

近代物理讲座

第六讲 加速器 (II)

张 英 侠

(北京大学技术物理系)

4. 直线加速器

直线加速器是最早发明的一种谐振式加速器。人们为了克服高压加速器所遇到的困难，探索了使粒子连续多次通过一个电压不很高的加速电场来获得高能量的方法。1924年 Ising 首先提出了可行的方案。1928年 Widroë 建成了第一个直线谐振加速器。

图 10 是早期直线加速器的工作原理图。沿着直线排列一些金属圆筒状电极（称为漂移管），奇数电极和偶数电极分别连接到高频电源的两个输出端上。当离子经过加速间隙 a 处时，间隙中的高频电场刚好是正电场，那么离子得到加速。如果离子进入漂移管后，高频电源正好转换极性（因为漂移管是金属制成的，在里面的电场强度等于 0，所以离子在漂移管里面不受高频电场的影响而作惯性运动），那么离子经过间隙 b 处时又能得到加速。这样，离子经过 n 个加速间隙后所获得的动能 W_n 为

$$W_n = nZV_a \cos \varphi, \quad (24)$$

式中 V_a 是高频电压的振幅值， φ 是离子通过加速间隙中心时加速电压的相角（称为加速相角）。

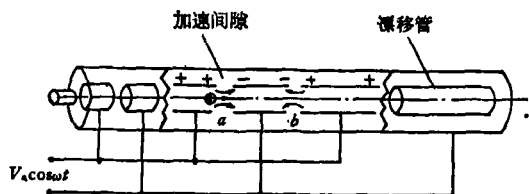


图 10 早期直线加速器工作原理图

设离子通过第 n 个漂移管所需要的时间为 τ_n ，高频电压的周期为 T_f ，则谐振加速的条件为

$$\tau_n = \alpha \frac{T_f}{2} = \text{常数} \quad \alpha = 1, 3, 5, \dots \quad (25)$$

另一方面，

$$\tau_n = \frac{l_n}{v_n}, \quad (26)$$

其中 l_n 是第 n 个漂移管的长度， v_n 是离子通过第 n 个漂移管时的速度。因此，第 n 个漂移管的长度应满足

$$l_n = \alpha T_f \sqrt{\frac{W_n}{2m}} = \frac{\alpha}{f} \sqrt{\frac{W_n}{2m}}, \quad (27)$$

式中 W_n 是离子的动能。

由此可见，随着离子能量的增加，漂移管的长度越来越长，这将使整个加速器的长度变得非常长。由式(27)可见，缩短加速器长度的途径是增加高频电压的频率 f 值。第二次世界大战以后，超高频微波技术有了很大的发展。在这个基础上，直线加速器重新得到了迅速发展。现在，直线加速器已经和回旋加速器一样，成为重要的加速器类型之一。

由于现代直线加速器利用了微波技术，因此跟原始直线加速器比较，结构上就大不相同。根据所采用的电磁场形式，现代直线加速器可以分为两种：一种是利用谐振腔中的驻波电场来加速粒子的，称为驻波直线加速器；另一种是利用波导中的行波电场来加速粒子的，称为行波直线加速器。它们既可以用来加速离子，也

可以用来加速电子。质子直线加速器多半采用前一种，而电子直线加速器一般采用后一种。

(1) 驻波直线加速

现代高频及微波技术已经把工作波长缩短到厘米波段。于是，可将整个加速器作成圆柱形谐振腔，用高频电源在腔体内激励起 TM_{010} 式振荡（下标第一个和第三个数字 0 表示沿 φ 角方向和轴向方向电场均匀无变化，第二个数字 1 表示沿半径方向电场的波节点数），这时在谐振腔里形成较强的轴向电场分量，这个轴向电场就可以用来加速带电粒子。

