DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314257

基于改进鲸鱼算法优化模糊控制的开关电源*

张家刘[1] 李正权[1,2]
(1.江南大学物联网工程学院 无锡 214122; 2.北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室 北京 100876)

摘 要: 针对反激式开关电源的控制策略问题,传统的模糊 PID 控制下的电源输出稳定性低,同时出现负载突变时的控制效果较差。利用鲸鱼优化算法对模糊 PID 控制系统进行优化,并且使用 Tent 映射对鲸鱼算法中初始种群进行混沌化,通过混沌鲸鱼优化算法对模糊 PID 控制系统中的论域进行优化,使得该控制系统下的反激式开关电源输出稳定度和抗干扰能力得到提升。基于 Matlab 软件完成反激式开关电源建模进行仿真研究。仿真结果表明,CWOA-FPID 下的反激式开关电源的稳定性优于鲸鱼算法和粒子群算法优化下的控制器,当负载从 10 Ω 变到 5 Ω 时,本文下的控制策略相比较其它两个算法在电压恢复时间和电压输出突变都有显著优势。验证了改进鲸鱼算法优化的模糊 PID 控制器能够更好的满足反激式开关电源的控制要求。

关键词: 鲸鱼算法;混沌;伸缩因子;模糊控制;反激式开关电源
中图分类号: TP273.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Optimization of fuzzy control for switching power supply based on improved whale algorithm

Zhang Jialiu[1] Li Zhengquan[1,2]
(1. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. State key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Aiming at the control strategy of flyback switching power supply, the traditional fuzzy PID control algorithm is difficult to achieve good control effect. The whale optimization algorithm is used to optimize the fuzzy PID control system, the initial population in the whale algorithm is chaotic by Tent mapping, and the discussion domain in the fuzzy PID control system is optimized by chaotic whale optimization algorithm. The output stability and anti-interference ability of flyback switching power supply under this control system are improved. Based on Matlab software, modeling of flyback switching power supply is completed for simulation research. The simulation results show that the stability of flyback switching power supply under CWOA-FPID is better than that under WOA and particle swarm optimization. When the load changes from 10 Ω to 5 Ω, the control strategy proposed in this paper has significant advantages in voltage recovery time and voltage output mutation compared with the other two algorithms. It is proved that the fuzzy PID controller optimized by the improved whale algorithm can better meet the control requirements of flyback switching power supply.

Keywords: whale optimization algorithm; chaotic; stretch factor; fuzzy control; flyback switching power supply

0 引 言

反激式开关电源在各种电子设备中都是不可或缺的组成部分,电源的性能可以直接关系到设备的技术指标和其可靠性优劣。反激式开关电源相比较 Buck 电路较为简单,同时输出与输入利用变压器隔离,在多路输出和宽范围升降压环境中有较多应用,因此在中小功率的场合得到广泛的应用。同时新的变换技术、新的电子器件和新的控制理论不断的出现,使得反激式开关电源具有频率高、效率高和可靠性高等特点[1]。

模糊 PID 控制器(fuzzy PID,FPID)目前已经变成工业控制系统中常见的存在。张淼等[2]成功利用模糊 PID 控制方法设计了针对 DCDC 的控制器,于玉军等[3]成功利用模糊 PID 的鲁棒性设计了针对 DCDC 的模糊 PID 控制器,并

