

自制粒子加速器

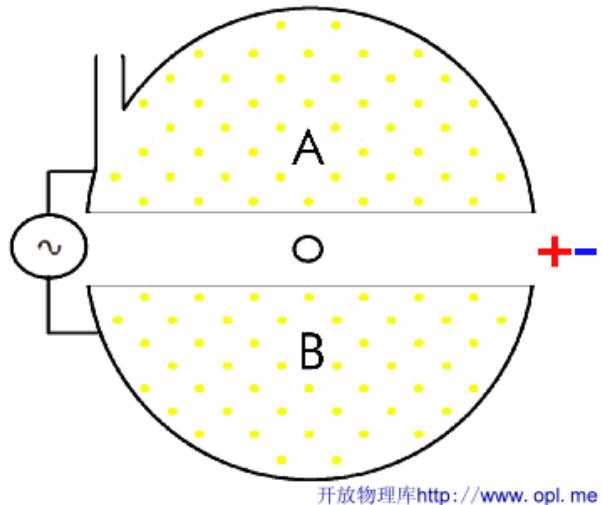
大象无形

目录

一、什么是回旋加速器.....	1
二、加速器的原理及公式.....	2
三、电磁铁制作.....	3
1.概述.....	3
2.铁芯.....	5
3.磁极设计.....	6
4.励磁线圈的设计.....	7
四、真空系统.....	8
五、射频电子系统.....	10
1、射频系统驱动.....	10
2、电源要求:	10
3.D 盒电路设计:.....	12
4.偏置电压.....	13

一、什么是回旋加速器

它是利用磁场使带电粒子作回旋运动，在运动中经高频电场反复加速的装置。是高能物理中的重要仪器。



1930 年 E.O. 劳伦斯提出其工作原理，1932 年首次研制成功。它的主要结构是在磁极间的真空室内有两个半圆形的金属扁盒 (D 形盒) 隔开相对放置，D 形盒上加交变电压，其间隙处产生交变电场。置于中心的粒子源产生带电粒子射出来，受到电场加速，在 D 形盒内不受电场，仅受磁极间磁场的洛伦兹力，在垂直磁场平面内作圆周运动。绕行半圈的时间为 $t = (m \pi) / qB$ ，其中 q 是粒子电荷， m 是粒子的质量， B 是磁场的磁感应强度。如果 D 形盒上所加的交变电压的频率恰好等于粒子在磁场中作圆周运动的频率，则粒子绕行半圈后正赶上 D 形盒上极性变号，粒子仍处于加速状态。由于上述粒子绕行半圈的时间与粒子的速度无关，因此粒子每绕行半圈受到一次加速，绕行半径增大。经过很多次加速，粒子沿螺旋形轨道从 D 形盒边缘引出，能量可达几十兆电子伏特 (MeV)。回旋加速器的能量受制于随粒子速度增大的相对论效应，粒子的质量增大，粒子绕行周期变长，因此，为了使粒子每次穿过缝隙时仍能不断得到加速，必须使交变电场的角频率 ω 随着粒子的加速过程而同步降低，使之满足 $\omega = qB$ (式中 q 和 B 时不变的)。根据这个原理设计的回旋加速器叫做同步回旋加速器 (Syncrocyclotron)。

二、加速器的原理及公式

磁场里带电粒子所受的力为：

$$\vec{F} = q\vec{v} \times B$$

这个力提供了粒子圆周运动的向心力。

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

$$v = \frac{qBr}{m}$$

利用以上公式及动能定义，粒子的动能如下：

$$K.E. = \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}$$

加速器的周期定义为粒子运动一周的时间：

$$\tau = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{\frac{qBr}{M}} = \frac{2\pi M}{qB}$$

