

# 基于相对论返波管的全三维 PIC/PSO 数值优化研究\*

王辉辉<sup>†</sup> 蒙林 刘大刚 刘腊群 杨超

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2012 年 12 月 11 日收到; 2013 年 3 月 13 日收到修改稿)

本文研究了粒子群优化算法 (PSO), 在全三维粒子模拟 (PIC) 软件 CHIPIC 平台上, 设计了 PSO 优化模块, 成功研制了 PIC/PSO 代码. 接着, 研究了多频 (包括单频) 微波的输出功率特性, 并根据该特性设计了一类目标函数. 采用该类型优化目标函数, 分别对单频与双频相对论返波管 (RBWO) 进行了模拟优化. 模拟优化结果显示: 随着优化过程的进行, 单频 RBWO 的频率特性向单频靠近, 双频 RBWO 的频率特性则向等幅双频靠近, 它们的输出功率都逐渐增大. 这表明通过控制该类型目标函数参数, 该 PIC/PSO 代码可分别对单频与双频 RBWO 进行优化.

**关键词:** 粒子群优化算法, 粒子模拟, 相对论返波管, 双频

**PACS:** 84.40.Fe, 02.60.Pn, 52.65.Rr

**DOI:** 10.7498/aps.62.138401

## 1 引言

相对论返波管 (RBWO) 是最重要的功率微波源之一, 其在 X 波段表现优良, 得到了许多学者的关注<sup>[1-9]</sup>. 尽管 RBWO 的工作频率可通过理论进行较准确的估计<sup>[2]</sup>, 但却不易直接精准地对输出功率进行理论预测. 因而, 目前众多学者通常采用粒子模拟 (PIC) 的方法来进行 RBWO 的设计<sup>[2-9]</sup>. RBWO 中, 慢波结构 (SWS) 因其对管子性能的显著影响而成了关注的焦点. SWS 的参数与 RBWO 的性能之间呈现复杂的非线性关系, 采用梯度法、牛顿型法等确定类优化算法往往容易陷入局部优点, 而最直接可以取到全局最优参数的方法则是对所有的参数取值可能性都进行 PIC 模拟, 但这样需要的 PIC 模拟次数非常庞大, 而且每次 PIC 模拟往往都需要消耗大量时间 (一个或几个小时, 甚至几天), 因此整个过程需要花费的时间将变得不可接受. 因而采用具有全局搜索功能的且收敛速度较快的优化算法是非常有意义的. 全局优化算法中, 粒子群优化算法 (PSO) 是其中一种功能强大、收敛速度较快<sup>[10]</sup> 且易实现的算法, 由 Kennedy 与 Eberhart 于 1995 提出<sup>[11]</sup>, 并得到了快速发展<sup>[12-15]</sup>, 且被有

效应用在了许多领域<sup>[15-19]</sup>.

本文研究了 PSO 优化算法, 在 CHIPIC 粒子模拟软件平台<sup>[20]</sup> 上, 设计了 PSO 优化模块, 研制了全三维 PIC/PSO 代码. 接着, 研究了多频 (包括单频) 微波的功率特性, 在其基础上设计了一种优化目标函数, 并采用该类型目标函数分别对单频与双频 RBWO 进行了模拟优化.

## 2 PIC/PSO 优化算法

PSO 是模拟鸟群寻找食物行为而设计的一种全局优化算法. PSO 是一种群体优化过程, 每次迭代时, 群体中每个粒子的速度都被该粒子本身的历史最佳点及所有粒子的历史最佳点所调节. 其具体搜索方案如下<sup>[11-13]</sup>:

$m$  个待优化参量  $a_1, a_2, \dots, a_m$  用以  $a_1, a_2, \dots, a_m$  为坐标轴的  $m$  维空间来表示, 该  $m$  维空间中的粒子以其坐标值对应了一组优化参量值. 初始时刻, 在  $m$  维空间中随机选择  $n$  个粒子组成一个粒子群, 并对每个粒子都赋予初始速度, 以每个粒子所表示的参量值分别计算目标函数值, 然后更新每个粒子的历史最佳位置, 记为  $p_i$  ( $i$  表示是粒子群中的第  $i$  个粒子), 并更新整个粒子群搜索到的历史最佳位

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11175040, 60971034) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: whhnjznl@163.com

置, 记为  $p_g$ , 然后根据  $p_i$  和  $p_g$ , 以及每个粒子当前时刻的速度与位置, 按 (1) 式计算下一时刻的粒子速度及位置. 接着, 以更新后的粒子位置作为参量值来计算每个粒子的目标函数值, 更新  $p_i$  与  $p_g$ , 并再一次按 (1) 式计算下一时刻的粒子速度及位置. 如此重复操作, 使粒子群中的粒子逐渐向最优位置收敛.

$$\begin{aligned} v_i^{t+1} &= \omega v_i^t + c_1 \text{rand}[p_i^t - x_i^t] + c_2 \text{rand}[p_g^t - x_i^t], \\ x_i^{t+1} &= x_i^t + v_i^{t+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, 时刻  $t$  表示迭代次数,  $x_i^t$  是  $t$  时刻第  $i$  个粒子的位置,  $v_i^t$  是  $t$  时刻第  $i$  个粒子的速度,  $p_i^t$  是到  $t$  时刻为止第  $i$  个粒子的历史最佳位置,  $p_g^t$  是到  $t$  时刻为止所有粒子的历史最佳位置, rand 是 0—1 的均匀随机数.

