

声发射和小波包分析在损伤状态监测中的应用*

操礼林^{1,2}, 李爱群², 邓扬², 丁幼亮²

(1. 江苏大学土木工程系 镇江, 212013) (2. 东南大学土木工程学院 南京, 210096)

摘要 为应用声发射技术对结构的损伤状态进行监测与识别, 基于小波包分析提出了一种在线损伤监测方法。采用D-S证据理论对声发射信号的小波包能量谱进行多源信息融合得到改进的小波包能量谱, 计算Mahalanobis距离构建结构损伤状态判别指标, 采用 t 检验的概率方法考察不同损伤状态下判别指标的变化情况。旋转轴承结构的声发射信号分析结果表明, D-S证据理论能够对声发射信号的小波包能量谱识别样本抽取有效信息, 结构损伤状态判别指标具有良好的结构损伤识别能力, 能够准确地实现对结构不同损伤状态的识别。

关键词 损伤状态监测; 声发射; 小波包分析; 小波包能量谱; 信息融合

中图分类号 TU311.41

引言

声发射技术是根据结构内部由于损伤释放的应力波来判断内部损伤类型和程度的一种动态无损检测方法, 该技术已在机械工程和航空航天领域得到了一些成功的应用^[1-2]。结构损伤声发射信号的处理方法主要包括参数分析和波形分析。目前, 声发射信号处理研究主要采用基于参数的分析方法^[3], 对声发射信号的全波形分析方法还有待深入研究。

小波包分析继承了小波变换的时频局部化能力, 能够将小波变换未处理的信号高频成分进一步分解, 实现了将信号无冗余、无疏漏、正交地分解到独立的频带内, 提高了频率分辨率和信号的信噪比^[4-6]。基于小波包分析的特点, 笔者提出了基于小波包能量谱的声发射信号特征提取方法, 并采用基于D-S证据理论的信息融合技术提高了小波包能量谱的信号特征表达能力, 运用统计模式识别的方法建立了结构损伤状态的在线监测方法, 用旋转轴承结构的声发射信号对该方法的有效性进行了分析。

1 在线损伤监测方法

1.1 结构声发射信号的小波包能量谱

小波包理论^[7]可以将小波空间进一步分解, 使

正交小波变换中随尺度因子增大而变宽的频谱窗口进一步变细, 能将信号按任意时频分辨率分解到不同频段, 具有精确细分的特点和较强的时频局部化能力。随着分解层次的增加, 信号的信噪比将提高, 这使得小波包分析具有很强的信号特征提取能力。文献[8]基于多尺度分析提出了小波包能量谱的理论框架, 笔者在此基础上采用小波包能量谱进行声发射信号的特征提取。

对结构声发射信号 f 进行第 i 层小波包分解, 则信号 f 在第 i 分解层的小波包能量谱向量 E_i ^[8]为

$$E_i = \{E_{i,p}\} = \left\{ \sum |f_{i,p}|^2 \right\} \quad (p = 0, 1, \dots, 2^i - 1) \quad (1)$$

其中: $f_{i,p}$ 为信号 f 在第 i 层分解频带 (i, p) 上的结构响应。

计算各个小波包分解频带上的能量比 I_p 为

$$I_p = \frac{E_{i,p}}{\left(\sum_{j=1}^{2^i-1} E_{i,j} \right) / 2^i} \quad (p = 0, 1, \dots, 2^i - 1) \quad (2)$$

能量比 I_p 反映了声发射信号在各个小波包分解频带上的幅频特性, 可以根据此变化判断结构损伤状态的变化^[8]。

1.2 小波包能量谱的多源信息融合

从信息融合的角度分析^[9], 假设声发射信号的

* 国家杰出青年基金资助项目(编号:50725828);国家自然科学基金资助项目(编号:50808041)

收稿日期:2011-08-10;修改稿收到日期:2011-09-27

每个测试样本识别的小波包能量谱都能一定程度地反映结构的损伤状态,但每个测试样本的辨识能力是有限的,即在在线监测不确定因素的影响下仅能从一个侧面反映结构的真实状态,此时若采用信息融合技术从所有测试样本识别的小波包能量谱中抽取有效信息并对其重构,则可以获得对结构损伤状态更为准确的描述。信息融合采用的主要技术有:统计方法、贝叶斯推理技术、Dempster-Shafer 证据理论(简称D-S 证据理论)和模糊集理论等。

