

基于互相关检测的滚动轴承实时故障诊断方法^{*}

马增强, 谷朝健, 王梦奇

(石家庄铁道大学电气与工程学院 石家庄, 050043)

摘要 提出了一种易于用模拟电路实现的基于互相关检测的滚动轴承实时故障诊断方法, 首先, 用两个加速度传感器在不同测点采集轴承振动信号, 将其分别送入相应通道的高 Q 带通滤波器来选择最优共振带; 然后, 将两路带通滤波器的输出信号进行互相关检测, 将互相关检测得到的信号经低通滤波器, 保留低频故障信号; 最后, 将低通滤波器输出的时域信号通过频谱分析仪显示滚动轴承故障特征频率的谱线以实现滚动轴承的实时故障诊断。用模拟电路的形式将该方法进行搭建, 并在 QPZZ-II 实测平台完成滚动轴承的实时故障诊断。结果表明: 该方法克服了单一信号源的局限性, 能利用互相关函数削弱共振带内部噪声, 使诊断结果具有更高的频谱辨识度, 而且能够用结构简单、易于维护的模拟电路实现, 对轴承实时故障诊断方法的应用与普及具有一定的参考价值。

关键词 滚动轴承; 实时故障诊断; 互相关检测; 模拟电路

中图分类号 TH165⁺.3; TN911

引言

随着机车技术水平和运行速度的提高, 对其机械零部件安全性提出了更高要求。滚动轴承是旋转机械中的重要基础元件, 也是旋转机械振动的主要激振源之一, 这使得轴承成为机车上最容易发生故障的零部件之一^[1]。滚动轴承的状态监测与故障诊断系统包括在线和离线监测与诊断系统, 离线系统不能实时监测与诊断, 存在安全隐患^[2]。因此, 实时监测轴承的工作状态是对轴承早期故障进行诊断的前提和必要环节。

目前, 能够实现对滚动轴承实时故障诊断的方法有共振解调法、冲击脉冲法^[3]、统计参数法^[4]、神经网络法^[5]、小波变换法^[6]和遗传算法^[7]等。这些方法中除共振解调方法外, 其余方法在滚动轴承实时故障诊断中的实现方式多基于数字芯片。在实际应用中, 信号采集电路中的 A/D 转换精度和转换速度是制约故障诊断系统准确性和实时性的重要因素, 现有的技术方案会导致常规冲击信号丢失和 A/D 采样频率不能覆盖故障信号等不足^[8]。数字信号处理需要通过算法优化来满足系统的实时性要求^[9], 现场可编程门阵列实现复杂算法时, 需要采用面积与速度互换的方法来降低算法的复杂度以提高算法的运行效率。这使滚动轴承实时故障诊断系统

成本高昂、管理和维护不易。相比于数字电路, 模拟电路不仅成本较低, 而且不需要 A/D 采样和考虑存储空间与运算时间, 因而成本低廉、结构简单、稳定性高和易于维护, 成为滚动轴承实时故障诊断的首选设计方法。共振解调方法虽然能够用简易的模拟电路搭建^[10], 但该方法使用单一信号源, 抗噪能力较差, 获取信息途径单一, 且自身对噪声的抑制能力较弱, 在诊断结果中滚动轴承故障特征频率常被强大的背景噪声所淹没。

为克服上述方法的缺陷, 笔者采用两个传感器拾取故障轴承的振动信号, 构成的多维信息消除了共振解调单维信息源的局限性^[11]。首先, 利用带通滤波选择两路振动信号谱峭度预处理所得到的最优共振带; 然后, 将两路共振带信号经互相关检测, 消除共振带内部噪声, 将相关检测得到的时域信号经低通滤波器滤除高频噪声; 最后, 通过经频谱分析仪显示滚动轴承的故障特征频率, 并与滚动轴承故障特征频率的理论值进行比较以确定故障类型, 完成故障诊断。

1 方法原理

实际应用中, 由于互相关法运算简单、检测效果信噪比高, 应用最为广泛^[12]。相关检测利用相关原理, 通过自相关或互相关运算, 找出信号两部分之间

^{*} 国家自然科学基金资助项目(11227201, 11372199, 11572206); 河北省自然科学基金资助项目(A2014210142)
收稿日期: 2016-06-06; 修回日期: 2016-08-02

