

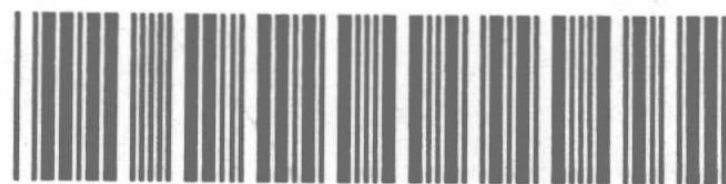
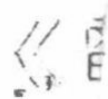
雷达技术讲义

下 册



上海市科技交流站电子电器队

1976.8



30056859



第四章 雷达发射机

4-1 概述	4-1
4-2 磁控管振荡器	4-7
4-3 脉冲调制器的一般概念	4-10
4-4 电子开关调制器	4-14
4-5 离子开关(斩牲)调制器	4-23
4-6 磁性开关调制器	4-29
4-7 脉冲调制器实例	4-34

第五章 雷达接收机

5-1 雷达接收机的组成和作用	5-1
5-2 中频放大器	5-7
5-3 检波器及视频的放大器	5-14
5-4 混频器	5-19
5-5 参量放大器	5-60
5-6 接收机的主要辅助电路	5-92

第六章 雷达显示器

6-1 引言	6-1
6-2 示波管及其辅助电路	6-3
6-3 距离显示器	6-21
6-4 定时——测距组合	6-33

6-5 距离自动跟踪	6-38
6-6 平面位置显示器	6-45
6-7 直角坐标显示器	6-56

第四章 雷达发射机

4-1 概述

雷达发射机一般采用脉冲调制发射机，其传递的信号为一系列短促矩形脉冲。此脉冲频率很低，不能经天线有效的辐射出去。（能有效辐射的交流信号频率是在10000赫芝以上），必须借助于一个能有效辐射的高频载波，把它运载出去。因此雷达发射机应有两个主要部份，即调制器和高频振荡器。调制器产生一定重复频率，一定宽度的矩形脉冲，高频振荡器在此矩形脉冲的控制下产生高频脉冲。这种控制过程，称为调制。调制载波的矩形脉冲称为调制脉冲。载波受调制后，称为已调波。在脉冲制雷达发射机中的已调波就是高频脉冲如图4-1所示。其中 τ 表示高频脉冲的持续时间即脉冲宽度， T 表示脉冲重复周期。表示脉冲工作状态的一个重要参量为重复周期与脉冲宽度之比，称空度比或工作比，通常用 q 表示故：

