

# 采用多准则决策分析的高功率微波源多目标优化设计

杨文晋<sup>1,2</sup>, 李永东<sup>1,2</sup>, 王洪广<sup>1,2</sup>, 蒋铭<sup>1,2</sup>, 曹猛<sup>1,2</sup>, 刘纯亮<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学电子物理与器件教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学电子与信息学部, 710049, 西安)

**摘要:** 为解决高功率微波源优化设计难度较大的问题,将多准则决策分析方法、遗传算法和全电磁粒子模拟软件 UNIPIC 相结合,提出了一种适于高功率微波源的多目标优化设计方法 FSAWS-GA。通过对待优化器件的结构参数进行浮点编码生成种群个体,利用多准则决策分析方法中的主观目标和客观目标评价算法实现个体适应度评价,基于遗传算法实现种群进化,达到高功率微波源多目标优化设计的目的。对比测试结果表明:FSAWS-GA 算法较传统单目标遗传优化算法,对高功率微波源优化有更好的适应性,能够优化出多性能指标均符合设计要求的器件结构。利用 FSAWS-GA 对一种 Ka 波段的相对论返波管进行了结构优化测试,得到了输出功率为 0.642 GW、工作频率为 26.68 GHz、频率纯度为 0.09、电子通过率为 86.72%、能量转换效率为 15.6% 的新型器件结构。新型器件结构在确保多项性能指标均满足设计要求的前提下,输出功率较原器件提高了 210.1%,验证了利用 FSAWS-GA 算法实现高功率微波源多目标优化设计的可行性。

**关键词:** 高功率微波;粒子模拟;多目标优化;多准则决策分析

**中图分类号:** TN101;O411.3 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtubxb202306009 **文章编号:** 0253-987X(2023)06-0074-13

## Multi-Objective Optimization Design of High-Power Microwave Source Based on Multi-Criteria Decision Making

YANG Wenjin<sup>1,2</sup>, LI Yongdong<sup>1,2</sup>, WANG Hongguang<sup>1,2</sup>, JIANG Ming<sup>1,2</sup>,

CAO Meng<sup>1,2</sup>, LIU Chunliang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Physical Electronics and Devices of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To overcome the difficulty in optimization design of high-power microwave (HPM) sources, a multi-objective optimization design method of HPM sources, named FSAWS-GA, was proposed in this study based on multi-criteria decision making (MCDM), genetic algorithm, and fully electromagnetic particle simulation software UNIPIC. The structure parameters of the device to be optimized were used to generate individual chromosome by using float-encoding. The individual fitness evaluation was realized by using subjective-objective evaluation algorithms in MCDM method, and the population evolution was based on the genetic algorithm, thus realizing multi-objective optimization design of HPM sources. The comparative results showed that the

收稿日期: 2022-11-09。 作者简介: 杨文晋(1987—),男,博士生;李永东(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61971342,12005165,62101434)。

网络出版时间: 2023-03-14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230313.0905.002.html>

FSAWS-GA was more suitable than the conventional single-objective genetic optimization algorithm for the multi-objective optimization design of HPM sources, and can be used to generate an optimized device with better comprehensive performance than the primary device. The FSAWS-GA was used to optimize a Ka-band relativistic back-wave oscillator (RBWO). An optimized RBWO was generated with output power of 0.642 GW, operating frequency of 26.68 GHz, frequency purity of 0.09, electron passing rate of 86.72% and beam-to-microwave conversion efficiency of 15.6%. The output power of the optimized RBWO was increased by 210.1% compared to the primary RBWO on the premise of ensuring that multiple performance indicators meet the requirements, which verifies the feasibility of using FSAWS-GA algorithm to achieve multi-objective optimization design of HPM sources.

**Keywords:** high power microwave; particle-in-cell simulation; multi-objective optimization; multi-criteria decision making

高功率微波(high-power microwave, HPM)源基于电磁场与带电粒子间复杂的非线性相互作用工作,可产生工作频率为1~300 GHz、微波输出功率大于100 MW的高功率微波。传统的HPM源设计一般采用理论分析与全电磁粒子模拟(particle-in-cell, PIC)相结合的方法完成,并最终通过实验调试确定器件结构。近年来,随着HPM源的发展,研究人员为了设计出性能更优的HPM源,提出了越来越多的器件结构和性能参数<sup>[1-7]</sup>。复杂的器件结构和众多的性能参数提高了HPM源的设计难度,对传统HPM源设计方法提出了新的挑战。

随着智能优化算法的发展,越来越多的领域开始利用智能优化算法辅助完成优化设计,如半导体器件设计、集成电路设计、机械结构设计、车身结构设计等<sup>[8-10]</sup>。近年来,研究人员将遗传算法、粒子群算法等智能优化算法应用于HPM源优化设计,并取得了一定的成果<sup>[11-13]</sup>。但是,已有研究成果主要关注的是工作频率、输出功率、波束转换效率等单一性能参数,缺乏针对多种性能参数的综合考虑。

在最优化问题中,针对多个目标进行优化的问题被称为多目标优化问题。经典的多目标优化算法有基于数学思想的优化算法(如线性加权方法、 $\epsilon$ 约束方法和逼近理想解排序法等)和基于群体启发的优化算法(如PAES、NSGA、NSGA-II、SPEA-II、MOMPA等<sup>[14-21]</sup>)。其中,基于数学思想的优化算法需要将多目标优化问题转换为单目标优化问题,适于解决较简单的优化问题。基于群体启发的进化优化算法、基于Pareto非劣解概念实现适于求解复杂的优化问题。

在HPM源优化设计中,研究人员关心的性能参数众多且优先级不同,较重要的有:输出功率,工

作频率,频率纯度,波束转换效率,电子通过率等。其中,输出功率、波束转换效率等属于趋势参数,取极大值或极小值为最优。工作频率、电子通过率、频率纯度等性能参数属于区间参数,需基于所属区间进行优劣评价。例如,在设计Ka波段的HPM源器件时,可认为工作频率在26.5~40.0 GHz之间均符合设计要求。因此,若直接使用上述传统多目标优化方法进行HPM源多目标优化设计可能导致过拟合现象或Pareto解集包含大量无效解。

多准则决策分析方法(multi-criteria decision making, MCDM)主要用于根据事物的多属性进行综合评估,能够在具有不可公度性的方案中进行分析决策,常被用于解决决策分析类问题,如工厂选址、企业战略决策、疾病治疗方案决策、供应商抉择、绘制洪水易感性图和物流中心选址等<sup>[22-24]</sup>。本文所用模糊简单加权系统(fuzzy simple additive weighting system, FSAWS)<sup>[25]</sup>是一种集成了模糊集理论、因素评级系统和简单加权系统的多准则决策分析方法,被广泛应用于各个领域。FSAWS中的主客观目标分类评价算法非常适于HPM源性能参数特点,可用做适应度评价,辅助实现HPM源多目标优化设计。

本文基于FSAWS和遗传算法<sup>[26]</sup>,提出了一种支持并行的HPM源多目标优化算法FSAWS-GA。FSAWS-GA算法充分考虑了HPM源的区间型性能参数和趋势型性能参数的特点,实现了相对简单的权重设置和目标评价,适于解决HPM源多目标优化设计问题。首先,本文详细介绍了FSAWS-GA算法的具体实现方法。然后,利用FSAWS-GA算法与UNIPIC<sup>[27-29]</sup>相结合,对一种Ka波段的相对论返波管(relativistic back-wave oscillator, RBWO)

进行结构优化,得到了工作频率、频率纯度和电子通过率均符合设计要求且输出功率更高的器件结构。最后,通过对比优化前后 RBWO 器件的 PIC 数值模拟结果,分析了器件性能得到改善的深层原因。

1 FSAWS-GA 算法描述

FSAWS-GA 的主流程基于遗传算法实现,适应度评价算法基于 FSAWS 实现,详细算法流程描述见 1.3 小节。

设 HPM 源的器件结构参数为  $\boldsymbol{x} \in \mathbf{R}^n$ , 器件性能参数为  $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) \in \mathbf{R}^m$ , 性能参数的评价函数为  $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})) \in \mathbf{R}^m$ , 结构参数  $\boldsymbol{x}$  的搜索域为  $\Omega$ , 则最优结构参数为

$$\boldsymbol{x}^* = \operatorname{argmin}_{\boldsymbol{x} \in \Omega} \left( \sum_{k=1}^m -W_k F_k(f_k(\boldsymbol{x})) \right) \quad (1)$$

