

研究与设计

改进模拟退火算法在三相异步电动机优化设计中的应用

韩力, 王亚峰, 李伟, 李景灿
(重庆大学, 重庆 400044)

韩力 1963年生, 重庆大学电气工程学院副教授、硕士生导师。主要从事电气设备的现代设计方法研究。

摘要 为了更好地将模拟退火算法应用于三相异步电动机优化设计中, 本文分析了模拟退火算法的优点和局限性, 针对其搜索过程慢的缺点, 提出了改进模拟退火算法的思路和具体实现方法, 并通过两个经典数学函数检验了新算法的性能。在此基础上, 将改进模拟退火算法应用于三相异步电动机优化设计中, 分别以有效材料成本最小和效率最高为目标进行了优化设计。结果表明, 在不改变电动机的结构设计和制造工艺的情况下, 基于改进模拟退火算法的优化设计能显著减小材料成本和提高电动机效率, 具有工程实用价值。

关键词 三相异步电动机 优化设计 模拟退火算法

Application of Improved Simulated Annealing Algorithm for Optimum Design of Three-phase Induction Motors

Han Li, Wang Yafeng, Li Wei, Li Jingcan
(Chongqing University)

Abstract: In order to apply simulated annealing algorithm more efficiently to the optimum design of three-phase induction motors, the merit and the shortcoming of simulated annealing algorithm are analyzed. Aimed at the deficiency i.e. the tardiness of the algorithm, a new thought of improved simulated annealing algorithm and concrete method to realize this thought are provided to improve this algorithm. The validity of the new method is confirmed by the test on two classic mathematic functions. Then the improved simulated annealing algorithm is applied to the optimum design of three-phase induction motors. The results showed that the optimum design based on improved simulated annealing algorithm can cut material cost and increase efficiency greatly when the structure design and manufacturing craft are unchanged. The new algorithm has the value of project application.

Key words: Three-phase induction motor Optimum design Simulated annealing algorithm

1 前言

电机优化设计属于多变量有约束非线性的静态优化设计问题。优化算法中的直接法以其对目

标函数的解析性要求低而广泛应用于电机优化设计中。但是, 由于目标函数和变量之间的关系往往不是凸函数而是多峰函数, 所以传统的直接法往往很难求得目标函数的全局最优解, 而仅仅是

局部最优解。近年来,包括模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法在内的被称为智能优化算法或现代启发式算法的一些新颖的优化算法得到了迅速发展^[1]。这些算法从理论上可以求得全局最优解,因而为电机的优化设计开辟了新的途径。

对于将 SA 算法应用到电机优化设计中,一些学者做了尝试。关于状态产生函数,文献[2]提出将优化变量用定长的二进制编码表示,然后对各变量的二进制串随机变位;文献[3]的结论是:在同一温度控制参数 T 下,变量的邻域范围 x 没有变化的必要。针对降温函数的设计,文献[4]提出了 $T = T_0 / (1 + an)$, ($n = 0, 1, 2, \dots; a$ 为一常数)的温度递减函数。文献[2~5]分别将 SA 算法应用于电力变压器、系列异步电机、单相电机、永磁直流测速发电机的优化设计中,取得了较明显的效果。然而,SA 算法的缺点在于其收敛速度慢,特别是在最优点附近时尤为明显。对于电机优化设计这类目标函数难于计算的复杂问题,要使退火过程模拟得很充分,需要很长的计算时间。因此,有必要对 SA 算法进行改进,提高其寻优速度,缩短其优化时间。本文提出了一种改进的模拟退火算法,它不仅搜索质量高,而且时间性能优良。将其用于电机优化设计,可以显著提高优化效果。

