

拉深件成型裂纹的非平稳信号处理及状态识别*

骆志高, 叶红英, 胥爱成

(江苏大学机械工程学院 镇江, 212013)

摘要 为了对金属拉深件成型时裂纹所产生的非平稳信号进行处理, 最终提取到声发射信号的特征参数, 从而进行金属制件的状态识别, 首先, 以Matlab 数据处理软件为工具, 采用小波包分析对金属板料拉深成型实验中采集到的声发射信号进行多维正交分解; 然后, 对信号进行平滑、消除趋势项、差分处理得到平稳信号, 剔除了噪声信号带来的影响; 最后, 采用时序分析建立各分解信号的自回归模型以提取声发射信号的特征参数, 以此进行制件的状态识别, 并通过实验加以验证。研究表明, 通过此方法将金属拉深制件成型时裂纹的非平稳信号转换为平稳信号, 再经时序分析提取到了声发射信号的特征参数及其分布图, 根据其分布图能够判定金属制件有无裂纹状态。

关键词 拉深件; 裂纹; 声发射; 小波包; Matlab

中图分类号 TH707; TB533

引言

金属板料在拉深过程中产生的声发射信号是连续型信号与突发性信号的混合型信号, 其中还夹杂着大量的噪声信号, 故其信号波形十分复杂、不平稳, 而且信号所包含裂纹信号的特征频率分布在不同的频带里。笔者以ST14 盒成型件为研究对象, 借鉴直接剔除法与趋势项提取法的信号处理思想, 首先, 采用小波包技术分解该非平稳时序信号, 将采集到的声发射信号细化分解到8组信号, 对各组分解信号进行平滑、提取趋势项和差分后, 将非平稳信号转换成平稳信号, 达到对信号的消噪处理; 然后, 建立各组分解信号的时间序列模型, 提取声发射信号的特征参数及其分布图, 从而进行状态识别。

1 小波包分析

小波包理论是小波变换的延伸, 可以将形(小波)空间作进一步分解, 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。它能将信号按任意时频分辨率(满足 Heisenberg 测不准原理)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, 能很好地满足信号特征提取的要求^[1-2]。

1.1 小波包分解

图1为3层小波包分解结构图。其中:L表示低频;H表示高频;末尾的序号数表示小波包分解的层数。其分解关系为

$$S = LLL3 + HLL3 + LHL3 + HHL3 + LLH3 + HLH3 + LHH3 + HHH3 \quad (1)$$

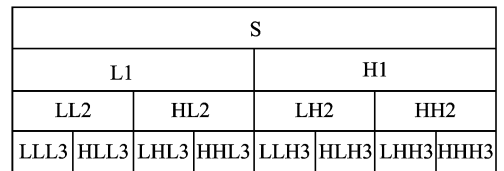


图1 3层小波包分解树示意

1.2 小波包技术在声发射信号分解重构中的应用

在Matlab 软件中, 采用db5 小波作为分解小波基, 将信号进行3层小波包分解, 具体命令格式为

$$t = wpdec(m, 3, 'db5', 'shannon')$$

其中: m 为加载的分解信号;3表示小波分解层数;db5为分解小波基;Shannon表示所取的熵值。

应用函数 $S = wprcoef(t, N)$, 其中: t 为被重构的信号; N 为重构的节点。

图2(a)为一组裂纹声发射信号的小波包树结构图, 图2(b)为AE信号重构图。

* 科技型中小企业创新基金资助项目(编号:09C26213201011)

