

PRPM聚焦多注速调管电子光学系统的研究

王树忠^{①②} 丁耀根^① 肖 刘^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要 该文采用边界元(BEM)软件TAU对具有周期反转永磁(PRPM)聚焦结构的多注速调管电子光学系统进行研究。通过编写程序增加TAU读入三维磁场数据的功能,从MAFIA中导入三维磁场,分别模拟了处于径向不同位置处电子注的轨迹。通过对磁聚焦系统进行优化设计,外层电子注轨迹得到明显改善。使用软件TAU进行三维模拟可以大大缩短模拟时间,便于多注速调管电子光学系统的工程设计。

关键词 多注速调管,TAU,边界元,多注电子光学

中图分类号: TN122.5, O463.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1967-04

Study on Electron Optics System of Multi-beam Klystron with PRPM Focusing

Wang Shu-zhong^{①②} Ding Yao-gen^① Xiao Liu^①

^①(Institute of Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Boundary Element Method(BEM) is applied to simulate electron optics system of multi-beam klystron with PRPM focusing in this paper. The function of importing 3D magnetic fields from MAFIA is added to TAU. Magnetic induction distribution along Z axis at different radial positions is given out and the electron trajectories are analysed. Optimization of the magnetic focusing system can decrease the radial magnetic induction and improve the electron beam quality. Less time will be needed than other codes, TAU become a very useful tool for multi-beam electron gun design.

Key words Multi-beam klystron, TAU, Boundary Element Method(BEM), Multi-beam electron optics

1 引言

多注速调管是在大功率速调管的基础上,采用多电子注技术发展而来的一种新型大功率微波放大器^[1]。多个电子注的产生、形成和聚焦是实现高性能多注速调管的最关键的技术问题之一。多注速调管可以采用周期反转永磁聚焦系统,它的主要特点为工作电压低,可以实现控制极调制方式,容易实现高功率微波电子系统脉冲宽度的变化;同时该系统体积小、重量轻,减小了调制器的体积和重量,降低了成本。与采用均匀电磁聚焦系统相比,采用周期反转永磁聚焦系统的多注速调管的电子注通过率较低,因此,发展三维电子光学的数值模拟方法,研究磁位形的变化对电子轨迹的影响,提高电子注通过率,就显得十分必要。

目前,可以应用于三维电子光学模拟的软件有MICHELLE 3D, MAGIC 3D, TOPAZ 3D等,其中MICHELLE 3D和MAGIC 3D软件采用PIC模拟方法。这种方法的特点是直接求解MAXWELL方程组和LORENTZ方程,跟踪大量宏观粒子的运动。由于模拟中采用较少的近似,所以在PC机上运行时模拟时间很长,很难在PC机上应用这类软件进行工程设计。TOPAZ 3D是建立在微扰理论上的边界元程序。边界元算法的特点是只有在有物体和电子注的地区划分网格,这样可以大大减少计算区域内网格的数量,适用于多注速调管电

子光学系统的三维模拟^[2]。软件TAU也是基于边界元算法的程序,使用TAU可以计算磁场,但是其计算结果与实验结果相差较大。TAU的新版本增加了从MAFIA中导入三维磁场数据的功能,从而可以实现对多注电子光学系统的精确模拟。

2 电子光学模型及边界元方法

微波管电子光学系统属于强流电子光学,其基本方程组为^[3]

$$\Delta U = -\rho/\epsilon \quad (1)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (2)$$

$$d\mathbf{p}/dt = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (4)$$

式中 ϵ 为介质介电常数, μ 为介质磁导率; $\mathbf{E} = -\nabla U$ 为电场强度; ρ 为空间电荷密度; \mathbf{A} 为磁矢位; \mathbf{B} 为磁感应强度; \mathbf{J} 为电流密度; \mathbf{p} 为电子运动动量; e 为电子电量; \mathbf{v} 为电子速度。在计算时首先求解在封闭边界条件下的拉普拉斯方程($\rho=0$),得到初始电位分布,由电子运动方程求得轨迹及空间电荷密度,再通过求解这种电荷分布下的泊松方程得到新的电位分布,重复上述过程直到收敛。

