

# 基于遗传算法的飞机俯仰控制 参数优化设计及重构

何 龙<sup>1</sup>, 刘晓荣<sup>2</sup>, 耿 宏<sup>2</sup>

(1. 成都航空职业技术学院, 成都 610100; 2. 中国民航大学, 天津 300300)

**摘要:** 遗传算法不受问题性质(如连续性, 可微性)的限制, 能够处理传统优化算法难以解决的复杂问题, 故近年来在控制参数优化方面得到了广泛的应用; 但算法中, 交叉概率与变异概率的选择没有给出通用标准, 通过多种交叉概率与变异概率组合的优化结果比较确定合适的交叉概率与变异概率, 然后从几种控制系统常用性能指标中选择最合适的一种做为适应度函数, 优化得无故障时控制参数, 按照重构后系统开环传递函数保持不变, 即系统闭环传递函数极点不发生变化的原则, 由升降舵损伤程度和无损伤时控制参数可得重构后的控制参数; 由仿真实验可得, 此方法能够较快较精确地确定控制参数, 系统无超调, 控制效果良好, 重构后, 系统性能能够保持不变, 达到良好的重构效果。

**关键词:** 遗传算法; 交叉概率; 变异概率; 适应度函数; 升降舵

## Genetic Algorithm Based Aircraft Pitch Control Parameter Optimization Design and Reconfiguration

He Long<sup>1</sup>, Liu Xiaorong<sup>2</sup>, Geng Hong<sup>2</sup>

(1. Chengdu Aeronautic Vocational and Technical College, Chengdu 610100, China;

2. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Genetic algorithms are not limited by the nature of the problems (such as continuity, differentiability), can handle complex problems that traditional optimization algorithms can't solve. It has been widely applied in control parameters optimization in recent years. But there is not a common standard to choose its crossover probability and mutation probability, by means of the comparison between different groups of optimization results by different crossover probability and mutation probability to determine the appropriate crossover probability and mutation probability, and select the most suitable one from several control systems commonly used performance indicators as the fitness function, get the control parameters when there's no fault on the aircraft. When the system open-loop transfer function remains unchanged, the system closed-loop transfer function poles does not change, by the elevator damage degree and control parameters when there's no damage control parameters after reconstructed can be obtained. The simulation result shows that the system using the method based on is genetic algorithms of no overshoot. As well, the settle time are shorter. The better control effect than the traditional design methods. after reconstruction, the system performance can be maintained constant, the method achieves a good effect on the reconstruction

**Key words:** genetic algorithms; crossover probability; mutation probability; fitness function; elevator.

## 0 引言

PID控制在飞行控制中应用最为广泛, 其有成熟的理论基础和实际应用, 控制效果很好, 故控制器采用PID控制结构, 但传统PID参数整定方法, 需要大量经验, 费时且不精确<sup>[1]</sup>, 因此, 将控制器参数调节问题转化为无约束条件下极小值的寻优问题, 并利用遗传算法进行优化。遗传算法是一种成熟的具有高鲁棒性和广泛适用性的全局优化方法。近年来, 遗传算法在控制领域的PID控制、线性及非线性控制、最优控制、鲁棒性、自适应控制、滑模及模糊逻辑等方面均得到了广泛的应用<sup>[2-3]</sup>, 在飞行控制律设计中也得到大量应用<sup>[4-5]</sup>。但算法中, 交叉概率与变异概率的选择没有给出一个通用标准, 通过多个交叉概率与变异概率组合的优化结果相比较确定合适的交叉概率与变异概率, 从几种常用控制系统性能指标中选择最合适的

一种做为适应度函数, 得无故障时控制参数, 按照重构后系统开环传递函数保持不变, 即系统闭环传递函数极点不发生变化的原则, 由升降舵损伤程度和无损伤时控制参数可得重构后的控制参数。由仿真结果得, 此方法能够较快确定控制参数, 且控制效果良好, 重构后, 系统性能能够保持不变, 达到良好的重构效果。

