

# 铁道车辆滚动轴承外圈故障数值模拟与实验\*

廖英英<sup>1,2</sup>, 刘永强<sup>2,3</sup>, 杨绍普<sup>2,3</sup>, 梁 帅<sup>3</sup>

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043) (2. 河北省交通安全与控制重点实验室 石家庄, 050043)  
(3. 石家庄铁道大学机械工程学院 石家庄, 050043)

**摘要** 提出了一种故障轴承的三维建模方法, 并采用数值模拟和实验研究相结合的方法分析了 352226X2-2RZ 型双列圆锥滚子轴承在正常状态和外圈剥离故障状态时的故障特征频率。首先, 利用三维实体建模软件 Solidworks 建立了正常状态和外圈剥离故障状态的轴承模型; 然后, 将模型导入 ADAMS 中添加约束和驱动, 并对两种模型进行动力学仿真分析; 最后, 利用轮对跑合实验台对故障轴承进行试验测试分析, 试验结果与仿真结果十分吻合。研究结果证明了所提出的建模和仿真方法的正确性。

**关键词** 滚动轴承; 故障模拟; 多体动力学; 铁道车辆  
**中图分类号** U270.1; TH133

## 引 言

滚动轴承在实际中非常重要, 几乎所有的旋转机械都需要用到。国内外的专家学者针对滚动轴承研究非常多, 但由于它的结构复杂, 理论建模工作进展缓慢<sup>[1-3]</sup>。目前, 在大多数研究中, 针对滚动轴承的模型均进行了大量的简化, 这与实物存在较大的误差。近年来, 计算机技术的高速发展为滚动轴承的精细化建模提供了可能性。Tomoya 等<sup>[4]</sup>采用机械系统动力学自动分析 (automatic dynamic analysis of mechanical system, 简称 ADAMS) 研究了考虑保持架弹性变形的 6 自由度滚子轴承模型保持架压力和变形等对轴承动力学响应的影响。Sopanen 等<sup>[5-6]</sup>研究了轴承径向间隙对转子-轴承系统的固有频率和振动响应的影响。Sakaguchi 等<sup>[7]</sup>对单列圆锥滚子轴承进行了建模和动力学仿真分析, 并利用实验进行了验证。何芝仙等<sup>[8]</sup>研究了变载荷作用下轴-滚动轴承系统的动力学问题。朱利军等<sup>[9]</sup>利用 ADAMS 中的 Impack 函数对深沟球轴承进行了动力学分析, 并与理论结果进行了比较。李昌等<sup>[10]</sup>利用 ADAMS 参数化技术对轴承进行参数化建模, 分析了内圈跳度和随机误差对轴承动态特性的影响。

352226X2-2RZ 型 (旧型号为 197726) 轴承是铁路货运列车应用最广泛的轴承之一, 它是一种双列圆锥滚子轴承, 即可承受列车自重和货物的垂向加载, 还可以承受列车轮轨间横向作用力导致的横向加载力, 该轴承结构和受力都非常复杂。笔者拟采用三维实体建模和多体动力学方法建立双列圆锥滚子轴承的动力学模型, 模拟轴承外圈故障, 仿真分析轴承外圈故障对轴承振动特性的影响, 并结合轮对跑合实验台的实验数据对仿真结果进行验证, 以证明该建模和仿真方法的正确性。

## 1 滚动轴承的平衡方程

圆锥滚子轴承在外界载荷作用下, 在滚子和内滚道间会产生滚子端部和挡边载荷, 如图 1 所示。

为了便于分析, 将滚子和内外滚道接触区域划分为  $k$  个切片, 每个切片的宽度为  $\omega$ 。根据受力作用, 滚子的载荷平衡方程可表示为

$$\begin{cases} \omega \sum_{m=1}^2 c_m \cos \alpha_m \sum_{\lambda=1}^k q_{mj\lambda} - Q_{ij} \cos \alpha_f = 0 \\ \omega \sum_{m=1}^2 c_m \sin \alpha_m \sum_{\lambda=1}^k q_{mj\lambda} + Q_{ij} \sin \alpha_f = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $m=1$  为外圈滚道;  $m=2$  为内圈滚道;  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$

