

机体杆端轴承-密封单元动力学仿真平台开发^{*}

张 帅^{1,2}, 杜学芳¹, 张 涛¹, 周守虎², 王 伟¹

(1. 河南工学院 机械工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 浙江兆丰机电股份有限公司, 浙江 杭州 311232)

摘要: 机体杆端轴承对飞机的安全飞行起着重要的作用, 开展机体杆端轴承-密封单元的动力学特性研究, 对提高轴承的工作性能和使用寿命, 降低轴承的故障率, 提升飞行安全系数具有重要作用。基于 FORTRAN 语言对 ADAMS 软件进行二次开发, 建立机体杆端轴承-密封单元动力学仿真平台, 开展机体杆端轴承摩擦力矩特性研究。研究表明: 机体杆端轴承摩擦力矩随内圈沟曲率半径的增大而减小, 外圈沟曲率半径和钢球直径对摩擦力矩影响不大。动力学仿真平台的开发可为机体杆端轴承-密封单元的设计和應用提供参考。

关键词: 机体杆端轴承; 摩擦力矩; ADAMS; 动力学

中图分类号: TH133.33

文献标识码: A

文章编号: 2096-7772(2023)05-0001-04

0 引言

机体杆端轴承广泛应用于飞机操作机构中, 对飞机安全飞行起着重要的作用^[1]。机体杆端轴承为带密封单元的双列调心球轴承, 两列钢球交错排列, 做往复摆动, 钢球与钢球、钢球与轴承套圈间的作用力复杂多变, 容易导致钢球卡死, 造成轴承失效, 影响飞机操作的安全性。此外, 密封圈和轴承套圈摩擦生热, 导致轴承腔内温度升高, 润滑脂的润滑特性改变, 影响轴承的动力学特性和使用寿命。因此, 开展机体杆端轴承-密封单元的动力学特性研究, 可提高轴承的工作性能和使用寿命, 降低轴承的故障率, 提升飞行安全系数。

轴承摩擦力矩的大小和波动性直接影响转子-轴承系统的定向和定位精度、寿命以及主机的安全^[2]。邓四二等建立了双列调心滚子轴承^[3]、双列圆锥滚子轴承^[4]、陀螺角接触球轴承^[5]和圆柱滚子轴承^[6]的摩擦力矩模型, 分析了不同工况、结构及工艺对摩擦力矩的影响。张占立^[7]建立了 YRT 转台轴承摩擦力矩模型, 分析了轴向游隙和滚子修形对摩擦力矩特性的影响。崔宇飞等^[8]建立了六自由度控制力矩陀螺轴承组件非线性动力学微分方程组, 分析了公-自转工况、有/无重力的工况、轴承预紧力

以及保持架兜孔间隙对轴承摩擦力矩及其波动性的影响。

现有文献鲜见机体杆端轴承动力学方面的研究, 本文基于机体杆端轴承的运动和受力分析, 开发机体杆端轴承-密封单元的动力学仿真平台, 开展摩擦力矩特性研究, 为机体杆端轴承-密封单元的设计和優化提供参考。

1 机体杆端轴承-密封单元动力学模型

1.1 机体杆端轴承

机体杆端轴承是轴承与操作杆复合的一种新型轴承, 由外圈、内圈、钢球和密封单元组成(如图 1 所示), 两列钢球交错排列。



图 1 机体杆端轴承组成

^{*} 收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(232102220042); 河南省高校重点科研项目(23B430015)

第一作者简介: 张帅(1980—), 男, 河南南阳人, 讲师, 博士, 主要从事润滑与密封研究。

1.2 机杆端轴承摩擦力矩分析

机杆端轴承为满装双列调心球轴承,因此主要考虑滚动体与滚道弹性滞后引起的摩擦、差动滑动引起的摩擦、润滑脂的粘性摩擦和密封圈的滑动摩擦。

1.2.1 材料弹性滞后引起的摩擦力矩

$$M_E = \frac{D_{PW}}{4} (1 - \gamma^2) \left(\sum_{j=1}^Z q_e + \sum_{j=1}^Z q_i \right) U \quad (1)$$

