旅客机座舱综合环境质量评价模型

宁献文 李运泽 王 浚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对旅客机座舱综合环境质量评价问题,提出一种模糊综合评价模型. 其采用分层评价体系,将座舱热环境、座舱空气质量以及座舱声、视、安全环境作为评价模型的第一层,各环境要求的具体评价因素作为评价模型的第二层,应用模糊综合评价方法,将两层因素结合在一起. 在第二层次中,根据对座舱环境的影响,合理区分其重要程度,利用模糊运算得出初级评价结果,利用层次分析法,确定第一层次三方面的权重系数,从而得出座舱综合环境质量的评价结果,并通过求重心的方法解决了最大隶属度不适用的情况. 还通过对具体实例的应用,证实了模型的可行性和合理性.

关 键 词: 旅客机; 座舱环境质量; 模型; 模糊数学; 综合评价

中图分类号: V 245.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)02-0158-05

Comprehensive evaluation model for integrative cabin environment quality of airliner

Ning Xianwen Li Yunze Wang Jun

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To study the evaluation for integrative cabin environment quality of airliner, a comprehensive evaluation model using a stratified evaluation system was proposed. Thermal environments, cabin air quality and acoustical, visual and safe environments were assumed to be the first layer of an evaluation model, while specific evaluation factors were taken as the second layer of the model. Through the method of a fuzzy comprehensive evaluation the factors of the two layers were joined together. According to the effect on the cabin environments, the weight coefficients in the second layer were confirmed and the primary result of evaluation was given by applying the fuzzy operation. The weight coefficients of the first layer were given by applying analytic hierarchy process. Then the result of comprehensive evaluation of cabin environment quality was obtained. By solving barycenter of the result of comprehensive evaluation, the question when the maximum subjection value was not applicable was solved. The feasibility and rationality of the model is substantiated through some specific cases.

Key words: airliner; cabin environment quality; model; fuzzy mathematics; comprehensive evaluation

旅客机座舱是空勤人员、旅客在飞机上工作和生活的场所,舒适的舱内环境不仅能保护人体免受各种有害因素的作用,而且能提高空勤人员的工作效能.

旅客机座舱与一般室内环境相比具有很多明显的不同之处[1],比如:座舱内空间狭小,人员密集,不能随环境任意走动,有增压需求;在飞行中,人们受到多种环境因素的综合影响,包括:低湿度,低气压,气体污染物(臭氧、一氧化碳、二氧化碳和空气细菌等). 因此有必要针对旅客机特殊的座舱环境问题进行全面、深入的研究,提出一种科学的评价方法,用于评价座舱综合环境质量.

收稿日期: 2004-12-20

作者简介: 宁献文(1976-),男,河南商丘人,博士生, ningxianwen@163.com.

旅客机座舱环境涉及许多方面,主要包括热环境、座舱空气质量以及声、视、安全环境等. 热环境,以旅客和机组工作人员为主来研究热舒适条件;座舱空气质量主要针对座舱内有害有毒成份;声、视、安全环境主要指座舱内照明、噪声、座舱压力和微波辐射等.

目前针对旅客机座舱环境的评价都是限于其中的某一方面,然而座舱环境是一个全面、综合的概念,各个方面之间是相互影响、相互联系的,单独对某一方面的评价不能从整体上说明座舱环境的情况.

笔者认为,旅客机座舱综合环境质量评价是一个多层次、多因素的评价问题,其评价方法可采用多层模糊综合评价法. 根据座舱环境种类的属性,将其分成三个不同的评价方面,形成两个评价层次;在第二层次中,根据对座舱环境的影响,合理区分其重要程度;最后,运用层次分析法(AHP, Analytic Hierarchy Process),确定热环境、座舱空气质量和声、视、安全环境各自的权重,进而得出座舱综合环境质量的评价结果.

1　座舱综合环境质量模糊评价

1.1　评价模型结构

旅客机座舱综合环境质量评价模型如图 1 所示,由两层评价体系组成,第一层是从座舱热环境、座舱空气质量和声、视、安全环境来综合评价座舱环境,评价的依据来源于:①第二层的各因素模糊运算结果;②第一层的各方面权值大小.

