

基于 PSO 的自抗扰飞行控制律参数优化方法

尹 晖¹, 熊治国², 高 翔², 王 浩²

(1.空军工程大学训练部,陕西西安,710051;2.空军航空大学飞行器控制系,吉林长春,130022)

摘要 提出了一种基于粒子群优化(PSO)的自抗扰(ADRC)超机动飞行控制律参数优化方法。分析了自抗扰超机动飞行控制律的参数取值和调节问题,讨论了扩张状态观测器(ESO)中非线性函数的系数对系统性能的影响,并给出了系统的性能指标函数。在给定的参数范围内,采用标准的 PSO 算法对 ESO 中非线性函数的系数进行了参数优化,优化结果表明:这种算法可以按性能指标搜索到近似的最优参数。采用该算法得到的参数对超机动飞行控制律进行了数字仿真。仿真结果表明:控制律具有良好的动态和稳态性能,该参数优化方法是有效的。

关键词 粒子群优化;超机动;飞行控制律;自抗扰控制

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.03.005

中图分类号 V249.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)03-0019-04

Parameters Optimization of Flight Control Law Using ADRC for Super-maneuverable Aircraft Based on PSO

YIN Hui¹, XIONG Zhi-guo², GAO Xiang², WANG Hao²

(1. Department of Training, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Aeronautical Control Engineering Department, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: Exact prediction of unsteady aerodynamics is of great importance to the design and study of advanced combat aircraft. In response to the problem of complex calculating and lack of considerable factors in handling normal state-space model, a new flow separation model and a new state-space aerodynamics model are put forward in this paper. Compared with normal state-space model, complex calculation of differential equations is avoided and simultaneously a new influence factor -pitching angular velocity is introduced in the new state-space model which makes the physical meaning of the new state-space model proposed in the paper become clearer and more definite. At the same time, the static and dynamic proceedings are combined into one equation by the flow separation model proposed in the paper. At last, the large amplitude oscillation wind tunnel data are used for testing, the result suggests that the unsteady aerodynamic model proposed in this paper can describe the time-delay characteristics of the aerodynamic force and fit well with the wind tunnel test data.

Key words: PSO; super-maneuver; flight control; ADRC

超机动^[1-3]是第三代和第四代战斗机的主要特征之一,在近距离格斗中具有明显的战术优势。但是,

收稿日期:2012-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60904038)

基金项目:尹晖(1978-),男,湖南长沙人,讲师,硕士,主要从事飞行器控制研究。E-mail:yinhui0611@163.com

由于超机动飞行时迎角和角速率都相当大,飞机具有强耦合、强非线性的特点,此时,传统的小扰动线性化方法已不再适用于飞行控制律设计,必须采用非线性控制方法^[3]。自抗扰控制器(ADRC)是一种新型非线性鲁棒控制算法^[4-9],具有很强的鲁棒性,为解决复杂非线性系统的控制提供了一种有效途径。文献[8]利用ADRC算法设计了超机动飞行快回路的控制律,在此基础上,文献[9]利用ADRC算法设计了超机动飞行慢回路的控制律。但是,利用完整的ADRC所设计的超机动飞行控制律共涉及72个参数,其中,TD参数18个,ESO参数36个,NLSEF参数18个,控制律的调参比较困难,目前还是依赖经验就具体问题在一定范围内进行试凑。

本文引入一种基于粒子群优化的调参算法,并通过计算机程序实现了该算法。

1 自抗扰超机动飞行控制律的参数

ADRC超机动飞行控制律是基于一阶ADRC的串联组合。控制律ADRC方程见式(1~4),其中, $i=p, q, r, \alpha, \beta, \mu$,分别表示子回路:

TD方程:

$$\dot{x}_{i1} = -R_i f(x_{i1} - u_k(t) + |x_{i1}| |x_{i1}| / 2R_i, a_{i1}, \delta_{i1}) \quad (1)$$

ESO方程:

$$\dot{z}_{i1} = z_{i2} - b_{i1} f(z_{i1} - y_i, a_{i2}, \delta_{i2}) + u_k \quad (2)$$

$$\dot{z}_{i2} = -b_{i2} f(z_{i1} - y_i, a_{i3}, \delta_{i3}) \quad (3)$$

控制量方程:

$$u_k = b_{i0} fal(x_{i1} - z_{i1}, a_{i1}, \delta_{i1}) - z_{i2} \quad (4)$$

控制量方程由NLSEF与ESO动态补偿共同得到, v_k 和 y_i 分别为各子回路的输入指令和输出。

由于一阶ADRC的TD作用是安排过渡过程,可用一阶线性滤波器代替。快回路状态量变化较大,对响应速度的要求比较高,所以用误差的线性组合代替。另外,反馈系数 b_{i0} 均可根据要求的系统带宽确定。又由于控制系统主要需要调节的参数就是各个回路的二阶扩张状态观测器参数,实际上,ESO也是决定ADRC性能的最关键部分。一般令 a_{i2} , a_{i3} 和 δ_{i2} , δ_{i3} 分别相同,则 b_{i1} , b_{i2} 为重点需要调节的ADRC超机动飞行控制律参数,共计12个。下面采用基于粒子群优化的算法对这12个参数进行优化调节。

