

# 经验模态分解滤波器组特性及轴承异音识别\*

黄迪山, 刘玉霞

(上海大学机电工程及自动化学院 上海, 200072)

**摘要** 利用经验模态分解滤波器组特性可调整性, 结合短时傅里叶变换(STFT)技术识别轴承异音。在研究高斯随机噪声经验模态分解(EMD)的基础上, 运用数值方法证实EMD滤波器组特性随判别参数SD改变, 指出类似于二进制小波滤波器组特性只是一种特殊条件下的分解现象。根据轴承振动加速度的广谱性质, 利用参数SD对EMD滤波器组特性可调性, 对滚动轴承振动加速度信号按异音测量要求进行EMD自动频段分解。对前3阶本征模态进行STFT变换, 用三维图刻画轴承振动的幅值大小、频率大小、周期和随机分布冲击特性, 设定阈值, 在时频域上刻画轴承的异音。该方法揭示了轴承异音分布模式, 能通过异音识别控制轴承加工质量。

**关键词** 经验模态分解; 轴承振动; 异音; 识别

**中图分类号** TH113; TB52

## 引言

Huang 在 1998 年提出了一种全新的信号时频分析方法—HHT, 该方法的核心内容是经验模态分解(EMD), 即把信号分解成多个相互正交本征模态函数(imf)<sup>[1]</sup>。EMD 分解具有自适应滤波性质, 文献[2-3]对 EMD 滤波器组特性进行研究, 通过 5 000 次独立的高斯噪声进行 EMD 分解, 分别得到 imf 的频谱。经过观测和分析推知, 当输入信号为高斯噪声或具有广谱性时, EMD 具有和二进制小波分解完全类似的二进制滤波器组结构的特性。本文在高斯噪声 EMD 分解中, 改变判别参数 SD, 研究 EMD 滤波器组特性。通过大量独立的数值计算, 发现 EMD 滤波器组特性是可调整的, 文献[2-3]中所观测到的二进制小波特性的是一种特殊条件下的现象。EMD 滤波器组特性的可调整性将为 EMD 分解信号分析拓宽应用前景。

轴承异音指轴承运转过程中, 除了均匀的基音以外, 还伴随周期性和随机性的各种声音<sup>[4]</sup>, 它的频谱具有广谱性。因此, 根据轴承振动加速度的广谱性, 文中将 EMD 对轴承振动加速度信号进行分解, 利用参数 SD 对 EMD 滤波器组特性的可调性, 实现振动信号按异音测量要求进行自动频段分离。结合前三阶本征模态的 STFT 处理, 实现轴承异音在时频域上的识别。

## 1 高斯随机噪声经验模态分解

假设  $n(t)$  为高斯随机噪声信号;  $imf_i(t)$  为 EMD 分解得到的本征模态函数,  $r(t)$  为余量, 则高斯噪声信号可以表达为所有的  $imf_i(t)$  及余量  $r(t)$

$$n(t) = \sum_{i=1}^N imf_i(t) + r(t) \quad (1)$$

在 EMD 分解中, 采用递推过程实现高斯噪声信号“筛”过程的数值计算。考虑到较少递推次数和较小的包络平均计算误差, 用统计参数 SD 控制“筛”过程的次数

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[ \frac{|h_{1,k-1}(t) - h_{1,k}(t)|^2}{h_{1,k-1}^2(t)} \right] \quad (2)$$

文献[1]对 1 024 点数据进行 EMD 分解, 推荐  $SD=0.2 \sim 0.3$  为“筛”过程的递推停止判据, 相当于递推次数 4~10 的情况。在这种条件下, 对高斯噪声信号进行 EMD 分解, 滤波器组特性表现为二进制小波特性的, 即相邻滤波带的中心频率之比为

$$f_{oi}/f_{o(i+1)} \approx 2 \quad (3)$$

但是在式(2)中, 会遇到某些点  $h_{1,k-1}(t)=0$  情况, 对不利于 SD 数值计算。为此笔者采用的递推停止判据为

$$SD^* = \sqrt{\frac{\sum_{t=0}^T |h_{1,k-1}(t) - h_{1,k}(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{1,k-1}^2(t)}} \quad (4)$$

