

综述

电机优化设计技术发展情况

范镇南, 韩力

(重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 在分析电机优化设计技术文献的基础上,总结了国内在电机传统优化设计方面的特点,几种主要的新型算法及其在电机设计中的应用,电磁场逆问题的优化设计,以及电机优化设计技术的发展动向;并对该领域未来的发展趋势作了展望。

关键词: 电机设计; 优化算法; 电磁场逆问题; 数值方法

中图分类号: TM302 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2006)08-0003-05

Overview about the Optimization Design of Electrical Machines

FAN Zhen-nan, HAN Li

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Based on analysis of the interrelated technical literatures for the optimization design of electrical machines, the features of conventional optimization design of electrical machines in China are summarized. Several primary optimal algorithms and its application in design of electrical machines, optimization design of inverse electromagnetic field problems, the technical developing trend of optimization design of electrical machines, the future developing trend of this field are presented.

Key words: design of electrical machines; optimal algorithms; inverse electromagnetic field problems; numerical methods

0 引言

电机的优化设计技术是电气工程领域中一个长盛不衰的研究热点。所谓电机优化设计,是指在满足国家标准、用户要求以及特定约束的条件下,使电机效率、体积、功率、重量等设计性能指标达到最优的一种设计技术。它可以被描述为一个有约束、多目标、多变量以及多峰值的复杂非线性问题:

$$\begin{cases} \min f(X), & X \in R^n \\ g_j(X) \leq 0, & j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(X)$ ——优化目标函数;

$g_j(X)$ ——约束条件函数;

m ——约束条件数;

n ——变量数;

X ——优化变量。

从早期凭经验判断到用古典极值理论和传统随机算法寻优,再到目前广泛使用的通过数学建模用全局优化理论求得最优设计,电机优化设计

取得了丰硕的成果。本文在分析大量文献的基础上,阐述了国内在电机传统优化设计的特点及几种主要的新型优化算法及其在电机设计中的应用,电磁场逆问题的优化设计,电机优化设计技术的未来走向等,以利于促进电机设计的进一步发展。

1 电机优化设计方法简述

1.1 传统优化设计方法

电机传统优化设计是建立在古典极值理论和传统随机算法基础上的优化设计方法,主要有直接搜索法和随机搜索法两种寻优模式。其中应用较为广泛的寻优策略有 Powell法、单纯形法、可变容差法和梯度法等。利用这些算法,电机设计曾取得了一定的成果,但也暴露出传统优化算法本身一系列难以克服的问题。其中比较突出的问题是:此类算法收敛速度虽然很快,但由于寻优过程受初始解的制约太大,优化结果常常收敛于初始解附近的局部最优点,全局寻优能力较差;且此

类算法在建模和求解中忽略的因素太多,使得算法难于求解复杂的工程实际问题。上述缺陷使电机传统优化设计的应用受到了极大的限制。

1.2 几种主要的新型优化算法

通过对物理、自然或社会现象的观察和模拟,人们成功地提出了以模拟退火算法、遗传算法、禁忌搜索算法等全局优化算法为代表的新型优化算法。与传统优化算法相比,这些算法能跳出局部极值点,并能以较少的计算代价搜索到最优解。

1.2.1 模拟退火算法

模拟退火(Simulated Annealing, 简为 SA)算法是 S Kirkpatrick 于 1983 年提出的一种适用于组合优化问题的优化算法。其出发点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 算法是在某一初温下,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。其算法框图如图 1 所示^[1]。

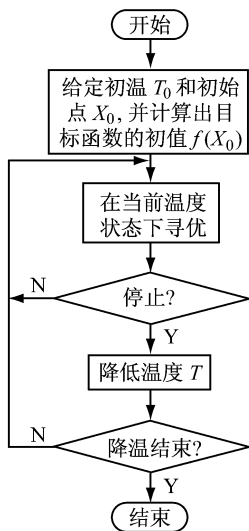


图 1 模拟退火算法框图

该算法具有很好的局部搜索能力,并能使搜索过程避免陷入局部最优解;但缺点是对整个搜索空间了解不多,不便于使搜索过程进入最有希望的搜索区域,导致采样次数过多,优化时间长。