2 超机动飞行控制律参数优化

2.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法^[10]的基本思想在于:在每一次

迭代过程中,粒子通过个体极值和全局极值更新自身的速度和位置,见式(5~6):

$$V_{id}^{k+1} = \chi [w V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k)] \quad (5)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (6)$$

式中: $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 表示在一个 D 维的搜索空间中由 n 个粒子组成的种群, $d=1, 2, \dots, D, i=1, 2, \dots, n, n$ 为种群规模; k 为当前进化代数; c_1 和 c_2 为非负的学习因子, r_1 和 r_2 为分布于区间 $[0, 1]$ 之间的随机数。其中第 i 个粒子表示为一个 D 维的向量 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$,代表第 i 个粒子在 D 维搜索空间中的位置,亦代表了问题的一个潜在解。 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})^T$ 代表了第 i 个粒子的速度, $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})^T$ 为个体极值,即适应值最小的位置, $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD})^T$ 为种群的全局极值,即种群中所有粒子搜索到的最好值。为防止粒子的速度过大,可将其速度限制在一定的区间 $[-V_{\max}, V_{\max}]$ 内。粒子就是通过更新前的速度、自身经验、群体经验根据式(5)调整自己的速度,进而按照式(6)改变自己的位置,达到寻优的目的。 w 为惯性权值, χ 为收敛因子,且有:

$$\chi = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (7)$$

式中 $\varphi = c_1 + c_2$, $\varphi > 4$ 。由式(5)和(6)组成的迭代算法为标准PSO算法。该算法的具体流程可参考文献[11]。

2.2 控制律参数优化方法和结果

系统的性能指标可由下式表述:

$$\min J = \tilde{\omega}_\alpha \int_0^t (\alpha(t) - \alpha(t))^2 dt + \tilde{\omega}_\beta \int_0^t (\beta(t) - \beta(t))^2 dt + \tilde{\omega}_\mu \int_0^t (\mu(t) - \mu(t))^2 dt + \tilde{\omega}_p \int_0^t (p_c(t) - p(t))^2 dt + \tilde{\omega}_q \int_0^t (q_c(t) - q(t))^2 dt + \tilde{\omega}_r \int_0^t (r_c(t) - r(t))^2 dt \quad (8)$$

式中 $\tilde{\omega}$ 分别为各子回路的惩罚项,根据对各回路响应的要求取值,各回路误差变化比率相同时,误差总量的增量一致。 $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\mu(t)$, $p_c(t)$, $q_c(t)$, $r_c(t)$ 为慢回路和快回路的指令信号。所以,PSO的适应值函数即取为上述性能指标函数。

要获得更好的控制效果,需要更大的粒子数目,更高的进化代数和更小的步长,这无疑会增加控制算法的复杂度。在实际工程中还应该根据计算机的计算能力,综合考量系统实时性的要求,对三者进行恰当选择。为避免计算量过大,本文粒子数目 n 取20,最大进化代数 T_{\max} 取100,搜索空间为12维,超机动控制系统的步长取0.02 s进行仿真。此外,为

进行有效搜索,必须确定搜索空间即满足系统稳定的参数取值范围。参数取值范围见表 1。算法的详细流程按文献[9]3.1 节中 step1~6 进行。

为便于比较,将经过搜索和文献[9]中通过试凑取定的参数列在表 2。可见,参数之间的关系(主要是快慢回路之间以及 b_{n1}, b_{n2} 之间)和试凑得到的关系大概相同,这说明本文方法有效。同时,分析发现,很多参数都具有很好的控制效果,表明 ADRC

控制律参数本身的变化范围也很大,试凑方法容易得到较好参数值。算法搜索过程中的群体最优适应值曲线见图 1,群体最优适应值在迭代的 20 次之前单调下降,第 20 次由 714 增大 721,此后基本上单调下降,在 40 次后保持在 705。通过 PSO 优化得到的参数均不在边界上。适应值的绝对数值比较大是由于罚函数取的比较大,对 PSO 调参算法而言,适应值下降并收敛的过程表明了算法的有效性。

