

基于改进型蜂群算法的无人机姿态控制参数优化

林峰, 王晓桐, 曲晓光

(沈阳航空航天大学 自动化学院, 沈阳 110136)

摘要: 针对蜂群算法容易陷入局部最优值的缺点, 引入交叉变异选择操作和自适应的思想对算法进行改进, 使算法能够在保持蜂群种类多样性的同时, 自适应更新食物源位置。然后通过改进型蜂群算法对小型固定翼无人机姿态控制模型进行参数优化, 分别对无人机的俯仰、滚转和偏航姿态进行 PID 控制, 并且通过仿真实验与遗传算法和粒子群算法优化的 PID 参数进行对比。结果表明, 相比于其它优化算法, 改进型蜂群算法在超调量和振荡次数方面有着明显的优点, 能够有效地提高无人机姿态控制系统的控制性能。

关键词: 蜂群算法; 改进; 无人机; 姿态控制; PID

中图分类号: V249.121 文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.2095-1248.2015.06.007

Parameters optimization of UAV's attitude control system based on improved bee colony algorithm

LIN Feng, WANG Xiao-tong, QU Xiao-guang

(College of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: A defect of BCA is that it is easy to fall into local optimum. To rectify this defect this paper introduced an improved algorithm of crossover operation, mutation operation, select operation and adaptive thought to maintain the diversity of bees species and update food source adaptively. Then the parameters of small fixed-wing UAV's attitude control model were optimized by improved bee colony algorithm (IBCA), PID control and simulate pitching-pose-holding-mode, rolling-pose-holding-mode and yawing-pose-holding-mode of UAV, and compared with GA and PSO. The results show that the IBCA has obvious advantages in the aspects of overshoot and oscillation frequency, and thus improves the performance of UAV's attitude control system effectively.

Key words: bee colony algorithm; improvement; UAV; attitude control; PID

由于无人机^[1]有着体积小、使用方便和造价低等诸多优点, 如今已经被广泛应用在各个领域中。而无人机的各种姿态控制都是需要依靠无人机自动驾驶仪来完成的, 因此对无人机自动驾驶仪控制律的设计^[2]成为该领域的研究热点。目

前, 应用在无人机飞行控制系统设计的控制方法主要分为经典控制技术与现代控制技术两大类。经典控制方法主要是研究飞机的俯仰、滚转和偏航三个反馈系统的控制器设计, 方法简单、成熟, 已经广泛应用于工程中的飞控系统^[3]中。近年

收稿日期: 2015-07-02

作者简介: 林峰(1963-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 主要研究方向: 嵌入智能与智能微处理器、信号分析与处理等, E-mail: lfshenyang163@163.com。

来,在飞行控制系统的设计中应用了大量的现代控制理论方法,如非线性动态逆控制^[4]、鲁棒控制^[5]和滑模变结构控制^[6]等方法。虽然这些方法都能较好地满足飞行控制的需要,但是对无人机模型的精确度要求很高,实现有一定的难度。

在经典控制方法中,无人机采用最多的是 PID 控制器,由于传统 PID 控制器的参数需要进行反复的试验来确定,耗用很长的时间,并且不能保证控制系统的最佳性能,因此要对 PID 参数进行优化以满足无人机姿态控制的需要。20 世纪 80 年代以来,大量的智能算法^[7]涌现出来,人们将这些智能算法应用在无人机的姿态控制器参数优化上面,并得到了较好的优化效果,如遗传算法^[8]和粒子群算法^[9]等。蜂群算法^[10-12]是近年来一种新的智能优化算法,通过模仿蜂群的采蜜行为,每个人工蜂分别在各自的区域范围内寻取最优值,最终可以把群体中的全局最优值突出表现出来。算法有着很好的鲁棒性和收敛性^[13],但也存在容易陷入局部最优值的缺点。在已有的研究结果中,都是根据保持蜂群的多样性^[14-15]来进行改进,然而算法中食物源的位置同样重要。到目前为止,尚没有学者对食物源位置这个方面进行改进。

