

振动信号小波包特征熵的时变与频变特性分析

孙来军

(黑龙江大学黑龙江省高校自动控制重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘 要: 为了更好的反应高压断路器的机械振动状态, 介绍了一种基于小波包分解的断路器振动信号特征提取新方法。将正常状态标准信号 3 层小波包分解后提取第 3 层各节点重构信号的包络, 利用能量均等的原则将各包络分成 15 段并提取各分段时间点并利用正常状态标准信号所得包络的分段时间点分段测试信号的对应节点包络, 再利用熵原理计算各节点熵, 组合后形成小波包特征熵向量用于断路器故障诊断。利用实际信号分别模拟时变和频变信号测试所得向量变化特性的仿真结果表明: 无论在时变还是频变情况下, 该方法所提取的振动信号特征向量都可以以不同的变化特性直观、明显地反映信号的变化。

关键词: 小波包; 熵; 高压断路器; 振动信号; 时变; 频变

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1003-6520(2007)08-0146-05

Time-variation and Frequency-variation Analysis of Wavelet Packet-characteristic Entropy for Vibration Signals

SUN Lai-jun

(HLJ Province Key Lab of Senior-education for Electronic Engineering, Automation Control Lab, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: A new method for extracting characteristic parameters from vibration signals of HV CB (circuit breakers) is introduced based on wavelet packet. For one normal signal, the method splits each reconstructed-signal envelope into 15 segments with the same energy, at the third layer of the wp-decomposition, and the testing signal is also split with the same breakpoint as the normal signal. The characteristic entropy is extracted from the segmental energy of reconstructed signals, and an 8-D vector can be gotten. At last, many simulated signals with time-domain and frequency-domain changes from the normal signal are used to test the characteristics of the new method. The simulation results indicate the characteristic vector extracted from HVCB vibration signal with the new method can reflect the changes of the mechanical states visually and sharply, and can be used to diagnose the fault of HVCB.

Key words: wavelet packet; entropy; high voltage circuit breakers; vibration signal; time-variation; frequency-variation

0 引 言

高压断路器动作产生的机械振动信号蕴含着许多状态信息, 分析振动信号能够发现触头磨损、螺丝松动等许多机械故障征兆^[1-7]。近年来出现的断路器状态监测系统也开始对断路器的振动信号进行处理, 利用新型的信号处理方法提取振动特征用于故障诊断, 如信号包络检测^[1]、敏感节点系数分析^[2]、奇异性检测^[8]、能量分析^[1,9-12]等方法, 都取得了一定的实用效果。

小波包作为一种新型的信号时频分析方法, 近年来在信号检测中得到了很好的应用。较以往的小波方法, 小波包不仅关注信号分解的近似信号, 还能够更为直观的反映细节信号在原始信号中的分布, 利用不同的节点反应不同频段的变化情况, 同时在时域和频域两个方面反映信号^[3,8,10]。建立在概率统计基础上的信息熵是系统不确定程度的一种描述, 反映了信息概率分布的均匀性, 近年来在生物学、故障诊断中多有应用, 并取得初步成果^[9,13]。

故障诊断是对被诊断对象(设备或系统)当前状态的识别和未来状态的估计^[14], 抽象到理论上就是系统识别。目前的识别方法主要有统计识别法、函数识别法、逻辑识别法、模糊识别法和神经网络识别法等, 不论哪一种方法, 其识别过程均包括信号测量、特征提取、标准特征建库和比较识别 4 个部分。在传统识别流程中, 最重要的环节就是特征提取, 因为所提取特征对状态变化的敏感程度直接决定着诊断系统的诊断效果以及后续识别方法的设计。实质上, 识别的过程就是比较, 通过“比较”测试状态信号参量与已知状态信号参量来确定是否存在故障, 存在什么故障。如果在特征提取之前, 将测试信号与标准信号作有目的比较, 即在特征提取之前增加信号预比较环节, 可以减少对特征提取方法的过度依赖。在一般设备的各种状态中, 各正常状态可看作是一正常标准状态的脉动, 而各故障状态则可看作是这个正常标准状态的不同突变, 这样就可利用信息熵通过检测突变信息诊断故障。

结合小波包分解理论和信息熵理论, 本文提出

了一种基于新流程的特征提取方法——小波包特征熵诊断方法,并就该方法在原始信号时变和频变时的特性作了详细分析。

1 小波包特征熵向量的提取

小波包特征熵提取过程如下:

