

文章编号:1671-6833(2003)03-0091-04

基于包络分析的自行火炮变速箱故障诊断研究

张鸿河¹, 关惠玲²

(1. 中国人民解放军 71309 部队装备处, 河南 许昌 461700; 2. 郑州大学机械工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 在振动信号分析的基础上, 提取了反映自行火炮变速箱故障的时域特征量和包络谱特征量, 建立了基于 BP 神经网络的故障诊断系统, 实现了自行火炮变速箱故障模式的自动识别, 有效地检测了自行火炮变速箱的早期故障. 通过实际所测的自行火炮变速箱故障数据验证, 诊断结果表明选择的特征参数较好地识别变速箱常见故障.

关键词: 变速箱; 故障诊断; 神经网络
中图分类号: TH 165^{+.3} **文献标识码:** A

0 引言

自行火炮变速箱中元件(轴承和齿轮)的工作状态, 含疲劳、撞击等产生裂纹、点蚀、剥落或擦伤等表面损伤故障, 若不及时对这些早期故障进行诊断和维修, 会进一步扩展, 造成变速箱损坏和灾难性事故, 因此对变速箱元件的早期故障进行检测是十分必要的.

包络分析是目前诊断轴承和齿轮故障的最有效的方法^[1~3]. 它的实质是对周期性的冲击故障信号来说, 其宽频带特性常引起系统固有频率处的谐振, 从而在该频率附近形成以特征故障频率为基频的边带, 此边带可被认为是故障信号调制的结果. 因此又有人称为解调分析. 解调的目的就是得到调制信号, 获取包络线, 从而分析时频域特性, 达到故障诊断的要求.

本文应用振动分析的方法提取变速箱故障的时域特征量和频域特征量, 再利用人工神经网络对所得的故障特征量进行处理, 从而实现计算机自动识别自行火炮变速箱元件的故障模式.

1 包络分析方法简介

1.1 基于 Hilbert 变换的解包络分析

一个实信号的 Hilbert 变换定义如下:

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

(1)

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

(2)

式中: * 表示卷积, 式(1)和式(2)为 Hilbert 变换对.

由傅里叶变换的性质, 得

$$\frac{1}{\pi} \xrightarrow{\text{Fourier}} j \operatorname{sgn}(f)$$

(3)

$$x(t) \xrightarrow{\text{Fourier}} X(f)$$

(4)

$$\hat{x}(t) \xrightarrow{\text{Fourier}} X(f)$$

(5)

对式(1)作傅里叶变换, 得

$$X(f) = X(f)[j \operatorname{sgn}(f)]$$

(6)

对式(6)两边再进行傅里叶逆变换, 即可获得 Hilbert 变换

$$\hat{x}(t) = F^{-1}\{X(f)[j \operatorname{sgn}(f)]\}$$

(7)

Hilbert 解包络原理: 让测试信号产生 90° 的相移, 从而与原信号构成一个解析信号, 求出它的解析信号, 解析信号就构成包络.

常用的 Hilbert 变换解调原理过程: 设 $x(t)$ 为振动加速度信号, 带通滤波后得到信号 $y_r(t)$, $y_i(t)$, 经过 Hilbert 变换得到 $y_i(t)$, 二者构成一个解析函数式 $z(t)$, 可表示为

$$z(t) = y_r(t) + j y_i(t)$$

(8)

由此可得到振动信号的幅值调制信号为

$$|z(t)| = \sqrt{y_r^2(t) + y_i^2(t)}$$

(9)

上述过程完成了对信号的解包络分析. 在实际中,

收稿日期: 2003-03-28; 修订日期: 2003-06-10

作者简介: 张鸿河(1970-), 男, 河南省淮阳县人, 71309 部队军官, 郑州大学硕士研究生, 主要从事军备管理和指挥工作.

包络解调前必须选择一个冲击激起的受环境干扰小的高频振动,并以其为中心频率进行窄带滤波,然后再对滤波后的信号进行包络分析过程,因此又可称为高频共振解调方法.

