改进浣熊算法的自抗扰控制分岔扰动抑制策略

孙博睿，周雪松，马幼捷
（天津理工大学 天津市新能源电力变换传输与智能控制重点实验室，天津 300384）

摘 要：针对 Boost 级联变换器受参数变化导致输出电压振荡恶化电能质量的问题，文章提出一种改进浣熊算法的自抗扰抑制策略。首先，建立级联变换器的简化离散模型，证明系统中存在倍周期分岔并结合仿真验证，得出引起端口输出电压产生低频振荡是由于系统发生了倍周期分岔扰动；其次，利用线性自抗扰控制器对扰动估计补偿，由于人工整定参数低效且难以保证精确性，引入改进浣熊算法实现控制器参数自适应整定，算法方面，采用自参数化(SPM)混沌映射初始化，增加种群多样性，融合 Levy 飞行和折射反向学习策略避免算法陷入局部最优，提高参数寻优效率和质量；最后，仿真验证了改进浣熊算法参数配置整定后的控制器能够有效抑制倍周期分岔扰动，改善传输电能质量。

关键词：Boost 级联变换器；倍周期分岔；改进浣熊优化算法；线性自抗扰控制
中图分类号：TK51 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2026)01-0114-08

0 引言

Boost 级联变换器作为微网中连接电源和多种负载间的枢纽，能够平抑可再生能源发电单元的随机波动，为负载提供稳定输入电压[1]。然而，由于其内部开关的高频切换，参数变化时会导致分岔、混沌等非线性行为发生，导致输出电压失稳振荡，从而影响电能传输质量。

有效抑制分岔现象对提高变换器工作性能，改善微网中电能传输质量至关重要。文献[2,3]对变换器中倍周期分岔产生机理进行阐述和仿真验证。文献[4,5]研究了变换器引起低频振荡现象的分岔，但主要针对 Hopf 分岔。文献[6,7]对变换器中分岔及混沌现象进行研究并抑制，通过将传统 PI 控制与立方差反馈控制及滑模控制改进相结合，以达到对分岔及混沌的有效抑制，其控制手段具有简洁性和可移植性，但过度依赖模型信息，且其中的线性控制环节缺少抗扰机制。线性自抗扰控制(Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC) 不依赖扰动产生模型的精确信息对其补偿抑制[8]。本文将引起输出电压低频振荡的分岔等行为归为系统发生的扰动，利用线性扩张状态观测器(LESO)对扰动实时跟踪，结合线性状态误差反馈控制律(LSEF)对扰动补偿进行抑制。对于 LADRC 的参数配置，传统整定手段耗时长，且结果难以保证最优[9,10]。文献 [11,12] 将粒子群优化(PSO)、布谷鸟搜索(CSA)等算法引入到参数整定领域，但算法本身仍须要配置相应参数，增加了整定的复杂性。浣熊优化算法（Coati Optimization Algorithm，COA）作为一种新型启发式元算法，本身无须配置参数，且相较目前主流算法寻优更精准高效[13]。但其在寻优过程中可能存在局部最优等问题，造成算法早熟，影响控制器参数的最优配置。

本文将 Boost 级联变换器进行简化，利用简化模型验证变换器系统中发生的倍周期分岔扰动，利用 LADRC 对其估计补偿，引入改进的浣熊优化算法实现控制器参数的自整定，以有效抑制倍周期分岔扰动产生的输出电压低频振荡，从而提高系统的稳定性和可靠性。在算法方面，引入 SPM 混沌映射初始化来增加寻优初期多样性[14]，并融合 Levy 飞行和折射反向学习策略对 COA 进行改进，以避免寻优过程陷入局部最优，从而改善算法性能，提高了控制器参数配置效率和精准度，更好地抑制系统发生的倍周期分岔扰动。最后，通过仿真验证所提 ICOA-LADRC 的有效性及可行性。

1 Boost 级联变换器系统模型

由于级联系统中变换器之间的相互作用十分

收稿日期：2024-02-05。
基金项目：国家自然科学基金项目(U23B20142)；天津市研究生科研创新项目(2022SKY180)。
通信作者：周雪松(1964-)，男，教授，博士生导师，研究方向为新能源与智能电网控制技术研究。E-mail：zxsmyj@126.com

复杂,为了简化分析,并考虑实际应用场景,依据文献[2]将级联系统等效为一个闭环 Buck 变换器,如图 1 所示。其中次级变换器受到严格调控,可使得 R_0 电压 u'_0 恒定,从而维持功率恒定。因此,相对于电源端 Boost 变换器可视其为恒功率负载。