1) 对正常状态标准信号 3 层小波包分解,基小波选为 db10,分别在第 3 层 8 个节点处重构信号;

2) 对 1) 中所得到的 8 个重构信号分别利用 Hilbert 变换求取包络^[8];

3) 将各节点包络信号按照能量均等的原则沿时间轴分成 15 等份,提取各分段时间点;

4) 将测试信号依次按照 1)、2) 进行处理,然后将所提取的包络信号按照 3) 所得到的时间点分段,并利用下式计算各段能量^[10]:

$$Q_k(i) = \int_{t_1}^{t_2} |f(x)|^2 dx,$$

式中 $f(x)$ 为包络信号, $i=1, 2, \dots, 15, k=0, 1, \dots, 7, t_1, t_2$ 分别为其中一段的时间分界点;

5) 各节点包络信号的分段能量归一化如下:

$$\epsilon_k(i) = Q_k(i) / \sum_{i=1}^{15} Q_k(i),$$

根据信息熵的基本理论,定义小波包特征熵为^[9,13]:

$$H_k = - \sum_{i=1}^{15} \epsilon_k(i) \lg \epsilon_k(i);$$

6) 形成小波包特征熵向量 $T = [H_0, H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6, H_7]$,并以此作为诊断断路器故障的特征向量。

在上述特征提取的过程中,将正常信号等能量分段方式作为一个标准用于测试信号的分段,本身就是一种比较,即将正常状态各分段内能量的近平均与测试信号分段后各段能量分布的突变作比较,将故障诊断转变成能量分布的突变检测。将正常状态信号作为标准分段时,在反映有无故障上比较敏感,而如果利用各种故障状态信号作为标准时,则可以敏感的反映出是否存在该种故障。

2 正常状态标准信号的处理

图 1 为某断路器在运行之初所得到的正常状态标准振动信号。在利用小波软阈值去噪处理后,以 db10 小波为基小波对标准信号进行 3 层小波包分解,并在第三层 8 个节点处重构信号;利用 Hilbert 变换提取各重构信号包络,8 个节点包络信号见图 2;对图 2 的各个包络信号分别按照能量均等原则分成 15 份,提取的各分段时间点见表 1。

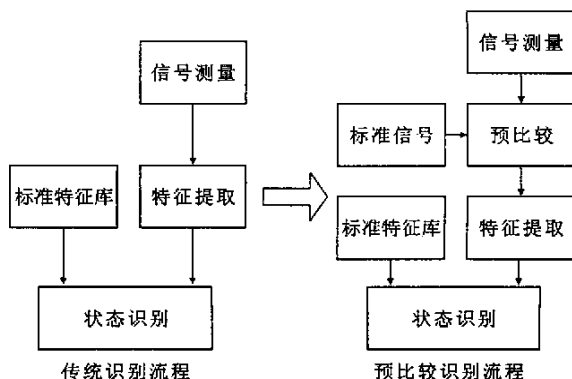


图 1 正常状态标准信号

Fig. 1 Standard signal of normal state

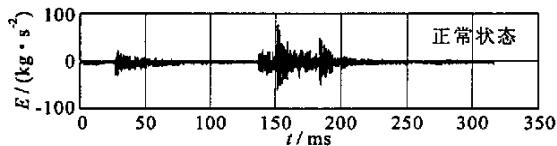


图 2 节点包络信号

Fig. 2 Junction envelopes of normal signal

表 1 各节点等能量段划分时间点

Tab. 1 Time points of each equal-energy segment ms

节点	[3,0]	[3,1]	[3,2]	[3,3]	[3,4]	[3,5]	[3,6]	[3,7]
1	29.20	31.94	40.15	36.95	33.76	31.94	41.06	31.48
2	42.43	46.99	95.35	89.88	48.99	47.90	98.09	45.17
3	57.48	62.65	112.76	115.46	87.07	70.26	129.57	81.66
4	73.45	85.95	132.45	131.89	120.90	127.74	142.80	129.57
5	93.98	108.73	144.66	143.47	148.73	146.90	148.73	143.25
6	126.83	127.40	153.59	152.40	161.50	160.13	155.03	151.92
7	152.38	145.13	161.70	160.59	169.26	173.82	162.59	159.22
8	163.33	165.15	169.72	166.52	188.88	188.42	168.15	165.15
9	176.10	177.93	180.66	177.02	193.26	192.53	173.37	177.93
10	196.18	192.53	191.61	191.16	199.83	197.55	182.97	190.70
11	209.41	197.55	199.37	198.00	206.67	204.39	192.98	198.91
12	231.31	210.32	209.41	210.78	218.53	218.08	204.39	212.14
13	264.15	229.02	229.02	229.94	238.15	240.89	223.55	232.22
14	301.56	268.26	260.50	269.17	281.03	283.32	257.31	275.56
15	333.50	333.50	333.50	333.50	333.50	333.50	333.50	333.50

