

双注电子枪中最小二乘法拟合磁场的研究

刘 冲^{1,2}, 赵 青², 张桂臣¹, 林叶春¹, 王海燕¹

胡以怀¹, 李精明¹, 李军军¹, 武起立¹, 陈 军¹

(1. 上海海事大学商船学院, 上海 201306; 2. 电子科技大学物理电子学院, 四川成都 611731)

摘 要: 用粒子仿真软件 EGUN 和 MAGIC 仿真电子枪时, 需设置一组线圈来拟合磁控注入电子枪的磁场. 为了提高设计效率, 采用最小二乘法计算线圈参数, 拟合电子枪磁场, 计算结果用于 34GHz 双注磁控注入电子枪的仿真中, 仿真结果表明: 最小二乘法能够直接计算出拟合磁场的线圈组合, 提高设计电子枪的效率; 仿真的双注磁控注入电子枪电子速度零散小, 纵横速度比适中, 满足回旋管对电子枪的要求.

关键词: 电子枪; 磁场; 最小二乘法; 拟合

中图分类号: TN12

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)07-1395-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.07.022

Study of Least Square Method Matching Magnetic Field of Double-Beam Magnetron Injection Gun

LIU Chong^{1,2}, ZHAO Qing², ZHANG Gui-chen¹, LIN Ye-chun¹, WANG Hai-yan¹

HU Yi-huai¹, LI Jing-ming¹, LI Jun-jun¹, WU Qi-li¹, CHEN Jun¹

(1. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: When simulating double-beam magnetron injection gun using EGUN and MAGIC, electromagnetic coils was used to match magnetic field of magnetron injection gun. Least square method was used to calculate parameters of electromagnetic coils, which was used to match magnetic field of magnetron injection gun. When simulating 34GHz double-beam magnetron injection gun, the parameters of electromagnetic coils were calculated by least square method. The result of simulation shows that least square method can calculate parameters of solenoid magnets and a 34GHz double-beam magnetron injection gun with a modest velocity ratio of the beam and a low velocity spread was designed.

Key words: magnetron injection gun; magnetic field; least square method; match

1 引言

回旋管在雷达、通讯、等离子体加热等领域有广泛的应用前景^[1,2], 也是军事装备中重要的核心器件^[3], 在国际上是一个研究热点, 也取得了相关的研究成果^[4~6]. 磁控注入电子枪产生相对论电子注, 是回旋管的重要组成部分^[7]. 电子枪磁场对电子注质量有重要的影响^[8], 磁场决定电子回旋频率、纵横速度比、速度零散等参数, 文献^[9,10]分析了不同的磁场对电子注质量的影响. 用粒子仿真软件 EGUN 和 MAGIC 仿真电子枪时, 需要用一组线圈磁场叠加产生电子枪的磁场, 文献^[11~13]中用多个线圈叠加, 产生电子枪的磁场.

要得到符合要求的电子枪磁场, 需要调整线圈的位置、半径、励磁电流, 在调整参数过程中, 很难发现规律, 现在的方法是多次设置线圈参数, 在多个仿真结果中, 选取最优的线圈组合, 调整参数这一过程比较麻烦. 为提高电子枪设计效率, 采用最小二乘法计算线圈参数, 计算的结果用于双注磁控注入电子枪中, 仿真得到一支 34GHz 双注磁控注入电子枪, 仿真的电子枪速度零散较小, 纵横速度比适中, 电子注性能满足回旋管的要求.