D-S 证据理论在不确定因素处理、基于知识的证据进化、适用条件和应用范围等方面具有明显优势^[10-11];因此,这里采用D-S 证据理论对结构损伤声发射信号的小波包能量谱进行数据融合以提高其对结构损伤状态的判别能力。D-S 证据理论的基本原理^[10-11]是设 m_1 和 m_2 分别为两信息源对应的基本概率赋值,焦元分别为 A_1, A_2, \dots, A_k 和 B_1, B_2, \dots, B_k , 又设

$$K_1 = \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1 \quad (3)$$

则两信息源的组合为

$$m(C) = \begin{cases} \sum_{A_i \cap B_j = C} \frac{m_1(A_i)m_2(B_j)}{(1 - K_1)} & (\forall C \subset U, C \neq \phi) \\ 0 & (C = \phi) \end{cases} \quad (4)$$

对 n 个测试样本提取的小波包能量谱频带能量比 I_p 采用D-S 证据理论进行融合,得到证据合成后改进的能量比 \hat{I}_p 为

$$\hat{I}_p = C^{-1} \sum_{\substack{\cap j=p \\ 1 \leq i \leq n}} I_{i,j} \quad (p = 0, 1, \dots, 2^i - 1) \quad (5)$$

其中: i 为第 i 个测试样本; j 为小波包能量谱第 j 个频带; C 按下式计算

$$C = 1 - \sum_{\cap j=\phi} I_{i,j} = \sum_{\cap j \neq \phi} I_{i,j} \quad (6)$$

1.3 在线损伤监测步骤

1) 采集结构在不同状态下的声发射信号监测数据。这里以两个状态为例,设参考基准状态的数据样本集为 A_1 ,待判别状态的数据样本集为 A_2 ,这两个状态中测试样本数分别为 n_1 和 n_2 。

2) 对两个状态的声发射信号样本集 A_1 和 A_2 分别进行小波包分解,确定小波包分解层次和频带数量 m ,在此基础上分别得到状态 A_1, A_2 的 $n_1 \times m, n_2 \times$

m 阶小波包能量比矩阵 I_{p1} 和 I_{p2} 。

3) 采用多源信息融合的方法对步骤(2)得到的能量比矩阵 I_{p1} 和 I_{p2} 进行特征参数提取。设每 l 个能量比向量经D-S 证据理论进行融合后得到一个新的能量比向量,令 $k_1 = n_1/l, k_2 = n_2/l$,得到 $k_1 \times m, k_2 \times m$ 阶数据融合后的能量比矩阵 \hat{I}_{p1} 和 \hat{I}_{p2} 。

4) 记参考基准状态 A_1 得到的能量比矩阵 \hat{I}_{p1} 为 m 维总体 G ,其均值为 μ ,协方差矩阵为 Σ 。定义能量比矩阵 \hat{I}_{p1} 和 \hat{I}_{p2} 中 m 维行向量 $v_i (i = 1, 2, \dots, k_1; i = 1, 2, \dots, k_2)$ 到总体 G 的 Mahalanobis 距离^[12]为结构损伤状态判别指标(damage condition discrimination index,简称DCDI)

$$DCDI = [(v - \mu)^T \Sigma^{-1} (v - \mu)]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

5) 若结构处于不同的损伤状态,则从 A_1 和 A_2 得到的DCDI 存在显著性差异,为了在概率意义上衡量这种差异,采用 t 检验方法在一定显著性水平下进行假设检验

$$\begin{cases} H_0: \mu_2 = \mu_1 \\ H_1: \mu_2 \neq \mu_1 \end{cases} \quad (8)$$

