

机器故障功率谱诊断的进一步探讨

周晓勤 高品忱 于骏

(吉林工业大学) (吉林工业大学)

摘要: 机器故障往往反映为传感信号功率谱的特征变化, 为了在复杂机械工况的在线监视与故障诊断中快速有效地捕捉住功率谱的变化特征, 本文进一步探讨了表征信号功率谱特征变化的特征量, 谱形扩展系数及其快速算法。与过去的几种典型特征量比较, 谱形扩展系数具有适应性强且计算更简便等特点。

关键词: 工况; 故障诊断; 功率谱。

一、问题的提出

近二十多年来, 各国学者对机器故障诊断进行了广泛的研究并提出了各种诊断方法, 其中功率谱诊断是目前最为常用的一种。由于机器故障的发生常常会导致传感信号功率谱特征变化, 因此目前在应用计算机进行在线监视和早期诊断中, 首先要对功率谱做定量的描述。但是, 过去的研究工作尚存在一些问题。

1. 表征功率谱变化的特征量计算速度太慢, 不能适应那些过程变化较快的工况。(比如机床颤振的发展过程一般仅在 1 秒左右)。文献^[1,2]提出的方法要求先计算出信号功率谱, 然后再做主分量分析或 Walsh 变换。其计算复杂, 不便在微型机(特别是单板机)上进行识别、诊断。

2. 需要多个特征量描述信号功率谱特征变化。文献^[3]中不仅需考察信号的频域特性, 而且还要考察信号的时域变化特性(如方差、自相关函数等)以使用描述信号时域变化的特征量和描述信号频域变化的特征量构造一多维矢量来描述信号的特征变化, 这无疑造成了快速诊断的困难。因此, 描述信号功率谱变化应采用尽量少的特征量以减少特征矢量的维数。

3. 过去的研究工作仅仅适合某些特定的工况, 而对各种不同工况却缺乏好的适应性。文献^[4]引入了以下几个特征量: 均方频率 MSF , 频谱重心 F_c , 频域方差 V_f , 分别定义为:

$$MSF = \frac{\int_0^{\infty} f^2 \cdot s(f) df}{\int_0^{\infty} s(f) df}, \quad F_c = \frac{\int_0^{\infty} f \cdot s(f) df}{\int_0^{\infty} s(f) df}, \quad V_f = \frac{\int_0^{\infty} (f - F_c)^2 \cdot s(f) df}{\int_0^{\infty} s(f) df}$$

式中 $s(f)$ 为信号功率谱, 其中均方频率 MSF 和频谱重心 F_c 都是用来描述功率谱主频带绝对位置变化, 显然对于不同工况的情形, 均方频率 MSF 和频谱重心 F_c 的变化特性不可能完全相同, 尤其是阈值难于确定。因此文献^[4]尽管推导了 MSF 和 F_c 的快速算法, 但仍存在一定的缺陷。频域方差 V_f 用来描述谱能量的分散程度, 反映了 $s(f)$ 相对 F_c 的变化。与 MSF 和 F_c 比较, V_f 具有好的适应性, 但阈值确定仍是问题。

另外, 在以往的研究工作中, 上述三个方面的问题几乎都是割裂开来研究的。同是出现在机器故障诊断中的三个问题应该统一起来, 以同一诊法和数学描述归结于系统研究之中。

因此本文作者在前人工作的基础上,进行了更为深入一些的探讨。

二、表征功率谱变化的新特征量——谱形扩展系数

正如文献^[4]的研究表明,传感信号功率谱变化反映了信号中各频率成份的能量大小情况。故障的形成过程就是系统能量向某一频带集中并发展的过程,这主要体现在功率谱谱形的特征变化,即由分散谱逐渐形成集中谱的过程。因此,通过描述功率谱谱形的特征变化,就能较好地描述传感信号的异常征兆,从而确诊机器故障。

首先引入概念,谱形扩展系数 SEC 并定义为:

$$SEC = \frac{[\int_{-\infty}^{\infty} f \cdot s(f) df]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} s(f) df \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f^2 s(f) df} \quad (1)$$

