

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.02.029

飞行品质频域准则的输入激励研究

支真莉*, 韩意新

中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089

摘 要: 采用加权交叠平均法(Welch法)对电传飞机的4种典型输入激励进行功率谱估计分析, 通过合适的加窗处理和频谱分析得到最优的激励输入, 并将扫频输入得到的飞机频率特性使用带宽准则、Neal-Smith准则进行飞行品质评估, 最终给出评估结果和结论, 这对飞行试验的飞行品质研究具有一定的指导意义。

关键词: 功率谱估计; Welch法; 带宽准则; Neal-Smith准则

中图分类号: V217.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2017) 02-0029-05

现代战斗机大多采用电传飞控系统,使得飞机系统的数学模型变得十分复杂,虽然目前通用的低阶等效系统方法可以评价飞机的飞行品质,但是仍会出现失配过大的情况。因此,GJB2874-97提出,针对高增益飞机以及具有直接力控制所产生的非常规飞行模式的飞机,当低阶等效系统和高阶系统之间失配大时,或者当俯仰轴增益产生非经典响应时,建议同时使用CAP准则、Chalk准则、带宽准则、Neal-Smith准则等中的几种或全部^[1]。在应用这些准则评价高增益飞机的飞行品质过程中,激励飞机的输入是个非常关键的部分,不恰当的输入很可能无法进行飞行品质评价。本文将论述在频域中如何分析、选取这些激励输入并应用于飞行品质评价,最后给出带宽准则和Neal-Smith准则的计算结果,最终的结论将为飞行试验的试飞方法设计和数据分析处理提供依据。

1 功率谱估计

1.1 加权交叠平均法(Welch法)

功率谱密度是一种概论统计方法,是对随机变量均方值的量度。平稳信号的自相关函数的傅立叶变换称为功率谱密度。功率谱估计(PSE)是用有限长的数据估计信号的功率谱密度^[2]。为了更准确地获取频谱信息,本文采用Welch法^[3]对飞机的激励输入进行功率谱估计。

Welch法是对随机序列分段处理,使每一段部分重叠,然后对每一段数据用一个合适的窗函数进行平滑处理,最后对各段谱求平均^[4]。这样可以得到随机序列 $x(N)$ 的功率谱估计:

$$\hat{S}(\omega) = \frac{1}{MUL} \sum_{i=1}^L \left| \sum_{n=0}^{M-1} x_N^i(n) e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (1)$$

式中:

$$U = \sum_{n=0}^{M-1} \omega(n) \quad (2)$$

$\omega(n)$ 是窗函数,由于各段数据的交叠,数据段数 L 增大,从而减小了方差。另外,通过选择合适的窗函数,也可使遗漏的频谱减少,改进了分辨率。因此,这是一种把加窗处理和平均处理结合起来的方法,它能够满足谱估计对分辨率和方差的要求,但是如果信号数据过短,也会无法进行观测。

1.2 典型信号的功率谱估计

对飞行试验,常用的飞机激励信号是倍脉冲信号、阶跃信号、扫频信号和“3211”信号,本文通过Welch法对上述4种信号进行谱密度估计并分析。其中,采样率 $F_s=32$,窗函数采用海明窗^[5],由于窗长过短会导致有效分析频谱范围过窄,使部分频谱泄露而不能真实的反映输入信息,这里采用窗长45s,其有效分析频谱范围为0.14~20rad/s,迭代长度为22.5s,由此得到上述4种输入的功率谱图,如图1~图4所示。

收稿日期:2017-01-01; 退修日期:2017-01-09; 录用日期:2017-01-18

*通讯作者. Tel.: 029-86837905 E-mail: yusushan@qq.com

引用格式: ZHI Zhenli, HAN Yixin. Research on input of flight quality criterion in frequency domain [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(02): 29-33. 支真莉, 韩意新. 飞行品质频域准则的输入激励研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(02): 29-33.

由图1~图4可以看出,在0.01~10rad/s的范围内,4种输入方式都可以在低频区产生足够的能量激发飞机的响应,但是随着频率增大,阶跃信号和“3211”信号的能量衰减很快,在中高频区能量不足,而倍脉冲和扫频输入的功率谱覆盖频段较宽,特别是扫频输入,能量分布比较均匀,能够满足飞行品质最关

