

# 基于小波-Hilbert 的涡喷发动机静电监测技术研究\*

## Research on Electrostatic Monitoring Technology of Turbojet Engine Based on Wavelet-Hilbert

南京航空航天大学民航学院 刘鹏鹏 左洪福 余有峰  
北京航空工程技术研究中心 王璐璐

**[摘要]** 在某型涡喷发动机试车过程中首次开展了气路静电监测试验,获取了若干试车阶段静电信号。选用第 102 阶段(发动机处于健康状态)监测的静电信号进行时域特征分析,获取了发动机处于启动、巡航、停车 3 个典型工况下时域幅值以及活动率水平、正负事件率特征参数的变化情况,分析表明静电信号会随发动机工况变化而变化。为了进一步揭示静电信号特征,采用小波-Hilbert 变换方法处理了第 102 阶段的静电信号,获取了其能量值、能量分布以及功率谱的特征。为了验证分析方法的有效性,也对第 174 阶段(该阶段发动机存在积碳故障)的静电信号进行了对比分析。

**关键词:** 涡喷发动机 状态监测 小波-Hilbert 静电监测

**[ABSTRACT]** We have made the first gas path electrostatic monitoring experiment and got some commissioning phase electrostatic signals in some type of the turbojet commissioning process in this paper. It selects the 102 stage (engine in a healthy state) electrostatic monitoring signal to analyze features in time domain, obtaining the change of the characteristic parameters such as time domain amplitude, activity level, positive and negative event rate in three typical working conditions. The result of analysis shows that the electrostatic signal changes with the engine conditions. In order to further reveals electrostatic signal characteristics, this paper uses wavelet-Hilbert transformation method to deal with the 102 stage of the electrostatic signal, getting its energy, energy distribution and power spectrum characteristics. With the goal to verify the validity of the method of analysis, we also analyze 174 stage (this stage engine exists carbon fault) electrostatic signals.

**Keywords:** Turbojet engine Condition monitoring Wavelet-Hilbert Electrostatic monitoring

航空发动机是飞机的核心部分,其健康状况监测一直是发动机健康管理领域的研究重点。航空涡喷发动机的尾气中含有大量的带电颗粒,当气路部件发生故障时,将会产生一些异常的带电颗粒,由于这些带电颗粒是故障的直接产物,所以通过监测带电颗粒特性就可以实现在线监测发动机工作状态。一般使用基于光学原理的方法来测量气体中颗粒物特性,但这些方法无法适应于发动机气路恶劣的工作环境,不能够实现在线监测。英国 Smith 公司的 Powrie HEG 和 Fisher 等在 20 世纪 90 年代就开展了航空涡喷发动机尾气静电监测技术研究并获取了大量的研究成果<sup>[1-2]</sup>,该技术利用基于静电感应原理设计的静电传感器对气路静电荷整体水平进行监测。

文献 [3-6] 简单介绍了静电监测技术应用于 F-35 战斗机时的实施和集成情况。Lapini G L 等使用一台重度污染的发动机,借助尾气静电监测系统实现了对气路部件的故障监测与预警<sup>[7]</sup>。文献 [8] 研究了将该技术应用于工业燃气涡轮机上及静电传感器的安装问题,以及不同安装位置的信号特征等。文振华等<sup>[9-10]</sup>对尾气静电监测技术原理展开研究,用有限元方法对气路静电传感器感应特性进行仿真研究,并初步研究了信号特征提取方法,最后在尾气静电监测模拟环境中进行了传感器可行性验证试验。李耀华等开展了基于静电感应原理的航空涡轴发动机监测技术研究,完成了对某型涡轴发动机尾气静电监测的地面试验<sup>[11]</sup>,孙见忠等利用测得的试验数据分析了涡轴发动机尾气静电信号的影响因素<sup>[12]</sup>。

在航空发动机试车台对某型航空涡喷发动机实现了气路静电监测试验,获取了发动机若干试车阶段的静电监测数据。首先分析了发动机处于健康状态时 3 种典型工况下的静电信号的时域特征;然后,根据静电信号所具有非平稳的特征,选择了小波变换方法从能量角度对获得的两类尾气静电信号进行特征提取,并对两类信号进行了对比分析;最后结合小波变换的信号分解结果采用 Hilbert 变换分析了两类信号的频率分布情况,进一步确立正常信号与故障信号的区别。该研究揭示了两类信号在能量值、能量分布、功率谱方面对应的变

