

基于 PEM-ABC 算法的小型无人直升机系统辨识

丁力¹ 吴洪涛¹ 姚裕² 申浩宇¹ 李晓芳¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 210016)

摘要: 针对小型无人直升机在悬停状态下飞行动力学模型的系统辨识问题, 提出了一种基于预测误差法与人工蜂群算法 (PEM-ABC) 结合的辨识算法。该算法将系统辨识问题转化为优化问题, 用 PEM 算法确定搜索空间的范围; 雇佣蜂搜索阶段采用改进的自适应搜索策略加快收敛速度; 跟随蜂搜索阶段引入一种新的概率选择方式保证种群多样性; 侦察蜂搜索阶段利用混沌算子来提高全局搜索能力。通过机载设备采集到的飞行实验数据, 对辨识获得的模型进行了分析与验证。结果表明: 采用该辨识方法, 估计出了无人直升机动力学模型的未知参数, 与 PEM 算法和传统人工蜂群算法相比, 所提算法的辨识精度更高, 具有重要的工程使用价值。

关键词: 小型无人直升机; 系统辨识; 预测误差法; 人工蜂群算法

中图分类号: TP242; V279+.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)01-0008-07

Hybrid PEM-ABC Algorithm for System Identification of Small-scale Unmanned Helicopter

Ding Li¹ Wu Hongtao¹ Yao Yu² Shen Haoyu¹ Li Xiaofang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The small-scale unmanned helicopter is well-known by its hovering capabilities. However, it exhibits a nonlinear and complex dynamic phenomenon, and it is a loop unstable, high degree of inter axis coupling system. The goal of autonomous flight was realized based on an accurate and appropriate helicopter model. And system identification is the practical method to obtain the model. Aiming at the system identification of a small-scale unmanned helicopter in hover condition, a novel algorithm combined prediction error method with artificial bee colony algorithm (PEM-ABC) was proposed. In the proposed algorithm, the problem of system identification was turned into an optimization problem. The search scope was arranged by the PEM algorithm; in that case, the initial solutions can be obtained. And in the stage of employed bee search, an adaptive search strategy was adopted to increase the speed of convergence. In the stage of following bee search, a new probability of selection strategy was introduced to keep the diversity of the population. And in the stage of scout bee search, the chaotic search operator was used to improve the ability of global search. Through the actual flight data collected by airborne equipment, the model used in system identification was validated and analyzed. The results show that the unknown parameters can be estimated based on the proposed algorithm. Compared to PEM algorithm and traditional ABC algorithm, the identified accuracy of the proposed algorithm was better, which showed an important engineering application value.

Key words: small-scale unmanned helicopter; system identification; prediction error method; artificial bee colony algorithm

收稿日期: 2015-06-01 修回日期: 2015-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375230)和江苏省科技支撑计划重点项目(BE2013003-1、BE2013010-2)

作者简介: 丁力(1989—),男,博士生,主要从事无人直升机动力学建模与控制、智能算法研究,E-mail: nuaadli@163.com

通信作者: 吴洪涛(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事并联机构、机器人、智能算法研究,E-mail: mehtwu@126.com

θ 、 ϕ ——俯仰角和滚转角

u 、 v 、 w 、 p 、 q 、 r —— $O_B X_B Y_B Z_B$ 坐标系下 X_B 、 Y_B 、 Z_B 轴上的线速度和角速度

a_s 、 b_s ——主旋翼的纵、横向挥舞角

u_{lon} 、 u_{lat} 、 u_{col} 、 u_{ped} ——纵向周期变距、横向周期变距、总距和尾桨桨距

其余 27 个参数为相应的稳定性导数,即待辨识的参数。

根据文献 [13],线速度稳定性导数 $X_a \approx -g$, $Y_b \approx g$;而俯仰和滚转力矩稳定性导数可表示为

$$M_a = \frac{h_{mr} mg + K_\beta}{I_{xx}} \quad (2)$$

$$L_b = \frac{h_{mr} mg + K_\beta}{I_{yy}} \quad (3)$$

式中,转动惯量 I_{xx} 和 I_{yy} 可以通过三线摆实验获得; h_{mr} 是主旋翼桨毂中心到机身重心的距离; K_β 是主旋翼有效弹簧常数,可通过频域辨识获得^[14],这里不再赘述。

