

汽轮机振动信号频谱分析方法的仿真研究

张 峰, 石现峰

(西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710032)

摘 要: 汽轮机是广泛应用的旋转机械设备, 对其故障进行诊断具有重要的实际意义。汽轮机振动信号的频谱分析是提取故障特征的有效方法。对振动信号谱分析中常用的算法进行了介绍, 包括周期图法、改进的周期图法及多窗谱估计算法, 并基于 Matlab 进行了仿真实现。在算法仿真基础上利用各算法对实测汽轮机振动信号进行了功率谱分析, 并对分析效果及算法性能进行了对比。最后指明了经典谱估计算法的特点和在实际应用中的局限。研究及分析结论对汽轮机振动信号的频谱分析具有一定的指导意义。

关键词: 汽轮机; 振动; 谱估计; 周期图; 多窗

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)09-0209-04

Study and Simulation of Spectrum Analysis Methods for Turbin's Vibration Signal

ZHANG Feng, SHI Xian-feng

(Electronic and Information Engineering School of Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Turbines are a kind of widely used rotating machinery, so it is extremely significant to diagnose the running fault. The spectrum analysis of turbin's vibration signal is an efficient method for default extraction. The methods that are often used in vibration signal's spectrum estimation are introduced and analyzed, including periodogram method, modified periodogram method and multitaper method, and all the methods are programmed and simulated by using Matlab. Based on this, the spectrum analysis of field measured turbin's vibration signal is performed by the use of above-mentioned methods and the performances are compared. At the end of the paper, the characters and limitations of classic spectrum estimation methods in application are figured out. The conclusion that the paper provides can be useful in the spectrum analysis of turbin's vibration signal.

Key words: turbin; vibration; spectrum estimation; periodogram; multitaper

0 引 言

汽轮机是一类被广泛应用于电力、化工、冶金、矿山、船运等行业的关键的旋转机械设备, 其工况不仅关系该机器本身的正常运行, 而且还会对后续生产造成影响, 严重时将会对国民经济造成重大损失, 甚至会导致机毁人亡的严重后果^[1]。汽轮机故障诊断技术对于上述领域的安全生产和效益的提高具有重要的作用。由于当汽轮机产生故障时, 其振动信号的频谱能量分布情况通常会有所改变, 因此对振动信号进行频谱分析是当前常用的汽轮机故障特征提取方法。目前, 基于傅氏变换的经典谱估计算法在振动信号频谱分析中得到了广泛应用^[2]。

文中对信号处理领域常用的经典谱估计算法进行了分析介绍, 并基于 Matlab 环境利用各种算法对实测的汽轮机振动信号进行了频谱分析, 在此基础上对各种算法在振动信号频谱分析中的性能进行了总结对比, 并指明了经典谱估计算法应用于振动信号频谱分析的特点与局限。

1 振动信号采集

算法仿真分析所使用的汽轮机振动信号源自实际开发的汽轮机振动在线监测系统现场实测数据。振动传感器采用美国 bently 公司的电涡流式传感器, 汽轮机转轴理想转动频率为 50Hz (即转速为 3000 转/分钟), 振动信号的采集策略分两种:

(1) 倍频采样: 按照汽轮机转轴转动频率的整数倍进行整周期采样, 用以进行振动信号的谐波分析。文中对倍频采样频率表示为“倍数 + X”的形式, 例如 32X

收稿日期: 2010-01-14; 修回日期: 2010-04-12

基金项目: 陕西省厂校合作计划项目(H200712229)

作者简介: 张 峰(1979-), 男, 河南南阳人, 讲师, 博士研究生, 研究方向为信号与信息处理、自动控制、计算机应用。

表示 32 倍频采样,倍频采样最高采样频率达到转速的 128 倍。

(2) 固定频率采样:按照固定的采样频率进行信号采集,用以分析振动信号的频率成份,固定频率采样的最高采样频率为 256Hz。

图 1 即为实际采样的振动信号的时域波形,其中图(a)为倍频采样数据,采样频率为转速的 32 倍频,采样点数为 128 点;图(b)为固定频率采样数据,采样频率为 256Hz,采样点数为 400 点。单纯从时域很难对振动信号的特征进行准确分析,也难以发现、定位故障信息,需要借助频谱分析工具。