收稿日期:2011-05-06;修改稿收到日期:2011-07-07

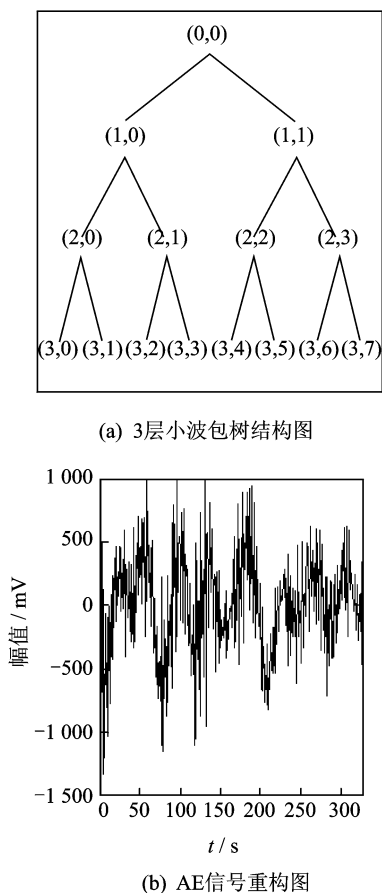


图2 3层小波包分解图

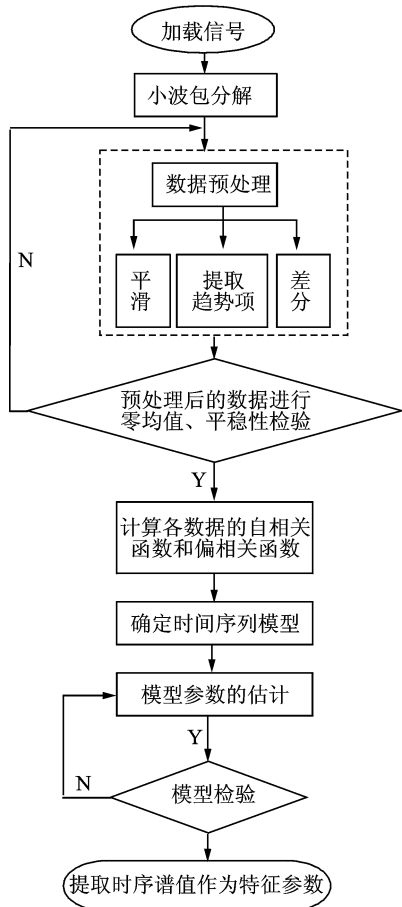


图3 特征参数提取流程图

2 非平稳时间序列信号的处理方法

2.1 特征参数的提取过程

通常情况下,处理非平稳时序信号的条件是该时间序列必须是方差平稳的时间序列。而建模方法分为两类:一类是直接剔除法,通过差分方法^[3-4]将确定性部分从非平稳时间序列中直接剔除掉,再建立ARMA模型;另一类为趋势项提取法^[5],是从非平稳时序中提取确定性部分,将确定性部分用明确的函数关系式表达,再对剩下的平稳时序建立ARMA模型,将确定性的函数关系式与ARMA模型组合,得到非平稳时序模型^[6]。

笔者借鉴直接剔除法与趋势项提取法的信号处理思想,首先,采用小波包技术分解该非平稳时序信号,将采集到的声发射信号细化分解到8组信号,对各组分解信号进行平滑、提取趋势项和差分后,将信号转换成平稳信号,达到对信号的消噪处理;然后,建立各组分解信号的时间序列模型,提取时序谱值作为特征参数。具体过程如图3所示。

2.2 Matlab在非平稳信号处理中的应用

Matlab是功能强大的大型工程软件,在数值分析、科学计算、算法开发、建模和仿真等方面独具优势^[7]。在Matlab软件中,提取小波包分解重构后的8组分解信号进行消噪处理,从而转换为平稳信号,具体命令格式为: $x = \text{smooth}(\text{data})$, $y = \text{detrend}(x)$, $z = \text{diff}(y)$ 。其中: data 为分解重构信号; x 为被平滑的信号; y 为被提取趋势项的信号; z 为被差分的信号。 $[H, PValue, TestStat, CriticalValue] = \text{dfARDTest}(z, 0, [], 0.05, 'T')$,对预处理后的数据进行平稳性检验,若 $H=0$ 时,则需要继续对其进行平稳性检验,直到 $H=1$ 。

