

文章编号: 1000-6893(2000)06-0561-03

# 模拟退火算法和遗传算法在航空直流测速发电机优化设计中的应用与性能比较

刘向群, 仇越

(北京航空航天大学 304 教研室, 北京 100083)

## APPLICATION AND PERFORMANCE COMPARISON OF GENETIC ALGORITHM AND SIMULATED ANNEALING ALGORITHM IN THE MOTOR OPTIMAL DESIGN

LIU Xiang-qun, QIU Yue

(Faculty 304, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘要:** 结合某航空永磁直流测速发电机的优化设计, 论述了模拟退火算法和遗传算法的启发式特点、运行过程, 说明模拟退火算法和遗传算法是电机较为理想的最优设计方法。

**关键词:** 测速发电机; 优化设计; 模拟退火算法; 遗传算法

**中图分类号:** V 242 **文献标识码:** A

**Abstract:** This paper discusses the optimal design of permanent magnet DC tachogenerator, then presents the heuristic characters, the process of running genetic algorithm (GA) and simulated annealing algorithm (SAA), and thereby demonstrates that the two algorithms are ideal methods in the motor optimal design.

**Key words:** tachogenerator; optimal design; simulated annealing algorithm; genetic algorithm

### 1 测速机数学模型的建立

要对某测速机进行优化设计, 关键是建立数学模型, 为此首先确定其优化目标。对于测速发电机, 它是一种信号电机, 其突出的技术指标是负载输出斜率, 表示式是

$$u_n = \frac{R_L}{R_L + R_2} u_{n0}$$

其中:  $u_{n0} = pN \Phi_{\delta 0} / (60a)$  为空载输出斜率;  $p$  为极对数;  $a$  为支路对数;  $N$  为总导体数;  $\Phi_{\delta 0}$  为空载气隙磁通;  $R_2$  为转子电阻;  $R_L$  为负载电阻。

测速机技术指标还要求有小的线性误差, 低的无信号区(不再列出公式)。它们对航空产品尤为重要。

综上所述, 当负载电阻  $R_L$  一定时, 转子电阻  $R_2$  愈小, 输出斜率愈大, 电枢反应引起线性误差愈小, 且无信号区可缩小, 所以, 对测速机进行优化设计时要尽量减小转子电阻。因此测速机的目标函数应是输出斜率和电枢电阻  $R_2$  的函数, 采用下式为其目标函数

$$F(X) = R_2 u_{n0} / u_n (\Omega)$$

式中:  $u_n$  为技术指标值;  $u_{n0}$  为设计值, 采用两比值的形式是为了既使设计值接近技术指标值, 又使两比值数量级与  $R_2$  的数量级相当, 便于寻优。

它的最优化问题为目标函数  $F(X)$  的最小值, 表示式如下

$$\min F(X) = \min (R_2 u_{n0} / u_n)$$

要建立好数学模型还要确定优化设计变量和列好约束条件。

当极对数和支路对数一定情况下, 若要满足负载输出斜率的要求, 确定其总导体数和空载气隙磁通是至关重要的。由测速机的工作原理可知, 气隙磁通取决于电机气隙的大小、定转子和磁钢的形状、几何尺寸等。因此确定与上述有关的 10 个变量为优化设计变量(这里不再列出)。

约束条件包括电机的一般约束和性能约束。这里特别要指出的是针对上述目标函数式(式中输出斜率用相对值表示), 在性能约束中必须对其输出斜率的值进行约束(例如:  $u_n \geq 0.01$ ), 否则所要求的输出斜率的值难于满足。

### 2 模拟退火算法和遗传算法的基本原理、启发式特点及运行过程

通过几年的摸索, 认为 GA 算法和 SAA 算法是性能优良的最优设计方法。它们都是建立在随机算法的基础上。

随机法是利用计算机内产生的随机数形成多维空间经过大量地随机取点, 即通过同一迭代格式的反运算并利用概率统计中的优选原理进行

寻优。它的运算避免常规数学解析法基于梯度寻优带来的缺点,适用于目标函数不连续或不可导的情况,能保证寻优。因而使它可以比较有效地解决优化设计中初始解的可行性问题。一般情况下,运算过程扰动较大,计算量较大,运算不可重复。

图1表示了利用一般随机算法对上述测速机进行优化设计运算过程中其目标函数 $F(X)$ (纵坐标表示)随反复迭代次数(横坐标表示,本例3500次)的变化情况。明显看出,整个运算过程均是振荡的。为此,可采用记忆法(记录整个运算过程中的最优点)以完成寻优任务。