收稿日期:2023-07-31
* 基金项目:网络与交换技术全国重点实验室(北京邮电大学)开放课题项目(SKLNST-2023-1-13)资助

减小了输出电压的超调量；在上述应对存在非线性、高阶数等特点的环境，普通的模糊 PID 控制器取得的参数就不会很理想。因此许多学者将智能算法应用到模糊 PID 控制上，优化模糊 PID 控制器的性能。赵继民等[4]将模糊 PID 与 BP 神经网络结合来应对传统模糊 PID 控制器参数不理想的缺点，并使用鲸鱼优化算法（whale optimization algorithm，WOA）对 BP 神经网络进行优化，仿真结果表明系统动态性能与稳态性能均能得到改善。彭健等[5]使用鸡群优化算法优化 PID 的参数，仿真结果表明，该算法可达到更高的控制精度同时更好的鲁棒性；上述几位学者没有考虑到普通鲸鱼算法和鸡群优化算法难以保证优化结果为全局最优的问题。Premkumar 等[6]根据普通 PID 和抗饱和 PID 控制器提出了模糊抗饱和与 PID 控制器结合来提升系统的动态和稳态性能，但是没有考虑到量化因子与比例因子的优化问题。同时目前对于开关电源控制器大都是 PID 控制或者模糊 PID 控制，关于智能优化算法与模糊 PID 结合控制开关电源的应用较少。

鲸鱼优化算法是一种新型的群智能优化算法，源于鲸鱼捕猎时的行为模型研究，具有参数容忍度强、鲁棒性好、收敛速度快等优点[7]。针对前述不足，本文将鲸鱼算法与混沌序列结合，对算法中出现的随机参数进行优化，使该算法有较强的全局搜索能力与精度。最后采用该算法对模糊 PID 控制参数进行优化，仿真结果表明，该算法能使模糊 PID 在反激式开关电源动态响应过程中取得良好的控制效果。

1　改进鲸鱼优化算法

1.1　基本鲸鱼算法原理

鲸鱼算法寻优过程中主要包括随机搜索猎物、螺旋气泡捕食和包围捕食 3 个行为[8]。鲸鱼先通过随机搜索猎物确定目标，然后再通过包围捕食和螺旋气泡捕食两种策略围捕猎物，捕食过程中包围捕食和螺旋气泡捕食是同时存在，对于这种行为，Mirjalili 等[9]设置两种行为概率相等，使用 0 到 1 的随机数来决定选择哪种方式。与其它算法相比具有参数设置少、操作简单、易于实现、寻优能力强等优势，而反激式开关电源控制系统的参数设置需要组合优化和自适应性强等要求，因此选用该算法作为本控制系统寻优算法。

1）包围猎物

在鲸鱼算法中不断迭代的过程中，鲸鱼朝着猎物位置移动采用包围捕食策略，适应度最高的最优个体或者最优候选解带领其余个体向猎物包围靠近，也就是其余个体会选择向着最优个体游动。用数学公式表示为：

$$X(t+1)=\boldsymbol{X}^{*}(t)-A\cdot D \tag{1}$$

$$D=\left|C\cdot\boldsymbol{X}^{*}(t)-\boldsymbol{X}(t)\right| \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{X}^{*}(t)$ 是已知最优个体，$\boldsymbol{X}(t)$ 是普通个体，$\boldsymbol{D}$ 是最优个体与普通个体之间的距离向量，t 是迭代次数，A 和 C 定义为下式：

$$A=2ar_1-a \tag{3}$$

$$C=2r_2 \tag{4}$$

式中：r_1 和 r_2 是服从[0,1]均匀分布的随机数，a 是线性递减的向量，最大为 2，最小为 0，定义为下式：

$$a=2-\frac{2t}{T_{\max}} \tag{5}$$

式中：$T_{\max}$ 为最大迭代次数。

2）螺旋气泡捕食

随着迭代次数的增加，a 从 2 递减到 0，这时鲸鱼会以螺旋上升的方式游动，并制造气泡对猎物形成包围。在模拟鲸鱼螺旋气泡捕猎的过程中，设定在包围捕食和螺旋气泡捕猎各自占有 0.5 的概率，在优化过程中采用如上方式改变鲸鱼位置可用数学模型如下：

$$X(t+1)=\begin{cases}\boldsymbol{X}^{*}(t)-A\cdot\boldsymbol{D}, & p<0.5\\ \boldsymbol{D}'\cdot e^{bl}\cdot\cos(2\pi l)+\boldsymbol{X}^{*}(t), & p\geqslant 0.5\end{cases} \tag{6}$$

