

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.05.006

# 基于 Matlab/Simulink 的滚动轴承划伤缺陷 动力学建模及仿真\*

何贞志<sup>1</sup>, 徐晓冬<sup>2</sup>, 邵明辉<sup>1</sup>

(1. 江苏师范大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**为解决缺陷轴承动力学建模及振动特性分析的问题,将套圈沟道缺陷引起的额外弹性趋近量引入到轴承缺陷激励模型中。基于接触力学分析方法,建立了额外弹性趋近量与划伤缺陷宽度及轴承参数等之间的关系,建立了滚动轴承划伤缺陷的非线性动力学模型;利用 Matlab/Simulink 软件搭建了动力学仿真模型,开展了划伤缺陷轴承的振动特性数值仿真研究,得到了接触变形、接触载荷及外圈振动加速度随时间的变化规律;对数值仿真结果进行了评价,并进行了缺陷轴承振动测试。研究表明:内圈划伤和外圈划伤缺陷轴承振动包络谱的仿真结果与实验结果基本一致,均存在相应的缺陷频率及其倍频成分,且内圈划伤缺陷频率附近存在旁瓣频率成分,从而验证了动力学模型及 Simulink 仿真模型的正确性。

**关键词:**滚动轴承;划伤缺陷;动力学建模;Simulink;数值仿真

中图分类号:TH133.33;TH113

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)05-0475-06

## Dynamic modelling and simulation of defective rolling element bearing based on Matlab/Simulink

HE Zhen-zhi<sup>1</sup>, XU Xiao-dong<sup>2</sup>, SHAO Ming-hui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of dynamic modelling and characteristics analysis of defective bearing, the additional contact deformation caused by scratch defect of raceway was introduced into the excitation model of defect. The relationship between additional contact deformation and defect width and bearing parameters was established based on contact mechanism theory, and then a nonlinear dynamic model of rolling element bearing with scratch defect on raceway was established. The simulation model was set up by using Matlab/Simulink, and the analysis of numerical simulation of vibration characteristics generated by scratch defects was completed to obtain the contact deformation, contact forces and vibration acceleration of outer ring. The simulation results were evaluated and the vibration of bearing with scratch on inner raceway or outer raceway were tested. The experimental results show that the normalized envelop spectrum of simulated results and experimental results are fitted well and the corresponding defect frequency and its harmonic frequencies are both found. Also there are sideband frequencies at defect frequencies in the spectrum of defective bearing with defect in inner raceway. Thus the dynamic model and simulation model were verified.

**Key words:** rolling element bearing; scratch defect; dynamic modelling; Simulink; numerical simulation

收稿日期:2017-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51505201);兰州市科技计划项目(2015-3-98)

作者简介:何贞志(1982-),男,江苏沛县人,副教授,硕士生导师,主要从事滚动轴承动力学特性分析及故障诊断技术、滚子修形设计方法的研究。E-mail: hezz82@163.com

# 0 引 言

滚动轴承广泛应用于旋转机械中,轴承缺陷是引起机械故障的重要因素之一。轴承缺陷包括两大类:分布式缺陷和局部式缺陷。一般来说,轴承划伤缺陷是引起轴承失效的主要原因。

轴承划伤缺陷的振动响应模型是为了研究缺陷对轴承冲击引起的轴承振动响应,在轴承结构振动模型的基础上提出的一种轴承振动简化模型<sup>[1]</sup>。对轴承缺陷模型的建立主要存在以下方法:

(1)局部式缺陷的冲击序列模型。MCFADDEN等<sup>[2-3]</sup>使用一串串周期性脉冲函数模拟单点和多点局部式缺陷对轴承振动的影响,使用脉冲函数中的放大系数表示缺陷的冲击程度;CHOUDHURY等<sup>[4]</sup>使用冲击力序列模拟轴承局部式缺陷的激励作用,该冲击力激起了内圈、外圈等轴承元件的共振模态;陈於学等<sup>[5]</sup>利用脉冲冲击波模拟滚动轴承早期缺陷振动;曹宏瑞等<sup>[6]</sup>、武济钢等<sup>[7]</sup>利用一系列冲击脉冲描述滚动体经过损伤时产生的冲击现象。

