

# 一种有效的高速攻击型无人机二自由度 PID 控制

耿峰<sup>1,2</sup>, 祝小平<sup>1</sup>, 周洲<sup>2</sup>, 孟俊生<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室, 陕西 西安 710072  
2. 西北工业大学 无人机研究所, 陕西 西安 710072; 3. 中国东方航空工程技术公司, 上海 200335)

**摘要:** 高速攻击型无人机的飞行控制系统需要具有最佳的指令跟踪性能、干扰抑制性能和鲁棒性, 而传统单自由度 PID 控制技术只有 1 组 PID 参数, 无法同时满足上述设计要求。针对这一问题, 采用给定值滤波器型二自由度微分先行 PID 控制技术。通过利用基于改进的粒子群优化算法的  $H_\infty$  参数整定方法进行微分先行 PID 控制器设计, 保证系统“干扰抑制性能及鲁棒性最佳”, 通过调节二自由度化系数(给定值滤波器设计), 确保系统“指令跟踪性能最佳”。以俯仰控制回路设计为例, 经仿真与对比研究, 结果表明, 该控制技术克服了单自由度 PID 控制技术的不足, 控制回路的控制品质满足设计要求。

**关键词:** 约束最优化, 自由度(力学), 扰动抑制, 飞行控制系统, 纵向控制, 多目标优化, 粒子群优化, 鲁棒性(控制系统), 示意图, 无人机; 微分先行, PID 控制

中图分类号: V249.122+.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-2758(2013)01-0001-07

精确制导武器在现代高技术条件下的战争中发挥着越来越重要的作用。高速攻击型无人机是一种新型的装有导引头和战斗部, 具有高精度打击能力的远程防区外精确制导武器, 它不仅具有机动灵活的自主飞行、长时间待机压制、可重复使用等能力, 还具有巡航导弹的远距精确打击能力。它可对敌方高价值军事和经济目标实施精确攻击, 不仅可以摧毁地面(或水面)小型固定目标, 还可以在指定区域游弋, 对随时出现的机动目标进行攻击, 因而, 受到了各国的广泛关注。

由于经常需要面对来自战场的各种威胁以及敌方各种反打击措施(诸如, 各种光电干扰、诱饵等)的影响, 高速攻击型无人机在控制和精确制导方面面临着很大的挑战。控制系统必须同时具有最佳的控制精度、动态性能、干扰抑制性能及鲁棒性等。传统的 PID 控制技术虽然具有结构简单、参数整定方便、结构改变灵活、鲁棒性强、易于操作等优点, 但是也存在着明显的缺陷, 即它所设计的控制器是单自由度的控制器, 只有 1 组可调的 PID 参数。若按干扰抑制特性整定 PID 参数, 则参考信号跟踪特性就会

相对较差; 反之, 若按参考信号跟踪特性整定 PID 参数, 那么干扰抑制特性就会相对较差。在实际的设计过程中, 不得不采用折中的方法来整定 PID 参数, 以取得在参考信号跟踪特性和干扰抑制特性上的折中。为了使高速攻击型无人机的飞行自动控制系统的干扰抑制能力和指令信号跟踪性能均达到最佳, 采用传统的单自由度 PID 控制器显然无法实现。

为了解决这一问题, 学者 Isaac M. Horowitz 提出了二自由度控制的设计思想。所谓二自由度控制就是分别独立地整定 2 组参数, 一组参数用来保证“扰动抑制性能最佳”, 另一组用来保证“目标跟踪性能最佳”, 最终使得“外扰抑制性能”和“目标跟踪性能”同时达到最优。二自由度控制的优点是不仅可以提高控制系统设计的自由度, 还可以改善系统的性能, 提高控制品质。目前, 其已在自感应微型执行机构<sup>[1]</sup>、柔性塔式起重机<sup>[2]</sup>、自主控制风洞模型<sup>[3]</sup>、航天器<sup>[4]</sup>等诸多领域中得到了广泛的应用。

鉴于二自由度控制所具有的优点, 国内外学者们对传统的 PID 控制器进行了改进, 提出了多种二自由度 PID 控制器结构<sup>[5-9]</sup>, 其中, 便于工程实现的

收稿日期: 2012-03-01

作者简介: 耿峰(1977—), 西北工业大学博士后, 主要从事导航、制导与控制的研究。

有给定值滤波器型、给定值前馈型、反馈补偿型以及回路补偿型等 4 种结构形式。由于二自由度 PID 控制器的参数要比传统的 PID 控制器的参数多,给设计工作带来了很大困难,学者们还提出了大量关于二自由度 PID 控制器的设计方法<sup>[10,11]</sup>。