当用来加速质子时，因质子通过谐振腔空间时需要花相当长的时间，如果电场方向发生变化，而质子仍在腔体内，那么会被减速。为了防止这种减速作用，在腔内设置漂移管。适当选择漂移管的长度，可以使粒子经过漂移管之间缝隙（加速间隙）时总是得到加速，而在电场改变方向时粒子正好进到漂移管中，受漂移管的屏蔽作用而不被减速。这样，质子就可以得到谐振加速。谐振加速条件为

$$l_n = k\beta_n\lambda, \quad (28)$$

式中 l_n 为第 n 个漂移管的长度， β_n 是质子通过第 n 个漂移管时的相对速度， λ 是加速电压的波长， k 是一个整数。

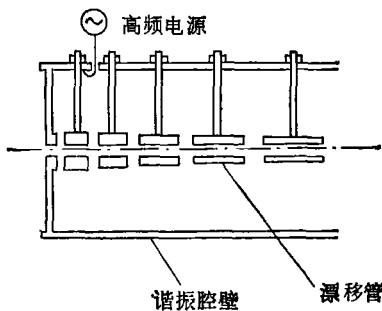


图 11 质子直线加速器原理图

图 11 是这种质子直线加速器的原理图。为了在谐振腔的每个加速间隙上形成相同谐振频率的电场，随着漂移管长度的增加，其直径要相应地减小，加速间隙也适当加大。这种直线加速器最早是由 Alvarez 实现的。

当前世界上最大的质子直线加速器是美国

洛斯阿拉莫斯实验室的能量为 800 MeV 的介子物理用加速器 (LAMPF)。由于高能质子直线加速器需要很大的高频功率，技术比较复杂，造价昂贵，因此目前一般只做到 200 MeV 左右，仅作为高能加速器的注入器用，而更高能量的加速就要靠质子同步加速器来完成。

上述驻波直线加速器一般用来加速质子，不适于加速电子。近年来由于谐振腔的结构形式不断有所改进，出现了所谓第二代、第三代驻波加速结构。改进后的驻波直线加速器既可以加速离子，也可以加速电子。目前，带耦合腔的驻波加速结构已在工业及医用的小型电子直线加速器上采用。驻波加速器的谐振腔尺寸比较大，储能较多，电子流通过谐振腔时对高频系统的影响较小，可加速比较强的电子流。我国也已制造此类加速器。

(2) 行波直线加速器

因为电子的速度在不很高的能量时就接近光速，所以可以利用波导中的行波电场来实现加速。如果把具有一定初始能量的电子放到行波波峰的某一相位上，并适当控制行波电场的传播相速度，使得与电子速度保持一致，那么电子好象骑在波峰的某一相位上，与电磁波共同前进，并在行波的纵向电场的作用下不断地增加能量。

我们知道，在均匀的圆柱形波导内输入微波功率，并在波导的终端接上匹配负载，那么在系统内可以激励起 TM_{0n} 型行波（右上角 0 表示圆波导，右下角第一个数字 0 表示沿 φ 角方向电场均匀，第二个数字 1 表示沿半径方向的波节点数）。不过在一般的波导中行波的相速度是大于光速的。当然，在这样的行波场中，电子不能与行波保持恒定相位而持续加速。因此，在行波电子直线加速器中，需要采取慢波措施，使得行波的相速减慢到与电子速度一致。目前常用的办法是在圆波导内每隔一定距离（一般 $1/4$ 或 $1/3$ 行波电场的波长）安放一个具有圆孔的金属圆盘。实际上这些圆盘是波导中的电抗性负荷，所以把这些波导称作盘荷波导。图 12 是行波电子直线加速器的原理图。

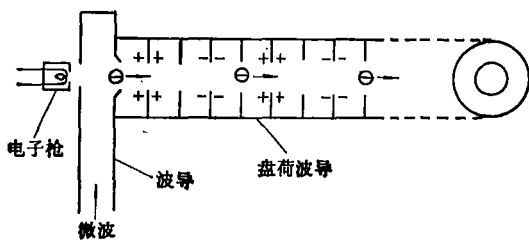


图 12 电子直线加速器原理图

1966年美国建造的 24GeV 电子直线加速器 (SLAC)¹⁾, 是迄今能量最高的电子加速器。这台加速器的总长为 3050m, 一共用了 245 个大功率速调管, 总微波功率峰值达 4000 MW。由于大功率微波系统不但投资贵, 并且日常维护费用也很高, 因此目前世界各国一般采用电子同步加速器来获得较高能量的电子。

