

# 基于 EEMD-HT 的飞行数据小突变信号检测\*

王帮峰, 林剑祥, 芦吉云

(南京航空航天大学民航学院 南京, 210016)

**摘要** 针对快速存取记录器(quick access recorder,简称 QAR)所记录的飞行数据小突变信号监测问题,提出一种总体经验模式分解(ensemble empirical mode decomposition,简称 EEMD)结合希尔伯特变换(Hilbert transform,简称 HT)的时频分析方法。介绍了 EEMD 的基本原理及其求解步骤,在评估实际 QAR 数据序列的平稳性的基础上,对存在小突变的飞行数据序列进行求解分析。结果表明 EEMD 可有效抑制模态混叠现象,基于 EEMD 求解结果的希尔伯特谱与瞬时能量密度水平可检测出飞行数据中的小突变信号,证实了 EEMD 结合 HT 对 QAR 数据中小突变信号检测的有效性。

**关键词** 飞行数据; 总体经验模式; 平稳性评估; 小突变信号检测

**中图分类号** TP301

## 引言

快速存取记录器是被飞机广泛采用的数据记录装置,记载了丰富的飞行数据信息。因其记录数据能够真实反映飞机的各种状态,在飞机飞行品质监控、发动机状态检测、诊断飞机系统故障与评价飞行员操作等方面都起到了一定参考作用。因此近些年对 QAR 数据的研究也越来越多。文献[1]与[2]分别基于小波与奇异值分解对飞行数据进行去噪处理,文献[3]提出了一种飞行数据异常值检测方法。

QAR 数据是按照时间顺序采样得到的,因而其属于典型的时间序列信号。本文试图从时频角度对 QAR 数据信号进行分析。通常情况下飞机飞行状态是一直变化的,故 QAR 记录下来的数据信号多表现为非线性、非平稳特征。对于这类信号传统的时频分析方法(如短时傅里叶变换),由于窗口固定不适合分析多尺度和突变信号,魏格纳分布存在严重交叉干扰项,而小波变换结果依赖小波基的选择,自适应不佳<sup>[4]</sup>。希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform)是由 Huang 等人于 1998 年提出的一种主要用于分析非线性、非平稳信号分析的方法<sup>[5]</sup>,其核心是经验模式分解(empirical mode decomposi-

tion,简称 EMD)。EMD 对信号的分解是自适应的,并且理论上能精确给出信号中频率随时间变化的规律,避免虚假频率等冗余现象。其已经被有效地应用到机械、交通、海洋、医学及电力等领域<sup>[5-8]</sup>。另外针对 EMD 中模态混叠问题,Wu 与 Huang 提出了 EEMD 方法<sup>[9]</sup>,能有效抑制模态混叠,还原信号本质<sup>[4,9-10]</sup>。基于此本文将采用 EEMD 结合 HT 对 QAR 数据进行分析。

## 1 EEMD-HT 理论

### 1.1 EMD 与 EEMD 基本原理

EMD 是根据信号的局部极值特征将信号分解成有限个本征模态函数(intrinsic mode function,简称 IMF)与一个余项之和。每个 IMF 都满足如下两个条件:a. 整个信号范围内过零点与极值点相差最大于 1;b. 信号上任意一点,由局部极大值与局部极小值分别确定的包络线均值为 0。

对于任意实信号  $s(t)$ ,其 EMD 最终可表示为

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (1)$$

其中: $c_i(i=1,2,\dots,n)$ 为 IMF 分量; $r_n$ 为余项。具

\* 国家自然科学基金资助项目(51075207);江苏省博士后基金资助项目(1001014C);南京航空航天大学引进人才基金资助项目(YAH10013)

