

传统优化算法与竞选算法应用于机械优化设计的比较

贺春华¹, 张湘伟², 吕文阁²

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 论述了机械优化设计中的传统优化设计算法, 同时介绍了一种现代的优化设计方法——竞选算法的原理及其求解步骤. 采用传统优化设计算法与竞选算法分别对箱形盖板 and 两杆桁架结构的优化设计问题进行求解, 比较了两者的求解方式上的特点, 并就竞选算法与传统优化算法间求解效果进行了比较. 结果表明, 竞选算法是一种非常有效的机械优化设计方法.

关键词: 优化; 竞选算法; 机械设计; 惩罚函数法

中图分类号: TH122

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2010)03-0046-05

优化设计是将最优化原理和计算技术应用于设计领域, 为工程设计提供一种重要的科学设计方法. 它起源于 20 世纪 60 年代初, 并于 20 世纪 60 年代后期成功地应用于机械设计. 近年来, 机械优化设计的应用愈来愈广, 但还面临着许多问题需要解决, 其中之一就是发掘更为有效的优化设计方法^[1].

自然界和人类社会中的各种复杂系统如生态系统、经济系统、社会系统等是经过长期发展而形成的, 它们目前的结构或状态是对环境适应的结果, 它们的发展过程本质上就是一个优化的过程. 在优化理论和方法研究上, 人们通过模拟自然界和人类社会的各种行为、特征和机制, 提出了具有优秀搜索能力的现代优化算法——启发式优化算法, 如模仿物种进化的遗传算法^[2]、模拟金属冷却过程的退火算法^[3]、模拟蚂蚁觅食过程的蚁群算法^[4]、模拟鸟类或鱼群觅食行为的粒子群算法^[5]、模拟人类和动物记忆功能的禁忌搜索算法^[6]等.

竞选是人类社会的一项重要活动, 竞选人通过一系列竞选行为, 以期获得选民们的最大支持. 竞选人根据对选民们的抽样调查来了解当前支持情况, 并决定下一步竞选行动. 为了获得选民们的更高支持, 竞选人总是趋向具有较高威望选民的位置, 而结果总是支持率最高、在选民中威望最高的竞选人赢得竞选. 竞选算法 (election-survey algorithm, ESA)^[7] 就是通过模拟人类社会竞选活动而建立的一种搜索最优解的启发式优化算法. 本文以机械优化设计问题

为例, 对传统优化设计方法与竞选优化算法的求解特点进行比较.

1 传统优化算法

一般来说, 求解机械优化设计问题的传统方法可以分成解析解法和数值计算方法两大类^[8].

1.1 解析法

解析解法是将所研究的机械优化设计问题用数学方程 (数学模型) 描述出来, 然后用数学解析方法 (微分、变分方法等) 求出极值点——即最优解. 根据多元函数存在极值的充分必要条件可知, 利用解析法寻求极值点时, 需要求解由目标函数的偏导数所组成的方程组, 以便找出稳定点, 然后还要用 Hessian 矩阵对所找到的稳定点进行判断, 看它是否是最优点. 在目标函数比较简单时, 求解上述方程组及用 Hessian 矩阵进行判断并不困难. 但在很多实际的机械设计问题中, 优化设计的数学表达非常复杂或为非凸函数, 甚至根本无法用数学方程描述, 应用这种数学分析方法就会带来麻烦, 有时甚至很难解出由目标函数各项偏导数所组成的方程组, 更不用说用 Hessian 矩阵进行判断时的困难了, 在这种情况下不便于甚至不可能用解析方法求解.

1.2 数值计算法

数值计算方法是一种近似的、迭代的数值解法, 它是通过大量试验数据用插值或拟合方法构造一个近似函数式, 然后再求其优化解, 最后通过试验验

证;或者直接以数学原理为指导,从任取一点开始通过少量试验(探索性的计算),并根据试验计算结果的比较,逐步改进而求得优化解.常用的传统数值计算方法有可行方向法、线性逼近法、序列二次规划法、罚函数法和直接法等.数值计算方法是实际问题中常用的方法,但对于复杂问题,由于不能把所有参数都完全考虑并表示出来,只能是一个近似的最优化的数学描述,最后得出的是逼近精确解的近似解.