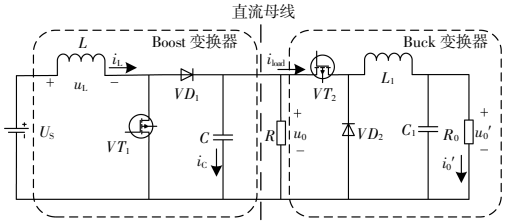


图 1　Boost 级联变换器示意图

Fig.1 Boost cascade converter diagram

由于输入、输出功率平衡,且根据输入、输出电压和占空比之间的关系可得:$u_0 i_{load}=u'_0 i'_0$,$u'_0=\gamma u_0$(γ 为 Buck 变换器的占空比),可将其等效为一个非线性电阻 $R'_0=R_0/\gamma^2$,即将恒功率负载简化成图 2[2]。

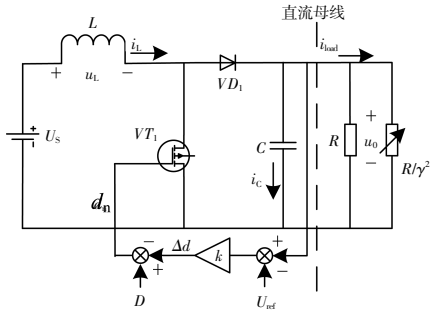


图 2　Boost 级联变换器简化模型

Fig.2 Boost cascade converter simplified model

考虑 Boost 变换器工作在不连续导通模式(DCM)下,系统状态方程为

$$\begin{cases}\dot{X}=A_1X+B_1U,(t_n<t_1<t_n')\\ \dot{X}=A_2X+B_2U,(t_n'<t_2<t_n'')\\ \dot{X}=A_3X+B_3U,(t_n''<t_3<t_{n+1})\end{cases}\tag{1}$$

$$A_1=A_3=\begin{bmatrix}-\dfrac{1}{C\left(\dfrac{RR_0}{\gamma^2R+R_0}\right)} & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$A_2=\begin{bmatrix}-\dfrac{1}{C\left(\dfrac{RR_0}{\gamma^2R+R_0}\right)} & \dfrac{1}{C}\\ 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$B_1=B_2=\begin{bmatrix}0\\ \dfrac{1}{L}\end{bmatrix},B_3=\begin{bmatrix}0\\ 0\end{bmatrix},U=[U_S],X=\begin{bmatrix}u_C\\ i_L\end{bmatrix}。$$

由图 2 可得占空比为 $d_n=D-k(x_n-U_{ref})$,每次间隔一个开关周期进行一次状态变量采样,结合式(1)整理得到 DCM 下迭代映射方程为

$$f(k,x)=x_{n+1}=\alpha x_n+\frac{\beta d_n^2U_s^2}{(x_n-U_S)}\tag{2}$$

$$\alpha=\left(1-\frac{T}{C\left(\dfrac{RR_0}{\gamma^2R+R_0}\right)}+\frac{T^2}{2C^2\left(\dfrac{RR_0}{\gamma^2R+R_0}\right)^2}\right),\beta=\frac{T^2}{2LC}。$$

系统在稳定工作点时,输出电压等于期望值。得到稳定工作点即系统平衡点为 $x^*=x_{n+1}=x_n=U_{ref}$。代入式(2),得到稳态占空比 D 为

$$D=\frac{1}{U_S}\sqrt{\frac{U_{ref}(1-\alpha)(U_{ref}-U_S)}{\beta}}\tag{3}$$

2　系统中倍周期分岔存在性证明

2.1　系统的稳定域

运行稳定是闭环系统最基本的要求,系统受到小且适宜的扰动仍能保证恢复原稳定状态。研究表明[3],倍周期分岔发生在偏导数等于-1 的情况下。通过线性化展开并结合式(2)可得系统稳定域及临界值分别为

$$\left|\alpha+\frac{-2k^*\beta DU_S^2}{U_{ref}-U_S}-\frac{\beta D^2U_S^2}{(U_{ref}-U_S)^2}\right|<1$$
$$k^*=\left[1+\alpha-\frac{\beta D^2U_S^2}{(U_{ref}-U_S)^2}\right]\frac{U_{ref}-U_S}{2\beta DU_S^2}\tag{4}$$

式中:k^* 为稳定工作点时的 k 值。

当 k^* 小于临界值时,系统运行稳定;否则,系统发生失稳,产生低频振荡,影响输出电能质量。

2.2　倍周期分岔定理

如果映射函数 $f(k,x)$ 满足以下条件,则系统在工作点 x^* 处,发生倍周期分岔。

①满足平衡点方程:$f(k^*,x^*)=x^*$;

