

均匀磁聚焦和周期磁聚焦部分屏蔽流过渡区的设计¹

鲁佩菊

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 本文叙述均匀磁聚焦和周期磁聚焦部分屏蔽流过渡区设计的一种方法,指出对于阳极电位与慢波线电位不同的电子光学系统,以及这两个电位虽然相同,但导流系数大,阳极孔效应严重的电子光学系统,它们的过渡区的设计,必须采用非等位空间中的傍轴电子轨迹方程。并对用部分屏蔽流周期磁聚焦的电子光学系统,电子枪区中的电子轨迹与磁力线重合的问题提出一些看法。

关键词 均匀磁聚焦, 周期磁聚焦, 屏蔽流, 过渡区

中图分类号 O463.1

1 引言

从强流电子光学的观点看,微波器件的电子注可以分为下述四个区段:电子枪区、过渡区、作用区和收集极区。O型电子枪的设计,使用皮尔斯的设计思想,已有成熟的计算程序,用计算机能较快地得到符合电子枪参量要求的电极尺寸。作用区中的电子注,借助求解傍轴电子轨迹方程,可以计算出电子注的波动情况。收集极区的电极设计,对提高管子的总效率有很大的作用,但它还要知道经过高频作用后的电子注的能量分布,目前设计方法不如电子枪成熟。过渡区是电子枪区和作用区之间的区域,电子注经过过渡区后应满足作用区所要求的注入条件,也就是说,电子注通过过渡区的过程,是实现电子枪参量与作用区参量之间的匹配过程。这种匹配的好坏,对作用区中的电子注的质量有很大的影响。由于过渡区内的情况比较复杂,理论分析和实验测量都比较困难,所以过渡区的处理是一个重点,也是一个难点^[1]。

2 设计过渡区的途径和以往所用的方法

文献[1]总结了设计过渡区的两个途径和三种方法,途径(1)根据聚焦磁场区平衡电子注的要求和实际过渡区的磁场分布来设计合乎要求的电子枪,称为逆顺流法;途径(2)根据聚焦磁场区平衡电子注的要求和实际使用的电子枪来设计过渡区的磁场分布,使电子注匹配,叫做反算法。第三种方法是等效法,设计过渡区的磁场分布与理论上要求的有跳变的磁场分布相等效,也就是要求两者的磁感应强度的平方沿对称轴向距离的积分相同。在比较三种方法中文献[1]指出:逆顺流法在解决屏蔽流聚焦过渡区设计时,是有效和方便的,在设计非屏蔽流聚焦过渡区时,存在一定的困难。反算法适合于解决非屏蔽流聚焦过渡区的设计问题。等效法简单直观,已很好地解决了屏蔽流聚焦过渡区的设计问题。但原理不够严谨,而且也不能很好地用于解决非屏蔽流聚焦过渡区的设计问题。

三种方法中有两种方法不能解决非屏蔽流聚焦过渡区的设计,反算法虽可解决非屏蔽流聚焦过渡区的设计问题,但有对电子枪区的电子轨迹要与磁力线重合的要求。上叙三种方法中所用的基本方程是等位空间中的傍轴电子轨迹方程,即

¹ 1997-01-15 收到, 1997-05-08 定稿

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{\eta}{8U(z)} \left[B^2(z) - \frac{B_c^2 r_c^4}{r^4} \right] r + \frac{I}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{2\eta} U(z)^{3/2} r}, \quad (1)$$

式中 $U(z)$ 为轴上电位分布, $B(z)$ 为轴上磁场分布, B_c 为阴极上轴向磁场分量, r_c 为阴极弦半径, I 为电流, η 为电子荷质比, ϵ_0 为真空中介电常数。

