

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201305055

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/CNKI:23-1538/TP.20131101.1720.006.html>

# 改进蛙跳算法的 LQR 控制器的优化设计

彭勇<sup>1</sup>, 陈俞强<sup>1,2</sup>

(1. 东莞职业技术学院 计算机工程系, 广东 东莞 523808; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**针对多变量、非线性、强耦合性的倒立摆系统,运用牛顿-欧拉方法建立了倒立摆的数学模型,然后对该模型分别进行 LQR 控制。在 LQR 控制中,权矩阵  $Q$  和  $R$  的选取直接影响着结构的动力反应和控制力。在标准蛙跳算法对权矩阵  $Q$  和  $R$  进行优化的基础上,通过采取新的最差青蛙跳跃策略能有效提高算法的全局搜索能力,同时加入自适应跳跃因子以加快算法的收敛时间。仿真实验表明,该算法能有效地获得最优的权矩阵  $Q$  和  $R$ ,使 LQR 控制效果能够满足结构性能要求。

**关键词:** LQR 控制器; 倒立摆; 改进蛙跳算法; 优化设计; 权矩阵

**中图分类号:** TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2014)04-480-05

中文引用格式: 彭勇, 陈俞强. 改进蛙跳算法的 LQR 控制器的优化设计[J]. 智能系统学报, 2014, 9(4): 480-484.

英文引用格式: PENG Yong, CHEN Yuqiang. Optimal design of the LQR controller based on the improved shuffled frog-leaping algorithm[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(4): 480-484.

## Optimal design of the LQR controller based on the improved shuffled frog-leaping algorithm

PENG Yong<sup>1</sup>, CHEN Yuqiang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Computer Engineering, Dongguan Polytechnic, Dongguan 523808, China; 2. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Based on the inverted pendulum system which is multi-variable, nonlinear and strong coupling, a mathematical model of the inverted pendulum is established by utilizing the Newton-Euler method, and then the LQR control is implemented for the model. The weighted matrices  $Q$  and  $R$  have a direct impact on the dynamic response and control of the single inverted pendulum. During optimization of the matrices  $Q$  and  $R$  through use of the standard shuffled frog-leaping algorithm, the new worst frog jumping strategy can effectively improve the global search ability of the algorithm and the adaptive jump factor can speed up the convergence. The simulation experiment shows that the improved shuffled frog-leaping algorithm can effectively obtain the optimal weight matrices  $Q$  and  $R$ ; as a result, the effect of the LQR controller meets the performance requirements of the single inverted pendulum.

**Keywords:** LQR controller; inverted pendulum; improved shuffled frog-leaping algorithm; optimal design; weight matrices

线性二次型调节器 (linear quadratic regulator, LQR) 是以状态变量和控制变量二次型函数的积分作为目标函数的最优控制系统<sup>[1]</sup>。

倒立摆系统是一个典型的高阶次、不稳定、多变

量的非线性控制系统。自动控制系统的稳定性、可控性、收敛速度、抗干扰能力等抽象的控制概念都可以通过倒立摆系统直观、形象地表现出来,所以倒立摆是自动控制领域中较为理想的实验平台。自适应、状态反馈、智能控制、模糊控制及人工神经网络等多种控制理论都可以通过倒立摆系统来加以验证,所以通过倒立摆系统来对利用蛙跳算法进行

LQR 优化控制的效果进行验证<sup>[2]</sup>。

### 1 单级倒立摆系统数学模型的建立

假设线性时不变系统的状态方程模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{cases}$$

可以引入最优控制的性能指标,既设计一个输入量  $\mathbf{u}$ ,使得式(1)最小。

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{S} \mathbf{x} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}] dt \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 分别为状态变量和输入变量的加权矩阵, $t_f$ 为控制作用的终止时间。矩阵 $\mathbf{S}$ 对控制系统的终值给出某种约束,这样的控制问题称为线性二次型最优控制问题<sup>[3]</sup>。

对于倒立摆系统来说,如果忽略了空气阻力和各种摩擦之后,可将直线一级倒立摆系统抽象成沿着光滑导轨运动的小车和通过轴承连接的匀质摆杆组成。如图1所示<sup>[4]</sup>。其中,小车的质量为 $M$ ,摆杆质量为 $m$ ,摆杆长为 $l$ , $F$ 为作用于小车上的外力, $\mu$ 为小车摩擦系数, $I$ 为摆杆转动惯量, $\mathbf{x}$ 为小车的位移,摆杆角度为 $\theta$ ,重力加速度为 $g$ 。