2 PEM-ABC 辨识算法

2.1 算法描述

人工蜂群算法是对蜂群觅食行为的模拟,它包括 3 部分:雇佣蜂、待工蜂和蜜源^[15]。其中待工蜂由跟随蜂与侦查蜂组成。PEM-ABC 辨识算法将小型无人直升机中每个待辨识的参数作为一个蜜源,蜜源质量的好坏则用收益度来评价,最好的蜜源就是整个辨识过程中的最优参数。算法的具体步骤如下:

(1) 获得初始解。在 Matlab 2012b 的辨识工具箱中,利用 PEM 算法得到未知参数的初始解,根据初始解来确定搜索空间的范围,为进一步辨识工作做好准备。

(2) 种群初始化。随机产生 x_{ij} 组解,即蜜源。蜜源随机产生公式为

$$x_{ij} = x_{ij}^L + \text{rand}(0,1)(x_{ij}^U - x_{ij}^L) \quad (i=1,2,\dots,N;j=1,2,\dots,D) \quad (4)$$

式中 N ——雇佣蜂与待工蜂的数量之和

D ——解空间的维数

x_{ij}^L 、 x_{ij}^U —— x_{ij} 取值的下限和上限,也就是搜索空间的范围

(3) 计算蜜源收益度。根据收益度值保留蜜源质量较高的前 $N/2$ 组解,并与雇佣蜂一一对应。计算公式为

$$\text{fit}_i = 1/(1 + F_i) \quad (5)$$

$$F_i = \sum_{i=1}^M \frac{\|y_i - y_{mi}\|}{\|y_i - \bar{y}_i\|} \quad (6)$$

式中 F_i ——寻优目标函数

y_i ——实际飞行数据

\bar{y}_i ——实际飞行数据的平均值

y_{mi} ——辨识获得的数据

M ——采样数

收益度 fit_i 越大,辨识的精度越高。

(4) 雇佣蜂搜索。对相应于当前第 T 代雇佣蜂中的一个目标蜜源 x_{ij}^T ,随机选择蜜源 $r \in [1, 2, \dots, N/2]$ ($r \neq i$) 逐维进行交叉搜索,产生新的蜜源 v_{ij} 。传统 ABC 算法在雇佣蜂搜索阶段时会由于过分开采蜜源而导致算法收敛速度变慢。本文采用一个自适应雇佣蜂搜索策略来提高算法收敛速度,即

$$v_{ij} = x_{ij}^T + \omega \Phi_{ij}(x_{ij}^T - x_{rj}^T) \quad (7)$$

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{T_{\max}} T \quad (8)$$

式中 Φ_{ij} —— $-1 \sim 1$ 的随机数

ω ——权重因子

ω_{\max} 、 ω_{\min} ——最大和最小权重

T_{\max} ——最大迭代数

(5) 贪婪选择。为了保证算法朝最优方向进化,通过公式来保留 x_{ij}^T 与 v_{ij} 中的较好解,即

$$x_{ij}^{T+1} = \begin{cases} v_{ij} & (\text{fit}(v_{ij}) > \text{fit}(x_{ij}^T)) \\ x_{ij}^T & (\text{fit}(v_{ij}) \leq \text{fit}(x_{ij}^T)) \end{cases} \quad (9)$$