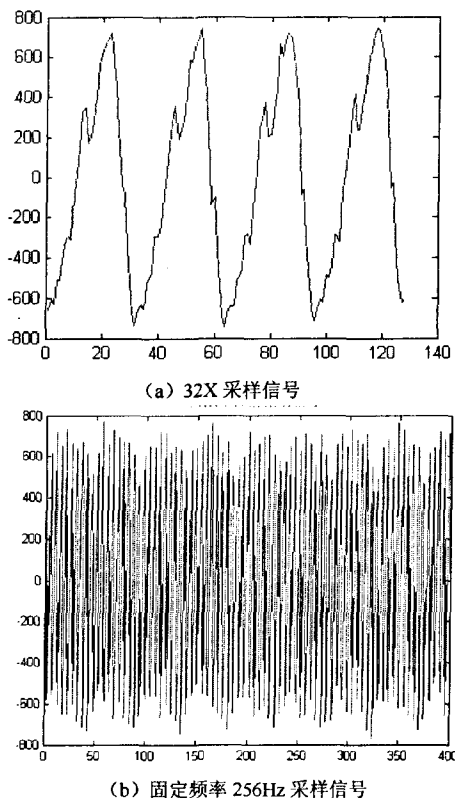


图 1 实际采样的振动信号时域波形

2 经典谱估计算法分析

经典谱估计算法以傅里叶变换为基础,对平稳随机信号的功率谱分析具有较好效果,目前常用的有周期图法、相关图法、改进的周期图法等。以下将对周期图法及改进的周期图法进行简要分析,并简单介绍经典算法中较新提出的多窗谱估计算法。

2.1 周期图法

周期图法属于经典谱估计的直接算法,其基本思路是将信号观测的有限个样本值 $x(n) = \{x(0), x(1), \dots, x(N-1)\}$ 直接进行 FFT 变换,用于对信号功率谱的估计。

实平稳随机信号 $x(n)$ 的 N 点周期图可用如下公

式计算^[3]:

$$I_N(k) = I_N(\omega) |_{\omega = \frac{2\pi k}{N}} = \frac{1}{N} |X(k)|^2 \quad (1)$$

式中, N 为数据长度, $X(k)$ 是信号 $x(n)$ 的离散傅里叶变换,可用 FFT 计算。信号功率谱估计中有 $P_x(\omega) = I_N(\omega)$ 。

该算法的方差在零均值正态白色随机信号时,由下式确定:

$$\text{var}[P_x(\omega)] = \langle \sigma_x^2 \rangle^2 \{1 + [\frac{\sin(\omega N)}{N \sin \omega}]^2\} \quad (2)$$

式中 σ_x^2 为信号的方差。由于 $\text{var}[P_x(\omega)]$ 不随数据长度的增加趋于零,因此周期图法不是一致估计^[3]。该算法的特点是简单,且有较好的分辨力,但在信号记录长度一定的条件下,方差性能较差。

2.2 改进的周期图法

改进的周期图法是为改善谱估计的方差性能而提出的,有平均周期图法(Bartlett 算法)和加窗平均周期图法(Welch 算法)两种,以 Welch 算法为例进行说明。用 $B_x(\omega)$ 表示 Welch 算法的结果,其过程为:将 $x(n)$ 的长度 N 分成 P 段,每段有 M 个数据,则第 P 段的修正周期图为^[4]:

$$J_p(\omega) = \frac{1}{MU} \left| \sum_{n=0}^{M-1} x_p(n) w(n) e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (3)$$

其中 $U(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w^2(n)$, 是归一化因子,允许调整, $w(n)$ 为所加的窗函数,可选择 Rectangular 窗、Hamming 窗、Hanning 窗、Blackman 窗、Kaiser 窗及 Chebyshev 窗^[5]。