\* 国家自然科学基金与中国民航联合资助基金重点项目 (60939003) 资助。

化情况,该项研究用于解决利用静电信号特征监测发动机异常状态并为进一步研究发动机气路故障诊断问题提供依据。

## 1 典型信号处理与分析

### 1.1 原始静电信号时域分析

利用涡喷发动机气路静电监测系统采集了寿命试车中第 102 阶段的航空发动机启动时、巡航时、停车时 3 个典型工况的尾气静电信号,3 个信号采集时间都为 60s(远大于发动机工况调节时间),获取的 3 个信号的时域波形如图 1 所示。

其中,图 1(a)为航空发动机处于启动工况时静电信号时域波形,图 1(b)为航空发动机处于巡航工况时静电信号时域波形,图 1(c)为航空发动机处于停车工况时静电信号时域波形。可见,图 1(a)信号在发动机启动瞬间对应着幅值较大的突变,随着发动机点火成功,发动机逐渐转入地慢工况,静电信号变得比较稳定;图 1(b)信号中突变脉冲比较多,信号幅值比较大,一方面是由于发动机燃烧室是存在一些设计缺陷,在燃烧过程中容易产生大的碳烟颗粒引起的<sup>[13]</sup>,另一方面是由于巡航工况下发动机排气速度非常快,从而也可以导致静电感应信号的幅值增大;图 1(c)信号是发动机控制系统发出停车指令,静电信号在供油系统停止供油后出现跳变。

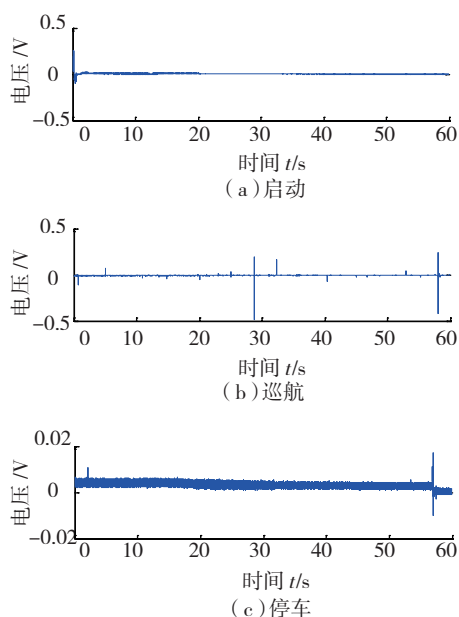


图 1 涡喷发动机启动、巡航、停车时的尾气静电信号

Fig.1 Electrostatic signal of exhaust gas in starting,cruising and stopping stages of turbojet

### 1.2 基于小波变换的静电信号分析

涡喷发动机静电信号具有非平稳信号的特征,而小

波变化是处理非平稳信号的有力工具,虽然它不是一种新方法,但是已得到广泛的研究和应用,具有独特的优势<sup>[14-16]</sup>,所以本文选择小波变换方法从能量角度来观察本次静电监测试验获取的静电信号的一些特征。为了便于分析涡喷发动机启动时、巡航时、停车时 3 个典型工况静电信号,记发动机启动时静电信号为  $ES_1$ ; 发动机巡航时静电信号为  $ES_2$ ; 发动机停车时静电信号的为  $ES_3$ 。静电信号的采样频率均为 2kHz,则分解后各层小波系数对应的频率段如表 1 所示。

表 1 各层小波系数对应的频率段

小波系数	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$a_5$
频率段/Hz	(500, 1000)	(250, 500)	(125, 250)	(62.5, 125)	(31.25, 62.5)	(0, 31.25)

信号经过小波变换后,各层高频系数与第  $N$  层低频系数能量之和等于原始信号的能量,使得分解后的总能量保持不变<sup>[15]</sup>。近似系数  $a_5$  和细节系数  $d_1$  分别反应了信号的低频成分和低频成分。设  $ED_i$  为小波分解后的第  $i$  层高频小波分解系数序列  $d^i$  的能量。则有第  $i$  层能量为:

$$Ed_i = \sum_k^n |d_k^i|^2, \quad (1)$$

式中,  $d_k^j$  为第  $j$  层高频小波系数序列的第  $k$  个分量;  $n$  为序列  $d^j$  中分量的个数。类似地可以求得第  $N$  层低频系数序列的能量,则有信号的总能量为:

$$E = \sum_{i=1}^5 Ed_i + Ea_5. \quad (2)$$

根据式(1)~(2)可计算出信号  $ES_1$ 、 $ES_2$ 、 $ES_3$  的能量以及分解后各层信号的能量,并计算信号各层  $ES_1$ 、 $ES_2$ 、 $ES_3$  经过分解后得到的各层信号的能量所占的比例,是各层能量与信号总能量的比值,得到的结果如表 2 所示。