在现有的二自由度 PID 控制器中,给定值滤波器型二自由度 PID 控制器<sup>[12]</sup>结构简单直观,功能明确,设计较为方便,因此,本文在高速攻击型无人机俯仰控制系统的设计中采用了给定值滤波器型二自由度微分先行 PID 控制技术,其中,微分先行 PID 控制器设计采用基于改进的粒子群优化算法的  $H_\infty$  参数整定方法,以使系统获得最佳的扰动抑制性能和鲁棒性,同时减轻大量调参带来的设计困难,给定值滤波器设计通过调节二自由度化系数实现,以使系统获得最佳的指令跟踪性能。

### 1 二自由度 PID 控制技术

给定值滤波器型二自由度微分先行 PID 控制器的结构如图 1 所示,其中,  $G_p(s)$  为受控对象,  $G_c(s)$  为控制器,  $H(s)$  为设定值滤波器。其算法如下:

1) 干扰抑制算法

$$G_c(s) = \frac{-MV}{PV} = C(s) + F(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \eta T_d s} \right) \quad (1)$$

2) 设定值跟踪算法

$$C^*(s) = \frac{MV}{SV} = H(s) G_c(s) = K_p \left\{ \alpha + \left[ \frac{1}{T_i s} - \frac{(1-\alpha)(\beta-1)}{1+\beta T_i s} \right] + \frac{\alpha \gamma T_d s}{1+\eta T_d s} \right\} \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为比例增益二自由度化系数,通常  $0 \leq \alpha \leq 1$ ;  $\beta$  为积分时间二自由度化系数,通常  $1 \leq \beta < 2$ ;  $\gamma$  为微分时间二自由度化系数,通常  $0 \leq \gamma < 2$ ;  $\eta^{-1}$  为微分增益。

干扰抑制算法为常规的 PID 算法,通过调节  $K_p$ 、 $T_i$  和  $T_d$ ,可使系统扰动抑制特性最佳。设定值跟踪算法也符合 PID 调节规律,只是比例增益乘以  $\alpha$  倍;微分时间乘以  $\alpha \gamma$  倍;积分项减去时间常数为  $\beta T_i$ ,大小为  $(1-\alpha)(\beta-1)$  的一阶惯性环节,改变  $\beta$  可以等效地使其改变。于是,独立地调整  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ ,保证了系统跟踪特性最佳,并且不影响系统的扰动抑制性

能。考虑在稳定状态时,设给定值滤波器的输入输出必须相等,即  $\lim_{s \rightarrow 0} H(s) = 1$ ,以避免出现稳态偏差,则可得到给定值滤波器  $H(s) = C^*(s) / G_c(s)$  经整理可得  $H(s)$  如图 1 所示。

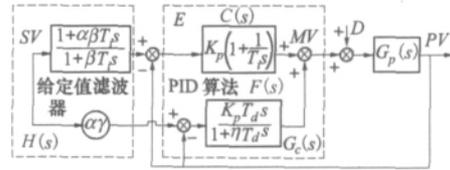


图 1 给定值滤波器型二自由度微分先行 PID 控制器结构(最简型)

从图 1 可以看出,为了实现二自由度化,只需在常规的 PID 控制器基础上增加一个超前滞后环节  $(1 + \alpha \beta T_i s) / (1 + \beta T_i s)$  故称为最简型。尽管图 1 所示算法结构是最简单的,但因设定值有 2 个通道,对某些系统用功能块组态实现并不方便。为此,可将其等效变换成图 2 所示结构。虽然多了 2 个环节,但是完全在设定值通道,实现起来比较方便。

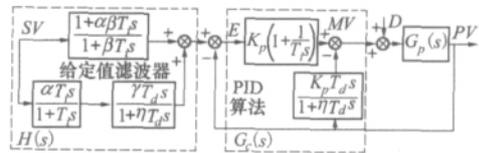


图 2 给定值滤波器型二自由度微分先行 PID 控制器结构(等效结构)