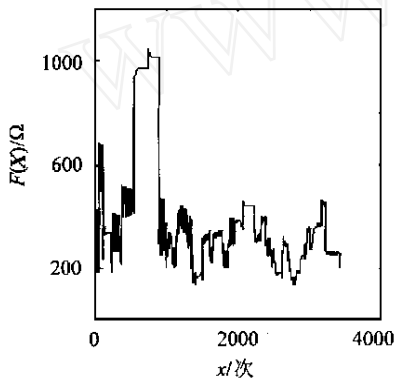


图1 随机法

#### (1) 模拟退火算法启发式特点及运行过程

SAA 算法是一种随机性搜索算法,其启发式特点是它模拟晶体物质的退火过程,反复迭代运算,进行优化问题的求解。

固体物质从高温熔化态逐渐降低温度,粒子逐渐形成低能态的晶格。当温度下降的速率足够缓慢时,物质将形成最低能量的状态。考察实际的优化问题,有类似的过程:例如把测速机进行优化过程中的一个解 $X_i = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$ 看成物质体系的微观状态,而把目标函数 $F(X_i)$ 看成物质体系在状态 $X_i$ 下的内能。用一个控制参数 $T$ 模拟温度从足够高的值缓慢下降,用所谓Metropolis 准则模拟该体系在此 $T$ 下的热平衡状态,即对当前状态 $X_i$ 作随机扰动,在其邻域( $X_i$ 的周围一个随 $T$ 减小而减小的区域)内随机产生新的状态 $X$ 。考虑它们的目标函数值,以一定的概率 $p$ 判断是否接受新解 $X$ ,并取代原解 $X$ 。

$$p(X = X) = \begin{cases} 1, & F(X) < F(X) \\ e^{-(F(X) - F(X))/T}, & F(X) > F(X) \end{cases}$$

式中: $T$ 为控制参数,当 $T$ 降低至足够低,这样的扰动重复足够多次后(取4500次),算法趋向于最优解。

可以看出,SAA 算法不同于一般随机算法也正是它的启发性特点,就体现在Metropolis 准则的应用上:算法初期和中期(约在2500次以前)对于随机产生的新解不仅接受性能优良的解,还可以以较大概率接受恶化解(即目标函数值较前更大);这就使得算法有较大扰动,见图2(纵坐标表示了每个状态下目标函数 $F(X)$ 值,横坐标表示循环的次数),曲线类似随机法。而在进程末期接受恶化解的概率减小直至不接受。这就使得算法由大扰动逐渐减缓,逐渐趋向于最优解,并能跳离局部最优的“陷井”。因此,它就更有可能求得优化问题的全局最优解<sup>[2]</sup>。

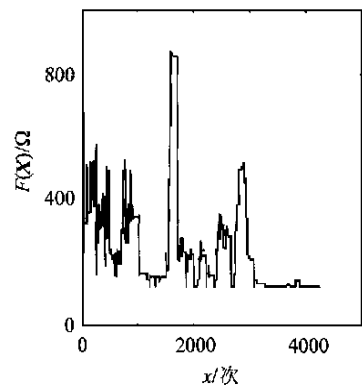


图2 退火法

SAA 算法本质上讲是一种串行算法。基本过程中的每一步都需要根据前面的结果进行,所以必须按次序进行,缺少任何一步都无法继续。对电机设计这样的多极值点、不连续的优化问题,SAA 搜索到全局最优解的计算量就要大一些。

(2) 遗传算法启发式特点及运行过程 GA 算法建立在生物自然选择和自然遗传学机理基础上的,是一种模拟自然界生物进化过程,高度并行、随机、自适应的算法。

自然界中生物进化过程是发生在作为生物体结构编码的染色体上,不是生物体本身。自然选择使得染色体在结合重组时适应性好的个体染色体繁殖的机会将更大;而不时发生的遗传进化(复制、交叉、变异等)让新的子代染色体类似并优于父代,进化结果必然是适者生存,不适者被淘汰。

应用GA 算法对上述测速机进行优化设计,它的优化过程是,首先将电机十个设计变量用基因码(相当于编码染色体)表示,并将基因码用一定方式组成基因串。随机初始化,产生多个基因串,建立一组初始群体(一组初始候选解)。计算群体中每一个串相应的目标函数值,按其解优劣进

