

旋转机械振动信号整周期重采样技术的研究^{*}

徐水军, 江志农^{*}

(北京化工大学 诊断与自愈工程研究中心, 北京 100029)

摘要:针对频谱泄漏及栅栏效应问题,建立了基于整周期重采样技术提高振动分析精度的方法,采用振动信号同步采集的频率计算整周期采集所需的时间,利用此时间可以对波形实现整周期重采样,并且在相位计算时,对各个通道补偿因循环采样所产生的相位误差。研究表明:该方法对振动信号可以实现整周期重采样,并能显著提高振动信号的幅值及相位精度,具有对数据采集系统硬件设备要求低、计算精度高的优点,可广泛应用于大型旋转机械的在线监测。

关键词:振动信号;键相;相位补偿;整周期重采样

中图分类号:TH113.1;TP277

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)02-0153-04

Study on full period re-sampling technology for vibration signal on rotating machinery

XV Shui-jun, JIANG Zhi-nong

(Diagnosis and Self-Recovery Engineering Research Center,

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at improving the accuracy of vibration signal analysis, a method based on the full period re-sampling technology was established. The full period sampling time calculated by the frequency synchronously sampled with the vibration signal was used to re-sample the waveform. And each channel was compensated with the error phase generated by loop sampling between channels. The study shows that this method can re-sample the vibration signal in periods correctly and increase the accuracy of amplitude and phase. Because of its low hardware requirement and high accuracy, it can be widely used in on-line monitoring of large rotating machinery.

Key words: vibration signal; key phase; phase compensation; full period re-sampling

0 引 言

旋转机械运行时产生的振动信号可以反映机组运行状态的优劣,为故障诊断提供重要信息。振幅、相位是现场振动监测的主要对象,一般需采用计算机对有限长度的离散数据进行频谱分析。利用 FFT 对信号进行频谱分析时,分析精度主要取决于混叠效应、量化误差、频谱泄漏与栅栏效应。通过抗混叠滤波器及匹配精度的 A/D,即可将混叠效应、量化误差控制在整体精度范围之内。对于频谱泄漏和栅栏效应,如果所

截取的离散信号不满足整周期条件,就会产生较大误差,影响振动分析精度,不利于故障诊断^[1-3]。因此,研究整周期采样技术对于旋转机械振动分析具有重要意义。

牛玉广等设计出采样率随工频自动调整的采样控制电路实现整周期采样^[4];张长会等将软件和硬件相结合实现实时测量转速和振动信号整周期采样的功能^[5];胡劲松等应用微分和样条插值对转子振动信号实现整周期重采样^[6];任达千等采用重心法检测键相信号周期实现整周期采样^[7]。

收稿日期:2010-08-31

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2007AA04Z433);国家自然科学基金重点资助项目(50635010)

作者简介:徐水军(1986-),男,浙江嘉兴人,主要从事大型石化设备在线监测数据采集方面的研究。E-mail: dolphin516@126.com

通信联系人:江志农,男,教授,博士生导师。E-mail: jiangzhinong@263.net

文献[4-5]利用硬件实现某一时刻的转速控制下一时刻的采样率,因此只有转速稳定时可实现整周期采样,在转速波动时会产生较大误差;文献[6-7]将键相信号与振动信号均作为电压信号同时采集,采用软件提取键相波形的周期起始点,其精度受制于算法的可靠性。

本研究采用触发采集与软件重采样相结合的方式对振动信号进行整周期处理,有效解决了这些问题。

1 触发采集与整周期重采样

1.1 键相信号预处理及触发采集

对于在线监测系统,为了提高测量精度和长期获取稳定可靠的标准键相信号,应采用电涡流传感器^[8]。电涡流传感器输出电压与传感器头部线圈和导体之间的距离成正比。在转轴圆周表面设置一个凸条或凹槽,则转轴每转一周,电涡流传感器便输出一个负或正脉冲信号,通常称之为键相信号。测量键相信号的周期即可获得旋转机械的转速,将键相信号作为振动采集的触发信号即可获取振动信号基准。本研究以转轴圆周表面设置凹槽为例,对键相信号进行分析。