### 2 基于改进的粒子群优化算法的 $H_\infty$ 参数整定方法

假设搜索空间是  $D$  维的,由  $n$  个粒子组成的粒子群可表示为  $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ ,粒子群中每个粒子都有一个位置,第  $i$  个粒子的位置可用  $D$  维位置矢量  $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$  表示,其相应的速度(位置变化率)用速度矢量  $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$  表示,第  $i$  个粒子运动历史中的最佳位置用矢量  $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}]$  表示(局部最优),整个粒子群中最好的粒子位置(例如,具有最小函数值)下标记作  $g$ ,即  $P_g = [p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD}]$ (全局最优)。第  $i$  个粒子的速度和位置更新方程如下<sup>[13]</sup>

$$\begin{aligned}
 v_{id}^{iter+1} &= wv_{id}^{iter} + c_1 r_1(\cdot) (p_{id}^{iter} - x_{id}^{iter}) + \\
 &\quad c_2 r_2(\cdot) (p_{gd}^{iter} - x_{id}^{iter}) \\
 x_{id}^{iter+1} &= x_{id}^{iter} + v_{id}^{iter+1} \\
 v_{id} &\in [v_{dmin} \quad v_{dmax}], x_{id} \in [x_{dmin} \quad x_{dmax}] \\
 i &= 1 \quad 2 \quad \dots \quad n; d = 1 \quad 2 \quad \dots \quad D \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中,  $iter$  当前迭代次数  $w$  为惯性加权因子  $c_1$  和  $c_2$  为加速度因子  $c_1, c_2 \in [0, 2]$  通常取  $c_1 = c_2 = 2$ ,  $r_1(\cdot)$  和  $r_2(\cdot)$  为介于  $[0, 1]$  的随机数。粒子的最大速度可表示为  $V_{max} = [v_{1max} \quad v_{2max} \quad \dots \quad v_{dmax}]$ , 通常取  $v_{dmax} = x_{dmax}$ 。

为了在迭代的早期加快惯性加权因子的递减速度, 以便更快地进入局部搜索, 可构造自适应非线性惯性加权递减函数为<sup>[14]</sup>

$$\begin{aligned}
 w &= (w_{max} - w_{min}) \left( \frac{iter}{iter_{max}} \right)^2 + \\
 &\quad (w_{max} - w_{min}) \frac{2iter}{iter_{max}} + w_{max} \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中,  $w_{max}$  为最大权重  $w_{max} \in [0.8, 1.2]$ , 通常取  $w_{max} = 0.9$ ,  $w_{min}$  为最小权重, 通常取  $w_{min} = 0.4$ ,  $iter$  为当前迭代次数,  $iter_{max}$  为最大允许迭代次数。

评价函数考虑到对模型摄动的鲁棒稳定性以及扰动抑制性能的要求, 假设标称受控对象  $G$  的摄动边界为:  $\bar{\sigma}(\Delta G(j\omega)) \leq \bar{\sigma}(W_1(j\omega))$ ,  $\forall \omega \in [0, \infty)$  其中,  $W_1$  为已知的稳定函数。

设计的控制器  $K$  应达到如下要求: 标称闭环系统是渐进稳定的; 鲁棒稳定性应满足不等式:  $\|W_1(s)T(s)\|_{\infty} < 1$ ; 扰动抑制性能应满足不等式:  $\|W_2(s)S(s)\|_{\infty} < 1$ 。从而, 在受控对象摄动以及外干扰下, 闭环系统也是渐进稳定的。其中,  $W_2$  是稳定加权函数,  $T$  和  $S$  分别为系统的灵敏度函数和补灵敏度函数

$$\begin{aligned}
 S(s) &= (1 + G(s)K(s))^{-1} \\
 T(s) &= G(s)K(s)(1 + G(s)K(s))^{-1} \quad (5)
 \end{aligned}$$

则平衡评价函数<sup>[15]</sup>为

$$\begin{aligned}
 J_{\infty} &= \\
 &\sqrt{\sup_{\omega \in [0, \infty)} (\bar{\sigma}^2(W_1(j\omega)T(j\omega)) + \bar{\sigma}^2(W_2(j\omega)S(j\omega)))} < 1 \quad (6)
 \end{aligned}$$

总的性能指标(评价函数)可以表示为

$$\begin{aligned}
 J(k) &= w_1 J_{\infty} + w_2 M_p + w_3 t_r + w_4 t_s + w_5 E_{ss} + \\
 &\int_0^T (w_6 |e(t)| + w_7 u^2(t)) dt + \frac{w_8}{PM} + \frac{w_9}{GM} \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中, 超调量  $M_p$ , 上升时间  $t_r$ , 调节时间  $t_s$ , 稳态误差

