

# 蚂蚁算法在天线结构优化中的应用

李泉永 龚雨兵

桂林电子工业学院机电与交通工程系，桂林 541004

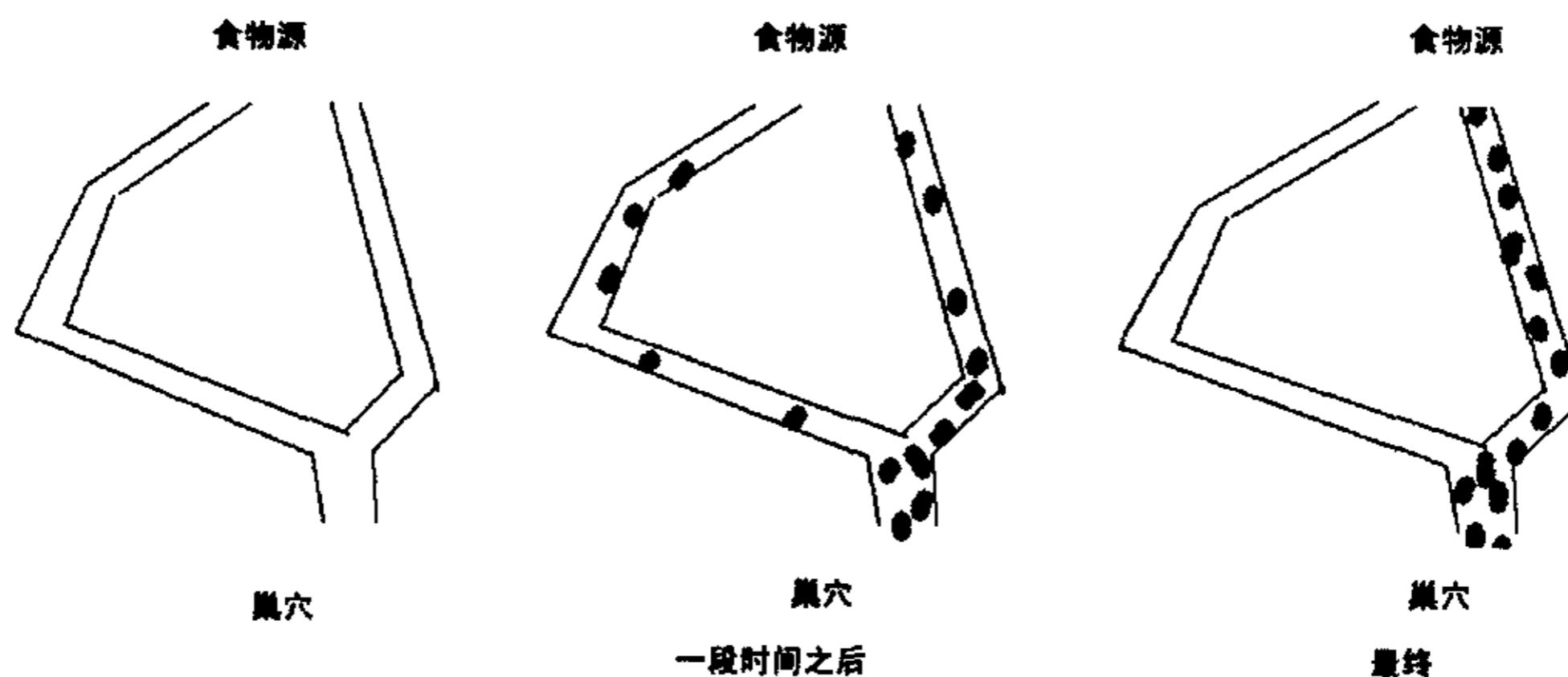
**摘要** 蚂蚁算法是优化领域内，近年来提出来的并得到较大发展的一种新的优化算法。蚂蚁算法被归结为随机启发式算法。它的正反馈性，协同性以及隐含的并行性，使得其在优化领域以及人工智能方面得到了广泛应用。本文首次将蚂蚁算法应用于天线结构优化中。针对两类较为典型的天线结构优化问题，分别采用了蚂蚁算法，遗传算法以及模拟退火算法进行了优化以及比较。比较的结果说明，蚂蚁算法能够成功应用于大型天线结构优化问题，同时蚂蚁算法的优化结果优于遗传算法和模拟退火算法的最优结果。

