基于 Hilbert 包络解调的增速机滚动轴承故障诊断

郝富贵[1,2],任学平[2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司设备工程部,内蒙古 包头 0104010;
2. 内蒙古科技大学机械工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要:考虑到故障诊断涉及机械、信号处理、高等数学、振动学等多门学科交叉等特点,结合现场设备工况以及点检人员具体情况,提出利用 Hilbert 包络解调对滚动轴承工作状态进行判别。通过使用封装了 Hilbert 包络解调电路的智能点检仪对现场数据进行分析,验证了此方法在轧机增速机滚动轴承故障诊断过程中的实用性与有效性。

关键词:增速机;滚动轴承;包络解调;故障诊断

中图分类号:TH133.33 **文献标识码**:B **文章编号**:1009-5438(2020)04-0063-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.04.017

Fault Diagnosis for Rolling Bearing of Speed Increasing Machine Based on Hilbert Envelope Demodulation

Hao Fu-gui[1,2], *Ren Xue-ping*[2]

(1. *Equipment Engineering Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: It is proposed to discriminate working conditions of rolling bearing with Hilbert envelope demodulation in consideration of the fault diagnosis involving such disciplines as machinery, signal processing, advanced mathematics and vibration as well as combining with the working conditions of field equipment and specific circumstances of spot check personnel. The practicability and effectiveness of the method in fault diagnosis for rolling bearing of speed increasing machine for rolling mill are verified through analyzing field data with the intelligent point detector encapsulated with Hilbert envelope demodulation circuit.

Key words: speed increasing machine; rolling bearing; envelope demodulation; fault diagnosis

滚动轴承作为旋转机械的重要的基础部件,在钢铁企业炼铁厂高炉、炼钢厂转炉、轧钢厂不同类型的轧机上应用非常广泛。由于工作环境的恶劣,钢厂的设备长期在复杂的工况下工作造成轴承故障发生率比较高[1-3],一旦滚动轴承出现故障,轻则导致生产设备停产,重则导致严重事故发生,威胁现场工作人员的生命安全,造成不良影响。除此之外,由于冶金设备滚动轴承处于复杂工作环境下,其振动信息受设备中其他激励源信号的调制与干扰,往往呈现出复杂的多耦合性与非平稳性特征,且噪声背景影响严重,因此在故障诊断过程中,需要将被调制的轴承振动信息提取出来。考虑到故障诊断涉及机

收稿日期:2020-05-07

作者简介:郝富贵(1982-),男,内蒙古包头市人,硕士,工程师,现从事设备运行管理工作。

械、信号处理、高等数学、振动学等多门学科交叉的特点，钢厂的工作环境以及现场设备维护人员受教育程度、工作态度及工作素养参差不齐，提出利用Hilbert包络解调技术对冶金设备滚动轴承进行故障判别。在现场实际操作环节，结合工人实际操作水准，将Hilbert包络解调电路封装入智能点检仪的无线传感单元内，利用仪器设备进行现场数据诊断。

1 Hilbert包络解调技术诊断原理

传统的滚动轴承故障诊断技术是建立在对原信号进行各类谱图分析、寻找故障频率谱线的基础上进行的，通常情况下，在对原信号直接进行快速傅氏变换所得幅值谱中，无法直接找到故障频率成分，影响了诊断过程的顺利进行。Hilbert包络解调技术[4]是在Hilbert变换基础上提出的一种信号分析方法，此类方法所得谱图相较于传统幅值谱在谱线分布成分上更为简洁，可以直接找到振动信号的故障频率成分，提高了故障诊断过程的效率与准确性，利用Hilbert包络进行故障诊断流程如图1所示。



图1 Hilbert包络解调技术故障诊断原理

由图1中可以看出，故障诊断最终结果是参照包络幅值谱得出的，而包络幅值谱是由原信号的Hilbert包络信号求得的。Hilbert包络解调流程[5]如下：

首先，对原振动信号进行Hilbert变换，变换公式如式(1)所示。

$$\hat{X}(t) = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{x(t)}{t-\tau}d\tau \tag{1}$$

式中，$x(t)$为原振动信号，$\hat{X}(t)$为变换后所得结果。

然后，利用原信号$x(t)$与Hilbert变换所得结果可以得到复数域的解析信号，如式(2)所示。

$$\tilde{x}(t) = x(t) + j\hat{X}(t) \tag{2}$$

式中，$\tilde{x}(t)$为解析信号；利用解析信号的实部与虚部求得时域包络信号$A(t)$如式(3)所示。

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{X}(t)^2(t)} \tag{3}$$

最终，将时域包络信号进行快速傅里叶变换，获得Hilbert包络幅值谱，结合特征频率进行故障判别。

2 Hilbert包络对故障信号的处理

为对比Hilbert包络谱与普通幅值谱在故障诊断中的实际效果，构造仿真信号进行试验，仿真信号$x(t)$的时域波形如图2所示。对原信号求取幅值谱与包络谱，所得结果分别如图3、图4所示，对比两图可以发现，在图3幅值谱中故障频率对应的谱线被其他嘈杂成分给埋没，无法进行故障判别，与图3相比，在图4可以在最为突出的谱线准确找到原信号故障频率近似成分99.61 Hz及其倍频，误差不足1 Hz，可以准确进行故障判别，证实了包络谱相较于普通幅值谱的优越性。