式中:  $f_k(\boldsymbol{x})$  为第  $k$  个器件性能参数;  $F_k(f_k(\boldsymbol{x}))$  为第  $k$  个器件性能参数的评价函数;  $W_k$  为第  $k$  个器件性能参数的权重。器件性能参数的权重设置和评价函数均基于 FSAWS 实现, 详见 1.1 和 1.2 小节。

1.1 权重设置

本文参考文献[25]将 HPM 源器件性能的权重分为 5 个级别并用梯形模糊数<sup>[30]</sup>进行描述, 如表 1 所示。若定义模糊集合为  $\tilde{A} = (a, b, c, d)$ , 其中  $a < b < c < d$ , 则梯形模糊数的隶属函数为

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x < c \\ \frac{x-d}{c-d}, & c \leq x < d \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

模糊数的符号距离定义为

$$d(\tilde{A}) = \frac{1}{4}(a + b + c + d) \quad (3)$$

表 1 权重的模糊数描述<sup>[25]</sup>

Table 1 Fuzzy number for the importance weight

| 权重级别           | 模糊数          |
|----------------|--------------|
| very low (VL)  | (0,0,0,3)    |
| low (L)        | (0,3,3,5)    |
| medium (M)     | (2,5,5,8)    |
| high (H)       | (5,7,7,10)   |
| very high (VH) | (7,10,10,10) |

假设共有  $T$  个决策者。其中,第  $i$  个决策者的可信度为  $I_i$ , 对第  $j$  个器件性能参数建议的权重为

$W_{ij}$ , 具体数值从表 1 中选取。决策者权重设置如表 2 所示。

表 2 决策者权重设置

Table 2 Importance weight setting of decision maker

| 器件性能参数                | 权重       |          |          |          |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|
|                       | $D_1$    | $D_2$    | $\cdots$ | $D_T$    |
| $f_1(\boldsymbol{x})$ | $W_{11}$ | $W_{21}$ | $\cdots$ | $W_{T1}$ |
| $f_2(\boldsymbol{x})$ | $W_{12}$ | $W_{22}$ | $\cdots$ | $W_{T2}$ |
| $\vdots$              | $\vdots$ | $\vdots$ | $\cdots$ | $\vdots$ |
| $f_m(\boldsymbol{x})$ | $W_{1m}$ | $W_{2m}$ | $\cdots$ | $W_{Tm}$ |

器件性能参数权重设置流程如下。

步骤 1 计算第  $j$  个器件性能参数的权重

$$\tilde{W}_j = \sum_{i=1}^T I_i W_{ij} = (\omega_{1j}, \omega_{2j}, \omega_{3j}, \omega_{4j}) \quad (4)$$

式中  $\sum_{i=1}^T I_i = 1$ 。  $\tilde{W}_j$  由  $T$  个决策者共同决定。

步骤 2 计算第  $j$  个器件性能参数权重的符号距离

$$d(\tilde{W}_j) = \frac{1}{4}(\omega_{1j} + \omega_{2j} + \omega_{3j} + \omega_{4j}) \quad (5)$$

步骤 3 权重归一化

$$W_j = \frac{d(\tilde{W}_j)}{\sum_{k=1}^m d(\tilde{W}_k)} \quad (6)$$

在本文中,默认只采用 1 个决策者,未涉及多个不同可信度决策者的情况。在实际应用过程中,可以进一步结合实际情况,酌情引入多个决策者,设计出更准确的权重系数,有助于改善优化结果。

1.2 目标评价

本文将 HPM 源器件性能参数分类为区间型和趋势型两类。

区间型性能参数需根据参数所属区间进行优劣评价,通常利用分段函数实现数学表述,如工作频率、电子通过率、频率纯度等。趋势型性能参数需根据参数的相对变化趋势进行优劣评价,如输出功率、功率转换效率等。

设  $f_s(\boldsymbol{x})$  为 HPM 源的区间型性能参数的描述函数,  $\tilde{F}_s(f_s(\boldsymbol{x}))$  为  $f_s(\boldsymbol{x})$  的评价函数, 公式为

$$\tilde{F}_s(f_s(\boldsymbol{x})) = S, \quad L < f_s(\boldsymbol{x}) < U \quad (7)$$

参考 FSAWS 将区间型性能参数分为 9 个级别,并用模糊数进行描述,如表 3 所示。  $S$  的取值根据预先设定的评价准则,结合  $f_s(\boldsymbol{x})$  所属区间范围从表 3 中选取。

表 3 区间型性能参数评级的模糊数描述<sup>[25]</sup>

Table 3 Fuzzy number for ratings of interval object

| 评级                                        | 模糊数              |
|-------------------------------------------|------------------|
| very poor (VP)                            | (0,0,0,20)       |
| between very poor and poor<br>(B. VP & P) | (0,0,20,40)      |
| poor (P)                                  | (0,20,20,40)     |
| between poor and fair<br>(B. P & F)       | (0,20,50,70)     |
| fair (F)                                  | (30,50,50,70)    |
| between fair and good<br>(B. F & G)       | (30,50,80,100)   |
| good (G)                                  | (60,80,80,100)   |
| between good and very good<br>(B. G & VG) | (60,80,100,100)  |
| very good (VG)                            | (80,100,100,100) |

趋势型性能参数可分为正趋势参数和负趋势参数两类。其中,正趋势参数以相对大值为优,负趋势参数以相对小值为优。输出功率即为一种正趋势参数,数值相对越大则评级越优。由于趋势型性能参数没有绝对的最大值或最小值,因此需要在限定的集合内进行优劣评价。

设  $f_o(\mathbf{x})$  为 HPM 源的趋势型性能参数的描述函数,  $\tilde{F}_o(f_o(\mathbf{x}))$  为  $f_o(\mathbf{x})$  的评价函数,待评价集合内共有  $p$  组结果。

若该趋势参数为正趋势,以相对大值为优,则第  $i$  组结果的评价为

$$F_{oi}(f_{oi}(\mathbf{x})) = 100(f_{oi}(\mathbf{x})/\max(\{f_{o1}(\mathbf{x}), \cdots, f_{op}(\mathbf{x})\}))$$
$$i = 1, 2, \cdots, p, f_{oi}(\mathbf{x}) > 0 \tag{8}$$

若该趋势参数为负趋势,以相对小值为优,第  $i$  组结果的评价为

$$F_{oi}(f_{oi}(\mathbf{x})) = 100(\min(\{f_{o1}(\mathbf{x}), \cdots, f_{op}(\mathbf{x})\})/f_{oi}(\mathbf{x}))$$
$$i = 1, 2, \cdots, p, f_{oi}(\mathbf{x}) > 0 \tag{9}$$

为了能够适于模糊数运算,将  $F_{oi}(f_{oi}(\mathbf{x}))$  转换为模糊数的表述形式

$$(F_{oi}(f_{oi}(\mathbf{x})), F_{oi}(f_{oi}(\mathbf{x})), F_{oi}(f_{oi}(\mathbf{x})), F_{oi}(f_{oi}(\mathbf{x})))$$
$$\tag{10}$$

$\tilde{F}_o(f_o(\mathbf{x}))$  和  $\tilde{F}_s(f_s(\mathbf{x}))$  即为目标评价函数  $\mathbf{F}(f(\mathbf{x}))$  的具体实现。

由于评价函数是以模糊数的形式描述的,因此需要对式(1)进行修正以适于模糊数计算。设器件结构参数共有  $p$  组,器件性能参数有  $q$  个。其中,区间型性能参数的数量为  $q_s$ ,趋势型性能参数的数量

为  $q_o$ ,则  $q = q_s + q_o$ 。  
第  $i$  组器件结构的综合评价为

$$E_i = (\sum_{j=1}^{q_s} W_j \tilde{F}_{sij}) \oplus (\sum_{k=1}^{q_o} W_k \tilde{F}_{oik}) \tag{11}$$