造成键相脉冲异常的原因主要可以分为两部分:

①电涡流传感器安装不当,如间隙电压偏小,即使调低触发电平也可能无法正常触发;②键槽设置不合理,如键槽深度不够,假设键相信号可以正常触发,但触发信号可能不是来自电涡流传感器输出的脉冲信号,而是来自转轴或支架振动的高点。因此在使用键相信号之前,首先要合理设置键槽,使键槽深度大于该处转轴表面摆值振幅值(峰值),并保证键槽的垂直度,一般键槽深度为 0.8 mm ~ 1.2 mm 左右,键槽宽度为 6 mm ~ 10 mm 左右;其次需要确认电涡流传感器是否正确安装,保证间隙电压为 -10 V 左右。

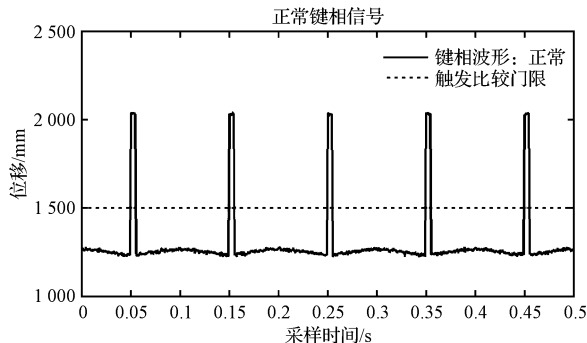


图1 正常键相信号

合理的键相信号应如图1所示,只要将键相信号通过一个门限可设的迟滞比较电路,即可获取数采卡

所需的触发信号,没有必要对键相信号采用微分处理、重心法等方法索取周期初始点,大大提高了系统的可靠性。本研究所采用的数采卡支持 TTL 电平信号,因此键相信号预处理后得到如图2所示的触发信号,并将此信号输入 A/D 外触发端,实现触发采集。

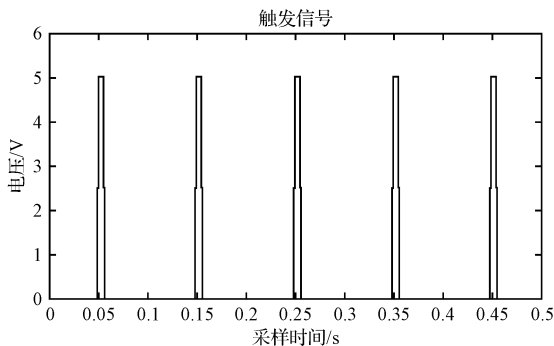


图2 预处理后的触发采集信号

1.2 频率测量

由于旋转机械运行工况比较复杂,严格地说旋转机械运行时处于变速状态,每一时刻对应着不同的转速。理想的转速测量应当测得每一时刻的瞬时转速,但由于现场条件限制,很难实现。数字频率测量法有直接测频法、测周期法和多周期同步法。考虑到旋转机械工频较低,且需要利用频率对振动信号实现整周期重采样,因此本研究采用多周期测频法。通过换算可求得转子多周期的平均转速。

1.3 相位补偿

在振动监测基本参数中,相位对于谐波分析、动平衡测量、识别振型和共振点非常关键,因此数据采集的一项关键技术就是基于键相信号多通道数据同步。对于一般工业应用,采集卡只有单个 ADC,利用多路复用器切换实现多通道循环采集。本系统采集方式如图3所示。采样间隔为采样频率的倒数,切换间隔为切换频率的倒数,切换频率是采样频率与通道数之积。由此可知,各个通道并非完全同步。

