

多腔磁控管的
计算与设计原理
(谐振腔系统)

国防工业出版社

多腔磁控管的 计算与设计原理

(谐振腔系统)

〔苏〕Д.Е.萨姆索诺夫 著

微波管技术翻译组 译

国防工业出版社

4419.25

序言（节译）

近 15~20 年来，超高频管制造工业，其中包括多腔磁控管的研制和生产，得到了蓬勃的发展。

由于作为超高频振荡源的磁控管结构简单，因此，从雷达到食品工业等许多科学技术部门，都得到了广泛应用。

尽管多腔磁控管的结构简单，但是，其中物理现象却是错综复杂的。磁控管的制造工艺也比较复杂而且至今尚未完善。

在阐述磁控管的物理现象时，理论上通常不考虑真空度、阴极的有限发射能力等工艺因素。

在建立磁控管的理论时，通常认为管内真空度是理想状态的，阴极的发射能力是无限的。即使在这样的理想化条件下，电子与高频电磁场相互作用的严密而系统的磁控管理论至今尚未建立。

这是因为磁控管的所谓自洽场的问题，至今未能用分析的方法获得解决。在相互作用空间内，电子在恒定的正交电磁场以及迅速改变的交变场中的运动轨迹是很复杂的。这种电子轨迹由许多因素决定，其中包括空间电荷的变化规律。同时，空间电荷的变化与电子运动轨迹又有直接的联系。

问题的复杂性还在于，对阴极附近（空间电荷层内）和阴极上的一些现象了解不多，对管内阴极区域的电子“挑选”机理至今还不清楚。这些复杂现象交织在一起，致使其工作

原理的严格的数学理论未能建立起来。

采用将很多单个电子的运动轨迹按空间和时间取其平均值的方法来求解电子运动的微分方程式，这种理论工作是极有实用价值的^(1,2)。

现在，我们只采用假想的所谓“现象学理论”来解释磁控管的物理现象，并用实验来校对计算值。然而，至今这种理论也不能在已知相互作用空间的几何尺寸、谐振腔系统参数和磁场值时用来严格地计算磁控管的伏安特性、管内的电子导纳以及电子交给回路的高频能量。

在许多情况下，分析磁控管的工作状态和计算管子的输出参数时，可以采用等效电路法，并应用诸如电子复导纳、负载复导纳以及振荡电流的无功和有功分量等概念，即分析和计算普通电子管振荡器时所运用的概念。

在磁控管的研制和生产中，常有这样的情形，即当没有精确关系式时，往往采用大量的近似关系式，借此就能迅速地对输入和输出参数给定的磁控管进行近似的计算。随后，再经过一系列试验，对磁控管的工作状态、相互作用空间、谐振腔系统和输出装置的几何形状等再做一番必要的修正。

正是采用这种方法才产生了各种各样结构、工作状态和波段的多腔磁控管。某些磁控管样品，就其本身的输出参数而言，还是成功的，并且在磁控管技术发展的初期，它们在实际上已成了磁控管的基准结构，借助于这些基准结构仿造出了许多工作状态和输出参数相同或大同小异的新型磁控管。根据现象学理论，对磁控管可以进行电动力学模拟，它们的这种特性是促使磁控管品种增加的一个基本因素。不仅如此，还可以用典型的制作得很好的磁控管来实验校对由磁

控管的近似理论所得到的一些基本计算关系和图示曲线。这样,使得基于劳伦兹-麦克斯韦方程式的磁控管理论逐步具有实用性,并且,由于许多研究者的共同努力,获得了确切的物理结论,进而更确切地阐明了已为实用的关系式。利用这些关系式即能计算磁控管的基本特性:激励电压和工作电压、电子导纳、电子效率、电子频移、储存在回路中以及交给有效负载的高频能量等。

本书的引言(第一章)介绍对作为超高频稳定振荡源的磁控管所提出的一般要求,并叙述磁控管的一些主要特性。

其余五章阐述实际中所遇到的各种类型磁控管谐振腔系统的计算与设计问题。

一些主要计算关系式采用国际单位制(ГОСТ9867-61),而一些辅助计算关系式和图表则采用对使用来说最为方便的形式。同时,电容和电感的单位采用厘米(1毫微亨=1厘米,1微微法=0.9厘米)。

