

基于混合策略麻雀搜索算法优化的 DC-DC 变换器自抗扰稳压策略*

王 晨¹ 周雪松¹ 马幼捷¹ 赵 明² 王鸿斌³ 赵家欣⁴

(1. 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;

2. 承德电智尚节能科技有限公司 承德 067000; 3. 天津安捷物联科技股份有限公司 天津 300392;

4. 天津瑞源电气有限公司 天津 300308)

摘 要:为抑制城轨列车频繁启停引起的牵引网电压剧烈波动,在车载储能 DC-DC 变换器中设计一种基于改进麻雀搜索算法的自抗扰控制器。首先,建立 DC-DC 变换器的一阶自抗扰控制器进行稳压控制;然后,为提高系统快速性和抗扰性,引入麻雀搜索算法进行控制器参数寻优;之后针对麻雀搜索算法易陷入局部最优的缺点,引入 Tent 混沌序列和多样化变异处理,并提出基于樽海鞘算法的新型改进算子对麻雀搜索算法进行改进;最后,根据列车的速度曲线进行仿真验证。通过实验对比,自抗扰控制器在启动加速阶段的电压调节时间相较于 PI 控制、传统自抗扰和麻雀搜索自抗扰分别减小 0.012、0.006、0.003 s,在制动减速阶段分别减小 0.005 4、0.002 5、0.001 5 s,结果表明所设计的控制器的可行性和有效性。

关键词:车载储能系统;自抗扰控制;混合策略麻雀搜索算法;DC-DC 变换器;Tent 混沌

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Active disturbance rejection voltage stabilization strategy for DC-DC convertor based on hybrid sparrow search algorithm

Wang Chen¹ Zhou Xuesong¹ Ma Youjie¹ Zhao Ming² Wang Hongbin³ Zhao Jiaxin⁴

(1. Tianjin Key Laboratory of New Energy Power Conversion, Transmission and Intelligent Control, Tianjin

University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. Chengde Dianzhishang Energy Saving Technology

Co., Ltd., Chengde 067000, China; 3. Tianjin Anjie IoT Technology Co., Ltd., Tianjin 300392, China;

4. Tianjin Ruiyuan Electric Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: In order to suppress the voltage fluctuation of traction network caused by frequent start and stop of urban rail trains, an active disturbance rejection controller based on improved sparrow search algorithm is designed for on-board energy storage DC-DC converter. Firstly, the first order active disturbance rejection controller of the DC-DC converter is established for voltage control. Then, in order to improve the rapidity and immunity of the system, sparrow search algorithm is introduced to optimize the controller parameters. Then, aiming at the shortcomings of sparrow search algorithm that is easy to fall into local optimal, Tent chaotic sequence and diversified mutation processing are introduced, and a new improved operator based on salp swarm algorithm is proposed to improve sparrow search algorithm. Finally, the speed curve of the train is simulated and verified. Compared with PI control, traditional active disturbance rejection and Sparrow search active disturbance rejection, the voltage adjustment time of the proposed active disturbance rejection controller is reduced by 0.012, 0.006 and 0.003 s respectively in the start-up acceleration stage, and by 0.005 4, 0.002 5 and 0.001 5 s in the braking deceleration stage, respectively. The results show that the designed controller is feasible and effective.

Keywords: vehicle energy storage system; active disturbance rejection control; sparrow search algorithm; DC-DC converter; Tent chaos

收稿日期:2023-10-21

* 基金项目:国家自然科学基金(51877152)、天津市科技特派员项目(22YDTPJC00340)、天津市研究生科研创新项目(2022SKY180)、天津理工大学校级研究生科研创新实践项目(YJ2225)资助

0 引言

车载储能系统是城轨列车的重要组成设备之一,其作用是回收制动能量同时抑制电压波动。目前车载储能系统一般采用双向 DC-DC 变换器连接直流牵引网与储能装置进行能量传递^[1]。DC-DC 变换器一般采用电压外环和电流内环的 PID 双闭环控制策略^[2],但由于变换器频繁通断使系统具有非线性特性,且 PID 控制具有滞后性,控制效果不够理想。为解决上述问题,引入具有主动估计并抑制扰动的自抗扰控制^[3](active disturbance rejection control, ADRC)进行稳压控制。

ADRC 核心思想是将系统内扰和外扰看作总扰动,通过扩张状态观测器(extended state observer, ESO)进行估计补偿,该方法较传统 PID 鲁棒性强、超调小和动态响应强^[4]。目前已经提出许多 ADRC 的稳压策略,付建哲等^[5]设计了基于 ADRC 的微电网稳压控制,石波等^[6]设计了基于解耦 ADRC 的小型压水堆稳压策略,但 ADRC 非线性函数较多,分析过程较复杂。为此,高志强^[7]提出了线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)技术,将其中 ESO 和 NLSEF 线性化处理,并提出极点配置法,将自抗扰参数和带宽联系起来,极大简化了参数整定过程。传统的 LADRC 的参数整定较多依靠经验,且各参数之间存在复杂耦合关系,因此难以整定出合理有效的参数,目前基于智能化算法的参数优化方法为常用的 LADRC 参数优化方法,李浩东等^[8]设计了基于自适应 PSO 的双向 DC-DC 变换器 LADRC 稳压策略,周涛^[9]设计了基于差分进化算法的线性自抗扰控制参数优化,均取得了良好的控制效果。

但现有算法迭代步长较小,迭代次数较多,导致寻优速度较慢,基于此引入麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA),与其他算法相比,该算法结构简单,收敛速度快,具有较高精度和效率,同时具有鲁棒性强、稳定性高的优点,寻优性能优越。为此引入麻雀搜索算法并针对其缺点进行修改,利用改进麻雀搜索算法进行 LADRC 参数寻优,得到最优控制效果。首先分析双向 DC-DC 变换器,得到 Boost 模式的数学模型,然后基于状态空间表达式设计一阶线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)和线性误差反馈控制率(linear state error feedback, LSEF)并设计控制策略。之后介绍麻雀搜索算法并针对麻雀搜索算法的缺点做出相应改进,之后分析控制器带宽对系统跟踪性和抗扰性的影响,最后通过仿真验证本文所提出的方法的正确性及可行性。

1 系统分析

含车载储能系统的列车运行结构如图 1 所示^[10],系统由双向 DC-DC 变换器作为储能控制器连接直流牵引网和储能装置。列车启动时大量吸收能量导致牵引网电压下降,此时储能装置放电进行电压补偿;列车制动时造成

牵引网电压抬升,此时储能装置吸收并储存产生的再生制动能量。

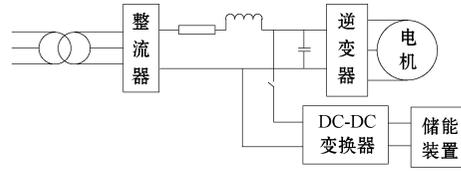


图 1 车载储能系统结构

Fig. 1 Structure of vehicle energy storage system

储能系统拓扑结构如图 2 所示,本文选取结构简单、体积小且动态性能好的半桥型双向 DC-DC 变换器作为系统的储能控制器,系统运行状态由列车的不同工况来决定,储能装置的充放电模式随列车工况改变。为便于分析,储能装置由电阻和电容并联等效,直流牵引网由恒压源和电容并联等效。本文以 Boost 模式下的电路例进行分析,Boost 电路如图 3 所示。