2 双注磁控注入电子枪磁场

双注磁控注入电子枪产生两束电子注^[14], 其结构如图 1 所示, 由 1 个阴极、3 个阳极和 1 个阴极上的电子

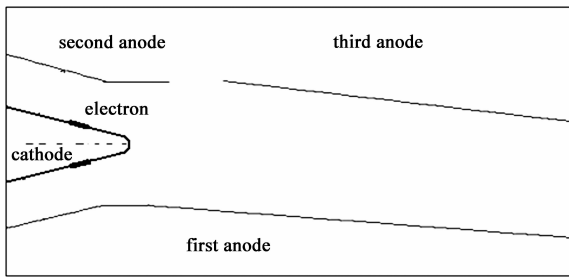


图1 双注磁控注入枪结构

发射带组成。

2.1 双注电子枪磁场

在磁控注入电子枪中,确定了回旋管的工作频率 f_0 ,根据式(1)计算电子枪出口的磁场强度^[15,16]。

$$\mathbf{B}_0 = \frac{f_0 \gamma}{28s} \quad (1)$$

式中: \mathbf{B}_0 为电子枪出口磁场强度; f_0 为回旋管的工作频率; s 为谐波次数; γ 为相对论因子。

用正弦磁场做为双注磁控注入电子枪的磁场,则双注磁控注入电子枪的磁场如图2所示。

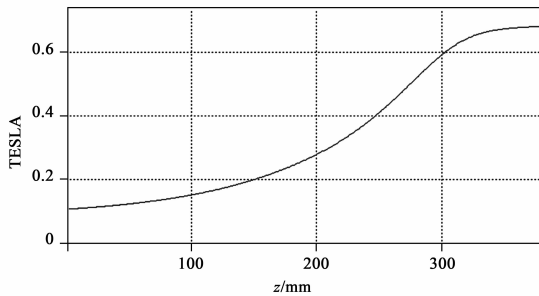


图2 双注磁控注入电子枪磁场

2.2 线圈磁场

在磁控注入电子枪中,采用 m 个通电线圈拟合电子枪磁场。在圆柱坐标系中, m 个通电线圈在 $(x, 0)$ 处的磁场强度为式(2)。

$$\mathbf{B}(x) = \sum_{i=1}^m \frac{\mu_0 r_i^2 I_i}{((x - z_i)^2 + r_i^2)^{3/2}} \quad (2)$$

式中: m 为线圈个数; z_i 为第 i 个线圈位置; r_i 为第 i 个线圈半径; I_i 为第 i 个线圈励磁电流; μ_0 为常数。

2.3 最小二乘法拟合磁场

最小二乘法拟合电子枪磁场时,采用最小二乘法计算出一组线圈,用此组线圈叠加产生电子枪的磁场。在图2双注磁控注入电子枪磁场上取 n_0 个点,坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{n_0}, y_{n_0})$,根据回旋管的尺寸,设定 m 个线圈的位置、半径,参数为 $(z_1, r_1), (z_2, r_2), (z_3, r_3), \dots, (z_m, r_m)$,求解励磁电流 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_m$,得到线圈的位置、半径、励磁电流三个参数。

最小二乘法拟合磁场目标是被拟合磁场与线圈磁

场之间误差的平方和最小,取 n_0 个磁场上的点计算误差,使 $\sum_{j=1}^{n_0} \delta_j^2$ 值最小。

$$\mathbf{F}(I_1, I_2, \dots, I_m) = \sum_{j=1}^{n_0} \delta_j^2 = \sum_{j=1}^{n_0} [y_j - \mathbf{B}(x_j)]^2 \quad (3)$$

$\sum_{j=1}^{n_0} \delta_j^2$ 取最小值时,需使 $\partial \mathbf{F} / \partial I_i = 0$,得到式(4)。

$$\begin{aligned} \partial \mathbf{F} / \partial I_i &= \left(\sum_{j=1}^{n_0} (y_j - \mathbf{B}(x_j))^2 \right)' \\ &= 2\mu_0 \sum_{j=1}^{n_0} \sum_{i=1}^m \frac{\mu_0 I_i r_i^2}{2(r_i^2 + (x_j - z_i)^2)^{3/2}} \\ &\quad \cdot \frac{r_i^2}{2(r_i^2 + (x_j - z_i)^2)^{3/2}} \\ &\quad - 2\mu_0 \sum_{j=1}^{n_0} y_j \frac{r_i^2}{2(r_i^2 + (x_j - z_i)^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad (4)$$