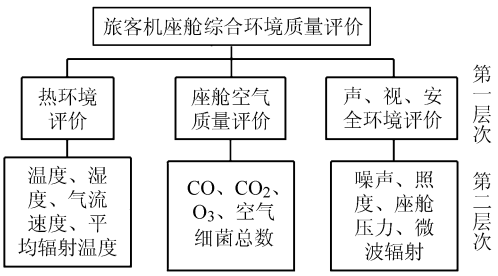


图 1　评价模型基本构造图

由于第一层次着重考虑影响座舱环境的各主要方面,它具有很好的发展性. 可随着社会的进步以及旅客机更新换代而拓展,同时因不涉及到各方面因素的具体指标个数,对各方面的重要程度评价亦可根据社会进步和旅客机发展来合理分析,使座舱综合评价结果更符合于实际.

模型中的第二层分别就座舱环境的某方面进行综合评价,它仅考虑同类因素,不仅使问题处理方便,而且可以采用一些技术成熟的评价方法,充分利用前人的研究成果. 同时,由于是同类指标进行对比,各指标的重要程度确定将更合理,为评价的准确性提供了前提条件. 采用分层模型,不但可降低数学处理的难度,同时使分析过程更符合人类思维方式,可弥补目前常用方法的缺陷.

1.2　评价模型计算方法

设评价对象因素集为

$$U = \{u_1, u_2, \cdots, u_m\}$$

给定评语集合为

$$V = \{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$$

多层次模糊综合评价的一般步骤如下.

1) 划分因素集 U

对因素集 U 作划分,即

$$U = \{U_1, U_2, \cdots, U_N\}$$

式中,$U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \cdots, u_{ik_x}\}$, $i = 1, 2, \cdots, N$. 即 U_i 中含有 k_x 个因素, $\sum_{i=1}^{N} k_x = n$,并满足以下条件:

$$\bigcup_{i=1}^{N} U_i = U \quad U_i \cap U_j = \phi \quad i \neq j$$

2) 初级评价

对于每个 $U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \cdots, U_{ik_x}\}$ 的 k_x 个因素,按初始模型作模糊综合评价. 设 U_i 的因素重要程度模糊子集为 A_i, U_i 的 k_x 个因素的总的评价矩阵为 $\boldsymbol{R}_i$,于是得到

$$A_i \circ \boldsymbol{R}_i = B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \cdots, b_{in}) \quad i = 1, 2, \cdots, N$$

式中,B_i 为 U_i 的单因素评价,实际计算中,"$\circ$"算子采用加权平均算子 $M(\cdot, +)$.

3) 二级评价

设 $U = \{U_1, U_2, \cdots, U_N\}$ 的因素重要程度模糊子集为 A,且 $A = A_1, A_2, \cdots, A_N$,则 U 的总评价矩阵为

$$\boldsymbol{R} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \circ R_1 \\ A_2 \circ R_2 \\ \vdots \\ A_N \circ R_N \end{pmatrix}$$

则得出总的(二级)综合评价结果,即

$$B = A \circ R$$

亦是评价对象因素集 $U = \{u_1, u_2, \cdots, u_m\}$ 的综合评价结果.

由多层次综合评价法得到的结果是一个等级模糊子集 $B = (b_1, b_2, \cdots, b_n)$,对 B 是按照"最大隶属度原则"选择其最大的 b_j 所对应的等级 v_j 作为评判结果,根据参考文献[2],最大隶属度原则的不适用条件为

$$b_m = \max(b_1, b_2, \cdots, b_n) \leqslant 0.5$$

这时,可用文献[2]中的求重心法来进行处理,其重心的坐标式为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}$$

式中,n 为 x 轴上点的个数;$m_i(i=1\sim n)$ 为 i 点的质量;x_i 为质量 m_i 的点所处的位置.

座舱综合环境质量评价时,为方便比较,统一用求重心的方法进行处理,通过 $\bar{x}$ 大小来判断座舱环境的优劣.

