航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Jun. 25 2019 Vol. 30 No.06 68-73

模式搜索法在飞行品质评价中的应用研究

肖艳平*，傅庆庆，潘建
中国民航飞行学院，四川 广汉 618307

摘　要：飞机的飞行品质对飞行安全十分重要。本文针对飞行品质评价中的低阶等效系统拟配问题，利用模式搜索法对飞机的横航向运动低阶模型的未知参数进行辨识。结果表明，使用模式搜索法的拟配效果良好，且不受初值的影响，通过算法优化，使运算效率大大提高。

关键词：飞行品质；横航向；低阶等效；参数辨识；模式搜索法

中图分类号：V212.12　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.06.011

安全是航空领域最为关注的话题之一，飞机的飞行品质与飞行安全密切相关[1,2]。飞机的飞行品质是飞机的固有属性，从飞机自身来讲，就是要具有良好的稳定性和操纵性[3]。飞机的横航向运动通常会耦合发生，若驾驶员驾驶的飞机不具备良好的横航向飞行品质，工作负荷会大大加重，操纵不当就会进入危险状态[4-6]，所以为给驾驶员提供更好的飞机横航向驾驶的稳定性和操纵性感受，对飞机横航向飞行品质的研究十分重要。

现代飞机的动力学模型阶次非常高，需要利用低阶等效原理进行降阶处理，并利用参数辨识技术对未知参数进行拟配[7]。模式搜索法是一种直接搜索方法，寻优时不需要已知目标函数的梯度信息，甚至对不可导的目标函数仍可寻优，解决问题的范围更广。本文应用模式搜索法进行低阶等效拟配从而进行飞行品质研究，为飞机横航向稳定性和操纵性设计提供参考。

1 等效系统拟配步骤

模式搜索法中心思想是不断探索附近的点，并朝着连线方向，改变步长进行下一次探索，直至找到最优解[8]，模式搜索法进行等效系统拟配的步骤如下。

(1) 当前点和模式

参数初值即第一次迭代计算的当前点，每次迭代算出的最小点作为下次迭代的当前点，依此类推。模式通常使用单位矢量，模式的个数通常是未知参数个数的两倍，如某系统有两个待辨识参数，则模式可取为：

$$\boldsymbol{P}=\left[\boldsymbol{P}_1\ \boldsymbol{P}_2\ \boldsymbol{P}_3\ \boldsymbol{P}_4\right]=\begin{bmatrix}1 & 0 & -1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & -1\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{P}$为模式矩阵；$\boldsymbol{P}_i$为模式矢量。

(2) 目标函数

模式搜索法要搜索的目标函数即为失配度值函数[6]：

$$M=\sum_{i=1}^{n}\left[\Delta^2 G(\mathrm{j}\omega_i)+K\Delta^2\Phi(\mathrm{j}\omega_i)\right]=\sum_{i=1}^{n}\left\{\left[\left|G_1(\mathrm{j}\omega_i)\right|-\left|G_2(\mathrm{j}\omega_i)\right|\right]^2+K\left[\left|\Phi_1(\mathrm{j}\omega_i)\right|-\left|\Phi_2(\mathrm{j}\omega_i)\right|\right]^2\right\} \tag{2}$$

式中：$\Delta G(\mathrm{j}\omega_i)$为高低阶方程的幅频特性的差值；$\Delta\Phi(\mathrm{j}\omega_i)$为高低阶方程的幅频特性的相位的差值；$K$是一个加权系数，取为0.0175。

(3) 网点计算

网点的大小C随迭代过程的进行而改变，设起始网点大小为C_1=1，当叠加到k+1次时，网点区域范围是第k次的

收稿日期：2019-05-06；退修日期：2019-05-17；录用日期：2019-05-27
基金项目：中国民航飞行学院面上项目(J2016-59)；中国民航飞行学院研究生创新项目(x2017-4)
*通信作者. Tel.：13668305670　　E-mail：8557261@qq.com
引用格式：Xiao Yanping, Fu Qingqing, Pan Jian. Research on the application of pattern search method in flight quality evaluation [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(06): 68-73. 肖艳平，傅庆庆，潘建. 模式搜索法在飞行品质评价中的应用研究[J]. 航空科学技术，2019，30(06)：68-73.

