

# 希尔伯特解调算法在高精度磨床修复中的应用

王仑峰<sup>1</sup> 李实<sup>1</sup> 王利明<sup>2</sup>

(1 宁波宝新不锈钢有限公司设备部 浙江 宁波 315800; 2 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

**摘要:** 准确的预测故障部位是高精度轧辊磨大修是否顺利的关键环节, 目前国内普遍依靠维修人员的经验及普通的振动频谱分析来解决此问题, 但应用效果十分不理想, 其主要原因是采用传统的傅里叶解析法无法获得低频振动数据, 而磨床本体振动大多数是低频(低于100赫兹)振动。在6号轧辊磨床大修中首次将基于希尔伯特解调算法的振动分析仪器应用到故障部位的诊断中, 成功的获取了低频段振动数据, 取得了良好的效果。

**关键词:** 轧辊磨床; 振痕振动; 特征提取; 希尔伯特解调

## 0 引言

高精度轧辊磨床是冷轧不锈钢的关键设备, 其磨削精度对不锈钢表面的光洁度起着极其重要的作用, 随着使用年限的增长, 其磨削精度逐步下降, 劣化到一定程度后, 需要通过机床大修来恢复其磨削精度, 机床大修前对机床性能劣化原因诊断精确度的高低对大修的成本、工期乃至最后的结果起着非常重要的作用。目前国内这部分的工作主要依靠两种手段:

一种是依靠维修公司老师傅、老专家的经验, 由于高精度磨床本身振动非常微小, 依靠人的感官很难做出精确的判断。

一种是近十年出现的采用振动分析仪分析, 但采用传统的傅里叶解调方法很难获得低频振动数据, 而磨床本体的振动又集中在此频段。因此很难以此来断定劣化部位。

多次实践证明这两种方法都存在很大的局限性, 都不能准确的预判出机床性能劣化的部分, 最后局部修理转变成全面修理, 不但将修复费用及修复周期成倍的提高, 更有甚至是修复后机床的精度出现全面下降, 完全不能适应高精度不锈钢的生产。因此采用有效的技术手段能够较为准确的检测出机床性能劣化的部件(或部分), 使磨床维护人员能控制修复范围是从事磨床维护的工程技术人员梦想。在2017年一台轧辊磨的中修当中, 将重庆大学研发的基于希尔伯特解调算法的振动分析仪器应用到磨床的劣化部位诊断工作中, 取得了令人满意的效果。

## 1 磨床出现的问题

### 1.1 故障描述

2017年初, 生产高等级不锈钢BA产品磨辊的6号磨床在粗磨时出现大量宽振纹(振纹形态: 宽度为1~3毫米, 间隔5~8毫米, 辊全长皆有, 振动时几乎无手感), 精密工艺无法消除, 工艺反复调整, 情况依无好转(如图1所示)。

### 1.2 检修面临的困难

决定对其进行中修, 以消除此缺陷。但在制定修复方案时, 由于修复单位无法判断出故障部位, 因此建议对此磨床进行全面大修, 但费用及工期均不允许, 在这种情况下, 国内某家检测公司用频谱分析的方法对此磨床进行了检测, 测得的主轴时域波形(如图2所示)。



