

# 基于免疫算法的 E 面波导分支耦合器优化技术

许 殿, 史小卫

(西安电子科技大学理学院, 陕西西安 710071)

**摘要:** 免疫算法结合“熵”的概念, 采用基于浓度的选择机制, 既鼓励适应值高的个体, 又抑制浓度高的个体, 从而保证了算法的收敛性及解群体的多样性. 使用免疫算法结合有限元数值计算方法优化 E 面波导分支耦合器, 通过和现有的优化设计算法作比较, 表明了基于免疫算法的微波电路优化设计具有高效性和精确性.

**关键词:** 免疫算法; 有限元法; 分支波导; 耦合器

**中图分类号:** TN624      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2139-03

## Optimization of E-plane Branch-Waveguide Couplers Using Immune Algorithm

XU Dian, SHI Xia-wei

(School of Science, Xidian Univ., Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Immune algorithm combines entropy and adopting selection rule of thickness. It increases the individual's number of high fitness and decrease that of high thickness, therefore, makes algorithm convergent with multiplicities. Using immune algorithm and finite element method, an E-plane branch-waveguide coupler is optimized. After comparing with existing optimization methods, the result indicates that microwave circuit optimization based on immune algorithm has the advantages of high efficiency and accuracy.

**Key words:** immune algorithm; finite element method; branch-waveguide; coupler

## 1 引言

微波元器件结构的优化一直是微波学科领域的一个重要的分支, 结合不断提高的机械制造工艺和电路集成技术, 微波器件在满足足够好的性能前提下体积亦显著减小, 应用在诸如便携式移动设备这类电子电路中取得了巨大的市场效应. 其中为满足电路高度集成的要求, 在符合制造工艺的前提下, 结合电磁场数值理论极大可能的缩小器件的结构尺寸, 设计所采用的数值计算和优化方法显得尤为重要. 精确的计算方法可以提高仿真精度, 从而提高成品率和减低投入的成本; 合适的优化方法在优化出更高性能元器件的同时, 亦能提高优化效率, 从而大大释放了工程技术人员投入研究的时间.

微波元器件的优化通常不一定存在所谓的全局最优解, 实际解的局部极值差异也很小. 采用现有的优化算法各有利弊, 尤其是采用遗传算法 (Genetic algorithms, GA) 优化微波电路<sup>[1]</sup>时很容易陷入局部极值, 其主要原因便是遗传算法计算流程本身所难以避免的早熟缺陷. 文献[2]针对早熟所采用的包括自适应调节参数 (交叉、变异参数) 等方法, 只是在早熟时增大变异概率, 针对的是种群整体变异概率, 并不能从根本上抑制过早收敛.

免疫算法 (Immune algorithm, IA) 从生物免疫系统演化出来, 依据抗体之间差异程度进行繁殖, 能从本质上抑制了早

熟. 本文基于 Kazuyuki Mori 等人发展的免疫网络模型, 将“熵”的概念运用到免疫优化算法, 并对具有广泛应用前景的 E 面波导分支耦合器这一微波电路进行优化, 优化过程中采用具有精确的电磁场数值计算方法——有限元法进行仿真计算. 最后, 将免疫算法与等效网络设计法、遗传算法进行比较, 结果表明基于免疫算法优化后的耦合器通带内波纹平坦、结构紧凑, 至此证明了微波电路采用免疫算法这一新的优化方法的高效性和精确性.

## 2 免疫算法原理

免疫系统是抵抗细菌、病毒和其它致病因子入侵的基本防御系统, 其通过一套复杂的机制重组基因而产生抗体, 消灭入侵的抗原<sup>[3]</sup>. 而免疫算法正是从体细胞理论和网络理论中得到启发, 模仿生物免疫系统, 实现了类似于免疫系统的自我调节和生成相异抗体的功能<sup>[4]</sup>.

免疫算法具体步骤为: (1) 根据实际问题选择合适解的表达形式以及各个参数值 (群体规模, 变异率, 浓度阈值); (2) 基于记忆库的记忆元素产生初始解群体, 若记忆库中没有相关记忆, 则随机产生; (3) 对解群体中的各个解个体进行综合评价, 包括解 (抗体) 与问题 (抗原) 的适应值、解与解之间的相似度; (4) 按照解的综合评价对解群体进行“增殖分化操作 (选择、变异)”, 以产生新群体; (5) 判断是否满足结束条件: 是, 则

结束并将问题的特征描述以及结果元素存入记忆库; 否, 则重复 3~ 5 步. 计算流程如图 1 所示.

