

改进的禁忌搜索算法及其在电磁场逆问题中的应用

安斯光^{1,2}, 杨仕友¹, 李桃³

(1. 浙江大学电气学院, 浙江 杭州 310027; 2. 中国计量学院机电工程学院, 浙江 杭州 310018;
3. 水利部产品质量标准研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对求解多极值点目标函数的电磁场逆问题, 提出了一种改进的禁忌搜索算法。为提高算法的全局寻优能力和减少寻优计算的时间, 改进算法在结构上提出了不同状态的新转移规则: 步长向量选取原则和不同循环起始点选择的新规则。避免了重复或无意义中间点的产生, 使算法能够有效地跳出局部极值点, 迅速收敛到全局最优点。给出的典型数学函数验证了算法的快速性和有效性, 电磁场逆问题算例 TEAM Workshop 问题 22 的结果表明算法的优越性和工程应用价值。

关键词: 禁忌算法; Matlab; Ansys; 电磁场逆问题; 全局最优化

The application of improved tabu search algorithm in electromagnetic inverse problems

AN Si-guang^{1,2}, YANG Shi-you¹, LI Tao³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
3. Product Quality Standard Research Institute, Ministry of Water Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: An improved tabu search algorithm is presented to solve inverse electromagnetic problems for multimodal objective optimizations. In order to promote the global searching ability and decrease the calculation time, the algorithm is improved by a new transition rule for accepting new current states, i.e. a proper step vector choosing rule and a new rule for selecting initial states of different iterative cycles. These improvements avoid repeated mid-points, jump out of the local optimal and converge to the global optimal point efficiently. Results of a typical mathematic function prove the rapidity and validity of the algorithm, and the results of item 22 of TEAM workshop which is an example of electromagnetic inverse problem are reported to show the excellent performance of the proposed algorithm and its great values for engineering application.

Key words: tabu search algorithm; Matlab; Ansys; electromagnetic inverse problem; global optimization

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0030-04

0 引言

随着科学技术的不断发展和制造工艺水平的日益提高, 人们对现代电气产品的设计精度要求也越来越高。因此, 电磁场逆问题已经成为计算电磁学的研究热点之一。一般而言, 电磁装置优化设计大多为复杂、非凸、非线性的多极值点目标优化设计问题。传统的确定类搜索算法, 如梯度类算法、模式搜索算法等, 很难搜索到此类复杂多目标函数的全局最优解。因此, 传统的确定类寻优算法已不能满足当代工程分析和综合的需要, 迫切需要探索电磁场逆问题分析、计算的快速、可靠的全局优化算法。通过对物理现象、社会和生物过程的模拟, 人们提出了模拟退火算法, 基因算法、粒子群算法等进化类全局优化算法^[1-3]。这些算法的共同优点是算法具有全局搜索能力。但根据“no free lunch theorem”, 这些算法的不足也是非

常明显的, 即算法结构复杂、算法性能过度依赖算法参数, 以及收敛速度较慢等等。因此, 提高这些算法的计算效率同时保证算法的全局寻优能力是目前电磁场逆问题全局新优化算法研究的一个主要方面。为此, 在传统禁忌算法基础上, 本文对禁忌搜索算法的状态转移规则、有效步长的选取以及新点产生规则等若干问题进行了探讨和改进, 以取得计算效率和全局寻优能力俱佳的计算效果。最后, 给出了改进算法的计算实例。

1 改进的禁忌算法

禁忌搜索算法是由 Glover F 在 1986 提出的一种启发式的全局搜索算法。该算法通过引入灵活的存储结构和相应的禁忌准则避免重复搜索, 并通过特赦准则赦免一些禁忌表中的优良状态, 进而保证算法能够搜索到多极值点目标函数的全局最优点。

禁忌搜索算法首先成功应用于组合优化问题, 并随后推广应用到连续变量的优化问题。然而, 目前广泛应用于连续变量优化的禁忌搜索算法主要存在下面的两个问题: (1) 算法容易陷入局部最优解; (2) 算法的收敛速度比较慢。为解决这些问题, 本文通过对算法内部结构和搜索机制的改进, 以提高算法的全局寻优能力和搜索效率。其中主要工作如下。

1.1 状态转移规则

在传统的禁忌算法中, 在搜索过程中从当前状态点 x 转移到状态点 y 需要满足 $f(y) < f(x)$ 条件 (其中 f 为极小化问题的目标函数), 即只有当下一个状态点 y 的目标函数值小于当前状态点 x 的目标函数值时才进行状态的转移^[4]。显然这样的状态转移规则使得算法不具“上山性”, 因而算法通常会陷入局部最优点。为此, 改进禁忌算法的状态转移规则为: 在当前状态点 x 的邻域内随机取 p 个邻域点, 以其中目标函数值最佳的点作为下一个当前状态。显然, 这样处理后算法结构具有“上山性”, 从而可跳出局部最优点而搜索到全局最优点。

