飞行器助推段振动环境分析

袁宏杰 唐 环 姜同敏

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100083)

摘 要: 对飞行器助推段非平稳随机振动信号采用局部平稳模型进行分析,把此段非平稳随机信号的时变谱分解成2个独立的过程:决定时变均方值的确定性过程和决定频率特性的平稳随机过程. 利用小波分析对确定性信号和随机信号进行分离,用信号的全部带宽计算非平稳信号的时变均方值,缩短了平均时间,减少了偏置误差;用信号的整个持续时间确定非平稳信号的谱特性,提高了频率分辨率,减少了随机误差. 对分离出的平稳随机振动自功率谱密度进行了归纳,得到了飞行器助推段的振动环境.

关 键 词: 随机振动; 小波变换; 非平稳

中图分类号: V 217

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0760-04

Analysis of nonstationary random vibration data during lift-off

Yuan Hongjie Tang Huan Jiang Tongmin

(Dept. of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The locally stationary parametric model was established to analyze the nonstationary random vibration environment of aircraft during lift-off. The computation of a time-varying spectrum was decomposed into two separate operations, one to define the time-varying mean square value of the signal, and the other to define the spectral properties of the signal. The wavelet transforms were used to separate the nonstationary vibration signal into the deterministic signal and random signal. Specifically, the time-varying mean square value of the signal was computed using the entire signal bandwidth, and the averaging time could be made short without causing a large bias error. Conversely, the basic spectra character of the signal was computed using the entire signal duration, and the frequency resolution bandwidth could be made small without causing a large random error. The vibration environment of aircraft during lift-off was obtained by concluding the auto-spectra of stationary random vibration.

Key words: random vibration; wavelet transforms; nonstationary

振动环境是飞行器飞行中最重要的环境因素之一. 飞行器在飞行过程中需经历多种振动环境,如助推时非平稳的随机振动及自由飞时近似平稳的随机振动等. 助推时的非平稳随机振动量级大,是飞行器自由飞时量级的2~3倍,是导致飞行故障较多的环境因素之一. 由于其持续仅几秒钟,而且只能获得极少数样本,根据个别样本记录处理非平稳随机振动,至今还没有成熟的方法. 文献[1]对大力神-Ⅳ号仪器舱整流罩助推段振动数据采用滑动平均的方法,找出最佳平均时间,使随机误差和偏置误差最小,在找出的平均时间段内按处理平稳信号的方法处理. 文献[2]建议按平稳随机信号的多帧平均处理方法计算自功率谱密度,再将结果乘以2(或加3 dB)修正后作为助推段的自功率谱密度.

上述方法都在一定范围内把非平稳的数据近似为平稳的数据,不可避免地带来较大误差,也不能得到助推段振动的本质特征. 本文对飞行器实测的助推段振动数据,采用数学建模的方法,应用局部平稳模型进行分析,得到该非平稳随机振动

收稿日期: 2005-08-01

作者简介: 袁宏杰(1970-),男,河北阜城人,高级工程师,yuanhongjie@buaa.edu.cn.

信号的时变数字特征,有效地避免了把非平稳的数据近似为平稳数据所带来的一系列问题.

1　助推段非平稳振动分析

对于非平稳随机振动信号,其时变的自功率谱密度 $G_{xx}(f,t)$ 可用式(1)计算:

$$G_{xx}(f,t)=\frac{1}{BT}\int_{-T/2}^{+T/2}x^2(t,B,f)\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

其中,f 为窄带滤波器的中心频率;B 为窄带滤波器带宽;T 为平均时间;$x^2(t,B,f)$ 为通过中心频率为 f、带宽为 B 的窄带滤波器后信号的瞬时平方值.

在非平稳随机振动数据的时变谱分析中,平均时间 T 及带通滤波器的带宽 B 是可选的. 平均时间 T 越长,随机误差越小,偏置误差越大;平均时间 T 越短,随机误差越大,而偏置误差越小. 同样长度的随机序列,带宽 B 越大,分辨率越低,随机误差越小;带宽 B 越小,分辨率越高,随机误差越大. 文献[1]对大力神-Ⅳ号的助推段振动采用了滑动平均的方法,应用多项式对时变的均方值曲线进行拟合,综合考虑了随机误差和偏置误差,并给出了最佳平均时间,然后在给出平均时间的数据段内按平稳随机信号的多帧平均处理方法计算自功率谱密度. 这种把非平稳信号当作平稳信号处理的方法除引起偏置误差和随机误差外,还引起频率分辨率的偏置误差[3].