2 应用实例

以国内民航具有代表性的三种机型(B757,A300 和国产 Y7)为例,论述综合评价模型的具体应用. 各旅客机座舱卫生调查情况见表 1[3],表中数据为各位置平均值. 对大中型旅客机,测点位置选择 4 点即驾驶舱、客舱的前(前第五排)、中、后位(倒数第五排),小型旅客机选择 2 点即驾驶舱和客舱的中部.

表 1 不同机型旅客机的座舱卫生状况

因素	旅客机机型		
	B757	A300	Y7
空气温度/℃	22.9	25.1	21.8
平均辐射温度/℃	22.9	25.1	21.8
风 速/(m·s^{-1})	0.17	0.15	0.12
相对湿度/%	19.8	15.2	16.4
CO 浓度/10^{-6}	1.93	1.42	1.36
CO_2 浓度/10^{-6}	1 634	1 817	1 310
O_3 浓度/10^{-9}	53	57	66
空气细菌总数/(cfu·m^{-3})	620	798	4 750
噪声/dB	74.2	76.2	84.9
照度/lx	227	177	195
座舱压力/kPa	86.3	83.1	86.7
微波/(μW·cm^{-2})	0.67	0.47	0.77

2.1 划分因素集

根据文献[4],选取具有代表性的 12 个因素作为评价旅客机座舱环境质量的因素. 将因素集划分为三个不同的评价方面,即 $U=\{U_1,U_2,U_3\}$,U_1、U_2 和 U_3 分别代表热环境、空气质量和声、视、安全环境,分别包括四个因素,具体如图 1 所示.

座舱综合环境质量评价结果借鉴地面分级方法分为优、可、差三级进行评价.

2.2 座舱环境初级评价

2.2.1 隶属度函数的确定

正确地确定隶属函数是应用模糊综合评价的基础. 由独立分布情形下的中心极限定理可知,对于独立同分布的随机变量序列 $X_1,X_2,\cdots X_n$,不论 $X_1,X_2,\cdots X_n$ 原来服从什么分布,当 n 足够大时,总可以近似认为其服从正态分布. 在数理统计中,常用的数理统计量均具有渐进正态性,故本文中采用的隶属函数为正态分布型,其形式如下[2].

中间对称型的正态分布

$$\mu(x)=\mathrm{e}^{-k(x-a)^2} \quad k>0$$

戒上型的降半正态分布

$$\mu(x)=\begin{cases}1 & x\leqslant a\\ \mathrm{e}^{-k(x-a)^2} & x>a\end{cases} \quad k>0$$

戒下型的升半正态分布

$$\mu(x)=\begin{cases}0 & x\leqslant a\\ 1-\mathrm{e}^{-k(x-a)^2} & x>a\end{cases} \quad k>0$$

2.2.2 座舱热环境评价

热环境因素包括空气温度、湿度、气流速度、平均辐射温度、人体活动量和衣着情况. 旅客机座舱环境内旅客处于静坐状态,可认为人体活动量相同;表 1 中所列三种机型的数据是在同一段时间内测定的,亦可认为衣着情况也基本一致.

热环境评价的指标有预测吹风感不满意百分数 PD 和预测热感觉指标 TS 等. 评价时为避免单个指标的片面性,选取这两项指标作为等级划分的元素,进行综合评价. 等级划分建议值见表 2,PD 和 TS 的详细计算见文献[5,6].