## 1 系统模型

飞机俯仰角控制系统框图如图1所示<sup>[6]</sup>。

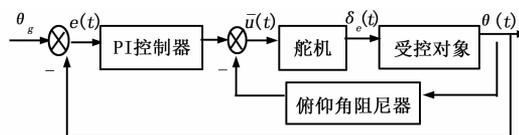


图1 俯仰角控制系统框图

其中:  $\theta_g$  为俯仰角输入指令,  $e(t)$  为偏差信号,  $\bar{u}(t)$  为舵机输入,  $\delta_e(t)$  为舵机输出即受控对象输入,  $\theta(t)$  为飞机俯仰角,

收稿日期: 2013-10-12; 修回日期: 2013-12-25。

作者简介: 何 龙(1973-), 男, 四川遂宁市人, 讲师, 学士, 主要从事飞行控制仿真方向的研究。

舵机传递函数:  $G_{\delta_e}(s) = -\frac{10}{s+10}$ 。

1.1 受控对象气动模型

以飞机速度  $V$ 、俯仰角  $\theta$ 、迎角  $\alpha$  和俯仰角速率  $q$  为状态变量, 升降舵偏  $\delta_e$  为控制输入, 俯仰角  $\theta$  为输出, 系统状态方程和输出方程为:

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$Y = [0 \ 0 \ 0 \ 1]X$$

其中:  $X = [V \ \alpha \ q \ \theta]^T$ ,  $U = \delta_e$ ,  $A$ 、 $B$  与飞机的飞行状态和气动参数有关。某机型飞机当速度  $V=250$  m/s, 高度  $H=7\ 500$  m 时, 状态矩阵  $A$  和控制输入矩阵  $B$  分别为<sup>[6]</sup>:

$$A = \begin{bmatrix} -0.020\ 4 & -2.644 & 0 & -9.6 \\ -0.000\ 6 & -1.2 & 1 & 0 \\ 0.02 & -52.4 & -14.2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -1.4 \\ -0.36 \\ -23.2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

。以  $\delta_e$  为输入,  $\theta$  为输出的传递函数为:

$$\frac{\theta(s)}{\delta_e(s)} = -\frac{23.2s^2 + 9.477s + 0.204\ 9}{s^4 + 15.42s^3 + 69.75s^2 + 1.639s + 0.532\ 2}$$

升降舵损伤表现为飞机的操作性变差, 受控对象矩阵方程中的状态矩阵不会改变, 控制输入矩阵中的系数会相应减小, 状态方程变为<sup>[7]</sup>:

$$\dot{X} = AX + B(1-\gamma)U$$

其中:  $\gamma$  表示升降舵的损伤程度。对应的以  $\delta_e$  为输入,  $\theta$  为输出的传递函数变为:

$$\frac{\theta(s)}{\delta_e(s)} = -\frac{(1-\gamma)(23.2s^2 + 9.477s + 0.204\ 9)}{s^4 + 15.42s^3 + 69.75s^2 + 1.639s + 0.532\ 2}$$

1.2 控制律设计

如图 1 所示, 飞机俯仰角控制律结构为:  $\delta_e = Kp \times (\theta_g - \theta) + Ki \times \int (\theta_g - \theta) dt + Kq \times q$ , 其中, 比例项  $Kp \times (\theta_g - \theta)$  作为主控项控制权限最大, 比例系数越大系统响应越快, 但如果超过一定值以后, 系统会不稳定, 积分项  $Ki \times \int (\theta_g - \theta) dt$  一方面加快姿态调整的速度; 另一方面自动配平升降舵, 消除系统的稳态误差, 俯仰角速率反馈项  $Kq \times q$  增加俯仰角运动阻尼, 增强系统的稳定性。

2 基于遗传算法的控制参数优化

2.1 待优化参数

待优化参数为控制律中的比例项系数  $Kp$ , 积分项系数  $Ki$ , 及俯仰角速率反馈项系数  $Kq$ , 传统参数调整方法, 需要根据系统的频域和时域性能, 逐个调整控制参数, 用遗传算法优化控制参数可以同时 3 个控制参数进行整体寻优, 减少参数调整时间。

