DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.1 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

基于改进粒子群算法的 Boost 变换器分数阶 PID 控制设计

王仁明，杨 婕，刘闻仲，鲍 刚，张铭锐
(三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002)

摘要：研究 Boost 变换器分数阶 PID 控制设计问题，利用 Oustaloup 滤波器近似算法拟合系统的分数阶电感和电容模型。针对粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)算法整定分数阶 PID 控制器参数时学习能力不充分、迭代收敛乏力的问题，提出 1 种改进的粒子群优化算法，该算法引入了自适应惯性权重、自适应学习因子及加权变异 3 种策略用以提高粒子多样性，增强收敛速度与精度。将改进的粒子群算法应用于分数阶 Boost 变换器 PID 控制系统设计。仿真结果表明，经改进的粒子群算法设计的控制系统的输出电压和电感电流动态响应更快，在负载突变时输出电压的抗干扰能力更优，电感电流的跟踪调节能力更强。

关键词：Boost 变换器；分数阶 PID；粒子群优化

Design of Fractional-order PID Control of Boost Converter Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

WANG Renming, YANG Jie, LIU Wenzhong, BAO Gang, ZHANG Mingrui
(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The design of fractional-order PID control of a Boost converter is studied, and the fractional-order inductor and capacitor models of the system are fitted using the Oustaloup filter approximation algorithm. To solve the problems of insufficient learning capability and weak iterative convergence when a particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to adjust the parameters of the fractional-order PID controller, an improved PSO algorithm is proposed, which introduces three strategies of adaptive inertia weight, adaptive learning factor and weighted mutation to improve the diversity of particles and enhance the convergence speed and accuracy. The improved PSO algorithm is applied to the design of a PID control system for a fractional-order Boost converter. Simulation results show that the control system designed using the improved PSO algorithm has a faster dynamic response of output voltage and inductance current, a better anti-interference capability of output voltage and a better tracking and adjusting capability of inductance current when the load changes suddenly.

Keywords: Boost converter; fractional-order PID; particle swarm optimization (PSO)

近年来，对电感和电容的数学建模结果表明：电感和电容本质上都是分数阶元件，用分数阶微积分对电感和电容建模更能准确描述其物理特性[1-5]。因此，用分数阶微积分理论对 DC-DC 变换器进行建模和分析引起了众多学者的关注[6-9]。文献[6]以 Buck 变换器为例，对 DC-DC 变换器的分数阶 PI 控制和稳定性进行了研究；文献[7]建立了 Buck-Boost 分数阶系统模型，但仅考虑了电容是分数阶的；文献[8]基于 R-L 分数阶定义，对 PCCM Boost 变换器进行了建模与分析；文献[9]提出了 Boost 变换器全分数阶化系统。现有研究大多是针对分数阶 PID 控制器和分数阶 Boost 变换器模型进行的研究。

自 Podlubny 提出分数阶 PID 控制器设计方法

收稿日期：2022-08-07；**修回日期**：2022-09-05；**录用日期**：2022-09-16；**网络首发日期**：2022-12-01
基金项目：国家自然科学基金资助项目(61876097)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 61876097

以来[10]，分数阶 PID 控制器被广泛应用于不同领域的受控对象[11-12]，结果显示分数阶 PID 控制器比传统 PID 控制器具有更优越的性能。然而，由于增加了 2 个参数，使得分数阶 PID 的参数整定变得复杂。除了传统的参数整定方法，一些启发式随机算法，如粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)算法[13]、鲸鱼优化算法[14]、遗传算法[15-16]等在控制器参数整定中展现出显著优势。其中，粒子群优化算法简单易实现，可调参数少，已有不少学者将其广泛应用到分数阶 PID 参数整定上。文献[17]通过自适应惯性权值调整的方式对粒子群算法进行优化，并将其应用在控制系统参数优化上；文献[18]使用量子粒子群算法优化分数阶 PID 控制器的参数，使得算法具有更强的全局寻优能力；文献[19]采用改进粒子群优化 MPSO(modified PSO)算法对分数阶 PID 控制器进行参数寻优，使参数随外界环境的变化而自动调整。以上算法虽然多数都能完成对分数阶 PID 控制器参数的优化，但也存在各自的缺点和局限性。

为了克服粒子群算法整定控制器参数时收敛速度较慢、精度不高等缺点，本文设计了 1 种加权变异粒子群优化 WVPSO(weighted variation PSO)算法来整定分数阶 PID 控制器参数。利用非线性动态自适应惯性权重和自适应学习因子，以平衡全局搜索和局部搜索能力；同时使用算术交叉和自然选择策略，提高算法的收敛精度。最后将改进的粒子群算法应用于分数阶 Boost 变换器的分数阶 PID 控制系统的设计。

1 Boost 变换器及其控制系统模型

1.1 分数阶电感和电容的等效模型

文献[20]中建立了变换器的分数阶模型。分数阶电感电容的实现方法是利用拟合算法[21]在一定频带内拟合出具有分数阶特性的链式结构。本文对电感 $s^{0.8}$ 进行 5 阶拟合，得到 L=3 mH 的 0.8 阶电感等效模型如图 1(a)所示。同理对电容 $s^{-0.8}$ 进行 5 阶拟合，得到 C=100 μF 的 0.8 阶电容等效模型如图 1(b)所示。

