

文章编号: 1000-8055(2008)12-2321-06

气路颗粒静电监测技术及实验

文振华, 左洪福, 李耀华
(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

摘 要: 介绍了发动机气路荷电颗粒产生的机理、静电传感器原理以及气路静电监测技术的原理, 然后介绍了模拟试验装置和试验过程, 并通过实验的方法对静电监测技术进行了研究, 最后通过小波分析的方法对实验信号的能量分布特征进行了研究, 结果为大颗粒产生的感应信号的幅度要大而能量分布集中在低频段, 而细小颗粒产生的感应信号幅值较小, 信号能量分布集中在高频段, 实验结果为在气路监测中辨别异常颗粒提供了参考依据, 同时也表明了基于颗粒静电监测方法的可行性。

关 键 词: 航空发动机; 气路; 颗粒; 静电监测; 小波分析

中图分类号: V231.25

文献标识码: A

Gas path debris electrostatic monitoring technology and experiment

WEN Zhen-hua, ZUO Hong-fu, LI Yao-hua

(Civil Aviation College,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The formation mechanism of charged - particles, the principle of electrostatic sensor and gas path electrostatic monitoring technology were discussed in this paper, then the simulated experimental system and experiment process were analyzed to make a preliminary exploration on gas path electrostatic monitoring technology; lastly, the energy distribution characteristics of experimental signal was studied via wavelet analysis. The results show that, the signal induced by large particle has the characteristic of large amplitude and energy distribution on low frequency band, but the signal induced by fine particle has the characteristic of small amplitude and energy distribution on high frequency band. The result provides a reference for distinguishing abnormal particle and proves the feasibility of monitoring method based on charged particle.

Key words: aero-engine; gas path; particle; electrostatic monitoring; wavelet analysis

发动机状态监测是保证飞机安全性和可靠性的基础技术, 是使发动机具有 PHM (Prognostics and health management) 能力的技术保证。由于工作环境的恶劣, 气路部件等主要发动机机械部分的退化和零件的磨损时有发生, 对飞行安全有重要影响, 需要对这两种故障实施在线监控。传统得济技术手段如气路方程、振动和孔探等方法通常

都需故障恶化到一定程度, 引起组件几何参数发生变化时才能探测到故障的存在, 不能在故障发生的前期提供预警信息, 这难以满足状态监测实时的需要。基于静电监测的发动机气路部件状态监测技术, 通过监测气路部件发生故障或性能衰退时候的直接产物, 有效地提高了发动机的 PHM 能力, 该技术在上一世纪 90 年代由英国

收稿日期: 2007-11-14; 修订日期: 2008-04-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划) (2006AA04Z427)

作者简介: 文振华(1976-), 男, 湖北天门人, 博士生, 主要从事航空发动机状态监测与故障诊断方面研究。

Smith 公司的 Powrie H E G 和 Fisher C E 等人^[1-3]提出并展开了大量的研究,以此技术为基础研制开发的 IDMS (Ingested debris monitoring system) 和 EDMS (Exhaust debris monitoring system) 目前已经在 F35 上得到了应用^[4-5],图 1 为 F35 战斗机的气路静电监测系统的硬件配置图,美英已将该技术列为军事技术限制出口.本文主要针对颗粒静电监测技术的原理、荷电颗粒的产生、以及实验模拟这三个方面进行了初步的研究和探讨,为后续研究适合我国军机、民机的嵌入式静电监测技术机载化奠定基础.

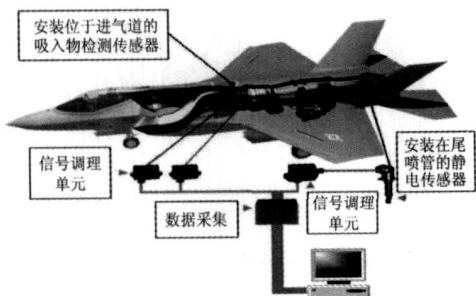


图 1 F35 的 IDMS 和 EDMS 硬件配置图

Fig. 1 IDMS/ EDMS hardware configuration for F35

1 发动机气路静电监测技术原理

1.1 尾气中荷电颗粒产生的机理

航空发动机燃烧后排放产物主要包括二氧化碳、氮氧化物、水蒸气、碳氢化合物、一氧化碳、硫氧化物和微小颗粒^[6]. 碳烟颗粒在航空发动机尾气中颗粒物含量占有很大比例,在富油或燃烧性能下降时都会产生大量的碳烟颗粒,如果所生成的碳烟颗粒不能在燃烧过程中完全氧化,就会随着尾气一起排入大气中.除正常燃烧产生的碳烟颗粒外,进气道吸入的外来物、叶片排气边局部出现瞬时高温会导致叶片烧蚀掉块、涂层剥落、叶片局部在高温环境下受周期应力导致材料丢失、以及叶片与机匣、密封圈之间的摩擦都是尾气中异常颗粒物的可能来源.

