

微波管电子光学系统 设计手册



国防工业出版社

73.6x

709

-5

微波管电子光学系统设计手册

电子管设计手册编辑委员会 编



国防工业出版社

1109435

内 容 简 介

本手册叙述强流电子注的产生和聚焦的基本问题,讨论轴对称收敛型电子枪、磁控注入式电子枪和M型电子枪的设计理论和设计方法,叙述轴对称实心电子注的均匀磁场聚焦、周期永磁聚焦、单倒向永磁聚焦、静电聚焦等几种常用的聚焦系统的设计方法,深入研究了均匀磁聚焦的过渡区设计方法,给出了相应的设计曲线和设计实例。

手册还叙述了近代计算机数值计算方法和分析器实验技术在微波管电子光学系统设计中的应用。

本书适用于从事研制微波管电子光学系统的工程技术人员阅读,也可供电子物理、电真空器件专业的高等院校师生参考。

0024/01

微波管电子光学系统设计手册

电子管设计手册编辑委员会 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张12³/₈ 插页2 313千字

1981年5月第一版 1981年5月第一次印刷 印数:0,001—3,600册

统一书号:15034·2111 定价:2.05元

序 言

微波管电子光学系统主要包括电子枪、聚焦系统和电子注射极。它们的设计理论、方法以及强流电子注的性能是强流电子光学研究的主要内容。

强流电子光学是由于研制微波器件的迫切需要而发展起来的，始于二十世纪四十年代。目前，它不仅应用于微波器件中，而且还应用于高能加速器、电子束激光、电子束加工机和电子束轰击冶炼等方面。强流电子光学在五十年代和六十年代进展特别显著，在理论、实验研究和实际应用方面，都积累了大量的资料。

本手册仅从工程设计的角度出发，简要论述了有关微波管电子光学系统设计的基本理论和方法，并按照微波管中常用的电子枪及聚焦系统的设计方法分类加以叙述，力求做到理论和实践相结合，尽可能地给出设计的具体步骤、公式、曲线和图表，以供从事这方面实际工作的读者参考。

参加本手册的编写单位有中国科学院电子所、1412所、北京电子管厂、邮电部506厂、西安电讯工程学院等，成都国光电子管厂、清华大学等提供了部分资料。参加编写的主要人员有朱协卿、张荫钦、赵立平、康念坎、李声沛、夏福根、林云起、邬显平、王化民、忻宝禄、尤世杰。电子管设计手册编委会的黄国祥、吴鸿适审阅了书稿，最后由朱协卿、张荫钦对全书进行了修改和整理。

在编写设计手册的过程中，许多单位的领导和同志给予了支持和帮助，对此，我们深表谢意。由于编写人员水平有限，手册中难免存在某些缺点甚至错误，希望广大读者批评、指正。

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 微波器件中的电子注	1
1.1.1 强流电子注和导流系数	1
1.1.2 微波器件中电子注的四个区段	2
§ 1.2 基本方程	5
1.2.1 麦克斯韦方程	5
1.2.2 运动方程	7
1.2.3 电流连续性方程	7
1.2.4 强流电子光学基本方程组	8
1.2.5 缩尺原理	9
§ 1.3 轴对称和平面对称系统	10
1.3.1 轴对称系统	10
1.3.2 平面对称系统	17
第二章 轴对称收敛型电子枪的设计	19
§ 2.1 引言	19
§ 2.2 电子枪的参量	19
2.2.1 电子枪的主要参量	19
2.2.2 电子注的层流性	20
2.2.3 阴极半锥角和阴阳极曲率半径	21
2.2.4 表征热速度大小的 PU/T 量	21
§ 2.3 电子枪的设计方法	21
2.3.1 三种设计方法及其比较	21
2.3.2 改善层流性问题	36
2.3.3 加大半锥角设计方法的半锥角加大量和枪参量	39
2.3.4 几点说明	43
§ 2.4 设计步骤和实例	45
2.4.1 阴阳极曲率半径之比 R_K/R_a 和阴极半锥角 θ 的选取	45
2.4.2 电解槽模拟确定外电极形状	46
2.4.3 计算机数值计算和电子注分析器热测	48
2.4.4 设计实例	50

