

费米国立加速器 实验所 (FNAL) 的预注入器

朱孚泉

在美国中西部芝加哥 (CHICAGO) 城外勃脱维亚 (BATAVIA) 小镇旁的费米加速器实验所, 拥有一台高能加速器, 它可使质子获得最高能量为 500 京电子伏 ($500 \times 10^9 \text{eV}$), 这是目前世界上已建成的最大的加速器之一, 是作为探索物质构造奥秘的有力工具。

质子最终达到这么高的能量, 是分成四个阶段完成的, 每个阶段由一台加速器使它获得预定的能量。第一台加速器——预注入器, 把质子从离子源引出并使它达到能量为 750 仟电子伏 (Kev), 注入到第二台加速器即直线加速器中去, 它使质子的能量提高 200 兆电子伏 (MeV), 以后再注入到一个称为增强器 (Booster) 的环形加速器去, 把能量又提高了 8 京电子伏 ($8 \times 10^9 \text{eV}$)。最后的加速阶段是由一台称为主环形加速器 (Main ring accelerator) 完成的。当质子达到所需要的能量后, 自加速器中引出, 通过运输系统打到各种靶上, 产生次级粒子, 提供作各种物理实验。

预注入器是由高压发生器、离子源、加速管、控制系统及其他附属系统所组成。

高能加速器的预注入器大多用脉冲双等离子源产生正氢离子束 (即质子束)。这种离子源是把氢气电离后, 形成等离子体, 在引出电场作用下, 把正氢离子拉出来送入加速管。这是一种比较经济而又容易获得强脉冲束流的离子源。高压发生器产生直流高压供给加速管, 在加速管内形成了高压静电场, 离子束通过后获得更高的能量。从加速管出来的离子束通过束流运输系统, 这套系统有各种测量及聚束装置, 对束流进行性能测量、位置校准、及按照要求进行聚焦, 并把它“护送”进入直线加速器, 开始了它的第二阶段旅程。

预注入器是一种高压型加速器, 它的原型就是三十年代考克克罗夫脱-华尔顿 (Cock Croft-Walton) 发明的高压倍加器, 经过了四十多年的发展, 使用了一些新技术, 使加速器的性能不断有所改进。这些改进可概括为以下几方面: 即具有高稳定度的高压发生器, 高梯度加速管 (加速区电场强度 30—50 仟伏/厘米), 高亮度离子源 (即束流强、束流发散角小)。近十几年来发展了负氢离子源、极化离子源等新型离子源, 显出了它强大的生命力。

这里介绍费米加速器实验所的预注入器, 它是安装在一个六面用金属板屏蔽 9 米多高的大厅内, 为了稳定高压, 要求厅内温度控制在 20°C 左右, 相对湿度保持在 40—50%, 通过铅玻璃窗看进去, 闪亮的电极、高大的结构, 确是一台又庞大又美观的装备。

高压发生器

总高约 6 米的高压发生器安在大厅的一边, 是由 5 级高压整流硒堆向高压电容充电的倍压线路组成。高压电极的直径约 1.8 米, 呈半球形, 工作直流高压为 750 仟伏。这台高压发生器由 5 仟周电源经升压变压器供电, 又采用了反馈线路, 使直流高压稳定度优于 0.05%。

用一个长约 2.4 米的保护电阻, 把高压电极与高压舱连接起来 (高压舱每边约 2.5 米用金属外壳屏蔽起来), 使两者的电位相等, 保护电阻为 5 兆欧, 内部充高绝缘气体六氟化硫 (SF_6)。高压舱内装有供离子源所需的各种电源设备及辅助的真空、水冷系统等。所需用电都由一台发电机供应。高压舱由 4 根绝缘筒支承, 总高约 6.7 米, 有一台安在地面上的电动机, 通过绝缘杆传动高压舱内的发电机。

高压舱的一面与墙之间装有一个长约 2.7 米的电阻电容组合分压器, 向控制室提供高压讯号。另有玻璃纤维制成的光通导, 向控制室发送各种讯号及参数, 并传递来自控制室的讯号, 操作高压舱内各设备。

加速管与离子源

高压舱的另一面与墙之间是加速管, 总长 2.13 米。

从图 1 可知离子束自引出电极拉出后, 即进入加速区, 这是由多电极组成的静电场, 每个电极是具有一定形状的曲面, 中心有孔可使束流通过, 由水电阻分压连至各电极, 满足所要求的加速电场分布。加速区的长度 22.9 公分。加速区内保持高真空, 每个加速电极与陶瓷环用胶粘接起来组成加速圆柱, 柱外是一个玻璃钢容器, 内充高强度绝缘气体 SF_6 。