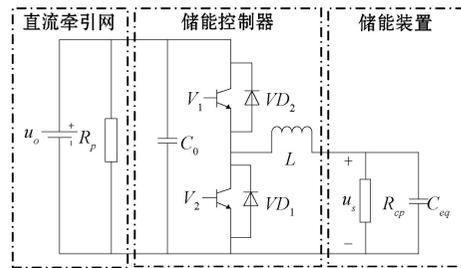


图 2 储能系统基本结构

Fig. 2 Basic structure of energy storage system

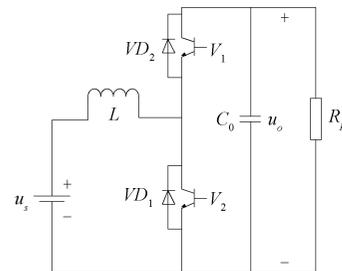


图 3 DC-DC 变换器 Boost 模式

Fig. 3 Converter Boost mode working state

假设电路均为理想原件,根据基尔霍夫定律和状态空间平均法可得变换器状态空间模型:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L \\ u_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -d/L \\ d/C_o & -1/R_p C_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} u_s \quad (1)$$

式中: u_s 为储能侧电压值; L 为储能侧电感值; C_o 为牵引侧电容值; d 为 Boost 模式占空比; R_p 为牵引网等效电阻。

忽略储能侧电压扰动和直流母线电流扰动,通过小信号建模和拉普拉斯变换得到双向 DC-DC 变换器占空比与电感电流、电容电压的传递函数为:

$$\begin{cases} G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{u_o(C_0s + 1/R_p) + i_Ld}{LC_0s^2 + Ls/R_p + d^2} \\ G_{ud}(s) = \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{u_o d - sLi_L}{LC_0s^2 + Ls/R_p + d^2} \end{cases} \quad (2)$$

2 基于 LADRC 的牵引网电压控制策略

储能控制器具有非线性特性,且运行过程中易受到频繁启停引起的扰动,因此采用能够极好的容忍模型偏差和未知扰动的 LADRC 设计控制策略。将储能侧电压波动和负载波动等作为扰动,设计一阶 LADRC^[11]如图 4 所示。

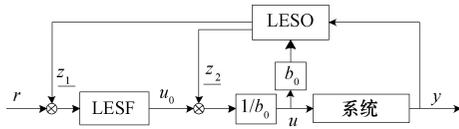


图 4 一阶 LADRC 结构

Fig. 4 First order LADRC structure

图 4 中, r 为牵引网母线参考电压 u_o^* , u_0 可以看作补偿前的控制信号。 u 和 y 分别表示被控对象的输入和输出,分别对应 i_L 和 u_o 。

2.1 LESO 设计过程

将电路表述为带有扰动的一阶微分形式,即:

$$\begin{cases} \dot{u}_o = b_0 i_L + f \\ y = u_o \end{cases} \quad (3)$$

式中: f 为总扰动; b_0 为补偿因子。其表达式为:

$$f = -u_o/(C_0R_p) - i_L(u_o d + Li_L)/(C_0u_o) \quad (4)$$

$$b_0 = d/C_0 \quad (5)$$

选取状态变量 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T = [u_o \ f]^T$ 和 $u = i_L$, 并采用一阶 LESO:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 + b_0 u - l_1(z_1 - y) \\ \dot{z}_2 = -l_2(z_1 - y) \end{cases} \quad (6)$$

式中: z_1 和 z_2 分别实时反映牵引网母线电压和总扰动, $L = [l_1 \ l_2]^T$ 为需要设计的观测器增益矩阵,一阶 LESO 对状态量和扰动量进行实时估计,即 $z_1 \rightarrow u_o, z_2 \rightarrow f$ 。

通过极点配置法将 LESO 特征方程的极点放在 $-\omega_0$ 处,即可求出 LESO 的误差反馈增益:

$$\begin{cases} l_1 = 2\omega_0 \\ l_2 = \omega_0^2 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 LSEF 设计过程

针对此一阶 LESO,设计相应 LSEF 为比例控制率,其表达式为:

$$u_0 = k_p(r - z_1) \quad (8)$$

式中: k_p 为控制器比例控制增益,经过参数化,取 $k_p = \omega_c, \omega_c$ 为控制器带宽。

3 控制策略设计

DC-DC 变换器的控制策略如图 5 所示,电压外环对一阶 LADRC 采用混合策略优化麻雀搜索算法对 LESO 和 LSEF 的带宽进行寻优,以电压误差为输入量,输出量为控制器和观测器的带宽修正量,电流内环用传统 PI 控制。图 5 中, u_o^* 和 i_L^* 分别为电压环和电流环的参考值, $G_{id}(s)$ 为电感电流对占空比的传递函数, $G_{ui}(s)$ 为牵引网母线电压对电感电流的传递函数。 $G_m(s)$ 为 PWM 的传递函数。

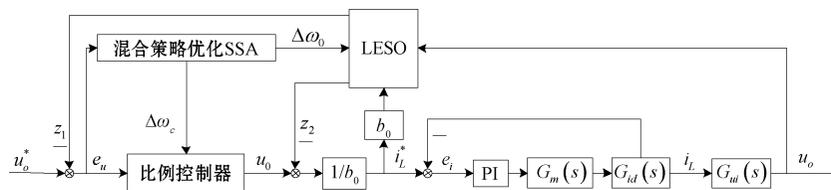


图 5 针对储能控制器的控制策略

Fig. 5 Control strategy for energy storage controllers

4 优化算法

4.1 麻雀搜索算法

自抗扰控制器的控制性能主要取决于控制参数是否合适,本文研究系统具有强随机性和强不确定性的特点,传统的参数整定方法较为困难,且传统方法不能兼顾系统鲁棒性、跟踪性和抗干扰性,不能保证 LADRC 的良好控制效果,针对该非线性系统的参数优化问题有大量研究使用 SSA^[12-14],其迭代方式为随机方式,灵活性较其他算法更高;可同时兼顾多个动态性能指标,以此类推,研究人员可以根据具体控制系统的要求灵活选取相应动态性能构

建目标函数。为此使用麻雀搜索算法进行参数整定具有一定理论依据。

SSA 算法^[15]包含全局寻优和局部寻优过程,即先利用发现者在限定范围内寻求大致最优解范围,之后用跟随者在最优解范围附近进行局部参数寻优,获得收敛结果。即全局寻优获得近似解,局部寻优获得最优解。为在线观测控制效果和减少参数调节时间,本文提出一种基于混合策略优化麻雀搜索算法的自适应 LADRC。假设 SSA 算法中的 d 维空间中有 n 只麻雀,第 i 只麻雀在 d 维空间中的位置为 $\mathbf{x}_i = [x_{i,1} \ x_{i,2} \ \dots \ x_{i,d}]$,麻雀种群可表示为:

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,d} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,d} \end{bmatrix} \quad (9)$$

随机生成初始麻雀种群的公式为:

$$x_i = lb_i + \mathbf{rand}(1,D) \times (ub_i - lb_i) \quad (10)$$

式中: x_i 为第 i 只麻雀的位置信息; ub_i 和 lb_i 分为个体的上下界; \mathbf{rand} 为 $(0,1)$ 均匀分布的随机数矩阵。

发现者占整个种群的 $10\% \sim 20\%$, 根据算子进行位置迭代, 发现者的位置更新公式为:

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} x_{i,j}^t \cdot \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot iter_{\max}}\right), & R_2 < ST \\ x_{i,j}^t + Q \cdot L, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (11)$$

式中: $iter_{\max}$ 为最大迭代次数; $x_{i,j}^t$ 为麻雀个体位置; $ST \in [0.5, 1]$ 为安全值; $\alpha \in (0, 1]$ 为随机数; $Q \in [0, 1]$ 为正态分布的随机数; $R_2 \in [0, 1]$ 为预警值; L 为 $1 \times d$ 的矩阵, 矩阵中元素都为 1。

种群其余个体作为跟随者, 跟随者基于发现者位置进行搜索, 且为提高自身适应度与发现者争夺最优适应度位置, 位置更新公式为:

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(-\frac{x_{\text{worst}}^t - x_{i,j}^t}{i^2}\right), & i < \frac{N}{2} \\ x_p^t + |x_{i,j}^t - x_p^t| \cdot \mathbf{A}^+ \cdot L, & i \geq \frac{N}{2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: x_{worst}^t 为当前适应度最差位置; x_p^t 为发现者当前最佳位置; \mathbf{A}^+ 为元素随机赋值为 1 或者 -1 的 $1 \times d$ 的矩阵, 其中 $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}$ 。

麻雀种群中 $10\% \sim 30\%$ 的麻雀个体为预警者, 预警者在种群中随机产生, 其位置更新公式为:

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} x_{\text{best}}^t + \beta |x_{i,j}^t - x_{\text{best}}^t|, & f_i > f_g \\ x_{i,j}^t + k \frac{|x_{i,j}^t - x_{\text{best}}^t|}{(f_i - f_w) + \epsilon}, & f_i = f_g \end{cases} \quad (13)$$

式中: β 为步长控制参数, 服从 $[0, 1]$ 正态分布; f_g 为全局最优适应值; f_w 为全局最差适应度值; f_i 为当前麻雀的适应度; x_{best}^t 为当前全局最佳位置; k 为步长控制参数, 为 $[-1, 1]$ 服从均匀分布的随机数; ϵ 为最小常数。SSA 算法的流程如图 6 所示。

但在 SSA 的优化过程中, 个体迭代是直接跳跃到最优解附近, 导致麻雀搜索算法收敛速度较快, 但一旦陷入局部最优就难以跳出当前局部空间。且在求解最优解偏离原点的函数时有原点和最优解两个收敛方向, 在求解最优解偏离原点的函数时, 后期搜索出现停滞, 因此麻雀算法改进需要平衡局部搜索与全局搜索, 避免陷入局部最优。

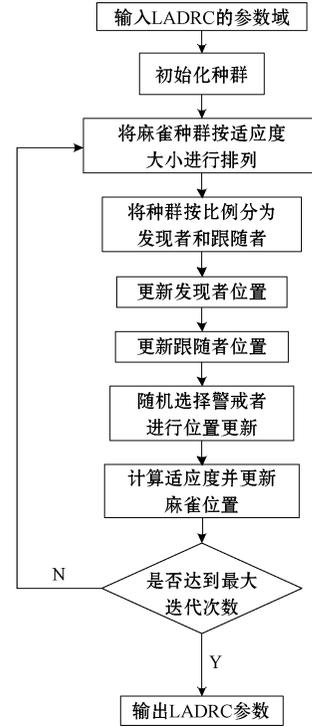


图 6 麻雀搜索算法流程

Fig. 6 Sparrow search algorithm flow

4.2 Tent 混沌序列

SSA 初始种群个体的生成采用给定范围内随机生成数组的方式, 如图 7(a) 所示, 图 7(b) 所示为随机序列在各区间的分布概率, 可以看出随机序列在 $[0.7, 0.8]$ 的取值次数较高, 分布概率不均匀, 导致麻雀种群分布不均匀、搜索空间不足。

混沌为确定系统中貌似随机的运动, 具有遍历性的特点, 即混沌运动轨道在有限时间内能不重复的经过区域内每一个状态点, 因此混沌优化搜索过程不存在局部最优。可利用混沌变量的遍历特性^[16] 代替伪随机数生成器进行种群初始化, 使种群分布尽可能均匀, 提升算法寻优能力。常用的混沌映射为 Logistic 映射, 其分布如图 7(c) 所示。Logistic 映射的方程为:

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n) \quad (14)$$

其中, $x_n \in [0, 1], \mu \in [0, 4], n = 0, 1, 2, \dots$ 。

由图 7(d) 可以看出, Logistic 映射的取值次数最小是 38 次, 最大 139 次, 区间取值次数差别较大, 遍历均匀性较低, 当最优解落在取值概率较低位置时, 系统需要多次迭代才能得到最优解, 算法寻优速度降低。

为了提高混沌初始序列的遍历均匀性, 本文引入 Tent 混沌映射^[17], Tent 混沌映射为:

$$y_{k+1} = \begin{cases} y_k / \varphi, & 0 < y_k < \varphi \\ (1 - y_k) / (1 - \varphi), & \varphi < y_k < 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中: y_k 为第 k 维的群体, 当 $\varphi \in [0, 1]$ 且 $y_k \in [0, 1]$ 时, 系统处于混沌状态, 本文取 $\varphi = 0.455$, 图 7(e) 和 (f) 所示

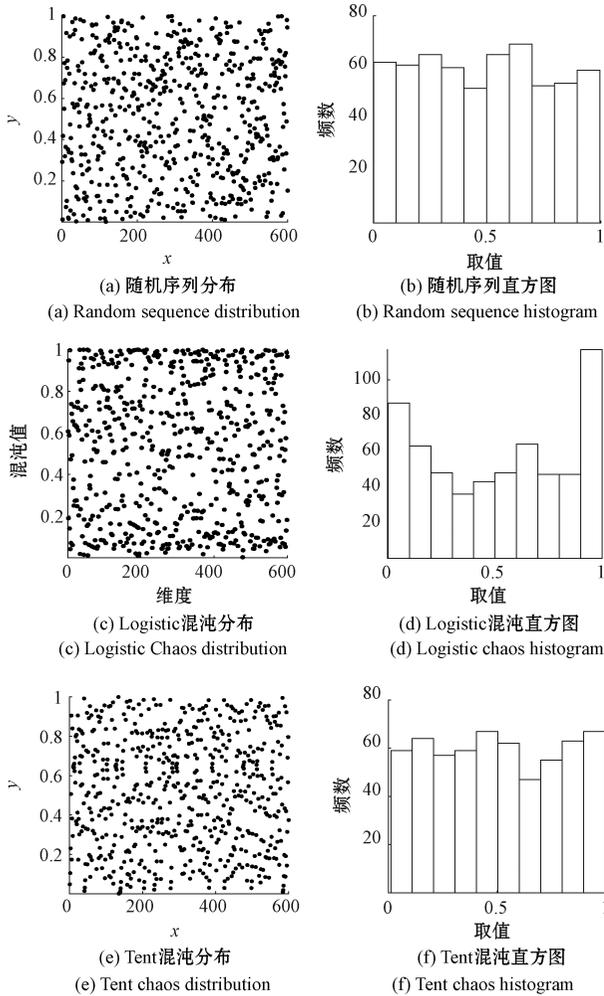


图7 初始序列分布对比

Fig. 7 Initial sequence distribution comparison

为 Tent 混沌序列的分布图和分布直方图。

由图 7(f) 可以看出, Tent 混沌序列的最少取值次数为 54 次, 最大为 69 次, Tent 混沌序列各区域取值概率较 Logistic 映射更均匀, 遍历均匀性和优于 Logistic 映射, 因此本文采用 Tent 混沌序列初始化种群增加种群的多样性, Tent 混沌初始化种群公式如下:

$$x_i = lb_i + y_k(i) \times (ub_i - lb_i) \quad (16)$$

4.3 发现者算子改良

发现者需要更大搜索空间进行寻优, 且加入者需要基于发现者轨迹寻优, 因此 SSA 个体寻优能力与发现者搜索范围与迭代速度有关, 发现者搜寻范围越大, 迭代衰减的速度越快, 则全局搜索能力越强, 算法性能越好。SSA 中发现者的位置主要依靠算子进行迭代, 算子 $f(i)$ 为:

$$f(i) = \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot iter_{max}}\right) \quad (17)$$

$f(i)$ 迭代散点图如图 8 所示, 算子迭代区间在 $[0, 1]$ 。

由图 8 可知, 函数迭代初期散点主要分布在 1 附近,

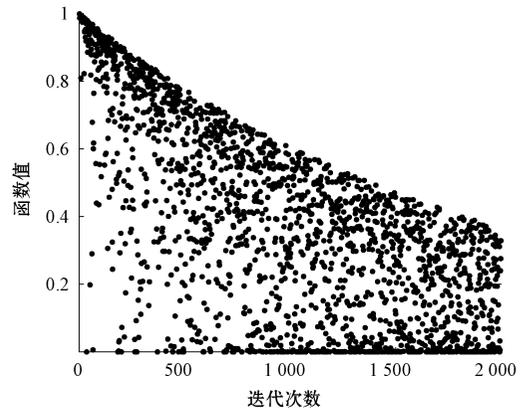


图8 发现者算子散点图

Fig. 8 Scatter plot of the discoverer operator

迭代后期散点高度集中在 $[0, 0.3]$, 算子收敛区间大, 迭代次数多, 收敛速度不够理想。这样的算子在零点附近的局部搜索能力较强, 但会导致迭代后期种群多样性减少, 出现局部最优现象。

基于发现者算子存在的问题, 文献[18]提出基于樽海鞘算法的改进麻雀算子, 公式如下:

$$g(t) = \frac{c_1((ub - lb)c_2 + lb)}{ub(1 + c_3)} \quad (18)$$

式中: ub 和 lb 分别是解空间的上下限值; c_2 和 c_3 均为 $[0, 1]$ 的随机数。 c_1 为自适应参数, 随迭代次数的增加从 2 收敛到 0, 因此樽海鞘算法主要依靠 c_1 迭代收敛。其表达式为:

$$c_1 = 2 \cdot \exp\left(-\left(\frac{4t}{iter_{max}}\right)^2\right) \quad (19)$$

函数迭代散点图如图 9(a) 所示。观察可得, 改进算子迭代初期分布在 $[-1.5, 1.5]$, 寻优范围明显提升, 但散点主要集中在 $[-0.5, 0.5]$, 其余区域分布较少, 边缘搜索能力较弱。且算子受到区间边界界的限制, 当边界的界差减小时, 算子搜索范围减小, 如图 9(b) 所示。

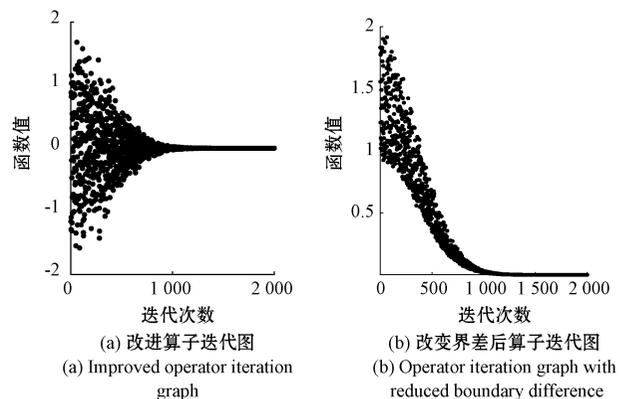


图9 基于樽海鞘算法的改进麻雀算子

Fig. 9 An improved sparrow operator based on salps swarm algorithm

由于樽海鞘算子 c_1 是从 2 收敛到 0, 相较原算子搜索范围更大, 因此用 c_1 替换掉原麻雀算子。为协调算子的全局搜索和局部搜索能力, 引入自适应权重, 使发现者在迭代初期权重尽量大, 使麻雀大范围寻优; 在迭代的后期权重减小, 使算子更多地进行局部搜索, 提升收敛速度。同时为了进一步扩大搜索范围, 提升改进算子正负方向的搜索能力, 提出参数 h 为 $[-1, 1]$ 的随机数。权重公式和改进后的算子公式为:

$$\omega(t) = \frac{e^{\frac{2(1-t/iter_{max})}{e}} + e^{-\frac{2(1-t/iter_{max})}{e}}}{e^{\frac{2(1-t/iter_{max})}{e}} - e^{-\frac{2(1-t/iter_{max})}{e}}} \quad (20)$$

$$q(t) = h \cdot c_1 \cdot \omega(t) \quad (21)$$

改进后的发现者位置更新如图 10 所示。

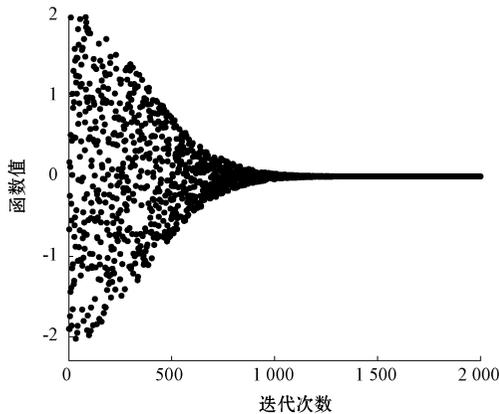


图 10 基于樽海鞘算法的新型改进算子
Fig. 10 New improved operator based on salps swarm algorithm

通过对比图 8~10 可知, 迭代初期新型改进算子分布在 $[-2, 2]$, 提升了麻雀种群的搜索范围, 且搜索范围不受参数上下界的影响, 搜索范围较稳定。散点在搜索范围内均匀分布, 避免了原算法中的局部最优现象, 全局搜索能力较强, 同时兼顾了算法的前期搜索能力和后期收敛速度, 因此改进后的算子具有更好的性能。改进后发现者的公式为:

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} x_{i,j}^t \cdot h \cdot c_1 \cdot \omega(t), & R_2 < ST \\ x_{i,j}^t + Q \cdot L, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (22)$$