行波电场也可以用来加速离子, 但盘荷波导结构不适于加速离子, 而螺旋波导 (在金属圆波导内沿轴线设置金属螺旋管) 和分离环等慢波结构则适合于加速质子或其他重离子。目前, 螺旋波导和分离环等结构的直线加速器属于中低能加速器, 加速能量在一定范围内可以连续调节, 而且可以做成全离子加速器 (可以加速从氢到铀全部元素的离子)。使用高频场来同时聚焦和加速的 RFQ 结构 (即高频四极透镜结构) 近年来也已进入实用阶段。

和回旋式加速器相比, 直线加速器具有以下优点: (1) 粒子的入射与引出都比较容易, 可以获得聚焦较好的粒子束; (2) 可以产生较强的粒子流; (3) 辐射损失很小, 可以忽略不计; (4) 建造时可以分期进行, 根据条件逐步加长 (提高能量), 灵活性较大。直线加速器的主要缺点是造价比较昂贵。在目前条件下和相同能量的回旋式加速器相比, 它的造价往往要高出好几倍。

5. 对撞束加速器 (对撞机)

当一个具有动能为 W 的粒子去轰击静止靶时, 其有效作用能量 $\varepsilon_{\text{有效}}$ 为^[5]

$$\varepsilon_{\text{有效}} \approx (2\varepsilon_0 W)^{1/2} \quad (W \gg \varepsilon_0 \text{ 时}), \quad (29)$$

其中 ε_0 是粒子的静止能量。由此可见, $\varepsilon_{\text{有效}}$ 比 W 要小得多。

如果动能为 W^* 的两个相反方向运动的同种粒子对撞, 则两个粒子的能量可全部用于粒子反应, 因此

$$\varepsilon_{\text{有效}} = 2W^*. \quad (30)$$

利用 (29) 式和 (30) 式便能得到

$$W \approx 2 \left(\frac{W^*}{\varepsilon_0} \right) W^*. \quad (31)$$

这关系式表明, 动能为 W^* 的两个粒子对撞的作用, 相当于动能为 W 的粒子轰击静止靶时的作用。也就是说, 对撞时的有效能量比起轰击静止靶时的有效能量提高了 $2(W^*/\varepsilon_0)$ 倍。例如, 两个动能为 $W^* = 30 \text{ GeV}$ 的质子对撞, 就等效于动能为 $W = 2000 \text{ GeV}$ 的质子轰击静止质子的作用。

能实现两束相对运动的粒子对撞的设备叫做对撞束加速器或对撞机。对撞束加速器的出现, 大大提高了有效作用能, 因此它的高能物理实验中起着日益显著的作用。近年来, 在粒子物理中的一系列重大发现和研究成果, 几乎都是在对撞束加速器上获得的。

六十年代以来, 先后建成 l^+e^- , $p-p$ 和 $p-\bar{p}$ 对撞机。从 (31) 式可以看到, 对于静止能量 ε_0 小的电子来说, 使用对撞的方法将更有效, 而且所付的代价也较小, 所以迄今已建成的对撞机大多数是电子对撞机。对撞机的形式有单环式、双环式和直线式。

对撞机虽然具有若干突出的优点, 但还不能代替普通加速器, 因为目前它只能用来作与 l^+l^- , $p-p$ 和 $p-\bar{p}$ 对撞有关的高能实验, 而且作用几率也很小。和普通加速器相比, 有以下关系:

$$L_{\text{加速器}} \approx (10^4 \sim 10^6) L_{\text{对撞机}},$$

其中 L 是亮度, 表示在单位反应截面上单位时间内所产生的事例数。可见, 使用对撞机做实验取得数据的速度远远不能与使用普通加速器相比拟。此外, 普通加速器能产生许多次级粒子, 利用这些次级粒子可以进行多种核反应实验, 这也是对撞机所不能做到的。在若干高能