图1 磨削振痕图

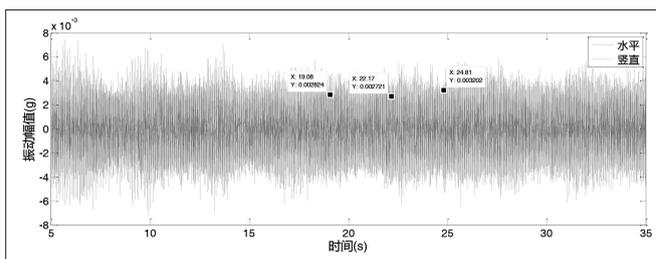


图2 6号磨床出问题时的主轴时域图

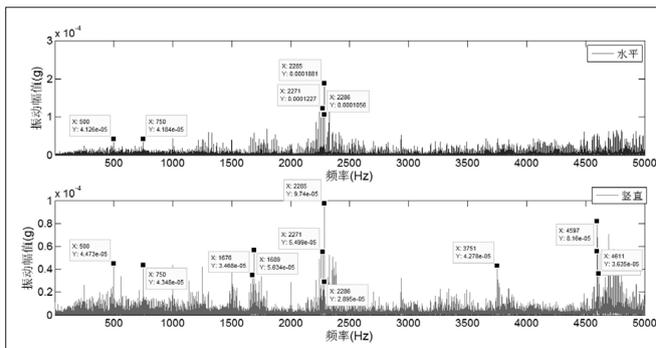


图3 6号磨床主轴振动的频域图

对凸振动数据进行傅里叶分解后的频域图(如图3所示)。

### 1.3 对策

在图3的分析图中, 振动的能量主要集中在2280HZ为中心的频段, 低频几乎看不出振动, 这就给判断故障部位带来很大的困难, 因为按照磨削的基本原理, 轧辊出现宽大振纹, 说明一定出现了低频振动, 且振动频率同磨床机械部件

的固有频率是相吻合的。在这种情况下，重庆大学的老师提出有可能低频振动波形在傅里叶分解过程中被自动过滤掉了，因此建议使用他们研发的基于洗希尔伯特解调方法的振动分析系统，或许可以再现当时低频振动的波形。

## 2 希尔伯特解调方法简介

### 2.1 希尔伯特解算的框图

目前比较常用的是基于 Hilbert 变换技术的包络解调方法，其基本步骤如图 4 所示，首先振动信号经过带通滤波，选择出包含调制信息（即故障信息）最明显的频率范围；然后经过 Hilbert 变换求取信号的包络，Hilbert 的具体操作步骤如公式 (1)、公式 (2)、公式 (3) 所示，其中， $x(t)$  为振动信号， $g(t)$  为  $x(t)$  的解析信号， $A(t)$  即是对原信号的包络幅值；最后经过低通滤波消除其它高频率成分和噪声的干扰，获得解调后的信号。

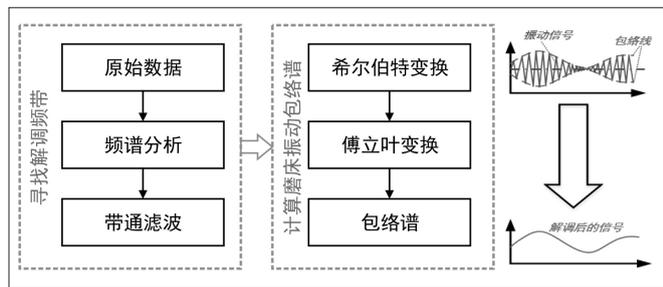


图 4 包络解调算法操作步骤

### 2.2 希尔伯特解算的公式：

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

$$g(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (2)$$

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

为检验各测点对故障信息的敏感度，下面对正常含有模拟振纹故障，模拟 3 个支撑座松动故障，模拟砂轮动不平衡故障四个工况下部分测点振动信号进行包络解调分析。

## 3 测试介绍

### 3.1 测试设备布置

本次测试在 6 号磨床头尾架顶尖及砂轮轴上加装传感器，并对其记录的振动数据进行分析（如图 5 所示），后经过对比发现尾架上传感器所记录的振动数据最为全面，故后面的振动数据都取自于尾架传感器。

