DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.02.034

频域参数辨识节点选择优化方法

李雅静*,魏斌,秋路,焦岗

中国飞行试验研究院,陕西西安 710089

摘 要:针对某型机频域参数辨识过程使用传统的方法选择拟配节点出现的拟配不精确的问题,提出了自动选择拟配节点 范围和随失配包线与功率谱密度综合选择拟配节点的方法。飞行试验数据处理结果表明,使用本文改进的辨识方法可提高 等效系统辨识精度,同时提高试飞数据处理效率。

关键词: 低阶; 等效系统辨识; 拟配间隔; 失配包线; 功率谱密度

中图分类号: V21 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 02-0034-05

目前,在分析飞机动态特性、计算飞机特性指标时最常用的方法是等效系统法,频域参数辨识等效系统方法¹¹¹的原 理是利用一个拟配的低阶系统来代替所要分析的高阶系统, 并利用这个拟配的低阶系统得到的特性参数来评价对应的 高阶系统。

拟配频率范围根据驾驶员操纵飞机的常用频段取为 0.1~10.0rad/s,而对于某型机的纵向短周期频率和荷兰滚频 率都较小,要求飞机倍脉冲机动时间较长,尽量激发飞机在 中低频段的响应,这使得飞机在较高频段频域响应辨识不 准,在数据处理中需要注意覆盖欲评价的主要频率区域即 可,为了数据处理简便快捷,需要找寻一种方法自动搜索可 用频段,去掉辨识不准的高频段。本文提出了一种频段截取 的方法,并应用于实际试飞数据处理中,得到较好的效果。

拟配节点选择还有另一方面,即拟配节点的分布,前 期等效系统拟配选择节点一般每10倍频程取10个点,对 0.1~10.0rad/s范围的拟合取20个点^[2],并且是对数等间隔 的。但在处理某型机试飞数据时,发现使用对数等间隔选取 拟配节点时在系统转折频率点处精确度较差,本文根据某型 机短时数据频响特点,提出了随失配包线与功率谱密度综合 选择的拟配节点的方法,比使用对数等间隔选择拟配节点得 到的辨识结果更精确。

1 等效系统拟配

1.1 目标函数

为了使高、低阶系统频率特性在 $\omega_i \in [a,b]$ 频段内拟合, 可以利用不同的优化方法寻求低阶系统的参数,如纵向双拟 配模型^[3]中 ξ_{sp} 、 ω_{sp} 、 ξ_p 、 ω_p 、 K_θ 、($1/T_{\theta 1}$)、($1/T_{\theta 2}$)、 τ_θ 、 K_n 、 τ_n , 使目标函数(失配度函数)最小,使在一定频率范围内低阶等 效系统频率特性与高阶系统频率特性最为接近。其接近程度 用失配度度量,为:

$$J = \sum_{i=1}^{n} \left[\Delta^2 G(j\omega_i) + W \Delta^2 \phi(j\omega_i) \right]$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \left\{ \left[G_{\text{HOS}}(\omega_i) - G_{\text{LOS}}(\omega_i) \right]^2 + W \left[\phi_{\text{HOS}}(\omega_i) - \phi_{\text{LOS}}(\omega_i) \right]^2 \right\}$$
(1)

式中:n为拟配点数目,取为20;W为加权因子,取为0.01745; $G_{HOS}(\omega_i)$ 、 $\phi_{HOS}(\omega_i)$ 分别为高阶系统在第i个拟配频率的幅值 (dB)和相角(deg); $G_{LOS}(\omega_i)$ 、 $\phi_{LOS}(\omega_i)$ 分别为低阶等效系统在 第i个拟配频率的幅值(dB)和相角(deg);J为失配度,J越小, 两个系统频率特性越接近。 ω_i 是在[a,b]范围里,频率对数坐 标上按均匀等分取值^[4]。

1.2 **拟配精度**

分别用失配度和失配包线来衡量拟配精度。由于失配 度仅代表在确定频率范围内各离散频率点上失配数的总和, 而驾驶员对截止频率1~4rad/s范围内的动态特性变化最敏

收稿日期:2016-12-13; 退修日期:2016-12-21; 录用日期:2017-01-17 *通讯作者. Tel.:18049472178 E-mail:jingchaojun@163.com

引用格式: LI Yajing, WEI Bin, QIU Lu, et al. Optimization method for intervals choice of frequency domain parameters identification [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(02): 34-38. 李雅静,魏斌,秋路,等. 频域参数辨识节点 选择优化方法[J]. 航空科学技术,2017,28(02):34-38.