从表 1 明显可见,断路器动作过程中的撞击事件所处的时间段间隔较小,最小的只有 5 ms;而其他平坦处分段间隔较大,使这种分段方式可在各频段范围内检测出撞击事件发生时刻的偏移^[15,16]。分段数目的选取直接决定所得向量对断路器状态变化的灵敏度;如果分段过少,各段时间长,可能包括几个撞击事件,各撞击事件发生时刻的偏移可能就检测不出来;如果分段过多,正常范围内的事件偏移会引起特征向量的较大波动,从而造成误判。本文在经过多次试验比较后,最终选择 15 段。

3 振动事件时变分析

利用该断路器某正常振动信号,通过加入干扰噪声和延迟的方法模拟 5 个信号,见图 3。图中时变信号 1 为正常状态实际振动信号,时变信号 2~6 为从 100 ms 处依次延迟 3 ms 的模拟信号,从图中可以看出,从上至下各信号 100 ms 之后的撞击事件依次后移,到时变信号 6 时已较正常状态信号后移了 15 ms;按照第 1 节中 3)~6)分别处理图 4 各信号,提取小波包特征熵向量见表 2, $T_1 \sim T_6$ 分别对应信号时变信号 1~6。表 2 的特征向量表明,正常状态下向量元素分布比较均匀,随着时间延迟,这种均匀逐渐被打破,各熵值逐渐减小。图 4 是各熵值相对于正常状态的变化曲线,随着延迟时间加长,各节点的变化基本一致;在节点[3,0],即最低频段,特征熵变化很小,这是因为相对其他频段低频段在信号中的分布最均匀,无论事件发生时间如何变化,都不会引起低频成份分布的明显变化。利用 $\sigma_i = \|T_1 - T_i\|$ ($i=2, \dots, 6$) 计算各延迟信号与正常信号的欧氏距离,其中 $\|\cdot\|$ 表示取绝对值,结果见表 3,随着时间的延迟,各信号与正常信号的向量距离逐渐加大,利用这一点可判断测试信号对正常状态时间延迟的大小,检测断路器可能存在的润滑不足,操作延迟等故障^[17]。

表 2 时变测试熵向量

熵	H_0	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7
T_1	1.249 9	1.180 1	1.090 6	1.225 0	1.253 3	1.282 9	1.069 9	1.172 1
T_2	1.236 1	0.981 3	1.021 1	1.026 0	1.183 1	1.268 0	0.962 7	1.029 2
T_3	1.218 0	0.950 6	0.930 6	0.811 3	1.069 8	1.230 5	0.895 3	0.917 9
T_4	1.208 1	0.906 9	0.834 6	0.879 5	1.009 2	1.181 3	0.764 2	0.973 6
T_5	1.203 7	0.881 4	0.682 6	0.813 4	1.005 1	1.144 5	0.667 5	0.918 1
T_6	1.205 5	0.787 3	0.708 0	0.770 7	0.953 6	1.082 5	0.606 6	0.802 5

表 3 时变欧氏距离

欧氏距离	$\ T_1 - T_2\ $	$\ T_1 - T_3\ $	$\ T_1 - T_4\ $	$\ T_1 - T_5\ $	$\ T_1 - T_6\ $
σ	0.816 1	1.499 9	1.766 5	2.207 5	2.627 1

4 振动信号频变分析

模拟一干扰信号,从幅值 0.8 mV、最高频率 4 kHz 开始衰减,在 40 ms 内全部衰减到 0 的干扰噪声;在某正常状态振动信号 50 ms 处加入干扰得到模拟信号 2,然后以模拟信号 2 为基础在其 100 ms 处加入干扰得到模拟信号 3,以此类推分别得到模拟信号 4~6,见图 5,这一系列信号频率成份逐渐变化,而各撞击事件时间没有变化。