$E_{ss}$ , 增益裕度  $GM$ , 相位裕度  $PM$ 。

于是, 粒子群优化中的每个粒子  $k_i = [K_{\theta i}, T_{\theta i}, T_{\theta d i}, \eta_i]$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 的适应度值可通过以下适应度函数计算

$$F(k_i) = J(k_i) + P(k_i) \quad (8)$$

式中,  $P(k_i)$  为罚函数, 如果  $k_i$  是不稳定个体, 则引入一个很大的罚值  $P_1 > 0$  (例如  $P_1 = 1 \times 10^6$ )。这样在迭代过程中  $k_i$  会自动被去除掉, 如果  $k_i$  是稳定个体, 则罚值  $P_1 = 0$ 。

### 3 高速攻击型无人机俯仰控制律设计

为了使高速攻击型无人机俯仰姿态控制系统能够在俯仰角保持以及俯仰角扰动抑制方面均具有很好的控制品质, 在控制器设计中采用给定值滤波器型二自由度微分先行 PID 控制技术。不考虑惯性、滤波器以及非线性等因素, 以纵向增稳控制系统为内回路, 俯仰角保持/控制模态的控制律为

$$\begin{aligned}
 \delta_e &= K_{\theta} \left( 1 + \frac{1}{T_{\theta i} s} \right) \cdot \\
 &\left[ \theta - \left( \frac{1 + \alpha \beta T_{\theta i} s}{1 + \beta T_{\theta i} s} + \frac{\gamma T_{\theta d} s}{1 + \eta T_{\theta d} s} \cdot \frac{\alpha T_{\theta i} s}{1 + T_{\theta i} s} \right) \theta_g \right] + \\
 &\frac{K_{\theta} T_{\theta d} s}{1 + \eta T_{\theta d} s} \theta + \left( K_q + K_{q i} \frac{1}{s} \right) q + \left( K_{a_z} + K_{a_z i} \frac{1}{s} \right) a_z \quad (9)
 \end{aligned}$$

式中,  $K_q, K_{q i}$  和  $K_{a_z}, K_{a_z i}$  分别为俯仰角速度和法向加速度反馈增益。升降舵回路简化为一阶惯性环节, 其传递函数为  $G_e = \frac{1}{\tau_e s + 1}$ , 时间常数  $\tau_e = 0.1$ 。控制系统框图如图 3 所示:

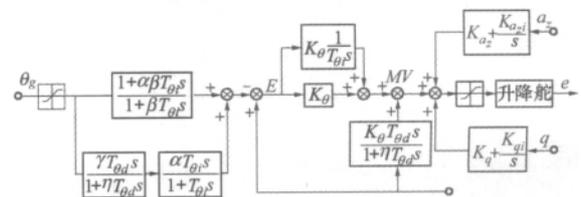


图 3 俯仰角保持/控制回路框图

给定值滤波器型二自由度微分先行 PID 控制器的设计方法: 首先, 采用基于改进的粒子群优化算法的  $H_{\infty}$  参数整定方法设计微分先行 PID 控制器的控制参数  $[K_{\theta}, T_{\theta i}, T_{\theta d}, \eta]$ , 控制器参数整定流程如下:

1) 初始化:

设定粒子群数目  $n = 50$  随机初始化粒子群,即粒子的位置向量和速度向量以及粒子历史最优位置  $P_i$  和全局最优位置  $P_g$ ; 设置迭代次数  $iter_{max} = 1000$ , 粒子群的搜索空间  $K_\theta \in [0.1, 2]$ ,  $T_{\theta d} \in [0.1, 10]$ ,  $T_{\theta i} \in [0.1, 10]$ ,  $\eta \in [0.1, 1]$ 。

式中, 选取加权函数为

$$W_1(s) = 1.32 / (s^2 + 1.73s + 1.25)$$

$$W_2(s) = (1.9s + 0.035) / (s^2 + 5.8s + 11.5)$$

式中,  $M_p = 0.05$ ,  $t_r = 3$ ,  $t_s = 10$ ,  $E_{ss} = 0.5$ ,  $PM = 15$ ,  $GM = 60$ , 选取加权  $w_1 = 10$ ,  $w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = w_6 = w_7 = 1$ ,  $w_8 = 100$ ,  $w_9 = 10$ , 设置  $T = 100$  s。