文献 [2] 叙述了适用于轴对称强流电子光学系统各种磁结构的部分屏蔽流过渡区的设计方法, 但文章给出的方程也是等位空间中的傍轴电子轨迹方程。因此文献 [1]、文献 [2] 的方法只适用于管子的阳极电位与慢波系统的电位相同时情况。对于阳极控制的微波管, 阳极电位与慢波系统的电位不同, 过渡区中的轴上电位变化很大, 就不能用等位空间中的傍轴电子轨迹方程来计算。图 1 是某一分布作用放大器管中轴上电位分布图, 它的阳极电位 6000V, 慢波系统的电位 8800V, 可以明显地看出过渡区中的轴上电位变化相当大。对此管作过这样的计算: 阳极电位 6000V、慢波系统的电位 8800V 时, 用非等位空间中的傍轴电子轨迹方程, 逆电子运动方向算得过渡区入口处的注半径为 0.468mm, 斜率为 -0.1118, 如果按 8800V 无电场等位空间计算时, 过渡区入口处的注半径为 0.427mm, 斜率为 -0.07563, 两种情况下半径的误差 9%, 斜率的误差 32%。显然, 若用等位空间中的方程计算出的半径和斜率, 去求得相匹配的电子枪是不合适的。另外, 即使当阳极电位与慢波系统的电位相同时, 对于导流系数大的电子枪, 由于阳极孔效应, 在阳极头后一段距离后, 轴上电位才接近阳极电位, 而通常选用离阳极头后不远处, 作为过渡区的始端^[1], 因此在过渡区中轴上电位分布随轴向距离有明显的变化, 见图 2 某一速调管电子枪区的轴上电位分布图, 此电子枪的导流系数是 2 微朴。从其过渡区的轴上电位分布看, 显然也不能用 (1) 式来计算了。

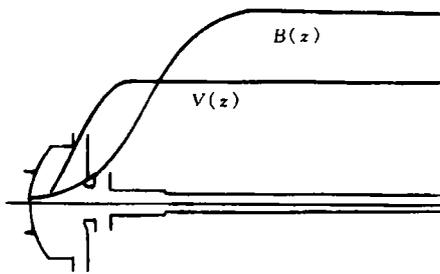


图 1 分布作用放大器电子光学系统的轴上电位分布 $V(z)$ 和轴上磁场分布 $B(z)$

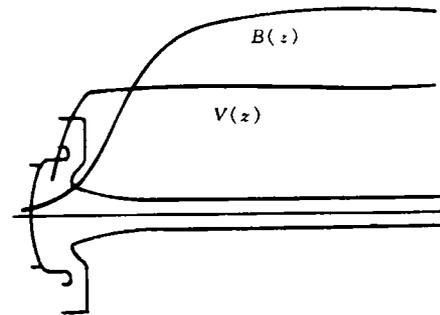


图 2 速调管电子光学系统的轴上电位分布 $V(z)$ 和轴上磁场分布 $B(z)$

为了设计阳极控制电子光学系统的过渡区, 考虑过渡区中不是等位空间, 采用下面非等位空间中的傍轴电子轨迹方程。

3 非等位空间中的傍轴电子轨迹方程

在轴对称情况下, 非等位空间中的傍轴电子轨迹方程为

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = -\frac{U'(z)}{2U(z)} \frac{dr}{dz} - \left\{ \frac{U''(z)}{4U(z)} + \frac{\eta}{8U(z)} \left[B^2(z) - \frac{B_c^2 r_c^4}{r^4} \right] \right\} r + \frac{I}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{2\eta} U(z)^{3/2} r}, \quad (2)$$

$$U'(z) = \frac{dU(z)}{dz}, \quad U''(z) = \frac{d^2 U(z)}{dz^2}.$$

为了使方程简化一些, 去掉 $U''(z)$ 和 dr/dz 项, 作如下变换: 设 $R = rU^{1/4}$, 这样 (2) 式变成

$$\frac{d^2 R}{dz^2} = -\frac{3}{16U^2(z)} R(U'(z))^2 - \frac{\eta}{8U(z)} B^2(z) R + \frac{\eta B_c^2 r_c^4}{8R^3} + \frac{I}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{2\eta} U(z)^{3/2} R}. \quad (3)$$