式中:  $\tilde{F}_{sij}$  表示第  $i$  组器件的第  $j$  个区间型性能参数的评价结果;  $\tilde{F}_{oik}$  表示第  $i$  组器件的第  $k$  个趋势型性能参数的评价结果;  $W_k$  表示第  $k$  个趋势型性能参数的权重;  $E_i$  是模糊数形式,记为

$$E_i = (E_{1i}, E_{2i}, E_{3i}, E_{4i}) \tag{12}$$

$E_i$  的符号距离为

$$d(E_i) = \frac{1}{4}(E_{1i} + E_{2i} + E_{3i} + E_{4i}) \tag{13}$$

$d(E_i)$  即为第  $i$  组器件结构的适应度。

基于上述内容结合式(1),则最优器件结构参数为

$$\mathbf{x}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{x} \in \Omega} (-d(E(\mathbf{x}))) \tag{14}$$

1.3 算法流程

FSAWS-GA 的主流程基于遗传算法实现。遗传算法由 Holland 提出,是一种借鉴了自然选择和遗传机制的随机搜索算法<sup>[31]</sup>。遗传算法与求解问题本身弱相关,具有较强的鲁棒性,不容易陷入局部最优,且隐含支持并行计算。本文利用 FSAWS 实现适应度评价,提出了 FSAWS-GA 算法,适于解决 HPM 源多目标多参数的优化问题。

利用 FSAWS-GA 进行 HPM 源优化设计的详细流程如图 1 所示,描述如下。

**步骤 1** 将待优化 HPM 源进行结构参数化,确定待优化器件结构参数为

$$\mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{im}], \quad i = 1, 2, \cdots, N \tag{15}$$

**步骤 2** 设置种群包含个体的数量为  $N$ ,在器件结构参数变化范围内,采用均匀随机方式生成具体参数值  $\mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{im}]$ ,并利用浮点数基因编码方式对器件结构参数进行浮点数基因编码,编码后的种群个体基因为  $C_i$ 。其中,浮点精度根据器件结构参数精度确定。初始种群表示为

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \cdots, \mathbf{x}_N\} \tag{16}$$

**步骤 3** 确定关注的器件性能参数类型,如输出功率、工作频率、频率纯度、波束转换效率、电子通过率等,并根据器件性能优先级确定权重  $\mathbf{W}$ 。权重设置方法详见 1.1 小节,设关注的器件性能参数数量为  $m$ 。

**步骤 4** 基于器件结构参数  $\mathbf{x}$  生成具体器件模型,并利用 PIC 模拟软件 UNIPIC 完成数值模拟,得到器件性能的数值模拟结果



$$f(x_i) = [f_1(x_i), f_2(x_i), \dots, f_m(x_i)]$$
$$i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

式中  $f(x_i)$  为第  $i$  个器件性能参数的描述函数, 依据性能参数类型分为区间型和趋势型, 并用于计算个体适应度。

**步骤 5** 确定器件性能参数的评价准则, 并利用 FSAWS 方法计算个体适应度  $d(E_i)$ 。

**步骤 6** 基于个体适应度和迭代数判断是否达到收敛条件。若达到收敛条件, 则输出种群中的精英个体作为优化后的器件结构参数  $x^*$ , 并结束优化。否则继续下一步骤。

**步骤 7** 参考遗传算法, 利用选择、交叉、变异算法生成新种群, 并结合精英策略引入原种群中的精英个体。

**步骤 8** 重复步骤 4~6。

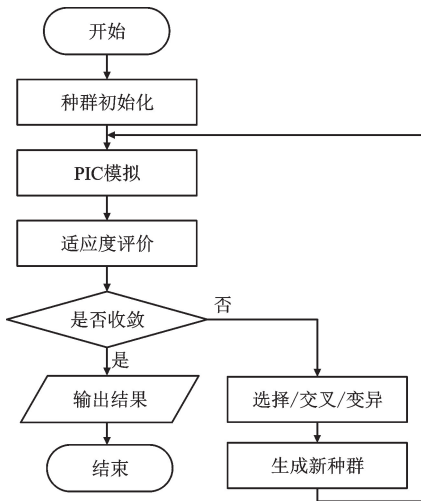


图 1 FSAWS-GA 算法流程示意  
Fig. 1 FSAWS-GA flow chart

## 2 算法验证

研究表明, Ka 波段 RBWO 在引导磁场为 0.8~2.2 T 时, 输出功率可达 100~300 MW<sup>[32-34]</sup>。但是, 由于受到功率容量限制和模式竞争的影响, Ka 波段 RBWO 器件的功率转换效率较低。本文参考文献[32]初步设计了一种工作在 0.8 T 引导磁场下的 Ka 波段 RBWO 原型, 并利用 FSAWS-GA 算法对 RBWO 的反射腔尺寸、提取腔尺寸和慢波结构等进行了优化, 优化目标包括输出功率( $P_{out}$ )、工作频率( $f_w$ )、频率纯度( $A_{secf}/A_{maxf}$ , 其中,  $A_{maxf}$  为工作频率的信号幅值,  $A_{secf}$  为杂波中的最高信号幅值)和电子通过率( $I_{out}/I_{cathode}$ ), 用以验证多目标优化算法 FSAWS-GA 的正确性。优化后的 RBWO 的工作

频率为 26.68 GHz, 且  $A_{secf}/A_{maxf}$ 、 $I_{out}/I_{cathode}$  和  $P_{out}$  较 RBWO 原型均更优。

### 2.1 RBWO 原型

RBWO 原型的器件结构如图 2 所示, 慢波结构 (slow wave structure, SWS) 的平均直径  $D=27.2$  mm, 过模比( $D/\lambda$ )约为 2.8。因此,  $TM_{01}$ 、 $TM_{02}$  和  $TM_{03}$  模式均可以存在, 但  $TM_{04}$  以上的高阶模式将被截断。

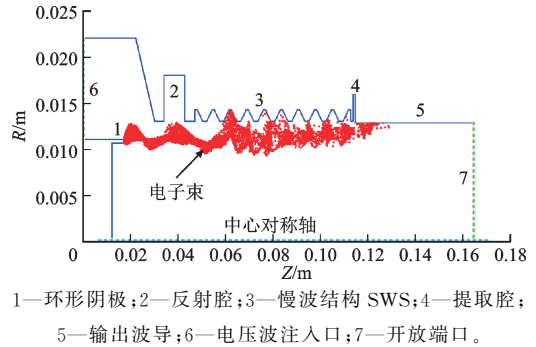
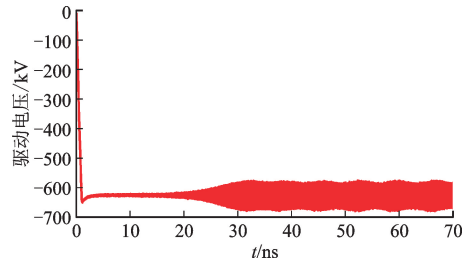
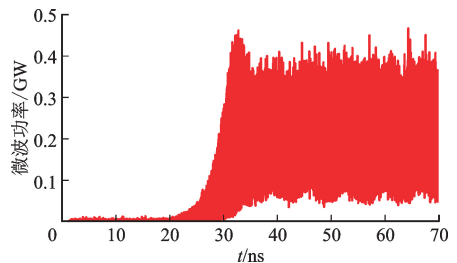


图 2 RBWO 原型结构  
Fig. 2 Structure of the primary RBWO

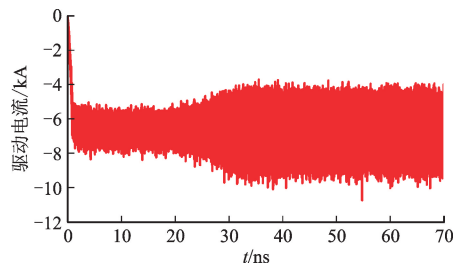
PIC 数值模拟结果表明, 该器件的驱动电压和电流分别为 625.9 kV 和 6.57 kA, 工作频率为 30.31 GHz, 输出功率为 207.0 MW, 功率转换效率约为 5%, 如图 3 所示。