其中: μ_1 和 μ_2 分别为 A_1 和 A_2 的DCDI 的均值。

当假设检验结果为 H_1 时,表明结构处于不同的损伤状态,同时得到零假设成立时假设统计量 T 大于或等于显著性水平 α 的概率,记为 p 。

笔者提出的基于声发射技术和小波包分析的结构在线损伤监测方法步骤流程如图1所示。

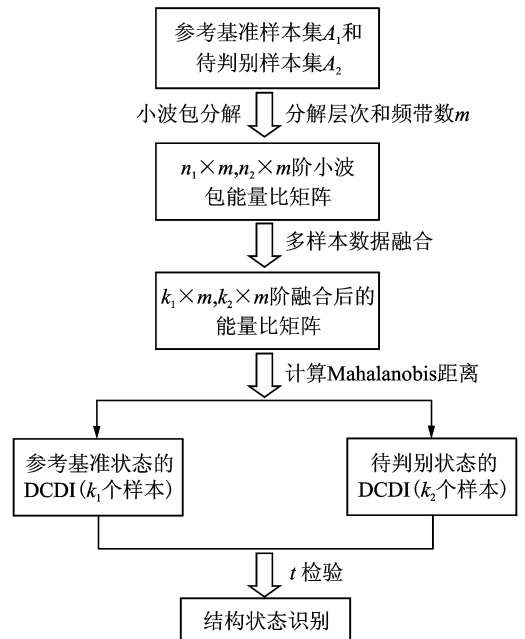


图1 在线损伤监测步骤

2 试验研究

2.1 试验简介

采用旋转轴承结构的声发射损伤试验来验证该方法的有效性,试验中轴承通过电动机和试验装置以各种不同的速度驱动,所有测试都是在较强噪声的环境中进行,试验声发射数据可以从网址 <http://www.muravin.com/> 下载得到。试验共采用了4个处于不同损伤状态下的相同轴承:a. 正常工作情况,可认为结构的状态为“优良”;b. 润滑状态,可认为结构的状态为“有问题的”;c. 轴承外圈有轻微损伤,可认为结构的状态为“损伤”;d. 轴承外圈有剥落及疲劳开裂,可认为结构的状态为“失效”。试验采用的AE换能器的响应频率为50~1 000 kHz,前置放大器的增益为27 dB,主增益为40 dB,滤波频率为50~500 kHz,采样频率为1.562 5 MHz。每种状态下采集了101个数据样本,样本长度均为65 536,图2为4种状态下随机截取的声发射信号序列,数据长度均为8 192。

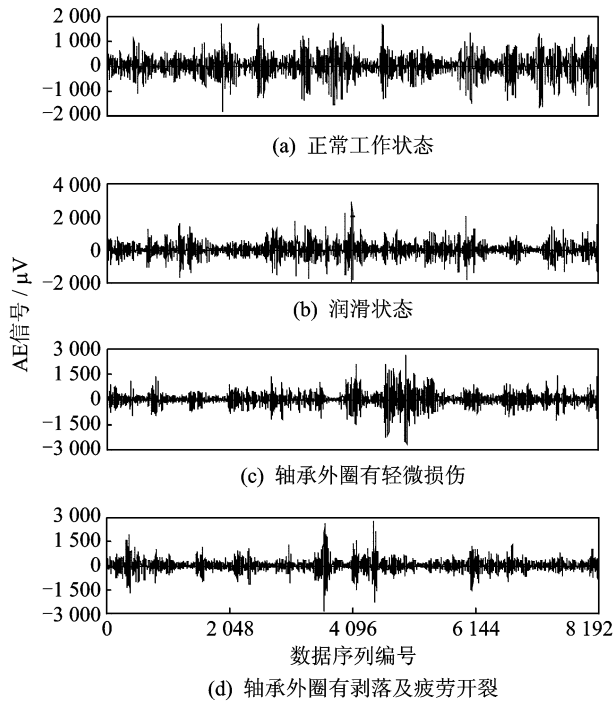


图2 声发射信号数据序列

2.2 小波包能量谱识别分析

从4个状态的声发射信号文件中随机抽取10个数据样本进行小波包能量谱的识别分析,将每个数据文件等分为8个子样本,子样本长度为8 192,每类状态均得到80个数据样本,计算采用Daubechies25小波函数,分解层次为6,频带数取前32阶。

