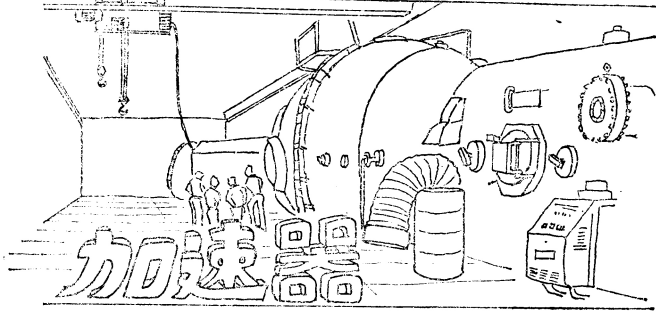


# 串列式静电



于 蘊 峰

## 一、引言

串列式静电加速器简称串列加速器。它是由静电加速器巧妙发展起来的。静电加速器是利用静电发电机(或称静电高压发生器)作高压电源加速带电粒子的设备。

静电发电机作为高压电源早已为大家所熟知。由静电学可知:一个与地绝缘的空心金属球(通称高压电极),它所带的电荷总是分布在外表面的,若另一个带电体在内侧与它接触,则电荷将全部流到金属球的外表面,若带电体从电源获取电荷再次在内侧和金属球接触,则电荷又将全部流到金属球的外表面。若金属球的对地电容为  $C$ , 所带电荷量为  $Q$ , 则其对地电位

$$V = \frac{Q}{C}. \quad (1)$$

于是,金属球上带的电荷越多,则其对地电位越高,形成的静电场也越强。基于这一原理,范德格拉夫(Van de Graaff)于1929年提出利用静电发电机来做粒子加速器的高压电源,因此,静电加速器也叫范德格拉夫加速器。

静电电荷分正电荷和负电荷,并具有“同性相斥,异性相吸”的性质。假设高压电极带正电,我们把高压电极内离子源产生的正离子引出来,则正离子将受到静电场的排斥向地电位加速运动。当正离子被加速到地电位时,它所获得的能量为

$$E = eV, \quad (2)$$

式中  $e$  为正离子所带的电荷,单位为电子电荷; $V$  为高压电极对地的电位,单位为伏特; $E$  的单位为电子伏特,简称电子伏。

由(2)式可知,如果希望被加速的离子达到较高的能量,只有提高  $V$ 。当一台高压发生器的结构一定时,它的对地电容就固定了。由(1)式可知,若要提高  $V$ ,

只有增加  $Q$ 。从原则上讲,  $Q$  可增加到无穷大,因而,  $V$  可提高到无限高。但由于材料、工艺等因素的限制,  $V$  达到一定值后再进一步提高遇到了较大的困难。于是,人们就设想,既然把离子源产生的正离子引入正极性的静电场可以受到“排斥”而被加速获得能量,那么,离子源产生的负离子在地电位同样可以被“吸引”到高压电极,获得同样的能量。在高压电极内利用一个装置(通称电子剥离器)使负离子变为正离子,并将其引入静电场,则正离子将再次被“排斥”到地电位。这样,带电粒子在同一个正电压下被加速两次,它所获得的总能量为  $2eV$ 。这种设想,随着科学技术的发展,特别是负离子源的试验成功,后来变为现实。在1958年建成了第一台这样的加速带电粒子的装置,称为“串列加速器”。

串列加速器包含了静电加速器所具有的一系列优点,如能量可以方便地精细调节,能区变化范围大,能量稳定度高而且可以测量得很精确,束流聚焦准直好,辐射本底小等等。与静电加速器相比,串列加速器加速粒子的能量可以高一倍到多倍,而且由于离子源移到钢筒外部,处于地电位,不受离子源体积、供电、冷却等条件的限制,适于加速各种重粒子;束流也易于实现脉冲调制。离子源更换、维修方便,大大提高了加速器的利用效率。与能量相近的其他类型加速器相比,串列加速器的上述优点尤为突出。这使串列加速器成为近代低能核物理和核技术应用中的一种较理想的设备。

## 二、基本结构和工作原理

串列加速器主要由高压发生器、负离子注入器、加速管、电子剥离器、束流输运系统、能量稳定、控制及监测系统、脉冲化系统和真空系统等部分组成。图1为二级串列加速器的基本结构示意图。

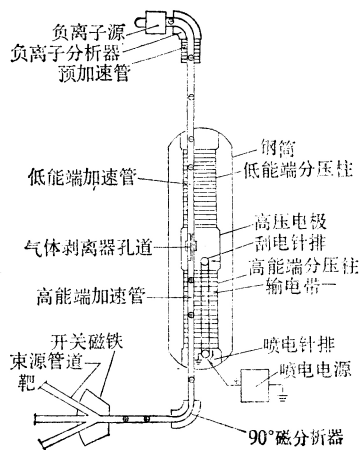


图1 二级串列加速器基本结构示意图

高压发生器和静电加速器一样,都是放在充有几个到十几个大气压力的绝缘气体(如  $N_2$  和  $CO_2$  或  $SF_6$ )的

钢筒内,用以提高高压发生器部件的耐电击穿的能力。分压柱用于使高压电极对地的电压均匀地分布在加速管上,以防止纵向电场分布不均而造成局部击穿。所不同的是分压柱和加速管都是两根,高压电极由半球状改为圆筒状。