$$\tau = \frac{2\pi M}{Bq}$$

那么，频率为：

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{Bq}{2\pi M}$$

同时，角频率 ω 也是表示粒子圆周运动的一个参量。

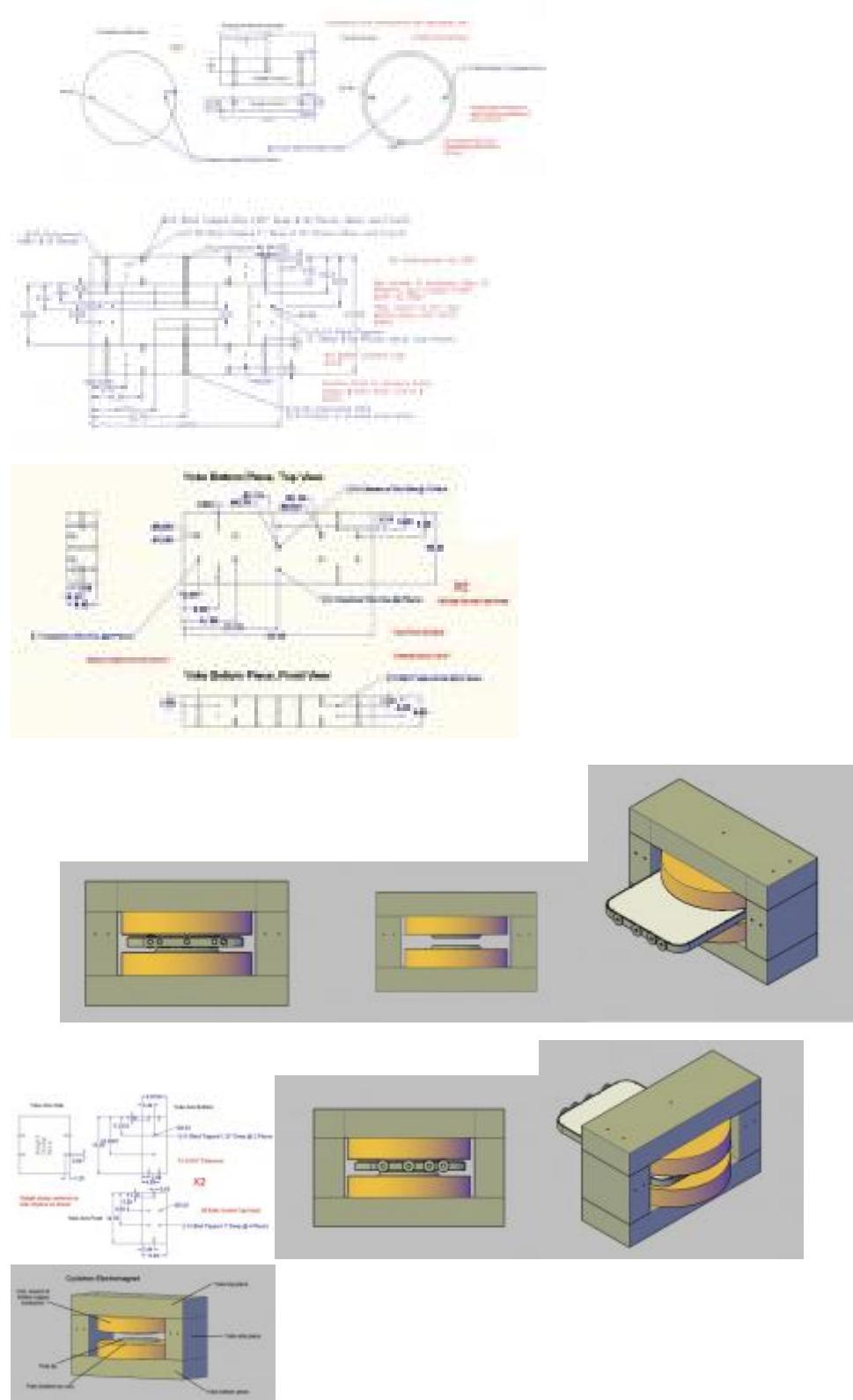
$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} = 2\pi f$$

$$\omega = \frac{qB}{M}$$

三、电磁铁制作

1.概述

电磁铁提供了一个强大而均匀的磁场，这个磁场能够穿越真空并且弯曲被加速粒子的轨道。如下所示，标准的加速器的电磁铁都有一个具有 H 型开口的软铁芯，真空室处于磁铁的两极之间在内部，有两组内水冷励磁线圈来产生磁场，同时有一个磁阻很小的铁芯提供磁路，此磁铁的最大设计磁通量是 1.6T。



