



改进的 Seam Carving 瞬时频率估计算法研究

摘要

旋转机械升降速阶段微弱振动信号具有潜在性和动态响应的微弱性等特点,因此瞬时频率是限制早期故障诊断发展的关键问题.针对这一问题,该文引入了图像处理领域的 Seam Carving(SC)算法,并对 SC 算法进行改进,结合短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transformation,STFT),提出了 STFT-SC 瞬时频率估计算法.STFT-SC 算法采用 STFT 对振动信号进行时频分析,然后利用 Seam Carving 算法中的能量梯度,采用动态规划的思想寻求 seam 路径,实现了旋转机械振动信号的一阶瞬时频率提取,最后对一阶时频数据进行时域重构,将重构的时域信号和仿真信号进行相关性分析.结果表明,STFT-SC 算法对于高噪声、邻近阶比等振动信号都具有非常好的效果.

关键词

旋转机械; Seam Carving 算法; 瞬时频率估计; 能量梯度

中图分类号 TP242

文献标志码 A

收稿日期 2016-03-18

资助项目 国家自然科学基金(51505234)

作者简介

赵晓平,女,博士,副教授,主要研究方向为动态测试与虚拟仪器.zxp@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 计算机与软件学院,南京,210044

2 南京信息工程大学 江苏省网络监控工程中心,南京,210044

0 引言

滚动轴承升降速阶段微弱振动信号包含了大量的运行状态信息,其中一些是难以发现的系统缺陷.实现这一阶段高效的故障特征提取,是滚动轴承故障诊断的重要环节,对轴承设备的正常运行具有重要意义^[1].而瞬时频率估计是高效特征提取的关键.

针对旋转机械振动信号的特点,早期提出的瞬时频率估计方法主要有:STFT 谱峰搜索法^[2]、隐马尔科夫模型瞬时频率估计方法^[3]、分段最小二乘拟合的瞬时频率估计算法^[4]等.但这几种常用的算法都有其各自的局限性,如 STFT 谱峰搜索法在求取多分量信号的瞬时频率时,采用的是遮隔技术,从而增加了计算量,除此以外,遮隔宽度的设定也会影响瞬时频率的估计精度.隐马尔科夫模型瞬时频率估计方法采用了大量的矩阵运算,增加了运算量.分段最小二乘拟合的瞬时频率估计算法是根据分段点处是否为速度瞬变点来设定边界条件的,从而有一定的局限性.

在以上算法的基础上,近两年提出了 STFT-VF(Short-Time Fourier Transform-Viterbi algorithm Fit,STFT-VF)瞬时估计算法^[5]以及对谱峰搜索方法的各种改进算法^[6]等.STFT-VF 算法是将 STFT 和 Viterbi 算法结合提出的瞬时频率估计算法,该算法运用了 Viterbi 算法寻找最小时间点间的最优频率路径,结合旋转机械非平稳信号的特点,实现了对参考轴瞬时频率的估计,因旋转机械信号数据量大,因此计算效率上有待进一步提高.改进的峰值搜索法与传统的峰值搜索法相比在降低信号干扰方面有了很大的改进,但在计算精度和抗干扰方面仍待提高.

Seam Carving 算法^[7]是图像处理领域根据像素的能量梯度来寻求 seam 路径(最佳路径)的算法.本文以振动信号的时频谱图为基础,引入 Seam Carving 寻求最短路径的思想,根据滚动轴承振动信号的特点,对其进行改进,将短时傅里叶变换和 Seam Carving 算法相结合,提出 STFT-SC 瞬时频率估计算法.

1 Seam Carving 算述描述

Seam Carving 算法是近年来图像处理领域内的一个新的研究热点,是一种基于内容的图像缩放算法^[8].它的基本思想是根据图像中

像素的重要性,通过逐步赋值或删除图像中单像素宽连续的近似水平或垂直的曲线(seam)(即寻找一条最短路径),从而来调整图像尺寸的大小。

为了寻找 seam,首先要计算图像的能量分布.对于高度为 n ,宽度为 m 的图像,其像素点为 (x,y) , $0 \leq x \leq (n-1)$ 且 $0 \leq y \leq (m-1)$.在像素点 (x,y) 的密度值用函数 $I(x,y)$ 来表示,那么像素点的能量值 $e(I(x,y))$ 为

$$e(I(x,y)) = \left| \frac{\partial}{\partial x} I(x,y) \right| + \left| \frac{\partial}{\partial y} I(x,y) \right| = |G_x(I(x,y))| + |G_y(I(x,y))|, \quad (1)$$