收稿日期:2011-07-23;修改稿收到日期:2011-11-02

体分解过程可参考文献[4]。

针对模态混叠问题, Wu 和 Huang 提出了一种噪声辅助数据分析方法—EEMD<sup>[9]</sup>。这种方法是在原信号中加入白噪声, 补充信号的一些尺度缺失, 使信号在不同尺度上具有连续性, 减小了模态混叠的程度。在进行多次 EMD, 由于所添加的不同白噪声之间不相关, 因此对所有 EMD 结果相应 IMF 求整体平均后, 人为添加的噪声将被抵消掉。与 EMD 相比, EEMD 能够消除模态混叠, 使得 IMF 的物理意义更明确<sup>[4]</sup>。其具体分解步骤如下。

1) 指定进行 EMD 的总次数  $N$  (一般可设为 100) 与所加入白噪声幅值系数  $k$  (取为 0.01~0.5 倍原信号的标准方差<sup>[4]</sup>)。另外, 因为最后要以各次 EMD 结果求平均作为最终 EEMD 结果, 所以要指定 EMD 总 IMF 数  $N_c$  与获得各个 IMF 进行筛选的次数。

2) 向原信号  $s(t)$  中加入幅值系数为  $k$  的白噪声得信号  $sw(t)$ , 即  $sw(t) = s(t) + k \cdot n(t)$ 。并对  $sw(t)$  进行 EMD, 得到  $N_c$  个 IMF, 依次记为  $c_{j,i}$  ( $i=1, 2, \dots, N_c$ )。重复这个过程  $N-1$  次, 得到  $c_{j,i}$  ( $j=2, 3, \dots, N; i=1, 2, \dots, N_c$ )。

3) 对所得结果求平均

$$\bar{c}_i = \sum_{j=1}^N c_{j,i} / N \quad (2)$$

其中:  $i=1, 2, \dots, N_c$ , 作为 EEMD 的各个 IMF 分量, 并记为  $ac_i$  ( $i=1, 2, \dots, N_c$ )。

从以上 EEMD 过程不难看出, 所得的 IMF 分量并不一定是真实的 IMF 分量, 因此需要对 EEMD 所得结果进行后处理<sup>[9]</sup>。具体过程如下。

对 EEMD 结果的  $ac_1$  进行 EMD, 所得结果第 1 个 IMF 分量  $ec_1$  作为最终 EEMD 的第 1 个 IMF 分量, 而把剩下部分  $res_1$  加到  $ac_2$  上, 并对其进行 EMD。依此类推有如下关系式

$$\begin{cases} ac_1 \xrightarrow{\text{EMD}} ec_1 + res_1 \\ ac_2 + res_1 \xrightarrow{\text{EMD}} ec_2 + res_2 \\ \vdots \\ ac_{N_c} + res_{N_c-1} \xrightarrow{\text{EMD}} ec_{N_c} + res_{N_c} \end{cases} \quad (3)$$

最终 EEMD 结果可以表示为

$$s(t) = \sum_{i=1}^{N_c} ec_i + res_{N_c} \quad (4)$$

### 1.2 希尔伯特谱及其引申谱图

在获得 IMF 分量后, 对于任意一个 IMF 分量  $c(t)$ , 其 HT 结果  $H[c(t)]$  可与原分量组成解析信号

$$z(t) = c(t) + jH[c(t)] = a(t)e^{j\Phi(t)} \quad (5)$$

记  $h(t) = H[c(t)]$ , 则其中

$$a(t) = \sqrt{s^2(t) + h^2(t)} \quad (6)$$

$$\Phi(t) = \arctan[h(t)/c(t)] \quad (7)$$

定义瞬时角频率为

$$\omega(t) = d\Phi(t)/dt \quad (8)$$

省去余项  $r_n$ , 原信号可以表示为

$$s(t) = (\text{real}) \sum_{j=1}^n a_j(t) \exp\left(j \int \omega_j(t) dt\right) \quad (9)$$

式(9)中频率  $\omega_j(t)$  和幅值  $a_j(t)$  都是时间的函数, 可以用三维图表达幅值、频率和时间之间的关系, 或者把振幅用灰度的形式显示在频率-时间平面上就得到希尔伯特谱, 记作  $H(\omega, t)$ 。