从典型工况下的发动机尾气静电信号能量、分解后各层信号能量可以看出,启动时的静电信号  $ES_1$  的能量比巡航工况的静电信号  $ES_2$ 、停车时的静电信号  $ES_3$  能量大,这是由于航空涡喷发动机启动时采用了富油启动,产生的燃烧颗粒物大而且电离程度高,故而使得信号能量也比较大,这是符合客观情况的。从静电信号  $ES_1$ 、 $ES_2$ 、 $ES_3$  经过分解后的各层信号能量分布来看,  $ES_1$  信号能量绝大部分集中在低频部分( $d_5$  和  $a_5$ ),其他频段的能量相差不大且都比较少( $<1\%$ )。

$ES_2$  能量大部分集中于低频部分,但是其他频段的能量与  $ES_2$  相比较出现了一个数量级的增加,而且各较高频段能量分布大小有所差异,主要是因为巡航工

表 2 典型工况下的发动机尾气静电信号能量、分解后各层信号能量

信号	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$a_5$	ES	
$ES_1/J$	0.0724	0.0815	0.0991	0.0727	0.2066	15.5434	16.0757	
$ES_2/J$	0.0228	0.0627	0.2694	0.6909	1.4649	5.5200	8.0308	
$ES_3/J$	0.0073	0.0084	0.0107	0.0104	0.0249	1.3650	1.4267	
对应的能量分布 /%	$ES_1/ES$	0.45	0.51	0.62	0.45	1.29	96.69	
	$ES_2/ES$	2.80	7.80	3.35	8.60	18.24	68.74	
	$ES_3/ES$	0.51	0.59	0.75	0.73	1.75	95.68	

况下,发动机转速高、排气速度快,从而可以导致静电信号  $ES_2$  在较高频各部分能量的增加;  $ES_3$  出现了与  $ES_1$  相类似的能量分布情况,只不过是其能量总值比  $ES_1$  的要小,主要原因是采集  $ES_1$ 、 $ES_3$  信号时,发动机的燃油消耗率大小差异比较大,但是  $ES_1$ 、 $ES_3$  所处的发动机的启动与停车工况决定了排气速度比较低,从能使得能量分布绝大部分集中在较低频率,故有类似的能量分布情况。

### 1.3 基于小波 -Hilbert 变换的静电信号分析

为了研究静电信号的频率特征,结合了采用 db3 小波对  $ES_1$ 、 $ES_2$ 、 $ES_3$  作 5 层分解的结果,采用 Hilbert 变换分别对  $ES_1$ 、 $ES_2$ 、 $ES_3$  经过分解后的各层细节信号及  $a_5$  进行谱分析,获取功率谱包络谱信息,分析频率分布情况<sup>[17-19]</sup>。

变换过程如下所示,实信号  $ES(t)$  的 Hilbert 变换  $ES'(t)$  可以定义为<sup>[20]</sup>:

$$ES'(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{ES(\tau)}{t - \tau} d\tau = ES(t) \times \left(\frac{1}{\pi t}\right), \quad (3)$$

$ES(t)$  的包络信号  $a(t)$  可利用式 (3) 求得:

$$a(t) = \sqrt{(ES(t))^2 + (ES'(t))^2}。 \quad (4)$$

对静电信号  $ES_1$ 、 $ES_2$ 、 $ES_3$  各层分解信号按照式 (3)、式 (4) 做 Hilbert 变换得到包络谱结果如表 3 所示。

表 3 中可以看出信号中包络谱中幅值较大的频率为多个低频部分,而频率值为 50Hz 左右及  $n$  倍频被认

为是市电工频干扰,其他频率反映了信号中对应于异常颗粒物产生时的频率分布。利用小波 -Hilbert 变换对  $ES_1$ 、 $ES_2$ 、 $ES_3$  信号进行处理,揭示了各信号在频率分布方面情况。