(a) 驱动电压



(b) 微波输出功率



(c) 驱动电流

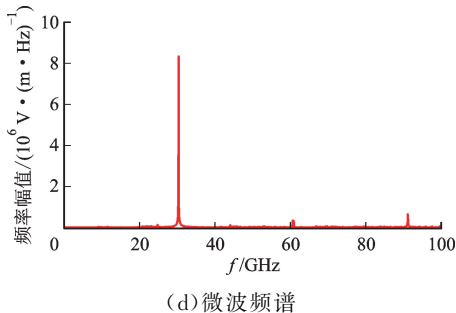


图 3 RBWO 原型 PIC 数值模拟结果

Fig. 3 PIC simulation results of primary RBWO

采用文献[35]方法求解 SWS 的色散曲线,结果如图 4 所示。图中,  $k_z$  为电磁波波数,  $p$  为 SWS 周期长度。电子束线与  $TM_{01}$ 、 $TM_{02}$  和  $TM_{03}$  模式的  $-1$  次空间谐波色散曲线均有交点,因而模式竞争主要存在于  $TM_{01}$ 、 $TM_{02}$  和  $TM_{03}$  模式之间。其中,  $TM_{03}$  模式工作点处的频率更高,斜率(电磁波群速)更小,品质因数更好。因此,  $TM_{03}$  模式具有更好的谐振特性,容易成为波束相互作用的主模。

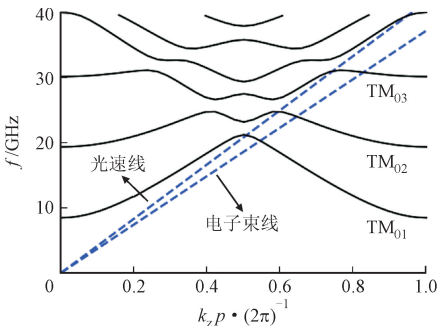


图 4 RBWO 原型慢波结构的色散曲线

Fig. 4 Dispersion curves in SWS of primary RBWO

RBWO 原型的轴向电场空间分布如图 5 所示,波束相互作用区的电磁场主工作模式为  $TM_{03}$ 。

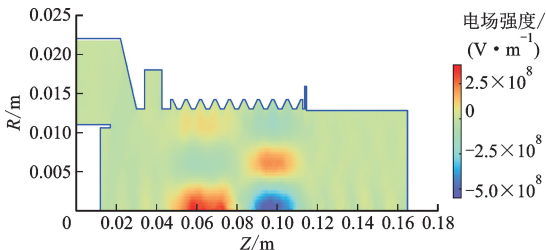


图 5  $t=59.0\text{ ns}$  时 RBWO 原型轴向电场空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of axial electric field for primary RBWO ( $t=59.0\text{ ns}$ )

2.2 RBWO 器件优化

RBWO 原型的待优化器件结构参数共有 12 个,包括反射腔尺寸、提取腔尺寸和慢波结构等,如图 6 所示。待优化参数的取值范围及精度如表 4 所示。

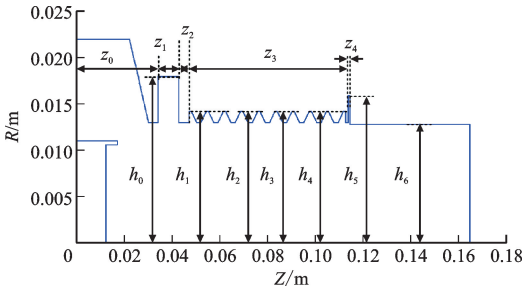


图 6 RBWO 原型器件结构参数

Fig. 6 Structure parameters of primary RBWO

表 4 结构参数变化范围

Table 4 Structure parameters setting

| 参数    | 初始值/mm | 变化范围/mm     | 精度/mm |
|-------|--------|-------------|-------|
| $z_0$ | 34.0   | [3.0, 7.0]  | 0.1   |
| $z_1$ | 8.7    | [6.0, 9.0]  | 0.1   |
| $z_2$ | 4.3    | [2.5, 6.0]  | 0.1   |
| $z_3$ | 66.8   | [1.0, 3.0]  | 0.1   |
| $z_4$ | 0.8    | [1.0, 3.0]  | 0.1   |
| $h_0$ | 16.3   | [-3.0, 3.0] | 0.1   |
| $h_1$ | 14.2   | [-3.0, 3.0] | 0.1   |
| $h_2$ | 14.2   | [-3.0, 3.0] | 0.1   |
| $h_3$ | 14.2   | [-3.0, 3.0] | 0.1   |
| $h_4$ | 14.2   | [-3.0, 3.0] | 0.1   |
| $h_5$ | 14.2   | [-3.0, 3.0] | 0.1   |
| $h_6$ | 12.8   | [-3.0, 3.0] | 0.1   |

器件优化测试环境为: Windows Server 2016, Intel(R) Xeon(R) Gold 6240R 处理器, 384 GB 内存。优化算法采用 FSAWS-GA 算法, 种群包含个体的数量设置为 15, 交叉概率为 0.8, 突变概率为 0.1, 最大迭代次数为 150, 优化目标包括输出功率 ( $P_{out}$ )、工作频率 ( $f_w$ )、频率纯度 ( $A_{sef}/A_{maxf}$ ) 和电子通过率 ( $I_{out}/I_{cathode}$ ), 目标权重分别设置为 low、very high、medium、high。区间型性能参数的评级准则如表 5~7 所示, 输出功率为趋势型性能参数, 按照式(8)进行评价。采用 15 线程并行计算, 完成 150 次迭代的计算总时长约为 57 h。

表 5  $f_w$  评级准则

Table 5  $f_w$  evaluation criteria

| $f_w/\text{GHz}$ | 评级 |
|------------------|----|
| (28.0, 32.0]     | VG |
| (32.0, 34.0]     | G  |
| (26.0, 28.0]     | G  |
| (34.0, 36.0]     | F  |
| (24.0, 26.0]     | F  |
| (36.0, 38.0]     | P  |
| (22.0, 24.0]     | P  |
| (0.0, 22.0]      | VP |
| (38.0, +∞]       | VP |

表 6  $A_{\text{secf}}/A_{\text{maxf}}$  评级准则  
Table 6  $A_{\text{secf}}/A_{\text{maxf}}$  evaluation criteria

| $A_{\text{secf}} \cdot A_{\text{maxf}}^{-1}$ | 评级 |
|----------------------------------------------|----|
| (0.0, 0.1]                                   | VG |
| (0.1, 0.3]                                   | G  |
| (0.3, 0.5]                                   | F  |
| (0.5, 0.7]                                   | P  |
| (0.7, 1.0]                                   | VP |

表 7  $I_{\text{out}}/I_{\text{cathode}}$  评级标准  
Table 7  $I_{\text{out}}/I_{\text{cathode}}$  evaluation criteria

| $I_{\text{out}} \cdot I_{\text{cathode}}^{-1}$ | 评级 |
|------------------------------------------------|----|
| (0.9, 1.0]                                     | VG |
| (0.8, 0.9]                                     | G  |
| (0.7, 0.8]                                     | F  |
| (0.6, 0.7]                                     | P  |
| (0.0, 0.6]                                     | VP |