作者

目 录

序言(节译).....	2
第一章 引言.....	7
1. 磁控管的参数和特性	7
2. 脉冲磁控管的振荡稳定性和稳定性	13
3. 决定振荡状态的各因素间的关系	20
4. 磁控管设计的要求	20
5. 多腔磁控管的能量关系	32
第二章 谐振腔系统的类型及其特性.....	38
1. 谐振腔系统的一般特性	38
2. 谐振腔系统振荡模谱的计算方法	43
3. 无隔模带谐振腔系统的振荡模谱	46
4. 有隔模带系统的振荡模谱	52
5. 磁控管的谐振频率方程及互作用空间内的电磁场结构	58
6. 封闭式系统的特性	61
7. 用四端网络法计算有隔模带谐振腔系统的基本特性	63
8. 长阳极系统的特性及其振荡模谱	89
9. 端部空间对系统谐振特性的影响	94
第三章 谐振腔系统工作振荡模式的谐振波长、 波阻抗和品质因数的计算.....	105
1. 无隔模带系统的计算公式、曲线图和列线图	106
2. 根据磁控管输出参数来计算谐振腔系统等效参数的 近似图.....	120
3. 有隔模带谐振腔系统的计算	123

4. 计算谐振腔系统参数的实例	129
5. 根据已知的磁控管输入和输出参数来计算谐振腔系统的 结构参数	137
第四章 磁控管的振荡状态及寄生振荡模的抑制方法	142
1. 磁控管的振荡工作状态	142
2. 磁控管中振荡模式的竞争问题及非工作（寄生）模式的 抑制方法	144
3. 磁控管中谐振空间的固有振荡	154
第五章 阳极块几何尺寸公差的确 定	159
1. 引言	159
2. 选择磁控管零部件几何尺寸公差的方法	160
3. 生产件公差的计算和检验方法	166
4. 锐边缘的倒圆公差	186
5. 关于磁控管阳极块表面的清洗和化学处理	187
6. 关于阳极块加热的某些效应	193
7. 谐振腔系统的加固方法	194
第六章 磁控管阳极块的热状态	197
1. 引言	197
2. 连续波磁控管的热状态和热特性的计算	198
3. 脉冲温度的计算	207
4. 热状态计算的详细说明	212
5. 阳极块的极限热负荷	215
附录	217
参考文献	222

第一章 引 言

1. 磁控管的参数和特性

多腔磁控管广泛地应用在雷达、无线电导航以及各种无线电通信和无线电控制系统中。

目前，从各种运用条件出发，对磁控管的频率稳定性提出了十分苛刻的要求。例如，相邻脉冲的高频振荡频率（在脉冲时间内的平均值）的变化不应大于几十千赫。对动目标雷达系统^[3]中所使用的3厘米波段的磁控管就有这种要求。在这种情况下，相邻脉冲的高频振荡频率的稳定度规定为 $(3\sim 5)\times 10^{-6}$ 。在其他应用磁控管的场合中，也要求有高的频率稳定度。

磁控管应能在使用条件所规定的机械和气候条件下可靠地工作。负载变化对磁控管的稳定度具有很大的影响。同时，磁控管工作的稳定度还由它在设备内的工作状态所决定。

在磁控管和调制器同时工作时，它们会相互影响。实际上常常很难确定破坏发射机正常工作的原因是磁控管还是调制装置（在脉冲信号的发射机中）^[4]。例如，在磁控管的高频振荡的频谱中，造成个别谱线全部或部分漏掉的原因，不仅可能是阴极发射不足，而且常常可能是调制器或调制器部件的工作稳定度遭到破坏。譬如：调制器的电源不稳定或过载、调制器的电压脉冲发生器或脉冲整形级的工作发生故障、电压脉冲的前沿陡度急剧增大（或减小）等等。