## 2 发动机异常状态时的静电信号对比分析

在本次的涡喷发动机试车过程中,该型号发动机出现了严重的发动机燃烧室积碳故障,所以对发动机进行了停车维修工作。本节选取了维修工作开始之前的第 174 试车阶段(第 174 阶段带故障运行)典型工况的静电信号,分别记为  $ES_4$ 、 $ES_5$ 、 $ES_6$ ,利用前节所述的小波 -Hilbert 变换分别进行了分析,得到的分析结果如表 4 和 5 所示。

从表 4 可以发现,巡航工况下的发动机尾气静电功率值明显减少,各典型工况下发动机尾气静电信号的分解信号的能量分布也发生了改变;包络谱中的频率分布情况也发生了改变,功率谱中的出现了新的尖峰值(对应着新的频率值),各层分解信号中的低频部分出现增大现象,为了更直观地表现发动机出现故障前后静电信号的变化情况,对经过基于小波 -Hilbert 变换分析后的各正常信号和异常信号进行残差分析得到的结果如图 2 和图 3 所示。

## 3 结论

本文分析了航空涡喷发动机的静电监测原理,并利用某型涡喷发动机及其试车台开展了涡喷发动机监测试验,获取了若干阶段的静电监测数据。对启动、巡

表 3 包络谱信息中的频率分布情况

Hz

信号	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$a_5$
$ES_1$	0/15.35/50/83.1/ 98.5/181.5/246/ 295.3/393.7	0/15.37/49.2/ 98.45/196.49 /303.1	0/7.917/35.08/ 98.43/151.5 /250/500	0/29.98/ 95.02/250	0/6/29.93/125	0/6.3
$ES_2$	0/48.03/95.97 /192.2	0/13.2/96.05	0/(8.3,38.03)/95.97 /250/500	(0,33.5)/ 250	(0,46.82)/125	7.45
$ES_3$	48.27/96.52 /193	17.17/48.27 /96.5/403.5	17.7/39.87/96.53 /114.1/153.5/250 /500	19.78/76.73 /96.53/250	28.48/34.02/ 125	0

表 4 存在积碳故障时典型工况下的发动机尾气静电信号能量、分解后各层信号能量

信号	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$a_5$	$ES$
$ES_4/J$	0.0699	0.1976	0.4337	0.6186	0.6964	14.4095	16.4257
$ES_3/J$	0.0047	0.0072	0.0218	0.0572	0.0399	1.1149	1.2457
$ES_2/J$	0.0036	0.0019	0.0020	0.0046	0.0102	1.5007	1.5230
对应的 能量分 布 /%	$ES_4/ES$	0.43	1.20	2.64	3.77	4.24	87.73
	$ES_3/ES$	0.38	0.58	1.75	4.59	3.20	89.50
	$ES_2/ES$	0.24	0.12	0.13	0.30	0.67	98.54

表 5 存在积碳故障时尾气静电信号功率谱中的频率分布情况

Hz

信号	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$a_5$
$ES_4$	(5.4, 7.8) / 75.67	13.08/46.55, 121.8/500	39.22/ (0, 11.38) /50 250/500	(0, 41.67) / 125/ 250	(0, 30.7) / 125	0
$ES_5$	99.08/198.7/ 209.3	106.9/500/ (0, 68.7)	(0, 40.05) / 250/500	(0, 51) /125/250	(0, 32.98) /125	0
$ES_6$	49.48/98.83 /197.8/209.3	49.48/98.83/ 209.3	49.48/200.5/ 500	26.17/49.48/ 75.52/125/ 250	(0, 18.23) / 26.17	0