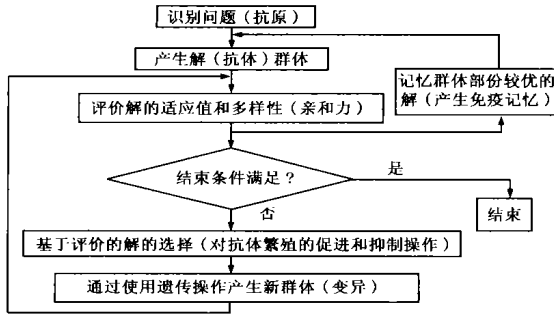


图 1 免疫算法计算流程图

本文采用信息熵来衡量群体中抗体的多样性, 并用二进制编码, 如图 2 所示.  $N$  个群体的信息熵定义为

$$H(N) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(N) \quad (1)$$

$H_j(N)$  为  $N$  个抗体第  $j$  位的信息熵

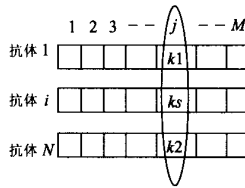


图 2 免疫算法中的信息熵

$$H_j(N) = \sum_{i=1}^2 - p_{ij} \log p_{ij} \quad (2)$$

式中  $p_{ij}$  为  $N$  个抗体中第  $j$  位为  $k_s$  (0 或 1) 的概率. 两个抗体间的相似度可定义为

$$ay_{vw} = 1 / (1 + H(2)) \quad (3)$$

由此每代抗体  $v$  的浓度可定义为

$$c_v = \frac{1}{N} \sum_{w=1}^N ac_{vw} \quad (4)$$

$$ac_{vw} = \begin{cases} 1, & ay_{vw} \geq Tac \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (5)$$

$Tac$  为预先确定的阈值, 一般取值范围为 0.65~ 0.85 之间.

另一方面亲和力(抗体和对抗原识别程度) 取为适应值函数  $ax_v = fitness(v)$ , 由上述浓度和亲和力的定义, 抗体的选择率<sup>[5]</sup> 为  $e_v = ax_v / c_v$ .

免疫算法具有应答超变异性, 无交叉算子只取变异算子, 这增加了优化过程的随机性. 为了加速优化进程, 本文引用遗传算法中的交叉操作, 使得免疫算法变异的同时进行交叉操作, 从而提高了进化速度. 采用基于浓度的选择机制, 既鼓励适应值高的解, 又抑制浓度高的解, 从而保证了算法的收敛及解群体的多样性, 适合多峰值函数的寻优<sup>[6]</sup>.

### 3 微波元器件优化

$E$  面分支波导耦合器(如图 3 所示)由于能承受较高功率并具有良好的定向性和正交功率分配特性, 而被广泛用于复杂的多模多波速天线中, 成为波速形成网络(BFN)的一个重要不可缺少的重要组成部分

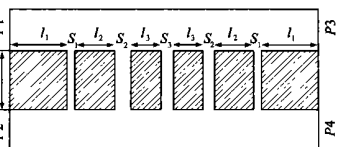


图 3 四端口五分支波导耦合器结构

分. 利用早期的等效网络理论可以对分支波导耦合器进行综合优化设计, 但其集总和传输线模型没有考虑波节的寄生响应, 很难获得期望性能. 以精确的场理论为基础的有限元方法(FEM)在电磁学中的已有广泛的应用, 相对于模匹配法, 前者在处理任意复杂的结构是具有很高的计算精度.

文献[7]采用遗传算法结合 FEM 优化出的耦合器结构能提高相应端口耦合隔离性能, 但正如前面讨论的, 由于遗传算法本身所固有的早熟问题, 如果没有足够的进化代数很难收敛到全局最优解, 尤其是微波电路这一类数值计算仿真过程需要很多的时间代价, 进化的效率显得尤为重要. 在一段时间内遗传算法优化会陷入早熟的困境中, 表现为数据长时间不更新从而呈现为收敛到全局最优解的假相, 这时从中截取的数据结果很有可能是局部最优解. 免疫算法由于提倡种群中个体的差异, 也就扩大在搜索空间中个体的分散度, 增加了收敛到全局最优解的几率, 从本质上避免了遗传算法的过早收敛问题.

