

文章编号: 2095-4980(2013)06-0927-06

## 高功率微波器件的初步优化设计

孙会芳, 姜幼明, 董 烨, 李瀚宇, 董志伟, 周海京

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 将遗传算法与全电磁粒子模拟算法有机融合, 研制出二维全电磁粒子模拟并行优化程序。据此对高功率微波源器件——磁绝缘线振荡器(MILO)和超辐射返波管(SRBWO)进行优化设计。将束波转换效率作为优化目标, 在输入功率基本不变的情况下, 优化后的磁绝缘线振荡器的效率比原模型提高 38.8%; 将超辐射相对论返波管的峰值输出功率作为优化目标, 优化后的器件峰值输出功率比原来提高了 37.5%, 束波转化效率提高了 50%; 将超辐射相对论返波管的输出微波总能量作为优化目标, 输出微波总能量比原来提高了 38.1%。经优化后获取的器件模型几何参数合理, 物理图像正确。

**关键词:** 遗传算法; 全电磁粒子模拟程序; 高功率微波器件; 优化设计

**中图分类号:** TN753.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201306.0927

## Preliminary optimization design of High Power Microwave sources

SUN Hui-fang, JIANG You-ming, DONG Ye, LI Han-yu, DONG Zhi-wei, ZHOU Hai-jing

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

**Abstract:** A paralleled 2-dimensional optimization code is developed by combining the Genetic Algorithm with Particle-In-Cell(PIC) code in order to improve the design of High Power Microwave(HPM) sources. Two HPM sources—Magnetically Insulated Transmission Line Oscillator(MILO) and Superradiance Relativistic Backward Wave Oscillator(SRBWO)—are optimized by using this optimization code. While the beam-wave conversion efficiency is set as optimization goal, the efficiency of optimized MILO is higher than original one by 38.8% with almost the same input power; while the peak output power is set as optimization goal, the peak output power of SRBWO has increased by 37.5% and the beam-wave conversion efficiency has increased by 50%; while the total energy of output wave is the optimization goal, the total energy of output wave of SRBWO has increased by 38.1%. All optimized models obtain reasonable geometry parameters and exact simulating spectra.

**Key words:** genetic algorithm; PIC code; High Power Microwave sources; optimization design

高功率微波器件的研制离不开全电磁粒子模拟(PIC)技术, 基于 PIC 模拟的设计结果进行加工试验, 能大大减少源器件的研制成本和周期, 获得可观的效益。但 PIC 技术本身并不包含寻优技术, 目前基于 PIC 技术的器件设计主要以参数扫描方式针对各个参量依次进行数值模拟, 从中人为寻优, 这个过程不仅非常缓慢, 效率低下, 费时费力, 而且真正的最优值可能永远无法找出<sup>[1]</sup>。遗传算法可以弥补 PIC 算法的不足, 它不依赖于问题的具体领域, 具备全局寻优能力, 可以实现对复杂系统的全局优化<sup>[2]</sup>, 同时还具有效率较高和易于并行计算等优点。遗传算法已经在很多领域获得了广泛运用<sup>[2-4]</sup>。本文将遗传算法和二维 PIC 程序(karat)有机融合, 并充分利用本单位的大型计算机资源, 研制出含有遗传算法的二维并行优化程序, 并利用该优化程序对典型的高功率微波源器件磁绝缘线振荡器(MILO)和超辐射返波管(SRBWO)进行初步的优化设计。

### 1 二维并行优化程序简介

遗传算法是美国密歇根大学 Holland 教授模拟生物进化方式而提出的一种优化算法<sup>[2]</sup>, 它借鉴生物界的进化

收稿日期: 2012-12-24; 修回日期: 2013-03-22

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(2011B0402068); 国家自然科学基金资助项目(11305015)

规律, 仿效生物的进化与遗传, 根据“生存竞争”和“优胜劣汰”的原则, 借助选择、交叉和变异操作, 使所要解决的问题从初始解一步步逼近最优解。

基于遗传算法编制了优化程序的主体, 器件的优化设计可转化为极大目标函数的优化问题, 因此将适应度函数设定为目标函数, 采用二进制编码, 以一个概率分布——轮盘赌的形式选取个体构成初始种群, 交配(交叉)采用常规方法——一对个体(染色体)按随机位交换基因, 个体中的每一个基因都以相同的概率变异。