把  $H(\omega, t)$  对时间积分, 就得到希尔伯特边际谱

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (10)$$

作为希尔伯特边际谱的附加结果, 可以得到瞬时能量密度水平

$$IE(t) = \int_{\omega} H^2(\omega, t) d\omega \quad (11)$$

进一步还可以得到平稳度为

$$DS(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{T \cdot H(\omega, t)}{h(\omega)}\right)^2 dt \quad (12)$$

## 2 QAR 数据的平稳性评估

选取某 B767 飞机的发动机排气温度 (exhaust gas temperature, 简称 EGT) 进行分析, 以气压高度 (pressure altitude, 简称 ALT) 作为飞行起落参考, EGT 与 ALT 的记录速率均为 1 个数据点/s。图 1 为 EGT 与 ALT 曲线, 由 ALT 曲线知图 1 的飞行数据 EGT 包括了起飞、巡航、降落整个飞行过程。本文重点关注巡航过程的信号突变问题, 因此选取了图 1 中 EGT 序列 2 201~4 800 s 之间的数据, 记为序列  $a$ 。从另一个航班同是巡航过程, 选取同样长度数据序列作为另一个分析序列, 记为序列  $b$ 。

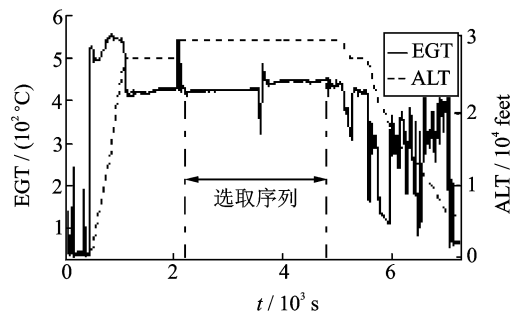


图 1 飞机一个飞行起落曲线

图2为所选取的序列 $a$ 与序列 $b$ 曲线,为方便描述指定它们的第一个数据点为时间 $0\text{ s}$ 。不难看出序列 $a$ 在 $1\ 400\text{ s}$ 左右有一个比较大的突变,而序列 $b$ 则相对较平稳,在 $240$ 与 $2\ 400\text{ s}$ 附近有两个小突变。图3给出了对两数据序列根据公式(12)分别求解 $DS(\omega)$ ,并对所求结果进行归一化的曲线。从中可以看出,在 $0.1\text{ Hz}$ 以下序列 $a$ 的 $DS(\omega)$ 有一个小凸起,与序列 $a$ 中的较大突变情况一致;序列 $b$ 则相对比较平稳。

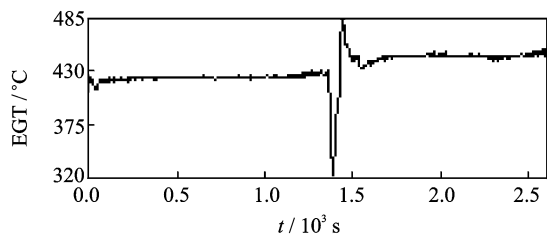
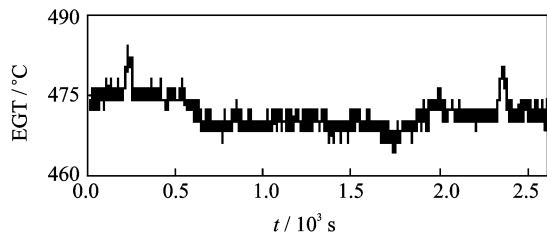
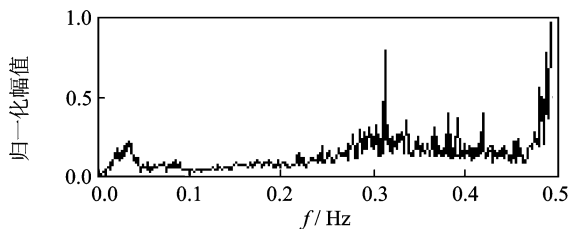
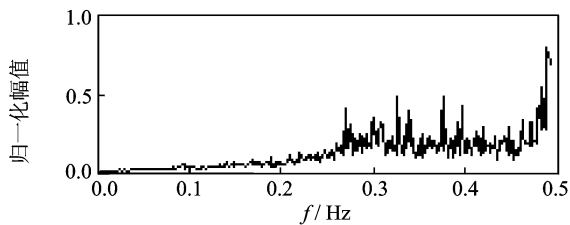
(a) 序列 $a$ 的原始数据曲线(b) 序列 $b$ 的原始数据曲线

