

飞机舵机电液伺服系统智能 PID 控制方法研究

刘晓琳, 苏 杨

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘 要:针对飞机舵机电液伺服系统中 PID 控制器参数难以整定的问题,引入一种智能 PID 控制方法。该方法结合了粒子群算法和 PID 控制器的优点,并利用蜂群算法的选择策略对粒子群算法进行优化,适应了飞机舵机电液伺服系统非线性动态控制环境的要求。实验结果表明,飞机舵机电液伺服系统智能 PID 控制方法能够达到系统控制性能指标要求,相较于传统 PID 控制器具有更良好的跟踪效果。

关键词:电液伺服系统;PID 参数整定;智能控制;粒子群算法;蜂群算法

中图分类号:TP273.3

文献标识码:A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.03.010

引用格式:刘晓琳,苏杨.飞机舵机电液伺服系统智能 PID 控制方法研究[J].信息技术与网络安全,2020,39(3):50-55.

Research on the intelligent PID control method of the electro-hydraulic servo system of the aircraft steering gear

Liu Xiaolin, Su Yang

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: An intelligent PID control method is introduced to solve the problem that the parameters of PID controller are difficult to be adjusted in the electro-hydraulic servo system of aircraft steering gear. This method combines the advantages of particle swarm optimization (PSO) and PID controller, and optimizes PSO by using the selection strategy of bee algorithm, which adapts to the requirements of nonlinear dynamic control environment of aircraft servo system. The experimental results show that the intelligent PID control method of the electro-hydraulic servo system of the aircraft rudder can meet the requirements of the system control performance, and has better tracking effect than the traditional PID controller.

Key words: electro hydraulic servo system; PID parameter setting; intelligent control; particle swarm optimization; bee colony algorithm

0 引言

飞机在飞行过程中通过舵机控制舵面偏转^[1],以实现飞行姿态的改变。因此飞机舵机性能的好坏至关重要。在实验室条件下,利用飞机舵机电液伺服系统对飞机舵机进行力的加载,模拟舵机工作时的负载状况,能够克服传统自破坏性实验成本高、周期长的缺点^[2-3]。飞机舵机电液伺服系统的设计难点在于,系统在实际工作过程中输出与输入存在误差,即多余力^[4]。多余力的存在对系统各项性能指标的提高造成了影响。因此,如何通过对系统控制方法的合理设计,达到补偿输出误差、抑制多余力干扰的目的,是飞机舵机电液伺服系统研究热点之一。由于智能 PID 控制器可以在系统工作过程中进行自学习、自适应、自组织,通过对被控过程参数进行自动识别,达到

自动整定控制参数的目的^[5],从而适应被控过程参数的变化。此外,它还具有常规 PID 控制器结构简单、可靠性高、鲁棒性强、简单易操作的特点。所以智能 PID 控制器不仅能够适应飞机舵机电液伺服系统参数时变的性能特点,在实际应用中还具有较高的可行性。

本文首先引入蜂群算法^[6]的选择策略对粒子群算法^[7]进行优化,再对 PID 控制器进行参数寻优,实现对飞机舵机电液伺服系统的智能 PID 控制。最后通过 Simulink 平台进行仿真实验,验证基于智能 PID 控制方法的飞机舵机电液伺服系统具有更良好的跟踪性能。

1 飞机舵机电液伺服系统数学模型

飞机舵机电液伺服系统原理框图如图 1 所示。控制器根据预设的加载梯度和实时获取的舵

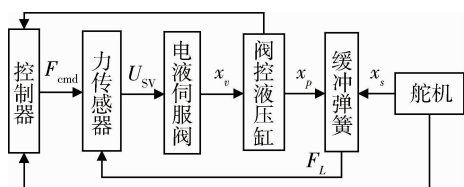


图1 飞机舵机电液伺服系统原理框图

机位移 x_s 获得指令力 F_{cmd} , 同时与阀控液压缸输出位移 x_p 进行比较得到系统误差 e 。

力传感器输出电压 U_{sv} 与指令力和缓冲弹簧输出力 F_L 之差成正比关系, 即

$$U_{sv} = K_{v/I}(F_{cmd} - F_L) \quad (1)$$

式中, $K_{v/I}$ 为力传感器系数。

电液伺服阀将电压信号转换为便于阀控液压缸处理的机械能信号, 驱动阀芯运动产生位移 x_v , 其传递函数 $G_{sv}(s)$ 如下:

$$G_{sv}(s) = \frac{X_v}{U_{sv}} = \frac{K_{sv}}{T_s s + 1} \quad (2)$$

式中, T_s 为时间常数; K_{sv} 为伺服阀增益。

阀控液压缸通过内部的阀芯运动, 改变腔体体积, 带动伸出杆结构变换。其运动学方程为:

$$F_L = A_p p_L - B_p \frac{dx_p}{dt} - kx_p - M_t \frac{d^2 x_p}{dt^2} \quad (3)$$