图3为从状态1和状态2的80个样本中抽取的未信息融合的两个能量比向量 I_b ,发现信号能量分布在少数频带上,通过直接对比信号能量在频带上的分布情况就可以区别状态1和状态2,这说明小波包能量谱具有良好的损伤敏感性。进一步观察发现,同一状态的两个样本的能量分布存在着一定的差异,现在的问题是如何能够有效地减小这种差异,避免对结构损伤状态判别的不利影响。

采用D-S证据理论对识别的小波包能量比矩阵进行信息融合。信息融合的样本个数 l 为8,这样每种状态得到10个新的能量比向量。图4为多样本融合之后的正常工作状态和润滑状态的两个改进的能量比向量样本,可以看到两个不同样本的能量分布非常一致,这说明通过信息融合较好地消除了小波包能量谱识别的随机性。

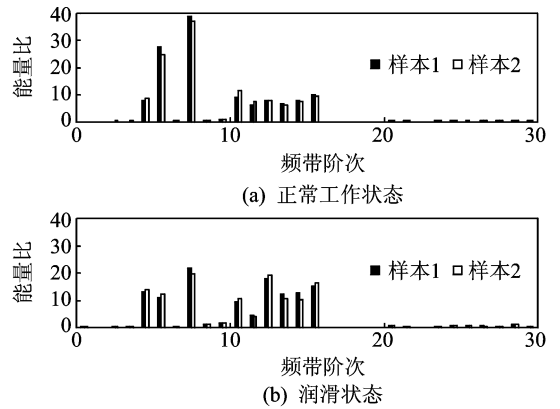


图3 未信息融合的小波包能量比

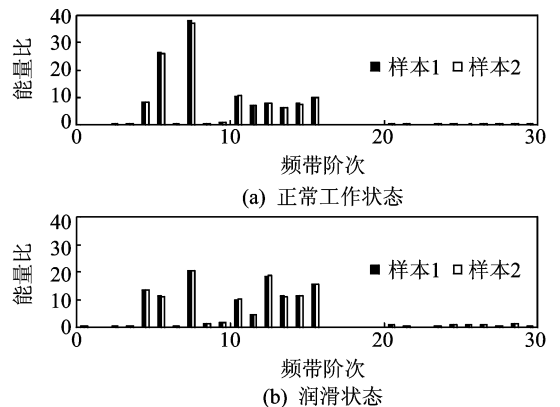


图4 多样本信息融合的小波包能量比

2.3 损伤状态识别分析

计算时以某一状态为参考基准状态,以另外3种状态作为待判别状态。首先,计算所有状态的声发射信号的小波包能量比谱;然后,按照图1步骤提取DCDI值;最后,采用假设检验的方法对结构状态间的差异进行概率描述。

图5为未采用多样本信息融合的损伤状态判别指标分布图。可以发现,不同状态的指标存在着一定的差别,通过比较指标的变化可以实现状态的初步判别,但同时发现由于小波包能量谱识别的随机性造成指标的波动较大,指标的准确性和鲁棒性稍差,一定程度上影响了指标的状态判别效果。

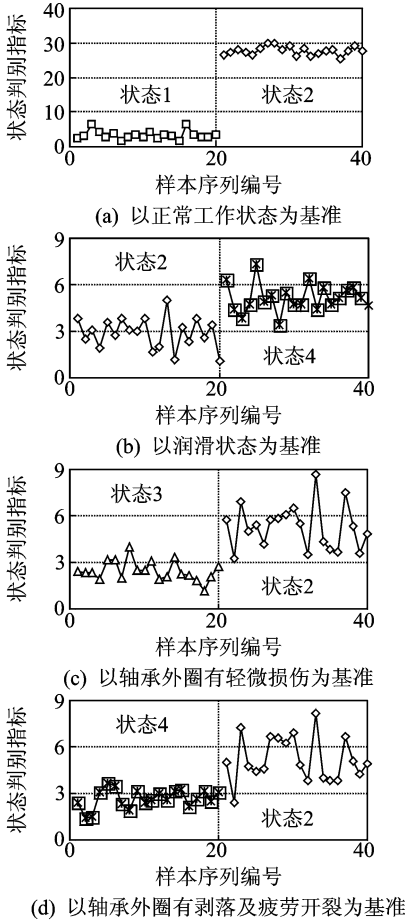


图5 未信息融合的损伤判别指标分布图

采用D-S证据理论对旋转轴承所有状态下声发射识别的小波包能量比矩阵进行信息融合。信息融合的样本个数 l 取为8,每种状态得到10个新的能量比向量。图6为多样本数据融合之后的损伤判别指标DCDI分布情况,可以看出,指标的准确性和鲁棒性均有明显地提高。由于D-S证据理论能够通过集