3 金属拉深制件早期裂纹非平稳信号数据分析

3.1 测试方法

3.1.1 实验仪器

声发射检测系统包括声发射传感器、电缆、前置

放大器和声发射采集卡。图4和图5为实验中所采用的声发射传感器和前置放大器。

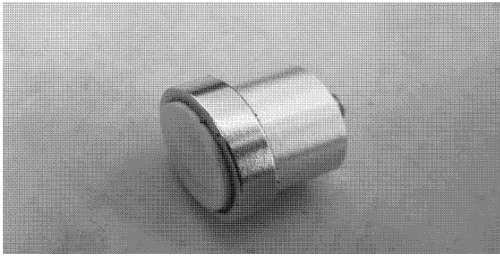


图4 PXR15 谐振式声发射传感器



图5 PXPAIV 前置放大器

本实验所用模具为盒形件拉深模具,其结构如图6所示。

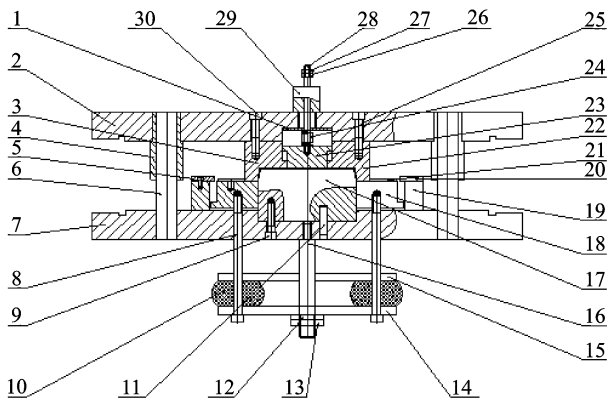
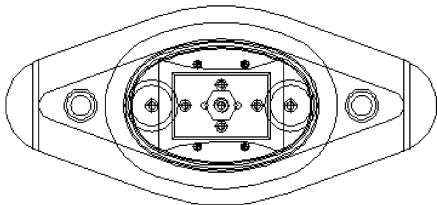


图6 实验模具装配图

- 1-挡板;2-动模板;3-拉深凹模;4-导套;5-定位块;6-导柱;7-定模板;8-顶块;9-螺栓;10-橡胶柱;11-定位销;12-调节螺母;13-锁紧螺母;14-挡板;15-推板;16-固定杆;17-拉深凸模;18-卸料板;19-限位块支撑块;20-限位块;21-挡料钉;22-垫板;23-顶出块;24-弹簧;25-螺栓;26-调节螺母;27-锁紧螺母;28-推杆;29-模柄;30-螺栓

3.1.2 实验设备布置

本次实验对金属板料ST14(尺寸为400mm×600mm×1.5mm)在拉深模具上进行拉深试验。在板料拉深成型之前,需将板料放置压边圈的中间位置,故需要在板料上标出其对称线,方便放置于压边圈中央。在拉深过程中,板料始终与卸料板相接触,故将声发射传感器分别置于卸料板的周围,并用声发射仪采集全过程声发射信号。图7为实验现场。

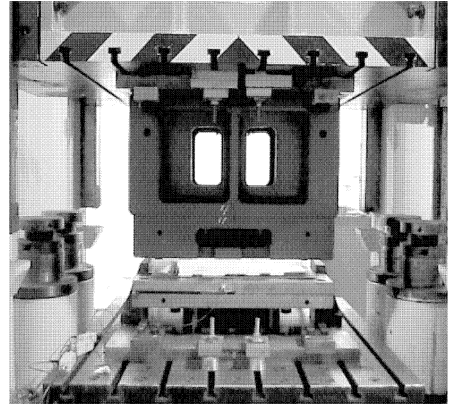


图7 实验现场

3.2 实验数据处理

3.2.1 数据处理

本研究将声发射检测设备采集到的2组声发射信号 S_1, S_2 分别导入到Matlab软件中,将小波包分解与重构后得到的8组分解信号进行平滑、提取趋势项和差分处理后,得到各分解信号的平稳信号,如图8和图9所示。

3.2.2 能量参数的提取

由于大多数金属都具有一定的塑性,裂纹向前扩展一步,则将积蓄的能量释放出来,而裂纹尖端区域卸载。这样,裂纹扩展产生的声发射很可能比裂纹形成的声发射大得多,故声发射信号的能量值对裂纹特征十分敏感。将声发射原始信号进行数据处理并检验合格后,在Matlab软件中计算各数据的自相关系数与偏相关系数,确定模型类型。根据检验结果,所有分解信号都满足建立AR模型的条件。

对8组分解信号采用FPE准则确定模型的最佳阶次。根据软件计算所得最佳阶数分别对各组信号进行时序建模,得到各组信号的自回归模型。对于AR模型的参数估计,Matlab中采用ar函数,具体调用格式为