2 改进模拟退火算法的依据和优势

SA 算法是基于 Monte Carlo 迭代求解策略的一种随机寻优算法,其出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题的相似性。SA 算法在某一初温下,伴随温度参数的不断下降,结合概率突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解,即能从局部最优解概率性地跳出并最终趋于全局最优^[1,6]。SA 算法具有思路简单、实验性能质量高、初值鲁棒性强、通用易实现等优点。当初温充分高、降温足够慢、每一温度下采样次数足够多、最终温度趋于零时,算法最终将以概率 1 收敛到全局最优解。但采样次数多、优化过程长、控制参数合理配置难等是其不足之处。针对 SA 算法搜索过程长的缺点,本文提出了一种改进模拟退火(Improved Simulated Annealing, ISA)算法。ISA 算法通过结合使用步长加速法来改进模拟退火算法,实质上是一种混合优化策略。步长加速法具有计算量小、线性收敛、

优化速度快等优点,且不要求函数可导,故可应用于任何形式的目标函数,应用范围广。这样,通过二者的结合使用,可以取长补短,发挥以下优势:

(1) 机制的融合。步长加速法是确定性的下降搜索方法,SA 算法是基于随机分布的算法。步长加速可以迅速得到局部最优解。SA 算法可有效避免陷入局部极小并最终趋于全局最优解。选择机制上存在如此差异的两种算法进行组合,有利于丰富优化中的搜索行为,增强全局和局部意义下的搜索能力和效率。

(2) 行为的互补。步长加速法收敛速度快,但易陷入局部极小点;SA 算法具有突跳性,不易陷入局部极小点,但收敛速度慢。两种算法结合,可以互相补充不足,大大提高算法的效率,改善时间性能。

(3) 削弱参数选择的苛刻性。SA 算法的收敛条件导致参数选择较为苛刻,甚至不实用,设计时均要通过大量的试验和经验来确定。SA 算法与步长加速法相混合,有了步长加速法作为辅助,使算法各方面的搜索能力均有提高,因而对参数的选择不必过分严格。

3 改进模拟退火算法的基本思想和实现

ISA 算法的基本思想是:使用模拟退火算法作为寻优的第一步,使优化过程中的探测点能免于陷入局部极小而进入全局最优解所在的区域;在这一区域内则使用步长加速法,发挥其收敛速度快、计算量小的优势,从而使搜索过程迅速收敛于最优点。具体实现方法如下:

(1) 将记忆功能加入 ISA 算法。由于在 SA 算法的搜索过程中有可能将曾经搜索到的最好解丢弃,所以为了避免此缺陷,在算法中加入记录器,记下搜索过程中的最好解。

(2) 切换准则的判断。实现 ISA 算法的关键在于,何时将搜索过程从 SA 算法转向步长加速法。当然,这个结论应从 SA 算法与步长加速法结合使用的大量实例比较和针对具体应用对象的特点分析中得出。理论上,如下的判据都可以作为结束 SA 算法而启动步长加速法的准则:

检查变量变化范围是否小于给定值;

检查温度是否小于给定值;

检查连续若干步函数值是否变化很小。

显然,第一条判据与优化过程中变量的性质密

切相关。在电机优化设计中,所选定的各种优化变量通常不在同一个数量级上,即使为每个变量都规定各自的变化步长,也难以保证算法内同一基准的变化会对目标函数产生相同的影响。再考虑到工程问题实际,这一判据难以在电机优化设计中应用。第二种判据易于实现,但在解决不同工程问题时,由于目标函数极值分布的复杂性差别很大,很难确定温度小于某一低值时的接受概率如何,即跟目标函数的振荡剧烈度有关。第三个判据最适合工程实际应用,它直接以目标函数的变化情况为判据。如果此条件满足,说明 SA 算法已经无助于明显改善优化性能,因此本文采用这种判据作为模拟退火算法和步长加速法的切换准则。