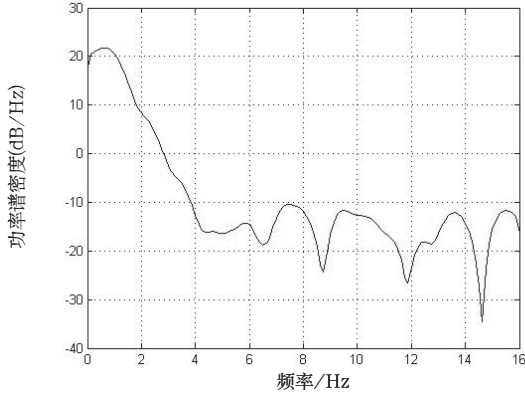


图1 倍脉冲功率谱图

Fig.1 Power spectrum of double pulse

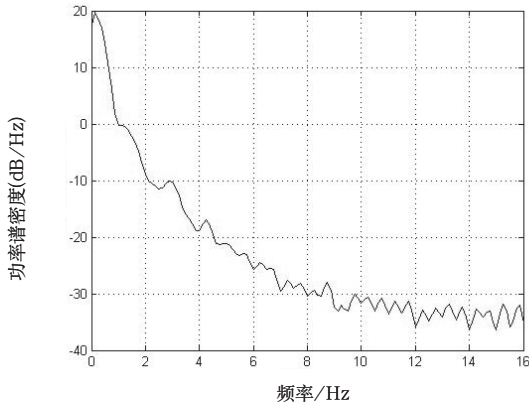


图2 阶跃功率谱图

Fig.2 Power spectrum of step

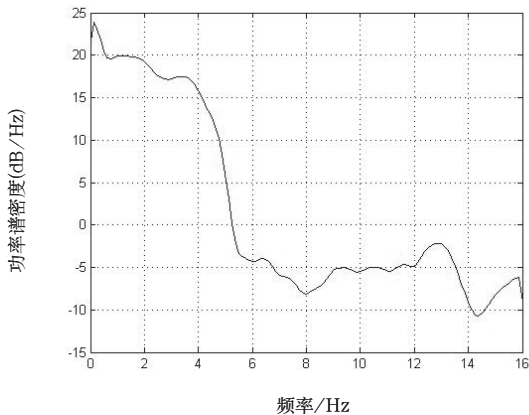


图3 扫频功率谱图

Fig.3 Power spectrum of swept frequency

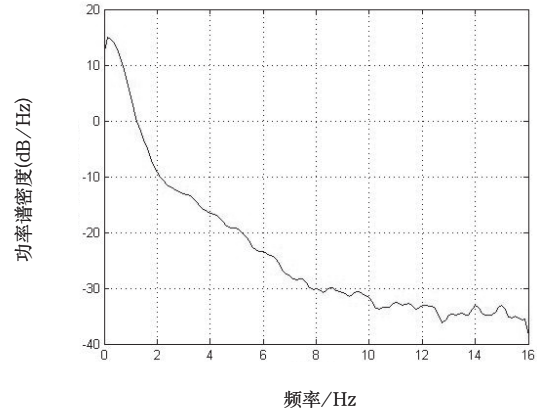


图4 “3211”功率谱图

Fig.4 Power spectrum of '3211'

注的频段的能量需求,但是由于实际操纵飞机需要至少45s的输入,长时间的连续倍脉冲输入也可认为是扫频信号,因此采用频率由低至高(期望从0.01~10rad/s)的扫频输入,从而可以认为这样的扫频输入是使用飞行品质评估准则的最优输入。

2 飞行品质评估准则

2.1 姿态带宽准则

姿态带宽准则是通过姿态角对驾驶员杆力输入的开环频域响应计算带宽和时延两个特征值。并以此为依据,进行驾驶员诱发震荡(PIO)趋势评估。以姿态角($^{\circ}$)对驾驶员杆力(lb)输入的频域响应为输入^[6]。

带宽计算示意图见图5。其中,相位带宽 ω_{BW}^{phase} 定义:相位为 -135° 处的频率值,单位为rad/s;幅值带宽 ω_{BW}^{gain} 定义:相位 -180° 处的幅值抬高6dB处的频率值,单位为rad/s。带宽定义为式(3),单位为rad/s:

$$\omega_{BW} = \min(\omega_{BW}^{phase}, \omega_{BW}^{gain}) \quad (3)$$

时延定义为式(4),单位为s:

$$\tau = -\frac{\phi_{2\omega_{180}} + 180}{57.3 \times 2 \times \omega_{180}} \quad (4)$$

式中: ω_{180} 为相位 -180° 处的频率,单位为rad/s; $\phi_{2\omega_{180}}$ 为相位 -180° 处的频率 $\times 2$ 处的相位值。

2.2 闭环准则(Neal-Smith准则)