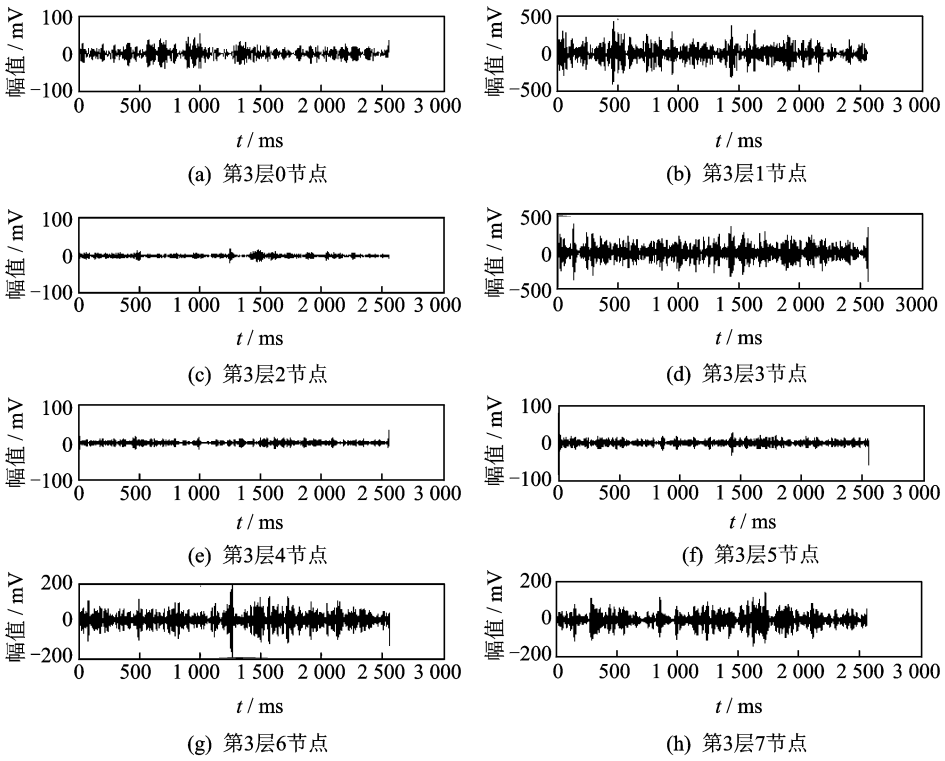


图8 声发射信号 S_1 的一通道平稳信号

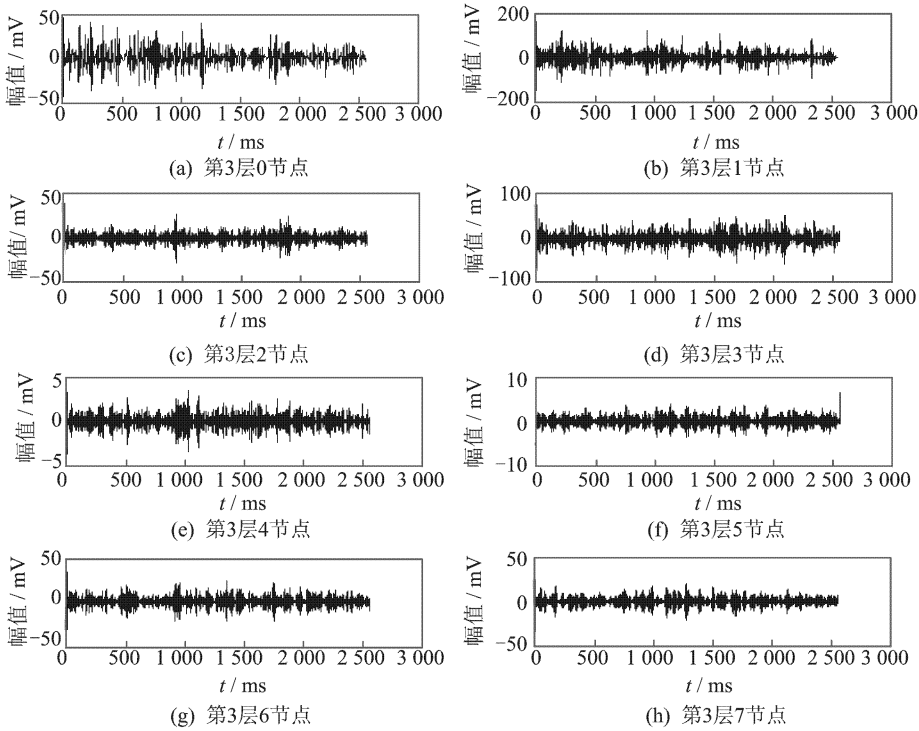


图9 声发射信号 S_2 的一通道平稳信号

$$\text{Model} = \text{ar}(y, n, \text{'approach'})$$

其中： y 为需要建模的时间序列信号； n 为模型阶数；‘approach’表示采用的参数估计方法。

本研究采用最小二乘法估计模型参数。经检验，模型残差符合正态分布，说明所建立的时序模型是正确的。

采用 $E=\text{trapz}(f0,px0)$ 命令提取时序谱能量值作为反映裂纹信号的特征参数。同时,为直观地将声发射信号的能量分布根据频率由高到低进行显示,将声发射信号 S_1 和 S_2 一通道的时序谱能量值连成平滑的曲线,如图10和图11所示。