优化后的 RBWO 器件结构如图 7 所示。优化前后 RBWO 器件的结构参数如表 8 所示。

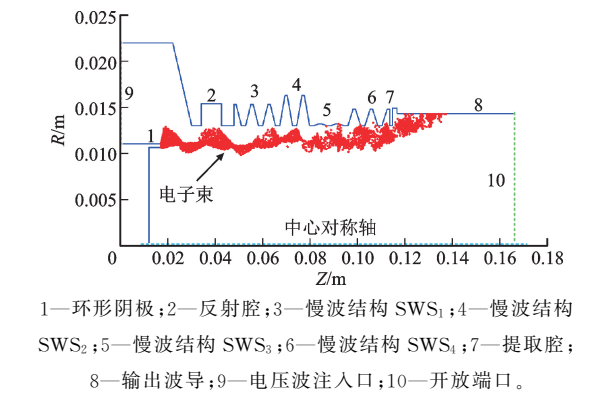


图 7 优化 RBWO 器件结构

Fig. 7 Structure of the optimized RBWO

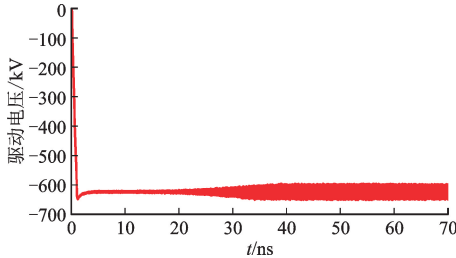
表 8 优化前后 RBWO 器件结构参数对比

Table 8 Comparison of structure parameters

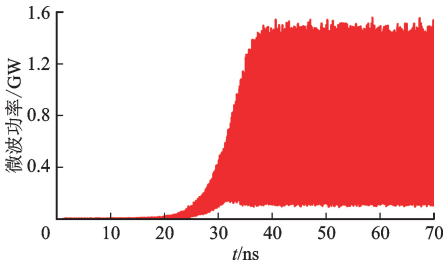
| 参数              | 数值      |         | 参数              | 数值      |         |
|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|
|                 | RBWO 原型 | 优化 RBWO |                 | RBWO 原型 | 优化 RBWO |
| $z_0/\text{mm}$ | 34.0    | 34.1    | $h_0/\text{mm}$ | 18.0    | 15.4    |
| $z_1/\text{mm}$ | 8.7     | 8.4     | $h_1/\text{mm}$ | 14.2    | 15.3    |
| $z_2/\text{mm}$ | 4.3     | 5.3     | $h_2/\text{mm}$ | 14.2    | 16.3    |
| $z_3/\text{mm}$ | 66.8    | 66.9    | $h_3/\text{mm}$ | 14.2    | 13.2    |
| $z_4/\text{mm}$ | 0.8     | 2.1     | $h_4/\text{mm}$ | 14.2    | 14.8    |
|                 |         |         | $h_5/\text{mm}$ | 15.9    | 14.9    |
|                 |         |         | $h_6/\text{mm}$ | 12.8    | 14.3    |

PIC 数值模拟结果如图 8 所示,该器件的驱动

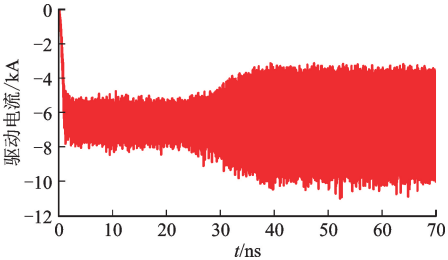
电压和电流分别为 625.7 kV 和 6.58 kA,工作频率为 26.68 GHz,输出功率为 642.0 MW,功率转换效率约为 15.6%。



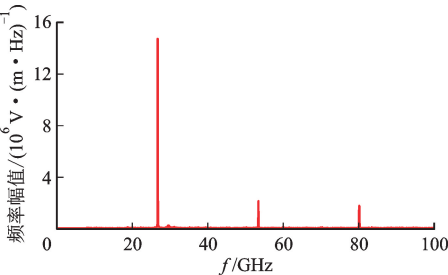
(a) 驱动电压



(b) 微波输出功率



(c) 驱动电流



(d) 微波频谱

图 8 优化 RBWO 数值模拟结果

Fig. 8 PIC simulation results of optimized RBWO

优化 RBWO 的轴向电场空间分布如图 9 所示,波束相互作用区的电磁场主模式为  $\text{TM}_{03}$ 。优化前后数值模拟结果如表 9 所示。可以看出,优化后 RBWO 器件在确保工作频率符合设计要求的前提下,不仅输出功率较 RBWO 原型提高了 210.1%,且  $A_{\text{secf}}/A_{\text{maxf}}$  和  $I_{\text{out}}/I_{\text{cathode}}$  也均有改善。测试结果验证了 FSAWS-GA 算法的正确性及用于 HPM 源多目标优化的可行性。

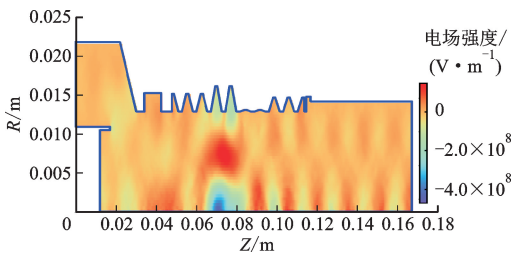


图 9  $t=59.0\text{ ns}$  时优化 RBWO 轴向电场空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of axial electric field for optimized RBWO ( $t=59.0\text{ ns}$ )

表 9 优化前后 RBWO 器件 PIC 数值模拟结果对比  
Table 9 Comparison of PIC simulation results

| 参数                                           | 数值      |         |
|----------------------------------------------|---------|---------|
|                                              | RBWO 原型 | 优化 RBWO |
| 电压/kV                                        | 625.90  | 625.70  |
| 电流/kA                                        | 6.57    | 6.58    |
| 功率/GW                                        | 0.207   | 0.642   |
| 频率/GHz                                       | 30.31   | 26.68   |
| 起振时间/ns                                      | 26.03   | 35.32   |
| $A_{\text{secf}} \cdot A_{\text{maxf}}^{-1}$ | 0.12    | 0.09    |
| 电子通过率/%                                      | 70.13   | 86.72   |
| 波束转换效率/%                                     | 5.00    | 15.60   |

2.3 算法比对

HPM 源的性能参数众多且优先级不同, 包含有趋势型性能参数和区间型性能参数, 与一般的优化问题略有不同。因此, 若使用一般多目标优化算法进行 HPM 源多目标优化设计, 则可能导致过拟合或生成大量无效解。已有关于 HPM 器件优化设计的方法均为单目标优化算法<sup>[11-13]</sup>, 使用遗传算法、粒子群算法与 PIC 模拟相结合实现。为了进一步验证 FSAWS-GA 的优势, 在小样本条件下, 分别利用传统单目标遗传算法和 FSAWS-GA 进行优化测试。

测试用 RBWO 器件的结构及参数化详情如图 10 和表 10 所示, 参数组合共 15 625 种。利用 UNIPIC 软件进行全域数值模拟, 诊断结果包括输出功率( $P_{\text{out}}$ )、工作频率( $f_{\text{w}}$ )、频率纯度( $A_{\text{secf}}/A_{\text{maxf}}$ )、

电子通过率( $I_{\text{out}}/I_{\text{cathode}}$ )。设定优化设计目标为  $f_{\text{w}} \in [29.5, 32.5]\text{ GHz}$ ,  $A_{\text{secf}}/A_{\text{maxf}} < 0.25$ ,  $I_{\text{out}}/I_{\text{cathode}} > 0.5$ ,  $P_{\text{out}} > 200\text{ MW}$ 。在 15 625 组数据中, 满足上述设计目标的数据共有 14 组, 约占样本库的 0.09%。

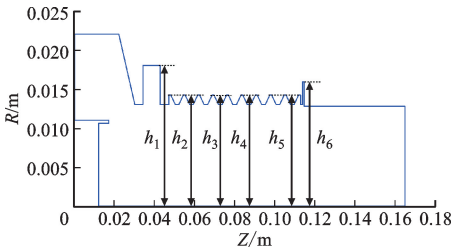


图 10 RBWO 器件结构参数

Fig. 10 Structure parameters of the RBWO

表 10 结构参数变化范围

Table 10 Structure parameters setting

| 参数    | 初始值/mm | 变化范围/mm       | 精度/mm |
|-------|--------|---------------|-------|
| $h_1$ | 16.3   | $[-2.0, 2.0]$ | 1.0   |
| $h_2$ | 14.2   | $[-2.0, 2.0]$ | 1.0   |
| $h_3$ | 14.2   | $[-2.0, 2.0]$ | 1.0   |
| $h_4$ | 14.2   | $[-2.0, 2.0]$ | 1.0   |
| $h_5$ | 14.2   | $[-2.0, 2.0]$ | 1.0   |
| $h_6$ | 14.2   | $[-2.0, 2.0]$ | 1.0   |

采用传统遗传算法(GA)对图 10 所示 RBWO 器件进行优化测试。设定种群大小为 15, 迭代数为 150, 优化目标为输出功率  $P_{\text{out}}$ , 重复进行 5 次优化得到的结果如表 11 所示。采用 FSAWS-GA 对图 10 所示 RBWO 进行优化测试。设定种群大小为 15, 迭代数为 150, 优化目标为  $P_{\text{out}}$ 、 $f_{\text{w}}$ 、 $A_{\text{secf}}/A_{\text{maxf}}$  和  $I_{\text{out}}/I_{\text{cathode}}$ , 重复进行 5 次优化得到的结果如表 12 所示。

测试结果表明, 传统单目标遗传优化设计算法仅能优化趋势型单目标参数, 无法保证其余参数满足设计要求, 而 FSAWS-GA 算法可以很好地平衡多目标, 获得符合设计要求且综合性能更优的优化结果。