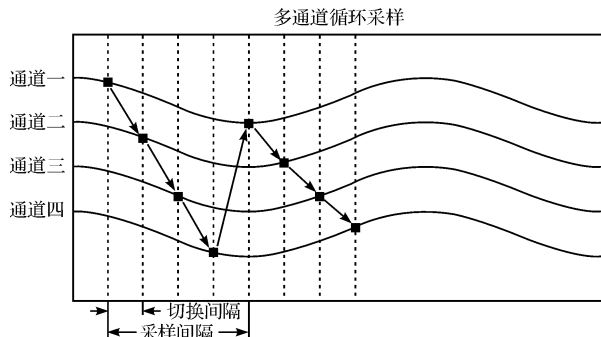


图3 多通道循环采样示意图

由于通道间并非完全同步采样,因此各通道振动波形的相位存在差异。具体某个通道与基准相位差按下式计算:

$$\varphi = n/60 \times 360 \times (N - 1) \times 1/(f_s \times N) \quad (1)$$

式中: φ —相位差, $^{\circ}$, n —机组转速,r/min, N —通道序号, f_s —采样频率,Hz。

例如,机组转速为9 000 r/min,采样频率为4 096 Hz,通道序号为16时,可求得16通道与基准信号相位差为12.36 $^{\circ}$ 。在不改变采样频率时,如果提高机组转速,此误差会更大。由于相位差由采样率和转速两个变量决定,每次采样完成后,可以由采样率和单周期平均转速计算出各个通道与基准信号的相位差,将此相位差补偿到各个通道的相位特征值,即可获取精度较高的相位。

1.4 整周期重采样

整周期采样可以使信号特征频率为频域分辨率的整数倍,避免产生频谱泄漏,保证特征频率对应的幅值真实反映旋转机械运行状态。传统的方式是根据转速调整采样率,然后进行整周期采样,其精度受转速波动率的影响较大。

本研究根据当前转速调整下一次的采样率、采样点数及信号周期数,如表1所示。随着转速上升,采样率和采样点数调整使采样时间降低,减小了采样周期内转速波动的影响。当然上述采样未实现整周期,因此需要进行软件重采样。

表1 转速—采样率、采样点数对照表			
转速区间/(r·min ⁻¹)	采样频率/Hz	采样点数	整周期数
<240	1 024	4 096	8
240~480	1 024	3 072	12
480~960	1 024	2 048	16
960~1 920	2 048	3 072	16
1 920~3 840	4 096	3 072	16
3 840~7 680	8 192	3 072	16
>7 680	8 192	2 048	32

对所在转速级数不同的旋转机械振动测点,采样率和采样点数可能不同,而数采卡只有一个ADC,因此需统一采样率和采样点数,数采卡的采样点数和采样率计算公式如下:

$$\begin{cases} f_s = \max(f_1, f_2, \cdots, f_i, \cdots, f_N) \\ t_s = \max(n_1/f, n_2/f_2, \cdots, n_i/f_i, \cdots, n_N/f_N) \\ n_s = f_s \times t_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_i —测点采样率, n_i —测点采样点数, N —通道序号, f_s —数采卡采样率, t_s —数采卡采样时间, n_s —数采卡采样点数。

采集完成后,对于采样率低于数采卡采样率的测点进行数字抗混叠滤波,然后对波形进行等间隔抽样;对

于采样率与数采卡采样率相同的测点,直接从波形初始点截取所需点数的波形。波形经过抽样或截断处理后,即可用于整周期重采样。例如前一次转速为176 r/min,本次采样率修正为1 024 Hz,采样点数为4 096。本次采集8个键相脉冲后得到的平均转速为179 r/min。如图4所示,处理时通过频率和采样率计算8周期波形点数,对振动信号重新截断,实现整周期重采样。如果信号截断所需点数大于采样点数时,将自动调整截断周期,重新计算振动波形可以截取的最多点数。

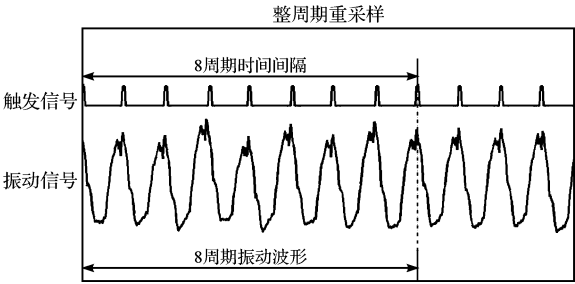


图4 整周期重采样示意图

1.5 仿真实验

传统的频谱分析方法是对一定长度的时域信号加Hanning窗,再经快速傅里叶变换得到离散频谱,经过幅值恢复后即可求得幅值。由FFT的实部和虚部得到的相位误差高达 $\pm 90^{\circ}$,所以一般采用时域信号与相应频率的标准正弦信号进行互功率谱分析,搜索幅值谱的最大值并求取相应的相位。近些年,一些学者利用离散频谱校正技术提高频谱分析精度,工程中常用的方法是Hanning窗能量重心校正法^[9-10]。本研究所采用的方法是先对一定长度的时域信号进行整周期重采样,再按传统的方式求取幅值与相位。上述3种计算方法在下文中分别称为:传统法、频谱校正法、整周期重采样法。