§ 2.5	栅控电子枪	56
2.5.1	栅控枪原理	56
2.5.2	栅控枪的设计方法	57
2.5.3	设计实例	64
第三章 磁控注入式电子枪的设计		67
§ 3.1	引言	67
§ 3.2	设计方法	68
3.2.1	卡诺平面空间电荷流理论及其设计方法	68
3.2.2	轴对称空间电荷流理论及电极设计方法	78
§ 3.3	阳极调制结构过渡区的设计	83
3.3.1	枪的截止特征	84
3.3.2	过渡区设计	84
§ 3.4	设计实例	85
3.4.1	电子枪参量的计算	85
3.4.2	平面电极形状和轨迹的计算	86
3.4.3	轴对称电极的计算和电解槽模拟设计	87
3.4.4	阳极调制结构过渡区的计算	88
3.4.5	分析器热测实验结果	88
第四章 M型电子枪的设计		90
§ 4.1	引言	90
§ 4.2	M型电子枪的基本设计要求	90
4.2.1	布里渊电子注的特性	91
4.2.2	电子注在互作用空间的位置和厚度	92
§ 4.3	两种经典的电子枪的理论设计	94
4.3.1	查理斯枪的设计	94
4.3.2	卡诺枪的设计	96
§ 4.4	M型电子枪的实用设计方法	102
4.4.1	一般设计法	102
4.4.2	近似缩尺设计法	105
§ 4.5	设计实例	106
4.5.1	一般设计法的实例	106
4.5.2	卡诺短枪设计实例	108
4.5.3	近似缩尺设计实例	110
第五章 轴对称实心电子注均匀磁聚焦系统的设计		114
§ 5.1	引言	114
§ 5.2	均匀磁场聚焦的基本原理	114

5.2.1	基本方程和均匀磁聚焦的三种形式	114
5.2.2	三种流的特性	117
5.2.3	电子注的波动	121
5.2.4	电子注的刚度	132
5.2.5	积分傍轴轨迹方程求解电子轨迹的数值算法	134
§ 5.3	均匀磁聚焦过渡区的设计方法	135
5.3.1	过渡区的意义	135
5.3.2	设计过渡区的方法	136
5.3.3	热速度效应对过渡区设计的影响	145
5.3.4	过渡区始端条件修正	146
§ 5.4	磁聚焦过渡区的设计步骤和实例	156
5.4.1	设计步骤	156
5.4.2	设计实例	161
§ 5.5	磁系统的设计	167
5.5.1	螺管线包系统	168
5.5.2	电磁铁系统	171
5.5.3	永久磁体系统	176
第六章	周期永磁聚焦系统的设计	183
§ 6.1	引言	183
§ 6.2	周期磁聚焦系统中的电子注	184
6.2.1	傍轴轨迹方程	184
6.2.2	电子注波动的分析	186
6.2.3	周期 L 和峰值磁感应强度 B_0 的选择	191
§ 6.3	过渡区的“匹配”问题	191
6.3.1	屏蔽流的过渡区	191
6.3.2	非屏蔽流的过渡区	193
6.3.3	端部效应	194
§ 6.4	周期永磁聚焦系统的设计	194
6.4.1	极靴头内半径 r_1 的选择	195
6.4.2	极靴头间距 g 的选择	195
6.4.3	磁环厚度 d 的选择	195
6.4.4	磁环材料的选择	197
6.4.5	极靴头外半径 r_2 的估算	201
6.4.6	磁环内半径 R_1 的选择	201
6.4.7	磁环外半径 R_2 的计算	201
6.4.8	极靴外半径 r_3 的选择	210
§ 6.5	关于磁环工作点的一些讨论	210