\* 国家重点基础研究发展计划 (“九七三” 计划) 资助项目 (2012CB723301); 国家自然科学基金资助项目 (11227201, 11202141, 11172182, 11302137); 铁道部重点资助项目 (2011J013-A); 河北省自然科学基金资助项目 (A2013210013); 河北省教育厅资助项目 (Z2011228)  
收稿日期: 2013-08-01; 修回日期: 2013-12-13

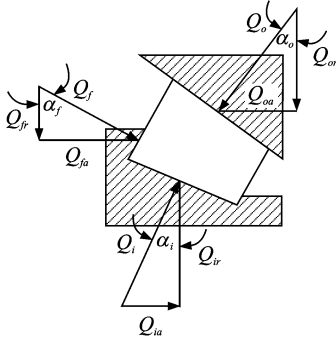


图 1 圆锥滚子轴承所加载荷示意图

Fig. 1 Diagram of tapered roller bearings load

为圆锥滚子与内外滚道间的接触角; \$q\$ 为单位长度的载荷; \$Q\_f\$ 为滚子端部与套圈挡边间的载荷; 其他参数如图 1 所示。

径向平面内滚子的力矩平衡方程为

$$\omega \sum_{m=1}^2 \sum_{\lambda=1}^k q_{mj\lambda} \left[ \lambda - \frac{1}{2}(k+1) \right] - R_f Q_{fj} = 0 \quad (2)$$

其中: \$R\_f\$ 为滚子轴线至端面与挡边接触处的半径。

与滚子歪斜相关的起动力和抵抗力矩平衡方程为

$$\frac{1}{2} l \mu Q_{fj} - \frac{\omega^3 \xi_j}{d_m + D} \sum_{m=1}^2 \sum_{\lambda=1}^k q_{mj\lambda} \cdot \left[ \lambda - \frac{1}{2}(k+1) \right]^2 q_{mj\lambda} = 0 \quad (3)$$

其中: \$l\$ 为滚子长度; \$\mu\$ 为滚子端面滑动摩擦因数; \$\xi\$ 为滚子歪斜角; \$d\_m\$ 为轴承节圆直径; \$D\$ 为滚子平均直径。

轴承内圈的力和力矩平衡方程为

$$\begin{cases} F_r - \omega \sum_{j=1}^Z \cos \psi_j \left[ \sum_{\lambda=1}^k q_{2j\lambda} \cos \alpha_2 - Q_{fj} \cos \alpha_f \right] = 0 \\ F_a - \omega \sum_{j=1}^Z \left[ \sum_{\lambda=1}^k q_{2j\lambda} \sin \alpha_2 - Q_{fj} \sin \alpha_f \right] = 0 \\ M - \omega \sum_{j=1}^Z \cos \psi_j \left[ \sum_{\lambda=1}^k q_{2j\lambda} r_2 \cos \alpha_2 - Q_{fj} (r_{fc} \sin \alpha_f - r_{fr} \cos \alpha_f) \right] = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中: \$F\_r\$ 为轴承内圈径向载荷; \$F\_a\$ 为轴承内圈轴向载荷; \$M\$ 为轴承内圈的力矩; \$\psi\$ 为滚子方位角; \$Z\$ 为滚子个数; \$r\_f\$ 为轴承内圈轴线至端面与挡边接触处的半径; 其他参数如图 1 所示。