(2)轴承系统的多体动力学模型,这种模型建立轴承系统的非线性动力学模型,并对其求解得到轴承系统的振动响应,将轴承缺陷引起的轴承元件间的附加趋近量添加到正常情况下的弹性趋近量中,根据 Hertz 接触理论计算接触载荷。ARSLAN等<sup>[8]</sup>建立了轴承-转子系统的动力学模型,研究了局部式缺陷引起的角接触球轴承的振动特性;PATEL等<sup>[9]</sup>考虑局部式缺陷的宽度和深度建立了套圈含局部式缺陷的滚动轴承动力学模型;MOAZEN等<sup>[10]</sup>考虑滚动体的质量建立了滚动轴承非线性动力学模型,研究了局部式缺陷对接触载荷及振动的影响。

本文将通过引入划伤缺陷引起轴承内、外圈之间额外弹性趋近量,利用余弦函数建立内圈划伤、外圈划伤的缺陷模型,从而得到划伤缺陷滚动轴承外圈的非线性动力学模型,并基于 Simulink 进行仿真求解,得到外圈的缺陷振动响应,同时对振动特性进行分析,为滚动轴承振动仿真分析及故障诊断提供理论依据。

## 1 滚动轴承划伤缺陷动力学模型

假设轴承内圈以恒速旋转,外圈在外加径向载荷  $F_r$  的作用下不转动。本研究在建立滚动轴承振动模型时,忽略滚动体的质量,将滚动体与外圈和内圈间的接

触采用弹簧和阻尼来代替,讨论轴承的振动特性,轴承的振动模型如图 1 所示。

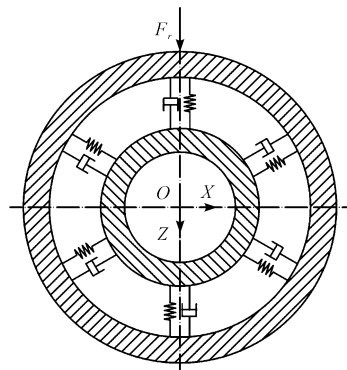


图 1 轴承的振动模型

假设滚动体匀速转动,则  $t$  时刻第  $j$  个滚动体的方位角可以写为:

$$\varphi_j = \omega_c t + \varphi_0 + \frac{2\pi(j-1)}{Z} \quad (j = 1, 2, \dots, Z) \quad (1)$$

式中:  $\omega_c$ —保持架转动角频率;  $\varphi_0$ —首个滚动体的初始方位角;  $Z$ —滚动体个数。

### 1.1 接触变形量

考虑无缺陷轴承中的接触情况。根据图 1 所示的球轴承振动模型,在外界因素的作用下,轴承转动过程中内、外圈滚道与滚动体之间产生接触变形,方位角  $\varphi_j$  处的正常轴承内、外圈滚道的相对趋近量  $\delta_j$  可以表示为:

$$\delta_j = -x \sin \varphi_j - z \cos \varphi_j - C_r \quad (2)$$

式中:  $C_r$ —滚动轴承的径向间隙。

若轴承元件中存在缺陷,当缺陷位于滚动体与内、外圈滚道的接触区域时,缺陷的存在将产生额外的弹性趋近量  $\delta'$ 。

滚动轴承内、外圈滚道表面划伤缺陷模型如图 2 所示。

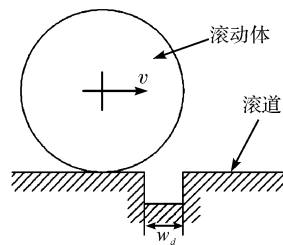


图 2 划伤缺陷示意图

此处假设缺陷为早期划伤缺陷,即缺陷宽度较小,滚动体经过划伤缺陷时不与缺陷底部接触。

当滚动体进入损伤区域时,其与滚道之间由于

缺陷产生的额外趋近量可使用余弦函数表示为<sup>[11]</sup>:

$$\delta' = \begin{cases} -\Delta \cos\left(2\pi \frac{v}{w_d} t + \varphi_{d0}\right), & |\varphi_j - \varphi_d| < \frac{\phi}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $v$ —接触零件之间移动的相对速度; $w_d$ —缺陷宽度; $\varphi_{d0}$ —缺陷初始方位角; $\varphi_j, \varphi_d$ —滚动体和缺陷的瞬时方位角; $\phi$ —缺陷范围角,  $\phi \approx 2w_d/d$ ;  $d$ —划伤缺陷所在滚道的直径(内圈或外圈滚道); $\Delta$ —缺陷引起趋近量的幅值。

$\Delta$ 大小由缺陷严重程度及轴承几何尺寸决定:

$$\Delta = \frac{D_b}{2} \left(1 - \cos \frac{\phi_b}{2}\right) \pm \frac{d}{2} \left(1 - \cos \frac{\phi}{2}\right) \quad (4)$$

式中:“+”—内圈划伤情况;“−”—外圈划伤情况; $\phi_b \approx 2w_d/D_b$ ;  $D_b$ —滚动体直径。

此时,内、外圈间的总接触变形量为原接触变形与缺陷引起的内、外圈额外趋近量之和,即:

$$\delta_{sj} = \delta_j + \delta' \quad (5)$$

### 1.2 接触载荷和阻尼力

在滚动轴承的接触问题分析中,只有当滚子和内、外圈滚道接触时才产生接触载荷  $Q_{sj}$ , 因此,本研究将接触载荷表示为分段函数,即当接触变形量为正值时才存在接触载荷,否则接触载荷为0。根据 Hertz 接触理论,方位角  $\varphi_j$  处内、外圈的接触载荷  $Q_{sj}$  可表示为<sup>[12]</sup>:

$$Q_{sj} = \begin{cases} K_n \delta_j^n & \delta_j > 0 \\ 0 & \delta_j \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $K_n$ —内、外圈等效载荷-变形系数; $n$ —载荷-变形指数。

对球轴承,  $n = 3/2$ ; 对滚子轴承,  $n = 10/9$ 。

同样的,接触副间的阻尼力  $Q_{dj}$  可以写为:

$$Q_{dj} = \begin{cases} c \delta_j & \delta_j > 0 \\ 0 & \delta_j \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $c$ —等效粘性阻尼系数。

### 1.3 轴承外圈动力学方程

根据图1可以得到轴承外圈 X 向和 Z 向的运动微分方程分别为:

$$m_o \ddot{x} - \sum_{j=1}^Z Q_{dj} \sin \varphi_j - \sum_{j=1}^Z Q_{sj} \sin \varphi_j = 0 \quad (8)$$

$$m_o \ddot{z} - \sum_{j=1}^Z Q_{dj} \cos \varphi_j - \sum_{j=1}^Z Q_{sj} \cos \varphi_j = F_r + m_o g \quad (9)$$

式中: $m_o$ —外圈质量; $F_r$ —施加在外圈上的径向载荷; $Z$ —滚子个数; $Q_{sj}, Q_{dj}$ —方位角  $\varphi_j$  处内、外圈接触副间接触载荷和阻尼力,分别由式(6,7)给出。

## 2 Simulink 动力学仿真模型

Matlab 是当今较流行的以数值计算为主的软件,其中自带的仿真工具包 Simulink 可以较为方便地按照给定方程对动力学系统进行建模、仿真求解和分析。用户既可用方框图建立仿真模型<sup>[13]</sup>,也可以使用 Matlab 语言编写 M 文件构建模型。与传统的仿真软件相比, Simulink 具有直观、方便、灵活的特点。

利用 Simulink 进行数值仿真的一般步骤为:建立系统的数学模型;在 Simulink 中建立数字仿真模型并设置仿真参数<sup>[14]</sup>;执行仿真得出仿真结果并分析。