对 P 个分段的周期图进行平均,就可得到整个信号 $x(n)$ 的功率谱估计:

$$B_x(\omega) = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} J_p(\omega) \quad (4)$$

由于进行了加窗和分段平均,改进的周期图法对谱估计的方差性能有了较大的改善,但是数据分段及加窗会加剧频谱的泄露,降低谱估计的分辨力。

2.3 多窗谱估计算法

多窗谱估计(亦称为 MTM 算法)也是基于 FFT 的一种谱估计算法,由 Thomson 于 1982 年提出,其基本思路是对同一数据序列加多个正交的数据窗,分别求直接谱(特征谱),然后取平均得到谱估计^[6]。多窗谱定义如下:

$$X(\omega) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} S_k(\omega) \quad (5)$$

其中 K 为加窗的个数, $S_k(\omega)$ 为第 k 个特征谱,计算公式为:

$$S_k(\omega) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) a_k(n) e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (6)$$

式中, N 为数据序列长度, $a_k(n)$ 为第 k 个数据窗序列。Thomson 所使用的数据窗 $a_k(n)$ 是一组相互正交的离散椭圆序列 (DPSS 序列)^[7], 满足:

$$\begin{cases} \sum a_k(n)a_j(n) = 0 & k \neq j \\ \sum a_k(n)a_j(n) = 1 & k = j \end{cases} \quad (7)$$

由于采用多窗进行平滑, 因此多窗谱估计算法方差性能良好, 同时由于数据窗相互正交, 可有效阻止频谱泄露, 保证该方法的谱估计分辨率^[8]。

3 基于经典谱估计的振动信号频谱分析

在 Matlab 的信号处理工具箱中, 带有经典谱估计各种算法的仿真函数, 例如实现 Welch 算法的 Pwelch 函数、实现多窗谱估计算法的 Pmtm 函数等, 只需设置合适的函数参数并编写外围的代码即可完成对信号的频谱分析工作^[9]。

下面使用上述的三种谱估计方法对现场实测的固定频率为 256Hz 采样的振动信号进行频谱仿真分析, 结果如图 2 所示。

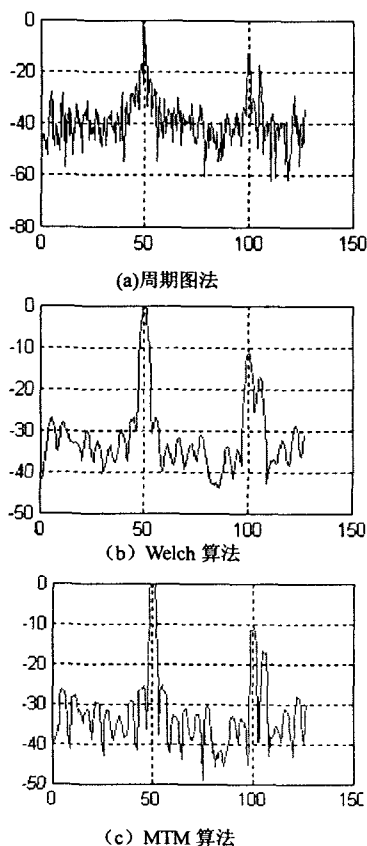


图2 基于经典算法的振动信号频谱 ($f_s = 256\text{Hz}$)

仿真编程中为防止混叠, 需注意 FFT 点数一定要大于或等于采样点数, 三种算法的主要参数设置如下:

- (1) 周期图法, FFT 的点数为 512 点;
- (2) 改进周期图法使用效果较好的 Welch 算法,

FFT 点数为 512 点, 分段长度为 128, 段与段之间有 50% 的重叠, 加窗类型为 Hanning 窗;

(3) 多窗谱估计算法, FFT 点数为 512 点, 加窗个数为 3。

从三幅仿真图形中均可看出, 汽轮机的转动频率约为 50Hz (对应第一个谱峰), 信号中含有一定分量的较明显 100Hz 左右的高频振动成分。

三种算法对比分析如下:

(1) 图(a)是周期图法的频谱分析结果, 从图中可以看出该方法具有很好的谱分辨率, 反映在图形上就是谱峰非常尖锐, 但是方差性能较差, 频谱图的起伏较大, 因而对噪声的容忍能力较差。

(2) 图(b)是改进的周期图法的频谱分析结果, 频谱图的起伏要比周期图法有较大程度的改善, 方差性能良好, 提高了对噪声的容忍能力, 但是谱峰明显变宽, 谱分辨率降低较明显。

(3) 图(c)是多窗谱估计算法的谱分析结果, 相对于周期图法, 其方差性能也有很大的改善, 同时相对于改进的周期图法, 其谱分辨率要好, 可以说该方法是在方差性能与谱分辨率之间进行了较好的折中。

仿真分析结果表明, 三种算法在固定频率采样, 采样信号长度较长 (400 点) 的情况下对振动信号的频谱分析是比较有效的, 实际应用中, 选择哪种方法需要根据分辨率和方差性能的要求进行确定。

4 经典算法在振动信号谐波分析中的局限

4.1 经典谱估计算法分辨率与噪声性能的矛盾

由算法分析可知, 在经典谱估计算法中, 周期图法是分辨率最好的, 实际分析中若对分辨率要求较高, 则需要利用该方法进行频谱分析或谐波分析。但实际信号在传输过程中不可避免地会受到噪声的干扰, 以下利用周期图法对加噪振动信号进行频谱分析, 所加噪声为均值随机噪声, 仿真结果如图 3 所示。

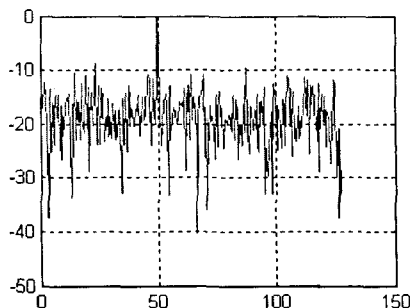


图3 周期图法对加噪振动信号的频谱分析 ($f_s = 256\text{Hz}$)

由图可看出, 由于周期图法方差性能较差, 在噪声的影响下, 振动信号频谱图起伏加剧, 谱峰难以辨认。

若信噪比较低,则汽轮机振动的一些频谱特征将被噪声所淹没,严重影响谱估计的质量与正确性。采用改进周期图法或多窗谱估计算法,方差性能会有改善,但分辨力难以保证。

仿真分析表明,经典谱估计方法谱分析的分辨力和噪声性能之间存在矛盾,在振动信号受到强噪声干扰的情况下,频谱分析难以兼顾分辨力性能和方差性能。

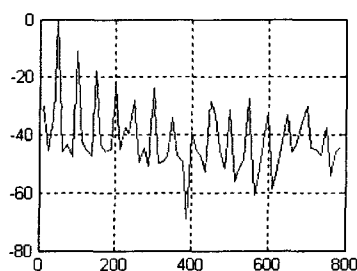
4.2 经典谱算法在短数据情况下的局限

使用上述的三种方法对 32X 采样的振动信号(采样 128 点)进行谐波分析,三种算法的主要参数设置如下:

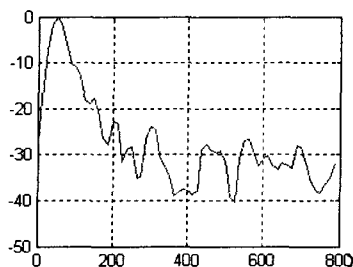
(1)周期图法,FFT 的点数为 128 点;

(2)改进周期图法,FFT 点数为 128 点,分段长度为 64,段与段之间有 50% 的重叠,加窗类型为矩形窗;

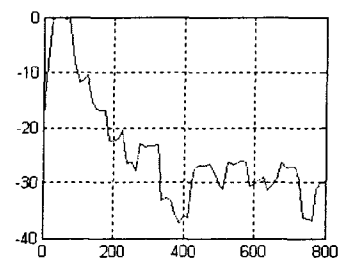
(3)多窗谱估计算法,FFT 点数为 128 点,加窗个数为 3。



(a) 周期图法



(b) Welch 算法



(c) MTM 算法

图 4 经典谱估计算法对振动信号的谐波分析
($f_s = 32X$)