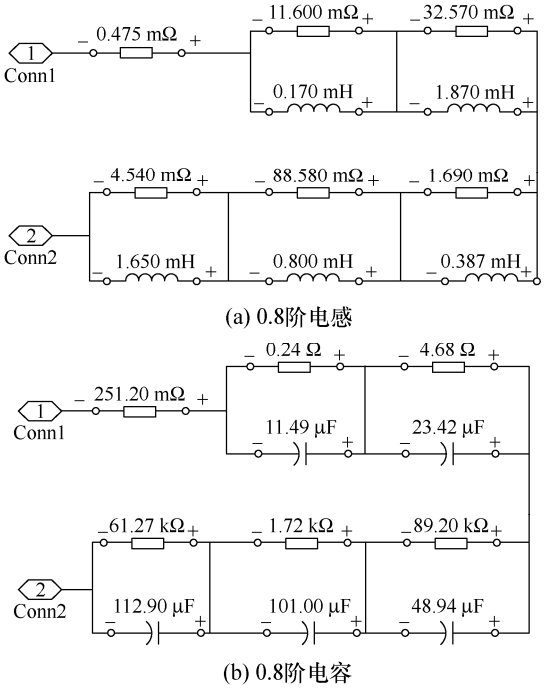


图 1 分数阶电感和电容的等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit models of fractional-order inductor and fractional-order capacitor

1.2 Boost 变换器双闭环控制系统的数学模型

分数阶 Boost 变换器双闭环控制系统原理如图 2 所示。图中：v_{in} 为输入电压；v_L 为电感电压；i_C 为电容电流；i_L 和 v_{o} 分别为电感电流和输出电压；i_L^*和v_{o}^* 分别为期望的电感电流和输出电压；L_α 和 C_β 分别为分数阶电感和分数阶电容，α、β 为分数阶导数的阶次，且满足 0<α<1，0<β<1；$e_i(t)$、$e_v(t)$分别为电流控制误差和电压控制误差，是电流环控制器和电压环控制器的输入信号，$e_i(t)=i_L^*-i_L$、$e_v(t)=v_{\text{o}}^*-v_{\text{o}}$；$u(t)$为控制器输出；$R$ 为负载电阻；S 为功率开关，d 为 S 的占空比。

Boost 变换器的分数阶数学模型为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}^\alpha i_L}{\mathrm{d}t^\alpha}=\dfrac{v_{\text{in}}}{L_\alpha}-\dfrac{v_{\text{o}}(1-d)}{L_\alpha}\\[2ex]\dfrac{\mathrm{d}^\beta v_{\text{o}}}{\mathrm{d}t^\beta}=\dfrac{i_L(1-d)}{C_\beta}-\dfrac{v_{\text{o}}}{C_\beta R}\end{cases}\tag{1}$$

设 i_L、v_{o}和 d 的直流分量分别为 I_L、V_{o}和 D。根据开关平均建模方法[22]可得，电感电流对占空比的传递函数 $G_{id}(s)$ 和输出电压对电感电流的传递

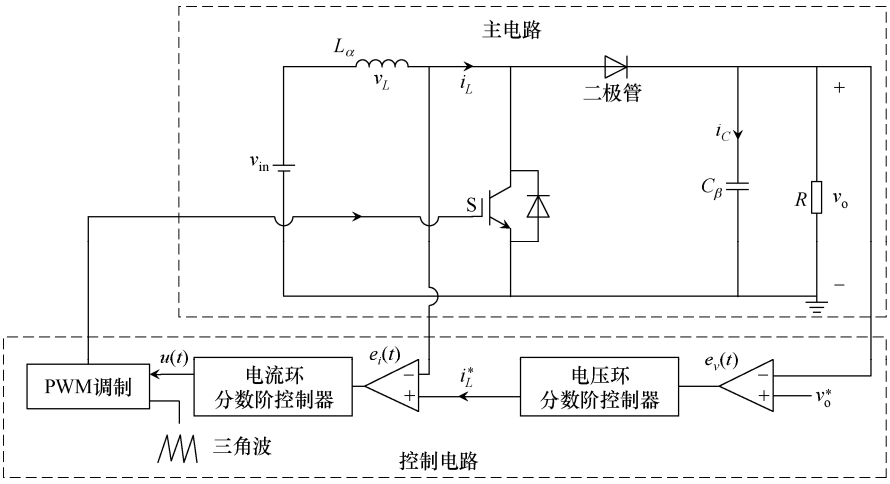


图 2　分数阶 Boost 变换器双闭环控制原理

Fig. 2 Schematic of fractional-order Boost converter under double closed-loop control

函数 $G_{vi}(s)$ 分别为

$$G_{id}(s)=\frac{V_{\mathrm{o}}C_\beta s^\beta+2V_{\mathrm{o}}/R}{L_\alpha C_\beta s^{\alpha+\beta}+L_\alpha s^\alpha/R+(1-D)^2} \tag{2}$$

$$G_{vi}(s)=\frac{(1-D)V_{\mathrm{o}}-L_\alpha I_L s^\alpha}{V_{\mathrm{o}}C_\beta s^\beta+2V_{\mathrm{o}}/R} \tag{3}$$