6.5.1	不可逆温度效应	211
6.5.2	工作点与自退磁点之间的关系	212
§ 6.6	影响电子注流速率的因素	213
6.6.1	磁系统的影响	213
6.6.2	电子注非层流性的影响	214
6.6.3	对中的影响	214
6.6.4	收集极返回电子的影响	215
6.6.5	高频散焦的影响	215
§ 6.7	周期永磁聚焦系统调测中的几个问题	216
6.7.1	轴上磁感应强度的测量	216
6.7.2	组装磁系统中的问题	217
第七章 单倒向永磁聚焦系统的设计		219
§ 7.1	引言	219
§ 7.2	补偿原理和设计方法	220
7.2.1	补偿原理——附加磁场扰动	220
7.2.2	扰动量的计算	221
7.2.3	倒向区的计算	229
7.2.4	负扰动的扰动环尺寸设计	230
7.2.5	设计步骤	232
7.2.6	计算实例	233
§ 7.3	校直器的设计	234
7.3.1	横向场的测量	235
7.3.2	校直器原理	235
7.3.3	盘状校直器的设计	236
§ 7.4	实例	239
7.4.1	倒向区和扰动区的设计结果	240
7.4.2	校直器设计结果	240
7.4.3	主磁路的设计结果	240
7.4.4	单倒向永磁聚焦系统的结构	241
第八章 静电聚焦系统的设计		242
§ 8.1	引言	242
§ 8.2	静电聚焦原理	243
8.2.1	平直流法的原理	244
8.2.2	单透镜法的原理	246
§ 8.3	设计方法	247
8.3.1	由电子注平衡条件求解静电场	247

8.3.2	求解外电极形状	254
§ 8.4	设计步骤和注意事项	256
8.4.1	设计步骤	256
8.4.2	设计实例	258
8.4.3	设计注意事项	260
§ 8.5	静电聚焦系统的高频散焦问题	261
第九章 计算机的数值计算方法		265
§ 9.1	引言	265
§ 9.2	轴对称电子枪的计算	265
9.2.1	基本方程	265
9.2.2	计算机的程序框图	267
9.2.3	计算电位	267
9.2.4	计算阴极发射电流	274
9.2.5	计算电子轨迹	275
9.2.6	空间电荷密度的计算	284
9.2.7	热速度对电子注发散影响的计算	288
§ 9.3	M型电子枪的计算	290
9.3.1	基本方程	290
9.3.2	计算电位	291
9.3.3	计算阴极发射电流密度	292
9.3.4	计算轨迹	294
9.3.5	计算空间电荷密度	296
§ 9.4	轴对称磁系统的计算	298
9.4.1	基本方程	298
9.4.2	计算机程序框图	300
9.4.3	计算磁通函数	300
9.4.4	计算永久磁体的体电流密度 J_{Hp} 和面电流密度 K_H	303
9.4.5	铁磁体的磁导率	304
9.4.6	轴上磁感应强度的计算	305
第十章 实验方法		306
§ 10.1	引言	306
§ 10.2	电解槽模拟	307
10.2.1	电解槽的模拟原理	307
10.2.2	模拟方法	309
10.2.3	利用无源斜槽确定轴对称直线流外电极的方法	311
§ 10.3	O型电子注的热测方法	312
10.3.1	电子注分析器设备	312

10.3.2	测量电子枪参量的方法	314
10.3.3	热测实验中应注意的几个问题	323
§ 10.4	M型电子注的热测方法	326
10.4.1	分析器设备	326
10.4.2	测量方法	328
10.4.3	实验中的一些问题	331
附录—	脉冲电流互感器	335
附录一	实用单位制下基本量的计量单位和基本常数	336
附录二	平板二极管、圆柱二极管和球形二极管	337
附录三	各种坐标下部分矢量分析的公式	358
附录四	轴对称系统轨迹方程的推导	363
附录五	空间电荷扩散曲线	368
附录六	带孔屏蔽板型磁场分布曲线	373