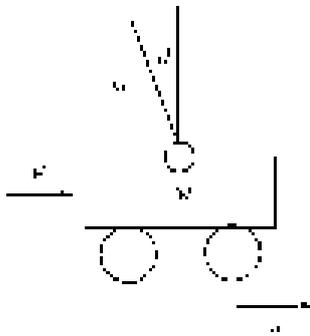


图1 单级倒立摆的结构简化模型

Fig.1 The model of inverted pendulum system

倒立摆控制系统本质上是一个不稳定系统,如果不给小车施加牵引力以使小车做适当运动,倒立摆就不能保持倒立位置而向左或向右倾倒,系统控制的目的是让小车在轨道上来回运动,以保持摆杆树立不倒。

至为了使系统模型不过于复杂,先进行几点假设:1)摆杆及小车均为刚体且摆杆为匀质刚体;2)忽略小车运动时所受摩擦力和摆杆转动时所受的摩擦力矩<sup>[2,4]</sup>。

得到系统的动力学方程组为

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} - \frac{1}{2}ml\dot{\theta}^2 \sin\theta + \frac{1}{2}ml\ddot{\theta} \cos\theta = F \\ \frac{1}{3}ml^2\ddot{\theta} + \frac{1}{2}ml\dot{x} \cos\theta - \frac{1}{2}mgl \sin\theta = 0 \end{cases}$$

当倒立摆的摆角和摆速很小时(考虑 $\theta \approx 0$ ,则 $\dot{\theta} \approx 0, \sin\theta \approx 0, \cos\theta \approx 1$ ),线性化后的方程组为

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + \frac{1}{2}ml\ddot{\theta} = F \\ \frac{1}{3}ml^2\ddot{\theta} + \frac{1}{2}ml\dot{x} - \frac{1}{2}mgl\theta = 0 \end{cases}$$

令作用力、位移与角度参数为时间的函数有

$$\begin{cases} \ddot{\theta}(t) = \frac{2}{ml} [F(t) - (M+m)\ddot{x}] \\ \frac{2l}{3} [F(t) - (M+m)\ddot{x}] + \frac{ml}{2} (\dot{x} - g\theta) = 0 \end{cases}$$

于是最终得到方程组为

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) = \frac{4}{m+4M} F(t) - \frac{3gm}{m+4M} \theta(t) \\ \ddot{\theta}(t) = -\frac{6}{l(m+4M)} F(t) + \frac{6g(m+M)}{l(m+4M)} \theta(t) \end{cases}$$

即系统的状态变量为

$$\mathbf{X} = [\theta \quad \dot{\theta} \quad x \quad \dot{x}]^T, \mathbf{u} = F(t), \mathbf{Y} = [\theta \quad x]^T$$

则系统状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases}$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{6g(m+M)}{l(m+4M)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{6}{l(m+4M)} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{3gm}{m+4M} \\ 0 \\ \frac{4}{m+4M} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

根据单级倒立摆系统的状态方程,由于终端时间 $t_f = \infty$ ,系统的二次型性能指标为

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [\mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)] dt$$

式中: $\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}_r - \mathbf{y}(t)$ , $\mathbf{y}_r$ 为系统期望输出; $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 分别为输出误差变量和输入变量的加权矩阵,决定了系统误差与控制能量消耗之间的相对重要性( $\mathbf{Q}$ 为半正定对称矩阵; $\mathbf{R}$ 为正定对称矩阵)。找一状态反馈控制律: $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$ ,使得二次型性能指标最小化。

由线性二次型最优控制理论可知,若想最小化 $J$ ,则控制信号应该为

$$\mathbf{u}^* = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x}$$

式中： $P$  为对称矩阵，该矩阵满足 Riccati 微分方程：

$$\dot{P} = -PA - A^T P + PBR^{-1}B^T P - Q$$

易知，状态变量  $x$  与 Riccati 微分方程的解  $P$  将决定最优控制信号。

在实际工程中，系数矩阵  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $R$  多为常数矩阵，而且系统在  $t_f \rightarrow \infty$  时趋于稳定，微分方程的解矩阵  $P$  将趋于 0，使得  $\dot{P} = 0$ ，则 Riccati 微分方程简化为 Riccati 代数方程：