4 改进模拟退火算法的数学仿真

通过 Camel函数和 Schaffer函数,本文对所提出的改进模拟退火算法的试验性能进行了数值仿真。

4.1 Camel函数的数值仿真

Camel函数解析式为^[7]

$$f = (4 - 2.1x^2 + x^4/3)x^2 + xy + (-4 + 4y^2)y^2 \quad (1)$$

图 1 为该函数极值分布图,从图中可以看到,该函数具有多个极值。已知其全局最小值为 -1.031628。

图 1 Camel函数极值分布图

表 1 列出了用 SA 算法和 ISA 算法分别对 Camel函数求最小解的结果以及所需计算时间。

表 1 SA 算法和 ISA 算法对 Camel函数的寻优结果

算法	次数	x	y	f	时间 /s
SA	1	0.0898420	-0.71265641	-1.03162845	3.50
	2	-0.0898420	0.71265639	-1.03162845	3.23
	3	0.0898420	-0.71265641	-1.03162845	3.27
ISA	1	-0.0898420	0.71265641	-1.03162845	1.57
	2	0.0898420	-0.71265640	-1.03162845	1.35
	3	0.0898420	-0.71265640	-1.03162845	0.83

图 2和图 3对比了对 Camel函数采用 SA 算法和采用 ISA 算法寻优的动态搜索轨迹(其中,横坐标 n为迭代次数,纵坐标 f为函数值)。

图 2 SA 算法寻优轨迹

图 3 ISA 算法寻优轨迹

4.2 Schaffer函数的数值仿真

Schaffer函数的解析式为^[11]

$$f = \frac{\sin^2 \sqrt{x^2 + y^2} - 0.5}{[1 + 0.001(x^2 + y^2)]^2} - 0.5 \quad (2)$$

其中: $|x| \leq 100$, $|y| \leq 100$ 。

已知该函数全局最小点为 $f(0, 0) = -1$ 。图 4 为该函数极值分布图,从图中可以看到,该函数在距全局最小点 $x^2 + y^2 \leq 3.14$ 的范围内存在无穷多个局部极小点,且函数强烈振荡,因此一般算法难以得到全局最优解。

图 4 Schaffer函数极值分布图

表 2 列出了用 SA 算法和 ISA 算法分别对 Schaffer函数求最小解的结果以及所需计算时间。

4.3 数值仿真结果评价

在对以上两个数学函数求解全局最小值的仿

表 2 SA 算法和 ISA 算法对 Schaffer 函数的寻优结果

算法	次数	x	y	f	时间 /s
SA	1	- 1. 5226749E-03	8. 4112506E-05	- 0. 99999767	21. 67
	2	2. 7187242E-03	9. 9809703E-04	- 0. 99999160	24. 09
	3	3. 0013838E-04	1. 7288419E-03	- 0. 99999692	21. 47
ISA	1	- 2. 4730478E-05	- 1. 6874829E-06	- 0. 99999999	10. 86
	2	1. 5815031E-05	3. 9507973E-06	- 0. 99999999	10. 19
	3	2. 5838915E-05	- 3. 1083567E-05	- 0. 99999999	11. 48

真中, ISA 算法的切换准则均取为:当单纯的 SA 算法在连续 5 次降低温度控制参数 T , 目标函数都保持不变时, 则结束 SA 算法。此后, 利用记录器中记下的当前最优解作为初始点, 在最后一个温度 T 下的搜索邻域内, 开始启动步长加速法。

在第一例仿真中, ISA 算法所用时间为 SA 算法时间的 $1/3 \sim 1/2$ 倍, 时间显著缩短; 在第二例仿真中, ISA 算法在所用时间不到 SA 算法的 $1/2$ 倍的前提下, 计算精度还普遍提高。为了更好地说明寻优搜索过程, 文中还给出了第一例仿真中目标函数值 f 随迭代次数 n 变化的寻优动态搜索轨迹图。从图中迭代次数 n 的大小可以看出, ISA 算法较 SA 算法可大大减小寻优迭代次数。

以上结果对比和讨论说明:在搜索的最终结果方面, SA 算法和 ISA 算法都具有全局寻优能力, 可以完全收敛到全局最优解; 但在搜索的效率方面, ISA 算法远比 SA 算法表现优越。