### 2.1 建立仿真模型

使用标准的积分模块,根据轴承外圈  $x$  向和  $z$  向加速度得到相应的速度、位移状态,根据式(8,9)可以得到 Simulink 环境下的滚动轴承划伤缺陷动力学模型,如图3所示。

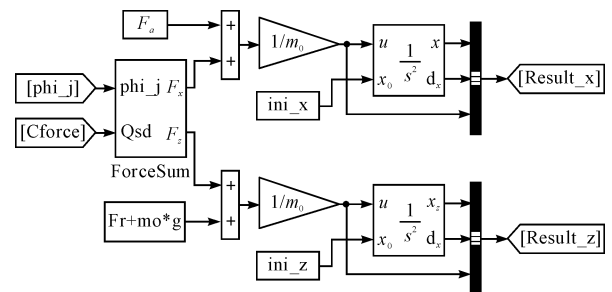


图3 滚动轴承动力学仿真模型

其中,为了使程序框图整洁、易理解,模型中使用了 Subsystem、From、Goto、Bus Creator、Bus Selector 等模块。

其中,ForceSum 模块的功能是根据每个滚子位置处的接触弹性力  $Q_{sj}$  和阻尼力  $Q_{dj}$  计算  $x$  向和  $z$  向总接触载荷,如图4所示。

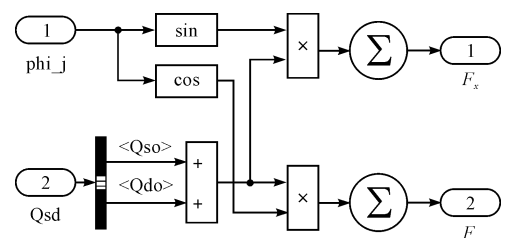


图4 计算总接触载荷的 ForceSum 模块

根据轴承外圈、内圈之间的相互位置关系及划伤缺陷模型,由式(2,5)可计算各滚子处的接触变形量 $\delta_j$ ,根据接触载荷的计算公式(6,7),得到轴承外圈的接触载荷,如图5所示。

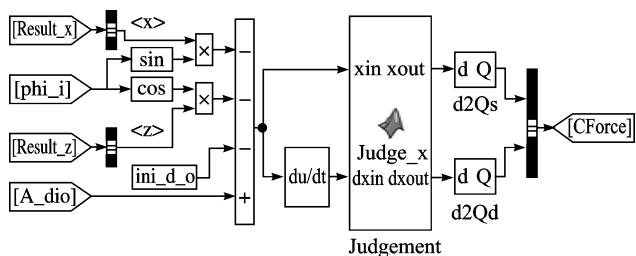


图5 各滚子处接触载荷的计算

在滚动轴承动力学问题中的载荷为接触载荷,仅当轴承元件接触时存在载荷,即该接触载荷为分段函数,如式(6,7)所示。使用 Simulink 标准模块可以对此进行建模,但模型将比较复杂。因此使用 Matlab function 实现模型中的分段函数,具有简单直观的特点,如图5中 Judgement 模块所示。

### 2.2 设置仿真参数

利用 Simulink 对动力学模型进行仿真,需要对仿真参数进行合理的设置:

- (1) 仿真时间的设置。开始时间为 0 s, 停止时间为 0.2 s;
- (2) 求解器类型的选择。选择 Variable-step 变步长、ode45 算法;
- (3) 初始值的设置。 $x, z$  的积分初值设置为静力平衡情况下的  $x_0, z_0$ 。

## 3 仿真结果及分析

以某型号球轴承为例,主要参数如表1所示。

表1 球轴承主要参数

项目	数值	单位
钢球直径	11.509	mm
节圆直径	48.5	mm
径向游隙	-2	$\mu\text{m}$
钢球个数 Z	8	个
接触角 $\alpha$	0	( $^\circ$ )
外圈质量	0.295 5	kg

其中,径向载荷为 1 000 N, 主轴转速(内圈转速)为 1 500 r/min, 可得内圈转动频率 $\omega_i$ 为 25 Hz。对于内圈旋转、外圈不转动的轴承,当轴承内圈滚道、外圈滚