1.3 分数阶 PID 控制器

相比于整数阶 PID 控制器，分数阶 PID 控制器增加了 2 个参数：积分阶次 λ 和微分阶次 μ，λ、$\mu\in[0,1]$。分数阶 PID 控制器的传递函数为

$$G_c(s)=K_{\mathrm{p}}+K_{\mathrm{i}}s^{-\lambda}+K_{\mathrm{d}}s^\mu \quad 0\leqslant\lambda,\mu\leqslant1 \tag{4}$$

式中：K_{p} 为比例增益；K_{i} 为积分系数；K_{d} 为微分系数。

Boost 变换器双闭环控制系统框如图 3 所示。本文为降低分数阶 PID 控制器的设计复杂性，电流环和电压环均采用分数阶 PI 控制器。

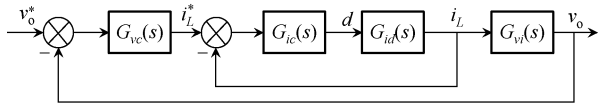


图 3　Boost 变换器双闭环控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of Boost converter under double closed-loop control system

$G_{vc}(s)$ 为电压环控制器，其传递函数为

$$G_{vc}(s)=K_{v\mathrm{p}}+K_{vi}s^{-\lambda} \tag{5}$$

式中：$K_{v\mathrm{p}}$ 为电压环控制器比例增益；K_{vi} 为电压环控制器积分系数。

$G_{ic}(s)$ 为电流环控制器，其传递函数为

$$G_{ic}(s)=K_{i\mathrm{p}}+K_{i\mathrm{i}}s^{-\lambda} \tag{6}$$

式中：$K_{i\mathrm{p}}$ 为电流环控制器比例增益；$K_{i\mathrm{i}}$ 为电流环控制器积分系数。

2　改进粒子群优化方法

2.1 标准粒子群优化算法

PSO 算法[23]是模拟自然界鸟群的觅食行为演变而来的 1 种基于群体协作、信息共享的随机优化搜索方法。假设在 N 维空间内，粒子群由 m 个粒子构成，第 t 次迭代时粒子 i 的位置可表示为

$$x_i^t=\{x_{i1}^t,x_{i2}^t,\cdots,x_{iN}^t\} \tag{7}$$

式中，i=1, 2,⋯, m。第 t 次迭代时粒子 i 的速度为

$$v_i^t=\{v_{i1}^t,v_{i2}^t,\cdots,v_{iN}^t\} \tag{8}$$

在迭代过程中，粒子群会产生 2 个最优位置：每个粒子移动过程中距离最优解最近的位置称为个体最优位置，可表示为

$$p_{\mathrm{best}}^t=\{p_{i1}^t,p_{i2}^t,\cdots,p_{iN}^t\} \tag{9}$$

整个种群当前寻找到的最优解称为全局最优位置，可表示为

$$g_{\mathrm{best}}^t=\{p_{g1}^t,p_{g2}^t,\cdots,p_{gN}^t\} \tag{10}$$

标准 PSO 算法迭代过程的更新公式为

$$v_{iN}^{t+1}=wv_{iN}^t+c_1r_1(p_{iN}^t-x_{iN}^t)+c_2r_2(p_{gN}^t-x_{iN}^t) \tag{11}$$

$$x_{iN}^{t+1}=x_{iN}^{t}+v_{iN}^{t+1} \tag{12}$$

式中：ω为粒子运动的惯性权重系数；c_1和c_2为粒子的学习因子；r_1和r_2是在(0, 1)内取值的随机数。

2.2 加权变异粒子群算法

传统的 PSO 算法存在易于陷入早熟、收敛速度较慢及收敛精度不高等缺陷。本文将对上述算法进行改进，提出 WVPSO 算法，改进之处包括以下 3 点。

(1)结合进化离散度$k(t)$和 Sigmoid 函数(在线性与非线性之间具有较好的平衡性能)，设计出 1 种非线性动态自适应惯性权重计算公式[24]。为描述种群进化整体适应度值的变化，将第t代种群与第$t-1$代种群的适应度值标准差的比值定义为进化离散度$k(t)$，即

$$\begin{cases}k(t)=1 & t=1\\ k(t)=\dfrac{StdFit(t)}{StdFit(t-1)} & t>1\end{cases} \tag{13}$$

式中，$StdFit(t)$为适应度值标准差函数。

基于进化离散度，给出权重更新计算公式为

$$\omega(t)=\omega_{\max}+(\omega_{\min}-\omega_{\max})\Big/\left\{1+\exp\left[-10b\left(\frac{2t}{k(t)\cdot T}-1\right)\right]\right\} \tag{14}$$

式中：$\omega_{\max}$、$\omega_{\min}$分别为最大、最小惯性因子；b为阻尼因子；T为最大进化次数。

(2)粒子群经历的个体位置信息和群体位置信息影响粒子飞行轨迹的程度取决于学习因子c_1和c_2的值。随着迭代次数的增加，要求c_1按照一定规律减小，c_2则增大。为此，本文设计了自适应学习因子[25]，计算公式为

$$c_1=c_{1\mathrm{up}}-r\left[1-\exp\left(\frac{-T}{T-t}\right)\right](c_{1\mathrm{up}}-c_{1\mathrm{low}}) \tag{15}$$

$$c_2=c_{2\mathrm{low}}+r\left[1-\exp\left(\frac{-T}{T-t}\right)\right](c_{2\mathrm{up}}-c_{2\mathrm{low}}) \tag{16}$$

