

基于蝙蝠算法的三电平有源电力滤波器复合控制

陆阳,陈红卫

(江苏科技大学 电信学院,江苏 镇江 212003)

摘要:为改善基于重复控制方式的三电平 APF 动态性能欠佳的不足,采用重复控制+滞后 1 拍 PI 控制的复合电流跟踪控制方式。为了进一步提高控制器性能,采用改进的蝙蝠算法对控制器参数进行优化,给出了参数优化结果。分别对传统 PI 控制与优化后的复合控制进行了 Matlab/Simulink 仿真实验。结果表明,复合控制方式静态与动态性能更好,能够更加有效抑制电网谐波,达到了预期目标。

关键词:三电平;有源电力滤波器;复合控制;蝙蝠算法;参数优化

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19329

Compound Control of Tri-level Active Power Filters Based on Bat Algorithm

LU Yang, CHEN Hongwei

(School of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China)

Abstract: In order to improve the dynamic performance of tri-level active power filter (APF) based on repetitive control, a compound current tracking control method combining repetitive control and one-beat lag PI control was used. For further improving the performance of the controller, the parameters of the controller were optimized by the improved bat algorithm, and the exact values of the parameters of the controller were achieved. Though the Matlab/Simulink simulation experiment of the traditional PI control method and the optimized compound control, the results demonstrate that the proposed method has better static and dynamic performance, and can suppress grid harmonic more effectively, and reach the desired goals.

Key words: tri-level; active power filter (APF); compound control; bat algorithm; parameter optimization

近年来,随着供电系统的迅猛发展,各种非线性负载被广泛使用,大量谐波注入电网,给电网的电能质量带来了严重的负面影响。有源电力滤波器(active power filter, APF)由于其在谐波抑制方面具有优越的性能,因而受到广泛的关注。谐波检测方法和电流控制策略共同决定了有源电力滤波器性能的优劣。目前,常见的电流控制策略有滞环控制、无差拍控制、三角载波控制和谐振控制等。滞环控制中,开关频率具有较大的波动性,开关损耗大,设计难度大。文献[1]提出了一种有源电力滤波器随机变环宽滞环电流跟踪控制方法,有效降低了开关损耗,取得了良好的谐波补偿效果。针对无差拍控制依赖于系统的精确数学模型,抗扰性差,文献[2]提出了一种结合电压修正算法和电流校正算法的改进无差拍控制器,改善了对变化较快的电流的跟踪

效果,增强了抗扰性。针对三角载波控制受限于开关器件的开关频率,难以应对高频谐波且响应速度较慢,文献[3]将快速跟踪微分器引入三角载波控制,有效减小了因电流响应滞后引起的误差,提高了控制器响应速度。谐振控制需要对各次谐波单独设计控制器,因而控制系统复杂,基于此,文献[4]提出一种比例-积分-多频谐振控制,只针对主要次谐波设计谐振控制器,不仅简化了控制器,还具有更好的补偿效果与动态响应性能。

重复控制能够实现对电流谐波的无静差跟踪,且结构简单、易于工程实现^[5],但其动态性能较差,扰动出现 1 个周期后它才开始起作用。系统采用重复控制与滞后 1 拍的 PI 控制相结合的电流控制策略,保证稳态性能的同时,提高系统动态响应速度。

本文在建立并联三相三线制三电平有源电力滤波器数学模型的基础上,构建了APF重复+滞后1拍PI控制的复合控制器模型。在此基础上,采用改进的蝙蝠算法对控制器的参数进行优化。

1 三电平 APF 数学模型

系统采用二极管钳位式三电平逆变器作为APF主电路,其拓扑结构如图1所示。图1中, u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 为电源电压; i_a, i_b, i_c 为网侧电流; i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 为非线性负载电流; i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 为补偿电流; u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 为APF输出电压; U_{dc} 为APF直流侧电压; L_1, L_2, C, R_d 同组成LCL型输出滤波器; C_1, C_2 为APF直流侧电容。