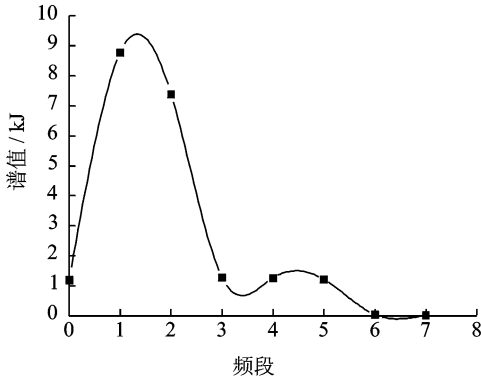


图10 信号 S_1 一通道能量分布图

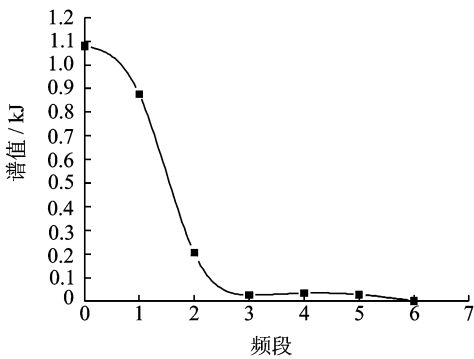


图11 信号 S_2 一通道能量分布图

值呈现相同的规律,不同的是有裂纹声发射信号所占比值较大,而无裂纹声发射信号所占比值较小。

4 拉深件状态识别

对于采集所得声发射信号 S_3 和 S_4 ,采用以上方法提取特征参数,其分布图分别如图12与图13所示。

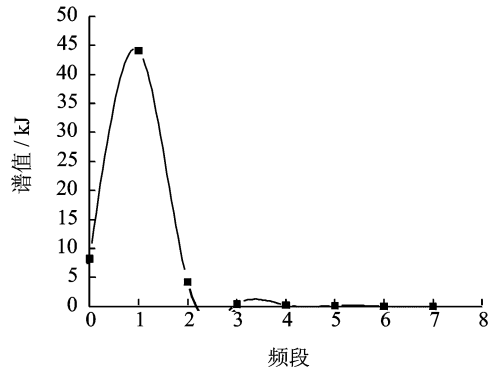


图12 信号 S_3 一通道能量分布图

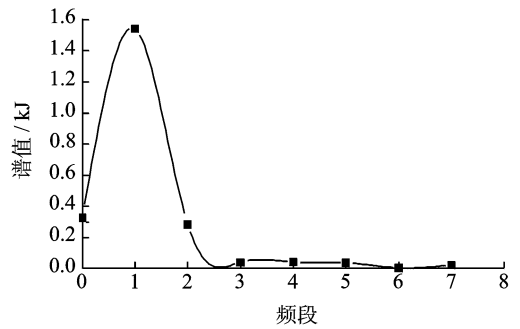


图13 信号 S_4 一通道能量分布图

3.3 实验结果分析

有裂纹与无裂纹信号的区别如下。

1) 有裂纹声发射信号各分解频带能量值之和远大于无裂纹声发射信号能量值,而且自125 kHz到300 kHz频段,各分解频段的能量值都比无裂纹声发射信号大很多。

2) 有裂纹声发射信号能量分布是先增大后减小趋势,而无裂纹声发射信号能量分布是逐渐减小的趋势。

3) 它们的第一分解频带的能量值百分数呈现相反的比例趋势。有裂纹声发射信号的第一分解频带的时序谱值占整段信号时序谱值的比值较小,而无裂纹声发射信号占整段信号时序谱值的比值较大。同理,这两组分解信号的第三分解频段的时序谱

