

# W 波段回旋行波管新型曲线阴极磁控 注入电子枪优化设计

董坤\*, 罗勇, 蒋伟, 唐勇, 鄢然, 王沙飞  
(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

**摘要:** 设计了采用新型曲线阴极结构的 W 波段双阳极磁控注入电子枪, 手动优化得到的电子注参数在速度比 1.1 时, 纵向速度零散为 1.84%。为了克服手动优化方法的繁琐和低效, 引入了数值计算方法的优化策略, 编制了基于 MATLAB 语言的遗传算法和模拟退火算法的优化程序, 并结合二维电子光学软件 EGUN 对该 W 波段曲线阴极结构电子枪进行优化, 优化得到的电子枪在保证电子注速度比 1.1 的情况下, 纵向速度零散分别达到了 0.81% 和 1.05%。与手动优化方法相比, 数值优化方法不需要设计者干预优化过程, 具有自动高效的特点, 且优化结果更好。

**关键词:** 回旋行波管; W 波段; 磁控注入电子枪; 曲线阴极; 遗传算法; 模拟退火算法

**中图分类号:** TN125 **文献标识码:** A

## Optimal design of a novel magnetron injection gun with curved emitter for a W-band gyrotron traveling wave tube

DONG Kun\*, LUO Yong, JIANG Wei, TANG Yong, YAN Ran, WANG Sha-Fei  
(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The design of a novel magnetron injection gun with curved emitter for a W-band gyrotron traveling wave tube has been presented. An axial velocity spread of 1.84% with beam velocity of 1.1 is obtained by manual optimization. To overcome the complexity and inefficiency of manual optimization, numerical optimizing methods are employed. Optimizing codes based on genetic algorithm (GA) and simulated annealing algorithm (SAA) are completed by using the MATLAB program language. 2-D electro-optic code EGUN is employed to calculate and optimize the electron trajectories and beam parameters. The achieved velocity spreads optimized by GA and SAA are 0.81% and 1.05%, respectively, when velocity ratio is kept at 1.1. Compared with manual optimization, the numerical optimizing methods do not need the designers to get involved in the optimizing process. Besides, the numerical optimizing methods feature automation and high-efficiency, and often, the optimizing results are better.

**Key words:** gyrotron traveling wave tube, W-band, magnetron injection gun, curved emitter, genetic algorithm, simulated annealing algorithm

**PACS:** 29. 25. Bx, 84. 40. Fe, 84. 47. +w

### 引言

回旋行波管 (Gyrotron Travelling Wave Tube, Gyro-TWT) 是一种基于电子回旋脉塞机理的高频率高功率的真空快波器件<sup>[1]</sup>, 在材料处理、等离子加热、雷达通信等领域有着广泛的应用<sup>[2]</sup>。作为回旋

器件的心脏, 磁控注入电子枪 (Magnetron Injection Gun, MIG) 产生小回旋电子注与微波场进行相互作用换能, 电子注质量的好坏直接影响整管的性能<sup>[3]</sup>。一般来说, 对回旋电子注的要求是具有一定的速度比和尽可能低的速度零散<sup>[4-5]</sup>。磁控注入电子枪的传统设计方法是首先根据设计要求, 利用 J. M.

收稿日期: 2015-06-18, 修回日期: 2015-12-22

Received date: 2015-06-18, revised date: 2015-12-22

作者简介 (Biography): 董坤 (1990-), 男, 安徽六安人, 博士, 主要研究领域为回旋管电子光学系统、高功率微波源。

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: dkun1990@126.com

Brird<sup>[6]</sup>, W. Lawson<sup>[7]</sup> 等人给出的综合设计方法, 计算出电子枪参数的可选范围, 再对参数进行不断的手动优化, 最后获得理想的电子注参数. 在这一设计及优化过程中, 所有的操作包括参数选择、结果判断等都需要设计者亲自参与, 这不仅大大提高了优化的难度, 而且效率低下, 耗时费力. 另外, 对于直线阴极结构的磁控注入电子枪, 因为阴极表面的电磁场难以达到理想分布, 若要获得低速度零散的电子注, 设计难度更大, 优化周期更长. 根据实际需要, 为了高效地设计一支适用于 W 波段回旋行波管的低速度零散双阳极磁控注入电子枪, 论文创新地提出了一种新型曲线阴极结构电子枪, 该阴极结构表面电磁场匹配度更高, 电子注速度比分布更加均匀. 另外, 引入了两种数值计算方法(遗传算法和模拟退火算法)对该曲线阴极结构电子枪进行优化, 并将结果与手动优化结果进行比较.