4.4 追随者更新策略改进

当 $i > n/2$ 时, 追随者位置迭代时逐渐趋近于 0, 与发现者更新存在相似问题, 同时由于其位置更新存在跳跃性, 容易跳过最优解。为了更好提升追随者性能, 本文在追随者公式中加入自适应余弦惯性权重机制^[19]来动态调节当前个体对下次迭代的影响。引入自适应余弦惯性权重公式为:

$$\delta(t) = \frac{\delta_{max} - \delta_{min}}{2} \cos\left(\frac{\pi t}{iter_{max}}\right) + \frac{\delta_{max} + \delta_{min}}{2} \quad (23)$$

引入自适应余弦惯性权重的追随者公式如下:

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} \delta(t) \cdot Q \cdot \exp\left(-\frac{x_{worst}^t - x_{i,j}^t}{i^2}\right), & i < \frac{N}{2} \\ x_{i,j}^t + \delta(t) \cdot |x_{i,j}^t - x_{i,j}^t| \cdot A^+ \cdot L, & i \geq \frac{N}{2} \end{cases} \quad (24)$$

选取 $\delta_{max} = 0.9, \delta_{min} = 0.1$ 为最小和最大权重, 通过加入惯性权重使追随者搜索随着迭代次数而变化, 提高追随者灵活性, 增大后期收敛精度。

4.5 多样化变异处理

算法收敛后期个体容易快速同化导致算法出现早熟现象。为此在种群聚集到一定程度时执行变异操作, 提高算法跳出局部最优空间的可能性。为更好观测种群聚集度, 引入指标 A ^[20]:

$$A = \frac{\delta - \bar{x}}{x^2} \quad (25)$$

式中: δ 为麻雀适应度方差; \bar{x} 为适应度均值。当种群大量聚集时, $A \gg 0$; 当种群较分散时, A 趋近于 0。同时为避免迭代初期出现种群聚集现象, 采用柯西变异对种群进行处理。

当 $t \leq iter_{max}/2$, 且 A 超过阈值时, 使用式(26)对全局最优解进行变异处理。

$$X = X_{best} + X_{best} \cdot Cauchy(0, 0.5) \quad (26)$$

4.6 算法流程

混合策略优化麻雀搜索算法(hybrid sparrow search algorithm, HSSA)流程如图 11 所示, 其中虚框为改进部分。

5 自抗扰控制器性能分析

5.1 控制器参数对系统性能影响

由式(7)可得, LESO 中 $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$ 的传递函数^[21]为:

$$Z_1(s) = \frac{b_0 s \cdot U(s)}{s^2 + l_1 s + l_2} + \frac{(l_1 s + l_2) \cdot Y(s)}{s^2 + l_1 s + l_2} \quad (27)$$

$$Z_2(s) = \frac{l_2 s \cdot Y(s)}{s^2 + l_1 s + l_2} - \frac{b_0 l_2 \cdot U(s)}{s^2 + l_1 s + l_2} \quad (28)$$

$$\text{由 } U(s) = \frac{k_p(R(s) - Z_1(s)) - Z_2(s)}{b_0} \text{ 得:}$$

$$U(s) = \frac{R(s)k_p(s^2 + l_1 s + l_2)}{b_0 s(s + l_1 + k_p)} - \frac{Y(s)(k_p l_1 s + l_2 s + k_p l_2)}{b_0 s(s + l_1 + k_p)} \quad (29)$$

对式(29)进行化简, 令 $N(s) = s(s + l_1 + k_p)$, $G(s) = k_p(s^2 + l_1 s + l_2)$, $H(s) = k_p l_1 s + l_2 s + k_p l_2$ 。化简后为:

$$U(s) = \frac{G(s)}{b_0 N(s)} R(s) - \frac{H(s)}{b_0 N(s)} Y(s) \quad (30)$$

由 $\dot{y} = f + b_0 u$ 可得 $sY(s) = F(s) + b_0 U(s)$ 。LADRC 的闭环传递函数为:

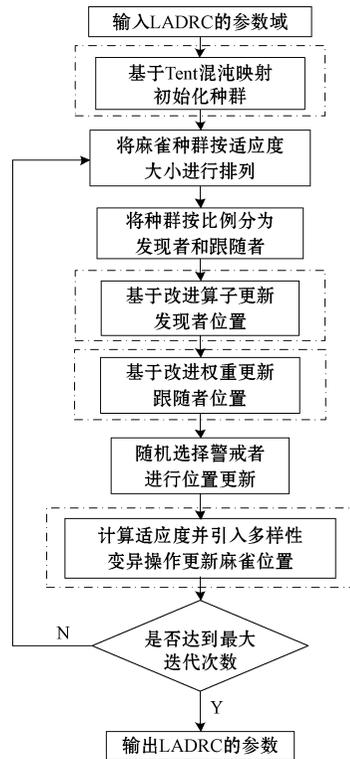


图 11 混合策略优化麻雀搜索算法流程

Fig. 11 Flow chart of sparrow search algorithm optimized by mixed strategies

$$Y(s) = \frac{N(s)F(s)}{sN(s) + H(s)} + \frac{G(s)R(s)}{sN(s) + H(s)} = \frac{N(s)F(s)}{sN(s) + H(s)} + \frac{k_p}{s + k_p} R(s) \quad (31)$$

由式(31)可知,控制器输出主要与输入信号跟踪项和系统干扰有关,其中输入信号跟踪项和 LSEF 参数有关。当忽略扰动项影响时,系统输入与输出传递函数为:

$$G_1(s) = Y(s)/R(s) = \frac{k_p}{s + k_p} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (32)$$

控制器参数对系统快速性影响如图 12 所示,可知,随

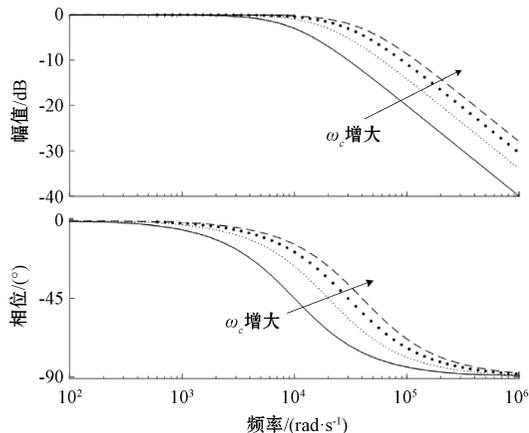


图 12 控制器参数对系统快速性的影响

Fig. 12 Influence of controller parameters on system responsiveness

着 ω_c 的增大,系统响应速度加快,即系统快速性随 ω_c 增大提高,但对噪音的灵敏度也会提高,且随着 ω_c 增大,系统跟踪速度对 ω_c 敏感程度降低。基于此规律调节 ω_c , 权衡系统的响应速度和噪音灵敏度。

5.2 观测器参数对系统性能影响

系统扰动是影响线性自抗扰系统性能的重要因素,自抗扰通过 LESO 对总扰动实时估计并补偿将控制对象变为积分串联型,即扰动抑制能力是自抗扰控制器性能的重要标准之一。定义 LESO 的估计误差为:

$$e_1 = z_1 - y, e_2 = z_2 - f \quad (33)$$

估计误差的状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - l_1 e_1 \\ \dot{e}_2 = -l_2 e_1 - \dot{f} \end{cases} \quad (34)$$