在航空发动机燃烧室中,由于燃油燃烧产生的高温使得气体分子发生化学电离反应,气体分子所具有的动能与温度成正比,当温度增高时,平均动能增大,导致超过气体电离能的分子数也急剧增加,它们可使因气体分子之间的碰撞所引起的电离作用大大增加,同时具有足够动能的电子、亚稳态原子或离子可以使被碰撞的气体分子或化合物发生离解,成离解原子、游离原子团、分子离子和离解原子的离子,这些气体化学电离产生大

量的带电离子充斥着整个气路,燃烧产生的碳烟颗粒和随机热运动的离子相互作用而荷电,颗粒和随机离子运动的离子发生碰撞时,可以接收电荷^[7],该过程可以表示为

$$q_p = \frac{d_p k T}{2e^2} \ln \left(1 + \frac{d_p \sigma \pi e^2 N t}{2 k t} \right) \quad (1)$$

式中 q_p 为颗粒的带电量; d_p 为颗粒直径; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度; e 为电子的电荷量; c 为颗粒的平均速度; N 为颗粒浓度; t 为时间.

除此之外,固体颗粒带电方式还有接触带电、分离带电、摩擦带电以及断裂带电^[8]等.在航空发动机气路工作环境中,这几种荷电方式都在一定程度上存在,如叶片与机匣的摩擦、颗粒与管壁以及颗粒之间的碰撞、材料丢失等.

1.2 静电传感器原理

基于静电感应原理的静电传感器是测试系统的最前端的元器件,其感应探极采用耐高温的镍基合金材料,探极和传感器外壳之间采用陶瓷材料进行隔离,当荷电颗粒经过静电传感器探极表面的时候,探极里面的电子会在电场力的作用下重新分布,当感应电荷产生的附加场强与外面荷电颗粒所产生的场强的合场强为零时,探极包括其表面没有电荷的定向移动,即达到静电平衡状态.当尾气中含有的荷电颗粒远离静电传感器感应探极的时候,其表面产生的感应电荷又回归为零.在荷电颗粒靠近和远离传感器感应探极的过程中,造成了感应探极内电子的定向移动,从而形成感应电流.最后将感应电流通过变换电路转化为电压信号输出.

假设颗粒在传感器探极上的感应电荷量为 $q(t)$,则输出电压的测量可由图 2 所示的电路表示.

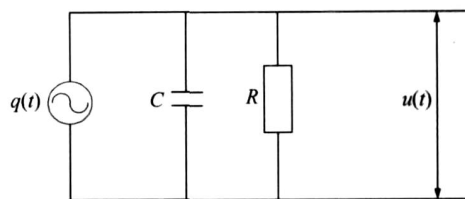


图 2 静电传感器的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of electrostatic sensor

其中 R 表示测量回路的等效电阻; C 表示测量回路的等效电容.假设电路的初始状态均为零,则输出电压的拉氏变换 $U(s)$ 和感应电荷的拉氏变换 $Q(s)$ 之间的关系为

$$U(s) = RSQ(s) / (RCS + 1) \quad (2)$$

当 $RCS \ll 1$ 时候,则测量模型等效为

$$u(t) = Rq'(t) \tag{3}$$

即所测得的电压反映了感应电荷变化情况,因此测得的电压信号的包含了气路中荷电颗粒的信息特征.

