

浸没流多透镜多注电子光学系统的模拟研究

张瑞^{①②} 王勇^① 谢敬新^①

^①(中国科学院电子学研究所 中国科学院高功率微波源与技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 该文采用先 2 维后 3 维的计算方法, 对 L 波段高功率多注速调管电子光学系统进行了模拟设计。采用均匀场浸没流多透镜聚焦系统对电子注进行聚焦, 获得了通过率 100%, 填充因子 55%, 特性良好的旁轴电子注。模拟计算表明, 多透镜系统可有效调整电子注平衡半径, 电子枪区均匀场可有效调整电子注波动性及层流性, 聚焦系统可在阴极磁感应强度为 0.001~0.01 T, 主磁场为 0.06~0.13 T 的范围内实现对旁轴电子注的良好聚焦。

关键词: 电子光学系统; 多注速调管; 电子枪; 电子注

中图分类号: TN122

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)07-1722-05

Simulation Study of the Confined-Flow Multi-lenses Multi-beam Electron-Optical System

Zhang Rui^{①②} Wang Yong^① Xie Jing-xin^①

^①(Key Laboratory of High Power Microwave Source and Technologies, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The electron-optical system of an L-band multi-beam klystron is designed. The 2-D simulation for the system is conducted first and the 3-D simulation is done in succession. Confined-flow uniform magnetic fields focusing system with multi-lenses is adopted and the paraxial beams with perfect characteristic are obtained. Simulation indicates that the beam occupancy rate is about 55%, the beam transmission rate is 100%, the multi-lenses system can modulate the beam equilibrium radius effectively and the uniform magnetic field in gun region can modulate the beam trajectories. The focusing system allows matching beams with the magnetic fields on the cathode range from 0.001 T to 0.01 T and the magnetic fields in main region range from 0.06 T to 0.13 T.

Key words: Electron-optical system; Multi-beam klystron; Electron gun; Electron beam

1 引言

高功率速调管在加速器、对撞机、超远程雷达、高功率微波武器方面有着重要的应用价值。传统单注速调管可以获得较高的输出功率, 但其过高的工作电压会带来高压击穿、辐射增强以及电源调制器复杂度提高等一系列问题, 其高工作电流会产生强空间电荷作用力, 使电子注聚焦困难, 增加噪声及阴极负载并降低效率。新型高功率多注速调管采用多个电子注并联工作, 可以在较低的电压水平下获得较高的电子注电流及导流系数, 显著降低管子的工作电压, 在采用同轴谐振腔或高次模圆柱谐振腔代替传统基模圆柱谐振腔后, 高功率多注速调管可以进一步增大阴极发射面积, 提高功率容量和使用寿命^[1-8]。

速调管电子光学系统主要包括发射电子注的电

子枪以及使电子注稳定传输的聚焦系统, 其性能优劣对速调管设计成功与否起着至关重要的作用, 这一点对于高功率多注速调管来说更为突出。高功率多注速调管多个电子注不在系统主轴上, 在采用同轴谐振腔或高次模谐振腔的情况下, 电子注距离主轴较远, 旁轴电子注聚焦比较困难, 需要进行 3 维计算, 增加了系统设计的复杂度^[9,10]。

本文首先用基于稳态模拟算法的 EGUN 软件为主要工具, 对 L 波段同轴腔多注速调管电子光学系统进行等效 2 维设计, 然后以基于 PIC 粒子模拟算法的软件对系统进行 3 维设计。采用了限制流多透镜均匀磁场聚焦系统实现多电子注聚焦, 模拟表明, 其多透镜系统可以有效调整电子注平衡半径, 其电子枪区由反线包产生的均匀场可以有效调节电子注层流性, 设计的电子光学系统电子注通过率 100%, 填充因子约 55%。聚焦系统可在阴极磁场为 0.001~0.01 T, 主磁场为 0.06~0.13 T 的范围内实现

表 1 L 波段 10 MW 多注速调管整管参数

工作频率	工作电压	总电流	峰值功率	平均功率	增益	效率	脉冲宽度	重复频率
1300 MHz	115 kV	132 A	10 MW	150 kW	>45 dB	>65%	1.5 ms	10 Hz

对旁轴电子注的良好聚焦。

2 多注电子枪的设计

L 波段 10 MW 多注速调管具有较高的工作比, 其脉冲宽度为 1.5 ms, 重复频率 10 Hz。管子不仅具有高的峰值功率, 其平均功率也很高(150 kW), 这就对电子光学系统性能提出了高要求: 为使管体不致过热受损, 电子注通过率要尽可能高; 为在长脉冲情况下获得较长的使用寿命, 阴极负载应尽可能低。