拉氏变换后可得总扰动到估计误差的函数为:

$$\begin{cases} G_{e1}(s) = \frac{e_1(s)}{f(s)} = \frac{s}{s^2 + l_1 s + l_2} \\ G_{e2}(s) = \frac{e_2(s)}{f(s)} = \frac{s^2 + l_1 s}{s^2 + l_1 s + l_2} \end{cases} \quad (35)$$

为分析 LESO 的估计性能和反馈增益的关系,式(35)将估计误差 e_i 和总扰动相互联系,实现 e_i 的纵向比较,即通过改变 LESO 的带宽 ω_0 比较 $G_{ei} (i = 1, 2)$ 在不同带宽下的频率特性。图 13(a)和(b)所示为 G_{ei} 的频域特性曲线。

由图 13 可知,对于 G_{e1} 和 G_{e2} , ω_0 增大均可有效降低总扰动的估计误差,且带宽的大小不会影响相角裕度。由图 13(b)可知,LESO 对高频扰动的抑制作用有限,即 LESO 受到带宽的限制。为减小系统跟踪误差,需要增大观测器带宽 ω_0 , 但增益过大会使噪声抑制能力变差,因此 ω_0 的取值需要平衡 LESO 的误差估计能力和噪声抑制能力。

6 仿真实验

为了验证本文所提出基于混合策略优化麻雀算法的自抗扰控制策略的有效性,在 MATLAB R2021b 上搭建双向 DC-DC 变换器并进行数字仿真。仿真环境为 Lenovo Legion R7000P2021 电脑,CPU 为 AMD Ryzen 5 5600 H,显卡为 RTX3050Ti Laptop GPU 4GB,内存为 16 GB,硬盘为 512 GB+1 TB 固态硬盘。针对不同工况,分别使用传统 LADRC、SSA-LADRC、HSSA-LADRC 控制。将 3 种不同策略下的直流母线输出电压波形和电感电流波形进行对比分析。

6.1 仿真参数

双向 DC-DC 变换器的参数如表 1 所示,电源采用超级电容,电容值为 300 F,内阻为 5.6 mΩ,起始电压为 900 V,工作温度为 25 °C。

选取电流的 PI 参数为 $k_{ip} = 13, k_{ii} = 120$ 。电压外环的 PI 参数为 $k_{up} = 0.6, k_{ui} = 300$ 。LADRC 外环参数为

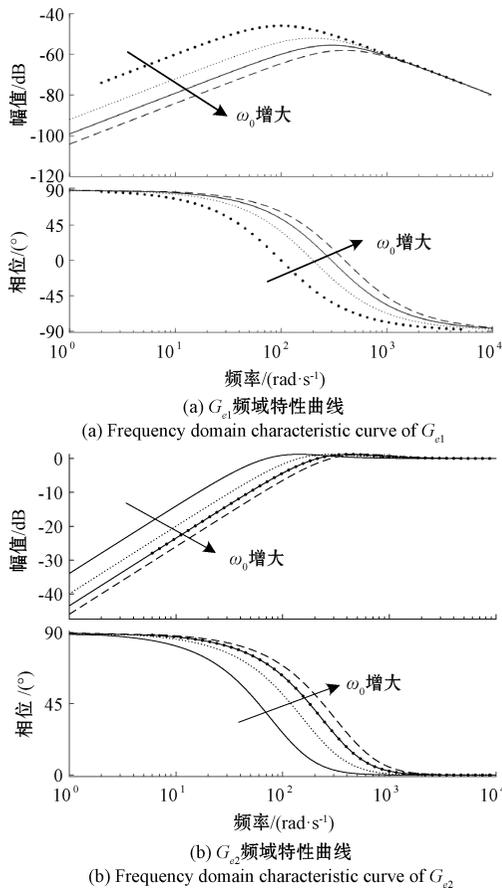


图 13 观测器参数对系统抗扰性影响

Fig. 13 Influence of observer parameters on system immunity

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	参数数值
开关频率/kHz	250
电容/ μF	700
电感/ μH	700
直流牵引网电压/V	1 500
负载/ Ω	2.5

$\omega_c = 800, b_0 = 8\ 000, \omega_0 = 1\ 600$ 。基于经验法选取参数上下限为 $\omega_c \in [700, 900], \omega_0 \in [1\ 500, 1\ 700]$ 。

6.2 工况分析

在整车正常运行的情况下,列车通过受电弓从接触网获取电能,供给牵引系统及辅助系统。控制器在整车正常运行状态下可分为牵引加速、惰行匀速、制动减速 3 种运行工况,图 14 所示为模拟列车的电机转速^[22],反应列车工况,由于列车牵引加速和制动减速时电压变化较大,因此本文只分析这两种工况。

6.3 仿真结果与分析

1) 启动加速阶段仿真分析

列车在 $0 \sim 0.01\ \text{s}$ 处于启动加速状态,此时列车从接

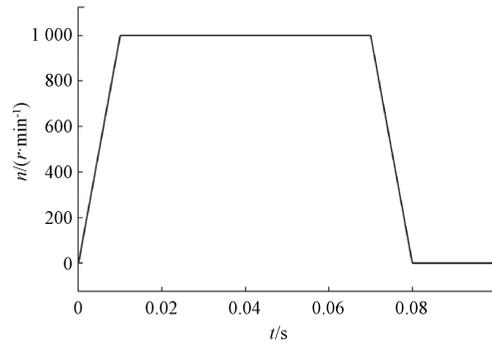
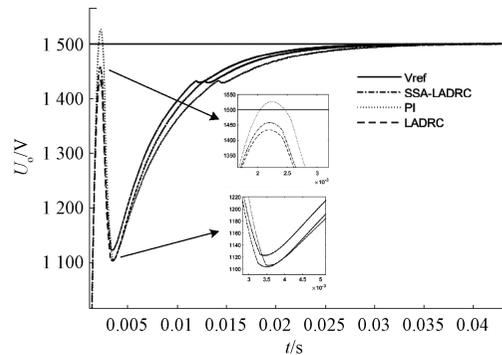


图 14 列车电机转速模拟

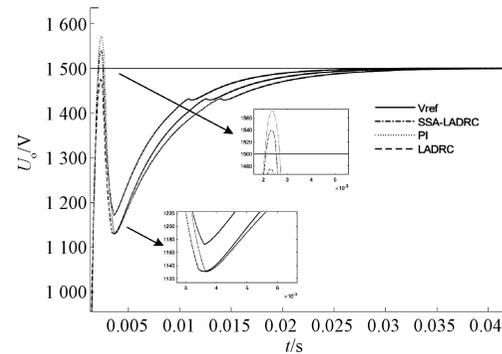
Fig. 14 Train motor speed simulation diagram

触网吸收大量能量,导致电网电压下降,影响列车运行状态。牵引网母线电压波形如图 15 所示,电感电流调节波形如图 16 所示。



(a) SSA-LADRC、LADRC、PI 电压波形对比

(a) SSA-LADRC, LADRC, PI voltage comparison



(b) HSSA-LADRC、LADRC、PI 电压波形对比

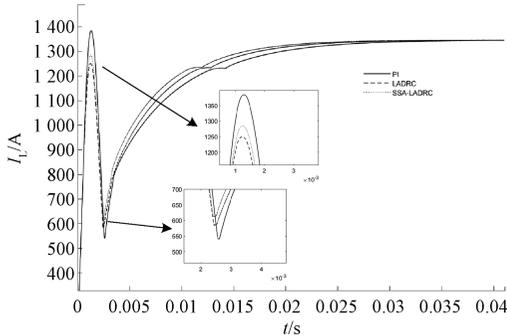
(b) HSSA-LADRC, LADRC, PI voltage comparison