$$q = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{F\tau}$$

其中 F 为脉冲的重复频率 $F = \frac{1}{T}$

雷达发射机中所采用的脉冲宽度 τ ，一般为十分之几到几个微秒，而重复频率 F 一般为几百到几千赫，因此通常脉冲制雷达发射机的工作比为几百到几千。

雷达发射机的任务，是产生具有一定脉冲重复频率，一定脉冲宽度的大功率高频脉冲。

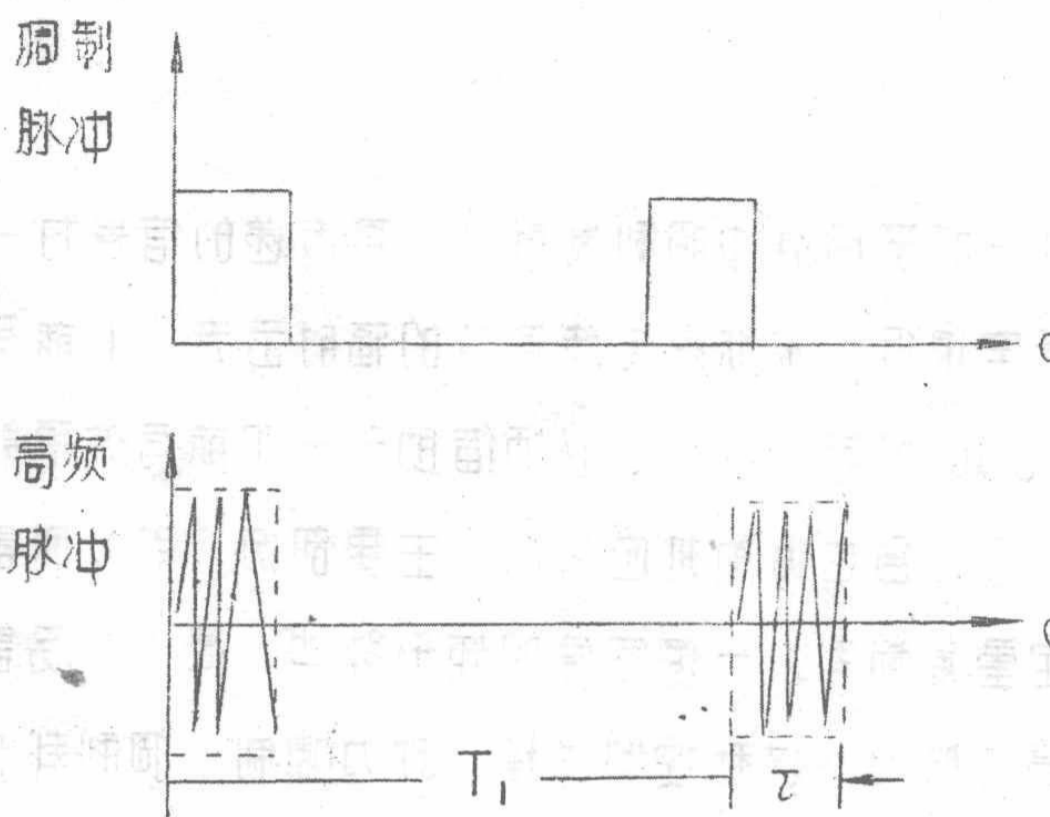


图 4-1 雷达发射机的主要波形

一般雷达发射机，是由高压电源及控制保护电路，调制器和高频振荡器三部份组成。组成方块图如图 4-2 所示。

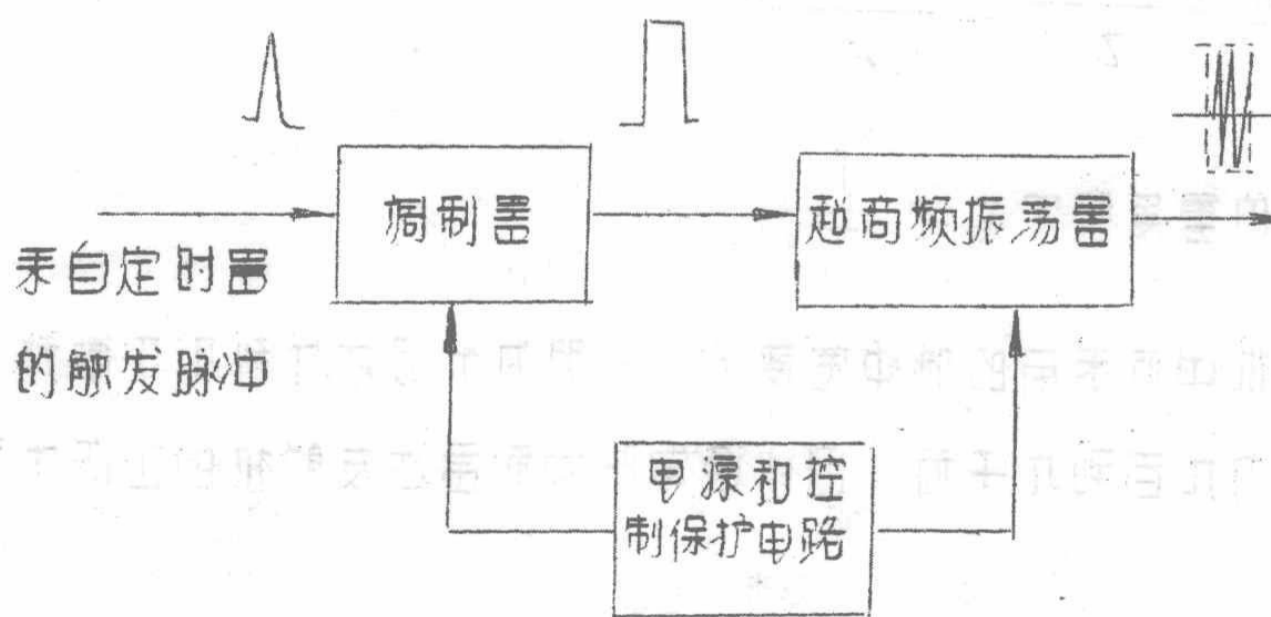


图 4-2 雷达发射机的组成方块图

电源和控制保护电路供给调制器和超高频振荡器所需的电能，用手控制发射机的接电、断电程序，降低发射机的温度，并在发生故障或打开机门时

查机雷等情况下，自动地切断高压电源，以保护机雷和人身的安全。

调制器用来产生一定脉冲重复频率和一定脉冲宽度的高压调制脉冲。调制脉冲控制高频振荡器，使它按脉冲方式工作。良好的调制脉冲波形，要求尽量可能接近矩形。

高频振荡器是在调制脉冲的控制下，产生具有一定脉冲重复频率，一定脉冲宽度的大功率高频脉冲的装置。它只在调制脉冲输入期间才能工作。产生的大功率高频脉冲，并经高频传输系统送至天线，向空间辐射。

高频振荡器，因工作频率很高，输出功率很大，所以在结构上与低频振荡器有很大的差别。由于电子管内部参数及电子飞渡时间的影响，工作在超高频时，不能用普通电子管，而用专门的超高频电子管。低频振荡回路由集中常数的电感、电容组成，当频率很高时损耗增大，效率很低，而超高频回路一般都采用分布参数的元件，如平行双线、同轴线及空腔等。在微波波段内，大功率的高频振荡器采用磁控管，它是一种特殊的振荡管，用空腔作振荡回路。此外灯塔管和调速管，也可作微波波段的功率振荡管。

雷达发射机的参数，是用来表示雷达发射机性能的数据。它是根据不同类型雷达的用途及工作条件而提出的。主要参数有：

工作频率 f 或工作波长 λ

工作频率 f 是高频振荡器的振荡频率，工作波长 λ 是高频电波在一个周期 T 内传播的距离。电波在空间传播的速度 $C=3 \times 10^8$ 米/秒，则 λ 与 f （或 T ）的关系如下式表示。

$$\lambda = \frac{C}{f} = CT \text{ (米)} \quad (4-1)$$

工作波长（或频率）高低与雷达的精确度、分辨能力和探测距离有关。从提高精确度和分辨能力出发，工作频率越高越好。因为工作频率越高，便

用同样大小的天线就可以获得更好的方向性。因此，不但可以提高雷达的侧角精确度和角分辨能力，也可以提高探测距离，工作频率越高，越有条件使用窄脉冲并获得好的脉冲波形，以提高雷达的距离分辨能力和测距精确度。

高的工作频率虽然有上述好处，但是，“我们必须学会全面地看问题，不但要看到事物的正面，也要看到它的反面。”事实上选择高的工作频率，也有不利的一面。例如，电波传播时的衰减增大，使雷达的探测距离减小，气象的干扰会增大，影响对目标回波的观察，等等。因此发射机工作频率的高低，是根据各种雷达的不同用途来选择的。通常雷达在米波段，分米波段的工作频率分别在 $70 \sim 300$ 兆周， $500 \sim 1500$ 兆周，厘米波段和毫米波段 $3000 \sim 10000$ 兆周和 $24 \sim 384$ 千兆周。

