

蚂蚁算法在天线结构优化设计中的应用

李泉永，龚雨兵

(桂林电子工业学院 机电与交通工程系,广西 桂林 541004)

摘要：蚂蚁算法是优化领域内,近年来提出来的并得到较大发展的一种新的仿生优化算法,它已被迅速应用到如组合优化、人工智能等多个领域。通过两个典型的天线结构优化问题,采用蚂蚁算法、遗传算法以及模拟退火算法进行了优化并加以比较。结果表明,蚂蚁算法能够成功应用于大型天线结构优化问题,同时蚂蚁算法的优化结果优于遗传算法和模拟退火算法。

关键词：蚂蚁算法;天线结构;优化;仿生算法

中图分类号：O 342;O 241.81 文献标识码：A 文章编号：1672-0679(2005)01-0022-04

1 蚂蚁算法简介

生物学者们观察发现,自然界中的蚂蚁群体具有寻找到从蚁巢到食物源之间最短路径的特殊能力。进一步研究发现,蚂蚁在其行进过的路径上会分泌出一种被称为“激素”的化学物质。这种化学物质同时会随着时间而消散,蚂蚁个体就是根据这种化学物质的多少来选择路径的,它会沿着“激素”较多的路径行走。可以预见,在蚂蚁来回于蚁巢和食物源之间若干次(或若干时间)之后,较短路径上残留的信息激素量将相对较多,那么它将更能吸引后出发的蚂蚁个体选择它作为行走路径。最后,蚂蚁群体将会一致地选择出最短路径作为行走路径,图1为蚂蚁觅食的示意图。

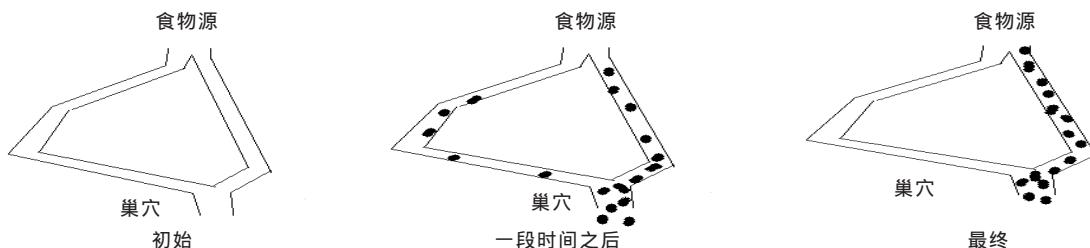


图1 蚂蚁觅食示意图

受到蚂蚁群体的这种独特行为的启发,在M. Dorigo^[1]等学者提出了称之为“蚂蚁算法”的优化算法之后,引起了很多研究者们的兴趣。蚂蚁算法的随机启发性、协同性以及并行性被迅速应用到如组合优化、人工智能等多个领域。像经典的TSP、QAP优化难题,通过蚂蚁算法的求解都得到了令人满意的结果。本文主要介绍蚂蚁算法在天线结构优化中的应用。

2 蚂蚁算法在结构优化中的应用

2.1 结构优化问题描述

以桁架结构为例,其结构优化问题,可作如下的数学描述

$$\text{Min } M(A) = \sum_{i=1}^n \rho A_i L_i \quad (1)$$

[收稿日期] 2004-12-30

[作者简介] 李泉永(1939-),男,福建莆田人,教授。

$$\text{s.t. } g_j(A) \leq 0 \quad j=1, \dots, m \quad (2)$$

在上式中, $A = [A_1, A_2, \dots, A_n]^T$ 为 n 组杆件的横截面积; $M(A)$ 为目标函数值, 一般是结构的总重量或质量; ρ 为材料容重或密度; A_i 和 L_i 分别为第 i 组杆件的横截面积和总长度。可采用罚函数法思想, 将以上的带约束函数优化问题, 转换为无约束极小化问题, 新的目标函数

$$\varphi(A) = M(A) + \alpha \quad (3)$$

对应地

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \text{如果 } g_j(A) \leq 0 \quad j=1, \dots, m \\ \text{大的常数, 其他} & \end{cases} \quad (4)$$

