

# 基于共振解调模拟电路的滚动轴承早期故障检测性能研究

马增强, 李延忠, 谷朝健

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**共振解调模拟电路是滚动轴承故障诊断中最常用的技术之一,但是其故障检测性能的定量评价研究尚未见报导。因此,分别以正弦调制和脉冲调制所构造的故障轴承振动加速度信号为电路输入,定量分析了共振解调电路在不同信噪比条件下的故障检测性能,并研究了电路中的关键设计参数——带通滤波器品质因数  $Q$  的调制规律,为共振解调模拟电路在轴承早期故障检测的实际工程应用提供了可靠的科学依据。

**关键词:**共振解调模拟电路;信噪比;故障检测性能

**中图分类号:**TH165.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2016)04-0072-05

## 0 引言

滚动轴承早期故障具有症状不明显,特征信号微弱,故障信号被噪声信号所掩盖,信噪比低等特点。频率分析法<sup>[1-2]</sup>可以对轴承的早期故障进行精确诊断。共振解调方法<sup>[3-5]</sup>是频率分析法中较为成功的一种,它极大地提高了信噪比,特别适用于轴承故障的早期诊断<sup>[6-7]</sup>。张功学等将共振解调技术用于滚动轴承的故障诊断,研制出了共振解调器<sup>[8]</sup>,然而并没有对故障检测性能进行定量评价。信噪比等于信号与噪声的功率谱之比,它是轴承故障诊断结果的重要影响因素,提高信噪比可大大提高故障频率提取的准确度,常用的方法有同期时域平均(相干检波)、滤波等,通常需要事先知道信号和噪声的统计特性。针对实际机械早期故障诊断中强噪声背景下难以提取故障特征的情况,文献<sup>[9]</sup>提出了一种基于随机共振消噪和经验模态分解的轴承故障诊断方法。针对轴承故障信号的降噪处理,文献<sup>[10]</sup>研究了粒子滤波方法和它在信号降噪中的应用。虽然均可以提高故障信号对噪声的比例即信噪比,实现微弱信号检测,也获得了较好的降噪效果。然而,这些方法若没有噪声对共振解调模拟电路的故障频率检测的影响规律做参照,通过降噪提高故障频率检测效率的方法就会缺少明确的参考。因此,单独研究噪声对轴承故障频率检测性能的影响,制定轴承噪声标准和相应的工艺标准很有必要。

## 1 共振解调模拟电路工作原理

共振解调模拟电路工作原理示意图及各部分组成如图 1 所示。

如图 1 所示,共振解调电路提取故障信号的过程分为 3 步进行:

- (1)高  $Q$  带通滤波器:输入端宽频带的故障信号在加速度的安装谐振频率处得到了大幅度加强,经过高  $Q$  带通滤波器(通带中心频率与加速度传感器的安装谐振频率一致)后,保留下冲击性的故障信号,而常规的干扰噪声由于其多分布在低频段内而得以消除。
- (2)包络峰值检波器:包络检波电路取出共振波的外包络,将高频共振波转化为低频包络信号。
- (3)低通滤波器:经此滤波器滤去残余的较高频域的干扰噪声。

收稿日期:2015-11-20 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzb.2016.04.12

基金项目:国家自然科学基金(11227201,11372199,11572206)

作者简介:马增强(1975-)男,博士,教授,主要从事网络化测控系统,数字图像处理与模式识别的研究。E-mail:06116272@stdu.edu.cn

马增强,李延忠,谷朝健.基于共振解调模拟电路的滚动轴承早期故障检测性能研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(4):72-76.