1.2 基于连续小波的解调分析法^[4]

小波变换的原理及性质.根据小波理论,一个基小波 $\Psi \in L^1 \cap L^2$ 且 $\Psi(0) = 0$,若它满足允许性条件

$$C_{\Psi} = \int_R \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \tag{10}$$

则称为允许小波,该小波经过如下方式伸缩与平移,得到函数族 $\{\Psi_{a,b}\}$

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (b \in R, a \in R, a \neq 0) \tag{11}$$

叫做分析小波或连续小波.式中: a 为尺度因子; b 为时间因子.信号与分析小波的卷积结果就是连续小波变换,有一种基本小波为复小波,又叫高斯基小波: $\Psi_g(t) = \exp(j\varphi)\exp(-t^2/2)$,其实部与虚部分别为 $\Psi_g(t) = \cos\varphi\exp(-t^2/2)$, $\Psi_g(t) = \sin\varphi\exp(-t^2/2)$.小波函数具有波动性、衰减性和带通性.从傅里叶变换的角度看,这种小波的实部为偶函数,经傅里叶变换后仍为实偶函数;而虚部由傅里叶变换可知,它实部相移 90° ,但二者的幅频相同.由于小波本身的带通特性,它在进行小波变换的同时,就已经完成了滤波过程,这同时也是小波解包络的优点.

对于利用连续小波进行解调分析,有两种实现形式:① 可利用单个小波的带通特性,通过 a 改变的取值来选择带通范围.② 利用小波滤波器组,可方便地实现选频、带通来完成信号的解调分析,图 1 为解调分析的原理图.

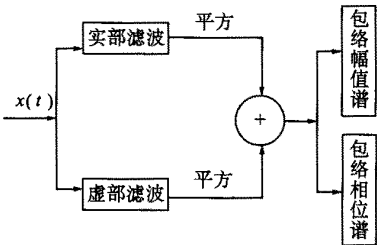


图 1 连续小波解包络原理图

Fig. 1 Schematic diagram of continuous wavelet envelope

2 基于包络的特征分析

2.1 包络时域参数的提取

以轴承为例,自行火炮变速箱典型的轴承故障时域振动波形如图 2 所示.

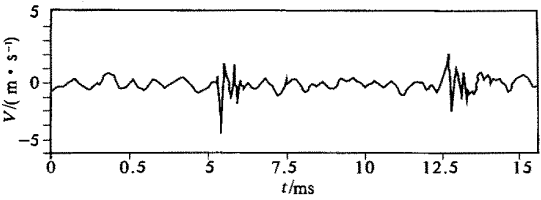


图 2 轴承故障时域振动波形

Fig. 3 Envelop subdividing spectrum of bearing fault

滚动轴承的某一元件表面存在故障时,在轴承的旋转过程中,故障表面会撞击轴承其它元件的表面,产生峰值较高的高频振动序列,根据这一特性,选择轴承故障时域特征向量为无量纲参数峰值因子 C_f (Crest Factor) 和脉冲因子 I_f (Impulse Factor),它们定义为

$$C_f = P/R \tag{12}$$

$$I_f = P / \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N |x(i)| \tag{13}$$

式中: $P = 1/\sqrt{2} [\max(x(i)) - \min(x(i))]$;

$$R = \sqrt{1/N \sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^2}.$$

在某自行火炮上进行了一系列变速箱轴承故障实验,内容包括正常情况,主动轴某轴承外环故障、内环故障和滚动体故障,实验条件是保持发动机转速为 $1\,000\text{r/min}$.实验结果如表 1 所示.

表 1 轴承故障时域特征参数值

Tab. 1 Bearing fault features parameter value of time domain

状态	峰值因子 C_f	脉冲因子 I_f
轴承正常	3.704	3.624
轴承外环故障	16.055	16.006
轴承内环故障	12.761	17.407
轴承滚动体故障	67.130	44.959

表 1 表明,时域无量纲参数峰值因子和脉冲因子能较好地反映轴承的故障状态.

由于对原始信号经过了包络处理,它使原始信号变得光滑和平缓,按照通常时域处理的方法,提取诸如:波形因子、脉冲因子、峭度因子、裕度因子等,这些时域上的参数从不同方面反映出包络信号的性质和特征上,同时也反映出故障的不同分类来.在这里,包络分析的作用相当于是对信号进行预处理,去掉原始信号的噪声,提高信噪比.对求出的特征参数,还可进一步利用模糊数学的方法,对其进行模糊处理,为模式识别打好基础.

当然利用时域参数不能精确诊断出故障所在,但它对于简易诊断,及时判断有无故障出现,还是一个很好的方法.