1.3 发动机气路静电监测原理

健康的航空发动机处于正常工况时候,其气路中的颗粒物主要为粒径较小的碳烟颗粒,其粒径分布集中在 5~7 nm 和 20~40 nm 两个区域^[9],且气路总体静电荷水平保持在一个相对稳定的水平,而当发动机的气路部件性能衰退(如燃烧室性能衰退)或发生故障(如叶片碰摩)时,会产生大量的异常颗粒,这些异常的颗粒粒径都比较大,通常在 40 μm 以上^[1],从式(1)可以看出,颗粒的荷电量和颗粒的粒径,温度以及颗粒的运动速度都有关系,一旦发动机的工况发生变化或者发生故障都将会使得气路中的温度、颗粒浓度或颗粒粒径分布等发生变化,从而导致气路中总体的静电荷水平发生变化.气路静电监测技术通过置于尾喷管处的静电传感器用来实时监控发动机气路静电荷水平的变化,以此来达到监测气路部件的状态的目的,提供发动机初始故障状态的早期预警信息.

2 模拟实验及结果分析

2.1 实验系统构成

为了模拟航空发动机气路工作环境,构建了如图 3 所示的发动机气路模拟系统用来进行静电监测技术实验研究,该实验系统采用燃油燃烧器、风机、不锈钢管道、压缩机等模拟发动机燃烧产生的尾气及碳烟颗粒.其中静电喷粉器来模拟气路部件性能衰退或发生故障时产生的荷电颗粒物,它由压缩机、高压电发生装置、喷枪、粉桶这四部分组成,喷枪出口处有一电晕,通过高压使得周围空气电离形成大量的空间电荷,当喷射出的颗粒物通过该区域后因吸附作用而荷电.监测系统主要由以下几部分构成:静电传感器、信号调理箱、数据采集卡、计算机构成.管道上设有多个测点,静电传感器可以根据工程实验需求进行布置,传感器离燃油燃烧器火焰喷口的距离可调节,信号传输线采用同轴电缆,且电缆外面电缆采用陶瓷管进行隔热处理,信号调理器主要完成感应电流到电压信号的转换、信号的放大、滤波等预处理工作,数据采集卡完成模数转化、数据采集,最后由计算机完成对采集的数据的分析工作.前期大量

的实验表明感应信号频率较低,因此在实验过程中所用的采样频率均为 1 kHz.

2.2 模拟实验过程及结果

实验分别在常温环境和高温环境下进行.实验内容包括常温下的不同粒径的颗粒实验,旨在检验静电传感器的有效性和比较不同粒径的颗粒产生的感应信号的差别,为是后续的高温实验做测试系统的检验工作.由于静电传感器大部分工作是在发动机处于点火的状态下工作,也就是要求监测系统的前端元器件能够高温环境下正常运行,为了模拟航空发动机气路工作的环境,采用航空煤油作为燃料,燃油燃烧器模拟发动机燃烧在图 3 所示的实验系统进行高温环境实验.高温实验主要检验传感器在高温环境中的工作性能,主要目的在于分析碳烟产生的感应信号、燃烧稳定的背景信号以及气路中混入铁粉颗粒后的信号这三者之间的特征差异.

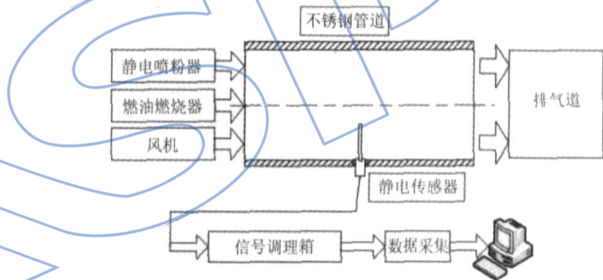


图 3 模拟实验系统

Fig. 3 Simulated experimental system

常温环境下的试验,即在不点火的情况下,启动风机后通过静电喷粉器向管道内喷带电颗粒进行实验,分别以粒径为 200 目(约 75 μm)的铁粉模拟小颗粒物,小螺钉(直径为 1 mm)模拟超大颗粒物.图 4 常温下采集的背景信号,用来作为参考,图 5 为向管内喷射两次铁粉后采集到的信号波形,图 6 为向管内喷射铁粉和螺钉混合物的实验采集的信号波形.

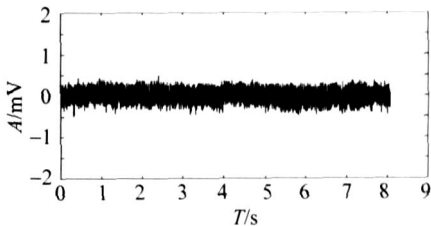


图 4 常温背景信号

Fig. 4 Background signal at room temperature

实验结果可以看出,荷电的铁粉颗粒经过传感器后,传感器输出信号幅值有明显的变化,表明

了静电传感器能够有效地监测到气路中的荷电颗粒,而且粒径大的颗粒产生的信号的幅值要高.

