

通信技术

# 基于田口算法的超宽带 TEM 喇叭天线及阵列的优化

张青洪 廖成\* 常雷 盛楠 唐丽娟

(西南交通大学电磁场与微波技术研究所,成都 610031)

**摘要** 田口算法作为一种全局优化算法,具有实现过程简单、收敛速度快等优点。采用田口算法与时域有限差分(FDTD)法结合的方法对超宽带 TEM 喇叭天线进行了优化,并把优化性能、收敛速度等与整数编码微分进化相应结果进行对比。结果表明田口算法能够寻到最优解,而且其收敛速度是整数编码微分进化收敛速度的近三倍。另外还对六元喇叭天线阵进行了优化,优化后六元阵的性能得到了很大的提高。

**关键词** 田口算法 时域有限差分法 超宽带 TEM 喇叭天线 整数编码微分进化 六元阵

**中图分类号** TN822.8; **文献标志码** A

随着电磁脉冲技术的不断发展,超宽带雷达在目标探测和识别领域得到了广泛应用。作为其关键技术,超宽带 TEM 喇叭天线的研究与设计在国内外备受关注<sup>[1]</sup>。

超宽带 TEM 喇叭天线具有低驻波比、大功率容量等优点,它能辐射纳秒级短脉冲宽频信号,被广泛应用于多种领域,如高功率微波武器、相控阵雷达以及合成孔径雷达等<sup>[2]</sup>。

基本的 TEM 喇叭天线结构很简单,是由两块金属三角平板组成的,如图 1 所示。同轴线通过平行板传输线给 TEM 天线馈电,不考虑馈电结构,天线可以由下面 3 个参数描述:顶角  $\alpha$ 、两块金属板间夹角  $\beta$  和三角板边长  $s$ ,这 3 个结构参数决定了 TEM

喇叭天线的性能。

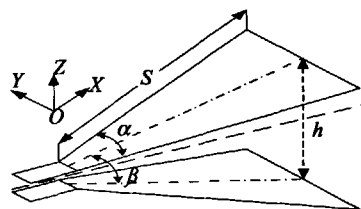


图1 超宽带 TEM 喇叭天线

超宽带天线虽然现在已被广泛应用于多种领域,但作为单独应用的天线,其方向图太宽,增益不高,采用阵列天线的技术可以大大提高天线增益和方向性<sup>[3]</sup>。

对于超宽带天线及其阵列,我们通常是采用数值方法来研究天线的设计问题。时域有限差分法(finite-difference time-domain method, FDTD)具有在时域直接描述辐射场的优势,适合于超宽带天线及其阵列的仿真研究<sup>[4,5]</sup>。时域有限差分法属于全波分析法,它是 Yee 在 1966 年所提出的数值方法<sup>[6]</sup>,其原理是将麦克斯韦方程式中两个微分形式的旋度方程式以中心差分式做离散化,求解过程由递推完成,尤其适合计算机编程实现。近些年 FDTD 发展的十分迅速,在各个领域都有很多的应用,包括

2011年9月16日收到

国家自然科学基金委和中物院

联合基金(11076022)、西南交通大学工程实践项目资助

第一作者简介:张青洪(1986—),男,湖南邵阳人,西南交通大学电磁场与微波技术研究所研究生。研究方向:计算电磁学与电波传播。E-mail: zqh19861020@163.com。

\*通信作者简介:廖成(1964—),男,重庆人,教授,博士生导师,西南交通大学电磁场与微波技术研究所所长。研究方向:计算电磁学、电磁散射与逆散射和天线理论及应用。E-mail: c. liao@swjtu.edu.cn。

天线设计,微波电路设计,电磁兼容分析,电磁散射计算,光子学应用等等。

利用传统的参数扫描或者随机搜索方法寻找能够找到天线的最优参数组合,但其计算量是非常庞大的,而且容易陷入局部最优,丢失全局最优解。因此怎样通过较少的计算量获得全局最优的参数组合,是快速设计优良性能天线的重要途径,为此,本文介绍了一种基于正交矩阵抽样的田口算法<sup>[7]</sup>。

1 田口算法

在 20 世纪 70 年代,日本的田口玄一博士将数理统计和经济学应用于质量工程创立了田口方法<sup>[8]</sup>。田口方法是工程领域的一种求最佳产品品质的实验方法,它的核心思想是以最少的实验次数确定最佳的制程参数组合条件,快速筛选出最优设计方案<sup>[9]</sup>。