式中：p 是[0,1]中的随机数。

3）随机搜索

在此阶段，为了使搜索猎物的范围更广，采取随机捕猎机制。即当 A 出现 $|A|\geqslant 1$ 时，鲸鱼个体会放弃先前移动方向并随机确定一个新的方向进行移动，可通过随机更新距离 $\boldsymbol{D}_{\text{rand}}$ 实现上述行为。式(1)、(2)位置更新如下：

$$\boldsymbol{D}_{\text{rand}}=\left|C\cdot\boldsymbol{X}_{\text{rand}}(t)-\boldsymbol{X}(t)\right| \tag{7}$$

$$X(t+1)=\boldsymbol{X}_{\text{rand}}(t)-A\cdot\left|C\cdot\boldsymbol{X}_{\text{rand}}(t)-\boldsymbol{X}(t)\right| \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{\text{rand}}(t)$ 是从当前种群中选择的随机位置向量（随机鲸鱼）$\boldsymbol{D}_{\text{rand}}$ 为当前鲸鱼与随机鲸鱼之间的距离。

1.2　改进的鲸鱼优化算法

传统鲸鱼优化算法虽然能够确定最优模糊规则参数，但是其寻优过程的起点具有较大随机性，同时搜索最优解过程容易陷入局部最优解无法跳出搜寻其它位置。鲸鱼优化算法中如式(3)、(4)中 r_1、r_2 和式(6)中概率 p，都是由(0,1)随机产生的随机数，这种随机数很大可能性使得算法收敛速度和目标解质量降低。为弥补鲸鱼优化算法初始化种群多样性不足的缺点，本研究引入混沌方法产生具有混沌初始种群的混沌鲸鱼优化算法（chaotic whale optimization algorithm，CWOA），能够实现鲸鱼优化算法在模糊规则寻优过程中的全局性和遍历性[9]。

生成初始化种群位置时可以使用的混沌映射有多种，而使用 Tent 映射所得到的最优解会比其他种类混沌映射要好，并且 Tent 映射更加适应鲸鱼优化算法[10]。如式(9)，使用 Tent 映射生成的混沌序列更为均匀，以此可增强算寻优能力[11]。混沌序列计算公式为：

$$x_{i+1}=\begin{cases}2x_i, & 0\leqslant x_i<0.5\\ 2(1-x_i), & 0.5\leqslant x_i\leqslant 1\end{cases} \tag{9}$$

式中：i 表示映射次数，x_i 表示第 i 次映射函数值。

2 基于改进鲸鱼算法优化控制器设计

2.1 改进鲸鱼算法优化论域范围

模糊 PID 控制器的初始论域是固定的,不会根据输入变量的变化而变化,而反激式开关电源的控制是一个多变量的非线性系统,虽然采用模糊 PID 控制对反激电源的模型中参数精度要求不高,但是模糊 PID 中输入变量误差和变化率初始论域的选择对电源控制的精度却有着紧密联系。即选择的论域过大,模糊控制器对反激电源的控制精度则会降低;反之选择的论域过小,电源的输出电压容易出现超调现象。对此,引入鲸鱼算法解决初始论域选择的问题,以此提高系统的控制效果[12]。

由此,在初始论域的选择中引入伸缩因子来使论域范围变得可控,如图 1 所示,[$-W$, W]为模糊控制的论域,α 为伸缩因子,可通过减小 α 使论域范围减小实现论域收缩过程。论域可变模糊 PID 控制就是在不改变模糊划分的同时通过伸缩因子使论域可变。在模糊规则的个数不变的情况下,伸缩论域达到提高控制精度的目的。

在变论域的基础上,使用改进的鲸鱼优化算法整定模糊控制的论域。根据输入变量的误差变化,调节输入和输出变量的伸缩因子,应用与反激式开关电源系统电压外环,提高系统的动态响应能力。具体表示为:设输入与输出之之间误差 e 和变化率 e_c 对应的初始论域为[$-W$, W]和[$-W_c$, W_c]。增加伸缩因子表述为:

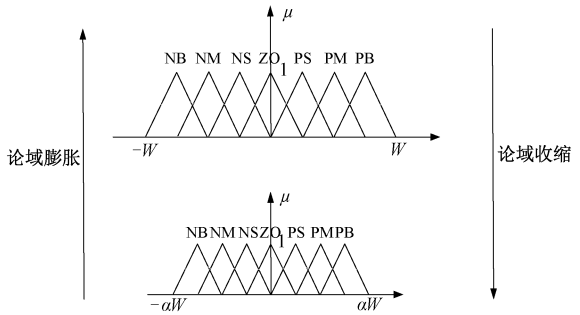

图 1 变论域原理

$$X(e)=[-\alpha(e)W,\alpha(e)W] \tag{10}$$

$$X(e_c)=[-\beta(e_c)W_c,\beta(e_c)W_c] \tag{11}$$

式中:$\alpha(e)$ 和 $\beta(e_c)$ 均为论域伸缩因子。

2.2 模糊推理及解模糊化

首先根据经验可将模糊 PID 控制器的模糊规则确定如表 1 所示。

表 1 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 的模糊规则表

$\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$	NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NB	PS/NS/NB	Z0/Z0/NM	Z0/Z0/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	Z0/Z0/NS	NS/Z0/Z0
NS	PM/NB/Z0	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	Z0/Z0/NS	NS/PS/NS	NS/PS/Z0
Z0	PM/NM/Z0	PM/NM/NS	PS/NS/NS	Z0/Z0/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/Z0
PS	PS/NM/Z0	PS/NS/Z0	Z0/Z0/Z0	NS/PS/Z0	NS/PS/Z0	NM//NM/Z0	NM/PB/Z0
PM	PS/Z0/PB	Z0/Z0/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	Z0/Z0/PB	Z0/Z0/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

其次进行模糊推理,模糊推理即将采集到的信息带入到所属的隶属度函数,这里选择三角形隶属函数。最后进行解模糊化,解模糊化是将模糊推理得到的模糊输出解成清晰值,这里采用的解模糊化方法为加权平均法[12]。

2.3 CWOA-FPID 控制器原理图

模糊 PID 控制是将模糊控制理论与 PID 控制相结合的方法,同时拥有这两种控制策略的优点[13-14]。针对 PID 控制参数无法实时调节且稳态性较差的缺陷[15],模糊 PID 控制器可以把反激式开关电源的输出期望值与实际值产生的偏差 $e(t)$ 和偏差变化率 $e_c(t)$ 设为输入变量,经过量化、模糊化、模糊决策推理、解模糊以及比例环节将 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 三个参数变量输出,从而实现 PID 控制参数的自适应调节[16],实现输出调节。

图 2 为基于 CWOA 的可变论域的模糊 PID 控制器。CWOA 通过误差 e 和变化率 e_c 得到论域伸缩因子 $\alpha(e)$ 和 $\beta(e_c)$,使论域可以膨胀或者收缩。得到的伸缩因子送到模糊控制器得到输出变量,最后利用式(12)得到 K_p、K_i、K_d,实现控制过程[17]。控制器参数调节公式为:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \tag{12}$$

式中:K_p、K_i、K_d 表示调节后的参数,K_{p0}、K_{i0}、K_{d0} 表示调节前的参数,ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d 表示经过模糊调节的参数变量。

适应度函数是 CWOA 算法当前寻优区域好坏的唯一评判标准,一般情况下,适应值越大,寻优区域越差,适应值越小,寻优区域越好[18]。CWOA 算法优化模糊 PID 时主要以系统性能为优化目标,本文选取下式作为算法目标函数,即:

$$J=\lambda\,|e(t)|+(1-\lambda)\,|e_c(t)| \tag{13}$$

式中:$\lambda\in(0,1)$,通过调节 λ 可改变误差与误差变化率在适应度函数中的占比。停止迭代的适应度条件 $J<0.1$,同

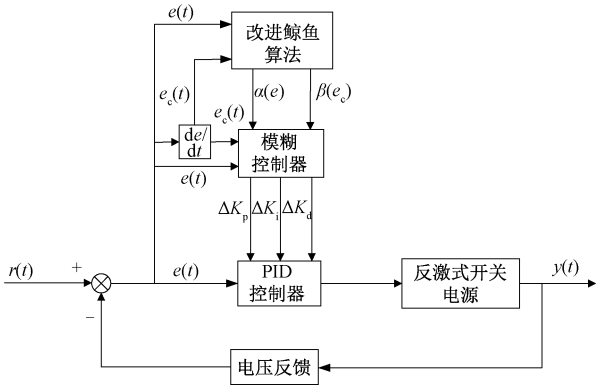

图 2　CWOA-FPID 控制器原理图

时前后两步适应度函数值变化不超过 0.000 1。该适应度函数可保证系统相对稳定性和响应快速性，不断调整模糊规则中的论域范围用以减少控制器系统误差，降低系统产生的剧烈波动，从而达到优化系统的目的[19]。

2.4　具体 CWOA-FPID 算法的实现步骤

采用 CWOA 算法优化模糊 PID 的具体步骤如下：

1)初始化种群位置。给定种群维数 N、规模一系列值，生成种群位置矩阵；

2)使用式(13)计算鲸鱼适应度值，同时记录最优值；

3)利用 Tent 即式(9)生成均匀分布的 r_1^{Tent}、r_2^{Tent} 和 p^{Tent}，同时更新 a、A、C、l 等；

4)比较 $|A|$ 的大小，Tent 生成的概率因子与 0.5 做比较，当 $p<0.5$ 且 $|A|<1$ 时进行包围收缩；当 $p<0.5$ 且 $|A|\geqslant 1$ 时进行随机搜索；当 $p\geqslant 0.5$ 且 $|A|\geqslant 1$ 时进行螺旋机制更新位置。

5)位置更新完后计算每条鲸鱼的适应度值，更新最优鲸鱼位置和全局最优适应度值；

6)判断迭代次数 t 是否大于最大迭代次数，是则退出循环，否则从步骤 3)继续执行。

7)迭代结束输出全局最优解。

3　仿真分析

本研究以 Simulink 为仿真环境，为验证 CWOA-FPID 的控制效果，在仿真中使用鲸鱼算法和粒子群算法(PSO)优化的模糊 PID 控制进行对比。同时设 WOA 与 CWOA 算法中参数设置种群规模为 12，最大迭代次数为 100，初始论域 W 与 W_c 均设为 15，则伸缩因子参数搜索范围为[1/3，19/15]；PSO 种群维度、规模和最大迭代次数与上述相同。

3.1　反激式开关电源模型建立

将设计完成的模糊 PID 控制器加入到反激式开关电源系统仿真模型的环路控制中，图 4 为所示模糊 PID 控制器的仿真模型，图 3 为基于模糊 PID 算法的系统仿真模型，给定仿真条件为 24 V 直流输入，目标输出电压为 12 V，频率为 65 kHz。