(6) 跟随蜂搜索。传统 ABC 算法中跟随蜂选择雇佣蜂跟随的概率与收益度成正比例关系,经过多次迭代循环后,当前较差的解易被剔除掉,但它们同样包含着有用信息。故本文提出一种新的概率选择方式,使得较差的解有较大选择概率,即

$$p_i = \frac{\frac{1}{\text{fit}_i}}{\sum_{i=1}^{N/2} \frac{1}{\text{fit}_i}} \quad (10)$$

(7) 侦察蜂搜索。当搜索次数 trial 大于某个阈值 Limit 时,若尚未找到当前最优解,则当前蜜源 x_{ij} 被放弃,相应的雇佣蜂变成侦察蜂重新搜索蜜源。本文采用混沌算子来实现侦察蜂的初始化。混沌算子具有遍历性和稳定性^[16],可以在局部最优解附近产生许多邻域点,然后通过载波操作将混沌变量 y_{nj} 放大并加载到待搜索的蜜源 x_{ij} 上,侦察蜂的搜索范围则变成了以蜜源 x_{ij} 为中心、 R_{ij} 为半径的区域。具体公式为

$$y_{(n+1)j} = 4y_{nj}(1 - y_{nj}) \quad (11)$$

$$\tilde{y}_{nj} = x_{ij} + R_{ij}(2y_{nj} - 1) \quad (12)$$

式中, $n \in [0, T_{\max}]$, $j \in [1, D]$, $0 \leq y_{nj} \leq 1$ 且 $y_{nj} \neq$

{0.25, 0.5, 0.75}。

(8) 求解并记录当前最优解。然后返回到步骤(4), 使种群进化到下一代反复循环, 直至 $T = T_{max}$ 。

2.2 算法流程图

采用 PEM-ABC 算法对公式(1)中的未知参数进行辨识, 算法的流程如图 2 所示。

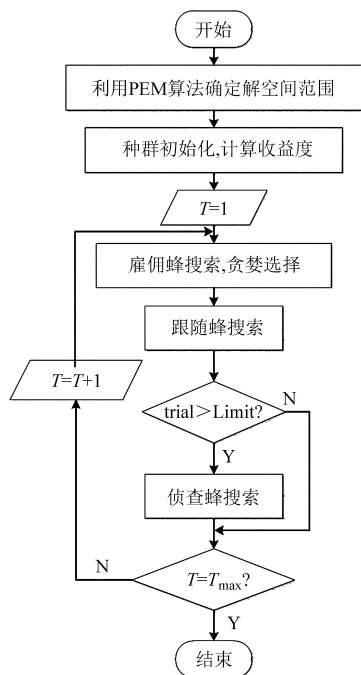


图 2 PEM-ABC 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of PEM-ABC algorithm

3 系统辨识与模型验证

整个无人直升机实验系统如图 3 所示, 由 3 部分组成: Trex-600 小型无人直升机; 一套机载设备; 地面站。本文采用 Trex-600 小型无人直升机为实验平台, 并根据辨识实验需要对其进行了改装。其中, 整个系统净质量 2.45 kg, 起飞质量 6.4 kg, 机身长度 1.16 m, 主旋翼直径 1.35 m, 尾翼直径 0.24 m, 主旋翼转速 2 200 r/min。机载设备由数传电台、全

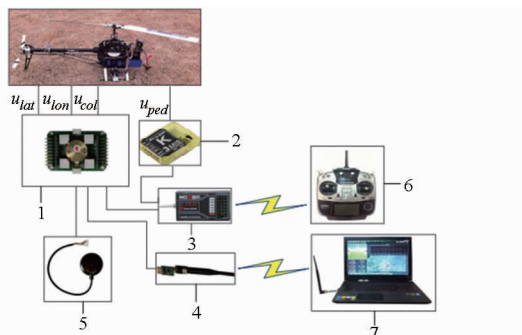


图 3 无人直升机实验系统

Fig. 3 System of unmanned helicopter

1. ACS 2. KBAR 偏航角速度陀螺仪 3. 6 通道遥控器接收器
4. 数传电台 5. GPS 6. Futaba 无线电遥控器 7. 地面站

球定位系统 (Global positioning system, GPS)、飞行控制系统 (AERO control system, ACS)、KBAR 偏航角速度陀螺仪、6 通道遥控接收器、摄像机等组成。