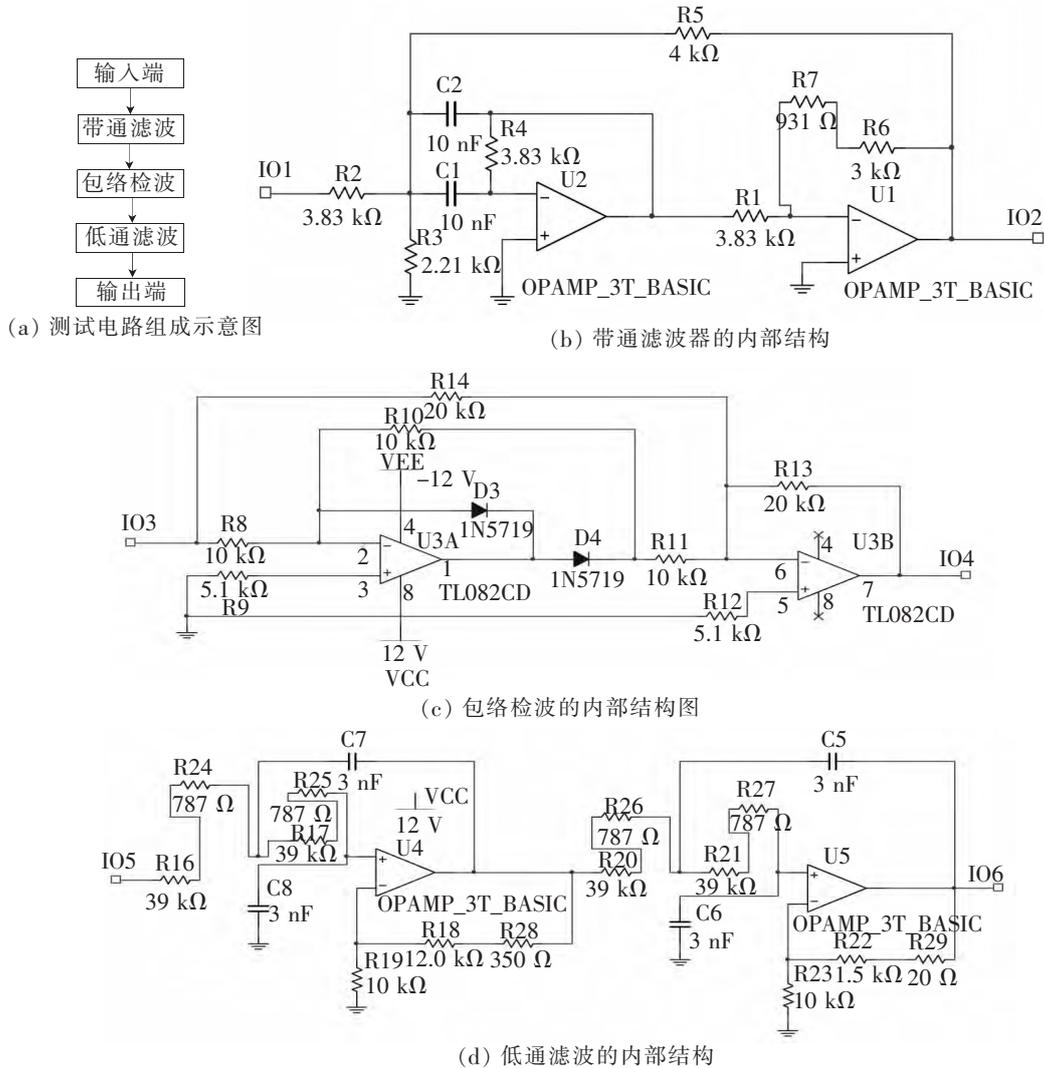


图 1 共振解调模拟电路工作原理图及内部结构图

## 2 轴承故障信号的数学模型

使用的输入信号的模型是根据实验中搭建的电路构造并定义为

$$m(t) = [C_1 \sin(2\pi f_3 t) + C_2 \sin(2\pi f_1 t)] C_3 \sin(2\pi f_2 t) + C_4 \sin(2\pi f_2 t) \quad (1)$$

式中,  $C_1, C_2, C_3, C_4$  为常数, 为实验方便, 初始值将  $C_1, C_2, C_3, C_4$  都取为 1;  $f_1$  为设定的故障频率;  $f_2$  为载波频率即轴承的工作频率;  $f_3$  为轴承的轴转频, 它的定义是滚动轴承的转速  $v$  与 60 的比值。实验中所用的滚动轴承型号为 N205EM, 参照该型号轴承的某种典型故障频率理论值来构造电路输入信号, 可得基于共振解调电路的故障诊断实验结果。图 2~图 4 分别为轴承滚动体、轴承内圈、轴承外圈的故障频谱图。

图中, 主瓣部分相当于有用信号, 旁瓣中其他突出的部分相当于噪声信号, 实验中可以改变转频信号  $\sin(2\pi f_3 t)$  的系数  $C_1$  来改变旁瓣部分的幅值, 即改变噪声和信噪比。

## 3 实验结果与分析

为定量评价滚动轴承微弱故障检测性能, 通过改变式(1)中的  $C_1$  以改变正弦和脉冲信号调制的信噪比测试出了故障特征频率在频谱图中对应幅值(本文统称为故障幅值)的影响曲线, 并讨论了带通滤波器品质因数  $Q$  调整规律。