脉冲重复频率 F 及脉冲重复周期 T

脉冲重复频率 F 是每秒钟产生脉冲次数，脉冲重复周期 T 是两个相邻脉冲的间隔时间，它与雷达的最大探测距离有关。脉冲重复频率高，脉冲积累数增多，因此显示器荧光屏上的回波清晰，容易发现远距离的微弱回波信号，不过重复频率过高时，也就是重复周期过短。反过来限制了雷达的最大探测距离。所以通常要求脉冲重复周期必须大于电波在雷达与能够观察到的最远目标之间往返一次的时间，否则，可能使远距离的目标出现在近距离的位置上造成严重的测距错误，通常警戒雷达的脉冲重复频率约 $50 \sim 400$ 赫，炮瞄雷达的探测距离较小，脉冲重复频率可高至 2000 赫左右。

脉冲宽度

脉冲宽度 τ 是产生脉冲的持续时间，它与雷达的距离分辨力和最小可测距离有关。

脉冲宽度越大，在脉冲功率一定条件下，发射机输出的能量越大，最大探测距离也就越远，脉冲宽度越小则雷达能分辨在相同方向上两相邻目标的最小距离 ΔR 越小，为了不使两相邻目标的回波重叠，应使

$$\Delta R > \frac{C}{2} \tau \quad \text{即} \quad \tau < \frac{2\Delta R}{C}$$

当目标与雷达站太近时，搜索脉冲（主波）的后沿将与回波前沿混在一起而无法探测目标最近距离，这就造成所谓雷达“盲区”的原因，盲区半径 R_{min} 为：

$$R_{min} > \frac{C\tau}{2}$$

炮瞄雷达要求能准确测定很近的目标，有很好的距离分辨能力，所以脉冲宽度应选得较小 $\tau = 0.02 \sim 2$ 微秒，而远程警戒雷达要求有较大的探测距离，而对距离分辨力要求不高，故一般 τ 选都选得较大，例如选 $\tau \geq 10$ 微秒。

脉冲功率 P_m 是脉冲期间产生的功率，平均功率 $P_{\text{平}}$ 是脉冲功率在一个重复周期内的平均值。发射机的脉冲功率是决定雷达最大测距的一个因素，脉冲功率愈大，最大测距愈远，脉冲功率可以数十瓦到数千瓦（兆瓦）。由于产生脉冲的时间极短，所以平均功率不大，它的数值不仅与脉冲功率有关，也还与脉冲宽度及重复周期有关，关系如下式表示：

$$P_{\text{平}} = \frac{\tau}{T} P_m = \frac{P_m}{q} \quad (4-2a)$$

$$\text{或} \quad P_m = q P_{\text{平}} \quad (4-2b)$$

在实用中，脉冲平均功率往往不容易测量，平均电流容易测量，因而常用测得的平均电流来计算脉冲功率。平均电流 $I_{\text{平}}$ 与脉冲电流 I_m 有如下关系：

$$I = \frac{T}{T} I_m = \frac{1}{T} I_m$$

效率 η :

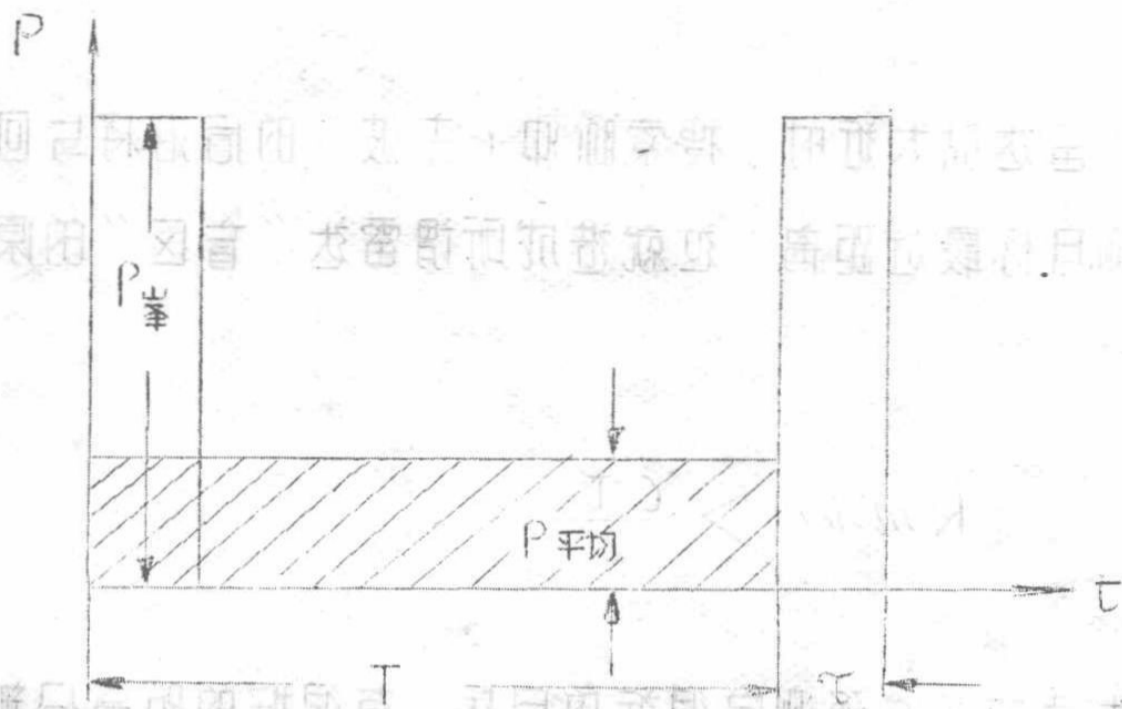


图 4-3 脉冲功率与平均功率

效率是指雷达发射机的输出高频平均功率与输入直流功率之比。由于发射机的输出功率很大，故效率是一个重要指标，如果效率低，则大量的电源功率就被白白浪费掉，提高发射机的效率是改进发射机质量的一个重要方面。