在本文优化过程中,  $\omega = 0.729$ ,  $c_1 = c_2 = 1.49$ <sup>[12,13]</sup>, 并强迫  $x_i, v_i$  位于设置的有限区间内. 在对 RBWO 的优化过程中, 粒子位置  $x_i$  代表 RBWO 中待优化的结构参数, 具体的代码流程如图 1 所示. 首先随机选取由  $n$  个粒子组成第 1 代粒子群, 设置初始位置与初始速度, 对每一个粒子都进行 PIC 模拟, 然后根据 PIC 模拟结果, 确定  $p_i, p_g$  的值, 接着按 (1) 式计算出下一代粒子群的粒子信息, 如此循环, 直到到达优化目标.

### 3 功率优化的目标函数设计

对于多频微波, 需要同时对频率数、各频率分量的相对大小、及输出功率大小进行优化, 本质上是一种多目标优化问题. 本小节设计了合适的目标函数, 化多目标问题为单目标问题.

设输出微波由  $k$  个相近角频率  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$  的微波叠加而成, 横向电场分量分别为  $E_1 \cos(\omega_1 t), E_2 \cos(\omega_2 t), \dots, E_k \cos(\omega_k t)$ , 并假设  $E_1, E_2, \dots, E_k$  的方向在同一直线上. 在分析中, 采用纵向波印廷矢量  $S$  来阐述功率特性.

$$\begin{aligned} S &= |E_{\perp} \times H_{\perp}| = \frac{1}{\eta} \left[ \sum_{i=1}^k E_i \cos(\omega_i t) \right]^2 \\ &\leq S_{\max} \leq \frac{1}{\eta} \left( \sum_{i=1}^k E_i \right)^2, \quad (2) \\ S_{\text{av}} &= \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{\int_{-T}^T \frac{1}{\eta} \left[ \sum_{i=1}^k E_i \cos(\omega_i t) \right]^2 dt}{2T} \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^k \frac{E_i^2}{2}, \quad (3)$$

式中,  $E_{\perp}$  为总横向电场分量,  $H_{\perp}$  为总横向磁场分量,  $S_{\max}$  为  $S$  的最大值,  $S_{\text{av}}$  为  $S$  的平均值,  $\eta$  为波阻抗. 值得注意的是, 对于不同频率的 TE 模式或 TM 模式微波, 其波阻抗略有不同, 这考虑的是  $k$  个相近频率微波, 波阻抗近似认为是相同的, 统一用  $\eta$  表示.

$$K = \frac{S_{\max}}{S_{\text{av}}} \leq \frac{\frac{1}{\eta} \left( \sum_{i=1}^k E_i \right)^2}{\frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^k \frac{E_i^2}{2}} \leq 2k. \quad (4)$$

记  $S_{\max}$  与  $S_{\text{av}}$  的比值为  $K$ , 如 (4) 式所示, 对于  $k$  个频率的微波, 其  $K$  值的上限为  $2k$ , (4) 式右边的等号当且仅当  $E_1 = E_2 = \dots = E_k$  时成立. 虽然一般情况下, (2) 式中  $S_{\max}$  很难达到  $\frac{1}{\eta} \left( \sum_{i=1}^k E_i \right)^2$ , 因而  $K$  值通常到达不到上限  $2k$ , 但对于单频 ( $k = 1$  时) 微波, 其  $S_{\max}$  显然为  $\frac{1}{\eta} E_1^2$ , 因而  $K$  等于 2; 而对于双频 ( $k = 2$  时) 微波, 文献 [3] 的分析显示, 只要两个频率相近, 其  $S_{\max}$  可以近似取到  $\frac{1}{\eta} (E_1 + E_2)^2$ , 因而当  $E_1 = E_2$  时,  $K$  值近似为其上限 4.

