

均匀磁场聚焦部分屏蔽流电子注的一种设计方法*

袁 光 泉

(中国科学院电子学研究所)

提 要

本文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。通过综合选取磁系统和电子枪参数,实现了磁系统与电子枪的最佳匹配,获得了屏蔽系数大于0.8,波动小于1%的电子注。

一、引 言

由于部分屏蔽流在磁场不太强的情况下就能获得波动较小、刚性较大的电子注,因此,在一些功率较大的微波管中都希望使用部分屏蔽流电子注。多年来,已有不少文章讨论过设计不同磁结构的磁聚焦电子注的方法。文献[1]是早期比较全面讨论磁聚焦过渡区问题的文章。文献[1]的基本思想是,假设皮尔斯电子枪区电子轨迹与磁力线重合,以相互作用区的起始点作为过渡区的终端条件,再向电子枪方向反推,求出过渡区的始端条件,即电子枪阳极出口处条件,然后与皮尔斯电子枪的设计参数联系起来,从而求出匹配的电子枪。但由于实际设计与上述情况偏离较大,故此后又有不少人在这方面作了大量的工作^[2]。文献[3]较全面地介绍了过渡区设计的各种方法。总结了设计部分屏蔽流的“逆顺流法”、“反算法”和“等效法”。在高性能部分屏蔽流的设计中,虽然“等效法”有原理上的近似性,但方法简单,在某些情况下(如周期永磁聚焦部分屏蔽流设计),可用来初步确定磁结构。当电子枪区磁场作用不是很强或枪区电子轨迹与磁力线偏离不太大时,“逆顺流法”较简单,也有一定的实用性。“反算法”在这三种方法中有它自己的特点。它在一定程度上把选取磁结构参数与电子枪参数联系起来了。

本文主要是设计永磁均匀磁场聚焦部分屏蔽流。提出把确定屏蔽板(或筒)孔径与选取整个电子光学系统的参数综合起来考虑(即在设计时不预先选定电子枪或给定磁场分布),通过合理选择参数,以实现电子枪与磁系统的最佳匹配。

二、轨 迹 方 程

在轴对称情况下,无电场区域内层流电子注轨迹方程的柱坐标表示为:

* 1981年8月5日收到。

$$\frac{dr^2}{dz^2} + \frac{\eta B^2}{8V_0} r - \frac{\eta B_c^2 r_c^4}{8V_0 r^3} - \frac{I}{4\sqrt{2\eta \pi \epsilon_0 V_0^{3/2}} r} = 0, \quad (1)$$

亦可写成

$$r'' + \frac{\eta B_0^2 r_0^4}{8V_0} r \left(\frac{F^2(z)}{r_0^4} - \frac{K_c^2}{r^4} \right) - \frac{I}{4\sqrt{2\eta \pi \epsilon_0 V_0^{3/2}} r} = 0, \quad (2)$$

式中 r 和 z 是电子注边缘电子轨迹坐标, I 和 V_0 分别是电子注电流和电子注电压, B_0 为均匀磁场区磁场值, $F(z)$ 是描写过渡区轴向磁场的形状函数, K_c 为屏蔽系数, B_c 为阴极面上的磁场值, r_0 为均匀磁场区电子注平衡半径, r_c 是阴极半弦长, η 是电子荷质比, ϵ_0 是真空介电常数, 而

$$B = B_0 F(z). \quad (3)$$

在平衡条件下, B_0 与布里渊磁场值 B_b 和 K_c 的关系为:

$$B_0^2 = \frac{B_b^2}{1 - K_c^2}. \quad (4)$$

又因为

$$B_b^2 = \frac{\sqrt{2} I}{\pi \epsilon_0 \eta^{3/2} V_0^{1/2} r_0^2}, \quad (5)$$

所以有

$$\frac{\eta B_0^2 r_0^4}{8V_0} = \frac{P_\theta r_0^2}{4\pi\sqrt{2} \eta \epsilon_0 (1 - K_c^2)}, \quad (6)$$