某飞行器助推段振动的波形如图 1 所示,其振动量值大,持续时间短,可提供的样本少,为分析其时变特征带来了困难. 针对其特点,采用数学建模的处理方法来克服滑动平均的缺陷.

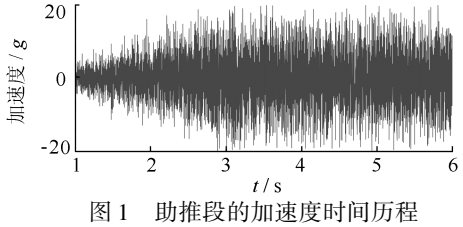

图 1　助推段的加速度时间历程

设 $y(t)$ 为飞行器助推时非平稳随机振动的样本函数,则其自相关函数 $R(\tau,t)$ 为时变的函数,可表示为

$$R(\tau,t)=E\left(y\left(t-\frac{\tau}{2}\right)y\left(t+\frac{\tau}{2}\right)\right) \tag{2}$$

对该样本函数 $y(t)$ 的自相关函数计算,发现其自相关函数可近似分解为 2 部分的乘积:

$$R(\tau,t)=R_1(t)R_2(\tau) \tag{3}$$

公式(3)所定义的随机振动为局部平稳的随机振动[4],其自功率谱密度函数为

$$G(f,t)=\int_0^{\infty}R_1(t)R_2(\tau)\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f\tau}\,\mathrm{d}\tau=$$

$$R_1(t)\int_0^{\infty}R_2(\tau)\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f\tau}\,\mathrm{d}\tau=R_1(t)G(f) \tag{4}$$

对于平稳的随机过程,$R_1(t)$ 为常数.

对于局部平稳的随机过程中平稳的自功率谱密度 $G(f)$ 归一化处理,使得

$$\int_0^{\infty}G(f)\,\mathrm{d}f=1 \tag{5}$$

则得到如式(6)所示时变的自功率谱:

$$G(f,t)=a^2(t)G(f) \tag{6}$$

其中 $a^2(t)$ 为信号的时变均方值函数.

则该非平稳的随机信号 $y(t)$ 可看作确定性信号 $x(t)$ 与平稳的随机信号 $u(t)$ 之积:

$$y(t)=x(t)u(t) \tag{7}$$

其中,确定性信号 $x(t)$ 描述了非平稳随机振动均方根值的变化,表示非平稳随机振动的量级随时间变化的规律;平稳的随机信号 $u(t)$ 描述了非平稳随机振动的频率成分.

2　确定性信号与随机信号分离

2.1　小波变换

信号 $s(t)$ 的小波变换定义为

$$W(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{\infty}s(t)\psi^*(t)\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{8}$$

其中,$\psi^*(t)$ 为 $\psi(t)$ 的复共轭,$\psi(t)$ 为小波基或母小波;a,b 为时间的伸缩和平移;信号 $s(t)\in L^2(\mathbf{R})$ 在小波基 $\psi(t)$ 上的分解,必须满足可容许性条件:

$$\int\frac{\psi(\omega)}{|\omega|}\mathrm{d}\omega<\infty \tag{9}$$

其中 $\psi(\omega)$ 是 $\psi(t)$ 的傅里叶变换.

小波变换由信号 $s(t)$ 在函数族 $\psi((t-b)/a)$ 上展开,该函数族是由小波基在时域上平移 b 且伸缩 a 产生的. 因此,小波变换好像一组短时傅里叶变换,在不同的频率上加不同的窗. 与短时傅里叶变换不同的是,其窗函数的宽度是可变的,它在高频时使用短窗口,而在低频时使用宽窗口,它充分体现了恒相对带宽频率分析和自适应分辨分析的思想.

2.2　多分辨分析

设 h_k 为信号多分辨分析所需要的低通滤波器的脉冲响应,g_k 为信号多分辨分析所需要的高通滤波器的脉冲响应,则多分辨分析的小波函数 $\psi(t)$ 和尺度函数 $\varphi(t)$ 满足双尺度的差分方程:

$$\left.\begin{aligned}\frac{1}{\sqrt{2}}\varphi\left(\frac{t}{2}\right)&=\sum_k h_k\varphi(t-k)\\ \frac{1}{\sqrt{2}}\psi\left(\frac{t}{2}\right)&=\sum_k g_k\psi(t-k)\end{aligned}\right\}\tag{10}$$