根据整管参数(见表 1)的要求, 确定采用 6 注电子枪方案, 单电子枪基本目标参数如表 2 所示, 阴极负载在 2.1 A/cm^2 左右, 单个电子枪导流系数约为 $0.56 \mu\text{P}$, 电子枪总流为 132 A。多注电子枪拓扑结构如图 1 所示, 共 6 个阴极, 各阴极具有独立的热子组件, 阴极主轴距系统主轴 60.0 mm, 阴极间夹角为 60° , 对称地分布在一个圆周上。

根据皮尔斯设计方法^[1], 初步确定电子枪阴极半径为 19.0 mm, 采用平板阳极, 阳极孔半径为 15.0 mm, 阴阳极间距为 40.0 mm, 聚焦极头倒角半径为 6.5 mm, 聚焦极为一个整体结构, 以最大限度使结构紧凑, 相邻聚焦孔之间的距离约 2.0 mm。

多注电子枪 3 维结构如图 2 所示。

多注电子枪可以认为是由多个完全相同的单电子枪构成的, 因此首先进行 2 维单电子枪无磁场时的静电设计和模拟, 以确定电子枪静电参数。将上

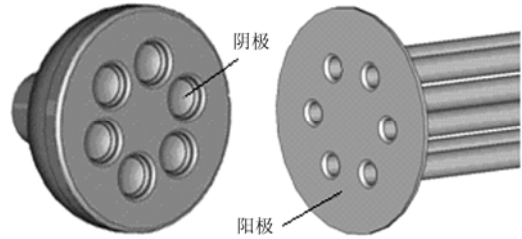


图 2 多注电子枪 3 维结构示意图

节初定的电子枪参数代入 2 维电子光学系统稳态模拟软件 EGUN 进行模拟计算。初步模拟结果表明导流系数偏高, 电子注层流性较差, 因此相应地加大了阴阳极间距离并改变聚焦极与阴极间距, 通过大量计算和调整, 获得了一组合乎要求的电子枪结构, 其具体参数如表 3 所示。

电子枪导流系数收敛在 $0.565 \mu\text{P}$, 电子注注腰半径 5.0 mm, 射程约为 40.0 mm。由电子注静电轨迹(图 3)可见电子注层流性较好。阴极最大电流发射密度为 2.1 A/cm^2 , 中心电流发射密度为 1.6 A/cm^2 (见图 4), 阴极电流发射均匀, 最大发射与最小发射之比小于 1.4。电子枪内场强小于 5 kV/mm , 处于较安全的范围内。电子枪各项基本参数达到了设计目标。图 5 为采用 3 维 PIC 模拟软件计算的多电子注静电轨迹(截取至电子注腰处)。

3 聚焦系统

单注速调管电子光学系统一般通过磁屏开孔大小以及枪区反线包调控阴-阳极区磁场, 使电子注得到良好聚焦。多注速调管由于电子枪紧密排列, 因此过渡区磁屏板开孔半径大小也受到限制, 不能在大范围内调节透入电子枪区的磁场, 另一方面, 即使能够将磁屏板孔开大, 由于其不在系统轴上, 也会造成非对称横向磁场的增加。因此很多传统的基模圆柱腔多注速调管电子光学系统采用屏蔽流聚焦方式, 屏蔽板开孔较小, 最大限度地屏蔽透入电子枪区的磁场。但是实际制管表明, 在屏蔽流聚焦方式下, 由于电子枪区聚焦磁场极弱, 因而电子注刚度较差, 其直流通率尚可, 在加激励之后, 由于高频扰动, 电子注散焦加重, 通过率会有明显下降。此外, 传统基模多注速调管电子注大多在通过一个磁屏板后直接进入主磁场区, 缺乏对电子注入射条件的有效调节手段, 电子光学系统的适应性较

表 2 电子枪目标性能参数

电压	单注电流	单电子注导流系数	阴极负载	阴极发射比	阴极个数
115 kV	22 A	$0.56 \mu\text{P}$	$<2.1 \text{ A/cm}^2$	<1.4	6