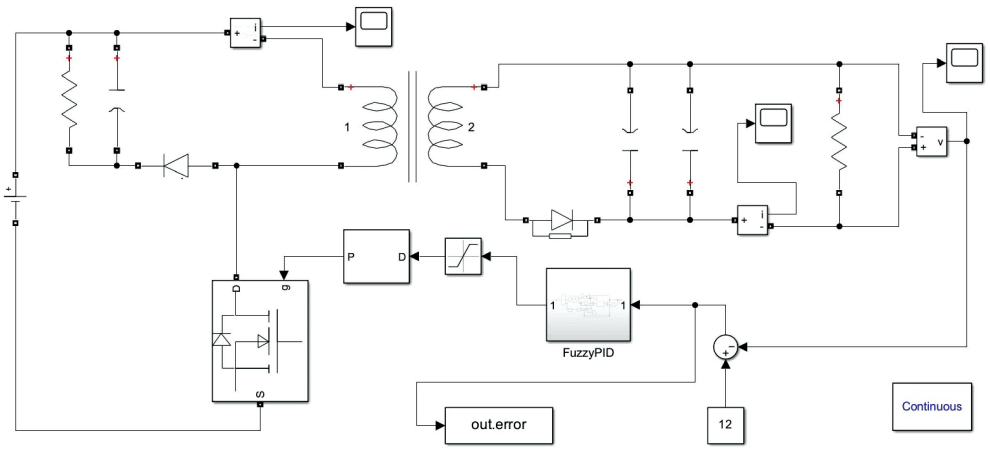

图 3　反激式开关电源仿真模型

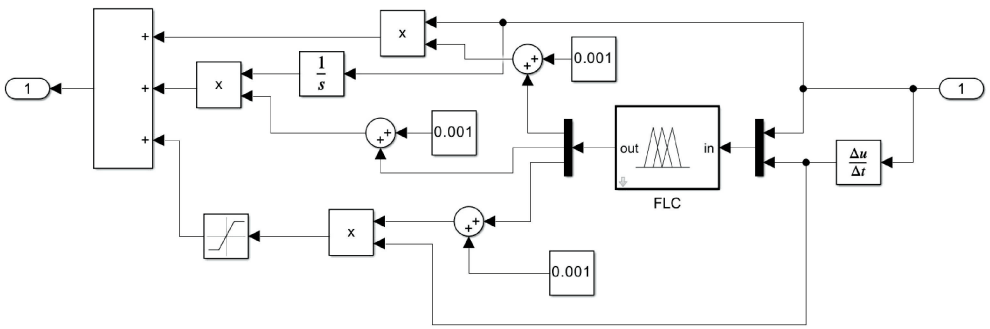

图 4　模糊 PID 控制器仿真模型

3.2　实验分析

在无负载状态下,对系统输入单位阶跃信号,设置仿真时间为0.05 s,仿真结果得出相应曲线如图5～7所示。可知,WOA和PSO优化模糊PID下的控制输出电压波形的波动较大,不够稳定;而CWOA优化模糊PID下的控制输出电压曲线更加贴近设定电压值,稳定后的波形波动较小。显然CWOA优化后的PID控制器相比较于普通WOA和PSO优化后的PID控制器,不仅保证反激电源快速无误差跟踪输出电压设定值,而且有效消除了稳态电压的波动。由此可见,改进鲸鱼算法优化的模糊PID控制具有更好的动态响应特性。