具体计算流程如下: 首先将对器件设计要求转化为一个适应度函数(即优化目标函数), 在高功率微波器件优化设计中, 往往选用峰值输出功率、束波转换效率等具有全局性的器件性能指标作为优化目标, 构成适应度函数; 将预优化的器件结构或输入参数转变为遗传算法的个体代码(基因); 遗传算法随机产生初始种群, 包含若干个体, 每个个体代表一种器件结构; 将每个个体的代码重新“翻译”为器件结构参数, 调用 PIC 程序计算得到器件的各个性能数据, 计算出相应的适应度函数值, 再将计算结果返回“遗传算法”主进程; 遗传算法通过选择、交叉、变异等操作产生新一代个体, 新一代个体具有比上一代更高的适应度函数值, 即器件的性能得到了优化。重复以上步骤, 迭代若干代后, 将得到的最优个体作为器件设计的最佳结果。

基于遗传算法进行高功率微波器件的优化设计, 计算量大, 耗时长, 必须采用并行计算技术并借助高性能计算机完成。本文采用“主从式并行遗传算法”, 即整个并行程序分为主程序和从程序 2 个独立程序, 主程序的内核是遗传算法, 从程序的内核是二维 PIC 程序——karat 程序。通过 MPI 提供的进程创建函数, 在并行系统主节点上创建一个主进程, 在若干个从节点各创建一个从进程。主进程完成并行任务分配、并行管理和协调, 以及除数值计算外其他计算工作。从进程完成由主进程分配给它的数值计算任务, 并将计算结果返回主进程。可以看出, 在优化设计过程中, 器件结构的优化依靠 PIC 算法和遗传算法共同完成。

## 2 优化计算模型及结果分析

程序调试成功后, 作为初试, 选择了 2 种成熟器件进行优化设计, 一种是美国 Philip 实验室已重复进行实验的硬管 MILO 模型<sup>[5]</sup>; 另一种是超辐射返波管(SRBWO)模型。两者优化参数选取类似, 在原有模型基础上仅选择器件的核心部位——慢波结构参数进行优化, 根据经验, 合理设定预优化参数及其取值范围, 确定交叉概率为 0.5, 变异概率为 0.02, 群体维度为 512, 即每代有 512 个模型, 迭代次数设为 30, 2 种模型计算结果都充分收敛, 说明优化条件设定充分。计算结果如下。

### 2.1 硬管 MILO 优化结果及分析

MILO 是具有代表性的正交场器件, MILO 的研究以美国的硬管 MILO 和英国的锥形 MILO 为代表<sup>[6]</sup>。硬管 MILO 模型如图 1(a)所示。硬管 MILO 的核心部位——慢波结构参数为: 空间周期长度 3.8 cm, 前端扼流片叶片厚度 1.0 cm, 互作用叶片厚度 1.3 cm, 阴极发射面长度 24.2 cm。用 PIC 程序进行模拟计算, 在输入电压为 768 kV, 输入功率为 49.0 GW 时所得结果如图 1 所示, 输出微波平均功率 6.19 GW, 频率在 1.2 GHz 左右, 得出微波转换效率为 12.63%, 器件阻抗为 12.04  $\Omega$ 。