式中：$c_{1\mathrm{up}}$、$c_{1\mathrm{low}}$分别为学习因子c_1的上、下界，$c_{2\mathrm{up}}$、$c_{2\mathrm{low}}$分别为学习因子c_2的上、下界；r为 0~1 之间的随机数。

(3)对粒子进行加权变异[25]，即引入算术交叉和自然选择策略来提高粒子多样性、增强收敛速度与精度。算法存在随机性，因此将全部粒子适应度值的绝对值从小到大依此分为好(ξ_1、ξ_2)与差(ξ_3、ξ_4)2 个群体(4 个部分)。其中ξ_1、ξ_4各占总体的 20%，ξ_2、ξ_3各占 30%。

$$\underbrace{[|p_1|,\cdots,|p_{\frac{m}{5}}|}_{\xi_1},\underbrace{|p_{\frac{m}{5}+1}|,\cdots,|p_{\frac{m}{2}}|}_{\xi_2},\underbrace{|p_{\frac{m}{2}+1}|,\cdots,|p_{\frac{4m}{5}}|}_{\xi_3},\underbrace{|p_{\frac{4m}{5}+1}|,\cdots,|p_m|]}_{\xi_4} \tag{17}$$

式中，P_m为第m个粒子的适应度值。

使用算术交叉作用于ξ_2、ξ_3，融合好粒子和差粒子，产生多样性的后代，公式为

$$x_{\xi_3}=rx_{\xi_2}+(1-r)x_{\xi_3} \tag{18}$$

$$v_{\xi_3}=rv_{\xi_2}+(1-r)v_{\xi_3} \tag{19}$$

式中：x_{ξ_2}、x_{ξ_3}分别为ξ_2、ξ_3的粒子位置；v_{ξ_2}、v_{ξ_3}分别为ξ_2、ξ_3的粒子速度。

将自然选择策略作用于ξ_1、ξ_4，将差粒子的速度与位置直接替换为好粒子的速度与位置，相当于将整个种群缩小 20%，这样将加快粒子的收敛速度，即

$$\begin{cases}x_{\xi_4}=x_{\xi_1}\\ v_{\xi_4}=v_{\xi_1}\end{cases} \tag{20}$$

2.3 算法性能测试

为了验证加权变异粒子群算法的寻优能力，本文选取 Sphere 单峰函数$f_1(x)=\sum_{i=1}^{N}x_i^2$和 Rastrigin 多峰函数$f_2(x)=\sum_{i=1}^{N}[x_i^2-10\cos(2\pi x_i)+10]$进行测试分析。选取$c_1$=2.0、$c_2$=2.0、$c_{1\mathrm{up}}$=2.5、$c_{1\mathrm{low}}$=0.5、$c_{2\mathrm{up}}$=3.5、$c_{2\mathrm{low}}$=0.8，惯性权重系数$\omega_{\min}$=0.4、$\omega_{\max}$=0.9，阻尼因子$b$=0.5。种群大小设置为 50，最大迭代次数设置为 2 000。在相同条件下，分别对标准 PSO、MPSO[19]、IPSO(improved PSO)[24]、WVPSO 进行性能测试对比。选择 2 种函数的平均值、标准差、最优值、最差值作为评价算法性能的指标，重复运行 20 次，结果见表 1 和表 2，可以

看出，函数 f_1、f_2 基于 WVPSO 算法的各种指标值均优于其他算法的相应指标值，且随着优化的进行，WVPSO 算法搜索到的平均值均小于其他算法，说明 WVPSO 算法具有较高的收敛精度。图 4 和图 5 分别为函数 f_1、f_2 在 4 种不同算法下的寻优过程，可以看出，函数 f_1、f_2 基于 WVPSO 算法的寻优过程比其他算法寻优过程的收敛速度更快。

表 1　Sphere 函数实验结果

Tab. 1 Experimental results for Sphere function

算法	平均值	标准差	最优值	最差值
PSO	0.943 9	0.592 3	0.129 8	2.273 2
MPSO	0.910 7	0.545 0	0.258 1	2.377 8
IPSO	4.983 1	5.776 3	0.034 2	20.596 0
WVPSO	0.002 3	0.002 5	0.000 2	0.009 2

表 2　Rastrigin 函数实验结果

Tab. 2 Experimental results for Rastrigin function

算法	平均值	标准差	最优值	最差值
PSO	106.192 7	33.423 0	22.280 7	143.817 0
MPSO	66.691 3	26.304 6	28.326 5	118.901 1
IPSO	48.849 3	16.753 1	18.514 4	41.811 0
WVPSO	36.307 5	15.057 1	6.247 4	35.499 1