式中, M_t 为活塞及负载质量; A_p 为活塞有效面积; p_L 为液压缸两腔压差; B_p 为有效黏性阻尼系数; k 为缓冲弹簧刚度系数; F_L 为缓冲弹簧输出的加载力, 且 $F_L = K_L(x_p - x_s)$, 其中, K_L 为弹簧刚度系数。

阀控液压缸的压力动态方程为

$$\frac{dp_L}{dt} = \frac{4\beta_\xi}{V_t} (q_L - A_p \frac{dx_p}{dt} - C_t p_L) \quad (4)$$

式中, V_t 为液压缸腔体容积; β_ξ 为油液弹性模量; q_L 为阀控液压缸进口流量 q_1 和出油口流量 q_2 的平均值且 $q_L = \frac{1}{2}(q_1 + q_2)$; C_t 为执行器泄漏系数。

对阀控液压缸负载流量方程进行线性化处理, 以阀控液压缸中位为零点, 即在 $x_v = 0, p_L = 0$ 以及 $q_L = 0$ 附近进行泰勒展开, 得到阀控液压缸线性化负载流量方程为:

$$q_L = K_q x_v - K_c p_L \quad (5)$$

式中, K_q 为伺服阀流量增益, K_c 为伺服阀总流量-压力系数。

分别对式(3)和(4)进行拉普拉斯变换, 得到:

$$p_L = \frac{x_p}{A_p} (M_t s^2 + B_p s + k) + \frac{F_L}{A_p} \quad (6)$$

$$q_L = A_p s x_p + \frac{V_t}{4\beta_\xi} s p_L + C_t p_L \quad (7)$$

进而由式可得阀控液压缸输出为:

$$x_p = \frac{\frac{K_q}{A_p} x_v - \frac{K_c}{A_p^2} (1 + \frac{V_t}{4\beta_\xi K_c} s) F_L}{s \left[\frac{V_t M_t}{4\beta_\xi A_p^2} s^2 + \left(\frac{K_c M_t}{A_p^2} + \frac{B_p V_t}{4\beta_\xi A_p^2} \right) s + \left(1 + \frac{B_p K_c}{A_p^2} \right) \right]} \quad (8)$$

由于阀控液压缸的密封结构简单、成熟, 其执行机构泄漏系数通常较小, 即 $\frac{B_p K_c}{A_p^2} \ll 1$, 所以式(8)

可简化为:

$$x_p = \frac{\frac{K_q}{A_p} x_v - \frac{K_c}{A_p^2} \left(1 + \frac{V_t}{4\beta_\xi K_c} s \right) F_L}{s \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi_n}{\omega_n} s + 1 \right)} \quad (9)$$

式中, $\omega_n = \sqrt{\frac{4\beta_\xi A_p^2}{M_t V_t}}$ 为阀控液压缸固有频率; $\xi_n =$

$\frac{K_c}{A_p} \sqrt{\frac{\beta_\xi M_t}{V_t}} + \frac{B_p}{4A_p} \sqrt{\frac{V_t}{\beta_\xi M_t}}$ 为阀控液压缸等效阻尼系数。