网点大小C_k乘以模式P，再与第k代的当前点x_k相加，即：

$$\begin{aligned} x_{(k+1)},1 &= C_k P_1 + x_k \\ x_{(k+1)},2 &= C_k P_2 + x_k \\ x_{(k+1)},3 &= C_k P_3 + x_k \\ &\cdots \\ x_{(k+1)},n &= C_k P_n + x_k \end{aligned} \tag{3}$$

式中：$x_{(k+1)},n$为计算到第k+1次的网点；x_k为k次的当前点；C_k的值与上一代网点C_{k-1}的大小有关。

(4) 目标函数值寻优

根据算法迭代规则不断进行目标函数值的迭代运算，直至搜索到符合条件的最优值。

(5) 结束

当结果达到预设精度或算法达到迭代次数限制时结束。

2 算例分析

2.1 算例一

已知某型运输机巡航阶段滚转角速度对滚转操纵力响应的高阶动力学模型为：$G_H(s)=A(s)/B(s)$[9]。

$$\begin{aligned} A(s) = & -2.2737\times10^{13}s^{18} - 5.8208\times10^{11}s^{17} + 53923s^{16} + \\ & 2.4976\times10^{7}s^{15} + 6.7061\times10^{9}s^{14} + 1.174\times10^{12}s^{13} + \\ & 1.4861\times10^{14}s^{12} + 1.3681\times10^{16}s^{11} + 9.2455\times10^{17}s^{10} + \\ & 4.4122\times10^{19}s^{9} + 1.4134\times10^{21}s^{8} + 2.7908\times10^{22}s^{7} + \\ & 3.0719\times10^{23}s^{6} + 1.641\times10^{24}s^{5} + 3.6214\times10^{24}s^{4} + \\ & 5.8633\times10^{24}s^{3} + 4.2788\times10^{24}s^{2} + 1.0329\times10^{24}s + \\ & 7.8884\times10^{9} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B(s) = & s^{19} + 540.91s^{18} + 1.6271*10^{5}s^{17} + 3.253\times10^{7}s^{16} + \\ & 4.7414\times10^{9}s^{15} + 5.1933\times10^{11}s^{14} + 4.3379\times10^{13}s^{13} + \\ & 2.7522\times10^{15}s^{12} + 1.3064\times10^{17}s^{11} + 4.5231\times10^{18}s^{10} + \\ & 1.1028\times10^{20}s^{9} + 1.7995\times10^{21}s^{8} + 1.844\times10^{22}s^{7} + \\ & 1.108\times10^{23}s^{6} + 3.7574\times10^{23}s^{5} + 7\times4452\times10^{23}s^{4} + \\ & 1.0005\times10^{24}s^{3} + 6.62\times10^{23}s^{2} + 1.5375\times10^{23}s + \\ & 4.7125\times10^{19} \end{aligned}$$

由于是针对侧向滚转角速度对滚转控制力响应的研究，所以对该高阶方程进行拟配时，采用的低阶系统动力学模型为：

$$\frac{\phi}{F_{as}} = \frac{K_p(s^2 + 2\zeta_\varphi\omega_\varphi + \omega_\varphi^2)}{(s + 1/T_R)(s^2 + 2\zeta_d\omega_d + \omega_d^2)} e^{-\tau_{\varphi p}s}$$

式中：ζ_φ和ω_φ为等效零点阻尼比和固有频率；T_R为滚转模态时间常数；ζ_d和ω_d为荷兰滚模态的阻尼比和频率；τ为延迟时间。采用的拟配频率范围是0.1~10rad，初始值x=[50 0.7 4 6 0.8 4 0.01]^T。通过模式搜索算法拟配低阶系统，得到各参数的结果，见表1。

依据拟配结果可得，该低阶模型为：

$$\frac{\phi}{F_{as}} = \frac{22.8658(s^2 + 2\times1.4529\times5.4235\times s + 5.4235^2)}{(s + 1/0.3485)(s^2 + 2\times1.0952\times5.8741 + 5.8741^2)} e^{-0.0312t}$$