另外, ACS 中嵌有惯性测量单元 (Inertial measurement unit, IMU)、数字气压高度计、三轴加速度计、三轴磁力计和 1GB 板载数据记录仪, 如图 4 所示。ACS 的关键指标见表 1, 数据表明 ACS 可以处理任何常规无人直升机的机动情况。

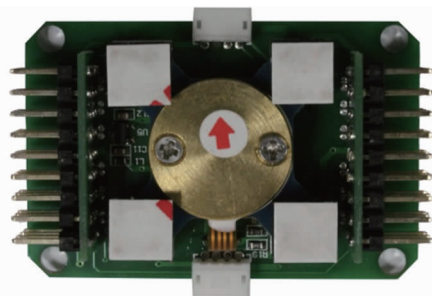


图 4 ACS 的内部结构

Fig. 4 Internal structure of ACS

表 1 ACS 的关键指标

Tab. 1 Specification of ACS

指标	数值
加速度测量范围/($m \cdot s^{-2}$)	± 19.6
角速度测量范围/($^{\circ} \cdot s^{-1}$)	± 200
磁力计测量范围/G	± 0.75
GPS 测量精度/m	0.2
Roll/Pitch 测量精度/rad	0.005
Yaw 测量精度/rad	0.012
尺寸/($mm \times mm \times mm$)	$65 \times 42 \times 13$
质量/g	68

为了得到辨识数据, 飞行手分别对俯仰、横滚、偏航和总距通道进行激励, 使直升机处于悬停状态, 并获得输入量、姿态角、线速度、角速度等信息, 如图 5 所示。为了保证实验样本容量足够大, 悬停实验重复进行 3~5 次。



图 5 悬停实验

Fig. 5 Hovering experiment

原始飞行数据受到诸多干扰, 如阵风干扰、舵机信号干扰等, 故在模型辨识之前需对采集到的数据进行去噪和平滑等预处理。本文飞行数据采集频率为 50 Hz, 共采集到 4 308 组数据, 取悬停状

态下的 2 640 组数据经过零均值化、去中值和去趋势处理后,作为辨识用的原始数据样本。然后,采用五点三次平滑法对原始数据进行平滑处理^[17],计算公式为

$$\begin{cases} \bar{y}_1 = \frac{1}{70}[69y_1 + 4(y_2 + y_4) - 6y_3 - y_5] \\ \bar{y}_2 = \frac{1}{35}[2(y_1 + y_5) + 27y_2 + 12y_3 - 8y_4] \\ \bar{y}_i = \frac{1}{35}[-3(y_{i-2} + y_{i+2}) + 12(y_{i-1} + y_{i+1}) + 17y_i] \\ \bar{y}_{m-1} = \frac{1}{35}[2(y_{m-4} + y_m) - 8y_{m-3} + 12y_{m-2} + 27y_{m-1}] \\ \bar{y}_m = \frac{1}{70}[-y_{m-4} + 4(y_{m-3} + y_{m-1}) - 6y_{m-2} + 69y_m] \end{cases} \quad (i=3, 4, \dots, m-2) \quad (13)$$

其中 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$
 $\bar{\mathbf{Y}} = (\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_m)$

式中 \mathbf{Y} ——原始数据

$\bar{\mathbf{Y}}$ ——经过平滑后的数据

设置 ABC 算法和 PEM-ABC 算法的初始条件为: $N=20$, $\text{Limit}=5$, $T_{\max}=50$, 利用这两种算法分别对无人直升机的动力学模型进行辨识,并记录下迭代过程中的每代最优收益度。两种算法的迭代曲线如图 6 所示,从图中可以看出 PEM-ABC 算法在 11 代时开始收敛,而 ABC 算法到了 16 代左右才开始收敛,且本文算法的最优收益度为 0.879 7,而 ABC 算法为 0.825 3,说明本文算法的收敛速度快、全局寻优能力强。

