

倒频谱在航空发动机振动分析中的应用

李飞行 张群岩 王 涛

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要 基于倒频谱分析技术原理及航空发动机振动状态特征, 探讨了倒谱在航空发动机振动分析中的应用。采用倒谱技术对实际发动机振动数据进行了分析, 结果表明倒频谱分析技术应用于航空发动机振动分析, 可以有效分离传递通道影响并从复杂的频谱中提取出特征频率。

关键词 倒频谱 航空发动机 振动分析

中图法分类号 V231.92; **文献标志码**

航空发动机在其工作过程中, 由于自身的各种机械运动, 包括高低压转子的旋转运动, 齿轮的啮合以及轴承的摩擦等, 将会产生复杂的振动现象。当发动机出现故障时, 如转子对中不良、转静子碰撞、转静子松动、轴承或齿轮的故障等, 振动则更为复杂, 用一般频谱分析方法已经难于辨识。同时一般发动机振动测量都是在机匣上安装传感器, 所得振动信号都是源信号经过系统路径的传输而得到的响应, 不能完全反映源信号特征。对于发动机状态监测和故障诊断而言, 为准确判断发动机健康状态, 必须消除传递通道的影响。倒频谱分析是近代信号处理中的一项新技术, 它可以监测复杂信号频谱上的周期结构, 分离和提取在密集泛频谱信号中周期成分, 倒谱对于谐频、边频等复杂的信号分析识别非常有效, 同时也可有效分离信息通道对信号的影响^[1]。

1 倒频谱原理概述

1.1 倒频谱数学描述

对于时域信号 $x(t)$, 经过傅里叶变换后, 可得到频域函数 $X(f)$ 或功率谱密度函数 $S_x(f)$ 。对功率密度函数取对数进行傅里叶变换并取平方, 则可以

2011年1月28日收到, 2月11日修改

第一作者简介: 李飞行(1978—), 男, 研究方向: 航空发动机结构强度与振动飞行试验。E-mail:lifxg@sohu.com。

得到倒频谱函数 $C_p(q)$ (power cepstrum)。其数学表达式为:

$$C_p(q) = |F\{\lg S_x(f)\}|^2 \quad (1)$$

$C_p(q)$ 又叫功率倒频谱, 或叫对数功率谱的功率谱。工程上常用的是式(1)的开方形式, 即:

$$C_0(q) = \sqrt{C_p(q)} = |F\{\lg S_x(f)\}| \quad (2)$$

$C_0(q)$ 称为幅值倒频谱, 有时简称倒频谱。自变量 q 称为倒频率, 其具有与自相关函数 $R_x(\tau)$ 中的自变量 τ 相同的时间量纲, 一般取 s 或 ms。

为了使其定义更加明确, 还可以定义:

$$C_y(q) = F^{-1}\{\lg S_y(f)\} \quad (3)$$

即倒频谱定义为信号的双边功率谱对数加权, 再取其傅里叶逆变换, 联系一下信号的自相关函数:

$$R_x(\tau) = F^{-1}\{S_y(f)\}.$$

这样可以看出, 这种定义方法与自相关函数很相近, 变量 q 与 τ 在量纲上完全相同。倒频谱与相关函数不同的只差对数加权, 目的是使再变换以后的信号能量集中, 扩大动态分析的频谱范围和提高再变换的精度。还可以解卷积(褶积)成分, 易于对原信号的分离和识别^[2]。

1.2 分离信息通道对信号的影响

若源输入信号为 $x(t)$, 测得的输出信号为 $y(t)$, 传递响应函数 $h(t)$, 则时域关系为: $y(t) = x(t)h(t)$ 。

频域为: $Y(f) = X(f)H(f)$ 。
或 $S_y(f) = S_x(f)|H(f)|^2$ 。

对上式两边取对数,则有:

$$\lg S_y(f) = \lg S_x(f) + \lg |H(f)|^2.$$

对上式进一步作傅里叶变换,即可得幅值倒频谱:

$$F\{\lg S_y(f)\} = F\{\lg S_x(f)\} + F\{\lg |H(f)|^2\}.$$

即: $C_y(q) = C_x(q) + C_h(q)$ 。

通过以上推导可知,倒频谱分析可以将源信号 $x(t)$ 和传递响应 $h(t)$ 在时域和频域内复杂的卷积和乘积关系转换为倒频谱域内 $C_x(q)$ 和 $C_h(q)$ 的相加关系,使系统特性 $C_h(q)$ 与信号特性 $C_x(q)$ 明显区别开来,有效清除了传递通道的影响^[2]。

1.3 增强频谱中周期性成分的识别

从倒谱分析的原理中可以看出,假如功率谱 $S_x(f)$ 中包含周期性成分,倒频谱分析首先取对数以加强线性频谱中冲淡了的那些成分,在取其傅里叶变换之后, $S_x(f)$ 的周期分量表现在倒频谱上就会出现一个峰值。这样就加强了频谱中不易识别的周期信号的识别能力。

同时在功率谱中,一些边频间距的分辨率受分析频带的限制,分辨频带越宽分辨率越低,可能使某些边频信号不能分辨;若提高分辨率,则有可能丢失信号。倒谱分析能在整个功率谱的范围内采取边频的平均间距,因而既不会漏掉信号,又能给出非常精确的间距结果^[3]。

2 倒谱在航空发动机振动分析中的应用

一般航空发动机测量都是在机匣上安装传感器,以测量发动机振动信息。对于航空发动机振动,主要是基于转子源和故障源的,并且转子部件故障远高于静子部件,因此在机匣上测得的振动信号大都是源信号经过系统路径的传输而得到的响应。而且传感器一般不能直接安装,都是通过支架加装在被测机匣上,这使测量的振动又通过了一层传递。因而所测的振动容易受测量传递通道的影响。