\* 收稿日期: 2010-01-22; 修改稿收到日期: 2010-09-25

在EMD分解中,如果改变判据参数 $SD^*$ 取值范围,不仅影响EMD分解中递推次数,而且EMD滤波器组特性将随之改变。

在数值试验中,对1 024点高斯随机噪声信号 $n(t)$ 进行5 000次独立EMD分解,采用三次样条插值EMD算法,其中取循环停止判据参数 $SD^*=0.3, 0.03$ 和 $0.003$ ,取前7个本征模态信号 $imf_1 \sim imf_7$ 。为了防止分解过程中的端点误差进入本征模态信号 $imf_i(t)$ 的频谱,除了作端点处理外,从本征模态信号 $imf_i(t)$ 的中间取8 192点进行傅里叶变换,得到相应的归一化频谱,最终将各个 $imf_i(t)$ 的频谱汇总在同一图上(见图1)。

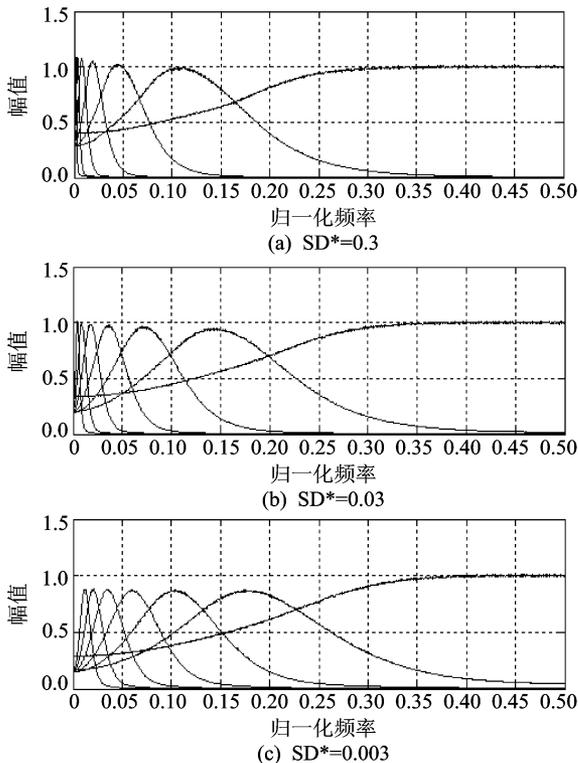


图1 3种判据 $SD^*$ 的高斯噪声经验模态分解结果

反复数值试验结果显示,不同的判据参数 $SD^*$ 取值,得到不同的EMD滤波器组特性。最明显的特征是EMD滤波器组的中心频率变化:

1) 当判据参数 $SD^*$ 减小时,在高斯随机噪声信号进行EMD分解中,滤波器组的中心频率右移;反之,则中心频率左移。

2) 当判据参数 $SD^*$ 变化时,相邻滤波带的中心频率之比随之改变,具体的数据见表1。当判据参数 $SD^*$ 取值为 $0.03$ ,对高斯噪声信号进行EMD分解,滤波器组呈现二进制小波特性的。如果判据参数 $SD^*$ 偏离 $0.03$ 时,滤波器组将不再保持二进制小波特性的,即相邻滤波带的中心频率之比

$$f_{oi}/f_{o(i+1)} \neq 2 \quad (5)$$

表1 相邻滤波带中心频率之比与判据参数 $SD^*$ 关系

$SD^*$	0.300	0.030	0.003
$f_{oi}/f_{o(i+1)}$	2.40	2.00	1.71

通过改变判据参数 $SD^*$ ,能在一定范围内改变滤波器组的特性,但判据参数 $SD^*$ 的大小影响EMD分解的计算速度。

## 2 轴承异音检测应用

应用EMD分解对轴承振动加速度信号进行分解,实现自动频段分组。对轴承异音,由数值试验方法,确定递推判据 $SD^*=0.3$ ,实现EMD分解中滤波器组的中心频率调整。

在试验研究中,选用异音强度中等偏下(人耳辨别)的608系列深沟球轴承,在安德鲁轴承试验机上进行驱动,转速为1 800 r/min,外圈固定并且轴向加载2.25 kg,进行振动测试。用传感器B&K 4517-002拾取轴承振动加速度,用PULSE分析仪3560-B-120对振动信号采集,得到如图2(a)所示的0~12.8 kHz轴承振动加速度信号。