这台预注入器的特色是采用负氢离子源, 并获得很好的结果。这是使用了一台磁控管型的负氢离子源,

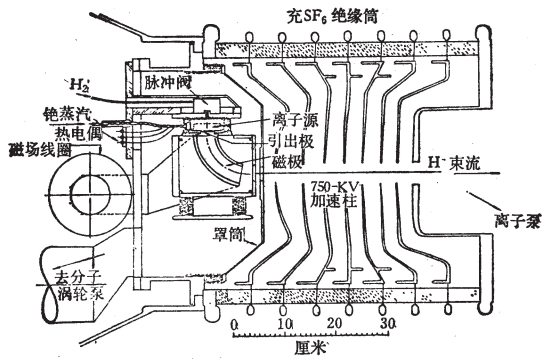


图1 负氢离子源与加速管

它完成了负氢离子的形成、引出和偏转整形三个过程。负氢离子是由正氢离子俘获电子而形成的，为提高负氢离子产额，是借助于电子逸出功较低的铯来实现的。

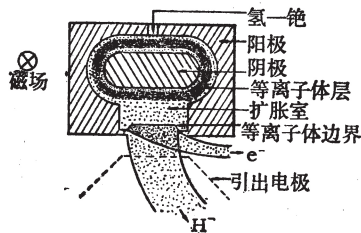


图2 磁控管型负氢离子源工作原理

从图2可见阳极与阴极间是一个跑道形放电室，有充氢及铯两个孔道。当室内建立起适当的氢气压时，由脉冲电场使放电室内发生电弧放电，在垂直磁场作用下，电弧放电扩展到整个放电室，形成等离子体。在电场作用下，正离子轰击阴极，在适当的温度及供给适量的铯蒸气条件下，可使阴极表面附着一层铯，这样就很容易把电子转交给正氢离子，形成了负氢离子。

在引出电场作用下，一部份负氢离子及电子，从引出缝中拉出，通过引出电极进入 90° 偏转磁场。从引出缝拉出的负氢离子束成带状截面， 90° 偏转磁场作用之一是使束流截面变成近于圆形而进入加速管。从引出缝一起出来的其它负离子、电子，由于质量不同，在偏转磁场作用下，只有负氢离子按原设计要求，沿偏转磁场的中心线进入加速管中心，大部分电子按较小的半径打到阳极块上。

负氢离子束的多圈注入

费米加速器实验所原先用直线加速器将正离子束注入增强器的，自1978年3月开始改为将负氢离子束多圈注入方法来提高增强器的束流。它简要的原理是这样：当一团质子在增强器的闭合轨道上运转，如将一团负离子射进来，那末这两团离子会重叠在一起，接着使它通过一个很薄的剥离膜；这膜是如此之薄（其厚度约200微克/厘米²），当这些离子通过后都不会受到损

失或改变运动方向，而仅使负氢离子被剥去了两个电子而变成了正离子，这样这团混合的离子都是正离子，如继续用这种方法多次注入负氢离子，最后使这团正离子的数量增加了许多，即提高了束流强度。

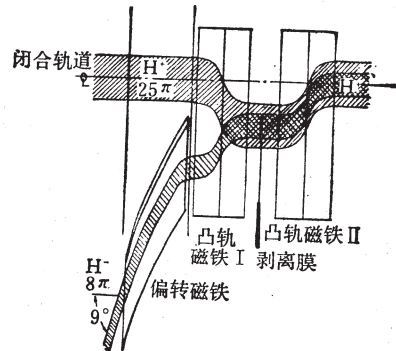


图3 负氢离子束多圈注入到增强器的原理

图3中表示在增强器的闭合轨道上运转的一团正氢离子，进入到第一凸轨磁场区，改变了原来轨道而凸了出来。这时有一团从直线加速器注入的负氢离子，沿着与增强器闭合轨道相平行的方向进入第一凸轨磁场区，这团负氢离子也改变了运行方向，与正离子团重叠起来；一起通过剥离膜形成一个新的正离子团进入第二凸轨磁场区，这种磁场使新离子团又回到增强器闭合轨道上继续运行。这样待下次运转到第一凸轨磁的场区时，又遇上一团负氢离子，再混合起来通过剥离膜，形成新的正氢离子团。可用这种方法多次注入负氢离子束。到1978年9月，费米加速器实验所已用负氢离子16圈注入，每次注入脉冲负氢离子束43毫安，与原先用正氢离子束300毫安单圈注入的效果相比，使增强器的束流提高了30%。这样用负氢离子束注入，对预注入器及直线加速器束流强度的要求也降低了。这种用负氢离子束多圈注入到增强器的方法引起人们很大的兴趣，美国的BNL和我国的高能加速器都准备采用这种注入方案。

预注入器的运行，可以在主控制室操作，也可由本机控制室操作。本机控制系统还包括了一台小型计算机，可以操作高压发生器及高压舱内离子源各项电源及设备，并显示各项参数，经过数据处理后还可显示并记录各项参数及图形、曲线。

高能加速器的束流就这样在预注入器中产生，并开始它漫长的加速历程，昼夜不停地成千小时连续运行。