当 $\partial \mathbf{F} / \partial I_i = 0$ 时,得到式(5)。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{n_0} y_j \frac{r_i^2}{2(r_i^2 + (x_j - z_i)^2)^{3/2}} \\ = \sum_{j=1}^{n_0} \sum_{i=1}^m \frac{\mu_0 I_i r_i^2}{2(r_i^2 + (x_j - z_i)^2)^{3/2}} \frac{r_i^2}{2(r_i^2 + (x_j - z_i)^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad (5)$$

要使线圈产生的磁场与电子枪磁场拟合程度最大,需要使 $\sum_{j=1}^{n_0} \delta_j^2$ 取最小值,即当 $j = 1, 2, 3, \dots, m$ 时,式(5)成立。

3 求解方程组

选取9个线圈拟合电子枪的磁场,当 $i = 1, 2, 3, \dots, 9$ 时, $\partial \mathbf{F} / \partial x_j = 0$,得到式(6)~(8),此时, $\sum_{j=1}^{n_0} \delta_j^2$ 取最小值。

$$\begin{aligned} I_1 \sum_{j=1}^{n_0} \frac{r_1^2}{2(r_1^2 + (x_j - z_1)^2)^{3/2}} \frac{r_1^2}{2(r_1^2 + (x_j - z_1)^2)^{3/2}} \\ + I_2 \sum_{j=1}^{n_0} \frac{r_1^2}{2(r_2^2 + (x_j - z_2)^2)^{3/2}} \frac{r_1^2}{2(r_1^2 + (x_j - z_1)^2)^{3/2}} + \dots \\ + I_9 \sum_{j=1}^{n_0} \frac{r_1^2}{2(r_9^2 + (x_j - z_9)^2)^{3/2}} \frac{r_1^2}{2(r_1^2 + (x_j - z_1)^2)^{3/2}} \\ = \sum_{j=1}^{n_0} y_j \frac{r_1^2}{2\mu_0(r_1^2 + (x_j - z_1)^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_1 \sum_{j=1}^{n_0} \frac{r_1^2}{2(r_1^2 + (x_j - z_1)^2)^{3/2}} \frac{r_2^2}{2(r_2^2 + (x_j - z_2)^2)^{3/2}} \\ + I_2 \sum_{j=1}^{n_0} \frac{r_1^2}{2(r_2^2 + (x_j - z_2)^2)^{3/2}} \frac{r_2^2}{2(r_2^2 + (x_j - z_2)^2)^{3/2}} + \dots \\ + I_9 \sum_{j=1}^{n_0} \frac{r_1^2}{2(r_9^2 + (x_j - z_9)^2)^{3/2}} \frac{r_2^2}{2(r_2^2 + (x_j - z_2)^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

$$= \sum_{j=1}^{n_0} y_j \frac{r_2^2}{2\mu_0(r_2^2 + (x_j - z_2)^2)^{3/2}} \quad (7)$$

$$I_1 \sum_{j=1}^{n_0} \frac{r_1^2}{2(r_1^2 + (x_j - z_1)^2)^{3/2}} \frac{r_9^2}{2(r_9^2 + (x_j - z_9)^2)^{3/2}} + I_2 \sum_{j=1}^{n_0} \frac{r_1^2}{2(r_2^2 + (x_j - z_2)^2)^{3/2}} \frac{r_9^2}{2(r_9^2 + (x_j - z_9)^2)^{3/2}} + \dots + I_9 \sum_{j=1}^{n_0} \frac{r_1^2}{2(r_9^2 + (x_j - z_9)^2)^{3/2}} \frac{r_9^2}{2(r_9^2 + (x_j - z_9)^2)^{3/2}} = \sum_{j=1}^{n_0} y_i \frac{r_9^2}{2\mu_0(r_9^2 + (x_j - z_9)^2)^{3/2}} \quad (8)$$