根据圆锥滚子轴承的平衡方程确定滚子和内外圈轨道的载荷类型、外界作用力大小及约束方式等。

## 2 多体动力学模型

利用三维实体建模商业软件 Solidworks 建立

352226X2-2RZ 型铁路货车轴承。该轴承为双列圆锥滚子轴承, 每列有圆锥滚子 20 个, 两列之间有垫圈相隔, 主要结构如图 2 所示。轴承主要尺寸参数如表 1 所示。

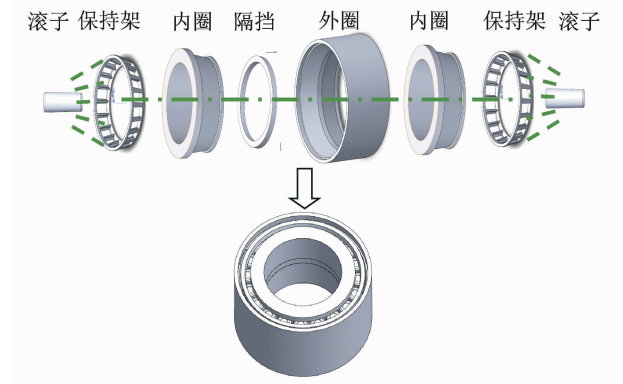


图 2 双列圆锥滚子轴承结构

Fig. 2 Structure of two row tapered roller bearings

表 1 352226X2-2RZ 轴承主要参数

Tab. 1 Main parameters of 352226X2-2RZ bearings

参数	数值
内径/mm	130
外径/mm	230
质量/kg	29.5
滚子个数	20
滚子小端直径/mm	22.81
滚子大端直径/mm	24.74
圆锥滚子锥角/(°)	2.33
接触角/(°)	10
保持架锥角/(°)	9.22
隔圈厚度/mm	17.38

在 Solidworks 中经过干涉检查后, 将装配好的轴承模型导入多体动力学软件 ADAMS 中。滚子材料为 GCr15, 密度为 7.81 g/cm<sup>3</sup>; 内圈、外圈材料为 20CrNi2MoA, 密度为 7.85 g/cm<sup>3</sup>; 保持架为 10 号钢, 隔挡材料为 15 号钢, 二者的密度约为 7.9 g/cm<sup>3</sup>。设置各部件的材料, 定义各部件之间为刚性接触, 接触刚度系数为 1×10<sup>9</sup> N/m, 考虑润滑后的摩擦因数设置为 0.1。内圈与地面之间添加旋转副并施加驱动, 使转速为 470 r/min。为了固定住外圈, 但不至于将它锁死而失去振动, 在外圈和地面之间使用扭簧固定, 扭簧刚度系数设置为 1×10<sup>4</sup> N/deg。在垂直方向施加 4 kN 径向载荷, 模拟垂向作用力的影响。在 ADAMS 中建立的轴承动力学模

型如图 3 所示。

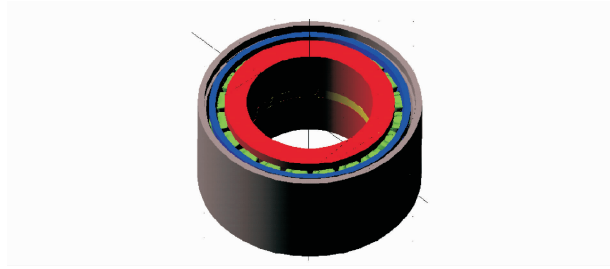


图 3 双列圆锥滚子轴承动力学模型

Fig. 3 Dynamic model of two row tapered roller bearings

模型包含了 46 个活动部件,每个部件均有 6 个自由度,共计 276 个自由度。模型中每两个可能接触的部件之间都需要定义接触关系,本模型共定义了 124 个刚性接触。