5 改进模拟退火算法在三相异步电动机优化设计中的应用

基于 ISA 算法, 本文研究了中小型三相异步电动机的优化设计问题, 对多台样机进行了优化设计。ISA 算法的初始解采用由原企业分析设计得到的结果, 初温 T_0 取为 100, 降温方式为依次递减为原来的 0.9 倍, 每一温度下 M 过程抽样次数为 100 次。

以有效材料 (主要材料) 成本最小为目标时, 目标函数为

$$\min f = G_{fe} \times P_{fe} + G_{cu} \times P_{cu} + G_{al} \times P_{al} \quad (3)$$

其中 G_{fe} ——硅钢片重量, kg

G_{cu} ——铜导线重量, kg

G_{al} ——铸铝的重量, kg

P_{fe} ——硅钢片的单价, 元 /kg

P_{cu} ——铜导线的单价, 元 /kg

P_{al} ——铸铝的单价, 元 /kg

本文取 $P_{fe} = 4$ 元 /kg, $P_{cu} = 25$ 元 /kg, $P_{al} = 15$ 元 /kg,

约束条件为以下 9 项

$$\begin{cases} \cos & \cos \\ I_{st} & I_{st}, T_{st} & T_{st} \\ T_m & T_m, B & 1.8 \\ 70\% & S_f & 80\% \\ J & 6.5 \times 10^6, A & 50000 \end{cases} \quad (4)$$

式中 ——效率的设计值

\cos ——功率因数的设计值

I_{st} ——起动电流倍数的设计值

T_{st} ——起动转矩倍数的设计值

T_m ——最大转矩倍数的设计值

(右上角加“ ”号的为各量的国家标准值)

B ——磁密, T

S_f ——槽满率

A ——线负荷, A /m

J ——电流密度, A /m²

独立变量取以下 18 个: 定子铁心内径 D_{il} , 定子铁心长度 L_i , 气隙长度, 每槽导体数 Z_0 , 导线并绕根数 N_1, N_2 , 线规直径 ϕ_1, ϕ_2 , 定子槽形尺寸 b_{s1}, R, h_{s12} , 转子槽形尺寸 b_{r1}, b_{r2} (或 ϵ_2), $b_{r3}, b_{r4}, h_{r12}, h_{r3}$ 。算法适用于定子圆底槽和转子圆底槽、梯形槽、凸形槽、刀形槽的优化设计。

算法切换准则为:若温度参数连续 15 次降低时, 目标函数波动都小于 5 元, 则结束模拟退火算法, 启动步长加速法。

以效率最高为目标时, 目标函数为

$$\max f = \quad (5)$$

独立变量仍为上述 18 个变量。约束条件与式 (4) 类似, 但第一项效率约束条件改为

$$C < C \quad (6)$$

其中 C ——有效材料成本, 元

C ——原始设计方案的有效材料成本, 元

算法切换准则为:若温度参数连续 10 次降低时, 目标函数波动都小于 0.001, 则结束模拟退火算法, 启动步长加速法。

表 3 所示为采用 ISA 算法对 11 台不同型号的三相异步电动机进行优化设计的结果 (表中的成本指有效材料成本, 成本降低和效率提高百分比都是相对于原始设计方案而言)。可以看到, 采用 ISA 算法对三相异步电动机进行优化设计后, 有效材料成本平均节省了 14.07%, 效率平均提高了 0.70%。结果表明, 在保持性能、工艺等满足要求的条件下, 通过 ISA 算法优化设计, 合理