式中, U 为材料弹性滞后系数; D_{PW} 为滚动体中心直径; γ 为无量纲几何参数; q 为钢球与滚道间法向方向接触负荷; Z 为钢球个数; 下标 i 、 e 和 b 分别表示轴承内、外圈和钢球(下同)。

1.2.2 钢球与套圈差动滑动引起的摩擦力矩

$$M_D = \frac{D_{PW}}{4D_W} (1 - \gamma^2) \left(\sum_{j=1}^Z M_{D_i} + \sum_{j=1}^Z M_{D_e} \right) f_s \quad (2)$$

$$M_{D_{i(e)}} = 0.04025 \frac{u_{i(e)}}{\nu_{i(e)}} \left(\frac{3E'}{8 \sum \rho_{i(e)j}} \right)^{\frac{2}{3}} Q_{i(e)j}^{\frac{5}{3}} \quad (3)$$

$$\nu_{i(e)} = \frac{f_{i(e)} D_W}{0.5 + f_{i(e)}} \quad (4)$$

式中, f_s 为钢球与滚道间接摩擦因数; $\sum \rho$ 为主曲率和; $E' = \frac{4(1 - g_{i(e)}^2)}{E_b} + \frac{4(1 - g_{i(e)}^2)}{E_{i(e)}}$, E 为弹性模量, g 为泊松比; f 为沟曲率系数; $Q_{i(e)j}$ 为第 j 个钢球与滚道间法向方向接触负荷。

1.2.3 润滑脂黏性引起的摩擦力矩

$$M_{oil} = 6.53 \alpha_{oil}^{-1} S \left(\frac{D_{PW}}{2} \right) \sum_{j=1}^Z \left[\left(\frac{H_i + H_e}{2} \right) (a_{ij} + a_{ej}) \right] \quad (5)$$

式中, α_{oil} 为润滑脂基础油黏压系数; S 为润滑充分系数; H 为油膜厚度; $a_{i(e)j}$ 为第 j 个钢球与内(外)滚道接触椭圆长轴。

1.2.4 密封圈的滑动摩擦力矩

$$f_{seal} = \varphi(\eta u b / G)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

根据文献[9], $\phi = 0.111$, η 为润滑剂动力粘度; u 为轴表面速度, $u = n\pi D/60$; n 为旋转轴转速; D 为密封件接触处内圈的直径; b 为密封圈接触宽度; G 为抱轴力。