道存在缺陷时,根据几何关系可得到滚动体通过内圈滚道或外圈滚道上一个缺陷的通过频率,即内圈缺陷频率、外圈缺陷频率,分别表示为:

$$\omega_i = Z(\omega_s - \omega_c) = \frac{Z\omega_s}{2} \left(1 + \frac{D_b}{d_m} \cos\alpha\right) \quad (10)$$

$$\omega_o = Z\omega_c = \frac{Z\omega_s}{2} \left(1 - \frac{D_b}{d_m} \cos\alpha\right) \quad (11)$$

因此,可得保持架转动频率 $\omega_c$ 为 9.5 Hz, 外圈缺陷频率 $\omega_o$ 为 76.3 Hz, 内圈缺陷频率 $\omega_i$ 为 123.7 Hz。

### 3.1 正常轴承仿真结果

滚动轴承无缺陷时,利用 Simulink 仿真得到的内圈-外圈接触变形量及接触载荷的变化、轴承外圈 Z 向的加速度响应如图6所示。

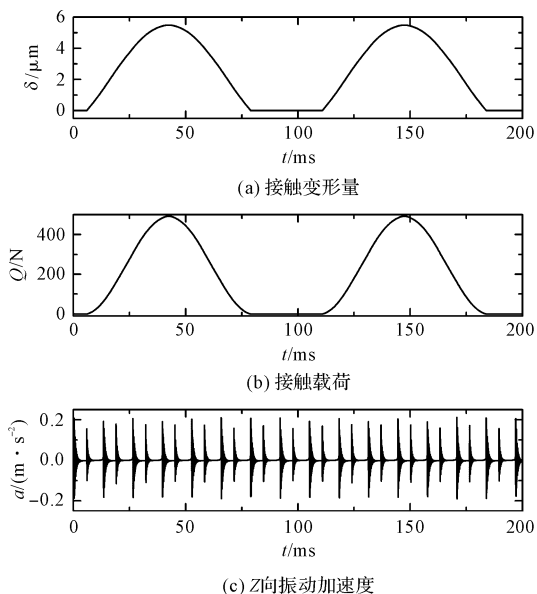


图6 正常轴承振动响应

由图6可知:

- (1) 在径向载荷作用下,轴承中某一滚动体处的内圈-外圈接触变形量和接触载荷均呈周期性变化,如图6(a,b)所示;
- (2) 在轴承转动过程中,某一滚动体并不是始终与内圈、外圈接触,存在脱离接触的情况,即图中接触变形量及接触载荷为零的时刻,该时间与径向载荷、轴承结构及游隙等有关,如图6(a,b)所示;
- (3) 正常轴承外圈 Z 向存在周期性的低幅振动(最大幅值约为  $0.2 \text{ m/s}^2$ ),其周期为滚动体通过频率,如图6(c)所示。实际上,这种振动是由于使用了有限个滚动体支撑方式,在轴承运转过程中,钢球的方位角是不断变化的,导致轴承承载区内的承载钢球数目及承载力周期性变化,轴承的刚度呈周期性变化,而



轴承刚度变化引起了轴承的振动。

### 3.2 划伤缺陷轴承振动仿真结果

令划伤缺陷的宽度为 0.8 mm,深度为 0.1 mm,初始方位角为 0°。本研究分别设划伤缺陷位于外圈滚道和内圈滚道,利用 Simulink 进行仿真求解,得到轴承外圈径向振动加速度信号随时间的变化,如图 7 所示。

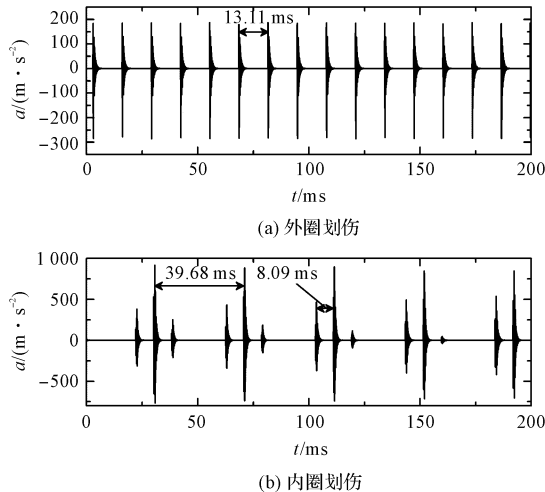


图 7 划伤缺陷轴承振动响应(a 外圈划伤 b 内圈划伤)

