

# 正负电子对撞机的注入器——电子直线加速器

潘惠宝

在对撞机的真空室内,电子和正电子在磁场的作用下反方向地以接近光的速度飞行,在指定的地点实现对撞。这两束束流是由一个注入器来提供的,这个注入器既能产生电子束,又能产生正电子束,并且它本身就是一个加速器。现在最常用的是电子直线加速器。

电子直线加速器是利用在加速管中行进电磁波来加速电子的。但作为对撞机的注入器必须具备以下的条件:

**1. 能量高** 为了提高对撞机的“亮度”,即提高对撞机发生对撞的几率,要求注入器注入能量尽可能接近对撞能量。注入能量等于对撞能量的称为全能量注入,注入能量是对撞能量一半的称为半能量注入。究竟选择多大注入能量为好?这需从性能、经济等各方面综合考虑后才能决定。北京正负电子对撞机第一步将采用半能量注入,要求注入器的能量为 1.1MeV,几乎相当于100多台医用电子直线加速器能量的总和。

**2. 脉冲宽度窄、束流大** 一般电子直线加速器脉冲宽度为 1~2 微秒,脉冲束流为几十毫安,而作为注入器要求脉冲宽度压缩到几十毫微秒,脉冲电流则提高到几百毫安。

**3. 能谱宽度特别窄** 能谱宽度是反映出口处电子能量的差异的一个量,一般电子直线加速器大约是 3~5%,而作为注入器则要求达到 0.5%。过于宽的能谱实际上将减少有用电子的数目,使对撞几率减少,同时增加实验时的辐射本底。

**4. 发射度小** 也就是要求电子整齐,这样便于高能束流的远距离输运,并且当注入到对撞机中去时不致损失太多。

**5. 运行的可靠性高** 对于这样一个庞大的工程,要求数量众多的设备能够稳定可靠地运行,必须严格保证每一个设备和部件的质量。

由此可见,作为注入器的电子直线加速器,其要求大大超过了一般用途的电子直线加速器,它代表了目

前同类加速器的最高水平。因此,只有在设计和制造上采取一系列的措施才能满足对撞机的要求。显然,没有高水平的注入器,便不可能有高水平的对撞机。

图 1 是作为注入器的电子直线加速器示意图。1 是电子枪,电子经预注入段(2)进入第一加速段加速到 370MeV,  $T$  是正电子产生靶,当靶插入时,电子打靶产生的正电子再由第二加速段加速,得到正电子束;如靶抽出,则电子被继续加速到注入能量 1.1GeV。

现在让我们来认识一下这个加速器的各个主要部分及其主要方面。

## 电子从这里起跑——电子枪和预注入段

电子枪顾名思义就是发射电子的器件,电子从阴极上被发射出来后,在电场作用下开始加速。这和电视机中的显象管相类似,它也有电子枪。当然加速器的电子枪要复杂得多,电压也高。为了要得到毫微秒级的电子束,在结构上要特别仔细地考虑。这种电子枪是脉冲式工作的,脉冲流强可以到几个安培。等到一声令下,电子就成群结队地从这里出发了。

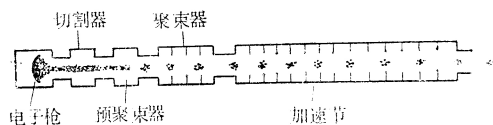


图2 电子枪和预注入段

从电子枪出来的电子束虽然数量众多,但必须经过一番整理、挑选才能符合要求。先经过一个切割器,把电子束按需要的束流长度“切头去尾”使其整齐,然后经过预聚束器,这是一个频率和主加速器频率相同的单腔,它的作用是对电子进行速度调整,使原来相当于一个脉冲宽度的束流分别聚成许多相当于工作频率数目的小的束团。这时电子的速度大约是光速的一半。经过预聚束的电子束再向前走就进入聚束段,它进一步使电子束会聚,同时加速电子到 0.75 光速。再经过一节加速管,将电子加速到 30MeV 左右。这时的束流性能已基本达到要求,以后就主要是提高能量了。整个注入器性能的好坏几乎在很大程度上决定于预注入段的性能。