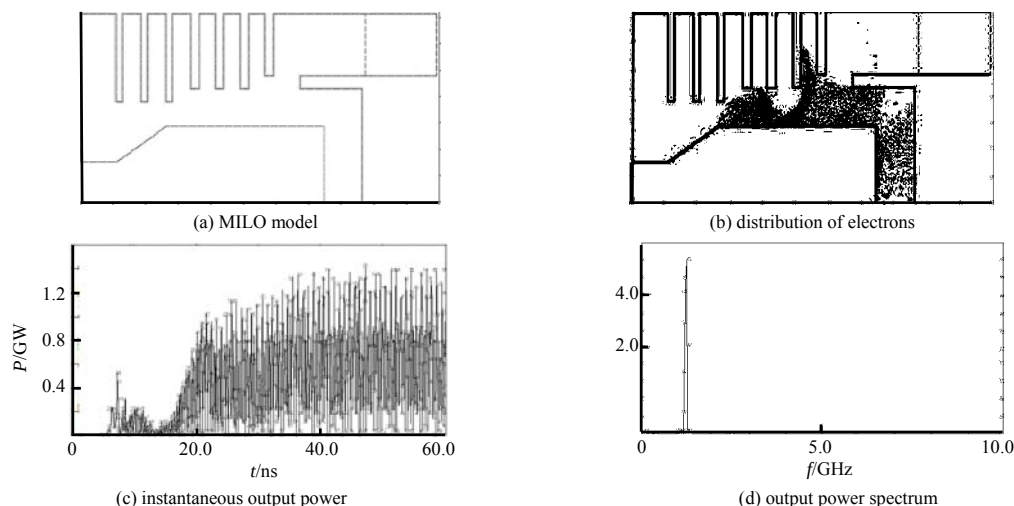


Fig.1 Model and numerical simulating spectrum of MILO

图 1 MILO 模型及数值模拟结果

## 2.2 硬管 MILO 优化模型及模拟结果

为尽量不改变器件的阻抗、频率等主要特性, 仅选择慢波结构的轴向参数和阴极发射面长度作为优化参数, 慢波结构采用非均匀结构, 即每个慢波腔的空间周期和叶片厚度都作为独立参数进行优化, 输出腔结构参数相对慢波结构整体保持不变, 以束波转化效率作为优化目标函数(适应度函数), 得出硬管 MILO 优化模型和模拟结果如图 2 所示, 优化后的慢波结构为非均匀结构, 6 个空间周期依次为 4.0 cm, 3.1 cm, 4.3 cm, 3.8 cm, 4.3 cm 和 2.8 cm, 7 个叶片厚度依次为 1.3 cm, 1.4 cm, 1.6 cm, 1.4 cm, 1.4 cm, 0.4 cm 和 0.6 cm, 前端阴极长度不变, 阴极发射面长度为 19.1 cm。模拟中输入电压为 775 kV, 输入功率 48.6 GW, 输出的平均功率 8.59 GW, 输出微波转换效率 17.67%, 器件阻抗  $12.36 \Omega$ , 频率在 1.2 GHz 左右。可见, 优化模型在对阻抗、频率等主要特性影响不大, 输入功率基本相同的情况下, 输出功率比原来提高了 38.8%, 微波转化效率提高了 5%, 起振时间也明显缩短。