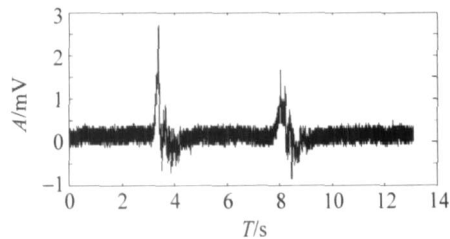


图 5 铁粉颗粒感应信号

Fig. 5 Induced signal of iron particle

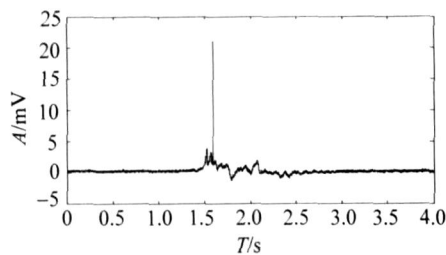


图 6 铁粉和螺钉混合物的感应信号

Fig. 6 Induced signal of mixture of iron particle and screws

高温环境下的实验历经燃烧器点火、燃烧稳定、颗粒模拟试验三个过程,用来模拟发动机的启动、以及正常工况和发生磨损故障的过程.在燃烧器点火后,由于管内碳烟颗粒浓度由零开始急剧增加,传感器输出信号的幅值的变化主要由碳烟颗粒感应产生,此段信号可以视为碳烟颗粒感应产生的信号如图 7 所示.

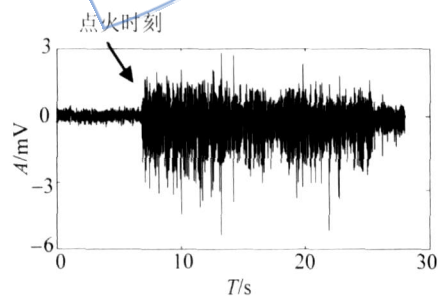


图 7 碳烟颗粒产生的感应信号

Fig. 7 Induced signal of carbon particle

大量实验表明,约经过 20 s 后燃烧趋于稳定,管内的颗粒浓度也处于一个相对稳定的水平,因而可以取稳定后的信号作为高温环境下的背景信号,如图 8 所示.随后开始向管内喷入铁粉颗粒,间断地喷射两次少量铁粉和连续喷射多量铁粉(喷设持续时间约 5 s),采集到的信号如图 9 所示.

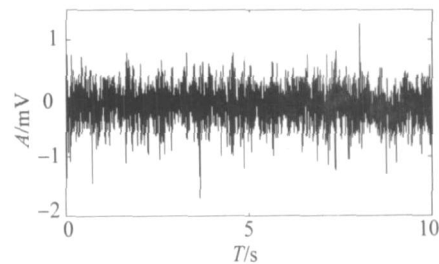


图 8 高温环境下的背景信号

Fig. 8 Background signal at high temperature

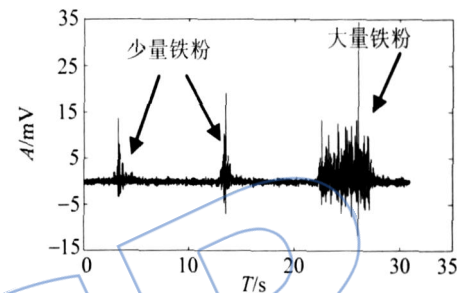


图 9 高温环境下铁粉颗粒的感应信号

Fig. 9 Induced signal of iron particle at high temperature

2.3 实验信号处理及分析

从高温实验采集的信号来看,传感器对碳烟颗粒的产生和铁粉的混入输出感应信号与高温背景信号相比,从时域波形上来看,幅值都有明显的变化,说明传感器仍然能保持正常的工作.三个信号的统计特征值如表 1 所示,通过对比可以看出铁粉颗粒产生的感应信号的幅值较大.

表 1 信号统计特征

Table 1 Statistical characteristics of signal

信号	极差	平均值绝对偏差	标准差
碳烟颗粒信号	2.96	0.37	0.52
高温背景信号	8.18	0.22	0.28
铁粉颗粒信号	46.24	0.73	1.37

鉴于监测信号具有非平稳信号的特征,特采用适合处理非平稳信号的有力工具小波分析来对信号进行分析处理,以便进一步比较背景信号、碳烟颗粒信号以及铁粉颗粒信号三者之间的特征差异.小波分析得到广泛的研究和应用^[10],关于小波的基本概念已有大量文献介绍,在这里不再赘述.本文采用小波分析的方法对信号在不同频率段的能量分布特征进行分析.