表 11 GA 优化测试结果

Table 11 Optimizing results generated by GA

| 序号 | $h_1/\text{mm}$ | $h_2/\text{mm}$ | $h_3/\text{mm}$ | $h_4/\text{mm}$ | $h_5/\text{mm}$ | $h_6/\text{mm}$ | 功率/GW | 频率/GHz | $A_{\text{secf}} \cdot A_{\text{maxf}}^{-1}$ | 电子通过率/% | 是否满足设计要求 |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|--------|----------------------------------------------|---------|----------|
| 1  | 17.3            | 15.2            | 12.2            | 12.2            | 15.2            | 12.2            | 0.88  | 21.20  | 0.25                                         | 28.0    | 否        |
| 2  | 15.3            | 14.2            | 15.2            | 13.2            | 16.2            | 16.2            | 0.56  | 17.90  | 0.15                                         | 26.0    | 否        |
| 3  | 16.3            | 12.2            | 12.2            | 12.2            | 12.2            | 12.2            | 0.86  | 32.40  | 0.28                                         | 8.0     | 否        |
| 4  | 16.3            | 15.2            | 12.2            | 12.2            | 15.2            | 12.2            | 0.90  | 21.30  | 0.30                                         | 26.0    | 否        |
| 5  | 15.3            | 12.2            | 12.2            | 12.2            | 12.2            | 12.2            | 0.80  | 32.40  | 0.13                                         | 11.0    | 否        |



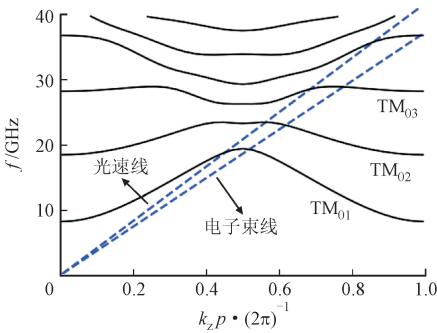
表 12 FSAWS-GA 优化测试结果  
Table 12 Optimizing results generated by FSAWS-GA

| 序号 | $h_1/\text{mm}$ | $h_2/\text{mm}$ | $h_3/\text{mm}$ | $h_4/\text{mm}$ | $h_5/\text{mm}$ | $h_6/\text{mm}$ | 功率/GW | 频率/GHz | $A_{\text{seef}} \cdot A_{\text{maxf}}^{-1}$ | 电子通过率/% | 是否满足设计要求 |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|--------|----------------------------------------------|---------|----------|
| 1  | 15.3            | 12.2            | 12.2            | 12.2            | 14.2            | 15.2            | 0.23  | 32.40  | 0.11                                         | 71.0    | 是        |
| 2  | 15.3            | 14.2            | 12.2            | 12.2            | 14.2            | 13.2            | 0.41  | 30.40  | 0.19                                         | 52.0    | 是        |
| 3  | 16.3            | 12.2            | 12.2            | 12.2            | 14.2            | 15.2            | 0.40  | 32.40  | 0.12                                         | 63.0    | 是        |
| 4  | 15.3            | 14.2            | 12.2            | 12.2            | 14.2            | 13.2            | 0.41  | 30.40  | 0.19                                         | 52.0    | 是        |
| 5  | 18.3            | 14.2            | 14.2            | 14.2            | 14.2            | 14.2            | 0.29  | 30.30  | 0.18                                         | 43.0    | 否        |

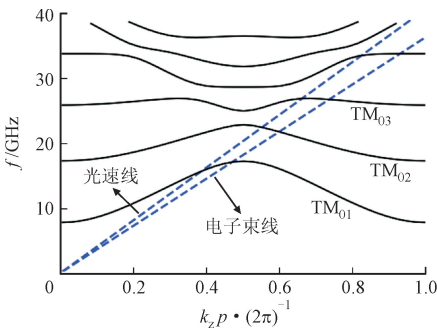
3 物理分析

图 7 所示优化后 RBWO 的慢波结构与 RBWO 原型不同,是一种 4 段非均匀慢波结构。其中; $\text{SWS}_1$  的平均直径  $D_1=28.30\text{ mm}$ ,波纹深度  $r_1=1.15\text{ mm}$ ;  $\text{SWS}_2$  的平均直径  $D_2=29.30\text{ mm}$ ,波纹深度  $r_2=1.65\text{ mm}$ ;  $\text{SWS}_3$  的平均直径  $D_3=26.20\text{ mm}$ ,波纹深度  $r_3=0.10\text{ mm}$ ;  $\text{SWS}_4$  的平均直径  $D_4=27.80\text{ mm}$ ,波纹深度  $r_4=0.90\text{ mm}$ 。优化 RBWO 慢波结构的径向尺寸较 RBWO 原型更大,功率容量更高。

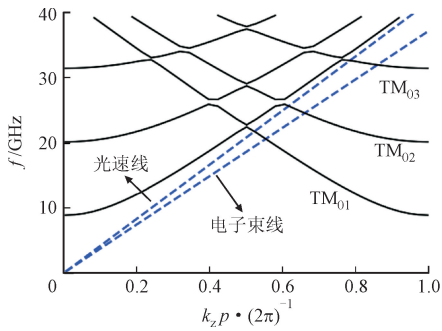
采用文献[35]方法求解优化 RBWO 的 SWS 色散曲线,结果如图 11 所示。由于优化后 RBWO 的主工作频率为  $26.68\text{ GHz}$ ,因此可以进一步推断出  $\text{SWS}_2$  为主要的波束互动区。此时,电子束线与  $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{TM}_{02}$  和  $\text{TM}_{03}$  模式的  $-1$  次空间谐波色散曲线均有交点。由于  $\text{TM}_{03}$  模式的工作点斜率(电磁波群速)更小,品质因数更好,更容易在模式竞争中取胜,因此  $\text{TM}_{03}$  模式是  $\text{SWS}_2$  波段的主工作模式。



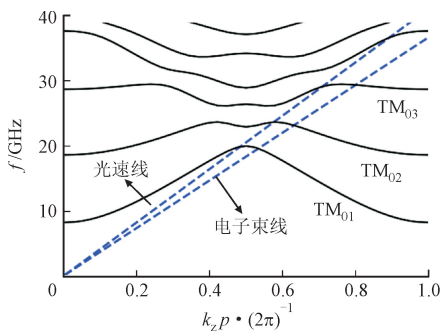
(a)  $\text{SWS}_1$



(b)  $\text{SWS}_2$



(c)  $\text{SWS}_3$



(d)  $\text{SWS}_4$

图 11 优化 RBWO 器件 SWS 的色散曲线

Fig. 11 Dispersion curves in SWS of the optimized RBWO

优化后 RBWO 器件各段结构的作用分析如下。

(1)预调制过渡区。优化算法通过调整反射腔和  $\text{SWS}_1$  的结构,构建同轴传输线与波束互动区之间的预调制过渡区。相比于 RBWO 原型,优化后的 RBWO 的过渡区主要从以下 2 个方面改善器件性能。

①使  $\text{SWS}_1$  右侧的  $\text{TM}_{03}$  模式的电磁场过渡为左侧的混合模式,能够更有效地抑制  $\text{TM}_{03}$  模式电磁场能量的衍射泄漏,如图 9 所示。

②对电磁场和电子束进行预调制,改善电子束和电磁场的相位匹配,降低电子束的能量分散程度,增强切伦科夫辐射,提高波束互动效率,如图 12 和图 13 所示。图中:  $E_z$ 、 $I_z$  分别为  $z$  方向的电场、电流;  $u_z = \gamma v_z$ ,其中,  $\gamma$  为相对论因子,  $v_z$  为电子的  $z$  方向速度。