对应的包络谱如图 8 所示。

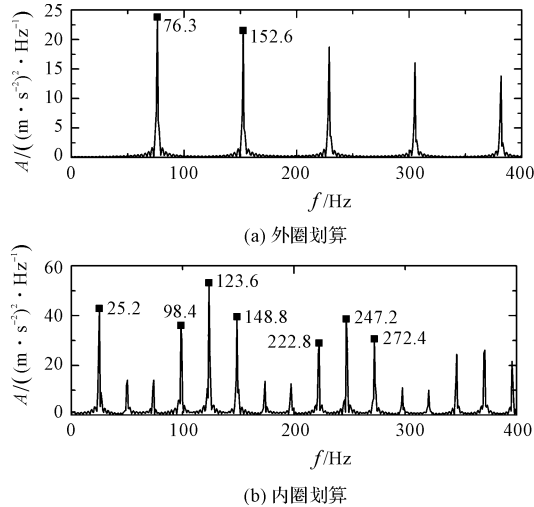


图 8 划伤缺陷轴承振动包络谱(a 外圈划伤 b 内圈划伤)

由图(7,8)可以看出:

(1)轴承划伤缺陷激起了轴承的高频固有振动,表现为轴承外圈振动信号中周期性的阻尼振荡衰减波,如本例中外圈划伤和内圈划伤引起的振动衰减波周期分别为 13.11 ms 和 8.09 ms;

(2)产生的阻尼振荡衰减波出现的频率与钢球通过缺陷的频率有关,即特征缺陷频率,通过对振动信号进行包络分析可以有效地提取特征缺陷频率,可以看到轴承缺陷频率及其倍频的存在,即外圈缺陷频率为

76.3 Hz,内圈缺陷频率为 123.6 Hz,这与理论结果一致;

(3)外圈划伤缺陷产生的阻尼振荡衰减波幅值基本相等,而内圈划伤缺陷产生的阻尼振荡衰减波幅值受到了调制,调制波的周期为 39.68 ms,频率为 25.2 Hz,即为内圈的转动频率;这在图 8 包络谱分析中表现为在内圈划伤缺陷频率附近存在旁瓣频率成分,间隔为内圈转动频率 25.2 Hz,该现象与文献[1]给出的结果一致。

### 3.3 动力学模型验证

基于 BVT-5 型轴承振动测量仪,笔者分别使用含有内圈划伤、外圈划伤缺陷的滚动轴承进行振动测试。当施加径向载荷为 1 000 N,主轴转速为 1 500 r/min 时,采集轴承外圈径向振动信号,并对其进行包络分析。本研究将实验结果和仿真结果作对比,如图 9 所示。

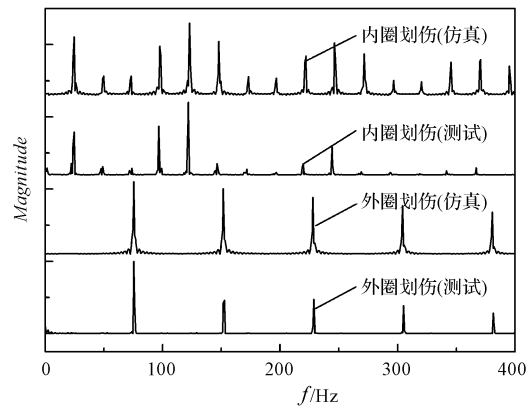


图 9 动力学模型的验证

其中,本研究对振动包络谱幅值经过了归一化处理。由对比结果可以看出:划伤缺陷轴承振动的仿真结果与实测结果基本一致,都存在划伤缺陷频率及其倍频成分。因此,本文给出的基于 Simulink 的滚动轴承动力学分析结果是正确的。