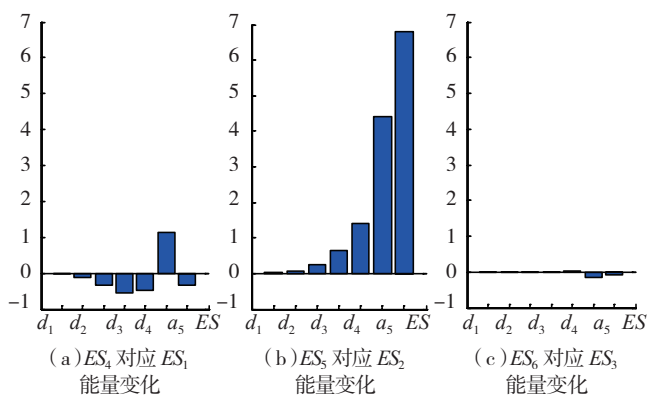


图 2 存在积碳故障时静电信号能量大小的变化

Fig.2 Changes of power's amplitude of electrostatic signal with carbon fault

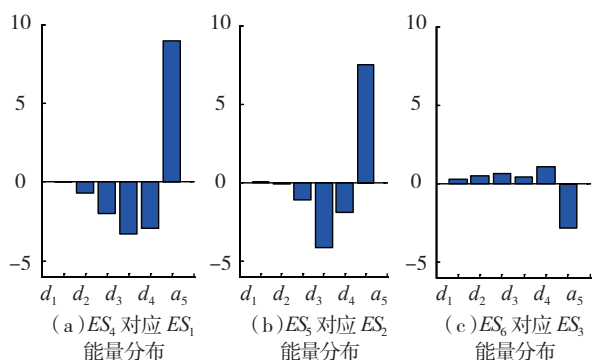


图 3 存在积碳故障时静电信号能量分布的变化

Fig.3 Changes of power's distribution of electrostatic signal with carbon fault

航、停车 3 个典型工况下的健康发动机的静电信号和有燃烧室积碳故障的发动机的静电信号分别利用小波-Hilbert 方法做了分析。本研究获取的结论如下：

(1) 通过对航空涡喷发动机的时域信号分析, 3 种典型工况下的静电信号的形态差别可以说明静电监测技术可以敏感地反映出发动机工况的变化情况。

(2) 健康发动机典型工况下的静电信号经过小波变换后, 产生的 5 层信号能够很好地刻画静电信号的细节特征, 特别是能够清晰描述突变信号的特征, 研究了 3 种典型工况下的静电信号的能量大小以及能量分布情况, 发现启动时、巡航时、停车时信号能量依次下降, 这是符合客观事实的, 而且各信号的小波分解信号所占的比例也存在很大的差别。

(3) 采用了小波-Hilbert 变换分析了涡喷发动机存在燃烧室积碳故障时的静电信号, 得到了启动时、巡航时、停车时静电信号及其各层分解信号的能量大小、能量分布, 发现信号的能量大小以及能量分布都有较大的变化, 其巡航工况时静电信号的能量有大幅度的下降。通过采用残差分析方法, 清晰地反映了健康发动机与存在燃烧室积碳故障的发动机在相同工况下信号能量大小以及分布的变化情况。

## 参考文献

[1] Cartwright R A, Fisher C. Marine gas turbine condition monitoring by gas path electrostatic detection techniques. International Gas Turbine and Aero-Engine Congress and Exposition, 1991.

(下转第 82 页)

个现象可以用热管蒸发端换热面积增大,使热管砂轮的换热性能得到提升来解释。对热管砂轮而言,热管蒸发端与磨削弧区最直接的热量通道便是分布于磨削弧区的一个个磨粒,在其他条件都不变的前提下,磨削深度增加引起磨削弧区面积增大,这就使得弧区的磨粒个数大大增加,由于CBN磨粒本身具有优良的导热性,从而使磨削弧区的热量可以更多、更快地进入热管。这充分说明使用本文研制的热管砂轮在磨削过程中可以借助砂轮内部热管的换热作用,将更多积聚在磨削弧区的热量快速疏导出去,从而将弧区温度稳定控制在100℃以下。

#### 4 结论

(1)分析了热管砂轮在磨削过程中的强化换热原理,设计了一种焊接式热管砂轮,同时实现了对热管砂轮的抽真空、精确注液以及真空封尾,制备出可用于磨削加工的热管砂轮。

(2)开展了热管砂轮缓进给深切磨削TC4钛合金的试验研究,试验结果表明:使用热管砂轮能将磨削弧区积聚的热量通过砂轮内部热管的换热作用快速疏导出去,从而将弧区温度稳定控制在100℃以下。

(3)对磨削加工后工件的表层显微组织与基体的显微组织进行比较,发现晶粒没有发生明显的变化,没有变质层的产生,从而确证了使用热管砂轮在缓进给深切磨削TC4钛合金时能有效避免工件烧伤。

#### 参考文献

[1] 任敬心,康仁科,史兴宽. 难加工材料的磨削. 北京: 国防工业出版社, 1999.