**关键词** 蚂蚁算法；天线结构；优化；遗传算法

## 1 蚂蚁算法

### 1.1 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。进一步的研究发现，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。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。（见下面的示意图。）



受到蚂蚁群体的这种独特行为的启发，M. Dorigo<sup>[1]</sup>等于1991年第一次提出了称之为“蚂蚁算法”的优化算法。

蚂蚁算法提出之后，吸引了很多研究者们的兴趣。利用蚂蚁的随机启发性，协同性以及并行性，它被迅速应用到多个领域，如组合优化，人工智能等。经典的TSP、QAP优化难题，通过蚂蚁算法的求解，得出了令人满意的结论。

## 1.2 蚂蚁算法 程序基本流程

Begin

初始化：将各条路径边上的信息激素置为常数 C；信息激素增量 $\Delta$ 置为 0；信息激素消散率为常数 $\epsilon$ ；设定蚂蚁数目值 m。将 m 个蚂蚁放置在 N 个顶点上。

While (cycle < 预定的循环次数)

{ For k ← 1 to m

{ For n ← 1 to N

{ 按概率  $P_{ij}^k$  以能见度从顶点 i 选择顶点 j;

移动蚂蚁 k 从顶点 i 至顶点 j;

将顶点 j 标识为已经过的顶点;

}

根据蚂蚁 k 的解信息，实行局部搜索；

计算蚂蚁 k 的目标函数值；

根据目标函数值，更新最优点信息；

}

cycle++；

更新各条路径上的信息激素值；

输出目前的最优点信息；

}

End

## 2 蚂蚁算法在结构优化的应用

### 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：

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

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

在上式中， $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$  为 n 组杆件的横截面积。 $M(A)$  为目标函数值，一般是结构的总体积或重量。 $\rho$  为材料密度或容重， $A_i$  和  $L_i$  分别为第 i 组杆件的横截面积及长度。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：

$$\text{新的目标函数:} \quad \varphi(A) = M(A) + \alpha \quad (3)$$

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

### 2.2 蚂蚁算法解决结构优化问题的基本思想

从 2.1 的桁架结构优化问题描述中，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（总的体积或重量）看作为蚂蚁经过的路径的总长度；那么结构优化问题，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，其优化模型与上述介绍的桁架结构优化模型基本一样，即在保证强度、刚度和尺寸等约束条件下，使天线结构重量或体积最小。但对于精度要求较高的天线如射电望远镜天线等，其追求优化的目标也常有选为使在载荷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）相应的误差最小<sup>[2][3]</sup>。这里通常所采用的误差，可指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。综上所述天线结构的优化目标可为使天线结构重量最轻或为对 BFP 的法向误差等最小，等等。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  $\beta$  时，其法向误差加权均方值  $\Delta_D^2$  为最小（亦即法向误差  $\Delta_D$  最小）：

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

这里

$$\begin{aligned} \Delta = & \frac{1}{2\sqrt{f(f+z_0)}} [x_0(u-u_a) + y_0(v-v_a) - 2f(w-w_a) - 2hz_0 + y_0\Phi_x(z_0+2f) \\ & - x_0\Phi_y(z_0+2f)] \end{aligned}$$

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， $\Phi_x, \Phi_y$  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，我们取 1/4 天线结构，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  $[\sigma^+] = 19620 N/cm^2$ ，许用压应力  $[\sigma^-] = 14715 N/cm^2$ ，弹性模量  $E = 2.06 \times 10^7 N/cm^2$ ，材料容重  $r_1 = 7.652 \times 10^{-2} N/cm^3$ ，反射体面板采用 4mm 厚铝板，其材料容重  $r_2 = 2.678 \times 10^{-2} N/cm^3$ 。为适应基于最佳吻合抛物面（BFP）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。