## 1 曲线阴极结构电子枪

根据设计要求, 该 W 波段双阳极磁控注入电子枪的设计参数见表 1. 在表 1 中, 磁压缩比定义为  $f_m = B_0/B_c$ , 其中  $B_c$  为阴极区的磁场. 关于电子枪参数的初始计算, 文献[6]已有详尽的推导和叙述, 这里不再赘述. 电子枪结构见图 1, 优化得到的直线阴极结构电子枪参数列于表 2. 需要注意的是, 在电子枪设计优化过程中, 为了防止打火, 阴极区的电场不能超过 100 kV/cm, 同时为了使阴极能够长寿命工作, 阴极发射电流密度不能超过 10 A/cm. 计算得到此电子枪的阴极区最大电场约为 54 kV/cm, 阴极发射电流密度约为 9.23 A/cm, 符合设计要求.

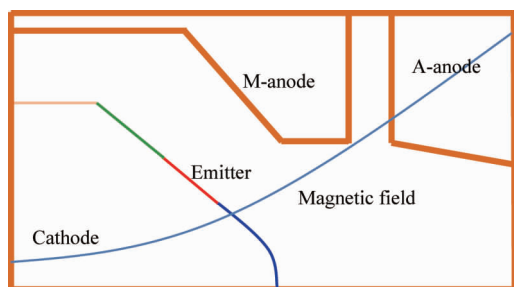


图 1 W 波段直线阴极结构双阳极磁控注入电子枪结构

Fig. 1 Schematic view of the W-band triode type MIG with flat emitter

可见, 优化得到的直线阴极结构电子枪纵向速度零散达到了 4.53%, 有必要进一步降低. 分析计算得到此电子枪发射带表面上的速度比分布见图 2,

表 1 W 波段双阳极电子枪设计目标

Table 1 Design goal for the W-band triode MIG

参数	值
工作电流 $I_0/A$	8
第一阳极电压 $V_m/kV$	30.45
第二阳极电压 $V_0/kV$	70
相互作用区磁场 $B_0/T$	3.43
此压缩比 $f_m$	10-15
引导中心半径 $r_{g0}/mm$	-0.85
速度比 $\alpha$	1.1
纵向速度零散 $\Delta\beta_z/\%$	<3

表 2 W 波段直线阴极结构电子枪参数

Table 2 Design parameters for the W-band triode MIG with flat emitter

参数	值
阳极倾角 $\phi_a/deg$	52.40
磁压缩比 $f_m$	12.90
发射带半径 $r/mm$	4.31
发射带宽度 $l/mm$	3.20
第一阳极电压 $V_m/kV$	41.80
第二阳极电压 $V_0/kV$	70.00
工作电流 $I_0/A$	8.00
引导中心半径 $r_{g0}/mm$	0.89
速度比 $\alpha$	1.10
纵向速度零散 $\Delta\beta_z/\%$	4.53

发射带两端的速度比偏大, 而中间的速度比偏低, 速度比最大相对零散达到了 42%. 从速度比的定义 ( $\alpha = v_t/v_z$ ,  $v_t$  和  $v_z$  分别是电子横向和纵向速度), 可得

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} - \frac{\Delta v_z}{v_z} = \frac{v_z \Delta v_z}{v_t^2}, \quad (1)$$

式(1)的右侧非负, 从而

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} > \frac{\Delta v_z}{v_z}. \quad (2)$$

于是, 可以通过降低速度比的零散来降低速度零散. 进一步假设阴极表面某位置电场和磁场的夹角为  $\theta$ , 则可计算得到此处的速度比大小为

$$\alpha = \left( \frac{(1 - \frac{1}{\gamma_0}) B_c^2 c^2}{f_m E_c^2 \sin^2 \theta} - 1 \right)^{-1/2}, \quad (3)$$

式中,  $\gamma_0$  为相对论因子,  $E_c$  为该位置的电场大小,  $c$  为光速, 可见, 通过改变  $\theta$  的大小, 可以对该位置处的速度比进行微调. 为了使速度比分布更加均匀, 将发射带的一半长度(即 1.6 mm)曲线化, 即采用曲线阴极结构发射带.