磁控管振荡器的振荡状态或者工作状态由下列主要因素所决定：

1. 由阳极块上彼此耦合的谐振腔所构成的谐振腔系统的参数；

2. 在实际真空度和有限发射阴极的条件下，在恒定的正交电磁场中运动并与谐振腔系统的高频场相互作用的电子流；

3. 由真空密封在一起的耦合变压器和不均匀传输线段所构成的能量输出器的特性；

4. 磁控管在设备中的工作条件和工作状态。

磁控管的运用条件包括：

——周围环境的温度、湿度及压强；

——冷却方法，从而也就是磁控管的阳极块和其他结构元件的温度；

——可调磁控管中，振荡频率的调谐速度以及加到调谐机构上的作用力；

——电源电压接通的次序、电源电压的稳定度，以及磁控管所要求的预热时间；

——磁控管在发射机中连续工作的时间，以及磁控管的通断次数；

——磁控管受机械力作用的情况（如振动、冲击等）；

——发射机的线路（用刚管调制还是软管调制等）；

——传输振荡功率的方法（传输线的长度，太长或太短，传输线内的气压大小，终端负载与传输线波阻抗的失配程度）；

——操作人员的技术水平；

——根据磁控管在特殊装置和工作状态下的运用，由技术条件、手册所规定的许多其他因素。

磁控管和发射机的技术条件所规定的磁控管的试验和运用规范包括：

——灯丝电压或灯丝电流及其容许偏离额定值的大小（一般容许偏离范围为 $\pm 10\%$ ）；

——阳极电压及其容许增加的上限；

——阳极电流及其容许偏离磁控管说明书中所规定的额定值的大小（偏大或偏小）；

——磁控管相互作用空间内的磁场强度；

——电压脉冲的持续时间、前沿陡度、顶部形状以及在主脉冲通过之后正或负电压的大小；

——电压脉冲的重复频率或工作比；

——高频负载的驻波系数和相位（负载包括从磁控管的输出法兰盘算起的传输线和吸收器或天线）等等。

在给定的试验条件和工作状态下，一定类型的磁控管其技术条件所规定的参数包括：

——振荡频率或调谐频带；

——输送给有效负载的脉冲功率及平均功率或连续波振荡功率；

——脉冲持续时间；

——效率，其定义为：磁控管输送给有效负载的高频能量与磁控管阳极回路所消耗的能量之比；

——频率牵引度，它表示当具有 1.5 的驻波系数的负载，在其相位改变 2π 时，磁控管振荡频率的变化值（在阳极电流和磁场不变的情况下）。其近似值可用下式来计算：

$$F = \frac{0.417 f_r}{Q_{BH}} \quad (I.1)$$

式中 F ——频率牵引度，兆赫；

f_r ——振荡频率，兆赫；

Q_{BH} ——磁控管回路的外观品质因数，其定义为：储存在回路中的能量与一个振荡周期内损耗在外匹配负载上的能量之比值，再乘上 2π ；

——电子频移，其定义为：在负载的驻波系数小于或者等于 1.1 的情况下，当阳极电流变化 1 安培，而其他各种工作条件不改变时，磁控管振荡频率的变化值，即

$$\text{电子频移} = \frac{\Delta f_r}{\Delta I} \left[\frac{\text{兆赫}}{\text{安培}} \right] \quad (I.2)$$

——频率温度系数，其定义为：当阳极块的温度改变摄氏 1 度时，磁控管振荡频率的变化值（在其他条件不变和负载驻波系数小于或等于 1.1 的情况下），即

$$\text{频率温度系数} = \frac{\Delta f_r}{\Delta T} \left[\frac{\text{兆赫}}{^\circ\text{C}} \right] \quad (I.3)$$

——调谐时的频率热偏移，其定义为：在调谐机构迅速地从一个点移到另一个点（在磁控管的调谐频带之内）的瞬间，所读到的振荡频率的变化值；

——频率热漂移，其定义为：在调谐频带内的某个给定点上，从加上全阳极电压的瞬间开始起，到工作频率稳定地建立起来的时候止，磁控管振荡频率的最大变化值及其符号（在阴极已经预热并且负载驻波系数小于或等于 1.1 的条件下）；

——频率调谐率 S_f ，其定义为：当调谐机构移动 1 毫米

距离时，磁控管振荡频率的变化值：

$$S_j = \frac{\Delta f}{\Delta l} \left[\frac{\text{兆赫}}{\text{毫米}} \right] \quad (1.4)$$

——调谐机构多次地从一个位置转换到另一个位置时，磁控管振荡频率 f_r 的重复性；

——等效静态电阻 R_{cr} 及动态或微分电阻 R_n ：

$$R_{cr} = \frac{U_a}{I_a} \text{ [欧姆]} \quad (1.5)$$

$$R_n = \frac{dU_a}{dI_a} \text{ [欧姆]} \quad (1.6)$$

式中 U_a ——工作点的阳极电压；

I_a ——工作点的阳极电流；

——还有许多附加参数，它们由磁控管在系统中的应用条件所确定，有的要求磁控管工作稳定性好和振荡频率的稳定度高（例如，在动目标雷达系统中，磁控管的附加参数是：相邻脉冲的频率偏移值，高频包络线前沿的起伏，单位时间内的漏脉冲数等等）。

