

研 究 报 告

脉冲高压电源

附 1. 20 千伏直流稳压电源

附 2. 50 千伏直流稳压电源

广 播 科 学 研 究 所

1964. 1.

脈 冲 高 压 电 源

附 1. 20 千伏直流稳压电源

2. 50 千伏直流稳压电源

作者: 許維中

本項目指導者: 許中明

本項目參加者: 孔宪旦、王承波

重成貴、肖隆昇

現代科學技術設備常需用小功率的直流高壓電源: 它是電視設備的顯像管、投影管、象加強器 等部分以及核物理的靜電加速器, 電子顯微鏡等方面的重要部件。

這類電源的主要特點是功率小(幾瓦——幾十瓦)、電壓高(10 千伏—100 千伏)、穩定性好; 在某些場合對體積和重量也有相當限制。實現的方案大致有三類:

1. 利用 50 赫工業用電通過高壓變壓器昇壓再經整流而得。

優點: 功率容量大, 設備技術上成熟可靠。

缺點: 高壓變壓器體積龐大, 濾波器件複雜、價格昂貴; 在功率不大時使用不便也不經濟。

2. 利用電子管形成高頻正弦振盪(幾十千赫——幾百千赫), 再經變壓器昇壓, 用倍壓整流電路獲得直流高壓。

優點: 變壓器體積小, 工作頻率高, 濾波簡易, 可以達到很高的電壓(100 千伏)和較大的功率(50W)。

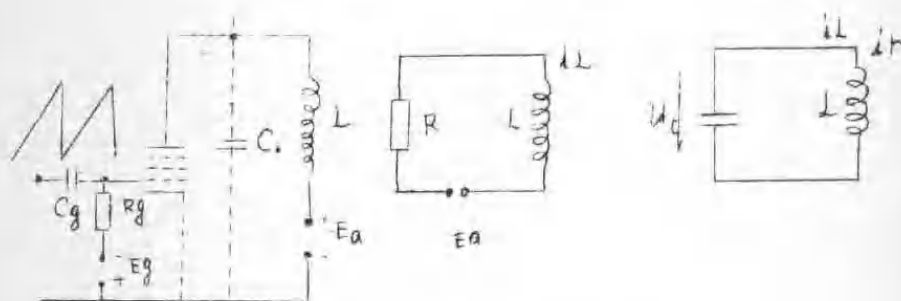
缺點: 高頻電壓絕緣困難, 容易產生電暈, 變壓器制作複雜, 高頻振盪的輻射, 會干擾就其他設備。

3. 利用儲能电感线圈对分布电容充放电形成打击性阻尼振荡，其脉冲峰值可达10千伏左右，再經变压器昇压整流得到直流高压。它除了具有和第二种方案相似的优点以外，还有一些独到之处：

- a. 变压器绕组少，参量要求不严，制作简单。
2. 工作频率低(0.1千赫)絕緣材料和鉄芯損耗等問題較易解决，不易輻射。
- c. 由于一次电压峰值高，不經過倍压整流就能获得相当高的电压(約30千伏)。

本文主要討論脈冲高压电源的設計和制作問題。由于能力和加工、器材等限制，許多关键性問題尚待进一步探討。

一、脈冲振盪的基本原理：



电子管导电期間等效电路，电子管截止期間等效电路

图1. 脈冲振盪原理图

1. 导电期間：

$$i = I_m (1 - e^{-\frac{R}{L} t})$$

$$I_m = E_a / R$$

导电期終了时，电感线圈中的
储能：

$$W_T = \frac{1}{2} L I_T^2 \quad \dots\dots(1)$$

$$I_T = I_m (1 - e^{-\frac{R}{L} \tau})$$

2. 截止期間：

电子管突然截止时，线圈中
电流保持連續，它使线圈两端的
分布电容充电，从而使磁場储能
轉为电容电场储能。

$$W_C = \frac{1}{2} C_0 U_{Cmax}^2 \quad \dots\dots(2)$$

令 $W_L = W_C$ 則得

$$U_{Cmax} = I_T \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad \dots\dots(3)$$