表 2 热环境单项指标等级划分建议值

指标	优	可	差
PD	≤15%	≤30%	>30%
TS	[3.5,4.5]	[2.5,3.5]或[4.5,5.5]	>5.5 或<2.5

根据隶属度函数可得三种机型座舱热环境评价矩阵分别为

$$\boldsymbol{R}_{1\mathrm{B757}}=\begin{pmatrix}0.010\,4 & 0.470\,6 & 0.519\,0\\ 1 & 0 & 0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{1\mathrm{A300}}=\begin{pmatrix}0.260\,3 & 0.418\,0 & 0.321\,7\\ 1 & 0 & 0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{1\mathrm{Y7}}=\begin{pmatrix}0.001\,3 & 0.339\,4 & 0.659\,3\\ 1 & 0 & 0\end{pmatrix}$$

评价矩阵中,第一行和第二行分别是针对 PD 和 TS 的模糊运算结果,上述两种因素均是关于座舱环境热舒适性的综合指标,因此可认为具有相等的权重系数,即 $A_1=(0.5,0.5)$,于是可求得三种旅客机热环境评价结果分别为

$$\boldsymbol{B}_{1\mathrm{B757}}=(0.505\,2 \quad 0.235\,3 \quad 0.259\,5)$$

$$\boldsymbol{B}_{1\mathrm{A300}}=(0.630\,1 \quad 0.209\,0 \quad 0.160\,9)$$

$$\boldsymbol{B}_{1\mathrm{Y7}}=(0.500\,7 \quad 0.169\,7 \quad 0.329\,6)$$

2.2.3 座舱空气质量评价

根据文献[4],选取对座舱空气质量影响较

大的 CO、CO_2、O_3 和空气细菌总数作为空气质量的评价因素集,其对应分级如表 3.

表 3　空气质量单项指标的分级方法

级别	$CO/10^{-6}$	$CO_2/10^{-6}$	$O_3/10^{-9}$	空气细菌总数/(cfu·m^{-3})
优	≤6	≤900	≤60	≤1 800
可	≤10	≤1 500	≤100	≤3 000
差	>10	>1 500	>100	>3 000

根据隶属度函数可求出三种机型空气质量评价矩阵,其中第一行是 CO_2 的模糊运算结果,第二行是 CO,第三行是 O_3,最后一行是空气细菌总数.

$$\boldsymbol{R}_{2B757}=\begin{pmatrix}0 & 0.253\,9 & 0.746\,1\\ 0.998\,3 & 0.001\,7 & 0\\ 0.731\,8 & 0.268\,2 & 0\\ 0.997\,8 & 0.002\,2 & 0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{2A300}=\begin{pmatrix}0 & 0.006\,1 & 0.993\,9\\ 0.999\,4 & 0.000\,6 & 0\\ 0.607\,2 & 0.392\,8 & 0\\ 0.992\,9 & 0.007\,1 & 0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{2Y7}=\begin{pmatrix}0.010\,9 & 0.806\,3 & 0.182\,8\\ 0.999\,5 & 0.000\,5 & 0\\ 0.290\,6 & 0.709\,4 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}$$

根据文献[7,8]的问卷调查进行统计分析得出权重系数 $A_2=(0.3,0.2,0.2,0.3)$,可求得三种旅客机空气质量评价结果分别为

$$\boldsymbol{B}_{2B757}=(0.645\,4\quad 0.130\,8\quad 0.223\,8)$$
$$\boldsymbol{B}_{2A300}=(0.619\,2\quad 0.082\,6\quad 0.298\,2)$$
$$\boldsymbol{B}_{2Y7}=(0.261\,3\quad 0.383\,9\quad 0.354\,8)$$

2.2.4　座舱声、视、安全环境评价

由图 1,声、视、安全环境评价的因素包括噪声、照度、座舱压力和微波辐射. 根据文献[4],座舱声、视、安全环境对应的分级表如表 4 所示.

表 4　声、视、安全环境单项指标的分级方法

级别	噪声/dB	照度/lx	座舱压力/kPa	微波辐射/(μW·cm^{-2})
优	≤48	[240,300]	[84.7,89.9]	≤6
可	≤80	[200,240]	[79.5,84.7]	≤10
差	>80	<200 或>300	<79.5 或>89.9	>10

根据隶属度函数求出三种机型各因素的隶属度评价矩阵,其中第一行为噪声的模糊运算结果,第二行为微波辐射,第三行为照度,第四行为座舱压力.