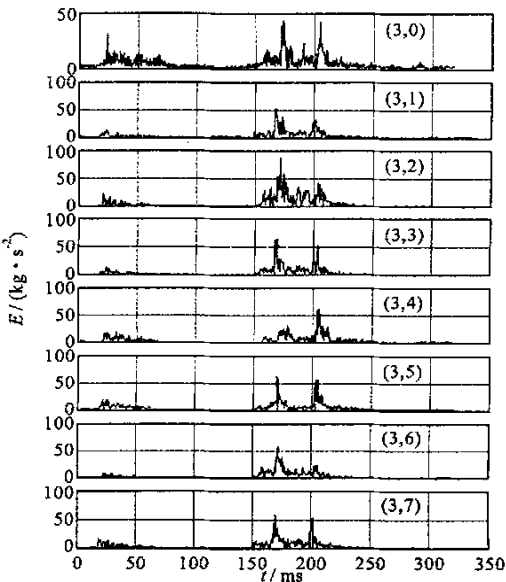


图 3 时间延迟模拟信号

Fig. 3 Simulated signals of time-variation

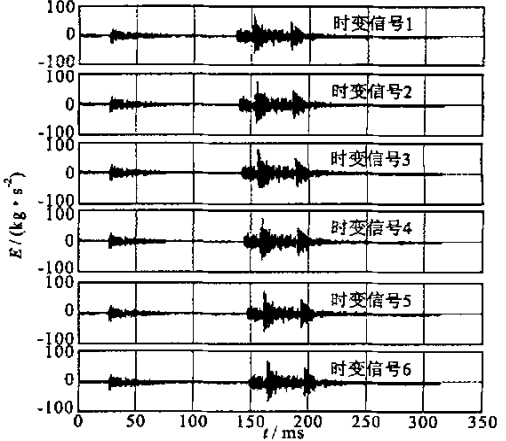


图 4 时变信号熵变化曲线

Fig. 4 Time-variation curves of entropy-variation

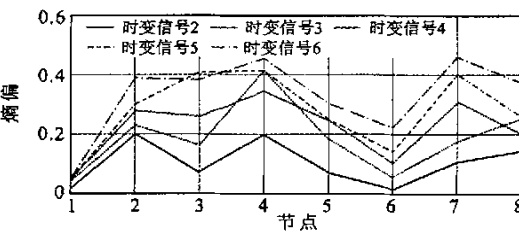


图 5 频变模拟信号

Fig. 5 Simulated signals of frequency-variation

利用前述特征提取方法提取特征熵向量结果见表 4。由表 4 可见,低频段熵值略有增加,而高频段却变化很小,各模拟信号相对于正常信号各节点熵值变化曲线如图 6。在变化曲线上,节点 1 和 0 变化幅度较大,其他节点变化很小,这主要是因为节点

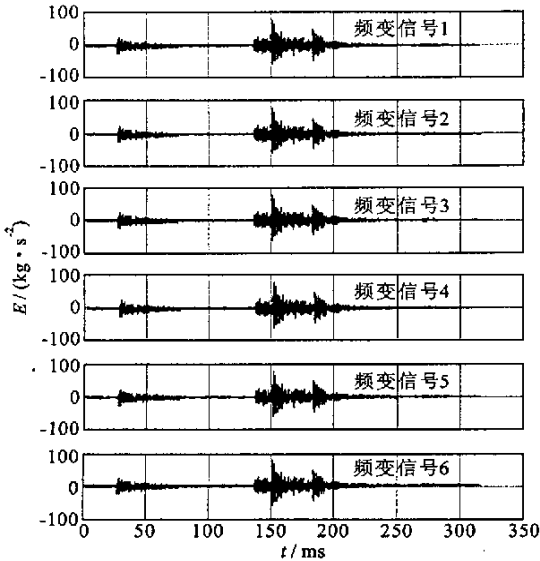


图 6 频变信号熵变化曲线

Fig. 6 Frequency-variation curves of entropy-variation

表 4 频变测试熵向量

Tab. 4 Testing entropy vectors of frequency-variation

熵	H_0	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7
T_1	1.249 9	1.180 1	1.090 6	1.225 0	1.253 3	1.282 9	1.069 9	1.172 1
T_2	1.263 9	1.193 9	1.091 5	1.226 2	1.254 5	1.283 5	1.070 4	1.172 1
T_3	1.263 0	1.197 1	1.091 4	1.226 2	1.255 1	1.282 8	1.070 9	1.171 5
T_4	1.264 5	1.201 7	1.092 4	1.226 9	1.254 9	1.282 9	1.070 6	1.172 2
T_5	1.265 6	1.205 4	1.093 0	1.227 1	1.255 0	1.282 8	1.070 5	1.171 3
T_6	1.266 2	1.208 1	1.095 6	1.227 1	1.254 9	1.282 6	1.073 3	1.171 3