2) 根据适应度函数(8) 计算粒子群中的每个粒子  $k_i$  的适应度值。

3) 将每个粒子的适应度值与其最优位置  $P_i$  的适应度值相比较, 若优于  $P_i$ , 则更新  $P_i$ , 将所有  $P_i$  中适应度值最佳的那一个设为全局最优位置  $P_g$ 。

4) 根据 3) 更新粒子的速度与位置。

5) 如果迭代次数未达到最大值, 则返回第 2) 步, 否则, 进入下一步。

6) 输出最后结果  $P_g$  (控制器参数的最佳值)。

然后, 选择二自由度化系数的推荐值 ( $\alpha = 0.4$ ,  $\beta = 1.35$ ,  $\gamma = 1.25$ ) 使俯仰角信号跟踪性能达到最佳。如果仍不满意, 可对二自由度化系数进行微调 ( $0 < \alpha < 1$ ,  $1 < \beta < 2$  以及  $0 < \gamma < 2$ ) 直到跟踪性能达到最佳为止。

## 4 仿真研究与对比分析

在  $H = 4500$  m,  $V = 206.447$  m/s,  $m = 700$  kg 的水平定直飞行状态下, 无人机纵向小扰动方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{V} \\ \Delta \dot{\alpha} \\ \Delta \dot{q} \\ \Delta \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.01 & 0.03 & 0.00 & -0.05 \\ -0.09 & -1.48 & 0.95 & 0.00 \\ -0.13 & -13.89 & 0.15 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{V} \\ \Delta \alpha \\ \Delta q \\ \Delta \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.01 & 0.05 \\ -0.14 & -0.01 \\ -55.59 & -0.001 \\ 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_e \\ \Delta \delta_T \end{bmatrix} \quad (10)$$

无人机纵向增稳控制回路俯仰角速度和法向加速度反馈增益分别为  $K_q = 0.672$ ,  $K_{q_i} = 0.198$ ,  $K_{a_z} = 0.405$ ,  $K_{a_z i} = 0.08$ 。不增稳时, 短周期阻尼比  $\xi_{sp} = 0.184$ 。根据飞行品质规范, 短周期阻尼比不满足飞机航行段和战斗段一级和二级飞行品质要求, 需增大阻尼。增稳后, 短周期阻尼比  $\omega_{sp} = 2.214$ , 满足规范要求。

经过参数设计, 二自由度 PID 控制器的控制参数分别为  $\alpha = 0.786$ ,  $\beta = 1.343$ ,  $\gamma = 1.406$ ,  $K_\theta = 0.694$ ,  $T_{\theta d} = 8.186$ ,  $T_{\theta i} = 1.205$ ,  $\eta = 0.874$ 。俯仰保持 / 控制回路的开环根轨迹、对数频率特性以及对数幅相曲线如图 4 所示,  $5^\circ$  俯仰角指令时的过渡过程如图 5 所示。

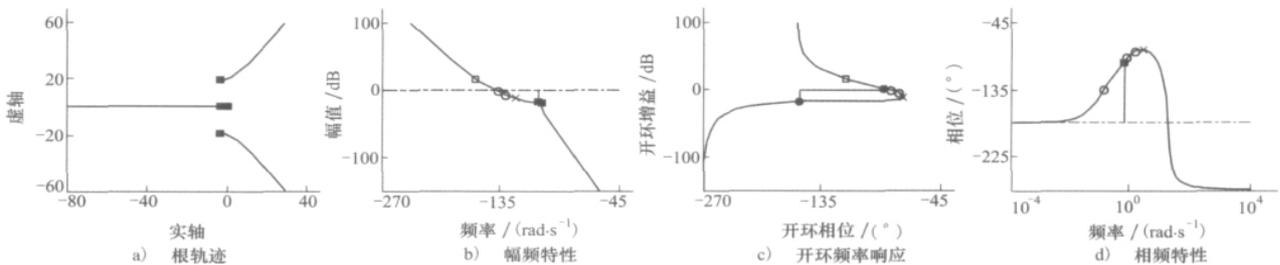


图 4 俯仰角保持/控制回路开环根轨迹、Nichols 以及 Bode 图

从图 5 中可以看出, 当模型参数摄动  $\Delta = 40\%$  时, 俯仰控制系统仍具有良好的控制品质, 说明设计的二自由度 PID 控制器具有很好的鲁棒性。

基于二自由度 PID 控制与基于传统单自由度 PID 控制(同样采用基于改进的粒子群优化算法的  $H_\infty$  参数整定方法, 控制器参数分别为  $K_\theta = 2.147$ ,  $K_{\theta d} = 0.333$ ,  $K_{\theta i} = 0.829$ ) 的俯仰角保持 / 控制回路