**例 1.** 4 环 12 梁 8 米模型天线，其 1/4 天线杆件布置图见图 1，共有 32 个节点，97 根杆，天线口径为 8 米，焦距  $f=300cm$ ，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，如表 1 示，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, 9.03, 21.334, 24.606  $cm^2$ 。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  $\Delta_D$  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  $m = 10000$  只，最大循环次数为 20 次，计算后的最优结果见表 3。整个优化程序运行时间大约 10 分钟左右（CPU 主频率 1.2GHz）。为了比较，表 3 中还分别给出了用模拟退火算法和

遗传算法的优化解。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  $M=100$ 。

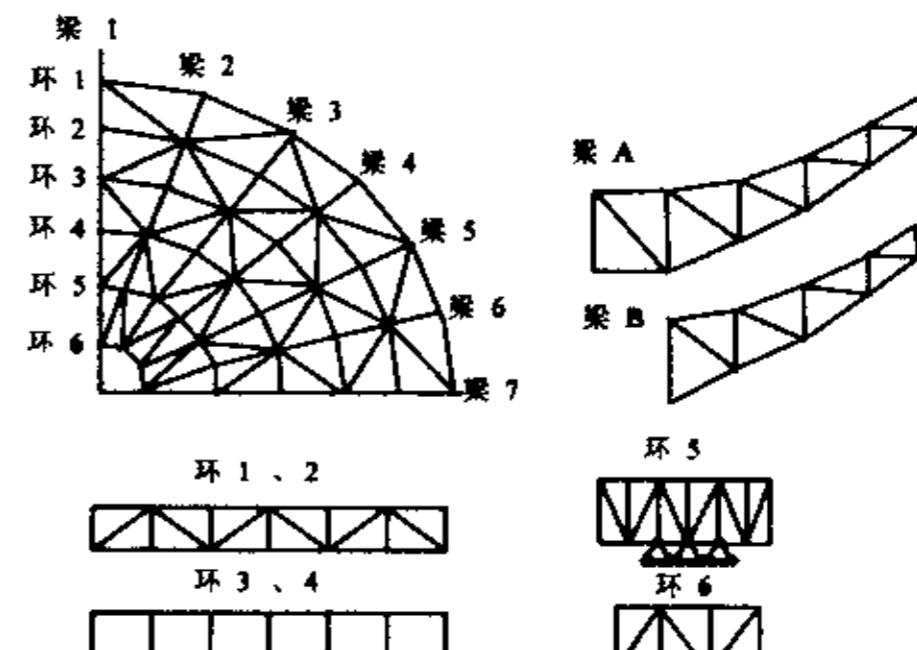
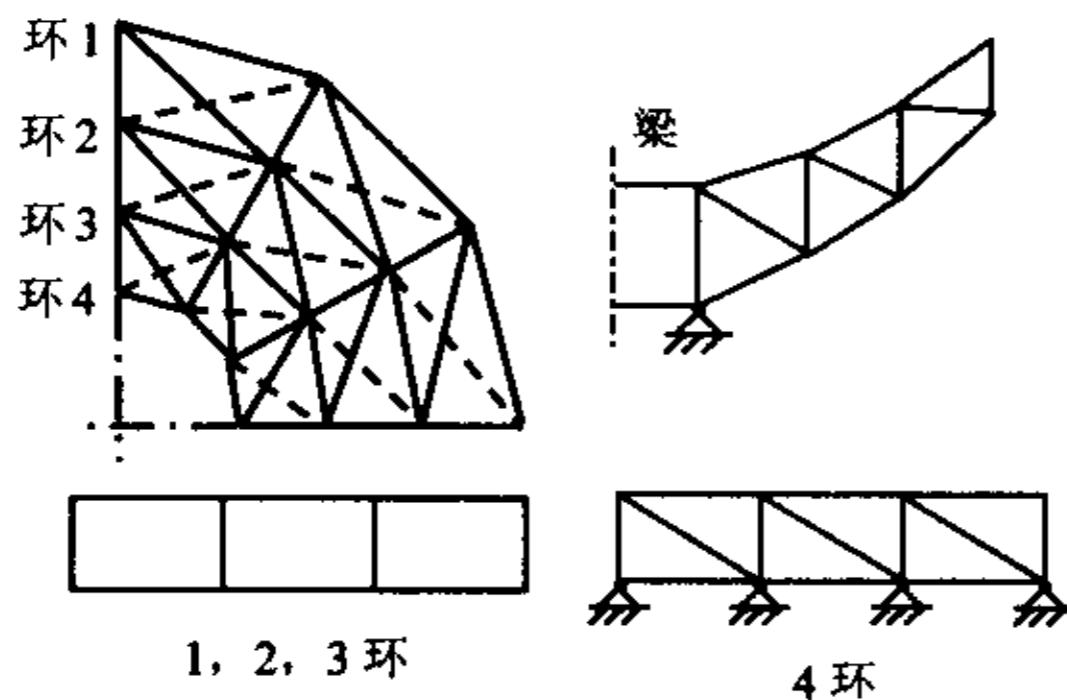