由 (4) 式可以看出,  $K$  由某点各频率间分量的相对比例大小决定, 但其仅表示某个点处的频率特性, 而通常关注的是整个横截面上输出微波功率. 若各频率间分量的相对比例在整个横截面保持不变 (即  $S_{\max}/S_{\text{av}}$  在横截面上的值都是常数  $K$ ), 则有

$$\begin{aligned} \frac{P_{\max}}{P_{\text{av}}} &= \frac{\iint_{\text{横截面}} S_{\max}}{\iint_{\text{横截面}} S_{\text{av}}} = \frac{\iint_{\text{横截面}} K S_{\text{av}}}{\iint_{\text{横截面}} S_{\text{av}}} \\ &= K, \quad (5) \end{aligned}$$

式中,  $P_{\text{av}}$  为平均输出功率,  $P_{\max}$  为输出功率峰值. 本文采用的返波管可以近似认为是这种情况, 如节 5 中的双频 RBWO 的两段 SWS 几乎处于同一径向坐标上, 两段 SWS 产生的微波在横截面上具有类似的径向分布. 值得注意的是, 若两段 SWS 径向位置相处较远, 两个频率的微波在横截面上的分布可能相差较大, (5) 式将不再适用<sup>[21]</sup>.

在本文优化中, 目标是得到具有某种频率特性的高输出功率的微波. 目标函数值越高表示越接近所需目标. 文中采用平均输出功率作为目标函数的一个因子, 来保证平均输出功率高时其目标函数值

也高. 同时为了保证不输出其他频率特性 (采用  $K$  值来描述) 的高功率微波, 当偏离所需  $K$  值时, 其目标函数值应急剧下降. 基于以上考虑, 当  $k=1$  或  $2$  时, 单频或等幅双频微波的优化目标函数设计为

$$F = P_{av} \exp(-|K - 2k|)$$

$$= P_{av} \exp\left(-\left|\frac{P_{max}}{P_{av}} - 2k\right|\right), \quad (6)$$

式中,  $F$  为优化目标函数. (6) 式显然达到了上文所述要求: 当  $K$  值在  $2k$  附近 (表明频率特性达到所需目标) 时, 由  $P_{av}$  决定  $F$  的大小; 而当  $K$  偏离  $2k$  时,  $F$  的值将快速下降. 因而, 高  $F$  意味着较理想的  $k$  个频率高功率微波输出.

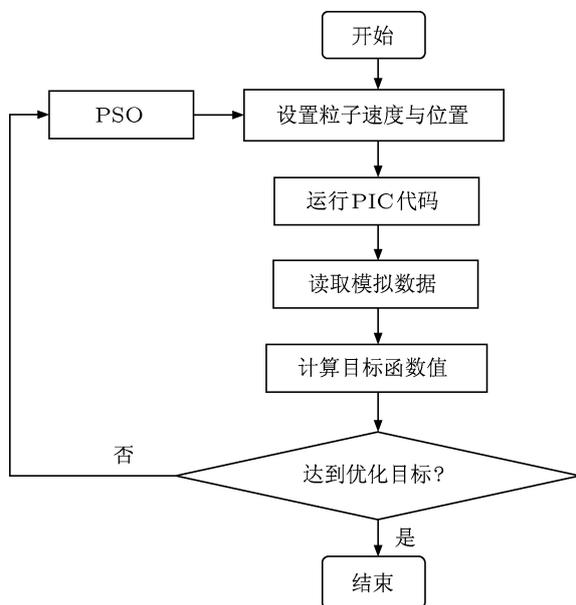


图1 PIC/PSO流程图

#### 4 单频 RBWO 的全三维 PIC/PSO 模拟优化

单频返波管采用单段 SWS 的模型, 如图 2 所示. SWS 为 9 个周期的正弦波波纹, 其最小半径为 13 mm. SWS 的波纹幅度  $amp$  与周期长度  $pl$  为优化变量, 即粒子群算法中的优化空间设为以变量  $amp$  为横坐标,  $pl$  为纵坐标的二维空间. 优化目标函数为 (6) 式中  $k=1$  时的情况. 优化过程中,  $1 \text{ mm} \leq amp \leq 5 \text{ mm}$ ,  $10 \text{ mm} \leq pl \leq 30 \text{ mm}$ , 输入端电压为 700 kV, 输入功率为 3.6 GW, 电子束内半径为 9.5 mm, 外半径为 10 mm, 电流 5.15 kA.

