

文章编号 :1672- 7010(2009)02- 0019- 05

# 直线单级倒立摆自抗扰控制优化设计

曾文飞<sup>1,2</sup>, 张英杰<sup>1</sup>

(1.湖南大学 计算机与通信学院,长沙 420087 2.邵阳学院 信息工程系,邵阳 422000)

**摘 要:** 自抗扰控制技术(ADRC)通过对模型不确定因素和外扰进行补偿,使得控制系统对外扰和不确定因素均有很好的适应能力,能够有效控制多种工业上较为难控的对象,表现了极强的鲁棒性和抗干扰性,但是 ADRC 参数众多难以调节。本文将生物免疫算法与遗传算法相结合,提出了一种基于免疫遗传机理优化计算模型,避免了遗传算法易出现早熟、搜索效率低及不能很好保持个体多样性等问题,给出了基于免疫遗传算法的 ADRC 参数整定方法,通过对直线单级倒立摆的自抗扰控制,仿真实验表明了通过免疫遗传算法整定的 ADRC 具有的良好控制效果。

**关 键 词:** 自抗扰控制(ADRC);免疫算法;遗传算法;优化设计;倒立摆

中图分类号:TP273

文献标识码:A

## The Optimization Design of Active Disturbance Rejection Control for the Linear Inverted Pendulum

ZENG Wen-fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Ying-jie<sup>1</sup>

(1. Institute of Computer and Communications Engineering, Hunan University, Changsha 420008;

2. Department of Information Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 42200)

**Abstract:** Active-Disturbance-Rejection Controller (ADRC) can effectively adjust uncertain factor and disturbance of the model by compensation. It can effectively control many unmanageable model and shows its robustness and anti-disturbance to us. However, ADRC parameter are numerous and hard to adjust. The text combines the Immune Algorithm and Genetic Algorithm to construct ideal controller, putting forward a kind of the optimization compute model based on Immune Genetic Mechanism, thus avoiding the problem of precocity, low searching efficiency and failure in maintaining individual diversity in Genetic Algorithm. The parameter setting of ADRC based on IGA is also given. The optimized ADRC is applied to the linear inverted pendulum, the result of simulation shows the good effect of ADRC set by IGA.

**Keywords:** active-disturbance-rejection control (ADRC); immune algorithm; genetic algorithm; optimization design; inverted pendulum

### 引言

倒立摆系统以其结构简单直观,构件参数和形状易于改变,成本低廉,而本身又是一个高阶次、不稳定、多变量、非线性、强耦合系统,被公认为自动控制理论中的典型试验设备,也是控制理论教学和科研中不可多得的典型物理模型。倒立摆系统稳定效果

非常明了,可以通过摆动角度、位移和稳定时间直接度量,控制效果好坏一目了然。由于倒立摆系统的稳定与空间飞行器控制和各类伺服平台的稳定有很大相似性,也是日常生活中所见到的任何重心在上、支点在下的静态不稳定对象控制问题的抽象。因此,倒立摆机理的研究又具有重要的应用价值,成为控制理论中经久不衰的研究课题。

收稿日期:2009-04-26

作者简介:曾文飞(1971-)男,湖南洞口人,在读硕士生,邵阳学院信息工程系副教授,主要从事计算机智能控制。

自抗扰控制算法<sup>[1]</sup>由中科院数学所韩京清研究员提出,是继PID控制算法之后的一种新的不依赖于对象数学模型的控制算法,该算法吸取经典PID的思想精华,构造出比PID更好的新型控制器,得到更好的控制效果。目前,该控制方法已在许多尖端科技领域(如机器人、磁悬浮、导弹飞行姿态、坦克火控及惯性导航等)科研项目中以控制品质优异、鲁棒性强的特点,取得了令人满意的效果<sup>[2-5]</sup>。但是在实际使用时多个参数需要整定,由于控制对象的不同,对象与控制算法又形成闭环,参数整定的方向及大小范围未知,参数整定困难,为实际使用造成障碍。