同时,航空发动机振动状态很复杂,频率成分众多,有些周期性频率成分在频谱图上难于辨识。应用倒谱分析则能增强一些特征频率识别能力,更有效监测发动机振动状态。

图 1a 与图 1b 分别为某型涡桨发动机振动的频

谱图和倒频谱图。该振动测点位于发动机压气机机匣和减速器机匣的安装边上。该型发动机转子基频 $f = 207$ Hz, 同时减速器输入轴基频也为 207 Hz, 减速器输出基频为 $f = 18$ Hz。

从图 1a 中看以看出,频谱图呈现出多个峰值梳状波,包括了众多频率成分,无明显突出波峰,而且多数频率成分与发动机机械状态无法对应,可能为噪声或传递中导致的频差、混频等,这都给特征信号的提取与识别造成困难。而从图 1b 中可以看出,在倒频图上在倒频率 $\tau = 1.201$ ms、 2.403 ms、 4.805 ms 等处均存在较明显波峰,其对应频率为 $f = 207$ Hz 及其倍频。该频率对应发动机转子基频或减速器输入轴基频,由此可见发动机转子或减速器输入轴为其振源。

图 2 为另一位置振动测点的倒频图,对比可知其与图 1b 振动测点反映相同,因此说明倒频分析可以有效分离传递通道的影响。

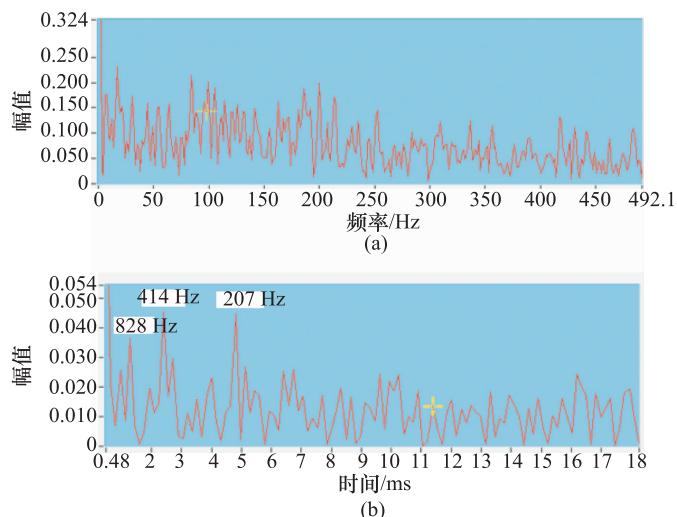


图 1 某涡桨发动机振动频谱图与倒频图

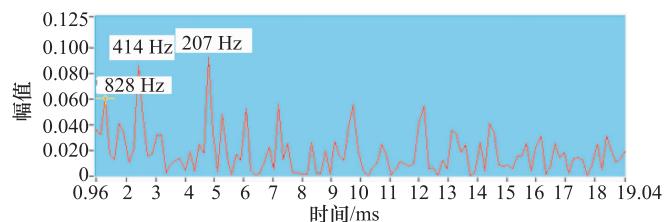


图 2 某涡桨发动机振动倒频图

(下转第 2739 页)

Design of the Configuration for Experimental Object of Spacecraft Experiment of Neutral Buoyancy

JIANG Qi-ying², FANG Qun¹, LI Jian-jun², ZHU Xiao-guang²

(College of Astronautic, Northwestern Polytechnical University¹, Xi'an 710072, P. R. China;
Qingzhou Second Artillery NCO School², Qingzhou 262500, P. R. China)

[Abstract] The problem of the experimental object design for ground experiment system of neutral buoyancy was one of the key to achieving demonstration effectually of the development of spacecraft. The issues of the configuration design which based on the requirement of the experimental object are studied. First, the relative position of the center of mass and buoyancy is design based on the Archimedean principle. Furthermore, the decision is made for the configuration of the experimental object. At last, the result of the design is verified reasonable by experiment.

[Key words] neutral buoyancy simulation spacecraft microgravity environment experimental object design

(上接第 2728 页)

3 结束语

倒频谱分析技术可以有效提取密集泛频谱信号中的周期性成分,有效分离信息通道对信号的影响,应用于发动机振动分析,可以从复杂的频谱中提取出特征频率,这有利于发动机振动监测与故障诊断。

参 考 文 献

- 1 李德葆,张元润. 振动测量与试验分析. 北京:机械工业出版社,1991
- 2 张金,张耀辉,黄漫国. 倒频谱分析法及其在齿轮箱故障诊断中的应用. 机械工程师,2005;(8):34—35
- 3 徐长庚. 倒频谱分析技术在某减速器疲劳试验中的应用. 中国航空学会(动力)第三届小发动机,中国航空学会(直升机)第三届动力与传动学术讨论会论文集;北京:中国航空学会,2000:92—95

The Application of Power Cepstrum in Aeroengine Vibration Analysis

LI Fei-xing, ZHANG Qun-yan, WANG Tao

(Flight Experimental Institute of China, Xi'an 710089, P. R. China)

[Abstract] The application of power cepstrum in aeroengine vibration analysis based on the theory of power cepstrum and the characteristic of aeroengine vibration is discussed. The power cepstrum is used to analyze the vibration data from test, the result indicates the method can be effectively utilized to remove the influence of passage and pick out the eigenfrequency of the engine vibration signal.

[Key words] power cepstrum aeroengine vibration analysis