

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2023) 04-070-05 中图分类号: TM77

# 优化过流继电器与距离继电器协调组合最佳距离

Optimize the Coordination and Combination of Overcurrent Relay and Distance Relay

★ 李永胜, 李致宇 (山东天瑞重工有限公司, 山东 潍坊 261061)

**摘要:** 由于过流继电器运行速度慢, 因此采用距离继电器作为分输电系统的主要保护装置, 采用过流继电器作为分输电系统主距离保护的后备保护, 即过流继电器为距离继电器的区域-2运行提供后备保护。本研究采用差分进化算法和混合变异技术算法对过流继电器的距离进行了优化协调, 并对备用过流继电器的时间刻度盘设置 (TDS)、插头设置 (PS) 以及区域-2设置与临界点过流继电器后备运行之间的协调时间间隔 (CTI) 进行了优化。将优化结果与遗传算法的优化结果进行比较, 结果表明, 差分进化不会产生失调, 也不会违反协调时间裕度。

**关键词:** 分传动系统; 距离继电器; 过电继电器; 最优中继协作

**Abstract:** The slow running speed of the overcurrent relay forces the use of the distance relay as the main protection device of the sub-transmission system. The overcurrent relay is used as backup protection of main distance protection in the sub-transmission system. The overcurrent relay provides backup protection for the zone-2 operation of the distance relay. The differential evolution algorithm and hybrid mutation algorithm are used to optimize and coordinate the distance of the overcurrent relay. The time dial setting (TDS) and plug setting (PS) of the standby overcurrent relay were optimized. The coordination time interval (CTI) between the zone-2 setting and the backup operation of the critical point overcurrent relay is optimized, and the optimization results are compared with those of the genetic algorithm. It can be seen that differential evolution does not produce dissonance and does not violate the coordination time margin.

**Key words:** Transmission system; Distance relay; Over current relay; Optimal relay cooperation

继电保护系统是指当电力系统发生故障或异常工况时, 在可能实现的最短时间和最小区域内, 自动将故障设备从系统中切除, 或发出信号由值班人员消除异常工况根源, 以减轻或避免设备的损坏和对相邻地

区供电的影响。保护系统必须对配电系统的故障作出快速、选择性和可靠的响应。过流保护是配电系统中最基本的继电保护方案之一。过流保护更经济, 它不需要在距离和差动保护方案中使用昂贵的通信设备, 因此在配电水平上更受欢迎。过流继电器被用作重网格和多源配电系统的主保护和备份保护<sup>[1-3]</sup>。

过流继电器的低速迫使距离继电器应用于保护子传输系统。因此, 距离继电器和过流继电器的配合在子传输系统的保护中起着重要作用<sup>[4-6]</sup>。在进行协调之前, 必须找到距离继电器和备用过电流继电器之间的时间裕度最小的关键故障位置<sup>[7-8]</sup>。在制定过流继电器和距离继电器联合协调方案时, 我们考虑了故障位置等五个不同的临界点。距离继电器是主要保护, 过流继电器是备用保护。距离继电器的三个区域特性与过流继电器的反时限特性相协调, 当子传输系统发生故障时, 距离继电器的区域-1必须对其作出响应。如果区域-1保护失败, 区域-2应将其清除。因此, 过流继电器为距离继电器提供后备保护<sup>[9-11]</sup>。

本文研究了多源多回路系统中过流继电器距离的优化协调问题, 进行了距离继电器协调与方向性过流继电器协调的集成, 并采用差分进化算法和混合变异技术算法对过流继电器的距离进行了优化协调, 对备用过流的时间刻度盘设置 (TDS)、插头设置 (PS) 以及区域-2设置与临界点过流继电器后备运行之间的协调时间间隔 (CTI) 进行了优化, 并将优化结果与遗传算法的优化结果进行了比较。结果表明, 差分进化不会产生失调, 也不会违反协调时间裕度。

## 1 最优过流继电器问题的公式化

在协调程序中，必须计算两种类型的抽头设置，即PS和TDS。每个继电器的电流设置由两个参数决定，即最小故障电流和最大负载电流。对于TDS计算，使用优化技术优化目标函数。目标函数是在图1和图2所示的关键故障下安装的所有过流继电器的总运行时间之和。如果在F4点发生故障，距离继电器将作为其区域-2设置的主保护运行。如果无法运行，则过流继电器在协调时间余量后作为备用继电器运行。