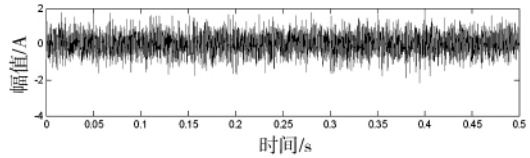


图2 仿真信号时域波形

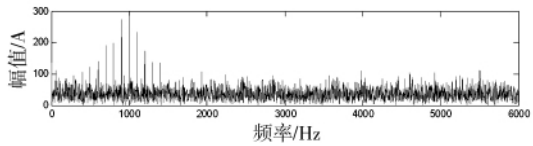


图3 仿真信号幅值谱

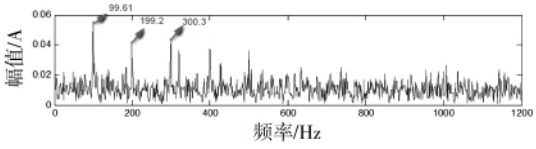


图4 仿真信号包络谱

3 轧机增速机滚动轴承中的应用

结合包钢的实际情况和现场对滚动轴承诊断的需求，将Hilbert包络解调技术封装在了智能点检仪的无线传感单元内。无线传感单元内置包络解调电路，提取被调制的滚动轴承的故障信号，计算其包络值大小和频谱分布。某钢厂长材厂棒材作业区新高线区域精轧增速机转速1 077 r/min(联调轧制)；输出端轴向定位轴承为角接触轴承。此机器轧制工况为轧制Φ8 mm、Φ10 mm螺纹钢。通过测量计算得

到输出端角接触球轴承的故障特征频率见表 1。

表 1　输出端角接触球轴承的故障特征频率　Hz

故障部位	内圈	外圈	滚珠	保持架
特征频率	772.596	515.064	213.778 8	23.412

现利用智能点检仪调用包络谱程序，对机械 5 月 29 日与 6 月 3 日的振动信息进行跟踪分析。首先，计算 5 月 29 日 22 架锥箱主轴输出端包络图与包络谱，两类谱图如图 5 所示，在包络图中可以找到 500 Hz 的边频成分，与轴承外圈故障频率较为接近，对信号进行包络谱分析可以发现，在谱图中分别出现了外圈故障信号的三次谐波(倍频) 成分，初步判断轴承外圈存在故障。然后，继续对 6 月 3 日主轴输出端的包络图与包络谱进行分析，所得图谱如图 6 所示，一方面，对比图 5 与图 6 的包络图可以明显看出，图 6 包络图中的边频带能量得到了增强，这直接反映了设备部件故障程度的恶化; 另一方面，图 6包络谱中外圈故障频率及倍频成分相较于图 5 中包络谱中得到了显著增强，这证实了轴承外圈存在故障且故障不断恶化。除此之外，轴承转频能量非常突出，这说明主轴转频与某一故障频率形成调制信息。综上所述，此设备滚动轴承故障属于综合故障。最后，对设备进行开箱检修，发现轴承出现外滚道，内滚道综合缺陷。外滑道剥落较严重，内滑道剥落较轻，轴承故障如图 7 所示，通过现场实验验证了 Hilbert 包络解调技术的工程实用性以及操作可行性。