图 3 为目标函数值随  $t$  的变化图, 可看出, 随着迭代的进行, 目标函数值趋于变大. 图 4 为 PIC 数

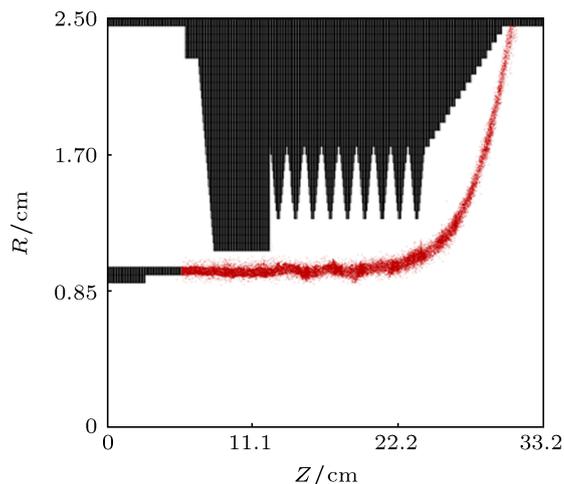


图2 单频 RBWO 的结构

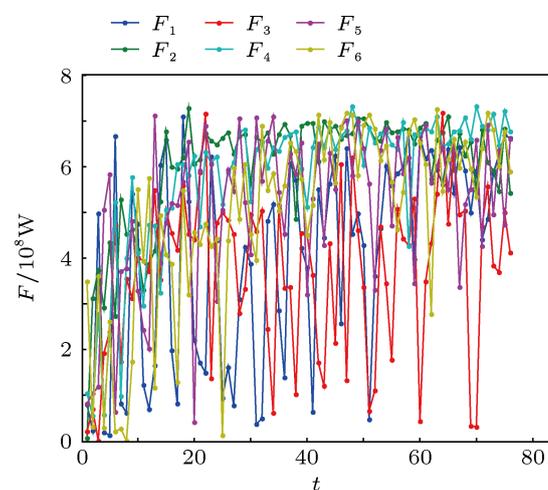


图3 目标函数值随  $t$  的变化

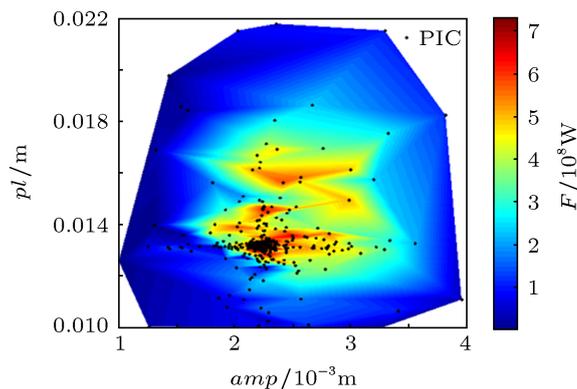


图4 优化过程中 PIC 数据的分段双线性插值图

据的分段双线性插值图, 其中 ‘.’ 为 PIC 数据, 各种颜色表示分段双线性插值的结果, 颜色越红表示目标函数值越大. 从图 4 可以发现, 该优化问题为多极值问题, 这表明了采用全局优化算法的必要性. 图 4 中许多黑点集中在最优点附近, 这是因为随着

优化迭代的进行, ( $amp, pl$ ) 振荡趋向于最优点 (图 5 和图 6). 图 7 与图 8 则分别为平均功率与  $K$  值的优化状况, 可以发现, 随着优化的进行, 平均功率越来越大,  $K$  值越来越接近于 2, 这表明目标函数 ((6) 式中  $k=1$ ) 可对平均功率与  $K$  值同时进行优化. 图 9 与图 10 为优化过程中最优粒子 (目标函数值最大的粒子, 即  $t=48, i=4$  时) 的表现, 证实了优化得到的确实为单频高功率微波.