或两个信号之间的关系并根据相关性进行检测和提取。利用相关检测技术,可以判断随机信号中是否含有周期分量,进行微弱信号提取^[13],图1为实时相关检测流程图。

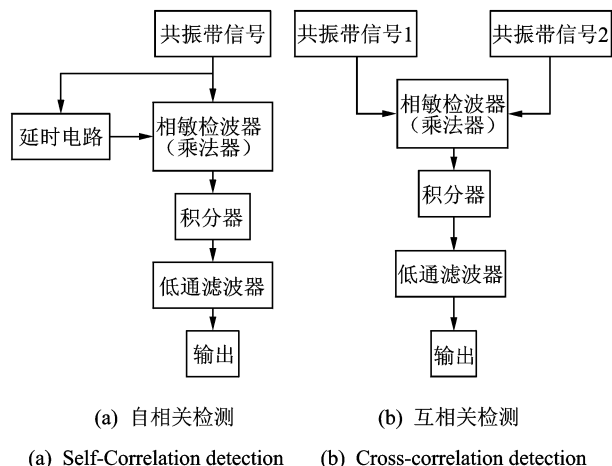


图1 相关检测流程图

Fig. 1 Flow chart of correlation detection

加速度传感器拾取的振动信号经共振解调带通滤波器选择的共振带信号可描述为高频谐振信号与低频振动信号的调制信号叠加噪声的总和。实时相关检测提取低频微弱故障信号的过程如下。

1) 待测信号为

$$U_A = U_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \sin(\omega_2 t + \varphi'_1) + S_1(t)$$

$$U_B = U_2 \sin(\omega_3 t + \varphi_2) \sin(\omega_2 t + \varphi'_2) + S_2(t')$$

其中: ω_1, ω_3 分别为两路信号的谐振频率; ω_2 为待提取的故障信号频率; φ_1 为 U_A 共振带信号的所带相位; φ'_1 为共振带信号的所带相位; φ_2, φ'_2 为 U_B 两种信号各自所带的相位; S_1, S_2 分别为两路信号的噪声部分; t 是指以 U_A 路的时间为标准; 噪声 $S(t)$ 的成分较为复杂且两路的延时不同, 故以 t' 代指。

由于两路传感器的安装位置不同, 同一振动源到两个传感器的传播路径不完全相同, 从而导致传播时间上也会有差异, 即信号延时。

2) 相敏检波器输出

$$\begin{aligned} U_A U_B &= [U_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \sin(\omega_2 t + \varphi'_1) + S_1(t)] \cdot \\ & [U_2 \sin(\omega_3 t + \varphi_2) \sin(\omega_2 t + \varphi'_2) + S_2(t')] = \\ & U_1 U_2 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \sin(\omega_2 t + \varphi'_1) \sin(\omega_3 t + \varphi_2) \cdot \\ & \sin(\omega_2 t + \varphi'_2) + f_1[S_1(t)] + f_2[S_2(t')] = \\ & \frac{U_1 U_2}{4} \{ \cos[(\omega_1 + \omega_3)t + \varphi_1 + \varphi_2] - \cos[(\omega_1 - \omega_3)t + \\ & \varphi_1 - \varphi_2] \} [\cos(2\omega_2 t + \varphi'_1 + \varphi'_2) - \cos(\varphi'_1 - \varphi'_2)] + \\ & f[S_1(t), S_2(t')] \end{aligned}$$