## 让电子不断得到加速——盘荷波导加速管

把电子从低能加速到高能的主要部件是一根直径

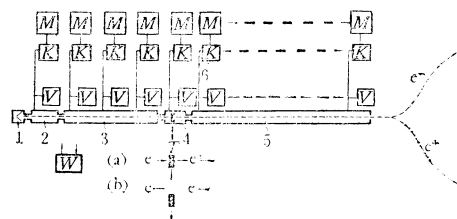


图1 作为注入器的电子直线加速器示意图

不过 100 多毫米的铜管——盘荷波导加速管。

人们早就注意到了电磁波和电子的相互作用。能否利用电磁波产生的轴向电场来加速电子？我们知道，在圆金属管内传输的电磁波，它的行进速度——相速，总是大于光速，而电子的速度是不可能大于光速的。电子赶不上电磁波的行进速度，当然也就不能被它加速。

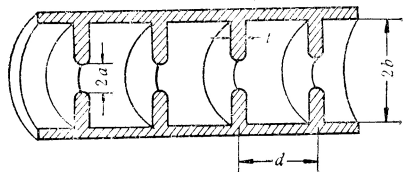


图 3 盘荷波导的截面

为了使电磁波的行进速度减慢下来，产生了各种慢波结构，其中之一就是在圆管中间隔地放置一些圆片。这好象给圆管增加了负荷，从而减慢了行波的相速，这就是所谓的盘荷波导。图 3 是它的截面形状。选择适当的尺寸，就可以得到不同相速的盘荷波导，我们按照电子在加速过程中速度变化情况来设计与电子速度保持同步的盘荷波导管，这样，用行波加速电子就成为可能了。有人把行波比作一匹快马，而电子就是骑在马上骑士；也有人把行波看作大海的波涛，而电子就是站在冲浪板上的美浪儿，利用波的冲力前进。这些都是极为简单的譬喻，实际上电子和波的相互作用要

复杂得多。

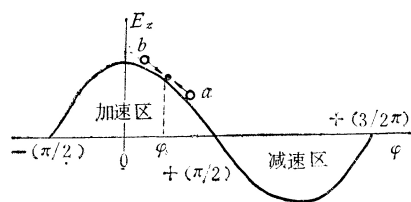


图 4 电子在加速过程中的会聚

在盘荷波导中，加速电场是随时间周期变化的，在正半周可以加速电子，而在负半周内使电子减速。见图 4 所示，相位  $\varphi$  从  $-\pi/2$  到  $+\pi/2$  为加速区，从  $\pi/2$  到  $3\pi/2$  为减速区，而且只有相位在  $0-\pi/2$  之间的电子由于会聚作用而可以稳定地被加速。从图 4 看，由于比相速快的电子  $a$  是处于低一些的电场，因而速度放慢了一些，而比相速慢的电子  $b$  处在高一些的电场，所以又使它加快一些。这样电子就在平衡相位  $\varphi$  附近滑来滑去，不会被丢掉，这就是电子的纵向聚束作用。而其它电子将在加速过程中丢掉。

上面所说的加速区和减速区是对电子而言，对正电子来说正好相反，加速区成了减速区，减速区成了加速区。所以同一根加速管既可以加速电子，又可以加速正电子，只需改变一下相位。

盘荷波导形状虽然简单，可是尺寸的选择却大有讲究，这需要通过大量的理论计算的方案比较才能最后确定。由于尺寸要求十分精确，有时还必须通过几批试验腔的测试对计算值进行修正。在等梯度加速管

中每个腔的内径、圆片中心孔的直径都不相同，公差要求在  $5\mu$  之内，表面光洁度在 10 级以上，又不允许用磨削或者研磨等工艺，因为这种加工由于磨粒嵌入表面将使表面污染而降低导电性能。目前都是在精密机床上用金刚石刀具加工。加工和测量都要在恒温下进行。一根 3 米长的盘荷波导管大约由 86 个腔组成，材料是用高导无氧铜，在专用的氢炉中进行焊接，钎焊后成为一整节，两端是二个输入或输出微波功率的耦合器，波导外面有冷却水管或水套。频率对尺寸特别敏感，腔内径每变化  $1\mu$ ，频率变化约 36 千赫芝，温度变化也导致频率变化，每变化  $1^\circ\text{C}$  则频率变化 50 千赫芝，所以在工作时要求通恒温水。即使进行这样的精密加工，仍不一定能满足注入器的性能要求，还要精密校正每个腔的相位。微波功率与加速器的“匹配”是很重要的。

