

基于 ASCP-CS 算法的桥式吊车滑模控制器设计

王天雷^{1,2†}, 谭南林¹, 张人丰², 邱炯智², Kenneth Teo Tze Kin³

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044;

2. 五邑大学 智能制造学部, 广东 江门 529020;

3. 沙巴大学 工程学院, 沙巴 哥打基纳巴卢, 马来西亚)

摘要:针对桥式吊车滑模控制器参数设置繁琐以及布谷鸟搜索算法(Cuckoo Search, CS)全局搜索能力不足问题, 提出了自适应选取交叉操作算子的布谷鸟搜索算法(Cuckoo Search Algorithm with Adaptively Selecting Crossover Points, ASCP-CS), 并将该算法用于桥式吊车滑模控制器参数整定. 该算法在 CS 算法的基础上改进自适应搜索步长, 并在交叉操作过程中引入自适应选取染色体交叉点. 通过对 4 种典型寻优函数进行测试的结果表明: ASCP-CS 算法具有较好的寻优精度和搜索能力. 对桥式吊车滑模控制器采用不同优化算法进行参数整定, 仿真实验表明, 基于该算法的控制器能更快地实现吊车负载定位, 更有效抑制负载摆角, 并具有较好的鲁棒性.

关键词:桥式吊车; 布谷鸟搜索; 自适应步长; 滑模控制器; 非线性系统

中图分类号:TP273

文献标志码:A

Design of a Sliding Mode Controller of Bridge Crane Based on ASCP-CS Algorithm

WANG Tianlei^{1,2†}, TAN Nanlin¹, ZHANG Renfeng², QIU Jiongzhi², Kenneth Teo Tze Kin³

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Faculty of Intelligent Manufacturing, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;

3. Faculty of Engineering, University Malaysia Sabah, Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia)

Abstract: For the tedious parameter settings of sliding mode controller of bridge crane and insufficient global searching ability of Cuckoo Search(CS), an improved Cuckoo Search algorithm based on adaptive crossover operation point selection (ASCP-CS) was proposed and applied to the adjustment of parameters for the sliding mode controller of bridge crane. The ASCP-CS algorithm improves the adaptive searching steps based on the CS algorithm, and introduces the adaptive selecting chromosome crossover points in the crossover operation. The test results of four typical optimization functions show that ASCP-CS algorithm has better optimization accuracy and search ability. The sliding

* 收稿日期:2019-09-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51505154,51437005), National Natural Science Foundation of China(51505154,51437005); 江门市科技计划项目(2019JC01029,2019JC01005), Science and Technology Plan Project of Jiangmen City(2019JC01029,2019JC01005); 广东大学生科技创新培育专项资金资助项目(PDJH2019A0489); Special Program for Scientific and Technological Innovation and Cultivation of Students of Guangdong University(PDJH2019A0489)

作者简介:王天雷(1981—),男,湖南长沙人,北京交通大学博士研究生,五邑大学讲师

† 通讯联系人, E-mail: tianlei.wang@aliyun.com

mode controller of bridge crane is tuned by different optimization algorithms. It is showed in the simulation results that the controller based on ASCP-CS algorithm can locate the payload more quickly, suppress the swing of the payload more effectively and has strong robustness.

Key words: bridge cranes; Cuckoo Search (CS); adaptive searching step; sliding mode controller; nonlinear systems

桥式吊车系统常用于各类重工业场地以及港口货物运输,工作时依靠台车悬挂的吊绳将负载牵引到指定位置.由于桥式吊车控制量维度少于其自由度,在运行过程中需要台车精准定位以及抑制负载摆动,致使控制难度大为增加.为解决上述问题,使桥式吊车系统高效稳定运行,学者们做了大量研究^[1-8].

吊车控制方式可分为开环和闭环控制,开环控制包括轨迹规划^[3]、输入整形^[4]等;闭环控制包括最优控制^[5]、模糊控制^[6]及滑模控制^[7-8]等.滑模控制由于具有快速响应、设计简单、鲁棒性强等特点,广泛应用于欠驱动系统的控制中^[9],但滑模控制器的参数整定过程复杂,整定结果对控制效果影响较大.因此,学者们对基于参数整定的滑模控制进行了研究^[10-14].

在滑模的优化控制方法中,陈志梅等^[10]提出了基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)的滑模控制方案,实现了对倒立摆状态轨迹的跟踪控制. Vishnu 等^[11]采用改进粒子群对 Buck 电路的滑模控制进行优化,降低了 Buck 电路的超调,提高了电路的鲁棒性.马群^[12]通过把变论域自适应的模糊滑模控制与粒子群算法结合,提高了负载的定位速度以及降低了摆角的角度.罗俊尧等^[13]采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对起重机的滑模控制器参数进行优化. Soufi 等^[14]提出了一种基于粒子群优化的滑模控制策略,并将其应用于风力发电并网系统中,实现了最大限度利用风能,并能同时限制电磁转矩的变化.但 GA 存在调节参数较多且设置难度较大的局限,而参数相对较少的 PSO 算法则容易陷入早熟.

