

予注入器

吴士勤

在铁道上飞驰的列车，它的速度有一个逐步提高的过程。同样，高能加速器中被加速的带电粒子的速度以及它们的动能，也是在加速过程中从低能到高能逐步提高的。因此，要把粒子加速到高能，不仅需要高能加速器，也需要低能加速器。有时要用好几台不同能量的加速器串联起来工作，让它们在不同能区各自发挥其特点。这一串加速器中的第一个，通常就叫做予注入器，能量一般选用750千电子伏。带电粒子就从这里踏上它们的“征途”。

予注入器所加速的带电粒子，是要注入到后面的加速器进一步加速，它的好坏关系到整个高能加速器的质量，因此，对它有一定的要求，主要是产生强脉冲粒子流，能量稳定，聚焦良好。脉冲流强要求几十到几百毫安，脉冲宽度几十到几百微秒，冲脉重复频率每秒几次到几十次。另外，为了使尽可能多的粒子能够进入后面的加速器继续加速，要求予注入器的粒子流的能量稳定度达到万分之几。还要求它的粒子流的聚焦情况良好，即粒子流截面要小，粒子发散角度也要小，各粒子运动方向尽可能和理想轨道一致。通常用“发散度”来描述粒子流的聚焦情况，发散度约正比于粒子流直径和最大发散角的乘积。预注入器的粒子流的发散度要求小于 2π 毫米·毫弧度。总的来说，对预注入器各项指标的要求都是比较高的。

预注入器和一般低能加速器大多是高电压型的，由离子源，加速管和高电压发生器三个主要部分组成。此外还有真空系统、束流测量装置等。下面简单介绍三个部分的工作原理和一些关键技术问题。

一、脉冲离子源

加速器把带电粒子加速后，用作“炮弹”去轰击靶，离子源就是提供这种带电的“炮弹”的装置。预注入器大多采用双等离子体离子源，这种离子源适于产生强

脉冲离子流，图1是这种离子源的原理图。氢气从进气管(1)进入放电室。电子从阴极发射出来，受阴极与阳极间数百伏电压的加速作用，向阳极运动。途中和氢气分子碰撞，使氢分子电离，产生等离子体，锥形中间电极附近的电场和中间电极与阳极间的不均匀磁场都对等离子体起约束作用，使得在阳极口附近形成高密度(10^{13} — 10^{14} /厘米³)的等离子体。引出电极(7)和阳极间的电场把等离子体中的正离子(质子)拉出离子源，送进加速管。适当调节离子源的参数，便能得到较强的脉冲粒子流，并且工作稳定，粒子能量均匀，发散角度小，质子比例高。

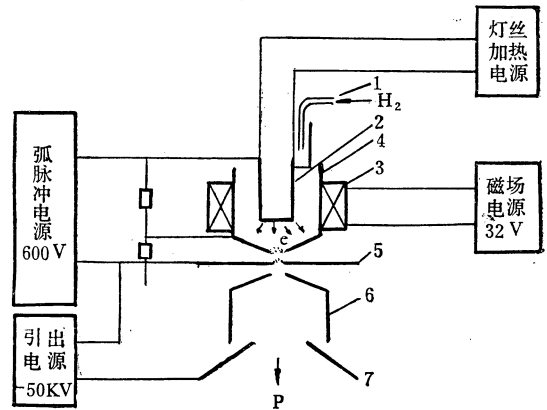


图1 双源体示意图

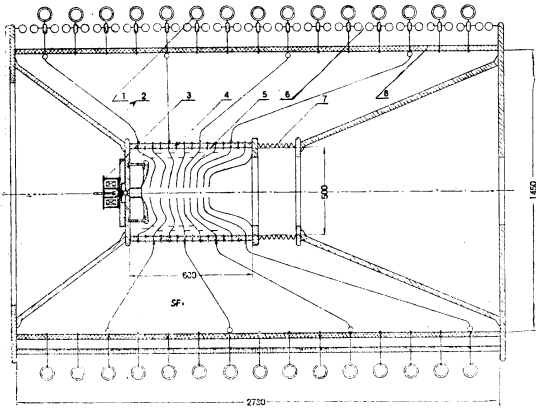
- (1) 进气管 (2) 阴极 (3) 磁场线圈 (4) 中极电极
(5) 阳极 (6) 扩张环 (7) 引出电极

二、高梯度加速管

加速管是一个真空管道，有一系列的加速电极，每个电极有一定的电位。加速管有三重作用：(1)给粒子束提供一个真空通道；(2)加速粒子；(3)对粒子束聚焦。从离子源出来的粒子流，进入加速管以后，前面的电极吸引它，后面的电极排斥它，粒子在各个电极间隙中连续受到加速作用，速度越来越高。它通过最后一个加速间隙时，就达到了在预注入器中的最高能量——750千电子伏。