在俯仰角指令跟踪以及俯仰角扰动抑制性能方面的对比如图 6 所示, 前者在俯仰角指令跟踪和俯仰角扰动抑制方面, 均无超调, 并且稳态精度高于后者(不考虑传感器测量精度及噪声, 指令跟踪精度为  $0.01^\circ$ , 而单自由度 PID 控制器的指令跟踪精度为  $0.1^\circ$ ) 此外, 前者的最大用舵量 ( $\delta_{emax} = 3.245^\circ$ ) 小于后者 ( $\delta_{emax} = 4.318^\circ$ )。

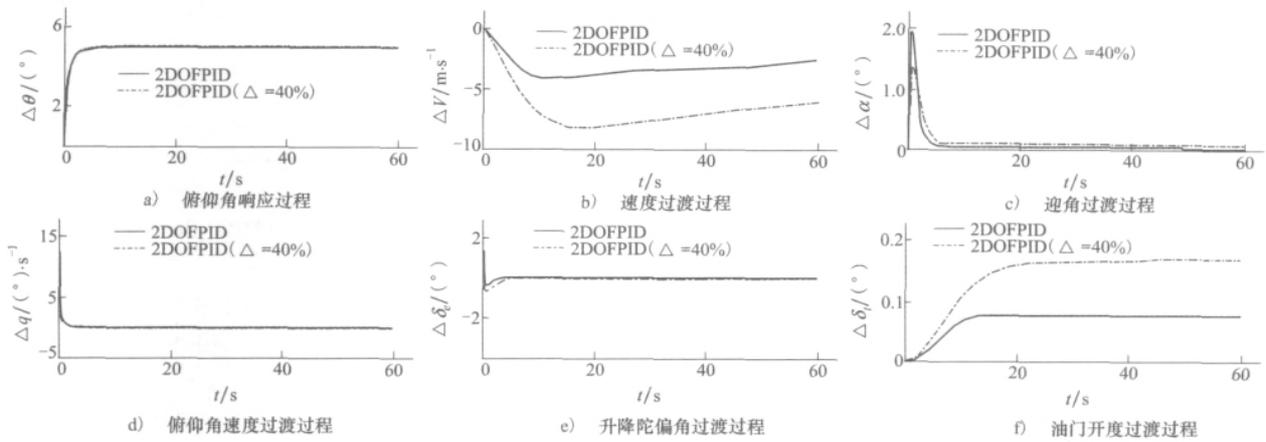


图 5 俯仰角指令  $\Delta\theta = 5^{\circ}$  时的过渡过程

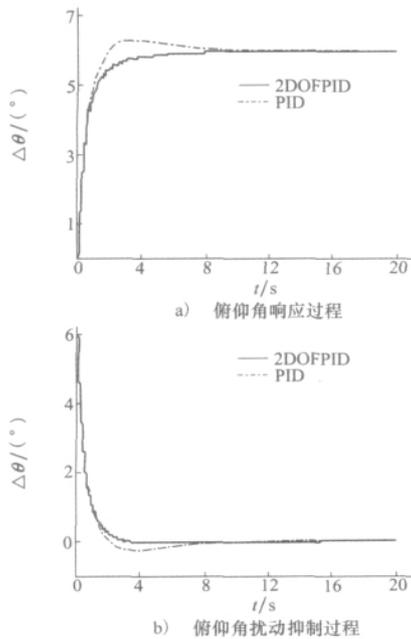


图 6 俯仰角信号跟踪与扰动抑制性能对比( $\Delta\theta = 6^{\circ}$ )

### 5 结 论

本文在高速攻击型无人机俯仰控制系统设计中,采用了给定值滤波器型二自由度微分先行 PID 控制技术。首先,利用基于改进的粒子群优化算法的  $H_{\infty}$  参数整定方法进行微分先行 PID 控制器设计,使控制系统获得最佳的扰动抑制性能和鲁棒性。然后,调节给定值滤波器的二自由度化系数,使控制系统获得最佳的指令跟踪性能。通过仿真研究与对比分析,可以得出如下结论:采用上述控制技术设计的控制系统同时具有最佳的干扰抑制性能,指令信号跟踪性能和鲁棒性,满足了高速攻击型无人机飞行控制系统在该方面的设计要求;在相同条件下,上述控制技术克服了传统单自由度 PID 控制技术因只有一组可调的 PID 参数,无法使控制系统的干扰抑制性能和指令信号跟踪性能均达到最佳的不足。

