

改进粒子群算法及其在超导电缆 参数优化中的应用

刘新颖, 王曙鸿, 邱捷

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种改进粒子群优化算法, 引入平均粒距和差分进化算子改善了传统粒子群算法在高维、多峰函数寻优应用中容易出现“早熟”的问题, 并且应用物理加速度的概念, 描述了其他粒子的速度信息对某个粒子速度产生的影响, 从而加快了粒子群算法的收敛速度. 针对高温超导电缆电流分配不均将导致交流损耗增大的问题, 应用改进粒子群算法对冷介质超导电缆的绕制方向、绕向角和半径进行了优化. 计算结果表明, 通过优化调整电缆导电层的结构参数, 各层电流可以达到均衡分布, 交流损耗显著降低.

关键词: 加速度; 平均粒距; 差分进化算子; 粒子群算法; 超导电缆

中图分类号: TM249.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)02-0219-04

Improved Particle Swarm Optimization with Its Applications to Parameter Optimization of High Temperature Superconducting Cables

Liu Xinying, Wang Shuhong, Qiu Jie

(State Key Laboratory of Electrical Insulation for Electric Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An improved particle swarm optimization (PSO) is proposed. To solve the premature of multi-modal function search with PSO algorithm, the average-distance-among-points and differential evolution (DE) operator are utilized. Introducing the conception of acceleration, the effects from the other particles on a single particle are described to accelerate the convergence of PSO. For a high temperature superconducting (HTS) cable, the non-uniform AC current distribution among the multilayer conductors gives rise to the increased AC losses, therefore the structure parameters of the multilayer conductors are optimized with the improved PSO. The results manifest that a uniform current distribution among layers can be realized via the optimization of structure parameters, thus the AC losses reduced substantially.

Keywords: acceleration; average-distance-among-points; differential evolution operator; particle swarm optimization; high temperature superconducting cable

粒子群算法(PSO)是美国学者 James Kennedy 和 Russell Eberhart 受到生物学中鸟群和鱼群觅食模型启发所提出的一种仿生算法^[1]. 传统的 PSO 算法在低维空间的函数寻优问题上具有寻解速度快、求解质量高等特点, 但是对于高维数、多峰值函数, 粒子群很容易出现由于缺乏多样性而导致的“早熟”

现象, 即局部收敛. 针对 PSO 的局部收敛问题, 研究者们提出了一系列的改进办法, 例如基于动态拓扑结构的 PSO 改进算法, 基于适应度方差的权重梯度方向进行变异的改进粒子群优化算法, 还有基于模糊控制、混沌搜索等方法对粒子群算法进行改进等.

本文首先应用平均粒距^[2]和差分进化(DE)算

子^[3]来改善粒子群在高维空间容易陷入局部极值的缺陷,其次利用加速度的概念引入了其他粒子的速度信息对某个粒子速度的影响,从而改进了传统PSO算法中粒子的速度更新只受其他粒子位置信息影响的缺陷.本文将改进后的粒子群算法应用于冷介质高温超导电缆的结构参数优化问题中,结果表明优化后的超导电缆各层电流的不均衡性得到了很大的改善.

1 粒子群优化算法

1.1 基本粒子群优化算法

粒子群优化算法是一种基于群智能方法的演化算法.假设由 n 个粒子组成的一个搜寻群体,在一个 D 维空间中进行最优搜索,其中第 i 个粒子的位置向量为 $\mathbf{X}_i(t) = (\mathbf{X}_{i,1}(t), \mathbf{X}_{i,2}(t), \dots, \mathbf{X}_{i,D}(t))$,粒子的速度向量可表示为 $\mathbf{V}_i(t) = (\mathbf{V}_{i,1}(t), \mathbf{V}_{i,2}(t), \dots, \mathbf{V}_{i,D}(t))$,粒子的个体历史最优解表示为 $\mathbf{p}_{i,d} = (\mathbf{p}_{i,d,1}, \mathbf{p}_{i,d,2}, \dots, \mathbf{p}_{i,d,D})$,计算过程中的粒子群最优个体表示为 $\mathbf{g}_b = (\mathbf{g}_{b,1}, \mathbf{g}_{b,2}, \dots, \mathbf{g}_{b,D})$.在粒子群算法中,操纵粒子在空间中进行搜索运动主要依靠下式^[4]来实现