吾多腔磁控管效率为 20 — 60%（一般与工作波长成正比）而脉冲调制器效率为 50 — 70%，故现有大多数雷达发射机的全机效率一般小于 30%。

脉冲波形：

要获得矩形高频脉冲，调制脉冲必须为矩形。实际上只能得到近似矩形的调制脉冲，其近似矩形的程度可用前沿（上升时间） τ_r 、后沿（下降时间） τ_f 及顶部起伏三个参数来决定，图 4-4 所示。采用不同的振荡管时，对上述参数有不同的要求。用磁控管时 τ_r 、 τ_f 不超过 τ 的 0.1 ~ 0.2 倍，顶部起伏 ΔU_m 不超过脉冲幅度 U_m 的 5%；用三极管时 ΔU_m 不超过 U_m 的 10 ~ 15% 时 τ_r 、 τ_f 要求不严。

雷达发射机除以上五个主要参数外，其它还有工作频率稳定性，脉冲重

展频率稳定度等，这里不再讨论。

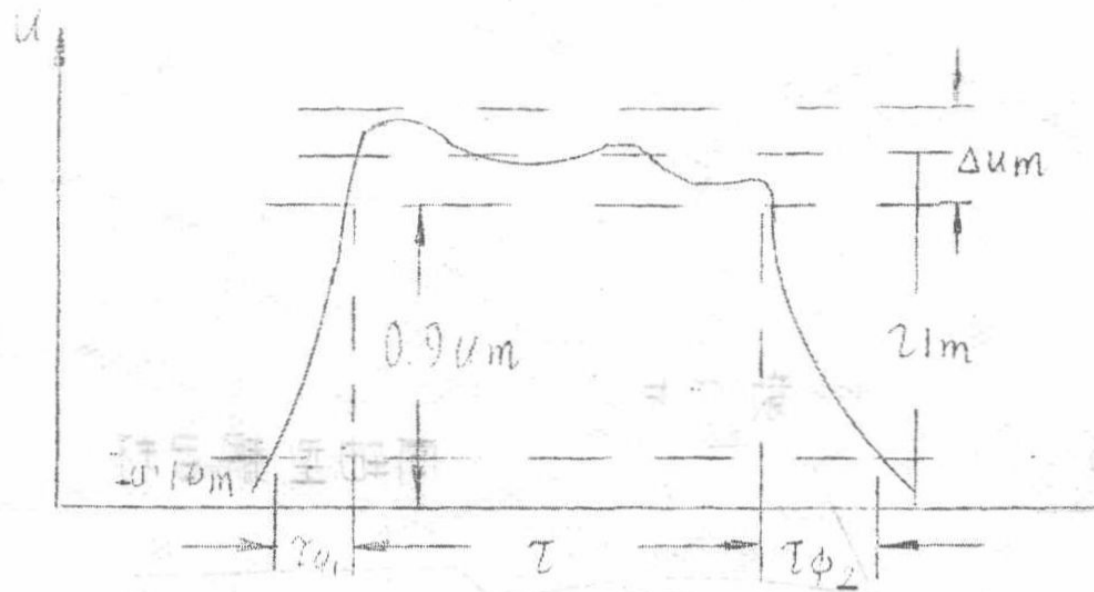


图 4-4 脉冲波形

4-2 磁控管振荡器

磁控管是一种用电场和磁场共同控制电子运动的微波特殊二极管，它本身就是一种振荡器，所以又叫磁控管振荡器。

磁控管产生电振荡的原理，同一般电子管振荡器的比较起来虽然有它的特殊性，但在特殊性中存在着普遍性，在共性中存在着共同性。”它要产生振荡，也必须具备两个必要条件。一是要有一个振荡回路，用来产生电振荡，二是要不断地向振荡回路输送能量，使振荡维持下去。由于磁控管工作频率极高，振荡回路已不能象普通的振荡器那样，采用线圈和电容器来组成，而采用谐振腔，谐振腔的槽体可以起线圈作用，而槽口则可以起电容器的作用，像这种振荡回路输送能量，也不能采用一般的回授放大的办法，而是利用电子在磁场和电场里的运动，以能量转换的办法来维持谐振腔的电振荡。在雷达中，目前都用多腔磁控管作为分米波和厘米波发射机的振荡器。它能以很高的效率（一般 50%~60%）输出直到数千千瓦的脉冲功率。