本文在总结前人工作的基础上,通过遗传算法中的交叉、变异、选择操作来保持蜂群多样性的同时,将自适应^[16]的思想引入到蜂群算法中对食物源位置的更新进行改进。通过改进后的蜂群算法在常规 PID 控制的基础上进行最优化的控制方法设计,并应用在对无人机姿态控制上。然后通过 MATLAB 进行仿真实验并与遗传算法、粒子群算法优化的 PID 参数进行对比,进而验证改进型蜂群算法在无人机的应用上比其它的优化算法具有更好的控制性能。

1 蜂群算法的改进

1.1 蜂群算法的改进思想

由于蜂群算法的优化原理是通过蜜蜂个体之间的交流合作来实现的,蜜蜂在算法进行的过程中不会改变自身的基因,只是在一定的条件下才转变他们所承担的角色。如果任意一种角色的蜜蜂的活动受到限制,就不会触发转变角色的条件,

进而会陷入局部的最优值。此外,蜂群算法的食物源位置不能跟随算法的进行而改变,只是解的质量不再得到改善并经过 limit 次循环以后才会更新个别的食物源位置。算法不够智能,搜索效率与收敛速度都比较低。因此为了避免算法陷入局部最优并提高算法效率,这里从以上两个方面来共同对蜂群算法进行改进。

一方面借助于遗传算法中的交叉变异操作,产生新的蜜蜂个体,达到实现蜜蜂群的多样性的目的,然后计算变异后的适应值,再保留通过选择操作选取出的变异前后中高质量的解;另一方面将花蜜程度引入到算法当中,花蜜程度按照规律进行自适应的调整,通过花蜜程度来自适应更新食物源的位置。按照这两方面改进不仅解决了容易陷入局部最优的缺点,而且还使得整个算法具有自适应性,提高了原本算法的效率。

1.2 改进型蜂群算法对 PID 的参数优化

在改进型蜂群算法优化 PID 参数问题中,可以把 PID 三个参数组合在一起作为所有可能的解来代表每一个食物源,同时为了抑制过渡过程中大偏差的出现,本文选用平方偏差积分方程 (ISE) 作为性能指标函数,如式 (1) 所示。

$$J = \text{ISE} = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1)$$

然后实时地计算适应值 J 来达到对 k_p 、 k_i 和 k_d 三个参数的动态调整,最终寻得三个参数的最优值。改进型蜂群算法优化 PID 参数结构图如图 1 所示。

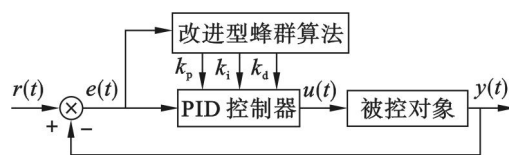


图 1 改进型蜂群算法优化 PID 参数结构图

具体步骤为:

(1) 初始化。设置迭代次数、蜂群规模、采样时间、花蜜程度、侦查蜂所占比率、自适应参数等参数以及 k_p 、 k_i 、 k_d 和三个参数的上下限,并随机生成含有 N 个解的初始种群。每个解 x_i ($i=1, 2, \dots, N$) 都是一个三维的向量,这里用 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})^T$ 来表示。初始种群的公式如式 (2) 所示。

$$x_i = LB + \text{rand}(0,1) * (UB - LB) \quad (2)$$

在上述式子中, LB 代表的是解 x 的取值下限, UB 代表的是解 x 的取值上限。

(2) 引领蜂开始随机地探路, 并计算每个解的适应值, 然后用交叉变异操作, 计算变异操作后的适应值, 通过选择操作保留高质量的解。

(3) 跟随蜂对食物源进行选择并向食物源移动。食物源被选择的概率计算公式如式(3)所示。

$$P_i = \frac{\text{fit}(i)}{\sum_{i=1}^N \text{fit}(i)} \quad (3)$$

在上述式子中, P_i 代表的是第 i 个食物源被跟随蜂选择的概率, $\text{fit}(i)$ 代表的是第 i 个解的适应值。

(4) 更新食物源位置并记录。食物源位置更新公式如式(4)所示:

$$x'_{ij} = x_{ij} * (1 - \text{Diff}) + \frac{\text{fit}_{\max} - \text{fit}(i)}{\text{fit}_{\max} - \text{fit}_{\min}} \quad (4)$$

