

谈谈高能加速器的总体布局

谢 家 鏊

现代质子高能加速器是由几个加速器组成的，其中每个加速器都承担将质子的能量提高一步的任务。经过一系列、分阶级的提高，最后达到设计的指标。一般把能量最高的末级叫作主圈，它以前的各级叫作增强器或注入器。以欧洲原子核研究中心(以下简称西欧中心)的高能加速器为例，其总体布局情况如图(一)所示。

由图可见，质子是经过五个加速器才加速到四千亿电子伏的能量。SPS 是主圈；PSB 是能量为 800 兆电子伏的第一增强器；CPS 是能量为 280 亿电子伏质子同步加速器，

可称为第二增强器；注入器是直线加速器；予注入器是高压加速器。现代的予注入器一般都是 750 千电子伏，近来有向 1 兆电子伏发展的趋势。注入器则多为几十兆电子伏

能量的直线加速器。予注入器及注入器的类型基本是定了的。在主圈的能量确定之后，总体布局主要是指对各级增强器的能量范围的划分和类型的选择问题。这是建造高能

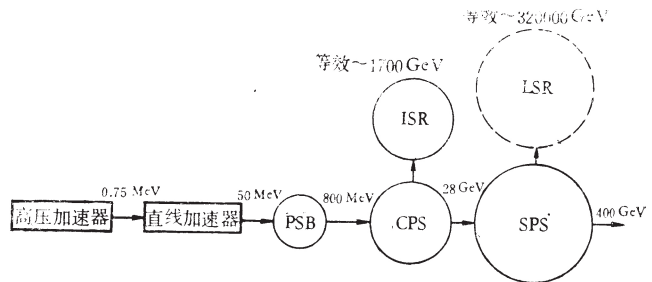


图 1 西欧中心高能加速器总体布局示意图。图中 PSB、CPS、SPS 和 ISR 是同步加速器和对撞机名称的缩写，虚线圆代表尚未实现的设想。

加速器的关键性的问题。一方面它决定了器的性能和经济指标,关系到规划是否合乎多快好省的原则;另一方面,它也关系到以后的发展。现代高能加速器的造价是很庞大的,已经建成的加速器势将成为向更高能量发展的阶梯。因此,总体布局影响深远,举足轻重,是高能工作者普遍感到关心的。下面粗浅地介绍一些这方面有关的知识。

(一) 决定每级加速器能量范围的因素

高能加速器的能量和流强要求确定之后,总体布局的首先考虑是它应由几级加速器组成,也就是首先要决定每级加速器的工作范围或“步子”的大小。为此,需要先从主圈出发,确定它的注入能量,这就是它的前级的设计能量,然后再依次向前推去。然而,注入能量又是如何确定的呢?下面我们就来讨论一下与它有关的因素。

(1) 磁场的限制

高能加速器的主圈和增强器一般都是强聚焦环形同步加速器。在这种加速器里,质子由高频加速电场获得能量,聚焦和导向磁铁的磁场则保持质子在一个近于圆形的闭合轨道上作回旋运动。在加速过程中,随着质子能量的增加,磁场由低到高地变化。最高磁场相应于加速器的设计能量,最低磁场相应于注入能量。最高、最低磁场都不是任意选择的,而是受到不同因素的制约。最高磁场受磁铁的饱和所限制,一般只能用到2万高斯上下。在使用超导磁体时可以用到4—5万高斯;而在加速器工作的重复率很高时,为了省电,却只可用到1万高斯左右。最低磁场受剩磁场、涡流场甚至地磁场等干扰场的限制。为了保证注入时磁铁磁场的空间分布和时间变化合乎设计的要求,最低磁场值就必须远大于干扰磁场的值。这就限制它一般不应低于100高斯。选定了最高和最低磁场,我们就可以算出一定半径大小的加速器的设

计能量和注入能量了。下面我们将用设计能量与注入能量的比值(工作比)来表示加速器能量范围的大小。早期建造的能量为几十千兆电子伏的高能加速器工作范围都是根据磁场的限制决定的,它们的工作比一般在600—700之间。

(2) 发射度的限制

在理想情况,质子在环形加速器中是在真空盒轴线上沿一个近于圆形的闭合轨道作回旋运动。但实际上有许多原因会使粒子偏离这个轨道,这时磁场的聚焦作用会使它们折返轴线,结果这些粒子就会沿轨道上、下、左、右,以一定的频率做振荡,这叫做横向振荡。(参阅下面图(三)(a))可以想到,只有那些与闭合轨道的距离和散角都在一定“范围”之内的振荡的粒子,才可以得到持续的加速,达到设计的能量,而那些与闭合轨道距离或散角太大的粒子都会打在真空盒壁上而在途中失掉了。这个“范围”叫做加速器的接受度,而它的前级加速器产生的束流所占的“范围”叫做发射度。显然,接受度与真空盒大小有关。真空盒截面越大,接受度也越大,但这样磁铁尺寸就要加大,就会导致磁铁重量增大,造价增高的后果。