Yang 和 Deb^[15]提出的布谷鸟搜索(Cuckoo Search, CS)算法具有易实现、可调参数少、全局搜索能力好等特点,但也存在后期收敛精度不高、收敛速度缓慢等问题.为此,郑洪清等^[16]利用每次迭代的结果来动态更新移动步长的方式替换 Lévy 飞行机制,避免了游走的随机性;彭建新等^[17]根据适应度值的分配进行步长和发现概率的自适应改变,提高了收敛速度与寻优精度.在控制系统应用中,Stojanovic 等^[18]

采用 CS 算法对并联机器人控制器的参数设置进行优化控制,对比粒子群与遗传算法,CS 算法具有更好的优化性能.朱笑花等^[19]通过借鉴核糖核酸(Ribonucleic Acid, RNA)的茎环结构对布谷鸟搜索算法进行改进,并用于吊车 PID 控制器的参数整定优化,提高了吊车系统的消摆与定位效果.

综上,为提高算法的全局寻优能力和后期的搜索精度,本文提出一种改进的 CS 算法,即在算法中自适应选取染色体交叉操作点以及选用改进的自适应步长函数.并采用该算法设计了桥式吊车滑模控制器,通过与布谷鸟滑模控制器(CS Sliding Mode Controller, CS-SMC)以及粒子群滑模控制器(PSO Sliding Mode Controller, PSO-SMC)的控制效果进行测试比较,结果表明本文设计的控制器性能良好.

1 桥式吊车系统的物理模型

图 1 为桥式吊车系统的物理模型,模型中负载通过吊绳悬挂在台车上,在力 F 作用下台车通过吊绳牵引将负载运送到指定位置.

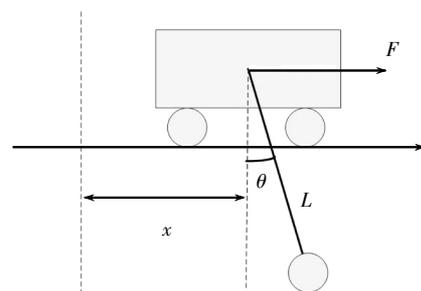


图 1 桥式吊车物理模型

Fig.1 Physical model of bridge crane

采用拉格朗日方程对吊车进行建模,忽略各类摩擦力、负载的空气阻力以及绳子的弹性形变.拉格朗日方程普遍形式如下:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial P}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

式中: T 为系统动能; P 为系统势能; q_i 为状态变量

(x, θ) ; Q_i 为非保守广义力. 该系统的动能 T 表示为:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x} + l \dot{\theta} \cos \theta)^2 + \frac{1}{2} m (l \dot{\theta} \sin \theta)^2 \quad (2)$$

式中: m 为负载质量; M 为台车质量; x 为台车位置; l 为吊绳长度; θ 为负载摆角.

$$P = -mgl(1 - \cos \theta) \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度. 联立式(1)~式(3), 可得如式(4)所示的动力学模型:

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + ml(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) = F \\ l\ddot{\theta} + \ddot{x} \cos \theta + g \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: F 为水平方向的控制力.

定义桥式吊车的系统状态变量为 $\mathbf{X}^T = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}]^T$, 输入 u 为 $u=F$, 输出为 \mathbf{Y} , x_1 和 x_2 分别为台车位置和速度, x_3 和 x_4 分别为负载摆角和加速度, 则系统动力学模型的状态方程可化为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(\mathbf{X}) + g_1(\mathbf{X})u \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(\mathbf{X}) + g_2(\mathbf{X})u \\ \mathbf{Y} = [x_1 \quad x_3]^T \end{cases} \quad (5)$$

其中, 非线性函数 f_1, g_1, f_2, g_2 分别定义如下:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{mg \cos x_3 \sin x_3 + ml \dot{x}_3^2 \sin x_3}{M + m \sin^2 x_3} \\ g_1 = 1/(M + m \sin^2 x_3) \\ f_2 = \frac{(M+m)g \sin x_3 + ml \dot{x}_3^2 \cos x_3 \sin x_3}{l(M + m \sin^2 x_3)} \\ g_2 = \frac{\cos x_3}{l(M + m \sin^2 x_3)} \end{cases} \quad (6)$$

2 桥式吊车系统的滑模控制

由式(4)可知, 吊车系统输入控制力 F 需完成精准的台车位置控制与良好的负载摆角抑制效果, 故滑模面设计如式(7)所示:

$$s = x_2 + a(x - x_d) + b\theta \quad (7)$$

式中: x_d 为台车位移的目标值, 与位置误差权重 a 、角速度误差权重 b 均为常数. 选取指数趋近律控制:

$$\dot{s}(e) = -\varepsilon \text{sign}(s) - ks, \varepsilon > 0, k > 0 \quad (8)$$

式中: ε 为切换增益, k 为指数系数, 均为大于 0 的常数; $\text{sign}(s)$ 是符号函数. 为削弱控制器抖振问题, 采用 $\text{sat}(s)$ 函数替换式(8)中的 $\text{sign}(s)$ 函数. $\text{sat}(s)$ 可定义为:

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s/\lambda \geq 1 \\ s/\lambda & \text{if } -1 < s/\lambda < 1 \\ -1 & \text{if } s/\lambda \leq -1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: λ 为常数. 对式(7)进行求导可得:

$$\dot{s}(e) = \dot{x}_2 + a\dot{x}_1 + b\dot{\theta} \quad (10)$$

联立式(7)和式(10)可得:

$$-\varepsilon \text{sign}(s) - ks = \dot{x}_2 + a\dot{x}_1 + b\dot{\theta} \quad (11)$$

联立式(4)~式(11)可得系统控制器输出 u 为:

$$u = (-\varepsilon \text{sat}(s) - ks - f_1 - a\dot{x} - b\dot{\theta})/g_1 \quad (12)$$

3 ASCP-CS 算法

Lévy 飞行机制与偏好随机游走机制在一定程度上缓解了 CS 算法搜索精度不足的缺陷, 然而桥式吊车控制器较为复杂的优化问题需要优化算法具备更强的搜索能力. 朱笑花和陶吉利等^[19-20]的研究表明, RNA 分子的变异以及交叉操作能够使 CS 算法和遗传算法的搜索效果更好. 受其启发, 本文设计了自适应选取交叉点的算子, 增加交叉操作的合理性, 并引入新步长的自适应改进策略, 提出一种具有自适应选取交叉点的布谷鸟搜索算法 (Cuckoo Search Algorithm with Adaptively Selecting Crossover Points, ASCP-CS).