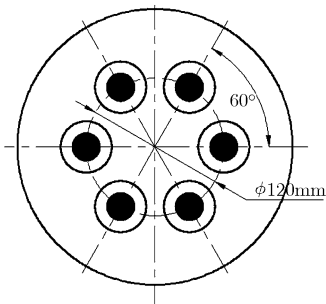


图 1 多注电子枪拓扑结构图

表 3 电子枪结构及计算结果

阴极半径	导流系数	阴阳极间距	聚焦极半径	电压	电流	射程	注腰半径	阴极最大电流密度
19 mm	0.56 μ P	48 mm	6.5 mm	115 kV	22 A	40 mm	5 mm	2.1 A/cm ²

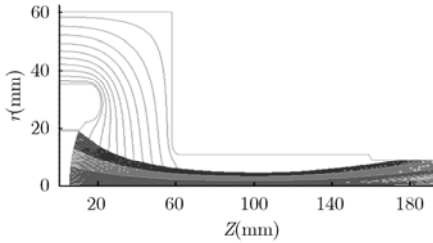


图 3 电子注静电轨迹

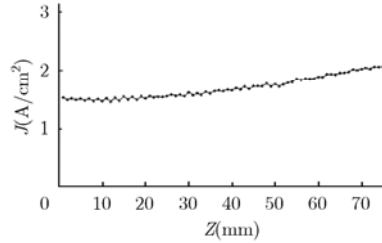


图 4 阴极发射电流密度分布



图 5 3 维电子注静电轨迹

差^[9-11]。

针对上述问题，我们采用了浸没流多透镜均匀磁场聚焦系统：电子枪外设置带有屏蔽板的反线包组件，通过合理设置屏蔽板结构，可以在整个电子枪区域产生轴向均匀磁场，一方面可以增加电子注刚度，另一方面最大程度地避免了非对称横向场；在过渡区设置多个屏蔽板，屏蔽板间为聚焦线圈，改变线圈电流可对电子注进入主磁场区的入射状态进行控制，从而调整电子注在主磁场区的传输特性。聚焦系统 2 维、3 维结构如图 6、图 7 所示。



图 6 聚焦系统 2 维截面图

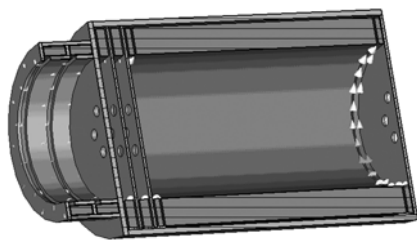


图 7 聚焦系统 3 维剖视图

4 电子注传输特性的 2 维近似模拟

多注速调管为非轴对称结构，理应以 3 维软件进行模拟计算，但 3 维软件对计算机硬件要求较高，计算速度慢，在初始的优化设计中，需要进行大量的计算和优化调整，仅仅使用 3 维计算软件难以胜任设计任务。我们采用先 2 维后 3 维的设计方法，首先假设单个电子注处于系统主轴上，则可以采用 3 维软件对电子注聚焦特性进行模拟计算。2 维模拟

的意义在于：一方面，如果电子注在主轴上获得了良好聚焦，则在离主轴不远的位置其传输特性应无显著变化，只需对聚焦系统作微调即可；另一方面，可获得电子注良好聚焦时轴上的磁场分布 B_z ，以此作为 3 维磁场设计时的参考依据。

对聚焦磁场大小进行初步估算，电子注布里渊聚焦磁场值 $B_b = \sqrt{2I / \pi \epsilon_0 \eta}^{3/2} U_0^{1/2} r_0^2$ ，若 r_0 以毫米为单位，则 $B_b = 8.3 * 10^{-4} * (\sqrt{P_{er} U_0} / r_0)$ (T)，其中 U_0 为电子注电压， P_{er} 为导流系数， r_0 为电子注平衡半径，也称布里渊半径。将各项参数代入式中，其中电子注平衡半径取值比注腰半径稍大，计算得到布里渊磁场值 B_b 约为 0.042 T，工作磁场 $B_0 = 2.5 * B_b = 0.105$ T。

根据电子光学系统设计理论^[8]，初步确定了线圈安匝数，分别利用 EGUN 和 SUPERFISH 对聚焦系统磁场进行了计算，经过调整，得到了与设计参数符合的聚焦系统。图 8、图 9 分别为二者计算的轴上磁场分布，计算结果基本一致。磁场在电子注阴阳极之间有很好的均匀度。

