

Application of genetic algorithm based on controllable crossover in magnetic field

Deng Yongxian

Soochow University, Suzhou

Abstract: The operator uses the controllable overlapping genetic algorithm, whose convergence rate is quicker, the convergence is better, the permanent magnet optimize structure which obtains is helpful in reducing the electric arc bending strain when the short-circuit current is open and improving the open performance of SF₆ circuit breaker.

Key words: genetic algorithm; controllable overlapping; circuit breaker; magnetic field

Received: 2020-01-01; Accepted: 2020-01-16; Published: 2020-01-18

基于可控交叉的遗传算法在磁场中的应用

邓永先

苏州大学，苏州

邮箱: yxdeng.99@163.com

摘 要: 采用可控交叉的遗传算法的算子, 收敛速度更快, 收敛性更好, 求得的永磁体的优化结构, 有助于降低开断短路电流时的电弧弯曲程度, 改进 SF₆ 断路器的开断性能。

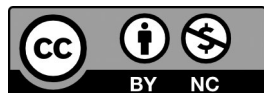
关键词: 遗传算法; 可控交叉; 断路器; 磁场

收稿日期: 2020-01-01; 录用日期: 2020-01-16; 发表日期: 2020-01-18

Copyright © 2019 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 引言

目前, 工程电磁场理论和方法在电器中的应用主要在于灭弧室、电磁操作

机构、带电体间的绝缘强度分析等等。在高压断路器（主要是真空断路器和 SF₆ 断路器）灭弧室中，电场或磁场对于电弧的熄灭具有重要作用，而要实现电场或磁场有利于电弧熄灭，应用工程电磁场数值分析是手段，进行电场或磁场的优化设计是目的。鉴于这类问题目标函数往往具有多极值的特点，采用全局优化方法是必要的。

2 GAs（遗传算法）

GAs（geneticalgorithms）是模拟自然界进化基本原则而形成的一种随机搜索算法，在电磁场的优化设计中具有很高的效率。

GAs 从多个个体所组成的一个初始群体开始最优解的搜索过程，群体中每个个体表示搜索空间的一点，搜索空间的维数由设计变量的个数决定，并用固定长度的二进制串、十进制串或其他符号串，即染色体编码表示设计参数值。GAs 计算每代群体中的每个个体的适应度函数值。类似于自然界的遗传与变异，GAs 的主要操作有交叉、变异、逆转和复制，这些操作生成新的染色体将组成下一代的个体。对该进程的一般性描述，即遗传算法的优化过程如下：

（1）初始化：选择 np ， ng ， pc ， pm ， pi ， $t=0$ 与初始代 X_i^1 ， $i=1, 2, \dots$ ， np ，其中， np 和 ng 分别为每一代的个体数和总代数； pc ， pm ， pi 分别为交叉、变异、逆转的概率； t 为进化的代数。

（2）交叉：以概率 pc 随机选择一对父代个体，交换二者的遗传代码。

（3）变异：以概率 pm 随机选择一个个体，变动其遗传代码。如在二进制编码下，将 0 变为 1、将 1 变为 0。

（4）逆转：以概率 pi 随机选择一个个体，逆转其遗传代码。

（5）停止准则：选择适应度最佳的个体。若满足预定的收敛准则或满足 $t>ng$ ，停止 GAs，根据需要决定是否继续采用确定性搜索。

（6）适应度函数：适应度函数评估是选择操作的依据。适应度函数有不同的构造方式，但必须保证适应度函数与目标函数成反比。为了获得全局最优解，在遗传进化的初期和后期适当的调整适应度函数，以保持进化过程中个体间的竞争水平。

(7) 复制或选择：根据每个个体的适应度从上一代生成新一代。常用的选择机制有赌轮选择、最佳保留选择和期望值选择等，其中赌轮选择最基本、最常用。

(8) 下一步搜索： $t=t+1$ ，返回(2)。

3 可控交叉的 GA

在可行域中搜索全局最小值时，交叉算子是产生新点的最重要的算子。该算子作用于2个随机产生的父代。交换遗传代码后生成新点，即新个体。新个体具有父代的部分遗传特性。

基本的交叉算子有一点交叉、二点交叉、多点交叉、一致交叉等。这里采用二进制串编码表示设计变量。为了防止随机选取的一对要交换的位串过于类似，甚至相同，如1111111和1111110或1111111和1111111，无论采用哪种交叉模式，该操作也不能有效交换父代的遗传特性，因此最好在交叉之前就考虑到相似性问题，然后决定是否进行交叉操作。