3.1 CS 算法

CS 算法的规律可概括为: 1) 每个布谷鸟随机选择一个宿主鸟巢生蛋; 2) 保留适应度较好的鸟巢进入下一代; 3) 宿主发现寄生的鸟巢并丢弃的概率为 P_a , 然后选择新的位置筑巢. 其中下一代鸟巢位置更新采用 Lévy 随机游走方式, 该方式具有“长期短距离游走结合偶尔的长距离跳跃”特点, 可保证算法的全局搜索能力. 鸟巢位置更新方法如式(13)所示.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \oplus L(\beta) \quad (13)$$

式中: x_i^t 和 x_i^{t+1} 分别为第 i 个鸟巢在 t 和 $t+1$ 代的位置; α ($\alpha > 0$) 是步长因子; \oplus 符号是点乘; $L(\beta)$ 为服从参数为 β 随机搜索向量. $L(\beta)$ 定义见式(14).

$$L(\beta) = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \quad (14)$$

式中: u 和 v 服从高斯分布, 即 $u : N(0, \sigma_u^2)$, $v : N(0, 1)$.

$$\sigma_u = \left[\frac{\Gamma(1+\beta) \sin(0.5\pi(\beta/2))}{2^{(\beta-1)/2} \Gamma(0.5+\beta/2)\beta} \right]^{1/\beta} \quad (15)$$

式中: Γ 是标准的 Gamma 函数; 本文取 β 为 1.5.

宿主以 P_a 的概率丢弃部分解后, 会通过偏好随机游走的方式产生新的解, 如式(16)所示:

$$Z_i^{t+1} = Z_i^t + r(Z_j^t - Z_k^t) \quad (16)$$

式中: Z_j^t 和 Z_k^t 为第 t 代的两个随机选择的解; r 为服从 $[0, 1]$ 区间的均匀分布的随机数.

3.2 自适应步长

为增强 CS 算法的搜索能力, 前期搜索范围较大, 后期需缩小搜索范围以获得更高的搜索精度. 针对上述问题, 对算法中的步长 α 进行如下改进:

$$\alpha = \alpha_1 + b_1 g / g_1 \quad (17)$$

式中: α_1 为初始时刻步长; b_1 为步长变化范围; g_1 为步长变化最大时的进化代数; g 为当前进化代数.

3.3 交叉操作算子

参考遗传算法的基本思想, 即通过交叉操作达到增加个体多样性, 本文在 CS 算法的搜索过程中引入交叉操作的算子, 如图 2(a)所示. 由于在交叉的过程中个体发生变异的情况充满随机性, 可能会导致算法的收敛速度变慢. 改进的 CS 算法在交叉操作中设计一种新型自适应选取交叉点的交叉操作算子, 利用该算子, 在搜索前期交叉操作的选取集中在序列的高位区域, 增加算法的搜索空间; 而搜索后期集中在序列的低位区域, 能增加搜索精度. 具体操作如图 2 所示.

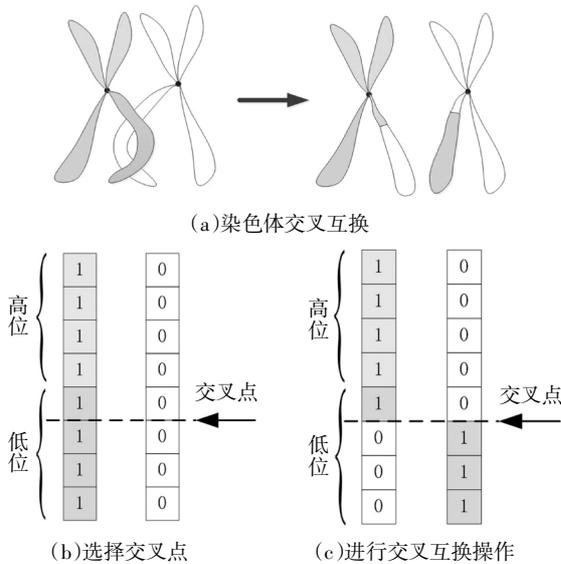


图 2 染色体交叉互换操作示意图

Fig.2 Diagram of chromosome crossing operation

自适应选取交叉点的概率公式为:

$$P_0 = b_2 / [1 + e^{c_1(g-g_0)}] \quad (18)$$

式中: b_2 为概率变化范围; g 为当前进化代数; c_1 和 g_0 分别为步长变化时候速率和对应的进化代数. 在选择序列的交叉操作点时, 随机产生一个概率 P_n , 当 $P_n < P_0$ 时, 在序列的 $L/2$ 处到 L 处的高位区域选择交叉点, 反之则在低位区域进行选取.