相敏检波器实现了两路信号的相乘, 同时强化了振动信号的幅值, 为实现相关运算提供了基础。

3) 积分器输出

$$\begin{aligned} R_{AB} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T U_A U_B dt = \\ & \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_1 U_2}{4} \{ \cos[(\omega_1 + \omega_3)t + \varphi_1 + \varphi_2] - \\ & \cos[(\omega_1 - \omega_3)t + \varphi_1 - \varphi_2] \} \cdot \\ & [\cos(2\omega_2 t + \varphi'_1 + \varphi'_2) - \cos(\varphi'_1 - \varphi'_2)] dt + \\ & \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f[S_1(t), S_2(t')] dt = \\ & \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{U_1 U_2}{4T} \int_0^T \cos[(\omega_1 + \omega_3)t + \varphi_1 + \varphi_2] \cdot \\ & [\cos(2\omega_2 t + \varphi'_1 + \varphi'_2) - \cos(\varphi'_1 - \varphi'_2)] dt - \\ & \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{U_1 U_2}{4T} \int_0^T \cos(\varphi'_1 - \varphi'_2) \cdot \\ & \cos[(\omega_1 + \omega_3)t + \varphi_1 + \varphi_2] dt - \\ & \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{U_1 U_2}{4T} \int_0^T \cos[(\omega_1 - \omega_3)t + \varphi_1 - \varphi_2] \cdot \\ & [\cos(2\omega_2 t + \varphi'_1 + \varphi'_2) - \cos(\varphi'_1 - \varphi'_2)] dt \end{aligned}$$

积分器的输出即为相关检测的结果, 因为信号与噪声是不相关的, 根据相关函数的性质可知, 噪声项积分为零, 即相关检测的结果中滤除了噪声, 只留下和谐振频率与故障频率有关的信号。

4) 低通滤波器输出

$$\begin{aligned} R'_{AB} &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{-U_1 U_2}{4T} \int_0^T \cos[(\omega_1 - \omega_3)t + \varphi_1 - \varphi_2] \cdot \\ & [\cos(2\omega_2 t + \varphi'_1 + \varphi'_2) - \cos(\varphi'_1 - \varphi'_2)] dt = \\ & F(\omega_2 t) \end{aligned}$$

低通滤波器滤除了积分电路输出结果中有关高频谐振的信号, 只保留了与低频故障有关的信号。对于低通滤波器输出信号表达式中的积分因子 $\cos[(\omega_1 - \omega_3)t + \varphi_1 - \varphi_2]$, 在互相关检测中, 带通滤波器通常选择同一种参数, 选取的谐振频率相等, 即 $\omega_1 = \omega_3$, 积分因子 $\cos[(\omega_1 - \omega_3)t + \varphi_1 - \varphi_2]$ 为常数, 所以低通滤波器输出信号 R'_{AB} 可描述为一个只与故障频率有关的信号 $F(\omega_2 t)$ 。在自相关检测中, U_B 为 U_A 的延时信号, 频率不发生变动, 即 $\omega_1 = \omega_3$, 所以有 $R'_{AB} = F(\omega_2 t)$ 。

2 方法流程

自相关检测本质上是单一信号源经延时器分离出的两路信号, 相比于互相关检测, 自相关检测实质上并没有摆脱单一信号源的局限性。笔者以互相关检测对滚动轴承进行实时故障诊断, 图2为其流程图。

基于互相关检测的滚动轴承实时故障诊断方法步骤如下:

1) 两个传感器将故障轴承振动信号分为两个通道进行独立采集, 一方面为互相关分析提供了延

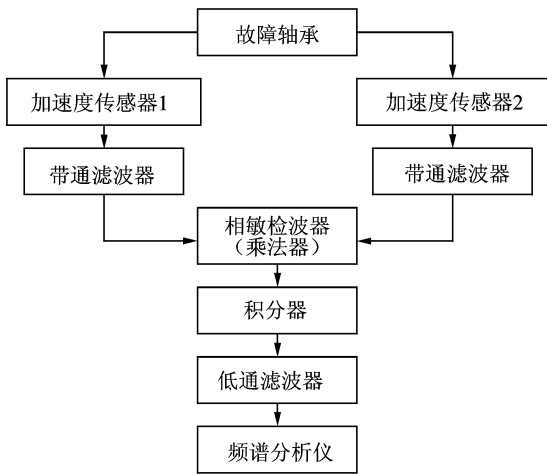


图 2 基于互相关检测的滚动轴承实时故障诊断方法流程

Fig. 2 Flow chart of real-time fault diagnosis method for rolling bearings based on cross-correlation detection