可以設想只要有足夠大的峰值电流 I_T 以及电感量 L ，同时力求
减小 C_0 就可能得到量級可觀的脈冲电压。

$$\text{例： } I_T = 500 \text{ mA} \quad L = 100 \text{ mH} \quad C_0 = 50 \text{ nF}$$

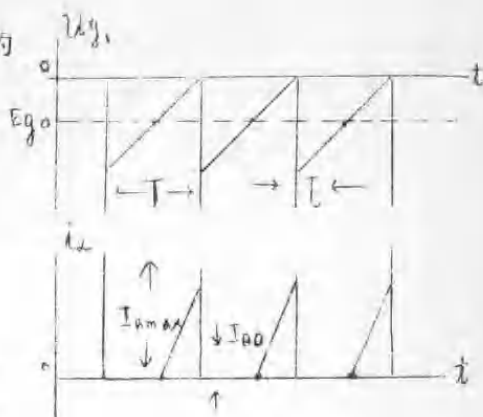
$$U_{Cmax} = 25 \text{ kV}$$

二、主要参数的选择

1. 整流电路：

高压整流一般都用特制的真空管，例如耐压 ± 5 千伏的 $1\text{U}11\text{n}$
和耐压 30 千伏的 $1\text{U}7\text{C}$ ， $3\text{A}3$ 等。就电路而言，可分半波整流
和倍压整流两种。倍压整流具有下列特性：

α. 脈冲电压峰值相同时，能得到数倍于一次整流的直流输出电
压，也就是在直流输出电压一定的前提下，可以放低变压器脈冲电压



的幅度要求。这对变压器的絕緣以及輸出管、整流管、滤波电容的耐压都是有利的。

b. 整流管和电容器的增多必将使结构复杂、体积庞大而且引入分布电容。影响脉冲幅度。

c. 整流管灯絲消耗功率。在灯絲回路和变压器耦合时会增加輸出管的負載。

d. 倍压整流內阻大、負載特性、较差輸出电压穩定度降低。

綜合上述各点並根据現有变压器的耐压情况，我們认为如有合适的輸出管(6П13С, 6Л-81, 6Л-36)和整流管(1Ц7С, 3А3,)輸出电压低于30千伏时采用一次整流是既簡單又方便的。高于30千伏时由于絕緣困难和元件上的限制，应该采用倍压整流。从整流管电流分配的均匀性和实际结构的可能性来看，倍压次数采用三次倍压比较妥当。

2. 脉冲振盪的重复頻率:

振盪頻率的确定将涉及到很多关键性的問題。例如:

a. 鉄芯磁滯損耗随着頻率增长而正比加大。渦流損耗更成平方关系;从减少鉄芯損耗來說,希望頻率低些。

b. 頻率过低会造成滤波困难,輸出电压脉动增加,这是不利因素。

振盪頻率和輸出管导电時間直接影响綫圈中的电流峰值以及輸出管的工作状态。应该针对这一点来确定合理的頻率。

假定:綫圈中电流的增长是綫性的,而且令 α 为輸出管导电期和总周期之比。

$$\alpha = \frac{\tau}{T}$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \frac{L I_{ama} x}{\alpha T} \dots\dots \text{导电期电感上的电压降}$$

只有在输出管板电压不低于临界值时才不会使板流迫于屏栅，加大屏栅耗。

$$\therefore u_L \leq E_a - u_{amin}$$

$$\text{即 } T = \frac{\alpha(E_a - u_{amin})}{\alpha I_{ama} x} \dots\dots(4)$$

脉冲振荡的总功率，

$$P = F \cdot W_L = \frac{1}{2} \alpha F I_{ama}^2 x \dots\dots(5)$$

负载消耗功率，

$$P_H = U_{Bbx} \cdot I_H$$

整流管消耗灯丝功率，

$$P_L = n \cdot e_f \cdot I_f$$

变压器效率为 η ：（在铁淦氧芯时可达 0.7~0.8）

$$\text{则 } P = \frac{1}{\eta} \cdot (P_H + P_L) = F \cdot W_L$$

$$\text{即 } I_{ama} x \leq \frac{\alpha P}{\alpha(E_a - U_{amin})} \dots\dots(6)$$