3.4 ASCP-CS 算法的步骤

ASCP-CS 算法流程如图 3 所示. 1) 初始化算法

相关参数; 2) 通过式 (18) 的步长公式更新鸟巢位置, 并计算适应度值; 3) 通过贪婪算法保存适应度值最优的鸟巢; 4) 为每一个鸟巢随机选取一个概率 P_i , 当 $P_i < P_0$ 时则丢弃原来的鸟巢, 并通过公式 (17) 的偏好随机游走方式更新鸟巢的位置; 5) 通过贪婪算法保存适应度值最优的鸟巢; 6) 在较好的解中随机选取 $n/2$ 个鸟巢进行两两配对, 让每个解在交叉点进行交叉操作; 7) 通过贪婪算法保存适应度值最优的鸟巢; 8) 判断是否满足算法的停止条件; 9) 不满足时重新第 2 个步骤; 10) 满足即停止搜索, 输出最优的鸟巢.

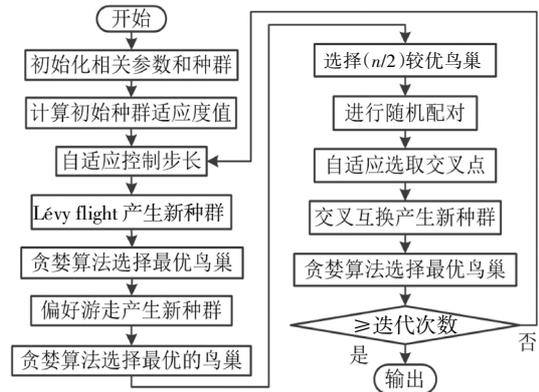


图 3 改进布谷鸟搜索算法流程图

Fig.3 Improved cuckoo search algorithm flow chart

4 数值寻优与结果

为检验 ASCP-CS 算法的性能, 分析自适应选取交叉点策略和变步长对该算法收敛速度和全局搜索能力的影响, 本文选取了 CS 算法、PSO 算法与 ASCP-CS 算法进行对比. 4 个测试函数全局最小值均为 0, 用于考察收敛速度的单峰函数 f_1 , 以及考察收敛速度和全局搜索能力的多峰函数 f_2 , f_3 和 f_4 . 4 个函数定义如下:

1) Sphere 函数.

$$f_1 = \sum_{i=1}^{30} x_i^2, x_i \in [-1.5, 1.5] \quad (19)$$

2) Rastrigin 函数.

$$f_2 = \sum_{i=1}^{10} [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10], x_i \in [-10, 10] \quad (20)$$

3) Schaffer 函数.

$$f_3 = 0.5 + \frac{\sin^2 \sqrt{x_1^2 + x_2^2} - 0.5}{[1 + 0.001(x_1^2 + x_2^2)]^2}; x_1, x_2 \in [-100, 100] \quad (21)$$

4)Ackley 函数.

$$f_4 = 20 + e - 20 \exp \left[-0.2 \times \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D x_i^2} \right] - \exp \left[\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \cos(2\pi x_i) \right] \quad (22)$$

$D = 200; x_i \in [-32, 32]$

初始化搜索算法的参数时, 为保持条件一致, ASCP-CS 算法与 CS 算法的鸟巢数目 $n = 15$, 最大迭代次数 $g_{\max} = 200$, 二进制序列长度 $L = \log_2 \max(|x_{\min}|, |x_{\max}|)$, 步长参数 $a_1 = 0.9, b_1 = 0.7$, 交叉点的自适应变异概率 $b_2 = 1, c_1 = 20/g_{\max}, g_0 = g_{\max}/2$, 被发现概率 P_a 为 0.25. PSO 算法的参数设置如下: 种群规模 $n = 15$, 惯性权重 $w = 0.7$, 学习因子 $c_1 = c_2 = 0.7$. 仿真环境为 Windows 10, 内存 16 GB, CPU 为 Inter i7 系列, MATLAB 2014b. 各算法独立运行 100 次, 对不同函数的几种算法计算结果如表 1 所示.

表 1 寻优结果比较

Tab.1 Comparison of optimization results

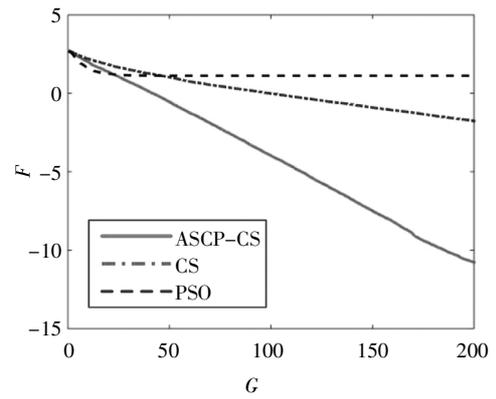
函数	算法	最优解	最差解	平均值	方差
f_1	ASCP-CS	5.8×10^{-7}	0.000 50	2.1×10^{-5}	5.8×10^{-5}
	CS	0.070 10	0.377 62	0.171 17	0.060 24
	PSO	0.913 17	8.302	3.082 9	1.309 60
f_2	ASCP-CS	0	0.245 62	0.004 318	0.025 37
	CS	10.973	50.201	27.1	8.198 90
	PSO	21.307	125.37	60.778	21.108 0
f_3	ASCP-CS	0	0	0	0
	CS	0	0	0	0
	PSO	0	0.092 76	0.003 786	0.012 96
f_4	ASCP-CS	11.285	20.013	17.776	2.544 70
	CS	16.069	20.003	18.796	1.314 20
	PSO	15.623	20.16	18.427	0.912 88

4.1 寻优精度比较

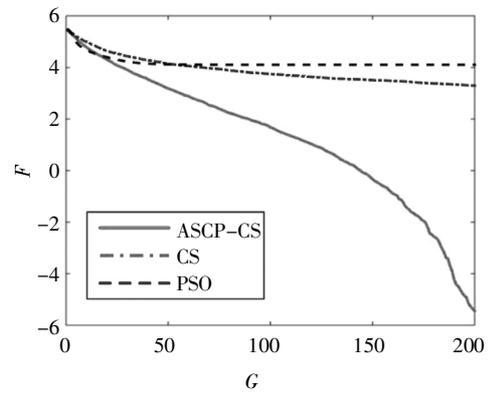
分析表 1 数据可知, 从 f_1 到 f_4 4 个函数的测试当中, ASCP-CS 算法的寻优精度、接近程度以及稳定性明显更高更好.