式中 $P_\theta = \frac{I}{V_0^{3/2}}$. 式(2)可化为:

$$r'' + \frac{P_\theta}{4\pi\sqrt{2\eta \epsilon_0}} \cdot \frac{r_0^2}{1 - K_c^2} r \left(\frac{F^2(z)}{r_0^4} - \frac{K_c^2}{r^4} \right) - \frac{P_\theta}{4\pi\sqrt{2\eta \epsilon_0} r} = 0. \quad (7)$$

把所有的长度量都对屏蔽板(或筒)孔半径 R_p 归一化, 即令

$$R = \frac{r}{R_p}, \quad Z = \frac{z}{R_p},$$

显然方程式的形式不变化.

式(7)中各量采用实用单位制, 导流系数 P_θ 的单位用 μP , 则式(7)化为:

$$R'' = 0.0157 P_\theta \left\{ \frac{1}{R} - \frac{R_0^2}{1 - K_c^2} R \left(\frac{F^2(Z)}{R_0^4} - \frac{K_c^2}{R^4} \right) \right\}. \quad (8)$$

式(8)就是我们用于求部分屏蔽流电子注设计曲线的基本方程.

三、设计部分屏蔽流电子注的步骤

我们把整个电子光学系统分成: ca 电子枪区, ab 磁场过渡区和 b 以后的均匀磁场区(见图1).

把 a 面作为磁场过渡区的入口面 (即电子枪区的出口面), b 面作为磁场过渡区的出口面. 要在均匀磁场区形成一个无波动的电子注, 要求在 b 面上满足条件 $r_b = r_0$ 和 $r'_b = 0$. 这里 r_b 和 r'_b 是电子注在 b 面上的半径和斜率. 设计出满足上述条件的电子注

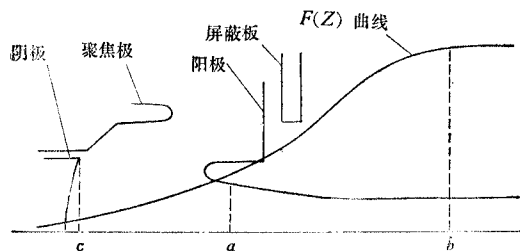
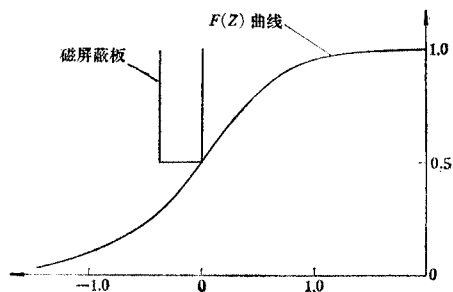


图 1 聚焦磁场分布

Fig. 1 Construction of the focusing field

图 2 归一化磁场 $F(Z)$ Fig. 2 Normalized magnetic field $F(Z)$

就是过渡区设计中要解决的问题。

由于在 a 面以后(远离阴极面方向)可看作是等位空间,因此可把 b 面上电子注的半径 r_b 和斜率 r'_b 作为初始条件,数值求解式(8),求出 a 面上电子注半径 r_a 和斜率 r'_a 。这一步与以往的作法没有什么区别。 P_θ 一定,如果给定 K_c 和 $F(Z)$,那么 r_a 和 r'_a 就唯一地确定了(这时可能对应不同压缩比的电子枪),但是这样求出的 r_a 和 r'_a 不一定能够找到满足所求出条件的实际电子枪。另一方面,如果选定电子枪(即选定电子枪压缩比),要满足条件 $r_b = r_0$ 和 $r'_b = 0$,必然要改变过渡区内 $F(Z)$ 分布(见图 2),但这样求出的磁场分布,在永磁结构下很难实现。因此现在我们把屏蔽板(或筒)孔半径 R_p 作为改变过渡区长度的一个因素,并认为在 R_p 变化不大时, cb 长度的变化正比于 R_p 。另外,把 K_c 也作为在一定范围内是可供选择的参量。导流系数选定后,把 K_c 和 R_0 作为求解式(8)的参数给出。由于均匀磁场区要求的注半径 r_0 是固定了的,所以 R_0 的变化即反映了 R_p 的变化。对于一组 R_0 、 K_c 参数,可以解出一条电子注包络轨迹。这条包络可以对应不同压缩比的电子枪,即对应不同的 R_a 和 R'_a 。这样给出不同的 R_0 和 K_c 参数,就可以获得一系列对应的 R_a 和 R'_a 。另外,从电子枪部分来看,对同一导流系数,不同的压缩比也能对应一组不同的 r_a 和 r'_a 曲线。我们的目的就是通过曲线上的参数,选定既满足平衡条件,又是电子枪可能提供的 r_a 和 r'_a 。这样求出的电子枪和磁系统必然是匹配的。现将过渡区的设计方法归纳如下:

1. 求归一化平衡半径 R_a 和斜率 R'_a 与屏蔽孔半径 R_p 的关系曲线

由于 P_θ 在设计过程中不变,以下的讨论中均作为常数对待。 R_0 和 K_c 作为参数,数值求解式(8),可以获得一系列不同压缩比 M^2 情况下的 R_a 和 R'_a 。这样可以作出以 K_c 和 M^2 为参数的 R_0-R_a 曲线和 $R_0-R'_a$ 曲线。将这组曲线稍作转换(R_a 乘上 R_p 得到 r_a ,而 $r'_a = R'_a$),就可求出一组以 K_c 、 M^2 为参数的 R_p-r_a 和 $R_p-r'_a$ 曲线(图 3 和图 4 对应于一组 K_c 、 M^2 参数)。不同的 K_c 值和不同的屏蔽板孔半径 R_p ,所要求的电子枪出口面上的半径和斜率是不相同的。这使我们在实现一个确定的 r_0 过渡区匹配时,有可能在一定范围内选择注入条件。

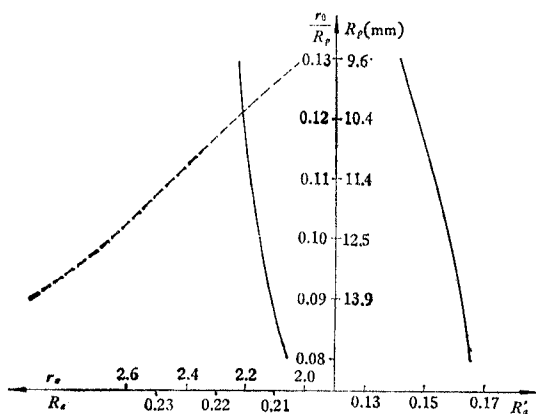


图3 ————均匀区归一化注半径与过渡区入口归一化注半径的关系曲线, $\frac{r_0}{R_p} - R_a$
 -----屏蔽板半径与过渡区入口注半径的关系曲线, $R_p - r_a$

Fig. 3 ———— $\frac{r_0}{R_p} - R_a$ Curve
 ----- $R_p - r_a$ Curve

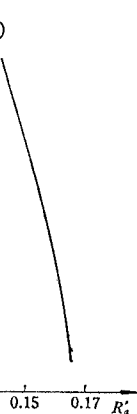


图4 均匀区归一化注半径与过渡区入口斜率的关系曲线,
 $\frac{r_0}{R_p} - R'_a$

Fig. 4 $\frac{r_0}{R_p} - R'_a$ Curve

2. 枪出口面处 M_e^2 与 r_a 和 r'_a 的关系曲线

文献[4]中Z系列给出了计算机设计出的不同导流系数、不同静电面积压缩比 M_e^2 的电子枪。我们首先可以从中选出几个导流系数接近设计要求的电子枪(每一个电子枪的 M_e^2 数值都是不相同的), 根据文献[4]给出的外层电子轨迹, 用插值法和数值微分法求出