根据对飞机舵机电液伺服系统各个元件的建模, 可得飞机舵机电液伺服系统的系统方框图, 如图2所示。

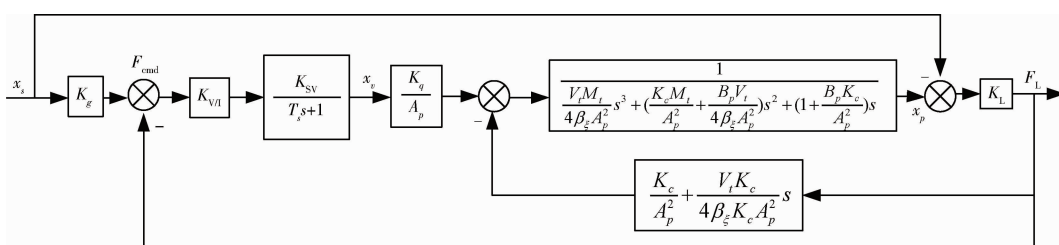


图2 系统方框图

2 飞机舵机电液伺服系统控制方法

本文采用智能 PID 控制方法对飞机舵机电液伺服系统的控制器进行设计,包括智能算法参数寻优和 PID 控制器自适应整定两个方面:

(1) 将蜂群算法的选择策略引入粒子群算法中,提高寻优过程的准确性和快速性。

(2) PID 控制器根据智能算法参数寻优结果进行在线自适应整定,在保持原有鲁棒性、操作便捷性的基础上,适应了非线性、时变性系统的性能特点。

2.1 智能算法优化设计

蜂群算法的选择策略能够对解的适应度进行评价^[8],将该思想引入粒子群算法,即粒子的速度和位置在每次的迭代更新过程中也都进行评价,从而增加粒子群多样性,提高粒子选择的质量。

在粒子群算法中,粒子速度和位置的更新仅仅建立在对父代粒子的某一维层面进行操作,这种方式限制了算法的收敛速度和适用范围。针对飞机舵机电液伺服系统控制器的特点,本文将粒子群算法的搜索维度相应拓展,采用多维搜索方式,设计参数 $D, D \in \{1, 2, 3, \dots\}$ 来表示粒子的维度。由于算法的优化目标是得到 PID 控制器的一组最优参数 k_p, k_i, k_d ,因此将粒子维度设置为 3。用所有粒子的三维向量代表飞机舵机电液伺服系统 PID 控制器符合预设范围和精度要求的全部控制参数。

以 PID 控制器的三个参数 k_p, k_i, k_d 为优化目标,则所有粒子为三维向量,其速度和位置更新公式分别为:

$$v_{i,j}^{k+1} = wv_{i,j}^k + c_1 \text{rand}_{[0,1]}^k (\text{pbest}_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + c_2 \text{rand}_{[0,1]}^k (\text{gbest}_{i,j}^k - x_{i,j}^k) \quad (10)$$

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1} \quad (11)$$

式中, $v_{i,j}^k$ 为第 k 次迭代中第 i 个粒子第 j 维的速度; $x_{i,j}^k$ 为第 k 次迭代中第 i 个粒子第 j 维的位置; w 为惯性权值; c_1 和 c_2 为加速常数; $\text{rand}_{[0,1]}^k$ 为第 k 次迭代中 $[0, 1]$ 间的随机数; $\text{pbest}_{i,j}^k$ 为第 k 次迭代中第 i 个粒子在第 j 维的个体极值; $\text{gbest}_{i,j}^k$ 为第 k 次迭代中第 i 个粒子在第 j 维的全局极值。

对惯性权值进行自适应调整,调整方式为:

$$w = \begin{cases} w_e + \frac{(w_b - w_e)(f - f_{\min})}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}, & f \leq f_{\text{avg}} \\ w_b, & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (12)$$

式中, w_b 为初始权值; w_e 为迭代结束权值; f 为粒子适应度; f_{avg} 为粒子平均适应度; $f_{\min}$ 为粒子最小适应度。

受蜂群算法观察蜂阶段对解进行局部搜索以提高算法寻优精度的启发,本文采用正比选择策略对粒子进行搜索,其基本思想是群体中每个粒子被选中进行评价的概率与其适应度成正比。因此,当种群规模为 SN 时,对于粒子 i ,设其适应度为 F_i ,则该粒子被选中的概率为

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^{\text{SN}} F_i}, i = 1, 2, \dots, \text{SN} \quad (13)$$

粒子在完成各维度更新后,利用蜂群算法的思想对粒子质量进行评价。如果粒子在新速度下的适应度较高,则用新速度替换原速度。同理,如果粒子在新位置下的适应度较高,则用新位置替换原位置。

