

回旋管双阳极磁控注入枪的边界元法计算*

李志良, 冯进军, 王峨锋, 刘本田, 钱丽军

(北京真空电子技术研究所 大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室, 北京 100016)

摘 要: 根据边界元法建立物理与数学模型, 编制了计算磁控注入枪的程序。使用该程序设计和模拟一个工作在 35 GHz, 70 kV, 10 A 基波回旋行波管放大器的双阳极磁控注入枪, 获得较好的模拟结果。并对电子注在不同工作电压和磁场下的质量进行了分析计算。计算表明, 边界元法在分析回旋器件电子光学方面是一种非常有效的方法。

关键词: 回旋行波管; 边界元法; 磁控注入枪; 数值计算

中图分类号: TN129 **文献标志码:** A

回旋管可在毫米波和亚毫米波波带产生高功率以及相干电磁波辐射, 所产生波具有波束窄、分辨率高、抗干扰能力强等优点, 所以回旋管在通信、雷达和电子对抗等方面都有着十分重要的应用前景^[1]。回旋管一般由磁控注入枪(MIG)、注波相互作用、输入输出耦合器和收集极等部分组成。虽然电子枪仅是一个组成部分, 但电子注的质量对注波相互作用的效率影响很大, 并随速度零散的增加其功率和带宽都有一个明显的下降, 从而直接影响到整管的性能, 因而对磁控注入枪的研究尤为重要^[2-6]。目前对磁控注入枪的数值分析, 常用的是有限差分法和有限元法, 用边界元法分析磁控注入枪却鲜见报导。边界元法的优点在于只需对电极边界进行数值分析, 再利用计算结果解析出场域内的电位, 不需对整个场域作全面的计算, 所以较适宜于电子光学的分析。故本文以边界元理论为基础对回旋管电子枪进行分析与模拟。

1 物理模型的建立

由于本文电子枪系统没有考虑空间电荷效应的影响, 为一拉普拉斯方程的边值问题, 其形式为

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = 0 \\ \phi|_A = 0 \\ \phi|_C = V \end{cases} \quad (1)$$

在这样一个由不规则形状电极构成的开放系统中, 求解该问题不太容易。利用等效原理, 在电极表面位置上布置一特定面电荷密度分布, 如图 1 所示, 使其满足电极之间区域的电位分布, 那么该物理模型的拉普拉斯方程的边值问题可转化为

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = -\sigma/\epsilon_0 \\ \phi|_A = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 表示电极上的等效面电荷密度分布。这样式(1)便转化为一个无界的泊松方程问题。

图 1 所示为一双阳极磁控注入枪的阴极与阳极结构示意图, 图 2 为电子枪电极边界离散图, 虚线表示电极分带离散后的密度分布情况, 其中 σ_1 和 σ_2 分别表示阴极和阳极的面电荷密度分布值。

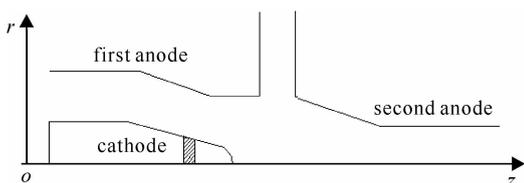


Fig. 1 Schematic diagram of double anode MIG
图 1 双阳极磁控注入枪示意图

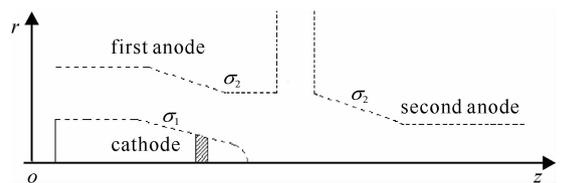


Fig. 2 Boundary partition of cathode and anode of double anode MIG
图 2 双阳极磁控注入枪的阴极与阳极边界离散图

* 收稿日期: 2008-10-20; 修订日期: 2008-11-20

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目(J0816092)

作者简介: 李志良(1979—), 男, 硕士, 工程师, 从事高功率微波毫米波回旋器件研究; lizhiliang100@163.com.