## 4 结果分析

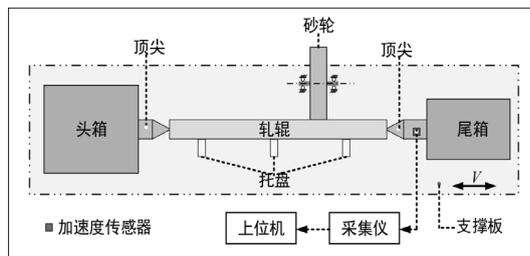


图 5 试验图

通过对 6 号磨床时域振动数据的分析，可以发现明显的拍振现象；频谱中有明显的边带出现，希尔伯特包络解调谱图中砂轮的特征频率及其谐频十分明显。

### 4.1 磨床振动数据

F 辊粗磨后发现振痕，时域波形如图 6 所示，振动幅度  $\pm 8\text{mg}$ ，峰峰时间间隔大约 3 秒。

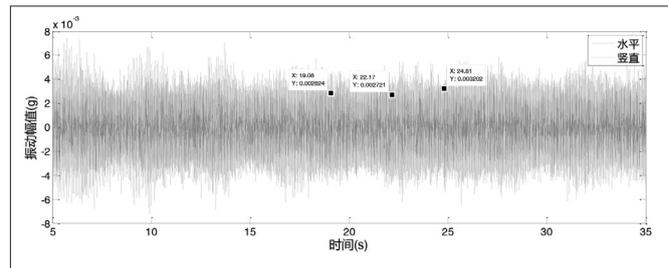


图 6 时域图

### 4.2 磨床振动数据的频域分析图

频谱如图 7 所示，水平方向谱能量更大，主要集中在 2200Hz~2400Hz。有间隔频率 1Hz 及 14Hz 左右的边带。轧辊频率为 1.3Hz，砂轮频率为 13.8Hz。这说明砂轮主轴有可能在磨削过程中对辊子产生了冲击，但是砂轮电机、皮带轮还是主轴本身及其相关辅件出现问题，此分析还不能说明问题。

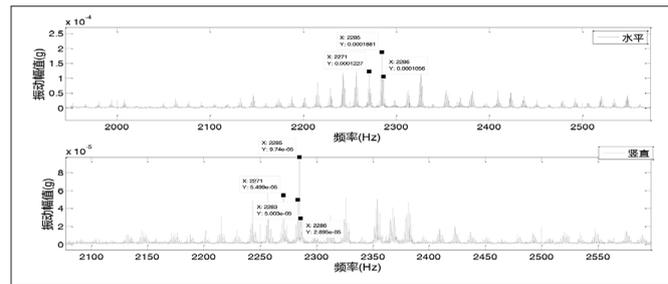


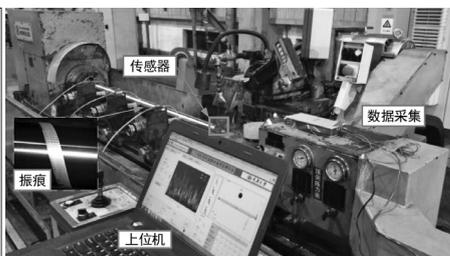
图 7 频谱图

### 4.3 采用希尔伯特解调方法获得低频振动数据的包络线

采用希尔伯特解析法对上述数据进一步分解，提取出包络谱如图 8 所示，谱能量集中在 0.2344Hz，轧辊转频 1.3Hz 及其 2 倍频，砂轮转频 13.8Hz 及其 2,3,4,5,6,9,10,12,13 倍频，并且有间隔 0.15Hz，1.3Hz 的边带，发现 13.8Hz 及以下的频谱能量比平时有，明显放大（超过正常值 1 倍以上）的迹象，这说明砂轮主轴本体及其相关辅件（与其特征频率相符）可能存在问题。

## 5 实际验证

基于以上分析，最终决定此次修复的重点为砂轮主轴及其相关辅助设备滚珠丝杆、导轨等，其中滚珠丝杆是重中之重（因为 0.2344Hz 的能量与其特征频率最为接近）。解体主轴及滚珠丝杆后发现滚阻丝杆与轴承座间隙很大，轴承座内部有明显