②达到稳定性边界-1:$\left.\dfrac{\partial f(k,x)}{\partial x}\right|_{x=x^*,k=k^*}=-1$;

③混合二阶导数满足:$\left.\dfrac{\partial^2 f^2(k,x)}{\partial k\partial x}\right|_{x=x^*,k=k^*}\neq 0$;

④施瓦茨导数满足:$S(f,x)=\dfrac{f'''}{f'}-\dfrac{3}{2}\left(\dfrac{f''}{f'}\right)^2<0$;

条件①为平衡点方程;条件②表示稳定域边界;条件③用来判别倍周期分岔的方向;条件④倍

周期分岔发生的辨别条件,而非其他分岔,且分岔发生后系统进入周期 2 轨道。

2.3 验证系统中倍周期分岔及仿真分析

Boost 变换器作为一个强非线性系统,参数的变化会导致不同类型的分岔发生。因此,需要对系统中发生的倍周期分岔进行辨别及验证。选取系统参数:L=208 μH,C=222 μF,R=18 Ω,R_0=6.5 Ω,γ=0.4,T=333.33 μs,U_S=16 V,U_{ref}=25 V。由式(3)可推出 D=0.287 4,且恒功率负载的输出基本维持稳定,由式(2)可得:

$$f(k,x)=x_{n+1}=0.887\ 1\times x_n+\frac{1.2\times d_n^2\times 16^2}{(x_n-16)}$$

根据倍周期分岔定理①,②可求得:k^*=0.080 1,x^*=25;代入定理③,④得:

$$\left.\frac{\partial^2 f^2(k,x)}{\partial k\partial x}\right|_{x=x^*,k=k^*}=-7.063\neq 0$$

$$S(f,x)\big|_{x=x^*,k=k^*}=-0.172\ 5<0$$

综上,系统满足倍周期分岔发生的 4 个条件,发生方向向右的倍周期分岔,与图 3 仿真结果一致。

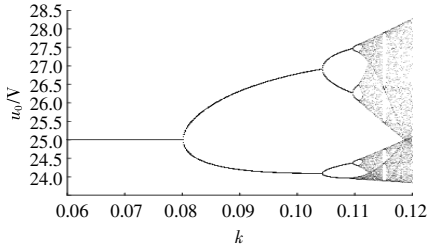
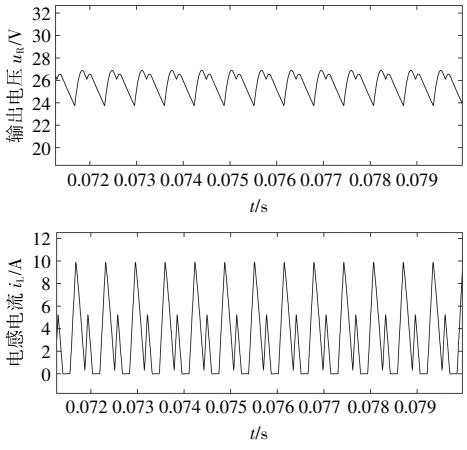


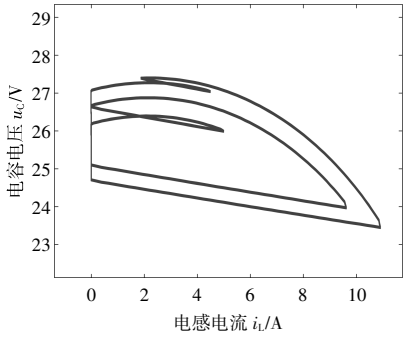
图 3 系统分岔图

Fig.3 System bifurcation diagram

图 4 为系统在 k=0.09 时输出电压与电感电流时域波形及相图。



(a)输出电压与电感电流波形



(b)系统相图

图 4 系统波形及相图

Fig.4 System waveform diagram and phase diagram

由图 4 可以看出,系统状态变量的变化导致系统发生倍周期分岔扰动。改变反馈控制回路,影响开关管的正常关断,且由于二极管的单向导通,使得电压、电流不能按照稳定工作时正常下降。最终导致输出电压形成低于系统开关频率的低频自激振荡现象,造成电压失稳,降低输出电能质量。