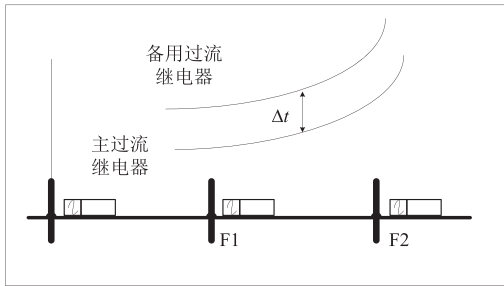


图1 近端和远端故障

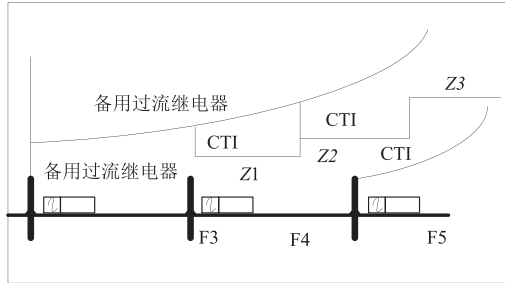


图2 过流继电器协调临界点

### 1.1 正常协调约束（仅限过电流继电器协调）

(1) 每个继电器的TDS界限<sup>[12]</sup>为：

$$TDS_i^{\min} \leq TDS_i \leq TDS_i^{\max} \quad (1)$$

式(1)中， $TDS_i^{\min}$ 和 $TDS_i^{\max}$ 分别是继电器 $R_i$ 的TDS的最小值和最大值，其值分别取0.025和1.2秒。每个继电器的拾取电流 $I_p$ 设置界限如式(2)所示：

$$I_{pickup}^{\min} \leq I_p \leq I_i^{\max} \quad (2)$$

对于标准反向定时继电器 $\gamma$ 为0.02， $\alpha$ 为0.14。

(2) 协调标准（选择性约束）

主继电器和备用继电器同时检测到故障，为避免误操作，备用继电器应仅在主继电器无法运行时才接管跳闸动作。如果 $R_i$ 是k处故障的主继电器， $R_j$ 是相同故

障的备用继电器，那么协调约束可以表述为<sup>[13-14]</sup>：

$$t_{i,k} - t_{j,k} = \Delta t \quad (3)$$

式(3)中，对于k点故障， $t_{i,k}$ 为主继电器 $R_i$ 工作时间； $t_{j,k}$ 为备份中继 $R_j$ 的工作时间； $\Delta t$ 为CTI，一般取0.3秒。

### 1.2 过流继电器协调距离对应的约束条件

距离继电器与过流继电器协调的五个关键点是F1和F2，如图1所示，对应于近端和远端故障。点F3、F4和F5对应于距离保护的每个区域的启动，在该区域，过电流继电器的CTI最小。关键点标记在图2中。如果在F4点发生故障，则距离继电器作为其区域-2设置的主保护运行。如果无法运行，则过流继电器在协调时间余量后作为备用继电器运行。因此，过流继电器协调对应的目标函数表达式修改如下<sup>[15]</sup>：

(1) 过流继电器协调的限制

当故障发生在近端点(F1)和远端点(F2)时，CTI为：

$$tb(F1) - tm(F1) \geq CTI1 \quad (4)$$

$$tb(F2) - tm(F2) \geq CTI1 \quad (5)$$

式(4)、(5)中， $tb(Fi)$ 和 $tm(Fi)$ 是备用继电器和主继电器在图1所示临界点F1和F2处的工作时间。

(2) 距离继电器和过流继电器协调的限制

过流继电器应为距离继电器的区域-2故障提供后备保护。因此，当故障发生在区域-1起点(F3点)和区域-2起点(F4点)时，约束条件如下：

$$tb(F3) - tz1 \geq CTI2 \quad (6)$$

$$tb(F4) - tz2 \geq CTI2 \quad (7)$$

式(6)、(7)中， $tb(F3)$ 和 $tb(F4)$ 是F3和F4故障的过流继电器的备用操作时间， $tz1$ 和 $tz2$ 是距离继电器的区域-1和区域-2设置。区域-1瞬时运行(20ms)，覆盖80%的线段。区域-2在0.3秒延时后运行，覆盖下一条最短线路的剩余20%和50%。