表1 模式搜索法各参数拟配结果

Table 1 The results of parameter matching of pattern search method

	K_p	ζ_φ	ω_φ	T_R	ζ_d	ω_d	τ
拟配初值	50	0.7	4	6	0.8	4	0.01
拟配结果	22.8658	1.4529	5.4235	0.3485	1.0952	5.8741	0.0312

使用模式搜索法对该系统拟配计算的失配度值M=2.7786。失配度值的大小表示高阶系统和低阶系统的拟合程度，该值越小说明拟合效果越好。大量的试飞和研究经验表明，M值小于20时拟合结果很好[10]。

滚转角速度对滚转操纵力的高低阶系统响应幅频特性曲线如图1所示，相频特性拟合曲线如图2所示，高低阶系统的阶跃响应拟合曲线如图3所示。

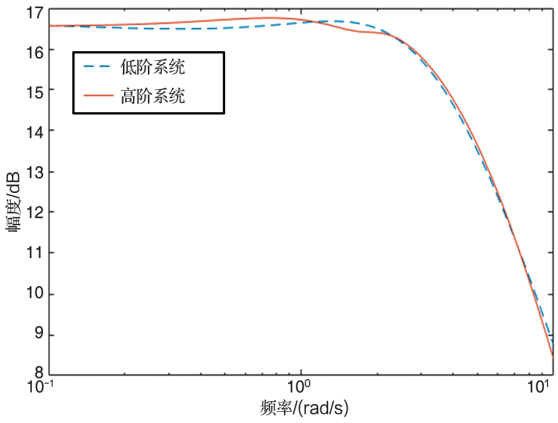

图1 滚转响应幅频特性曲线

Fig. 1 Amplitude-frequency characteristic curve

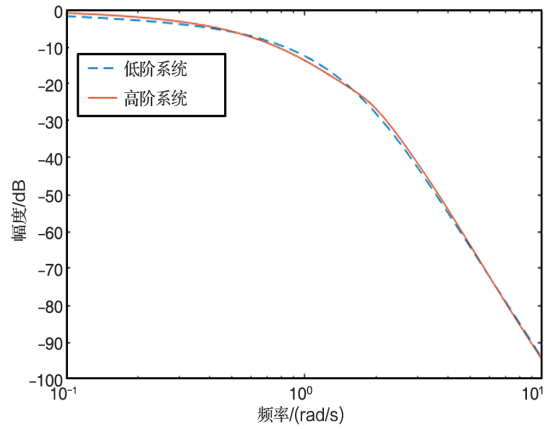

图2 滚转响应相频特性曲线

Fig.2 Phase frequency characteristic curve

根据高阶系统及低阶系统的幅频、相频响应曲线看，低阶系统的拟合曲线与高阶系统的响应曲线重合度很高，表明拟合效果良好。从阶跃响应曲线看，低阶系统的拟合效果良好，且系统是稳定的。

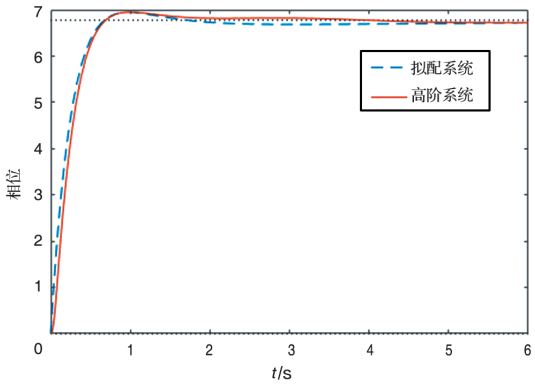

图3 滚转响应阶跃响应拟合曲线

Fig.3 Step response fitting curve of rolling response

2.2 算例二

在实际飞行中，飞机的横航向运动往往不会单独发生，而是复杂的耦合状态。对某型运输机的侧滑角滚转+螺旋+荷兰滚模态进行单拟配，系统高阶传递函数 $G_{高}(s)=A(s)/B(s)$ 为[10]：

$$A(s)=2.2737\times10^{-13}s^{18}+1.1642\times10^{-10}s^{17}+72.119s^{16}+37739s^{15}+1.0984\times10^{7}s^{14}+2.1123\times10^{9}s^{13}+2.9389\times10^{11}s^{12}+3.0368\times10^{13}s^{11}+2.3515\times10^{15}s^{10}+1.3472\times10^{17}s^{9}+5.5327\times10^{18}s^{8}+1.557\times10^{20}s^{7}+2.8142\times10^{21}s^{6}+2.9926\times10^{22}s^{5}+1.6599\times10^{23}s^{4}+4.1302\times10^{23}s^{3}+3.181\times10^{23}s^{2}+7.236\times10^{22}s-1.1982\times10^{21}$$