[2] 孙方宏,陈明,徐鸿钧,等. 磨削弧区采用径向射流冲击强化换热的试验研究. 工具技术, 1999, 33(10): 3-6.

[3] Ebbrell S, Woolley N H, Tridimas Y D, et al. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(2): 209-223.

[4] Irani R A, Bauer R J, Warkentin A. A review of cutting fluid application in the grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(15): 1696-1705.

[5] Morgan M N, Jackson A R, Wu H, et al. Optimisation of fluid application in grinding. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 363-366.

[6] 徐鸿钧,傅玉灿,孙方宏,等. 高效磨削时弧区热作用机理与强化弧区换热的基础研究. 中国科学, 2002, 32(3): 296-307.

[7] Song F, Ewing D, Ching C Y. Experimental investigation on the heat transfer characteristics of axial rotating heat pipes. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(22): 4721-4731.

[8] 庄骏,张红. 热管技术及其工程应用. 北京: 化学工业出版社, 2000.

(责编 小城)

(上接第77页)

[2] Powrie H E G, McNicholas K. Gas path cognition monitoring during accelerated mission testing of a demonstrator engine. AIAA-1997-2904, 1997.

[3] Fisher C E, Ford C. Data and information fusion for gas path debris monitoring//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana, USA: IEEE, 2001:3017-3022.

[4] Powrie H E G. Electrostatic charge generation associated with machinery component generation//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana, USA, 2002:2927-2934.

[5] Novis A, Powrie H E G. PHM sensor implementation in the real world—a status report. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2006:1-9.

[6] Powrie H E G, Novis A. Gas path debris monitoring for F-35 joint strike fighter propulsion system PHM//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2006:1-8.

[7] Lapini G L, Zippo M, Trione G. The use of electrostatic charge measurements as an early warning of distress in heavy-duty gas turbines. ASME Turbo Expo Proceedings, 2001:711-716.

[8] Wilcox M, Ransom D. Engine distress detection in gas turbines with electrostatic sensors//Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, Glasgow, 2010:14-18.

[9] 文振华,左洪福,李耀华. 气路颗粒静电监测技术及实验. 航空动力学报, 2008, 23(12): 2321-2326.

[10] 李耀华,左洪福,文振华. 航空发动机气路颗粒静电监测技术模拟实验. 航空学报, 2009, 30(4):604-608.

[11] 李耀华,左洪福,刘鹏鹏. 某型航空涡轮轴发动机尾气静电监测探索性实验. 航空学报, 2010, 31(11):2174-2181.

[12] 孙见忠,左洪福,詹志娟,等. 涡轴发动机尾气静电监测信号影响因素分析. 航空学报, 2012 (3):37-45.

[13] Sorokin A, Arnold F. Electrically charged small soot particles in the exhaust of an aircraft gas-turbine engine combustor: comparison of model and experiment. Atmospheric Environment, 2004,38(17):2611-2618.

[14] Chen C, Sun C, Zhang Y, et al. Fault diagnosis for largescale wind turbine rolling bearing using stress wave and wavelet analysis. Electrical Machines and Systems, 2005(3): 2239-2244.

[15] 牛培峰,张君. 小波分析技术在汽轮机故障诊断中的应用. 动力工程, 2007, 27(1):76-80.

[16] 师黎,王丽佳. 小波变换在心电信号处理机特征提取中的应用. 郑州大学学报(工学版), 2006,27(2):65-69.

[17] Ivan W, Selesnick. Hilbert transform pairs of wavelet bases. IEEE Signal Processing Letters, 2001,8(6):170-173.

[18] Noo F, Clackdoyle R, Pack J D. A two-step hilbert transform method for 2D image reconstruction. Physics in Medicine and Biology, 2004(49):3903-3923.

[19] Puche P R, Pineda S M, Riera G, et al. Improved resolution of the MCSA method via hilbert transform, enabling the diagnosis of rotor asymmetries at very low slip. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009,24(1):52-59.

[20] 黄中华,谢雅. 基于 Hilbert 变换的滚动轴承内环和外环故障诊断. 中南大学学报(自然科学版), 2011,42(7):1992-1996.

(责编 深蓝)