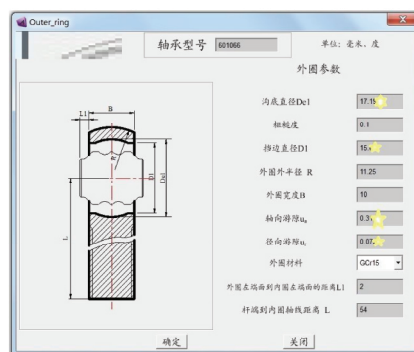
2 机杆端轴承-密封单元动力学仿真平台开发

基于 FORTRAN 语言对 ADAMS 软件进行二次开发[10],可自动生成所需要的动力学分析模型,避免重复性或复杂的工作,提高工作效率。

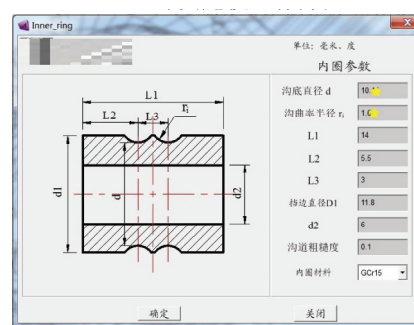
2.1 动力学平台前处理模块

机杆端轴承-密封单元动力学仿真平台前处

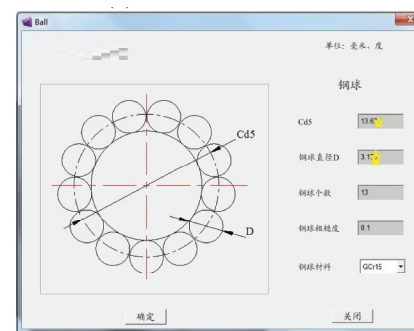
理模块主要包括外圈、内圈、钢球和润滑条件等建模工作界面,如图 2 所示。



(a) 外圈建模工作界面



(b) 内圈建模工作界面



(c) 钢球建模工作界面

图 2 前处理模块

2.2 动力学仿真平台后处理模块

图 3 为后处理模块,可查看输出分析结果。如套圈与钢球的作用力、钢球的动态特性、接触及润滑的结果、旋滚比、基本额定动(静)负荷等。

3 摩擦力矩特性研究

分析条件:径向载荷为 500N,轴向载荷为 0 N,内圈沟曲率半径 1.625 mm,钢球直径 3.165 mm,外圈沟曲率半径 8.59 mm,摆动幅值 45°,摆动频率为 10 Hz。

3.1 内圈沟曲率半径对摩擦力矩的影响

图 4 为内圈沟曲率半径对摩擦力矩的影响。摩



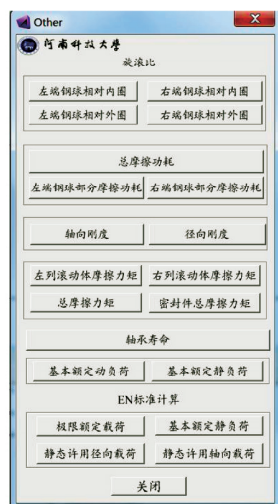
(a) 套圈与钢球的作用力后处理界面



(b) 钢球动态特性后处理界面



(c) 接触及润滑特性后处理界面

(d) 其他后处理界面
图3 后处理模块

摩擦力矩随内圈沟曲率半径的增大而减小。随着内圈沟曲率半径的增大,钢球与内圈间的密合度减小,因此由差动滑动引起的摩擦减小,摩擦力矩减小。

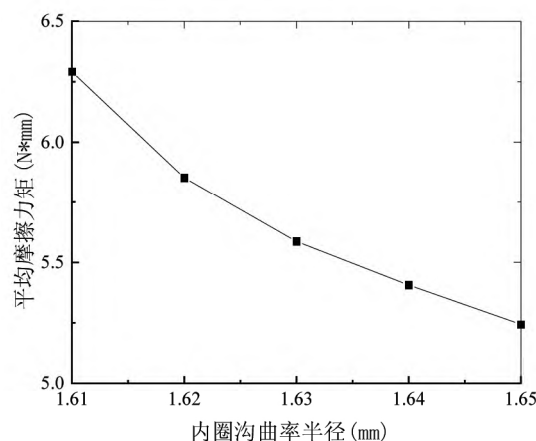


图4 内圈沟曲率半径对摩擦力矩的影响

3.2 外圈沟曲率半径对摩擦力矩的影响

图5为外圈沟曲率半径对摩擦力矩的影响。摩擦力矩随外圈沟曲率半径的增加而增加,但幅值变化不大,因此外圈沟曲率半径的变化对轴承摩擦力矩的影响较小。

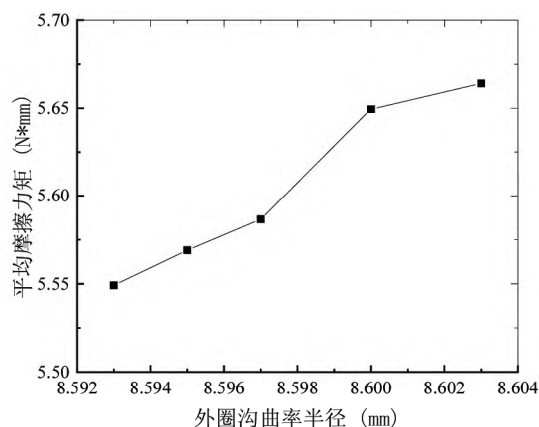


图5 外圈沟曲率半径对摩擦力矩的影响

3.3 钢球直径对摩擦力矩的影响

图6为钢球直径对摩擦力矩的影响。轴承摩擦力矩随着钢球直径的增大,摩擦力矩变化不大,因此钢球直径对轴承摩擦力矩的影响较小。

4 结论

基于 FORTRAN 语言对 ADAMS 软件进行二次开发,建立机体杆端轴承-密封单元动力学仿真平台,开展机体杆端轴承摩擦力矩特性研究。研究结果表明:轴承摩擦力矩随内圈沟曲率半径的增大而减小;外圈沟曲率半径和钢球直径对摩擦力矩影响不大。