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$$

则最优反馈系数矩阵  $K = R^{-1}B^T P$ 。

用 MATLAB 求解 LQR( $A, B, Q, R$ ) 可以求出最优反馈系数矩阵  $K$  的值。LQR 函数需要选择 2 个参数  $R$  和  $Q$ ，这 2 个矩阵是用来平衡输入量和状态量的权重， $R$  一般选择一常量， $Q$  是一个对角线矩阵，一般情况下由元素  $Q_{1,1}$  和  $Q_{3,3}$  来确定，其他元素项为 0。其中， $Q_{1,1}$  代表摆杆角度的权重，而  $Q_{3,3}$  是小车位置的权重。所设计的最优控制完全取决于加权系数  $Q_{1,1}$  和  $Q_{3,3}$  的选择。在以往的设计中，权重往往是由设计者根据其经验经过反复试验获得的，需要设计者根据系统输出逐步调整权重矩阵，直到获得满意的输出响应值为止。这样不仅费时，而且也无法保证获得最优的权重矩阵，因此获得的最优控制反馈系数不能保证使系统达到最优。

## 2 改进蛙跳算法优化 LQR 参数

混合蛙跳算法 (shuffled frog leaping algorithm, SFLA) 在解空间中模拟青蛙群体在寻找食物时的行为探索问题的最优解，是 Eusuff 和 Lanssey<sup>[5]</sup> 为解决组合优化问题于 2003 年提出的一种群智能算法。SFLA 结合了 PSO 算法和 Memetic 算法的优点<sup>[6]</sup>，具有易理解、易实现及寻优能力强等优势。其中，Memetic 是以遗传行为为基础，通过启发式搜索解决优化问题的一种群智能算法。Memetic 算法的特征是在进化之前通过局部搜索获得一些经验。

### 2.1 改进蛙跳算法的实现

#### 2.1.1 标准蛙跳算法<sup>[7]</sup>

1) 初始化：选择  $N_m$  和  $N_f$ ，令  $N_m$  为青蛙子群 memeplex 的个数， $N_f$  为每个子群 memeplex 青蛙的个数 (即可行解的个数)，则初始解 (青蛙种群) 的个数为： $N_{pop} = N_m \times N_f$ 。

2) 青蛙排序：将  $N_{pop}$  个青蛙 (初始解) 按适应度值降序排列，并记录适应度值最大的青蛙为  $x'_g$ 。

3) 青蛙分配：将排好序的青蛙依次循环分配到  $N_m$  个子群 (即第 1 只青蛙到第 1 个子群，第  $N_m$  个青蛙到最后一个子群，第  $N_{m+1}$  只青蛙又到第 1 个子群，周而复始，直到所有青蛙分配完毕)。

4) 确定局部搜索 (Memetic 进化) 迭代次数为 Iter。

5) Memetic 进化：

① 在每个子群中按适应度大小确定局部最好  $x'_b$  和局部最差  $x'_w$ ；

② 更新操作

$$f'_w = \text{Fitness}(x'_w)$$

$$\Delta x'_w = \text{rand}() * (x'_b - x'_w), -\Delta x_{wmax} \leq \Delta x'_w \leq \Delta x_{wmax}$$

$$x'^{t+1}_w = x'_w + \Delta x'_w$$

$$f'^{t+1}_w = \text{Fitness}(x'^{t+1}_w)$$

式中：Fitness 函数为适应度函数， $\Delta x_{wmax}$  表示蛙跳最大步长。rand() 为 (0, 1) 的随机数。

③ 如果  $f'^{t+1}_w > f'_w$ ，则用  $x'^{t+1}_w$  代替  $x'_w$ ，否则用  $x'_g$  代替  $x'_b$  并执行 ②，如果有改进 (即  $f'^{t+1}_w > f'_w$ ) 则用  $x'^{t+1}_w$  代替  $x'_w$ ，否则随机产生一个青蛙替换  $x'_w$ ；