$$B(s)=s^{19}+540.91s^{18}+1.6271\times10^{5}s^{17}+3.253\times10^{7}s^{16}+4.7414\times10^{9}s^{15}+5.1933\times10^{11}s^{14}+4.3379\times10^{13}s^{13}+2.7522\times10^{15}s^{12}+1.3064\times10^{17}s^{11}+4.5231\times10^{18}s^{10}+1.1028\times10^{20}s^{9}+1.7995\times10^{21}s^{8}+1.844\times10^{22}s^{7}+1.108\times10^{23}s^{6}+3.7574\times10^{23}s^{5}+7.4452\times10^{23}s^{4}+1.0005\times10^{24}s^{3}+6.62\times10^{23}s^{2}+1.5375\times10^{23}s+4.7125\times10^{19}$$

采用的低阶模型为：

$$\frac{\beta}{F}=\frac{K_{\beta}(s+1/T_{\beta1})(s+1/T_{\beta2})(s+1/T_{\beta3})}{(s+1/T_{S})((s+1/T_{R})(s^{2}+2\zeta_{d}\omega_{d}s+\omega_{d}^{2})}e^{-\tau_{\beta}s}$$

式中：T_s 为螺旋模态时间常数；$T_{\beta1}$，$T_{\beta2}$，$T_{\beta3}$ 为分子时间常数，初值设为 $x_0=[50\ 2\ 5\ 0.5\ 50\ 0.4\ 0.6\ 10\ 0.01]^{T}$，拟配结果见表2。

依据模式搜索法拟配结果可知，该型飞机的横航向耦合运动模态的低阶系统模型为：

$$\frac{\beta}{F}=\frac{0.0432(s+1/1.3232)(s+1/10)(s+1/0.0202)}{(s+1/8.0146)((s+1/1.1397)(s^{2}+2\times0.3611\times1.8713s+1.8713^{2})}e^{-0.0424s}$$

表2 横航向耦合运动模型拟配结果

Table 2 Simulation results of coupled lateral-directional motion model

	K_β	$T_{\beta1}$	$T_{\beta2}$	$T_{\beta3}$	T_S	T_R	ζ_d	ω_d	τ
拟配初值	50	2	5	0.5	50	0.4	0.6	10	0.01
拟配结果	0.0432	1.3232	10.000	0.0202	8.0146	1.1397	0.3611	1.8713	0.0424
品质评价结果	–	–	–	–	–	一级	一级	一级	一级

图4~图6是使用模式搜索法得到的低阶系统与高阶系统的幅频、相频及阶跃响应曲线对比。

运用模式搜索法拟配的失配度值 M=8.437，根据失配度及高低阶系统的频率响应曲线可知，模式搜索法得到的低阶等效系统的拟合效果仍良好。各参数飞行品质结果均为一级品质，对于爬升、巡航阶段的飞机横航向飞行品质评价标准在美国军标MIL-F-8785C[11]中的规定，见表3。

表3 飞行品质评价标准

Table 3 Flight quality evaluation criteria

飞行品质等级	T_R	ζ_d	ω_d/(rad/s)	τ/s
一级	≤1.4s	≥0.08	≥0.15	≤0.1
二级	≤3s	≥0.02	≥0.05	≤0.2
三级	≤10s	≥0	–	≤0.25

3 模式搜索法对初值依赖性的研究

对于模式搜索法对初值的依赖性问题，本文在横航向耦合运动模型的基础上进行分析，将飞行品质评价所关注的几个重要指标参数的初值进行调试。由于调试过程中发现，单独调整每个参数初值结果并无变化，因此对几个参数同时进行了调试，初值的选取见表4。