公式表明，根据总功率，电源电压，输出管特性可以求出所需脉冲电流峰值。

变压器输出脉冲电压可用下式决定：

$$U_{II} = \frac{U_{Bbx}}{0.9n_1 + 0.6n_2} \dots\dots(7)$$

n_1 ：正向整流管数目

n_2 ：反向整流管数目

則變壓器的電感量應滿足此公式：

$$L \geq \frac{u^2 n}{I_{ama} x} \cdot U_P \dots\dots(8)$$

利用(6)和(8)介出的結果代入(4)就能確定振盪頻率 F 。應該指出，加大電感量將不得不同時降低頻率，這會使高壓脈動加大而且負載特性必然變壞。合理的途徑是提高電源電壓，這將可能減小輸出管板流峰值，而且工作在較高的頻率上。

因此我們主張在不使用倍壓整流電路時應該採用阻尼二級管功率反饋電路來提高等效電源電壓、改進電路效率。

3. 變壓器參量：

脈沖變壓器需要足夠的初級電感才能保證儲能（幾十～幾百毫享）同時又希望力求減小自身分布電容。一般地說，初次級是耦合變壓器。空芯繞圈是不能勝任的。現在大都使用鉄塗氧磁芯繞圈，增進有效導磁率 and 耦合度，單位體積儲能的加大，使得有可能制作出結構小巧的繞圈。

a. 鉄芯的選擇：

I. 鉄芯應該具有低的端頭固力和大的電阻率，利於減少磁滯和渦流損耗。

II. 容許最大磁通密度高，使單位體積儲能大；而此時導磁率 μ 還不致下降。

III. 居里點高，保證長時間工作的穩定性。

現有鉄塗氧磁芯，以 $M 2000(\mu=1200)$ ， $M_6(\mu=800)$ 性能較好。鉄芯型式以“口”、“山”兩種為宜；窗口面積可以根據繞圈情況選擇，如有條件，最好用大一些，以免繞圈對鉄芯击穿。鉄芯的截面積應該根據所需功率來確定；單個鉄芯容量不夠時可以用幾個鉄芯

拼成一体。根据我们的经验，当铁芯具有 0.5—1 毫米的气隙时，
 由“口”型铁芯截面积 14 毫米×14 毫米磁路长度 250 毫米
 能得到直流功率 4~5 瓦；四块拼成“W”型能输出 20~25 瓦直
 流功率。

2. 升压比：

脉冲变压器初次级常用自耦变压器耦合以便充分利用初级高压振荡
 脉冲。升压比太低时，难以保证整流管所需高压脉冲，即使能获得，
 初级脉冲电压必然会增高，甚至超过输出管耐压值引起管内击穿，升
 压比过高带来的问题是等效分布电容会成倍增加而实际输出脉冲幅度
 反而下降；而且级数太多将给调试和绕制带来困难。通过下列核
 算可以初步确定升压比 N 值。



图 2. 升压变压器原理图。

$$\text{令 } u_2 = N u_1 \quad \text{而 } N = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = 1 + \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{则 } C_{10} = C_1 + (N-1) C_2 + N C_3$$

$$u_1 = I_{\text{max}} \sqrt{\frac{L}{C_{10}}}$$

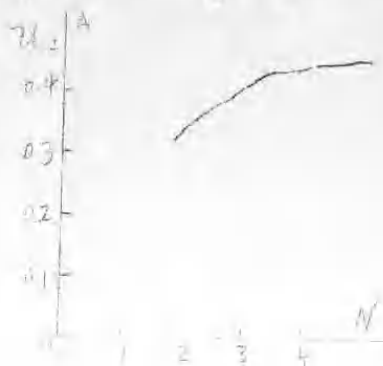
$$u_2 = N I_{\text{max}} \sqrt{\frac{L}{C_{10}}}$$