感,因此,对这一频率范围的拟配精度要求应高于其他频率段。GJB2874-97《电传操纵系统飞机的飞行品质》提出用失配包线代替失配度来衡量拟配精度,失配包线如图1所示。



当高阶系统和低阶等效系统的幅值和相位差别在规定 频段范围位于失配包线内时,则认为等效参数是可以正确的 预示驾驶员意见的,否则建议用其他高阶准则指标来评价^[4]。 失配包线定义为拉普拉斯变量s的函数:

上增益包线:(3.16s²+31.6s+22.79)/(s²+27.14s+1.84),下 增益包线:(0.095s²+9.92s+2.15)/(s²+11.6s+4.95);上相位包 线:(68.89s²+1100.12s-275.22)/(s²+39.94s+9.99);下相位包 线:(475.32s²+184100s+29460)/(s²+11.66s+0.039)。

2 拟配频率范围选择影响及自动选择实现方法

2.1 拟配频率范围选择影响

某型机纵向短周期频率和荷兰滚频率都较低,短时输入所 需频率也较低,能量主要集中在中频段,大多数情况下高频段 辨识结果较差且不可信,如果在0.1~10rad/s整个频段进行拟 配,在高频段就会产生很大误差,导致中低频段拟配结果也会 变差,如图2和图3所示。图2(a)、图3(a)为俯仰角速度频率响应 曲线,图2(b)和图3(b)为等效拟配幅值相位失配包线,比较图2 和图3可以发现,若强行拟配高频段,会使低频段尤其在转折 频率处拟配较差,如果放弃频率大于4.3rad/s的高频段,拟配 结果较准确,由图3可见,在转折频率附近拟配精度较高。



图2 0.1~10rads/s整个频段进行拟配的结果



Fig.2 Match results between 0.1~10rad/s frequency band







2.2 自动选择频率范围实现方法

根据大量数据统计,可以从两个方面进行频率范围选 择数据处理,一方面从频率响应中幅值曲线斜率的变化率判 断,若在某个频率点斜率突变,则判断该频率点后辨识曲线 不可信,判断此频率点为拟配最大频率点,另一方面从斜率 符号变化判断,如图4所示。在频率点处,幅值斜率变号且变 号发生时间较长,则判断该频率点后辨识曲线不可信,该频 率点为拟配最大频率点。依据试飞动作的频谱特性自动选择 拟配频段,无需手动选择,节省数据处理时间,为数据批处理 奠定基础,同时避免了不必要的干扰频段。





3 优化拟配节点及实现方法

传统等效系统拟配选择节点一般每10倍频程取10个点, 对0.1~10rad/s范围的拟合取20个点,并且是对数等间隔的。然 而短时激励在低频段能量激发不充分,能量集中在中频段, 而失配包线也是在中频段要求较高,希望在系统转折频率和 失配函数曲线最狭窄的频段处得到更高精度的拟配结果。图 5为使用对数等间隔选择拟配节点的方法得到的等效系统拟 配结果,图5(a)为俯仰角速度频率响应曲线,图5(b)为等效拟 配幅值相位失配包线,可见在系统转折频率处拟配不精准, 影响拟配结果。



图5 20个对数等间隔拟配节点频率响应辨识 Fig.5 Frequency response identification choosing 20 equispaced intervals

为提高拟配精度,提出优化拟配节点方法,即随失配包 线与功率谱密度综合选择拟配节点方法。

(1)随功率谱密度选择拟配节点,目的是提高激励动作 能量最大的频段拟配精度、在该频段分布更多的等效拟配节 点。而激励动作的设计是以飞机特性为依据,激励能量尽量 集中在飞机自然频率附近,能够更好地激起飞机响应。

计算输入、输出的功率谱密度,按对数均匀取离散频率 点,各变量功率谱归一化,如图6所示。其中,DE为纵向杆输 入,NZ为法向过载,Q为俯仰角速度,计算各变量能量谱(功 率谱曲线对离散频率点积分)并加权平均,得到归一化后的 功率谱,Syn为综合功率谱密度,对综合功率谱进行能量谱 归一化面积积分,最后按面积均匀取20个频率点作为拟配节 点,在综合功率谱密度曲线上以圈点表示。