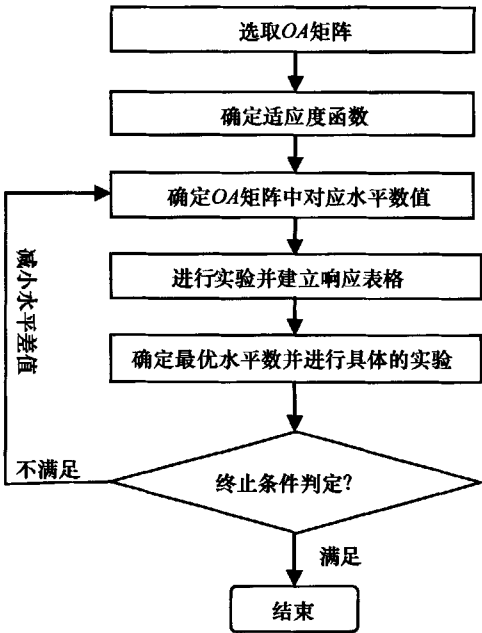


图2 田口算法流程图

田口方法一开始主要应用于产品的设计,后来应用范围越来越广泛。虽然田口方法已成功地应用在许多领域,如化学工程、机械工程、集成芯片制造、电力电子等,但它在电磁场领域的应用还不是很多,目前主要应用于双工器、微波电路参数的统

计特性、线性天线阵列的合成、微带滤波器、共面超宽带天等的设计<sup>[10]</sup>,并且取得了良好的优化效果。

田口算法基于正交矩阵对参数空间的均匀抽样,以较少的计算量就能评估参数对结果的影响,通过多次迭代并缩小搜索级差,从而实现快速的多参数优化,与传统的优化算法相比具有实验次数少、收敛速度快等优点。

图2为田口算法优化的流程图。

其基本实现过程如下:

- ① 根据实际的问题选择合适的正交矩阵  $OA(N,k,s,t)$ ,其中  $N$  为实验次数,  $k$  为优化参数的个数,  $s$  为水平数,一般取 3,  $t$  为强度一般取 2;
- ② 确定相应的适应度函数;
- ③ 利用正交矩阵  $OA$  来设计各输入参数的值;
- ④ 根据各参数值来进行具体的实验,并建立对应的响应表;
- ⑤ 参照响应表来确定各参数的最优中间水平数值,并进行确定的实验,计算出适应度值;
- ⑥ 判断迭代是否满足终止条件,不满足则减小水平差值并返回第 3 步继续循环,否则跳出程序,保存计算结果。

2 超宽带 TEM 喇叭天线优化

2.1 天线优化设计

本次优化的是一个简单的超宽带 TEM 喇叭天线。天线的人射波源是一个高斯脉冲,并且采用卷积分完全匹配层(CPML)作为截断边界。天线的具体尺寸如下:

- ① 三角板的斜边长度为 0.35 m;
- ② 平行板的长宽高分别为:0.03 m、0.05 m、0.01 m;
- ③ 金属板的厚度为:0.01 m。

优化过程中我们把天线的顶角( $\alpha$ )和天线二金属板间的夹角( $\beta$ )作为优化的变量,如图 1 所示, $\alpha$ 、 $\beta$  优化的范围为:

$$5^{\circ} \leq \alpha/2, \beta/2 \leq 60^{\circ} \tag{1}$$

初始的种群个体数量为 9,最大的迭代次数为 88。本次优化的目标是要获得一个好的带宽,因此适应

度函数可以设置为:

$$f = \max \{ VSWR_{0.6-3GHz} \} \tag{2}$$

优化过程中适应度函数值越小越好。

2.2 天线优化结果

整数编码微分进化压缩了解空间中的无效搜索区域,自动滤除了解空间中的不稳定区域,使搜索速度显著提高,与其它的优化算法相比,它具有很好的优化性能。本实例应用田口算法对超宽带 TEM 喇叭天线进行优化,并把优化的结果与应用整数编码微分进化优化天线的结果进行了对比,如表 1 和图 3 所示。

从表 1 可以看出,用田口算法和整数编码微分进化对天线进行优化时都可以获得较好的适应度函数值,但是田口算法能够更快的达到收敛条件,从总的计算次数来说,田口算法的初始种群个体数量为 9,最大的迭代次数为 88,它总的计算次数为 792,而整数编码微分进化的初始种群个体数量为 20,最大的迭代次数为 100,它总的计算次数为 2 000,由此可以看出田口算法比整数编码微分进化的计算次数要少得多,这也在一定程度上节约了计算的时间。