磁控管由阳极和振荡系统，阴极，磁铁，输出耦合装置等组成。如图4-5 a, b 所示。

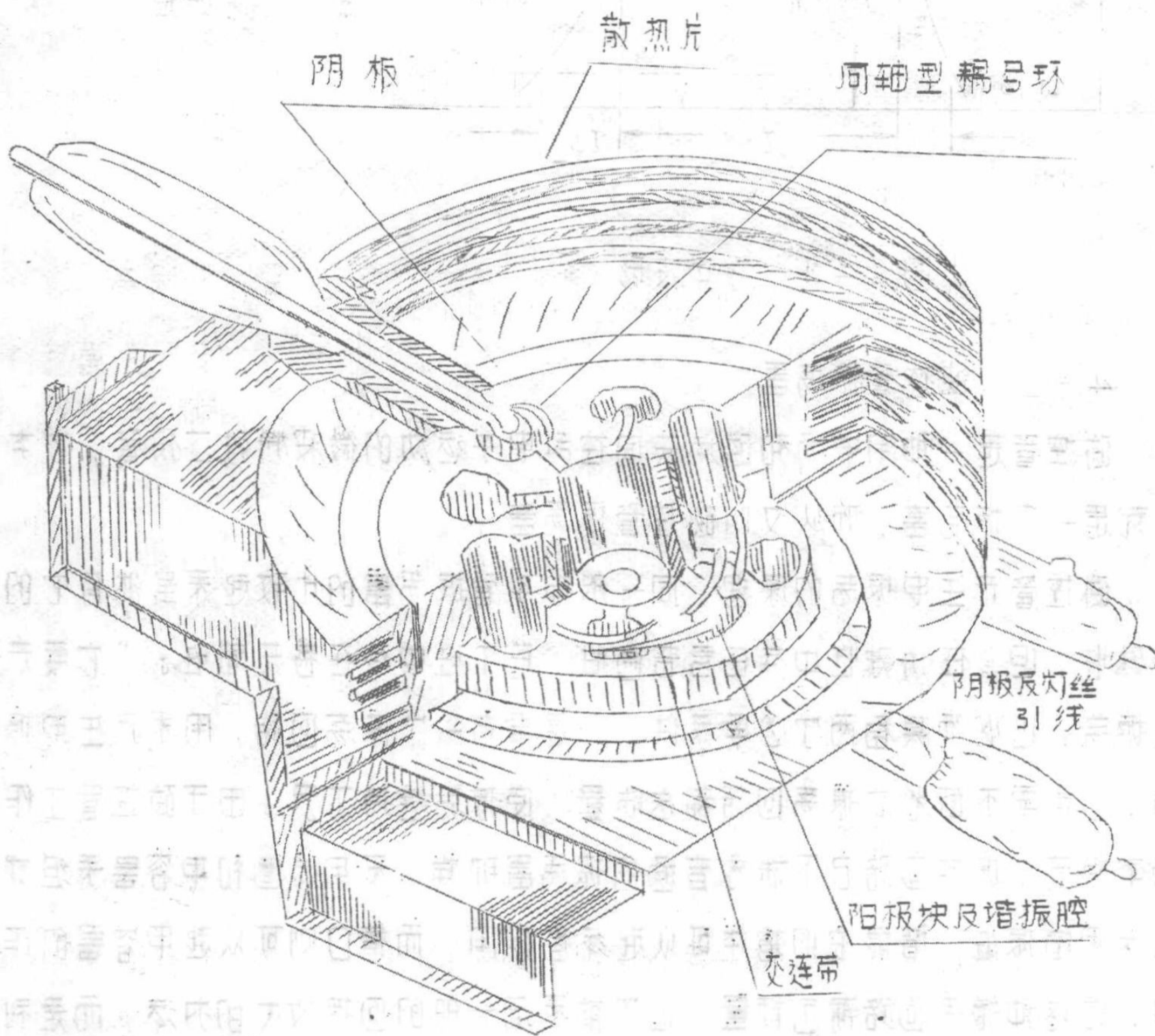


图 4-5 a 磁控的剖面图

阳极是由纯铜制成的中空圆柱体。圆柱体内壁常有偶数个谐振空腔（一般为8~40个）构成磁控管的振荡回路。空腔分洞槽式、翼片式和旭日式

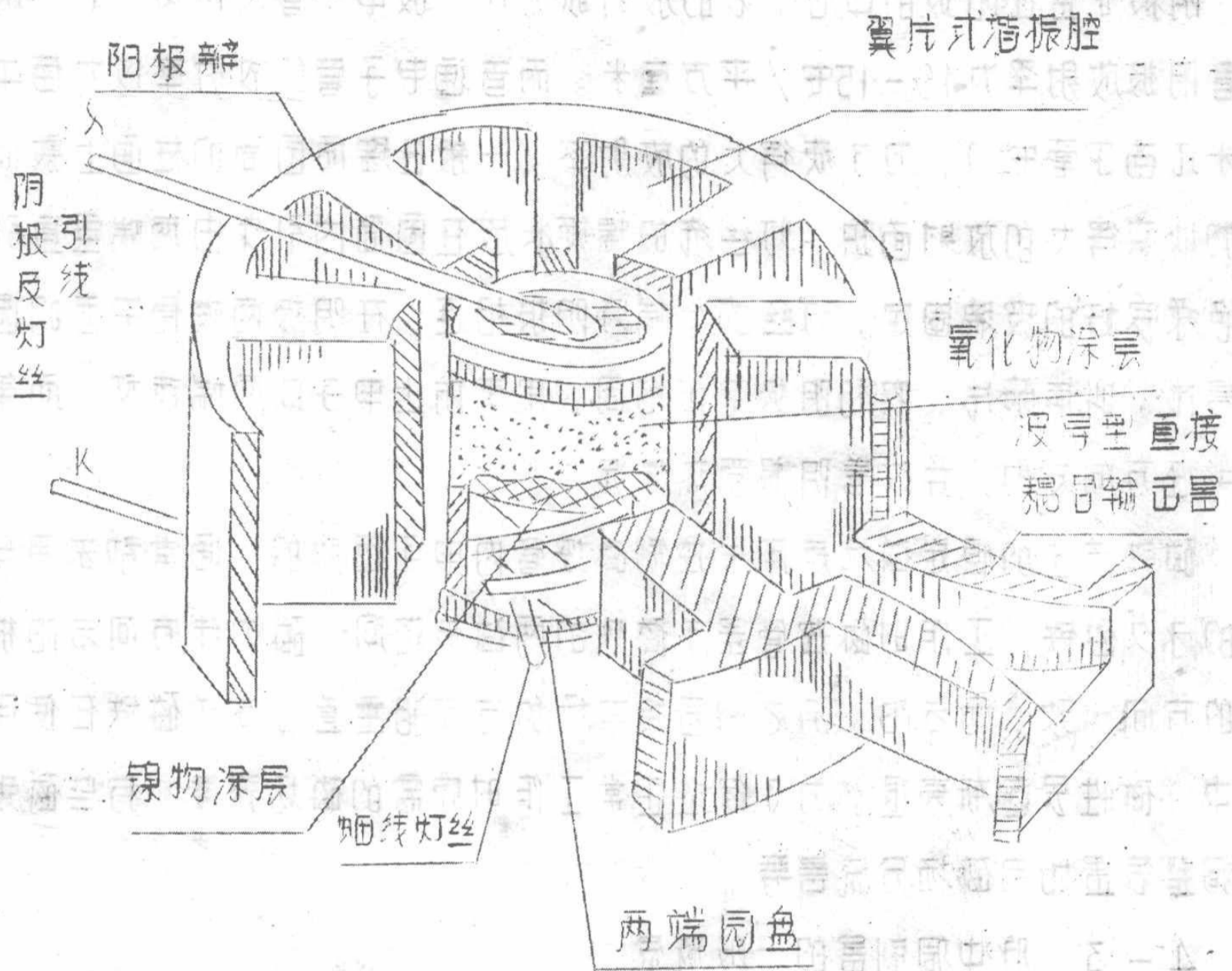


图4-5b 磁控管的内部结构

(或异腔式)等几种形式如图4-7所示洞槽式多用于频率较低的波段中($\lambda > 3\text{cm}$)翼片式和异腔式则多用于频率较高的波段($\lambda < 3\text{cm}$)。为了散发因电子打在阳极块上而产生的热量,阳极外部有散热片,用风冷却,在某些功率很大的磁控管中,由于温升极高,因此必须采用专门的冷却装置,它是由油泵和鼓风机组成,工作时冷却装置不断供给磁控管冷风和冷油,使

管子温度降低。

磁控管的高频能量，是集中在谐振腔中（从磁场和电场形式贮在腔内），因此它由安装在某一个谐振腔内的耦合环和相接的同轴线构成，如图4-5a所示，或通过隙缝与波导相耦合，如图4-5b所示。

阴极安置在阳极的中心，它的放射能力比一般电子管大得多，（一般磁控管阴极放射率为10-15安/平方厘米，而普通电子管的放射率仅为每平方厘米几百丁毫安），为了获得大的放射率，一般在绝缘圆筒的柱面上敷以氧化物以获得大的放射面积，灯丝绕成螺旋状放在圆筒内引线由两端垂直引出，用绝缘良好的玻璃固定，灯丝的一端与阴极相连，在阴极两端有突出的圆形金属片，叫屏蔽片，它和阴极电位相同，用来防止电子向两端运动，而集中向半径方向发射，并改善阴极受热情况。