该准则以闭环共振峰值和带宽处驾驶员的相位角(对应于驾驶员补偿)作为评定参数,评定飞机的飞行品质。以姿态角($^{\circ}$)对驾驶员杆力(lb)输入的频域响应为输入^[6]。

采用的驾驶员模型为:

$$k_p \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} e^{-\tau s} \quad (5)$$

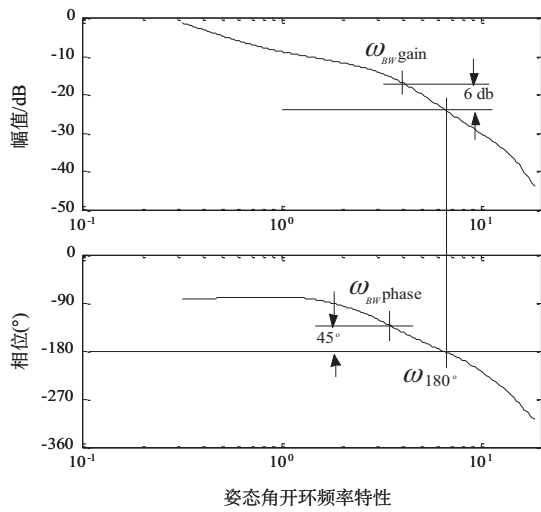


图5 带宽计算示意图

Fig.5 Definition of bandwidth calculation

式中取 $\tau = 0.3s$, 并且 T_1 、 T_2 满足以下条件, T_1 、 T_2 单位为s:

$$\begin{aligned} T_2 &= 0.01 & (T_1 > T_2) \\ T_2 &= 1/(\omega_{BW}^2 T_1) & (T_1 < T_2) \end{aligned} \quad (6)$$

对闭环频率特性的要求有两点:第一是带宽值 ω_{BW} 一般规定为 3rad/s ;第二是幅值特性下降 -3dB ,如图6所示。其中,带宽 ω_{BW} 定义为闭环频率特性相位为 -90° 处的频率值。根据闭环频率特性要求寻优求得 k_p , T_1 , T_2 , 确定驾驶员模型。

使用得到的驾驶员模型,计算人机系统闭环频率特性,可得到闭环共振峰值 $|\theta/\theta_{cl\max}|$, 单位为dB。

驾驶员补偿相位角的计算公式如式(7),单位为($^\circ$):

$$\angle PC = 57.3(\arctan(T_1 \times \omega_{BW}) - \arctan(T_2 \times \omega_{BW})) \quad (7)$$

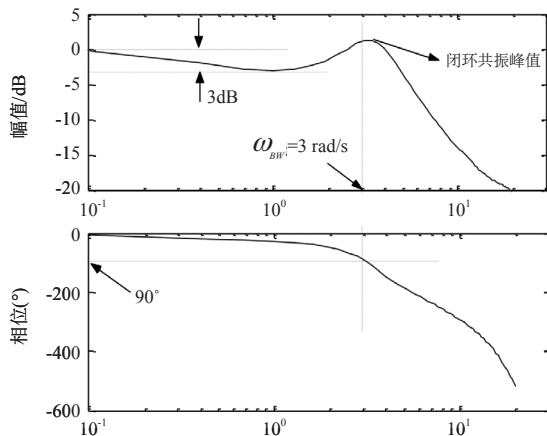


图6 Neal-Smith准则闭环频率特性要求

Fig.6 Neal-Smith criterion closed loop frequency characteristic requirements

3 算例分析

飞机的小扰动模型为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (8)$$

式中: $x = [v, \alpha, q, \theta]^T$, v 为前向速度, α 为迎角, q 为俯仰角速度, θ 为俯仰角; $u = [\delta_e]^T$, δ_e 为升降舵偏角; $y = [q, \theta, \gamma, n_z]^T$, n_z 为法向过载, γ 为航迹角。

飞机的 A 、 B 、 C 和 D 矩阵如下:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -0.0452 & 1.6869 & 0 & -9.81 \\ -0.0069 & -2.0291 & 1 & 0 \\ 0.0063 & -6.9843 & -3.001 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1598 \\ -11.73 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0.00135 & 0.397133 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.009762 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

飞机的杆力特性为: $\frac{\delta_e}{F_e} = 0.1856 (^\circ/\text{lb})$, 时间延迟为:

60ms, 飞机的开环频率特性为:

$$\frac{q}{F_e} = \frac{11.73s^3 + 23.2154s^2 + 1.1636s}{s^4 + 5.0753s^3 + 13.3126s^2 + 0.677s + 0.5982} e^{-0.06s} \quad (10)$$

$$\frac{\theta}{F_e} = \frac{11.73s^2 + 23.2154s + 1.1636}{s^4 + 5.0753s^3 + 13.3126s^2 + 0.677s + 0.5982} e^{-0.06s} \quad (11)$$

$$\frac{\gamma}{F_e} = \frac{-0.1595s^3 - 0.4868s^2 + 22.6636s + 0.3597}{s^4 + 5.0753s^3 + 13.3126s^2 + 0.677s + 0.5982} e^{-0.06s} \quad (12)$$

$$\frac{n_z}{F_e} = \frac{-0.0049s^4 + 0.007s^3 + 2.361s^2 + 0.0425s + 0.0065}{s^4 + 5.0753s^3 + 13.3126s^2 + 0.677s + 0.5982} e^{-0.06s} \quad (13)$$

给定飞机扫频输入, 将带入式(10)~式(13), 得到飞机的频率特性Bode图, 如图7~图10所示。

再用上述频率特性计算准则中的参数并标注在准则评估图中, 如图11和图12所示, 可以看出, 该飞机属2级飞行品质, 无PIO趋势。

4 结论

通过扫频输入分别得到飞机的姿态角速率、姿态角、法向过载、航迹角对杆力的频率特性, 并得到飞机的飞行品质评估结果, 两种准则的结果是准确一致的, 说明对输入信号

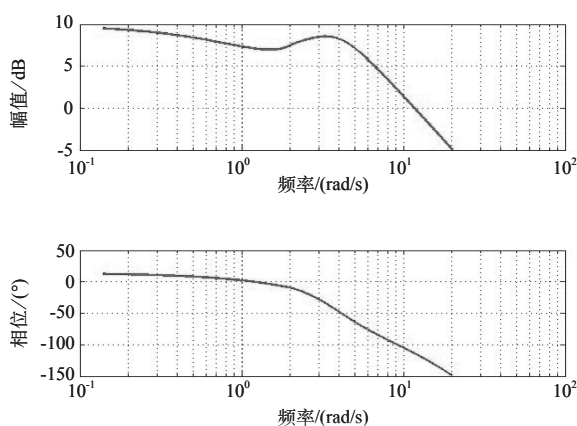


图7 姿态角速率对杆力频率特性Bode图

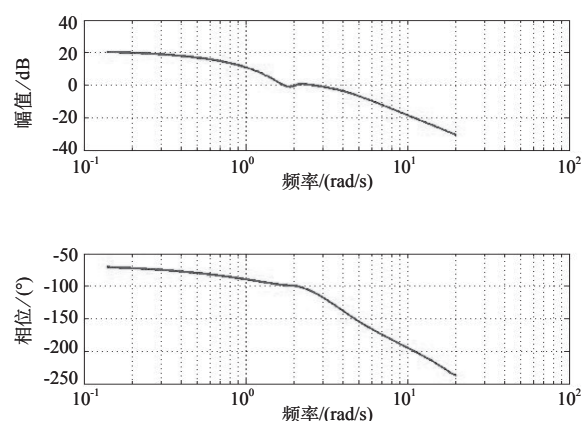
Fig.7 Bode diagram of q/Fe frequency characteristic

图8 姿态角对杆力频率特性Bode图

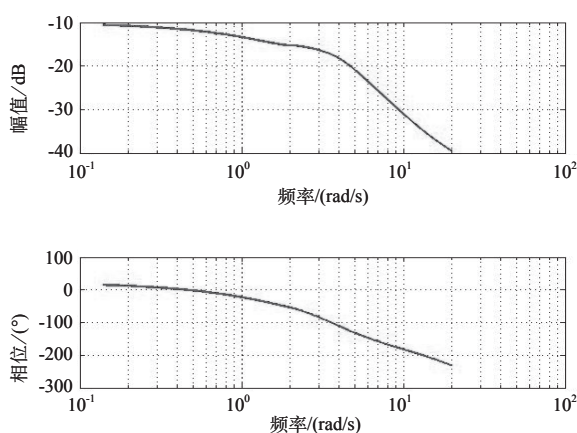
Fig.8 Bode diagram of θ/Fe frequency characteristic

图9 法向过载对杆力频率特性Bode图

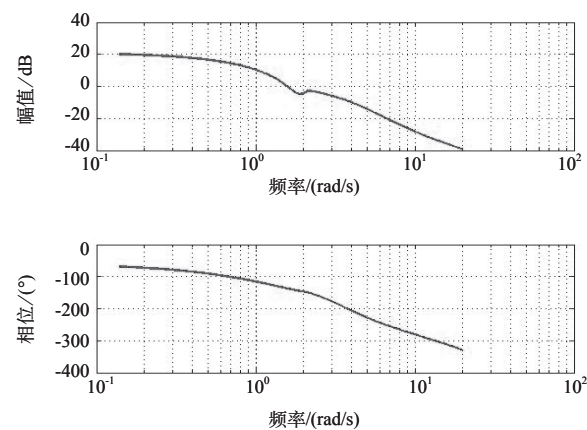
Fig.9 Bode diagram of n_z/Fe frequency characteristic