### 参考文献:

[1] Minoru Sasaki, Koji Fujihara, Hiroyuki Yamada, et al. Two-Degree-of-Freedom Control of a Self-Sensing Micro-Actuator for HDD. 22<sup>nd</sup> IEEE International Symposium on Intelligent Control Part of IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Singapore, 2007, 302-307

[2] Minoru Sasaki, Toshimi Shimizu, Koji Ikai, et al. Two-Degree-of-Freedom Control System for Motion Control of a Flexible Stacker Crane. SICE Annual Conference, Japan, 2008, 3272-3277

[3] Papageorgiou G, Glover K. Two-Degree-of-Freedom Control of an Actively Controlled Wind-Tunnel Model. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2002, 25(3): 510-516

[4] Renuganth Varatharajoo, Choo Tech Wooi, Musa Mailah, et al. Two Degree-of-Freedom Spacecraft Attitude Controller. Advances in Space Research, 2011, 47: 685-689

- [5] Sánchez J, Visioli A, Dormido S. A Two-Degree-of-Freedom PI Controller Based on Events. *Journal of Process Control*, 2011, 21: 639-651
- [6] Masanori Yukitomo, Takashi Shigemasa, Yasushi Baba, et al. A Two Degrees of Freedom PID Control System, Its Features and Applications. *5th Asian Control Conference*, 2004, 456-459
- [7] Shamsuzzoha M, Moonyong Lee. Enhanced Disturbance Rejection for Open-Loop Unstable Process with Time Delay. *ISA Transactions*, 2009, 48(2): 237-244
- [8] Alfaro V M, Vilanova R, Arrieteta O, et al. Robust Tuning of Two-Degree-of-Freedom (2DOF) PI/PID Based Cascade Control Systems. *Journal of Process Control*, 2009, 19: 1658-1670
- [9] Cui Jian, Guo Zhongyuan, Yang Zhenchuan, et al. Improvement of Transient Response for Drive Loop of Microgyroscope Using 2-DOF PID Controller. *6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Kaohsiung, Taiwan, 2011, 282-284
- [10] Stefan Preitl, Radu-Emil Precup, Claudia-Adina Dragos, et al. Tuning of 2-DOF Fuzzy PI(D) Controllers Laboratory Applications. *11th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics*, Budapest, Hungary, 2010, 237-242
- [11] 王维杰, 李东海, 高琪瑞等. 一种二自由度 PID 控制器参数整定方法. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008, 48(11): 1962-1966  
Wang Weijie, Li Donghai, Gao Qirui, et al. Two-Degrees-of-Freedom PID Controller Tuning Method. *J Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2008, 48(11): 1962-1966 (in Chinese)
- [12] 李甲申. 实用二自由度 PID 控制. *自动化仪表*, 2000, 21(11): 10-13  
Li Jiashen. The Functional PID Controllers with Dual Freedom. *Automation Instrumentation*, 2000, 21(11): 10-13 (in Chinese)
- [13] Sadati N, Zamani M, Mohajerin P. Optimum Design of Fractional Order PID for MIMO and SISO Systems Using Particle Swarm Optimization Techniques. *The 4th IEEE International Conference on Mechatronics*, 2007, 8-10: 1-6
- [14] 陈贵敏, 贾建援, 韩琪. 粒子群优化算法的惯性权值递减策略研究. *西安交通大学学报*, 2006, 40(1): 53-56  
Chen Guimin, Jia Jianyuan, Han Qi. Study on the Strategy of Decreasing Inertia Weight in Particle Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(1): 53-56 (in Chinese)
- [15] Ho Shinnjang, Ho Shinnying, Shu Lisun. OSA: Orthogonal Simulated Annealing Algorithm and Its Application to Designing Mixed  $H_2/H_\infty$  Optimal Controllers. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 2004, 34(5): 588-600

## An Effective 2-DOF ( Two Degree-of-Freedom) PID Control of High Speed Attack Unmanned Aerial Vehicles ( UAV)

Geng Feng<sup>1 2</sup>, Zhu Xiaoping<sup>2</sup>, Zhou Zhou<sup>1</sup>, Meng Junsheng<sup>3</sup>

(1. Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)  
(2. Research Institute of UAV, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)  
(3. CEA Engineering & Technic, Shanghai 200335, China)