2.2 优化过程实现

2.2.1 适应度函数选取

遗传算法中, 根据群体中每一个个体的适应度函数值评价个体的优劣。对于控制参数取值优劣, 可由偏差积分指标衡量, 常用偏差积分指标为<sup>[8]</sup>:  $ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$ ;  $IAE = \int_0^{\infty} |$

$e(t)| dt$ ;  $ITAE = \int_0^{\infty} t | e(t) | dt$ ; 采用不同的偏差积分指标,

意味着估计整个过渡过程优良程度的侧重点不同, 如  $ISE$  着重于抑制过渡过程中的大偏差, 而  $ITAE$  则着重于过渡时间, 下面分别以 3 种偏差积分指标作为优化目标函数, 得到控制参数, 再用此组控制参数得出这 3 种偏差积分值, 结果如下:

表 1 按 3 种适应度函数优化后各偏差积分的值

偏差积分 适应度函数	ISE	IAE	ITAE
ISE	0.064 6	0.228 7	0.708 5
IAE	0.529 6	0.203 1	0.705
ITAE	0.113 3	0.231 3	0.249 8

从表 1 可以看出, 以那个指标作为适应度函数所得控制参数, 使该系统的此偏差积分指标最小, 由于控制参数改变后,  $IAE$  值的变化不大, 反应不够灵敏, 因此从  $ITAE$  与  $ISE$  中选择, 从时域响应曲线可得, 以  $ISE$  为适应度函数进行优化后, 系统响应时间长, 且有小幅震荡, 以  $ITAE$  为适应度函数进行优化后, 系统响应较好, 故选择  $ITAE$  作为适应度函数  $J = \int_0^{\infty} t | e(t) | dt$ 。

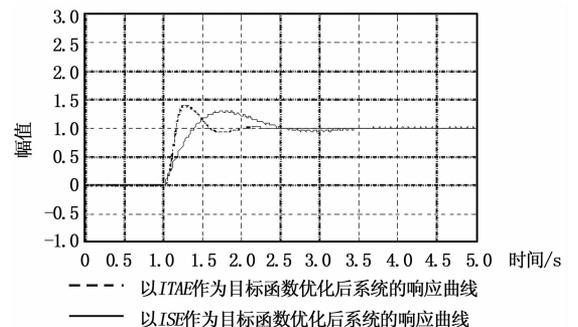


图 2 分别以  $ITAE$  与  $ISE$  作为目标函数优化后的系统响应曲线对比

2.2.2 控制参数优化过程设计

遗传算法抽象于生物体进化过程, 通过仿真模拟自然选择和遗传机制, 形成一种具有“生成+检验”特征的搜索算法。遗传算法以编码空间代替问题的参数空间, 以适应度函数为评价依据, 以编码群体为进化基础, 以对群体中个体的遗传操作实现选择和遗传机制。建立起一个迭代过程。在这一过程中, 通过随机重组编码重要基因, 使新一代位串集合优于老一代位串集合, 群体的个体不断进化, 逐渐接近最优解, 最终达到求解问题的目的<sup>[9]</sup>。控制参数优化流程如图 3 所示。

2.3 优化结果

由于遗传算法具有一定的随机性, 每次得到的结果不一定相同, 因此运用多次运行结果, 构成样本, 可以通过研究样本的一些统计特性来确定遗传算法较合适的交叉概率与变异概率, 并采用样本的平均值作为优化结果, 在遗传算法交叉概率与变异概率常用范围中, 选择几种组合进行优化, 得出多组优化结果, 计算出控制参数与适应度函数值的平均值及离散系数, 如表 2 所示。