当被选中粒子适应度未更新次数到达预先设定的极限时,需要放弃该粒子寻找下一个粒子。

智能算法优化设计流程图如图 3 所示。

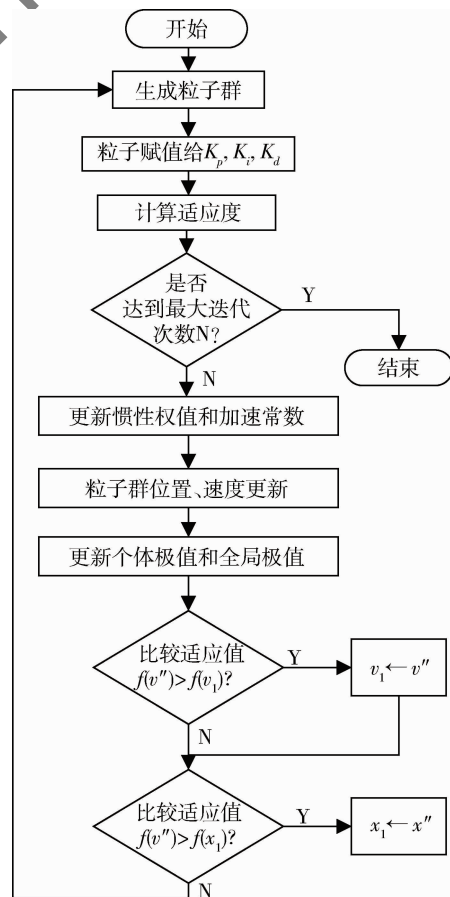


图3 智能算法优化设计流程图

2.2 智能 PID 控制器设计

智能 PID 控制器结合了智能控制和传统 PID 控制器的优点,利用智能控制不依赖系统环境和被控对象精确数学模型的特点,对 PID 控制器参数进行自适应整定,从而大大降低了构建被控对象模型的难度和精确度,简化了参数整定过程中的分析和计算步骤。智能 PID 控制器可以通过智能算法来调节比例系数 k_p 、积分时间系数 k_i 、微分时间系数 k_d 三个参数达到预期控制目标,相较于传统 PID 控制器的试凑法、理论设计法等,不需要根据经验人为调节控制参数,能够更好地满足飞机舵机电液伺服系统的控制需求。

智能 PID 控制器的设计首先需要选择合适的控制系统性能评价指标,既要体现系统性能的优越性,又要体现实际应用和计算分析中的易操作性。考虑到控制器设计常用的评判标准中,时间乘绝对误差积分 (ITAE) 准则^[9]能够反映系统的调节品质和系统瞬态响应的稳定性,适应参数时变性能系统的性能分析需求。因此,对于单输入单输出系统,通常采用 ITAE 准则作为衡量系统控制性能的指标。

由于 ITAE 指标能够适应参数时变系统的性能分析需求,并反映系统瞬态响应的稳定性,因此本文采用 ITAE 指标直接构造系统的适应度函数表达式。适应度函数构造如图 4 所示。

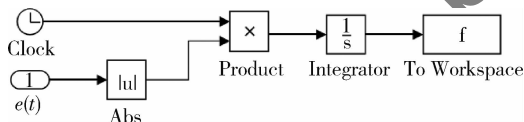


图 4 适应度函数构造图

然后,根据所确定 PID 控制器参数 k_p, k_i, k_d 的取值范围,利用智能算法计算得到一组 PID 控制器参数。PID 控制器再根据这组参数将系统的偏差函数 $e(t)$ 通过比例、积分、微分运算输出给被控对象,其控制规律为:

$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{k_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{k_d de(t)}{dt}] \quad (14)$$

式中, $u(t)$ 为控制器输出的加载力指令信号。

式(14)可用传递函数的形式表达为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p (1 + \frac{1}{k_i s} + k_d s) \quad (15)$$