2 竞选算法

竞选算法是通过模拟竞选过程中蕴涵的优化思想和机制而建立的一种启发式优化算法.在竞选算法中,将解空间想象成选民,将优化问题的当前解想象成竞选人.选民,即可行解所对应的函数值称为选民的威望;竞选人,即当前解所对应的函数值称为竞选人的威望.竞选算法的基本执行过程如下.

Step 0:设置算法参数.

Step 1:初始化一批竞选人,生成各竞选人的初始坐标位置,并根据竞选人的初始位置坐标直接由目标函数计算竞选人的威望.

Step 2:计算竞选人的影响范围.竞选人的威望越高,其影响范围也就越大,当超过一定的极限距离后竞选人对选民的影响降低为零.

Step 3:生成全局和局部抽样调查选民样本,并计算出选民样本的位置坐标.在可行解域中,生成全局抽样调查选民样本.在各个竞选人周围,生成局部抽样调查选民样本.

Step 5:根据各抽样调查选民的位置坐标,由目标函数计算出各抽样调查选民的威望.

Step 6:计算竞选人的支持重心,作为竞选人的下一位置.竞选人的支持重心是通过抽样调查获得的与竞选人较近的、具有较高威望的抽样调查选民位置,因此竞选人的下一步的竞选地点应该就是支持重心的位置.

Step 7:由目标函数计算出竞选人在新位置的威望.

Step 8:比较随机抽样调查选民与竞选人的威望.在计算过程中,为了加快搜索速度和跳出局部最优解,比较抽样调查选民与竞选人的威望,如果抽样调查选民的威望高于竞选人的威望,高威望抽样调查选民将参选而成为竞选人,而低威望竞选人被淘汰.

Step 9:判断.若满足停止准则,则停止,输出所

保留的最好解作为问题的近似全局最优解.否则返回 Step 1.

循环抽样、计算,直至搜索到最优解为止.

3 在机械优化设计中求解结果的比较

3.1 机械优化设计算例1

以文献[9]中箱形盖板优化设计问题为例:如图1所示,箱形盖板的长度 $l_0 = 600$ cm,宽度 $b = 60$ cm,厚度 $t = 0.5$ cm.翼板厚度为 x_1 (cm),承受最大的单位载荷 $q = 0.1$ MPa.要求在满足强度、刚度和稳定性等条件下,设计一个重量最轻的结构方案.设盖板的高度为 x_2 (cm),根据设计要求和约束条件建立该机械优化设计问题的数学模型为^[9]

$$\begin{aligned} \min f(x) &= 120x_1 + x_2, \\ \text{s. t. } \begin{cases} g_1(x) = x_1 > 0, \\ g_2(x) = x_2 > 0, \\ g_3(x) = 0.25x_2 - 1 \geq 0, \\ g_4(x) = \frac{7}{45}x_1x_2 - 1 \geq 0, \\ g_5(x) = \frac{7}{45}x_1^3x_2 - 1 \geq 0, \\ g_6(x) = \frac{1}{320}x_1x_2^2 - 1 \geq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

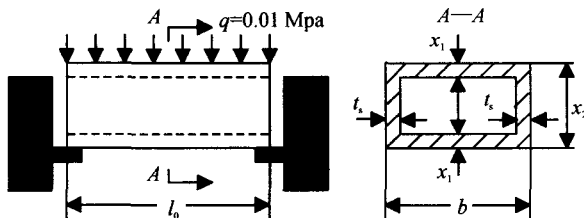


图1 箱形盖板

3.1.1 传统优化算法对箱形盖板优化设计结果

文献[9]采用传统的优化设计方法——内点惩罚函数法求解了该优化设计问题.其构造的惩罚函数如式(2):

$$\Phi(x, r_k) = f(x) + f_k \sum_{u=1}^6 \frac{1}{g_u(x)}, \quad (2)$$

式中, r_k 为惩罚因子.共循环 $k = 71$ 次,迭代129次,求得的最优解为: $x_1^* = 0.6366$, $x_2^* = 24.9685$, $f(x^*) = 101.3605$.