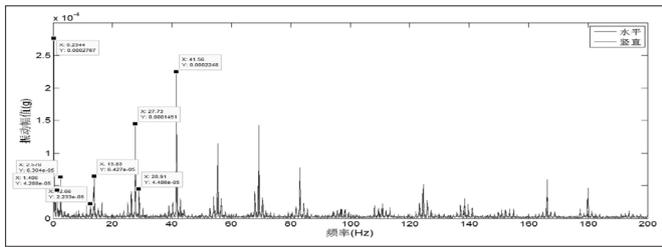


图8 包络谱

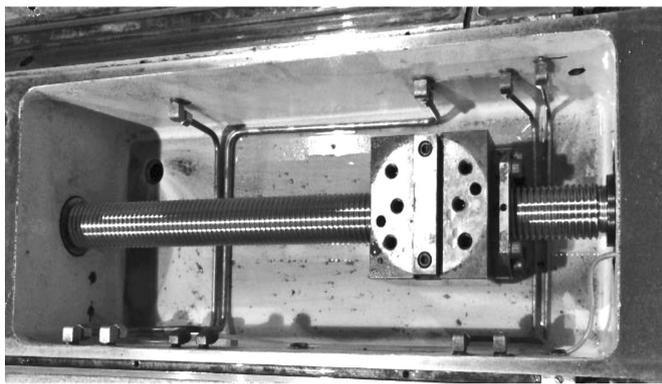


图9 磨床砂轮轴滚珠丝杆解体图

压痕(如图9所示)。

消除此缺陷后,磨床磨削正常,这充分说明之前的数

据分析是准确的。

### 6 结语

(1) 振动分析对于磨床维护是有很大的帮助的。

(2) 介于磨床本体振动绝大多数处于低频(低于20Hz),因此磨床振动分析必须要具备提取低频振动数据的能力。

(3) 希尔伯特解调方法低于提取低频振动数据具有很大的优势。

### 参考文献:

- [1] Kreis Thomas. Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1986, 3(6): 847-855.
- [2] Chan KT., Wong WO.. Quantitative vibration amplitude measurement with time-averaged digital speckle pattern interferometry[J]. Optics & Laser Technology, 1998, 30(5).
- [3] 高成勇, 周灿林. 一种基于希尔伯特变换实施相移的相位解调算法[J]. 光学技术, 2004, (4): 508-509, 512.
- [4] 王光平. 磨削中轧辊表面振痕产生的分析设备管理与维修[J]. 设备管理与维修, 2010(6): 51-52.
- [5] 姜继尚. 外圆纵向磨削稳定性统计分析对策[J]. 机械制造, 1998.

(上接第51页)

正确的测量方法,对控制螺纹精度也是必要的。一般情况,用得比较多的是直接用螺纹千分尺进行螺纹中径测量,现在介绍一种螺纹中径测量方法——单针测量法,即利用一根钢针,把钢针放在螺纹槽里,如图5所示。

这种方法与平时所讲的三针测量法原理相同,而且测量起来更加简单,计算公式如下:  $A = (M + d_0) / 2$ , 其中, A 是单针测量时千分尺上测得的尺寸,  $d_0$  是螺纹大径, M 是三针测量值  $M = d_2 + d[1 + 1/\sin(\alpha/2)] - P/2\cot(\alpha/2)$ ,  $d_2$  是螺纹中径,  $d_2 = d_0 - 0.65P$ , d 是钢针直径,  $\alpha$  是牙型角, P 是螺距。

例如测量上述例子 M30x4(P2), 如果钢针直径  $d=1$ ,  $\alpha=60^\circ$ , 外径千分尺上应该显示 30.016。原因如下:

因为  $\alpha=60^\circ$ ;

$$d_2 = d_0 - 0.65P = 30 - 0.65 \times 2 = 28.7, P=2, d=1;$$

$$M = d_2 + d[1 + 1/\sin(\alpha/2)] - P/2\cot(\alpha/2) = d_2 + 3d - 0.866P = 30.032$$

$$\text{所以 } A = (M + d_0) / 2 = 30.016.$$

此外,在控制精度中,无论是控制螺纹精度,还是外圆或内孔精度,在加工过程中,尽量要利用到冷却液,冷却液不单止有冷却作用,还可以使排屑更容易,对于精度控制中有很大的帮助,在此就不一一列举。

### 2 结语

螺纹精度控制的方法应该有许多种,以上是本人针对学生在加工普通双线螺纹时出现的问题提出解决方法,通过这种方法,有效地提高了普通双线螺纹的加工精度,减小加工过程中报废的几率。

### 参考文献:

- [1] 薛宏建. 车工实用手册[M]. 北京: 北京金盾出版社. 2005.11.
- [2] 吴善元. 机械制造技术[M]. 北京: 机械工业出版社. 1997.10.
- [3] 周凤云. 工程材料及应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社. 2002.11.

作者简介: 赖柳选(1983.07-), 男, 工学学士, 机械讲师, 研究方向: 机械教学研究; 赖小敏(1982.11-), 女, 工学学士, 数控技术应用讲师, 研究方向: 数控加工。

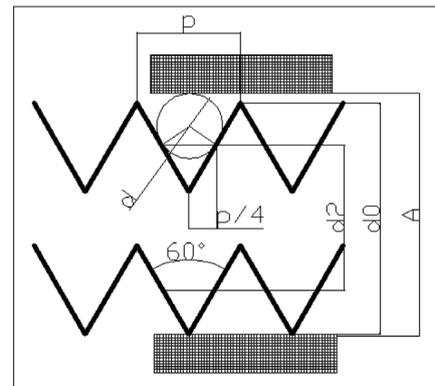


图5 测量方法示意图