用模式搜索法对某型飞机的横航向耦合运动低阶模型进行仿真拟配，结果见表5。

表4 模式搜索法初值选取

Table 4 Initial value selection of pattern search method

飞行品质指标	T_R	ζ_d	ω_d	τ
初值1	0.4	0.6	10	0.01
初值2	0.8	0.4	4	0.02
初值3	1.6	0.5	8	0.03
初值4	3.2	1.2	16	0.10
初值5	6.4	2.4	32	0.20
初值6	12.8	4.8	64	0.30

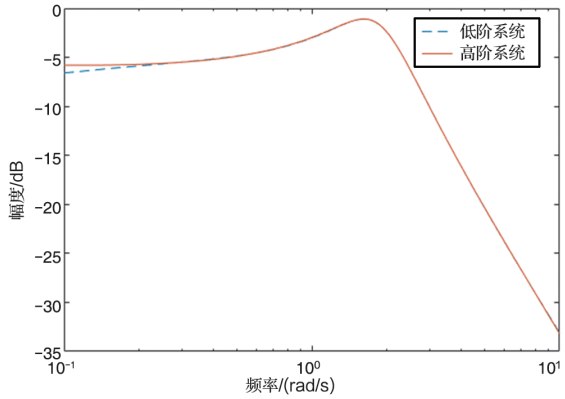

图4 幅频特性曲线

Fig.4 Amplitude-frequency characteristic curve

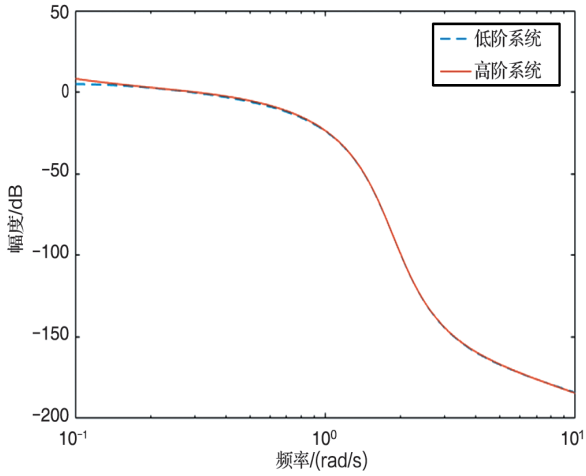

图5 相频特性曲线

Fig.5 Phase frequency characteristic curve

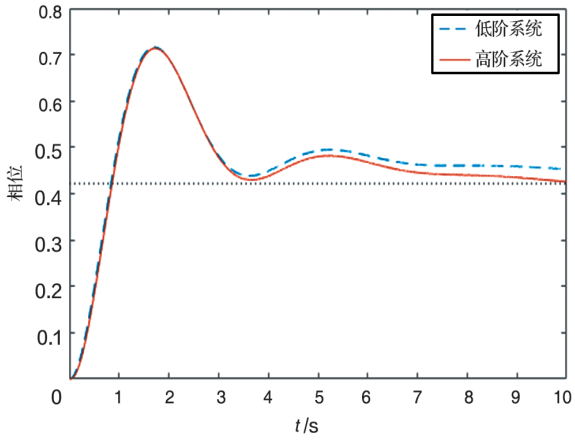

图6 阶跃响应曲线

Fig.6 Step response curve

由表5可以发现，虽然初值逐步递增，但各参数的拟配结果基本没有变化，其中，ζ_d和ω_d不受初值的影响，T_R和τ随着初值的改变发生很小的变化，基本可以忽略，且对飞行品质评价结果没有影响。分析表明初值的选取对模式搜索法基本无影响，所以在无法确定初值时，可采用模式搜索法进行低阶系统拟配。

表5 模式搜索法参数拟配结果

Table 5 Parametric matching results of pattern search method

飞行品质指标	T_R	ζ_d	ω_d	τ
结果1	1.1397	0.3611	1.8713	0.0424
结果2	1.1394	0.3611	1.8713	0.0423
结果3	1.1391	0.3611	1.8713	0.0423
结果4	1.1401	0.3611	1.8713	0.0424
结果5	1.1397	0.3611	1.8713	0.0424
结果6	1.1411	0.3611	1.8713	0.0424
飞行品质等级	一级	一级	一级	一级