3.1.2 竞选算法对箱形盖板优化设计结果

竞选算法不适合直接求解有约束的优化问题,在求解之前需要对约束条件进行预处理.本文采用Joines和Houck提出的动态惩罚函数法^[10]将式(2)

的约束优化问题转变为无约束优化问题求解:

$$G_k(x) = \min \left(f(x) + (Ct)^\alpha \sum_{i=1}^m |g_i(x)|^\beta \right), \quad (3)$$

式中, C, α, β 为动态惩罚项的调节参数, t 为当前迭代次数.

竞选算法求解该优化问题, 有关参数选取为: 动态函数惩罚项的调节参数取 $C=3, \alpha=3, \beta=3$, 竞选人数为 $m=10$, 2 个未知变量 x_1, x_2 , 初始化为 $(0, 50)$ 之间的随机数. 取 50 次计算最优结果的平均值. 计算结果如表 1 所示. 从表 1 中结果可看出, 当迭代次数(抽样调查次数)达到 10 次时, 所求目标函数的最优值已超过传统优化算法的求解结果. 此时所求未知变量的结果的精度已非常高, 可认为求解成功.

表 1 竞选算法求解箱形盖板优化设计问题的结果

抽样调查次数	x_1	x_2	$f(x)$
5	0.648 6	23.576 1	101.408 1
10	0.625 9	26.220 9	101.328 9
30	0.630 8	25.613 6	101.309 6
50	0.632 9	25.360 7	101.308 7
100	0.634 5	25.166 5	101.306 5

为观察算法的迭代求解速度, 图 2 为目标函数随抽样调查次数的平均收敛情况. 从图 2 中可看出, 竞选算法求解过程收敛非常迅速, 当迭代次数超过 10 次后, 目标函数值的变化已非常小, 这时, 目标函数已非常接近于最优值.

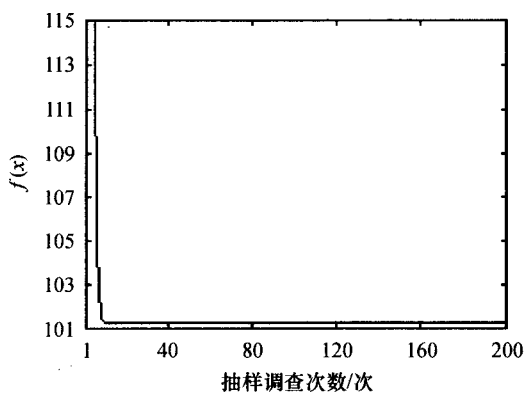


图 2 竞选算法求解算例的寻优过程

3.2 机械优化设计算例 2

两杆支架设计问题^[9]: 如图 3 所示, 在支架的顶点承受一个载荷 $2P=3000\ 000\text{ N}$, 支座之间的水平距离为 $2B=152\text{ cm}$, 若已知选定壁厚 $T=0.25\text{ cm}$ 的钢管, 弹性模量 $E=2.16 \times 10^5\text{ MPa}$, 密度 $\rho=8.30\text{ t/m}^3$, 屈服极限 $\sigma_y=703\text{ MPa}$, 设计一个满足强度和稳定性条件而重量最轻的桁架尺寸.

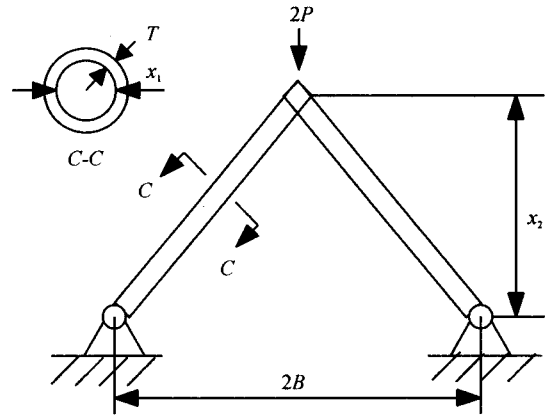


图 3 两杆支架设计问题

设钢管内径为 x_1 , 支架高度为 x_2 , 根据设计要求和约束条件建立该机械设计问题优化模型为^[9]

$$\begin{aligned} \min h(x) &= 0.013x_1(5\ 776 + x_2^2)^{1/2}, \\ \text{s. t. } \begin{cases} g_1(x) = 1\ 909.859(5\ 776 + x_2^2)/x_1x_2 - 703 \leq 0, \\ g_2(x) = 1\ 909.859(5\ 776 + x_2^2)/x_1x_2 - 2.66 \times 10^5(x_1^2 + 0.062\ 5)/(5\ 776 + x_2^2) \leq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

