 不同转速下摩擦力矩曲线图

由表 3 和图 5 可知：随着转速的增加，启动摩擦力矩和动摩擦力矩都随之增加，但变化幅度不大。

3.4 滚子与滑块之间的间隙对轴承摩擦力矩的影响

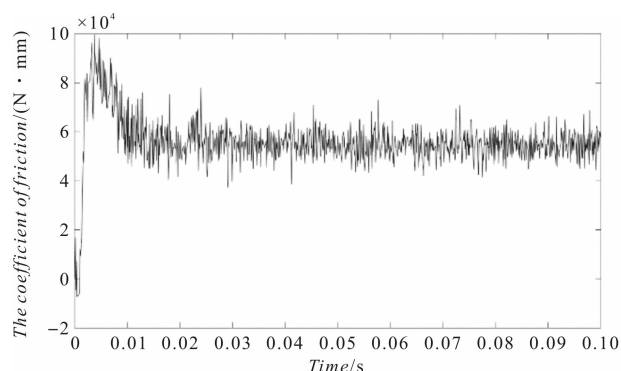
滚滑轴承工作主要是通过内圈带动滚子，然后滚子推动滑块来实现整个运动过程。因此，滚子和滑块之间的间隙也是一个影响轴承摩擦力矩的重要因素。考虑间隙分别为 0 、 0.05 mm 、 0.1 mm 这 3 种情况，径向载荷为 30 kN ，转速为 $3\ 000\text{ r/min}$ ，径向游隙为 0 。

启动摩擦力矩和动摩擦力矩具体数值如表 4 所示。

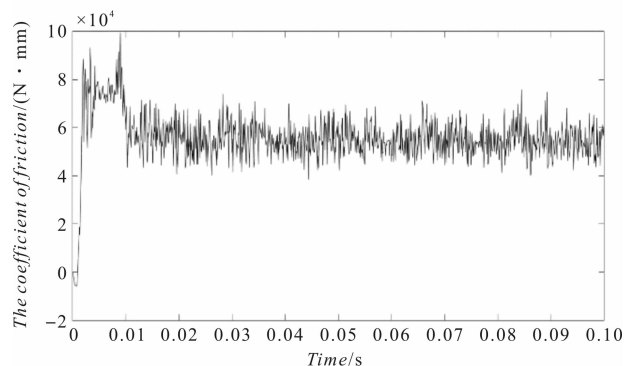
表 4 启动摩擦力矩和动摩擦力矩具体数值

间隙/mm	启动摩擦力矩/(N·mm)	动摩擦力矩/(N·mm)
0	99 734.48	54 571.02
0.05	99 593.81	54 562.45
0.1	99 517.74	54 264.37

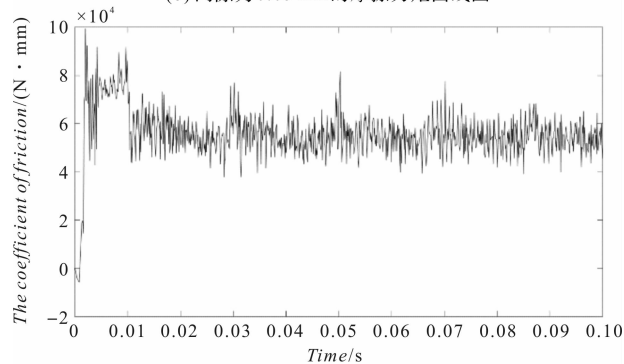
不同间隙下的摩擦力矩曲线如图 6 所示。



(a) 间隙为 0 的摩擦力矩曲线图



(b) 间隙为 0.05 mm 的摩擦力矩曲线图



(c) 间隙为 0.10 mm 的摩擦力矩曲线图

图 6 不同间隙下摩擦力矩曲线图

由表 4 和图 6 可知:随着滚子与滑块之间间隙的增大,启动摩擦力矩和动摩擦力矩都随之减小,这是因为间隙增大后,滚子滚动空间大,对滑块可以造成一定的冲击,更轻松地推动滑块;但是随着间隙的增大,启动阶段摩擦力矩变化很不规律,说明出现了复杂的接触状态,存在着明显的瞬时冲击力现象,破坏了轴承的运动稳定性。