第一章 概 论

§ 1.1 微波器件中的电子注

1.1.1 强流电子注和导流系数

微波器件中的强流电子注，通常有圆柱状(实心注)、管状(空心注)和带状(带状注)三种。由于微波器件是通过电子注和高频电磁场的互相作用，将电子注的直流能量转换为高频能量的器件，因而就存在着如何产生、维持和收集电子注的问题。

微波器件可以分为线性注器件(O型器件)和正交场器件(M型器件)两大类。本书主要讨论O型器件和注入式M型器件中电子注的设计方法。

强流电子光学和弱流电子光学都是研究电子在电场和磁场中的运动规律。它们的主要区别是：

(1) 前者所研究的注导流系数大，须要考虑电子间的互相作用(空间电荷效应)；后者导流系数小，通常可以忽略空间电荷效应；

(2) 前者以研究电子注的产生、维持和收集问题为主，后者以研究电子束的成象特性为主。

导流系数是电子注的一个重要特性，它是电子注空间电荷强度的度量。导流系数定义为

$$P = I / U^{3/2} \quad (1.1)$$

式中 I ——注电流(安)；

U ——注电压(伏)。

导流系数的单位为朴(P)，通常导流系数的数值很小，故常使用另一单位——微朴(μP)。1微朴 = 10^{-6} 朴，以下除特别说明外，均以微朴为单位。

1109435

一般认为，导流系数在 0.1 微朴以上的，属于强流电子注，在 0.001 微朴以下者，属于弱流电子束（如显象管、摄像管、示波管、电子显微镜和夜视器件中的电子束）。强流电子光学和弱流电子光学两种处理方法的侧重点有所不同；但是，随着研究工作的深入，两种处理方法互相渗透的情况越来越多。在绝大多数微波器件中，导流系数都在 0.1 微朴以上。

除特别注明外，手册中的单位全部采用国际单位制，在这种单位制下的计量单位和基本常数见附录一。

1.1.2 微波器件中电子注的四个区段

从强流电子光学的观点来看，微波器件中的电子注可以分为下述四个区段^[1]（见图 1.1）。

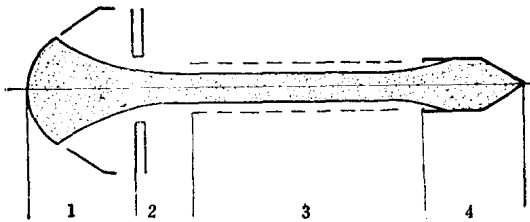


图 1.1 微波器件中的电子注

1—电子枪区；2—过渡区；3—作用区；4—收集极区。

电子枪区 电子枪由阴极、聚焦极和阳极构成。电子自阴极发射出来，受到阳极的加速作用。聚焦极的电位通常等于或接近于阴极电位，它的作用是限制电子注的形状。在这个区域内，存在着各电极和电子注自身空间电荷建立的静电场，有时也存在有磁场。

电子枪设计的基本思想是：首先找到一种适当的空间电荷流模型，见图 1.2(a)，在这种电子流中，电子轨迹都相似，沿轨迹的电位及其对轨迹的法向导数都可求解。然后“切去”多余部分，只留下所需要的电子注，以适当形状的外电极来代替被“切去”那