## 4 结束语

基于接触力学方法,本文通过将额外弹性趋近量引入到缺陷激励模型中,建立了滚动轴承划伤缺陷的非线性动力学模型,并基于 Matlab/Simulink 对模型进行仿真求解,得到了接触变形、接触载荷及外圈加速度随时间的变化结果。

根据仿真结果,本文对缺陷轴承的振动特性进行了分析。研究表明:径向载荷作用下,正常轴承内圈-外圈接触变形量和接触载荷均呈周期性变化,导致

轴承刚度呈周期性变化,因而轴承外圈 Z 向仍存在周期性的低幅振动;划伤缺陷激起轴承的高频固有振动,产生周期性的阻尼振荡衰减波,其出现的频率为特征缺陷频率;外圈缺陷引起的阻尼衰减波幅值基本相等,而内圈缺陷引起的阻尼衰减波幅值受到了调制。同时,根据划伤缺陷引起的振动响应包络谱的实验结果与仿真结果的对比,验证了动力学模型及 Simulink 仿真模型的正确性。

#### 参考文献 (References):

- [1] TANDON N, CHOUDHURY A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings [J]. **Tribology International**, 1999, 32(8):469-480.
- [2] MCFADDEN P D, SMITH J D. The vibration produced by multiple point defects in a rolling element bearing [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1985, 98(2):263-273.
- [3] MCFADDEN P D, SMITH J D. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1984, 96(1):69-82.
- [4] CHOUDHURY A, TANDON N. Vibration response of rolling element bearings in a rotor bearing system to a local defect under radial load [J]. **Journal of Tribology**, 2006, 128(2):252-261.
- [5] 陈於学,王冠兵,杨曙年. 滚动轴承早期缺陷振动的简化模型 [J]. **轴承**, 2007(10):18-21, 34.
- [6] 曹宏瑞,李亚敏,成玮,等. 局部损伤滚动轴承建模与转子系统振动仿真 [J]. **振动、测试与诊断**, 2014, 34(3):549-552.
- [7] 伍济钢,杨曾增,蒋勉,等. 滚动轴承表面损伤故障动力学建模方法研究 [J]. **机械传动**, 2016(2):27-33.
- [8] ARSLAN H, AKTURK N. An investigation of rolling element vibrations caused by local defects [J]. **Journal of Tribology**, 2008, 130(4):41101.
- [9] PATEL V N, TANDON N, PANDEY R K. A dynamic model for vibration studies of deep groove ball bearings considering single and multiple defects in races [J]. **Journal of Tribology**, 2010, 132(4):41101.
- [10] AHMADI A M, PETERSEN D, HOWARD C. A nonlinear dynamic vibration model of defective bearings-the importance of modelling the finite size of rolling elements [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2015, 52-53(1):309-326.
- [11] PATEL V N, TANDON N, PANDEY R K. Vibration studies of dynamically loaded deep groove ball bearings in presence of local defects on races [J]. **Procedia Engineering**, 2013(64):1582-1591.
- [12] HARRIS T A, KOTZALAS M N. **Rolling bearing analysis** [M]. New York: Wiley, 2001.
- [13] 孔佳元,张雷. 考虑柔性和间隙的螺旋引纬机构仿真分析 [J]. **轻工机械**, 2017, 35(1):5-9.
- [14] 徐国宝,马金凤,王延军. 基于 Adams 的跌落式装箱机动力学仿真研究 [J]. **包装与食品机械**, 2016(1):44-47.

[编辑:周昱晨]

#### 本文引用格式:

何贞志,徐晓冬,邵明辉. 基于 Matlab/Simulink 的滚动轴承划伤缺陷动力学建模及仿真 [J]. **机电工程**, 2018, 35(5):475-480.

HE Zhen-zhi, XU Xiao-dong, SHAO Ming-hui, et al. Dynamic modelling and simulation of defective rolling element bearing based on Matlab/Simulink [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2018, 35(5):475-480.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>