图2(b~f)是轴承振动加速度信号由EMD分解后的本征模态函数( $imf_1 \sim imf_5$ )。本征模态信号 $imf_1, imf_2, imf_3$ 可显示轴承瞬间的高、中、低频段振动加速度信号,反映了轴承的异音成分。

## 3 轴承异音的通频段识别

对轴承振动加速度信号的EMD分解的前3个本征模态信号 $imf_1, imf_2$ 和 $imf_3$ 之和进行短时傅里叶变换,得到时频的三维表达,即轴承加速度信号的时间、频率和幅值分布。通过对三维图的特征识别,实现对轴承异音在通频段的判别。

图3(a)是图2中(b,c,d)本征模态信号之和的时频分析,给出了异音发生时通频段的三维表示。在 $0 \sim 5 \text{ m/s}^2$ 幅值范围作均匀20等份等高线,得到图3(b)所示的等高线投影,给出时频分析的等高线表达。

无论从三维时频图还是从二维时频等高线图,都可以观测到轴承异音在低频段分布着幅值较大的冲击信号,并且带有周期性。在中频段则分布着周期性不明显而幅值相对较小的冲击信号;在高频段则密布着微小的随机性冲击信号。

## 4 异音分级判定

轴承异音是幅值大小不等、频率不等、周期和随

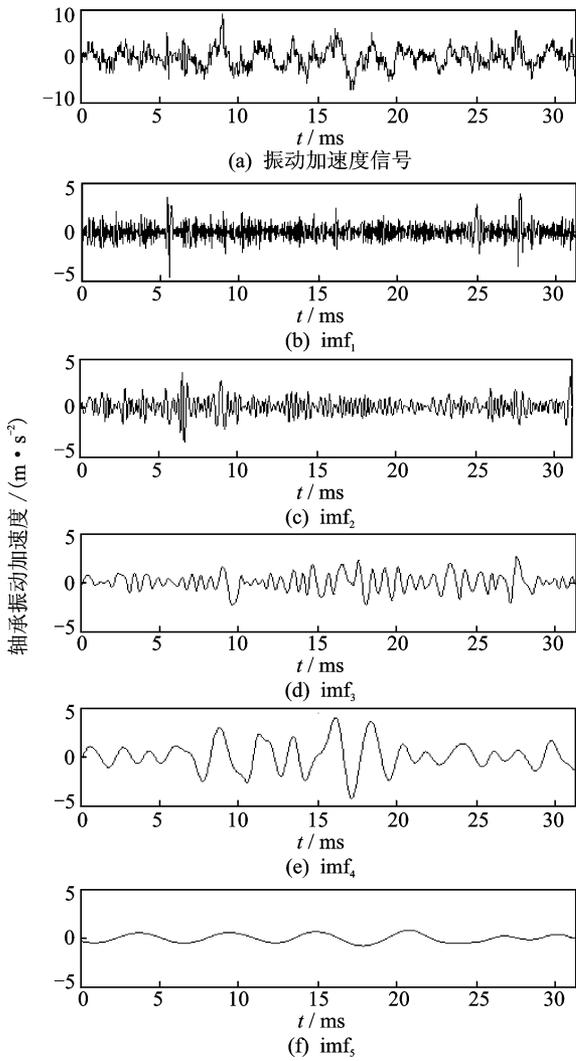


图2 轴承振动加速度信号及其本征模态函数( $imf_1 \sim imf_5$ )

机性的冲击,其时频特征形式繁多。图4列举了典型轴承异音信号,其特性明显不同于图3情况。其中图4(a)是异音强度中等偏下情况,异音的频率主要分布在中频段,并且振动延伸到高频段;图4(b)则是一个无异音情况,只有微小冲击分布在两个共振带上。由于振动幅值太小,时频域的等高线图不再出现。

根据多个异音强度中等偏下的轴承测定,结合振动加速度信号的EMD分解和时频分析,异音的确定可以从时频域的峰值或有效值判定。峰值判定对轴承具有周期性冲击的情况非常有效,如图3(a)和图4(a)。从峰值大小可以确定异音存在。虽然从三维图可直接观测,但不够精确。设置等高线的密度,使等高线与阈值有关,这样从等高线直接可以判定异音存在、及轴承的异音分级。当最低的等高线设为阈值(例中为  $0.5 m/s^2$ )时,如果异音存在,等高线图就会呈现;否则如图4(b)无异音情况,不存在等高线,图中出现一片空白。