根据实际故障轴承建立外圈剥离故障轴承模型,剥离损伤尺寸约为 60 mm×20 mm×0.5 mm,如图 4 所示。故障轴承建模过程与正常轴承类似。

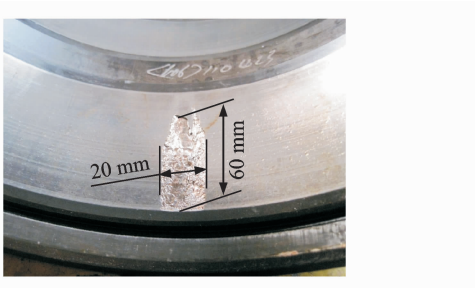


图 4 外圈剥离故障轴承实物图

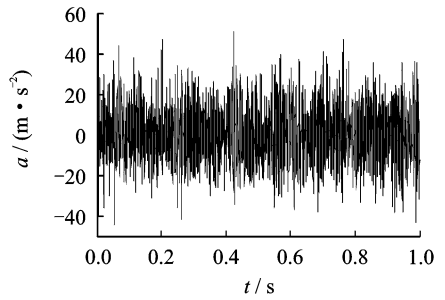
Fig. 4 Photo of bearing outer ring stripping fault

### 3 仿真分析

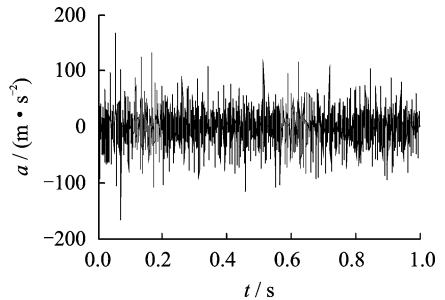
在 ADAMS 中分别对正常轴承和外圈剥离故障轴承进行动力学仿真。轴承内圈转速为 470 r/min,仿真时长为 1 s,步长为 0.001 s,仿真方式为交互式仿真。仿真计算出轴承外圈承载区域外表面处的加速度信号,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,故障轴承的加速度幅值远高于正常轴承,冲击振动明显。对加速度时域信号进行共振解调处理,利用 Hilbert 变换进行包络检波,采用 512 Hz 对包络信号进行降采样,之后利用 FFT 绘制加速度信号的频域曲线,如图 6 所示。

由图 6 可以看出:正常轴承经共振解调处理后无明显加速度峰值,并且整体幅值较小;外圈剥离故障轴承的故障频率明显。根据滚动轴承故障特征频率计算公式<sup>[11]</sup>可计算得到转速为 470 r/min 时该



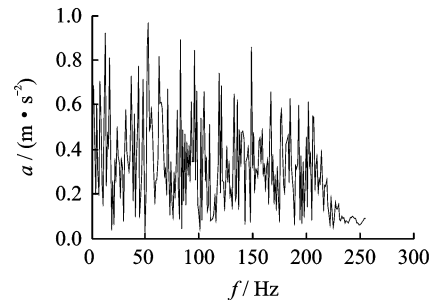
(a) 正常轴承  
(a) Normal bearings



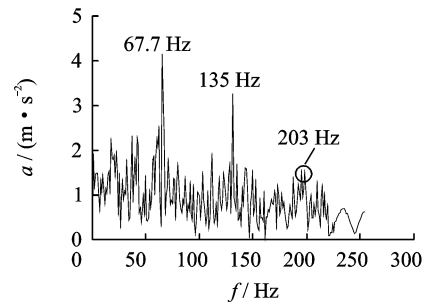
(b) 故障轴承  
(b) Fault bearings

图 5 轴承外圈外表面加速度信号

Fig. 5 Acceleration signal at outer ring of bearings



(a) 正常轴承  
(a) Normal bearings



(b) 故障轴承  
(b) Fault bearings

图 6 轴承外圈外表面加速度共振解调结果

Fig. 6 Outer ring acceleration resonant demodulation results

轴承外圈故障特征频率为 67.59 Hz。由图 6(b)可以明显看出,轴承故障特征频率仿真结果为 67.7

Hz,与理论计算结果非常接近。另外,图中故障特征频率的 2 倍频和 3 倍频也非常明显。因此,从仿真结果可以看出该模型可以很好地模拟真实外圈剥离故障。

## 4 实验研究

为了验证模型仿真结果,利用轮对跑合实验台对如图 4 所示的外圈剥离故障轴承进行实验测试,实验装置如图 7 所示。实验装置包括 CA-YD-188 型压电式加速度传感器、INV36DF 型信号采集仪、信号放大器、DSP 数据处理软件等。