1.2 步长向量的选取与新点产生的规则

改进禁忌算法对步长向量的处理方法是: 首先将不同坐标方向变量的变化范围统一变换到 $[0,1]$; 然后设置一个标准步长向量 h , 其分量表达式为: $h_i = \frac{h_{i-1}}{c_k} (c_k = 10000^{\frac{1}{r-1}}, h_1 = 1)$ 。坐标 j 方向上对应于步长 h_i ($i=1, 2, \dots, r$) 邻域的新点 $y_j = x_j$ 由式(1)给出

$$y_j = x_j + rp_j h_i \quad (1)$$

其中: r 为区间 $[-1,1]$ 内的随机数; p_j 为系数向量 p 的 j 分量, $p_j = (b_j - a_j) / 2$ ($j=1,2,\dots,n$); b_j 和 a_j 是第 j 个变量的边界^[5]。

1.3 不同循环起始点的选择与终止条件

传统的禁忌算法不同循环的起始点都是上一循环的最后一个状态点。当此状态点离当前最优解较远, 不利于全局搜索。若每次都从当前最优解开始搜索, 算法又易陷入局部极值点。为解决这一问题, 本文引入一个控制参数控制搜索过程中不同循环起始点的选择。在迭代次数未到达控制参数设定值前, 起始点为上一个循环的最后一个状态; 当迭代次数达到控制参数设定值后, 则从当前最优点开始搜索^[5]。这样实现了算法的全局搜索和局部细化搜索的平衡, 可有效加快算法的收敛速度。本文算法的终止条件为给定算法的最大迭代次数。

2 函数验证和应用实例

为验证本文改进禁忌算法的全局搜索能力和收

敛速度性, 首先给出典型数学函数的计算结果, 然后, 给出电磁场逆问题: TEAM workshop 问题 22 的工程应用实例。

2.1 数学函数验证

首先, 应用数学函数对本文算法进行验证。该数学函数定义如式 (2):

$$\begin{aligned} \text{minimize } f(x) &= \frac{\pi}{n} 10 \sin^2(\pi x_1) + \\ & \sum_{i=1}^{n-1} [(x_i - 1)^2 (1 + 10 \sin^2(\pi x_{i+1}))] + (x_n - 1)^2 \quad (2) \\ \text{subject to } & -10 \leq x_i \leq 10 \quad (i=1, 2, \dots, 5) \end{aligned}$$

该函数的极值点数为 10^5 左右, 其中全局最优解和全局最优点分别为 $x_i=1$ ($i=1, 2, \dots, 5$) 和 $f_{\text{opt}}=0.0$, 应用本文基于 Matlab 仿真平台开发的改进禁忌算法对该数学函数进行全局最优点搜索。在寻优、计算过程中, 算法的起始状态借助于 Matlab 的 rand 函数随机产生, 设定算法的最大运行次数为 $N=1000$ 。为说明算法的鲁棒性, 随机运行算法 20 次, 20 次随机搜索的计算结果示于表 1。同时, 为了形象地刻画算法的搜索过程, 某一典型搜索过程的搜索轨迹示于图 1。

表 1 本文算法 20 次随机搜索的计算结果和所需的迭代次数
Tab.1 Results of 20 random run of presented algorithm

序号	最优解 x_{opt}	最优值 f_{opt}	迭代次数
1	(1.000 0,1.000 0,1.000 0,1.000 4,0.999 6)	0.173 89×10 ⁻⁶	190
2	(1.000 1,1.000 0,0.999 9,0.999 7,1.000 4)	0.300 28×10 ⁻⁶	145
3	(1.000 0,0.999 7,0.999 6,0.999 7,1.000 1)	0.270 83×10 ⁻⁶	100
4	(1.000 0,1.000 6,1.000 0,0.999 7,0.999 9)	0.320 79×10 ⁻⁶	110
5	(0.999 9,1.000 2,0.999 8,1.000 3,1.000 3)	0.718 38×10 ⁻⁶	245
6	(1.000 0,0.999 2,1.001 4,1.000 9,0.999 9)	0.210 50×10 ⁻⁶	208
7	(1.000 0,1.000 1,1.000 2,0.999 5,1.000 3)	0.274 57×10 ⁻⁶	185
8	(1.000 2,0.992 4,1.002 8,0.997 9,1.001 6)	0.485 71×10 ⁻⁶	178
9	(1.000 0,1.001 1,0.998 7,1.000 3,0.998 9)	0.26558×10 ⁻⁶	220
10	(0.999 9,0.999 4,1.000 5,0.999 7,1.000 2)	0.699 23×10 ⁻⁶	246
11	(1.000 0,1.000 3,0.999 5,1.000 1,0.999 5)	0.393 62×10 ⁻⁶	81
12	(1.000 0,1.000 2,1.000 1,0.999 8,1.000 3)	0.241 24×10 ⁻⁶	120
13	(1.000 0,1.000 2,0.999 7,1.000 8,1.000 6)	0.698 22×10 ⁻⁶	300
14	(1.000 0,0.999 9,0.999 9,0.999 7,0.999 9)	0.337 23×10 ⁻⁶	103
15	(1.000 1,0.999 3,1.000 0,1.000 6,0.999 8)	0.921 75×10 ⁻⁶	173
16	(1.000 0,0.999 8,1.000 2,0.999 7,0.999 9)	0.110 46×10 ⁻⁶	242
17	(1.000 1,1.000 0,1.000 1,1.000 2,0.999 8)	0.293 20×10 ⁻⁶	107
18	(1.000 1,1.000 3,1.000 3,0.999 8,1.000 2)	0.355 20×10 ⁻⁶	154
19	(1.000 0,0.999 7,0.999 8,1.000 4,0.999 9)	0.281 70×10 ⁻⁶	144
20	(1.000 0,1.000 0,1.000 0,1.000 4,0.999 8)	0.173 75×10 ⁻⁶	155