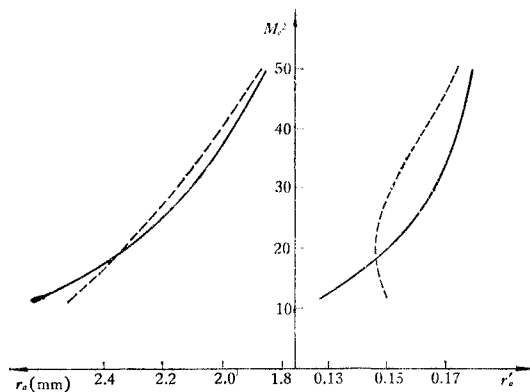


图5 ————静电枪压缩比与阳极出口处半径的关系曲线, $M_e^2 - r_a$
 -----静电枪压缩比与修正后阳极出口处半径关系曲线, $M_e^2 - r'_a$

Fig. 5 ———— $M_e^2 - r_a$ (unmodified)
 ----- $M_e^2 - r'_a$ (modified)

图6 ————静电枪压缩比与阳极出口处斜率关系曲线, $M_e^2 - r'_a$
 -----静电枪压缩比与修正后阳极出口处斜率的关系曲线, $M_e^2 - r'_a$

Fig. 6 ———— $M_e^2 - r'_a$ (unmodified)
 ----- $M_e^2 - r'_a$ (modified)

选定的 a 面处的 r_a 和 r'_a . 一般情况下, 电子枪区电子轨迹与磁力线不重合, 因而在枪出口面 a 上, 电子注半径和斜率在加磁场后都要发生变化, 这时应对 r_a 和 r'_a 作适当修正. 修正 r_a 和 r'_a , 可参考文献[3]中给出的修正曲线. M_c^2 与 r_a 和 r'_a 的关系曲线见图 5 和图 6.

3. 确定 R_p 和 M_c^2 参量

从图 3 和图 4 可以获得一条经过转换的 $r_a-r'_a$ 曲线. 这条曲线是在 P_θ 、 M^2 、 K_c 和 r_0 一定的情况下, 以 R_p 为函数作出的. 曲线上 r_a 、 r'_a 所对应的点仅是上述诸参数一定时, 与不同的 R_p 对应的平衡条件, 并不是曲线上每一点对应的参数值都能找到电子枪与之匹配. 从图 5 和图 6 也能得到一组 $r_a-r'_a$ 曲线, 它是 M_c^2 的函数, 它仅表明在 r_c 一定的情况下, 在 M_c^2 取不同值时, 可能有的 r_a 和 r'_a . 我们把两条曲线画在同一张图, 即图 7 上. 这两条曲线的交点确定的 r_a 和 r'_a 才是既满足平衡条件, 又是电子枪可能提供的参数. 由交叉点确定的 r_a 和 r'_a 可求出相应的 R_p 和 M_c^2 . 这样确定的电子枪和磁系统就能很好匹配.

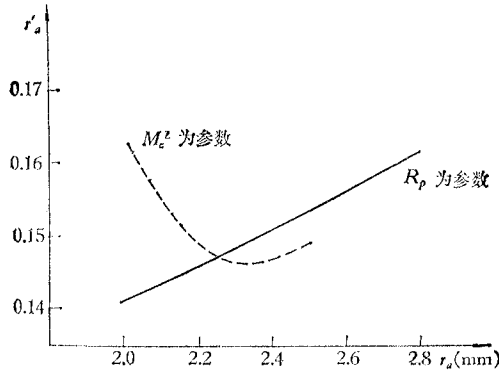


图 7 ————过渡区始端匹配条件
-----电子枪出口面参数

Fig. 7 ————The matched condition at the beginning of the transition region
-----The parameters of the electron gun at the outlet

四、设计举例

电子光学系统设计参数为.

$$P_\theta = 1.4 \mu\text{P}, \quad V_a = 26.9 \text{ kV}, \quad K_c > 0.8, \quad M^2 > 25, \quad r_0 = 1.25 \text{ mm}.$$

设计中 K_c 选为 0.85, 枪出口面 a 选在离阴极面 C 10.4 mm 处, M^2 取 25.