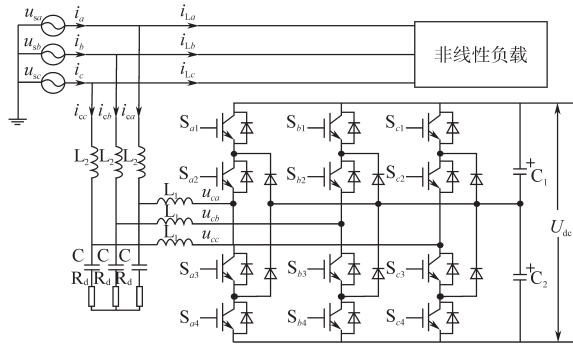


图1 三电平有源电力滤波器拓扑结构

Fig.1 Three-level active power filter topology

理想三电平APF在 abc 坐标系下数学模型为

$$\dot{X} = AX + BU \quad (1)$$

其中 $A = \text{diag}[-R/L, -R/L, -R/L]$

$$X = [i_{ca} \ i_{cb} \ i_{cc}]^T \quad U = [u_{ca} - u_{sa} \ u_{cb} - u_{sb} \ u_{cc} - u_{sc}]^T$$

$$B = \text{diag}[1/L \ 1/L \ 1/L] \quad L = L_1 + L_2$$

式中: L 为APF等效输出电感; R 为线路电阻。

将APF在 abc 坐标系下数学模型转化为在 dq 坐标下的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_{cd}}{dt} = -Ri_{cd} + \omega Li_{cq} - u_{sd} + u_{cd} \\ L \frac{di_{cq}}{dt} = -Ri_{cq} - \omega Li_{cd} - u_{sq} + u_{cq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为电网电压角频率。

由式(2)可以看出, d, q 轴电流分量不仅存在互耦,而且受到电网电压的干扰。若令

$$\begin{cases} u_{cd} = u_{cd}^* + u_{sd} - \omega Li_{cq} \\ u_{cq} = u_{cq}^* + u_{sq} + \omega Li_{cd} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{cd}^*, u_{cq}^* 为控制器输出量。

则有:

$$\begin{cases} L di_{cd}/dt + Ri_{cd} = u_{cd}^* \\ L di_{cq}/dt + Ri_{cq} = u_{cq}^* \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, i_{cd}, i_{cq} 可以由 u_{cd}^*, u_{cq}^* 单独控制,从而实现了APF输出电流的解耦控制。

2 电流复合控制

重复控制是一种基于内模原理的控制方法,它对前一个周期的误差信号进行采集,然后在下一个周期输出,并将误差累计,直至为零,最终实现无静差跟踪^[6],其系统结构如图2所示。图2中, r 为输入信号; e 为误差信号; d 为扰动信号; y 为系统输出信号; Q 为辅助补偿器,一般取小于1的常数,本文取0.98; z^{-N} 为1个基波周期的延迟环节; N 为1个基波周期的采样点数; $S(z)$ 为补偿器; $P(z)$ 为离散化的被控对象,即APF输出滤波器的离散化模型。

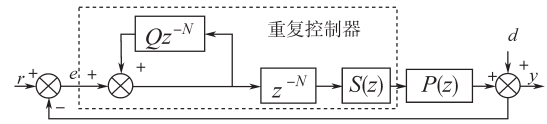


图2 重复控制原理框图

Fig.2 Block diagram of repetitive control principle

系统采用滞后1拍的PI控制作为外环,重复控制作为内环的APF电流复合控制方式,其结构如图3所示。当指令电流发生突变时,由于重复控制存在1个周期的延迟,不能做出及时响应,而滞后1拍的PI控制能够对扰动快速反应。所以,该复合控制系统既可以保证对周期性误差信号的无差跟踪,也可以提高系统的动态性能。

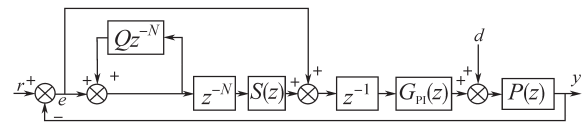


图3 复合控制结构框图

Fig.3 Structure diagram of compound control principle

重复控制器的设计主要是 $S(z)$ 的设计。根据重复控制的基本思想,可设:

$$S(z) = k_r z^k F(z) \quad (5)$$

式中: k_r 为补偿器增益,作用是合理匹配系统稳态裕度和误差收敛速度,本文取1; z^k 为相位超前补偿环节,作用是对 $P(z)$ 和 $S(z)$ 在低频段产生的滞后相位进行补偿; $F(z)$ 为滤波器,负责滤除系统产生的谐振峰,同时增强系统高频衰减特性。