磁铁产生的恒定磁场是用来控制磁控管内电子运动的，通常都采用马蹄形的永久磁铁，工作时磁控管置于磁铁的两磁极之间，磁力线方向与阳极轴线的方向一致，而与阳、阴之间直接电场的方向相垂直。永久磁铁在使用过程中，磁性会逐渐衰退。为了保证正常工作时所需的磁场强度，有些磁铁具有调整装置如用磁场分流器等。

4-3 脉冲调制器的一般概念

脉冲调制器用来产生调制脉冲，以控制高频振荡器的工作。目前应用的高频振荡器，几乎都采用阳极调制，需要调制器输出大功率的调制脉冲。因此本节只讨论产生大功率调制脉冲的原理。

脉冲调制器有多种类型，但各类调制器中普遍存在的中心问题是相同的，都是如何利用平均功率较小的电源来产生脉冲功率较大的调制脉冲，因而它们的组成部分和工作过程基本相同。毛主席教导我们说：“如果不认识矛盾的普遍性，就无从发现事物运动发展的普遍原因或普遍的根据。”因此在研究各种类型调制器之前，首先说明调制器的组成和产生调制脉冲的一般过程。

根据雷达发射机是工作在脉冲状态的，即在很长的脉冲间隔时间（ T ）内是休止，只是极短的时间（ τ ）工作的特点，这就要求脉冲调制器必须在极短的时间（ τ ）内供给高频振荡器强大的功率，为此脉冲调制器应采用能量储存的原理，即在脉冲之间较长的时间间隔内从电源取得能量，并把它储存起来，然后在对应的脉冲宽度的极短时间内，把能量迅速的放出来并供给高频振荡器。