表 5 频变欧氏距离

Tab. 5 Euclidean distance of frequency-variation

欧氏距离	$\ T_1-T_2\ $	$\ T_1-T_3\ $	$\ T_1-T_4\ $	$\ T_1-T_5\ $	$\ T_1-T_6\ $
σ	0.032 2	0.035 5	0.042 4	0.048 7	0.057 4

0 和 1 反应的是大约在[0~3 kHz]和[3~6 kHz]段频率成份的变化情况,而加入的干扰从 4 kHz 衰减下来,也分布在这两个区域,仿真的结果完全符合预期结果。表 5 所得的欧氏距离也进一步显示了频率成份变化对特征熵的影响。另外比较表 5 和表 3 数据则可得:撞击事件发生时间的变化对特征熵向量的影响远大于频率成份变化所产生的影响,这也为区分频变与时变提供了一个强有力的依据。

由以上分析可得,小波包特征熵能够从信号成份偏移的角度反映断路器状态逐步变化的过程,这也适用于许多其他设备的故障检测^[18]。具体使用时,分别以某种故障作为标准信号分段,最终利用标准状态与测试状态间熵向量的欧氏距离反映两种状态间的相似程度,根据最大距离即可确定测试状态即属于对应故障。

5 结 语

小波包分解作为信号时频分析的一个重要手段,结合特征熵的概念用于高压断路器的故障诊断取得良好仿真效果,为断路器的故障诊断提供了新的方法。从振动信号时变和频变两个方面对该方法的特性作详细分析取得了好的结果,但这种方法在工程实际应用还需要更多的状态数据验证、改进。

参 考 文 献

[1] Polycarpou A A, Soom A, Potter J W, et al. Event timing and shape analysis of vibration bursts from power circuit breakers [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 848-857.

[2] 孙来军, 胡晓光, 纪延超. 一种基于振动信号的高压断路器故障诊断新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 157-161. SUN Lai-jun, HU Xiao-guang, JI Yan-chao. A new method of fault diagnosis for high voltage circuit breakers based on vibration signals [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 157-161.

[3] Runde M, Ottesen G E, Skvberg B, et al. Acoustic diagnosis of high voltage circuit-breakers [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(3): 1306-1315.

[4] Dennis S S Lee, Brian J Lithgow, Rob E Morrison. New fault diagnosis of circuit breakers [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(2): 454-459.

[5] Runde M, Skyberg B, Ohlen M. Vibration analysis for periodic diagnostic testing of circuit breakers [C]. High Voltage Engineering Symposium. London, UK, 1999.

[6] Lai M L, Park S Y, Lin C C, et al. Mechanical failure detection of circuit breakers [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 1724-1731.

[7] 马 强, 荣命哲, 贾申利. 基于振动信号小波包提取和短时能量分析的高压断路器合闸同期性的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 149-154. MA Qiang, RONG Ming-zhe, JIA Shen-li. Study of switching synchronization of high voltage breakers based on the wavelet packets extraction algorithm and short time analysis method [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 149-154.

[8] 胡晓光, 戴景民, 纪延超, 等. 基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 67-70. HU Xiao-guang, DAI Jing-min, JI Yan-chao, et al. The fault diagnosis of high voltage breakers based on wavelet singularity detection [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 67-70.

[9] 桂中华, 韩凤琴. 小波包特征熵神经网络在尾水管故障诊断中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 99-102. GUI Zhong-hua, HAN Feng-qin. Neural network based on wavelet packet-characteristic entropy for fault diagnosis of draft tube [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 99-102.

[10] 赵海龙, 王 芳, 胡晓光. 小波包-能量谱在高压断路器机械故障诊断中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(6): 46-48. ZHAO Hai-long, WANG Fang, HU Xiao-guang. Application of wavelet packet-energy spectrum in mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers [J]. Power System Technology,

2004, 28(6): 46-48.