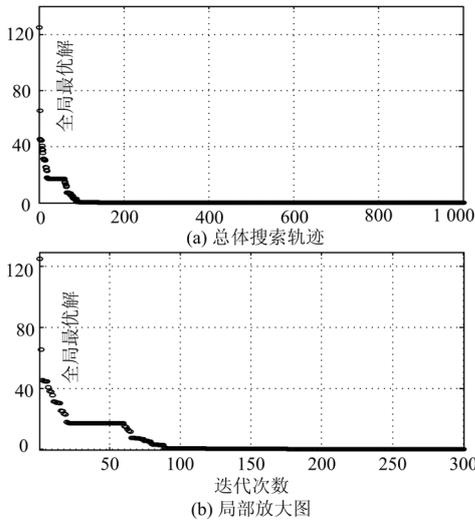


图 1 改进禁忌搜索算法优化数学函数的典型搜索轨迹
Fig.1 The searching process of a typical run of the proposed algorithm for solving the mathematic function

由这些计算结果可以看出，该改进禁忌算法随机运行 20 次搜索，就总体性能而言，一般在迭代 170 次后就已经收敛，而且 20 次搜索每次都搜索到了全局最优点。由此可以说明改进算法有较强的全局搜索能力和优异的收敛速度。

2.2 应用实例分析

下面以 TEAM Workshop 问题 22 中的三参数优化问题作为电磁场逆问题的应用实例。TEAM (Testing of Electromagnetic Analysis Method) Workshop Problem 是国际计算电磁学界的学者和研究者提出的一系列以相关工程问题为背景的基准问题，籍以校验和比较各种算法的正确性和有效性。其中的问题 22 为超导磁储能系统 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) 优化设计问题。SMES 系统是利用 SMES 装置将交流电网供电、励磁所产生的磁场能量储存起来，在需要时再将储存的磁场能量回馈交流电网或用作他用。

如图 2 所示，该问题的超导线圈为双螺管结构，其中一个线圈为位于内侧的主线圈，另一个是位于外侧的屏蔽线圈。主线圈的尺寸不变，而屏蔽线圈的尺寸即 r_2 、 h_2 和 d_2 为优化变量。为减小线圈周围环境电磁场的强度，两个线圈施加方向相反的电流。在进行 SMES 装置优化设计时，主要考虑的因素包括：

- (1) 装置中存储的能量为 180 MJ；
- (2) 磁场绝不能违背确保超导性的物理条件；
- (3) 远离储能装置 10 m 外的漏磁场应尽可能小。

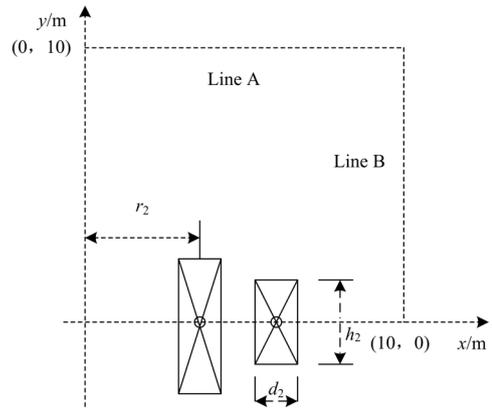


图 2 SMES 系统线圈结构示意图
Fig. 2 The coil structure of SMES

对于选定的超导材料，为保证超导体不失超，两个线圈上的电流密度和磁感强度之间应该满足约束方程式 (3)：

$$J_i \leq (-6.4 |B_{\max}|_i + 56) (A / \text{mm}^2) \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