图10 航迹角对杆力频率特性Bode图

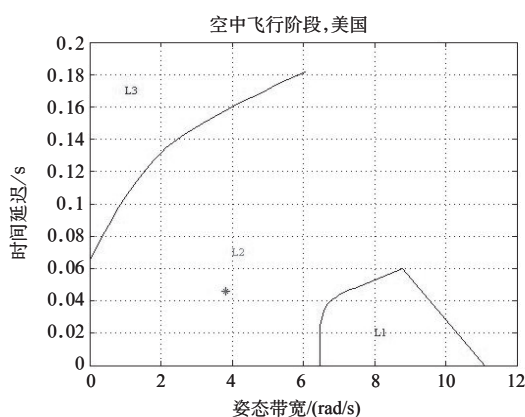
Fig.10 Bode diagram of γ/Fe frequency characteristic

图11 姿态带宽准则评估图

Fig.11 Evaluation of attitude bandwidth

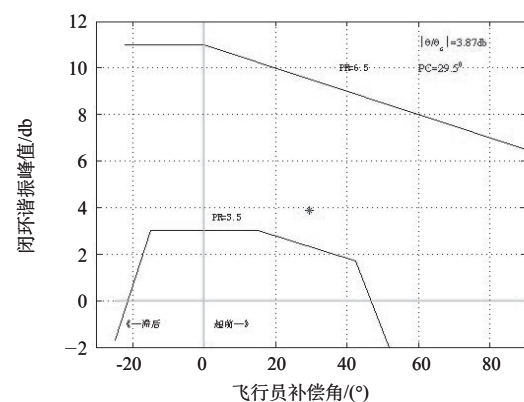


图12 Neal-Smith准则评估图

Fig.12 Evaluation of Neal-Smith

进行加窗处理以及频域分析范围的选取是合适的,满足在所分析的频段内频谱不失真的要求。

参考文献

- [1] 国防科学技术工业委员会. GJB2874-97: 电传操纵系统飞机的飞行品质[S]. 国防科学技术工业委员会, 1997.

- National Defense Science and Technology Industry Committee. GJB2874-97: Flying qualities standard for airplane with fly-by-wire control system[S]. National Defense Science and Technology Industry Committee, 1997. (in Chinese)
- [2] 杨晓明, 晋玉剑, 李永红. 经典功率谱估计Welch法的MATLAB仿真分析[J]. 电子测试, 2011, 7(7): 101-104.
- YANG Xiaoming, JIN Yujian, LI Yonghong. MATLAB simulation and analysis of the Welch method in the classical power spectrum estimation[J]. Electronic Test, 2011, 7(7): 101-104. (in Chinese)
- [3] 薛定宇, 陈阳泉. 基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- XUE Dingyu, CHEN Yangquan. System simulation technology and application based on MATLAB/Simulink[M]. Beijing: Tsinghua Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 王春兴. 基于MATLAB实现经典功率谱估计[J]. 曲阜师范大学学报, 2011, 4(2): 59-62.
- WANG Chunxing. Achieve power spectrum estimation based on MATLAB[J]. Journal of Qufu Normal University, 2011, 4(2): 59-62. (in Chinese)
- [5] Mark B T, Robert K R. Aircraft and rotorcraft system identification[J]. AIAA, 2006.
- [6] 阙向东. 飞机飞行状态估计与飞行品质评估研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- QUE Xiangdong. Research on aircraft flight state estimation and flight quality evaluation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)

作者简介

支真莉(1984—)女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机飞行品质。

Tel: 029-86837905

E-mail: yusushan@qq.com

Research on Input of Flight Quality Criterion in Frequency Domain

ZHI Zhenli*, HAN Yixin

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

Abstract: Power spectrum estimation analysis of four typical inputs of the fly-by-wire flight using Welch method, the optimal excitation input was obtained by appropriate windowing and spectral analysis, the frequency characteristics of swept frequency input were used to evaluate the flight quality on bandwidth and Neal-Smith criterion, final results and conclusions were given. It has certain guiding significance to the study of flight quality.

Key Words: power spectrum estimation; Welch method; bandwidth criterion; Neal-Smith criterion