在上述聚焦系统作用下，利用 EGUN 对电子注聚焦轨迹进行了计算，获得的初始电子注聚焦轨迹如图 10 所示，电子注层流性较差且波动偏大，为此对聚焦系统进行了优化。优化及计算过程表明，这种电子光学系统具有良好的适应性，通过改变过渡区线圈电流控制电子注入射条件，可以有效地优化电子注平衡半径，电子枪区反线包可以有效调节电子注层流性。计算表明阴极磁场在 0.001~0.01 T，主磁场在 0.06~0.13 T 内均可获得聚焦特性较好的电子注，限于篇幅这里不一一给出轨迹图。

图 11 为优化后阴极磁场 0.005 T，主磁场 0.1 T 时电子注聚焦轨迹，电子注在主磁场区具有良好的层流性且波动较小，注平衡半径约 5.0 mm，填充因

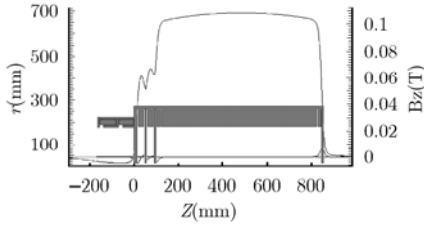


图 8 沿轴线磁场分布(EGUN)

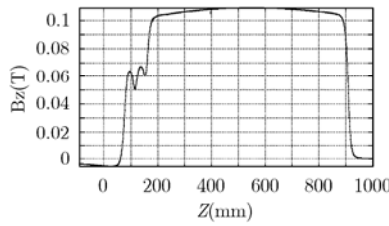


图 9 轴上磁场分布(SUPERFISH)

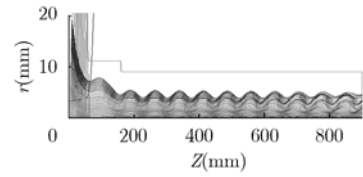


图 10 初始电子注聚焦轨迹

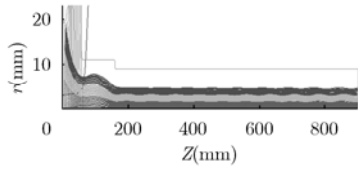


图 11 优化后电子注聚焦轨迹

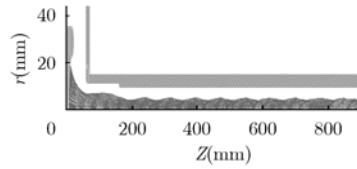


图 12 优化后电子注聚焦轨迹(PIC)

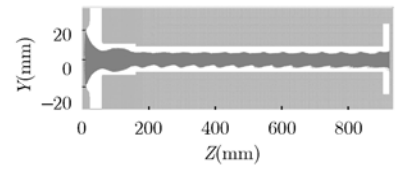


图 13 初始旁轴电子注 3 维轨迹 YOZ 截面图

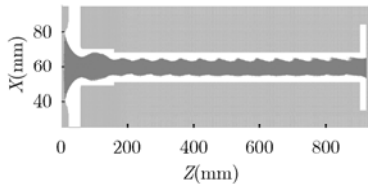


图 14 初始旁轴电子注 3 维轨迹 XOZ 截面图

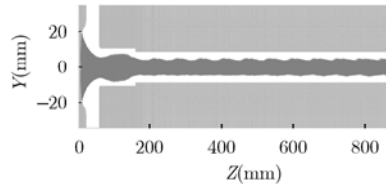


图 15 优化后旁轴电子注 3 维轨迹 YOZ 截面图

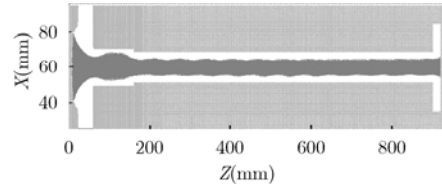


图 16 优化后旁轴电子注 3 维轨迹 XOZ 截面图

子 55%，电子注通过率 100%。将 SUPERFISH 计算的 2 维磁场数据导入 PIC 软件对电子注聚焦轨迹进行模拟，计算结果与 EGUN 获得了很好的一致性(见图 12)。