信号 $s(t)$ 可表示为

$$s(t)=\sum_{k\in\mathbf{Z}}\langle s,\varphi_{j,k}\rangle\varphi_{j,k}+\sum_{j=1}^{J}\sum_{k\in\mathbf{Z}}\langle s,\psi_{j,k}\rangle\psi_{j,k}=\sum_{k\in\mathbf{Z}}c_k^j\varphi_{j,k}+\sum_{j=1}^{J}\sum_{k\in\mathbf{Z}}d_k^j\psi_{j,k}=V^J+\sum_{j=1}^{J}W^j\tag{11}$$

其中，V^J 为信号 $s(t)$ 的近似信号；W^j 为信号 $s(t)$ 的细节信号；c_k^j 为信号 $s(t)$ 的近似信号系数；d_k^j 为信号 $s(t)$ 的细节信号系数.

多分辨分析对信号的每一层分解相当于使信号通过一低通滤波器和带通滤波器，把信号分解为低频部分和高频部分. 低通滤波器的特性由小波函数 $\psi(t)$ 确定，带通滤波器的特性由尺度函数 $\varphi(t)$ 确定. 当需要对信号继续进行分析时，下一层的小波函数和尺度函数在时域上伸展为原来的2倍，在频域上小波函数的带宽压缩为原来的一半，尺度函数的中心频带和带宽都为原来的一半，对低频部分再进行类似的分解. 因此多分辨分析是一种时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法.

如果信号中包含频率分量较低的确定性信号和频率分量较高的随机信号，由于信号的低频分量代表着信号的发展趋势，在多分辨分析中，随着分解层次的增加，信号的高频分量会逐渐减小，信号的低频分量越来越明显，也就是信号的趋势越来越明显.

如果确定性信号包含的噪声频率或频率范围不可预知，可利用小波变换的模极大值特性，模极大值代表了重要信号的特征. 在实际应用中可以对细节信号设立一个门限值，保留大于门限值的极值(模极大值)，而将小于门限值的毛刺置零. 然后进行重构，就可以获得较好的除去噪声的确定性信号.

2.3 信号分离

本次分析的数据来源于某次飞行器助推时实测的非平稳数据，其原始时域波形见图1，以下简述用小波分析实现确定性振动信号与随机振动信号的分离方法：

1) 建立如公式(6)的数学模型，对测量的数据进行一定的数学变换；

2) 采用Daubechies小波函数将信号分解到不同的频带上. 在小波分解中，若将信号中的最高频率成分看作1，则第1层分解相当于把频带宽为1的原始信号分解为一个低频信号 a_1(频率范围0~0.5)和一个高频信号 d_1(频率范围0.5~1)；接着再把低频信号 a_1 分解为 a_2 和 d_2，依次类推；再分解到第6层可得到确定性信号；

3) 采用小波重建函数对分解的各低频部分和高频部分进行重构，$d_1\sim d_6$ 为重构后各层的随机信号，如图2所示；对 $d_1\sim d_6$ 进行合成可得到平稳的随机信号 $u(t)$，如图3所示；a_6 为重构后的确定性信号 $x(t)$，如图4所示.