令要交换的位串长为 L ， L 随机确定， L_s 为要交换的一对位串中具有相同位的个数，定义 L_s/L 为类似性。如果 $L_s/L > \varepsilon$ ，则不进行交叉，而考虑在另一对父代间进行交叉，这里通常取 $\varepsilon \in [0.8, 0.95]$ 。若 $\varepsilon = 1$ ，该方法即为一般的遗传算法。

举例说明，优化问题为

$$\begin{aligned} \min f(X) &= 30 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{1}{10} (x_i - 20)^2 - 9 \cos \frac{2\pi}{5} x_i \right) \\ s.t. \quad &1 \leq x_i \leq 39 \quad i=1,2,3 \end{aligned} \quad (1)$$

这里， $X = (x_1, x_2, x_3)$ 与 $f(X)$ 分别为自变量向量与目标函数。若令 $np=100$ ， $ng=100$ ， $pc=0.8$ ， $pm=0.1$ ， $pi=0.01$ ，GA与可控交叉的GA的优化结果。在主频为66MHz的微机上测量所消耗的CPU时间。得出，当 $\varepsilon = 0.833$ 和0.875时，可控交叉的GA分别节约了8.1%和11.3%的CPU时间，而且可控交叉GA收敛性更好。

4 应用举例

4.1 期望的磁通密度分布

加入永久磁体的旋弧式灭弧室结构如图1所示。在磁场中运动着的弧柱除受洛伦兹力驱动外,还受到气体的阻力。如果①弧柱及周围气体都是不可压缩的;②驱动力和流体阻力相等;③忽略其它因素影响,弧柱的运动速度 V 可近似表示为

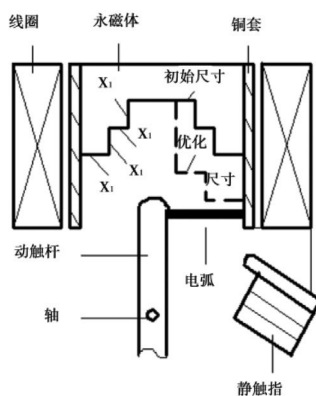


图1 SF6 断路器中永磁体的初始结构与优化结构示意图

$$V=K_1\left(\frac{Bi}{d}\right)^{0.5} \quad (2)$$

其中 K_1 为常数; B 为磁场的磁通密度; i 为电弧电流的瞬时值; d 为电弧直径。

从式(2)可知,电弧电流是唯一的变量, B 与 d 是它的函数。

当电弧在静态 SF₆ 气体中以速度 V 横向运动时, d 与 i 的关系为

$$d=K_2\left(\frac{i}{V+10}\right)^{0.5} \quad (3)$$

式中 K_2 为常数。从(2)和(3)式可得(4)式,即

$$B=\frac{K_3V^2}{(V+10)^{0.5}i^{0.5}} \quad (4)$$

式中 K_3 为常数。假设电弧在旋转时不弯曲,即不发生电弧卷曲,则弧柱上任一点的角频率 ω 都相同。令 r 为电弧上某点的半径,并用 ωr 代替(4)中的 V ,得

$$B_j = \frac{K_3 \omega_j^2 r_j^2}{(\omega_j + 10)^{0.5} i} \quad j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