1.2.2 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm, 简为 GA)是由 Holland 于 20 世纪 70 年代初首先提出的。其基本思想是:首先通过编码操作将问题空间映射到

编码空间;然后在编码空间内进行选择、交叉、变异 3 种遗传操作及其循环迭代操作,模拟生物遗传进化机制,搜索编码空间的最优解;最后逆映射到原问题空间,从而得到原问题的最优解。其算法框图如图 2 所示^[2]。

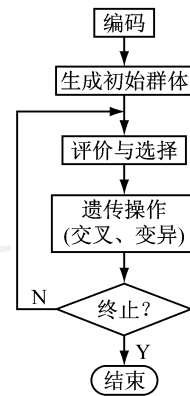


图 2 遗传算法框图

这是一种高度并行、随机、自适应的算法,全局搜索能力强,但缺点是局部搜索能力较弱。

1.2.3 禁忌搜索算法

禁忌搜索(Tabu Search, 简为 Tabu)算法是由 F Glover 等人于 1986 年为求解组合优化问题提出的。Tabu 算法的显著优点是:在寻优中,记录下已经到达过的局部最优点或到达过局部最优的一些过程,在下一步搜索中不再搜索或有选择地搜索这些点或过程,避免了寻优过程中大量无效劳动,保证了对不同有效搜索途径的探索;缺点是判据方面还不够成熟,与直接搜索法相比,速度不够快。其算法框图如图 3 所示^[3,17]。

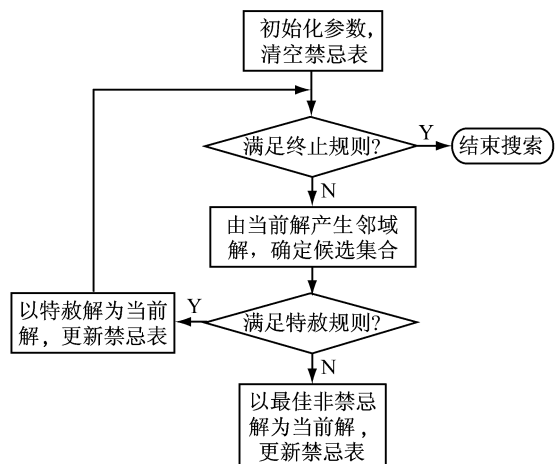


图 3 禁忌搜索算法

1.2.4 其他新型优化算法

其他较著名的新型优化算法有:源于遗传算法但不需进行编码和解码操作的差异进化算法(DE);源于模拟退火算法、将启发和随机相结合的Alpex算法;源于对鸟群捕食行为的研究而提出的粒子群优化算法(PSO);模拟生物免疫机制的免疫算法(A);基于“系统地探寻整个可行域以寻找全局最小解”思路的区域消去法;基于对大脑信息处理机制的模拟研究而诞生的神经网络算法;以专家提供的专业知识和经验为依据的专家系统;利用规格化的正交表合理安排设计方案的正交算法等。

2 在电机设计中的应用和发展

2.1 对算法本身的参数、结构进行改进

文献[4]在国内较早地对模拟退火算法进行了初步的适应性改进,并将其用于单相电机的优化设计。文献[5]在研究电机优化设计特点的基础上结合实际,对模拟退火算法作了适应性改进(包括共用变量与非共用变量的搜索模式,连续变量与非连续变量的搜索模式,以及全局寻优与收敛速度之间的协调问题),从而构成了更实用的电机全局优化设计算法;应用模拟退火算法对Y系列小型三相异步电机进行优化计算,并对堵转电流、力能指标及有效材料进行了对比分析。文献[6]通过改善控制参数 T ,并为每个变量规定适合自身变化的步长,对模拟退火算法作了更完善的适应性改进,并对容量自适应电机进行了实际的优化设计。文献[7]在国内首先将遗传算法引入电机及电力变压器的优化设计领域,提出了构造基因链的方法,并针对电机及变压器优化设计的特点,对传统的遗传算法和基因操作提出了改进措施。文献[8]结合异步电机优化设计的特点,使用“近亲变异率”对传统遗传算法进行了改进,增强了算法的搜索能力。文献[9]采用双亲四子交叉算子、自适应变异算子及多轮次循环优化策略,提出了改进实数编码遗传算法(RGA),并将其应用于Y系列三相异步电机的优化设计,分别以提高效率和降低成本为目标进行了优化。文献[10]在国内率先对差异进化算法本身作了改进,并对一台永磁同步电机进行了综合的优化设计。文献[11]详细分析了粒子群算法原理,提