合不确定性提取有效信息,并较大幅度地区分不同量值所代表的函数状态信息,因此采用D-S证据理论对少量测试样本进行信息融合可以有效降低损伤判别指标的随机性。

从图6可以看出两种不同状态DCDI的均值存在显著的差异。为了对这种差异进行定量描述,取显著性水平为0.05,对参考基准状态和待判别状态的DCDI的均值进行假设检验。表1为显著性水平为0.05时结构状态识别结果。可以看出,假设检验的结果全为 H_1 ,未出现状态误判的情况,检验返回的 p 值均远小于显著性水平0.05。这表明提出的损伤状态判别方法能够有效实现结构声发射损伤状态的识别,具有统计意义上的可信度。

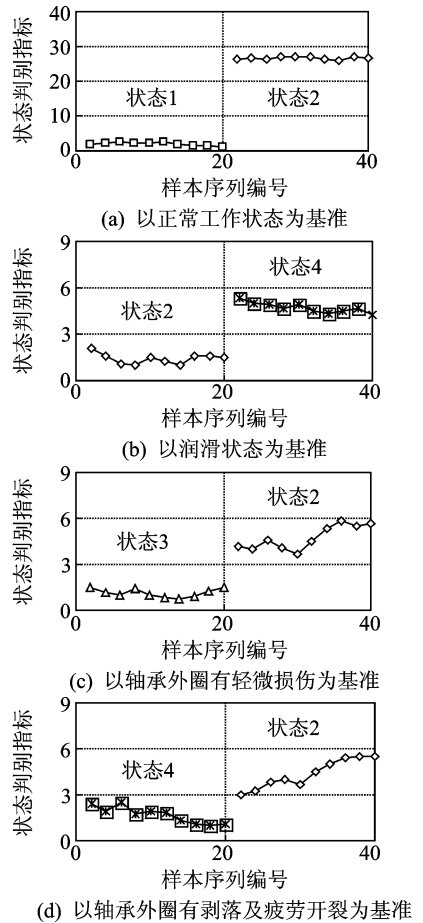


图6 多样本融合之后的损伤判别指标DCDI分布图

表1 结构状态识别结果

参考基准状态	待判别状态					
	t 检验	p 值	t 检验	p 值	t 检验	p 值
正常工作状态	润滑状态		轴承外圈有轻微损伤	轴承外圈有剥落及疲劳开裂		
	H_1	2.362×10^{-27}	H_1	5.2389×10^{-28}	H_1	1.5032×10^{-28}
润滑状态	正常工作状态		轴承外圈有轻微损伤	轴承外圈有剥落及疲劳开裂		
	H_1	1.3307×10^{-28}	H_1	6.8741×10^{-13}	H_1	3.8429×10^{-14}
轴承外圈有轻微损伤	正常工作状态		润滑状态	轴承外圈有剥落及疲劳开裂		
	H_1	6.9246×10^{-29}	H_1	5.7858×10^{-11}	H_1	3.9918×10^{-11}
轴承外圈有剥落及疲劳开裂	正常工作状态		润滑状态	轴承外圈有轻微损伤		
	H_1	1.7743×10^{-28}	H_1	8.4167×10^{-11}	H_1	6.2025×10^{-14}

3 结束语

为了应用声发射技术对结构的损伤状态进行在线监测与识别,笔者以小波包分析为基础构建了一种新的状态判别指标DCDI。采用小波包分析提取得到声发射信号的小波包能量谱,通过基于D-S证据理论对小波包能量谱进行多源信息融合得到结构损伤特征参数,在此基础上采用Mahalanobis距离构建结构损伤判别指标DCDI,采用 t 检验的方法考察在不同状态下该指标是否发生显著性变化,从而实现对结构不同损伤状态的识别。试验声发射信号分析表明:基于小波包能量谱的指标DCDI具有较强的损伤状态敏感性,在一定显著性水平下采用 t 检验可以实现结构状态的识别;基于证据理论的多样本数据融合使得指标DCDI的状态判别能力有了较大提高,适合于工程结构的实时损伤状态监测。