这样,得到 9 个关于线圈励磁电流的方程,将表 1 中的线圈位置、半径与图 2 中电子枪磁场上的点作为已知条件,代入式(6)~(8)的方程组,求解线圈电流 I 。为了降低线圈的励磁电流,采用多层线圈替代单圈线圈。根据线圈磁场的计算式(2)可得,若采用的励磁线圈的圈数为 n_0 圈,则励磁电流降低为原电流的 $1/n_0$ 。表 1 中,第 4 列为多层线圈的励磁电流,第 5 列为线圈圈数。传统方法设计磁控注入电子枪,设定 9 个线圈的 27 个参数,在设计的过程中多次调整线圈参数,比较结果得到最优线圈组合,与传统方法相比,最小二乘法能够直接计算出参数组合,避免了调整参数这一繁琐过程,提高了设计电子枪的效率。

表 1 最小二乘法计算的线圈组合

线圈序号	线圈位置	线圈半径	线圈电流	线圈圈数
1	205 mm	165 mm	2388 A	10
2	303 mm	105 mm	1564 A	10
3	376 mm	135 mm	2145 A	20
4	435 mm	133 mm	1869 A	10
5	526 mm	183 mm	3751 A	30
6	616 mm	133 mm	1869 A	10
7	674 mm	135 mm	3157 A	15
8	747 mm	105 mm	2145 A	20
9	831 mm	165 mm	1564 A	10

4 双注电子枪仿真结果

将表 1 的线圈参数用于双注磁控注入电子枪中,用粒子仿真软件 MAGIC 仿真双注磁控注入电子枪,仿真

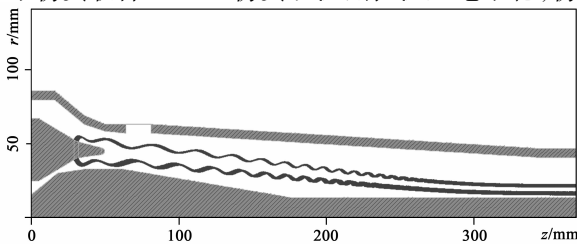


图3 双注磁控注入电子枪电子轨迹

结果如图 3 所示,清晰看到两条电子注轨迹.表 2 为双注磁控注入电子枪电子注参数,电子注电压 70kV,电子注电流 20A,速度比 1.5,横向速度零散 2.7%,纵向速度零散 5.2%,横纵速度比适中,满足回旋管对电子注的要求。

表 2 双注磁控注入电子枪仿真结果

电子枪电子注参数	内电子注	外电子注
相互作用区磁场	0.68 T	0.68 T
回旋管工作频率	34 GHz	34 GHz
注电压	70 kV	70 kV
注电流	10 A	10 A
相对论因子	1.117	1.115
速度比	1.5	1.5
拉莫半径	0.99 mm	0.984 mm
电子注厚度	2.2 mm	2.4 mm
横向速度零散	2.7%	2.7%
纵向速度零散	5.2%	5.2%

5 结论

本文研究电子枪磁场的拟合方法,采用最小二乘法计算线圈参数,来拟合电子枪的磁场,将此方法用于 34GHz 双注磁控注入电子枪中,设计结果表明:最小二乘法能够直接计算出线圈的参数,拟合电子枪磁场;设计的 34GHz 双注磁控注入电子枪性能满足回旋管的要求。

参考文献

[1] 喻胜,牛新建,李宏福,等.8mm 回旋速调管的模拟设计与实验[J].电子学报,2006,34(12):2541-2543.
 Yu Sheng, Niu Xin-jian, Li Hong-fu, et al. Simulation design and experiment of an 8mm gyrokystron amplifier [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2541 - 2543. (in Chinese)

[2] 牛新建,顾玲,于新华,等.回旋速调管 TE₀₁-HE₁₁ 模式变换器[J].电子学报,2011,39(8):1947-1949.
 Niu Xin-jian, Gu Ling, Yu Xin-hua, et al. High-power TE₀₁-HE₁₁ mode conversion for gyrokystron [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(8): 1947 - 1949. (in Chinese)

[3] 廖复疆.大功率微波真空电子学技术进展[J].电子学报,2006,34(3):513-516.
 Liao Fu-jiang. Technical advance of the vacuum microwave electronics [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 513 - 516. (in Chinese)