从这基本原理出发脉冲调制器应由以下几个基本组成部分如图 4-6 所示。下面分别说明各元件的作用。

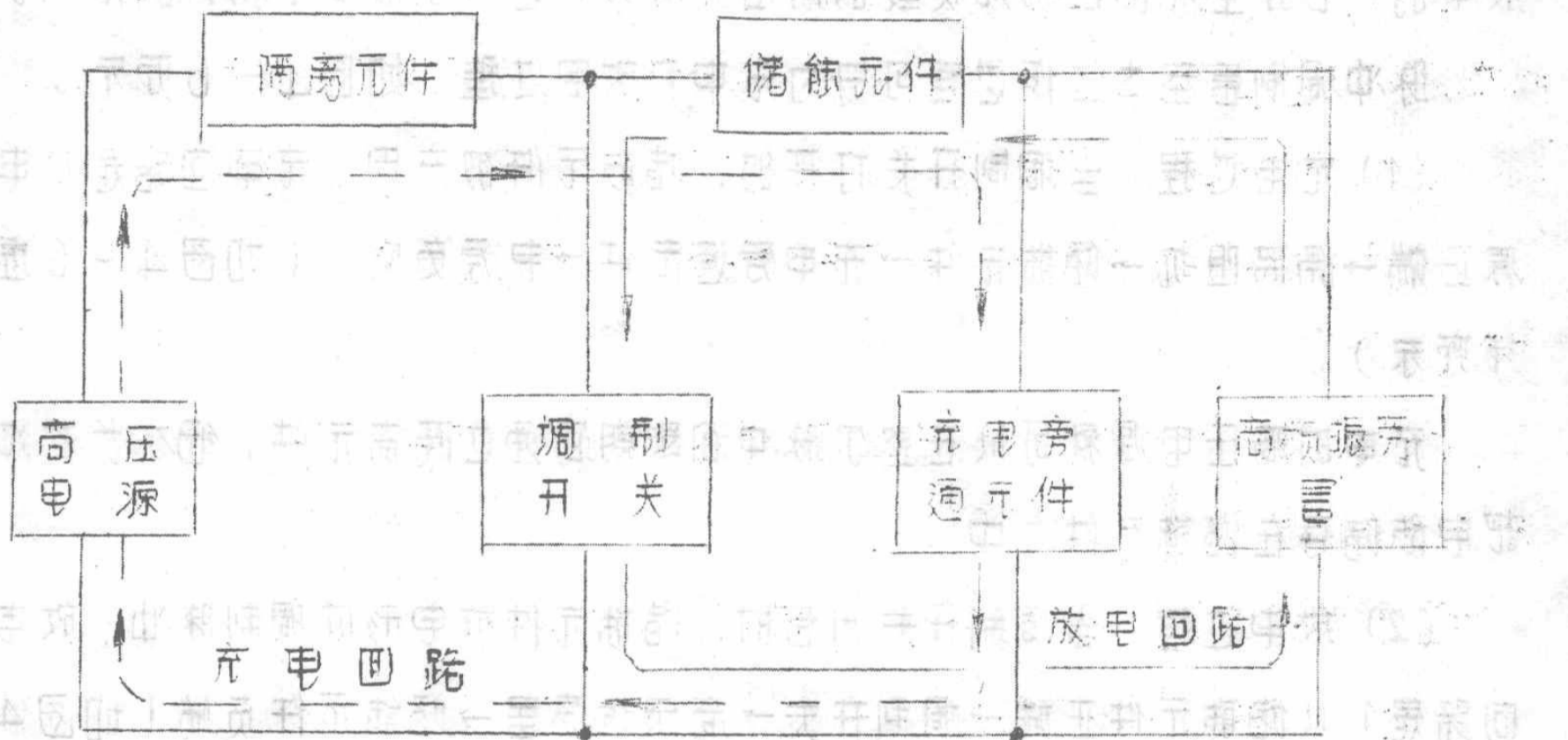


图 4-6 脉冲调制方块图

1. 调制开关——用来控制储能元件的充放电时间，即在较长的期间断开储能元件的放电回路，而在较短的期间接通储能元件的放电回路以形成调制脉冲。调制开关可以是电子开关如真空管三、四极管，也可以是离子开关。如充气的脉冲间流管或火花放电器，也可以是磁性开关。如非线性电感量（或饱和铁芯，电感量）。

2. 储能元件——用来储存能量，即在脉冲间隔期间内从电源取得能量并把它储存起来。然后在极短的脉冲期间（开关闭合）将能量放出来，以便得到大功率的高压脉冲，它可以是电容、电感，或仿直线。

3. 隔离元件——它的作用有二：一是构成储能元件的充电回路，并限制充电电流的数值；二是把高压电源和调制开关隔开，防止开关闭合时将高压电源短路，它可用电感也可用电阻。

4. 充电旁通元件——有电阻，电感和二极管等几种，用来使储能元件充电时构成回路，而不让充电电流经过负载（即高频振荡器），而在储能元件放电时，它所呈现的阻抗比负载的内阻大得多，这对于放电电流影响很少。

脉冲调制器基本工作过程可分为充电和放电过程，如图4-6所示。

(1) 充电过程：当调制开关打开时，储能元件被充电。充电回路是从电源正端→隔离阻抗→储能元件→充电旁通元件→电源负端。（如图4-6虚线所示）。

充电时高压电源就可以在整了脉冲间歇期间通过隔离元件，继续长流地把电能储存在储能元件之中。

(2) 放电过程：当调制开关闭合时，储能元件放电形成调制脉冲。放电回路是1从储能元件正端→调制开关→高频振荡器→储能元件负端（如图4-6实线所示）。

放电时储能元件中储存的能量在短暂时间内很快地通过开关元件供给高频振荡器。强大的脉冲功率从而产生高频振荡。

当储能元件放电以后调制开关打开它又被电源充电重复以上过程。由于充电时间较长（达几百至几千微秒），而放电时间极为短暂（仅零点几微秒至几微秒）。因此，可以利用平均功率较小电源。在较长时间内将能量储存起来，然后在极短的时间内将能量放出，产生较大调制脉冲，如果充电过程比放电过程长 Q （工作比）倍，那么直流电源供给的功率比脉冲时间内振

荡要求的脉冲功率要小 n 倍，这样就能使得我们从平均功率较小的电源，获得大功率的高压调制脉冲供给负载。这不仅使雷达发射机的体积大大的减小，而且制造上也比较经济。

根据调制开关的不同脉冲调制器可分为以下三类：

电子开关调制器

电子开关调制器是以真空管作为调制开关，大部分用电容器作为储能元件，这种调制器又称为电容器刚性开关调制器，刚性是对开关性能的描述，因为真空管的导通和截止，能严格地受激励脉冲的控制，转换非常迅速。正由于真空管具有良好的开关性能，因而调制脉冲的宽度基本上由激励脉冲决定的。