由于LCL型输出滤波器采用无源阻尼技术^[7]消除谐振峰,所以 $F(z)$ 的设计过程中只需考虑高频衰减。控制系统采用二阶滤波器来进行高频衰减,设其传递函数为

$$F(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (6)$$

式(6)采用双线性离散化后为

$$F(z) = \omega_n^2 \frac{1 + 2z^{-1} + z^{-2}}{(4f_s^2 + 4f_s\xi\omega_n + \omega_n^2) + (2\omega_n^2 - 8f_s^2)z^{-1} + (\omega_n^2 - 4f_s\xi\omega_n + 4f_s^2)z^{-2}} \quad (7)$$

式中: ξ 为阻尼比; ω 为转折角频率; f_s 采样频率。

3 蝙蝠算法优化控制器参数

文献[8]模拟蝙蝠通过回声定位猎物的行为,提出了一种新型的智能优化算法——蝙蝠算法(bat-inspired algorithm, BA)。电流控制器参数优化的目标是寻找到目标函数的极小值^[9],采用时间乘以误差绝对值积分(ITAE)的性能指标来作为优化过程中控制器优劣的评价指标。定义目标函数为

$$J = \int_0^\infty t|e(t)|dt \quad (8)$$

其离散形式为

$$J = T_s \sum_{k=0}^\infty k|e(kT_s)| \quad (9)$$

式中: T_s 为采样周期。

由于 T_s 为时间常数,因而可将目标函数简化为

$$J = \sum_{k=0}^\infty k|e(k)| \quad (10)$$

3.1 基本蝙蝠算法

基本蝙蝠算法基于以下几个理想化处理规则:

1) 蝙蝠通过回声定位测定距离,并分辨目标类型。

2) 蝙蝠在位置 x_i 以速度 v_i 随机飞行,以固定频率 $f_{\min}$ 、可变波长 λ 和响度 A_0 搜索目标,其依据目标与自己的距离调整脉冲波长,且在靠近猎物时调整脉冲发射速率 R 。

3) 假设响度从最大值 A_0 变化到最小值 $A_{\min}$ 。

基于以上假设,蝙蝠算法的主要步骤如下:

1) 参数初始化,目标函数 $f(X)$, $X = [x_1, \dots, x_d]^T$, 初始蝙蝠种群 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 和蝙蝠飞行速度 v_i , 脉冲频率 f_i , 初始化脉冲速率 R_i 和声音响度 A_i ;

2) 通过下式调整频率:

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta_0 \quad \beta_0 \in [0, 1] \quad (11)$$

采用下式生成新解并改变速度与位置:

$$v_i' = v_i^{t-1} + (x_i' - x_*)f_i \quad (12)$$

$$X_i' = X_i^{t-1} + v_i' \quad (13)$$

式中: t 为当前迭代次数; β_0 为随机向量; x_* 为当前全局最优解。

3) 若 $\text{rand} > r_i$, 则从最佳解集中选一个解,用下式在选择的最佳解附近形成一个局部解:

$$X_{\text{new}} = X_{\text{old}} + \varepsilon A' \quad \varepsilon \in [-1, 1] \quad (14)$$

4) 蝙蝠经过随机飞行生成一个新解;

5) 若 $\text{rand} < A_i$ & $f(X_i) < f(X^*)$, 则接受这个新的解,且采用下式,增大 R_i 和减少 A_i :

$$\begin{cases} A_i' = \alpha A_i^{t-1} \\ R_i' = R_i^0 [1 - e^{-\gamma}] \end{cases} \quad (15)$$

6) 排列蝙蝠并找到当前最优解 x_* ;

7) 如果未满足结束条件,则返回2);

8) 输出全局最优位置。

3.2 蝙蝠算法的改进

本文为蝙蝠速度项 v_i 的更新引入线性递减的惯性系数^[10],如下式:

$$v_i' = k_v v_i^{t-1} + f_1 r_1 (h_* - x_i^{t-1}) + f_2 r_2 (x_* - x_i^{t-1}) \quad (16)$$