由于旋转机械在正常运行过程中,表征其过程的随机信号是平稳和弱平稳的,在过渡状态下,其信号往往是非平稳的。因此本研究对传统法、频谱校正法和整周期重采样法分别使用平稳信号和非平稳信号进行测试,以比较三者的幅值和相位精度。

首先用平稳信号进行测试,信号如下:

$$y(t) = 25\sin(2\pi 0.5ft + 75) + 250\sin(2\pi ft + 140) + 125\sin(2\pi 2ft + 93) + 50\sin(2\pi 3ft + 87) \quad (3)$$

式中, f_s, n 根据表1设定, $f = 1 : 0.1 : 180$, $t = 0 : 1/f_s : (n - 1) \times f_s$ 。

对于稳态信号,由传统法、频谱校正法和整周期重采样法得到的1X幅值和1X相位误差分别如图5、图6所示。

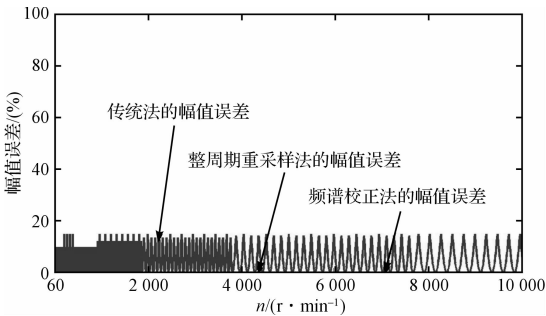


图 5 稳态信号 1X 幅值误差随转速变化曲线

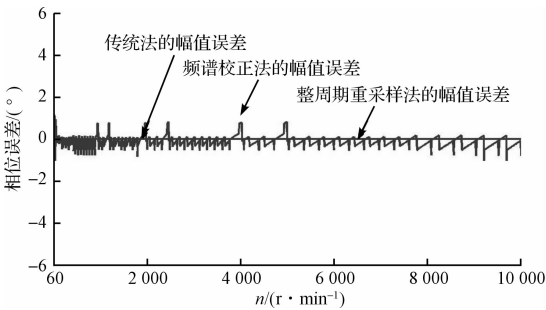


图 6 稳态信号 1X 相位误差随转速变化曲线

对于非稳态信号,采用 Linear Chirp Wave 信号验证。Linear Chirp Wave 信号是指正弦信号的频率随时间线性变化。本处设置信号的终止频率与初始频率相差 2%,1X、2X、3X、0.5X 幅值分别为 250、125、50、25,相位均为 0。