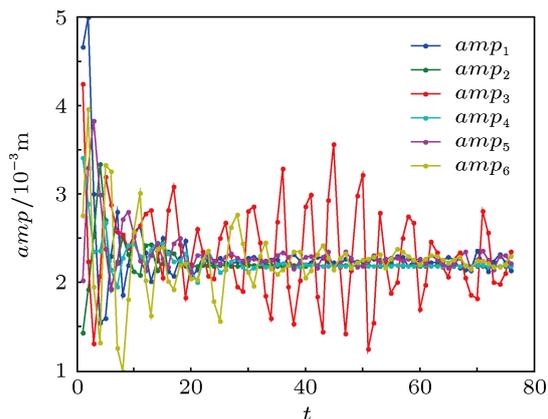


图 5 SWS 幅度随  $t$  的变化

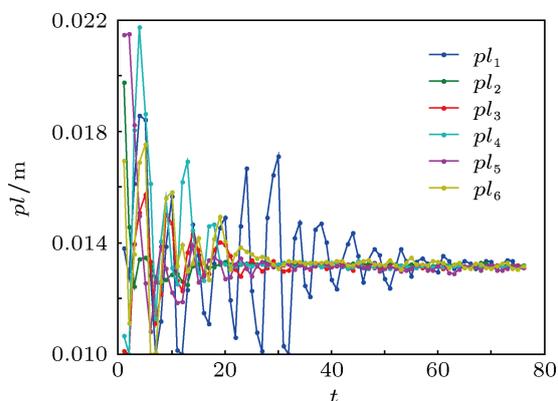


图 6 SWS 周期长度随  $t$  的变化

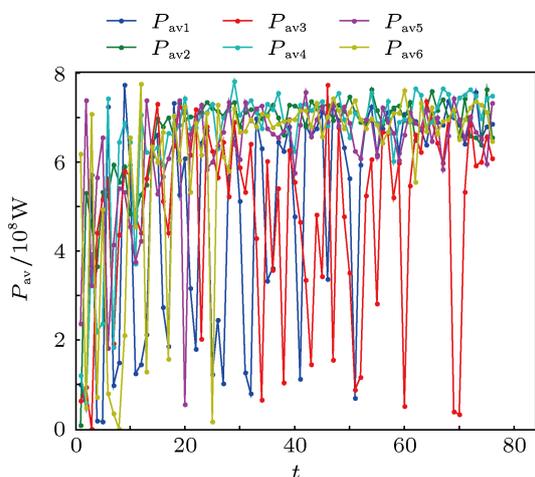


图 7 平均输出功率随  $t$  的变化

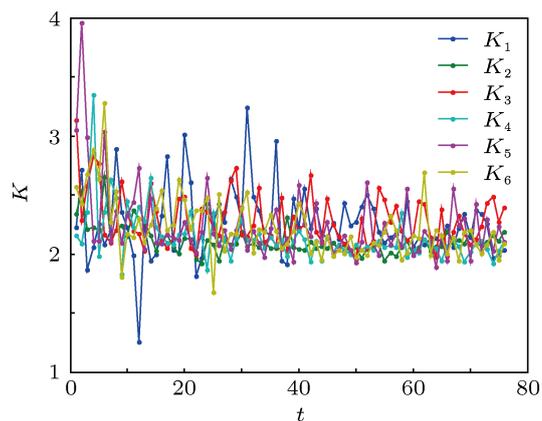


图 8  $K$  值随  $t$  的变化

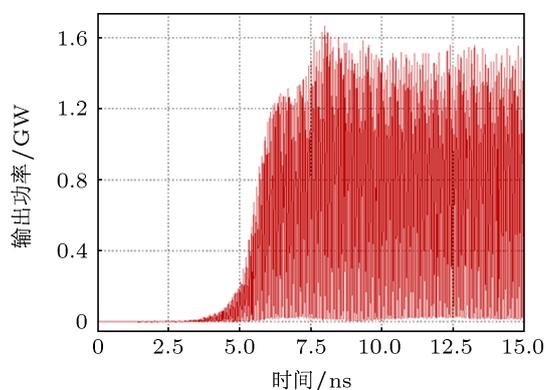


图 9 输出功率随时间变化图

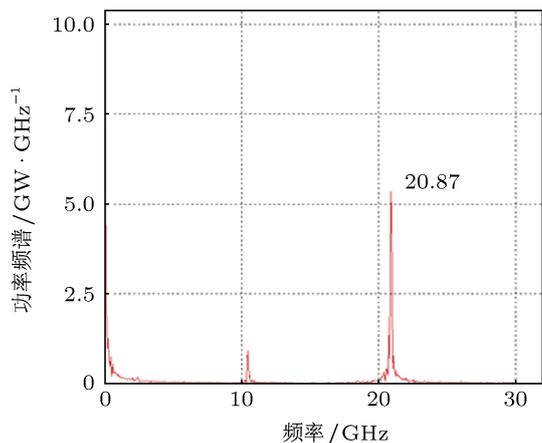


图 10 输出功率的频谱

### 5 双频 RBWO 的全三维 PIC/PSO 模拟优化

双频返波管采用类似文献 [3] 的模型, 采用两端波纹幅度相同的 SWS, 如图 11 所示. 第一段 SWS 由周期数为 6, 周期长度为 13 mm 的正弦波纹组成, 第二段 SWS 由周期数为 9, 周期长度为 14

mm 的正弦波纹组成, 波纹最小半径为 13 mm. 在优化过程中, 设 SWS 的波纹幅度  $amp$ , 两段 SWS 之间的间距  $d$ , 为优化变量, 即粒子群算法中的优化空间设为以变量  $amp$  为横坐标,  $d$  为纵坐标的二维空间.  $amp$  位于 0.5 mm 与 4 mm 之间,  $d$  位于 0 与 20 mm 之间, 输入端电压为 535 kV, 输入功率为 1 GW, 电子束内半径为 11 mm, 外半径为 12 mm, 电流 1.87 kA. 优化目标函数为 (6) 式中  $k = 2$  时的情况.