④  $t = t + 1$ ，if  $t \leq \text{Iter}$ ，转到 ①。

6) 洗牌 (种群信息交换)：

所有青蛙重新混合、按适应度值排序，更新  $x'_g$ 。

7) 检查收敛条件是否满足，如果满足，则解为  $x'_g$ ，不满足则转向 3)。

#### 2.1.2 改进的蛙跳算法

1) 新的最差青蛙跳跃策略。

只是采用  $x'_b$  去修改蛙群中的最差青蛙，很容易导致青蛙之间的差异性逐步减少，引起搜索范围的缩小，最后导致后期收敛速度变慢，甚至会陷入局部最优解。因为最差解青蛙每一次的调整只与蛙群内的或者全局的最优青蛙交换信息，而忽略了蛙群中其他青蛙的有效信息。尤其是对于全局解陷入局部最优时，整个蛙群都向局部最优移动，算法就会收敛于局部最优解。为了改进这个缺陷，给出一种改进的跳跃策略：

$$\Delta x'_w = \text{rand}() * (x'_b - x'_w) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \text{rand}() * (x'_i - x'_w) - \Delta x_{wmax} \leq \Delta x'_w \leq \Delta x_{wmax} \quad (2)$$

式中： $x'_i$  是蛙群中的异于  $x'_b$ 、 $x'_w$  的青蛙。首先对蛙群按照适应度降序排列，选择  $N$  个适应度较大的青蛙来修改最差青蛙个体。这样，在更新最差青蛙时，它不断与最优青蛙交换信息，还能吸收其他优秀青蛙的信息，增加蛙群的多样性，使得解的搜索多方向进行，能有效提高算法的全局搜索能力。

2) 加入自适应跳跃因子。

式 (2) 中 rand() 函数起到更新步长的作用。但由于 rand() 函数是一个随机数，很不稳定，会引起步长更新过大或步长更新过小，这样就导致了在最优解附近不停地搜索或者算法收敛时间较长。

数值实验表明，蛙跳算法的跳跃距离应该在开

始时大些,保证在整个解空间中搜索,到了后期应该取较小值,以便算法尽快收敛。根据跳跃距离先大后小的特点,本文设计了一种自适应跳跃算子,使得跳跃距离根据算法的运算过程自适应地调整。自适应跳跃因子为

$$AF = c * (\exp(b) - 1), \quad b = \frac{t_{\max}}{t_{\max} + t}$$

式中:  $t_{\max}$  为进化的最大代数,  $t$  为当前进化代数。  $c$  为系数,取值范围为  $[0.2, 0.6]$ 。则式(2)可修改为

$$\Delta x_w^t = AF * (x_b^t - x_w^t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n AF * (x_i^t - x_w^t),$$

$$-\Delta x_{w\max} \leq \Delta x_w^t \leq \Delta x_{w\max}$$

### 2.2 LRQ 控制器的参数优化

本文将采用改进蛙跳算法对 LQR 控制器设计中的权值  $Q_{1,1}$  和  $Q_{3,3}$  进行多目标优化。

具体算法流程图如图 2。

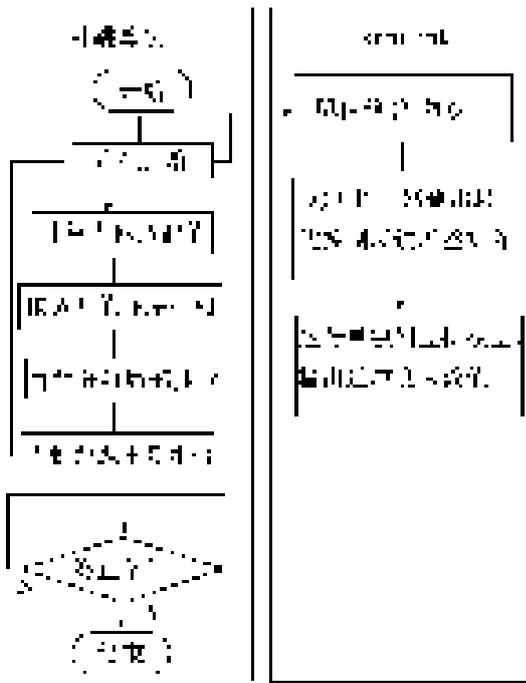


图 2 蛙跳算法优化 LQR 过程示意图

Fig.2 The optimization LQR process of SFLA

图 2 中,改进蛙跳算法与 Simulink 模型之间连接的桥梁是最优蛙(既 LQR 控制器参数)和该青蛙对应的适配值(既控制系统的性能指标)。优化过程如下:改进蛙跳算法产生蛙群(可以是初始化蛙群,也可以是更新后的蛙群),将蛙群中的青蛙依次赋值给 LQR 控制器的参数  $Q_{1,1}$  和  $Q_{3,3}$ ,然后运行控制系统 Simulink 模型,得到该组参数对应的性能指标,该性能指标传递到蛙跳算法中作为该青蛙的适配值,最后判断是否退出算法。