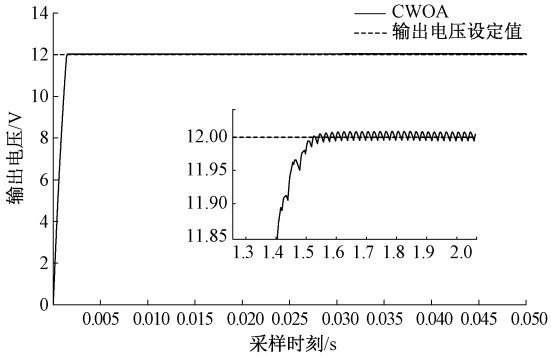

图5　CWOA优化下的阶跃响应

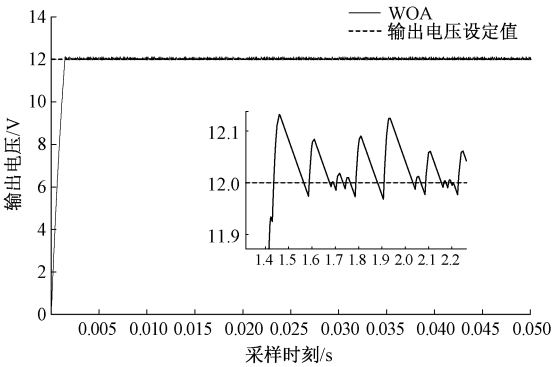

图6　WOA优化下的阶跃响应

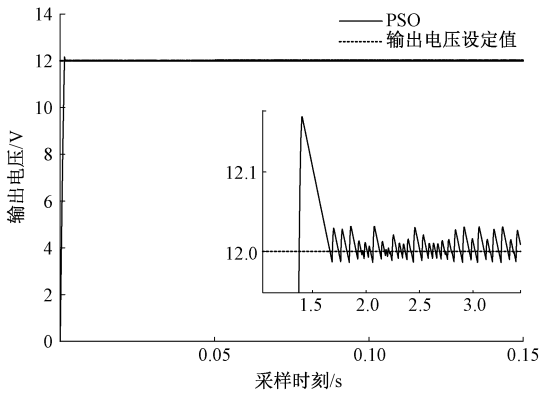

图7　PSO优化下的阶跃响应

图8～10为两个控制器再负载突变时的电压仿真波形。在0.05 s时设定负载从10 Ω变到5 Ω,WOA-FPID控制策略响应时间为0.04 s,输出过冲电压1.1 V;PSO-FPID控制策略响应时间为0.03 s,输出过冲电压0.8 V;CWOA-FPID控制响应时间为0.025 s,输出电压过冲0.3 V;可见改进鲸鱼优化算法优化的模糊PID策略更加优越,使得输出电压过冲更小,响应速度更快。

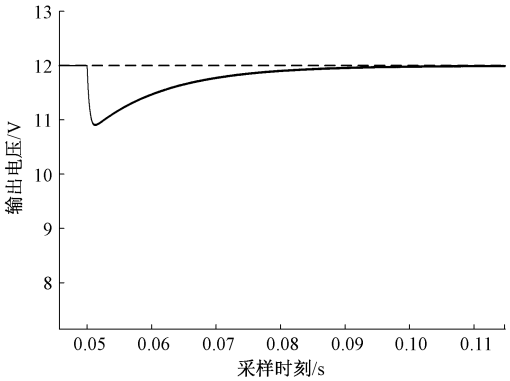

图8　WOA优化下的负载突降

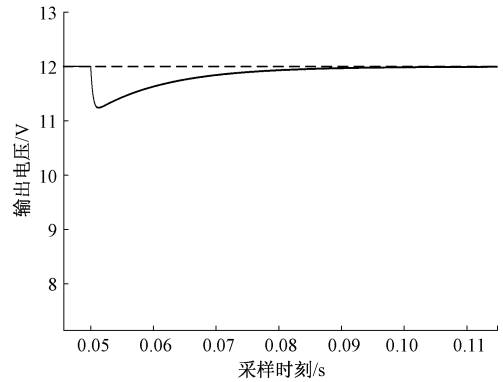

图9　PSO优化下的负载突降

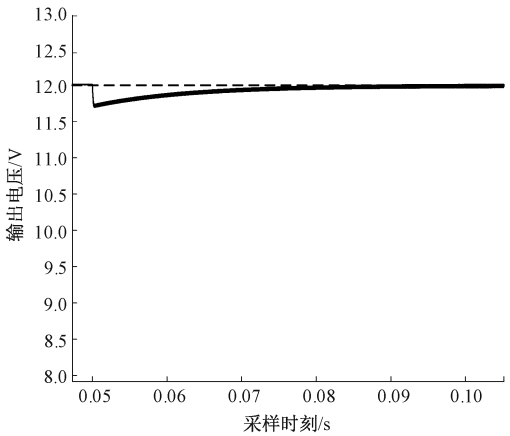

图10　CWOA优化下的负载突降

4 结　　论

针对反激式开关电源系统 FPID 控制器的论域优化问题，使用改进鲸鱼算法令该问题得到很好的解决，通过 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了反激式开关电源系统的模型，进行仿真实验，结果显示：CWOA-FPID 控制器控制下的输出电压相较 WOA-FPID 和 PSO-FPID 控制下的输出电压更稳定，同时系统响应速度更快，输出电压过冲更小，能够更好地满足反激式开关电源输出电压准确和抗扰动的控制要求，保证良好的控制。改进鲸鱼算法与模糊 PID 的融合提高了该算法的计算复杂度，并且反激式开关电源实际工作状况要复杂的多，而本文仅对算法与系统进行了仿真研究，不能说明在实际工作情况下的优势；所以之后的研究重点应该放在简化算法复杂度和进行足够试验来验证本文算法的优势所在。

参考文献

[1] 余明杨，蒋新华，王莉，等. 开关电源的建模与优化设计研究[J]. 中国电机工程学报，2006，26(2)：165-169.