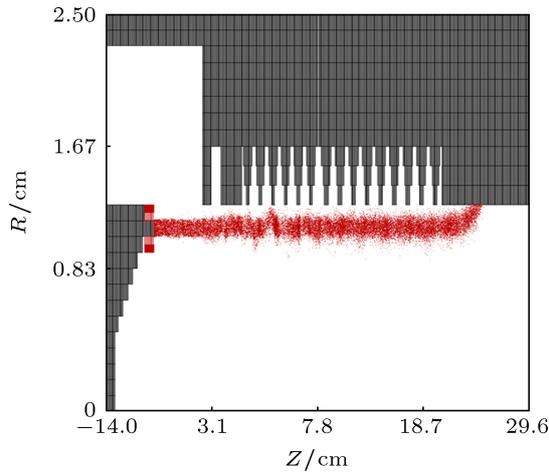


图 11 双频 RBWO 的结构

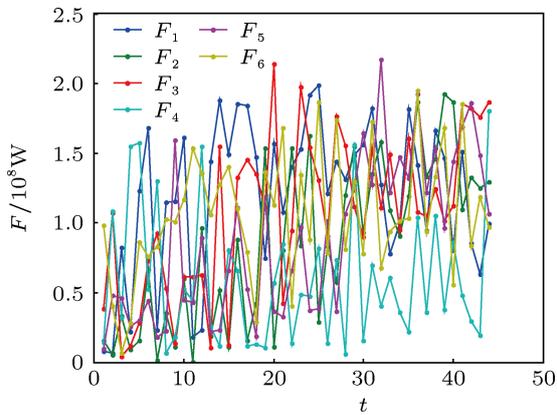


图 12 目标函数值随  $t$  的变化

图 12 与图 13 分别描述了目标函数值  $F$  及平均目标函数值  $F_{\text{mean}}$  (其值定义为  $(F_1 + F_2 + \dots + F_6)/6$ ) 与  $t$  的关系. 由图 12 可知, 随着优化的进行, 目标函数  $F$  总体上趋于变大, 图 13 则更清晰的呈现了这一规律. 图 14 与图 15 则阐述了随着优化的进行, 平均功率逐渐变大, 而  $K$  值逐渐向 4 靠近. 这再次表明了标函数  $F$  的设计成功实现了对平均功率及  $K$  值的同时优化. 图 16 与图 17 描述了结构参

数的  $amp$  与  $d$  的优化进程, 表明随着优化的进行, 其趋于收敛于某一优值. 优化过程中得到最优粒子 ( $t = 32, i = 4$  时) 的表现呈现在了图 18、图 19 与图 20 中, 其结果更进一步的表明了该优化成功实现了双频 RBWO 的设计.