磁控管的参数与它在发射机中的工作状态之间的关系，可由下列特性曲线来说明^(5,6)：

——工作特性曲线；

——负载特性曲线；

——伏安特性曲线；

——频带特性曲线（对可调磁控管而言）；

——灯丝特性曲线；

——调制特性曲线。

所谓工作特性曲线，就是在 I_a-U_a 坐标系中，当各种不

同的磁感应强度 B 值时, 所作出的 $P = \text{常数}$, $f_r = \text{常数}$, $\eta = \text{常数}$ 的曲线族, 因而, 它反映了磁控管的主要输出参数功率 (P)、频率 (f_r) 和效率 (η)——与阳极电压 (U_a)、阳极电流 (I_a) 及磁感应强度 (B) 之间的关系。此时, 假定负载和其他条件是给定的和固定不变的。

所谓负载特性曲线, 就是在给定的阳极电流和磁场保持不变的情况下, 在负载驻波系数的模量和相角的极坐标系中, 所作出的 $P = \text{常数}$, $f_r = \text{常数}$, $\eta = \text{常数}$ 的曲线族, 因而, 它反映了磁控管的主要输出参数与负载参数之间的关系。

所谓伏安特性曲线, 就是在给定的磁场和高频负载保持不变的情况下, 反映阳极电流与阳极电压之间的关系曲线(或曲线族)。

所谓频带特性曲线, 就是反映在调谐频带内磁控管的主要输出参数 (P, f_r, η) 与磁控管调谐机构的位置的关系曲线。

所谓灯丝特性曲线, 就是反映下列关系的曲线:

1) 发射电流及二次发射系数与阴极温度的关系, 它主要决定于所采用的阴极的类型 (氧化物阴极、浸渍阴极等等);

2) 阴极温度与灯丝加热功率的关系, 该关系决定于阴极的结构、基金属和涂层、阴极腿以及灯丝的结构与材料;

3) 没有振荡磁控管 (无恒定磁场) 的阳极电流与阴极温度的关系, 它表示实际磁控管在没有产生振荡时阴极的热发射性能, 此阴极温度是在给定的恒定阳极电压条件下, 借助于阴极腿的引入线加给灯丝的功率而建立的;

4) 振荡磁控管的阳极电流与阴极电流的关系, 该关系

决定于阴极的发射性能，此阴极温度是靠灯丝功率和返轰功率而建立的，

5) 在给定的阴极表面上的温度保持不变的情况下，处于振荡状态的磁控管的灯丝电压与磁控管输入功率之间的关系[●]；

6) 表示磁控管稳定性的参数（相邻脉冲的频率偏移、打火等）与灯丝加热功率间的关系；

7) 停振和起振特性，此特性分别决定在什么样的阴极温度下开始停振和起振（在其他条件是相同的时候）。

所谓调制特性曲线，就是反映磁控管的主要输出参数（振荡频率、功率）与周期性地作用于某个工作状态参数（诸如：电流、电压、脉冲持续时间、脉冲重复频率或电压脉冲幅度）的有限小幅度之间的变化关系，或者与调谐机构的不大的位移之间的关系，或者与对磁控管振荡状态的作用有联系的其他参数之间的关系。此时，假定在引入周期性的小的作用（调制）时，输出参数的平均值也近似地保持不变。

2. 脉冲磁控管的振荡稳定度和稳定性

对于在雷达和控制系统中的运用情况来说，只有这样的脉冲磁控管才能适应它的要求，即在给定的使用状态和使用条件下，能保证它具有振荡的稳定度和稳定性。所以，在进行计算、设计、制造及运用这类多腔磁控管时，必须对这种情况加以特别注意。

下面，我们将比较详细地来解释用于多腔磁控管的所谓振荡稳定度和稳定性的物理概念。

● 通常，把这一关系叫做磁控管的典型灯丝特性。

M. C. 涅曼首先对电子管振荡器的这些概念给出了明确的解释⁽⁷⁾，只是近几年 C. И. 贝奇可夫^(1,6,8)进一步发展了他的理论，把它们用于超高频振荡器。

M. C. 涅曼从确定振荡器稳定振荡状态的频率的公式出发，导出了振荡频率稳定的必要条件[⊙]

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = - \frac{\Delta \sum_i \varphi_i}{\omega \sum_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \omega}} \quad (I.7)$$