4.2 搜索能力比较

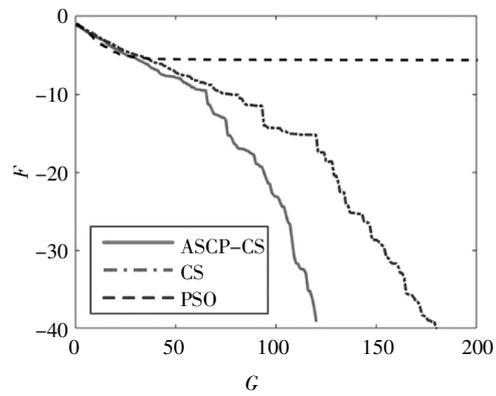
图 4 为 4 个测试函数的 3 种算法各自运行 100 次, 并取适应度值平均后的对数值绘制的寻优收敛曲线. 由图 4 可知, 在 4 个测试函数中, PSO 算法虽收敛速度快, 但均容易早熟, CS 算法虽有一直下降的趋势, 但明显比 ASCP-CS 算法慢; PSO 算法的收敛速度虽快, 但最终会陷入到局部解中, ASCP-CS 算法与 CS 算法明显具有很强的全局搜索能力.



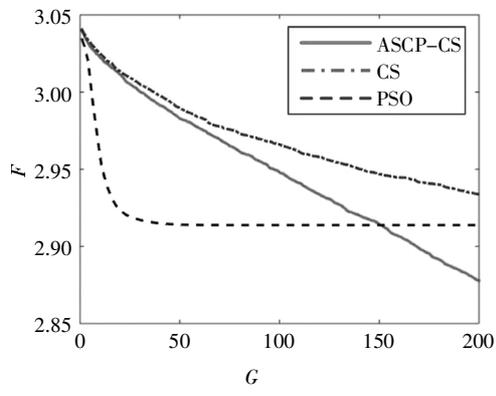
(a) f_1



(b) f_2



(c) f_3



(d) f_4

图 4 函数 $f_1 \sim f_4$ 的收敛曲线

Fig.4 Converges curve of the function $f_1 \sim f_4$

5 滑模控制器参数优化及系统仿真分析

MATLAB/Simulink 环境下,应用 ASCP-CS 算法对滑模控制器 4 个参数 (滑模面参数 a, b 及趋近率函数参数 ε, k) 进行离线优化,其实施过程如图 5 所示.

1) 对桥式吊车控制器模型参数进行初始化;2) 利用 ASCP-CS 算法优化计算出滑模控制器 4 个参数;3)桥式吊车模型运行结束后,利用获得系统状态量 (x, θ) 及控制力 u 计算出目标函数 J 的数值;4) ASCP-CS 对目标函数值进行评价, 如果到达目标阈值或者满足最大迭代次数则结束算法运行, 反之返回步骤 2 继续计算.

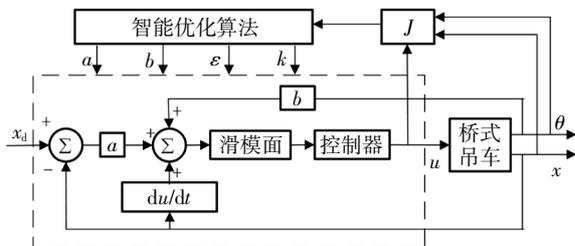


图 5 自适应滑模控制结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of adaptive sliding mode control structure

为保证吊车系统瞬态响应时振荡较小以及系统响应较快,并对控制系统的参数具有较好的选择性,采用控制系统性能评价指标 ITAE (Integrated Time and Absolute Error) 定义式(23)所示的目标函数 J :

$$J = \frac{c}{\int_0^t |e_x| dt + \int_0^t |e_\theta| dt + \int_0^t |u| dt} \quad (23)$$

式中: $\int_0^t |e_x| dt$ 、 $\int_0^t |e_\theta| dt$ 和 $\int_0^t |u| dt$ 分别表示吊车位置的目标值与实际值误差绝对值乘时间、负载摆角与实际值误差绝对值乘时间的积分以及控制器输出绝对值乘时间的积分; c 为常数.

为更加充分说明该智能优化算法在桥式吊车滑模控制器的参数整定方面的效果, 将 ASCP-CS 算法、CS 算法与 PSO 算法优化的滑模控制器进行控制效果的仿真对比实验. 采用文献[15]提供的桥式吊车参数: 台车质量 $M = 5 \text{ kg}$, 负载质量 $m = 1 \text{ kg}$, 绳长 $l = 1 \text{ m}$, 搜索空间分别为: $a, \varepsilon, k \in [0, 100], b \in$

$[-100, 100]$, 目标函数 J 的参数 $c = 1000$; 3 种算法的迭代次数均设置为 $G = 50$, 目标函数的阈值设为 $\sigma = 100$, 3 种优化算法在同时达到最大迭代次数或者超过该阈值即可认为结束本轮优化. 3 种算法的目标函数寻优对比实验结果如图 6 所示.