假設: $C_1 = 10n\phi$ $C_2 = C_1(N-1)$ $C_3 = 5n\phi$

图 3:

輸出高压和弄压的关系

$$A = I_{ana z} \sqrt{L \cdot 10^6}$$



多次实验也証明在使用能耐脉冲电压 8.5 千伏的輸出管时, N 取作 3 ~ 4 是合理的。

c. 变压器的圈数:

从减小綫圈銅損和分布电容, 提高回路品质因素, 縮減体积来看希望圈数尽可能少些, 但是圈数的减少还受下面两因素限制。

a. 在輸出电压一定时圈数少必然会使圈間和层間电压加大, 造成絕緣很困难; 特別在采用蜂房式繞法时, 綫圈成品率相当低。

实验表明, 綫圈寬度是 4 毫米綫徑在 0.15 毫米 ~ 0.20 毫米以內的綫漆包綫繞制, 有机硅或聚苯乙稀漆浸渍后再用环氧树脂密封的高压綫圈平均每圈安全电压不超过 20 伏。

$$\therefore n_1 + n_2 \geq u_{II} / u_0$$

例: $u_{II} = 30$ 千伏 $u_0 = 20$ 千伏 則 $n_1 + n_2 \geq 1500$

b. 在保証所需电感量的前提下, 圈数减小相应得提高鉄芯有效导磁率。也就是使磁通密度加大。这会使損耗显著增加, 鉄芯发热, 难以长期工作。

工作中应该通过实验和长期运行, 确定合适圈数。我們的經驗是:

№ 6 铁芯截面积 28 毫米×28 毫米，磁路长 250 毫米，初级用 400 匝，次级用 1200 匝，效果良好。

4. 输出级：

a. 输出管：

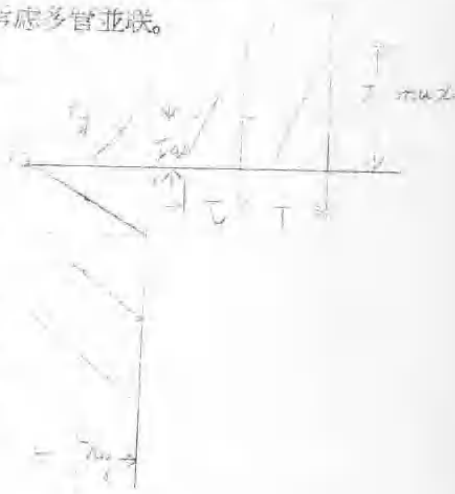
高压电源中所用的末级输出管应具备能输出较大的脉冲电流，耐受很高的阳极脉冲电压的特性，并希望临界板极电压低，而且还得有相当容量的板耗和屏栅耗。常用电子管的参量见下表：

型号	板流峰值	板极脉冲电压	临界	板耗	屏栅耗	备注
6П13С	300 毫安	6—8 千伏	100 伏	小于 10 瓦	3 瓦	
EL-81	300 毫安	8 千伏	100 伏	小于 10 瓦	3 瓦	
PL-36	400—500 毫安	8—10 千伏	60 伏	15 瓦	小于 5 瓦	

假如单管输出功率不够，可以考虑多管并联。

b. 输出管激励波形和工作比：

采用矩形波作开关激励脉冲，原理上是可行的，但实际上问题在于板流是按指数曲线增长的，所以在电子管导通的大部分时间内阴极电流会被迫向屏栅，以致使屏栅损耗过大。比较理想的是阴极电流放电也按指数上升（指数曲线起始段近于直线），这就需要栅极以锯齿波电压作激励。