表 2 按照不同交叉率与变异率优化所得控制参数及其适应度函数的均值与离散系数

交叉率	变异率	$K_p$ 均值 $M_{kp}$	$K_p$ 离散系数 $LS_{kp}$	$K_i$ 均值 $M_{ki}$	$K_i$ 离散系数 $LS_{ki}$	$K_q$ 均值 $M_{kq}$	$K_q$ 离散系数 $LS_{kq}$	参数综合离散系数 $LS_0$	$J$ 均值 $M_j$	$J$ 离散系数 $LS_j$	控制参数与 $J$ 综合离散系数 $LS_1$
0.7	0.01	55.078 1	0.186 1	3.737 3	0.353 7	6.57	0.289 1	0.493 4	0.422 8	0.127 7	0.509 6
	0.02	50.182 4	0.168 3	3.452 5	0.300 3	6.241 4	0.398 1	0.526 4	0.438 2	0.152 3	0.548
	0.03	54.490 3	0.073 2	3.606 3	0.200 6	6.341 7	0.525 5	0.567 3	0.397 5	0.155 9	0.588 4
	0.04	55.716 1	0.071 1	3.575 7	0.182 8	5.990 8	0.230 1	0.302 4	0.380 4	0.049 6	0.306 5
	0.05	54.928 2	0.080 3	3.276 7	0.160 4	6.492 2	0.295 5	0.345 8	0.385	0.098 1	0.359 5
0.8	0.01	55.995	0.126 4	3.810 1	0.300 9	6.618 9	0.289 6	0.436 4	0.410 9	0.083 2	0.444 2
	0.02	54.973 7	54.973 7	3.980 2	0.379 1	6.677 3	0.313 9	0.507 9	0.430 8	0.145 0	0.528 2
	0.03	53.496 8	0.102 6	3.535 8	0.190 1	6.264 8	0.391 4	0.447 1	0.409 1	0.127 3	0.464 9
	0.04	54.241 5	0.071 6	3.587 5	0.257 0	5.944 4	0.268 6	0.378 6	0.391	0.049 6	0.381 9
	0.05	53.497 8	0.051 2	3.423 2	0.209 0	6.082 7	0.191 9	0.288 3	0.395 4	0.067 2	0.296 1
0.9	0.01	54.420 5	0.183 7	3.755 3	0.375 2	6.507 2	0.328 6	0.531 6	0.429 4	0.130 1	0.547 3
	0.02	57.710 2	0.090 4	3.573 8	0.269 5	7.185 2	0.231 6	0.366 7	0.406	0.102 9	0.380 9
	0.03	53.599 3	0.121 8	3.257 9	0.291 6	6.987	0.483 9	0.578	0.431 7	0.225 3	0.620 4
	0.04	56.038	0.081 7	3.485 9	0.320 6	7.225	0.484 2	0.586 5	0.419 8	0.186 0	0.615 3
	0.05	54.287 9	0.101 7	3.321 8	0.232 3	6.783 7	0.303 6	0.395 6	0.413 9	0.130 4	0.416 6

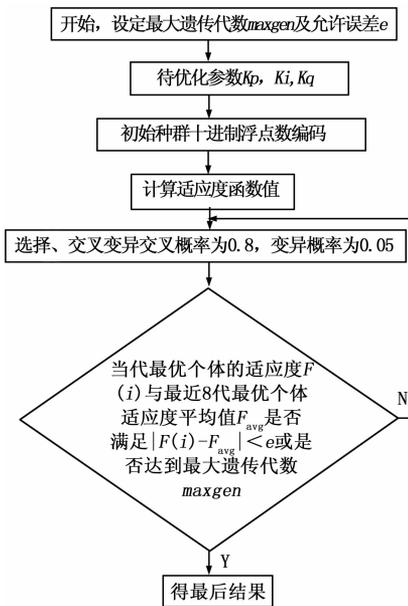


图 3 遗传算法优化流程图

表 2 中各控制参数离散系数体现了不同交叉概率与变异概率下控制参数的离散程度 ( $LS = \sigma/M$ ,  $\sigma$  为标准差,  $M$  为平均值), 控制参数综合离散系数能够同时反映 3 个控制参数的离散程度 ( $LS_0 = \sqrt{LS_{kp}^2 + LS_{ki}^2 + LS_{kq}^2}$ ),  $J$  离散系数反映了不同交叉概率与变异概率下适应度函数  $J$  的离散程度, 控制参数与  $J$  的综合离散系数同时反映了控制参数的离散程度与相应适应度函数的离散程度 ( $LS_1 = \sqrt{LS_0^2 + LS_j^2}$ ), 综合考虑控制参数的离散程度与适应度函数的离散程度, 及适应度函数值, 优化结果最好的一组为: 交叉概率 0.8, 变异概率 0.05; 因此以此组优化结果的平均值作为最终优化结果。