式中: k_v 为速度惯性系数; h_* 为第 i 个蝙蝠当前最优解; f_1, f_2 为脉冲频率; r_1, r_2 为介于 0~1 之间的随机数。

速度惯性系数逐渐减小,既保证了前期的全局搜索能力,也提高了后期的局部搜索能力。

式(16)中, f_1, f_2 分别表示蝙蝠个体与种群对蝙蝠飞行速度的影响。采用下式来更新 f_1, f_2 :

$$f_1 = \alpha(1 - e^{\frac{|F_{\text{avg}} - F_{\text{best}}|}{t_{\text{max}}}}) + \gamma(1 - \frac{t}{t_{\text{max}}}) + f_{\min} \quad (17)$$

$$C_\omega = f_1 + f_2 \quad (18)$$

式中: F_{avg} 为蝙蝠种群平均适应度; F_{best} 为当前最优蝙蝠个体; t_{max} 为最大迭代次数; α, γ, C_ω 为常数,可分别取 1.5, 2, 3; $f_{\min}$ 为 f_1 的最小值,取 2.5。

脉冲频率随着蝙蝠种群平均适应度与迭代次数的变化而变化。前期,较大的 f_1 能够提高蝙蝠算法的全局搜索能力;后期,较大的 f_2 能够保证蝙蝠算法具有较好收敛性。

对于蝙蝠个体的局部搜索方式,采用一种结合脉冲发射频率、脉冲响度与当前迭代次数的局部搜索策略^[10-11]。首先,生成随机数 $\beta \in [0, 1]$, 若有 β 小于 R , 则进行局部搜索。随着 R 逐渐变大,发生局部搜索的几率也将逐渐变大。当蝙蝠个体进行局部搜索,判断 $k=t/t_{\text{max}}$ 的数值大小,若其小于 0.4, 则蝙蝠个体采用下式进行位置更新:

$$x_i' = x_* + Ag\delta \quad (19)$$

否则采用下式:

$$x_i' = x_* + A0.1^g \delta \quad (20)$$

式中: A 为当前蝙蝠种群响度的平均值; δ 为在 $[-1, 1]$ 范围内的随机数。

为提高局部搜索的效率,引入 g 值,有 $g=10k+1$ 。

在算法前期, g 值较小, 搜索步长较大, 能够扩大蝙蝠飞行的空间区域; 在算法后期, g 值较大, 搜索步长较小, 能够提高局部搜索的精度。

为了进一步降低算法陷入局部最优解的几率, 本文引入了变异机制。在传统蝙蝠算法的末期, 响度降为零, 脉冲发射频率增至最大^[12], 因而不具备进行变异操作条件。为进行响度和脉冲发射频率的更新, 实现了对二者的限制, 分别采用下式:

$$A_i^{t+1} = f_1 / f_{\max} \quad (21)$$

$$R_i^{t+1} = f_2 / f_{\max} \quad (22)$$

式中: $f_{\max}$ 为脉冲频率的最大值。

本文采用结合响度的变异机制, 设置随机数 $\beta_1 \in [0, 1]$, 若有 $\beta_1 < A$ 且 $\beta > R$, 则随机设置 $\beta_2 \in [0, 1]$; 若有 $\beta_2 > \Psi$ (常数 $\Psi \in (0, 1)$, 本文取 0.5), 则重置该蝙蝠个体。

改进后的蝙蝠算法不仅能够有效降低算法过早陷入局部最优的几率, 还能够提高搜索精度。

3.3 改进蝙蝠算法测试及参数优化结果

为了验证改进的蝙蝠算法寻找最小值的实际效果, 本文从文献[13-15]中选取了 Schaffer 函数、Goldstein-Price 函数、多峰函数、Bohachevsky 函数以及 Six-Hump Camel-Back 函数进行仿真测试, 分别如下式:

$$f_1(x, y) = \frac{\sin^2(\sqrt{x^2 + y^2} - 0.5)}{[1 + 0.001(x^2 + y^2)]^2} - 0.5 \quad x, y \in [-4, 4] \quad (23)$$

$$f_2(x, y) = [1 + (x + y + 1)^2(19 - 14x + 3x^2 - 14y + 6xy + 3y^2)] \times [30 + (2x - 3y)^2(18 - 32x + 12x^2 + 48 - 36xy + 27y^2)] \quad |x| \leq 2, |y| \leq 2 \quad (24)$$

$$f_3(x) = [0.01 + \sum_{i=1}^5 \frac{1}{i + (x_i - 1)^2}]^{-1} \quad -10 \leq x_i \leq 10 \quad (25)$$

$$f_4(x) = 0.3 \cos(3\pi x_1) - 0.3 \cos(4\pi x_2) - x_1^2 - x_2^2 - 0.3 \quad x, y \in [-1, 1] \quad (26)$$

$$f_5(x) = 4x_1^2 - 2.1x_1^4 + \frac{x_1^6}{3} + x_1x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4 \quad (27)$$