表 1. 模型天线杆件分组

杆组	杆件
1	辐射梁 1~2 环间弦杆
2	辐射梁 2~3 环间弦杆
3	辐射梁 3~4 环间弦杆
4	1 环竖杆, 1~2 环间辐射梁斜杆
5	2 环竖杆, 2~3 环间辐射梁斜杆
6	3 环竖杆, 3~4 环间辐射梁斜杆
7	4 环竖杆及斜杆
8	1 环上下弦杆
9	2 环上下弦杆
10	3 环上下弦杆
11	4 环上下弦杆
12	背架上、下面各环间斜杆

表 2. 天线背架结构杆件分组

杆组	杆件
1	1~3 环竖杆, 1~3 环间辐射梁斜杆
2	4 环竖杆, 3~5 环间辐射梁斜杆
3	5 环竖杆
4	1~3 环间辐射梁弦杆
5	3~4 环间辐射梁弦杆
6	4~5 环间辐射梁弦杆
7	5~6 环间辐射梁弦杆
8	5~6 环间辐射梁斜杆
9	6 环竖杆
10	1 环弦杆
11	2、3 环弦杆
12	4 环弦杆
13	5 环弦杆
14	6 环弦杆
15	1、2 环斜杆
16	5、6 环斜杆
17	背架正面 1~5 环间斜杆
18	背架背面 1~5 环间斜杆
19	背架正面、背面 5、6 环间斜杆

例 2. 某 6 环 24 梁 15 米毫米波射电望远镜，其 1/4 天线结构简图见图 2，共有 78 个节点，275 根杆，天线口径为 15 米，焦距 4.5 米，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 39.24KN），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（见表 2），采用等边角钢，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 cm<sup>2</sup>。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  $\Delta D$  最小。计算时考虑实际天线照度不均匀，计算中按实际的 13db 照度进行加权。分别应用模拟退火算法、蚂蚁算法及遗传算法程序，进行优化所得的法向误差  $\Delta D$  值及相应的 19 组杆件面积优化值见表 4。其中，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

$m = 20000$  只, 最大循环次数为 20 次, 整个蚂蚁算法优化天线结构程序耗机时 16 分钟左右 (CPU 主频 1.2GHz.)。遗传算法的参数取为:  $N=15$ ,  $P_c=0.6$ ,  $P_m=0.06$ ,  $M=100$ 。从表 4 可见, 蚂蚁算法的最优值明显优于模拟退火算法和遗传算法的最优值。

表 3. 天线结构各优化算法结果及比较

	模拟退火算法	蚂蚁算法	遗传算法
$\Delta_D$ (cm)	0.001208	0.000847	0.000861
杆件横截面面积序号	1	2.264	2.264
	2	6.172	6.972
	3	19.03	19.03
	4	3.498	3.498
	5	3.198	5.572
	6	24.606	10.83
	7	24.606	24.606
	8	2.264	2.264
	9	6.172	2.264
	10	10.83	3.498
	11	10.83	24.606
	12	8.584	2.264