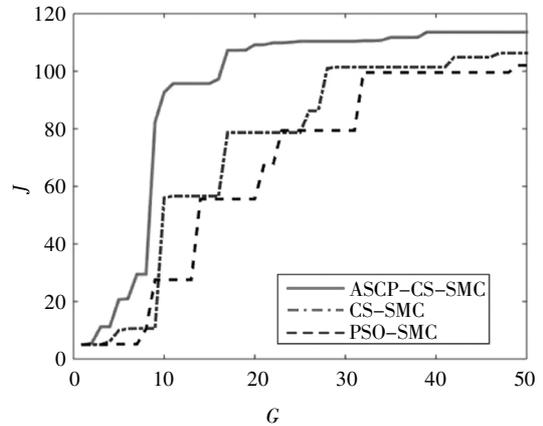


图 6 3 种算法的目标函数寻优过程

Fig.6 Objective function optimization process of three algorithms

对比图 6 的寻优情况,可知 ASCP-CS 算法在第 16 代时目标函数值已经达到所设置的目标函数阈值 σ , 即已经收敛, 而 CS 算法以及 PSO 算法依然在逐步收敛中. ASCP-CS 算法的收敛速度明显得到提高.

通过 3 种优化算法得到的滑模控制器的参数 (切换增益 e , 指数系数 k , 位移权重 a , 角度权重 b) 见表 2.

表 2 滑模控制器参数

Tab.2 Sliding mode controller parameters

算法	e	k	a	b	适应度值
ASCP-CS	98.129	100	0.761 04	-3.184 7	113.56
CS	100	89.855	0.723 73	-2.345	106.29
PSO	0.011 13	64.007	0.681 13	-3.072 3	102.02

5.1 控制器消摆和定位性能

图 7 为基于 3 种算法的滑模控制器的位置与摆角曲线. 由表 2 中适应度值数据表明, ASCP-CS 算法与 CS 算法相比, 在精度上有明显的提高. 由表 3、表 4 和图 8 可知, 在 ASCP-CS 滑模控制器作用下, 负载最大摆角在 0.11 rad 以内, 在 3.9 s 左右收敛到零. 同时与 CS 算法和 PSO 算法优化的滑模控制器相比, ASCP-CS 滑模控制器响应更迅速, 震荡更小, 控制效果更好.

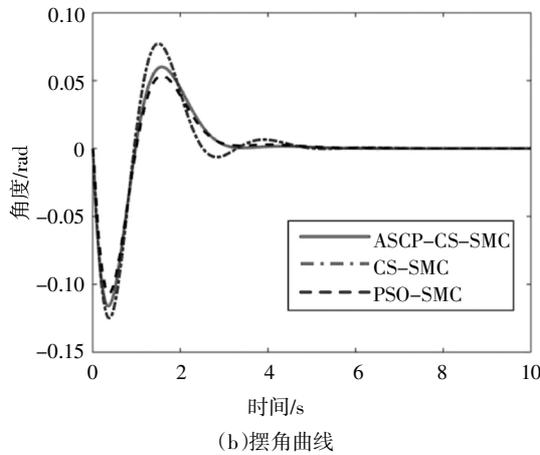
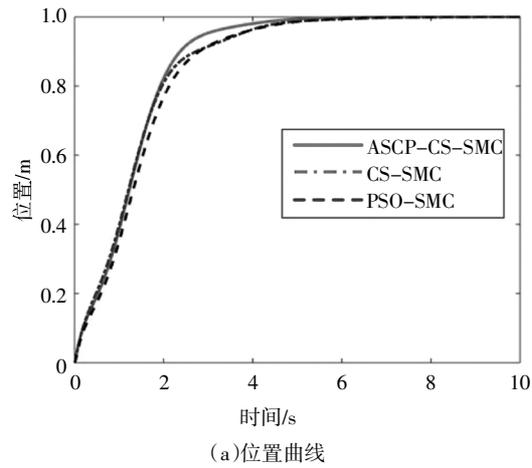


图 7 位置与摆角的曲线

Fig.7 Curves of position and swing angle

表 3 吊车位置性能

Tab.3 Trolley position performance

控制器	超调量/%	上升时间/s	调节时间/s
ASCP-CS-SMC	2.67×10^{-6}	2.171	3.957
CS-SMC	1.78×10^{-6}	2.536	4.495
PSO-SMC	1.21×10^{-6}	2.514	4.594

表 4 吊车摆角性能

Tab.4 Trolley swing angle performance

控制器	超调量/%	峰值时间/s	调节时间/s
ASCP-CS-SMC	0.060 1	1.579 1	5.403 6
CS-SMC	0.077 4	1.491 8	6.576 4
PSO-SMC	0.053 5	1.566 9	5.700 7