5 电子注传输特性的 3 维模拟

把聚焦系统由 2 维转换为 3 维情况，除各屏蔽板开孔变为 6 个并移到旁轴之外，保持聚焦系统其余各参量不变，利用 MAFIA 对聚焦系统进行了 3 维计算。将 MAFIA 计算的磁场数据导入 PIC 软件对旁轴电子注进行 3 维计算。为便于优化，首先选取了旁轴上一条电子注进行计算，聚焦系统参量未变的情况下，初始计算结果如图 13、图 14 所示，如同所预期的一样，电子注聚焦特性相对于 2 维主轴情况无显著变化，电子注无偏转，平衡半径基本一致，并获得了 100%的通过率。但缺点是电子注波动较大，层流性稍差。通过对比 3 维聚焦系统旁轴轴线上磁场分布与 2 维系统主轴上磁场分布发现，电子枪区磁场强度及均匀度下降，过渡区磁场值略有偏差。为此增加了电子枪区聚焦线圈电流并对屏蔽板结构进行了调整，屏蔽板整体加长，并改变板间距离，增加了枪区磁场的均匀度，将阴极区横向磁场降至 0.5%，同时相应地调整了过渡区线圈电流，优化后计算的电子注轨迹如图 15、图 16 所示，

电子注波动减小，层流性有所改善。电子注的 3 维轨迹见图 17。



图 17 电子注 3 维聚焦轨迹

6 结束语

本文采用先 2 维后 3 维的方法，对 L 波段峰值功率多注速调管电子光学系统进行了设计，采用均匀场多透镜聚焦系统对电子注进行聚焦。计算表明，多透镜系统可以有效调节电子注平衡半径，枪区磁场可以有效调节电子注层流性，设计的电子光学系统电子注通过率 100%，填充因子 55%，波动小，层流性较理想，基本达到了设计要求，并且，先 2 维后 3 维的设计方法可以高效完成设计工作。但必须提到的是，3 维情况下计算的电子注轨迹表明，电子注同步性不甚理想，这是由于磁场在旁轴屏蔽板孔中发散不对称，电子注切割磁场引起非对称旋转造成的，要消除这一影响，尚需对新型的聚焦系统进行研究。

参 考 文 献

- [1] 王勇, 丁耀根, 刘璞鲲, 等. 高功率多注速调管的初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1133-1136.
Wang Y, and Ding Y G, Liu P K, *et al.*. Research on high peak power multi beam klystron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(8): 1133-1136.
- [2] 丁耀根, 阮存军, 沈斌, 等. X 波段同轴腔多注速调管的研究[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2337-2341.
Ding Y G, Ruan C J, and Shen B, *et al.*. Study of a X-band coaxial cavity multi beam klystron[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(12): 2337-2341.
- [3] 张瑞, 王勇. 高功率多注速调管的发展现状[J]. 真空电子技术, 2007, 3: 25-30.
Zhang R and Wang Y. Development of High Peak Power Multi-Beam Klystron[J]. *Vacuum electronics*, 2007, 3: 25-30.
- [4] 沈斌, 丁耀根, and Aleksandr N. Sandalov. 超宽带多注速调管的模拟研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(1): 180-184.
Shen B, Ding Y G, and Aleksandr N. Sandalov. Theoretical, investigations of the super broadband multiple beam klystron amplifier[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(1): 180-184.
- [5] 孙鹏, 丁耀根, 赵鼎. X 波段高功率速调管功率合成器设计[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1865-1868.
Sun P, Ding Y G, and Zhao D. Design of power combiner for X-band high power klystron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1865-1868.
- [6] 丁耀根. 多注速调管电子光学系统的研究[J]. 电子科学学刊, 2000, 22(3): 485-491.
Ding Y G. Research of the optical system of the multi-beam klystron[J]. *Journal of Electronics*, 2000, 22(3): 485-491.
- [7] Gelvich E A, Borisov L M, and Zhary E V, *et al.*. The new generation of high-power multiple-beam klystrons [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1993, 41(1): 15-19.
- [8] Korolyov A N, Gelvich E A, and Zhary E V, *et al.*. Multiple-beam klystron amplifiers: Performance parameters and development trends[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, 32(3): 1109-1117.
- [9] 张瑞, 王勇. 高功率多注速调管电子光学系统的研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9): 1519-1523.
Zhang R and Wang Y. Electro-optical system in high peak power multi-beam klystron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(9): 1519-1523.
- [10] Petillo J J, Eppley K, and Panagos D, *et al.*. The MICHELLE three-dimensional electron gun and collector modeling tool: theory and design[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 30(3): 1238-1264.
- [11] Vaughan J R M. Synthesis of the Pierce gun[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1981, 28(1): 37-41.
- 张 瑞: 男, 1979 年生, 助研, 博士生, 从事高功率微波器件的研究工作.
- 王 勇: 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事新型速调管、计算电磁学及器件 CAD 方面的研究.
- 谢敬新: 男, 1961 年生, 高级工程师, 从事高功率速调管方面的研究工作.