时,另一方面确保了两路信号的独立性;

2) 将两通道信号分别通过参数相同的高 Q 带通滤波器进行初步降噪,保留故障信息较明显的最优共振带信号;

3) 将两路带通滤波器的输出结果经相敏检波器实现信号之间的相乘,随后将相乘的结果送入积分器,实现相关检测,利用互相关函数的特性进一步去噪;

4) 将积分器的输出信号送入低通滤波器,滤除高频信号,提取低频故障信号,通过频谱分析仪显示故障特征频率值,并与滚动轴承故障特征频率的理论值进行比较,确定故障类型。

3 电路实现

笔者所提方法的整体电路设计如图 3 所示,其中,激励源为两个传感器采集到的振动信号。低通滤波器模块后接频谱分析仪,其目的是实时显示诊断结果的频域信息。笔者使用正反馈带通滤波

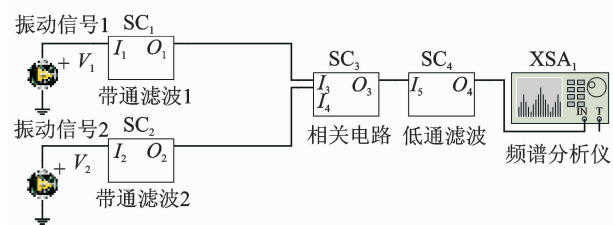


图 3 基于互相关检测的滚动轴承实时故障诊断电路

Fig. 3 Real-time fault diagnosis of rolling bearing based on cross-correlation detection

器^[14],如图 4 所示。相比于目前常用的压控电压源带通滤波器和无限增益多路反馈带通滤波器,正反馈带通滤波器能够获得较高的品质因数 Q,从而截取信号的带宽较窄,所截信号噪声较小。

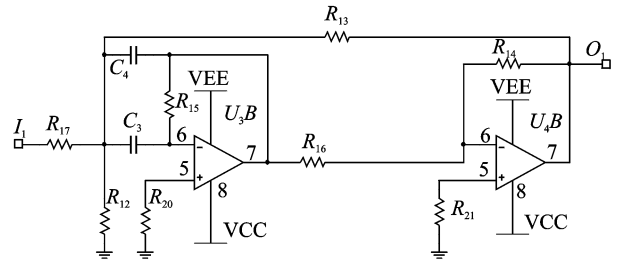


图 4 带通滤波器电路设计

Fig. 4 Circuit design of band-pass filter

如图 5 所示,相关电路由相敏检波器与积分器的串联构成。相敏检波器实质上是一种模拟乘法器,具有信号频谱迁移^[15]的作用,是相关器的核心部分。笔者采用平衡调制解调器芯片 AD630 搭建相敏检波器,该芯片具有极高的精度、非常低的通道串扰、较高的共模抑制比和增益调节等优点^[16]。积分器一种基于第 2 代电流传输器的电流模式积分器电路^[17],CCII 模块具有自偏置、宽带、低功耗、电流和电压传输误差小等优点。笔者以 AD844 芯片搭建 CCII 模块,该电路有较大的电流输入范围。

笔者使用 Sallen-Key 低通滤波器^[18],如图 6 所示。该滤波器网络元件少,特性容易调整,输出阻抗低,元件分布范围小,能够获得较高的同相增益。

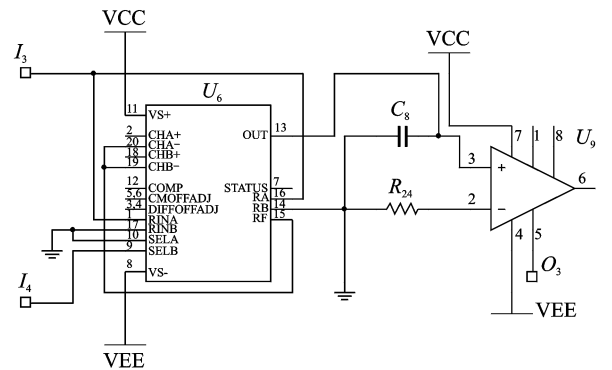


图 5 相关检测电路设计

Fig. 5 Circuit design of correlation detection

4 滚动轴承实时故障诊断分析

基于 QPZZ-II 旋转机械振动分析与故障模拟实验平台进行本次滚动轴承实时故障诊断分析,平台机构如图 7(a)所示,测试对象型号为 N205EM 的滚动轴承的外圈故障,传感器⑤,⑥的安装位置如图 7(b)所示。轴承测试参数如表 1 所示。本次诊断过