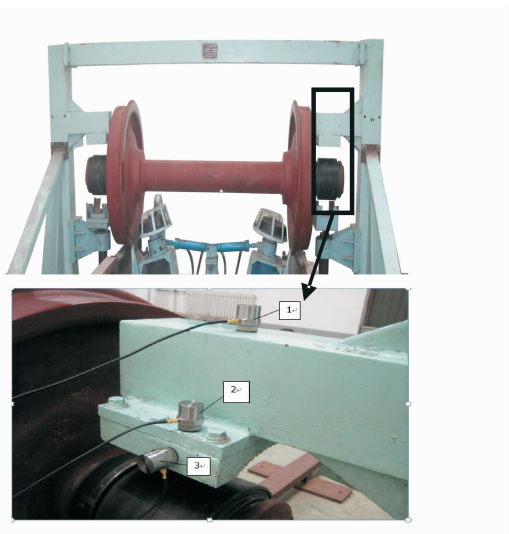


图 7 轮对跑合实验台故障信号测量装置

Fig. 7 Signal measure instrument on wheelset running-in test-bed

同样采用共振解调的方法对测量得到的故障轴承振动信号进行处理,测点如图 7 所示。本研究共振解调法利用传感器的谐振频率附近的信号进行处理,该处信号为高频段,不受低频噪声影响,且共振后的幅值较大。已知所用加速度传感器采用磁座式安装时的谐振频率约为 5.9 kHz。根据采样定理,取采样时长为 10 s,采样频率为 25.6 kHz,轮对转速为 470 r/min。由于实际测量信号的低频噪声较大,需要进行带通滤波,带通滤波中心频率设置为 5.9 kHz,带宽为 2 kHz。由于轴承故障特征频率均低于 100 Hz,同样利用 Hilbert 变换进行包络检波,采用 512 Hz 对包络信号进行降采样,最后进行 FFT 变换。外圈剥离故障振动实测信号及共振解调结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出,利用轮对跑合实验台测到的

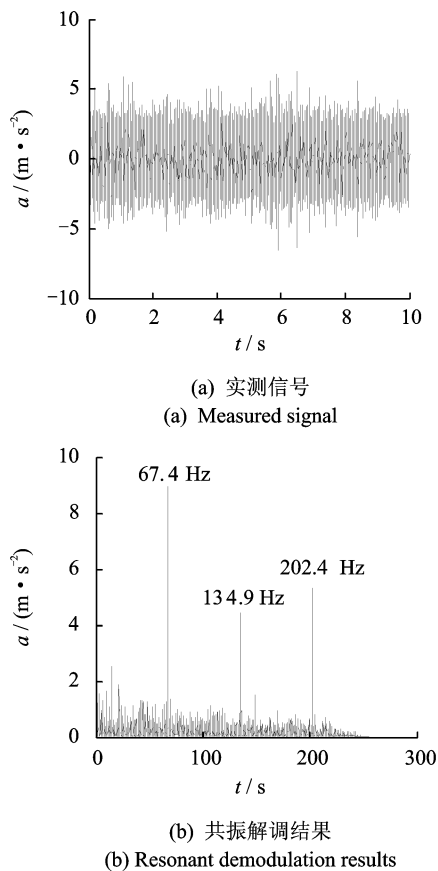


图 8 外圈剥离故障实测信号及共振解调结果  
Fig. 8 Measured vibration signal and its resonant demodulation results