采用边界元方法可以处理复杂的几何结构,减少边界近似带来的误差,求解出准确的结果。求解空间电位时,离散

空间中任意一点的电势由下面的方程给出：

$$U_m = \sum_{i=1}^N G_{i,m}^0 q_i + \sum_{j=1}^M G_{j,m}^0 Q_j \quad (5)$$

上式右边第 1 项对应空间体电荷产生的电势，第 2 项对应着边界表面电荷产生的电势。其中 $G_{i,m}^0$ 为自由空间中的源函数，在柱坐标系下表示为

$$G_{i,m}^0 = \frac{1}{2\pi^2 \epsilon_0} \frac{K(p_{i,m})}{\sqrt{(z_i - z_m)^2 + (r_i + r_m)^2}} \quad (6)$$

$$p = \frac{z\sqrt{r_i r_m}}{\sqrt{(z_i - z_m)^2 + (r_i + r_m)^2}}$$

其中 $K(p)$ 为第一类椭圆积分。

在电位计算中，边界上电荷分布的计算占有重要的地位。早期的工作直接采用式(6)计算源函数，奇点的存在使靠近边界处计算电位的准确性很低。TAU中假设在边界上电荷密度呈分段线性分布，这样可以消除源函数的奇异性，如图 1所示^[4]。这种分布可以用三角电荷的和来代替，每个电荷的密度沿边界上的两个相邻点呈线性分布。边界上电荷的源函数按式(7)进行计算。三角电荷值的大小由式(8)给出：

$$G_{i,m} = \frac{\frac{1}{l_{a,b}} \int_a^b G_{i,m}^0 l dl + \frac{1}{l_{b,c}} \int_b^c G_{i,m}^0 l dl}{(l_{a,b}(2r_b + r_a) + l_{b,c}(2r_b + r_c))/6} \quad (7)$$

$$Q_i = 2\pi\sigma_i \left(l_{a,b} \cdot \left(\frac{r_a}{2} + \frac{l_{a,b}}{3} \right) + l_{b,c} \cdot \left(\frac{r_c}{2} + \frac{l_{b,c}}{3} \right) \right) \quad (8)$$

其中 σ_i 为在中点 b 处的表面电荷密度， $l_{a,b}$ 和 $l_{b,c}$ 分别为 a, b 点和 b, c 点之间的长度。 r_a, r_b, r_c 分别为从坐标原点到 a, b 和 c 的距离。

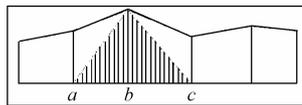


图1 电极上的三角电荷
Fig.1 Triangular charge on an electrode

TAU 中电子枪区和电子注通道区域是分开进行模拟的。对于电子枪部分，采用泊松方程进行迭代给出空间电位的分布。对于通道部分，读入电子枪计算的结果数据，这时采用高斯定理计算横向空间电荷力，忽略纵向空间电荷力。

阴极电流的计算满足二极管空间电荷限制流发射定律

$$j = 2.33 \times 10^6 \frac{U^{3/2}}{a^2} \quad (9)$$

在多注速调管中，磁场具有微小的非轴对称性。所以把磁场可以分为两部分：轴对称磁场 B_S 和非轴对称磁场 B_A 。TAU 中三维电子注的计算分两次进行，第一次在轴对称磁场 B_S 作用下进行轨迹分析，由此计算得到二维轴对称的注电场；第二次在磁场 $B_S + B_A$ 作用下计算轨迹，这也是 TOPAZ 3D 软件所采用的三维作为二维的微扰的方法。