其中谱形扩展系数 SEC 可用来描述传感信号功率谱的谱形特征变化。

1. 谱形扩展系数 SEC 的讨论

我们假设功率谱 $s(f)$ 为横放在坐标轴上的一根长杆的质量密度函数,从频谱重心 F_0 ,均方频率 MSF 和频域方差 V_f 的定义可以发现,实际上 F_0 是该杆的重心横座标 f_1 , MSF 是该杆绕原点回转半径 f_2 的平方, V_f 是绕重心 f_1 的回转半径 f_2 的平方。根据物理学平行轴距定理有, $V_f + (F_0)^2 = MSF$, 且 $V_f \leq MSF$ 。因此谱形扩展系数 SEC 可做如下变换:

$$\begin{aligned} SEC &= \frac{[\int_{-\infty}^{\infty} f \cdot s(f) df]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} s(f) df \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f \cdot s(f) df} = \frac{[\int_{-\infty}^{\infty} f \cdot s(f) df / \int_{-\infty}^{\infty} s(f) df]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 s(f) df / \int_{-\infty}^{\infty} s(f) df} \\ &= \frac{F_0^2}{MSF} = 1 - \frac{V_f}{MSF} \quad (2) \end{aligned}$$

从 V_f 的定义不难看出, V_f 实际上是一加权平均和。当权函数 $s(f)$ 的分布愈远离 F_0 时,权 $(f - F_0)^2$ 愈大,相应 V_f 值将愈接近 MSF 值,从而 $\frac{V_f}{MSF} \rightarrow 1$, 即 $SEC \rightarrow 0$ 。当权函数 $s(f)$ 的分布愈来愈接近 F_0 时,权 $(f - F_0)^2$ 愈小,相应地 V_f 值愈小于 MSF 值,从而 $\frac{V_f}{MSF} \rightarrow 0$,

即 $SEC \rightarrow 1$, 因此由权的概念定性说明了 SEC 值的大小描述了功率谱 $s(f)$ 的分散程度。

下面的分析可使我们更形象地理解谱形扩展系数的物理意义。对于分散谱情形,此时频域上没有哪一个频率成份的能量能占据主导地位,不妨设 $s(f) = s_0$, 代入 (1) 式得 $SEC = 0.75$ 。而对于集中谱情形,此时功率谱 $s(f)$ 基本上只在一个频率处有峰状强度,而在其它频率处近似为零,令 $s(f) = \delta(f - f_1) \cdot s_0$, 式中“ δ ”为单位脉冲函数记号,将该式代入式 (2), 则有 $SEC = 1$ 。这说明功率谱从分散谱逐渐形成成为集中谱的过渡过程中,满足 $0.75 \leq SEC \leq 1$ 。故实际上, SEC 反映了信号功率谱形状扩展 (或收敛) 的程度,即 SEC 值的变化能较好地描述功率谱的特征变化。

由上分析还可看到,描述功率谱变化只需要一个特征量,因而简化了计算。

2. 谱形扩展系数 SEC 的快速算法

上述谱形扩展系数 SEC 的定义比较复杂。如果直接利用公式 (1) 来计算,则首先得估计信号的功率谱,即使用 FFT 或者时序模型的方法求功率谱,其计算也是相当繁杂的,这对于那些变化较快的工况,其诊断速度是远远跟不上的,尤其是不适合利用微型机 (特别是

单板机)对机器故障进行实时诊断。因此,本文进一步讨论了谱形扩展系数 SEC 的快速算法。

根据 Fourier 变换的性质,则

$$MSF = \frac{\int_0^{\infty} f^2 s(f) df}{\int_0^{\infty} s(f) df} = \frac{E[\dot{x}^2(t)]}{4\pi^2 \cdot E[x^2(t)]} = \frac{2}{4\pi^2 \cdot \Delta^2} (1 - \rho_1)$$

$$F_{\sigma} = \frac{\int_0^{\infty} f \cdot s(f) df}{\int_0^{\infty} s(f) df} = \frac{E[x(t)\dot{x}(t)]}{2\pi \cdot E[x(t)^2]} = \frac{1}{2\pi \cdot \Delta} (1 - \rho_1)$$