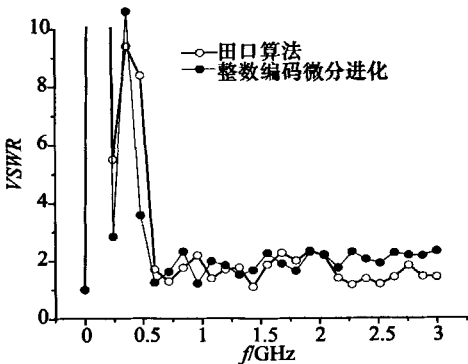


图 3 驻波比 (VSWR) 的比较

表 1 优化结果比较		
	总计算次数	适应度函数值
田口算法	792	2.307 43
整数编码微分进化	2 000	2.279 35

表 2 为田口算法和整数编码微分进化的优化变量的输出对比。

表 2 优化变量对比		
	$\alpha/2$	$\beta/2$
田口算法	10.49	39.66
整数编码微分进化	17.94	42.62

3 六元平面阵列优化

本次优化的是一个均匀排列的六元阵,如图 4 所示:

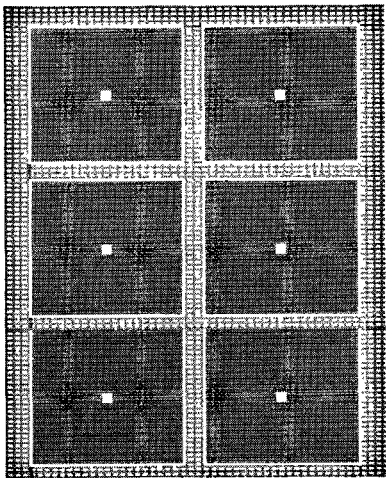


图 4 六元阵

2×3 六元阵的阵元为超宽带 TEM 喇叭天线,其相关的参数与前面优化的喇叭天线相同,同时天线的波源及相关的 FDTD 设置也与前面的一样。优化过程中我们把天线的顶角( $\alpha$ )、天线二金属板间的夹角( $\beta$ )以及单元间的距离( $y_{dis}, z_{dis}$ )作为优化的变量,优化变量的范围为:

$$5^{\circ} \leq \frac{\alpha}{2}, \frac{\beta}{2} \leq 60^{\circ} \tag{3}$$

单元间的距离:  $0 \leq y_{dis}, z_{dis} \leq 0.1 \text{ m}$ 。

本次优化的目标是要降低六元阵的副瓣电平,因此适应度函数可以设置为:

$$f = A_0 - A_1 SLL_{\max} \tag{4}$$

由于超宽带天线辐射的是脉冲信号,不同辐射

方向的辐射波形不同,所以常从时域和能量的角度来描述天线的性能<sup>[11]</sup>。天线归一化能量方向图定义为:

$$F_n(\theta,\varphi) = \frac{\int_0^t E^2\left(\theta,\varphi;t - \frac{r}{c}\right)dt}{\left(\int_0^t E^2\left(\theta,\varphi;t - \frac{r}{c}\right)dt\right)_{\max}} \quad (5)$$

表 3 列出了田口算法第一代优化后以及优化完成后六元阵的副瓣电平,由表 3 可知经田口算法优化后六元阵的副瓣电平大大降低了,这使得天线的性能得到了有效的提高。图 5 是田口算法第一代优化后以及优化完成后得到的六元阵的 E 面能量方向图。

表 3 优化前后对比

	第一代最优值	优化后
副瓣电平/dB	-5.996 32	-13.746 5

表 4 为田口算法优化后各优化变量的取值。

表 4 优化变量

优化变量	$\alpha/2$	$\beta/2$	$\gamma_{dis}$	$z_{dis}$
取值	27.122	11.055	0.100 7	0.195 6

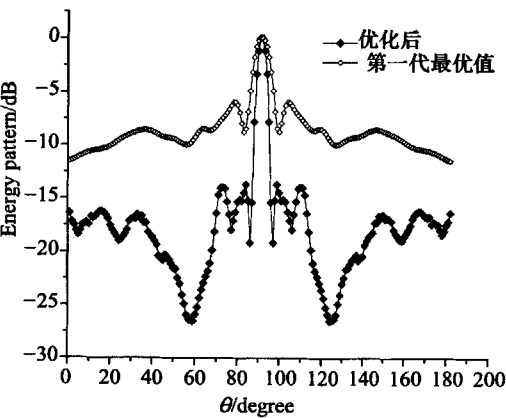


图 5 六元阵 E 面能量方向图

4 结论

田口算法结合 FDTD 为超宽带 TEM 喇叭天线及其阵列的优化提供了一种有效的方法。经田口算法优化后,TEM 喇叭天线及其阵列的性能都有了很大的提高,而且在优化过程中我们把 TEM 喇叭天线优化的结果与整数编码微分进化的相应结果进行了对比,期间田口算法的实验次数要少的多,这表明田口算法有一个很快的收敛速度。鉴于田口算法全局优化性能好、收敛速度快等优点,它将会被更多的应用于电磁场领域。