表 1 参数搜索范围

Tab.1 Parameters searching range

参数	回路					
	α	β	μ	p	q	r
b_{n1}	[0.5 5]	[0.5 5]	[0.5 5]	[1 10]	[1 10]	[1 10]
b_{n2}	[2 20]	[2 20]	[2 20]	[5 30]	[5 30]	[5 30]

表 2 PSO 搜索和试凑调节得到的参数值对比

Tab.2 PSO and trial method received parameters

参数	回路					
	α	β	μ	p	q	r
b_{n1}	2.171 0	2.106 3	2.639 5	6.200 0	2.021 0	3.374 3
b_{n2}	3.024 2	5.048 0	5.992 7	13.676 3	15.726 9	11.420 7

3 数字仿真结果

以表 2 中的参数,按文献[9]中的初始条件和系统结构图对慢回路进行仿真,结果见图 2。在图 2 (a)~(f)中,各曲线代表的含义同文献[9]。由图可见,在本文设计的控制律作用下,系统取得了比文献[9]更好的控制结果:慢回路 α, μ 的稳态误差不超过 1%,动态过程良好且过渡过程均不到 2 s; β 在小于 0.15° 的范围内波动,动态性能良好且稳定;快回路 p, q, r 各自跟踪指令信号 p_c, q_c, r_c , 动态过程在 0.5 s 之内。此外,经过算法优化后的闭环系统控制信号见图 3。可以看到,各操纵面的偏转角度均未超过极限制。本文采用的 PSO 算法对控制律参数进行优化结果是有效的,符合大迎角控制的要求。