5.2 控制器鲁棒性实验

5.2.1 实验安排

为验证 ASCP-CS 算法优化的桥式吊车滑模控制器的鲁棒性,本文分 2 种情况进行仿真测试。

仿真情况 1:施加外力的方式. 在运行 5 s 时,施加一个幅值为 10 N 的干扰外力,以测试系统鲁棒性. 仿真结果如图 8 所示。

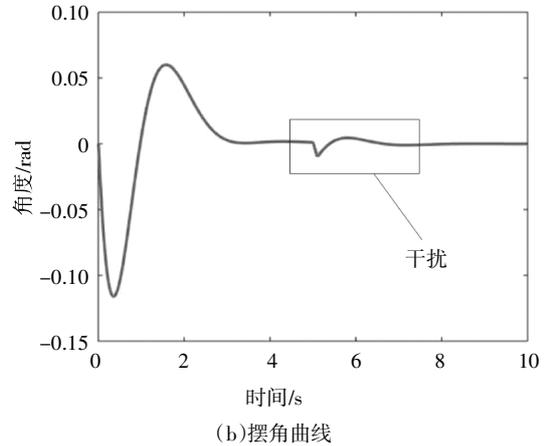
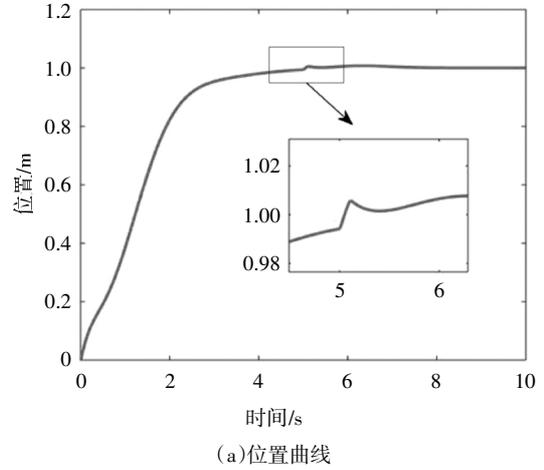


图 8 外加干扰的曲线

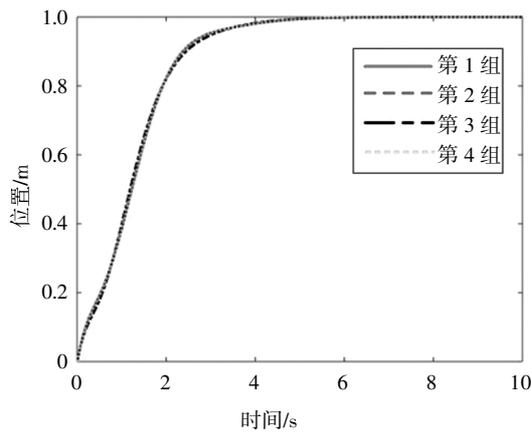
Fig.8 Curves with external interference

仿真情况 2: 改变吊车系统的负载质量 m 与绳长 l 两个参数. 第 1 组参数: $m = 1 \text{ kg}, l = 1 \text{ m}$; 第 2 组参数: $m = 1 \text{ kg}, l = 0.75 \text{ m}$; 第 3 组参数: $m = 0.5 \text{ kg}, l = 0.75 \text{ m}$; 第 4 组参数: $m = 0.5 \text{ kg}, l = 1 \text{ m}$. 仿真结果如图 9 所示。

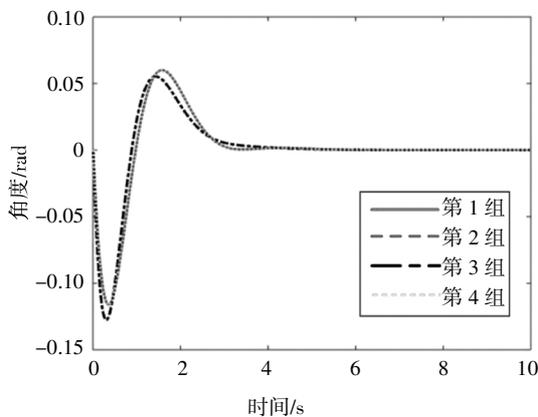
5.2.2 实验结果分析

1)抗干扰性分析. 由图 8 可知,系统受到干扰后,负载位置受影响较小,负载摆角在干扰瞬间会产生一定摆动,经过约 2 s 再次稳定,恢复到零摆角,表明 ASCP-CS 的滑模控制器具有较好的抗干扰能力。

2)变载荷稳定性分析. 由图 9 可得:①改变系统质量及绳长,对 ASCP-CS 滑模控制器的位置影响较小;②绳长不变,仅改变负载质量,负载的摆角无明显变化;③负载质量不变,仅改变绳长,负载摆角受到一定影响,随着绳长变短,摆角幅值变小。



(a)位置曲线



(b)摆角曲线

图9 变参数控制曲线

Fig.9 Control curves with variable parameters

综上所述,通过外加干扰以及改变系统参数的仿真实验结果表明,基于ASCP-CS算法的滑模控制器具有较强的抗干扰能力和鲁棒性,可适应吊车系统在不同的工作状态下稳定地运行。

6 结束语

本文提出一种能够自适应选取染色体交叉操作点的ASCP-CS算法,该算法能获得较好的全局搜索能力和后期搜索精度,而利用该算法优化的桥吊滑模控制器具有较好的消摆和定位性能,以及良好的鲁棒性。

1)为增强CS算法的搜索速度和精度,设定自适应搜索步长;同时在搜索过程中交叉操作算子环节,设计一种新型自适应选取交叉点的交叉操作算子,利用该算子能进一步提升搜索性能。

2)通过4个测试函数与CS、PSO算法进行寻优

测试对比,ASCP-CS算法全局搜索能力更强,更不容易早熟,同时兼顾较高的搜索精度和较快的收敛速度。

3)将ASCP-CS算法用于设计桥式吊车滑模控制器,相比于其他两种控制器,该控制器在3.9s左右摆角收敛到零且负载最大摆角在0.11rad以内,稳态误差较低。而且ASCP-CS在鲁棒性的仿真测试中具备较高的鲁棒性。