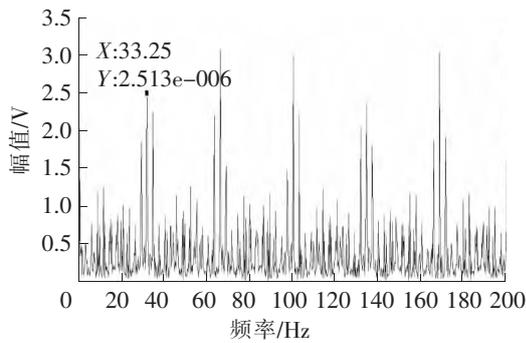


图 2 滚动体故障频谱图

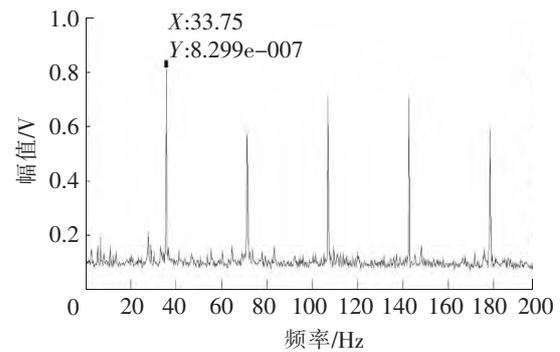


图 3 轴承内圈故障频谱图

### 3.1 正弦信号调制条件下共振解调电路故障检测性能分析

式(1)中的  $C_1$  的取值决定着电路输入信号的信噪比,因此可以通过记录不同  $C_1$  取值条件下的故障信号幅值来分析共振解调电路故障检测性能。理论上,噪声的放大倍数越大,对有用信号的干扰越大,输出的故障幅值越小,如图 5 为放大倍数为 5 的故障频率波形,图 6 的放大倍数为 50 的故障频率波形。

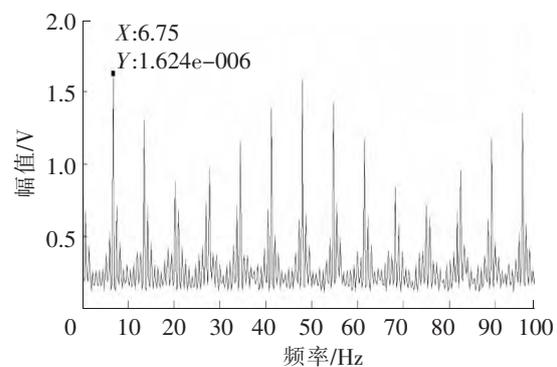


图 4 轴承外圈故障频谱

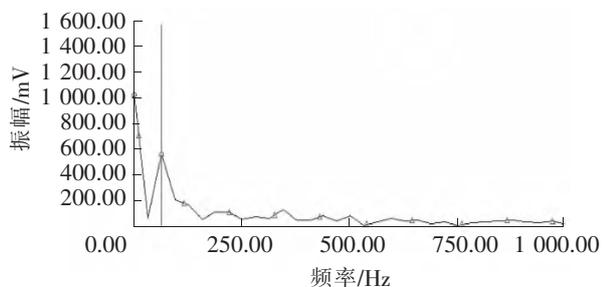


图 5 放大倍数为 5 的输出故障特征频率

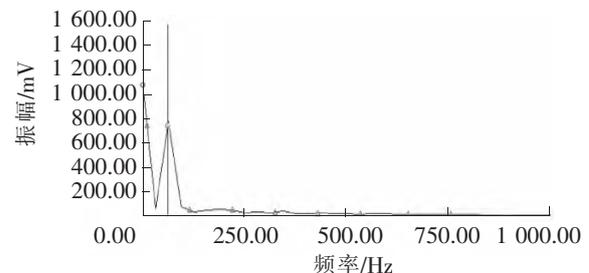


图 6 放大倍数为 50 的输出故障特征频率

从图 6 中可以看出,当噪声增大时,故障特征频率(此处为 60 Hz)的倍频成分,即 120 Hz,180 Hz,240 Hz,⋯,处也会出现故障。逐一增大噪声的放大倍数,分别设为 0,5,10,15,⋯,50,每个放大倍数测 3 组数据,取平均值并绘制曲线如图 7 所示,从图中可以得出以下结论:

(1)随着噪声放大倍数的增大即信噪比的减小,故障幅值减小。

(2)噪声放大倍数与故障幅值不是线性关系,而是更为复杂的函数关系。放大倍数为 0~15 时,曲线斜率较小,故障幅值下降较为缓慢;当放大倍数超过 20 后,曲线斜率增大,故障幅值下降比较迅速。