电子开关调制器的优点是调制开关的通断迅速，工作稳定（不易受温度、气压的影响），能产生波形较好的调制脉冲，目前广泛地应用于测距精度较高的炮瞄雷达和导航雷达中。缺点是真空管的内阻较大，调制器的效率较低，输出功率较小，并且需要有产生激励脉冲的激励器。

离子开关调制器

离子开关调制器是以间流管或火花放电管等离子器件做为调制开关调制器，由于离子器件的通和断，即电离和消电离都需要一定的时间，开关性能较差，因而这和调制器中常采用仿真线作储能元件，借以控制脉冲的宽度。为此离子开关调制器又称为仿真线软性开关调制器。

离子开关同电子开关相比优点是内阻很小，能通过的电流大，所以离子开关调制器具有功率大，效率高的优点，可用于探测距离较远的警戒雷达和引导雷达。离子开关的缺点是不能立即通断，并且通断的时机容易受温度、气压的影响，性能不够稳定。

磁性开关调制器

磁性开关调制器是用饱和铁芯电感器作为调制开关，饱和铁芯电感器在

未饱和时感抗很大，而饱和后感抗很小，所以它能作为开关使用，这种开关也能通过很大的电流，并且结构简单牢固，除具有离子开关优缺点外，还具有工作可靠，使用寿命长的优点，适用于远距离操縱的警戒雷达。缺点则是由于本身呈现一定感抗对调制脉冲波形有一定影响。

4-4 电子开关调制器(刚性调制器)

图4-7a是电子开关调制器的电路，图中真空管 G_1 是调制开关(亦

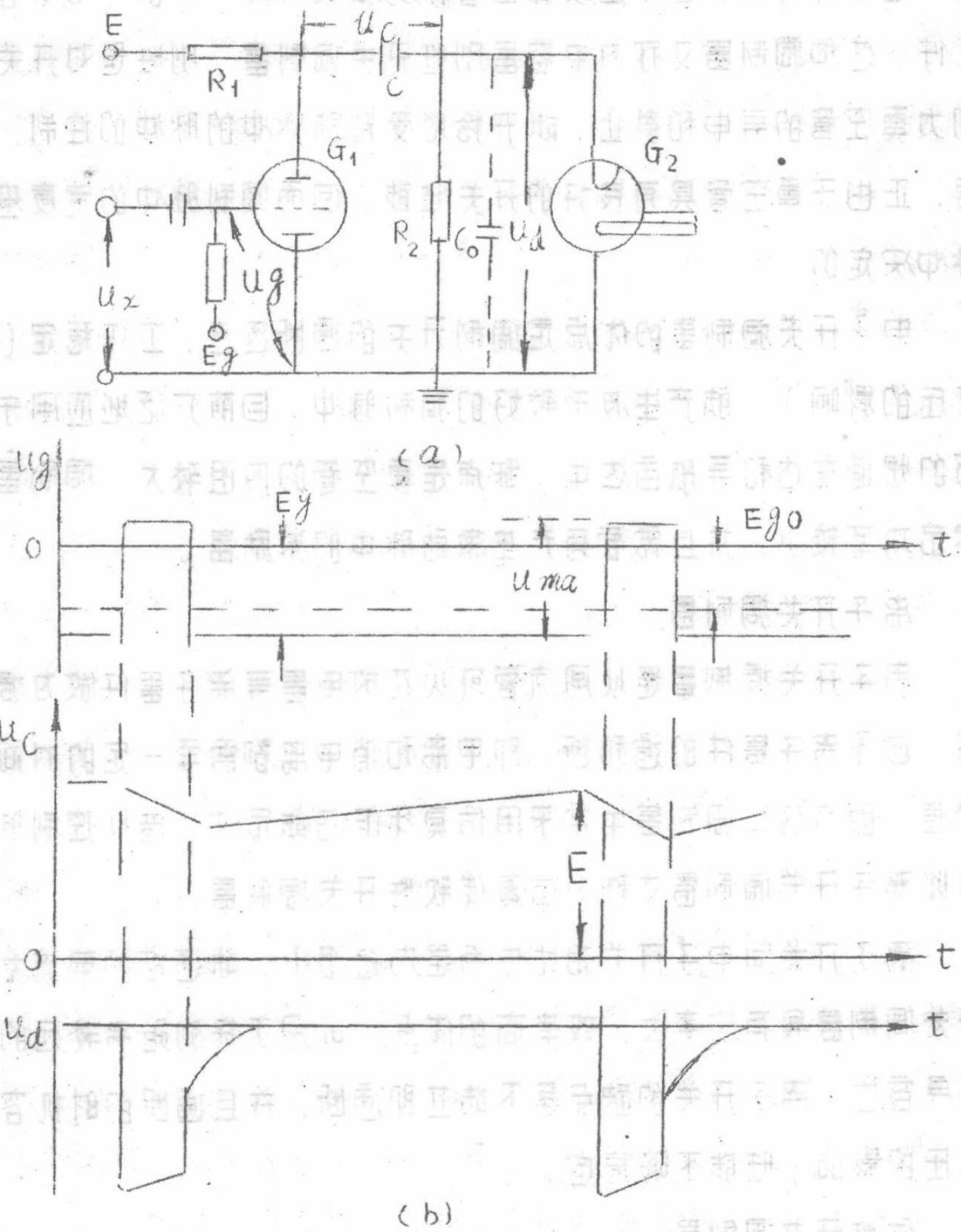


图4-7 电子开关调制器电路和波形