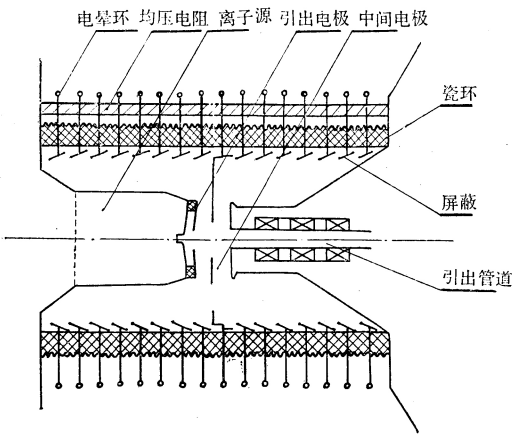
在预注入器中，脉冲流强很高，粒子流中各粒子带有同性电荷，相互排斥力很强(即空间电荷效应)，容易使粒子流发散。粒子能量越低，受到的发散作用也越大。为了减小粒子流的发散，就要缩短加速间隙，使粒子束在尽可能短的时间里加速到最高能量。由于加速间隙缩短，所以加速电场强度较高，约30千伏/厘米到50千伏/厘米。这种加速管叫高梯度加速管。另外，还可适当地选择电极形状，使加速电场对粒子流有一定的聚焦力，以抵消空间电荷作用。

高梯度加速管大致又分两种，图2a.是一种加速电极较多的加速管，共有十余个电极。电极形状经过



(a) 皮尔斯电极加速管

1. 防晕环
2. 引线
3. 离子源
4. 绝缘环
5. 加速电极
6. 保护球隙
7. 金属软管
8. 有机玻璃筒



(b) 少电极加速管

图 2

仔细的计算和实验决定，各个电极处在一定的电位下，电场的聚焦力便能抵消空间电荷力，这种电极系统叫皮尔斯电极系统。另一种加速管电极数目很少，只有二到三个。这种加速管的加速电场强度更强，常高达 50 千伏/厘米以上。图 2 (b) 是这种少电极加速管的示意图。

高梯度加速管里的电场强度很高，容易产生微放电。因此电极要用适于在强电场下工作的材料制，目前常用钛合金(6%的铝和4%的钒)。加速电极之间的绝缘环用高绝缘强度的陶瓷制作。加速管内部要保持高度清洁，封接瓷环和电极的胶及胶蒸汽不能逸进加速管。

三、特殊的稳定高压源

高压电源的作用就是给加速管提供加速和聚焦粒子束的电压。为了保证束的能散度小，高压稳定性要高。目前普遍采用对称式倍加电路获得高压(图4)。

我们用图3的单进倍加电路来简单介绍它的工作原理。

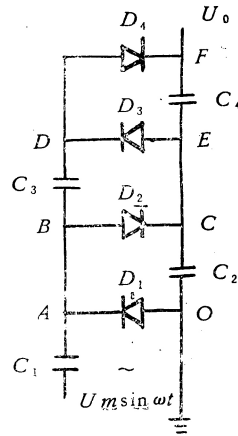


图3 倍加电路原理图

图3是一个二级单进倍加电路(每两个电容器和两个整流器构成一个倍加级)。当右端电位比左端高时奇数号整流器导通;反之,则偶数号整流器导通。我们以空载情况来说明这种电路的工作原理。A点为负电位时, D_1 导通, 把 C_1 充电到 U_m ; A点为正电位时, D_2 导通, C_1 上的 U_m 电压和电源电压串联起来对 C_2 充电; A点为负电位时, D_1 导通, 再把 C_1 充电到 U_m ; 同时 D_3 导通, C_2 上的电压和电源电压串联起来对 C_3 充电。如此反复充电, 在没有负载的情况, 在稳定状态下, 除 C_1 上的电压为 U_m 外, 其他电容器都达到 $2U_m$ 。由上面的分析可知, 在输出支路(F-O支路)上共有 N 个电容器, 因此总输出电压为 $2NU_m$ 。当有负载及其他漏电途径时, 输出电压会略低, 还会有波动。对称电路(图4)可以看成是两个单边电路并联, 空载电压和单边电路相等, 有载时电压降落及电压波动都较小。高压发生器的高压输出通过一