1) 斯坦福电子直线加速器中心。

加速器中心发展了综合体系,即加速器-对撞机复合体系,这样既可以进行高亮度的静止靶实验,又可以进行高能对撞实验。图 13 表示欧洲原子核研究中心的 SPS 加速器的总体布局示意图。

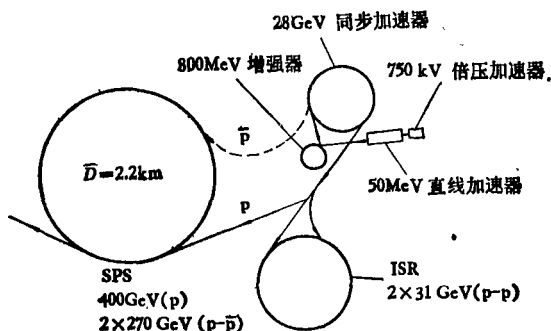


图 13 SPS 加速器总体布局示意图

到目前为止,已建造的最大的 e^+e^- 对撞机是西德的 PETRA ($2 \times 19 \text{ GeV}$), 已运行的 $p-p$ 对撞机和 $p-\bar{p}$ 对撞机是西欧原子核研究中心的 ISR ($2 \times 30 \text{ GeV}$) 和 SPS ($2 \times 270 \text{ GeV}$)。

三、加速器的现状与展望

自从三十年代初诞生第一台加速器以来,已有五十多年的历史。目前,加速器已经发展到 20 余种,能量从几百 keV 提高到几百 GeV,加速粒子种类也从初期只能加速 e, p, d 和 α 等轻粒子发展到可以加速到铀为止的几乎所有元素的离子,其规模也从开始的实验性小型装置发展到直径为两公里或长度可达三公里的巨型装置。

加速器是一门综合性很强的尖端科学技术。建造一台较高能量的加速器,不但要用到很多尖端的科学技术,而且需要强大的工业基础作后盾。

粗略地讲,加速器的发展史,就是克服内在的限制向更高能量发展的历史。图 14 表示加速器类型的演变以及加速能量随年代增长的情况¹⁾。由图可以看出,在向高能发展的过程中,在质子方面,直流高压型加速器受到击穿放电

的限制而为回旋加速器所代替;回旋加速器受到相对论质量增长的限制而为同步回旋加速器所代替;同步回旋加速器受到体积庞大的限制而为质子同步加速器所代替;而在质子同步加速器中,弱聚焦型磁铁过大,又为强聚焦型所代替。与此类似,在电子方面,电子感应加速器因磁铁庞大而让位于电子同步加速器;电子同步加速器因辐射损失而让位于电子直线加速器。因此到目前为止,能量最高的质子加速器和电子加速器,分别为强聚焦质子同步加速器 (500 GeV 的 FNAL²⁾) 和电子直线加速器 (24 GeV 的 SLAC)。由图上还可以看出,加速器能量的增长速度为每十年一个数量级以上 (平均每六或七年增长一个数量级)。另一方面,随着加速器科学技术的进步,每单位能量的造价大致以每十年一个数量级的速度下降。

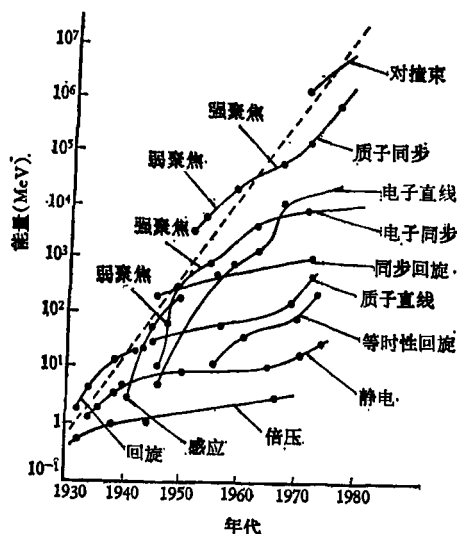


图 14 加速器发展历史示意图

加速器按能量的大小通常大体划分为三个能量区域: $E < 100 \text{ MeV}$ 的加速器叫做低能加速器; $100 \text{ MeV} \leq E < 1 \text{ GeV}$ 的加速器叫做中能加速器; $E \geq 1 \text{ GeV}$ 的加速器叫做高能加速器。