Schaffer 函数经过 20 次迭代后, 在 $(1.429\ 8 \times 10^{-4}, -1.428\ 6 \times 10^{-4})$ 处取得最小值 -1, 而最优解的理论值 -1 在 $(0, 0)$ 处取得, 二者十分接近。其余 4 个函数的仿真测试结果如表 1 所示, 皆可得出相似结论。

表 1 测试函数仿真结果

函数	理论最优解	仿真最优解
Goldstein-Price 函数	3.00	3.000 9
多峰函数	0.436	0.436 1
Bohachevsky 函数	0.24	0.240 0
Six-Hump Camel-Back 函数	-1.03	-1.031 6

综上所述, 本文采用的改进的蝙蝠算法具有较好的寻找最优解的能力。利用改进的蝙蝠算法对复合控制器参数进行优化确定, 得到参数 $\zeta = 0.324$, $\omega_n = 16\ 964$ rad/s, 并取 $k = 4$ 。

4 仿真分析与结论

为了验证所设计的复合控制系统的有效性, 使用 Matlab/Simulink 对三电平三相三线制并联型 APF 进行仿真实验。采用基于瞬时无功功率的 i_p, i_q 的谐波检测方法作为谐波检测环节, 空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 作为二极管钳位式三电平逆变器的驱动环节。仿真实验参数为: 三相电源相电压 220 V、频率 50 Hz, 三相非线性负载为三相不可控整流桥和感性负载, 直流侧电压 750 V; 直流侧电容 4 000 μF ; 输出 LCL 型滤波 $L_1 = 0.3$ mH, $L_2 = 0.15$ mH, $C = 10$ μF , $R_d = 1.8$ Ω ; 开关频率 8 kHz; 采样频率 16 kHz。在相同条件下, 分别对本文所采用的复合控制方式和传统的 PI 控制方式进行仿真, 并分析其抑制谐波的性能。以 A 相为例, 非线性负载电流的波形及其频谱分析如图 4 所示, 负载电流的总的谐波畸变率 (THD) 为 28.05%。

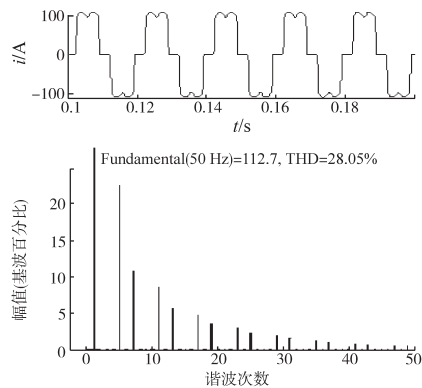


图 4 A 相负载电流波形及频谱

Fig.4 A phase load current waveform and spectrum

图 5、图 6 分别为经传统 PI 控制方式与基于蝙蝠算法的复合控制方式补偿后的 A 相网侧电流波形及频谱分析。基于蝙蝠算法的复合控制方式将总 THD 降低至 1.87%, 而传统 PI 控制方式的总 THD 为 5.87%, 两者都有抑制谐波的能力, 但前者的谐波抑制效果明显强于后者。优化后的

复合控制器不仅大幅降低了总谐波畸变率,还将各次谐波分量降低到0.35%以下,表现出较好稳态性能。

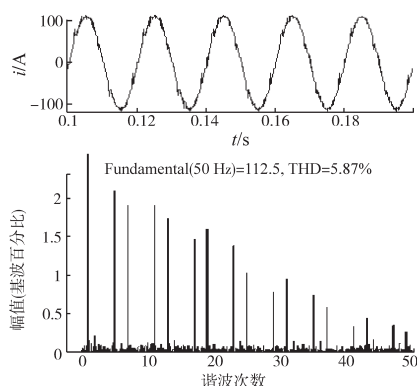


图5 传统PI控制方式A相网侧电流波形及其频谱图

Fig.5 Current waveform and its spectrum of A phase grid current with traditional PI controller