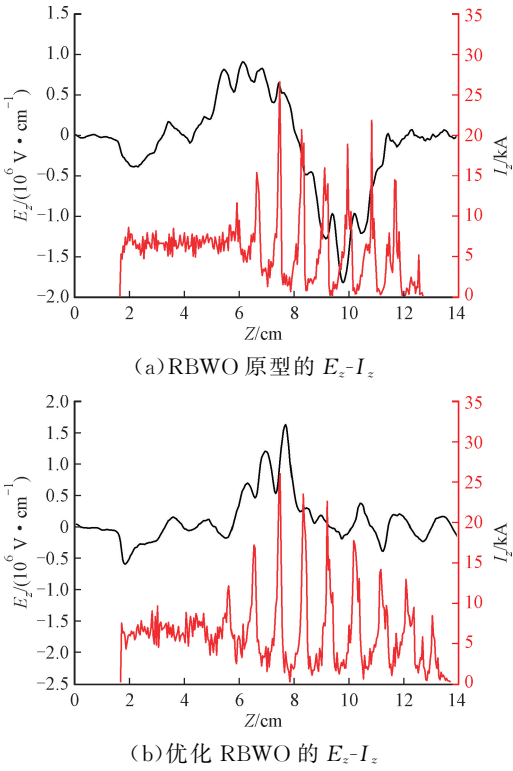


图 12  $t=59.0 \text{ ns}$  时 RBWO 轴向电场和束流的瞬态分析  
Fig. 12 Comparison of instantaneous distributions of the axial electric field and beam current for the RBWO ( $t=59.0 \text{ ns}$ )

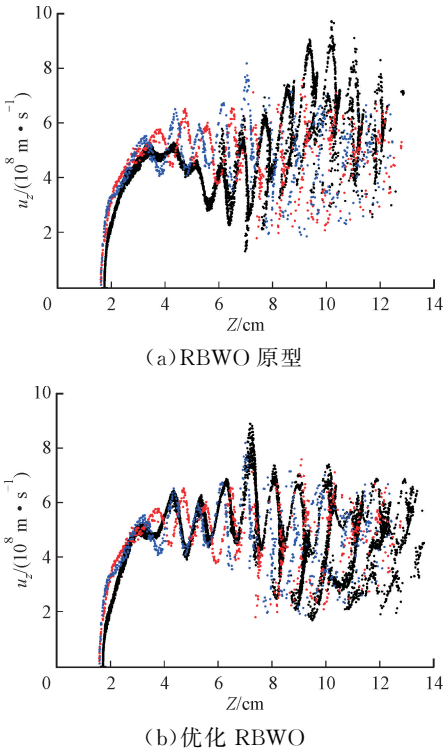


图 13 电子相空间分布  
Fig. 13 Phase space plot of electron

(2)切伦科夫辐射区。SWS<sub>2</sub> 为主要的波束相互作用区。在 SWS<sub>2</sub> 处,轴向电场与电子束运动方向相反,随电场增加电子被减速,轴向电流  $I_z$  减小,如图 12(b)所示。在 SWS<sub>2</sub> 处,电子束通过切伦科夫辐射实现与电磁场的第一次波束能量交换,电子束功率从 16.9 GW 降低至 7.8 GW,如图 14 所示。

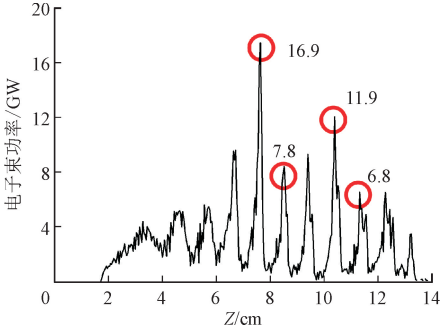


图 14  $t=59.0 \text{ ns}$  时优化 RBWO 的电子束功率  
Fig. 14 Power distribution of electron beam for the optimized RBWO

(3)电子漂移段。SWS<sub>3</sub> 的  $D_3/\lambda \approx 2.34$ ,  $D_3$  满足

$$p_{02} < \pi D_3/\lambda < p_{03} \tag{18}$$

式中  $p_{02}=5.52$  和  $p_{03}=8.65$  为 Bessel 函数  $J_0(x)=0$  的根。因此,SWS<sub>3</sub> 的存在截断了 TM<sub>03</sub> 模式,将电磁场模式转换为 TM<sub>02</sub>,为后续基于 TM<sub>02</sub> 模式的波束能量交换提供了条件,如图 9 所示。此外,SWS<sub>3</sub> 的波纹深度较浅,可以实现类似漂移段的作用,且有效增强电子聚集,形成良好的群聚束团,并有效提高电子通过率,实现提高波束能量交换效率的目的,如图 7 所示。

(4)渡越辐射区。电子束经过 SWS<sub>3</sub> 后,群聚效应增强。电子束团进入 SWS<sub>4</sub> 后,在第 1、2 周期被加速,电子束功率提升至 11.9 GW。电子束团进入 SWS<sub>4</sub> 最后一个慢波结构时,电子束通过渡越辐射实现第二次波束能量交换,电子束功率从 11.9 GW 降至 6.8 GW,如图 14 所示。

通过上述分析发现,虽然 FSAWS-GA 优化算法是利用数学工具从数据层面对 HPM 源进行优化设计的,器件结构不同于经典结构,具有分段非均匀的慢波结构。但是,依然实现了增大功率容量、改善电子束和电磁场相位匹配、降低电子束能量分散、增强电子束群聚的效果,并通过切伦科夫辐射和渡越辐射实现了两次波束能量交换,提高了波束相互作用效率,改善了器件性能。

## 4 结 论

本文基于 FSAWS 中的主客观目标分类评价算法,实现了适于 HPM 源器件性能参数特点的个体适应度评价,并与遗传算法和全电磁粒子模拟软件 UNIPIC 相结合,提出了一种适于 HPM 源多目标多参数优化设计的优化算法 FSAWS-GA。本文详细介绍了 FSAWS-GA,并利用该算法对一种工作在 Ka 波段的 RBWO 器件进行了结构优化测试,初步验证了利用 FSAWS-GA 实现 HPM 源多目标优化设计的可行性。

FSAWS-GA 多目标优化算法可以从数据层面而非纯粹物理层面出发,自动优化设计出不同于经典结构的异形器件结构。进一步的物理分析表明,虽然 FSAWS-GA 仅从数据层面出发实现器件结构优化,但却隐含有相应的物理机理,如改善波束相位匹配、降低电子束能量分散、增强电子束群聚等。因此,研究人员不仅可以利用 FSAWS-GA 实现器件结构的自动优化,而且可以通过对优化得到的异形器件结构进行机理分析,拓展新的优化设计思路。

在后续的研究工作中,拟将鲁棒性更强的多准则分析方法、更高效的优化算法和更准确的数值模拟方法相结合,并辅以基于物理机理的约束条件,提高优化效率,改善优化结果。

## 参考文献:

- [1] LEVUSH B, ANTONSEN T M, BROMBORSKY A, et al. Theory of relativistic backward-wave oscillators with end reflectors [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1992, 20(3): 263-280.
- [2] KLIMOV A I, KURKAN I K, POLEVIN S D, et al. A multigigawatt X-band relativistic backward wave oscillator with a modulating resonant reflector [J]. Technical Physics Letters, 2008, 34(3): 235-237.
- [3] ROSTOV V V, ROMANCHENKO I V, TSYGANKOV R V, et al. Numerical and experimental investigation of 4 mm wavelength microwave oscillator based on high-current compact accelerator [J]. Physics of Plasmas, 2018, 25(7): 073110.
- [4] TENG Yan, CAO Yinbin, SONG Zhimin, et al. A Ka-band  $TM_{02}$  mode relativistic backward wave oscillator with cascaded resonators [J]. Physics of Plasmas, 2014, 21(12): 123108.
- [5] JU Jinchuan, GE Xingjun, ZHANG Wei, et al. Coherent combining of phase-steerable high power microwaves generated by two X-band triaxial klystron amplifiers with pulsed magnetic fields [J]. Physical Review Letters, 2023, 130(8): 085002.
- [6] 王东阳, 滕雁, 史彦超, 等. Ka 波段  $TM_{02}$  模式低磁场相对论返波管初步实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(7): 38-42.  
WANG Dongyang, TENG Yan, SHI Yanchao, et al. Preliminary experimental study on a Ka-band RBWO operating at  $TM_{02}$  mode with low guiding magnetic field [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(7): 38-42.
- [7] XIAO Renzhen, SHI Yanchao, WANG Huida, et al. Efficient generation of multi-gigawatt power by an X-band dual-mode relativistic backward wave oscillator operating at low magnetic field [J]. Physics of Plasmas, 2020, 27(4): 043102.
- [8] 杨德利, 刘百勇, 龚雪皓, 等. 半导体器件的遗传算法优化设计 [J]. 半导体技术, 2001, 26(2): 41-44.  
YANG Deli, LIU Baiyong, GONG Xuehao, et al. Optimization design of semiconductor devices using GA [J]. Semiconductor Technology, 2001, 26(2): 41-44.
- [9] BARROS M, NEVES G, GUILHERME J, et al. An evolutionary optimization kernel with adaptive parameters applied to analog circuit design [C]//International Symposium on Signals, Circuits and Systems, 2005. ISSCS 2005. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 545-548.
- [10] VILLEGAS F J, CWIK T, RAHMAT-SAMII Y, et al. A parallel electromagnetic genetic-algorithm optimization (EGO) application for patch antenna design [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(9): 2424-2435.
- [11] 王辉辉, 刘大刚, 蒙林, 等. 粒子群及遗传算法在相对论返波管中的应用 [J]. 计算物理, 2014, 31(4): 479-485.  
WANG Huihui, LIU Dagang, MENG Lin, et al. Particle swarm optimization and genetic algorithm for a relativistic backward wave oscillator [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2014, 31(4): 479-485.
- [12] 陈再高, 王建国, 王玥, 等. 基于粒子模拟和并行遗传算法的高功率微波源优化设计 [J]. 物理学报, 2013, 62(16): 168402-1-168402-6.  
CHEN Zaigao, WANG Jianguo, WANG Yue, et al. Optimal design of high-power microwave source based on particle simulation and genetic algorithms [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(16): 168402-1-168402-6.
- [13] 孙会芳, 李瀚宇, 姜幼明, 等. 磁绝缘线振荡器的自动优化设计 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(4):