高能加速器是规模庞大、投资很高的设施。目前基本上集中在美国、苏联及西欧等国家中,

1) 引自“1979 年全国加速器技术交流会论文选集” p.5.
2) 费米国家加速器实验室。

它们分别属于几个高能物理实验中心。

中能加速器主要用于原子核物理(包括中子物理和介子物理等)的研究。有些加速器还兼顾其他方面的研究工作。特别是强流中能加速器(所谓介子工厂、中子工厂和光子工厂)已成为多种学科的重要实验设备。各种重离子加速器(中低能)的出现与发展,开辟了重离子科学的新领域。

在全世界范围内使用的低能加速器,到1970年已有2400多台。从七十年代以来发展更快,目前已超过4000台,其中美国占了一半以上。这些低能加速器约有五分之一用于核科学研究,其余则用于其他各种学科和领域里的基础研究以及满足广泛的应用目的,例如工业辐照、射线照相、离子注入、同位素生产、空间辐射模拟、诊断治疗、医疗器械消毒、种子辐照处理、食品保鲜 and 环境保护等等。

我国的加速器事业在建国之后从无到有从小到大获得了巨大的发展。先后建成了倍压加速器、静电加速器、电子感应加速器、回旋加速器、电子直线加速器和质子直线加速器等。这些加速器安装在研究所、高等学校、工厂和医院等单位,在基础与应用研究以及国民经济各部门中发挥着愈来愈大的作用。目前,我国正在中国科学院高能物理研究所研制能量为2.2 GeV的正负电子对撞机(简称BEPC)^[6]。

回顾加速器发展史,五十多年中,加速器的能量已经上升了七个数量级(对撞机的质心能量也将有四个数量级的上升)。但是,这些成就

还远远不能满足高能物理学发展的需要,看来即使再提高十个数量级也是不算多的。目前,美国和苏联正在分别建造利用超导磁体的1TeV和3TeV质子同步加速器(加速器-对撞机复合体系)。美、苏、欧、日等国讨论国际合作建造10TeV超高能质子同步加速器(VBA)。这样高能加速器的直径竟达20公里,建造的经费需要几十亿美元!看来,出路是必须对加速器的建造从原理上或技术上进行根本性的改革。

在新原理和新方法方面,人们已提出了许多种方案和设想。这些新的原理或方法是很吸引人的。例如利用集体相干场来加速,加速率可达每米100 GeV,利用激光来加速则可达每米几百 GeV,利用晶体格子内部的场加速则可达每米1TeV。一旦这些方法获得成功,其成就将是划时代的。当然,在目前要实现这些方法都还存在着很多困难。但是可以相信,随着人类认识的不断提高,新的更加优越的加速方法一定会出现。

参 考 文 献

- [1] 徐建铭,加速器原理,科学出版社,(1981).
- [2] A. П. 格林别格,加速器物理基础,人民出版社,(1961).
- [3] M. S. Livingston, Particle Accelerators, McGraw-Hill Book Company, (1962).
- [4] 熊谷實夫,加速器,共立出版株式会社,(1975).
- [5] 徐建铭,加速器原理,科学出版社,(1981), 399.
- [6] 朱洪元,物理,12-7(1983), 385.

.....

办理《物理》零售部购启事

为适应读者需要,特办理零售部购业务。现备有《物理》1982年第7,8,11,12各期;1983年(第5期除外)及本年度各期。

价格(每册): 门市3角8分;平邮4角;挂号5

角。

出售地点: 北京大学物理系示教室(北京大学东南门内)。

联系人: 张可法