图2 所选取的两组分析序列

(a) 序列 $a$ 数据归一化曲线(b) 序列 $b$ 数据归一化曲线图3 两组序列的 $DS(\omega)$ 归一化曲线

### 3 QAR 数据的小突变检测

对于序列 $b$ 中的小突变信号,采用EEMD-HT对其进行分析。图4和图5分别是对序列 $b$ 进行EEMD的结果与相对应的各IMF的边际谱。其中参数选择如下:EMD的总次数 $N=100$ 、所加入白

噪声幅值系数 $k=0.2$ 倍原信号的标准方差、EMD总IMF数 $N_c=10$ (同文献[9]取法,取为 $\text{int}(\log_2(2600)-1)=10$ ,其中 $\text{int}$ 表示取整)和获得各IMF进行筛选的次数为 $10$ 。

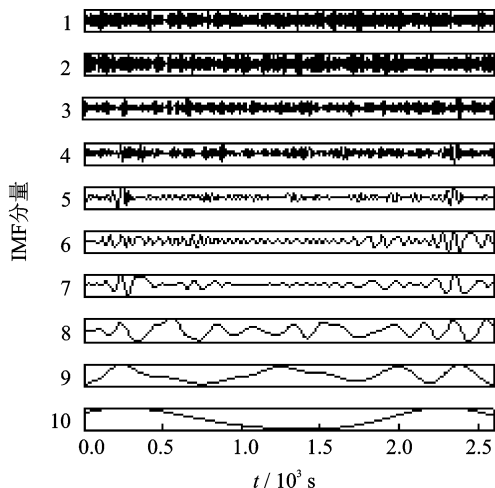
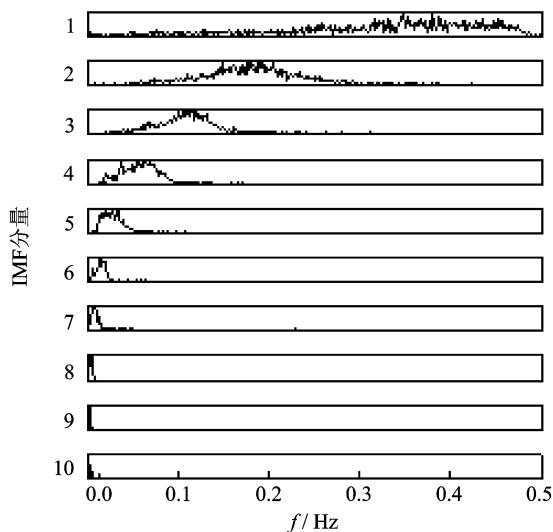
图4 序列 $b$ 的EEMD所得各IMF

图5 各IMF的边际谱

从各IMF分量边际谱可以看出各IMF分量的主要频带显由高到低分布,且混叠部分较少,而其中混叠部分主要是进行后处理导致的,从而证明了EEMD对抗模态混叠是有效的。另外从IMF1的边际谱可以看出IMF1主要是高频成分,而且其包含整个频率范围的频率,属于噪声部分。IMF2则反映了信号序列本身正常的数值波动。而从各IMF的幅值变化可以看出,IMF3~IMF7都包含有较大突变的信息。而IMF8~IMF10没有明显包含突变信息,这几个IMF分量的取得跟 $N_c$ 取值相关, $N_c$ 取较大值保证了序列EEMD能得到各IMF