从信号滤波的角度来看,二进正交小波分解是将待分解信号通过一个高通滤波器和一个低通滤波器进行滤波,得到一组低频信号和一组高频信号,并且对低频信号继续分解直到我们想要的第 N 层,每次分解得到的低频信号和高频信号都是原信号长度的一半,两者长度之和等于原信号的长度.信号经过正交小波变换之后,各层高频系数与第 N 层的低频系数能量之和等于原始信号的能量,使得分解之和的总能量保持不变^[11].

设 Ed_i 为小波分解的第 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

$$Ed_i = \sum^n |d_k^i|^2$$

(4)

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.类似的可以求得第 N 层低频系数序列的能量.则有信号的总能量 E 为

$$E = \sum_i^N Ed_i + Ea_N$$

(5)

各层的所占的总能量的比例即为各层能量与总能量 E 的比值.

本文采用 db4 小波对碳烟颗粒产生的信号、背景信号、喷入铁粉后产生的信号进行 5 层分解,则有分解后的第 1 层至第 5 层的高频信号依次位于频段 $F_1 \sim F_5$,第 5 层的低频信号位于频段 F_6 ,具体分布如下:

- F_1 250~500 Hz;

F_2 125~250 Hz;

F_3 62.5~125 Hz;

F_4 31.25~62.5 Hz;

F_5 15.625~31.25 Hz;

F_6 0~15.625 Hz.

通过小波分解得到的各层高频系数和低频系数,根据公式(4)和公式(5)即可以得到三个信号在各层即相应的频段的能量分布情况,结果如表 2 所示.

表 2 信号能量分布表

Table 2 Energy distribution of signal

信号	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
碳烟颗粒信号	0.247	0.198	0.119	0.090	0.109	0.236
高温背景信号	0.029	0.100	0.198	0.280	0.116	0.277
铁粉颗粒信号	0.008	0.048	0.115	0.158	0.135	0.536

从表 1 中可以看出和参考背景信号想比较,碳烟颗粒产生的感应信号能量在高频部分的比重增加,而铁粉颗粒产生的信号能量则大部分集中在低频部分,低频部分占有的比重明显增加.碳烟

颗粒产生的感应信号的频率较高的主要原因在于碳烟颗粒的运动速度比较快,靠近和远离传感器的敏感区域所需要的时间短,因而产生的感应信号的频率较高.这与文献[1]中采用活动性水平即监测信号中高频成分来对应气路中烟尘等细小颗粒的含量相一致.此外从采集信号的时域波形和能量分布中可以看出采集的信号中都不同程度的含有噪声干扰信号,尤其是工频(50 Hz)干扰信号在能量分布中占有较大的比重,在将来传感器性能完善和信号调理电路的设计中需要进一步的改进.

在进行监测信号能量分布特征分析的同时,可以利用小波分解得到的各层小波系数可以对信号进行重构,由于铁粉产生的颗粒信号主要成分位于低频部分,因此利用第 5 层分解得到的低频系数进行重构,得到的重构波形如图 10 所示.

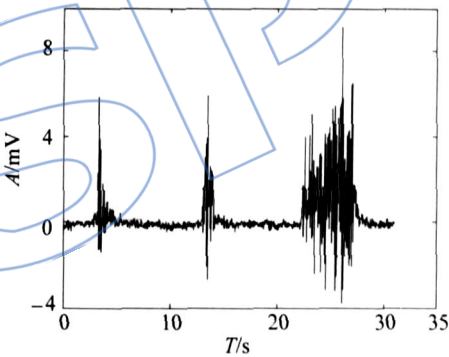


图 10 高温铁粉颗粒感应信号的重构

Fig. 10 Induced signal reconstruction of iron particle at high temperature

类似地可以对常温下铁粉产生的感应信号进行重构,如图 11 所示.从重构得到的信号可以看出信号的噪声幅度大大降低,而且和原始信号具有很好的相似性.