其中, $u_g = E_{g0} \cdot \frac{T}{T}$ (9)

工作比:

$$\lambda = T/T = T \cdot F$$

脉冲工作时的平均板流:

$$I_{a0} = \frac{I_{amax} T}{2T} \quad \dots\dots(10)$$

$$\therefore \lambda \leq \frac{2 I_{a0max}}{I_{amax}} \quad \dots\dots (11)$$

输出管选定以后, 根据屏栅压和 $U_{g1}=0$ 的条件可以查得 I_{amax} , I_{a0max} 由平均板流决定, 由于脉冲工作时平均板压不易测定, 这里我们提出一些经验数据:

6П130, 6П1, I_{a0max} 60-70mA

6П130, I_{a0max} 80-100mA

实际上就限定了工作比最大不能超过50%。工作比小能提高效率, 但是若过小, 则导电时间太短, 板流不能达到最大值; 储能不足, 高压上不去。损耗也可能加大。实验表明, 工作比在50%是适宜的。

三、高压的稳定

脉冲高压电源内阻很大, 输出电压会随负载电流急剧变化, 只有采用稳压电路才能满足高质量设备的要求。稳压电路基本上有两种方案:

1. 分流法:

利用高压分流管 (6Бк4, 6С20С) 和负载并联, 分流管电流可以补偿负载电流的变化, 保持输出电压恒定。这种方法线路简单但不经济, 只适合于电压不高和电流不大的情况。(30千伏200微安以

2. 負反饋法:

通过接在高压輸出端的高阻分压器或者和高压变压器耦合的輔助經阻电压整流器获得一个正比于輸出电压的信号电压,經直流放大器放大后控制輸出管脉冲电流峰值;从而确保輸出电压的稳定。

其中以控制第一極偏压最为有效,因为它改变板流的能力最强而且不耗功率,动态范围也不需过大。

負反饋法可以应用在各种类型的高压設備里,它消耗高压功率极小,並能随負載需要自动調整輸出管工作点,比較經濟可靠。

負反饋法的基本关系式如下:

$$R = \frac{R_{i0}}{1 + \mu k B} \quad \dots\dots(12)$$

式中:

R_i —— 电源內阻。

R_{i0} —— 沒有負反饋时的电源內阻。

μ —— 輸出高压增量和控制偏压增量之比。

k —— 直流放大量。

B —— 訊号电压和輸出高压的分压系数。

負反饋电路能使电压稳定度提高 $10^2 - 10^3$ 量級。能够滿足一般設備的要求。

四、整流管灯絲供电:

整流管灯絲有处于直流高电位(正向导电管),也有处于交直流都是高电位的(逆向导电管),所以应特別考慮絕緣和减少对地分布电容問題。

1. 灯絲回路和高压变压器耦合。这种方法簡單、方便,但消耗

高压功率：为了保証灯絲的正常加热，只能用于输出电压恒定的电源（电压可調量不超出士20%）。

2. 灯絲功率由单独时变压器供給；而变压器可以用50赫工业电也可用特設的高頻振盪器激励。綫路和結構比較复杂，但是容許輸出电压可作大范圍自由調节。

五、高压电源的結構和工艺問題

1. 高压变压器：

a. 变压器繞法：

高压变压器的工艺要求如下：

- I. 內阻小，减少損耗，避免过热損坏。
- II. 自身电容和对地电容小。
- III. 层間电压低以免击穿；綫間有足夠高度防止表面放电。
- IV. 初次級之間达到尽可能紧的耦合度。

所以高压变压器常做成几个薄而高的繞組，大都用蜂房式繞法。但这种繞法有以下缺点：

- I. 任何两根在垂直方向上相邻的导綫之間电压总是等于每层最大电压的两倍。
- II. 层間无法加絕緣层。
- III. 繞制过程中弯折次数多，这不但会加长了每圈平均长度，而且容易造成机械損伤，降低可靠性。