出了改进措施,增强了其全局寻优能力,并应用于直线异步电机的设计,证明了该算法全局寻优能力好,计算速度快,适合电机优化设计。

2.2 将全局优化算法与直接搜索法相结合

此类寻优策略充分利用了直接搜索法收敛较快的优点,先使用全局算法搜索到全局最优解的吸引区,然后再应用直接搜索法进行搜索,这样常常可以在最优化结果相当或相近的情况下,大幅度缩短计算时间,从而提高收敛速度。

文献[12]较早地在国内设计界介绍了由模拟退火算法和直接搜索法构成的混合寻优策略,在实用中选取直接搜索法中的Powell法与模拟退火算法相结合,以Y系列电机为例进行了成功的试算。文献[13]将模拟退火算法与步长加速法进行了有机的结合,提出了改进模拟退火算法(ISA)。该算法能在保持全局优化能力的前提下,有效节省搜索时间,显著改善模拟退火算法的时间性能。此算法应用于三相异步电机的优化设计中,获得了成功。文献[14]首先把区域消去法应用于电机设计并结合Powell法进行直线电机的优化设计。实践证明该方法计算速度快,全局寻优性能好,非常适合工程优化。除此之外,目前仍有许多研究者在进行这方面的探索。

2.3 多种优化算法的综合应用

文献[15,16]将遗传算法和模拟退火算法相结合,充分利用了遗传算法全局搜索能力强而模拟退火算法局部搜索能力强的优点,克服了遗传算法局部搜索能力差而模拟退火算法全局搜索能力差的缺点,成功地进行了圆筒直线异步电机和长定子同步直线电机的优化设计。文献[17]应用模糊优化设计算法建立了电机的优化设计数学模型,再利用Tabu算法对目标函数进行优化,减少了电机体积和设计时间,提高了电机的力能指标。文献[18]先使用Tabu算法对高维问题进行降维分解并缩小搜索域,然后用遗传算法进行全局寻优。应用此法对三相异步电机进行了优化设计,获得了满意度较高的优化结果。文献[19]将人工神经网络、数据库技术与专家系统相结合,提出并建立了电机设计混合型专家系统EMDIES的模型,用以指导三相笼型转子异步电机的设计。

近年来优化算法在电机设计领域的应用取得了长足的进步,但如果要更好地实现电机的全局

优化设计,仅依靠改进优化算法是不够的。

3 电磁场逆问题的电机优化设计

对电磁场逆问题的求解通常是将其分解成一系列的正问题,然后利用优化算法进行迭代求解,以最终达到优化设计的目的。所谓电磁场正问题,就是给定场的计算区域以及各区域材料(媒质)组成和特性,求其场域中场量随时间、空间分布的规律。而电机电磁场逆问题的优化设计,则是根据给定的电机性能、电磁场参数和相关特性,在一定的约束条件下,优化求解电机的几何结构参数、材料性能参数及激励参数等物理量。

与单纯使用优化算法进行电机设计相比,从电磁场逆问题角度出发进行电机优化设计,能够利用场的观点更加全面地研究电机,能够更加精确地考虑磁饱和、涡流效应和集肤效应等因素对电机参数及性能的影响,进而可以更准确地计算出电机电磁场的分布、电磁参数和性能指标,从而获得更好的优化设计结果。