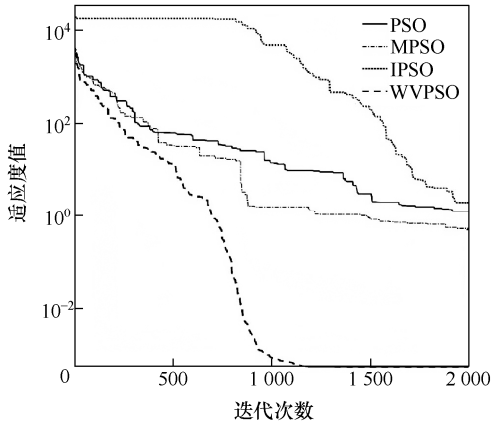


图 4　Sphere 函数的优化过程

Fig. 4 Optimization process of Sphere function

2.4　WVPSO 算法整定分数阶 PID 参数的步骤

分数阶 PID 控制器待优化的参数为比例系数 K_p、积分系数 K_i、微分系数 K_d、积分阶次 λ 及微分阶次 μ。将 K_p、K_i、K_d、λ、μ 作为算法的输入，即粒子参数空间的维度为 5。

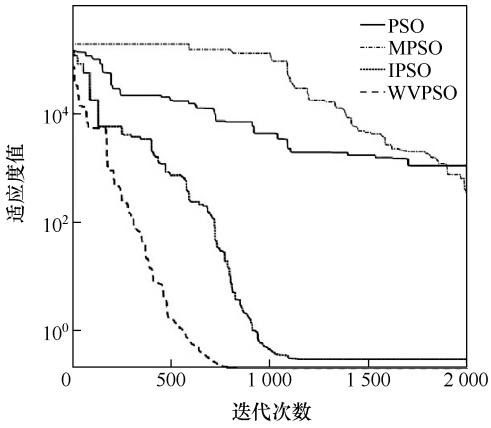


图 5　Rastrigin 函数的优化过程

Fig. 5 Optimization process of Rastrigin function

为了使系统响应具有较短的调节时间和较小的振荡性，本文选取最常用的 ITAE 优化准则作为适应度函数，表达式为

$$J_{\mathrm{ITAE}} = \int_0^{T_f} t\left|e(t)\right|\mathrm{d}t \tag{21}$$

式中：T_f 为仿真时间；$e(t)$ 为控制器 t 时刻的误差。

使用本文提出的 WVPSO 算法设计分数阶 PID 控制器步骤如下。

步骤 1　初始化粒子群参数。包括最大迭代次数、学习因子 c_1 和 c_2、惯性权重系数、阻尼因子、种群规模、粒子群初始速度和初始位置、适应度函数。

步骤 2　根据当前位置评价粒子的适应度值，并确定个体最优位置和全局最优位置。

步骤 3　根据式(14)计算惯性权重 ω；根据式(15)~式(16)计算学习因子 c_1、c_2。

步骤 4　根据式(18)~式(20)对粒子进行加权变异。

步骤 5　根据式(11)~式(12)更新粒子速度与位置，并对越界的速度与位置进行约束。

步骤 6　重新评价粒子的适应度函数值，通过比较适应度函数值取小者为佳，确定新的个体最优位置 p_{best} 和全局最优位置 g_{best}。

步骤 7　迭代是否结束：如果到达最大迭代次数 T，则结束；否则，返回步骤 2 继续迭代。

3 基于 WVPSO 算法的 Boost 分数阶 PID 控制器设计

将 WVPSO 算法应用于分数阶 Boost 变换器控制系统的设计，并对控制效果进行分析。根据式(2)、式(3)及电路参数，得到 Boost 变换器双闭环传递函数分别为

$$G_{id}(s)=\frac{5\times10^{-1}s^{0.8}+2\times10^{2}}{8+1.5\times10^{-5}s^{1.6}+3\times10^{-3}s} \tag{22}$$

$$G_{vi}(s)=\frac{8-3\times10^{-3}s^{0.8}}{2\times10^{-3}s^{0.8}+8\times10^{-1}} \tag{23}$$

设置相应的参数：粒子群规模 N_{um}=60，惯性权重系数 $\omega_{\min}$=0.1、$\omega_{\max}$=0.5，学习因子 c_1=2.0、c_2=2.0、$c_{1\mathrm{up}}$=2.5、$c_{1\mathrm{low}}$=0.5、$c_{2\mathrm{up}}$=2.5、$c_{2\mathrm{low}}$=0.5，阻尼因子 b=0.5，最大迭代次数 T=100。本文将设计的是分数阶 PI 控制器，粒子维数是 3。

基于式(22)和式(23)，利用 WVPSO 算法，以适应度函数、迭代次数为评价标准，对参数 K_{p}、K_{i} 及 λ 寻优。在相同条件下运行 5 次，得参数最优值见表 3。

表 3 基于 WVPSO 算法的参数最优值

Tab. 3 Optimal values of parameters based on WVPSO algorithm

传递函数	K_{p}	K_{i}	λ	适应度函数	迭代次数
G_{vi}	0.045 6	35.109 4	0.820 0	9.58×10^{-3}	31
	0.155 0	21.504 4	0.861 3	0.0162 3	63
	0.070 5	14.720 5	0.734 8	0.0117 6	47
	0.128 9	59.015 5	0.814 7	0.0194 9	46
	0.115 1	36.474 3	0.847 1	7.31×10^{-3}	34
G_{id}	3.522 3	56.946 6	0.658 9	0.0121 6	41
	0.759 3	48.537 8	0.873 7	8.23×10^{-3}	56
	0.154 6	15.897 1	0.781 4	6.73×10^{-3}	37
	1.546 0	27.521 7	0.759 5	0.0154 2	30
	5.810 9	28.948 5	0.861 1	5.61×10^{-3}	29