**Abstract:** High-speed attack UAV flight control system needs to have the best command tracking performance, disturbance rejection performance and robustness, but the traditional single degree of freedom PID controller has only one set of PID parameters, thus it can not fully meet these design requirements. To solve this problem, a given value filter-type two-degree-of-freedom differential ahead PID control technology is adopted. Sections 1 through 3 of the full paper explain our 2-DOF PID control mentioned in the title, which we believe is effective and whose core consists of: (1) in the differential ahead PID controller design, the  $H_\infty$  parameter tuning method based on an improved particle swarm optimization (PSO) is used to ensure that the system has the best disturbance rejection performance and robustness; (2) through adjusting the parameters of given value filter, it guarantees that the system

has the best tracking performance. Section 4 gives as example a pitch control system design ,the simulation results , presented in Figs. 4 through 6 and their analysis show preliminarily that the pitch control system is indeed effective: it meets the design requirements and the proposed control technology overcomes the inherent shortcomings of the traditional single degree of freedom PID control.

**Key words:** constrained optimization , degrees of freedom ( mechanics) , disturbance rejection , flight control systems , longitudinal control , multiobjective optimization , particle swarm optimization ( PSO) , robustness ( control systems) , schematic diagrams , unmanned aerial vehicles ( UAV) ; differential ahead , PID control

## 赵岷麟纪念华东航空学院成立六十周年的文章( 其一)

本简讯摘自校学报资料 2012 - 10 期( 总 1127 期) , 作者是赵岷麟 , 原标题是“礼赞: 航空工程英才的摇篮” , 副标题是“纪念华东航空学院成立六十周年”。

其一摘录的内容如下:

今年是原华东航空学院成立六十周年。华航是由国内三所著名大学交大、南大( 原中央大学)、浙大航空系合并而成。当年 , 华航以其一流的师资和从事航空高科技的专业性质闻名大江南北 , 为广大青年学生所向往。华航 1956 年迁至西安 , 易名西安航空学院。1957 年西北工学院与其合并成立西北工业大学。1970 年 , 哈军工空军工程系又并入西工大。

1953 年 10 月 , 寿松涛( 1900 年生 , 浙江诸暨人) 被任命为华航院长。寿松涛是个有战略眼光 , 强烈事业心 , 作风民主的好院长 , 他对华航与后来西工大的发展功勋卓著 , 深受师生员工的爱戴。

寿松涛在华航的一个重大决策就是说服华航师生员工 , 主动提出将华航西迁到西安 , 这不仅是服从中央在陕西重点发展航空工业的总体战略布局 , 也是为了取得国家支援 , 加快华航自身发展的需要。1956 年 9 月 , 华航师生员工和家属 5000 多人整体从富庶的南京搬到古都西安。从此 , 这支汇聚长三角地区航空教育精英的队伍扎根西北 , 成为构建我国西北航空航天产、学、研战略基地的重要支柱之一。

西迁对华航的影响是深远的。国家对西航的专业设置数量、办学规模、投资额度以及留学外派人数等方面都给予了特别的扶持。到 1957 年夏 , 在原有专业以外 , 增加了直升机专业和锻、铸、焊、热处理及表面保护五个新专业; 1956 年度 , 二机部拨给西航的设备费比往年增加了四倍之多; 从 1952 年到 1957 年 , 教师人数从 44 人增加到 450 人 , 学生人数从 455 人增加到 3235 人 , 其发展速度是惊人的。

寿院长深知 , 一所大学要办好不是靠规模而是要提高师资水平。在西方国家对中国全面封锁的情况下 , 除了自办研究生教育、青年教师派出进修和引进人才之外 , 他特别积极争取向苏联外派留学生和进修教师。当时学生人数猛增 , 教学任务十分繁重 , 特别是骨干教师紧缺 , 但他仍咬紧牙关下决心选派更多的骨干教师赴苏学习 , 这一有远见的决策 , 西工大日后得到了回报。譬如 , 1956 年高教部对西航特别照顾 , 全国高校 100 名赴苏名额中 , 给西航 12 个名额。据王适存教授回忆 , 当时在空气动力学教研组内 , 戴昌晖、陈士橹两位老师去做进修教师 , 赵令诚和王适存两人去读研究生 , 这就占了教研组教师人数的一半 , 由此可见寿院长决心之大。

这些留苏的教师不负重托 , 学成归来都成了西工大的重要骨干力量。

胡沛泉  
2013 年 1 月