本文将导致电压失稳的倍周期分岔扰动归为系统所受总扰动。利用 ICOA-LADC 对扰动观测、估计进行补偿,保障系统的工作性能和输出电能质量。

3 改进浣熊算法的自抗扰控制设计

3.1 二阶线性自抗扰控制设计

对于本文研究对象,选取二阶线性自抗扰控制器更为适宜,基本结构如图 5 所示。

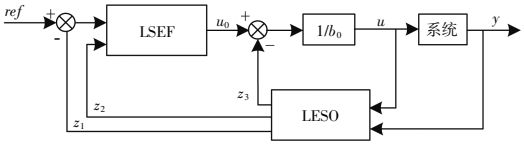


图 5 二阶 LADRC 结构图

Fig.5 Second-order LADRC structure diagram

对于二阶被控对象:

$$\ddot{y}=bu+f(y,u,w,t) \tag{5}$$

式中:y,u 分别为系统输出和输入;f (y,u,w,t)为系统外扰及内部不确定性;b 为控制增益。

由于控制增益 b 难以准确求得,采用近似值 b_0 代替得到:

$$\ddot{y}=b_0u+(b-b_0)u+f(y,u,w,t)=b_0u+g(y,u,w,t) \tag{6}$$

式中:$g(y,u,w,t)$为所受总扰动,即系统发生的倍周期分岔扰动。

取状态变量 $x_1=y$,$x_2=\dot{y}$,$x_3=g$;假设 g 可导,记

$h=\dot{g}$,则式(6)可描述为

$$\begin{cases}\dot{x}=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\0&0&0\end{bmatrix}x+\begin{bmatrix}0\\b_0\\0\end{bmatrix}u+\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}h\\ y=\begin{bmatrix}1&0&0\end{bmatrix}x\end{cases} \tag{7}$$

对其设计相应的 LESO 为

$$\begin{cases}\dot{z}=\begin{bmatrix}-\beta_1&1&0\\-\beta_2&0&1\\-\beta_3&0&0\end{bmatrix}z+\begin{bmatrix}0&\beta_1\\b_0&\beta_2\\0&\beta_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u\\y\end{bmatrix}\\ \hat{y}=\begin{bmatrix}1&0&0\end{bmatrix}z\end{cases} \tag{8}$$

式中:z 为观测器状态量;β_1,β_2,β_3 为增益矩阵参数。

利用带宽法参数化[8],将观测器极点配置在 $-\omega_o$ 处(ω_o 为观测器带宽),得到观测器增益矩阵为

$$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix}\beta_1\\\beta_2\\\beta_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}3\omega_o\\3\omega_o^2\\\omega_o^3\end{bmatrix} \tag{9}$$

针对三阶 LESO,其 LESF 环节选取:

$$u_0=k_p(ref-z_1)-k_dz_2 \tag{10}$$

式中:k_p,k_d 为控制器增益矩阵参数。

通过带宽参数化后[8],得到控制器增益矩阵:$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}k_p&k_d\end{bmatrix}^T=\begin{bmatrix}\omega_c^2&2\omega_c\end{bmatrix}^T$($\omega_c$ 为控制器带宽)。

对应于倍周期分岔扰动的补偿环节为

$$u=\frac{-z_3+u_0}{b_0} \tag{11}$$

综上,对于 LADRC 所需整定参数为 ω_c,ω_o,引入浣熊优化算法实现控制器参数的自整定,对系统发生的倍周期分岔扰动估计、补偿抑制。

3.2　浣熊优化算法(COA)

浣熊优化算法是 2022 年基于长吻浣熊的行为习惯提出的新型元启发式算法[13]。具体步骤如下。

初始化:与其他元启发式算法类似,在寻优前需对种群进行随机初始化。

$$x_{i,j}=lb_j+r\cdot(ub_j-lb_j) \tag{12}$$

式中:$x_{i,j}$ 为浣熊个体位置;ub_j,lb_j 为寻优空间边界;r 为[0,1]内随机实数。

3.2.1　阶段一:狩猎、捕食策略(全局搜索)

此阶段是模拟浣熊群对树上猎物狩猎捕食,将浣熊种群分为追捕和等候狩猎两部分。一部分浣熊群上树追捕猎物,迫使其落地。上树追捕的浣熊群位置为

$$x_{i,j}^{P_1}=x_{i,j}+r\cdot(ig_j-I\cdot x_{i,j}) \tag{13}$$

式中:ig_j 为猎物位置;I 为(1+r)后的取整数。

一旦猎物落地,着陆于地面上随机位置,树下等候的浣熊在空间内搜寻并对其猎杀。通过这种策略使浣熊群能够在搜寻空间的不同位置进行移动,这表明 COA 所具备的全局搜索能力。等候浣熊群位置模拟为

$$\begin{aligned}&ig_j^G=lb_j+r\cdot(ub_j-lb_j)\\&x_{i,j}^{P_1}=\begin{cases}x_{i,j}+r\cdot(ig_j^G-I\cdot x_{i,j}),F_{ig_j^G}<F_i\\x_{i,j}+r\cdot(x_{i,j}-ig_j^G),\text{else}\end{cases}\end{aligned} \tag{14}$$