对于非稳态信号,由传统法、频谱校正法和整周期重采样法得到的 1X 幅值和 1X 相位与转速关系分别如图 7、图 8 所示。

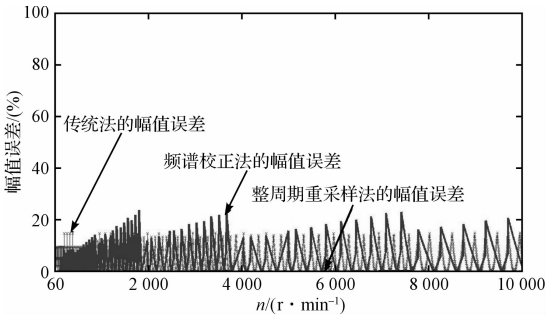


图 7 非稳态信号 1X 幅值误差随转速变化曲线

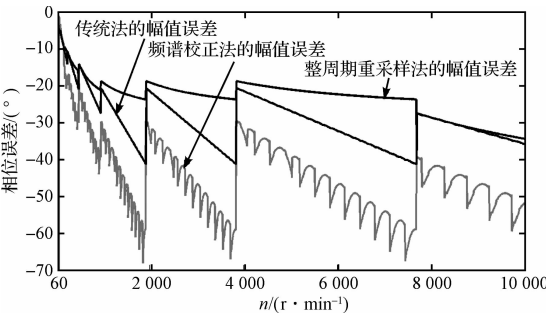


图 8 非稳态信号 1X 相位误差随转速变化曲线

对于稳态信号和非稳态信号,由传统法、频谱校正法和整周期重采样法得到的 1X 幅值和 1X 相位在高频和低频范围的最大误差分别如表 2 ~ 表 4 所示。

表 2 传统法的 1X 幅值、1X 相位最大误差

转速范围/(r·min ⁻¹)	60 ~ 240		240 ~ 10 000	
	幅值/(%)	相位/(°)	幅值/(%)	相位/(°)
稳态信号	10.04	-2.75	15.1	0
非稳态信号	9.952	-13.75	15.45	-41.32

表 3 频谱校正法的 1X 幅值、1X 相位最大误差

转速范围/(r·min ⁻¹)	60 ~ 240		240 ~ 10 000	
	幅值/(%)	相位/(°)	幅值/(%)	相位/(°)
稳态信号	1.116	5.12	0.192	-1.24
非稳态信号	5.984	-20.76	24.28	-68.1

表 4 整周期重采样法的 1X 幅值、1X 相位最大误差

转速范围/(r·min ⁻¹)	60 ~ 240		240 ~ 10 000	
	幅值/(%)	相位/(°)	幅值/(%)	相位/(°)
稳态信号	0.252	-2.42	0.096	0
非稳态信号	0.104	-10.63	0.96	-37.55

由表 2 可以看出,对于稳态信号,传统法的最大幅值误差为 15.1%,将严重影响故障诊断的准确性,频谱校正法和整周期重采样法的误差较小,且整周期重采样法性能优于频谱校正法;对于非稳态信号,传统法和频谱校正法的幅值误差和相位误差较大,均不能准确反映旋转机械的运行状态,而整周期重采样法的幅值最大误差为 0.96%,相位最大误差为 -37.55°,其性能显著优于传统法和频谱校正法。综上所述,本研究所采用的整周期重采样法可以提高振动信号的幅值和相位精度,性能明显优于传统的频谱分析法及近些年提出的频谱校正法。

2 结束语

本研究采用触发采集及整周期重采样处理,对于稳态信号,可使振动信号的幅值和相位准确反应机组的运行状态;对于非稳态信号,也可有效提高倍频幅值及相位精度。而且本研究补偿了因多通道循环采样而产生的相位误差,可大大减小数采系统的硬件成本。采集系统成本低、处理精度高,可广泛用于在线监测领域。

参考文献 (References) :

[1] EDWARDS S, LEES A W, FRISWELL M I. Fault diagnosis of rotation machinery [J]. **The Shock and Vibration Digest**, 1998, 30(1) : 4-13.

[2] AHMADI H, MOLLAZADE K. Bearing fault diagnosis of a mine stone crusher by vibration condition monitoring technique [J]. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, 2009, 1(3) : 112-115.

单。钢带的弹性变形与绳相比可以忽略,并且钢带的长度比绳更易精确控制。

在一定的承载范围内,可以说钢带并联机构兼备了杆支撑并联机构和绳牵引并联机构的一些优点。在承载要求不高、体积和质量要求较小、运动速度要求较快的情况下,可以替代杆支撑结构。在要求定位精度高,控制策略简单的情况下,可以放弃绳牵引结构而采用钢带结构。

但是,钢带并联机构是一种新型的结构,很多的问题还需要进行深入的研究。钢带并联机器人在工作空间中依靠钢带支撑和运动,因此容易发生失稳与振动,这是目前发展钢带并联机器人技术面临的主要问题。钢带结构的支撑承载能力是限制钢带并联机构应用的一个重要的因素,如何实现钢带并联机构的较高支撑承载是一个亟待解决的问题。