2.2 包络频域的分析

因为轴承的损伤表面与其它表面的撞击从本质上是周期性的,所以高频脉冲振动信号是周期性的,是按指数规律衰减的高频脉冲振动信号,高频脉冲振动信号的重复频率由轴承的结构、故障点位置(内环、外环或滚动体)和轴承的运动形式决定.假定滚动轴承的外环固定,滚动体与滚道之间无滑动接触,则滚动轴承各元件的故障特征频率如下:

内环故障频率为

$$f_{inner} = 0.5f_i(1 + d\cos \alpha/D);$$

外环故障频率为

$$f_{outer} = 0.5f_i(1 - d\cos \alpha/D);$$

保持架旋转频率为

$$f_{case} = 0.5f_i(1 - d\cos \alpha/D);$$

滚动体自转频率为

$$f_{roller} = 0.5f_i(1 - (d\cos \alpha/D)^2/d).$$

式中: D 为轴承的节径; d 为滚动体的直径; α 为接触角; f_i 为轴承内环旋转频率; Z 为滚动体个数.

根据轴承故障振动的模型,轴承故障的包络谱故障特征频率如下:① 轴承外环故障特征频率 f_{outer} ;② 轴承内环故障特征频率 f_{inner} ;③ 轴承滚动体故障特征频率 $f_{case}f_{roller}$.通过对包络信号进行频率分析,可以比较精确地确定出故障发生的部位和层次.在目前开发出来的许多机械设备的轴承及齿轮的故障诊断系统中,包络分析仍是精确诊断的有效手段之一,且被广泛地应用.它通过分析包络信号的频次和强度来得到诊断信息,如对于轴承和齿轮来说,它可以有效地识别出边频带,从而找出调制信号的特征来.然后再结合对于机械本身的了解,进行故障诊断.在进行频域分析时,主要是分析它的频谱图,结合特征频率来识别故障,而且往往要进行细化谱分析,因为包络信号为一低频信号必须降低它的采样频率.

在某自行火炮上针对主动轴某轴承进行的一系列变速箱各种轴承模拟故障实验的振动信号的包络细化谱如图 3 所示.

图 3(a) 表明,当轴承外环存在故障点时,其包络细化频率为 $f_{outer} = 136.2\text{ Hz}$ 及其高倍频附近存在明显的谱线;图 3(b) 表明,当轴承存在内环故障时,其包络细化谱在频率为 $f_{inner} = 197.3\text{ Hz}$

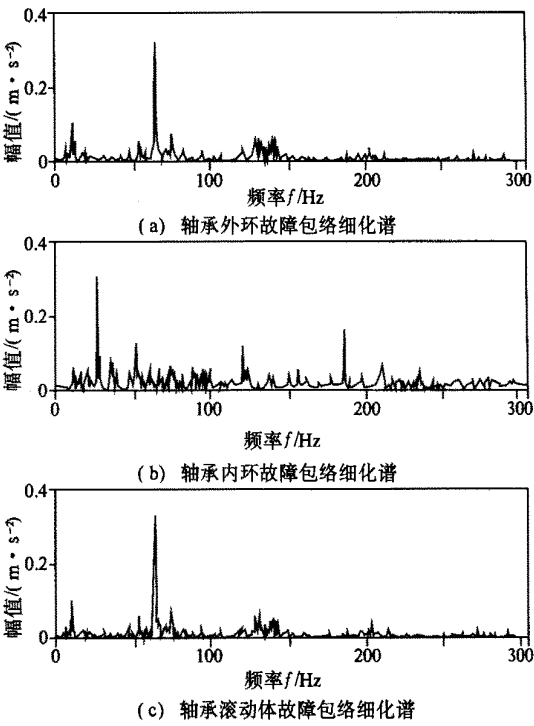


图 3 轴承故障包络细化谱

Fig. 2 Bearing fault vibration wave for m of time domain

和 $f_i = 23.8\text{ Hz}$ 存在明显谱线;图 3(c) 表明,当轴承存在滚动体故障时,其包络细化谱在频率为 $f_{roller} = 63.1\text{ Hz}$ 和 $f_{case} = 9.7\text{ Hz}$ 存在明显谱线.由上面分析可以看出,包络细化谱中特征频率 f_i , f_{inner} , f_{outer} , f_{roller} 和 f_{case} 能较好地反映轴承的故障模式,故选择轴承故障频率特征参数为 f_i , f_{inner} , f_{outer} , f_{roller} 和 f_{case} ,因为轴承的滚动体与滚道之间的滑动,实际的轴承故障频率特征参数与理论值有一定的偏差,因此在实际应用中,选取以故障频率特征参数理论值为中心的一个小区间中的最大值作为特征参数值.