分量,但同时可能导致多余分量的产生。为突出突变信息,故选择 IMF3~IMF7 作为有用 IMF 分量进行分析(求解希尔伯特谱与瞬时能量密度水平)。

图 6 给出了序列  $b$  的希尔伯特谱(IMF3~IMF7),从中可以看出在 240 s 与 2 400 s 附近处其瞬时幅值较大,与原序列相应时刻位置的小突变相对应。另外从图 7 瞬时能量密度水平(IMF3~IMF7)可以更清楚看出这一结果,从而证明了 EEMD-HT 分析的有效性。

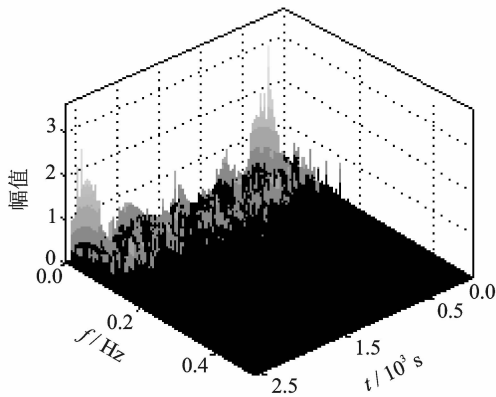


图 6 序列  $b$  的希尔伯特谱

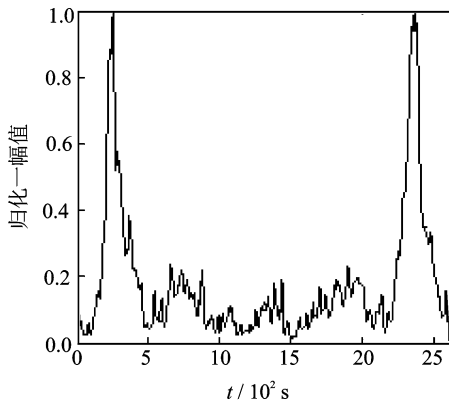


图 7 序列  $b$  的瞬时能量密度水平

## 4 结束语

本文利用 QAR 记录的 EGT 数据序列,研究 EEMD 结合 HT 时频分析方法用于小突变信号检测的求解方法。通过合理设置相关参数对飞行数据序列进行 EEMD,得到的各个 IMF 分量。对各分量 IMF 的边际谱进行分析得各 IMF 分量的重叠频率部分较少,分解后的 IMF 分量信号可以更真实地反映的原始信号。在所得的 IMF 分量中,通过分析选取包含突变信息的分量求解希尔伯特谱与瞬时能量密度水平,可以凸显出小突变信号的在原数据序列

中的位置。采用 EEMD-HT 分析可有效检测出 QAR 数据中的小突变信号,对于其他非平稳信号处理具有一定的参考价值。由于 EEMD 是总体效果,求解的 IMF 分量可能不是真实的 IMF,需要做进一步探讨。