其中, G_x 和 G_y 分别为水平和垂直方向的 Sobel 算子.在寻找最优 seam 的过程中,须先寻找以旋转机械工频为起始点的最小能量的 seam.为了寻找总能量最低的 seam,采用了动态规划算法,相应的状态转移方程为

$$M(x,y) = e(I(x,y)) + \min(M(x-1,y-1), M(x-1,y), M(x-1,y+1)), \quad (2)$$

$M(x,y)$ 表示 (x,y) 坐标点上像素修改后的累积能量,即 M 是求解动态规划所用的和值矩阵,记录的是当前状态对应的路径能量和.在寻找最短路径的过程中,使用矩阵 path 做记录,从而找出能量最短的路径。

2 STFT-SC 瞬时频率估计算法

对于旋转机械升降速阶段的振动信号,为了能更加准确地获取故障诊断的信息,采样频率一般比较高,振动信号的数量比较大,可以对数据进行分段处理,也可对数据进行抽取.以上是在文献[5]和文献[9]中所采用的方法.STFT-SC 算法具有快速和高效性,不对原始数据进行降采样,以旋转机械升速阶段振动信号为例,STFT-SC 瞬时频率估计算法的流程如图 1 所示。

1)对振动信号进行时频分析.首先对振动信号进行 STFT 分析,从而得到信号的时频谱图.给定一个时间宽度很短的窗函数 $\gamma(t)$,令窗滑动,则信号 $x(t)$ 的 STFT 为^[9]

$$S_x^{(\gamma)}(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x(\tau)\gamma * (\tau - t)] \exp(-j2\pi f\tau) dt, \quad (3)$$

式(3)中,*代表复共轭.STFT 频谱(SPEC)即 STFT 的时间-频率能量分布(瞬时频率谱密度)定义为 S_x 模值的平方:

$$P(t,f) = |S(t,f)|^2. \quad (4)$$

2)初始值的选取.旋转机械升速过程总有一稳

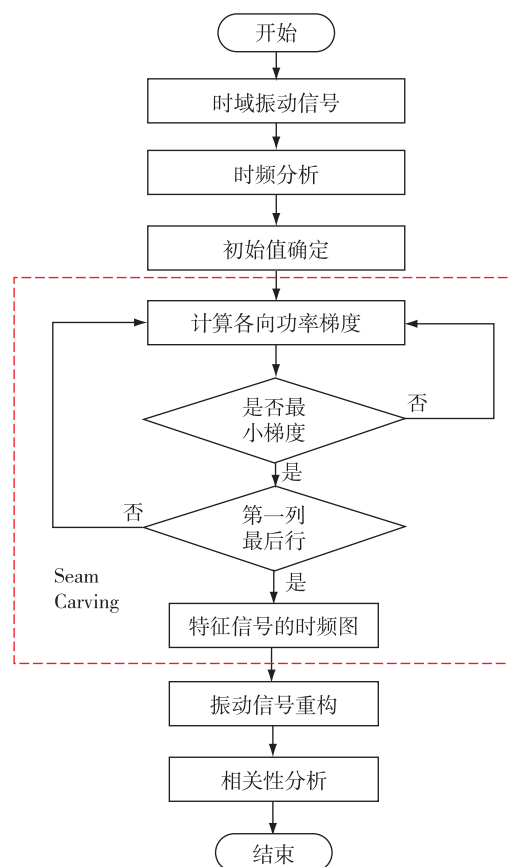


图 1 STFT-SC 瞬时频率估计算法流程

Fig. 1 STFT-SC instantaneous frequency estimation flow chart

定转速(相对恒定)阶段,例如对额定转速为 6 000 r/min 的升速阶段,在时频面上最终时刻参考轴对应的频率应在 100 Hz 附近.将 100 Hz 作为瞬时频率估计的起始点.对于时频谱中超过最高频率的数据可以将其去掉避免不必要的计算,从而降低计算量。