根据计算后新位置的适应度函数值更新种群的最优位置,更新策略为

$$x_i=\begin{cases}x_i^{P_1},F_i^{P_1}<F_i\\x_i,\text{else}\end{cases} \tag{15}$$

式中:F 为适应度函数值。

3.2.2　阶段二:逃跑、躲避策略(局部搜索)

此阶段针对模拟浣熊遭遇天敌时的逃窜策略进行位置更新。当浣熊被捕食者追逐时,它会逃离当前位置并移动至最近的安全位置。这一行为反映出 COA 在搜寻空间中的局部搜索能力,针对此行为模拟为

$$\begin{aligned}&x_{i,j}^{P_2}=x_{i,j}+(1-2r)\cdot\left[lb_j^{lc}+r\cdot\left(ub_j^{lc}-lb_j^{lc}\right)\right]\\&lb_j^{lc}=\frac{lb_j}{t},ub_j^{lc}=\frac{ub_j}{t}\end{aligned} \tag{16}$$

同理,根据计算后新位置的适应度函数值更新种群的最优位置,更新策略为

$$x_i=\begin{cases}x_i^{P_2},F_i^{P_2}<F_i\\x_i,\text{else}\end{cases} \tag{17}$$

式中:t 为迭代次数。

3.3　改进浣熊优化算法(ICOA)

3.3.1　SPM 混沌映射

COA 所采用的随机初始化,难以保证种群多样性,在后续寻优中易陷入局部最优。SPM 混沌映射具有高度的随机性及遍历性[14],使得初始种群获得更广阔的搜寻空间,避免陷入局部最优解,有效提升阶段一的全局搜索能力。映射表达式如下:

$$\begin{cases}\mathrm{mod}\left[\dfrac{x_n}{\eta}+\mu\sin(\pi x_n)+r,1\right], 0\leqslant x_n<\eta\\ \mathrm{mod}\left[\dfrac{x_n}{0.5-\eta}+\mu\sin(\pi x_n)+r,1\right], \eta\leqslant x_n<0.5\\ \mathrm{mod}\left\{\dfrac{(1-x_n)/\eta}{0.5-\eta}+\mu\sin[\pi(1-x_n)]+r,1\right\}\\ \quad 0.5\leqslant x_n<1-\eta\\ \mathrm{mod}\left\{\dfrac{(1-x_n)}{\eta}+\mu\sin[\pi(1-x_n)]+r,1\right\},\\ \quad 1-\eta\leqslant x_n<1\end{cases} \tag{18}$$

式中：x_n 为系统状态量；μ,η 为映射参数[17]，μ=0.3，η=0.4 时，系统进入混沌态。

3.3.2 融合 Levy 飞行的位置更新策略

由于阶段二为局部搜索，避免因阶段一寻优结果影响陷入局部最优。受 CSA 算法的启发，本文将 Levy 飞行融入 COA 阶段二位置更新策略中。Levy 飞行是一种随机游走过程，近年被用于改进群优化算法，已被证明能够在不同程度上提高种群位置多样性，使寻优跳出局部最优，有效改善算法性能[15]。通常采用 Mantegna 算法模拟 Levy 飞行步长，将式(16)更新策略修改为

$$x_{i,j}^{P_2}=x_{i,j}+(1-2r)\cdot[lb_j^{lc}+r\cdot(ub_j^{lc}-lb_j^{lc})]\cdot\mathrm{levy}(\lambda) \tag{19}$$

$$\mathrm{levy}(\lambda)=\frac{u}{|v|^{1/\beta}} \tag{20}$$

式中：$u\sim N(0,\sigma_u^2)$；$v\sim N(0,1)$；β=1.5。

3.3.3 引入折射反向学习的位置更新策略

通过融合 Levy 飞行策略避免 COA 在阶段二初期寻优陷入局部最优，但寻优后位置更新仍可能存在局部最优等缺陷。折射反向学习是一种基于透镜折射定律的新型算法改进机制，通过计算当前位置的反向解来扩大搜索范围[16]，避免算法早熟，找到优化问题的更优解。具体策略为

$$x_{\mathrm{best}}^{*}=\frac{ub_j+lb_j}{2}+\frac{ub_j+lb_j}{2n}-\frac{x_{\mathrm{best}}}{n}\qquad n=[1+(t/T)^{0.5}]^{10} \tag{21}$$