调整结构尺寸,使硅钢片、铜导线、铸铝三种有效材料达到最佳分配,可以显著减小有效材料的总成本;或者在有效材料总成本不增加的情况下,提高电动机的效率。

表 3 基于 ISA 算法的三相异步电动机优化设计结果

电机型号	原始设计方案		以有效材料成本最低为优化目标			以效率最高为优化目标		
	效率	成本 /元	效率	成本 /元	成本降低 /%	效率	成本 /元	成本降低 /%
Y80L-2	.7842	67.07	.7748	58.49	12.8	.7895	64.23	0.68
Y90L-4	.7901	112.32	.7900	105.26	6.3	.8083	111.43	2.30
Y100L1-4	.8269	154.13	.8179	148.66	3.5	.8346	152.10	0.93
Y132M2-6	.8517	404.19	.8530	390.42	3.4	.8565	404.16	0.56
Y132S-4	.8726	328.23	.8562	271.37	17.3	.8745	327.58	0.21
Y160L-6	.8967	665.80	.8860	525.53	21.1	.9002	663.35	0.39
Y160M-6	.8721	517.05	.8609	404.95	21.7	.8771	510.95	0.57
Y180L-6	.8970	861.36	.8950	749.47	13.0	.9011	855.15	0.46
Y180L-8	.8866	829.49	.8706	695.32	16.2	.8908	802.11	0.47
Y200L-8	.8898	986.24	.8800	816.76	17.2	.8979	981.57	0.91
Y250M-8	.9174	1856.85	.9050	1444.70	22.2	.9199	1856.85	0.27

6 结论

对两个典型数学函数的检验表明,通过将 SA 算法与步长加速法进行有机结合,新构造的 ISA 算法相对于 SA 算法在保持全局寻优能力的前提下,能有效节省搜索时间,显著改善了 SA 算法的时间性能。通过开发基于 ISA 算法的三相异步电动机优化设计软件,对 ISA 算法在三相异步电动机优化设计中的应用效果进行了检验。结果表明,在不改变电动机的结构设计和制造工艺的情况下,基于 ISA 算法的优化设计能显著减少材料成本和提高电动机效率。本文的研究证明 ISA 算法对三相异步电动机优化设计是实用有效的,从而为生产实际提供了新的更好的设计途径,具有工程实用价值。

参考文献

- 1 王 凌. 智能优化算法及其应用 [M]. 清华大学出版社, 2001.
- 2 金 明. 基于模拟退火算法的电力变压器优化设计

[J]. 电工技术杂志, 2000(2): 5~7.

- 3 孟大伟, 周美兰. 模拟退火算法在电机设计中的应用 [J]. 电机与控制学报, 2001, 5(3): 154~162.
- 4 黄哲理, 赵 光, 汪国梁. 模拟退火算法在电机全局优化设计中的应用研究 [J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(2): 8~15.
- 5 王 伟, 张 健. 模拟退火算法在电机优化设计中的应用. 微电机, 2000, 33(3): 10~13.
- 6 R. A. Rutenbar. Simulated Annealing Algorithm: An Overview [J]. IEEE CIRCUITS AND DEVICES MAGAZINE, 1989: 19~26.
- 7 李 辉. 改进遗传算法在电力变压器优化设计中的应用研究 [D]. 重庆大学, 2000.

收稿日期: 2004-01-30

相关链接

- 1 卢琴芬, 陈 宇, 叶云岳, 陈小峰. 遗传模拟退火算法在圆筒型直线感应电机优化设计中的应用. 中小型电机, 2002, 29(5): 17~19.
- 2 包广清, 江建中. 现代电机优化设计纵横谈. 中小型电机, 2004, 31(4): 1~6.

我国首台太阳能电源车在杭州问世

国内首台用于军事装备的太阳能电源车日前在杭州问世。这是由解放军某部和杭州爱知工程车辆有限公司共同研制开发的。

这台型号为 HYL5220TDY 的太阳能电源车, 集光控跟踪、电能转换、液压电控等多种技术于一体, 是以太阳能发电为主, 柴油机发电为辅的移动电源供应设备。工作时不会产生红外线辐射和噪声, 采光板自动跟踪光源, 具有高度机动性、持续性、稳定性和隐蔽性。