参考文献

- [1] RAMLI L, MOHAMED Z, ABDULLAHI A M, *et al.* Control strategies for crane systems: a comprehensive review [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 95: 1—23.
- [2] 孙宁, 方勇纯, 陈鹤. 欠驱动桥式吊车消摆跟踪控制[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(3): 326—333.
SUN N, FANG Y C, CHEN H. Antiswing tracking control for under-actuated bridge cranes [J]. *Control Theory and Application*, 2015, 32(3): 326—333. (In Chinese)
- [3] SUN N, FANG Y C, ZHANG X, *et al.* Transportation task-oriented trajectory planning for underactuated overhead cranes using geometric analysis [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2012, 6(10): 1410—1423.
- [4] 刘华森, 程文明. 抑制桥式起重机变频率摆动的优化复合输入整形器[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(12): 3044—3049.
LIU H S, CHENG W M. Optimized composite input shaping based on residual oscillation suppressing [J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(12): 3044—3049. (In Chinese)
- [5] SOLIS C U, CLEMPNER J B, POZNYAK A S. Designing a terminal optimal control with an integral sliding mode component using a saddle point method approach: a Cartesian 3D-crane application [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 86(2): 911—926.
- [6] PEZESHKI S, BADAMCHIZADEH M A, GHIASI A R, *et al.* Control of overhead crane system using adaptive model-free and adaptive fuzzy sliding mode controllers [J]. *Journal of Control, Automation and Electrical System*, 2015, 26(1): 1—15.
- [7] 于涛, 杨昆, 赵伟. 基于解耦滑模控制的桥式吊车系统的抗摆控制[J]. *中国测试*, 2017, 43(8): 95—100.
YU T, YANG K, ZHAO W. Anti-sway control of overhead crane system based on decoupled sliding mode control [J]. *China Test*, 2017, 43(8): 95—100. (In Chinese)
- [8] LU B, FANG Y C, SUN N. Sliding mode control for underactuated overhead cranes suffering from both matched and unmatched disturbances [J]. *Mechatronics*, 2017, 47(1): 116—125.
- [9] 高为炳. 变结构控制理论基础 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990: 19—21.

- GAO W B. Theoretical basis of variable structure control [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990: 19—21. (In Chinese)
- [10] 陈志梅, 孟文俊, 张井岗, 等. 基于改进粒子群算法的滑模控制方案[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(5): 137—141.
CHEN Z M, MENG W J, ZHANG J G, *et al.* Scheme of mode control based on modified particle swarm optimization [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2009, 29(5): 137—141. (In Chinese)
- [11] VISHNU T S, SHANAVAS T N, PATNAIK S K. Modified PSO based sliding mode controller parameters for buck converter [C]// Electrical, Electronics & Computer Science. Bhopal: IEEE, 2012.
- [12] 马群. 基于粒子群模糊滑模控制的三维桥式吊车系统 [D]. 大连: 大连理工大学电子与信息工程学院, 2014: 24—44.
MA Q. The 3D crane system based on particle swarm optimization fuzzy sliding mode control [D]. Dalian: College of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, 2014: 24—44. (In Chinese)
- [13] 罗俊尧, 陈志梅, 孟文俊. 基于遗传算法的三维起重机滑模控制方法研究[J]. 起重运输机械, 2011(9): 4—7.
LUO J Y, CHEN Z M, MENG W J. Research on 3D crane sliding mode control method based on genetic algorithm [J]. Lifting and Transportation Machinery, 2011(9): 4—7. (In Chinese)
- [14] SOUFI Y, KAHLA S, BECHOUAT M. Particle swarm optimization based sliding mode control of variable speed wind energy conversion system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016: 41(45): 20956—20963.
- [15] YANG X S, DEB S. Cuckoo search via Lévy flights [C]// World Congress on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE). Penang: IEEE, 2012: 210—214.
- [16] 郑洪清, 周永权. 一种自适应步长布谷鸟搜索算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(10): 68—71.
ZHENG H Q, ZHOU Y Q. Self-adaptive step cuckoo search algorithm [J]. Computer Engineering and Application, 2013, 49(10): 68—71. (In Chinese)
- [17] 彭建新, 詹志辉, 陈宗淦, 等. 自适应步长和发现概率的布谷鸟搜索算法[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2016, 30(5): 328—333.
PENG J X, ZHAN Z H, CHEN Z G, *et al.* Cuckoo search algorithm based on adaptive step and discovery probability [J]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2016, 30(5): 328—333. (In Chinese)
- [18] STOJANOVIC V, NEDIC N, PRSIC D, *et al.* Application of cuckoo search algorithm to constrained control problem of a parallel robot platform [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9/12): 1—11.
- [19] 朱笑花, 王宁. eRNA 布谷鸟搜索算法的桥式吊车 PID 控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(7): 1397—1404.
ZHU X H, WANG N. Cuckoo search algorithm with RNA crossover operation for PID control of overhead cranes [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2017, 51(7): 1397—1404. (In Chinese)
- [20] 陶吉利. 基于 DNA 计算的遗传算法及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学信息科学与工程学院, 2007: 24—28.
TAO J L. Research on DNA computing based genetic algorithms and its application [D]. Hangzhou: College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, 2007: 24—28. (In Chinese)