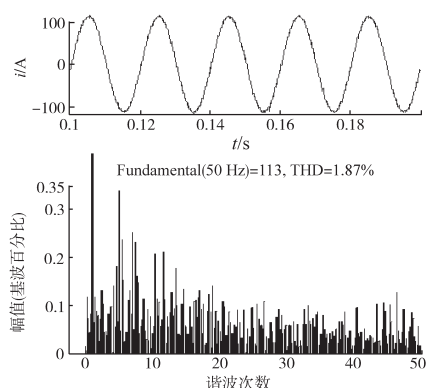


图6 复合控制方式网侧A相电流波形及其频谱图

Fig.6 Current waveform and its spectrum of A phase grid current with compound controller

为了验证复合控制器的动态性能,在仿真0.1 s时增大负载。如图7所示,复合控制器在负载切换时,能够在经过短暂的调节时间后达到新稳态,表现出较好的动态调节能力。

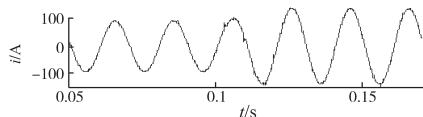


图7 存在负载切换的复合控制方式A相电流波形

Fig.7 A phase current waveform of compound controller with load switching

仿真实验结果表明,采用蝙蝠算法优化的复合控制器,三电平APF的谐波补偿性能得到了明显改善,取得了良好的谐波抑制效果,电流跟踪控制性能好。当系统处于稳态时,网侧电流十分接近标准正弦。

本文提出的基于蝙蝠算法的三电平有源电力滤波器复合控制方式,能够提高APF电流跟踪控制的性能以及系统的鲁棒性。采用改进后的蝙蝠算法对复合控制器参数进行优化,避免了传统试凑法设计效率低的不足,提高了控制器设计的效率。对传统PI控制器与优化后的复合控制器的仿真实验表明,设计的复合控制器能够更加有效地降低电网的谐波畸变率。

参考文献

- [1] 肖丽平,童朝南,高润泉.改进的有源电力滤波器滞环电流控制策略[J].电力系统自动化,2014,38(12):119-124,135.
- [2] 丁星星,马炜程,汪磊.有源电力滤波器的改进无差拍控制方法[J].电力电子技术,2017,51(2):39-42.
- [3] 綦慧,田正.跟踪微分器在APF中的应用[J].电力电子技术,2017,51(10):74-76.
- [4] 郑宏,张云,王哲禹,等.基于改进比例谐振控制的三相四桥臂有源电力滤波器研究[J].电子器件,2017,40(1):237-243.
- [5] 桂存兵.有源电力滤波器关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [6] 周虎,雷艾虎,李文龙,等.改进重复控制在并联型有源电力滤波器中的应用研究[J].工业仪表与自动化装置,2017,4(4):30-34.
- [7] 李连印.LCL型三电平有源电力滤波器的研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [8] Yang X S. A New Metaheuristic Bat-inspired Algorithm [C]// Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NIC-SO 2010). Berlin Heidelberg: Springer Publication, 2010: 65-74.
- [9] 张栋梁,谢业华,刘娟,等.基于遗传算法的有源电力滤波器滑模控制[J].电力系统保护与控制,2016,44(5):69-74.
- [10] 吕石磊,黄永霖,陈海强,等.基于自适应步长的改进蝙蝠算法[J].控制与决策,2018,33(3):557-564.
- [11] Fister I, Fister D, Zhang H Z. Convergence Analysis of Bat Algorithm[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 1(80): 1-7.
- [12] 李煜,马良.新型全局优化蝙蝠算法[J].计算机科学,2013,40(9):225-229.
- [13] Chattopadhyay R. A Study of Test Functions for Optimization Algorithms [J]. Journal of Optimization Theory & Applications, 1971, 8(3):231-236.
- [14] Schoen F. A Wide Class of Test Functions for Global Optimization [J]. Journal of Global Optimization, 1993, 3(2): 133-137.
- [15] Shang Y W, Qiu Y H. A Note on the Extended Rosenbrock Function [J]. Evolutionary Computation, 2006, 14(1): 119-126.

收稿日期:2018-07-22

修改稿日期:2018-10-26