3.2.1 传统优化算法对两杆桁架优化设计结果

采用传统的外点惩罚函数优化设计方法求解该优化设计问题^[9]. 其构造的惩罚函数如式(5):

$$\Phi(x, r^{(k)}) = h(x) + r^{(k)} \sum_{u=1}^2 \{ \max[g_u(x), 0] \}^2, \quad (5)$$

式中, $r^{(k)}$ 为惩罚因子.

从初始惩罚因子 $r^{(0)}=10^{-10}$ 开始计算, 直到惩罚因子 $r=10^{-4}$, 当 $r>10^{-4}$ 后, 无论从哪一个初始点出发, 都已不可能求得极值点. $r=10^{-4}$ 时求得的最优解为: $x_1^*=4.77\text{ cm}$, $x_2^*=51.30\text{ cm}$, $h(x^*)=56.859\text{ N}^{[9]}$. 实际上此时所求得的最优解并不完全满足约束条件.

3.2.2 竞选算法对两杆桁架优化设计结果

采用动态惩罚函数法将式(5)的约束优化问题转变为无约束优化问题求解, 用竞选算法进行求解:

$$G_k(x) = \min \left(h(x) + (Ct)^\alpha \sum_{i=1}^m |g_i(x)|^\beta \right), \quad (6)$$

选取有关参数为: 动态函数惩罚项的调节参数取 $C=3, \alpha=3, \beta=3$, 取 50 次计算最优结果的平均值. 当计算迭代次数达到 15 次时, 所求目标函数的函数值已基本保持不变, 此时目标函数已非常接近

于最优值. 求得的优化结果如表 2 所示, 目标函数平均值收敛情况如图 4 所示.

表 2 竞选算法求解两杆支架优化设计问题的结果

x_1/cm	x_2/cm	$h(x)/\text{N}$	$g_1(x)$	$g_2(x)$
4.754 4	52.917 5	56.093 2	$-6.485\ 5\times 10^{-5}$	-0.030 6

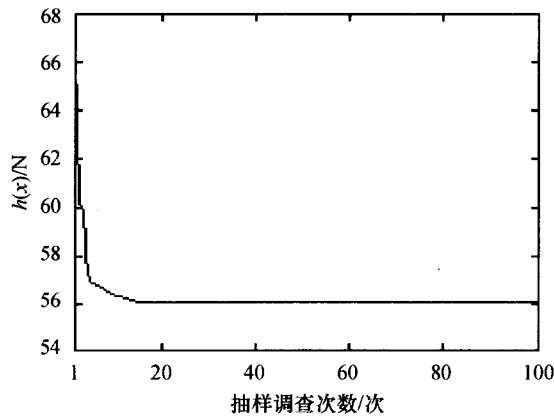


图 4 竞选算法求解算例的寻优过程

3.3 两种优化方法求解特点的比较

从上述竞选算法原理及求解两个机械优化设计问题算例过程及结果, 可看出两者求解的特点:

1) 竞选算法在解空间中从初始群体开始搜索, 同时处理一群点, 不只是局限于某一点, 具有较高效率的并行性; 而多数传统优化方法都是从搜索空间的单点出发, 通过某些转换规则确定下一点. 这种点到点的搜索方法在多峰值优化问题中, 首先找到的可能不是全局最优解, 容易陷入局域最优解. 因此竞选算法在搜索过程中达到最优解的概率远大于传统优化方法.

2) 竞选算法在寻优过程中, 不需要目标函数微分, 只需要目标函数的值, 具有较强的通用性; 传统优化方法在求解不同类型的优化问题时需要不同形式的目标函数梯度信息(二阶导数、一阶导数或零阶导数等), 没有通用的规则. 因此竞选算法具有较强的通用性和较广泛的适用性.

3) 竞选算法使用评估值来评价系统, 根据评估值来进行一定的随机搜索; 而传统的优化算法采用确定性的搜索方法. 因此竞选算法更有利于得到最优解.