在上述式子中, x'_{ij} 代表的是更新后食物源的位置, x_{ij} 代表的是初始化后食物源的位置, Diff 代表的是花蜜程度, $\text{fit}(i)$ 代表的是第 i 个解的适应值, fit_{\max} 代表的是当前记录适应值的最大值, fit_{\min} 代表的是当前记录适应值的最小值。

(5) 记录本次迭代的最好解和适应值。

(6) 自适应调整花蜜程度。当迭代达到 N 次后并且该次的适应值没有 N 次前的适应值优秀, 则花蜜程度按照如下规律进行调整如式(5)所示:

$$\text{Diff}' = \begin{cases} 0.95 * \text{Diff} & 0.95 * \text{Diff} \geq \text{Diff}_{\min} \\ \text{Diff}_{\min} & 0.95 * \text{Diff} < \text{Diff}_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

在上述式子中, Diff' 代表的是调整后的花蜜程度, Diff 代表的是调整前的花蜜程度, Diff_{\min} 代表的是花蜜程度的最小值。

(7) 判断是否能够满足算法的结束条件, 如果是, 输出最优解, 否则将迭代次数加一并跳回(2)。

2 无人机姿态控制的数学模型

由于固定翼无人机的数学模型是非线性的,

需要选择等速直线、对称定常、没有侧滑的飞行运动作为基准运动, 根据小扰动原理把非线性模型线性化, 才能经过解耦得到纵向运动和横侧向运动的线性模型。

本文以小型无人机 PT-60 (Perfect Trainer, PT) 作为研究对象。假定无人机在高度为 500 m 的空中以 20 m/s 的速度飞行, 根据配平可知迎角为 2° , 下滑角为 -2° , 然后结合气动导数公式可得纵向状态矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} -0.03667 & 7.405 & 0 & -9.8000 \\ -0.00915 & -2.611 & 1 & 0 \\ 0.00323 & -16.14 & -1.364 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.2357 \\ -0.09795 \\ -13.04 \\ 0 \end{bmatrix}$$

通过拉普拉斯变换, 能够得出输入是升降舵偏转角, 输出是俯仰角速度和俯仰角的传递函数:

$$\frac{\Delta q}{\Delta \delta_e} = \frac{-13.04s^3 - 32.95s^2 - 2.113s}{s^4 + 4.012s^3 + 19.91s^2 + 0.8224s + 1.529}$$

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta \delta_e} = \frac{-13.04s^2 - 32.95s - 2.113}{s^4 + 4.012s^3 + 19.91s^2 + 0.8224s + 1.529}$$

而横侧向状态矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} -0.2277 & 0 & -1.0000 & 0.2159 \\ -13.75 & -11.81 & 3.324 & 0 \\ 10.61 & -0.3601 & -0.3661 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 2 & 0.1001 \\ -117.9 & 8.936 \\ -0.304 & -6.671 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

同理, 经过拉式变化, 可得到输入是副翼舵偏转角, 输出是滚转角速度和滚转角的传递函数:

$$\frac{\Delta p}{\Delta \delta_a} = \frac{-117.9s^3 - 71.0195s^2 - 1265.1573s}{s^4 + 12.4038s^3 + 18.9031s^2 + 134.4811s - 6.5275}$$

$$\frac{\Delta \varphi}{\Delta \delta_a} = \frac{-117.9s^2 - 71.0195s - 1265.1573}{s^4 + 12.4038s^3 + 18.9031s^2 + 134.4811s - 6.5275}$$