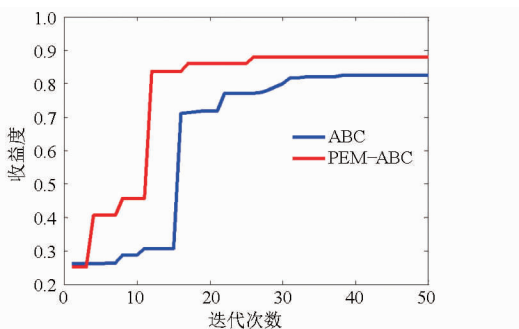


图 6 两种算法迭代曲线

Fig. 6 Comparison of iteration curves regarding two algorithms

利用本文辨识算法得到无人直升机模型中的未知参数,如表 2 所示。

为了比较 PEM 算法、ABC 算法和 PEM-ABC 算法的辨识精度,引入相关系数 ρ 来评价模型对飞行实验数据的匹配度

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(y_{mi} - \bar{y}_{mi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^N (y_{mi} - \bar{y}_{mi})^2}} \quad (14)$$

表 2 基于 PEM-ABC 辨识的参数

Tab. 2 Identified parameters based on PEM-ABC

参数	数值	参数	数值
X_u	-0.022 3	Z_r	0.815 2
Y_v	-0.647 0	N_v	2.066 3
M_u	0.753 2	N_p	-8.365 0
M_v	-0.190 1	N_w	-1.573 0
M_a	203.380 0	N_r	-0.628 3
L_u	-0.024 4	τ_f	0.023 3
L_v	-0.117 3	A_{lon}	0.206 0
L_b	575.104 0	A_{lat}	-9.210 3
A_b	0.688 0	B_{lon}	-1.347 2
g	9.800 0	B_{lat}	0.177 3
B_a	0.401 3	Z_{col}	-34.012 0
Z_a	0.547 1	N_{col}	0.235 3
Z_b	10.102 4	N_{ped}	12.831 0
Z_w	-5.113 0		

式中 \bar{y}_{mi} ——辨识数据的平均值

ρ 越接近 1,则说明辨识精度越高;反之,若 ρ 越接近 0,则说明辨识精度越差。

表 3 给出了通过 3 种算法得到的相关系数,以线速度 w 为例,PEM-ABC 算法的相关系数分别比 ABC 算法和 PEM 算法高了 4.74% 和 15.55%。由此可见本文算法的辨识精度更高。

表 3 3 种算法相关系数 ρ 的比较

Tab. 3 Comparison of three algorithms' correlation coefficient ρ

参数	算法		
	PEM	ABC	PEM-ABC
θ	0.864 6	0.841 2	0.894 1
ϕ	0.826 2	0.876 0	0.900 9
u	0.805 1	0.839 7	0.864 8
v	0.816 2	0.883 4	0.910 7
w	0.750 7	0.846 8	0.888 9
q	0.791 0	0.811 4	0.874 2
p	0.802 6	0.842 9	0.904 3
r	0.876 7	0.855 2	0.923 5

为了进一步比较 3 种算法的优劣性,分别利用这 3 种算法辨识的模型求出预测输出值,如图 7 所示。从图中可以看出,虽然 3 种模型的预测数据均能跟踪实际飞行数据,但用 PEM-ABC 算法得到的模型预测数据与实际数据吻合得最好,更能反映系统的动态特性。