图 15 加速阶段电压动态响应

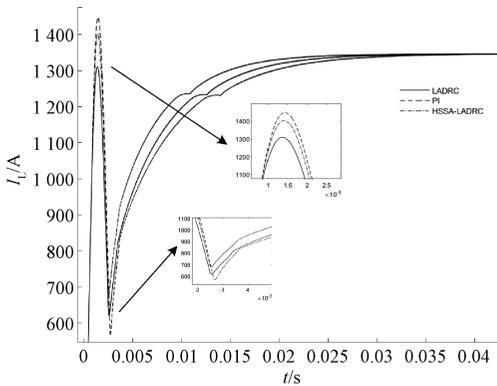
Fig. 15 Voltage response during acceleration phase

在不同控制策略下系统的电压跌落与电压、电流调节时间对比如表 2 所示。

通过仿真可得,在电压跌落, LADRC 和 PI 差别不大,但 LADRC 调节时间和抑制电流跌落的能力优于 PI,同时 SSA-LADRC 在电压、电流跌落和调节时间上较 LADRC 分别降低了 2.49%、31 A、0.004、0.003 5 s,而 HSSA-LADRC 较 LADRC 降低了 3.82%、70 A、0.006、



(a) SSA-LADRC、LADRC、PI电流波形对比
(a) SSA-LADRC, LADRC, PI current comparison



(b) HSSA-LADRC、LADRC、PI电流波形对比
(b) HSSA-LADRC, LADRC, PI current comparison

图 16 加速阶段电流动态响应

Fig. 16 Current response at acceleration stage

表 2 加速阶段控制性能比较

Table 2 Comparison of control performance in acceleration stage

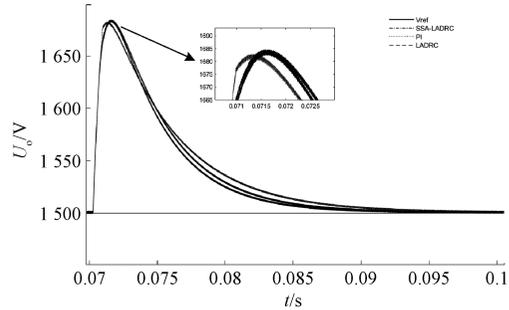
控制方案	PI	LADRC	SSA-LADRC	HSSA-LADRC
电压跌落/%	26.26	26.42	23.93	22.6
电压调节时间/s	0.041	0.035	0.031	0.029
电流调节时间/s	0.041 5	0.038	0.035 5	0.032
电流跌落/A	540	583	614	653

0.006 s, 控制性能优越。

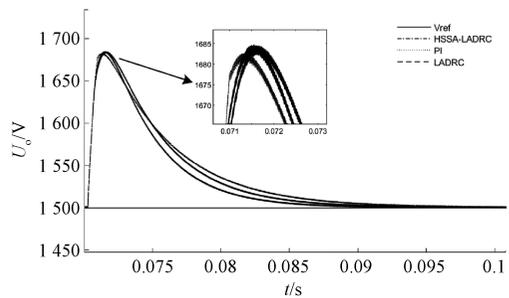
2) 制动减速阶段仿真分析

列车在 0.07~0.08 s 减速, 减速过程产生电能被储能装置吸收, 部分传输回接触网, 导致电网电压升高。牵引母线电压变化如图 17 所示, 电感电流波形如图 18 所示, 减速阶段不同控制策略的性能对比如表 3 所示, 由于减速阶段电感电流无超调, 因此不作分析。

由牵引网母线电压波形可知, HSSA-LADRC 的调节时间分别较 SSA-LADRC 和 LADRC 减小 0.001 5 和 0.002 5 s, 稳压效果明显, 通过对比电流调节时间可得, HSSA-LADRC 的调节时间较 SSA-LADRC 减小 0.001 5 s, 较 LADRC 减小 0.004 9 s, 即 HSSA-LADRC 可以实现快



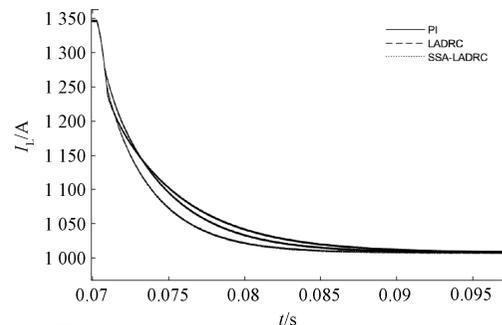
(a) SSA-LADRC、LADRC、PI电压波形对比
(a) SSA-LADRC, LADRC, PI voltage comparison



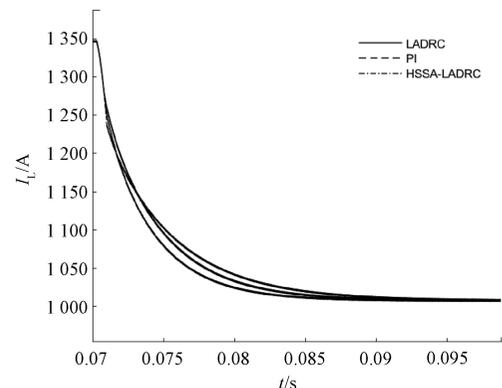
(b) HSSA-LADRC、LADRC、PI电压波形对比
(b) HSSA-LADRC, LADRC, PI voltage comparison

图 17 减速阶段电压动态响应

Fig. 17 Voltage response in deceleration stage



(a) SSA-LADRC、LADRC、PI电流波形对比
(a) SSA-LADRC, LADRC, PI current comparison



(b) HSSA-LADRC、LADRC、PI电流波形对比
(b) HSSA-LADRC, LADRC, PI current comparison

图 18 减速阶段电流动态响应

Fig. 18 Current response at deceleration stage

表3 减速阶段控制性能比较

Table 3 Comparison of control performance in deceleration stage

控制方案	PI	LADRC	SSA-LADRC	HSSA-LADRC
电压超调/%	12.1	12.23	12.266	12.266
电压调节时间/s	0.099 4	0.096 5	0.095 5	0.094
电流调节时间/s	0.028	0.025 4	0.022	0.020 5

速稳定电流。

由图 15~18 可知,当储能控制系统面临相同工况时,HSSA-LADRC 对母线电压和电感电流的调节速度快于 SSA-LADRC 和 LADRC。此外,HSSA-LADRC 能有效抑制加速阶段的电压降落。表明 HSSA-LADRC 可有效抑制扰动对系统的影响,提高牵引网电能质量。

7 结 论

本文针对车载储能控制系统的强非线性、易受扰动影响等特点,提出了基于混合策略优化麻雀算法的自抗扰控制。针对控制系统的放电模式设计自抗扰控制器,引入麻雀搜索算法并针对算法自身缺陷进行混合策略优化,利用 Tent 混沌映射的高遍历均匀性避免 SSA 寻优过程出现局部最优解,结合改进樽海鞘算子提升算法的前期搜索能力和后期收敛速度,使用自适应余弦惯性权重机制提高追随者灵活性,同时增大后期收敛精度。之后用本文提出的方法对控制器带宽进行寻优调整,实现对 LADRC 参数的快速、高效的调整。并在不同运行工况下对改进的方案进行仿真验证,通过对比各工况的性能指标,证明基于混合策略优化麻雀算法的自抗扰控制具有更好控制效果。

参 考 文 献

[1] 王俭朴,李瑞,洪磊. 地铁车辆车载超级电容储能系统的配置与经济性评估[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(10):201-205.
WANG J P, LI R, HONG L. Configuration and economic evaluation of on-board supercapacitor energy storage system for subway vehicles [J]. Urban Rail Transit Research,2022,25(10):201-205.