本文针对自抗扰控制器需整定参数多、整定困难,将生物免疫算法与遗传算法相结合,提出了一种基于免疫遗传算法机理优化设计模型,给出了基于免疫遗传算法的ADRC参数整定及优化方法。

## 1 直线单级倒立摆系统模型

倒立摆<sup>[6]</sup>系统的控制问题一直是控制研究中心的一个典型问题。控制的目的是通过给小车底座施加一个力 $u$ (控制量),使小车停留在预定的位置,并使杆不倒下,即不超过一个预先定义好的垂直偏离角度范围。图1为一级倒立摆系统示意图,小车质量为 $M$ ,摆的质量为 $m$ ,小车位置为 $x$ ,摆的角度为 $\theta$ 。

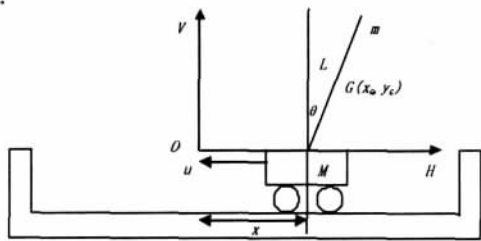


图1 一级倒立摆系统示意图

根据牛顿运动定律,我们建立的直线一级倒立摆的状态空间方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(l+m^2)b}{I(M+m)+lml^2} & \frac{m^2g^2}{I(M+m)+lml^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mlb}{I(M+m)+lml^2} & \frac{mgl(M+m)}{I(M+m)+lml^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{l+m^2}{I(M+m)+lml^2} \\ 0 \\ \frac{ml}{I(M+m)+lml^2} \end{bmatrix} u \quad (1)$$

系统的输出方程为:

$$y = \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (2)$$

设实际系统的模型参数如下:

小车质量  $M=1.096\text{Kg}$  摆杆质量  $m=0.109\text{Kg}$   
摆杆惯量  $I=0.0034\text{Kg}\cdot\text{m}^2$  采样频率  $T=0.005$  秒  
小车摩擦系数  $b=0.1\text{N/m/sec}$  摆杆转动轴心到杆质心的长度  $l=0.25\text{m}$

将实际系统的模型参数代入到式(1)中,可得到系统的状态空间模型如式(3)

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.08832 & 0.6393 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.2357 & 27.828 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (3)$$

## 2 自抗扰控制技术

许多实际被控制对象可以简化成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, w(t), t) + bu \\ y = x(t) \end{cases}$$

其中 $w(t)$ 表示外扰作用,自抗扰控制技术的核心是采用合适的方法,用希望得到的输出信号 $r(t)$ 和系统的实际输出信号 $y(t)$ 的差(即误差信号),以控制输入量 $u(t)$ 来估计系统运行过程中的实时作用量 $a(t)=f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, w(t), t)$ 并给予补偿,使系统变成积分串联型系统<sup>[2-5]</sup>

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = bu_0 \\ y = x(t) \end{cases}$$

然后对其实现适当的状态误差反馈来达到控制

的目的,这里 $f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, w(t), t)$ 是已知还是未知、线性还是非线性、时变还是非时变都不重要,只要它在过程的实时表象 $a(t)$ 为有界就可以了。

基于自抗扰控制技术的自抗扰控制器(Active-Disturbance-Rejection-Controller ADRC)主要是由:跟踪微分器(Tracking Differentiator TD),扩张状态观测器(Extended State Observer ESO),非线性反馈控制律(Nonlinear Feedback Control Law NLSEF)。自抗扰控制器技术的核心是把系统的未建模动态和未知外扰作用都归结于对系统的“总扰动”而进行估计并给予补偿。在ADRC的三个组成部分中,TD的作用是安排过渡过程并给出过程的微分信号;ESO的主要作用是给出对象状态变量估计值及系统模型和外扰实时总和作用的估计值,这个实时估计值的补偿作用使被控对象化为“积分器串联型”;最后利用非线性状态误差反馈(NLSEF)对被化成“积分器串联型”的对象进行控制。