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{i,d}(t) &= \omega \mathbf{V}_{i,d}(t-1) + \\ c_1 r_1 (\mathbf{p}_{i,d} - \mathbf{X}_{i,d}(t-1)) &+ c_2 r_2 (\mathbf{g}_{b,d} - \mathbf{X}_{i,d}(t-1)) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{X}_{i,d}(t) = \mathbf{X}_{i,d}(t-1) + \mathbf{V}_{i,d}(t) \quad (2)$$

式中: $d=1, 2, \dots, D; i=1, 2, \dots, n; t$ 代表进化代数; $\mathbf{V}_{i,d}(t)$ 和 $\mathbf{V}_{i,d}(t-1)$ 分别表示当前迭代的速度向量和上一次的速度向量在第 d 维空间上的值; $\mathbf{X}_{i,d}(t)$ 和 $\mathbf{X}_{i,d}(t-1)$ 分别表示当前迭代的位置向量和上一次的位置向量在第 d 维空间上的值; ω 是惯性因子;学习因子 c_1, c_2 是两个正的常数; r_1, r_2 是 $0 \sim 1$ 的随机数.

1.2 改进粒子群算法

1.2.1 基于DE算子的粒子群(DEPSO)算法 随着进化代数的增加,粒子群中的粒子会逐渐聚集在搜索空间内的某一特定位置,导致种群的多样性损失过快. DEPSO 算法首先应用平均粒距来描述种群个体相互之间的离散程度.

设 L 为搜索空间对角线中最大长度, n 和 D 分别为种群规模大小和解空间维数, $\mathbf{X}_{i,d}$ 为第 i 个粒子的第 d 维坐标值, $\bar{\mathbf{X}}_d$ 为粒子群 d 维坐标值的均值,则定义平均粒距为^[2]

$$D_{is}(t) = \frac{1}{nL} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{d=1}^D (\mathbf{X}_{i,d} - \bar{\mathbf{X}}_d)^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

由上式可知, $D_{is}(t)$ 越小,种群分布越不均匀.

当平均粒距 $D_{is}(t)$ 小于给定值经检验不是全局最优极值时,则进行变异操作.应用DE算子对第 i 个粒子的个体历史最优解 $\mathbf{p}_{i,d}$ 进行变异.

若随机数小于给定的常数或 d 等于 k (k 是从 1 到 D 之间的一个整数,这样可以保证至少有一维变量发生变异),取变异后粒子 i 的个体历史最优解的 d 维分量 $\mathbf{T}_{i,d}$ 为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{T}_{i,d} &= \mathbf{p}_{i,d} + \lambda (\mathbf{g}_{b,d} - \mathbf{p}_{i,d}) + \beta \boldsymbol{\delta}_{2,d} \\ \boldsymbol{\delta}_{2,d} &= \left(\sum_{i=1}^2 \bar{\mathbf{A}}_d \right) / 2 \\ \bar{\mathbf{A}}_d &= \mathbf{p}_{iA,d} - \mathbf{p}_{iB,d} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: λ, β 分别为加权因子; $\mathbf{p}_{iA,d}, \mathbf{p}_{iB,d}$ 是从全体粒子中随机抽取的 2 个粒子的历史最优解的 d 维分量.

1.2.2 引入粒子加速度的算法(DEPSO_Ac) 在DEPSO算法中,式(1)中只包含了其他粒子的位置信息对该粒子速度的影响,并没有其他粒子速度信息对其速度的影响.本文基于加速度的概念,提出了一种新的改进思想,即在一个群体中,不仅其他粒子的位置信息对某个粒子的速度有影响,而且其他粒子的速度信息对其也会产生一定的影响.因而,式(1)可改写为

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{i,d}(t) &= \omega \mathbf{V}_{i,d}(t-1) + \\ c_1 r_1 (\mathbf{p}_{i,d} - \mathbf{X}_{i,d}(t-1)) &+ c_2 r_2 (\mathbf{g}_{b,d} - \mathbf{X}_{i,d}(t-1)) + \\ c_3 r_3 (\mathbf{v}_{b,d} - \mathbf{V}_{i,d}(t-1)) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:学习因子 c_3 是一个正常数; r_3 是 0 到 1 之间的随机数; $\mathbf{v}_b = (\mathbf{v}_{b,1}, \mathbf{v}_{b,2}, \dots, \mathbf{v}_{b,D})$ 表示同代粒子群中最优个体的速度,体现了最优粒子的速度对其他粒子更新速度的影响,从物理角度讲,这一项又可以称为粒子的加速度.