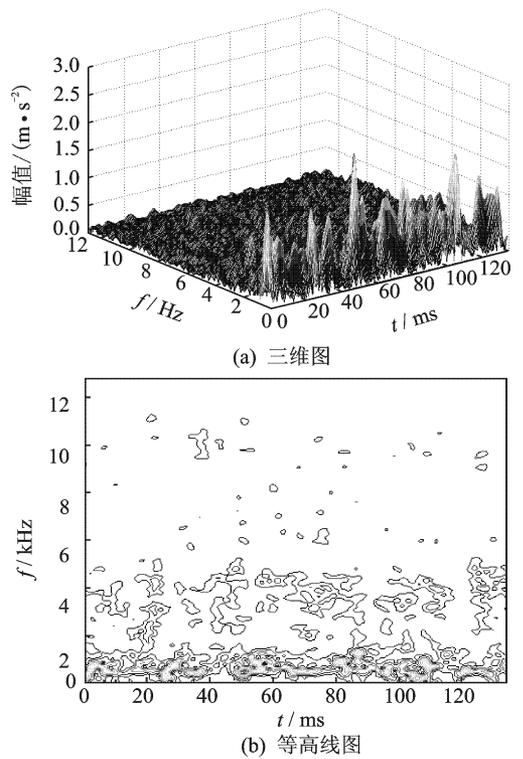
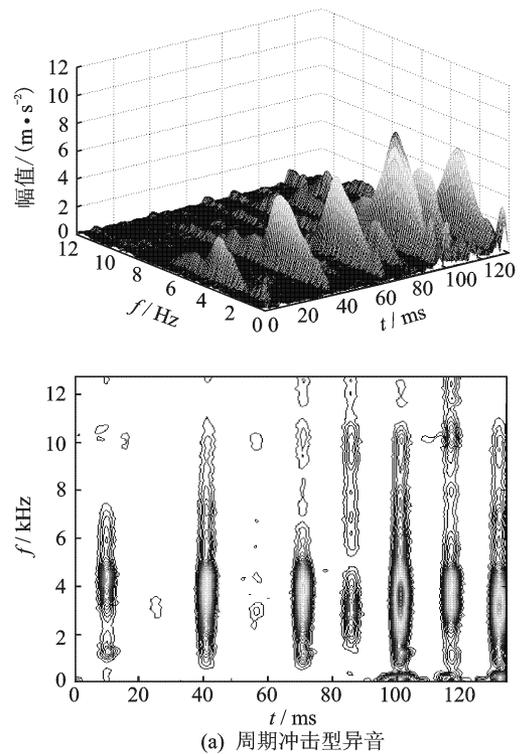


图3 轴承异音的时频域表示

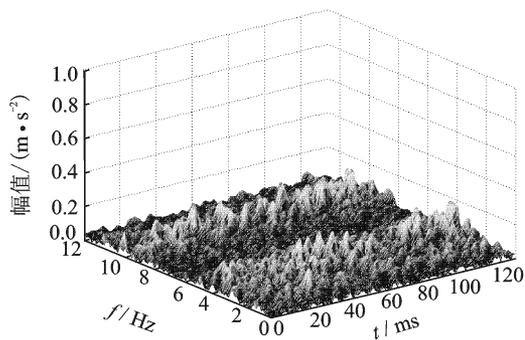
有效值则可统计随机分布为主导的冲击能量,如图4(c)情况,通过有效值计算可判定异音存在。