2.铁芯

铁芯的作用是提供一个低磁阻的磁通路。铁芯的设计目的就是使磁极间磁场达到最大。



有两个途径可以增加粒子的能量: 1. 加大 D 盒的尺寸 2. 增大磁场的强度。如果加大 D 盒的尺寸, 那么磁铁极面的尺寸也要随之增大. 做一个尽可能大的磁场会证明你的投入会很有效。

$$K.E. = \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}$$

有很多增大磁场强度的方法,一种是增加励磁线圈的安培匝数。这种方法的弱点就是需要一个适合的电源来提供尽可能大的电流。在家里面做这个加速器的话,电源是很大的问题。另一个方法就是尽量减小两极的距离(但还要考虑中间放真空室)。

$$B = \frac{\mu_0 NI}{g}$$

上面的公式: B 表示磁感应强度, μ_0 表示真空磁导率, N 表示匝数, I 表示电流, g 表示极的距离,事实上,真空室不能小于 2",在 $B=1.6T$ 时, $g=2.13"$ 是一个比较理想的值。

另外,铁芯的饱和度问题也必须考虑。我们的磁铁铁芯用 1060 块钢片组成,饱和度在 1.7T 左右,超过此值后,再提供电流磁场也不会增加。为了避免磁饱和,磁通量在极臂比中心值少 25%,只有 1.2T,可以通过增加 25% 的交叉拼装面来达到此目的。

3.磁极设计

磁极的形状直接决定了空隙间磁场的分布.我们这个加速器随着磁极半径的增大,磁场只有微小的减小,这对我们来说是非常重要的.微小的磁场变化会形成弱聚效应.这个效应会保持粒子束处于正确的轨道上.

像我们的加速器这样的弱聚加速器取决于磁场的形状.如果我们完全采用平直的磁极面,那么粒子束不可能达到我们所需的能量及半径,很少有粒子能在没有纵向分量的条件下进入正确的轨道,当粒子从离子源发射出来后,他们会"喷"向各个方向,如果一个粒子向上运动,那么它将保持向上运动.并且很可能撞到 D 盒上或真空室上部.这样这个粒子就浪费掉了.所以粒子要成束,就必须在轴向有个力,力的方向同轨道的轴向,并且使粒子回到中间的圆盘.

如下图所示,沿两极的锥形使得缝隙变大,这使磁场稍有减小磁感应线不在平行,除中间外他们"向外弯曲".在中间圆盘上方,有个放射状场分量指向外侧.在中间圆盘下方,有一个放射状的分量指向内侧.在内部没有放射状的磁场分量,而是平行且均匀的.只是强度上有所减小.

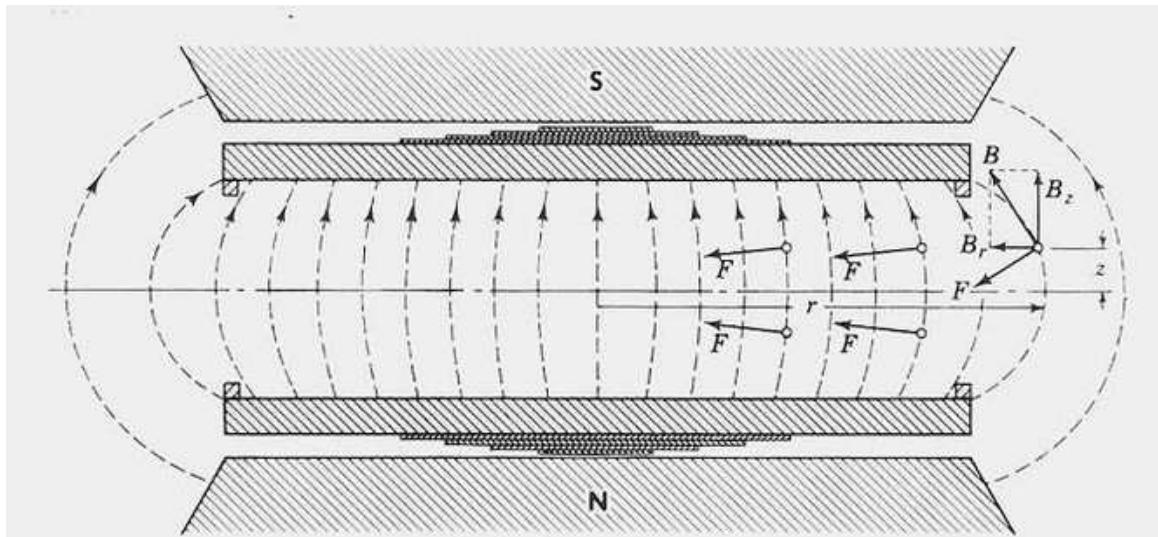


Fig. 6-7. Radially decreasing magnetic field between poles of a cyclotron magnet, showing shims for field correction.