对曲线阴极结构电子枪参数进行手动优化, 最

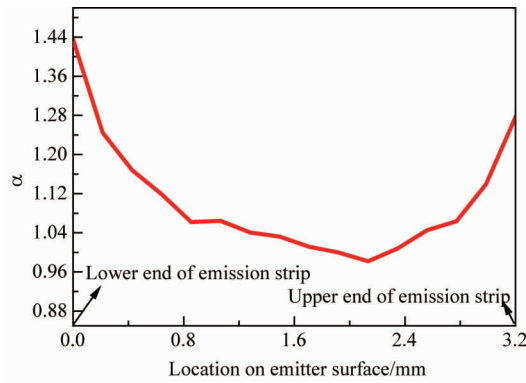


图2 直线阴极结构双阳极电子枪阴极表面速度比分布  
Fig. 2  $\alpha$  distribution along the emission surface of the MIG with flat emitter

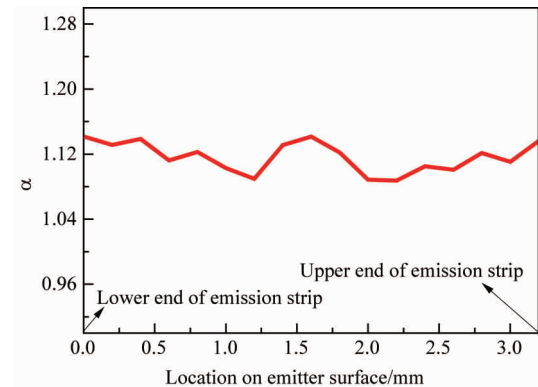


图3 曲线阴极结构双阳极电子枪阴极表面速度比分布  
Fig. 3  $\alpha$  distribution along the emission surface of the MIG with curved emitter

终得到的电子枪结构参数和电子注参数见表3. 缓冲段长度  $l_1$  是为了防止阴极打火设置的,  $R$  为曲线段圆弧的半径. 此时的纵向速度零散只有 1.84%, 可见, 采用曲线阴极结构可以显著提高电子注的性能. 此时得到的发射带上的速度比分布见图3, 可见速度比分布更加均匀, 速度比最大相对零散约为 4.82%. 图4 给出了 EGUN 的仿真结果, 可见, 电子注全部无截获的通过了电子枪通道, 电子注层流性很好. 至此, 已经完成了曲线阴极结构电子枪的手动优化.

表3 手动优化得到的电子枪和电子注参数

Table 3 Gun and beam parameters achieved by manual optimization

优化参数/电子注参数	手动优化结果
第一阳极电压 $V_m$ /kV	41.00
磁压缩比 $f_m$	13.03
曲线半径 $R$ /mm	20.00
缓冲段长度 $l_1$ /mm	0.50
速度比 $\alpha$	1.10
纵向速度零散 $\Delta\beta_z$ /%	1.84
引导中心半径 $r_{g0}$ /mm	0.83

## 2 数值优化方法

### 2.1 优化算法介绍

#### 2.1.1 遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)

遗传算法<sup>[8]</sup>是一种基于自然选择规律的优化算法. 可广泛应用在生物信息、计算科学、工程应用、化学化工、设计制造等领域. 算法具有适用面广, 效率高, 全自动化等优点. 遗传算法强调种群的概念. 每一代种群的个体数固定, 每一个个体的基因优良程度则由定义的适应度函数确定<sup>[9]</sup>, 而此函数往往