2 高温超导电缆的优化

按照绝缘介质所处的温度环境,高温超导电缆可分为室温介质和冷介质超导电缆^[5].前者的电气绝缘位于绝热层的外面,只有高温超导体处于制冷环境中;后者的超导体和电气绝缘均处于低温环境中,对绝缘介质的性能要求很高.

如图1所示,冷介质超导电缆是由不锈钢骨架、超导电层、电气绝缘、超导屏蔽层和金属保护层组成的.其主要优点在于:①结构尺寸小,可以用于现存的电缆管道;②超导磁屏蔽层可以消除外界磁场的干扰.

在满足集总参数条件下,冷介质超导电缆(含 m

层导电层, $(n-m)$ 层屏蔽层) 等效电路如图 2 所示。

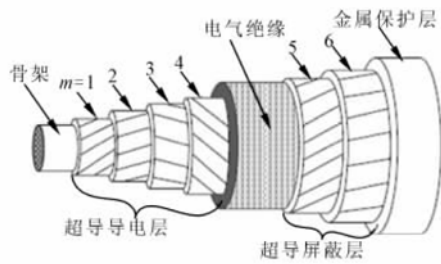
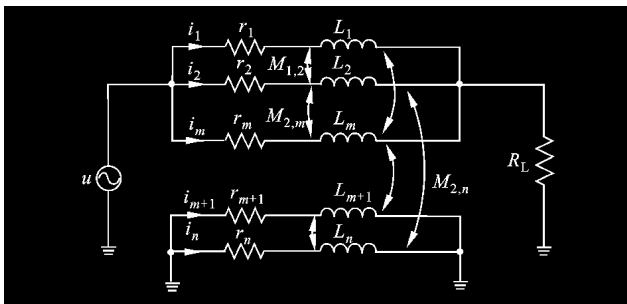


图1 冷介质超导电缆的结构示意图



r_i : 各层接头电阻与等效电阻之和; L_i : 各层自感;

$M_{i,j}$: 层间互感; u : 施加电压源; R_L : 负载电阻。

其中电阻、电感的计算公式可参照文献[5]

图2 冷介质超导电缆的等效电路模型

对冷介质高温超导电缆进行结构优化设计, 就是在保证带材的机械性能、临界电流等约束条件的前提下, 得到一组综合较优的电缆结构参数, 使得载流时各导电层流过的电流尽可能达到均匀分布^[5]。其中, 临界电流约束中考虑了电缆冷却量和电缆安全运行裕度的影响。选取电缆各层带材的绕向角 β 、绕制方向 α 及层半径 R 作为优化变量, 若冷介质超导电缆有 m 层导电层、 $n-m$ 层屏蔽层, 优化参数变量个数为 $3n$, 用向量 $\mathbf{X}$ 表示如下

$$\mathbf{X} = [\beta_1, \alpha_1, R_1, \beta_2, \alpha_2, R_2, \dots, \beta_n, \alpha_n, R_n]$$

为了使损耗减小, 则应使导电层、屏蔽层的电流分布均匀, 建立优化目标函数如下

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{X}) = & \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m |I_{ix}(\mathbf{X}) - I_{jx}(\mathbf{X})| + \\ & \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m |I_{iy}(\mathbf{X}) - I_{jy}(\mathbf{X})| + \\ & \sum_{i=m+1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n |I_{ix}(\mathbf{X}) - I_{jx}(\mathbf{X})| + \\ & \sum_{i=m+1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n |I_{iy}(\mathbf{X}) - I_{jy}(\mathbf{X})| \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $I_{ix}(\mathbf{X})$ 、 $I_{iy}(\mathbf{X})$ 分别表示第 i 层电流 $I_i(\mathbf{X})$ 的实部和虚部。

取电压源峰值为 10 kV、电阻为 10 Ω 、电缆长度

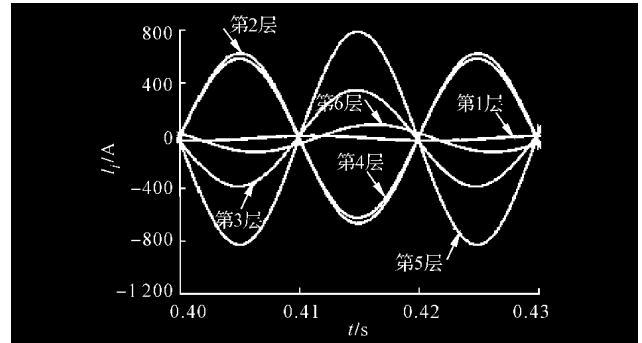
为 100 m 时, 冷介质超导电缆(含 4 层导电层、2 层屏蔽层)优化前后的结构参数如表 1 所示。