本文以二阶 ADRC 为例, 给出步长为  $h$  的欧拉法离散形式算法。假设对象为:

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) = f(x, \dot{x}, w(t)) + bu(t) \\ y = x(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中  $w(t)$  为扰动。

## 2.1 TD 的离散算法实现

首先定义一个函数:

$$\text{sat}(x, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(x) & |x| \geq \delta \\ x/\delta & |x| < \delta \end{cases}$$

$$e(k) = v_1(k) - v_0(k)$$

$$z_1(k) = e(k) - h_0 z_2(k)$$

$$g = \begin{cases} v_2 - \text{sign}(z_1) \frac{r(h_0 - \sqrt{8|z_1| - rh_0^2})}{2} \\ v_2 + \frac{z_1}{h_0} & |z_1| < \delta_1 \end{cases}$$

式中,  $v_0(k)$  为参考输入信号,  $v_1(k)$ 、 $v_2(k)$  分别为离散跟踪微分器的 2 个输出,  $\delta_1 = rh_0^2$ ,  $\delta = rh_0$ 。离散 TD 的实现如下:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) - hrsat(g(k)) \end{cases} \quad (5)$$

其中, 适当选择跟踪微分器的参数  $r$ , 就可以对参考输入  $v_0(k)$  安排出期望的过渡过程  $v_1(k)$  和该过渡的微分信号  $v_2(k)$ 。

## 2.2 ESO 的离散算法实现

实现方程如下:

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y(t) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01} \text{fal}(e(k), \alpha_{01}, \delta_0)) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02} \text{fal}(e(k), \alpha_{02}, \delta_0) + b_0 u) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_{03} \text{fal}(r(k), \alpha_{03}, \delta_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} e^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ e/\delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta \end{cases}, \quad \delta > 0$$

其中, 扩张状态观测器 ESO 的状态量  $z_1$ 、 $z_2$  能很好地跟踪对象输出  $y$  及  $\dot{y}$ , 而  $z_3$  则能估计出对象扰动的量和作用量  $f(x(t), \dot{x}(t), w(t))$ , 并反馈到控制量  $u(t)$ 。

## 2.3 NLSEF 的离散算法实现

$$\begin{cases} e_1 = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2 = v_2(k) - z_2(k) \\ u_0 = \beta_1 \text{fal}(e_1, \alpha_1, \delta) + \beta_2 \text{fal}(e_2, \alpha_2, \delta) \\ u = u_0 - z_3/b_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $e_1$ 、 $e_2$  是安排的过渡过程  $v_1$  和系统输出估

计  $y$  之间的误差和该误差的微分, 合理选择非线性参数  $(\alpha_1, \alpha_2, \delta)$  以及参数  $\beta_1, \beta_2$  来实现对“积分串联型对象”的非线性控制; 实际控制为  $u$ , 其中  $-z_3/b_0$  将扰动  $f(x(t), \dot{x}(t), w(t))$  和未建模动态特性一并补偿。

从上面的离散算法实现公式中我们知道, 自抗扰控制器的调节参数主要包括 TD 中  $\{r, \delta_1\}$ , ESO 中的  $\{\alpha_{01}, \alpha_{02}, \alpha_{03}, \delta_0, \beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, b_0\}$ , 非线性组合的  $\{\alpha_1, \alpha_2, \delta, \beta_1, \beta_2\}$ 。这些参数确定就是一项繁杂的过程, 而且目前参数调整主要还是依靠经验, 因此在实际使用时调节复杂, 不利于广泛应用。本文给出了基于免疫遗传算法的 ADRC 参数整定方法, 摆脱了 ADRC 参数整定和优化对经验的依赖。