取第 5 次的运行结果，WVPSO-FOPID(weighted variation PSO-Fractional order PID)控制器为

$$G_{vc}=0.1151+\frac{36.474\,3}{s^{0.847\,1}} \tag{24}$$

$$G_{ic}=5.810\,9+\frac{28.948\,5}{s^{0.8611}} \tag{25}$$

文献[9]整定的 FOPID(Fractional order PID)控制器为

$$G_{vc1}=0.04+\frac{31.33}{s^{0.8}} \tag{26}$$

$$G_{ic1}=0.02+\frac{6.58}{s^{0.8}} \tag{27}$$

本文同时将标准 PSO 算法应用于分数阶控制器的设计，整定得到的 PSO-FOPID(PSO-Fractional order PID)控制器为

$$G_{vc2}=0.055\,03+\frac{17.504\,4}{s^{0.893\,4}} \tag{28}$$

$$G_{ic2}=0.470\,3+\frac{49.841\,8}{s^{0.712\,2}} \tag{29}$$

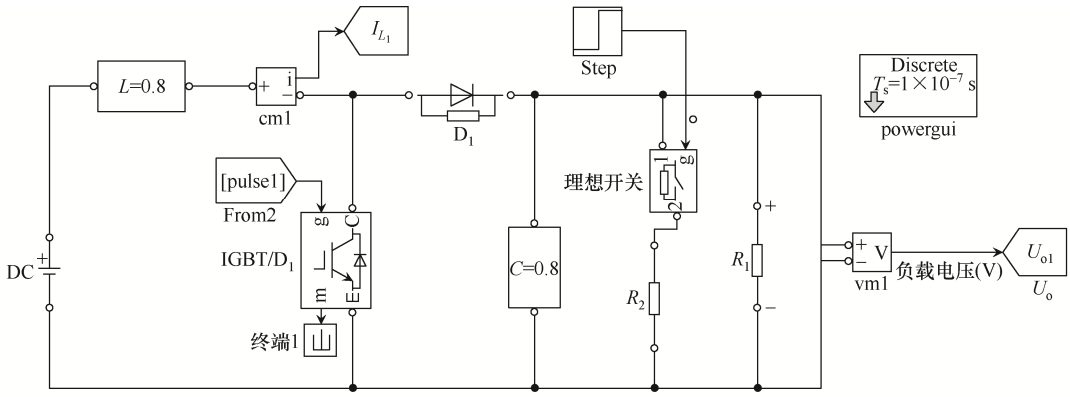
4 仿真分析

对在不同算法下设计的分数阶 Boost 变换器控制系统进行仿真分析。根据图 1 所示的分数阶电感电容等效模型，在 MATLAB/Simulink 环境下，搭建了分数阶 Boost 变换器控制系统电路仿真模型，如图 6 所示。参数设置：v_{in}=40 V，R=50 Ω，d=0.6，$L_{0.8}$=0.3 mH，$C_{0.8}$=100 μF，f=10 kHz。

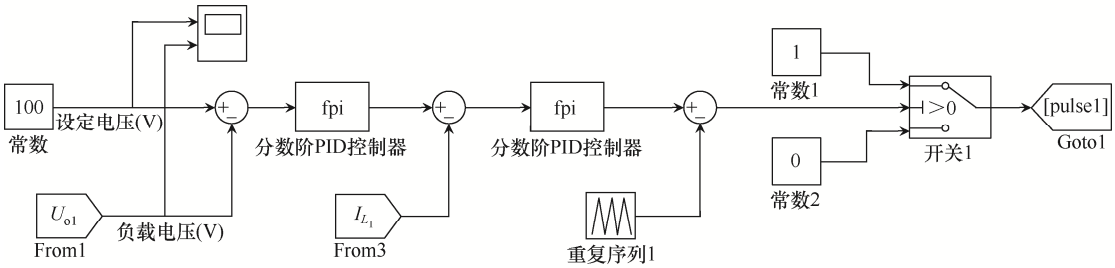
在 0.1 s 时给系统突加负载，系统的输出电压和电感电流响应曲线分别如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可见，基于 WVPSO 算法设计的 Boost 变换器控制系统的输出电压能更快地跟踪给定参考电压(100 V)，且在 0.1 s 负载突变时产生的波动较小。由图 8 可见，基于 WVPSO 算法设计的 Boost 变换器控制系统使电感电流响应速度更快，负载突变时调节时间更短。综上，基于 WVPSO 算法设计的分数阶 PID 控制系统的性能指标优于其他算法设计的控制系统的性能指标。

基于 WVPSO 算法、标准 PSO 算法及文献[9]算法设计的分数阶 PID 控制器的性能指标见表 4。从表 4 可以看出，基于 WVPSO 算法设计的控制系统，其超调量为 1.325%，调节时间为 0.017 s，稳



