

跑道式 电子迴旋加速器



张武 赵根深

跑道式电子迴旋加速器概况

电子迴旋加速器是用来加速电子的迴旋式谐振加速器。它使用大致均匀的直流磁场使电子迴旋，当电子通过谐振腔时为高频电场所加速，电子每加速一次，能量增加一次，其轨道半径也逐渐增大，这些半径逐渐增大的圆轨道都以谐振腔的加速间隙作为它们的公切点，图1是在这种加速器里电子轨道分布情况示意图。

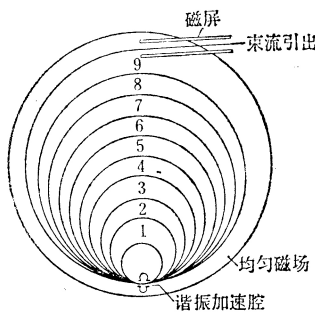


图1 普通电子迴旋加速器的电子轨道分部示意图

电子迴旋加速器的原理是1944年提出的，1948年在加拿大建成了第一台电子迴旋加速器，实现了这种加速原理。但由于流强低，同时也由于电子直线加速器的发展，电子迴旋加速器没有受到重视。后来由于解决了一系列的理论和 technical 问题，再加上这种加速器有一些独特的优点，则60年代初又重新迅速发展起来，在很多国家中研制成了结构型式新颖的、高效率、稳定的电子迴旋加速器，且成功地得到了实际应用。下面介绍的所谓跑道式电子迴旋加速器即其中之一。

在普通的电子迴旋加速器里，都取用低磁场（一般一千高斯左右）。这是因为如把磁场提高了，在同样倍频系数下，电场频率就要提高，这就增加微波技术的困难。同时，由于它采用单腔加速，电子每通过一次谐振腔时能量增益较小，如磁场提高了，电子轨道就不易分清，对引出不利。正因为普通电子迴旋加速器磁场低，所以磁铁尺寸大。例如一台30兆电子伏的电子迴旋加速器磁极直径约110厘米，磁铁重约5吨。

另外，电子绝大多数时间都运行在一个恒定的、分布大致均匀的主导磁场中，这种磁场没有足够的聚焦

力，大部份电子在头几圈就都损失掉了，并且在整个加速过程中还要继续损失。

这些都限制了加速器能量、流强的提高，目前世界上已建成这种类型的加速器除个别能量达30兆电子伏外，大多数能量都在几兆电子伏，流强也较弱。

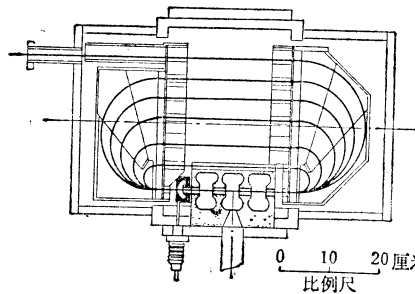


图2 6轨道跑道式微波迴旋加速器示意图

为了提高加速电子的能量和流强，1958年罗伯茨(A. Roberts)提出用多腔加速机构代替单腔加速机构、用磁场沿方位角调变的分裂磁铁结构代替磁场沿方位角均匀分布的整体圆盘结构。这就使电子迴旋加速器的性能大大提高一步。在这样磁铁结构中由于电子轨道不是一个圆，而是一个个像田径场上的跑道，所以人们称它为跑道式电子迴旋加速器。1973年加拿大安大略大学建成了一台这种类型的加速器，取得了良好的结果。其结构型式如图2所示。

跑道式电子迴旋加速器的特点

1. 结构紧凑 跑道式加速器主要由下列部件组成：加速机构、两个180°的偏转磁铁和一个电子枪组件。

加速机构是用几个谐振腔串联而成，实际上就是一台小型直线加速器。电子每次通过加速机构得到的能量增益比单腔要大得多，因而可以选用较强的磁场，以使加速器结构紧凑。

180°的偏转磁铁所产生的主导磁场不仅要使粒子偏转180°，而且磁铁极部的结构形状要保证粒子横向运动的稳定性，同时在整个能量范围内（指大幅度调能）获得一个合适的相位接收度。横向运动的稳定性主要依靠主导磁场内部强弱不同的场区之间过渡场的聚焦作用来维持。这些要求通过如图3所示的结构场来满足。就是说磁极间的磁场分布不是均匀的，有高、中、低之分，这种场形将使电子运动受到聚焦力的作