4 结束语

建立准确的无人直升机动力学模型是实现其自主飞行的关键性技术之一,也是无人飞行器领域研究的热点和难点。本文针对无人直升机动力学系统

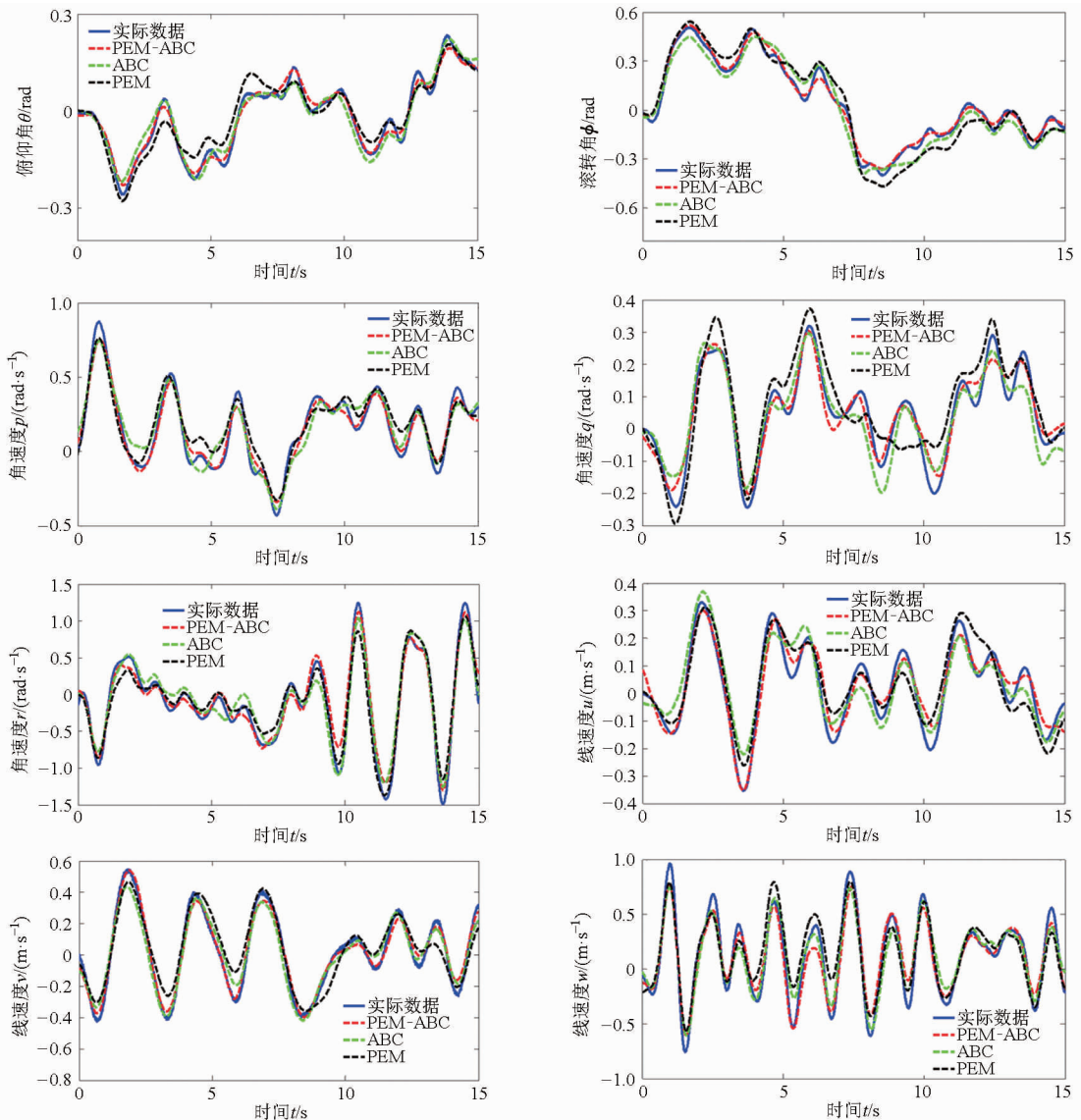


图 7 实际飞行数据与预测数据的对比

Fig. 7 Comparison of actual flight data and estimated data

辨识问题,提出了一种 PEM-ABC 混合算法。在算法中,通过引入自适应搜索机制、新颖的概率选择方式和混沌搜索策略来提高算法性能。同时,搭建了辨识所需的实验平台,通过采集悬停状态下无人直