参 考 文 献

- [1] 耿荣生,景鹏,雷洪,等. 飞机主梁疲劳裂纹萌生声发射信号的识别方法[J]. 航空学报, 1996, 17(3): 368-372.
Geng Rongsheng, Jing Peng, Lei Hong, et al. Identification of acoustic emission signals produced by fatigue crack initiation in wing spars of aircraft[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1996, 17(3): 368-372. (in Chinese)
- [2] 岳亚霖,韦朋余,李盛华,等. 钛合金焊接接头疲劳裂纹声发射特征研究[J]. 船舶力学, 2008, 12(3): 429-439.
Yue Yalin, Wei Pengyu, Li Shenghua, et al. Acoustic emission signature of fatigue cracks at titanium alloy welded joints [J]. Journal of Ship Mechanics, 2008, 12(3): 429-439. (in Chinese)
- [3] 朱宏平,余璟,张俊兵. 结构损伤动力检测与健康监测研究现状与展望[J]. 工程力学, 2011, 28(2):1-12.
Zhu Hongping, Yu Jing, Zhang Junbing. A summary review and advantages of vibration-based damage identification methods in structural health monitoring [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2):1-12. (in Chinese)
- [4] 赵奎,王更峰,王晓军,等. 岩石声发射Kaiser点信号频带能量分布和分形特征研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3082-3088.
Zhao Kui, Wang Gengfeng, Wang Xiaojun, et al. Research on distributions and fractal characteristics of kaiser signal of acoustic emission in rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3082-3088. (in Chinese)
- [5] Grabowska J, Palacz M, Krawczuk M. Damage iden-

tification by wavelet analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(7): 1623-1635.

- [6] 焦莉,李宏男,孙威. 基于数据融合和“能量-损伤”的结构状态特征提取[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(1): 83-86.
Jiao Li, Li Hongnan, Sun Wei. Feature extraction of structure status based on data fusion and wavelet analysis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(1): 83-86. (in Chinese)
- [7] 邸继征. 小波分析原理[M]. 北京:科学出版社, 2010: 108-138.
- [8] 丁幼亮,李爱群,缪长青. 环境激励下基于小波包分析的结构损伤预警方法[J]. 应用力学学报, 2008, 25(3): 366-370.
Ding Youliang, Li Aiqun, Miao Changqing. Structural damage alarming method based on wavelet packet analysis by ambient vibration test [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(3): 366-370. (in Chinese)
- [9] 郭惠勇,张陵,蒋健. 不同信息融合方法在结构损伤识别上的应用和分析[J]. 工程力学, 2006, 23(1):28-30.
Guo Huiyong, Zhang Ling, Jiang Jian. Application and analysis of different information fusion methods for structural damage detection [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(1):28-30. (in Chinese)
- [10] 张清华,李乔,唐亮. 基于证据理论的结构损伤识别研究[J]. 振动工程学报, 2007, 20(2): 200-205.
Zhang Qinghua, Li Qiao, Tang Liang. Study of structural damage identification based on evidence theory [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(2): 200-205. (in Chinese)
- [11] 刘涛,李爱群,缪长青,等. 基于数据融合的结构损伤识别方法研究[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 16-21.
Liu Tao, Li Aiqun, Miao Changqing, et al. Study of structural damage identification methods based on data fusion [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1): 16-21. (in Chinese)
- [12] Nair K K, Kiremidjian A S, Law K H. Time series-based damage detection and localization algorithm with application to the ASCE benchmark structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 291(1): 349-368.



第一作者简介:操礼林,男,1979年11月生,讲师、博士生。主要研究方向为结构振动控制与结构健康监测。曾发表《人群荷载下大型火车站房大跨楼盖振动舒适度控制研究》《《土木工程学报》2010年第43卷增刊》等论文。

E-mail: cll@uj.s.edu.cn