3)计算各向梯度.在图像处理中,像素的重要度定量地表示每个像素对图像视觉内容的重要程度,也称之为该像素点的能量.像素重要度的计算可通过像素梯度、图像熵、视觉关注度等确定.本文采用信号功率谱能量进行梯度计算.具体而言,以升速阶段为例,将整个寻求瞬时频率的过程,进行局部分析,如图 2 所示.假设当前的瞬时频率为中心点 5,那么下一个瞬时频率从中心点 5 出发,为纵向和横向的 8 连通路.根据旋转机械升速阶段振动信号的特点,分析可知,从中心点 5 到点 2、点 3、点 6、点 8 和点 9 等 5 个方向上的可能性几乎为零.因此,点 5 前一时刻的瞬时频率值只能是点 1、点 4 和点 7 方向上的某一个值.求取点 5 到点 1、点 4 和点 7 的能量梯度.这种思想,将 STFT-SC 计算效率大幅提高。

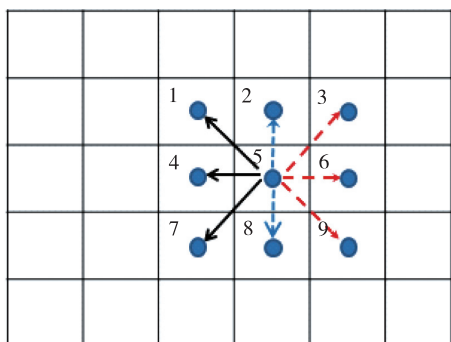


图2 寻求 seam 过程

Fig. 2 Process of solving seam

4) 功率谱梯度寻求 seam. 寻求 seam 路径的过程中,在本文采用动态规划算法来确定能量最小的 seam 通路,修改过程可以用式(2)累积能量的动态转移方程表示.选取功率谱在 t 时刻某一频率 f 的幅值 $P(t, f)$,计算其与 $t+1$ 时刻 $P(t+1, f)$ 之间的梯度,并以该梯度作为甄别瞬时频率的参数:

$$G = (P(t+1, f) - P(t, f)) / f, \quad (5)$$

式(5)中选取的 $P(t, f)$ 必须使沿信号功率谱梯度最小,以利于达到最好的瞬时频率估计的效果.甄别参数可表示为

$$G = \frac{P(t+1) - P(t)}{k\Delta f} = \frac{|X[k+1]|^2/N - |X[k]|^2/N}{k(2\pi/N)} = \frac{1}{2\pi k} (|X[k+1]|^2 - |X[k]|^2), \quad (6)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1,$$

其中 N 表示采样点数.对于图 2 来讲,即点 1、点 4、点 7 等 3 个点与点 5 的梯度差最小,说明该像素最有可能是 seam 路径上的点,同时将另外 2 个点的功率谱值置为 0,此方法能够高效地将信号中的噪声滤除掉,具体结果见后文的图 6.

重复以上过程,直到得到 $x=0$ 且 $y=0$,从而求出连通初始点到原点的 seam 通路.

5) 振动信号重构.通过 STFT-SC 算法获取信号的 1 阶瞬时频率值,实现各阶分量的时域信号重构.将重构的时域信号和仿真信号进行相关性分析,从而验证 STFT-SC 特征提取算法的高效性.

3 实验验证

3.1 仿真实验

为了验证算法,设计一个基准频率和幅值均变

化的仿真信号,取采样频率 $f_s = 2048$ Hz,采样时间 $T = 20$ s,基准频率从 20 Hz(f_{start})到 100 Hz(f_{work})线性变化,第 n 个点的频率表示为 $f(n) = (f_{\text{work}} - f_{\text{start}})n/N$,角速度为 $\omega(n) = 2\pi f(n)$,转过的相位角为 $\phi(n) = \sum_{i=1}^n \omega(i) \Delta t$.其中 1 阶频率信号的幅值在 200 处跳变,如式(7)所示:

$$A(n) = \begin{cases} 0, & n < 200, \\ 1, & n \geq 200. \end{cases} \quad (7)$$

取一个 1.3 阶频率信号,和 1 阶振动信号构成邻近分量,幅值为正弦变化,如式(8)所示:

$$B(n) = 1.2 + \sin(1.3\pi n/N). \quad (8)$$

第 3 阶频率信号的赋值呈 0 到 1 线性变化.由 3 个频率成分组建的多分量仿真信号如式(9)所示:

$$s(n) = A(n) \times \sin\phi(n) + B(n) \times \sin(1.2 \times \phi(n)) + (n/N) \times \sin(2 \times \phi(n)) + \eta(n), \quad (9)$$

式中 $\eta(n)$ 为 30% 的高斯白噪声,其时域波形如图 3 所示,图 4 为 1 阶时域信号.