升机的飞行数据进行了辨识实验。实验结果证实 PEM-ABC 算法具有较好的全局收敛性与鲁棒性,能有效解决无人直升机动力学系统辨识问题。

参 考 文 献

- 茹煜,贾志成,范庆妮. 无人直升机远程控制喷雾系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 47-52.
Ru Yu, Jia Zhicheng, Fan Qingni. Remote control spraying system based on unmanned helicopter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 47-52. (in Chinese)
- Gadewadikar J, Lewis F L, Subbarao K, et al. H-infinity static output-feedback control for rotorcraft[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2009, 54(4): 629-646.
- Kondak K, Bernard M, Losse N, et al. Elaborated modeling and control for autonomous small size helicopters[J]. VDI Berichte, 2006, 1956: 207-219.
- Tang S, Zheng Z, Qian S, et al. Nonlinear system identification of a small-scale unmanned helicopter[J]. Control Engineering Practice, 2014, 25: 1-15.
- Mettler B. Identification modeling and characteristics of miniature rotorcraft[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013: 93-120.
- Del Cerro J, Valero J, Barrientos A. Identification of a small unmanned helicopter model using genetic algorithms[C]// 2005

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005: 3360 – 3365.
- 7 Chen H S, Chen D R. Identification of a model helicopters yaw dynamics[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2005, 127(1): 140 – 145.
- 8 杜玉虎, 房建成, 盛蔚, 等. 基于最小二乘与自适应免疫遗传算法的小型无人直升机系统辨识[J]. 机器人, 2012, 34(1): 72 – 77.
- Du Yuhu, Fang Jiancheng, Sheng Wei, et al. Identification of small-scale unmanned helicopter based on least squares and adaptive immune genetic algorithm[J]. Robot, 2012, 34(1): 72 – 77. (in Chinese)
- 9 Tijani I B, Akmeliawati R, Legowo A, et al. Hybrid DE-PEM algorithm for identification of UAV helicopter[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2014, 86(5): 385 – 405.
- 10 李霜天, 段海滨. 基于人工蜂群优化的高超声速飞行器在线参数辨识[J]. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(11): 1350 – 1363.
- Li Shuangtian, Duan Haibin. Artificial bee colony approach to online parameters identification for hypersonic vehicle[J]. Scientia Sinica Information, 2012, 42(11): 1350 – 1363. (in Chinese)
- 11 高明松, 李素明, 周卫东. 应用人工蜂群算法辨识潜器参数[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(8): 1023 – 1027.
- Gao Mingsong, Li Suming, Zhou Weidong. Identification on hydrodynamic coefficients of underwater vehicle with the ABC algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(8): 1023 – 1027. (in Chinese)
- 12 Koo T J, Sastry S. Output tracking control design of a helicopter model based on approximate linearization[C] // Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, 1998, 4: 3635 – 3640.
- 13 Raptis I, Valavanis K. Linear and nonlinear control of small-scale unmanned helicopters[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2010: 47 – 72.
- 14 吴建德, 李平, 韩波. 一种基于参数辨识的微小型无人直升机建模方法[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 845 – 850.
- Wu Jiande, Li Ping, Han Bo. A modeling method of miniature unmanned helicopter based on parameter identification[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 845 – 850. (in Chinese)
- 15 Xu C F, Duan H B, Liu F. Chaotic artificial bee colony approach to uninhabited combat air vehicle (UCAV) path planning[J]. Aerospace Science and Technology, 2010, 14(8): 535 – 541.
- 16 Alatas B. Chaotic bee colony algorithms for global numerical optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(8): 5682 – 5687.
- 17 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 73 – 82.