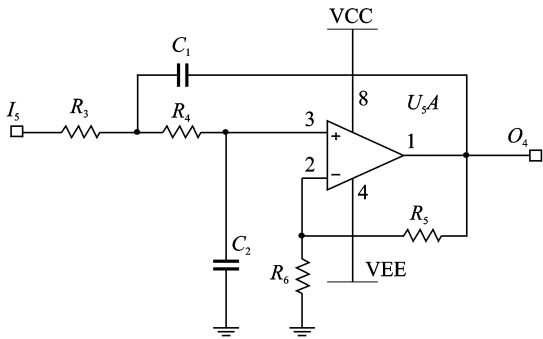
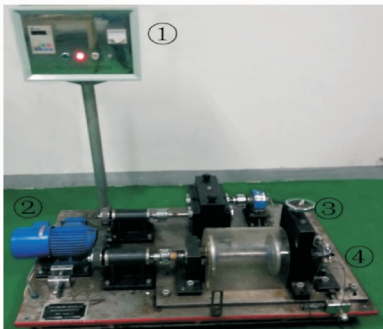


图6 低通滤波器电路设计

Fig.6 Circuit design of low-pass filter

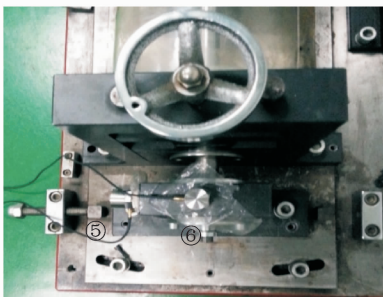
程仅以模拟元器件搭建的共振解调电路和基于互相关检测的轴承故障诊断电路进行实时测试,并对同一故障轴承的实时诊断结果进行对比分析。图7(b)中传感器①为通道1的信号源,为共振解调方法和基于互相关检测的轴承故障诊断方法的公共信号源。

图8(a)和图8(b)分别为两个加速度传感器拾取的原始振动信号的时域图。图8(c)和图8(d)为两路信号通过带通滤波器的初步去噪结果。可以看



(a) QPZZ-II 旋转机械振动分析与故障模拟实验平台

(a) QPZZ-II rotating machinery vibration analysis and fault simulation platform



(b) 传感器安装位置

(b) The installation position of sensor

①为操作平台;②为驱动电机;③为轴承底座;④为轴承;⑤,⑥为传感器安装位置

图7 实验平台及传感器安装位置

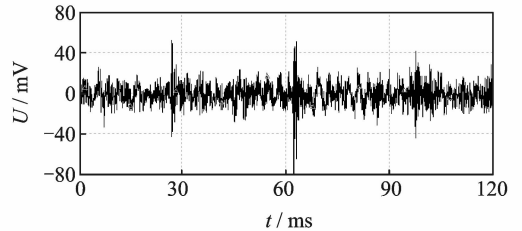
Fig.7 The experimental platform and the sensors installation location

表1 轴承测试参数

Tab.1 Bearing test parameters

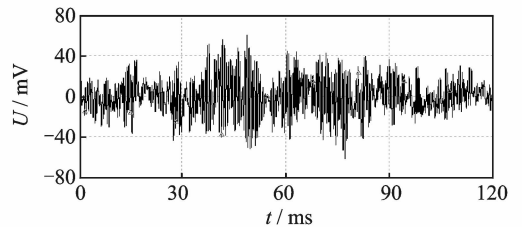
中径/mm	滚子直径/mm	接触角/ $^\circ$	滚子个数	转速/ $(r \cdot \text{min}^{-1})$	故障特征频率/Hz
38.5	7.5	0	13	310	27.04