[2] 葛艳华,刘金晶,宫钰明,等. 超级电容车载应急牵引系统 DC/DC 变换器研制[J]. 电力电子技术,2020,54(5):122-124,129.
GE Y H, LIU J J, GONG Y M, et al. Development of DC/DC converter for vehicle emergency traction system with supercapacitor [J]. Power Electronics Technology, 2020, 54(5):122-124,129.

[3] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策,1998,13(1):19-23.
HAN J Q. Self-disturbance rejection controller and its

application [J]. Control and Decision, 1998,13(1):19-23.

[4] FENG X, ZHANG Y, WANG Z, et al. Improved linear active disturbance rejection control strategy based on RBF neural network for main steam temperature of thermal power boiler[C]. 2022 34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2022: 248-255.

[5] 付建哲,郭昆丽,闫东. 直流微电网内双向 DC-DC 变换器的自抗扰控制研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(3):47-52.
FU J ZH, GUO K L, YAN D. Research on self-disturbance rejection control of bidirectional DC-DC converter in DC microgrid [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(3): 47-52.

[6] 石波,李待兴,郭伟,等. 小型压水堆稳压器多变量自抗扰解耦控制研究[J]. 核动力工程,2021,42(5):143-148.
SHI B, LI D X, GUO W, et al. Research on multivariable self-adaptive disturbance rejection decoupling control of small pressurized water reactor stabilizer [J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(5): 143-148.

[7] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用,2013,30(12):1498-1510.
GAO ZH Q. Research on the idea of active disturbance rejection control [J]. Control Theory and Applications, 2013, 30(12):1498-1510.

[8] 李浩东,肖伸平,余锦. 基于自适应 PSO 的微电网双向 DC-DC 变换器前馈自抗扰控制[J]. 电机与控制应用,2023,50(2):73-81.
LI H D, XIAO SH P, YU J. Feedforward active disturbance rejection control for microgrid bidirectional DC-DC converter based on adaptive PSO[J]. Electric Machines and Control Applications, 2019,50(2):73-81.

[9] 周涛. 基于差分进化算法的线性自抗扰控制参数优化[J]. 航空兵器,2021,28(1):98-103.
ZHOU T. Parameter optimization of linear active disturbance rejection control based on differential evolution algorithm [J]. Aeronautical Weapons, 2021,28(1):98-103.

[10] 韩乐. 车载混合储能动力系统功率最优分配策略研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(10):94-98.
HAN L. Research on optimal power distribution strategy of vehicular hybrid energy storage power system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2020,39(10):94-98.

[11] 马幼捷,姜欣宇,周雪松. 基于三相四线制

- DSTATCOM的新型线性自抗扰控制策略[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 23-30.
- MA Y J, JIANG X Y, ZHOU X S. Novel linear active disturbance rejection control Strategy based on three-phase four-wire DSTATCOM [J]. Electronic Measurement Technology, 21, 44(16): 23-30.
- [12] 王伟, 赵哲. 具有动态和输入不确定性的航空发动机自抗扰控制[J]. 航空科学技术, 2023, 34(7): 36-42.
- WANG W, ZHAO ZH. Aero engine active disturbance rejection control with dynamic and input uncertainties [J]. Aeronautical Science and Technology, 2019, 34(7): 36-42.
- [13] 贺佳飞. 光电稳定平台视轴自抗扰控制技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- HE J F. Research on visual axis active disturbance rejection control technology of optoelectronic stabilized platform [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2022.
- [14] 龚格格. 四旋翼无人机轨迹跟踪的自抗扰控制研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.
- GONG G G. Research on active disturbance rejection control for four-rotor UAV trajectory tracking [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022.
- [15] 薛建凯. 一种新型的群智能优化技术的研究与应用[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- XUE J K. Research and application of a new group intelligent optimization technology [D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [16] 孙家文, 张齐文, 孙永哲, 等. 基于混沌鲸鱼算法的自抗扰永磁同步电机控制[J]. 内燃机与配件, 2021(12): 84-86.
- SUN J W, ZHANG Q W, SUN Y ZH, et al. Control of permanent magnet synchronous motor based on chaotic whale optimization algorithm [J]. Internal Combustion Engines and Parts, 2021(12): 84-86.
- [17] 杨广亮, 万俊杰. 基于WOA-VMD-ISSA-LSSVM的商业短期电力负荷预测研究[J]. 现代建筑电气, 2023, 14(8): 7-15.
- YANG G L, WAN J J. Research on short-term electricity load forecasting in commercial buildings based on WOA-VMD-ISSA-LSSVM [J]. Modern Building Electrical Engineering, 2023, 14(8): 7-15.
- [18] 宋立钦, 陈文杰, 陈伟海, 等. 基于混合策略的麻雀搜索算法改进及应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(8): 2187-2199.
- SONG L Q, CHEN W J, CHEN W H, et al. Improvement and application of sparrow search algorithm based on hybrid strategy [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(8): 2187-2199.
- [19] 宋扬, 石勇, 刘宝泉, 等. 基于改进麻雀搜索算法的机场微电网优化调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 33-40.
- SONG Y, SHI Y, LIU B Q, et al. Optimization and scheduling strategy of airport microgrid based on improved sparrow search algorithm [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 33-40.
- [20] 张晓萌, 张艳珠, 刘禄, 等. 融合多策略的改进麻雀搜索算法[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(4): 1086-1091, 1117.
- ZHANG X M, ZHANG Y ZH, LIU L, et al. Improved sparrow search algorithm with multiple strategies integration [J]. Computer Application Research, 2022, 39(4): 1086-1091, 1117.
- [21] 陶珑, 王萍, 王议锋, 等. 微电网低压接口变换器的参数寻优自抗扰控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(16): 4202-4211.
- TAO L, WANG P, WANG Y F, et al. Parameter optimization of auto-disturbance rejection control for low-voltage interface converters in microgrids [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(16): 4202-4211.
- [22] 师同彦, 张彦兵, 王伟, 等. 地铁牵引控制系统的Simulink建模研究[J]. 电力学报, 2017, 32(3): 188-193, 256.
- SHI T Y, ZHANG Y B, WANG W, et al. Research on simulink modeling of subway traction control system [J]. Journal of Electric Power, 2017, 32(3): 188-193, 256.

作者简介

王晨, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电、电力系统控制。

E-mail: 2095320441@qq.com

周雪松(通信作者), 博士, 主要研究方向为新能源发电、电力系统控制。

E-mail: sjteam2023@163.com