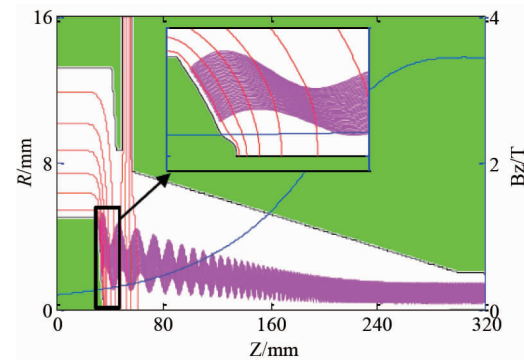


图4 EGUN 仿真结果  
Fig. 4 Simulated results by EGUN

是我们的目标函数. 目标函数可自由定义, 但应当尽量符合种族繁衍的规律, 以方便快速收敛. 在种群繁衍的过程中, 父辈的优良基因将被遗传下来, 而不良基因则会被淘汰, 取而代之的则是由优良基因经过交叉变异得到的基因, 这部分的基因好坏 (尤其是经过变异得到的基因) 无法判定, 但经过数次的换代之后, 种群的基因趋于稳定的良性状态.

在实现遗传算法的过程中, 子代的产生主要通过以下三条途径实现:

- 选择 (selection): 从当前种群中直接选择具有优良基因的个体作为父辈, 繁衍下一代并作为下一代的个体;
- 交叉 (crossover): 父辈之间交叉得到子代;
- 变异 (mutation): 单个父辈通过变异得到子代.

利用遗传算法寻找最优解的过程见图5.

#### 2.1.2 模拟退火算法 (Simulated Annealing Algorithm, SAA)

模拟退火算法是一种基于固体退火原理和蒙特

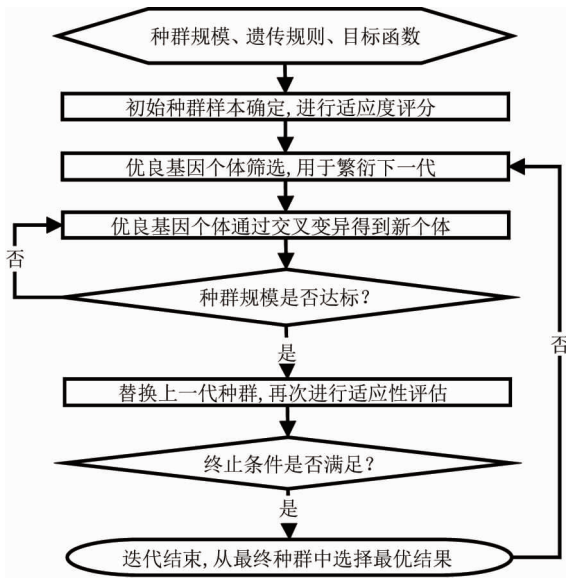


图5 遗传算法求解过程  
Fig. 5 Workflow chart of genetic algorithm

卡洛迭代求解策略的随机寻优算法<sup>[10]</sup>,其出发点是固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性,最早由 Kirkpatrick 等提出并应用于组合优化领域<sup>[11]</sup>. 模拟退火算法伴随温度参数的不断下降,结合概率突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解. 该算法在理论上具有全局优化性能,目前已经广泛应用在生产调度、控制工程、机器学习、神经网络、信号处理等领域<sup>[12]</sup>. 同为贪心搜索算法,但与爬山算法不同,模拟退火算法在寻优的过程中,会跳出局部最优解而达到全局最优解. 而爬山算法会在达到解域的第一个解时收敛,而此解极有可能只是一个局部最优解. 与遗传算法类似,模拟退火算法也是采用进化控制优化的过程,参数的进化由某一参数问题控制,然后通过一定的操作产生新解,再根据当前解的优劣确定是否接受当前的新解. 与遗传算法采用种群进行进化不同,模拟退火算法采用单个个体进行进化. 模拟退火算法在进行参数进化时,需要根据一定的规则进行参数更新,此规则往往是采用 Metropolis 接受准则<sup>[13]</sup>,以概率大小来接受新状态. 在具体问题上,则可概括为以下几点原则:

- 在固定温度下,系统接受使目标函数下降的解的概率要大于使目标函数上升的解的概率;
- 随温度的下降,系统接受使目标函数上升的解的概率要逐渐降低;
- 当温度趋于零时,系统接受使目标函数值增

加的解的概率趋于零,故只能接受使目标函数下降的解.