### 3.2 脉冲信号调制条件下共振解调电路故障检测性能分析

用 3.1 节中的方法绘制曲线如图 8 所示,由图 8 分析可得到如下结论:

(1)随着噪声放大倍数的增大即信噪比的减小,故障幅值减小。

(2)噪声放大倍数与故障幅值不是线性关系,而是更为复杂的函数关系。放大倍数为 5~10 和 25~30 时,故障幅值基本保持不变;放大倍数为 30~35 时,曲线斜率较大,故障幅值下降速度较快,其他情况下故障幅值基本以相同速率下降。

(3)用脉冲信号做调制比用正弦信号做调制测得的故障幅值小,而实际情况下的故障更接近于用脉冲信号做调制的信号。见图 9 所示。

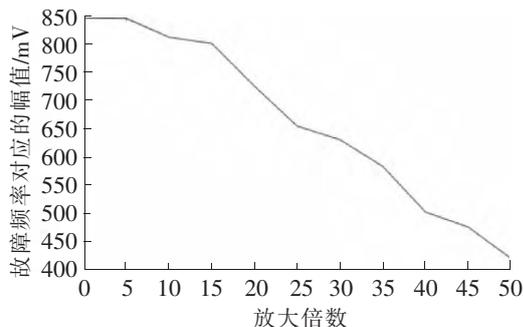


图 7 正弦调制信号信噪比-故障幅值的影响曲线

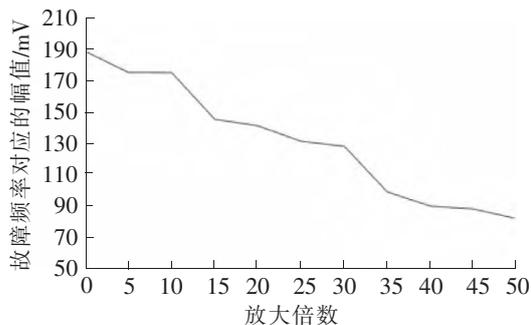


图 8 脉冲调制信号信噪比-故障幅值的影响曲线

### 3.3 带通滤波器品质因数 Q 调整规律

由品质因数 Q 等于中心频率除以带宽<sup>[11]</sup>,可推得

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_4}{R_{eq}}} \quad (2)$$

其中

$$R_{eq} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad (3)$$

用 3.1 节中介绍的方法,增大噪声放大倍数,记录故障幅值,并调整带通滤波器电路中的电阻 R2、R3、R4,使得 Q=5,10,15,⋯,40 8 个值,每个 Q 值测量一组数据,可得带通滤波器品质因数 Q 调整规律如图 10 所示,由图可得如下结论:

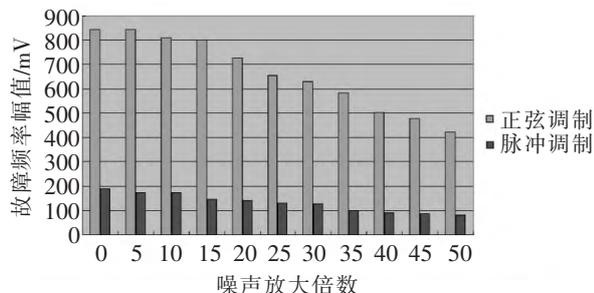


图 9 正弦调制与脉冲调制故障幅值的比较

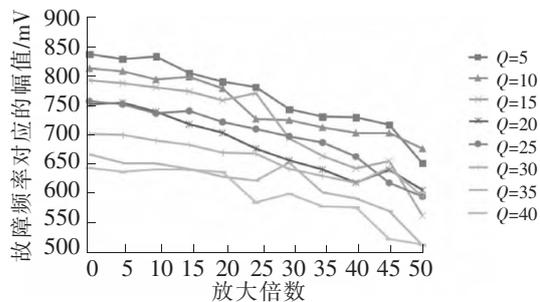


图 10 带通滤波器品质因数 Q 调整规律

(1)随着噪声放大倍数的增大,故障幅值减小。

(2)带通滤波器品质因数 Q 调整规律的曲线并不是严格下降的,例如在 Q=15 且噪声放大倍数为 20~25 时,和 Q=35 且放大倍数为 25~30 时,出现了故障幅值上升的现象。这与电路中的各元件、模块的性质有关,也和噪声的随机性有关,但曲线的总体趋势是下降的。