图 3 和图 4 分别给出了优化前后冷介质超导电缆各层的电流分布和磁场分布图。通过比较可以发现, 优化前超导电缆各层的电流、磁场在幅值、相位上均有较大的差异, 并且第 6 层的磁场存在突变状况。优化后超导电缆的导电层、屏蔽层的电流分布均匀, 且屏蔽层的总电流和导电层的总电流幅值大小相等, 相位相差 180°。

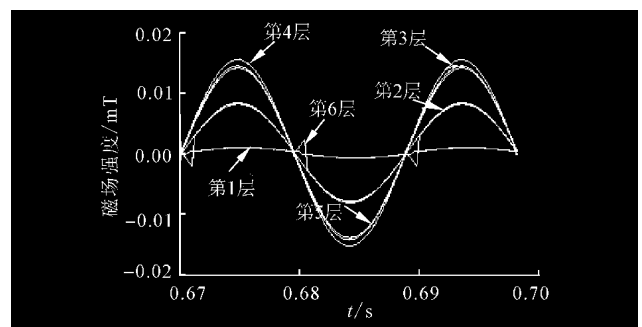
表1 冷介质超导电缆的结构参数

层号	α_i^Δ	$\beta_i^\Delta / (^\circ)$	R_i^Δ / mm	α_i^*	$\beta_i^* / (^\circ)$	R_i^* / mm
1	+1	27.0	10.00	+1	25.8	10.0
2	+1	27.0	10.45	+1	14.0	10.5
3	-1	27.0	10.90	-1	8.5	11.2
4	-1	27.0	11.35	-1	29.7	11.9
5	+1	27.0	18.50	+1	24.1	19.0
6	+1	27.0	18.95	+1	8.5	20.8

注: α_i^Δ 、 β_i^Δ 、 R_i^Δ 和 α_i^* 、 β_i^* 、 R_i^* 分别表示各层优化前、后冷介质超导电缆的绕制方向、绕向角和半径。



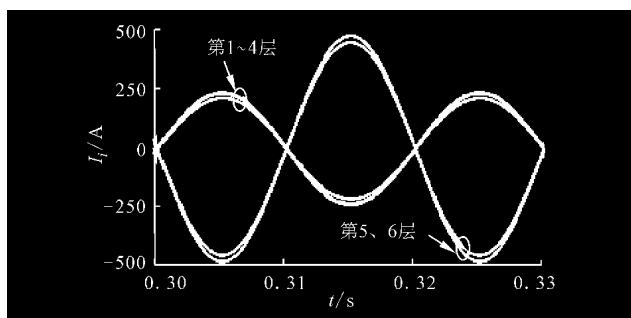
(a) 电流分布图



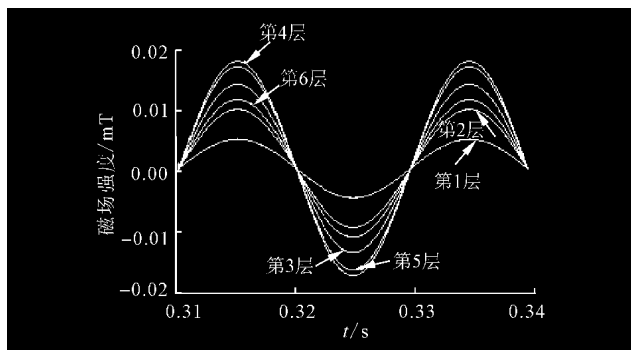
(b) 磁场分布图

图3 优化前的冷介质超导电缆

超导电缆的交流损耗可按照文献[6]中的方法进行计算。图 5 给出了优化前后冷介质超导电缆交



(a) 电流分布图



(b) 磁场分布图

图4 优化后的冷介质超导电缆

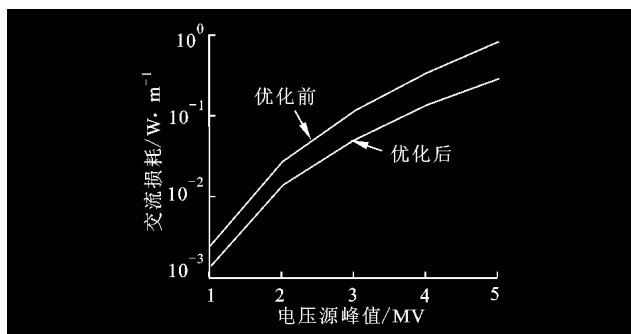


图5 优化前后冷介质超导电缆的交流损耗对比图

流损耗的对比.从图5中可以看出,优化后的交流损耗明显小于优化前的交流损耗.