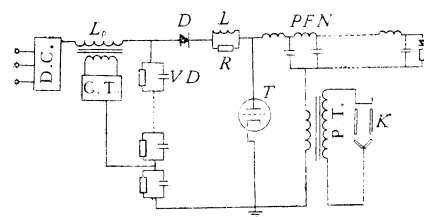


图 5 脉冲调制器原理图

加速器上去。北京正负电子对撞机的注入器由 54 节节长 3 米的盘荷波导加速管组成。

### 微波功率发生器——速调管和调制器

加速器的功率源就象人的心脏一样重要，这就是大功率速调管，它的脉冲功率达到 16 兆瓦以上，工作频率 2856 兆周，一个管子有成人那样高。速调管的原理恰恰和加速器相反，是把电子束的功率变成电磁波的功率。电子枪产生的强流电子束经过由输入讯号调制的调制腔，再经过几次放大后由输出腔输出微波功率，经过陶瓷输出窗送到波导中去。

每个速调管供给四节长 3 米的盘荷波导所需的微波功率。速调管的电子枪高压由脉冲调制器供给。脉冲调制器的脉冲功率达到 65 兆瓦，当脉冲次数为 50 次/秒时，功率约 13kW。北京正负电子对撞机的注入器需要 15 套这样的脉冲调制器和 15 个大功率速调管。

### 传输微波功率的管道——波导

微波功率怎样输送到加速管中去呢？在超高频情况下，普通的导线已不能用来传送电功率，这就要用空心的波导管了。

波导管是铜制成的矩形管，它的尺寸根据频率不同而不同，频率越高，截面尺寸越小。当通过高功率如几个兆瓦以上时，波导内由于电场强度太高而发生打火，这时需要充气或抽真空。在高频下传输时，电流只

在表面层流过,这就是所谓“趋肤效应”。频率为 3000 MHz 时,趋肤层只有  $1.2\mu$ ,所以表面要求很光洁。

波导管的连接法兰也需要特殊考虑,它不但要求在真空中不漏,还要求良好的高频接触,否则在高功率传输时就会发生打火现象。

传输线上需要各种波导元件,例如可以分两路输出功率的分功率器,用于测量的各种方向耦合器,抽真空用的排气波导,各种衰减器,吸收剩余功率的吸收负载,特殊的波导真空阀等,这是一个很大的波导家族呢。

### 能量倍增器——巧妙的储蓄箱

速调管的输出功率受速调管本身的限制,要提高加速器能量就要增加速调管的数量,以便给出更高的微波功率。有没有其它提高加速器能量的办法呢?有的,这就是在波导回路中加一个能量倍增器。

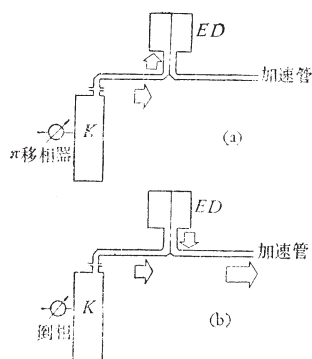


图6 能量倍增器的功用  
(a)储能 (b)向加速管送功率  
ED——能量倍增器 K——速调管

通过合理的设计,可以使功率增加1倍左右。北京对撞机的注入器打算使用这种能量倍增器,使速调管和脉冲调制器的数量从28套减为15套,电子能量仍可达1.1GeV。

### 真空是必不可少的条件

在我们所处的大气中每立升空间有  $2.687 \times 10^{22}$  个气体分子,电子通过这样的空间几乎处处碰到气体分子而产生散射,根本不可能沿着加速管加速。要避免这种情况,必须抽真空。根据计算,如果真空压力在  $10^{-5}$  托以下,电子和气体分子碰撞的损失就可忽略不计。另外,加速场强很高,所以在加速管内要求真空压力在  $10^{-6}$  托以下,特别是在速调管的输出窗附近,为了防止输出窗击穿,要求真空压力在  $5 \times 10^{-8}$  托以下。

仅是真空度达到要求还不够,还必须是清洁的真空。由于抽空设备带来新的问题,油分子的污染使加速管或波导表面覆盖一层有机物,在高频场和电子的轰击下形成不良导体甚至绝缘层,高频电流在表面流过时波大大衰减,以至损耗了加速功率。现代真空技