(3)随着 Q 的增加,故障幅值减小。图 11 为放大倍数为 5 时品质数与故障幅值的关系曲线。这是品质因数对带通滤波器选择性的结果,品质因数越大,带通滤波器的选择性越好,能够通过带通滤波器的信号成分越少,检测到的信号能量就越小。

(4)每个 Q 值曲线下下降幅度基本相同,说明 Q 的大小不会使曲线的下降变得剧烈或平缓,因此,不能通过改变 Q 的值减缓噪声对故障幅值的影响。

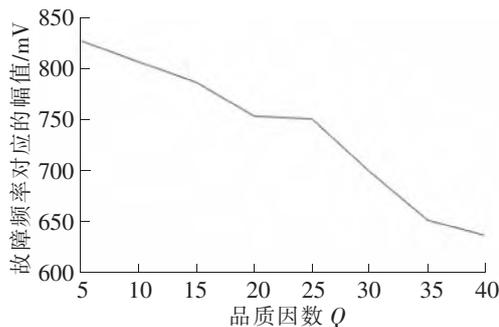


图 11 品质因数 Q 与故障幅值的关系

## 4 结论

通过建立轴承故障信号的数学模型,研究了共振解调电路对正弦和脉冲信号调制下的故障轴承振动加速度信号的检测性能分析,并讨论了调整带通滤波器品质因数  $Q$  对故障幅值曲线的影响规律。通过以上分析,可得结论如下:

(1)信噪比相同的情况下,脉冲调制比正弦调制得到的故障幅值小,而脉冲调制更接近于实际情况,可以推知实际情况下的故障将更加不容易被检测到;信噪比相同的情况下,随着带通滤波器的品质因数  $Q$  的增大,电路提取的故障特征频率的幅值减小; $Q$  对信噪比-故障幅值曲线的整体下降速率没有太大影响。

(2)为保证提取的故障频率不会加倍,应在故障信号与载波信号调制后加入一个载波信号,使得电路类似于幅度调制 AM。

(3)随着信噪比的减小,电路输出信号频谱中故障特征频率的幅值减小。

## 参 考 文 献

- [1]Tandon N, Choudhury. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings[J]. Tribology International, 1999, 32:469-480.
- [2] HoD, Randall R B. Optimization of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearings fault signals[J]. Mechanical systems and signal processing, 2000, 14:763-788.
- [3] 孟寒松. 用共振解调方法检测铁路滚动轴承[J]. 哈尔滨铁道科技, 1998, 3:48-52.
- [4] Nikolaou N G, Antoniadis I A. Demodulation of vibration of vibration signals generated by defects in rolling element bearing using complex shifted morlet wavelet[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2002, 16(4): 667-694.
- [5] Mcfadden PD, Smith JD. Model of the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing[J]. Journal of Sound and Vibration, 1984, 96: 69-82.
- [6] McFadden P D, Smith J D. Vibration monitoring of rolling element bearing by the high-frequency resonance technique-a review[J]. Int. J. Tribology, 1984, 17: 3-10.
- [7] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断——理论、方法、系统[M]. 北京:机械工业出版社, 1996.
- [8] 张功学, 马艳萍, 郑恩让. 故障诊断用共振解调器的研制[J]. 机械科学与技术, 1999, 18(6): 926-927.
- [9] 张超, 陈建军. 随机共振消噪和 EMD 分解在轴承故障诊断中的应用[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(1): 35-38.
- [10] 潘宏侠, 门吉芳. 粒子滤波在轴承故障振动信号降噪中的应用[J]. 振动, 测试与诊断, 2011, 31(3): 354-356.
- [11] 胡宴如. 高频电子线路[M]. 北京:高等教育出版社, 2005: 12-23.

## Research on Early Fault Detection Performance of Rolling Bearing Based on Simulation of Resonance Demodulation Circuit

Ma Zengqiang, Li Yanzhong, Gu Chaojian

(School of Electrical and Electronics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** The resonance demodulation circuit is one of the most commonly used techniques in fault diagnosis of rolling bearings, but the quantitative evaluation of the performance of the fault detection has not been reported. Therefore, this article uses fault bearing vibration acceleration signal which is respectively modulated by sinusoidal signal and pulse signal as an input of the circuit. The performance of the fault detection in the condition of different signal to noise ratio (SNR) is analyzed quantitatively, and the modulation law of the circuit key design parameter, the quality factor  $Q$  of the band-pass filter, is studied, which provided a reliable scientific basis for the practical engineering application of the resonance demodulation circuit in the early fault detection of bearing.

**Key words:** resonance demodulation analog circuit; SNR; fault detection performance