轴承外滚道局部故障的超谐共振特性

杨瑞, 靳玉林, 侯磊*, 陈予恕

哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001

* E-mail: houlei@hit.edu.cn

doi: 10.1360/N092018-00321

滚动轴承局部故障是常见的故障类型, 以磨损和剥落为代表的局部故障占有较大比重. 滚动轴承工作过程中滚动体与滚道不可避免地存在接触碰撞, 长期工作产生的接触疲劳会导致内滚道、外滚道和滚动体出现裂纹继而引发剥落, 形成局部故障. 此外, 当滚动轴承出现轻载打滑或者过载时也会造成轴承磨损, 磨损加剧后就会演变成局部故障. 经过学者们的努力, 滚动轴承和故障轴承的相关研究已经取得了丰硕成果, 在数学模型、动力学方程求解方法、信号处理、特征提取方法、试验研究以及工程应用等方面取得了很大进展, 但是很少有文献探讨轴承变刚度(varying compliance, VC)特性对故障轴承-转子系统共振特性的影响. 滚动轴承系统含有赫兹接触非线性、游隙非线性以及变刚度引起的参数激励特性, 具有本质非线性属性, 在某些参数条件下可能发生超谐共振和亚谐共振等典型非线性共振. 论文的目的在于探讨含局部故障的轴承-转子系统的非线性共振特性, 从非线性动力学角度揭示轴承故障机理, 从研究结果中提炼易于提取和识别的故障特征.

为了便于做理论分析, 论文考虑了平衡转子情况, 此时系统受到变刚度激励与故障激励两种激励形式. 轴承变刚度激励是固有激励, 轴承局部故障在运行过程中会产生冲击力. 论文利用常见的冲击函数(矩形、三角形和半正弦冲击)与轴承接触力的乘积表征故障激励^[1].

冲击函数傅里叶级数展开:

$$f(t) = f_0 + \sum_r f_r r \omega_{od} t, \quad (1)$$

其中, f_0 和 f_r 是傅里叶系数, ω_{od} 是故障频率.

局部故障产生的冲击力由故障处的轴承力乘以冲击函数:

$$F(t) = P(\varphi) f(t), \quad (2)$$

其中, $P(\varphi)$ 是轴承力, f 是冲击函数.

冲击力表示成傅里叶级数的形式, 故可利用谐波平衡-时域频域转换技术(HB-AFT)求解故障轴承-平衡转子系统的动力学方程. 该方法的核心思想是将动力学方程的解表示成傅里叶级数的形式, 方程中的非线性项也表示成傅里叶级数形式, 通过谐波平衡的方式(HB)得到非线性代数方程组, 同时利用时域频域转换技术(AFT)建立参数之间的补充方程^[2], 最后利用牛顿-拉弗森迭代得到动力学方程的解.

在英文全文中, 我们给出了故障轴承-转子系统的建模过程, 给出了应用HB-AFT方法的求解流程, 讨论了一些系统参数比如阻尼、游隙对共振特性的影响, 从物理角度探讨了系统超谐共振产生的机理. 此外, 论文中还还对试验台做了简介, 并给出了实验数据的采集和分析过程, 最终解释了实验结果与理论分析产生差异的原因. 以下是论文中的部分结果.

由HB-AFT方法得到基于几种不同故障模型的故障轴承系统垂直方向的共振曲线, 如图1所示. 由图可

英文全文见: Yang R, Jin Y L, Hou L, et al. Super-harmonic resonance characteristic of a rigid-rotor ball bearing system caused by a single local defect in outer raceway. Sci China Tech Sci, 2018, 61: 1184–1196, <https://doi.org/10.1007/s11431-017-9155-3>

图 1 (网络版彩图)不同轴承-转子系统垂直方向的共振曲线, 径向游隙 $2\text{ }\mu\text{m}$, 阻尼系数 200 N m/s . (a) 健康系统; (b) 半正弦冲击模型; (c) 矩形冲击模型; (d) 三角冲击模型

知变刚度共振大约在 4800 r/min , 2倍超谐共振大约在 2400 r/min , 3倍超谐共振大约在 1600 r/min . 与健康系统与故障系统共振处幅值比较, 故障系统的超谐共振幅值增大非常明显. 对比这些共振曲线, 发现系统的共振区域受局部缺陷影响较小. 此外, 不同冲击力故障模型存在差异, 这是因为不同冲击力模型的能量聚集效果和各个谐波的能量分布不同. 但是基于这些冲击力模型的系统都展现出了明显的谐波共振(2倍超谐共振和3倍超谐共振), 所以超谐波共振可作为故障轴承-转子系统的动力学故障特征.

提取实验信号BPFO及2BPFO频率成分的幅值可以画出共振曲线, 论文中, 基频BPFO曲线在 4550 r/min 转速附近有明显的峰值, 2BPFO频率曲线在 2300 r/min 转速附近有明显的峰值. 由此可以断定系统在 4550 r/min 转速附近发生VC共振, 在转速 2300 r/min 附近发生2VC超谐共振. 此实验结果定性验证了前面的理论分析结果.

论文通过理论分析与实验研究, 证实了外圈故障轴承-转子系统的超谐共振特性, 此共振特性可作为轴承故障的动力学特征.

参考文献

- 1 Choudhury A, Tandon N. Vibration response of rolling element bearings in a rotor bearing system to a local defect under radial load. *J Tribol*, 2006, 128: 252–261
- 2 Zhang Z, Chen Y, Cao Q. Bifurcations and hysteresis of varying compliance vibrations in the primary parametric resonance for a ball bearing. *J Sound Vib*, 2015, 350: 171–184