本文基于免疫算法设计一个四端口五分支波导耦合器. 各波导端口均为 BJ-32 标准波导(72.14mm × 34.04mm), 且各分支波导高度相同. 运用有限元法计算波导耦合器内场的分布. 其泛函由下式给出:

$$F(E) = \frac{1}{2} \iiint_{V'} \frac{1}{\mu_r} [(\nabla \times E) \cdot (\nabla \times E) - k_0^2 \epsilon_r E \cdot E] dV - \iint_{S_1} \left[ \frac{1}{2} E \cdot P(E) - E \cdot U^{inc} \right] dS - \iint_{S_2} \frac{1}{2} E \cdot P(E) dS \quad (6)$$

式中

$$P(E) = \sum_m \sum_n \frac{k_0^2}{\gamma_{mn}} e_{lmm}^{TM} \int_0^a \int_0^b e_{lmm}^{TM} \cdot E dx dy - \sum_m \sum_n \gamma_{mn} \epsilon_{mn}^{TM} \int_0^a \int_0^b e_{lmm}^{TM} \cdot E dx dy \quad (7)$$

$$U^{inc} = \hat{n} \times \nabla \times E^{inc} + \sum_m \sum_n \frac{k_0^2}{\gamma_{mn}} e_{lmm}^{TM} \int_0^a \int_0^b e_{lmm}^{TM} \cdot E^{inc} dx dy - \sum_m \sum_n \gamma_{mn} \epsilon_{mn}^{TM} \int_0^a \int_0^b e_{lmm}^{TM} \cdot E^{inc} dx dy \quad (8)$$

有了电场  $E$  表示的泛函, 通过区域离散、单元插值等有限元分析的基本步骤, 使用矢量单元离散上述泛函, 即可求得各端口上的场分布. 其它参数如各个模的幅度、反射系数和传输系数等也由此计算出<sup>[8]</sup>.

使用免疫算法结合上述数值计算方法进行优化, 免疫算法的优化对象是各分支的长度和间距共 7 个变量, 优化目标是在工作频带 2.7~ 3.0GHz 内端口 3 与 1 的耦合度为 5dB, 端口 2 与 1 的隔离度大于 28dB.

对于群体中某一个体(序号标记为  $j$ ) 在工作频率带宽内选择若干个采样频率点, 在频率  $f_i$  计算耦合度  $C_j(f_i)$ 、隔离度  $D_j(f_i)$ , 同时也考虑输入端电压驻波比  $\rho_j(f_i)$ . 目标函数设定为

$$F = \max_i D_j(f_i) - D_p / (\max_i C_j(f_i) - C_p + \max_i \rho_j(f_i)) \quad (9)$$

$C_p$ 、 $D_p$  分别为耦合器期望耦合度、最小隔离度.

免疫算法的原始群体是使用不同的随机二进制序列做抗

体, 抗体数为 40. 阈值  $T_{ac} = 0.73$ , 变异概率为 0.1. 表 1 是采用等效网络设计法 (ENM)、遗传算法 (GA)、免疫算法 (IA) 进行优化后各枝节的最优值, 图 4、图 5 是三种方法优化后的各个指标.

表 1 三种方法设计结果(单位: mm)

	ENM	GA	IA
$l_1$	35.000	35.000	29.421
$s_1$	5.251	5.848	5.954
$l_2$	30.852	30.831	30.023
$s_2$	10.003	10.015	9.985
$l_3$	28.476	30.586	29.354
$s_3$	10.003	10.015	9.985
$t$	38.479	31.254	30.131

优化结果说明, 用传统的等效网络综合理论设计的波导不仅体积大, 而且带内耦合波纹大. GA 和 IA 优化的波导体积分别减小 1/5, 1/4, 更重要的是其带内耦合度在 5dB 波动相对平稳. 由于 GA 很容易早熟, 时常陷入局部极值, 跳出局部最优解需要靠变异等待更好的机会, 因此消耗大量的时间和代数. IA 主要进化算子为变异, 变异较大寻优到最优解的机会也就较大. 两者相比, IA 更能搜索出更优的结果, 而避免了 GA 陷入局部极大值的可能.