## 3 基于免疫遗传算法的参数整定机理

常规的 ADRC 参数整定实际上是一个手工过程, 它需要调节人员有丰富的控制领域知识与经验, 是一个比较耗时的工作。特别是在优化问题中, 目标函数是多峰的, 就要求所使用的算法必须具有高度的鲁棒性, 以避免局部解在附近徘徊。免疫遗传算法的优点恰好是擅长全局搜索, 同时避免了遗传算法易出现早熟、搜索效率低及不能很好保持个体多样性等问题, 所以引入免疫遗传算法, 将使得原本繁琐的参数整定工作变得简单易行, 并且提高了参数整定的可靠性<sup>[9]</sup>。

### 3.1 自抗扰控制器的参数整定原则

对于二阶的 ADRC 来讲, 其跟踪微分器 TD 的参数整定相对来讲比较简单, 可以根据对过渡过程的要求确定参数  $r$ , 越大安排的过渡过程越短。当系统开始作用时, TD 只是给出一个对输入跟踪信号和一个微分信号,  $r$  的改变不会对系统的动态特征产生影响, 所以当  $r$  选取好之后就可以固定下来。

$b_0$  是一个较为特殊的控制器参数, 它既与控制量  $u$  有关, 又与状态观测器的第三个状态变量相联系, 不同的  $b_0$  值的选取相当于总扰动值在不同的范围内变化, 即补偿分量也会响应的改变。所以  $b_0$  作为外部调整参数, 它也不参与遗传算法优化过程。 $b_0$  的选取原则是: 当对象有迟延的时候取大值, 使得  $b_{0u}$  的值较大, 经 ESO 的第二个状态量反馈回 TD 后, 产生一个大误差控制信号把对象激励起来, 让输出尽快冲上去, 同时由公式  $z_3/b_0$  可以看出  $b_0$  取大值可以有有效的补偿扰动和模型的不同确定因素。

二阶的 ADRC 其相应的状态观测器 ESO 为三



阶,根据公式(3)可知有 $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$ 和 $\beta_{03}$ 三个参数需要调整,而控制律NLSEF也有 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 两个参数需要调整.对于一个控制系统来说,把五个参数有效的协调组合,以得到最优的控制效果,这无疑是一项困难而繁杂的工作,因此把这个寻优工作交给了免疫遗传算法.

### 3.2 基于免疫遗传算法的ADRC参数整定

用免疫遗传算法<sup>[7-8][10-11]</sup>进行自抗扰控制器的参数整定,需要对包括目标函数选择、自抗扰控制器待优化参数选择、编码方式选择等模块进行设定.免疫遗传算法用于ADRC参数寻优的过程如图2所示:

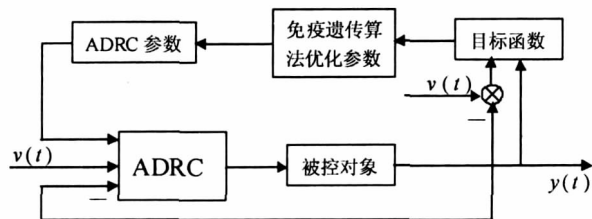


图2 免疫遗传算法用于ADRC参数寻优的示意图

#### (1) 免疫遗传算法目标函数的选择

为了使控制系统能对输入信号有好的响应,能较好的跟踪控制器中跟踪微分器安排的过渡过程,应使系统输出与跟踪微分器的输出的误差平方的积分最小,因此我们将目标函数<sup>[7-8]</sup>取为:

$$f = \int_0^T (y(t) - v(t))^2 dt \quad (8)$$

根据此目标函数,计算其倒数,就可以得到适应度函数.最优的控制参数是使适应度函数最大时,所对应的控制器参数.