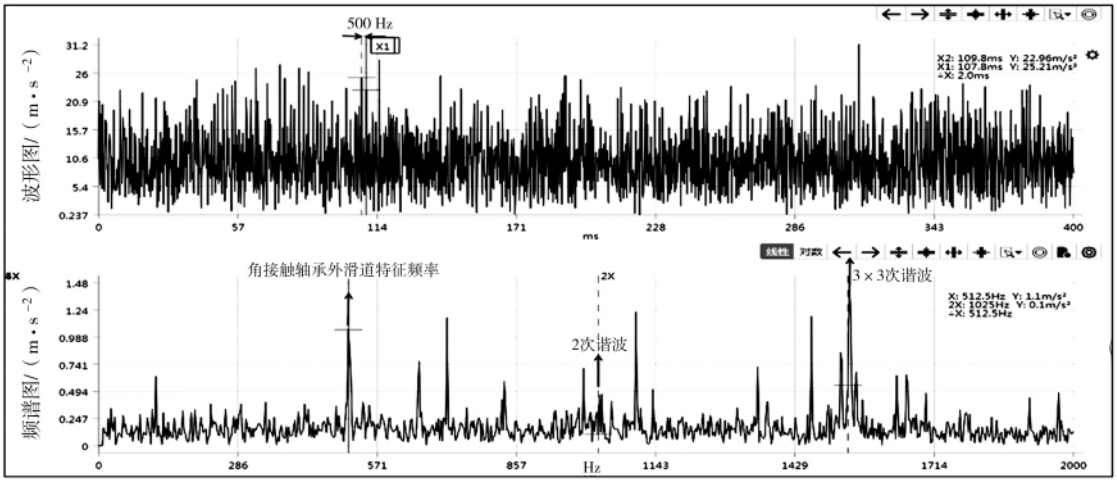


图 5　5 月 29 日主轴输出端包络图与包络谱

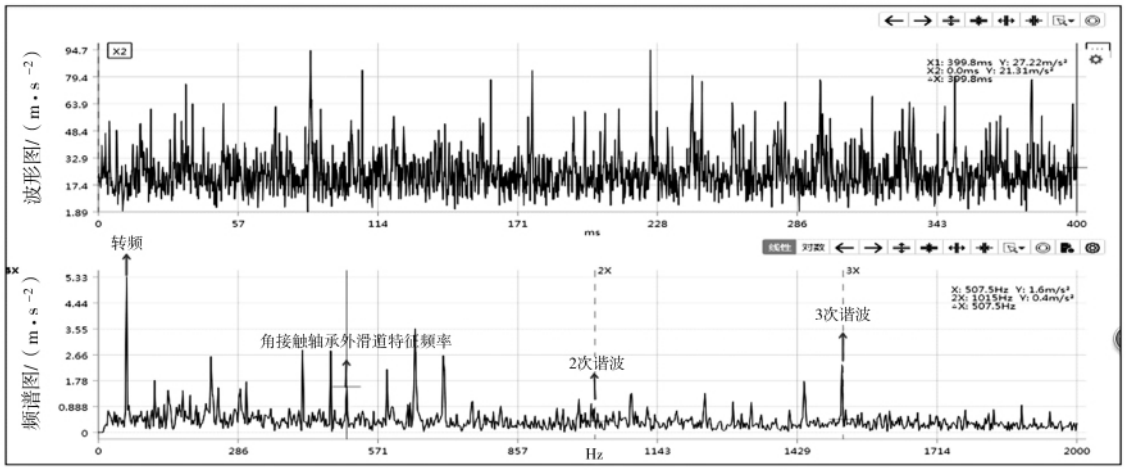


图 6　6 月 3 日主轴输出端包络图与包络谱



图7 开箱检修滚动轴承内圈、外圈故障

4 结束语

利用Hilbert包络解调技术进行冶金设备滚动轴承故障诊断，通过对比得出Hilbert包络谱更优越；将包络解调技术封装入智能点检仪内，实现了对某钢厂轧机增速机滚动轴承的故障判别，验证了Hilbert包络解调技术的实用性能。

参 考 文 献

[1] 张建宇，高立新，崔玲丽，等. 基于小波变换的轧机振动信号降噪技术研究[J]. 振动与冲击，2007，26(5)：71－74.

[2] 沈志熙，黄席，马笑潇. 基于EMD多模态特征融合支持向量机的故障诊断[J]. 控制与决策，2009，24(6)：889－893.

[3] 戴桂平，刘彬. EMD相关度去噪及其在轧机信号处理中的应用[J]. 电子器件，2009，32(1)：191－199.

[4] 马波，魏强，徐春林，等. 基于Hilbert变换的包络分析及其在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 北京化工大学学报，2004，31(6)：95－97.

[5] 张家凡. 振动信号的包络解调分析方法研究及应用[D]. 武汉：武汉理工大学，2008.

(上接第58页)

参 考 文 献

[1] 高仲. 异型坯铸坯缺陷分析[J]. 连铸，2017，42(3)：49－53.

[2] 于怀彬. 高效连铸下的异型坯质量缺陷分析及优化控制策略[J]. 安徽冶金科技职业学院学报，2009，19(2)：5－9.

[3] 杨应东. 氮含量控制对S450J0－T热轧H型钢表面裂纹的影响[J]. 上海金属，2018，40(3)：69－72.

[4] 艾西，孙彦辉，曾亚南，等. 低碳钢Q345B大方坯热塑性研究[J]. 钢铁钒钛，2014，35(4)：103－106.

[5] 杜松林，汤寅波，汪开忠，等. 连铸异型坯腹板中心裂纹研究[J]. 连铸，2003，(5)：34－36.

[6] 吴坚. 钒微合金化H型钢表面裂纹研究与控制[J]. 安徽冶金科技职业学院学报，2015，25(3)：14－17.