前面已经谈到静电高压产生的原理。如何将电荷输送到高压电极上去呢?承担这个任务的是高压发生器的充电系统。它的工作过程如下:喷电针排接到几十千伏高压电源的正端,由于尖端电晕放电的作用,将针尖附近的气体电离,并在电场的作用下将正电荷喷向绝缘橡胶带的表面,带子以大约 20 米/秒的速度在上、下轴之间运转,从而将正电荷源源不断地送至高压电极,同样,利用尖端放电的原理,在高压电极内用刮电针排将正电荷吸引下来,继之流向高压电极的外表面,于是在高压电极与地之间便形成了一定的静电场。

现在,不少串列加速器的充电系统,将输电带换成输电链或输电梯,喷(刮)电针排改为感应板。这使输电系统的高电压性能有了显著改进,并使头部高压的稳定性能大大提高。

负离子注入器由负离子源、负离子分析器、预加速管和高压电源等组成。实际上是一台小型高压加速器。负离子源产生的负离子被引出后,由于种类不纯,先使其进入负离子分析器进行分析,以选择我们所需要的负离子进行加速,而将其余不需要的负离子挡住,以减轻加速器的负载。分析后的负离子流进入到预加速管的束流传输系统相匹配,提高传输效率。

带电粒子的能量主要靠在加速管中被加速而取得。加速管由绝缘环(如玻璃、陶瓷)和有孔的金属电极(如铝、不锈钢、钛等)相间胶接或焊接而成。一般胶接成一定长度的管段,整根加速管由若干个管段用端法兰连接起来。为了抑制次级电子,提高加速管的耐电压水平,现在有效的办法是采用小孔径电极和倾斜电极。所以,有小孔径加速管和斜场加速管之称。在低能端,负离子受高压电极正电位的吸引进行第一次加速。在高压电极内,使负离子通过电子剥离器。电子剥离器可以是细长的通以低压气体的孔道,叫气体剥离器。也可以是固体薄膜,叫固体剥离器。负离子在电子剥离器里被剥掉两个以上的电子变成正离子。于是,在高压电极正电位的排斥下,正离子在高端加速管中向地电位进行第二次加速。对质子来说,正离子和负离子都带有一个电子电荷,故获得的总能量为

$$E_{\text{总}} = E_{\text{正}} + 2eV, \quad (3)$$

式中  $E_{\text{正}}$  为负离子从注入器出来进入低能端加速管时的注入能量。而对重离子来说,负离子通常也带有一个负电荷,而经过电子剥离器后正离子可以带一个或两个以上的正电荷。设剥离后正离子所带正电荷数为  $Z$ , 则经过第二次加速后重离子所获得的总能量为

$$E_{\text{总}} = E_{\text{正}} + (1 + Z)V. \quad (4)$$

从(3)、(4)式与(2)式相比较可以看出,串列加速器加速粒子的能量可以比单级静电加速器高一倍到多倍。例如:当  $V = 13\text{MV}$  时,对电荷数  $Z = 16$  的碘离子,得到的总能量为  $221\text{MeV}$ 。这是通常的静电加速器所难以达到的。

从高能端加速管出来的正离子束再次经过  $90^\circ$  磁分析器的偏转和分析,以便从剥离后形成的多种电荷态的正离子中,选择出所需要的某种电荷态的正离子,而将其余不需要的正离子挡住。开关磁铁的作用是将离子束转换到不同的束流管道,以供不同的实验使用。提高加速器的利用率。