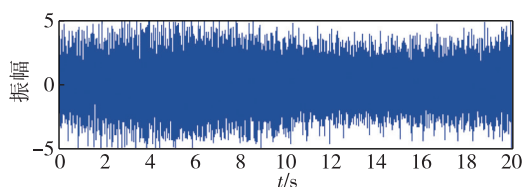


图3 仿真信号

Fig. 3 Simulation signal

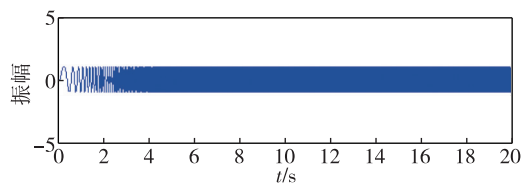


图4 1阶时域信号

Fig. 4 First order time-domain signal

对时域信号进行频谱分析,图 5 为仿真的时域信号的频谱.从图 5 中可以看出共包含 3 个频率分量,其中 1 阶频率分量和 1.3 阶频率分量是临近阶比分量.在图 5 基础上进行 STFT-CS 1 阶分量瞬时频率估计,结果如 6 所示.从图 6 中可以看出 1 阶信号为从 20~100 Hz 的 20 s 的信号,与仿真的 1 阶时域信号特征吻合.

为了进一步证明 STFT-SC 瞬时频率估计的高效性,本文从两个方面进行了验证:提取出的 1 阶瞬时频率与仿真的 1 阶频率进行了对比;对提取出的 1

阶信号进行时域重构,结果如图7所示.且对重构的时域信号和仿真的1阶信号进行相关性分析.

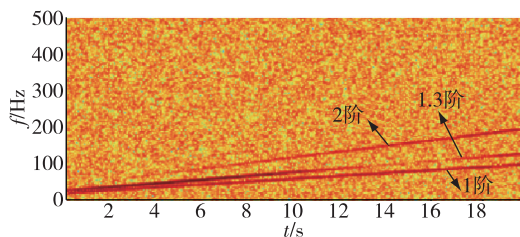


图5 时域信号的频谱

Fig. 5 Spectrum of simulation signal

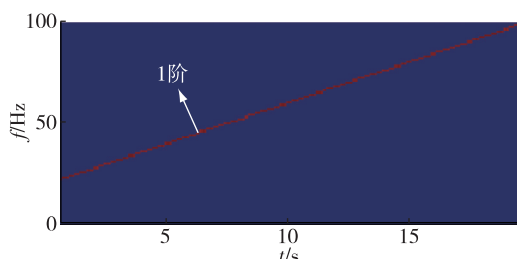


图6 STFT-SC算法估计的1阶瞬时频率

Fig. 6 First order instantaneous frequency estimated by STFT-SC

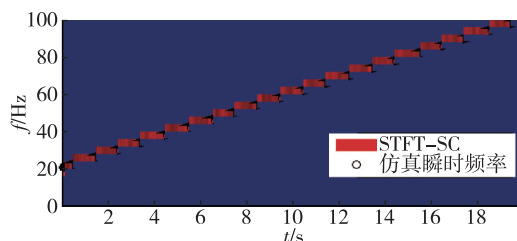


图7 提取的1阶信号和仿真1阶信号对比

Fig. 7 Comparison between estimated and simulated first order signal

从图7可以看出,提取出的1阶瞬时频率和仿真的1阶频率信号完全重叠,其中红色虚线为STFT-SC瞬时频率估计算法提取出的1阶瞬时频率值,黑色圆圈为仿真的1阶频率信号.另外对图4和图8进行了相关性分析,其相关性达到了98.6%,其相似度极高,从而证明STFT-CS算法的高效性.在对振动信号进行STFT时频分析时,加窗重叠对时域重构的精度有一定影响.

3.2 实测试验

采用OROS R3X系的动态信号分析仪和笔者自主研发的旋转机械阶比分析软件(OrdTra)对卧式螺旋离心机(简称卧螺离心机)升速阶段振动信号进

行测试实验.卧螺离心机相关参数如表1所示.