1. 准备磁场分布的归一化曲线 $F(Z)$, 见图 2.
2. 由计算机解式(8)轨迹方程, 作出 $\frac{r_0}{R_p} - R_a$ 和 $\frac{r_0}{R_p} - R'_a$ 曲线, 见图 3 和图 4.
3. 取 $r_0 = 1.25 \text{ mm}$, 作出 $R_p - r_a$ 曲线. 图 3 中虚线.
4. 由文献[4]中 $Z-24$ 到 $Z-27$ 电子枪, 作出出口面处的 $M_c^2 - r_a$ (乘上缩尺系数 0.625 后得到的) 曲线和 $M_c^2 - r'_a$ 曲线, 见图 5 和图 6 中实线.
5. 作 r_a 和 r'_a 的修正曲线, 图 5 和图 6 中的虚线.

6. 确定 R_p 和 M_c^2 为了确定这两个参数,需将上述曲线转换成 $r_a-r'_a$ 曲线,见图 7. 图中实线是以 R_p 为参数求得的,而虚线是以 M_c^2 为参数求得的. 这两条曲线的交点处对应的 R_p 和 M_c^2 就是要求的值. 从图 7 中得 $r_a=2.22$ 和 $r'_a=0.147$ (这里 r'_a 取绝对值,因两条曲线是从两个方向求出的,对同一斜率差一符号),可以查出 $R_p=10.4\text{mm}$ 和 $M_c^2=26$.

7. 在计算机上作最后的调整 由于图 5 和图 6 中的 r_a 和 r'_a 及其修正均有一定的误差,为了获得尽可能好的匹配,需要将实际的磁场加入电子枪,一起在计算机上进行计算,对 M_c^2 和电子枪相对于磁系统的位置作少量的调整. 在计算机上调整以后,获得了 $K_c > 0.8$, 波动小于 1% 的电子光学系统.

五、讨 论

本文提出的方法,同样适用于线包均匀磁场聚焦部分屏蔽流的设计. 在使用这个方法设计部分屏蔽流电子注的过程中,上面设计举例的第 6 步可能会出现两条曲线不相交的情况. 这表明所选用的系统设计参数不适合,找不到相匹配的电子枪. 这时必须改变系统设计参数,重新进行设计. 一般对参数稍作修改,就能找到适合的电子枪. 本设计方法也能用于永磁周期磁场部分屏蔽流的设计,但由于周期磁场部分屏蔽流有它自己的特点,还需要在本方法的基础上作一些工作. 用上述方法为一速调管放大器设计了永磁均匀磁场聚焦部分屏蔽流电子光学系统,并用于制管,结果表明电子光学系统性能稳定可靠,直流通过率在 99% 以上,其它有关指标也都达到了要求.

本项工作得到江钧基同志的鼓励和帮助,在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] V. Bevc, J. L. Palmer and C. süsskind, the Journal of the British I. R. E., **18** (1958), 697.
- [2] И. В. Алямовский 著,黄高年译,电子注与电子枪,电子管技术编辑组,1974 年.
- [3] 电子管手册编委会,微波管电子光学系统设计手册,第五章,国防工业出版社,1981 年.
- [4] 电子管手册编委会,强流电子枪优选系列,国防工业出版社,1979 年.

A METHOD OF THE DESIGN OF ELECTRON BEAMS FROM PARTIALLY SHIELDED CATHODE WITH UNIFORM MAGNETIC FOCUSING FIELD

Yuan Guang-quan

(Institute of Electronics, Academia Sinica)

This paper describes a method of the design of the transition region of the electron beams from partially shielded cathode. This method is applicable to magnetic focusing structures of the axisymmetric high-density electron beam. Through synthetical choice of the parameters of a magnetic system and an electron gun, a optimum matching between the magnetic and the electron gun is obtained. So good results are given: a shielding coefficient K_c is higher than 0.8, a ripple ratio of the electron beams is less than 0.01.