2 数学模型的建立

2.1 空间电位与电场的边界元计算方法

利用无界空间的格林函数,可以求出旋转对称场域内任一点电位为

$$\phi(r, z) = \int_0^{L_1} \frac{r_{i1} \sigma_{i1} F(k_1)}{\pi \epsilon_0 \sqrt{(r+r_{i1})^2 + (z-z_{i1})^2}} dz_{i1} + \int_0^{L_2} \frac{r_{i2} \sigma_{i2} F(k_2)}{\pi \epsilon_0 \sqrt{(r+r_{i2})^2 + (z-z_{i2})^2}} dz_{i2} \quad (3)$$

式中:区限上标 L_1, L_2 分别表示阴极和阳极的纵向长度; (r_i, z_i) 表示阴极或阳极表面上任一取点的坐标; $k = \frac{4rr_i}{(r+r_i)^2 + (z-z_i)^2}$; $F(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \beta}}$ 为第一类完全椭圆积分。通过此式所得的电势函数式可得到电场分量。式(3)表明空间任一点电位可由位置坐标及电极表面的电荷密度 σ 求得。

把阴极和阳极剖分为多个圆环带,设阴、阳极分带的总数为 N ,使用点选配法,选择合适的检验函数,并结合式(3),对于边界上的任一点 $j(i \neq j)$ 有

$$\phi_j = \sum_{i=1}^N \sigma_i P_{ij} \quad (4)$$

式中: $P_{ij} = 1/4\pi\epsilon_0 r_{ij}$, 对于边界上的每一个点都可以分别得到一个如式(4)的等式,当 $i=j$ 时,出现奇异积分,我们采用近似计算方法处理,可以求出 P_{ii} ,故可得代数方程组

$$|\phi| = |\sigma| |P| \quad (5)$$

求解上述代数方程组即可求得 σ 值。

2.2 磁场的计算方法

回旋管中要求轴上磁场分布是一个沿轴向缓慢递增变化的分布,本文采用理想线圈的组合来描述沿轴磁场

$$B = \frac{\mu_0 R^2 I}{[(z-z_0)^2 + R^2]^{3/2}} \quad (6)$$

式中: B 为磁场强度; I 为激励电流; R 为线圈的半径; z 为线圈中心至轴线上某点的距离。

旁轴磁场可利用谢尔茨级数展开计算场域空间中任一点磁场,本文采用下式近似求出

$$B_r(r, z) \approx -r[B'(z) - \frac{r^2}{8}B''(z) + \frac{r^4}{192}B^{(5)}(z)]/2 \quad (7)$$

$$B_z(r, z) \approx B(z) - r^2[B''(z) - \frac{r^2}{16}B^{(4)}(z) + \frac{r^4}{576}B^{(6)}(z)]/4 \quad (8)$$

2.3 电子轨迹的计算方法

电子光学中计算电子轨迹的方法有多种,例如欧拉法、龙格库塔法、泰勒法等。本程序中采用三阶泰勒展开来计算电子轨迹,其具体形式为

$$\begin{cases} r(t_i + \Delta t) = r(t_i) + \dot{r}(t_i)\Delta t + \ddot{r}(t_i) \frac{\Delta t^2}{2} + \dddot{r}(t_i) \frac{\Delta t^3}{6} \\ \theta(t_i + \Delta t) = \theta(t_i) + \dot{\theta}(t_i)\Delta t + \ddot{\theta}(t_i) \frac{\Delta t^2}{2} + \ddot{\theta}(t_i) \frac{\Delta t^3}{6} \\ z(t_i + \Delta t) = z(t_i) + \dot{z}(t_i)\Delta t + \ddot{z}(t_i) \frac{\Delta t^2}{2} + \ddot{z}(t_i) \frac{\Delta t^3}{6} \end{cases} \quad (9)$$

式中: Δt 为时间步长;“ \cdot ”代表各参量对时间的导数。由电磁场中电子的 Lorenz 方程可得二阶和三阶导数关系式,代入式(9),即可以求出电子的运动轨迹。

3 计算程序的结构特点及正确性验证

在数学模型的基础上,采用 Visual Fortran 结构化语言,完成了磁控注入枪边界元法计算程序的编制和调试。程序采用分带计算面电荷密度、对奇异积分的处理及选取时间步长等方法来计算电子轨迹,故难免存在一定的误差,通过能量守恒监视,使其符合精度要求。只需输入初始分带数及误差大小要求,计算时会通过电位监视迭代选择合适的分带数目,达到指定的精度要求。误差选择小于 0.5% 后,对电子轨迹的质量影响很小,本文误差选择为 0.3%。

4 整管对电子枪的参数要求及枪设计过程

回旋管为得到一定的输出功率和相互作用效率,电子注需具有一定的注电流、一定的引导中心位置、合适的速度比和尽可能小的速度零散。根据 35 GHz 基波回旋行波管整管需要,电子枪采用双阳极磁控注入枪。整管对电子枪性能提出了如表 1 中所示要求。