4 算法优化

相对于应用较广的最小二乘法，模式搜索法计算速度很慢，特针对该缺点进行优化。模式搜索法的原理如图7所示。

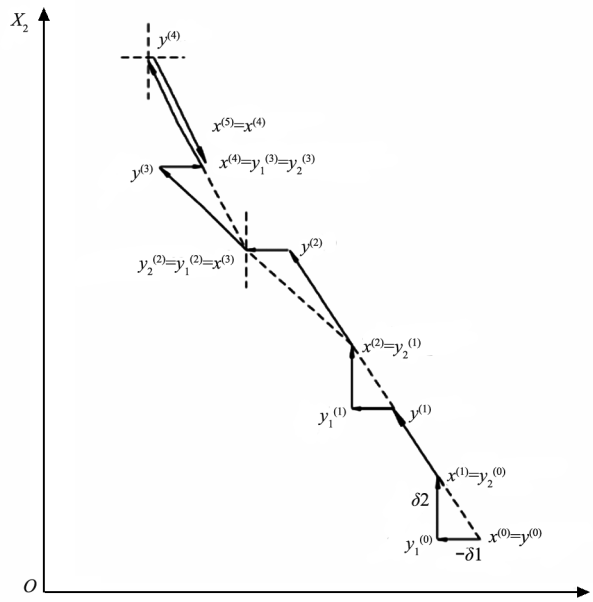

图7 模式搜索法原理

Fig.7 Principle of pattern search method

其运算缓慢主要是由于它是要从某个起点出发，不断地向各个方向做探索尝试，直至找到最小值点。在探索过程中会走大量的弯路甚至回头路。正是这些多走的路使其速度十分缓慢。因此，可在其起点到终点的路经上进行优化，进

而将运算速度提高，fmincon函数通过计算目标函数的梯度信息，找到最速寻优路径。所以在调用patternsearch函数前，先调用fmincon函数进行寻优路径优化，利用fmincon与patternsearch的混合寻优，提高模式搜索法的运算效率。具体调用方式为：

$$[x,\text{exitflag}] = \text{fmincon}(@\text{mismatch},x_0,A,B,A_{eq},B_{eq},lb,\text{ub})$$

式中：x为计算结果输出值；exitflag表示算法的结束条件；@mismatch为需计算的目标函数；x_0为各参数的初始值；A，B，Aeq，Beq代表条件不等式$A*x \leqslant B$和等式$A_{eq}*x = B_{eq}$，将其赋空。lb，ub为未知参数的范围。

以算例一为例，用优化后的算法进行拟配的结果与优化前的拟配结果对比见表6。

表6 模式搜索法优化前后结果对比

Table 6 Comparison of results before and after optimization of pattern search method

	K_p	ζ_ψ	ω_ψ	T_R	ζ_d	ω_d	τ_{ep}	M	运行时间/s
初值	50.0000	0.7000	4.0000	6.0000	0.8000	4.0000	0.0100	–	–
优化前	22.8658	1.4529	5.4235	0.3485	1.0952	5.8741	0.0312	2.7786	3120.4
优化后	23.9646	1.3340	5.1415	0.2883	1.0818	5.1826	0.0328	2.6598	148.84
品质评价	–	–	–	一级	一级	一级	一级	–	–

由表6可知，对模式搜索法进行优化后，运算时间大大缩短，运算效率有了很大的提高。优化后各参数有较小的变化，根据飞行品质评价中低阶等效系统模型的非唯一性[5]及各参数的物理意义，参数的细微变化在合理范围之内。优化后失配度值更小，优化后与优化前的飞行品质评价结果一致。根据失配度值及飞行品质评价结果分析可知，优化后得到的低阶系统拟合效果更好，且该优化是合理、适用的。

5 结论

本文对模式搜索法在飞行品质评价中的应用进行了研究，得到的结论如下：

(1)模式搜索法适用于飞机的飞行品质评价研究，利用模式搜索法进行低阶等效系统拟配效果良好，飞行品质评价结果准确。

(2)模式搜索法对初值的依赖性很小。

(3)模式搜索法的缺点是运算效率慢，通过对算法的优化，大大提高了运算效率，同时失配度更小，拟合效果更优。

AST

参考文献

[1] 胡兆丰. 人机系统和飞行品质[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1993.
Hu Zhaofeng. Man-machine system and flight quality [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1993. (in Chinese)