3 三维磁场的模拟

图 2 是多注速调管采用周期反转永磁聚焦系统的结构示意图。由于永久磁铁采用径向充磁方式，因此在 MAFIA 中进

行三维磁场模拟时只能采用柱坐标系。图 2 中标出了用于模拟计算的 4 个电子注通道的位置，通道的中心分别位于角向 $\varphi = 90^\circ$ ，径向 $r = 0, r = 6\text{mm}, r = 10\text{mm}$ 和 $r = 16\text{mm}$ 处。经过模拟计算可以得出整个区域的磁场分布。它包含电子枪部分，3 个均匀区部分和收集极区部分，其中各个通道磁场相差较大的为电子枪区和第 3 均匀区。在电子枪区每个通道轴上的 B_z 分布如图 3 所示。第 3 均匀区轴上磁场 B_z 分布如图 4 所示。每个通道轴上径向磁场 B_r 分布如图 5 所示。在 $r = 6\text{mm}, r = 10\text{mm}$ 和 $r = 16\text{mm}$ 处，阴极区横向磁场 B_r 最大值分别为 $2 \times 10^{-3}\text{T}, 3.3 \times 10^{-3}\text{T}$ 和 $4.1 \times 10^{-3}\text{T}$ ，纵向磁场大小分别为 $1.05 \times 10^{-2}\text{T}, 8.2 \times 10^{-3}\text{T}$ 和 $3.3 \times 10^{-3}\text{T}$ 。横向磁场 B_r 与纵向磁场 B_z 之比分别为 19%，40% 和 124%。第 3 均匀区横向磁场 B_r 最大值分别为 $4.42 \times 10^{-4}\text{T}, 7.55 \times 10^{-4}\text{T}, 1.624 \times 10^{-3}\text{Gs}$ ，第 3 均匀区纵向磁场 B_z 大约为 0.134T，横向磁场 B_r 与纵向磁场 B_z 之比分别为 0.33%，0.56% 和 1.21%。此比率值越小，电子轨迹受横向磁场的影响也就越小。注意本文中只分析了横向场 B_r ，TAU 在实际计算中的横向场也包含 B_θ 。文中没有分析 B_θ 是因为它只有 10^{-6}T 的量级，相对于 B_r 是可以忽略的。

MAFIA 是基于 FIT 算法的软件包，采用 YEE 网格划分方式^[5]。计算的三维磁场值位于每一个元胞的 3 个平面上^[6]，首先需要编写程序把位于每个元胞 3 个面上的场值插值到一个点上，然后把柱坐标系下的数据转换到直角坐标系下。由 TAU 读入这些数据进行三维轨迹模拟。

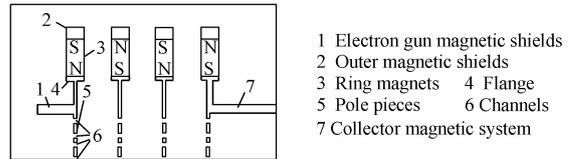


图 2 周期反转永磁聚焦系统结构示意图
Fig. 2 Section graph of PRPM focusing system

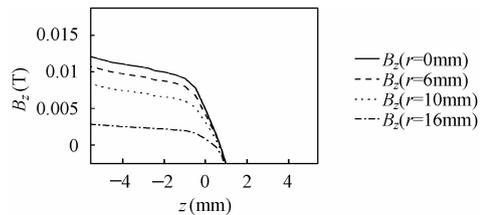


图 3 阴极区不同通道轴上磁场 B_z 图
Fig.3 Axial magnetic field B_z of different hole in cathode region

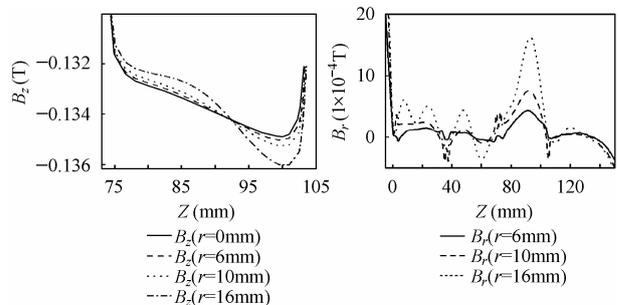


图 4 第 3 均匀区不同通道轴上磁场 B_z 图
Fig.4 Axial magnetic field B_z at different channel in the third uniform area

图 5 不同通道轴上磁场 B_r 图
Fig.5 Radial magnetic field B_r on the axis at different channel