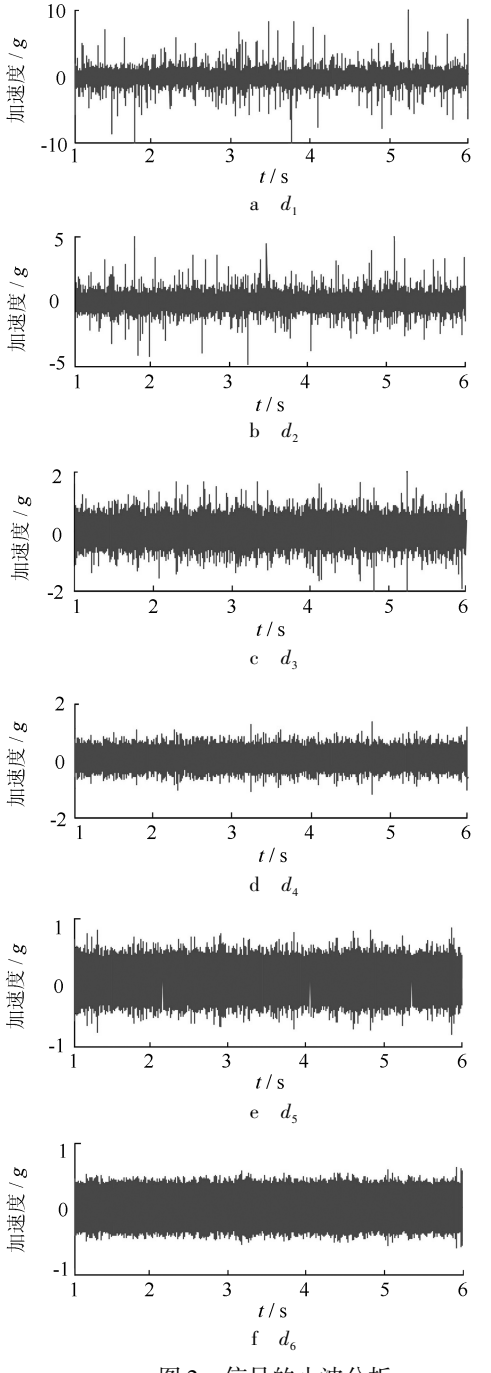

图2 信号的小波分析

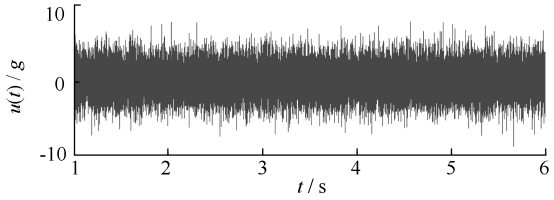

图 3　合成后的随机信号

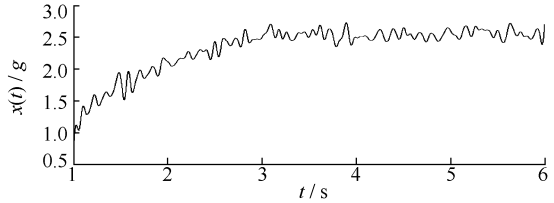

图 4　分离后的确定性信号

3　助推段振动环境条件归纳

飞行器助推段不随飞行的任务和状态而变化. 对同一测量点同一方向测量得到的振动数据进行小波分离和重构,获得平稳的随机信号;计算其自功率谱密度,将多个样本的自功率谱密度画在同一张图上,按有关标准进行归纳[5-6];对归纳出的自功率谱密度,在频域上进行归一化处理,使其均方根值为1,得到助推段的频率特征. 图5中较为规则的加黑粗线为归纳的某飞行器某点助推时的自功率谱密度,4 条不规则的线为不同飞行器同一方向的自功率谱密度.

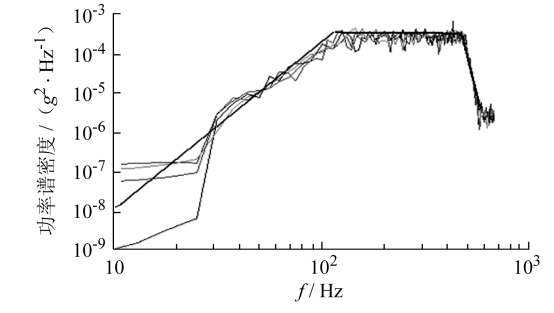

图 5　助推段归一化的频率特征

4　结 束 语

对飞行器助推段的非平稳随机振动,采用局部平稳模型,较滑动平均等方法更有效地利用了数据信息. 由于小波变换的多层次分解特性,利用其对助推段的振动数据进行分析,得到其时不变的频率特征自功率谱密度的谱型和时变的加速度均方值,最大限度地减少了随机误差和偏置误差.

参考文献 (References)

[1] Piersol A G. Optimum data analysis procedures for TITAN IV and space shuttle payload acoustic measurements during lift-off [R]. NASA-CR-190479,1991

[2] 黄怀德. 振动工程[M]. 北京:宇航出版社,1993:152-153
Huang Huaide. The vibration engineering[M]. Beijing: China Astronautics Publishing House,1993:152-153(in Chinese)

[3] Himelblau H, Piersol A G. Handbook for dynamic data acquisition and analysis[M]. Oxford: Institute of Environmental Sciences,1993:291

[4] 贝达特 J S,皮尔索 A G. 随机数据分析方法[M]. 凌福根译. 北京:国防工业出版社,1976:236
Bedate J S, Piersol A G. The analysis methods of random data [M]. Translated by Ling Fugen. Beijing: National Defense Press,1976:236(in Chinese)

[5] HB/Z87-84,飞机飞行振动环境测量数据的归纳方法[S]
HB/Z87-84,The inductive methods for environmental measured data of aircraft during flight[S] (in Chinese)

[6] GJB/Z126-99,振动冲击、环境测量数据归纳方法[S]
GJB/Z126-99,The inductive methods for environmental measured data of vibration and shock[S] (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)