智能 PID 控制器的工作流程如图 5 所示。

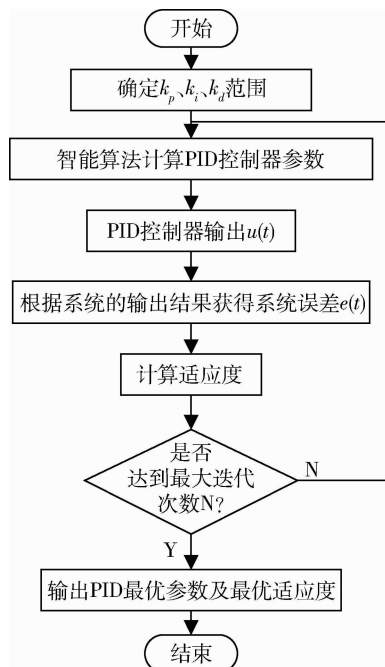


图 5 智能 PID 控制方法流程图

3 仿真结果及分析

飞机舵机电液伺服系统的评定指标包括加载精度、跟踪效果和抗干扰性这几个方面。

其中,加载精度和跟踪效果通过系统实际输出与期望输出之间的误差来体现。同一个系统,加载梯度设置不同,则输出结果也不同。在飞机舵机电液伺服系统中,通常将系统输入信号设置为正弦信号,模拟实际工作过程中舵机的运动轨迹,再根据输出端与输入端信号的比较,得到系统误差,从而判断系统的加载精度。在分析过程中,常常结合飞机舵机电液伺服系统的频率响应指标。常用的频率响应指标为双十指标,即系统实际输出与期望输出之间的幅度差在 10% 以内,相位差在 10° 以内。

抗干扰性通过系统在稳定运行中突然施加阶跃扰动后的动态性能来体现。抗干扰性能指标包括动态降落和恢复时间:

(1) 动态降落。在飞机舵机电液伺服系统稳定运行过程中,施加一定数值的扰动,使得输出信号产生偏差值 $\Delta c_{\max} \%$ 称为动态降落,用系统输出量相对于原稳态值 $c_{\infty 1}$ 偏差的百分数来表示。

(2) 恢复时间。从阶跃扰动开始,到系统输出恢复到与新稳态值 $c_{\infty 2}$ 相差 c_b (c_b 通常取 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$) 所用时间 t_f 称为恢复时间,其中,称为输出量在抗干扰性能指标中的基准值。

3.1 系统无扰动时仿真结果

令输入为幅值 6 mm, 频率为 10 Hz 的正弦信号, 当加载梯度为 1 T/mm 时, 将基于传统 PID 控制方法和基于智能 PID 控制方法的飞机舵机电液伺服系统仿真结果进行对比如图 6 所示, 其中曲线 1 为指令信号, 曲线 2 为基于传统 PID 控制方法的系统输出信号, 曲线 3 为基于智能 PID 控制方法的系统输出信号。

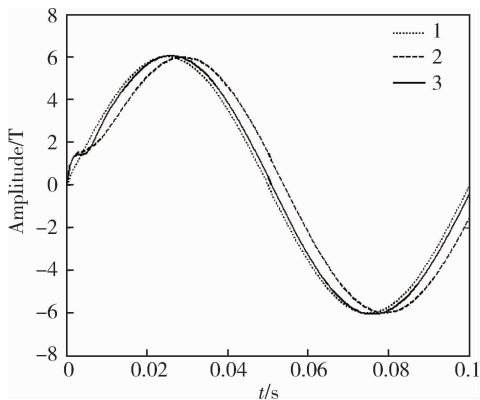


图 6 无扰动仿真曲线

基于传统 PID 控制方法, 系统最大幅差约为 16.7%, 相差约为 15.8°, 不能满足双十指标。基于智能 PID 控制方法, 系统最大幅差约为 8.33%, 相差约为 6.1°, 满足双十指标, 且能够提高系统的加载精度。同时, 通过对比两曲线可得, 基于智能 PID 控制方法的系统具有更加良好的跟踪效果。

3.2 系统有扰动时仿真结果

为了验证智能 PID 控制方法对系统抗干扰性的影响, 在系统运行到 0.04 s 时加入一个幅值为 1 mm, 周期为 0.1 s, 占空比为 5%, 相位延迟 0.04 s 的方波干扰信号, 对比系统输出结果如图 7 所示, 其中曲线 1 为指令信号, 曲线 2 为基于传统 PID 控制方法的系统输出信号, 曲线 3 为基于智能 PID 控制方法的系统输出信号。

当系统出现干扰时, 基于传统 PID 控制方法的系统出现较大的波动, 动态降落为 54.11%, 恢复时间为 0.08 s。基于智能 PID 控制方法的系统波动较小, 动态降落为 42.58%, 调节时间为 0.06 s。结果表明, 系统出现干扰信号后, 基于智能 PID 控制方法的飞机舵机电液伺服系统不仅能减少系统的动态降落, 还能减少恢复时间, 满足系统对抗干扰性的要求。