2.2 蚂蚁算法解决结构优化问题的基本思想

从上节关于桁架结构优化问题的描述中, 可以看出: 结构优化问题的候选解是在给定的离散截面积域中确定各组不同的杆件横截面积值的排列组成(对于连续的面积值取值域情况, 可以等效地转化为离散域的情形), 目标函数值是解的函数。如果将组成解的各个分量, 也就是所需杆件个数, 视作为蚂蚁路径上所必须经过的各个顶点, 将不同的杆件的横截面积看作为不同顶点间的路径长度, 将目标函数(总的重量或质量)看作为蚂蚁经过的路径的总长度, 这样结构优化问题就可看作为典型的蚂蚁觅食中寻找最短路径问题。本文正是基于这样的类比关系, 应用蚂蚁算法来解决天线结构优化问题。

3 天线结构优化数值实例

3.1 天线结构的计算模式

对于一般精度要求的天线, 其优化模型是在保证强度、刚度和尺寸等约束条件下, 使天线结构重量或质量最小。但对于精度要求较高的天线如射电望远镜天线等, 其追求优化的目标常选为在载荷的作用下与反射面正面点实际变形最贴近的一个吻合抛物面——最佳吻合抛物面(BFP, Best Fitness Paraboloid)相应的误差最小^[2-4]。这里所指的误差为天线结构变形后原抛物面上点对 BFP 的法向差、轴向差或半光程差的均方差(或均方根差)等。针对射电望远镜等高精度天线的要求, 本文选取的优化目标是天线在给定仰角 β 时, 其法向误差加权均方值 Δ_D^2 为最小(亦即法向误差 Δ_D 最小)

$$\Delta_D^2 = \sum \Delta_i^2 a_i q_i / \sum a_i q_i \quad (5)$$

这里 $\Delta = \frac{1}{2\sqrt{f(f+z_0)}} [x_0(u-u_a) + y_0(v-v_a) - 2f(w-w_a) - 2hz_0 + y_0\varphi_x(z_0+2f) - x_0\varphi_y(z_0+2f)]$ 为表面点的法向误差; a_i 为天线表面点 i 对应的口面面积; q_i 为其相应的照度。其中 f 为抛物面焦距; u, v, w 为表面点的 x, y, z 位移; x_0, y_0, z_0 为表面点的理论坐标值(z 轴为天线轴); u_a, v_a, w_a 为最佳吻合抛物面顶点位移; h 为 BFP 的焦距变化量; φ_x, φ_y 为 BFP 轴线的相对转角。优化的约束条件是杆件应力小于其相应许用应力, 对于高精度天线, 这个条件一般都能较好满足。

3.2 计算实例

针对环梁式天线结构左右、上下对称特点, 取 1/4 天线结构进行分析。下面给出的两个计算实例, 天线结构使用钢质骨架, 其许用拉应力 $[\sigma^+] = 19.620 \text{ N/cm}^2$, 许用压应力 $[\sigma^-] = 14.715 \text{ N/cm}^2$, 弹性模量 $E = 2.06 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$, 材料容重 $\gamma_1 = 7.652 \times 10^{-2} \text{ N/cm}^3$, 反射体面板采用 4 mm 厚铝板, 其材料容重 $\gamma_2 = 2.678 \times 10^{-2} \text{ N/cm}^3$ 。为适应基于最佳吻合抛物面的保型设计, 采用分块面板结构, 面板仅作为自重载荷参与结构分析, 不考虑其反射面板的刚度贡献。

算例 1 4 环 12 梁 8 m 模型天线(引自文献[3]例 3-2)

天线结构 1/4 模型的杆件布置如图 2 所示^[3], 共有 32 个节点, 97 根杆; 天线口径为 8 m, 焦距 $f=300 \text{ cm}$, 各环半径依次为 400, 310, 200, 80 cm; 环高依次为 30, 60, 80, 90 cm。全部 97 根杆分为 12 组, 可供选用的角钢有 16 种, 其横截面积分别为: 2.264, 2.864, 3.498, 4.218, 5.512, 6.172, 6.972, 8.584, 9.606, 10.83, 12.286,