模拟退火算法的执行思路见图 6.

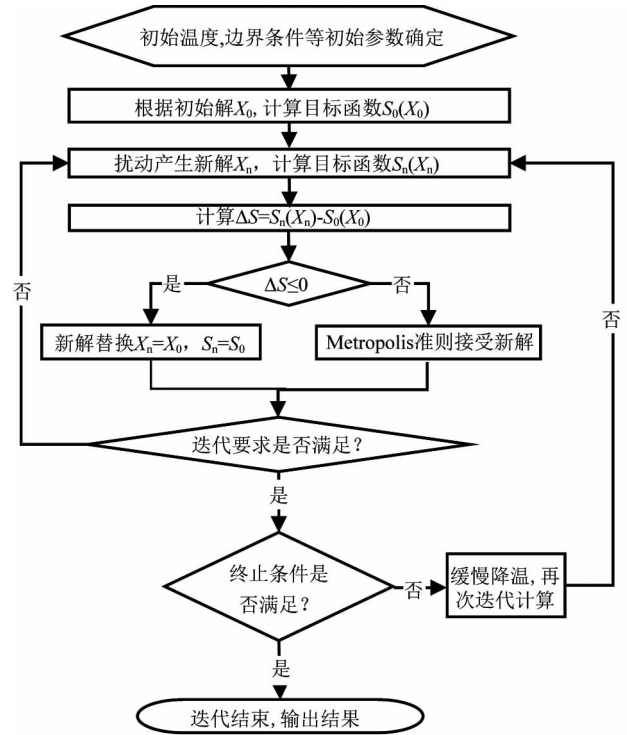


图6 模拟退火算法求解过程  
Fig. 6 Workflow chart of simulated annealing algorithm

## 2.2 优化过程及结果比较

在利用数值优化方法进行电子枪优化时,优化参数与手动优化的参数相同. 在利用多目标遗传算法优化电子枪参数时,设定优化的目标函数为

$$f_1(X) = A \left| \frac{\sum_{i=1}^N |v_{zi} - \sum_{i=1}^N v_{zi}/N|}{\sum_{i=1}^N v_{zi}} \right|, \quad (4)$$

$$f_2(X) = B \left| \frac{\sum_{i=1}^N |v_{zi}/v_{zi}|}{N} - \alpha_{\text{goal}} \right|. \quad (5)$$

式(4)是为了寻求使纵向速度零散最小的参数组,式(5)是为了寻求满足设定速度比的参数组.  $\alpha_{\text{goal}}$  为目标速度比,在此电子枪中其值为 1.10.  $N$  为粒子个数.  $A$  和  $B$  是权重因子,分布取值 100 和 1 000. 在多目标遗传算法中设置权重因子是为了在搜索最优解的过程中保持各个目标解的搜索平衡. 图 7 给出了种群不同个体(即电子枪的待优化参数组)之间的差异大小随种群繁衍代数(即优化迭代次数)的变化趋势,可见,随着子代个数的增加,种群个体之

间的差异已经越来越小. 在繁衍了 75 代之后, 这种差异已经达到最小并趋于稳定, 说明电子枪参数的最优解已经找到.

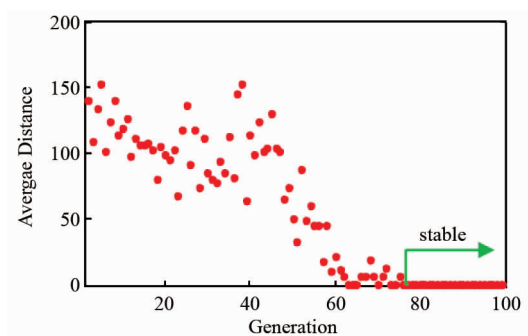


图 7 种群个体差异随繁衍子代的变化趋势  
Fig. 7 Dependence of average distance on generations

在利用模拟退火算法优化电子枪时, 开始时, 初始温度  $T$  是一个较大的值, 此时接受差解的概率大, 从而使得系统有较多的机会跳离局部最优, 逐渐减小  $T$  值, 系统接受差解的概率越来越小, 接受质量好的解的概率则越来越大. 设置  $T$  为  $100^{\circ}\text{C}$ , 目标函数设为

$$f(X) = A \left| \frac{\sum_{i=1}^N |v_{zi} - \sum_{i=1}^N v_{zi}/N|}{\sum_{i=1}^N v_{zi}} \right| + B \left| \frac{\sum_{i=1}^N |v_{zi}/v_{zi}|}{N} - \alpha_{\text{goal}} \right| \quad (6)$$