采用电磁场逆问题的研究方法进行电机优化设计,关键在于电机电磁场数值计算与优化算法的结合。此求解过程由以下 2 个步骤构成:

首先,应用电机电磁场的基本控制方程

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right] = \mathbf{J}_s - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (2)$$

结合边界条件和材料特性,建立电机电磁场的计算模型,采用一定的数值解法,求解电机的电磁场分布、电磁参数和性能指标。

其次,选定电机优化目标函数、优化变量及约束条件,建立优化设计模型,采用一定的优化算法,结合电磁场数值计算结果进行求解。

基于上述思路,文献[20]针对直线同步电机的特点,构造了直线同步电机的三维电磁场有限元数值计算模型,然后选定电机推进力谐波分量的最小化为优化目标,以磁极的结构尺寸为优化变量,结合遗传算法建立了电机优化设计模型;并对具体实例进行了成功的优化计算,表明这是电机优化设计领域中一条行之有效的思路。文献[21]将一种改进的 Tabu 算法与电磁场有限元分析法结合起来,建立了适合大型水轮发电机和发电电动机及贯流式机组转子极靴设计的多段圆弧极靴优化设计模型,并在对真机的试算中取得

了令人满意的结果。文献[22]对同一个问题,使用改进区域消除法结合电磁场有限元分析建立了优化设计模型,得到了与国外样机数据极为接近的优化结果。采用类似思路,文献[23]建立了轮毂式电机的准静态电磁场数值计算模型,结合改进的 Tabu 算法,对一台轮毂式永磁无刷电机实施了优化设计,使永磁材料的用量以及样机价格、体积和重量都有了相应的减少。

4 前景展望

4.1 优化算法将进一步发展

目前流行的各类随机优化方法和确定性优化方法远没有完美地解决避免陷入局部最优解的问题,并且优化搜索的收敛速度缓慢,还不能令人满意^[24-27]。一些新型的优化算法(如蚁群算法、粒子算法等)正在探索并不断发展。

4.2 对电磁场逆问题的研究将更加深入

电磁场逆问题实际上包含了电磁场正问题与优化方法的组合。由于每步迭代中都需要进行若干次电磁场的数值计算,并且现阶段各种全局优化算法的收敛速度本来就不高,所以现阶段面临着计算量大、计算效率难以保证的问题,不能满足包含三维瞬态耦合问题在内的一系列复杂大系统计算的要求^[28,29]。随着优化算法和电磁场数值计算方法的进步,该问题应能逐步得到解决。近年来出现的表面响应模型与随机类优化算法的结合,就是这方面值得注意的一个研究方向。

4.3 对材料特性的模拟将更加趋于精细化

电机电磁场的数值计算精度在相当大的程度上依赖于对求解区域中各种材料电磁参数和特性(如非线性问题、各向异性问题、磁滞问题、温度效应问题等)的准确模拟^[29]。上述问题的计入将使优化结果进一步精细化。这将促进对材料的微观物理特性的研究以及对宏观数学模型的改进,也将促进对新材料的研究应用,而新材料的应用又将进一步促进对材料电磁特性的模拟研究。

综上所述,电机优化设计技术已经取得了丰硕成果,但远未走到尽头。随着优化技术与电磁场计算技术的发展,人们终将具备从综合物理场(电磁场、温度场、流速场、应力场等)的角度研究电机内物理现象的能力;同时能够结合更先进的优化算法,应用更强大的计算机工具,真正实现电