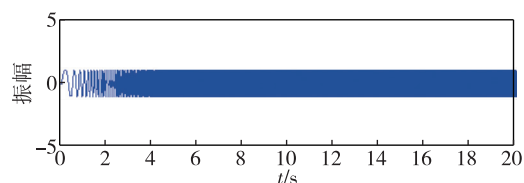


图8 重构的1阶频率信号

Fig. 8 1 Reconstructed first order signal

表1 卧螺离心机主要技术参数

Table 1 Technical parameters of horizontal spiral centrifuges

转鼓工作转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	转速差/ ($r \cdot \min^{-1}$)	功率/ kW	整机质量/ kg	外形尺寸/ mm
3 300	30	45	4 200	4 500×1 240×1 340

振动传感器布置在左右轴承座,从水平和垂直两个方向测量大端和小端瓦振.在大端和小端都安装了支架固定电涡流传感器用来测量轴的振动.光电传感器安装于转鼓大端.传感器的布置如图9所示.

试验中,测量瓦振的传感器为本特利9200速度传感器,灵敏度为 $20 \text{ mV}/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$;测量轴振的传感器为东南仪器厂生产的电涡流传感器,灵敏度为 $8 \text{ V}/\text{mm}$;测量脉冲信号的传感器为东南仪器厂生产的光电传感器,转速测量取值以脉冲前沿为触发参考.

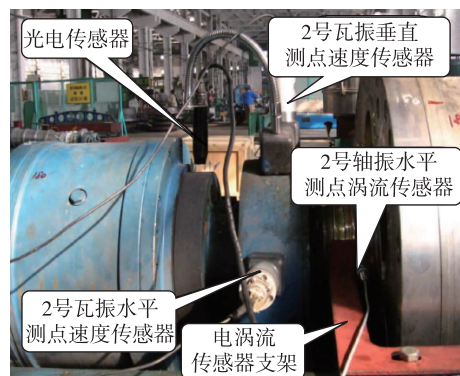


图9 卧螺离心机大端传感器布置

Fig. 9 Sensors of horizontal spiral centrifuge

以大端垂直方向轴振升速阶段振动信号为例,图10为其时域信号.对振动信号进行频谱分析,频谱分析结果如图11所示.从图11可以看出卧螺离心机振动信号中包含了多个分量.采用STFT-SC瞬时频率估计算法对卧螺离心机进行1阶瞬时频率估计,结果如图12所示.

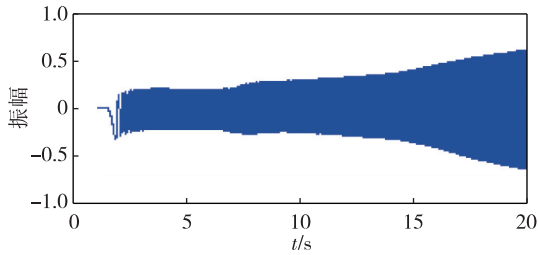


图 10 卧螺离心机大端时域信号

Fig. 10 Time-domain signal of horizontal spiral centrifuge

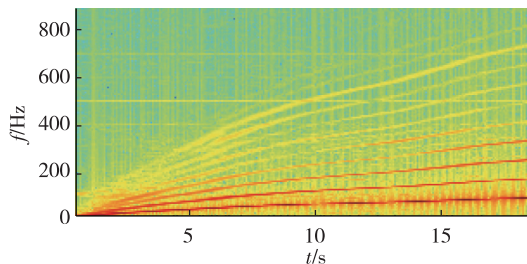


图 11 卧螺离心机大端时频谱

Fig. 11 Spectrum of simulated signal of horizontal spiral centrifuge

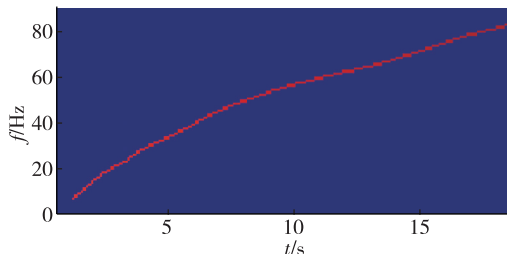


图 12 STFT-SC 瞬时频率估计

Fig. 12 Instantaneous frequency estimated by STFT-SC

4 结论

1) 本文详细介绍了基于 STFT-SC 瞬时频率估计算法的实现过程. 本文提出的 STFT-SC 算法首次将图像处理领域的 Seam Carving 算法应用到旋转机械的瞬时频率估计领域, 并根据信号的特点, 对 SC 算法进行了改进. 2) STFT-SC 瞬时频率估计算法通过功率谱梯度寻求 seam, 在计算过程中根据信号的特点采用动态规划算法, 大大降低了计算量, 提高了瞬时频率估计的效率. 3) 实验证明该方法对多分量复杂的滚动轴承故障信号、邻近阶比多分量信号和强噪声振动信号都有快速和高精度的提取效果.