### 3 重构

设没有故障时, 以升降舵偏为输入, 俯仰角为输出的传递函数为  $G_0(s)$ 。优化后控制参数为  $K_{p0}, K_{i0}, K_{q0}$ 。考虑控制

器以后系统开环函数为:

$$G_{bai0}(s) = \frac{K_{i0}/K_{p0} + s}{s} \times \frac{10}{s+10} \times G_0(s) \times K_{p0} \quad \text{假设升}$$

$$1 + \frac{10}{s+10} \times G_0(s) \times K_{q0} s$$

降舵损伤  $\gamma$ , 控制参数重构后为  $K_p, K_i, K_q$ , 系统开环传函变为:

$$G_{bai}(s) = \frac{K_i/K_p + s}{s} \times \frac{10}{s+10} \times G_0(s) \times (1-\gamma) \times K_p$$

$$1 + \frac{10}{s+10} \times G_0(s) \times (1-\gamma) \times K_q s$$

要使系统开环传递函数保持不变  $G_{bai}(s) = G_{bai0}(s)$ , 即系统闭环传函极点不发生变化, 需使  $(1-\gamma) \times K_q = K_{q0}$ ,  $(1-\gamma) \times K_p = K_{p0}$ ,  $K_i/K_p = K_{i0}/K_{p0}$ , 因此由升降舵损伤程度和无损伤时控制参数可得重构后的控制参数。

### 4 仿真结果

当升降舵损伤 40%, 60%, 80% 时, 由第 4 节可得重构后控制参数如表 3 所示。

表 3 重构后控制参数

控制参数 损伤程度	$K_p$	$K_i$	$K_q$
40%	89.163	5.705 3	10.137 8
60%	133.744 5	8.558	15.206 8
80%	267.489	17.116	30.413 5

下面给出飞机升降舵损伤 40%, 60%, 80% 及重构后即无故障时俯仰角的阶跃响应过渡过程, 仿真曲线图如图 4 所示。

从仿真曲线可知, 方向舵损伤程度越大, 其阶跃响应过渡时间越长, 经过重构后, 系统能够保持原有的动态性能, 达到了预期的重构控制效果。

(下转第 1789 页)

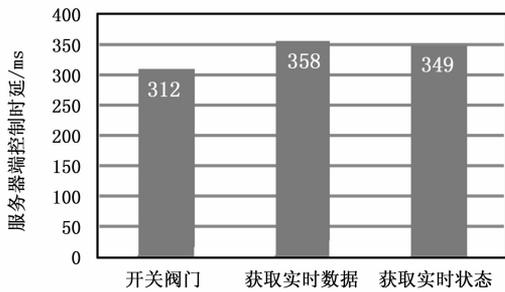


图 4 服务器端测试结果

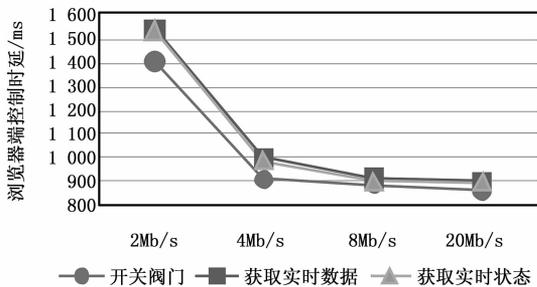
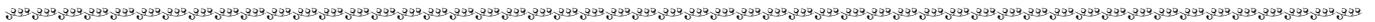


图 5 浏览器端测试结果

制的方法, 以及远程对设备进行升级等功能, 进一步完善环保物联网在监测、监控和监管中的功能。



(上接第 1782 页)