4 结论

本文根据飞机舵机电液伺服系统的工作原理,

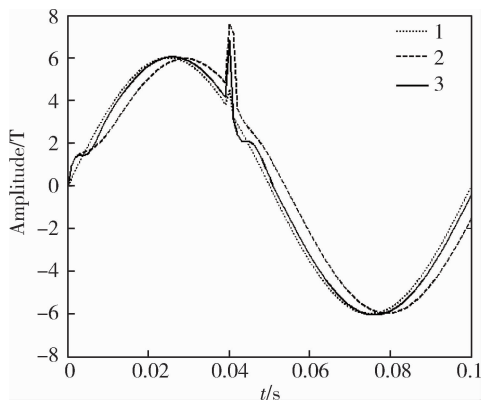


图 7 有扰动仿真曲线

建立系统数学模型, 提出一种智能 PID 控制方法。该方法引入蜂群算法的选择策略对粒子群算法进行优化, 再对 PID 控制器参数进行寻优, 从而实现 PID 控制器参数在非线性、时变性的飞机舵机电液伺服系统中的自适应整定。经过仿真研究发现, 本文提出的智能 PID 控制方法相较于传统 PID 控制方法, 能够符合系统要求, 提高了系统的加载精度和稳定性, 从而实现了飞机舵机电液伺服系统多余力干扰的有效抑制。

参考文献

- [1] 辛飞飞, 周向阳, 雷勇, 等. 舵机负载模拟器扭杆设计及性能分析[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(3): 45-48.
- [2] 袁野, 袁宇浩, 孙文理, 等. 电液伺服系统故障自愈仿真研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(19): 1-9.
- [3] Cheng Yangluo, Jian Yongyao, Fu Hongchen, et al. Adaptive repetitive control of hydraulic load simulator with RISE feedback[J]. IEEE Access, 2017, 5(13): 23901-23911.
- [4] 刘晓琳, 殷健敏. 飞机舵机电液伺服系统多余力抑制方法研究[J]. 科技创新与应用, 2017(8): 48-49.
- [5] SAMAKWONG T, ASSAWINCHAICHOTE W. PID controller design for electro-hydraulic servo valve system with genetic algorithm[J]. Procedia Computer Science, 2016, 86: 91-94.
- [6] Fan Chengli, Fu Qiang, Long Guangzheng, et al. Hybrid artificial bee colony algorithm with variable neighborhood search and memory mechanism[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2): 187-196.
- [7] Li Yang, Hou Jialin, Yuan Jin, et al. Experiment and vibration suppression algorithm for high-branch pruning manipulator based on fuzzy PID with improved PSO[J]. Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 49-58.
- [8] 庞育才, 刘松. 基于改进人工蜂群算法的 MIMO 雷达稀

疏阵列优化[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 11-15.

- [9] Gao Weifeng, Huang Lingling, Liu Sanyang, et al. Artificial bee colony algorithm based on information learning[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(12): 2827-2839.

(收稿日期: 2020-01-06)

(上接第 43 页)

- [4] 徐杰, 金湘亮, 白瑞广. 一种改进的摄像头视频实时拼接方法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(24): 179-181.
- [5] XI Y G, CHAI T Y, YUN W M. Survey of genetic algorithms[J]. Control Theory and Applications, 1996(6): 697.
- [6] PHOLDEE N, BUREERAT S. Hybrid real-code population-based incremental learning and approximate gradients for multi-objective truss design[J]. Engineering Optimization, 2014, 46(8): 1032-1051.
- [7] 徐凯, 陈贤富. 基于二倍体显性机制的 DNA 遗传算法研

作者简介:

刘晓琳(1978-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 智能控制、故障诊断。

苏杨(1994-), 女, 硕士, 主要研究方向: 智能控制、故障诊断。

究[J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37(7): 46-49.

- [8] 钱菲, 陈贤富. 基于双链染色体结构的遗传算法研究[J]. 信息技术与网络安全, 2019, 38(5): 33-36.

(收稿日期: 2020-01-03)

作者简介:

方树(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能信息处理。

陈贤富(1963-), 男, 副教授, 主要研究方向: 复杂系统与认知计算。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所