部分空间电荷所产生的场,维持电子注边界上的电位和电场不变。这样就可以得到所需要的电子注,见图1.2(b)。

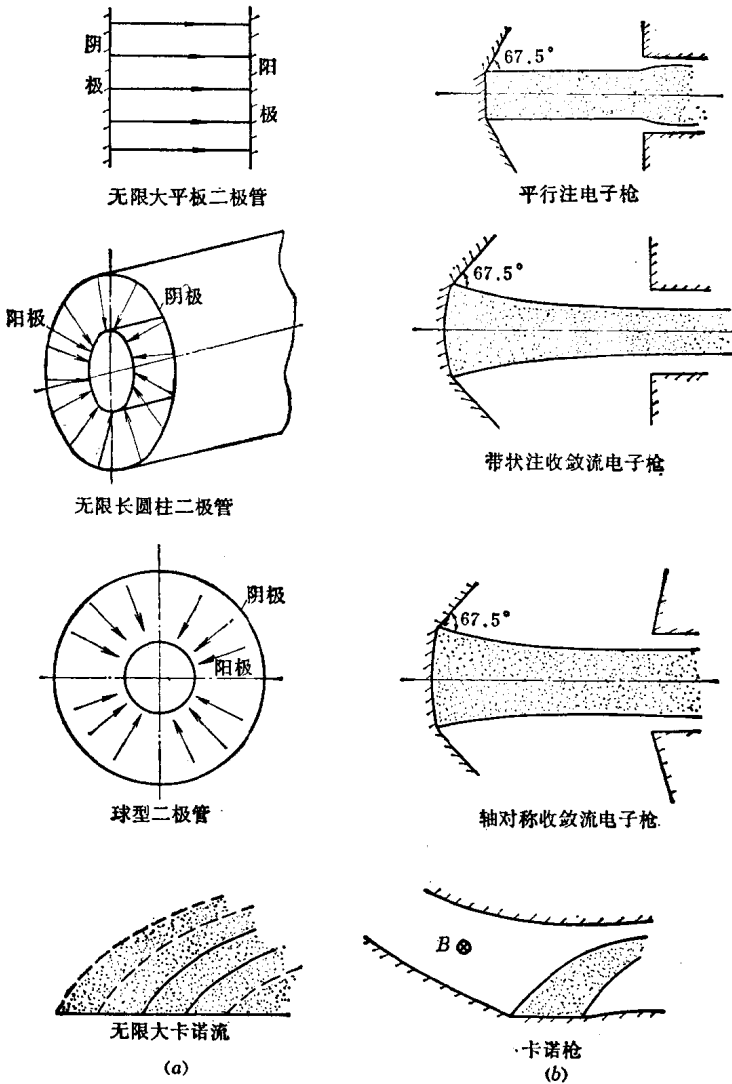


图1.2 电子枪设计的理论模型和实例
(a) 空间电荷流模型, (b) 各类电子枪。

应当指出，实际系统的电极形状和最后形成的电子注都与理论模型有一定的差别。

在附录二中给出了平板二极管、圆柱二极管和球形二极管的沿电子轨迹的电位分布。

过渡区 这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，电子注通过整个过渡区的过程就是电子枪参量与作用区参量之间的匹配过程。理论和实验都表明，这种匹配的好坏对作用区内电子注的好坏有很大的影响。但是，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，所以过渡区的处理既是一个重点，又是一个难点。

作用区 在这个区域内，电子注是在聚焦场中通过。由于聚焦力的作用，使电子注维持一定的形状，同时与高频电磁场互相作用，交换能量，完成了电子注的主要任务——将电源直流能量传递给高频电磁场。在作用区内要求聚焦力和空间电荷发散力（当电子注转动时，还有离心力）之间达到平衡；或是处处平衡（如均匀磁聚焦系统）；或是在一段长度（一个周期）内，聚焦力与发散力作用的总效果平衡（如周期聚焦系统）。

由于电子注与高频场互相作用，电子交出能量，以及高频场对电子注的扰动使部分电子发散，造成一些电子打在高频回路上，造成电子注流通率下降，这就是“高频散焦”问题。要解决这个问题，从电子光学观点来看，就是要求电子轨迹互不交叉和抗扰动性强。

收集极区 与高频场交换了能量的电子在这个区域内被收集极表面所收集。收集极设计的主要问题是收集极内电子轨迹计算，收集极的热状态分析，收集极内二次电子的抑制以及降压收集极的电流分配等。

在O型器件中，电子注与高频场交换能量后，仍有相当大的一部分电子带有较大的动能，这部分能量在收集极上转化为热能。

如果能将收集极电压降下来，就能减少能量的损耗，提高器件的总效率。理想的降压收集极是采用适当的电磁场将经过高频场作用后的电子按速度分类分别收集，使动能大的电子打到低电位电极上，动能小的电子打到较高电位的电极上，从而使电子到达相应电极表面时速度都接近于零。这样，收集极就几乎不消耗能量。本书未包括这部分的内容，有兴趣的读者可参阅参考资料〔1、2〕。