[2] 张淼，陈颀，谢佳明. 基于模糊 PID 算法控制开关电源研究[J]. 数据通信，2021(5)：18-20.

[3] 于玉军，王亚君，陈垚. 小型高效数字式双向 DC/DC 变换器设计[J]. 电子器件，2020，43(5)：1029-1034.

[4] 赵继民，付珍珠. 基于鲸鱼优化算法的模糊神经 PID 参数自整定[J]. 天津科技大学学报，2020，35(6)：66-71.

[5] 彭健，曹中清. 基于鸡群优化算法的 PID 参数优化[J]. 计算机与数字工程，2020，48(5)：1082-1086.

[6] PREMKUMAR D K，THAMIZHSELVAN T，PRIYA M，et al. Fuzzy anti-windup PID controlled induction motor[J]. Journal of Engineering and Advanced Technology，2019，9(1)：184-189.

[7] MIRJALILI S，LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software，2016，95(5)：51-67.

[8] 李宏玉，毛泉，祁忠伟，等. 基于鲸鱼算法优化 PNN 的变压器故障诊断[J]. 电气自动化，2022，44(4)：102-104.

[9] 王坚浩，张亮，史超，等. 基于混沌搜索策略的鲸鱼优化算法[J]. 控制与决策，2019，34(9)：1893-1900.

[10] SAYED G I，DARWISH A，HASSANIEN A E，et al. A new chaotic whale optimization algorithm for features selection[J]. Journal of Classification，2018，35(2)：300-344.

[11] 林杰，何庆，王茜，等. 基于混沌的正余弦鲸鱼优化算法[J]. 智能计算机与应用，2020，10(9)：43-48，52.

[12] JHA A K，DASGUPTA S S. Fractional order PID based optimal control for fractionally damped nonlocal nanobeam via genetic algorithm[J]. Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems，2019，25(11)：4291-4302.

[13] 刘杰，刘明芹. 基于模糊 PID 控制的永磁同步电机矢量控制研究[J]. 工业控制计算机，2022，35(1)：152-154，157.

[14] 刘玉可. 超声波电机模糊自整定 PID 控制研究[D]. 洛阳：河南科技大学，2019.

[15] 顾祖成，耿小江，王永娟，等. 模糊自适应 PID 控制在无刷直流电机调速系统中的应用[J]. 机械设计与制造工程，2020，49(1)：39-41.

[16] 沈跃杰，行鸿彦，王水璋. 基于粒子群优化的串级模糊 PID 无人机飞行控制系统[J]. 电子测量技术，2022，45(1)：96-103.

[17] 霍建楠，王自强. 基于神经网络的摆动电机的模糊 PID 控制[J]. 电子设计工程，2018，26(12)：129-133，138.

[18] 金爱娟，郑天翔，纪晨烨，等. 基于模糊自适应 PID 控制的速度调节器设计与仿真[J]. 电子科技，2018，31(1)：29-33.

[19] 曹梦龙，马俊林. 改进蝗虫优化算法在模糊神经网络 PID 控制中的研究[J]. 电子测量技术，2022，45(20)：74-80.

作者简介

张家刘，硕士研究生，主要研究方向为小功率电源、智能优化算法。

E-mail：1047660898@qq.com

李正权(通信作者)，教授，主要研究方向为物联网智能监测系统研发，电力通信等。

E-mail：lzq722@jiangnan.edu.cn