式中 B_j , r_j ——磁通密度和电弧上给定点 j 的半径; n ——电弧上给定的点数。

从上面的分析可知, 所需的磁密分布应使 (5) 式成立。

4.2 磁场计算

这里, 磁密计算采用二维有限元法, 如果不考虑涡流和电弧电流, 则用矢量磁位 A 表示的微分方程为

$$\text{rot}(v \text{ rot } A) = J_0 + J_m \quad (6)$$

式中 v 为磁阻率; J_0 为线圈中的电流密度; J_m 为永磁体中的等效激磁电流密度。

假设 SF₆ 断路器的开断空载电流为 100A, 短路电流为 10kA。在磁场计算中考虑 4 种情况: 在有永磁体、无永磁体的条件下, 分别考虑 $J_0=0.5\text{A/mm}^2$ 和 $J_0=50\text{A/mm}^2$ 的情况。在电弧上取 3 点, 其半径分别为 20, 50, 80mm, 3 点处磁密计算值的纵向分量为 B_{y1} , B_{y2} , B_{y3} , 角频率为 ω_1 , ω_2 , ω_3 。

通过求解可知: ①在开断空载电流的情况下, 采用永磁体大大增加了电弧旋转角频率, 从而加快了电弧的旋转; ②在开断短路电流的情况下, 采用永磁体也可以加速电弧运动, 但并不显著; ③有必要优化磁场分布, 尽量使 ω_1 , ω_2 , ω_3 的值相接近, 减少电弧弯曲。

4.3 磁场优化

4.3.1 优化问题

在图 1 中铜套的直径不变, 为确定永磁体的结构需要 4 个设计变量, 如图 1 中的 $X_1 \sim X_4$ 。

为减小电弧弯曲, 应使旋弧上所有点的角频率尽可能相互接近。令 n 个点的角频率平均值为

$$\bar{\omega} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \omega_k$$

式中 n ——电弧上均匀分布的点数；
 ω_k ——电弧上第 k 个点的计算角频率。
因此，优化问题可以表示如下

$$\min f(X)=\frac{1}{n\omega}\sum_{k=1}^n\left|\omega_k-\omega\right|$$
$$s.t/\ a_i\leqslant x_i\leqslant b_i\quad i=1,2,3,4$$
$$x_1+x_3\leqslant c_1$$
$$x_2+x_4\leqslant c_2$$

(7)

这里， $X=(x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ 为设计变量向量， $f(X)$ 为目标函数， a_i, b_i, c_1, c_2 为常数，目标函数表示 $\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n$ 的相近程度。 $f(X)$ 越小， ω 越相近。若 $\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n$ 相等， $f(X)$ 为 0。

4.3.2 优化结果

在对场域进行有限元分析的基础上，在 CPU 时钟为 500MHz 的个人计算机上分别用 GA 和可控交叉的 GA 求解（7）式。永磁体结构的优化结果如图 1 虚线所示。表 I 给出了对应于电流密度为 50A/mm² 的原始结果和优化计算结果。

从表 1 中可知：①在开断短路电流的情况下，采用优化后的永磁体结构能使 $f(X)$ 由 0.581 减至 0.218，并使 $\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n$ 更接近；②在求得全局最优解的条件下，可控交叉的 GA 比 GA 节约大约 28.7% 的 CPU 时间。

表 1 对应电流密度为 50A/mn 2 的原始和优化结果

	Original	GA	可控交叉的 GA
X_1/mm	30.0	77.1	56.4
X_2/mm	30.0	2.3	3.5
X_3/mm	30.0	32.1	52.9
X_4/mm	30.0	39.9	38.6
$f(X)$	0.581	0.219	0.218
函数调用次数		1 382	986
CPU 时间 /h		9.34	6.67

5 结束语

与 GA 相比，可控交叉的 GA 采用更有效的交叉算子，收敛速度更快，收敛性更好。在 SF₆ 断路器旋弧式灭弧室中采用永磁体，一方面有助于提高开断空载

电流的开断能力，另一方面，通过采用有限元法与 GA 或可控交叉的 GA 共同求得的永磁体的优化结构，有助于降低开断短路电流时的电弧弯曲程度。虽然旋弧的角频率无法由磁通密度准确求出，但以上研究表明采取的措施有助于改进 SF₆ 断路器的开断性能。

参考文献

- [1] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [2] 尚振球, 郭文元. 高压电器 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.
- [3] 黄彩玲. 磁放大器在矿井提升机上的应用 [J]. 煤炭技术, 2008 (6): 47-48.