(3) 距离约束作为过流继电器协调的备份

设置过流继电器为距离继电器区域-2备份的主继电器，应在距离继电器区域-2设置之前操作。这个点在图2中标记为F5，如式(8)所示：

$$tz2 - tm(F5) \geq CTI3 \quad (8)$$

目标函数的表达式如式(9)所示：

$$OF = OF_{OC-OC} + OF_{OC-DIS} + OF_{DIS-OC} \quad (9)$$

其中:

$$OF_{OC-OC} = \alpha * \sum_{n=1}^N t_n + \beta_1 * \sum_{k1=1}^{p1} (\Delta t_{mboc} | F_1 | - |\Delta t_{mboc} | F_1 |)^2 + \beta_1 * \sum_{k1=1}^{p1} (\Delta t_{mboc} | F_2 | - |\Delta t_{mboc} | F_2 |)^2 + \beta_2 * \sum_{k1=1}^{p1} (\Delta t_{mboc} | F_1 | - |\Delta t_{mboc} | F_1 |)^2 + \beta_3 * \sum_{k1=1}^{p1} (\Delta t_{mboc} | F_2 | - |\Delta t_{mboc} | F_2 |)^2 \quad (10)$$

$$OF_{OC-DIS} = \beta_1 * \sum_{k2=1}^{p2} (\Delta t_{mbocdis} | F_3 | - |\Delta t_{mbocdis} | F_3 |)^2 + \beta_1 * \sum_{k2=1}^{p2} (\Delta t_{mbocdis} | F_4 | - |\Delta t_{mbocdis} | F_4 |)^2 + \beta_4 * \sum_{k2=1}^{p2} (\Delta t_{mbocdis} | F_3 | - |\Delta t_{mbocdis} | F_3 |)^2 + \beta_5 * \sum_{k2=1}^{p2} (\Delta t_{mbocdis} | F_4 | - |\Delta t_{mbocdis} | F_4 |)^2 \quad (11)$$

$$OF_{DIS-OC} = \beta_6 * \sum_{k3=1}^{p3} |\Delta t_{mbdisoc} | \quad (12)$$

式(10)、(11)和(12)中,  $\beta_1$ 到 $\beta_6$ 是加权因子,  $k_1$ 是从1到 $p_1$ 的主/备用反向定时继电器的数量,  $k_2$ 为从1到 $p_2$ 的主距离继电器和备用反向定时继电器的数量,  $k_3$ 为从1变化到 $p_3$ 的主距离继电器和备用反向定时继电器的数量,  $\Delta t_{mboc} | F_i |$ 是主/备用反向定时继电器之间对 $F_i$ 发生故障的判别时间,  $\Delta t_{mbocdis} | F_i |$ 是主距离继电器和备用反向定时继电器之间对 $F_i$ 发生故障的判别时间<sup>[16]</sup>。其中:

$$\Delta t_{mboc} | F_i | = t_{boc} | F_i | - t_{moc} | F_i | - CTI1 \quad (13)$$

$$\Delta t_{mbocdis} | F_i | = t_{bdis} | F_i | - t_{mdis} | F_i | - CTI2$$

式(13)中,  $t_{boc} | F_i |$ 和 $t_{moc} | F_i |$ 分别是主/备用反向定时继电器用于 $F_i$ 故障的工作时间,  $t_{bdis} | F_i |$ 和 $t_{mdis} | F_i |$ 是主距离继电器在 $F_i$ 的第一个区域的工作时间,  $\Delta t_{mbdisoc} | F_i |$ 适用于减少距离继电器的区域-2工作时间, 其定义如下:

$$\Delta t_{mbdisoc} | F_i | = t_{z2} | F_i | - CTI3 \quad (14)$$

式(14)中,  $t_{z2}$ 是优化算法迭代期间的区域-2运行时间, 计算如下:

$$t_{z2} = \max(t_m(F_5) + CTI3, t_z) \quad (15)$$

式(15)中,  $t_z$ 是距离继电器区域-2的初始工作时间。

## 2 继电器优化协调的进化算法

最优化方法分为传统优化方法和启发式优化方法两大类。传统优化方法大多利用目标函数的梯度(或导数)信息实现单可行解的惯序、确定性搜索;启发式优化方法以仿生算法为主,通过启发式搜索策略实现多可行解的并行、随机优化。启发式搜索算法不要求目标函