如果粒子束正好处于两极之间,那么运行轨迹就应该是正常的.如果粒子束偏离圆盘,会有一个使其移动到中心的力,这个力引起了中间圆盘轴向谐振.即所说的纵向电子感应谐振.弱聚焦效应是设计磁极的一个重要指标.最好的导边是从极中间到边缘为 0.02in,这就使沿 6in 直径的极上磁场有 0.8T 的减小,另一个需要注意的就是避免加速器磁场共振现象.共振破坏了粒子流的平衡.关于这一点,我们还会讨论.作为真空室的一个规则,两极会比 D 盒大且两极边缘有个 45° 导角来避免直角部分的磁饱和.

4、励磁线圈的设计

做励磁线圈用的导线的截面是方形的,中间是空的,可以有冷水通过.线圈的电流是 110A, 电压是 115V, 由 720 圈水冷铜导线组成: 每个极上有 360 圈, 方形, 搪瓷绝缘线, 中空, 可以由冷水通过。

720 圈是由两个分布在两极上的两个 360 圈组成. 每个 360 圈都是由 10 个“双圈层”组成. 整个线圈有 20 层高, 18 层宽。

“双圈层”绕制技术允许整个线圈一部分一部分的分别绕制. 绕在同一轴上的两层线的长度在拉直时长度相等: 一半的线绕在小轴上, 并且向‘外’绕制, 然后另一半绕制在第二层上(从外往回绕制). 线圈被放置在环氧里, “双圈层”放置一层绝缘胶带, 把线圈用玻璃纤维胶带包好, 粘好, 这个线圈就完成了. 用铜块将线圈的端线连接起来后, 整个线圈就做

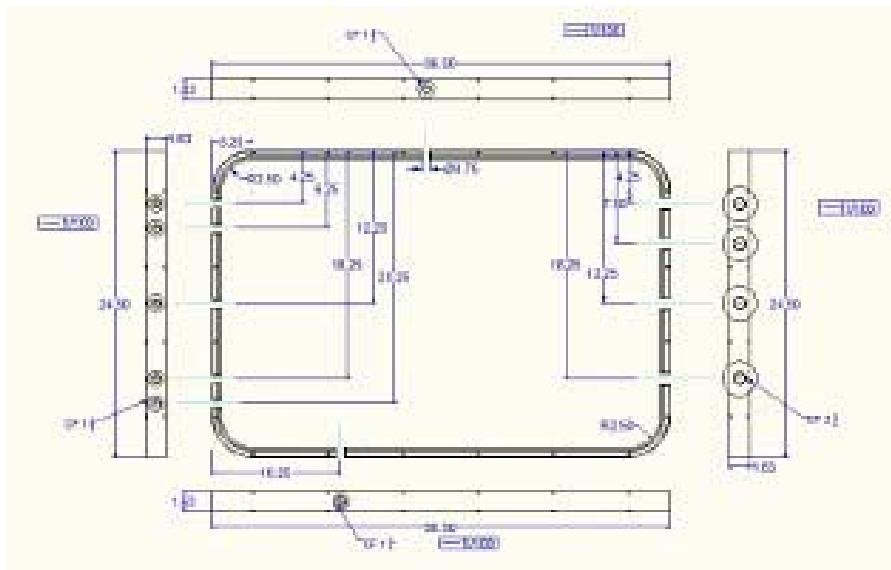
好了。

“双圈层”绕制技术及水冷技术的优势在于水管可以平行安装（只在接头处设置一个接头），电源也可以有序安装。线圈的参数表及绕制相关参数如下：

四、真空系统



加速器的真空室用不锈钢制成，有上下两个盖，每个都用螺丝上紧并加 O 形衬垫密封、电线及其它连接。如冷水、氢气等均通过侧面喇叭嘴进入真空室。这些都可以买到。真空室通过标准 CF 法兰连接到外部喇叭嘴。