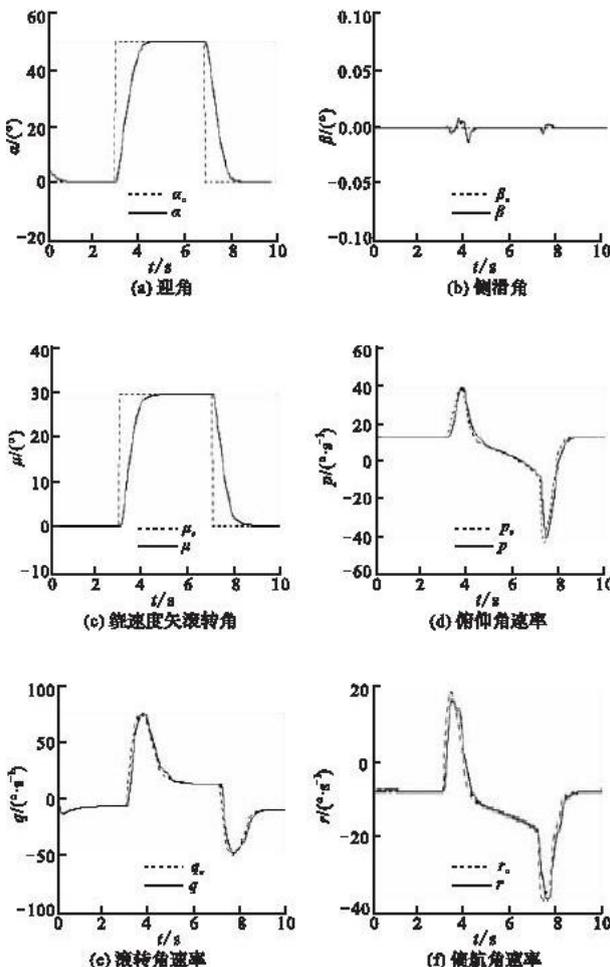


图 2 系统动态过程曲线

Fig.2 System dynamic process curve

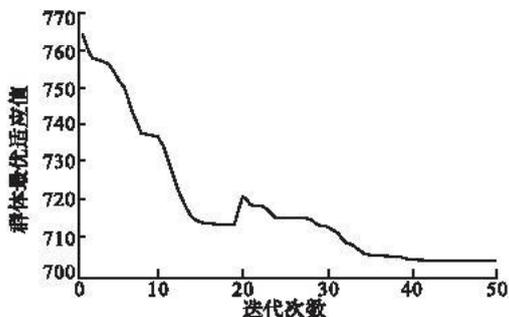


图 1 群体最佳适应值曲线

Fig.1 Population best adaptive value curve

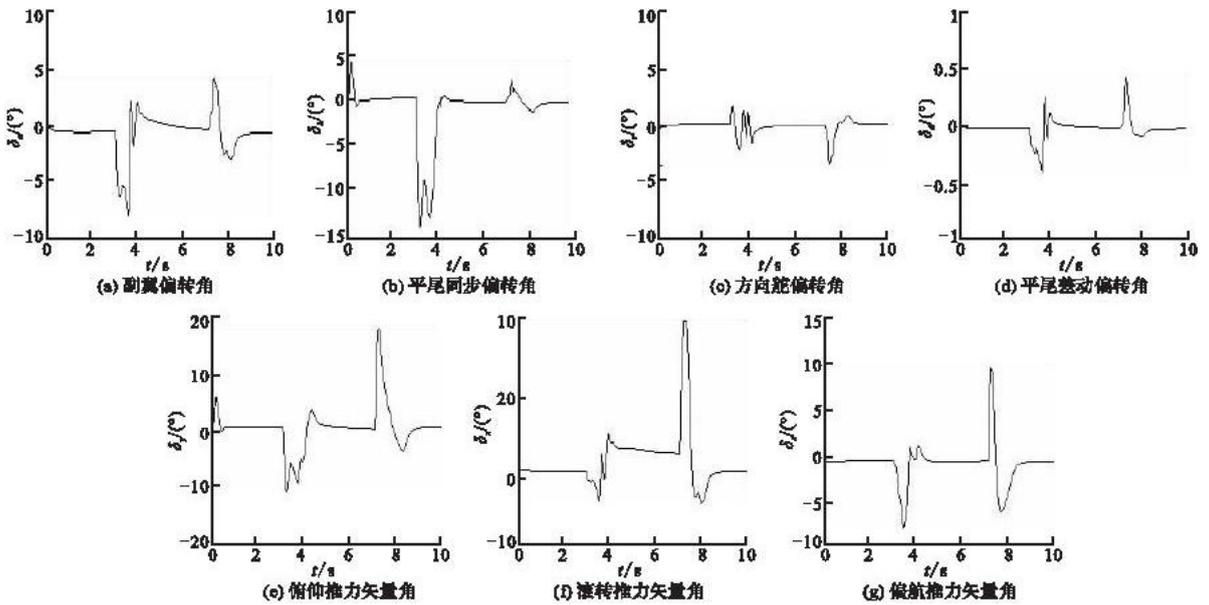


图3 闭环系统控制信号曲线

Fig.3 Control signal curve of closed-loop system

4 结语

本文针对 ADRC 超机动飞行控制律设计中比较难以把握的调参问题,提出了一种基于 PSO 的参数优化算法。这种方法可以有效地优化参数,对于给定的性能指标,可以得到近似的最优参数值。对本文控制律参数的优化结果表明。这种方法给 ADRC 的调参带来了便利,通过与经验调参相配合,可以大大减小调参的难度。该方法在很大程度上具有通用性,不仅可以用于本文的问题,也可以广泛用于其它 ADRC 设计问题。当然,这种方法只是对 ADRC 参数优化的一种探讨,而且对于本文研究的具体问题,为减小计算量还作了很多简化,如何提高这种方法的效率以及如何给出比较一致、有效的性能指标还需进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 牛绿伟,高晓光. 划分超视距、近距的多机协同作战战术决策[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(6): 971-975.
NIU Luwei, GAO Xiaoguang. Making decisions on proper cooperation tactics for multiple fighters to combat from beyond visual range (BVR) to within visual range (WVR) [J]. Journal of northwestern polytechnical university, 2011, 29(6): 971-975. (in Chinese)
- [2] 齐乃明,秦昌茂,宋志国. 高超声速飞行器改进自抗扰串级解耦控制器设计[J]. 哈尔滨工业大学学报,

2011, 43(11): 34-38.

QI Naiming, QIN Changmao, SONG Zhiguo. Improved ADRC cascade decoupling controller design of hypersonic vehicle [J]. Journal of harbin institute of technology, 2011, 43(11): 34-38. (in Chinese)

- [3] Snell S A, Enns D F, Garrard W L. Nonlinear inversion flight control for a super-maneuverable aircraft [J]. Journal of guidance, control and dynamics, 1992, 15(4): 976-984.
- [4] Yang Ruiguang, Sun Mingwei. ADRC control on first-order plant [J]. Journal of system engineering and electronics, 2011, 25(1): 967-971.
- [5] Qin Changmao, Qi Naiming, LÜ Rui, et al. ADRC fractional order PID controller design of hypersonic flight vehicle [J]. Transactions of Nanjing university of aeronautics & astronautics, 2011, 28(3): 240-244.
- [6] 周游,王庆林. 性能评价方法在 ADRC 参数整定中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(10): 1189-1193.
ZHOU You, WANG Qinglin. Application of performance assessment method to ADRC parameter setting [J]. Transactions of Beijing institute of technology, 2011, 31(10): 1189-1193. (in Chinese)
- [7] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
HAN Jingqing. Active disturbances rejection controller and its applications [J]. Control and decision, 1998, 13(1): 19-23. (in Chinese)

(下转第 32 页)