2.3 故障特征向量的标准化

仍以轴承为例,由上述分析得到轴承故障特征参数向量为

$$T = [C_f, I_f, f_{outer}, f_i, f_{inner}, f_{case}, f_{roller}]^T.$$

在实际的神经网络故障模式识别中,并不是将上述时域和频域特征参数的测量值输入到神经网络,而是首先将特征向量标准化,然后再输入神经网络进行故障模式识别.标准化的办法是根据实验数据,确定一个特征参数的门限值,若参数值超过门限值,则置 1,否则置 0,得到标准化特征向量为

$$T_0 = [C'_f, I'_f, f'_{outer}, f'_i, f'_{inner}, f'_{case}, f'_{roller}]^T,$$

向量 T_0 中元素的值域为 $\{0, 1\}$ 。

3 基于包络分析的故障诊断系统

故障诊断的过程实质就是进行模式识别的过程。人工神经网络的最大特点是能够保持“学习”状态的数据存储和实现非线性映射,具备了出色的学习能力。

自行火炮变速箱故障诊断系统原理框图如图 3 所示。

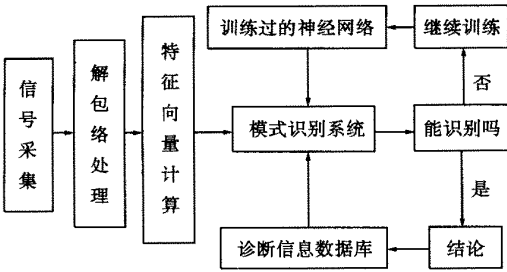


图 3 基于包络分析的故障诊断系统原理框图
Fig. 3 Schematic diagram of fault diagnosis system based on envelopment analysis

系统中,加速度传感器安置在变速箱靠近轴承座的位置,因变速箱体积大,内部轴承众多,为提高故障诊断的可行性,在变速箱盖上安置了多个加速度传感器。将各加速度传感器的输出分别送入电荷放大器进行放大,经 A/D 转换输入到计算机进行时域分析和包络谱分析,提取元件故障的时域特征量和频域特征量,然后将时域特征量和频域特征量送到人工神经网络进行故障模式识别,最后得到变速箱的故障模式。

神经网络需要对标准的样本进行训练,得到权值系数矩阵后,才能进行故障识别。利用包络分析后的数据,建立各个状态下的故障模式向量。对神经网络进行训练,得到权矩阵,然后再运用于实

际,进行故障诊断。系统中,特征向量计算可根据需要进行奇异性指标计算、时域特征参数计算、频域特征参数计算等。每次故障诊断的结果都存于诊断信息数据库中,以便进行历史查询。

4 结论

(1) 通过对变速箱体的振动信号结合小波分析进行解包络处理,获取故障向量模式,为变速箱故障诊断提供一条较好的思路。

(2) 确立的特征信息参量能很好地表征变速箱的运行状态。

(3) 通过选择合适的时域和频域特征向量,能有效地对自行火炮变速箱故障模式进行识别。

参考文献:

- [1] 丁康,米林,王志杰.解调分析在故障诊断中应用的局限性[J].振动工程学报,1997,10(1):13~20.
- [2] 傅勤毅,王峰林.滚动轴承故障诊断中的多参数综合判别方法[J].哈尔滨工业大学学报,1997,29(3):57~59.
- [3] 王延春,谢明,丁康.包络分析方法及其在齿轮故障振动诊断中的应用[J].重庆大学学报,1995,(2):87~91.
- [4] 张绪省,朱贻盛.信号包络提取方法——从希尔伯特变换到小波变换[J].电子科学学刊,1997,19(1):120~123.
- [5] 李智,陈祥初,刘政波.包络分析及其在设备故障诊断中的应用[J].测试技术学报,2002,16(2):92~95.
- [6] 胡亦农,陈幼平.基于神经网络模型的知识获取方法与故障诊断[J].华中理工大学学报,1995,(2):30~34.
- [7] ROBERT M Jones. A Guide to the Interpretation of Machinery vibration Measurements—Part 2[J]. Sound and Vibration, 1994(9):12~20.
- [8] 梁川,董英斌,韩捷.基于数据库的便携式数据采集和管理系统[J].郑州大学学报(工学版),2002,23(4):14~16.

Exploration of Fault Diagnosis in Gearbox of Self propelled Gun Based on Envelopment Analysis

ZHANG Hong-he¹, GUAN Hui-ling²

(1. Equipment Department, 71309 Troop of PLA, Xuchang 461700, China; 2. College of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: On the basis of analyzing vibration signal, both time domain and envelope spectrum domain diagnostic parameters are gained. The diagnosis system based on the envelopment analysis has been built, and the validity of the neural network to detect initial fault of gearbox is confirmed. Experiments show that common faults can be recognized by the chosen characteristic parameters.

Key words: gearbox; fault diagnosis; neural network