(a) 分数阶Boost变换器



(b) 分数阶Boost变换器双闭环控制系统

图 6　分数阶 Boost 变换器电路仿真模型

Fig. 6 Simulation model of circuit of fractional-order Boost converter

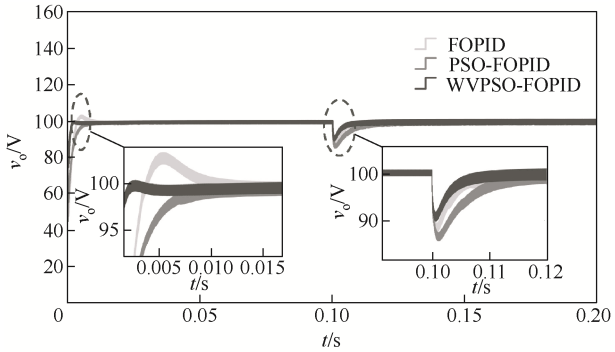


图 7　不同算法下的输出电压

Fig. 7 Output voltage under different algorithms

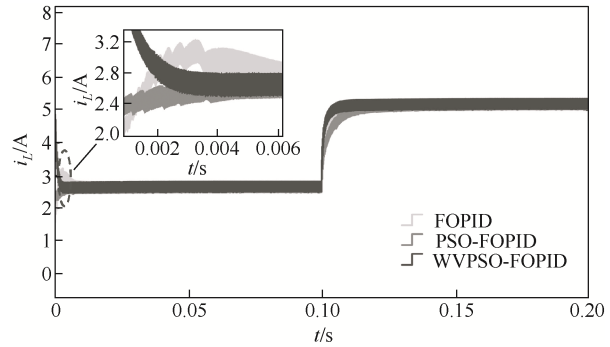


图 8　不同算法下的电感电流

Fig. 8 Inductance current under different algorithms

表 4　3 种控制器的性能指标

Tab. 4 Performance indicators for three types of controllers

算法	上升时间 T_r / s	调节时间 T_s / s	超调量 M_p / %	稳态误差 E_{ss} / %
FOPID	0.003 65	0.082	6.143	0.004 2
PSO-FOPID	0.008 61	0.063	0.585	0.003 0
WVPSO-FOPID	0.002 05	0.017	1.325	0.002 1

态误差为 0.002 1%。标准 PSO 算法设计的控制系统响应较慢，但超调量比 WVPSO 算法设计的控制系统要小。综合比较，基于 WVPSO 算法优化分数阶 PID 控制系统时相比于其他 2 种算法具有上升速度快、调节时间短和稳态误差小的优点。

5　结语

本文基于分数阶微积分理论，建立了 Boost 变换器的分数阶电路模型。同时，提出了整定分数阶 PID 控制器参数的改进的粒子群算法 WVPSO，与传统的 PSO 算法相比，进行了 3 处改进：设计了

自适应惯性权重和自适应学习因子用以提高 PSO 算法的全局搜索能力，避免早熟收敛；对 PSO 算法粒子位置和速度进行加权变异用以增加粒子多样性，加快算法收敛速度，提高收敛精度；将改进的粒子群算法应用于分数阶 Boost 变换器 PID 控制系统设计，并与基于标准 PSO 算法设计的 Boost 变换器 PID 控制系统进行了比较分析。结果显示，经改进的粒子群算法设计的控制系统的输出电压和电感电流动态响应更快，在负载突变时输出电压的波动更小、调节速度更快，电感电流的跟踪调节能力更强。

参考文献：

[1] John D A, Banerjee S, Bohannan G W, et al. Solid-state fractional capacitor using MWCNT-epoxy nanocomposite [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(16): 163504.

[2] Wei Zhihao, Zhang Bo, Jiang Yanwei. Analysis and modeling of fractional-order Buck converter based on Riemann-liouville derivative [J]. IEEE Access, 2019, 7: 162768-162777.

[3] Stefański T P, Trofimowicz D, Gulgowski J. Simulation of signal propagation along fractional-order transmission lines [C]// 2020 27th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and System (MIXDES). Lodz, Poland, 2020: 164-167.

[4] Li Zhitao, Gao Lixin, Chen Wenhai, et al. Distributed adaptive cooperative tracking of uncertain nonlinear fractional-order multi-agent systems [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(1): 292-300.

[5] 谢玲玲, 杨雨晴, 姚浚义, 等. 基于预估-校正算法的分数阶Boost变换器倍周期分岔研究[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 10-18.
Xie Lingling, Yang Yuqing, Yao Junyi, et al. Period doubling bifurcation of fractional-order Boost converter based on predictor-corrector algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 10-18. (in Chinese)

[6] 张晓超, 李虹, 苏文哲, 等. DC-DC 变换器分数阶 PI^{λ} 控制与稳定性分析研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(5): 21-31.
Zhang Xiaochao, Li Hong, Su Wenzhe, et al. Study on fractional-order PI^{λ} control and stability analysis of DC-DC converter [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(5): 21-31. (in Chinese)

[7] 胡旭旭, 范秋华. Buck-Boost 变换器断续模式下的分数阶建模与分析[J]. 现代电子技术, 2020, 43(24): 126-130, 134.
Hu Xuxu, Fan Qiuhua. Fractional-order modeling and analysis of Buck-Boost converter in discontinuous conduction mode [J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(24): 126-130, 134. (in Chinese)

[8] 王仁明, 李啸, 张赟宁. 基于 *R-L* 分数阶定义的 PCCM Boost 变换器建模与分析[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 19-26.
Wang Renming, Li Xiao, Zhang Yunning. Modeling and analysis of PCCM Boost converter based on definition of *R-L* fractional-order [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 19-26. (in Chinese)

[9] 柴秀慧, 曹晗, 张波, 等. Boost 变换器全分数阶化系统分析与控制性能研究[J]. 电源学报, 2019, 17(6): 27-33.
Chai Xiuhui, Cao Han, Zhang Bo, et al. Research on analysis and control performance of full fractional-order Boost converter system [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(6): 27-33. (in Chinese)

[10] Podlubny I. Fractional-order systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$-controllers [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(1): 208-214.