出,带通滤波器的输出信号接近于一个高频谐振信号与低频振动信号的调制信号叠加噪声的总和。图8(e)为两路带通滤波器的输出信号经相敏检波器处理后输出的时域波形,图中故障信号的冲击相比于噪声更加明显。图8(f)为积分器的输出结果。可以看出,当出现故障冲击时,积分器中的电容会迅速充电,输出结果会对应产生一个电压尖峰;冲击消失时,电容会放电,将电荷量保持在一个较低的水平,以等待下一个故障信号的冲击产生尖峰。图8(g)为将积分器的输出结果经过低通滤波器滤除高频信



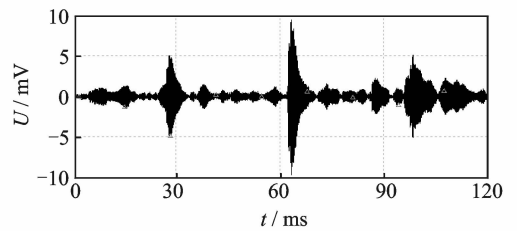
(a) 通道1原始振动信号时域波形

(a) Channel 1 original vibration signal waveform in time domain



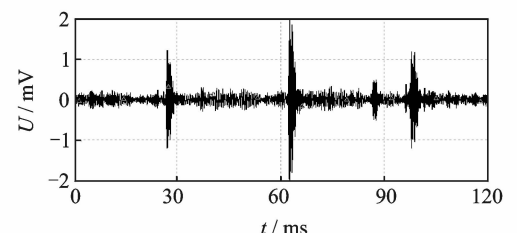
(b) 通道2原始振动信号时域波形

(b) Channel 2 original vibration signal waveform in time domain



(c) 通道1带通滤波器输出时域波形

(c) Channel 1 band-pass filter output waveform in time domain



(d) 通道2带通滤波器输出时域波形

(d) Channel 2 band-pass filter output waveform in time domain

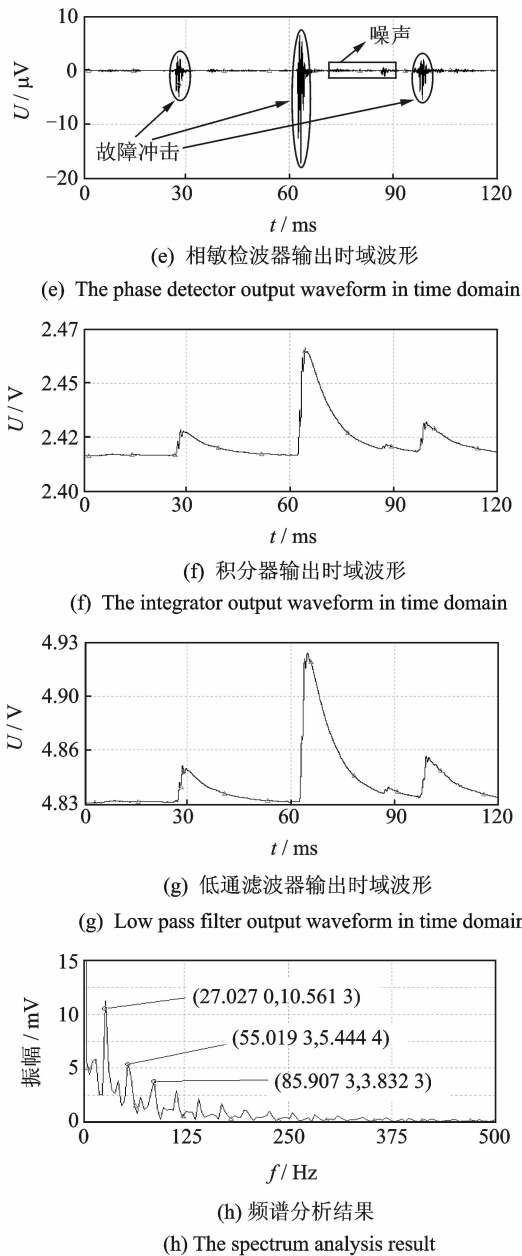


图 8 基于互相关检测的滚动轴承实时故障诊断

Fig.8 Real-time fault diagnosis of rolling bearing based on cross-correlation detection