- [11] 沈力, 黄瑜珑, 钱家骧. 高压断路器机械状态监测的研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 113-117.

SHEN Li, HUANG Yu-long, QIAN Jia-li. Research on mechanical condition monitoring for HV circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(2): 113-117.

- [12] 胡晓光, 齐明, 纪延超, 等. 基于径向基函数网络的高压断路器在线监测和故障诊断[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 41-44.

HU Xiao-guang, QI Ming, JI Yan-chao, et al. On-line monitoring and fault diagnosis of high voltage circuit breakers based on radial basis function networks[J]. Power System Technology, 2001, 25(8): 41-44.

- [13] 何正友, 蔡玉梅, 钱清泉. 小波熵理论及其在电力系统故障检测中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 38-43.

HE Zheng-you, CAI Yu-mei, QIAN Qing-quan. A study of wavelet entropy theory and its application in electric power system fault detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 38-43.

- [14] 虞和济, 陈长征, 张省, 等. 基于神经网络的智能诊断[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.

YU He-ji, CHEN Chang-zheng, ZHANG Sheng, et al. Intelligent diagnosis based on neural network [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.

- [15] 朱利民, 钟秉林, 贾民平. 振动信号短时分析方法及在机械故障诊断中的应用[J]. 振动工程学报, 2000 13(2): 400-405.

ZHU Li-min, ZHONG Bing-lin, JIA Min-ping. The short time

analysis method and its application on mechanical fault diagnosis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(2): 400-405.

- [16] 杨武, 荣命哲, 陈德桂, 等. 高压断路器操作振动信号处理的一种新方法[J]. 电工电能新技术, 2002, 21(3): 57-61.

YANG Wu, RONG Ming-zhe, CHEN De-gui, et al. A new method of high-voltage circuit breaker's vibration signal processing [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, 21(3): 57-61.

- [17] 张伟政, 杨兰均, 张文元. 小波分析在真空断路器机械振动信号分析中的应用[J]. 高压电器, 1997, 33(6): 19-22.

ZHANG Wei-zheng, YANG Lan-jun, ZHANG Wen-yuan. Application of wavelet in the analysis of CB vibration signals [J]. High Voltage Apparatus, 1997, 33(6): 19-22.

- [18] Albert Boggess, Francis J Narocwich. A first course in wavelets with fourier analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.



孙来军

Ph. D. SUN Lai-jun

孙来军 1977—, 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为设备监测与故障诊断技术、无损检测技术。E-mail: slaijun@126.com

收稿日期 2006-08-02

编辑 卫李静

征集《高电压技术》英文广告语

为了扩大《高电压技术》的国际影响力, 加快其国际化进程, 塑造《高电压技术》国际知名期刊品牌, 杂志社公开征集《高电压技术》英文广告语。

一、广告语应征须知

1. 反映《高电压技术》的办刊宗旨, 《高电压技术》的办刊宗旨为: 客观报导高电压及其相关领域的科研成果与动态, 构建高电压技术信息传播与交流的平台, 促进中国高压输变电技术的发展。

2. 主题鲜明, 语言简洁规范(不宜过长), 流畅(琅琅上口), 富有美感, 具有较强的感染力、号召力和唯一性, 成为《高电压技术》的理念识别。

3. 投稿方式: 通过 E-mail 投稿至 pengcz@whvri.com, 邮件标题请标注《高电压技术》英文广告语投稿, 并注明作者姓名、身份证号、单位、年龄、联系电话(办公电话或手机)和通信地址。来稿恕不退还, 请自留底稿。

4. 有效投稿时间: 2007 年 6 月 1 日~9 月 1 日。

5. 所有入选作品的著作权全部归《高电压技术》杂志社所有, 《高电压技术》杂志社有权对入选作品进行修改。

二、设立奖项

特等奖: 1 名, 奖金 3000 元; 赠送 2007~2008 年《高电压技术》;

一等奖: 2 名, 奖金 1000 元; 每人赠送 2007~2008 年《高电压技术》;

二等奖: 9 名, 奖金 500 元; 每人赠送 2008 年全年《高电压技术》;

参与奖: 赠送《高电压技术》2008 年年历。

三、评选方式

由《高电压技术》编委会委员投票评选。

《高电压技术》杂志社

2007-05-26