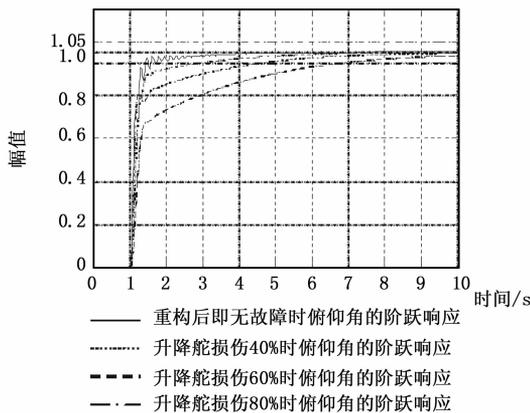


图 4 升降舵损伤 40%, 60%, 80% 及重构后即无故障时俯仰角的阶跃响应过渡曲线

### 5 结束语

运用遗传算法优化飞行控制参数, 通过多组比较的方式确定合适的交叉概率与变异概率, 确定了较适应度函数, 得无故障参数, 能够较快确定控制参数, 提高设计精度, 按照重构后系统开环传递函数保持不变, 即系统闭环传递函数极点不发生变化的原则, 由升降舵损伤程度和无损伤时控制参数可得重构后的

### 参考文献:

- [1] 张同文. 包头市污染源自动监控系统在环境管理中的应用 [J]. 科技创新导报, 2012, (7): 46-48.
- [2] 徐 敏, 孙海林. 从“数字环保”到“智慧环保” [J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23 (4): 5-7.
- [3] 中国电子信息产业发展研究院, 赛迪顾问股份有限公司. 中国环保物联网应用白皮书 (2011) [Z].
- [4] 陈立定, 秦亚辉. 远程环保监控系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1377-1379.
- [5] 张学雷. 省级环境在线监控数据库平台建设与应用 [J]. 安徽职业技术学院学报, 2010, 9 (3): 16-19.
- [6] 赵春胜, 陈俊杰. 智能物联网在环境在线监控中的应用研究 [J]. 北方环境, 2011, 23 (3): 114-116.
- [7] 张树礼, 郝 军, 张 巍. 环保物联网技术及应用研究 [J]. 中国环境管理, 2012, (04): 24-28.
- [8] 国家环保局. 污染源在线自动监控 (监测) 系统数据传输标准 (HJ/T212-2005) [EB/OL]. [http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/other/xxbz/200602/t20060201\\_73038.htm](http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/other/xxbz/200602/t20060201_73038.htm).
- [9] 吴灿培, 胡顺豪, 王海航, 等. 基于 Ajax 和 SVG 的 Web 远程实时监控 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32 (9): 3004-3007.
- [10] 周东仿, 孟 宁. 基于 WebSocket 的网络设别自发现机制 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 34 (2): 392-396.

控制参数, 仿真结果证明了此方法的有效性. 遗传算法作为一种新兴算法, 有许多新的技巧出现, 可以继续探索更有效可靠、更快捷的方法来实现问题的求解。

### 参考文献:

- [1] 邓华昌, 方康玲, 梁 开, 等. 一种混合遗传算法在 PID 参数优化中的应用 [J]. 机械设计与制造, 2009 (7): 89-91.
- [2] 陈 丹, 方康玲, 陈乔礼. 遗传算法在 PID 参数优化中的应用 [J]. 控制系统, 2007 (23): 35-37.
- [3] 李秋生, 张 策, 刘政华. 基于神经网络和遗传算法的 PID 智能 PID 控制 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (5): 610-612.
- [4] 李广文, 贾秋玲, 刘小雄, 等. 基于进化策略的飞行控制系统优化 [J]. 飞行力学, 2009, 27 (5): 33-36.
- [5] 李惠峰, 王 健, 孙文冲. 基于遗传算法的高速飞行器滑模控制律设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 45 (9): 1144-1147.
- [6] 吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [7] 李慎霞, 方 舟, 李 平. 小型无人机舵面故障的控制重构设计 [J]. 计算机工程与应用, 2011 (47): 236-240.
- [8] 王茂林. 改进遗传算法及其在 PID 控制器参数优化中的应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [9] 陈亚娟. 基于 Matlab 遗传算法工具箱的 PID 参数优化研究 [J]. 科技信息, 2008, (26): 69-70.