根据实验结果分析可得,信号 S_3 与 S_4 均为裂纹信号。经检验,在信号 S_3 与 S_4 对应的物件上发现了裂纹区域,如图14、图15所示。

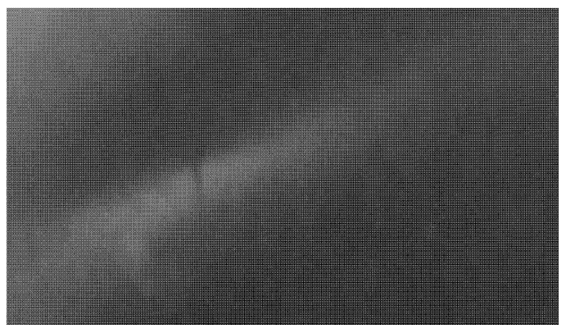


图14 信号 S_3 对应物件早期裂纹

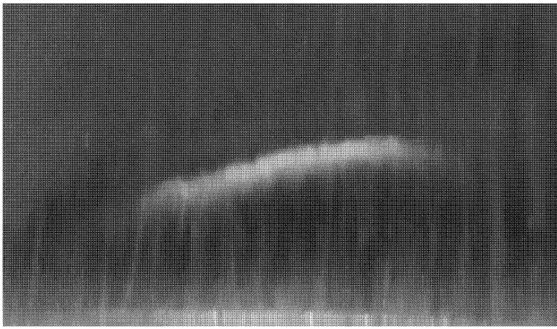


图 15 信号 S_4 对应制件早期裂纹

5 结 束 语

根据金属拉深制件在成型过程中产生的声发射信号特点,以 Matlab 软件为工具,采用小波包分解技术对声发射信号进行处理,同时对各分解频带的信号进行平滑、提取趋势项和差分处理,将非平稳信号成功地转换为平稳信号,剔除了噪声信号带来的影响。采用时序分析建立各分解信号的自回归模型以提取声发射信号的特征参数,及其频率由高到低的能量分布图。根据声发射信号的能量分布图对有无裂纹进行状态识别,成功判定了金属拉深制件的质量,且与实验结果相符。

参 考 文 献

- [1] 邓扬,丁幼亮,李爱群. 基于小波包分析的拉索损伤声发射信号特征提取[J]. 振动与冲击, 2010, 29(6): 154-158.
Deng Yang, Ding Youliang, Li Aiqun. Based on wavelet packet analysis of cable damage acoustic emission signal feature extraction[J]. Vibration and Impact, 2010, 29(6): 154-158. (in Chinese)
- [2] 刘志军,陈国平,张方,等. 超长斜拉索张力振动法测量研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 111-114.
Liu Zhijun, Chen Guoping, Zhang Fang, et al. Super-long sew cable tension vibration measurement research[J]. Vibration and Impact, 2008, 27(1): 111-114. (in Chinese)

- [3] 高博,曲小钢. 广义 Burgers-Fisher 方程的 Haar 小波有限差分法[J]. 纺织高校基础科学学报, 2010, 23(2): 170-173, 184.
Gao Bo, Qu Xiaogang. Haar wavelet finite difference method of generalized Burgers - Fisher equation[J]. The Basic Science Journal of Textile Colleges, 2010, 23(2): 170-173, 184. (in Chinese)
- [4] 柏柯嘉,刘伟铭,汤义. 基于 Gabor 小波和颜色模型的阴影检测算法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 64-68.
Bo Kejia, Liu Weimin, Tang Yi. The shadow detection algorithm based on the Gabor wavelet and color model[J]. Journal of South China University of Technology: Edition of Natural Science, 2009, 37(1): 64-68. (in Chinese)
- [5] 杜秋华,王飞. 经验模式分解在信号处理中的应用[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(S): 118-121.
Du Qiu-hua, Wang Fei. The application of empirical mode decomposition in the signal processing [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(S): 118-121. (in Chinese)
- [6] 杨叔子,吴雅,轩建平,等. 时间序列分析的工程应用: 下册[M]. 2 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007: 277.
- [7] 杜欣慧,张丽芳,李青,等. 电力系统负荷预测软件中 VB 与 Matlab 的接口方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 208-211.
Du Xinhui, Zhang Lifang, Li Qing, et al. VB and Matlab interface method research in the power system load forecasting software[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 208-211. (in Chinese)



第一作者简介: 骆志高,男,1953 年 11 月生,教授。主要研究方向为模具设计与制造、机械故障诊断及遗传基因算法的应用研究。曾发表《利用声发射信号的特征分析对冲压模具的判别》(《振动与冲击》2009 年第 28 卷第 3 期)等论文。
E-mail: lzg3359@163.com