14.576, 16.32, 19.03, 21.334, 24.606 cm²。计算载荷取天线面板及杆件自重, 优化目标是取天线在仰角 $\beta=45^\circ$ 时, 对应 BFP 的法向误差 Δ_D 最小。运用蚂蚁算法求解, 设置信息激素消散率 $\varepsilon=0.8$, 初始路径信息激素量为 $c=1$, 蚂蚁种群个数 $m=10\,000$ 只, 最大循环次数为 20 次。用蚂蚁算法求解的 12 组最优横截面积值为 $A^*=[2.264, 6.972, 19.03, 3.498, 5.512, 10.83, 24.606, 2.264, 2.264, 3.498, 24.606, 2.264]^T$, 对应法向误差最小值为 $\Delta_D=0.000\,847$ cm, 比用遗传算法求解的最优值(0.000 861 cm)减少了 1.6%, 比模拟退火算法求得的最优化值(0.001 208 cm)减少了 29.9%。整个优化程序运行时间约为 10 min(芯片主频率 1.2 GHz)。这里, 遗传算法选用的种群规模 $N=15$, 杂交率 $P_c=0.6$, 变异率 $P_m=0.06$, 遗传代数 $M=100$ 。

算例 2 某 6 环 24 梁 15 m 毫米波射电望远镜(引自文献[4])

天线结构的 1/4 计算模型见图 3, 总共有 78 个节点, 275 根杆, 天线口径为 15 m, 焦距 4.5 m, 反射体 6 环半径依次为 750, 680, 560, 420, 250, 100 cm; 环高依次为 70, 100, 160, 170, 200, 170 cm。天线工作环境较好, 亦只考虑结构自重载荷的作用, 对于中央圆筒及内部仪器等设备载荷(共 39.24 kN), 亦作为自重载荷均分转化至内环的上下 24 个节点上。天线背架结构的杆件被分成 19 组^[4], 每组可供选用的 16 种等边角钢的横截面积分别为 2.264, 2.864, 3.498, 4.218, 5.512, 6.172, 6.972, 8.584, 9.606, 10.83, 12.286, 14.576, 16.32, 19.03, 21.334, 24.606 cm²。由于此射电望远镜经常观测范围为 30°~80°, 要求在此区域保精度工作, 而 55°附近是最经常的观测角, 因此优化目标取为仰角 $\beta=55^\circ$ 时, 法向误差 Δ_D 最小。考虑实际天线照度不均匀, 计算中按实际的 13 dB 进行照度加权。

应用蚂蚁算法、遗传算法与模拟退火算法程序, 进行优化求解所得的法向误差 Δ_D 值分别为 0.002 491、0.003 629 与 0.002 949 cm。对应于蚂蚁算法最优解的 19 组杆件面积为 $A^*=[6.172, 12.286, 24.606, 2.264, 4.218, 4.218, 5.512, 24.606, 21.334, 2.864, 3.498, 14.576, 19.03, 24.606, 4.218, 24.606, 2.264, 12.286, 21.334]^T$ 。这里, 蚂蚁算法各项参数取为: 信息激素消散率 $\varepsilon=0.8$, 初始路径信息激素量为 $c=1$, 蚂蚁种群个数 $m=20\,000$ 只, 最大循环次数为 20 次, 整个蚂蚁算法优化天线结构程序共耗机时 16 min 左右(芯片主频 1.2 GHz)。模拟退火算法耗时约 7 min。遗传算法的参数取为 $N=15, P_c=0.6, P_m=0.06, M=100$ 。

比较上述最优解发现, 用蚂蚁算法优化求得的法向误差 Δ_D 的最优值(0.002 491 cm)要明显优于模拟退火算法和遗传算法求得的最优值。蚂蚁算法的优化值, 比遗传算法减少了 31.4%, 比模拟退火算法减少了 15.5%。