数连续、可微等信息,具有较好的全局寻优能力。在众多启发式优化方法中,差分进化算法是一种基于群体差异的启发式随机搜索算法,是R.Store和K.Price为求解Chebyshev多项式而提出的,具有原理简单、受控参数少、鲁棒性强等优点。进化算法受到物种自然进化的启发,已成功应用于电力系统、机械工程、通信和模式识别等多个领域<sup>[17-18]</sup>。在差分进化算法中,存在许多试验向量生成策略,其中一些可能适合解决某个特定问题。差分进化算法旨在演化出非确定性多项式D-维参数向量的种群,即所谓的个体,它将候选编码为全局最优解。第 $g$ 代第 $i$ 个向量的参数为:

$$X_{(i)}^g = \{x_{(1,1)}^1, x_{(2,2)}^2, \dots, x_{(j,j)}^j, \dots, x_{(N,D)}^G\} \quad (16)$$

式(16)中,  $g=1, 2, \dots, G$ 和 $i=1, 2, \dots, N$ ,  $g$ 是最大代数,  $N$ 是种群规模,  $D$ 是维度。在边界约束条件下,种群的初始化应尽可能均匀覆盖整个区域,假设上边界和下边界分别为 $X^{\min}$ 和 $X^{\max}$ ,如式(17)所示。

$$X^{\min} = \{x_1^{\min}, x_2^{\min}, \dots, x_j^{\min}, \dots, x_D^{\min}\} \quad (17)$$

$$X^{\max} = \{x_1^{\max}, x_2^{\max}, \dots, x_j^{\max}, \dots, x_D^{\max}\}$$

第一代第 $i$ 个向量的第 $j$ 个参数随机初始化方程为:

$$x_{(i,j)}^1 = x_j^{\min} + \text{rand}_{(i,j)} \times (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad (18)$$

式(18)中,  $\text{rand}_{(i,j)}$ 表示(0, 1)范围内的均匀分布随机变量。

### (1) 变异操作

初始化之后,差分进化算法使用突变操作生成一个针对当前种群中每个个体 $X$ 的突变向量 $V$ ,即当前种群中的目标向量。对于第 $g$ 代的每个目标向量 $X$ ,其相关的突变向量如式(19)所示:

$$V_{(i)}^g = \{v_{(i,1)}^g, v_{(i,2)}^g, \dots, v_{(i,j)}^g, \dots, v_{(i,D)}^g\} \quad (19)$$

在差分进化算法中实现的五种最常用的突变策略如式(20)所示<sup>[19-20]</sup>:

$$V_{(i)}^g = X_{(\alpha)}^g + F \times (X_{(\beta)}^g - X_{(\gamma)}^g)$$

$$V_{(i)}^g = X_{best}^g + F \times (X_{(\alpha)}^g - X_{(\beta)}^g)$$

$$V_{(i)}^g = X_{(i)}^g + F_1 \times (X_{best}^g - X_{(i)}^g) + F_2 \times (X_{(\alpha)}^g - X_{(\beta)}^g) \quad (20)$$

$$V_{(i)}^g = X_{best}^g + F_1 \times (X_{(\alpha)}^g - X_{(\beta)}^g) + F_2 \times (X_{(\gamma)}^g - X_{(\delta)}^g)$$

$$V_{(i)}^g = X_{(\alpha)}^g + F_1 \times (X_{(\beta)}^g - X_{(\gamma)}^g) + F_2 \times (X_{(\delta)}^g - X_{(\eta)}^g)$$

指标 $\alpha, \beta, \gamma, \zeta, \eta$ 是在 $[1, N]$ 范围内随机生成的互斥整数,与指标 $i$ 不同,这些指标对特定第 $g$ 代的每个突变向量随机生成一次。尺度因子 $F, F_1$ 和 $F_2$ 是缩放差

值向量的正控制参数, 是第 $g$ 代群体中适应度值最好的最佳个体向量。

### (2) 交叉操作

突变阶段结束后, 对目标向量 $X_{(i)}^g$ 及其对应的突变向量 $V_{(i)}^g$ 的每一对进行交叉运算, 生成一个试验向量 $U_{(i)}^g$ 。在基础版本中, 差分进化算法采用二项(均匀)交叉求出试验向量。

$$u_{(i,j)}^g = \begin{cases} v_{(i,j)}^g & \text{如果}(\text{rand}_{(i,j)} \leq Cr) \text{ 或 } j = j_{\text{rand}} \\ x_{(i,j)}^g & \text{其它} \end{cases} \quad (21)$$