4 电子轨迹的模拟

本文中使用的多注电子枪设计电压为 15kV，单注电流为 0.75A，导流系数为 0.41 μ P。按照上面的参数，我们先采用二维软件 EGUN 进行初步设计。把设计所得的结构尺寸分别代入到 TAU 和某 PIC 软件中进行模拟，表 1 给出了几种软件的模拟结果和计算从电子枪区到收集极区所需的时间对比。我们可以看到采用 TAU 进行三维模拟所得导流系数和采用 EGUN 所得结果基本一致，而计算时间却仅为 PIC 软件所用时间的 1/60(采用电脑主频 2.4GHz)。相对于 EGUN 来说，TAU 考虑了弱的非轴对称横向磁场的影响，可以实现对多注速调管电子光学系统的精确模拟。这使 TAU 成为进行多注电子光学系统设计的实用工具。

表 1 采用 EGUN, PIC code 和 TAU 等几种软件的模拟结果和运行时间对比

Tab.1 Comparison of results and running time using different soft ware: EGUN, PIC code and TAU

	V(kV)	I(A)	P(μ P)	Time
EGUN(2D)	15	0.75	0.408	2min
PIC code (3D)	15	0.761	0.414	42hour
TAU(3D)	15	0.752	0.409	40min

参照图5，外层电子注在电子枪区域有较大的横向磁场，这里的横向磁场是沿R方向的非轴对称场。在此横向磁场作用下，电子注发生偏转。图6分别是中心注和外层r=10mm处电子注在阳极入口处的粒子截面图，中心注无偏转，外层注在沿y轴正方向横向磁场的的作用下发生偏转，偏转方向沿x轴正方向。

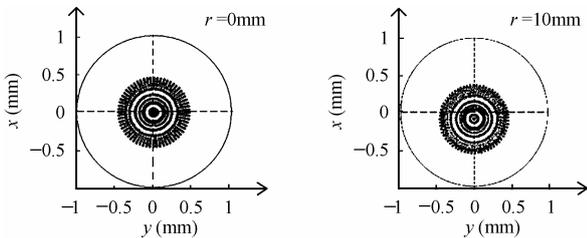


图 6 中心注和r=10mm处电子注在阳极口处电子轨迹截面图
Fig.6 Section graph of particles at the entrance of anode for the beam at center and r=10mm

电子注通过阳极孔后进入通道部分，对于中心注来说，磁场具有轴对称性，即相当于二维的情况。我们可以把采用TAU计算的结果与采用EGUN计算的结果进行比较(图7)，两者的轨迹完全一致，这验证了使用TAU进行三维模拟的正确性。从图8中可以看出几个通道内电子注的直流通率都很好，但外层电子注在r=6mm处，轨迹明显不具有轴对称性，轨迹在收集极的发散不是十分均匀；在r=10mm处，有较大的横向磁场，轨迹的不对称性更加明显，轨迹在收集极有较大的偏转；在r=16mm处，横向磁场最大，轨迹的不对称性最明显，轨迹在收集极的偏转最大。

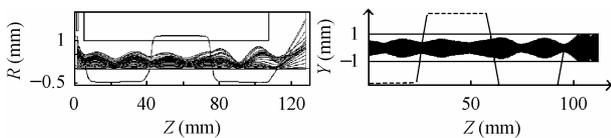


图 7 中心注电子轨迹(采用EGUN和TAU 3D)
Fig.7 Trajectories of the center beam(Using EGUN and TAU 3D)

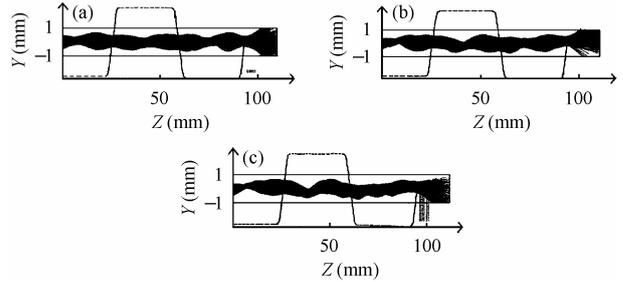


图 8 电子轨迹在YZ平面的投影图
Fig.8 Corresponding to the projection of the trajectories on the plane YZ (a) r=6mm (b) r=10mm (c) r=16mm