表 1 整管对电子注的参数要求
Table 1 Original electron beam parameters

beam voltage /kV	beam current /A	guiding center radius /mm	velocity ratio	velocity spread /%	cathode current density /(A · cm ⁻²)
70	10	2.60	1.0	≤5.0	<10

回旋管电子枪的设计,首先由整管性能确定注电压 V_0 ,注电流 I_0 ,速度比 α ,磁场强度 B_0 等电子注参量;其次根据文献[3]中给出的解析方程组,可以得到阴极平均半径 R_c ,阴极面倾角 Q_c ,阴阳极间距离 d_{ac} 等电子枪的初始结构参量;最后,再利用程序进行优化,确定电极的形状与电子注参量。

5 数值模拟结果及分析

5.1 电极形状和电子轨迹优化结果

根据上述基本原理设计出电极的初始形状,再利用编制的程序进行模拟计算。在没有考虑空间电荷效应的情况下,根据计算的结果不断地优化电极形状、电极电压和磁场分布等参量,最终得到符合整管参数要求,能够提供高质量电子注的双阳极电子枪。图 3 和图 4 分别是利用自编程序与 EGUN 软件模拟所得到的电极形状、电子注轨迹与轴上磁场分布结果,由图可见,两者有很好的一致性,优化后的电子注参数如表 2 所示。

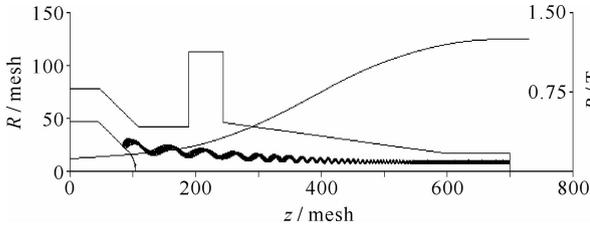


Fig. 3 Optimized electrode shape and electron trajectories

图 3 优化后电子枪的电极形状和电子注轨迹

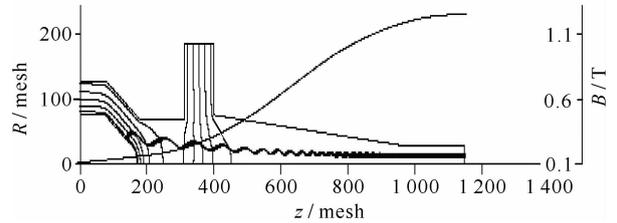


Fig. 4 Electrode shape and electron trajectories computed by EGUN

图 4 EGUN 计算电子枪所得电极形状和电子注轨迹

表 2 优化后的电子注参数

Table 2 Optimized electron beam parameters

beam voltage /kV	beam current /A	guiding center radius /mm	velocity ratio	magnetic field in the cathode region/T
70	10	2.597 2	1.016	0.121 3
transverse velocity spread/%	longitudinal velocity spread/%	cathode current density /(A · cm ⁻²)	relativistic factor	magnetic field in the interaction region/T
3.89	3.91	5.183 4	1.135	1.244 5

5.2 磁场对电子注的影响

文中多次改变磁场分布来进行计算,计算结果表明:在阴极区选择合适的磁场强度及在绝热压缩区选取最佳的磁场分布,电子注才有较佳的质量,即磁场分布曲线是影响电子注质量的重要因素之一。另外,程序编制中谢尔茨级数公式中导数采用差分法计算,图 5 和图 6 表示径向 r 取离轴一定距离,轴向 z 沿轴变化时的旁轴磁场计算对比情况。由图可见,并非取的阶数越高结果越准确,取得二阶或四阶导数时,误差较小,其精度要比取得六阶的精度高,其中二阶的要比四阶的相对误差小。

5.3 工作电压对电子注的影响

本文对第二阳极的工作电压在 67~73 kV 的变化范围进行了计算分析。保持第一阳极电压不变的情况下,通过变化第二阳极的电压值来改变阴极附近的电场,从而调整电子注的参数。图 7 表示引导中心半径和速度比随第二阳极电压改变时的变化关系,图 8 表示横向与纵向速度零散随第二阳极电压改变时的变化关系。从两图中可以看出:当第二阳极的工作电压由 67 kV 到 73 kV 变化时引导中心从 2.57 mm 到 2.63 mm,速度比从 0.975 到 1.064,速度零散在 3.5%~4.3% 的范围内。由此可见,所设计电子枪的适应范围比较宽,调节