式(21)中, 交叉速率 $C_r$ 是(0, 1)范围内用户指定的常数, 它控制从突变向量复制的参数值的比例。

$j_{\text{rand}}$ 是在[1, D]范围内随机选择的整数。

### (3) 选择操作

如果新生成的试探向量的某些参数值超过了相应的上下限, 我们将在预先指定的范围内随机一致地重新初始化它们。然后, 评估所有试验向量的目标函数值, 最后执行选择操作。

## 3 算法实现

### 3.1 问题表述

如图3所示的一个案例研究由7条线路、6路总线、2台变压器和2台发电机组成。在开始优化反向定时继电器和距离继电器之前, 必须协调所有分支的距离继电器。在本文中, 对于所考虑的网络, 我们得到了距离继电器的设置(即第一、第二和第三区域的阻抗加上相对操作时间)。所有距离继电器的第一、第二和第三区域的操作时间分别为20ms、0.3s和0.6s, 所有线路的起始第二区的所有点都是线路的80%。假设所有线路都受到距离继电器和反向定时继电器的保护。

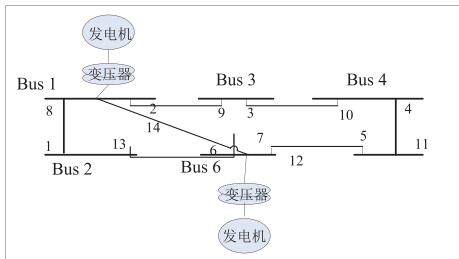


图3 IEEE 6总线系统

### 3.2 优化继电器设置

选取过流继电器作为后备继电器的控制参数, 采用差分进化算法对TDS和PS值进行优化。最佳设置如

表1所示。

表1 最佳过流继电器设置

继电器	TDS	PS
1	0.40952	0.95767
2	0.44215	1.08779
3	0.344	1.51803
4	0.35356	0.56566
5	0.40374	0.297
6	0.46922	1.49284
7	0.406	0.85524
8	0.52154	0.7856
9	0.31917	0.67792
10	0.28314	1.55611
11	0.37603	1.29726
12	0.53303	0.94027
13	0.39596	0.77006
14	0.37036	1.02891

四个临界点的协调时间裕度如表2所示。每个裕度值为正意味着备用继电器操作有足够的时间裕度, 距离继电器与过流继电器的协调保持良好。该结果与遗传算法得到的优化值进行了比较, 其中BK为备用继电器, PR为主继电器。从结果可以看出, 差分进化不会产生失调, 也不会违反协调时间裕度。

表2 协调优势

BK	PR	F1( $\Delta t_{\text{mboc}}$ )	F2( $\Delta t_{\text{mboc}}$ )	F3( $\Delta t_{\text{mboc}}$ )	F4( $\Delta t_{\text{mboc}}$ )
2	1	0.246246	0.878509	1.005094	1.258488
14	1	0.349595	0.003677	1.014488	1.175354
3	2	0.011033	0.069547	0.692923	0.642234
4	3	0.012382	0.069547	0.734751	0.656691
5	4	0.001027	0.518508	0.694201	0.894951
6	5	0.123573	2.70511	0.946475	3.579345
7	5	0.298521	0.002529	0.951751	1.071868
1	6	0.116471	0.498676	0.838605	1.037654
2	7	5.68E-05	0.336226	0.758905	0.814987
8	7	0.022531	2.761845	0.761111	3.896011
13	8	0.022531	0.109159	0.726956	0.755516
8	9	0.457196	0.009822	1.201789	3.980607
14	9	0.54641	0.200492	1.211303	1.789647
9	10	4.58E-05	1.020226	0.689624	1.116579
10	11	0.041159	0.144282	0.631155	0.621151
11	12	0.000789	0.00892	0.721066	0.532774
7	13	0.296036	4.45E-05	0.949266	1.079912
12	13	0.130023	0.611923	0.94047	1.086423
6	14	0.001734	2.516472	0.824635	3.061673
12	14	0.011501	0.415682	0.821948	0.91285