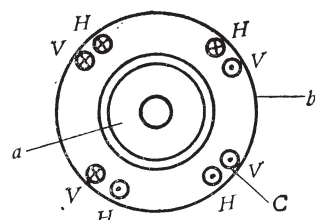


图7 磁屏蔽和补偿  
了一个庞大的真空系统。

术还不能做到绝对无油,但采取必要措施是可以满足加速器要求的。主要的真空泵是分子泵和溅散离子泵,大量的泵、管道、仪器、阀门以及成千对法兰密封等,组成

### 精确的安装——用激光准直

我们可以想象,以接近光速飞行的电子通过一个中心孔为20mm,长达几百米的细长管子时,如果管子不直的话,电子就要打在壁上了。所以,要把加速管中心要准直。

用激光准直的方法大大提高了精度。基本原理是在加速器一端用激光器射出一束单色光,被准直的加速管安装在铝管上。空气的对流会使激光光线弯曲,所以要让激光在圆管中通过。铝管又作为支承,内部装有可翻转的准直靶——波纹板,所得的像再射到位于加速器另一端的接收器上,经过扫描读出偏差数,调整支承就可使加速管中心对准到中心线上去。

加速管的支承要有足够的刚性,使加速管中心保持在一条直线上。还必须考虑其他的因素。如温度,加速管热胀冷缩在长度上的变化需在支架上得到补偿,并且使其保持中心不变。地基的变化会使加速管移位,因而一定时期后需要重新准直。支架的结构还必须考虑地震的影响,以及抗辐照的能力等等。

### 外磁场的影响

按照激光准直好了的加速管是否就能让电子顺利通过呢?还不行,电子在加速过程中要受到各种外磁场的干扰:地球磁场、支架所用材料磁化的影响、附近各种设备上磁铁的影响、输电线在电流通过时周围产生的磁场的影

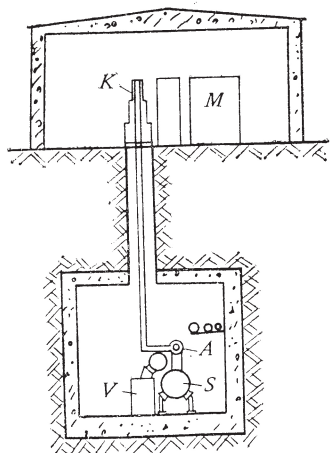


图8 建筑的剖面

响、输电线在电流通过时周围产生的磁场的影,就是接地电流通过支架时也会有影响。因此,必须采取措施来补偿或屏蔽这些杂散磁场对加速电子的影响。一个办法是沿加速管铺设四组导线,导线中

通过电流使所产生的磁场与外磁场抵消。另一个办法是在加速管外面包一层屏蔽带,可以使外磁场的干扰降低 10 倍(见图 7)。当然,最有效的是在加速过程中随时测量电子的位置,控制电子沿所规定的轨道前进。

### 正电子的产生和捕获

正电子是用一定能量的电子轰击铜或铅靶后产生的。它的产额和电子的能量、电子束流大小有关,正电子能量和轰击靶的电子能量成正比,而且电子能量越高,束流愈强,则正电子产额也越大,从这点来看,希望把正电子的产生靶放在加速器的后部为好,但是正电子产生后还要进一步加速,要使正电子能量高又要求把靶放在加速器的前部。均衡各种条件,一般把正电子靶放在前面的三分之一处。

正电子产生靶的设计是很巧妙的,有时使加速电子打在靶上产生正电子,有时使加速电子通过而继续加速,这样就几乎同时可以得到两种束流。靶子还要用水冷却,能够迅速而准确地放到电子束的中心位置上去。

北京正负电子的注入器中,用加速到 370MeV 的电子轰击铜或铅靶产生正电子,正电子经过整理后进入正电子捕获节进一步加速、聚焦、再经过高频偏转器把和正电子同时产生的电子偏离掉,然后再进入后面主加速段加速。

### 庞大的工程

高能电子直线加速器在运行时有强辐射产生,需要辐射防护措施。为节省投资,一般将加速系统建在地下隧道内(见图 8)。北京正负电子对撞机拟在地下建筑一条长 200 米的隧道,离地面有 4 米的土防护层。地面上的建筑是一条同样长度的大厅,放置速调管及其调制器、各种电源、控制设备和辅助设备等,这些都放在地面,便于经常维修和调整。微波功率通过波导送到地下隧道内的加速管。整个加速器的控制由控制室的中央控制台利用计算机进行。各分系统用微处理机收集数据与预处理,并将主要数据送中央控制台处理。中央控制台又可和对撞机的主控制机联系。

经过加速后的电子、正电子通过两条输运系统分别注入对撞机的椭圆形轨道,并在那里实现电子和正电子的对撞。