仿真结果如图 4 所示。从仿真图形可看出,在采样数据较短的情况下,经典方法的频谱分辨力严重下降,改进的周期图法及多窗谱估计算法的分析结果甚

至无法准确定位各次谐波。同时,三种分析方法的方差性能都变差,谐波图的起伏较大,谱分析的准确性降低。若要改善谐波分析的谱分辨力和方差性能,只有增加采样点数,这样势必造成计算时间及数据存储量的增加,影响分析的实时性。仿真分析的结果表明,经典算法在采样数据因某种限制而较短的情况下,效果难以满足需求,应用受到一定的局限。

5 结束语

以傅里叶变换为核心的经典谱估计方法在汽轮机振动信号分析及故障诊断领域得到了较为广泛的应用。论文基于 Matlab 使用经典谱估计各种算法对工业现场实测的汽轮机振动信号进行了仿真分析。

分析结果表明,虽然经典谱估计算法存在分辨力与噪声性能的矛盾,但在采样数据较长的情况下,经典算法对振动信号的频谱分析有较好的效果,可根据分辨力及方差性能要求选择合适的分析算法。而在采样数据因某种限制较短的情况下,经典算法性能下降严重,影响谱分析及故障诊断的准确性,应用受到一定的局限^[5]。

由于经典谱估计算法是建立在信号平稳性的假设上的,而汽轮机振动信号本质上是非平稳的,对于非平稳的振动信号的分析,结合现代谱估计的一些方法,比如 AR 模型法^[10]、最大熵谱估计算法^[11],或引入短时傅立叶变换(STFT)、小波变换(DWT)、希尔伯特—黄变换(HHT)等时频分析方法将是解决经典算法局限性的有效途径^[12]。

参考文献:

- [1] 程军圣. 基于 Hilbert-Huang 变换的旋转机械故障诊断方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005: 1-6.
- [2] Chen Y D, Du R. Fault features of large rotating machinery and diagnosis using sensor fusion[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 188(2): 227-242.
- [3] 张学智. 数字信号处理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006: 187-207.
- [4] 张 峰, 石现峰, 张学智. Welch 功率谱估计算法研究及仿真分析[J]. 西安工业大学学报, 2009(8): 353-356.
- [5] 余训锋, 马大玮, 魏 琳. 改进周期图法功率谱估计中的窗函数仿真分析[J]. 计算机仿真, 2008, 25(3): 111-113.
- [6] 吴红卫, 吴镇扬, 赵鹤鸣, 等. 多正弦窗谱估计的性能分析[J]. 信号处理, 2007, 23(6): 932-936.
- [7] Thomson D J. Spectrum estimation and harmonic analysis[J]. Proc. IEEE, 1982, 70: 1055-1096.
- [8] 江志红, 屠其璞, 施 能. 多窗谱分析方法(MTM)及其在

(下转第 217 页)

户侧;而在动态组播中只在用户有请求时,才向其传送请求接收的数据。

在场景二中业务传输开始以后,无论静态组播路由还是动态组播路由,所有组播数据都会在网络中传送,两者需要相同的带宽传送这些数据,动态组播并不节省带宽资源;而且, IPTV 业务不需要在网络骨干侧按需动态生成组播树,按需生成的路径往往就是所有业务提供到所有用户端时的路径;同时静态组播将所有频道的组播流推到用户侧,采用该模式更能满足用户频道间快速切换的要求。

从场景一到场景二,静态组播消耗的带宽没有变化,始终是动态组播的最大值;而动态组播占用的带宽迅速增加,它与 IPTV 用户的数量有关系,用户数量大,同时在线的频道多,占用的带宽就大。

在随机用户行为下,从吞吐量可以看出,动态组播模式下的吞吐量几乎总低于静态组播。这是因为,静态组播中,所有 IPTV 组播源数据都要传送到用户上游的组播复制点;而实际中,所有用户随机选择组播组,在同一时刻,并非所有 IPTV 频道都被观看,网络中的数据也不是所有 IPTV 组播源数据,因此,动态组播总能节省部分带宽。