## 3 实验结果与分析

对于 LQR 控制器参数优化问题已经有多种方法,本文采用标准蛙跳算法、改进蛙跳算法、粒子群算法、遗传算法共 4 种方法对 LQR 控制器的参数进行优化,寻找出合适的  $Q_{1,1}$  和  $Q_{3,3}$ 。各算法参数设置如下:

1) 遗传算法:采用文献[8]的参数集,种群规模为 100,变异概率为 0.05,交叉概率为 0.3。

2) 粒子群算法:利用文献[9]的建议,种群规模为 100,认知学习因子为 2.9、社会学习因子为 1.2、惯性因子为 0.4。

3) 标准蛙跳算法和改进蛙跳算法:采用文献[10]的建议,文化基因体数为 20,文化基因体中青蛙数为 10,独立进化次数为 10,个体最大进化步长  $S_{\max} = 100\%$  变化范围。

迭代次数改进蛙跳算法设置为 50,其他 3 种均设置为 100。

对这 4 种算法优化同一模型的结果进行比较,以此来检验改进蛙跳算法对此类问题的优化性能。实验结果如图 3 和图 4,仿真得出,遗传算法(GA)的稳态误差为 0.24%,而粒子群算法(PSO)、标准蛙跳算法(SFA)、改进蛙跳算法(ISFA)求解后没有稳态误差。

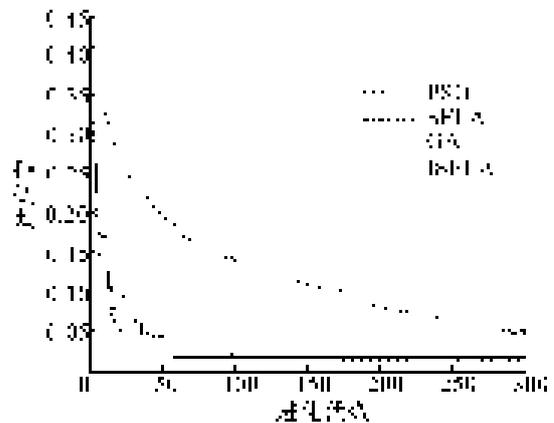


图 3 改进蛙跳算法适应度变化曲线

Fig.3 Improved shuffled frog-leaping algorithm fitness curve

从图 3 可以看出改进蛙跳算法在进化代数为 58.2 时,最优解就稳定下来,粒子群算法、标准蛙跳算法在 120 代之后最优解才稳定下来,而标准的遗传算法在接近 300 代时仍然未稳定下来,说明最优解还有上升的可能,由此可见,改进蛙跳算法在快速收敛性方面有较好表现。

针对单级倒立摆的控制,实验系统的模型参数如下:

小车质量  $M$  为 1.075 kg,摆杆质量  $m$  为 0.105 kg,摆杆长度  $l$  为 0.25 m,小车摩擦系数  $\mu$  为

0.1 N/m/sec, 摆杆转动惯量  $I$  为  $0.0035 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。根据不同算法得到的  $Q_{1,1}$  和  $Q_{3,3}$  代入单级倒立摆模型得到的摆角响应曲线如图 4 所示。