在设计真空系统时，要考虑最大吞吐量或抽真空的效率，我 i 类实现这一点：扩展真空室至磁铁处；直接将泵放置在室下方并用一个大的管子连接至真空室的下方。



为了减小两极间缝隙来增强磁场强度。我们应尽量将真空室做的薄一些。在我们的加速器中真空室只有 2" 高，用 3/16 厚铝做上下盖，在大气压力下的重量，这两个盖如此薄且大，很容易被挤压变形，在室内，我们用铝支撑（如图）来防止挤压并行。（如图）



扩散泵

用抽真空系统可以使真空室的工作压力降到 10^{-7} Torr (托, 相当于 1mm 梅柱的压力)。内装的泵是一个 Varian M4 扩散泵, 这种泵不能工作在大气压下, 所以此泵工作之前, 先用大泵粗略的将真空室压力降到大约 1/1000 大气压, 当真空泵的排气管里充满了氢气, 氮气就被引入排气管中来稀释氢气。

五、射频电子系统

1、射频系统驱动 D 盒上的加速电势。加速器频率 (见公式) 取决于磁场强度, 如下:

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{Bq}{2\pi M}$$

D 盒电压与 RF 能量的关系决定于电路的配置。在我们这个电路里, 我们用 D 盒与一个电感串联组成的电容而形成一个调频电路。通过一个电源放大器直接驱动非调频主电路的方式来向电感线圈供电。

当加速器处在最大磁场状态下运行时, 频率是 24MHz。起初, 我们只运行在低强度下频率也只有 13.56MHz。

2、电源要求:

理论上, 穿越缝隙的电压会很小。电压决定了在粒子获得足够的能量之前它们旋转的圈数。事实上, 让粒子束旋转更多的圈数是不切实际的, 有下面几个原因:

第一、 保持高压的第一个原因就是允许处于加速器中间的离子源在第一圈

就清理离子源的真空管。为了避免粒子撞在真空室上。粒子必须在第一圈就获得足够的能量来超过粒子源的半径。

第二、 保持旋转圈数达到最小值的原因是这样会使粒子旋转的频移就不成问题了。引起频移的原因是微小的磁场变化引起了微小的轨道频率变化。以及运动中的粒子的相对论质量的增加。

第三、 保持路径长度最短是最小化真空室内游离粒子碰撞, 粒子的路径长度应该与真空室的平均自由程处于同一水平。这些限制因数定了必要的 RF 电路输入能量。足够的 RF 输入能量也只有 0.5kw, 我们用能量放大器的容量是 3kw。

能量放大器的选取

用于 RF 射频的商用设备是取得放大器的方便之门, 特别是那些共振不太好需要小的修理的设备. 然而一个新的 3kw 放大器我们需要数千美元, 这已超出了我们的经济范围.

也有一个需要考虑的是固态真空放大器. 现在也有固态器件, 这些器件更耐用. 不需要再调谐. 如果实用了这些器件, 那么永远都不会坏.

然而如果 SWR 很高, 那么变压器很容易被烧坏. 真空管器件却相反. 它能应付自如, 并处理好阻抗的匹配, 在加速器中, 真空室内有很多偶发的电弧改变了电路的阻抗, 这样很可能破坏固体放大器额定 3kw 的 plasma Therm.HFS3000 就可完全应付这种不匹配. 这个芯片可以在 ebay 上买到.



3.D 盒电路设计:

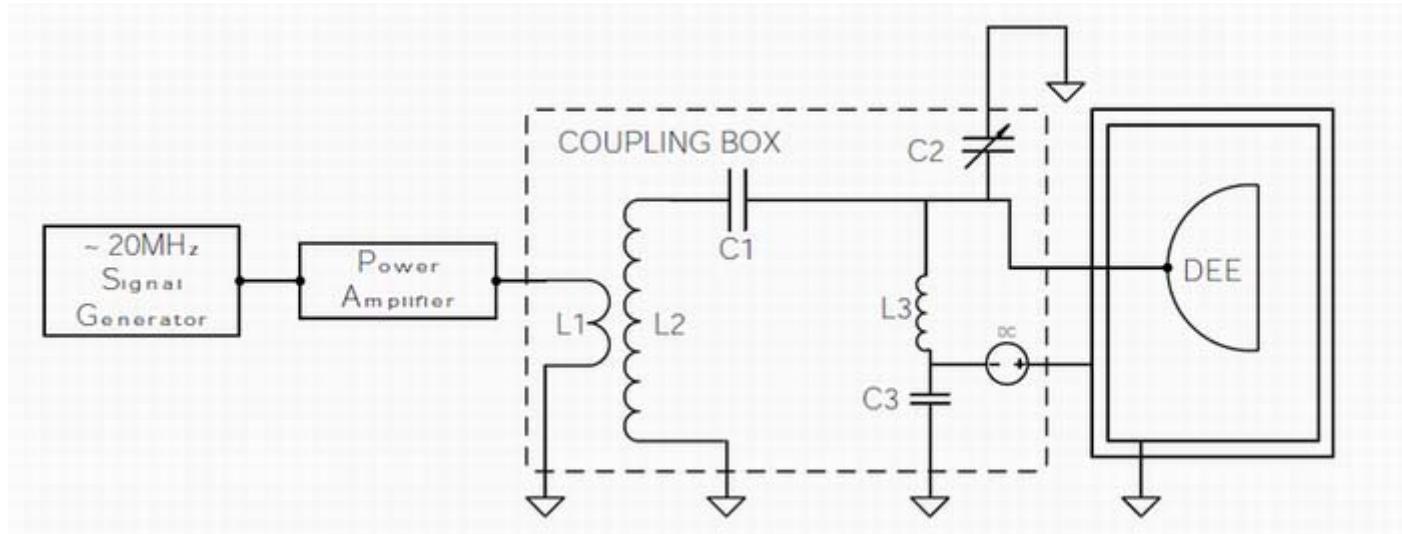
D 盒的电容

D 盒的电容可以近似为以真空为介质的平行板电容器,公式如下: $C = A\epsilon_0 d$ 其中 ϵ_0 是介电常数,为 $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$. 将上下两个盘半径为 6in 距离为 0.5in 可以得到每个盘的电容为 25pF. 估算 D 盒柄的电容可以把它看成是置于真空室中心的平板. 面积是 1.5in^2 . 事实上,就是一个 $\square 0.5\text{in}$ 的杆,电容之和就得到了大约 54pF 的电容值.

盒电路

因为加速器工作在一个单一的频率下,这样就可以获得一个很高的品质因素 Q 电路来驱动 D 盒,D 盒的电容与一个电感串联就形成了一个调谐电路(盒电路).与 D 盒并联一个真空可变电容器是用于调谐电路的共振频率.

另一个使用盒电路的原因是其提供了一个倍亚电路. 盒电路中的电压被电路的品质因数 Q 所乘,因其有能量存储特性.



L1---半匝初级线圈

L2---多匝次级线圈

L3---RF 抑制来保护 DC 电源(用于粒子提供而接于 D 盒上的偏置电压)

C1---高压传导电容,避免 DC 电压与地短路

C2---5~100pF,真空可调谐电容,用于调整 LC 盒电路中的电容

C3---RF 滤波电容,700pF

L1 与 L2 是绕制在 1/4in 长的铜质冷却管上,它们在同一轴线上,并有同一个中心点.由于次级线圈中有很大的电流,就用未电离的水进行冷却.在线圈的两端,尼龙管用 swagelok 连接器构成,从而形成了水流的通路,铜带焊接到线圈上,并用螺钉拧到另一端的 RF 信号端.

调节 L1 与 L2 直到获得最佳互感为止.它们的手动可调电感量大约为 0.01,为减小主电路与辅助电路之间的电感,我们应尽量减小主电感,这是为什么 L1 只有半匝的原因.



4.偏置电压

为了满足提取离子的目的.我们在 RF 信号之外又加在 D 盒上一个直流电压,通用连接 D 盒到电源负极盒与互感其次级间串联一个防短路电容来达到 D 盒的偏置的目的.直流电源与 RF 电压通过一个绕在 G10 核上的扼流圈绝缘,这个线圈对直流量成低阻抗,但对交流信号成高阻抗,可以起到很好的阻止作用.在扼流圈之后加上一个电容,以滤掉没有被扼流圈阻止的 RF 信号,即一个低通滤波器,最佳电压值及精确的从粒子源中提取粒子就需要在实际中摸索了.

来源物理之舞网站加速器专题: <http://www.opl.me/special/accel.html>

版权归原作者所有!