4) 信息共享机制: 在竞选算法中, 距离当前解距离近的信息以大权重传给下一循环, 属于集中式的信息流动, 整个搜索更新过程能以更快的速度收敛.

4 结论

本文通过具体的机械优化设计问题实例, 比较了竞选优化算法和传统优化设计方法的求解特点. 与传统优化设计方法相比, 竞选算法具有鲁棒性、自适应性、全局优化性和隐含并行性, 因而适用于大规模、非线性函数优化以及无解析表达式的目标函数的优化. 但 Wolpert 和 Macready 提出的“没有免费的午餐”(No Free Lunch, NFL) 定理^[11]已经证明了一种算法不可能对所有类型的优化问题的求解能力都优于其他算法. 因此, 不断分析总结各类问题的特征, 抽象出其共同的部分, 对具体优化问题采用合适的优化设计方法, 将始终是机械优化设计工作者研究的方向之一.

参考文献:

[1] 孙靖民, 梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[2] Holland J H. Genetic Algorithms[J]. Scientific American, 1992(7): 44-50.

[3] Krikpatrick S, Gelett C, Veechi M. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(8): 671-680.

[4] Dorigo M, Maniezzo V, Colormi A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans on system, Man and Cybernetics-Part B, 1996, 26(1): 29-41.

[5] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// Proceeding IEEE international Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 1995, 4: 1942-1948.

[6] Cvijovic D, Kilnowski J. Tabuo Search: An Approach to the Multiple Minima Problem[J]. Science: 1995, 67(3): 664-666.

[7] 贺春华, 吕文阁, 张湘伟. 竞选算法及其在函数全局最优化问题中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(11): 196-199.

[8] 罗述全. 传统优化算法与遗传算法的比较[J]. 湖北工业大学学报, 2007, 22(3): 32-35.

[9] 陈立周. 机械优化设计方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.

[10] Joines J A, Houck C R. On the use of non-stationary penalty functions to solve nonlinear constrained optimization problems with GA's[C]// Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 1994: 579-584.

[11] Wolpert D H, Macready W G. No Free Lunch Theorems for Optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 67-82.

Comparison Between the Traditional and Election-survey Algorithms for Mechanical Optimum Design

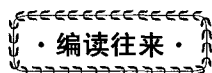
He Chun-hua¹, Zhang Xiang-wei², Lü Wen-ge²

(1. Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The traditional optimized algorithms in machine optimization design are demonstrated. A modern optimized design method-election-survey algorithm is introduced with its theory and characteristics. The results of applying the traditional and the election-survey algorithms are obtained, based on the optimum design of the box-shaped cover board and a two-bar truss structure. And then the optimal solutions and the characteristics of the two algorithms are compared. The results show that the election-survey algorithm is an effective method for mechanic optimum design.

Key words: optimization; election-survey algorithm; mechanical design; penalty function method



《管理实验与实验管理学》推介

作为探索管理现象和寻求管理规律的基本研究方法和手段,从“泰勒实验”、“霍桑实验”开始,百年来管理实验一直推动着管理科学的发展.可以说,没有管理实验,就没有管理科学今天的发展.著名学者李怀祖教授、马庆国教授等都把管理实验方法列为管理研究的重要方法之一.《管理实验与实验管理学》(何斌,李泽莹,王学力,清华大学出版社,2010年4月)一书是广东工业大学何斌教授等在国家自然科学基金项目和广东省自然科学基金项目支持下多年研究积累的成果.该著作系统地总结了管理实验和实验管理学的概念与分类、形成与发展、定位与作用,探讨了管理实验的基本特征、基本原理和基本方法,并基于实验分析、设计和实施的全过程,给出了4个深入浅出的典型管理实验案例.

该书有3个创新点:一是提出了综合运用“管理实验”、“网络技术”、“角色扮演”和“新兴交叉学科方法”的研究途径;二是初步构建了管理实验研究方法体系并给出了一些新的管理实验研究方法;三是提出了发展管理实验和实验管理学的4条线索.

相信该书的出版能够吸引更多的学者关注和探讨管理实验和实验管理学,从而进一步推动管理实验和实验管理学在我国的发展.

谨此推介.

暨南大学管理科学与工程研究所

孙东川

2010年7月8日