机的全局优化设计。

【参考文献】

- [1] 王凌. 智能优化算法及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [2] 李鲲鹏, 胡虔生. 遗传算法在电机优化设计简介 [J]. 微特电机, 2001(4): 32-33.
- [3] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [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] 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.
- [6] 周美兰, 孟大伟. 容量自适应电动机的优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 25(5): 132-135.
- [7] 樊叔维, 汪洁, 鱼振民, 等. 遗传算法在电力变压器和电机全局优化设计中的应用研究 [J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(6): 15-21.
- [8] 李景川, 励庆孚, 丁国兴. 基于遗传算法的大中型异步电机的优化设计 [J]. 大电机技术, 1998(3): 34-38.
- [9] 韩力, 李景灿. 应用改进实数编码遗传算法的三相异步电动机优化设计 [J]. 中小型电机, 2005, 32(2): 1-5.
- [10] 陈晨, 张玮. 差异进化算法在永磁同步电机优化设计中的应用 [J]. 微特电机, 2004(2): 10-12.
- [11] 夏永明, 付子义. 粒子群算法在直线感应电机优化设计中的应用 [J]. 中小型电机, 2002, 29(6): 14-16.
- [12] 孟大伟, 张弘. 基于模拟退火法及直接搜索法的混合优化策略在电机设计中的应用 [J]. 电机与控制学报, 1997, 1(2): 94-97.
- [13] 韩力, 王亚峰, 李伟, 等. 改进模拟退火算法在三相异步电动机优化设计中的应用 [J]. 中小型电机, 2004, 31(6): 1-5.
- [14] 贾宏新, 叶云岳. 一种新型全局优化算法在直线电机优化设计中的应用 [J]. 微特电机, 2001(1): 3-5.
- [15] 卢琴芬, 陈宇, 叶云岳, 等. 遗传算法在圆筒型直线感应电机优化设计中的应用 [J]. 中小型电机, 2002, 29(5): 17-19.
- [16] 陈宇, 卢琴芬, 叶云岳. 长定子同步直线电动机的设计及其优化 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 18-21.
- [17] 贾克兵, 孙昌治, 耿连发. 禁忌搜索算法在二相永磁同步电动机中的应用 [J]. 微电机, 2002, 35(4): 18-23.
- [18] 方攸同, 陆俭国. 基于随机算法的三相异步电机全局优化 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 18-21.
- [19] 方瑞明, 胡虔生. 异步电动机设计混合型专家系统的研究 [J]. 中小型电机, 2000, 27(3): 11-14.
- [20] 邱琳, 刘长虹, 姚若萍. 基于遗传算法的直线同步电机优化设计 [J]. 大电机技术, 2003(2): 1-4.
- [21] 杨仕友, 倪光正, 钱金根. 电机电磁场逆问题数值计算的改进 TABU 算法 [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 83-86.
- [22] 马文阁, 洛家华, 杨仕友. 应用于电磁场逆问题中的改进区域消除法 [J]. 辽宁工学院学报, 2000, 20(1): 3-6.
- [23] 乔静秋, 陈旭东, 杨仕友, 倪光正. 基于 TABU 算法的轮毂式永磁电机优化研究 [J]. 浙江大学学报, 2002, 36(6): 714-717.
- [24] 王伟, 张健. 模拟退火算法在电机优化设计中的应用 [J]. 微电机, 2000, 33(3): 10-13.
- [25] 耿连发, 孙昌治, 弥丽娜. 现代电机设计中的一种优化算法 [J]. 微电机, 1999, 32(1): 7-9.
- [26] 方瑞明, 翟旭平, 胡虔生. 多轮遗传算法在电机优化设计中的应用 [J]. 微电机, 2002, 35(3): 6-9.
- [27] 刘向群, 仇越. 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及性能比较 [J]. 航空学报, 2000, 21(6): 561-563.
- [28] 谢德馨, 唐任远. 计算电磁学的现状与发展趋势 - 第 14 届 COMPUMAG 会议综述 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(5): 1-6.
- [29] 谢德馨, 唐任远. 计算电磁学近年来的若干重要成果 - 第 15 届 COMPUMAG 会议概述 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 1-4.
- [30] 倪光正, 杨仕友, 钱秀英, 等. 工程电磁场数值计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 1-7.
- [31] 金建铭(美). 电磁场有限元方法 [M]. 王建国, 译. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [32] 颜威利, 杨庆新, 汪友华, 等. 电气工程电磁场数值分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [33] 盛剑霓. 电磁场数值计算 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [34] 李荣华. 边值问题的 Galerkin 有限元法 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [35] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.

收稿日期: 2004-03-17

— 7 —