§ 1.2 基本方程

强流电子光学的基本方程由电磁场麦克斯韦方程、电磁场中电子运动方程和电流连续性方程三部分构成。

1.2.1 麦克斯韦方程

在强流电子光学中，一般只研究静态电磁场。在静态条件下，麦克斯韦方程的形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = -\rho \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_H \quad (1.5)$$

式中 \mathbf{D} ——电位移矢量；

\mathbf{E} ——电场强度矢量；

\mathbf{B} ——磁感应强度矢量；

\mathbf{H} ——磁场强度矢量；

ρ ——自由电子电荷密度(取绝对值)；

\mathbf{J}_H ——传导电流密度矢量。

哈密顿算符 ∇ 在各种坐标下的表示式见附录三。

\mathbf{D} 、 \mathbf{E} 及 \mathbf{B} 、 \mathbf{H} 分别满足下列关系式；

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

式中 ϵ ——介质介电常数；

μ —— 介质磁导率。

由方程(1.3) 电场的无旋性, 可引入电位 U , 令

$$\mathbf{E} = -\nabla U \quad (1.6)$$

方程(1.2) 成为

$$\varepsilon \nabla^2 U + \nabla U \cdot \nabla \varepsilon = \rho \quad (1.7)$$

如果所研究的范围仅限于真空中, $\varepsilon = \varepsilon_0$, ε_0 为真空介电常数, 方程(1.7) 变为

$$\nabla^2 U = \rho / \varepsilon_0 \quad (1.8)$$

它称为泊松方程。当不存在空间电荷, 即 $\rho = 0$ 时, 便得到拉普拉斯方程

$$\nabla^2 U = 0 \quad (1.9)$$

泊松方程的积分形式是高斯定理, 它表明电场强度沿封闭表面的积分与封闭表面所限定体积内的总电荷有关。

$$\oint_S \mathbf{E}_n \cdot d\mathbf{S} = -\frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \rho dV = -\frac{Q}{\varepsilon_0} \quad (1.10)$$

式中 E_n —— 封闭表面上的电场强度法向分量;

S —— 封闭表面面积;

dS —— 封闭表面的面积元;

V —— 封闭表面所限定的体积;

dV —— 体积元;

Q —— 体积 V 内包含的总电荷。

由方程(1.4) 磁感应强度的无源性, 可引入磁矢位 \mathbf{A} , 令

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1.11)$$

方程(1.5) 可化为

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_H \quad (1.12)$$

它的积分形式是安培定理, 任何磁系统在真空中某一点 P_0 的磁矢位为

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{1}{r} \mathbf{J}_T dV \quad (1.13)$$

式中 \mathbf{J}_T ——全电流密度矢量（包括传导电流和感应电流）；
 r ——从 P_0 点到体积元 dV 的距离；
 μ_0 ——真空磁导率；
 V ——该磁系统所占的体积。

1.2.2 运动方程

电磁场中电子运动方程为

$$\frac{d}{dt} (m\mathbf{v}) = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1.14)$$

式中 t ——时间；
 m ——电子质量；
 e ——电子电荷量（取绝对值）；
 \mathbf{v} ——电子运动速度矢量。

须要注意的是，当所考虑的系统工作在大于 50 千伏的高压时，电子运动速度可以和光速相比拟，这时必须考虑相对论效应。方程(1.14)中的电子质量 m 应为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\mathbf{v}/c)^2}} \quad (1.15)$$

式中 m_0 ——电子静止质量；
 c ——光速。

1.2.3 电流连续性方程

电流密度矢量定义为

$$\mathbf{J} = -\rho\mathbf{v} \quad (1.16)$$

由于空间电荷既不会凭空产生，也不会凭空消失，因此，电流连续性方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1.17)$$