外圈剥离故障轴承的故障特征频率为 67.4 Hz,与理论结果的 67.59 Hz 十分接近,外圈故障特征频率的 2 倍频和 3 倍频在结果中也十分明显。由此可知,实验数据分析结果与仿真结果十分吻合,表明所建轴承外圈剥离故障模型比较准确,可以用于轴承的状态监测与故障诊断、故障产生机理和发展规律的研究等方面。

## 5 结束语

笔者利用三维实体建模工具和多体动力学仿真软件对 352226X2-2RZ 型铁路货车轴承进行了详细的建模和仿真,对比分析了轴承外圈剥离故障与正常轴承的仿真结果,并利用轮对跑合实验台对仿真结果进行了验证。根据研究结果,发现该方法所建轴承模型比较接近实际,轴承外圈故障特征频率的仿真结果与理论计算、实验结果十分吻合。该模型的建立为轴承故障诊断、损伤产生机理研究、故障演化规律研究、故障下的非线性动力学行为研究等提

供了便捷和有效的途径。

### 参 考 文 献

- [1] Bai Changqing, Xu Qingyu. Dynamic model of ball bearings with internal clearance and waviness [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(1-2): 23-48.
- [2] Cong Feiyun, Chen Jin, Dong Guangming, et al. Vibration model of rolling element bearings in a rotor-bearing system for fault diagnosis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(8): 2081-2097.
- [3] 徐东,徐永成,陈循,等.单表面故障的滚动轴承系统非线性动力学研究[J].机械工程学报,2010,46(21):61-68.  
Xu Dong, Xu Yongcheng, Chen Xun, et al. Research on nonlinear dynamics of a single surface defect in rolling element bearing systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 62-68. (in Chinese)
- [4] Tomoya S, Kazuyoshi H. Dynamic analysis of cage stress in tapered roller bearings using component-mode-synthesis method [J]. Journal of Tribology, 2009, 131(1): 1-9.
- [5] Sopanen J, Mikkola A. Dynamic model of a deep-groove ball bearing including localized and distributed defects/part 1: theory[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers/Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2003, 217(3): 201-211.
- [6] Sopanen J, Mikkola A. Dynamic model of a deep-groove ball bearing including localized and distributed defects/part 2: implementation and results[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers/Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2003, 217(3): 213-223.
- [7] Sakaguchi T, Harada K. Dynamic analysis of cage behavior in a tapered roller bearing[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2006, 128(3): 604-611.
- [8] 何芝仙,蔡高峰,干洪.变载荷作用下轴-滚动轴承系统动力学仿真[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2008,32(6):1173-1176.  
He Zhixian, Cai Gaofeng, Gan Hong. Simulation on dynamic problem for the shaft-rolling bearings system on variable loading[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008, 32(6): 1173-1176. (in Chinese)
- [9] 朱利军,谭晶,黄迪山,等.基于 ADAMS 的深沟球轴承仿真分析[J].轴承,2011(2):3-6.  
Zhu Lijun, Tan Jing, Huang Dishan, et al. Simulation analysis of deep groove ball bearings based on ADAMS [J]. Bearing, 2011(2): 3-6. (in Chinese)
- [10] 李昌,韩兴.基于 ADAMS 的轴承虚拟可靠性试验方法[J].中国机械工程,2011,22(5):509-512.  
Li Chang, Han Xing. Virtual reliability test method for bearing based on ADAMS[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(5): 509-512. (in Chinese)
- [11] 杨国安.机械设备故障诊断实用技术[M].北京:中国石化出版社,2007:232-235.



**第一作者简介:**廖英英,女,1979年8月生,讲师、硕士生导师。主要研究方向为车辆系统动力学、机车状态监测与故障诊断。曾发表《磁流变阻尼器逆向模型的建模、优化与仿真》《《振动、测试与诊断》2013年第33卷第4期)等论文。  
E-mail: sjzlyy820@163.com