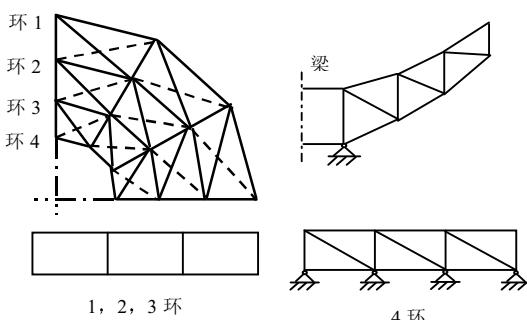


图 2 1/4 模型天线杆件布置图

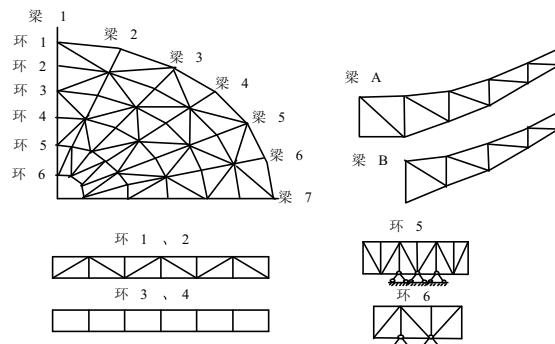


图 3 1/4 射电望远镜天线结构简图

4 结语

(1) 实践表明, 蚂蚁算法不仅是求解组合优化问题的一种好的优化方法, 同时对于求解工程结构优化问题也是一种值得推荐的优化方法。将蚂蚁算法用于优化复杂的天线结构的结果, 明显优于用遗传算法和模拟退火算法的最优结果, 特别是对于大型的结构更为突出。

(2) 通过实践, 还发现蚂蚁算法不仅是求解具有离散型变量结构优化问题的较为有效的和很有前景的优化算法, 而且也是求解连续变量结构优化问题的一种区别于数学规划法和准则优化法之外的另一种可行和

有效优化方法^[5]。

(3)本文虽只给出最佳吻合面的法向误差值,程序本身还可用于计算半光程差、轴向差的均方根的值;也可计算不作吻合时的相应误差。作为算例,只取杆件和面板的自重载荷一种计算载荷,对象温度、风荷等载荷,只要对程序作适当修改后即可计算。

(4)虽然,蚂蚁算法的优化解相对较好,但它的求解时间目前相对较长。设法提高蚂蚁算法的求解效率,是有待进一步的工作。

参考文献:

- [1] Dorigo M. Optimization, learning and natural algorithms [D]. Ph D Thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- [2] 叶尚辉,李在贵.天线结构设计[M].西安:西北电讯工程学院出版社,1986.
- [3] 陈树勋.精密复杂结构的几种现代设计方法[M].北京:北京航空航天大学出版社,1992.
- [4] Li Q Y, Li W Y. Parallel genetic algorithm optimization design of antenna structure with simulated annealing mechanism[A]. Proceedings of the Fourth World Congress of Structure and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-4, Dalian, China, June 4-8,2001) [C/ CD]. Shenyang:Liaoning Electronic Press, 2001.29.
- [5] 李泉永,龚雨兵.离散变量结构优化中的一种有效仿生算法[J].现代制造工程,2004,(5):32-34.

The Application of Ant Algorithm in Structural Optimization of Antenna

LI Quan-yong, GONG Yu-bing

(Dept. of Electronic Machinery and Traffic Engineering, Guilin University of Electronic Technology ,Guilin 541004, China)

Abstract: Ant Algorithm is a newly developed algorithm. It has been widely applied in combination optimization and artificial intelligence. In this paper, two typical optimization problems are solved by ant algorithm, genetic algorithm and simulated annealing algorithm respectively. The comparisons between these results show that ant algorithm is a satisfying and promising algorithm for structural optimization of antenna.

Key words: ant algorithm;antenna structure;optimization;zoomimic algorithm

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>