号的结果,即诊断结果的时域图。

通过对比图 8(h)与图 9 两种方法的实时诊断结果频谱可知,基于互相关检测的滚动轴承实时故障诊断方法能够成功提取故障特征频率及其二倍频、三倍频等。相比于笔者所提方法,共振解调方法只能勉强提取出特征频率的一倍频,高阶倍频已被噪声淹没,这种孤立的谱线在实际工况下很容易被误诊为保持架故障产生的外孤谱^[19]。依据文献^[20],笔者定义滚动轴承故障诊断结果的频谱辨识率为特征频率谱线最大幅值与噪声幅值平均值的比

值 $R_s = \frac{\text{Max}(A_f)}{\text{Average}(A_{ns})}$ 。从图 8(h)与图 9 中标注的指示线可看出,基于互相关检测的滚动轴承实时故障诊断方法提取的一倍频振幅为 10.561 3 mV,并将噪声基本控制在 5.00mV 以下,而共振解调方法提取的一倍频振幅为 293.9028 μV ,噪声基本控制在 166.67 μV 以下,所以笔者所提方法的频谱辨识率为 $\frac{10.5613 \text{ mV}}{5.00 \text{ mV}} = 2.11$,共振解体方法的频谱辨识率为 $\frac{293.9028 \mu\text{V}}{166.67 \mu\text{V}} = 1.76$ 。这说明了基于互相关检测的滚动轴承实时故障诊断方法比共振解调方法具有更高的频谱辨识率、更强的故障特征提取能力和抗噪、降噪能力。

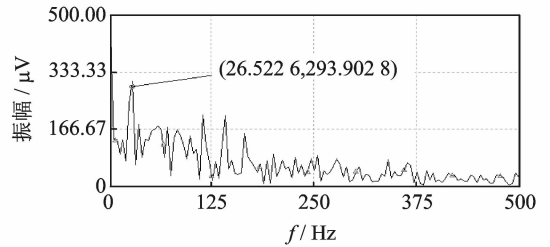


图 9 共振解调方法诊断结果频谱分析

Fig.9 Spectral analysis of resonance demodulation method

5 结 论

1) 基于互相关检测的滚动轴承实时故障诊断方法采用两个加速度传感器拾取轴承振动信号,由此克服了单一信号源对信号采集维度的局限性,提高了振动信号的真实性和可靠性。

2) 笔者所提方法利用互相关检测,削弱了所选共振带信号的内部噪声,降低了带内噪声对诊断结果的影响,使故障特征频率更加突出,提高了诊断结果频谱辨识率。

3) 该方法以结构简单的模拟电路搭建,实现滚动轴承的实时故障诊断,对旋转机械实时故障诊断的普及具有一定的参考价值。

参 考 文 献

[1] 梁瑜. 地铁列车轴承故障诊断及在途诊断系统研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.

[2] 刘佩森. 基于共振解调理论的滚动轴承故障诊断仪研究[D]. 成都:电子科技大学, 2014.

[3] 李珊珊. 基于冲击脉冲法的便携式轴承故障检测仪的设计与改进[J]. 仪表技术与传感器, 2014(4): 106-107.

Li Shanshan. Design and improvement of portable bearing fault detector based on shock pulse method