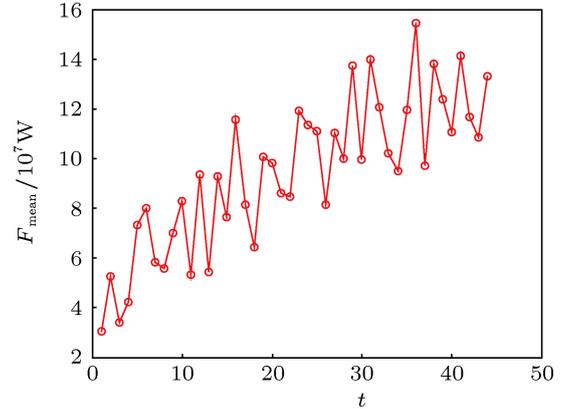


图 13 平均目标函数值随  $t$  的变化

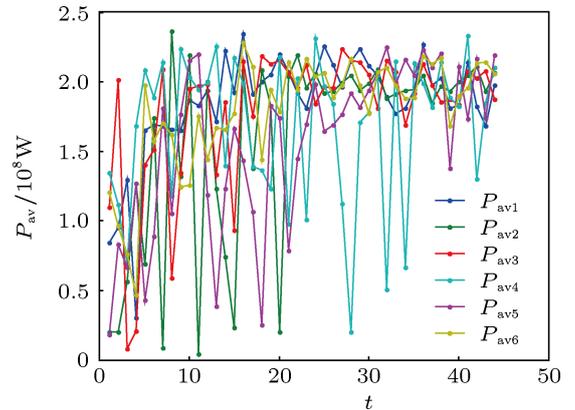


图 14 平均输出功率随  $t$  的变化

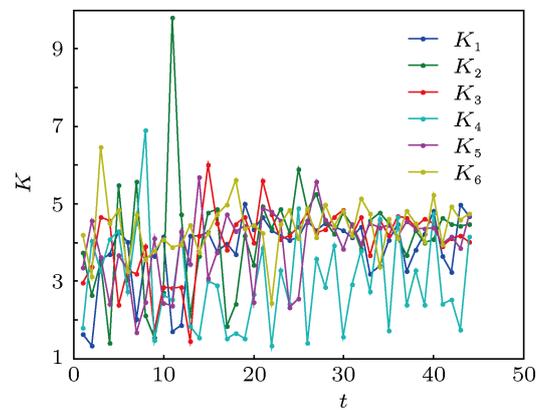


图 15  $K$  值随  $t$  的变化

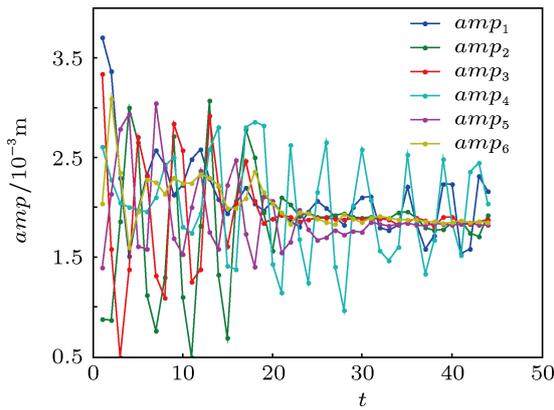


图 16 SWS 幅度随  $t$  的变化

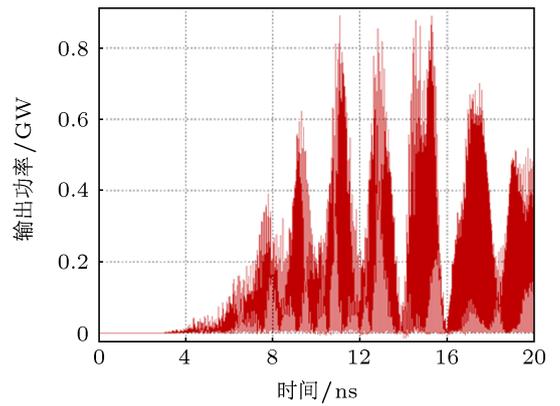


图 19 输出功率随时间变化图

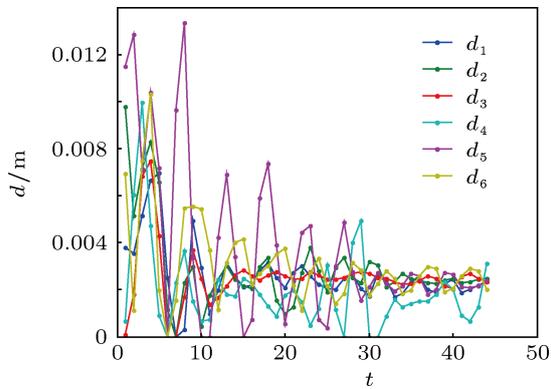


图 17 两段 SWS 的间距幅度随  $t$  的变化

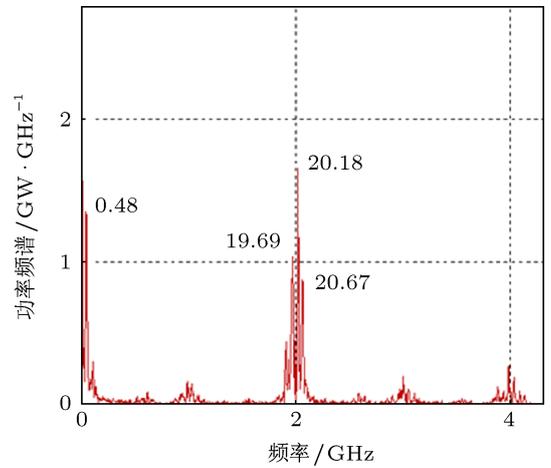


图 20 输出功率的频谱

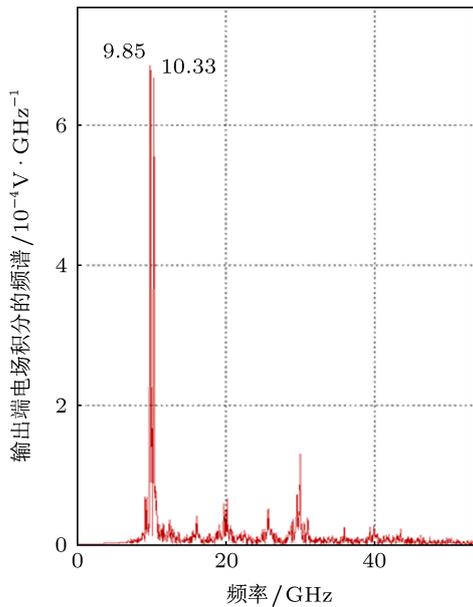


图 18 输出端电场积分的频谱

## 6 结论

本文深入研究了 PSO 优化算法与多频输出功率特性, 在 Chipic 平台下开发了全三维 PIC/PSO 软件, 使其具有对单频及多频返波管进行优化的能力. 分别以单段 SWS 与双段 SWS 的 RBWO, 验证了该软件对单频及双频 RBWO 的优化设计能力. 随着优化的进行, 对于单频 RBWO, 功率越来越大, 且  $K$  值越来越接近 2; 而对于双频 RBWO, 其功率越来越大, 且  $K$  值越来越接近 4. 因而本文设计的目标函数把双目标 (输出功率与  $K$  值) 问题转化为了单目标 ((6) 式) 问题, 具有同时对输出功率与  $K$  值进行优化的能力. 该软件的开发及目标函数的设计, 为单频及双频 RBWO 的优化设计提供了软件保证, 为 RBWO 的进一步发展提供了有力支持.