#### (2) 自抗扰控制器待优化参数的确定

从本文中自抗扰控制器参数对性能的影响的分析中,我们知道对于二阶自抗扰控制器共有 $r, b_0, \beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, \alpha, \delta_0, \delta, \delta_1, \beta_1, \beta_2$ 等11个参数需要确定,从中我们共选取 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, \beta_1, \beta_2$ 这5个参数用来进行编码,以免疫遗传算法对这5个参数进行寻优,而其它几个未参与免疫遗传算法编码的参数根据自抗扰控制器参数整定的一般原则设定为: $r=2, \delta_0=0.01, b_0=2, \alpha=0.5, \delta_1=1, \delta=1$ .从而构造理想的自抗扰控制器,获得优化的控制效果.

#### (3) 编码方式的选择

对于二阶自抗扰控制器的 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, \beta_1, \beta_2$ 这5个参数,由于他们是在一定范围内的数值,并且具有小数部分,所以本文采用浮点编码方法对这五个变量进行编码.

采用免疫遗传算法进行自抗扰控制器参数优化的基本思想是:当选择好被控对象后,随机产生按设定种群大小规定的一组初始个体,每个个体由5个实数构成,这5个实数分别表征控制器的5个参数 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, \beta_1, \beta_2$ .接下来分别以每个个体的参数数值作为控制器参数对被控对象进行仿真,并且分别获得每个个体控制效果的目标函数值,进而获得适应度值.根据适应度值,依据规则进行免疫遗传的选择、交叉、变异操作获得下一代个体,如此经过一定的进化代数就可以选择出使控制器有优越控制品质的优良个体.

#### (4) IGA的选择算子

个体的选择概率 $p$ 由适应度概率 $p_f$ 和浓度概率 $p_d$ 两部分组成,即:

$$p = \alpha p_f + (1 - \alpha) p_d \quad (9)$$

其中 $p_f$ 用轮盘赌选择法计算,第 $t$ 个个体的 $p_d$ 计算如下:

$$C_i = \frac{\text{与抗体 } i \text{ 浓度大于 } \lambda \text{ 的抗体数和}}{N} \quad (10)$$

用式(10)计算抗体浓度,找出浓度较大的个体,记为个体 $1, 2, 3, \dots, t$ ,则定义该 $t$ 个个体的浓度概率为:

$$p_d = \frac{1}{N} (1 - \frac{t}{N}) \quad (11)$$

其中 $1 < t < N$ ,其它 $(N-t)$ 个个体的浓度概率为:

$$p_d = \frac{1}{N} (1 + \frac{t^2}{N^2 - N \cdot t}) \quad (12)$$

式(9)中, $\alpha$ 为亲和系数, $0 < \alpha < 1$ ;并且其中 $p_f < 1, p_d < 1$ .

(9)式可以实现:个体适应度越大,则选择概率越大;个体浓度越大,则选择概率越小,这样既可保留适应度高的个体,又能确保个体的多样性,从而可改善早熟收敛.

#### (5) IGA的交叉算子

采用两交叉概率控制的方法,即对种群中好的个体采用小的交叉概率,以继承父代的优越性,对于较差的个体采用大的交叉概率,以保持种群的多样性.

#### (6) IGA的变异算子

同样采用两变异概率控制的方法,即好的个体采用小变异概率,差的个体采用大的变异概率.

## 4 仿真实验

系统控制采用自抗扰控制器如式(5)至(7)所描述,免疫遗传算法中的5个决策变量 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, \beta_1,$

$\beta_2$  分别用实数编码表示, 目标函数的选择同式(8), 自抗扰控制器的其它未编码参数的取值为  $\gamma=2$ ,  $\delta_0=0.01$   $\beta_0=2$   $\rho=0.5$   $\delta_1=1$   $\delta=1$ .

系统实际控制是在 Windows2000 环境下, Matlab7.0 平台中实现.