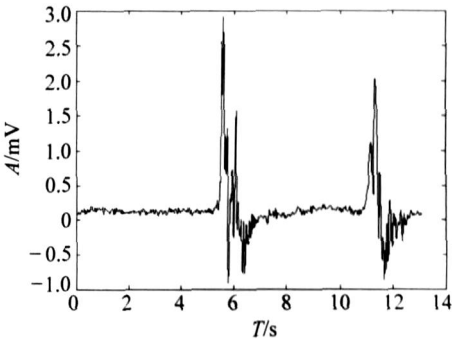


图 11 常温实验铁粉颗粒的重构信号

Fig. 11 Induced signal reconstruction of iron particle at room temperature

目前的模拟实验环境还相对简单,和发动机台架实验环境以及真实工况还有较大的差距,只能做初步的定性分析试验,从模拟实验的结果可以看出,静电传感器在低温和高温环境下均能保持有效地区分颗粒粒径的性能,粒径大的颗粒产生的信号幅值要大且信号能量大部分集中在低频部分,小颗粒产生的感应信号幅值较小但信号能量分布偏重于高频部分.可以类比到发动机的工况,如燃烧性能衰退或富油等原因,气路中碳烟颗粒的浓度的增加将导致产生的感应信号幅值发生较小的变化且高频成分含量增多,而当发生磨损故障时候,产生的感应信号的幅值变化很大而低频成分的含量增多.

3 结 论

1) 本文针对气路颗粒的静电监测技术做了初步的探讨和模拟试验研究,论述了发动机的尾气中荷电颗粒的产生机理、静电传感器原理以及静电监测技术的基本原理,并进行了定性的模拟实验.

2) 从实验的结果可以看出,粒径大的颗粒产生的感应信号幅值大且能量主要集中在低频部分,而细小颗粒产生信号的幅值较小而能量分布集中在高频部分,结合监测信号的时域特性和能量分布特征能够有效地区分气路中的异常颗粒,表明了基于颗粒静电的监测方法的可行性.

3) 监测信号分析处理的结果表明小波分析的方法能够有效地对气路路静电监测信号进行降噪和能量分布特征提取.同时实验结果对后续的传感器性能改善、信号调理电路的设计具有指导意义.

参考文献:

- [1] Powrie H E G, Mcnicholas K. Gas path condition monitoring during accelerated mission testing of a demonstrator engine[C]// The 33rd AIAA/ ASME / SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Seattle, WA, USA: AIAA-1997-2904
- [2] Powrie H E G, Fisher C E. Engine health monitoring: towards total prognostics[C]// IEEE Aerospace Applications Conference Proceedings. CA, USA: IEEE, 1999 (3):11-20.
- [3] Fisher C E. Gas path debris monitoring-A 21st century PHM tool[C]// IEEE Aerospace Conference Proceedings. Montana, USA: IEEE, 2000, 6:441-448.
- [4] Powrie H, Novis A. Gas path debris monitoring for F-35 joint strike fighter propulsion system PHM[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana, USA: IEEE, 2006(2):1-8.
- [5] Novis A, Powrie H. PHM sensor implementation in the real world-a status report[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana, USA: IEEE, 2006(3):1-9.
- [6] 严传俊, 范玮. 燃烧学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2005.
YAN Chuanjun, FAN Wei. Combustion theory[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. (in Chinese)
- [7] 任俊, 沈健, 卢寿慈. 颗粒分散科学与技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2005:25-28.
REN Jun, SHEN Jian, LU Shouci. Particle dispersion science and technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:25-28. (in Chinese)
- [8] 张宝铭, 林文荻. 静电防护技术手册[M]. 北京:电子工业出版社, 2000:38-41.
ZHANG Baoming, LIN Wendi. Technical handbook for electrostatic discharge protection [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2000:38-41. (in Chinese)
- [9] Sorokin A, Arnold F. Electrically charged small soot particles in the exhaust of an aircraft gas-turbine engine combustor: comparison of model and experiment[J]. Atmospheric Environment, 2004, (38): 2611-2618.
- [10] 徐长发, 李国宽. 实用小波分析方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2005.
XU Changfa, LI Guokuan. Practical wavelet analysis method[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2005. (in Chinese)
- [11] 牛培峰, 张君. 小波分析技术在汽轮机故障诊断中的应用[J]. 动力工程, 2007, 27(1): 76-80.
NIU Peifeng, ZHANG Jun. Application of the wavelet transform technique in turbo-generator fault diagnosis[J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(1): 76-80. (in Chinese)