3.5 径向游隙对轴承摩擦力矩的影响

径向游隙对轴承的动态性能和寿命都有很大的影响。一定的径向游隙可以保证轴承运转灵活,阻碍小,但是过大的游隙会降低轴承工作的稳定性,因此,研究径向游隙对滚滑轴承摩擦力矩的影响很有必要。

笔者分别选取径向游隙为 0、0.1 mm、0.2 mm,径

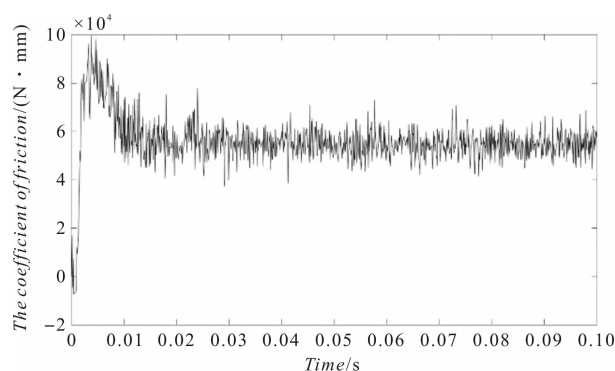
向载荷为 30 kN,转速为 3 000 r/min,滚子与滑块之间的间隙为 0,研究不同径向游隙对滚滑轴承摩擦力矩的影响。

启动摩擦力矩和动摩擦力矩具体数值如表 5 所示。

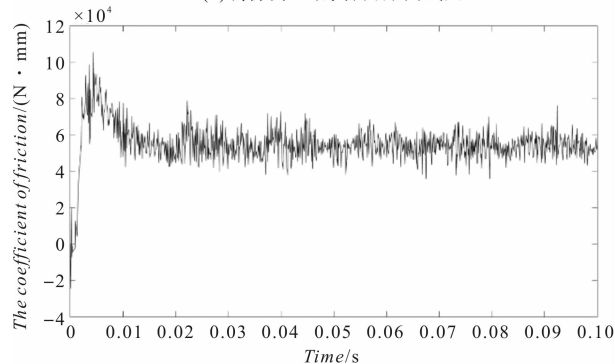
表 5 启动摩擦力矩和动摩擦力矩具体数值

径向游隙 /mm	启动摩擦力矩 /(N · mm)	动摩擦力矩 /(N · mm)
0	99 734.48	54 571.02
0.1	105 712.08	53 861.45
0.2	119 715.76	52 993.53

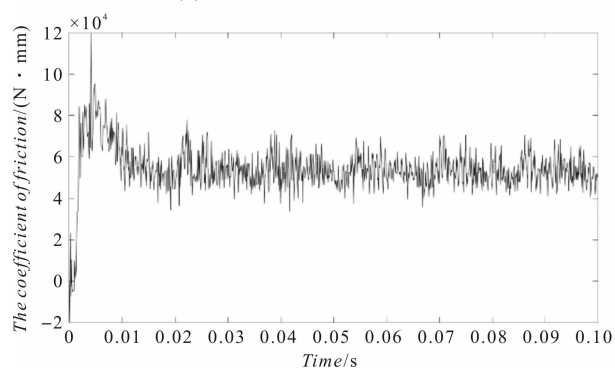
不同径向游隙下的摩擦力矩曲线图如图 7 所示。



(a) 游隙为 0 的摩擦力矩曲线图



(b) 游隙为 0.1 mm 的摩擦力矩曲线图



(c) 游隙为 0.2 mm 的摩擦力矩曲线图

图 7 不同径向游隙下摩擦力矩曲线图

由表 5 和图 7 可知:随着径向游隙的增大,启动摩擦力矩随之增大,动摩擦力矩随之减小,径向游隙为 0.2 mm 的滚滑轴承在启动阶段摩擦力矩曲线图上出

现了很明显的尖点。这说明径向游隙过大,轴承在启动阶段振动程度很大,转动不平稳,摩擦力矩值出现瞬时突变。

4 动力学模型的验证

为了验证滚滑轴承动力学模型的正确性,笔者对 NU2214 圆柱滚子轴承设置类似的动力学条件,即:工作转速为 3 000 r/min;径向载荷 30 kN;静摩擦系数 0.01,动摩擦系数 0.001。