- 17-21.
- SUN Huifang, LI Hanyu, JIANG Youming, et al. Self-optimization design of magnetically insulated transmission line oscillator [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(4): 17-21.
- [14] AFSHARI A, MOJAHED M, YUSUFF R M. Simple additive weighting approach to personnel selection problem [J]. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 2010, 1(5): 511-515.
- [15] MAVROTAS G. Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2009, 213(2): 455-465.
- [16] BEHZADIAN M, KHANMOHAMMADI OTAGH-SARA S, YAZDANI M, et al. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications [J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(17): 13051-13069.
- [17] KNOWLES J, CORNE D. The Pareto archived evolution strategy: a new baseline algorithm for Pareto multiobjective optimisation [C]//*Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99* (Cat. No. 99TH8406). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 98-105.
- [18] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms [J]. *Evolutionary Computation*, 1994, 2(3): 221-248.
- [19] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [C]//*Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2000: 849-858.
- [20] ZITZLER E, LAUMANN S M, THIELE L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm [EB/OL]. [2022-10-01]. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004284029>.
- [21] ABDEL-BASSET M, MOHAMED R, MIRJALILI S, et al. An efficient marine predators algorithm for solving multi-objective optimization problems: analysis and validations [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 42817-42844.
- [22] MOUSAVI-NASAB S H, SOTOUDEH-ANVARI A. A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems [J]. *Materials & Design*, 2017, 121: 237-253.
- [23] ALBAHRI O S, AL-OBAIDI J R, ZAIDAN A A, et al. Helping doctors hasten COVID-19 treatment: towards a rescue framework for the transfusion of best convalescent plasma to the most critical patients based on biological requirements via ml and novel MCDM methods [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2020, 196: 105617.
- [24] HONG Haoyuan, TSANGARATOS P, ILIA I, et al. Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 575-588.
- [25] CHOU Shuoyan, CHANG Yaohui, SHEN Chunying. A fuzzy simple additive weighting system under group decision-making for facility location selection with objective/subjective attributes [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189(1): 132-145.
- [26] MITCHELL M. An introduction to genetic algorithms [M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1996.
- [27] 李永东, 王洪广, 刘纯亮, 等. 高功率微波器件 2.5 维通用粒子模拟软件: 尤普 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(12): 1866-1870.
- LI Yongdong, WANG Hongguang, LIU Chunliang, et al. 2.5-dimensional electromagnetic particle-in-cell code-UNIPIC for high power microwave simulations [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(12): 1866-1870.
- [28] LI Yongdong, WANG Yue, LIU Chunliang, et al. Unipic: a conformal particle-in-cell code for high power microwave and pulse discharge [C]//*2020 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 414.
- [29] WANG Jianguo, ZHANG Dianhui, LIU Chunliang, et al. UNIPIC code for simulations of high power microwave devices [J]. *Physics of Plasmas*, 2009, 16(3): 033108.
- [30] KAUFMANN A, GUPTA M M. Introduction to fuzzy arithmetic, theory and applications [J]. *Mathematics of Computation*, 1986, 47(176): 762-763.
- [31] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence [M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992.
- [32] YE Hu, TENG Yan, CHEN Changhua, et al. A millimeter wave relativistic backward wave oscillator operating in  $TM_{03}$  mode with low guiding magnetic field [J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(6): 063104.
- [33] YALANDIN M I, RUKIN S N, SHPAK V G, et al. Highly effective, repetitive nanosecond-range Ka-band BWO [C]//*2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 402-404.

- design of structural parameters for shield cutterhead based on fuzzy mathematics and multi-objective genetic algorithm [J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(3): 937-945.
- [19] 马军, 尹春洋, 李医中, 等. 基于聚合代理模型的土压平衡盾构刀盘轻量化设计方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(1): 310-319.
- MA Jun, YIN Chunyang, LI Yizhong, et al. Lightweight design method of earth pressure balance shield cutter head based on ensemble surrogate model [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(1): 310-319.
- [20] FERRARI F, SIGMUND O. A new generation 99 line Matlab code for compliance topology optimization and its extension to 3D [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 62(4): 2211-2228.
- [21] 孙鹏飞, 张跃, 尹鹏, 等. 隐式曲面梯度多孔结构拓扑优化设计方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(1): 85-95.
- SUN Pengfei, ZHANG Yue, YIN Peng, et al. A topology optimization design method of graded cellular structures with implicit surfaces [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(1): 85-95.
- [22] SVANBERG K. The method of moving asymptotes: a new method for structural optimization [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1987, 24(2): 359-373.
- [23] 王雷, 闫素娜, 赵强强, 等. 基于单元过滤的自支撑结构拓扑优化方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(5): 45-55.
- WANG Lei, YAN Suna, ZHAO Qiangqiang, et al. A topology optimization method for self-supporting structures based on element filtering [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(5): 45-55.
- [24] 艺游. 现代盾构 3D 模型 [EB/OL]. [2022-12-01]. [https://www.3d66.com/relation/xl3gR0\\_2045108.html](https://www.3d66.com/relation/xl3gR0_2045108.html).
- [25] 李斌斌. 某型土压平衡式盾构机刀盘的力学分析与结构优化 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [26] LIU Feixiang, WANG Qingyang, JI Zhiyong, et al. Performance assessment and structural design of the atmospheric cutterhead of slurry shield machine [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(11): 5611-5624.
- [27] 高见. 盾构机刀盘开口率与盘体结构优化设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [28] 宋克志. 无水砂卵石地层盾构推力及刀盘转矩的计算 [J]. *建筑机械*, 2004(10): 58-60, 63.
- SONG Kezhi. Calculation on thrust and cutter disc torque of shield in sandy cobble with no water [J]. *Construction Machinery*, 2004(10): 58-60, 63.
- [29] LE C, NORATO J, BRUNS T, et al. Stress-based topology optimization for continua [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, 41(4): 605-620.
- [30] ZHAI Xiaoya, CHEN Falai, WU Jun. Alternating optimization of design and stress for stress-constrained topology optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 64(4): 2323-2342.
- [31] DENG Hao, VULIMIRI P S, TO A C. An efficient 146-line 3D sensitivity analysis code of stress-based topology optimization written in MATLAB [J]. *Optimization and Engineering*, 2022, 23(3): 1733-1757.

(编辑 李慧敏 刘杨)

(上接第 85 页)

- [34] ZHU Jun, SHU Ting, ZHANG Jun, et al. Experimental investigation of a Ka band high power millimeter wave generator operated at low guiding magnetic field [J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18(5): 053101.
- [35] SWEGLE J A, POUEY J W, LEIFESTE G T. Backward wave oscillators with rippled wall resonators: analytic theory and numerical simulation [J]. *The Physics of Fluids*, 1985, 28(9): 2882-2894.

(编辑 陶晴 刘杨)