3.2 应用前景

上述功能特点使得钢带并联机器人在工程中的应用具有广阔的前景。钢带并联机器人可应用于狭窄管道和深孔中的移动检测作业、水果的自动采摘等。在航天领域的应用中,其特点更明显。在失重的太空中,钢带并联机器人较大的工作空间可使得基于其工作原理设计的太空望远镜进行大范围的调焦。当宇航员离开航天器进行太空行走和作业时,其还可以将宇航员送到目的地,并对宇航员的位姿进行调整。钢带并联机器人还具有体积小、重量轻、结构紧凑的特点,非常便于航天器的运载。在医疗领域,钢带并联机构应用于医疗器械中,可以大大减轻器械的重量,便于携带实施急救;另外,钢带并联机构的调整速度快,便于快速实现机器人位姿调整与定位,加快治疗的速度。

4 结束语

(1) 本研究设计了一种新型的六自由度钢带并联机器人。该钢带并联机器人采用钢带运动副作为其驱

动方式,在运动副的结构上不同于传统的杆支撑并联机构和绳牵引并联机构,是一种全新的并联机构形式。

(2) 弯曲圆弧截面的钢带能承受一定的压力,采用这种结构作为运动副的钢带并联机器人兼具杆支撑并联机构和绳牵引并联机构的特点,具有广泛的应用前景。

(3) 钢带并联机器人在工作空间内容易发生失稳与振动,这是目前发展钢带并联机器人技术面临的主要问题。

参考文献(References):

- [1] STEWART D. A platform with 6-DOF[J]. **Proceedings on Institution of Mechanical Engineering**, 1965, 18(1): 371-386.
- [2] 李晓冬. 并联机器人的特点及应用分析[J]. 黑龙江科技信息, 2008(10): 36-37.
- [3] LIU X W, QI Y, AGYEMANG B B, et al. Design wire-driven parallel suspension system for wind tunnel based virtual flight testing[C]//Proceedings of the 7th ICFDM 2006 International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing. Guangzhou: Guangdong University of Technology Press, 2006: 7-12.
- [4] 艾青林, 计时明, 金明生, 等. 一种六自由度钢带并联机器人机构: 中国, ZL 200610049643.0[P]. 2008-01-09.
- [5] MERLET J P. Parallel Robots[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [6] 胡国胜. 并联机器人的工作空间研究现状[J]. 仪器仪表表用户, 2004, 11(6): 1-3.
- [7] VERHOEVEN R. Analysis of the Workspace of Tendon-based Stewart Platforms[D]. German, Duisburg: Duisburg-Essen University, 2004.
- [8] 郑亚青, 刘雄伟. 绳牵引并联机构的研究概况与发展趋势[J]. 中国机械工程, 2003, 14(9): 808-810.
- [9] 孙立宁, 于玲涛, 杜志江, 等. 并联机器人胡克铰工作空间的研究与应用[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 120-124.
- [10] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. [编辑: 柴福莉]

(上接第 156 页)

- [3] KIM N H. Rotor fault detection system for inverter driven induction motors using currents signals and an encoder[J]. **Journal of Power Electronics**, 2007, 7(4): 271-277.
- [4] 牛玉广, 侯维宁. 多通道信号的同相位整周期采样[J]. 数据采集与处理, 1997, 12(2): 114-117.
- [5] 张长会, 徐宏波, 牛忠荣. 用 ADSP2181 实现旋转机械整周期采样[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(4): 565-568.
- [6] 胡劲松, 杨世锡. 转子振动信号同步整周期重采样方法的研究[J]. 动力工程, 2008, 28(3): 408-410.
- [7] 任达千, 杨世锡, 吴昭同, 等. 检测键相信号周期的新方法

研究[J]. 制造业自动化, 2009, 31(3): 106-108.

- [8] 施维新, 石静波. 汽轮发电机组振动及事故[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 19-24.
- [9] 丁康, 谢明, 杨志坚. 离散频谱分析校正理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 111-119.
- [10] DING Kang, CAO Dang-dang, LI Wei-hua. An approach to discrete spectrum correction based on energy centroid[J]. **Key Engineering Materials**, 2006, 321-323(11): 1270-1273. [编辑: 柴福莉]