式中 $\dot{x}(t)$ 为 $x(t)$ 的导数, $E[x^2(t)]$ 为 $x(t)$ 的均方值, Δ 为采样间隔, ρ_1 为一步自相关函数,且

$$\rho_1 = \frac{E[x(t)x(t-1)]}{E[x^2(t)]}$$

将上述结果代入式(2),则

$$SEC = \frac{F_{\sigma}^2}{MSF} = \frac{1}{2} (1 - \rho_1) \quad (3)$$

设 $\{x(t)\}$ 为平稳时间序列, $E[x(t)] = \mu$, 对 $\{x(t)\}$ 做出硬判决得:

$$z(t) = \begin{cases} 1, & x_t > \mu \\ 0, & x_t \leq \mu \end{cases}, \quad t = 1, \dots, n \quad (4)$$

则称 $\{z(t)\}$ 是以 $\{x(t)\}$ 的水平为均值 μ 的 0—1 时间序列,在 0—1 时间序列中,称由“1”(“0”)连续组成的不能再长的子序列为“1”游程(“0”游程),序列中“1”(“0”)游程的总个数为“1”(“0”)游程数。根据 0—1 时序理论,原平稳正态时间序列 $\{x(t)\}$ 的一步自相关函数 ρ_1 的估计可由 0—1 序列 $\{z(t)\}$ 求得:

$$\hat{p}_1 = \sin \pi \left(\hat{\lambda}_1 - \frac{1}{2} \right),$$

$$\hat{\lambda}_1 = \frac{n - 2(\text{“1”游程总数})}{n - 1} \quad (5)$$

式中 n 为样本长度。

因此在实际计算中可根据式(3)和式(5)很简便地计算出谱形扩展系数 SEC 值。

三、对谱形扩展系数诊法评价

应用谱形扩展参数 SEC 来描述信号功率的特征变化,进行机器故障诊断主要有以下几个方面的优越性。

1. 谱形扩展系数计算简便,能实现快速诊断。

为了考察谱形扩展系数 SEC 用于故障快速诊断的特点,我们在一台中型车床上采用 TP805 微机进行了机床颤振过程的在线监视与早期诊断的试验。机床颤振的监测过程如图 1 所示。

从对信号的频谱分析可知,信号的频率变化范围主要在 1000Hz 以下,对信号进行低通滤波其上限截止频率为 1000Hz,为了避免混迭,采样频率按 Shannon 采样定理取 2000Hz。

考虑到监测系统快速诊断的要求和特征量的统计意义, 首先来样 256 个点, 以后每次采样 25 个点来刷新最先采的 256 点, 计算出刷新后特征量值, 并判别是否越出谱形扩展系数 SEC 的门限。每刷新一次, 计数器减 1, 若刷新计数器为 0, 则将采样指针恢复。上述过程重要进行, 一旦特征量越界, 则计算机立即发出峰鸣声报警。

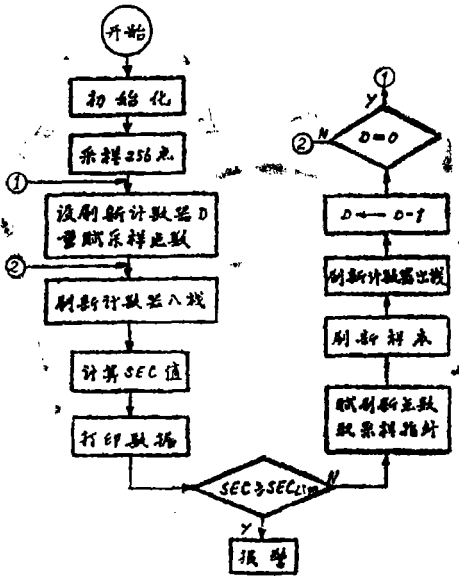
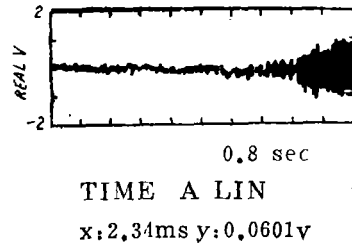
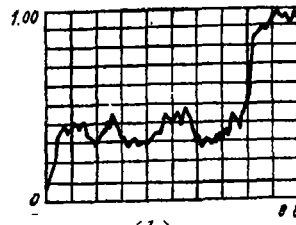


图 1



(a)



(b)