式中：x_{best} 为寻优后的最佳位置；x_{best}^{*} 为 x_{best} 的折射反向解；T 为最大迭代次数。考虑到 COA 前期全局搜索而后期局部精细搜索的特点，引入动态变化的 n，随着迭代次数变化，从而影响反向解的范围，使得 COA 位置更新摆脱局部最优，改善算法性能。

本文寻优流程如图 6 所示。

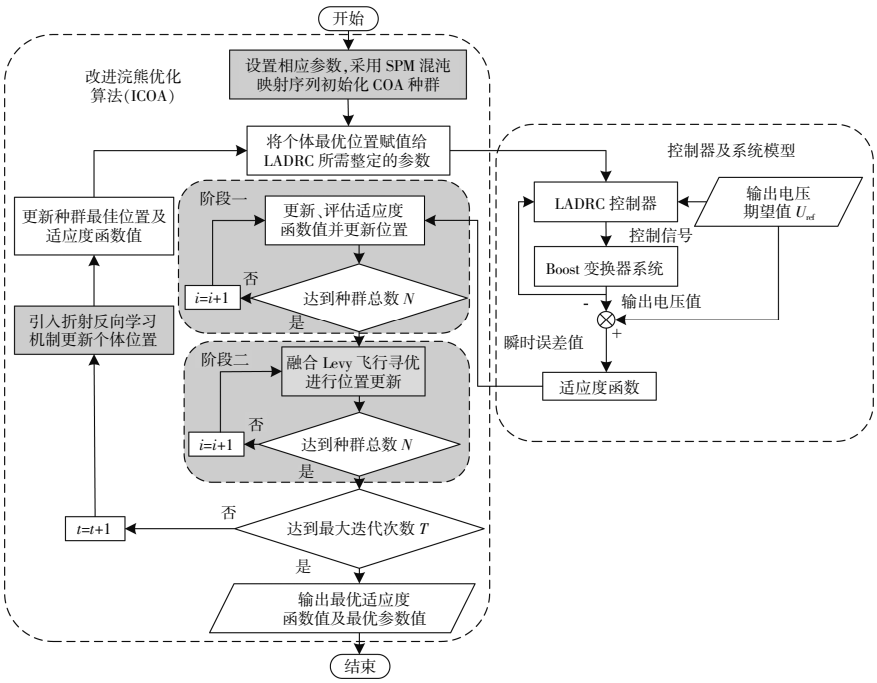


图 6 ICOA 寻优流程图

Fig.6 ICOA optimization flow chart

3.4 ICOA-LADRC 设计

本文选取时间乘绝对误差积分准则(ITAE)作为适应度函数，以此准则设计的控制器具有强误差抑制能力、低初始误差振荡、基本消除后期误

差等优势[17,18]。考虑到实际应用中,带宽法参数配置 ω_o 一般大于 ω_c 取值，引入罚函数 Q 加入适应度函数 F 中,即:

$$F=\int_0^t t\left|e(t)\right|\mathrm{d}t+Q$$
$$Q=\begin{cases}0,\omega_c\leqslant\omega_o\\1,\omega_c>\omega_o\end{cases}\qquad(22)$$

式中:$e(t)$为输出电压值与期望值误差。

由此将 LADRC 参数配置转化为高维函数最小值求解问题,利用 ICOA 对 LADRC 进行参数寻优,通过在线仿真求解适应度函数最小值,将寻优最佳结果输出储存,得到最优参数配置,达到对系统发生倍周期分岔扰动的最佳抑制效果，本文设计的 ICOA–LADRC 控制结构如图 7 所示。