对该电子光学系统进行优化设计，关键是减小阴极区域和第3均匀区的横向磁场。这可以通过增加电子枪屏蔽筒的长度、减小最后一块磁钢及屏蔽铁的尺寸来实现。优化设计后，阴极区横向磁场最大值分别为 1.6×10^{-4} T, 2.4×10^{-4} T, 2.7×10^{-4} T；纵向磁场大小分别为 7.9×10^{-3} T, 6.1×10^{-4} T, 2.5×10^{-3} T；纵横磁场之比分别为20%，40%和108%。虽然此比值比较大，但横向磁场数值非常小，所以电子到达阳极口处几乎没有偏转。第3均匀区横向磁场大小降为 1.1×10^{-4} T, 3.9×10^{-4} T和 5.8×10^{-4} T，纵向磁场大小为0.126T，纵横磁场之比分别为0.08%，0.3%和0.46%。从图9可以看出，r=6mm处电子注轨迹非常接近轴对称结构，电子在阴极区发散均匀；在r=10mm和r=16mm处电子通道内的电子轨迹比图8 (b), 8(c) 轨迹有良好的改善，在收集极发散趋于均匀。

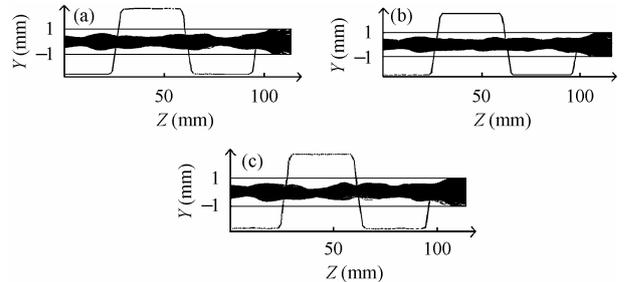


图 9 电子轨迹在YZ平面投影图
Fig.9 Corresponding to the projection of the trajectories on the plane YZ after optimization (a) r=6mm (b)10mm (c) 16mm respectively

5 结束语

本文采用边界元(BEM)软件TAU对具有周期反转永磁聚焦结构的多注速调管电子光学系统进行数值模拟，通过编写程序增加了TAU从MAFIA中导入三维磁场数据的功能，模拟分析了处于径向不同位置处的电子注轨迹。进行优化设计时，通过增加阴极区屏蔽筒的长度、减小最后一块磁钢和屏蔽铁尺寸的方式，减小阴极区和第3均匀区的横向磁场，从而使电子注轨迹得到明显改善。使用TAU软件进行三维模拟可以大大缩短模拟时间，便于多注速调管电子光学系统的工程设计。有待进一步开展的工作为设计特殊的磁屏结构，使处于外层电子注的磁场具有轴对称结构，从而提高电子注直流和高频通过率。

致谢 圣彼得堡电工大学Vjacheslav Tregbov 教授为了使TAU

能够计算多注电子光学, 修改了多个内部函数, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 丁耀根. 多注速调管电子光学系统的研究. 电子科学学刊, 2000, 22(3): 485-491.
- [2] Ivanov. V, *et al.*. 3D method for the design of multi or sheet beam RF sources. PAC2001, Chicago, IL 2001: 1213-1215.
- [3] 电子管设计手册编辑委员会. 微波管电子光学系统设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 5-9.
- [4] TAU 2003 User Guide. Volume 1, Solver Co. Saint-Petersburg, 2003.
- [5] The MAFIA Collaboration. MAFIA user manual version 4.0.25[M]. Germany : CST Inc, 2000.
- [6] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分法. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 8-14.
- 王树忠: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为高功率微波器件.
- 丁耀根: 男, 1942 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波电子学和大功率微波器件.
- 肖 刘: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为高功率微波器件.