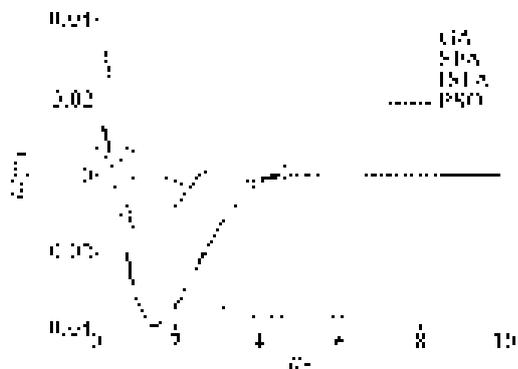


图 4 不同算法得到的摆角响应曲线

Fig.4 The comparison of response curve

从图 4 可以看出,系统能较好地跟踪阶跃信号,改进蛙跳算法对 LQR 控制器参数优化的效果最好,超调量、稳态误差等都有较好的表现,其中超调量是控制系统在阶跃信号输入下的阶跃响应曲线分析动态性能的一个指标值,表示被调参数动态偏离给定值的最大程度;稳态误差是指当系统从一个稳态过度到新的稳态,或系统受扰动作用又重新平衡后,系统可能会出现偏差,这种偏差称为稳态误差,改进蛙跳算法在 LQR 参数优化上有较好的寻优能力,所得参数对一级倒立摆的控制效果很好,精度也很高。

## 4 结束语

本文标准蛙跳算法的基础上,通过改进跳跃策略和增加自适应因子等方法,设计了一个新的蛙跳算法的来对 LQR 控制器进行优化设计,该算法相比于进化算法在收敛性和控制精度上有显著提高,可以较广泛的用于工业控制领域,后续工作主要是继续研究改进蛙跳算法对 PID 控制器的参数的调整,以期适应更广泛的控制领域。

## 参考文献:

- [1] 刘浩梅,张昌凡. 基于 LQR 的环形单级倒立摆稳定控制及实现[J]. 中南大学学报:自然科学版,2012,43(9): 3496-3501.  
LIU Haomei, ZHANG Changfan. Stability control and realization of single link rotary inverted pendulum on LQR controller[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(9): 3496-3501.
- [2] 张白莉. 单级倒立摆控制系统的稳定性算法设计[J]. 现代电子技术, 2011, 34(3): 120-122.  
ZHANG Baili. Stability algorithm design of first-order inverted pendulum control system[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(3): 120-122.

- [3] XU X. Suboptimal LQR problem: controller uncertainty and static output feedback controller[C]//Proceedings of the 23rd Chinese Control Conference. Changsha, China, 2004: 25-32.
- [4] 胡蓉,陶雪华.单级倒立摆的 LQR 控制和 DMC 控制 Matlab 仿真比较[J].工业控制计算机,2011,26(8): 38-40.  
HU Rong, TAO Xuehua. Comparison study of LQR control and DMC control on single inverted pendulum[J]. Industrial Control Computer, 2011, 26(8): 38-40.
- [5] ALIREZA R V. A hybrid multi-objective shuffled frog-leaping algorithm for a mixed-model assembly line sequencing problem[J]. Computers and Industrial Engineering, 2007, 53(9): 642-666.
- [6] 贺毅朝,曲文龙,许冀伟.一种改进的混合蛙跳算法及其收敛性分析[J].计算机工程与应用,2011,47(22): 37-40.  
HE Yichao, QU Wenlong, XU Jiwei. Improved shuffled frog-leaping algorithm and its convergent analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(22): 37-40.
- [7] LI Yinghai, ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongchuan, et al. Novel multi-objective shuffled frog leaping algorithm with application to reservoir flood control operation[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, 136(4): 217-226.
- [8] 张倩,杨耀权.基于遗传算法的 PID 控制器参数优化方法研究[J].电力科学与工程,2011,27(11): 53-57.  
ZHANG Qian, YANG Yaoquan. PID controller parameters optimization method based on genetic algorithm[J]. Electric Power Science and Engineering, 2011, 27(11): 53-57.
- [9] 应明峰,鞠全勇,高峰.基于粒子群优化的 PID 控制器设计与应用[J].计算机仿真,2011,28(11): 283-287.  
YING Mingfeng, JU Quanyong, GAO Feng. Design and application of PID controller based on particle swarm optimization[J]. Computer Simulation, 2011, 28(11): 283-287.
- [10] 葛宇,王学平,梁静.改进的混合蛙跳算法[J].计算机应用,2012,32(1): 234-237.  
GE Yu, WANG Xueping, LIANG Jing. Improved shuffled frog-leaping algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(1): 234-237.

## 作者简介:



彭勇,男,1976年生,副教授,主要研究方向为智能算法、网络安全,参与省部级科技计划项目多项,发表学术论文 17 篇,其中被 EI 检索多篇。



陈俞强,男,1980年生,副教授,主要研究方向为片上系统、普适计算,主持并参与省部级科技计划项目多项,发表学术论文 25 篇,其中被 EI 检索多篇。