高压发生器的

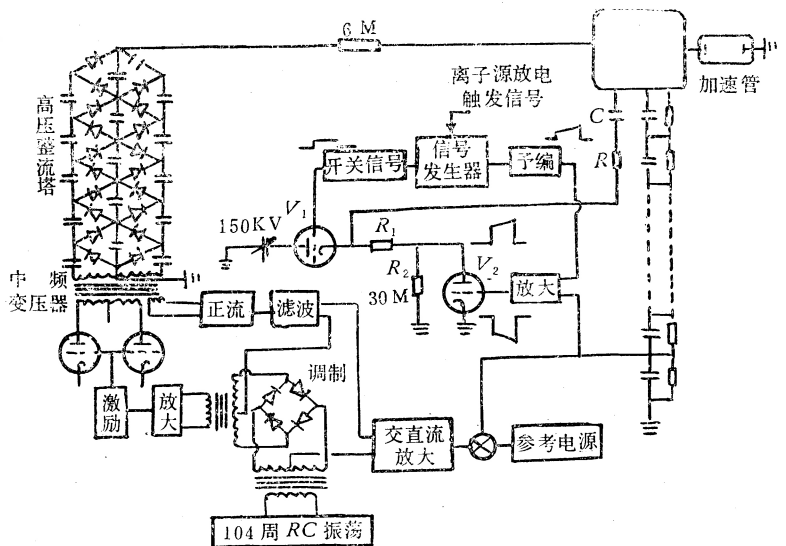


图4 高压发生器及其稳定系统

著变化的时间比起它与电子碰撞的时间来要长得多，因此，可以看成是单个自由的（似乎与其它部分子无关的）部分子与电子发生了散射，这是第一步；当电子在一个部分子上发生散射后，这个反冲的（被电子碰撞的）部分子走不多远就与其周围部分子强烈地作用，最终形成许多强子（即 X ）射出，这是第二步。因此，电子在核子上的深度非弹性散射实际上包括两个过程：一是电子在“自由”部分子上的弹性散射，一是反冲部分子与周围部分子之间的强过程（图 13）。

那么，部分子究竟是什么东西呢？最自然的一种猜想是，部分子可能就是层子（或者至少有一部分是层子）。但这个模型还存在着不少困难，实验上还没有真正找到层子，也没有找到双层子系统。迄今所发现的强子要么由三个层子构成，要么由一对层子（一个层子和一个反层子）构成。这种逢三饱和规律，虽然奇特，却是一个迄今为止仍无例外的实验规律。人们按照这个模型作了许多理论计算，发现它竟能成功地解释许多实验现象，例如《标度性定律》就是一例。所谓标度性定律是指：深度非弹性散射的结果不依赖于时间、

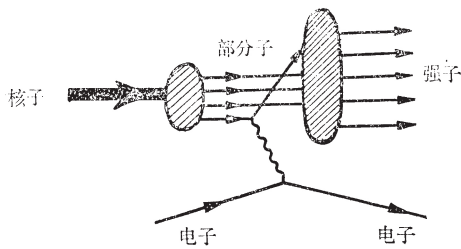


图 13

长度、质量标度的选取（只要不改变 \hbar 和 c 的数值），把时钟、尺子、天平的刻度选大或选小一些，测量出来的结果是一样的。这个定律可以从部分子模型推导出来，而实验发现在相当宽的电子能量范围内这个定律成立。这些事实表明层子——部分子模型包含有合理成分，是值得重视的。

按照部分子模型，还会在许多情形中出现喷射现象。例如，在高能 $e^+ - e^-$ 对撞过程中直接产生的是一对部分子，它们将倾向于沿某个轴线并且朝相反方向射出。由于逢三饱和定律，这一对部分子最终将形成两束强子朝相反方向喷射出来。测量喷射强子束的角分布，可以对部分子的性质作出某些理论推测。如果不是产生一对部分子，那么可以预期，强子应当从四面八方飞出。实验上果真已经观测到了喷射现象，并测出了喷射束的角分布，由此推测部分子的自旋似应为 $1/2$ ，这对层子——部分子模型是一个有力支持。

（六）结语

人类认识微观世界经历了好几个阶段。我们日常所见到的各种物质，均由分子构成；分子又由原子构成；原子又由电子和原子核构成；原子核又由核子构成。这些现已成为众所周知的物质结构图象，在科学史上曾经经历了充满矛盾和极不平凡的发展过程。这些进展不仅使人类对物质结构的认识前进了一大步，一次又一次地证实了物质的无限可分；同时又开辟了微电子学、激光以及原子能等一个又一个崭新的技术领域。如今，人们又正在向更深一层次的“基本”粒子领域进军。揭开“基本”粒子结构秘密的长征虽然刚刚开始，但是这种热情必将会得到新的丰收，一幅现在还难以预料的灿烂前景必将展现在眼前！