5 结束语

针对 IPTV 部署中的业务传输模式问题进行了研究,并从时延和吞吐量性能方面进行了分析比较,在不同场景中对组播模式进行了仿真。结果表明,应该结合 IPTV 业务的发展规模及其用户量并根据各组播模式在不同场景下的性能来决定采用哪种组播路由模式。在 IPTV 业务部署初期, IPTV 用户以及同时在线的 IPTV 频道数都比较少,使用动态组播路由模式可以降低对网络带宽的消耗;在业务大规模部署后,随着 IPTV 用户的迅速增加,各节点下的用户群可能收看的频道数,即同时在线的 IPTV 频道数也会随之增加,这时采用动态组播并不节省网络带宽资源;而静态组播通过将组播流拉到用户侧,更能满足用户频道间快速切换的要求,因此,在这种情况下骨干网中应该采用静态组播方式。

参考文献:

- [1] Xiao Y, Du X J, Zhang J Y, et al. Internet protocol television (IPTV): The killer application for the next - generation Internet[J]. IEEE Communications Magazine, 2007, 45(11): 126 - 134.
- [2] Joe H. Challenges delivering high QoE in IPTV networks[J]. Electronic Products, 2009, 51(3): 386 - 395.
- [3] Lee Chae - Sub. IPTV over next generation networks in ITU - T[C]//in Proceedings of 2nd IEEE/IFIP International Workshop on Broadband Convergence Networks, 2007. Munich, Germany: [s. n.], 2007: 15 - 32.
- [4] Lee E M, Han Y T, Park H S. Rendezvous Point Relocation for IPTV Services with PIM - SM[C]//in Proceedings of Asia - Pacific Conference on Communications. Akihabara, JAPAN: [s. n.], 2008: 761 - 765.
- [5] Smith, Donald E. IPTV bandwidth demand: Multicast and channel surfing[C]//in Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007). Anchorage, AK: [s. n.], 2007: 2546 - 2550.
- [6] Yu G, Westholm T, Kihl M, et al. Analysis and Characterization of IPTV user behavior[C]//in Proceedings of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, 2009. Bilbao, SPAIN: IEEE Broadcast technology society, 2009: 650 - 655.
- [7] Fenner W. RFC2236, Internet Group Management Protocol, Version 2[S]. 1997.
- [8] Adams A, Nicholas J, Siadak W. RFC 3973, Protocol Independent Multicast Dense Mode (PIM - DM)[S]. 2005.
- [9] Fenner B, Handley M, Holbrook H, et al. RFC 4601, Protocol Independent Multicast Sparse Mode (PIM - SM)[S]. 2006.
- [10] Huseyin U. Channel change delay in IPTV systems[C]//IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2009. Las Vegas, NV, United States: [s. n.], 2009: 206 - 211.
- [11] Guan Jianfeng, Gao Shuai, Li Xin, et al. The analysis and simulation of multicast join delay[C]//in Proceeding of IC - NIDC2009. Beijing, China: [s. n.], 2009.
- [12] 徐雷鸣, 庞 博, 赵 耀. NS 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [13] Burg J P. Maxiflurl entmpy spectral analysis[D]. Stanford, CA: Dept. of Geophysics, Stanford Univ., 1975.
- [14] Huang N E, Shen Z, Long S R. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert spectrum for Nonlinear and Non - Stationary Time Series Analysis[J]. Proc. R. Soc. Lond A, 1998, 454: 903 - 995.
- [15] 全球变暖研究中的应用[J]. 气象学报, 2001, 59(4): 480 - 490.
- [16] 罗 敏, 刘 松. 基于 Welch 算法的功率谱估计的实现[J]. 北京工商大学学报: 自然科学版, 2007, 25(3): 58 - 60.
- [17] 卢一相, 高清维, 张德详. 基于 AR 模型的齿轮箱振动故障检测[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(6): 250 - 252.

(上接第 212 页)