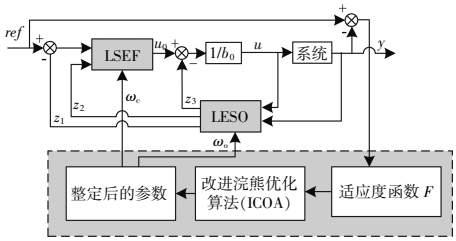


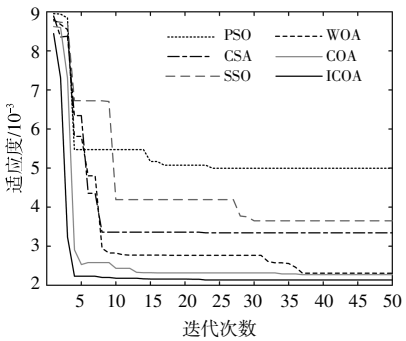
图 7　ICOA–LADRC 控制结构图

Fig.7 ICOA–LADRC control structure diagram

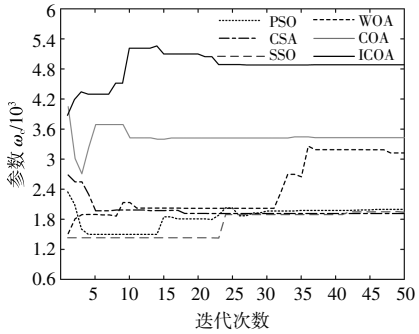
4　仿真及结果分析

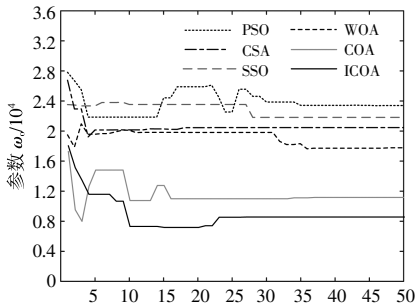
在仿真平台上搭建模型,以验证所提 ICOA–LADRC 的有效性。选取种群数量 N 为 40;最大迭代次数 T 为 50;控制增益 b_0 为 1.459×10^8;反馈系数 k 在 0.05 s 时由 0.01 变为 0.09，对比 ICOA–LADRC 与 PSO –LADRC,CSA –LADRC,SSO –LADRC,WOA–LADRC,COA–LADRC 对倍周期分岔扰动的抑制效果,如图 8 所示。

由图 8(a)可看出,在相同迭代次数下,由于 COA 本身寻优机制的优势,相比于 PSO,CSA 等



(a)适应度函数值对比





(b)参数优化迭代曲线

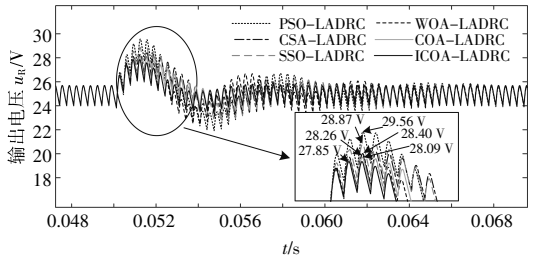
图 8　适应度函数值及参数优曲线

Fig.8 Fitness function values and parameter curves

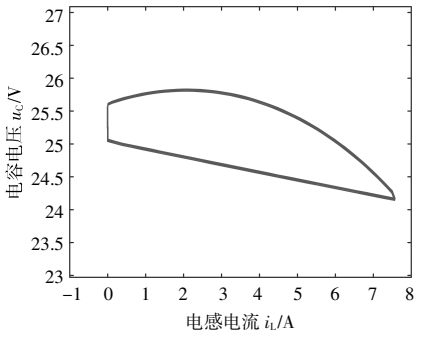
算法的收敛速度更快且得到更小的适应度函数值;此外,ICOA 采用 SPM 混沌映射使得寻优初期相比 COA 有着更快的收敛速度。在相同迭代次数下,ICOA 相比于 COA 能够更快地得到更小的适应度函数值,这源于融合 Levy 飞行和折射反向学习的位置更新使 ICOA 能够跳出局部最优，有效提升寻优效率。因此,与其他几种算法相比,ICOA 能够更高效、精准地得到控制器参数。

通过优化后的 LADRC 对系统发生的倍周期分岔扰动进行抑制，得到系统输出电压图及相图如图 9 所示。性能指标如表 1 所示。

由图 9(a)和表 1 可以看出,与其他几种控制算法相比,ICOA–LADRC 对倍周期分岔扰动有着更低的输出电压的波动范围,更短的调节时间,控



(a)倍周期扰动下输出电压



(b)ICOA-LADRC 抑制后系统相图

图 9 系统输出电压及相图

Fig.9 System output voltage diagram and phase diagram

表 1 性能指标对比

Table 1 Comparison of performance indicators

性能指标	PSO-LADRC	CSA-LADRC	SSO-LADRC	WOA-LADRC	COA-LADRC	ICOA-LADRC
超调量/%	18.24	13.60	15.48	13.04	12.36	11.40
调节时间/s	0.023 4	0.016 0	0.022 0	0.018 3	0.013 6	0.011 2

制器抑制效果更好,系统输出电压更稳定。

5 结论

Boost 级联变换器在运行过程中,由于参数的变化导致输出电压振荡, 本文通过构建系统离散模型,证明变换器中发生了倍周期分岔,将系统状态量发生的倍周期分岔归为所受总扰动, 利用所提 ICOA-LADRC 对其抑制。针对控制器参数配置问题,引入 ICOA 实现参数的自适应整定;为避免 COA 过早陷入局部最优,采用 SPM 混沌映射初始化,引入 Levy 飞行和折射反向学习提高算法寻优性能;通过仿真对比验证,在相同种群规模和迭代次数下,ICOA 能更高效地实现参数整定且配置参数最优,有效抑制系统发生的倍周期分岔扰动,保障变换器能稳定输出电压。

参考文献:

[1] 张纯江,暴云飞,孟宪慧,等.直流微网储能 DC/DC 变换器的自适应虚拟直流电机控制[J].电力系统保护与控制,2023,51(1):12-20.