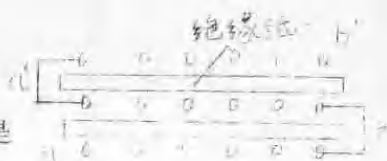
使用表明，虽然这种繞法比較方便，但是成品率不高。現在我們正在試驗用薄的分层平繞綫圈取代蜂房綫圈，它能弥补上述缺点；虽然繞制麻煩些，但是耐压强度会有显著改进，成品率高。

因为平繞只有外緣两根綫，电位差較大。再則容易加层間絕緣，

线圈可靠性得到了保证。

2. 变压器的浸渍:

增加层间绝缘强度,尤其是为了防止表面放电,变压器必须经过良好的绝缘漆浸渍处理。



对绝缘漆的要求如下:

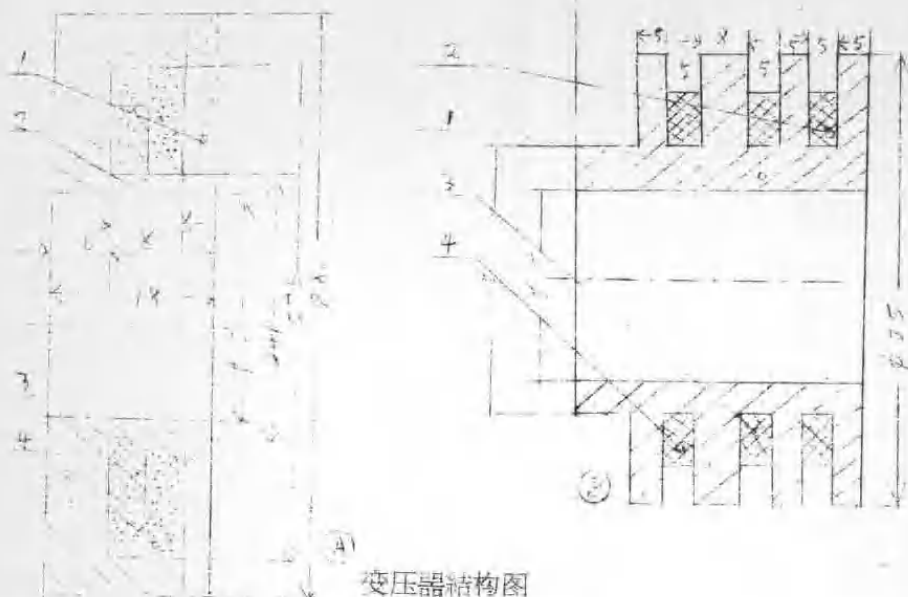
1. 绝缘强度高、介电常数 ϵ 小、机械强度好。
2. 干燥固化温度低($<100^{\circ}\text{C}$),以免损伤漆包线。
3. 固化过程应均匀,不形成气孔、气泡。

文献指出,以聚乙烯漆最佳。我们使用过有机硅、三聚氰胺醇醚漆、聚苯乙烯漆,其中以后者较理想。其配制方法如下:颗粒状聚苯乙烯和甲苯按20:100配比混合,在 $50^{\circ}-80^{\circ}\text{C}$ 温度下,加热四小时,搅拌均匀,再在室温下放置四小时,去除沉积的胶状物质即可,得到透明的聚苯乙烯漆。

浸渍过程:

先让线圈在 $60^{\circ}-80^{\circ}\text{C}$ 温度下烘干3小时,然后进行真空浸渍,真空度在1毫米汞柱以下,时间半小时;取出后在真空中凉干3小时,最后在 $80^{\circ}-100^{\circ}\text{C}$ 温度下烘干。

c. 变压器的结构:



變壓器結構圖

A 蜂房式繞法繞圈：

1. 蓋板；2. 盒體；（有機玻璃）。

3. 繞圈；4. 環氧樹脂。

註：a. 引出綫外圈在盒体外緣，內圈和抽頭在蓋板上垂直引出。

b. 一付繞圈共分兩盒，每盒各800圈。

B 分層平繞繞圈：

1. 盒體（有機玻璃）。

2. 初級繞圈400圈。3、4次級繞圈各600圈。

註：引出綫都在各繞組最外層，繞組間聯綫穿過有機玻璃隔板上的斜孔直接联接。

		圈 数	綫 型	綫 徑	侵蝕 情况	寬度 毫米	层間 絕緣
蜂房式繞法	初級	400	双絲漆包綫	0.17-0.25	一次	4.5	/
	次級	400+800	双絲漆包綫	0.13-0.17	一次	4.5	/
分层平繞法	初級	400	高强度漆包綫	0.15-0.20	二次	5	电容紙
	次級	600+600	高强度漆包綫	0.11-0.15	二次	5	电容紙

綫圈和铁芯之絕緣：(脉冲电压 $\leq 30kV$)

1. 所有引出綫都用 PE-1 電綫內芯(介質是 2.5 毫米聚乙烯)和綫圈相接处必須牢固不能和不同电位层錯位交叉。

2. 綫圈內层和铁芯之間至少應該有 2~3 毫米有机玻璃絕緣层，綫圈外层是高压位和铁芯之距离保持在 15 毫米以上，最好中間也用有机玻璃隔开。

3. 綫圈表面紧靠絕緣漆例：灌注物有机玻璃盒体等以防表面放电。

II. 高压盒:

在輸出电压超过 20 千伏时，高压部分必須用絕緣物做成一个独立的盒体，避免放电、防尘和保护人身安全，增加长期工作的稳定性。高压盒体材料用有机玻璃较可靠，一般 5~6 毫米已能满足要求。其中的主要器件是高压变压器、整流管、滤波电容、分压电阻。其結構排列。应该注意以下几点：

1. 輸出管阻尼管到变压器的距离以及变压器到整流管滤波电容的距离应该力求短捷联綫、远离底板，以减小分布容。

2. 在倍压整流时, 各整流管之間应该用有机玻璃板隔开; 采用直綫型式排列比較方便可靠。

3. 尖端放电和电晕現象是常見的毛病, 我們所用的整流管的管座是用有机玻璃特制的, 管帽是銅球(見附图); 使高电位导体有較大的曲率, 电場分布均匀; 銲接也要圆滑讲究。

4. 鉄芯的固定必須牢靠, 而且能調节其間隙, 間隙充填介質夾緊, 防止发声; 鉄芯和底板应保持一定距离(10毫米), 以免两者放电。

5. 整流管灯絲引綫必須具有很高耐压, PK-1 电綫內芯能經受30千伏电压可以使用。

六、高压电源的調整:

1. 激励部分

振盪源采用阻塞振盪器, 为了穩定振盪頻率栅极电阻接恒定正压, 它的优点是逆程短、振盪强烈。利用 R-C 充放电回路形成鋸齿波, 其時間常数以2~3倍振盪周期为宜。振盪周期和激励电压幅度的可調范围应有±30%左右。

升上輸出管后, 先不接負載电感而使 $U_a = U_{amin}$, 第一栅偏压用电位器手动控制; 調节偏压和激励电压幅度用示波器監視阴极电流使其达到最大值时, 工作比 $\alpha \leq 50\%$ 。量測 I_{g2} 核算 P_{g2} 是否容許。

II、輸出管和高压变压器:

接負載电感, 調偏压使 $I_a = \frac{1}{2} I_{amax}$ 。假使沒有振盪則可能是变压器有击穿短路; 但若有振盪而无高压輸出, 則可首先查看整流管灯絲回路是否正常; 如果高压电容击穿或負載对地短路, 則整流管会发藍光。

經驗表明, 为了使輸出管或整流管正常工作, 应先使設備在額定