## 5 轴承异音的低、中、高频段识别

对轴承振动EMD分解的各阶本征模态信号分



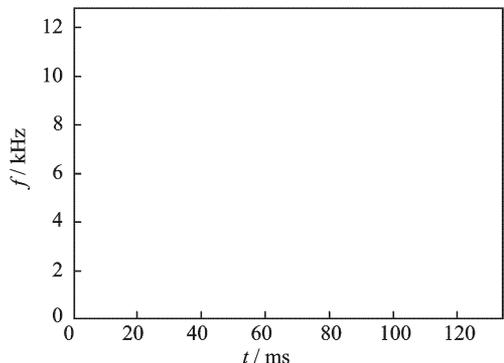
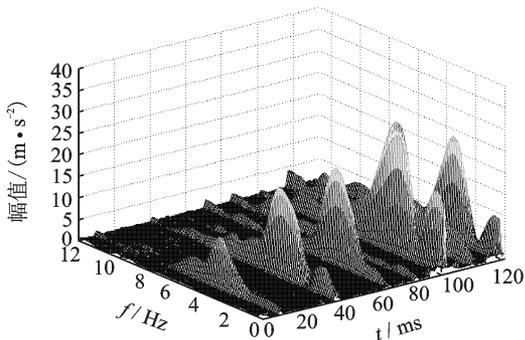
(a) 周期冲击型异音



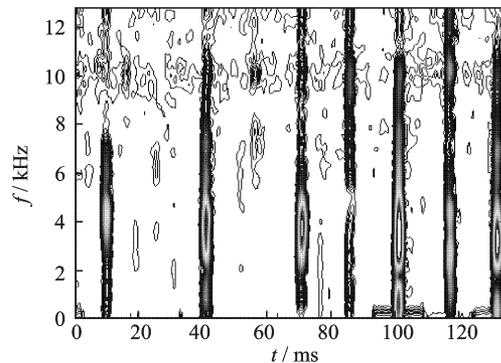
率得到提高。

## 6 异音模式识别

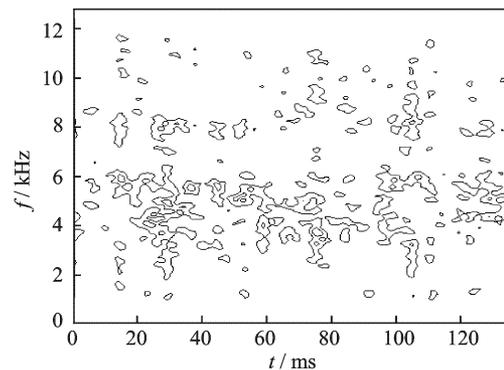
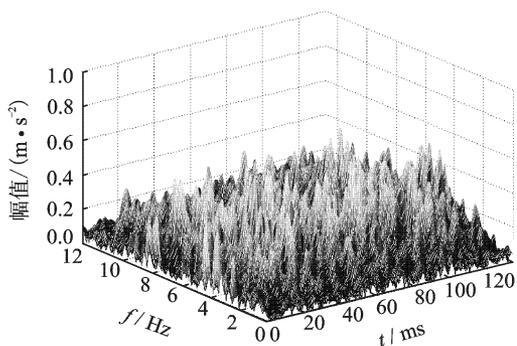
应用EMD和STFT不仅对轴承异音实现分级,而且从三维刻画的分布识别轴承异音的类别,跟踪轴承质量有关的加工过程。文中已列举了一些典型轴承异音情况。在图3中,振动在低频段呈周期性,



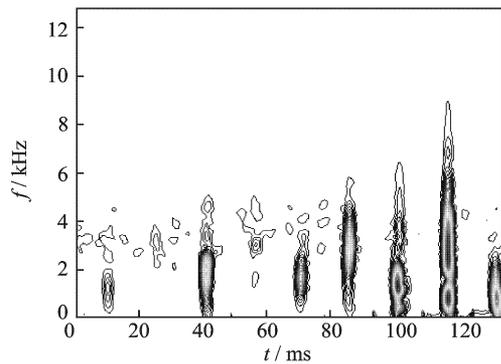
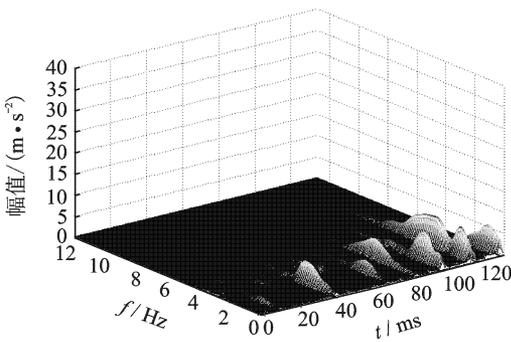
(b) 静音状况