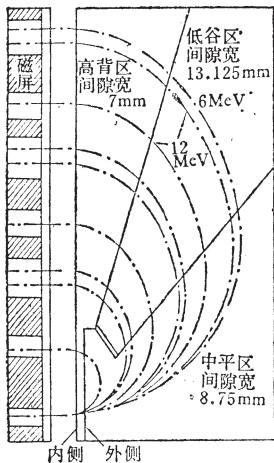


图3 180°偏转磁铁布置简图,图中所注间隙宽指的是上、下极靴之间缝隙的距离

常数 由于电子在各条轨道上都受聚焦力作用,并且提高了电子的注入能量,束流强度比普通电子回旋加速器高得多,脉冲流强可达百毫安左右。

4. 能量调变 引出电子束能量可通过调变每一轨道能量增益和运行中随时改变运行方式(模式)调变。

传输到加速机构(直线加速器腔体)中去的微波功率可以借助于功率分配器来调节,从而使加速电子在腔体中得到的能量可以在一个能量范围中连续调变。为了说明问题,假设这个能量范围从1.5到3.0兆电子伏;加速器的设计轨道为6条。在运行中如果我们适当的调节磁场等参量,就可以改变电子的运动状态,以实现更大范围的能量调节。一般用运行模式 n 来表示,不同 n ,电子经历的加速次数不同,最终能量也就不同。见表1,例如 $n=6$,电子通过一次加速机构以后,直接运行在第六条轨道上(因磁场调得很低),这时引出电子能量为1.5到3.0兆电子伏。若 $n=3$,表示电子经过一次加速后,运行在第三条轨道上,再经第二次加速,电子就运行在第六条轨道上而被引出,这时电子能量为3.0到6.0兆电子伏。同理还可以运行在 $n=2, n=1$ 的模式下。

由上可知,采用模式种类越多,能量调节范围就越大。为了满足谐振条件,除了调节磁感应强度、加速电压等参量外,还可以将磁极头做成活动的,通过调动磁极头的位置来改变电子运行轨道的长度来达到调谐的目的。

5. 电子能散度小 一般直线加速器电子能散度约为 $\pm 5\%$,普通电子回旋加速器约为1%。而跑道式电子回旋加速器因为磁场聚焦力加强了,同时由于它存在直线段,两相邻轨道之间的距离又比较大,有人将其直线段轨道管道化,并在轨道上加设聚焦透镜,致使束流能散度达到千分之一。

用,因而可以缩小两磁极间的距离,降低造价。

电子枪装在加速器外面(亦可装在谐振腔上),用静电偏转板引入加速腔。

2. 电子在跑道式回旋加速器中能多次返航加速,提高了加速机构的利用率,降低了对射频功率源的要求。一台18兆电子伏、30毫安的跑道式回旋加速器射频功率源只需3.5兆瓦。

3. 射频频率和磁场是不随时间变化的两个

表 1

运行模式 n	电子通过加速机构次数	电子运行的轨道	电子能量调节范围(兆电子伏)
$n=6$	1	第6	1.5—3.0
$n=3$	2	第3, 6	3.0—6.0
$n=2$	3	第2, 4, 6	4.5—9.0
$n=1$	6	第1, 2, 3, 4, 5, 6	9.0—18

跑道式加速器的束散度(束流半径 \times 发散度)亦很小。这也是它的一个优点。

由于这两个优点,使束流运输系统变得较为简单,在几米甚至十几米的束流运输过程中,几乎可将束流

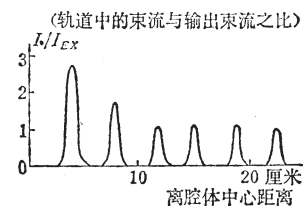


图4 在回旋加速中束流沿轨道的分布情况

100%的运输到所要使用的地方。

6. 引出方便 由于轨道相邻间隔大,能散度、束散度都很小,在各条轨道附近聚集着绝大部分电子,电子沿半径的分布情况如图4所示。

只要我们调节好磁屏蔽(本身是一根铁管,管中磁场强度差不多是零)的径向位置和方向,就可以把绝大多数电子引出来,引出效率可达90%以上。

加拿大安大略大学1973年成功地制成了一台跑道式电子回旋加速器,其性能如下:电子能量4.5—18兆电子伏;束流强度30毫安;电子注入能量:80千电子伏;最高磁场强度6000高斯;磁控管电源最大可调功率3.5兆瓦;设计电子轨道6条。

加速机构是由三个加速腔和两个边耦合腔组成。利用一个同方向的脉冲延时电路来使电子枪脉冲与射频脉冲达到同步。

跑道式电子回旋加速器的用途

跑道式电子回旋加速器的许多特点,使它特别适合于用来作辐射治疗。

一台能量在40兆电子伏以下的这种加速器可以做得非常紧凑,使之能符合于医疗设备的要求。一个用来作为微波振荡器的磁控管射频功率源可以安装在辐射治疗机的转动部份上。

通过选择不同的运行模式,束流的能量就可以从几兆电子伏到该加速器的最大能量之间连续调变。这就使得有可能制造一种适应性很广的辐射治疗设备,它既能作X射线治疗,同时又可以作剂量率为每分钟几百拉德(吸收剂量单位)以下的任何一种能量的电子