已知轴上磁场分布、轴上电位分布、电流以及初始半径和初始斜率, 用计算机很快可以算得轴向任一位置上的半径和斜率。

4 部分屏蔽过渡区设计的具体步骤

文献 [1] 和文献 [2] 设计部分屏蔽过渡区时, 因基本方程是等位空间中的傍轴电子轨迹方程 (1) 式, 无需知道具体的轴上电位分布, 而非等位空间中的傍轴电子轨迹方程 (2) 式时, 必须要已知轴上电位分布, 所采取的步骤如下:

(1) 根据电子枪参量 (导流系数 P , 注半径 r_0 , 压缩比和射程) 由强流电子枪通用程序设计出初始电极尺寸;

(2) 根据实测或计算得到的轴上磁场分布及选用的屏蔽系数大小, 确定阴极相对磁场的位置;

(3) 加入磁场计算初始电极尺寸的电子枪, 得到轴上电位分布;

(4) 利用计算傍轴轨迹方程 (3) 式的程序, 逆电子运动方向计算, 计算起点位置的选择: 对于均匀磁聚焦选磁场均匀区的开始处, 对周期磁聚焦系统选周期磁场第二峰或第三峰处作为起点, 初始半径 $r = r_0$ 、初始斜率 $dr/dz = 0$ 逆电子运动方向计算, 算到接近阳极头处某个位置 z_p , 得到这位置上的注半径 r_{p2} 和斜率 r'_{p2} ;

(5) 在有磁场情况下, 调整电子枪的电极尺寸, 顺电子运动方向计算, 在 z_p 处算得的半径和斜率 r_{p1} 和 r'_{p1} , 使 r_{p1} 和 r'_{p1} 尽量接近 r_{p2} 和 r'_{p2} ;

(6) 在调整电子枪的电极尺寸中, 新的轴上电位分布与在第 (3) 步中算得的不完全一样, 但差别很小, 必要时可以重复第 (4) 步, 修正 r_{p2} 和 r'_{p2} 。

5 设计例子

用上述匹配过渡区的方法, 设计了线包均匀磁聚焦、永磁均匀磁聚焦以及永磁周期磁聚焦的部分屏蔽流电子光学系统。设计得到的电子注的波动相当小, 说明过渡区的匹配得相当好。有三个实例的一些结果如表 1 所示, 设计出的电子枪、聚焦磁场和电子轨迹如图 3、图 4 和图 5 所示。

表 1

管子类型	聚焦方式	z 向位置 z_p	顺电子运动方向		逆电子运动方向		$(r_{p2} - r_{p1})/r_{p1}$	$(r'_{p2} - r'_{p1})/r'_{p1}$	电子注波动
			r_{p1}	r'_{p1}	r_{p2}	r'_{p2}			
速调管	线包均匀	12.2	6.25	-0.297	6.50	-0.310	0.038	0.044	< ±3%
分布作用放大器	永磁均匀	2.9	0.466	-0.114	0.468	-0.112	0.004	-0.017	< ±2%
行波管	永磁周期	7.8	0.160	-0.024	0.168	-0.022	0.05	-0.08	< ±12%

表 1 中的电子注的波动的定义是: 在所计算的聚焦区域内 (最大注半径 - 最小注半径)/(最大注半径 + 最小注半径)

行波管的电子注的波动比其它两个管子大,因为它用的是周期永磁聚焦系统,在周期磁场中电子注的波动可由二部分组成,一是周期场本身使电子注产生的固有波动,另一部分是由于入射条件不佳产生的波动。由磁场参量 α 、空间电荷参量 β 及屏蔽系数 k 可以估算出周期场本身使电子注产生的固有波动约 7%。我们所用的磁场分布各峰值大小不是一样的,在这磁场分布下以最佳入射条件注入,可算得有 10% 的波动, 12% 波动是由所计算范围内的最大注半径和最小注半径算得,这种波动情况说明电子枪与聚焦磁场间已有相当好的匹配。