式中 $\Delta\omega$ ——在不稳定因素作用下的频率增量；

$\sum_{i=1}^n \varphi_i = 2k\pi$ ——在确定的稳定振荡频率的自激振荡器的闭合

电路（电子管——振荡回路——反馈电路）内的总相移；

$\Delta \sum_i \varphi_i$ ——在不稳定因素的作用下，最小的总相移增量；

n ——在自激振荡器闭合回路中的网络数目；

$i = 1, 2, \dots, n$ 。

考虑到各种不稳定因素（电源、负载的驻波系数和相位等）对振荡频率的部分作用，可把式（I.7）改写成如下的形式：

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = - \frac{\sum_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \alpha} \cdot \Delta\alpha}{\omega \sum_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \omega}} \quad (I.8)$$

⊙ 这里不引用振荡器振幅稳定的条件。

式中 α ——在一定程度上与振荡器频率有关的一个参数。

方程式 (I.8) 的右边部分的分子

$$\sum_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha = \Delta \sum_i \varphi_i$$

它决定不稳定因素 α 对相角 φ_i 的影响程度；方程式 (I.8) 的分母

$$\delta = -\omega \sum_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \omega} \quad (\text{I.9})$$

通常称为振荡器的锁定能力。

振荡器频率稳定的条件为

$$\frac{\partial}{\partial \omega} \sum_i \varphi_i > 0 \quad (\text{I.10})$$

对此，还必须补充一个振荡器振幅的稳定条件。

如果存在多种稳定状态，那末，根据稳定状态的分析就不能确定在实际上将产生哪一种稳定状态。此时，往往会发生无线电技术中众所周知的牵引现象，这种或那种工作状态的产生，将取决于振荡器的“起振过程”〔7，第26页〕。

为了对磁控管工作模式的振荡状态进行定性分析，通常都采用图 I.1 中所给出的等效电路。

采用图 I.1 中的符号，稳定振荡的条件可以写成如下的

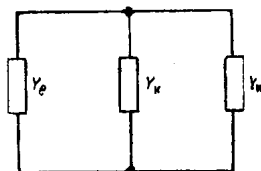


图 I.1 超高频振荡器的等效电路

$$Y_e = G_e + jB_e \text{—复电子导纳,}$$

$$Y_k = G_k + jB_k \text{—回路的复导纳,}$$

$$Y_n = G_n + jB_n \text{—负载的复导纳.}$$

形式:

$$\begin{aligned} G_e + G_k + G_n &= 0 \\ B_e + B_k + B_n &= 0 \end{aligned} \quad (I.11)$$

(I.11) 式的条件确定了磁控管的稳定振荡的振幅和相位。

由于在磁控管中决定振荡状态的许多因素彼此间的内在联系和相互影响, 要分析管内的现象是很复杂的。因此, 至今尚未建立如象经典的电子管振荡器⁽⁹⁾那样的关于磁控管振荡器的振荡稳定度和稳定性的严格理论。

因此, 在对磁控管振荡器中的振荡的稳定性和稳定度进行定性分析的时候, 采用这样一种方法: 只改变状态参数中的一个(例如, 阳极电流), 力求得到一些定量的数值 $\Delta f_r/f_r$ 和 $\Delta A/A$ (A ——振荡的振幅, f_r ——振荡频率) 以及一些关系式, 并根据这些来判断磁控管振荡器工作的稳定度以及稳定工作的范围。此时, 实验者往往忽略许多与磁控管内瞬变过程有关的规律; 而根据一系列稳态的测量结果来判断在这些条件下的振荡状态的稳定性和稳定度。

在进一步分析磁控管中的现象时, 我们将给振荡的“稳定度”和“稳定性”的概念以不同的含义。

一般来说, 与振荡频率和振幅的不大的缓慢变化有关的一些现象, 是指振荡频率的“稳定度”或“不稳定度”; 而与振荡频率和振幅的突变相连系的一些现象, 是指振荡模式的“稳定性”或“不稳定性”。当磁控管处于不稳定(度)工作时, 其振荡状态不发生质的变化(振荡模式保持不变); 而振荡稳定性的任何破坏(即使是很短的时间), 都伴随着停振, 或是转变成一种新的与原来的振荡状态有本质区别的振荡状