(2)随失配包线选择拟配节点,减弱低频激发不充分频段 的拟合要求,将节点更多的分布在拟配精度要求较高的中频段。 幅值允许包线与相位允许包线等量化,并取均值,如图7所 示。包线插值最小值归一化并取逆,如图8虚线所示,计算随 频率变化的曲线面积并归一化,如图8中实线所示,在该曲线 上按积分面积均匀取20个点,得到每个点对应的频率,即按 失配包线选择的拟配节点,如图8中圈点所示。



Fig.7 Equidimension of amplitude and phase envelope

(3)随失配包线与功率谱密度综合选择拟配节点可以 结合两者的优点,避免输入信号不理想,功率谱密度远离短 周期模态时,避免在不关心的频段的分布过多的拟配节点。 综合考虑根据失配包线和功率谱密度计算出的拟配节点,对 两组拟配节点加权取平均,得到随失配包线与功率谱密度综



图8 根据失配包线选择拟配点 Fig.8 Choosing the match nodes according to mismatch envelope

合选择的拟配节点,使用该方法进行等效系统拟配结果如图 9所示,比较图9(a)、图9(b)和图 5(a)、图 5(b),可见使用随 失配包线与功率谱密度综合选择拟配节点的方法可以提高 在需要频段的拟配精度。





4 结论

本文提出了某型机试飞机动特性品质评价中等效系统 拟配节点选择问题,并给出解决方法,即自动选择拟配节点 范围和随失配包线与功率谱密度综合选择拟配节点的方法。 通过飞行试验数据验证,可得到如下结论:

(1)自动选择拟配节点范围的方法不需人工选择,可自动搜索可用频段,去掉辨识不准的高频段,提高等效拟配精度,为数据批处理做好准备,提高数据处理效率。

(2)随失配包线与功率谱密度综合选择拟配节点的方法可以有效解决使用对数等间隔选取拟配节点时在系统转折频率点处拟配精确度较差的问题,得到的辨识结果更精确。

⁴AST

参考文献

 包立平,李春锦. 评定增稳飞机飞行品质的纵向频域等效系统 法[J]. 北京航空学院学报,1984(04):31-43.
 BAO Liping, LI Chunjin. Longitudial equivalent system approach for assessing flying quality[J]. Journal of Beijing Institute for Aeronautics and Astronautics, 1984(04):31-43. (in Chinese)

[2] 王水英,黄俊. 基于Matlab的俯仰轴等效系统拟配及飞行品质

评价[J].飞机设计,2009,29(05):32-36.

WANG Shuiying, HUANG Jun. Pitch axis equal system match and flying quality evaluation based on Matlab [J]. Aircraft Design, 2009, 29(05):32-36. (in Chinese)

[3] 田海燕.飞行品质中低阶等效系统的研究[D].西安.西安电子科 技大学,2008:33-34.

TIAN Haiyan. Research on low-order equivalent systems for aircraft handling qualities [D]. Xi'an: Xidian University, 2008:33-34. (in Chinese)

[4] 陈桂孙,方振平. 俯仰轴飞行品质中等效系统准则的计算与模拟[J].飞行力学,2003,23(01):16-20.

CHEN Guisun, FANG Zhenping. Calculation and simulation of equivalent system criteria for flying qualities of pitch axis[J]. Flight Dynamics, 2003, 23(01):16-20. (in Chinese)

作者简介

李雅静(1985-) 女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机飞行 品质试飞。 Tel: 18049472178 E-mail: jingchaojun@163.com

Optimization Method for Intervals Choice of Frequency Domain Parameters Identification

LI Yajing*, WEI Bin, QIU Lu, JIAO Gang

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

Abstract: There was an inaccurate problem when using traditional methods to choose match intervals on a log scale in the process of frequency domain parameters identification for one aircraft. The new method used the automatic selection of match intervals scope technique and chose the intervals according to mismatch envelopes and power spectral density. The result of flight test data processing demonstrates that the modified identification method can improve the identification precision and improve the flight test data utilization.

Key Words: low order; equivalent system identification; match intervals; mismatch envelopes; power spectral density