表 4. 射电望远镜各算法优化结果及比较

	模拟退火算法	蚂蚁算法	遗传算法
$\Delta_D$ (cm)	0.002949	0.002491	0.003629
杆件横截面面积序号	1	3.498	6.172
	2	8.584	12.286
	3	24.606	24.606
	4	2.264	2.264
	5	3.498	4.218
	6	6.972	4.218
	7	9.606	5.512
	8	24.606	24.606
	9	6.972	21.334
	10	2.264	2.864
	11	2.264	3.498
	12	5.512	14.576
	13	14.576	19.030
	14	5.512	24.606
	15	2.264	4.218
	16	24.606	24.606
	17	2.264	2.264
	18	4.218	12.286
	19	24.334	21.334

## 4 结果分析与讨论

从表 3 可以看出, 对于算例 1 中的天线结构, 蚂蚁算法的最优结果相对较好。其最优结果数值 (法向误差值) 比遗传算法的最优结果初步减少了 1.6%, 比模拟退火算法的最优结果减少了 29.9%。从表 4 可以看出, 对于算例 2 中的射电望远镜结构, 蚂蚁算法的最优结果在考察的几种算法中也是最令人满意的。蚂蚁算法优化后的最优结果 (法向误差值) 相较遗传算法的最优结果减少了 31.4%, 同时相较模拟退火算法的最优结果减少了 15.5%。这两个算例表明, 对于一般复杂程度的天线结构, 蚂蚁算法具有较强的优化其结构的能力。同时, 经过我们的数值比较, 蚂蚁算法的最优结果在考察的几种随机算法中, 往往还是最令人满意的。

另外, 我们在计算中还注意到各个优化算法程序的运行时间问题。蚂蚁算法的运行时间相较遗传算法以及模拟退火算法的运行时间稍长。但是, 对于算例 2 (候选解个数为  $19^{16} = 2,213,314,919,066,161$  个), 整个蚂蚁算法与天线结构程序运行时间大概也就在 16 分钟左右。笔者认为, 考虑到蚂蚁算法结果的高有效性, 时间的代价还是值得的。如果利用并且实现蚂蚁算法隐含的并行性, 笔者认为, 时间的花费将能够大大减少。相关文献见<sup>[4]</sup>。

## 5 结论

本文首次将蚂蚁算法引入到天线结构优化中。针对两个特定的天线结构, 优化目标取为天线 (或射电望远镜) 在特定仰角时对应 BFP 的法向误差  $\Delta_D$  最小, 对比遗传算法和模拟退火算法的运行情

况，考察了蚂蚁算法的有效性和效率。在蚂蚁算法局部优化策略中，本文采用了两位置交换的 2-OPT 算法。

计算情况表明，蚂蚁算法能应用于优化复杂的天线结构。并且，蚂蚁算法的求解最优结果优于遗传算法和模拟退火算法的最优结果。

另外须指出的是，本文虽只给出吻合情况下的法向误差值，程序本身还可计算半光程差、轴向差均方根的值，也可计算不作吻合时的相应误差。作为计算例子，我们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。

### 参 考 文 献

- [1] Dorigo M, Mariezzo V and Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans on SMC*, 1996, 26(1): 29~41.
- [2] S Von Hoerner. Homologous deformations of tilttable telescopes. *Journal of Structure Division. Proc. ASCE*, 93, ST5, Oct, 1967: 461~485.
- [3] Li QY, Li WY. Parallel Genetic Algorithm optimization design of antenna structure with Simulated Annealing mechanism. *The Fourth World Congress of Structure and Multidisciplinary Optimization (WCSMO4)*, Dalian, China, June, 2001: 4~8
- [4] Marcus Randall and Andrew Lewis. A parallel implementation of Ant Colony Optimization. *Journal of Parallel and Distribution Computing*, 2002, 62: 1421~1431.

## The Application of Ant Algorithm in Optimum Design of Antenna Structure

Quanyong Li Yubing Gong

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

**Abstract** The paper firstly introduces Ant Algorithm into the optimum design of antenna structure. Aimed at two specific antenna structures, the optimum result given by Ant Algorithm has been obtained and compared with the results given by Genetic Algorithm (GA) and Simulated Annealing (SA) algorithm. The comparison shows that the efficiency and effect ness of Ant Algorithm is satisfied and the optimum result given by Ant Algorithm is relative the best.

**Keywords** Optimization; Ant Algorithm; Antenna Structure; Genetic 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](http://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](http://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](http://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>