- [J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(4):106-107. (in Chinese)
- [4] 任锴胜, 王增才, 王保平. 基于 DSP 的滚动轴承在线故障诊断系统[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2011, 33(2):247-250.
Ren Kaisheng, Wang Zengcai, Wang Baoping. A bearing on-line diagnosis system based on DSP[J]. Journal of WUT: Information & Management Engineering, 2011, 33(2):247-250. (in Chinese)
- [5] 谢志勇. 基于 DSP 和 BP 神经网络的旋转机械在线故障诊断系统[J]. 仪表技术与传感器, 2011(3):64-70.
Xie Zhiyong. On-line fault diagnosis system of Rotary machine based on DSP and BP neural network[J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(3):64-70. (in Chinese)
- [6] 李辉, 郑海起, 唐力伟. 基于改进双树复小波变换的轴承多故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1):53-59.
Li Hui, Zheng Haiqi, Tang Liwei. Bearing multi-faults diagnosis based on improved dual-tree complex wavelet transform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1):53-59. (in Chinese)
- [7] 马文朋, 张俊红, 马梁, 等. 改进的经验模式分解在机械故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(4):637-644.
Ma Wenpeng, Zhang Junhong, Ma Liang, et al. Applications of improved empirical mode decomposition in machinery fault diagnosis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(4):637-644. (in Chinese)
- [8] 崔健, 何鸿云. 走行部故障实时监测及诊断系统的数字化实现方式[J]. 电力机车与城轨车辆, 2015, 38(4):53-55.
Cui Jian, He Hongyun. Digitized solution for the running gear real-time fault monitoring and diagnosis system[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38(4):53-55. (in Chinese)
- [9] 孙歆. 嵌入式轴承故障诊断系统的 DSP 端设计[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [10] 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.
Zhang Gongxue, Ma Yanping, Zheng Enrang. The development of a resonant demodulator used in failure diagnosis[J]. Mechanical Science and Technology, 1999, 18(6):926-927. (in Chinese)
- [11] 张志刚. 轴承故障实时监测系统的设计与应用研究[D]. 天津:天津大学, 2005.
- [12] 杨志超. 电磁式可控震源地震信号检测关键技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2015.
- [13] 李锐, 何辅云, 夏玉宝. 相关检测原理及其应用[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2008, 31(4):573-579.
Li Rui, He Fuyun, Xia Yubao. Theory of correlation detection and its application[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2008, 31(4):573-579. (in Chinese)
- [14] 约翰逊 D E, 希尔伯恩 J L. 有源滤波器的快速使用设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 1980:139-140.
- [15] 闫行, 朱荣. 基于传感器微弱电流矢量检测电路的设计[J]. 自动化与仪表, 2011(1):13-16.
Yan Xing, Zhu Rong. Design of the weak current vector measurement based on sensors[J]. Automation & Instrumentation, 2011(1):13-16. (in Chinese)
- [16] 蒋鹏, 赵国忠. TDS 用锁相放大器电路设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(4):24-28.
Jiang Peng, Zhao Guozhong. Design of lock-in amplifier circuit for TDS[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(4):24-28. (in Chinese)
- [17] 邓盼盼. 一种基于第二代电流传输器的积分器设计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(13):135-141.
Deng Panpan. Design of an integrator based on second generation current conveyors[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(13):135-141. (in Chinese)
- [18] 林斯波, 葛愉成. 基于 Sallen-Key 滤波器的主成形成大电路的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(4):408-416.
Lin Sibao, Ge Yucheng. Study of main shaping amplifier circuit based on Sallen-Key filter[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, 35(4):408-416. (in Chinese)
- [19] 黄贵发, 王定晓, 唐德尧. 用于城市轨道交通车辆走行部故障的车载在线实时诊断与监测系统[J]. 城市轨道交通研究, 2015(9):31-36.
Huang Guifa, Wang Dingxiao, Tang Deyao. On-line real-time fault diagnosis and monitoring system for urban rail transit vehicle bogie[J]. Urban Mass Transit, 2015(9):31-36. (in Chinese)
- [20] 杨霞菊, 刘稚均, 李华彪. 频谱识别的一般方法[J]. 噪声与振动控制, 1997(4):10-11.
Yang Xiaju, Liu Zhijun, Li Huabiao. The general method of spectrum recognition[J]. Noise and Vibration Control, 1997(4):10-11. (in Chinese)



第一作者简介:马增强,男,1975年4月生,教授。主要研究方向为机车车辆状态监测与故障诊断。曾发表《Application of combined slice analysis based on MID algorithm in fault diagnosis of rolling element bearings》(《Journal of Vibration and Shock》2015, Vol. 135, No. 2)等论文。
E-mail:mzqlunwen@126.com