束流输运系统是在离子束从离子源到靶所经过的路径上设置的一系列电或磁的束流传输元件(图 1 中未全部画出),以减少束流在输运过程中的损失,提高传输效率。

能量稳定、控制及监测系统为一系列电子和电气装置,使束流的能量稳定度保持在千分之一到万分之一的范围内,并使操纵人员可以方便地在控制室对加速器进行遥控和监测。

脉冲化系统是由斩束器和聚束器等所组成,可把直流束转换成宽度为约  $1\text{ns}$  的脉冲束。

真空系统保证束流输运管道中达到必要的真空度。

### 三、用 途

串列加速器在国防和国民经济的应用研究和基础理论研究方面都有广泛的用途。

在应用研究方面,它可用于核参数的精细测量。反应堆性能的改进,可控热核反应的实现等等都对核参数的测量提出了很高的要求。采用通常的高压倍加器、静电加速器及回旋加速器等在测量精度、能区配套和粒子种类等方面都难于全面满足需要。而在这些方面,串列加速器具有较好的性能。串列加速器产生的各种能量的带电粒子束可以模拟空间辐射带,用来研究人造卫星上的各种器件在穿过辐射带时所受到的影响。用重离子轰击反应堆的有关材料,可以模拟中子及裂变碎片对材料的损伤效应,几小时的辐照效应相当于反应堆内运行一年以上的积累辐照效应,而且各种条件便于控制,这对堆材料辐照损伤机理的研究很有利。利用串列加速器进行带电粒子的 X 荧光分析和活化分析,是高纯度半导体等材料中微量元素分析的重要手段。利用串列加速器的精细的特点,还可以开展超精细相互作用的研究,用以研究固体物理、原子物理等许多重要课题。此外,在核化学、生物学及某些特殊同位素的制备等方面也得到了应用。

串列加速器是低能核物理基础理论研究的重要工具。为了更好地利用原子能及不断地开辟新的核技术

应用领域，必须更深入地探索和掌握原子核本身的微观运动规律。这是低能核物理基础研究的重大课题。精细反应核谱学，重离子反应研究，是当前核物理基础研究向纵深发展的两个比较重要的方向。串列加速器由于具有能量稳定、分辨率高、能量连续可调等特点，它是目前研究精细反应核谱学最为理想的工具。利用串列加速器，可以开展以较轻的重离子作为入射粒子的重离子反应的精细实验工作。串列加速器还可以作为重离子加速器的注入器，以提供优质高电荷态重离子注入到大型重离子加速器（如分离扇形迴旋加速器等）中去，可以充分发挥后者增加离子能量的潜力。

#### 四、目前发展状况

串列加速器的发展史可用图2表示。在电压等级方面，由图可见，高压电极的电压即端电压等级有多种。其中10MV MP型串列加速器的典型质子束流强度为10~25 $\mu$ A。

在结构形式方面，有直立式、卧式和折叠式三种。直立式机械结构较简单，但厂房高，基建费用较大，运行维修不方便。卧式结构是将整个加速器水平放置。

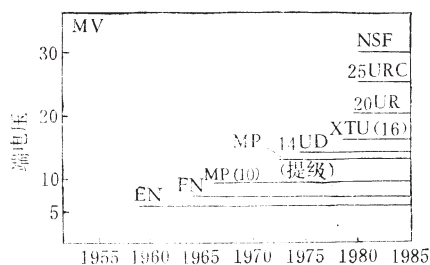


图2 串列加速器的发展史

这样，厂房高度可大大降低，但机械结构要复杂得多。因为整个分压柱、加速管、高压电极及其内部设备等的总重量约有几十吨，长约20多米，而且在温度、压力变化以及机械振动的情况下都可能影响加速管和剥离孔道的准直度，从而影响束流的顺利通过。这些都对结构提出了较高的要求。折叠式结构是在高压电极内设置一台能使带电粒子偏转180°的分析磁铁。分压柱象单级静电加速器一样只有一根，而柱内安装两根加速管。这样，加速器钢筒的高度缩短很多，因而厂房高度大大降低，基建费用可大大下降。但头部磁铁的供电、冷却，加速器运转的机械稳定性以及磁铁运行参数的测量、控制等都是较大的技术问题。

串列加速器的级数有二级、三级和四级，但绝大多数二级串列运行。

下面简单介绍一下几台电压较高的串列加速器的情况。

意大利里亚诺(帕多瓦)国立实验室的16MV XTU型卧式串列加速器，1980年5月，无加速管的高压试

验已达20MV。安装加速管后，由于在钢筒充以较高气压的SF<sub>6</sub>气体时加速管漏气，没有达到额定的16MV工作电压，现在降低工作电压出束。

日本JAERI 20UR折叠式串列加速器，1978年12月无加速管的高压试验，端电压达23--24MV，有加速管的高压试验，最高电压达到过19MV。1979年7月初试出束，10月31日13MV O<sup>+6</sup>束2 $\mu$ A被加速出来。之后，26MeV的质子束2 $\mu$ A调到实验室。

美国橡树岭国立实验室25URC，也是折叠式串列加速器。1979年5月，无加速管的高压试验，最高电压达32MV。1980年5月，15.5MV O<sup>+6</sup>束60pA(粒子毫微安)被加速出来，入射束为750pA，束流传输率8%。出束状态下的最高电压为17MV。

英国达莱斯堡30MV NSF直立式串列加速器是目前世界上正在建造中的最大的串列加速器。高压发生器部分已经装好，1980年5月，来装中间电极的高压试验，端电压达22MV(指标为20MV)。中间电极已加工好，是铝合金的。输电梯运转速度15米/秒，在样机上已运转了几千小时。负离子注入器的建造在顺利进行中。现在的工作重点是在加速管性能的研究和改进上，加速管的电极是可以更换的。整个加速器放在一个高约70米的塔楼里，塔顶部安置负离子注入器的圆形房间直径25米，高13米。