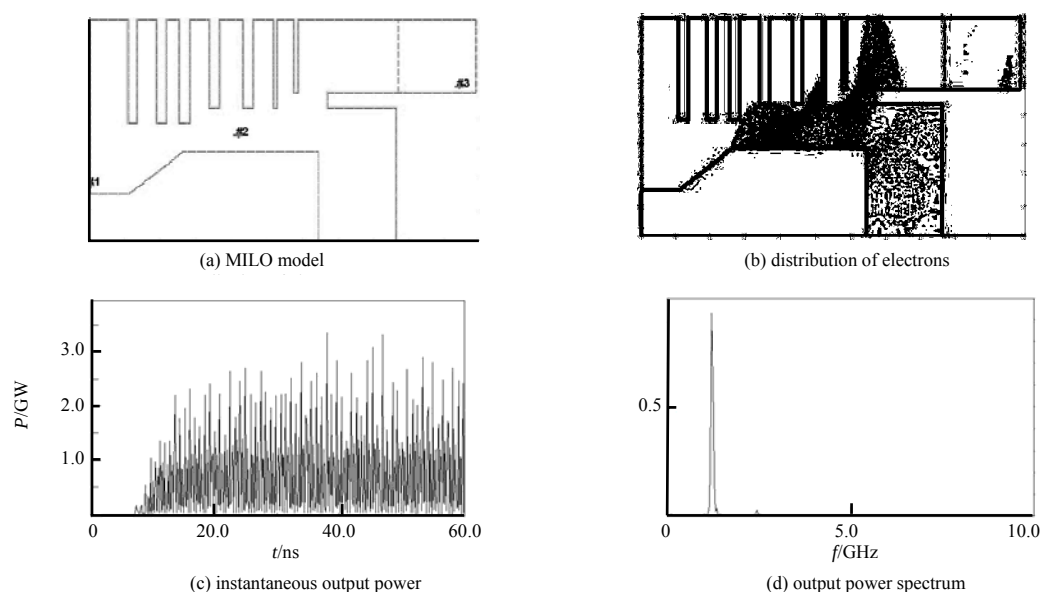


Fig.2 Model and numerical simulating spectrum of optimized MILO

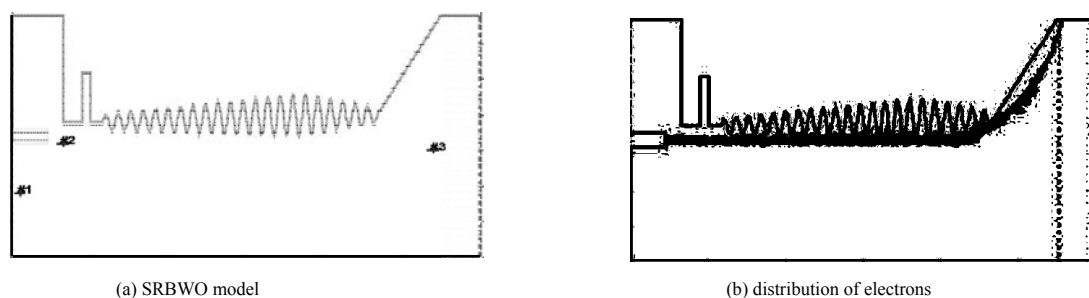
图2 硬管 MILO 优化模型及 karat 模拟结果

## 2.3 SRBWO 优化结果及分析

相对论返波管(BWO)是一种典型的 O 型器件, 具有高功率、高效率、适合重复频率运行等特点, 目前“超辐射”是它的一个重要研究方向<sup>[7]</sup>。

### 2.3.1 SRBWO 原模型及模拟结果

SRBWO 原模型如图 3(a)所示, 是在俄罗斯应用物理研究所的 N S Ginzburg 教授提出的 SRBWO 基础上优化得到的<sup>[8]</sup>, 慢波结构第 1 段深度从 0.1 cm 到 0.3 cm, 周期数为 16, 第 2 段深度从 0.3 cm 到 0.1 cm, 周期数为 6, 空间周期长度都为 1.6 cm, 慢波结构中心半径从 1.9 cm 渐变为 2.0 cm。采用无膜二极管, 爆炸式电子发射, 用 PIC 程序进行模拟计算, 结果如图 3 所示, 在输入电压 450 kV, 输入功率 1.2 GW, 磁场幅度 3.3 T 时, 峰值输出功率 1.6 GW, 输出微波峰值转换效率 133.3%, 频率在 8.5 GHz 左右。



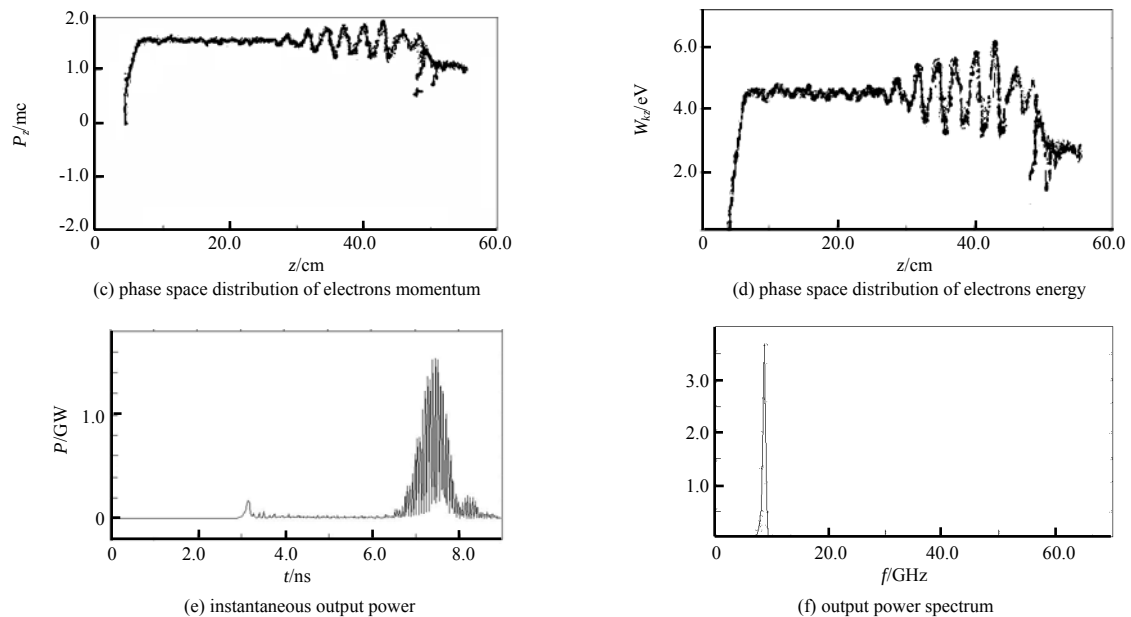


Fig.3 Model and numerical simulating spectrum of SRBWO

图 3 SRBWO 模型及数值模拟结果

### 2.3.2 SRBWO 优化模型及模拟结果

保持二极管参数不变,这样就保证超辐射返波管的输入条件不变,分别优化两段慢波结构的深度、周期长度和周期数,为保证电子束的有效传输,同时优化引导磁场的大小,2次分别设定不同的优化目标函数(适应度函数),得出如下的优化结果。