(a) 高频段异音



(c) 随机分布型异音



(b) 中频段异音

图4 608系列深沟球轴承异音分析

别进行STFT处理,实现对轴承的高、中、低频段异音识别。对图4(a)情况作分段STFT处理,如图5所示。图5(a)表明轴承高频段异音情况,图5(b)表明轴承中频段异音情况,图5(c)表明则轴承低频段异音情况。

由于不同频段可采用不同尺度的高斯窗进行STFT处理,在高频段时频分析中冲击的时间分辨

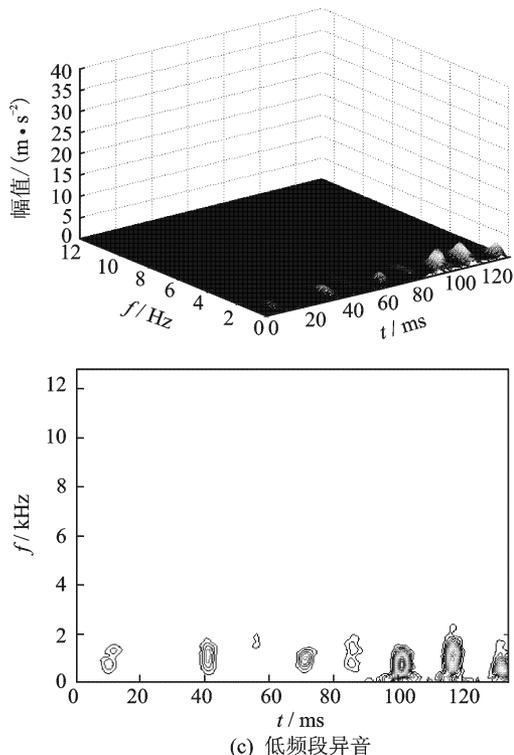


图5 轴承异音的低、中、高频段识别

异音的出现与轴承内外滚道圆形偏差有关;在图4(a)中,振动高频冲击,有周期性,异音的出现与轴承滚道的局部缺陷对应;在图4(b)中,在三维图上没有显示大的冲击,但明显存在两条低幅度的共振带,有窄带随机分布特征,是有轴承表面正常粗糙度对轴承滚道激励形成的,这种轴承加工质量上乘,异音小;图4(c)则在三维图上振动幅度较大并呈窄带随机分布,这是轴承滚道粗糙度过大引起的。三维图分布提供各种轴承加工质量的异音模式,可以帮助识别轴承加工质量误差源。

## 7 结 论

1) 在高斯噪声EMD分解中,采用三次样条插值算法,通过调整参数 $SD^*$ ,改变了EMD滤波器组特性。

2) 利用参数 $SD$ 对滤波器组特性可调性,实现轴承振动信号按异音测量要求进行自动频段分离。对前3阶本征模态函数进行短时STFT处理,把轴承异音的幅值大小、频率大小、周期和随机分布冲击特性在三维图中刻画出来。

3) 通过对STFT幅值和有效值的阈值设定,能客观地判定轴承各种异音存在。通过三维分布表达,能有效识别轴承异音模式,分析生产过程中加工质量误差源。该信号处理方法直观、易懂,可用于超静音轴承制造中的异音品质控制。

## 参 考 文 献

- [1] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis[J]. Proceeding of the Royal Society A, 1998(454): 903-995.
- [2] Flandrin P, Rilling G, Goncalves P. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. IEEE Signal Processing Letter, 2004, 11: 112-114.
- [3] Chen Qiuhui, Huang N E, Sheman D, et al. A B-spline approach for empirical mode decompositions[J]. Advance in Computation Mathematics, 2006, 24: 171-195.
- [4] 邱明, 李济顺, 张洛平, 等. 深沟球轴承异常声评定指标的探讨[J]. 轴承, 2002, 3: 26-29.  
Qiu Ming, Li Jishun, Zhang Luoping, et al. Discussion on evaluation for a abnormal vibration of deep groove ball bearing[J]. Bearing, 2002(3): 26-29. (in Chinese)

第一作者简介: 黄迪山, 男, 1957年11月生, 副教授。主要研究方向为机械动力学与信号分析。曾发表《FFT相位误差及实用修正方法》(《振动工程学报》1994年第2期)等论文。

E-mail: hdishan@shu.edu.cn