通过上述传递函数, 结合俯仰角和滚转角的

控制策略,可分别得到俯仰姿态控制模型和滚转姿态控制模型分别如图 2 和图 3 所示。

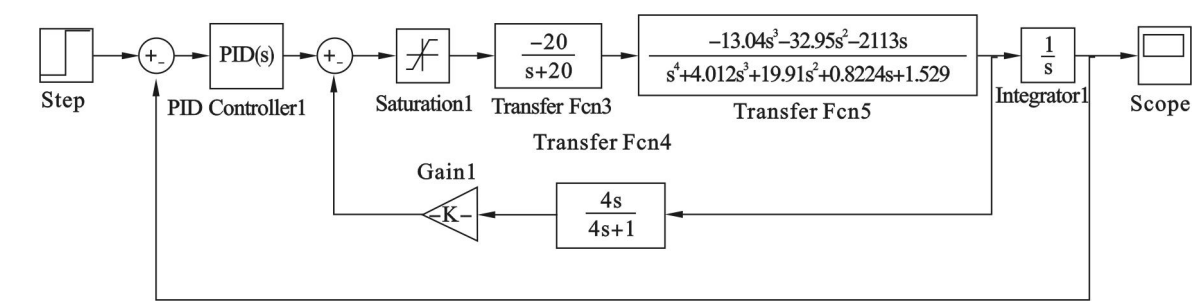


图 2 俯仰姿态控制模型

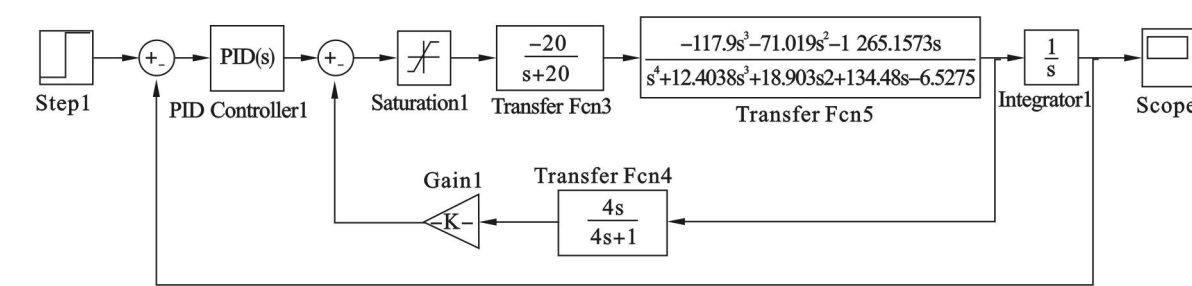


图 3 滚转姿态控制模型

而无人机以恒定角速率作水平协调转弯的情况下,偏航角速率 $\dot{\psi}$ 与滚转角 φ 的关系如式(6)所示。

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{g \cdot \tan(\varphi)}{v} \approx \frac{g \cdot \varphi}{v} \quad (6)$$

并通过拉普拉斯变化,可得:

$$\psi(s) = \frac{g \cdot \varphi(s)}{v \cdot s} \quad (7)$$

根据式(7)可知,在无人机协调转弯时,偏航姿态控制模型只需在滚转姿态控制模型的基础上增加一个外回路即可。因此偏航姿态控制模型如图 4 所示。

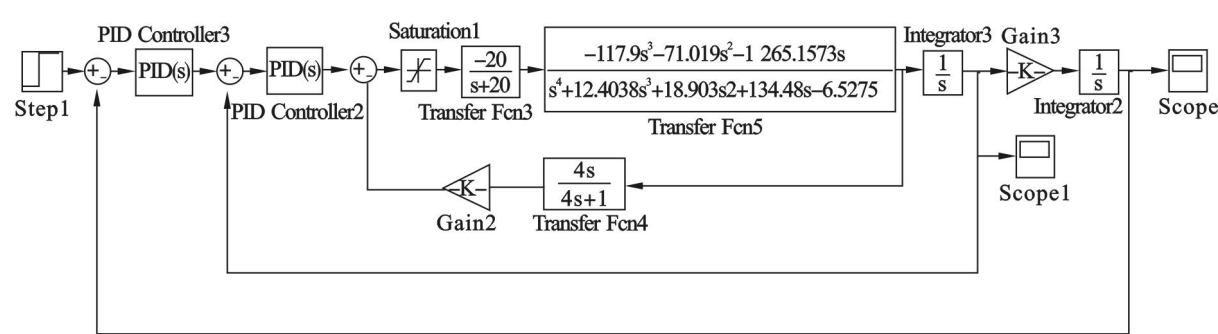


图 4 偏航姿态控制模型

3 PID 参数优化及仿真对比

通过改进型蜂群算法分别对俯仰、滚转和偏航三种姿态控制模型进行 PID 参数优化,分别获得三种姿态优化后的 PID 参数: $k_{pp} = 4.972\ 5$,

$$k_{ip} = 0.841\ 0, k_{dp} = 0.056\ 0。k_{pr} = 1.930\ 7, k_{ir} = 0.330\ 0, k_{dr} = 0.084\ 7。k_{py} = -4.135\ 7, k_{iy} = -0.428\ 0, k_{dy} = 0.848\ 8$$