- [1] Benford J, Swegle J 1992 *High power microwave*. Boston: Artech House
- [2] Tang Y F, Meng L, Li H L, Zheng L, Yin Y, Wang B 2012 *Phys. Script* **85** 055801
- [3] Wang H H, Li H L, Meng L, Liu F 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 1000 (in Chinese) [王辉辉, 李海龙, 蒙林, 刘丰 2011 强激光与粒子束 **23** 1000]
- [4] Gao L, Qian B, Ge X 2011 *Phys. Plasma* **18** 103111
- [5] Denisov G G, Kuzikov S V, Savilov 2011 A V *Phys. Plasmas* **18** 103102
- [6] Wang H H, Liu D G, Meng L, Liu L Q, Yang C, Peng K, Xia M Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 015207 (in Chinese) [王辉辉, 刘大刚, 蒙林, 刘腊群, 杨超, 彭凯, 夏蒙重 2013 物理学报 **62** 015207]
- [7] Xu X, Wei Y, Shen F, Yin H, Xu J, Gong Y, Wang W 2012 *Phys. Plasma* **19** 013113
- [8] Tang Y F, Meng L, Li H L, Wang B, Yin Y, Zhang F N 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 2415 (in Chinese) [唐永福, 蒙林, 李海龙, 王彬, 殷勇, 张斐娜 2012 强激光与粒子束 **24** 2415]
- [9] Wang D, Qin F, Chen D, Wen J, Jin X 2011 *AIP Advance* **1** 042156
- [10] Shen Y, Guo B, Gu T 2005 *Journal of UEST of China* **34** 696 (in Chinese) [沈艳, 郭兵, 古天祥 2005 电子科技大学学报 **34** 696]
- [11] Kennedy J, Eberhart R C 1995 *In Proceedings of the IEEE Neural Networks Conference* (IEEE, Perth, 1995), pp 1942—1948
- [12] Clerc M, Kennedy J 2002 *IEEE transactions on evolutionary computation* **6** 58
- [13] Eberhart R C, Shi Y 2001 *In Proceedings of the IEEE Evolutionary Computation Conference* (IEEE, Seoul, 2001), pp 81—86
- [14] Ho S Y, Lin H S, Liauh W H, Ho S J 2008 *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics-part A: Systems and humans* **38** 288
- [15] Selleri S, Mussetta M, Prinoli P, Zich R R, Matekovits L 2008 *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **56** 67
- [16] Valle Y D, Venayagamoorthy G K, Mohagheghi S, Hernandez J C, Harley R G 2008 *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* **12** 171
- [17] Kwok N M, Ha Q P, Liu D, Fang G 2009 *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* **6** 145
- [18] Sanchez C C, Pantoja M F, Martin R G 2011 *IEEE Transactions on Magnetics* **47** 4761
- [19] Xin B, Chen J, Zhang J, Fang H, Peng Z H 2012 *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews* **42** 744
- [20] Zhou J, Liu D, Liao C, Li Z 2009 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** 2002
- [21] Liu F, Meng L, Zhang J, Li H, Song G 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 1030 (in Chinese) [刘丰, 蒙林, 张建国, 李海龙, 宋刚永 2012 强激光与粒子束 **23** 1030]

# Numerical optimization study of PIC/PSO for RBWO\*

Wang Hui-Hui<sup>†</sup> Meng Lin Liu Da-Gang Liu La-Qun Yang Chao

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 11 December 2012; revised manuscript received 13 March 2013)

## Abstract

In this paper, based on the three-dimensional particle-in-cell (PIC) platform CHIPIC, a module of particle swarm optimization (PSO) is designed, and the code of PIC/PSO is developed. Then, the properties of multi-frequency output power are studied. Based on these properties, a class of optimization object functions is designed. With this PIC/PSO code and this class of object functions, single-frequency and dual-frequency RBWOs are optimized respectively. The optimization results show that both the single-and dual-frequency RBWOs can be optimized successfully with the corresponding object functions.

**Keywords:** particle swarm optimization, particle-in-cell, relativistic backward wave oscillator, dual frequency

**PACS:** 84.40.Fe, 02.60.Pn, 52.65.Rr

**DOI:** 10.7498/aps.62.138401

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11175040, 60971034).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: whhnjznl@163.com