[2] 李雅静,刘旭华,焦岗. 飞行品质准则与试飞员评述符合性探讨[J]. 航空科学技术,2016,27(05):61-64.
Li Yajing, Liu Xuhua, Jiao Gang. Discussion on the compatibility between flight quality criteria and test pilot review [J]. Aviation Science & Technology, 2016, 27 (05): 61-64. (in Chinese)

[3] 杨俊,张永,肖艳平. 飞机飞行品质规范及评价准则[J]. 中国科技信息,2017(08):16-17.
Yang Jun, Zhang Yong, Xiao Yanping. Aircraft flight quality standards and evaluation criteria [J]. China Science and Technology Information, 2017 (08): 16-17. (in Chinese)

[4] 肖艳平,傅庆庆. 横航向飞行品质评估方法研究综述[J]. 民航学报,2018,2(05):42-45.
Xiao Yanping, Fu Qingqing. Summary of research on evaluation methods of lateral flight quality [J]. Journal of Civil Aviation, 2018,2(05): 42-45. (in Chinese)

[5] 高金源,李陆豫,冯亚昌. 飞机飞行品质[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
Gao Jinyuan, Li Luyu, Feng Yachang. Aircraft flight quality [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)

[6] 田磊,张宏林,杨文凤. 直升机滚转侧滑耦合的响应分析[J]. 航空科学技术,2018,29(01):63-66.
Tian Lei, Zhang Honglin, Yang Wenfeng. Response analysis of helicopter roll-slip coupling [J]. Aviation Science & Technology, 2018, 29 (01): 63-66. (in Chinese)

[7] 徐浩军,刘东亮,孟捷. 基于系统仿真的飞行安全评估理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
Xu Haojun, Liu Dongliang, Meng Jie. Theory and method of

flight safety assessment based on system simulation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)

[8] 钟静,赖于树,吴鸿娟. 基于遗传算法和模式搜索的混合优化方法[J]. 重庆三峡学院学报,2011,27(03):70-73.
Zhong Jing, Lai Yushu, Wu Hongjuan. Hybrid optimization method based on genetic algorithm and patternsearch [J]. Journal of Chongqing Three Gorges University, 2011, 27 (03): 70-73. (in Chinese)

[9] 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.
Tian Haiyan. Research on the middle and low order equivalent system of flight quality [D]. Xi'an：Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2008. (in Chinese)

[10] 张永. 固定翼飞机纵向飞行品质评价指标研究[D]. 广汉：中国民用航空飞行学院,2018.
Zhang Yong. Study on longitudinal flight quality evaluation index of fixed-wing aircraft [D]. Guanghan：China Civil Aviation Flight Academy, 2018.(in Chinese)

[11] MIL-F-8785C. Military specification Flying qualities of piloted airplanes. [S]. ASG,1980.

（责任编辑 皮卫东）

作者简介

肖艳平(1980—)女,博士,教授。主要研究方向:气动弹性力学和飞行力学。
Tel:13668305670
E-mail:8557261@qq.com
傅庆庆(1993—)男,硕士研究生。主要研究方向:飞行运行与安全技术。
Tel:18783870603
E-mail:m18783870603@163.com
潘建(1994—)男,硕士研究生。主要研究方向:飞行运行与安全技术。
Tel:15883672827
E-mail:270760319@qq.com

Research on the Application of Pattern Search Method in Flight Quality Evaluation

Xiao Yanping*, Fu Qingqing, Pan Jian

Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China

Abstract: Flight quality of aircraft is very important to flight safety. Aiming at low-order equivalent system matching in flight quality evaluation, the unknown parameters of low-order model of aircraft lateral and heading motion are identified by pattern search method. The results show that the matching effect is good, and the pattern search method is not affected by the initial value. Aiming at the slow operation of pattern search method, the optimization is carried out, which greatly improves the operation efficiency.

Key Words: flying qualities; lateral-directional; low order equivalence; parameter identification; pattern search method

Received: 2019-05-06； **Revised:** 2019-05-17； **Accepted:** 2019-05-27

Foundation item: General Program of Civil Aviation Flight University of China (J2016-59); Postgraduate Innovation Project of Civil Aviation Flight University of China(x2017−4)

***Corresponding author.Tel. :** 13668305670 **E-mail:** 8557261@qq.com