将优化后的参数在无人机姿态控制模型内进行 PID 控制,并与遗传算法、粒子群算法优化的 PID 参数进行仿真对比,对比结果如图 5 – 图 8 所示。

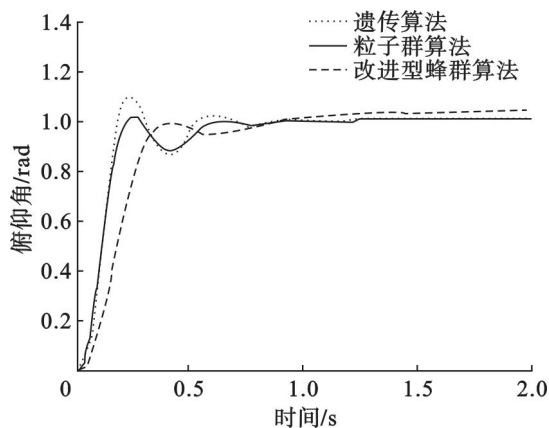


图5 俯仰姿态控制模型的俯仰角响应曲线

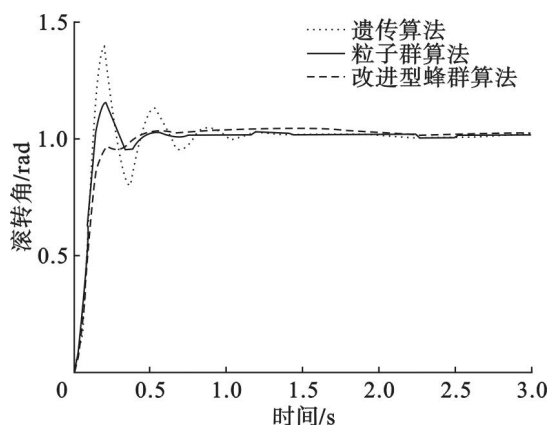


图6 滚转姿态控制模型的滚转角响应曲线

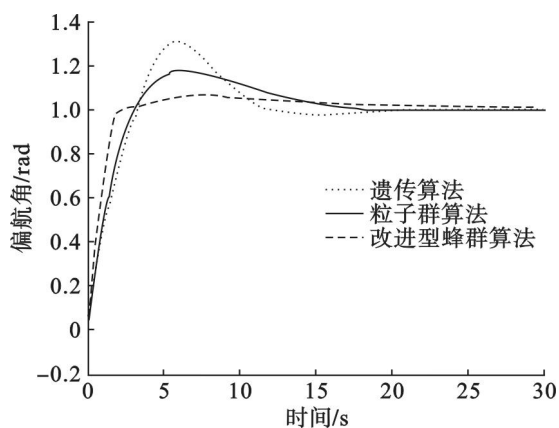


图7 偏航姿态控制模型的偏航角响应曲线

由上述仿真对比图可以看出,三种优化算法都可以对无人机姿态控制模型进行控制并且最终达到稳态,但是在动态指标上改进型蜂群算法要明显优于其它两种优化算法。首先,在超调量方面,改进型蜂群算法在三种姿态控制的超调量均没有超过7%,而遗传算法分别达到了11%、40%和31%,粒子群算法则是除了在俯仰姿态控制模型中超调量只有2%以外,其它控制系统均都维

持在15%左右。其次,在振荡次数方面,其它优化算法会有1-2次的振荡,而改进型蜂群算法做到了没有振荡,但是这是靠牺牲调节时间换来的。因此,在调节时间(5%误差带)方面,改进型蜂群算法没有明显的优势。