另外由于引入熵, 决定了 IA 解的多样性, 在全局变量很难确定甚至不存在的情况下, 给出多个局部极值作为候选方案是免疫算法的一大特点, 尤其适用于由于收到诸多变量影响的微波电路、天线方向图这一类不存在所谓的全局最优解的情况, 这样就可以综合衡量和选择群体中的能收敛到局部级值的若干个抗体组成解空间.

#### 4 结束语

现代工程设计问题的综合化和复杂化, 对优化设计提出了更高的要求. 大自然中丰富的生态系统蕴涵的网络结构信息提供了许多优良的优化计算方法, 遗传算法就是一种较好的求解方法, 但遗传算法易出现早熟、搜索效率低及不能很好保持个体多样性等问题. 而免疫算法由于提倡种群中个体的差异, 保证了进化群体的多样性, 从而增加了收敛到全局最优解的几率, 本质上避免了遗传算法的过早收敛问题. 将其用于 E 面波导分支耦合器的优化中, 结果表明采用免疫算法的优化技术能有效的解决微波电路及元器件的优化问题.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Weile D S, Michielssen E. Genetic algorithms optimization applied to electromagnetics: A review [ J ]. IEEE Trans. Antennas Propagat, 1997, 45(3): 343- 353.

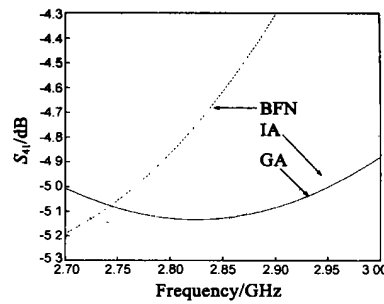


图 4 耦合器的带内耦合度

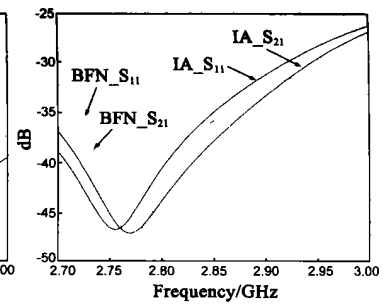


图 5 耦合器的隔离度、反射度

- [ 2 ] Davis L. Adapting operate probabilities in genetic algorithms [ A ]. Proc of the 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms [ C ]. San Mateo: CGA, 1989. 61- 69.
- [ 3 ] Dasgupta D, Atttoh-Okine N. Immunity-based systems: A survey [ A ]. Proc 1997 IEEE Int. Conf. ON Systems [ C ]. Man and Cybernetics, Orlando, FL, USA: IEEE, 1997( 1 ). 869- 874.
- [ 4 ] Dasgupta D. Artificial Immune Systems and Their Applications [ M ]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlang, 1999.
- [ 5 ] Chun Jang-Sung. Shape optimization of electromagnetic devices using immune algorithm [ J ]. IEEE Trans. on Magnetics, 1997, 33( 2 ): 1876 - 1879.
- [ 6 ] Jang-Sung Chun, et al. A study on comparison of optimization performances between immune algorithm and other heuristic algorithms [ J ]. IEEE Trans. on Magnetics, 1998, 34(5): 2972- 2981.
- [ 7 ] 王小陆, 等. E 面分支波导耦合器的遗传算法优化设计 [ J ]. 电波科学学报, 2002, 17( 6 ): 582- 585.
- [ 8 ] 金建铭(美). 电磁场有限元方法 [ M ]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.

#### 作者简介:



许 殿 男, 1979 年出生于江苏省南通市, 西安电子科技大学在读博士生, 主要研究领域: 智能天线、微波电路优化设计、射频电路分析.

史小卫 男, 1963 年出生于广东省汕头, 多年来从事电磁场与微波技术及无线电物理专业教学与科研工作, 现任西安电子科技大学教授、博士生导师, 目前主要研究方向有: 智能天线、射频识别、电磁兼容.