参 考 文 献

1 Baum C E. From the electromagnetic pulse to high-power electromagnetics. Proceedings of the 1992 IEEE Inter-national Conference, 1992; 80(6): 789—817

2 克劳斯 J D. 天线. 3 版. 张文勋,译. 北京:电子工业出版社, 2004

3 覃延明,廖 成,卫 涛,等. 超宽带 TEM 喇叭天线阵列的微遗传算法优化. 电波科学学报, 2008;23(2):352—355

4 Shlager K L, Smith G S, Maloney J G. Accurate analysis of TEM horn antennas for pulse radiation. IEEE Trans on EMC, 1996;38(3):414—423

5 吴锋涛,张光甫,张伟军,等. FDTD 分析时域平面 TEM 喇叭天线阵. 国防科技大学学报,2006;28(4):54—58

6 Grishm R. An information extraction: Techniques and chal-lenges. Information Extraction Springer-Verlag, Lecture Nots in Artificial Intelligece, 1997;10—27

7 Roy R. A primer on the Taguchi method. New York: Van Nostrand Reinhold Press, 1999

8 牛 勇,袁 泉,侯 郁. 田口方法近年来的发展—稳健性技术开发. 农机化研究, 2001;(1):33—37

9 聂利颖,张志鸿. 一种基于田口-遗传算法确定的神经网络及其应用. 计算机应用与软件, 2009;26(4):217—219

10 Weng Weichung, Yang Fan, Elsherbeni A. Electromagnetics and antenna optimization using taguchi ' s method. Morgan & Claypool, 2007

11 Oliver E A, David A H. Time-domain antenna characterizations. IEEE Trans on EMC, 1993;35(3):339—346

## Optimization of Ultra-wide Band TEM Horn Antenna and Antenna Arrays Based on Taguchi's Method

ZHANG Qing-hong, LIAO Cheng<sup>\*</sup>, CHANG Lei, SHENG Nan, TANG Li-juan

(Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

[**Abstract**] As a global optimization algorithm, Taguchi's Method has many advantages, such as simple implementation, fast convergence speed. An ultra-wide band TEM horn antenna is optimized through the method combining Taguchi's method with finite-difference time-domain (FDTD) method. Compared with integer coded differential evolution strategy, Taguchi's method can converge to the optimal result, and the convergence speed has been risen almost three times. Besides, a 6-element horn antenna array is optimized. Its performances are greatly improved.

[**Key words**] Taguchi's method FDTD ultra-wide band TEM horn antenna integer coded differential evolution strategy 6-element horn antenna array

(上接第 8476 页)

## The Temperature Drop Numerical Simulation of the Submarine Oil Pipeline Based on Fluent

LONG An-hou, ZHANG Fan<sup>\*</sup>, HAN Shuai

(Petroleum Engineering Institute Northeast Petroleum University, Daqing 163318, P. R. China)

[**Abstract**] Along with the development of offshore oil field, the research of the heat transfer process to the submarine oil pipeline which is shut-down is extremely urgent. Sometime in heating conveying process, crude oil pipeline has to shut-down when it inevitably suffers accidents from blackout of oilfield or pipeline maintenance. Once the situation happens, the viscosity of crude oil in the pipeline will rise as the oil temperature drop. The work of restart up will become very difficult, and even the pipeline will be blocked when the temperature drop to condensation point. In order to avoid these accidents, the temperature drop and safe shut-down time of the crude oil in undersea pipeline must be accurately predicted, the influence factor of shut-down time must be analyzed. The temperature drop in submarine oil pipeline during shutdown was simulated using Fluent software. The results show that, the thickness of thermal insulation layer and sea temperature have great effect on the shut-down time. The results can be guiding the production practice.

[**Key words**] submarine oil pipeline temperature drop of shutdown safe shut-down time numerical simulation

## 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,一直致力和专注于微波、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>