$$\boldsymbol{R}_{3B757}=\begin{pmatrix}0.003\,7 & 0.694 & 0.302\,3\\ 1 & 0 & 0\\ 0.244\,7 & 0.603 & 0.152\,3\\ 0.38 & 0.62 & 0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{3A300}=\begin{pmatrix}0.002\,2 & 0.631\,3 & 0.366\,5\\ 1 & 0 & 0\\ 0.013\,2 & 0.049\,5 & 0.937\,3\\ 0.329\,5 & 0.670\,5 & 0\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{3Y7}=\begin{pmatrix}0.000\,2 & 0.325\,8 & 0.674\\ 1 & 0 & 0\\ 0.094 & 0.342\,2 & 0.563\,8\\ 0.421\,2 & 0.578\,8 & 0\end{pmatrix}$$

根据文献[8,9]的问卷调查进行统计分析得出权重系数 $A_3=(0.3,0.2,0.2,0.3)$,可得三种旅客机声、视、安全环境评价结果分别为

$$\boldsymbol{B}_{3B757}=(0.364\,1\quad 0.514\,8\quad 0.121\,1)$$
$$\boldsymbol{B}_{3A300}=(0.302\,2\quad 0.400\,4\quad 0.297\,4)$$
$$\boldsymbol{B}_{3Y7}=(0.345\,2\quad 0.339\,8\quad 0.315\,0)$$

2.3　座舱环境综合评价

将前面计算得出的热环境评价、空气质量评价和声、视、安全环境评价综合在一起,构成总评价矩阵;并运用层次分析法[10],确定总权重系数 $A=(0.352\,7,0.294\,7,0.352\,6)$. 通过模糊运算,得出三种旅客机最终评价结果分别为

$$\boldsymbol{B}_{B757}=(0.496\,8\quad 0.303\,1\quad 0.200\,1)$$
$$\boldsymbol{B}_{A300}=(0.496\,8\quad 0.233\,4\quad 0.269\,8)$$
$$\boldsymbol{B}_{Y7}=(0.375\,3\quad 0.292\,8\quad 0.331\,9)$$

由结果可看出,其不符合“最大隶属度原则”. 为便于比较,通过求重心法得出三种机型的重心 $\bar{x}$,计算中“1”表示“优”,“2”表示“可”,“3”表示“差”,则所求的 $\bar{x}$ 靠近“1”、“2”、“3”中的哪个值,座舱环境就接近“优”、“可”、“差”,计算结果如下:

$$\bar{x}_{B757}=1.703\,3,\bar{x}_{A300}=1.773,\bar{x}_{Y7}=1.956\,6$$

从结果可以看出,B757 座舱综合环境质量最优,其次是 A300,最差的是国产 Y7,与参考文献[4]的结论吻合.

3　结 束 语

旅客机座舱综合环境质量具有多方面的属性,对其评价必须综合考虑这些属性. 文中所给出的座舱综合环境质量评价模型就是针对此问题而提出的一种新方法. 并利用此模型对三种典型的旅客机座舱环境进行了综合评价,评价结果与实际情况吻合,证实了该模型的可行性和合理性.

参考文献 (**References**)

[1] 寿荣中,何慧姗. 飞行器环境控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004
Shou Rongzhong, He Huishan. Environmental control of aircraft [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004(in Chinese)