图 2

图 2 (a), (b) 是微机根据公式 (3) 和 (5) 计算 SEC 值随时间变化情况。由图 2 (a) 可知, 颤振的起振点为 0.64 秒, 而在图 2 (b) 中, 当 $t = 0.685$ 秒时, SEC 值已达到 0.90, 如果以 $\alpha = 0.90$ 为监测门限值, 则仅仅只有 45ms 的时滞。而颤振的成长尚须 0.16 秒, 这就为颤振的监控赢得了 115ms 的时间, 因而极有利于对机床颤振进行早期诊断。

可以看到, 应用导出的快速算法估计 SEC 值, 完全不需要估算信号的功率谱, 而是从采样信号中直接清点“1”及“1”游程的个数。对比文献^[4]提出的方法避免了大量繁杂的乘法过程, 而仅仅只须有限的加减法运算, 正好符合微机自身的特点, 这是文献^[1,2,3,4]所述方法无法比拟的。

2. 采用谱形扩展系数 SEC 进行机器故障诊断, 具有适应性强的特点。

在前人的研究工作中, 都存在一个共同的问题, 即特征量的门限值对各种工况缺乏好的适应性^[1-4]。那些方法对不同的加工条件, 哪怕是换了根工件或改变了一下切削用量也要重新考虑门限值的设定问题。而对于本文提出的谱形扩展系数 SEC , 门限值的设定却极为简单, 无论对何种工作条件只须设置一个通用的门限值即可。因为谱形扩展系数 SEC 反映的是频谱重心 F_0 和回转半径 \sqrt{MSF} 的相对位置变化, 受工作条件影响的因素, 可同时从分子分母中抵消。不象 F_0 和 MSF 仅反映了主频带位置的绝对变化, 受工况条件的影响。因此采用谱形扩展系数 SEC 描述信号功率谱特征对比过去的诊法更为实用。

对机床颤振进行监测的试验表明, 尽管切削条件发生了相当的变化, 但谱形扩展系数 SEC 与机床颤振皆存在好的依赖关系。如图 3 是对 SEC 进行的 8 组 16 次切削试验。试验评定指标分别为谱形扩展系数 SEC 和颤振振幅 A 。由图 3 可见, 谱形扩展系数 SEC 值确实反映了颤振的特征, 且具有好的适应性。

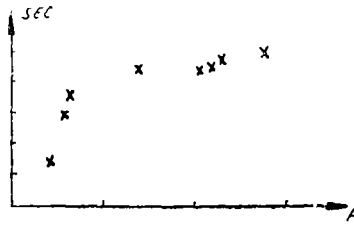


图 3

四、结束语

1. 本文探讨了表征功率谱特征变化的新的特征量。研究表明, 我们用一个简便易算而又有明确物理意义的谱形扩展系数来定量描述传感信号功率谱的变化是可行的。从而为复杂机械工况监视与故障诊断提供了一有效的工具。

2. 该方法成功地解决了阈值的设定及其适应性问题。谱形扩展系数对不同的工况几乎都有相同的阈值。因此在机器故障诊断和工况监视中, 应用谱形扩展系数 SEC 表征功率谱变化, 其阈值可不受工况的影响, 这就使该故障诊断方法在实用性上迈进了一步。

参 考 文 献

- [1] J.D.Gibbous, Nonparametric Statistical Inference, Mc Graw-Hill NY(1971)
- [2] 刘继跃, 屈梁生, 机械工程, 第 2 期增刊, (1987)
- [3] 梅志坚等, 振动工程学报, 第 1 卷第 3 期, (1988)
- [4] 梅志坚等, 华中理工大学学报, 第 16 卷, 第 3 期(1988)
- [5] B.Kedem, Binary Time Series, Macel Dekker(1980)

Improved Study for Power Spectrum Diagnosis of Machine Fault

Zhou Xiaoqin Gao Pinchen Yu Junyi

Abstract

Generally, machine fault can be detected by the characteristic changes of the power spectrum of a sensing signal. How to recognize and quantitatively translate these signal changes is, therefore, of great importance. A specific variable defined as the expanding coefficient of spectrum which describes the characteristic changes of power spectrum of the signal, is introduced and the fast algorithm of the variable is discussed. It is highly noise proof with good adaptability and requiring less computing time.