3 优化算法的比较

为了便于比较 PSO、DEPSO 和 DEPSO_Ac 3 种优化算法的优劣,取种群规模为 20,解空间维数为 18,迭代周期为 50,每个周期内最大迭代次数为 5 000,惯性因子 ω 为 1.4~0.2,学习因子 c_1 为 2.6, c_2 为 1.4, c_3 为 0.2,平均粒距的最小值为 0.25.考虑到约束条件的处理,本文应用了文献[7]中的适应度函数来确定、评价个体之间的优劣.

图6为3种优化算法的性能比较.纵坐标 F_{norm} 是 50 次优化周期中,每一代进化所达到的最优解的平均值,用它可以反映算法在整个进化过程中的寻优性能. F_{norm} 越小,表示所得到的平均值越接近目标

值.

表2为3种算法的测试对比,其中 F_{best} 、 T_{inter} 分别为 50 次优化周期中所达到的最优解的平均值和平均迭代次数.

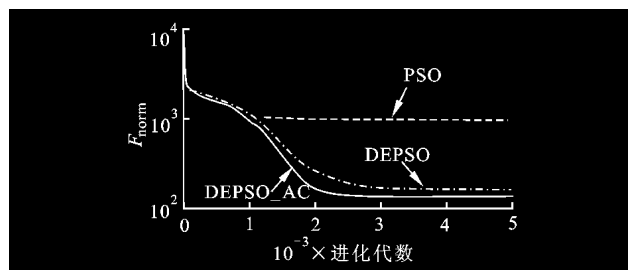


图6 算法性能的比较

表2 PSO、DEPSO 与 DEPSO_Ac 的测试对比

算法	F_{best}	T_{inter}
PSO	1 039.07	4 948.48
DEPSO	244.786	3 189.14
DEPSO_Ac	192.402	2 981.52

从表2和图5中可以看出,PSO 算法在迭代过程中过早地陷入了局部极值,DEPSO_Ac 算法比 DEPSO 算法在收敛速度、迭代次数和最优解上都获得了改善.

4 结 论

改进的粒子群算法改善了粒子群在高维空间容易陷入局部极值的缺陷,并引入了其他粒子的速度信息对粒子速度更新产生的影响,从而加快了粒子群算法的收敛速度.将该算法应用在冷介质超导电缆的结构参数优化问题中,优化后的结构参数使得超导电缆各层的电流分布趋于均匀.

参考文献:

- [1] Kennedy J, Eberhart R C. A new optimizer using particle swarm theory [C]//Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science. Piscataway, USA: IEEE, 1995:39-43.
- [2] 俞欢军,张丽平,陈德钊,等. 基于反馈策略的自适应粒子群优化算法[J]. 浙江大学学报, 2005, 39(9): 1286-1291.
Yu Huanjun, Zhang Liping, Chen Dezhaoh, et al. Adaptive particle swarm optimization algorithm based on feedback mechanism [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2005, 39(9): 1286-1291.
- [3] Zhang Wenjun, Xie Xiaofeng. DEPSO: hybrid particle

- swarm with differential evolution operator [C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Piscataway, USA: IEEE, 2003: 3816-3821.
- [4] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer [C]//IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Piscataway, USA: IEEE, 1998: 69-73.
- [5] 赵臻,邱捷,王曙鸿,等. 高温超导交流电缆电流分布及结构优化的研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(4): 352-356.
- Zhao Zhen, Qiu Jie, Wang Shuhong, et al. Study on the current distribution and structural optimization of a high-temperature superconducting AC power cable [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(4): 352-356.
- [6] Lee Ji-kwang, Cha Gueesoo. AC loss calculation of a multi-layer HTS transmission cable considering the twist of each layer [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11(1): 2433-2436.
- [7] Deb K. An efficient constraint handling method for genetic algorithm [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 186: 311-338.

(编辑 杜秀杰)