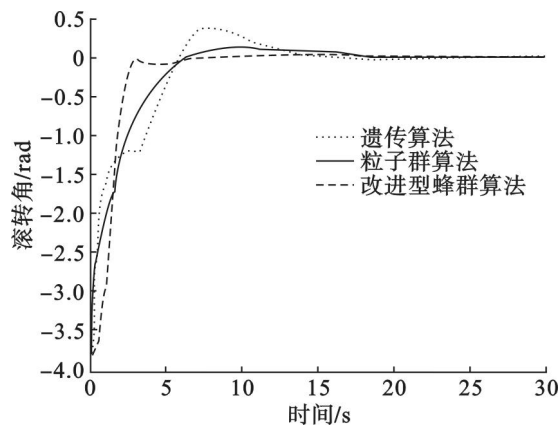


图8 偏航姿态控制模型的滚转角响应曲线

4 总结

本文通过引入交叉变异选择操作和花蜜程度对蜂群算法进行改进,在常规PID控制的基础上引入改进型蜂群算法对控制参数进行优化,并应用在无人机的姿态控制上,通过仿真实验与遗传算法、粒子群算法进行对比。仿真结果表明,在无人机姿态控制模型中,改进型蜂群算法比其它的优化算法有着调节时间略短、超调量小、无振荡的优点,可以使无人机在较快的时间内平滑过渡到稳态,避免了机头来回摆动的幅度与次数,能够更好地提高飞行控制系统的姿态控制性能。

参考文献 (References):

- [1] 党芳,王敏芳,汪银辉. 无人机发展现状及趋势[J]. 地面防空武器,2005(3):49-54.
- [2] Borrelli F, Keviczky T, Balas G J. Collision-free UAV formation flight using decentralized optimization and invariant sets [C]. 43rd IEEE conference on Decision and Control, Atlantis: Paradise Island, 2004, 1099-1104.
- [3] Gao J, Chen Z. Study on gain-scheduling problem in flight control [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1999, 12(4):217-221.
- [4] Sieberling S, Chu Q P, Mulder J A. Robust flight control using incremental nonlinear dynamic inversion and

- angular acceleration prediction [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2010, 33 (6): 1732 – 1742.
- [5] Dai H S, Zhu J H. An application of robust control techniques to control law design of unmanned air vehicle [C]. Control Conference (CCC), 2010: 1865 – 1869.
- [6] 黄显林,王海斌,尹航,等. 空间飞行器的非线性变结构控制[J]. 哈尔滨工业大学学报,1998,30(5): 42 – 45.
- [7] 姚新,陈国良,徐惠敏,等. 进化算法研究进展[J]. 计算机学报,1995,18(9):604 – 706.
- [8] 胡占双. 无人机飞行姿态检测及控制研究 [D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2012.
- [9] 李大伟,王宏伦. 无人机自动空中加油飞行控制技术 [J]. 系统仿真学报,2010,22(1): 126 – 130.
- [10] Karaboga D. An idea based on honey swarm for numerical optimization[R]. Kayseri:Erciyes University Press,2005.
- [11] Karaboga D. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (abc) algorithm [J]. Global Optimization, 2007, 39 (3):459 – 471.
- [12] Karaboga D, Basturk B. Artificial bee colony (abc) optimization algorithm for solving constrained optimization problem [C]. Proceedings of World Congress of the International-Fuzzy-Systems-Association, Cancun, MEXICO, 2007, 789 – 798.
- [13] Magdalene M, Yannis M, Constantin Z. Honey bees mating optimization algorithm for financial classification problems [J]. Applied Soft Computing, 2010, 10 (3):806 – 812.
- [14] Li B, Li Y. BE-ABC: hybrid artificial bee colony algorithm with balancing evolution strategy [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Control and Information Processing, Dalian, 2012, 217 – 222.
- [15] ServetKiran M, Gunduz M. A recombination-based hybridization of particle swarm optimization and artificial bee colony algorithm for continuous optimization problems [J]. Applied Soft Computing, 2013, 64 (5):1108 – 1119.
- [16] Middleton R H, Goodwin G C, Hill D G, et al. Design issues in adaptive control [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988, 33(1):50 – 58.
- (责任编辑:刘划 英文审校:刘飞)