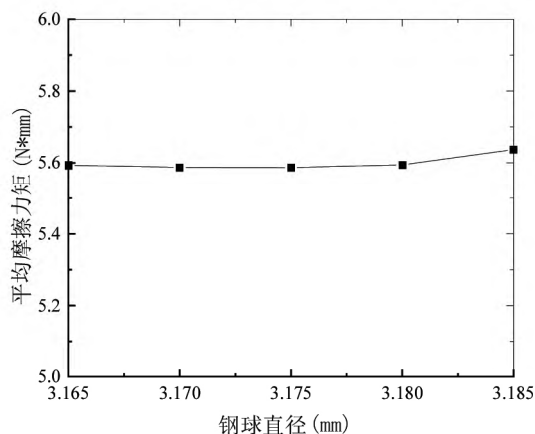


图 6 钢球直径对摩擦力矩的影响

机体杆端轴承-密封单元动力学仿真平台的开发,为机体杆端轴承-密封单元的设计和 optimization 提供了研究平台。

(责任编辑 吕春红)

参考文献:

- [1] 张帅, 杜学芳, 胡忠会, 等. 机体杆端轴承油封磨损特性分析 [J]. 轴承, 2022, 509(4): 15-23.

- [2] 邓四二, 李兴林, 汪久根, 等. 角接触球轴承摩擦力矩特性研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(5): 114-120.
- [3] 邓四二, 胡广存, 董晓. 双列圆锥滚子轴承功耗特性研究 [J]. 兵工学报, 2014, 35(11): 1898-1907.
- [4] 邓四二, 盛明杰, 邓凯文, 等. 双列调心滚子轴承摩擦力矩的特性 [J]. 航空动力学报, 2017, 32(7): 1666-1675.
- [5] 邓四二, 华显伟, 张文虎. 陀螺角接触球轴承摩擦力矩波动性分析 [J]. 航空动力学报, 2018, 33(7): 1713-1724.
- [6] 邓四二, 胡余生, 孙玉飞, 等. 空调滑片式压缩机用圆柱滚子轴承摩擦功耗特性分析 [J]. 兵工学报, 2019, 40(9): 1943-1952.
- [7] 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.
- [8] 崔宇飞, 邓四二, 邓凯文, 等. 控制力矩陀螺轴承组件摩擦力矩特性研究 [J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46(5): 73-80.
- [9] 赵良举, 赵向雷, 杜长春, 等. 橡胶油封唇口温度及其对润滑失效影响 [J]. 机械科学与技术, 2014, 33(6): 840-844.
- [10] 陈峰华. ADAMS2018 虚拟样机技术从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.

Development of Dynamic Simulation Platform for Airframe-rod-end Bearing and Sealing Unit

ZHANG Shuai^{1,2}, DU Xuefang¹, ZHANG Tao¹, ZHOU Shouhu², WANG Wei¹

(1. Department of Mechatronics Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2. Zhejiang Zhaofeng Mechanical and Electronic Co., Ltd, Hangzhou 311232, China)

Abstract: Airframe-rod-end bearing plays an important role in the safe flight of the aircraft. Study on the dynamic characteristics of airframe-rod-end bearing and sealing unit plays an important role in improving the working performance and service life of bearings, reducing the failure rate of bearings, and improving the safety factor of the aircraft. The second development of ADAMS was carried out based on FORTRAN. The dynamic simulation model of airframe-rod-end bearing and sealing unit was established, and the simulation study of the friction torque characteristics was carried out. The result showed that the friction torque decreased with the increase of the curvature radius of the inner ring groove, and the curvature radius of the outer ring groove and the diameter of the steel ball had little effect on the friction torque. The development of the dynamic simulation platform provided a reference for the design and application of airframe-rod-end bearing and sealing unit.

Key words: airframe-rod-end bearing; friction torque; ADAMS; dynamics