## 参 考 文 献

- [1] 赵兵,倪世宏.一种基于小波分析的飞行数据预处理方法[J].弹箭与制导学报,2005,25(3):457-459.  
Zhao Bing, Ni Shihong. A method of pretreatment of flight data based on wavelet analysis[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25 (3): 457-459. (in Chinese)
- [2] 吕永乐,郎荣玲.基于奇异值分解的飞行数据降噪方法[J].计算机工程,2010,38(3):260-262.  
Lü Yongle, Lang Rongling. Noise reduction method for flight data based on singular value decomposition [J]. Computer Engineering, 2010, 38(3): 260-262. (in Chinese)
- [3] 韩吴,赵清洲.一种基于阴性选择算法的飞行数据异常值检测方法[J].航空计算技术,2010,40(4):53-55.  
Han Min, Zhao Qingzhou. A detection method of abnormal flight data based on negative selection [J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40 (4): 53-55. (in Chinese)
- [4] 窦东阳,赵英凯.集合经验模式分解在旋转机械故障诊断中的应用[J].农业工程学报,2010,26(2):190-196.  
Dou Dongyang, Zhao Yingkai. Application of ensemble empirical mode decomposition in failure analysis of rotating machinery [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 190-196. (in Chinese)
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society, 1998, 454(1971): 903-995.
- [6] Rilling G, Flandrin P, Goncalves P, et al. On empirical mode decomposition and its algorithms[C]//IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing NSIP-03, Grado (I). Italy: IEEE, 2003: 9-11.
- [7] 胡劲松,杨世锡,吴昭同,等.基于EMD和HT的旋转机械振动信号时频分析[J].振动、测试与诊断,2004, 24(2):106-110.  
Hu Jingsong, Yang Shixi, Wu Zhaotong, et al. Time-frequency analysis of vibration signals in rotating ma-

chinery[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2004, 24(2): 106-110. (in Chinese)

[8] 钟佑明, 秦树人. 希尔伯特-黄变换的统一理论依据研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(3): 40-43.

Zhong Youming, Qin Shuren. Research on the uniform theoretical basis for Hilbert-Huang transform (HHT)[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3): 40-43. (in Chinese)

[9] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.

[10] 陈隽, 李想. 运用总体经验模态分解的疲劳信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1): 15-19.

Chen Jun, Li Xiang. Application of ensemble empirical mode decomposition to noise reduction of fatigue signal [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1): 15-19. (in Chinese)



**第一作者简介:**王帮峰,男,1970年1月生,教授、博士生导师。主要研究方向为飞行器故障诊断技术、航空器适航技术、智能结构以及信号处理技术等。曾发表《基于应力波检测的输油管道泄漏定位监测系统》(《仪器仪表学报》2007年第28卷第6期)等论文。

E-mail: bfwang@nuaa.edu.cn

## 《振动、测试与诊断》2011年影响因子

根据中国科学技术信息研究所《2012年版中国科技期刊引证报告(核心版)》最新公布,《振动、测试与诊断》2011年影响因子为0.626,在29种航空、航天科学技术类期刊中排名第一。在收录的1998种中国科技核心期刊中(不含港澳台地区),综合评价排名为244名。在此,编辑部衷心感谢广大读者、作者和审稿人对本刊的一贯支持与关怀!

表1 2011年航空、航天科学技术类期刊影响因子

刊名	影响因子		刊名	影响因子	
	数值	排名		数值	排名
振动、测试与诊断	0.626	1	中国空间科学技术	0.281	15
航空学报	0.604	2	空气动力学学报	0.279	16
宇航学报	0.592	3	航天返回与遥感	0.278	17
CHINESE JOURNAL OF AERONAUTICS	0.543	4	航天器工程	0.264	18
计算机测量与控制	0.438	5	航空制造技术	0.261	19
电光与控制	0.435	6	飞行力学	0.255	20
南京航空航天大学学报	0.381	7	强度与环境	0.250	21
航空动力学报	0.351	8	测控技术	0.248	22
推进技术	0.315	9	航空计算技术	0.206	23
北京航空航天大学学报	0.310	10	导弹与航天运载技术	0.175	24
固体火箭技术	0.300	11	南昌航空大学学报自然科学版	0.132	25
航天控制	0.298	12	中国民航大学学报	0.130	26
航天器环境工程	0.295	13	飞行器测控学报	0.117	27
实验流体力学	0.283	14	航空精密制造技术	0.109	28
			宇航计测技术	0.104	29

(数据摘自中国科学技术信息研究所《2012年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,科学技术文献出版社)