过渡区匹配得好坏可由实管测试来证实,速调管的电流通过率为 99%^[3],分布作用放大器管子的电流通过率达 99.8%^[4],行波管的通过率有 96%,由于此管的螺旋线的内径才 0.6mm,电子注与螺旋线的间隙很小,另件的加工精度、对中情况对电流的通过率影响很大^[5]。

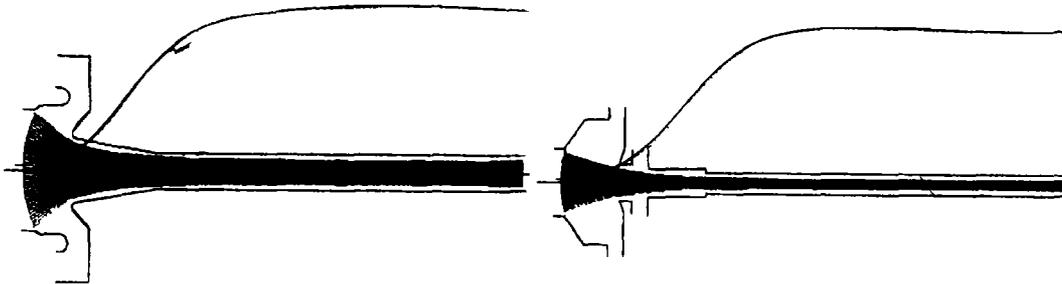


图 3 速调管电子枪、磁场分布和电子轨迹

图 4 分布作用放大器电子枪、磁场分布和电子轨迹

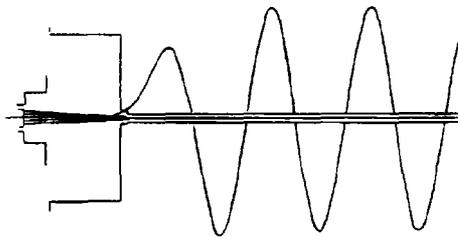


图 5 行波管电子枪磁场分布和电子轨迹

6 关于部分屏蔽流聚焦电子注腰前的电子轨迹与磁力线相重合的要求的讨论

在设计部分屏蔽流均匀磁场聚焦系统的过渡区时,文献 [1]、[6] 都指出要求电子注腰前的磁力线与电子轨迹相重合。在本文所述的设计步骤中,没有提及电子枪注腰前的电子轨迹与磁力线相重合的要求,我们比较了用此设计方法,过渡区已匹配好的电子枪中,有磁场和无磁场时的枪区电子轨迹情况,其结果如表 2 所示。

表 2 给出了过渡区入口处有磁场和无磁场时电子注的半径、斜率、相对误差和实管电子注电流的通过率。对于部分屏蔽流均匀磁聚焦系统的设计结果看,在电子枪区的电子轨迹有磁场与无磁场时基本上是一致的,也就是说电子枪区注腰前的电子轨迹与磁力线是重合的。对于行波管周期永磁聚焦系统来说,在电子枪区有磁场与无磁场时的电子轨迹差别不大,但不可能实现电子轨迹与磁力线相重合的要求,如果要求磁力线与电子轨迹相重合,即要求

$$B_g(z) = B_c[r_c/r_g(z)]^2 \quad (4)$$

表 2

管子类型	聚焦方式	z 向位置 z_p	有磁场		无磁场		$(r_{p2} - r_{p1})/r_{p1}$	$(r'_{p2} - r'_{p1})/r'_{p1}$	实管注电流通率 (%)
			半径 r_{p1}	斜率 r'_{p1}	半径 r_{p2}	斜率 r'_{p2}			
速调管	线包均匀	12.2	6.25	-0.297	6.23	-0.302	-0.0003	0.017	99
分布作用放大器	永磁均匀	2.9	0.466	-0.114	0.467	-0.114	0.0002	0.0	99.8
行波管	永磁周期	7.8	0.160	-0.024	0.151	-0.028	0.056	0.16	96