#### 1) 优化目标函数为微波峰值输出功率

将微波峰值输出功率作为优化目标函数,得出超辐射返波管新的优化模拟结果如图 4 所示,优化后的慢波结构参数为第 1 段深度从 0.2 cm 到 0.3 cm,周期数为 20,第 2 段深度从 0.3 cm 到 0.1 cm,周期数为 5,第 1 段周期长度为 1.4 cm,第 2 段周期长度为 1.5 cm,慢波结构中心半径不变。保持输入电参数不变,即输入电压 450 kV,输入功率 1.2 GW,磁场幅度增大为 3.42 T,得到输出微波峰值功率 2.2 GW,输出微波峰值转换效率 183.3%,频率在 9.0 GHz 左右。可见在输入功率相同的情况下,器件的输出功率比原来提高了 37.5%,微波转化效率提高了 50%。

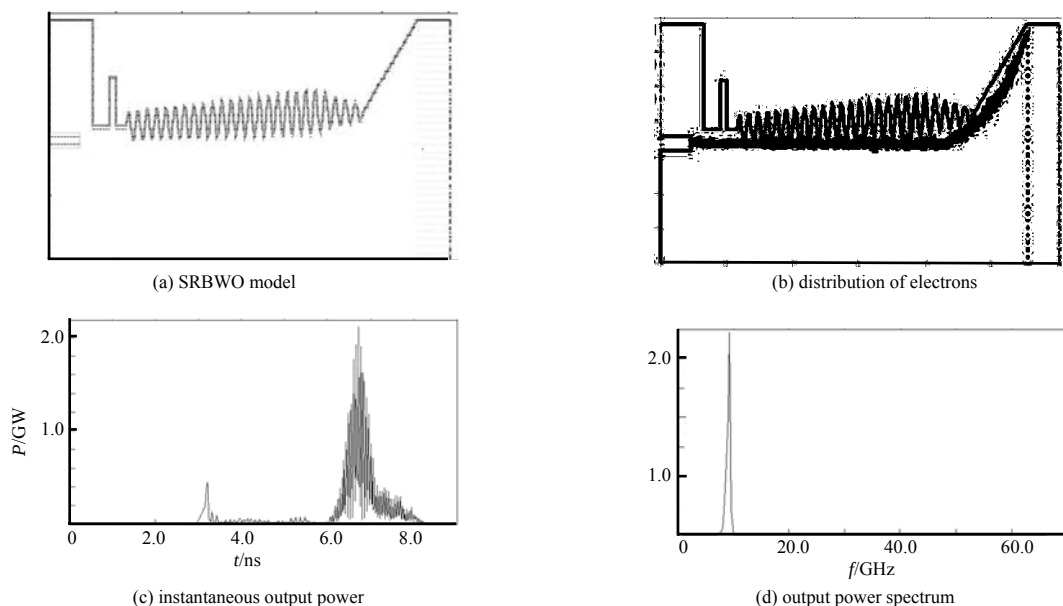


Fig.4 Model and numerical simulating spectrum of optimized SRBWO(optimization goal being the peak output power)

图 4 SRBWO 优化模型及 karat 模拟结果(优化目标函数为峰值功率)

## 2) 优化目标函数为微波输出总能量

将微波输出总能量作为优化目标函数, 得出 SRBWO 优化模型和模拟结果如图 5 所示, 优化后的慢波结构参数为第 1 段深度从 0.1 cm 到 0.3 cm, 周期数为 23, 第 2 段深度从 0.3 cm 到 0.2 cm, 周期数为 3, 周期长度都为 1.4 cm, 慢波结构中心半径不变。保持输入参数不变, 即输入电压 450 kV, 输入功率 1.2 GW, 磁场幅度 3.3 T, 结果显示输出微波峰值功率没有提高, 但脉宽明显变宽, 约从 1 ns 增加到 1.5 ns, 在计算时间 0 ns~9 ns 内原模型输出微波平均功率为 223 mW, 优化模型输出微波的平均功率为 308 MW, 由此得出输出微波总能量比原来提高了 38.1%。