将仿真得到的动摩擦力矩结果与 SKF 轴承摩擦力矩计算器得到的理论值进行对比,结果如表 6 所示。

表 6 理论值与仿真值对比

	理论值/(N·mm)	仿真值/(N·mm)	误差/(%)
动摩擦力矩	1 084.1	1 009.2	6.9

由表 6 可知:

(1)理论值高于仿真的结果,这是因为仿真很难做到和理论计算一样全面考虑,忽略了一些其他因素,比如润滑和密封对轴承摩擦力矩的影响;

(2)两者之间的误差只有 6.9%,误差比较小,说明滚滑轴承的动力学模型是有效的。

5 结束语

采用 ADAMS 软件,笔者建立了滚滑轴承的动力学模型,分析了不同工况和结构对轴承摩擦力矩的影响,为滚滑轴承的设计提供了参考。

主要结论如下:

(1)滚滑轴承的启动摩擦力矩明显大于动摩擦力矩;

(2)径向载荷、内圈转速、滚子与滑块之间的间隙、径向游隙对滚滑轴承的启动摩擦力矩和动摩擦力矩均有一定影响,其中,影响程度最大的是径向载荷;

(3)滚滑轴承的启动摩擦力矩和动摩擦力矩均随径向载荷和转速的增大而增大,随滚子滑块之间间隙的增大而减小;启动摩擦力矩随径向游隙的增大而增大,动摩擦力矩随径向游隙的增大而减小。滚子与滑

块之间的间隙、径向游隙过大会导致轴承启动过程不稳定,振动大。

参考文献 (References):

- [1] 卢黎明,谷开,唐俊涛,等.高速重载滚滑轴承动态有限元对比分析[J].组合机床与自动化加工技术,2019(7):26-29,33.
- [2] 卢黎明,余云云,曾国文,等.基于 ABAQUS 的滚滑轴承静力学分析[J].现代制造工程,2018(8):92-97.
- [3] PALMGREN A. Ball and roller bearing engineering [M]. Burbank: Philadelphia, 1959.
- [4] TODD M J, STEVENS K T. Frictional torque of angular contact ball bearings with different conformities, ESA-CR (P)-1221 [R]. Risley: National Center of Tribology, European Space Tribology Lab, 1978.
- [5] 邓四二,贾永川.推力球轴承摩擦力矩特性研究[J].兵工学报,2015,36(9):1615-1623.
- [6] 朱春熙,李妙玲,宗春丽.大型负游隙转盘轴承启动摩擦力矩的研究[J].煤矿机械,2017,38(1):18-20.
- [7] 莫易敏,徐亚平,向科鹏,等.轮毂轴承摩擦力矩的影响因素分析及其优化研究[J].机械设计与制造,2019(9):108-111.
- [8] 张占立,周鹏举,李文博,等.YRT 转台轴承摩擦力矩特性研究[J].兵工学报,2019,40(7):1495-1502.
- [9] 于东,张进华,王东峰,等.RV 减速器主轴承摩擦力矩理论计算及特性分析[J].浙江大学学报:工学版,2017,51(10):1928-1936,1947.
- [10] 邢化友,孙瑞峰,田景志,等.基于阻尼振动的轴承摩擦力矩测量方法[J].装备制造技术,2018(10):173-176.
- [11] 张辛,高奋武,孔志营.超越离合器轴承动态摩擦力矩测量仪[J].装备制造技术,2016(4):80-83.
- [12] 郭惠俊.SKF 轴承综合型录[M].上海:上海科学技术出版社,1994.
- [13] 曾祥春.滚动轴承摩擦力矩测量方法研究与实现[D].武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2015.
- [14] 杜兆飞.径向载荷下滚动轴承摩擦力矩测量技术研究[D].武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2017.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

卢黎明,李夫,李中豪.基于 ADAMS 的滚滑轴承摩擦力矩研究[J].机电工程,2020,37(9):1026-1031.

LU Li-ming, LI Fu, LI Zhong-hao. Friction torque for roller-sliding bearing based on ADAMS[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(9):1026-1031.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>