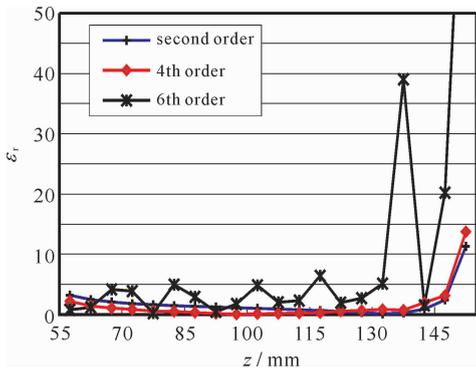


Fig. 5 Relative error of the radial magnetic field for different order differential

图 5 径向磁场取不同阶导数情况下的相对误差比较

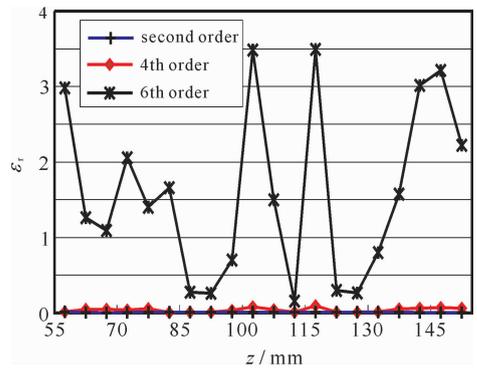


Fig. 6 Relative error of the axial magnetic field for different order differential

图 6 轴向磁场取不同阶导数情况下的相对误差比较

也较为灵活,有很大适用性。

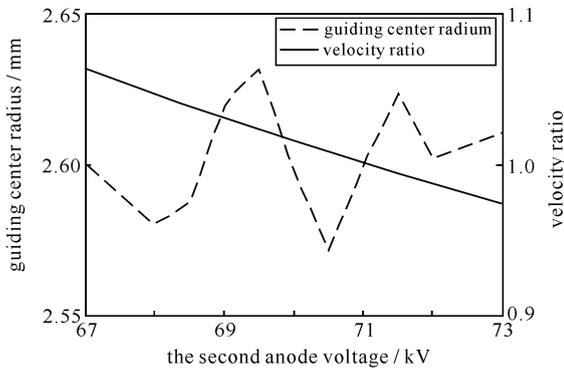


Fig. 7 Variation of guiding center radius and velocity ratio with different work voltage

图 7 引导中心半径和速度比与工作电压的关系

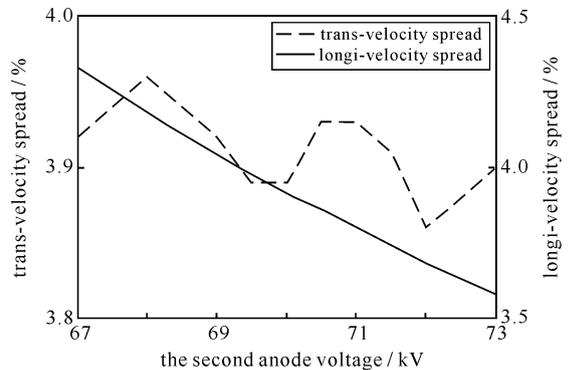


Fig. 8 Variation of transverse velocity spread and longitudinal velocity spread with different work voltage

图 8 横向速度零散和纵向速度零散与工作电压关系

5.4 影响电子注性能的其他因素

影响回旋电子注性能的因素还有很多,如改变阴极发射带的倾角、调整前后成形极的长度及前端圆弧的半径等。同时,两阳极间的分压比,对电子注性能也有较大影响,故需选取合适的分压比。综合以上各种因素,利用根据边界元理论编制的计算程序进行模拟,同时在模拟时不断地进行优化,最终获得较为满意的结果。

6 结论

本文以边界元法为基本原理,在理论分析基础上对 35 GHz 基波回旋行波管的双阳极磁控注入枪进行了设计和数值模拟,得到了较好的输出结果,基本满足了所给的参数要求。理论分析和实际计算结果表明:利用边界元方法分析磁控注入枪具有很好的优点,不用划分网格,减少了电位的计算工作量;在程序编制上也简便得多,并且对无界区域问题不需要某些附加条件。从而为分析回旋器件电子光学提供了一条快捷有效的途径。

参考文献:

- [1] Choi J J. Design of a temperature limited single-anode magnetron-injection-gun[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Wave*, 1999, **20**(2):239-252.
- [2] Nguyen K T, Danly B G, Baruch L, et al. Electron gun and collector design for 94 GHz gyro-amplifiers[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 1998, **26**(3):799-813.
- [3] Baird J M, Lawson W. Magnetron injection gun(MIG) design for gyrotron application[J]. *Int J Electronics*, 1986, **61**(6):953-967.
- [4] 王华军,李宏福,石红. 回旋管单阳极电子枪计算机辅助设计[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(11):1123-1126. (Wang Huajun, Li Hongfu, Shi Hong. Computer assistant design of a single anode electronic gun for gyrotron. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(11): 1123-1126)
- [5] 徐寿喜,张世昌,栗亦农,等. 8 mm 二次谐波回旋速调管放大器双阳极磁控注入枪的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(1):104-108. (Xu Shouxi, Zhang Shichang, Su Yinong, et al. Design of a double-anode magnetron injection gun for 8 mm second harmonic gyroklystron amplifier. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(1):104-108)

- [6] 邹峰, 薛谦忠, 刘濮鲲. 大回旋电子束双磁会切电子枪的设计[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(3):463-466. (Zou Feng, Xue Qianzhong, Liu Pukun. Design of large orbit gyrotron electron beam double-cusp gun. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(3):463-466)

Calculation of double anode magnetron injection gun for gyrotron using boundary element method

Li Zhiliang, Feng Jinjun, Wang Efeng, Liu Bentian, Qian Lijun

(National Laboratory of Vacuum Electronics, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100016, China)

Abstract: Physical and mathematical models of the magnetron injection gun(MIG) were constructed, and a code for MIG's calculation was developed. A double anode magnetron injection gun for gyro-TWT amplifier working at 35 GHz, 70 kV and 10 A was designed and simulated by the program, and optimized simulation results were obtained. The influence of the beam voltage and magnet field on electron beam performance was studied. The results show that the boundary element method is an effective approach for analysis of electron optics system in gyro-devices.

Key words: gyro-TWT; boundary element method; magnetron injection gun; numerical calculation

* * * * *

《强激光与粒子束》继续入选中国科学引文数据库核心来源期刊

经过新一轮的遴选,《强激光与粒子束》继续作为中国科学引文数据库(CSCD)的2009~2010年来源期刊。中国科学引文数据库创建于1989年,收录我国数学、物理、化学、天文学、地学、生物学、农林科学、医药卫生、工程技术、环境科学和管理科学等领域出版的中英文科技核心期刊和优秀期刊千余种,目前已积累从1989年到现在的论文记录300万条,引文记录近1800万条。中国科学引文数据库具有建库历史最为悠久、专业性强、数据准确规范、检索方式多样、完整、方便等特点,自提供使用以来,深受用户好评,被誉为“中国的SCI”。

中国科学引文数据库内容丰富、结构科学、数据准确。系统除具备一般的检索功能外,还提供新型的索引关系——引文索引,使用该功能,用户可迅速从数百万条引文中查询到某篇科技文献被引用的详细情况,还可以从一篇早期的重要文献或著者姓名入手,检索到一批近期发表的相关文献,对交叉学科和新学科的发展研究具有十分重要的参考价值。中国科学引文数据库还提供了数据链接机制,支持用户获取全文。中国科学引文数据库已在我国科研院所、高等学校的课题查新、基金资助、项目评估、成果申报、人才选拔以及文献计量与评价研究等多方面作为权威文献检索工具获得广泛应用。

中国科学引文数据库是我国第一个引文数据库。曾获中国科学院科技进步二等奖。1995年CSCD出版了我国的第一本印刷本《中国科学引文索引》,1998年出版了我国第一张中国科学引文数据库检索光盘,1999年出版了基于CSCD和SCI数据,利用文献计量学原理制作的《中国科学计量指标:论文与引文统计》,2003年CSCD上网服务,推出了网络版,2005年CSCD出版了《中国科学计量指标:期刊引证报告》。2007年中国科学引文数据库与美国Thomson-Reuters Scientific合作,中国科学引文数据库将以ISI Web of Knowledge为平台,实现与Web of Science的跨库检索,中国科学引文数据库是ISI Web of Knowledge平台上第一个非英文语种的数据库,为全世界更多的科研人员了解中国的科研发展动态,推动我国科研成果在全球的传播提供了重要的渠道,为我国期刊面向全球提供了展示平台。

中国科学引文数据库分为核心库和扩展库,数据库的来源期刊每两年进行评选一次。核心库的来源期刊经过严格的评选,是各学科领域中具有权威性和代表性的核心期刊。扩展库的来源期刊经过大范围的遴选,是我国各学科领域优秀的期刊。中国科学引文数据库(2009年~2010年)共遴选了1121种期刊,其中英文刊65种,中文刊1056种;核心库期刊744种,扩展库期刊377种。

(编辑部:汪道友)