权重因子  $A$  和  $B$  同样设为 100 和 1 000. 图 8 给出了目标函数值随迭代次数的变化趋势, 可见, 在迭代了 4 392 次之后目标函数值趋于稳定, 则说明模拟退火算法求得的电子枪参数最优解也已找到. 至此, 已经利用三种优化方法完成了此 W 波段双阳极磁控注入电子枪的设计, 最终优化得到的电子枪电子注参数列于表 4.

表 4 三种优化方法得到的电子枪和电子注参数对比  
Table 4 Comparison of gun and beam parameters achieved by three optimizing methods

Parameters	Manual	GA	SAA
$V_m/\text{kV}$	41.00	41.16	41.00
$f_m$	13.03	12.80	13.00
$R/\text{mm}$	20.00	19.43	18.19
$l_1/\text{mm}$	0.50	2.94	0.59
$\alpha$	1.10	1.10	1.10
$\Delta\beta_z/\%$	1.84	0.81	1.05
$r_{e0}/\text{mm}$	0.83	0.87	0.85

从优化的结果来看, 在这三种优化方法中, 手动优化由于无法对参数空间进行全面搜索, 因而其优

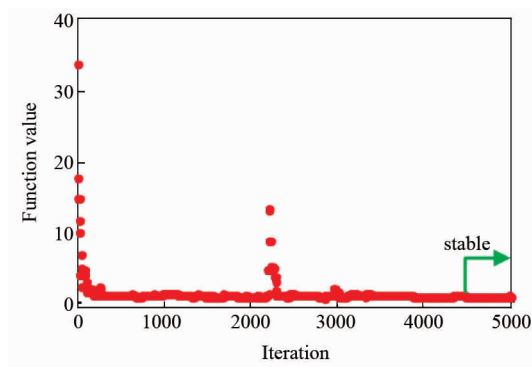


图 8 目标函数值随迭代次数的变化趋势  
Fig. 8 Dependence of function value on iterations

化结果最差, 遗传算法优化的结果最好, 模拟退火算法次之. 最终得到的电子注速度零散分别为 1.84%、0.81% 和 1.05%. 在优化的执行过程上, 手工优化最繁琐, 效率最低, 而数值优化方法只需设计者设置好初始参数和截止条件, 无需设计者参与优化过程, 因而其执行过程自动高效. 另外, 与模拟退火算法相比, 当截止条件相同时, 遗传算法耗时更多 (在此电子枪优化过程中, 遗传算法耗时约 18 h, 而模拟退火算法只需 6 h). 由此可见, 在一般的电子枪优化中, 模拟退火算法优化得到的电子注参数已经能够满足设计要求, 如对速度零散有进一步要求, 可用遗传算法进行深度优化.

### 3 结论

提出了曲线阴极结构磁控注入电子枪的设计思路, 设计了一支工作在 W 波段的曲线阴极结构磁控注入电子枪, 手动优化得到的电子注参数在速度比 1.1 h, 纵向速度零散为 1.84%. 为了更加高效的优化电子枪, 引入了数值计算方法对该电子枪进行优化, 遗传算法和模拟退火算法优化得到的电子枪在保证电子注速度比 1.1 的情况下, 纵向速度零散分别为 0.81% 和 1.05%. 与手动优化方法相比, 数值优化方法无需设计者参与优化过程, 优化全程自动高效, 结果更好. 本文的研究方法适用于其它频段回旋振器件磁控注入电子枪的设计优化, 同时也为其他电真空器件电子枪的优化设计提供了思路和方法.

### References

- [1] Calame J P, Garven M, Danly B G, et al. Gyrotron-traveling wave tube circuits based on lossy ceramics [J]. *IEEE T. ELECTRON DEV.*, 2002, 49(8): 1469–1477.

(下转第 495 页)