[4] 袁学松,鄒扬,刘盛纲.大半径同轴谐振腔太赫兹回旋管研究[J].电子学报,2009,37(2):334-337.
 Yuan Xue-song, Yan Yang, Liu Sheng-gang. Theoretical study on a large radius coaxial cavity terahertz gyrotron [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(2): 334 - 337. (in Chinese)

[5] 马春燕,袁学松,韩煜,等.0.6THz 三次谐波回旋管的研

- 究[J]. 电子学报, 2012, 40(3): 495 - 499.
- Ma Chun-yan, Yuan Xue-song, Han Li, et al. Study of 3rd-Harmonic 0.6THz gyrotron[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(3): 495 - 499. (in Chinese)
- [6] 殷勇, 祝大军, 刘盛纲, 等. 35GHz, TE021 回旋速调管的电磁模拟[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1024 - 1027.
- Yin Yong, Zhu Da-jun, Liu Sheng-gang, et al. Electromagnetic simulation of a 35GHz, TE021 gyrokystron[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1024 - 1027. (in Chinese)
- [7] 蒲友雷, 罗勇, 鄢然, 等. Ku 波段回旋行波管设计与分析[J]. 微波学报, 2012, 28(3): 29 - 32.
- Pu You-lei, Luo Yong, Yan Ran, et al. Design and analysis of ku-band gyro traveling wave tubes[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(3): 29 - 32. (in Chinese)
- [8] 傅文杰, 鄢扬, 袁学松, 等. 220 GHz 回旋管脉冲磁场系统和电子枪的设计与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(3): 395 - 398.
- Fu Wen-jie, Yan Yang, Yuan Xue-song, et al. Design and experimental study of pulsed magnet and electron gun of 220 GHz gyrotron[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(3): 395 - 398. (in Chinese)
- [9] 王丽, 李宏福, 牛新建, 等. 磁场分布曲线对高功率回旋管磁控注入枪影响的分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(12): 1233 - 1237.
- Wang Li, Li Hong-fu, Niu Xin-jian, et al. Analysis of the influence of the magnetic field profiles on the high power gyrotron's magnetic injection gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(12): 1233 - 1237. (in Chinese)
- [10] 王丽. 回旋管电子光学系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006. 23 - 25.
- Wang Li. Study on Electron Optics for Gyrotron[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. 23 - 25. (in Chinese)
- [11] 殷勇, 马强, 蒙林. 大回旋半径电子枪渐变线圈磁场的设计及优化[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 171 - 174.
- Yin Yong, Ma Qiang, Meng Lin. Design and optimization of smooth cusp magnetic field generated by three coils for axis-encircling large-orbit electron gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 171 - 174. (in Chinese)
- [12] Alberti S, Arnold A, Borie E, et al. Development of a 140-GHz 1-MW continuous wave gyrotron for the W7-X[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(3): 808 - 818.
- [13] Donaldson C R, He W, Cross A W, et al. A cusp electron gun for millimeter wave gyrodevices[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(14): 141501.
- [14] Zhao Qing, Dong Ai-xiang, Li Hong-fu. Numerical simulation study of double-beam magnetron-injection guns for high-power gyrotrons[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(2): 402 - 406.
- [15] 王文祥. 微波工程技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- Wang Wen-xiang. Microwave Engineering Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [16] 刘盛纲. 相对论电子学[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2000. 85 - 106.
- Liu Sheng-gang. Relativistic Electronics[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2000. 85 - 106. (in Chinese)

作者简介



刘冲男, 博士, 1980年1月出生, 山东威海人. 电子科技大学博士后, 上海海事大学讲师, 主要研究方向为双注磁控注入电子枪、电子枪磁场拟合方法、高功率微波.
E-mail: chongliu@shmtu.edu.cn



赵青男, 博士, 1964年12月出生, 四川成都人. 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为高功率微波、毫米波器件与技术、等离子体大功率射频加热技术研究等.
E-mail: zhaogq@uestc.edu.cn



张桂臣男, 博士, 1971年9月出生, 山东青岛人. 上海海事大学教授, 主要研究方向为高功率微波、船用电子电气设备等.
E-mail: zhanggc@shmtu.edu.cn