[11] Mughees A, Ali Mohsin S. Design and control of magnetic levitation system by optimizing fractional order PID controller using ant colony optimization algorithm [J]. IEEE Access, 2020, 8: 116704-116723.

[12] Asgharnia A, Jamali A, Shahnazi R, et al. Load mitigation of a class of 5-MW wind turbine with RBF neural network based fractional-order PID controller [J]. ISA Transactions, 2020, 96: 272-286.

[13] 郭根旺, 刘福才, 龚正阳. 气动变载荷加载系统的分数阶 PID 控制[J]. 高技术通讯, 2020, 30(11): 1161-1168.
Guo Genwang, Liu Fucai, Gong Zhengyang. Fractional order PID control of pneumatic variable load loading system [J]. Chinese High Technology Letters, 2020, 30 (11): 1161-1168. (in Chinese)

[14] 刘刚, 高成龙, 胡万君, 等. 基于鲸鱼优化算法超参数优化的径向基函数响应面模型的油浸式变压器绕组挡板结构优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5331-5343.

Liu Gang, Gao Chenglong, Hu Wanjun, et al. Optimization of winding block washer structure for oil immersed transformers based on radial basis function response surface model with whale optimization algorithm hyperparameters optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5331-5343. (in Chinese)

[15] 程翔鹏, 刘进军, 邵钰, 等. 峰值电流控制 Buck 变换器高频建模及结合遗传算法的控制器优化设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 217-232.
Cheng Xiangpeng, Liu Jinjun, Shao Yu, et al. High-frequency modeling for peak current-model Buck converters and optimal controller design by combining genetic algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 217-232. (in Chinese)

[16] Kumar A, Kumar V. Hybridized ABC-GA optimized fractional order fuzzy pre-compensated FOPID control design for 2-DOF robot manipulator [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2017, 79: 219-233.

[17] Zhang Shansi, Ma Shuyuan, Song Ningran, et al. Fuzzy sliding mode control based on PSO for magnetic levitation positioning stage [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(10): 1492-1500.

[18] 张欣, 仲崇权. 基于量子粒子群优化设计的分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器[J]. 控制工程, 2018, 25(3): 493-498.
Zhang Xin, Zhong Chongquan. Fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller design based on quantum particle swarm optimization [J]. Control Engineering of China, 2018, 25 (3): 493-498. (in Chinese)

[19] 谢玲玲, 陆柳, 刘斌. 基于改进粒子群算法的并网逆变器分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 172-180.
Xie Lingling, Lu Liu, Liu Bin. Research on fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ control of grid-connected inverter based on MPSO algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 172-180. (in Chinese)

[20] Wang Faqiang, Ma Xikui. Transfer function modeling and analysis of the open-loop Buck converter using the fractional calculus [J]. Chinese Physics B, 2013, 22(3): 030506.

[21] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Xue Dingyu, Chen Yangquan. Advanced Applied Mathematical Problem Solutions with MATLAB [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

[22] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
Xu Dehong. Modeling and Control of Power Electronic System [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)

[23] Jain N K, Nangia U, Jain J. A review of particle swarm optimization [J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series B, 2018, 99(4): 407-411.

[24] 王生亮, 刘根友. 一种非线性动态自适应惯性权重 PSO 算法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(4): 249-253, 451.
Wang Shengliang, Liu Genyou. A nonlinear dynamic adaptive inertial weight particle swarm optimization [J]. Computer Simulation, 2021, 38(4): 249-253, 451. (in Chinese)

[25] 徐灯, 傅晶, 王文丰, 等. 一种加权变异的粒子群算法[J]. 南昌工程学院学报, 2021, 40(1): 51-56, 82.
Xu Deng, Fu Jing, Wang Wenfeng, et al. A weighted variation particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2021, 40(1): 51-56, 82. (in Chinese)



王仁明

作者简介：

王仁明(1964—)，男，博士，教授。研究方向：复杂系统的分析与控制。E-mail：eermwang@ctgu.edu.cn。

杨婕(1998—)，女，通信作者，硕士研究生。研究方向：新能源电力系统的智能控制。E-mail：740601966@qq.com。

刘闻仲(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：光伏能源系统设计与控制。E-mail：1019073778@qq.com。

鲍刚(1977—)，男，博士，讲师。研究方向：电力系统分析与控制。E-mail：hustgangbao@gmail.com。

张铭锐(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：光伏能源系统设计与控制。E-mail：1207531553@qq.com。

(责任编辑：耿越)