式中： J_i 和 $|B_{\max}|_i$ 分别代表第 i 个线圈中的电流密度和最大磁感应强度值。

对于三参数问题，两个线圈中的电流密度设为定值 (22.5 A/mm^2)，所以式 (3) 可以变为

$$|B_{\max}| \leq 4.92 \text{ T} \quad (4)$$

综合以上各目标，该优化问题的数学模型为

$$\min f = w_1 \frac{B_{\text{stray}}^2}{B_{\text{norm}}^2} + w_2 \frac{|Energy - E_{\text{ref}}|}{E_{\text{ref}}} \quad (5)$$

$$|B_{\max}| \leq 4.92 \text{ T} \quad (6)$$

式中： $E_{\text{ref}} = 180 \text{ MJ}$ ； $B_{\text{norm}} = 3 \times 10^{-3} \text{ T}$ ； $Energy$ 为超导系统的实际储能； w_1 和 w_2 为权系数； B_{\max} 为线圈中的最大磁通密度； B_{stray}^2 为衡量 SMES 装置对周围电磁环境影响的一个指标，其大小用图 2 直线 A 和直线 B 中 22 个等距点上磁通密度平方的平均值来衡量，即

$$B_{\text{stray}}^2 = \sum_{i=1}^{22} B_{\text{st},i}^2 / 22 \quad (7)$$

采用有有限元分析软件计算 SMES 装置中的轴对称电磁场及其中存储的电磁场能量。为此，本文开发了有限元分析软件 Ansys 与 Matlab 语言的接口程序，并对该工程实例进行了分析和计算。表 2 为本文优化算法结果与文献[6-7]中其他优化算法结果的比较。显然，本文算法在解的质量方面与目前计算电磁学中广泛使用的其他算法所得到的解的质量相当，但其计算效率明显优于其他算法。

表 3 本文优化算法与文献[6-7]中其他优化算法结果比较

Tab.3 Comparison of different algorithms^[6-7]

算法	r_2/m	d_2/m	$(h_2/2) / m$	OF	$B_{stray}^2/(\times 10^{-7})$	$Energy/MJ$	迭代次数
GA	3.04	0.39	0.24	0.134	9.615	175.0	2 400
SA	3.08	0.39	0.24	0.098	8.017	178.4	5 025
HuTS	3.08	0.38	0.25	0.089	7.612	179.2	3 821
本文	3.10	0.39	0.24	0.098	8.547	179.4	1 824

3 结论

通过引入不同的状态转移规则、更有效的步长向量选取以及新点产生规则, 本文提出一种改进禁忌算法。典型的数学算例和 TEAM workshop 问题 22 的计算结果表明, 本文算法能够有效地跳出局部最优点, 快速地收敛到全局最优点。利用该算法求解多目标优化问题, 算法结构简单, 程序易于实现。与现有方法的计算结果相比, 具有一定的优越性。因此, 本文算法具有实际工程应用价值。

参考文献

[1] Ho Siu-Lau, Yang Shiyu. A computationally efficient vector optimizer using ant colony optimizations algorithm for multobjective designs[J]. IEEE Trans Magn, 2008, 44 (6) : 1034-1037.

[2] Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Trans Magn, 2002, 6 (2) : 182-197.

[3] Vasconcelos J A. Simulated annealing coupled with the tabu search method for continuum optimization in electromagnetics[J]. IEEE Trans Magn, 1996, 32 (3) : 1206-1209.

[4] Ho S L, Yang S. An efficient tabu search algorithm for robust solutions of electromagnetic design problems[J]. IEEE Trans Magn, 2008, 44 (6) : 1042-1045.

[5] 谢德馨, 杨仕友. 工程电磁场数值分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

XIE De-xin, YANG Shi-you. Projective electromagnetic mathematic analysis and synthesis[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.

[6] 张慧. 电磁场逆问题分析计算的快速全局优化算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

ZHANG Hui. A fast global optimization method in electromagnetic inverse analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[7] Sara Carcangiu, Alessandra Fanni. Multiobjective tabu search algorithms for optimal design of electromagnetic devices[J]. IEEE Trans Magn, 2008, 44 (6) : 970-973.

[8] Ho S L, Yang Shiyu. An improved tabu search for the global optimizations of electromagnetic devices[J]. IEEE Trans Magn, 2001, 37 (5) : 3570-3574.

[9] 葛哲学. 精通Matlab[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

GE Zhe-xue. Master matlab[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.

[10] Hu N. Tabu search method with random moves for globally optimal design[J]. Int J Num Meth Eng, 1992, 35 (5) : 1055-1070.

收稿日期: 2009-12-24; 修回日期: 2010-02-26

作者简介:

安斯光 (1981-), 女, 讲师, 从事电磁场数值计算;
E-mail: annsg@126.com
杨仕友 (1963-), 男, 博士生导师, 从事电磁场计算;
李桃 (1975-), 女, 工程师, 从事电气设计。