## 4 结语

子输电系统采用网状结构, 距离继电器是主要的保护装置, 备用保护由过电流继电器提供。差分进化算法可用于优化过电流继电器区域-2设置和备用操作之间的协调时间间隔, 也可用于优化中继参数的混合变异方案。将该算法结果与遗传算法得到的优化值进行比较, 从结果可以看出, 差分进化不会产生失调, 也不会违反

协调时间裕度。**AP**

### 作者简介:

**李永胜** (1961-), 山东潍坊人, 总工程师, 本科, 现就职于山东天瑞重工有限公司, 主要从事磁悬浮和凿岩机械技术研究工作。

**李致宇** (1986-), 山东潍坊人, 工程师, 本科, 现就职于山东天瑞重工有限公司, 主要从事凿岩机械技术和大数据运维研究。

### 参考文献:

- [1] 冯海宁, 刘彦辉, 陈升武, 等. 电力系统保护与继电器技术应用发展研究[J]. 山西电子技术, 2021, 5: 74 - 76.
- [2] Chen Q, Zhou XT, Sun MX, Zhang XT. Fault tracking Method for Relay Protection Devices[J]. Energies, 2021, 14 (9) : 2723.
- [3] 吴玉玲, 王能胜, 王黄磊, 江涛. 继电保护自动化技术在电力系统中的应用研究[J]. 信息技术, 2021, 4: 164 - 169.
- [4] 陈金刚, 张志伟, 高春林. 继电器在电机控制保护电路中的应用和发展[J]. 船电技术, 2020, 40 (09) : 58 - 60.
- [5] 薛晨. 基于状态信息关联性的变电站继电保护实时检测方法研究[J]. 电气传动自动化, 2022, 44 (05) : 44 - 47.
- [6] 李志刚, 丁宁, 成诚, 郑小立, 蒋学平. 继电保护二次回路缺陷及故障处理对策研究[J]. 设备管理与维修, 2022, 14: 72 - 73.
- [7] Kumar P, Kumar V, Pratap R. RT-HIL Verification of FPGA-Based Communication-Assisted Adaptive Relay for Microgrid Protection[J]. Electrical Engineering, 104 (3) : 1277 - 1287.
- [8] 汪敏, 孙达山, 张健. 量子粒子群算法优化PID的继电保护在线整定研究[J]. 微型电脑应用, 2022, 38 (07) : 95 - 98.
- [9] 李敏, 年安君, 王洁, 徐晓明. 继电保护与通信设备光口直连技术的研发和应用[J]. 电子设计工程, 2022, 30 (13) : 151 - 159.
- [10] 关悦. 电力系统继电保护可靠性研究[J]. 光源与照明, 2022, (04) : 180 - 182.
- [11] 杨林, 朱成亮, 刘彬. 电网继电保护综合自动化系统分析[J]. 时代农机, 2019, 46 (11) : 86 - 87.
- [12] 丁宝帅, 崔悦, 李琳, 李淼, 高永俊, 张成, 王志宏, 韩明彤. 电力系统继电保护安全运行的措施分析[J]. 山东工业技术, 2018, 21.
- [13] 李杰. 配电网单相接地故障继电保护原理与故障定位方法研究[M]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [14] Strezoski L, Stefani I, Bekut D. Novel Method for Adaptive Relay Protection in Distribution Systems With Electronically-Coupled DERs[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 116 : 105551.
- [15] 李彦宾. 新能源场站送出线路继电保护原理研究[M]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [16] 陈实. 含新能源发电系统的联络线继电保护方案研究[M]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [17] 林剑, 叶璟轩, 刘雯雯, 邵晓雯. 求解带容量约束车辆路径问题的多模态差分进化算法[J]. 计算机应用, 2022, 9.
- [18] Civicioglu P, Besdok E. Bernstein-Search Differential Evolution Algorithm for Numerical Function Optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 138 : 112831.
- [19] 余伟, 梁恒辉, 罗映. 一种改进差分进化算法的分数阶系统辨识研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33 (05) : 1157 - 1166.
- [20] Huang CW, Bai H, Yao X. Online Algorithm Configuration for Differential Evolution Algorithm[J]. Applied Intelligence, 2022, 52 (8) : 9193 - 9211.