行排列,并按某种指标从中选出的一些候选解进行评价、选择。再利用遗传算子如复制、交叉、变异等对其进行运算,以产生新一代一组的候选解。然后在此基础上进行往复循环,使得候选解的质量不断提高。迭代一定的次数或者满足收敛指标,寻优结束。

GA 算法的许多随机操作决定了它是一种随机算法。利用编码技术对群体中的个体进行简单的复制、交叉和变异作用是 GA 算法的精髓。复制、交叉和淘汰是利用前代一组串中适应性好的位和段来生成后代一组串,保证后代串的性能要优于前代,而变异是偶尔在把前代串中的位和段用新的进行替代以产生后代串,保证算法能搜索到解空间的每一个点,避免局部最优。由于上述种种作用的“指导”,使群体不断地进化,其群体(本例中有 64 个个体)的平均目标函数值一代代地减小,最优个体的目标函数值也趋于最优解。图 3 表示了每代群体平均目标函数  $F(X)$  的值随循环的代数(横坐标表示,本例用 20 代)的变化情况。可以看出,每一代候选解的平均目标函数值变化趋势是明显地、不断地下降,收敛快速而稳定。这正是 GA 算法的启发式特点所造成的。

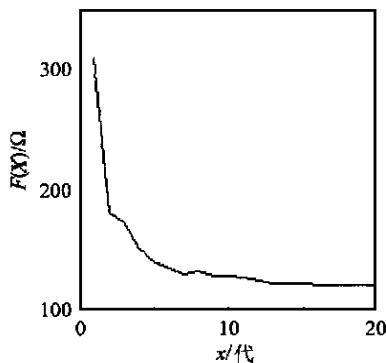


图 3 遗传法

GA 算法对“群体”进行运算体现其内在的固有的及高度的并行性。GA 算法每一步都是从多个点出发进行搜索,这些点都随机分布于解空间的不同位置,搜索到全局最优解的几率就更大。因此,GA 算法固有的并行性也使图 3 中平均目标函数值变化趋势是明显地下降,收敛快速稳定,也是使它的性能优于其它算法的主要原因。

GA 法中要对群体进行种种遗传进化运算,所以编程、运算均较随机法和 SAA 算法复杂。

### 3 3 种算法计算结果及分析

在对上述测速机进行电磁复算(性能校核)

后,应用随机算法、模拟退火算法和遗传算法 3 种算法对其优化设计。计算结果见表 1。

表 1 电磁复算和 3 种优化算法的优化结果对比表

		目标函数	电枢电阻	输出斜率
电磁复算		273.1	246	0.111
优化设计	随机算法	132.2	123.1	0.01074
	退火算法	121.1	120.9	0.01002
	遗传算法	118.8	118.8	0.010001
优化约束条件				0.01

由表 1 对 GA 算法和 SAA 算法的性能分析如下:

(1) 高效性 3 种优化设计后的产品性能都较原有产品有大幅的提高,在保证输出斜率的前提下,优化设计目标函数减小到原来的 42% ~ 48%, SAA 和 GA 两种算法与随机法相比性能更优。

(2) 稳定性 优化变量数目是影响算法性能的重要因素。在本例以及其它几种电机优化设计中,优化变量的个数都增加到 10 个,运算量大,并经过多次重复运算,计算的结果相近,说明 SAA 和 GA 两种算法具有较好的稳定性。

(3) 广泛性 由于两种算法都成功应用于测速机等多种电机的优化设计,再次证明两种算法应用的广泛性。

### 参 考 文 献

- [1] 王冲权. 电机的计算机辅助设计与优化技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1988
- [2] 康立山, 谢云, 尤矢勇, 等. 非数值并行算法(第一册)——模拟退火算法[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [3] 刘勇, 康立山, 陈毓屏. 非数值并行算法(第二册)——遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [4] 刘向群. 遗传算法在两相伺服电动机优化设计中的应用. 微特电机, 1996, 113(2): 5~10

作者简介:



刘向群 1942 生,女,北京人,现为北京航空航天大学教授,1966 年毕业于北京航空航天大学,主要从事电机 CAD(包括人工智能的优化方法)、电机控制、测试技术、故障检测与诊断等方面的研究。电话 82317314(O)。



仇越 1976 年,男,四川绵阳人。现为北京航空航天大学硕士研究生。