[2] 张勇,徐瑞东,李涛,等.恒功率负载下 DC-DC 双向变换器分岔现象研究[J].工矿自动化,2016,42(2):61-66.

[3] 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.

[4] 秦明,宋胜男,王克文.基于电容电流的变换器多脉冲序列控制技术研究[J].电源学报,2023,21(1):9-16.

[5] 张书鑫,赵若凡,刘鸿鹏.模块化高压大容量 DC/DC 变换器综述[J].东北电力大学学报,2024,44(1):52-60.

[6] 王浩宇,董学育,朱建忠,等.Buck-Boost 变换器非线性行为分析与混沌控制研究[J].电工技术,2021(7):27-29,32.

[7] 徐敏,康哲,刘早富.基于观测器的混沌电力系统 PI 固定时间自适应滑模控制 [J]. 电力系统保护与控制,2022,50(19):146-157.

[8] Gao Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[A].Proceedings of the American control conference[C].Denver:IEEE,2006.4989-4996.

[9] 张永,王佑,薛亚丽,等.线性自抗扰控制器的改进设计及应用[J].动力工程学报,2023,43(1):34-40,55.

[10] 袁东,马晓军,曾庆含,等.二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究 [J]. 控制理论与应用,2013,30(12):1630-1640.

[11] 郑宏,郭其金,沈建杨.无桥 DBPFC 变换器的虚拟超局部优化控制策略[J].电测与仪表,2023,60(8):20-25.

[12] 李浩东,肖伸平.基于 PSO-LADRC 的 DC-DC 升压变换器控制策略[J].电工技术,2022(10):14-18,21.

[13] 卢昕,陈众励,李辉.基于自抗扰控制的直流微电网双向 Buck-Boost 变换器控制策略研究 [J]. 发电技术,2021,42(2):193-200.

[14] 左锋琴,张达敏,何庆,等.融合无迹 sigma 点变异和交叉反向的鹈鹕优化算法[J].计算机科学与探索,2024,18(11):2954-2968.

[15] 国珍,仝棣.基于莱维飞行粒子群算法的异步电机效率优化[J].计算机仿真,2024,41(9):265-270,509.

[16] 周鹏,董朝轶,陈晓艳,等.基于 Tent 混沌和透镜成像学习策略的平衡优化器算法[J].控制与决策,2023,38(6):1569-1576.

[17] 魏立新,赵默林,范锐,等.基于改进鲨鱼优化算法的自抗扰控制参数整定 [J]. 控制与决策,2019,34(4):816-820.

[18] 马星河,张振东,许丹,等.基于蜂群算法的矩阵变换器 ADRC 参数优化[J].电力系统保护与控制,2019,47(17):61-68.

Improved coati algorithm bifurcation disturbance suppression strategy for active disturbance rejection control

Sun Borui, Zhou Xuesong, Ma Youjie
(Tianjin Key Laboratory of New Energy Power Conversion, Transmission and Intelligent Control, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Aiming at the problem of output voltage oscillation and deterioration of power quality caused by parameter changes of Boost cascade converter, an active disturbance rejection suppression strategy that improved coati algorithm is proposed. First, a simplified discrete model of the cascade converter was established to prove the existence of period-doubling bifurcation in system and combined with simulation verification, it was concluded that the low-frequency oscillation of the port output voltage was due to the period-doubling bifurcation disturbance in the system; Secondly, using linear active disturbance rejection controller compensates for disturbance estimation. Since manual tuning of parameters is inefficient and difficult to ensure accuracy, improved coati algorithm is introduced to realize adaptive tuning of controller parameters. In terms of algorithm, SPM chaos mapping is used for initialization to increase population diversity; Incorporating Levy flight and refractive backward learning strategies to avoid the algorithm falling into local optimum and to improve the efficiency and quality of parameter finding. Finally, through simulation verification and analysis, improved coati algorithm parameter configuration is more accurate and efficient, and the tuned controller can effectively suppress period-doubling bifurcation disturbances and improve the quality of transmitted power.

Keywords: Boost cascade converter; period-doubling bifurcation; improved coati optimization algorithm; linear active disturbance rejection control