本文的研究结果对旋转机械故障诊断具有极强

的指导意义和参考价值.

参考文献

References

- [1] 明安波, 褚福磊, 张炜. 滚动轴承复合故障特征分离的小波-频谱自相关方法 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (3): 80-87
MING Anbo, CHU Fulei, ZHANG Wei. Compound fault features separation of rolling element bearing based on the wavelet decomposition and spectrum auto-correlation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (3): 80-87
- [2] 郭瑜, 秦树人, 汤宝平, 等. 基于瞬时频率估计的旋转机械阶比跟踪 [J]. 机械工程学报, 2003, 39 (3): 32-36
GUO Yu, QIN Shuren, TANG Baoping, et al. Order tracking of rotating machinery based on instantaneous frequency estimation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39 (3): 32-36
- [3] 梁玉前, 秦树人, 郭瑜. 旋转机械升降速信号的瞬时频率估计 [J]. 机械工程学报, 2003, 39 (9): 75-80
LIANG Yuqian, QIN Shuren, GUO Yu. Instantaneous frequency estimation of run-up or run-down sign of rotating machinery [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39 (9): 75-80
- [4] 孔庆鹏, 宋开臣, 陈鹰. 基于分段最小二乘拟合的瞬时频率估计方法 [J]. 农业机械学报, 2006, 37 (11): 204-206
KONG Qingpeng, SONG Kaichen, CHEN Ying. Instantaneous frequency estimation based on piecewise least squares fitting [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2006, 37 (11): 204-206
- [5] 赵晓平, 赵秀莉, 侯荣涛, 等. 一种新的旋转机械升降速阶段振动信号的瞬时频率估计算法 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (7): 103-108
ZHAO Xiaoping, ZHAO Xiuli, HOU Rongtao, et al. A new method for instantaneous frequency estimation of run-up or run-down vibration signal for rotating machinery [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (7): 103-108
- [6] 胡爱军, 朱瑜. 基于改进的峰值搜索法的旋转机械瞬时频率估计 [J]. 振动与冲击, 2013, 32 (7): 113-117
HU Aijun, ZHU Yu. Instantaneous frequency estimation of a rotating machinery based on an improved peak search method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32 (7): 113-117
- [7] Dong W, Zhou N, Paul J-C, et al. Optimized image resizing using seam carving and scaling [J]. ACM Transaction on Graphics, 2009, 28 (5): 125-132
- [8] Wei J D, Lin Y J, Wu Y J. A path analysis method to detect seam carved images [J]. Pattern Recognition Letters, 2014, 36 (1): 100-106
- [9] 赵晓平, 侯荣涛. 基于 Viterbi 算法的 Gabor 阶比跟踪技术 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (11): 247-252
ZHAO Xiaoping, HOU Rongtao. Gabor order tracking based on viterbi algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (11): 247-252

Instantaneous frequency estimation based on improved Seam Carving algorithm

ZHAO Xiaopin^{1,2} WU Jiabin^{1,2} ZHOU Zixian^{1,2}

1 School of Computer & Software, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Feature extraction of instantaneous frequency is the key for fault diagnosis of rotating machines, considering that the vibration signals of bearing are usually potential and very weak for dynamic response. A new STFT-SC (Short Time Fourier Transform and Seam Carving) feature extraction method is thus proposed which can estimate instantaneous frequency of vibration signal of rolling bearings. Seam Carving method, usually applied in the field of image processing, is revised according to the characteristics of the rolling bearing. Instantaneous frequency of the vibration signal is estimated using the STFT, then the first order Seam route is solved using the energy gradients of Seam Carving and dynamic planning method; finally, the first order signal is reconstructed and compared with the simulated signal. Results show that the proposed STFT-SC method is effective and quick for estimation of vibration signal even under interference of strong noise and adjacent order components of signal.

Key words rotating machine; Seam Carving; instantaneous frequency estimation; energy gradient