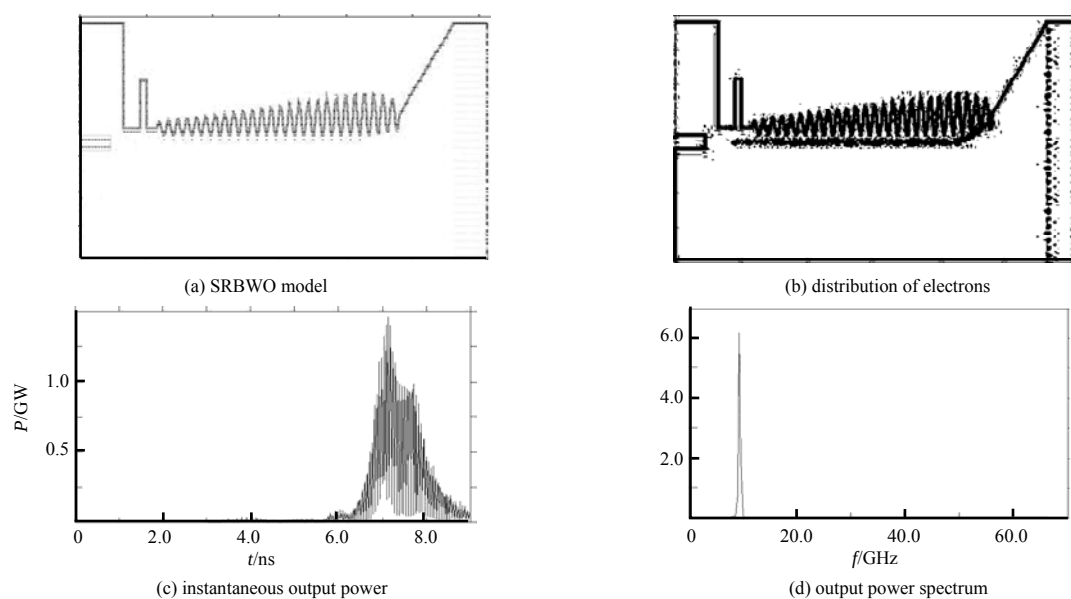


Fig.5 Model and numerical simulation spectrum of optimized SRBWO(optimization goal being total energy of output wave)

图 5 SRBWO 优化模型及 karat 模拟结果(优化目标函数为输出微波总能量)

## 3 结论

利用将遗传算法和二维 PIC 程序有机融合的二维并行优化程序对高功率微波源器件——MILO 和 SRBWO 进行初步的优化设计, 通过合理设定优化目标函数, 实现了对高功率微波器件的核心部分——慢波结构的参数优化, 磁绝缘线振荡器的效率比原模型提高 30%以上, 超辐射返波管的 2 个优化模型性能也都有很大程度的提高。

本文涉及的 2 个器件的起始模型都是利用 PIC 程序反复优化过的成熟模型, 经优化后性能都有一定程度的提高, 说明此并行优化程序具有单靠 PIC 算法无法比拟的寻优能力, 且快速高效。本文是利用该优化程序得到的初步优化结果, 是对程序的初步验证, 优化程序本身和结果的可靠性还有待于实验验证。

## 参考文献:

- [1] Arman M J, Havranek J, Dietz D. Self-optimization in simulation-aided high power microwave source design[C]// International Workshop on High Power Microwave Generation and Pulse Shortening. 1997:225-232.
- [2] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论·应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. (WANG Xiaoping, CAO Liming. Genetic algorithm-theory·apply and software[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.)
- [3] 梁宇宏, 陈星. 天线自动设计和“天基”系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2006, 4(6):454-456. (LIANG Yuhong, CHEN Xing. Automated Antenna Design and “Tian Ji” System[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2006, 4(6):454-456.)
- [4] 王建成, 田沛. 基于 GA 的电磁参数提取时域仿真研究[C]// 中国电子学会第十二届全国青年学术年会. 西安: [s.n.], 2006:115-117. (WANG Jiancheng, TIAN Pei. Time domain simulation study of distilling electromagnetic parameters based on GA[C]// The 12th national youth academic meeting of Chinese electronic institute. Xi'an: [s.n.], 2006:115-117.)
- [5] 孙会芳, 董志伟. 磁绝缘线振荡器(MILO)的冷腔研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2006, 4(1):35-39. (SUN Huifang, DONG Zhiwei. Study of Cooling Magnetically Insulated Line Oscillator[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2006, 4(1):35-39.)

(下转第 941 页)