[2] 张 跃.模糊数学理论及其应用[M],北京:煤炭工业出版社,1992
Zhang Yue. The theory and application of fuzzy mathematics [M]. Beijing: China Coal Industry Press, 1992(in Chinese)
[3] 李六亿,葛盛秋,金兰军.旅客运输机座舱卫生学现况调查[J],航天医学与医学工程,1996,4:130~133
Li Liuyi, Ge Shengqiu, Jin Lanjun. Hygienic investigation of passenger aircraft cabin in china[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 1996,4:130~133(in Chinese)
[4] MH7005-95,旅客运输机和直升机座舱卫生标准[S]
MH 7005-95,Cabin hygienic standard of commercial aircraft and helicopter[S](in Chinese)
[5] 袁修干,庄达民. 人机工程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002
Yuan Xiugan, Zhuang Damin. Man-machine engineering[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002(in Chinese)
[6] Fanger P O. Thermal comfort [M]. New York: Mc-Graw Hill, 1972
[7] Rankin W L, Space D R, Nagda N L. Passenger comfort and the effect of air quality[A]. In: Nagda N L, ed. Air Quality and Comfort in Airliner Cabins, ASTM STP 1393. American Society for Testing and Materials[C]. West Conshocken, PA, 2000
[8] Lee S C, Poon C S, Li X D, *et al*. Questionnaire survey to evaluate the health and comfort of cabin crew[A]. In:Nagda N L, ed. Air Quality and comfort in Airliner Cabins, ASTM STP 1393. American Society for Testing and Materials[C]. West Conshocken, PA, 2000
[9] Mark Pierce W, Jolanda N. Air quality on commercial aircraft [J]. ASHRAE, 1999, 9:26~32
[10] 赵焕臣.层次分析法[M]. 北京:科学出版社,1985
Zhao Huanchen. Analytic hierarchy process[M]. Beijing: Science Press, 1985(in Chinese)

(上接第147页)

4 结束语

本文建立了基于质心逆动力学的开环指令和基于动态逆的反馈补偿的混合逆控制方法,设计了机动轨迹跟踪器,并通过"*S*"形机动和 *Herbst* 机动等战术动作进行了仿真验证.由仿真结果可以证明本文采用的控制律结构和算法是可行的.在整个轨迹跟踪器系统中,开环指令主要消除大幅误差,抵消非线性特性,加入闭环反馈进行误差补偿后进一步提高了控制的精度.从仿真曲线可以看出,实际结果和期望指令之间的延迟特性符合轨迹回路带宽较小的飞行特性.如果还需精确消除稳态误差,可在控制格式中添加积分环节来保证,但引入积分反馈将引起系统的稳定裕度下降,所以应适当折衷.另外,仿真表明,本文设计的算法稳定,实时性强,能适应机载实现要求,既可应用于常规机动,也适用于过失速机动.

参考文献 (**References**)

[1] 邱晓红.战术任务综合飞行管理系统[D].北京:北京航空航天大学无人驾驶飞行器设计研究所, 1995
Qiu Xiaohong. Research on core technology for tactical mission integrated flight management system. [D]. Beijing:Research Institute of Unmanned Aerial Vehicle, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1995(in Chinese)
[2] 王忠俊. 非线性飞行控制方法研究概述[J]. 飞行力学, 1995, 13(3):24~28
Wang Zhongjun. An introduction to nonlinear flight control[J]. Flight Dynamics, 1995, 13(3):24~28(in Chinese)
[3] 范子强. 过失速机动飞机的鲁棒非线性控制律设计及仿真[D]. 北京:北京航空航天大学航空科学与工程学院, 1999
Fan Ziqiang. Robust, nonlinear control design and simulation of post-stall maneuvering aircraft[D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Technology,Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999(in Chinese)
[4] Zhao Y Y. Concepts of least square optimal linearization[R]. AIAA-92-4554-CP, 1992
[5] 张曙光,方振平.反馈线性化飞行控制的应用问题研究[J].航空学报,1998,19(2):142~146
Zhang Shuguang, Fang Zhenping, Research on application problems on linearization-via-feedback flight control technique[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998,19(2):142~146(in Chinese)
[6] 张曙光,方振平,王 勇. 飞行逆动力学的应用[J].北京航空航天大学学报, 1998,19(2):142~146
Zhang Shuguang, Fang Zhenping, Wang Yong. Application of inverse flight dynamics[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 19(2):142~146(in Chinese)
[7] 张曙光, 孙金标. 最佳过失速机动研究[J]. 航空学报, 2001,22(4):289~292
Zhang Shuguang, Sun Jinbiao. Research on optimal post stall maneuvers[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(4) : 289~292(in Chinese)
[8] Ostroff A J, Bacon B J. Enhanced NDI strategies for reconfigurable flight control[A]. In:Proceedings of the American Control Conference[C]. Anchorage, 2002.3631~3636