免疫遗传算法中初试种群大小取为 100, 交叉概率  $P_c=[0.7, 0.8]$ , 交叉概率  $P_m=[0.05, 0.1]$ , 经过 100 代进化, 获得优化参数如下:

最优个体为: BestS=[10, 7.2, 92, 59, 2.6];

最佳适应度: f=0.035;

自抗扰控制器的参数为:

TD  $\gamma=2$   $\delta_0=0.01$ ;

ESO  $\alpha_1=0.5$   $\beta_{01}=10$   $\beta_{02}=7.2$   $\beta_{03}=92$   $\delta_1=2$   $\beta_0=0.5$ ;

NLSEF  $\alpha_2=0.5$   $\beta_1=59$   $\beta_2=2.6$   $\delta_2=1$ ;

适应度函数变化值如图 3 所示, 图中代数为 100 代.

倒立摆的恒值响应见图 4, 图中采样周期为  $T=0.005$  秒.

直线一级倒立摆的实际控制中, 能很好的保持稳定性, 验证了经免疫遗传算法优化的自抗扰控制器对倒立摆对象控制的有效性.

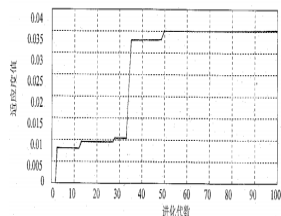


图 3 适应度函数值的变化

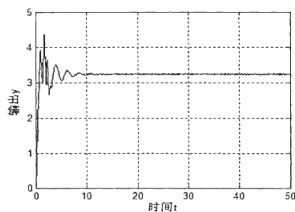


图 4 倒立摆恒值响应  
Simulink 仿真图

## 5 结论

仿真实验表明, 针对倒立摆这样的二阶、不稳定、多变量、非线性、强耦合系统, 利用自抗扰控制技术对扰动的良好估计、对系统参数的强适应性, 使用免疫遗传算法整定的自抗扰控制器能够对倒立摆实现有效控制, 表现出良好的鲁棒性和很强的抗扰性, 并且系统的动静态性能也都令人满意. 同时通过对免疫遗传算法和简单遗传算法进行控制效果的比较, 采用免疫遗传算法获得的适应度值要大于采用简单遗传算法获得的适应度值, 免疫遗传算法改善

了遗传算法收敛速度过快的缺陷, 采用免疫遗传算法获得的 ADRC 参数控制效果明显要优越于简单遗传算法获得参数的控制品质.

参考文献:

- [1] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程. 2002.9(3): 13- 18.
- [2] Ding S C. Active disturbance rejection controller and its application in furnace control[D]. Beijing: Institute of Systems Science of Chinese Academy of Science. 1996.
- [3] Baks M W, Luo Z H, Han J Q, et al. ESO for motion control of high speed high precision robot[J]. Japanese. 2000.18(2): 244- 251.
- [4] Xie W M. The investigation on synchronous system of hydraulic press and control theory of nonlinear state error feedback [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1996.
- [5] Gao Z Q, Hu S H, Jiang F J. A novel motion control design approach based on active disturbance rejection [A]. Proceedings of IEEE Conference on Control and Decision [C]. Orlando: IEEE. 2001.
- [6] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社. 2007.
- [7] Dasgupta D, Attouh- Okine N. Immunity- Based systems: A survey[J]. In: proc 1997 IEEE Int conf on systems, Man and Cybernetics, Orlando, FL, USA, 1997, 1: 869- 874.
- [8] Forrest S, Javornik B, Smith R, Perelson AS. Using genetic algorithms to explore pattern recognition in the immune system [J]. Evolutionary Computation, 2006, 1(3): 191- 211.
- [9] 于希宁, 朱丽玲. 自抗扰控制器的动态参数整定及其应用[J]. 华北电力大学学报, 2005.41(6): 95- 99.
- [10] Shyh- Jier Huang. An Immune- Based Optimization Method to Capacitor Placement in a Radial Distribution system [C]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2000, 15(2): 744- 749.
- [11] Gao Feng. Optimal design of piezo- electric actuators for plate vibroacoustic control using genetic algorithms with immune diversity [J]. Smart Materials and Structure, 2000, 1(1): 485- 491.