$B_g(z)$ 为枪区磁场分布, B_c 为阴极上磁场, $r_g(z)$ 为静电电子枪的注半径, r_c 为阴极弦半径。

因为在电子枪区的电子轨迹是收敛的, $r_g(z)$ 在电子枪区内逐渐减小, 为满足 (4) 式, 势必要求阴极后的磁场强度随距离呈增加趋势, 而我们从图 6 所示的磁场分布看到, 为了使阴极上有适当的磁场强度, 把阴极放于小峰处, 阴极后的磁场强度绝对值呈降低趋势, 下降到零后再上升, 因此不可能实现磁力线与电子轨迹重合这一苛刻的要求。在电子枪区有磁场与无磁场时的电子轨迹差别不大, 只是说明在电子枪区, 静电场的作用力比磁场的作用力大。

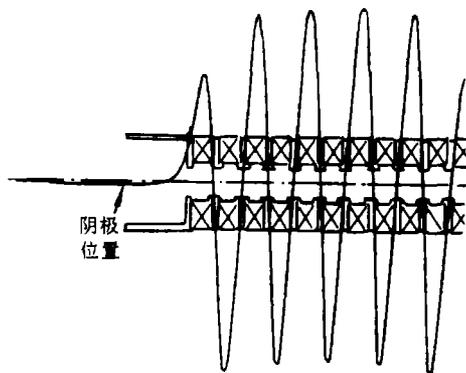


图 6 行波管磁结构和磁场分布

7 结 论

考虑到阳极电位与慢波线电位不同, 以及阳极孔效应使过渡区不处于等电位空间, 采用非等位空间中的傍轴电子轨迹方程来求解是必须的。所用的部分屏蔽过渡区设计方法, 抛开了电子枪中电子轨迹与磁力线相重合的要求, 设计出一些过渡区匹配很好的电子光学系统。

参 考 文 献

- [1] 电子管手册编委会. 微波管电子光学系统设计手册. 国防出版社, 1981, 第五章.
- [2] 袁光泉. 均匀磁场聚焦部分屏蔽流电子注的一种设计方法. 电子科学学刊. 1983, 5(1): 32-37.
- [3] 刘铁山, 唐仪凤, 张月兰, 鲁佩菊. C 波段、脉冲功率 500KW、KC-56 速调管放大器. 中国电子学会真空电子学会分会第十届年会论文集, 上册. 1995 年 11 月, 93.
- [4] 电子所内部资料. 科学技术成果鉴定证书, 编号: 871001, 8 毫米波段, CW100 瓦输出的分布作用放大器 (EIA), 1987 年 10 月.
- [5] 鲁佩菊. 八毫米瓦级连续波行波管电子光学系统的设计. 中国电子学会真空电子学会分会第十届年会论文集, 上册, 1995 年 11 月, 96.
- [6] И. В. 阿良莫夫斯基著, 黄高年译. 电子注与电子枪, 北京: 电子管技术编辑组出版, 1974 年, 第十一章.

A DESIGN OF THE TRANSITION REGION ABOUT PARTIALLY
SHIELDED CATHODE WITH UNIFORM AND PERIODIC
MAGNETIC FOCUSING FIELD

Lu Peiju

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract This paper describes a method about the design of the transition region of the electron beam from partially shielded cathode with uniform and periodic magnetic focusing field. It is necessary to use paraxial ray equation in non-equipotential space for the electron optics system in which anode potential is not the same as helix potential or for the electron optics system in which anode potential is the same as helix potential, but the perveance is high, thus the anode hole influence is strong. Some idea about the problem of coincidence of electron trajectory in electron gun with magnetic flux line for the electron optics system using partially shielded cathode with periodic magnetic focusing field is presented.

Key words Uniform magnetic focusing, Periodic magnetic focusing, Electron beam from partially shielded cathode, Transition region

鲁佩菊：女，1940年生，高级工程师，从事微波管电子光学系统设计的研究工作。