根据理论分析,我们知道粒子在加速过程中,横向振荡的振幅会逐渐缩小。能量愈高,收缩愈多,束流的密度愈大,发射度愈小。这样,使用较高的注入能量,就可以在主圈上使用较小截面的真空盒,因而在经济上有所得益。换句话说,真空盒不变,提高注入能量就能在横向容纳更多的粒子。实际上真空盒尺寸并不单纯决定于横向振荡,但它是一个重要的因素。

(3) 流强的限制

前面提到的横向振荡的频率是高能加速器的一个关键的参数,设计时必须慎重地选择。这是因为磁铁系统存在着各种缺陷,而在一些特定的频率,缺陷的作用力会与粒子振荡产生共振现象,使粒子振幅愈来愈大,终至打在真空盒壁上

而损失。在粒子振荡频率与它们回旋频率之比是整数或半整数时,共振最为严重,因此,选择的频率必须避开这些共振,而位于两个严重的共振之间,例如下面图(二)中a点所示的位置。

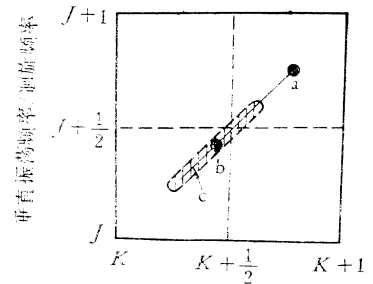


图2 工作点与共振线示意图
图中实线代表水平和垂直方向的整数共振;虚线代表半整数共振
K和J代表任意整数。

当加速粒子数很大,也就是电流较强时,束流中任一个质子除了受到磁场的聚焦力以外,还受到其他粒子的空间电荷的电场的散焦力,因而减弱了聚焦作用。我们知道粒子的振荡频率是与聚焦作用有关的,聚焦作用减少,频率就会降低,这种在强流情况由于空间电荷引起的粒子横向振荡频率的移动叫做“频移效应”。

如果束流内的粒子在截面上是均匀分布的,则全体粒子的频移相同。在图(二)中可用b点代表移动后的工作点。但是,事实上粒子在截面上的分布不会是均匀的,而是在中心密度最大,越靠边越小。这时与轴线距离不同的粒子所受的聚焦作用不同,频移不等。因此,束流中的粒子振荡不但发生了“频移”,而且产生了频率的分散——“频散”。这样工作点就由图(二)中原来设计值a点移动到虚线所示的范围c内,在这个过程中许多粒子通过了半整数共振线,由而遭受损失。这个情况形象地如图(三)所示。在束流很小时,横向振荡是等幅的频率较高、波长较短的振荡(图(三)(a))。而在束流较大时,横

向振荡的频率降低,波长加大,同时由于共振作用而振幅逐渐增大,终至损失在真空盒壁上。(图(三)(b))

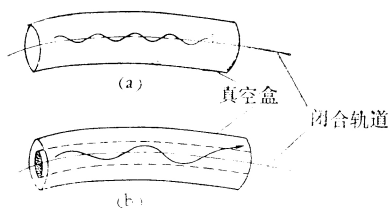


图3 加速器中带电粒子横向振荡示意图
(a) 束流很小时的情况
(b) 束流很大或注入能量很低时的情况

理论分析表明:束流的“频移”除与粒子数有关外,还和粒子能量及发射度有关。能量愈小,“频移”愈大。在注入时粒子能量最小,“频移”最大,而为了使束流不受损失,必须把“频移”限制在较小的范围。这样,如果固定了粒子数和发射度,注入能量就必须选在一个下限之上。具体计算表明,当加速粒子数为 10^{13} 并且选用适当的发射度时,对几万兆电子伏能量的加速器而言,工作比将由前面根据磁场限制给出的600—700降低到大致100左右,这时最低注入磁场竟使用到几百到一、二千高斯,已远远超过根据干扰场而提出的要求了。

除了上面讨论的三个限制注入能量的因素外,还有高频加速场引起的粒子的纵向振荡频率与回旋运动频率也会发生共振等其他一些因素需要考虑。不过,现代高能加速器都是强流加速器,因此流强的限制是决定性的因素,在保证流强的条件下,发射度和注入能量的最后抉择则决定于经济上的考虑。

(二) 各种类型增强器的选择与比较

根据上面的讨论,可知每级加速器的能量范围,主要确定于流强的考虑。那么,各级加速器是否可用同一类型的同步加速器来组成呢?这是不可能的!因为前面已经

说过了能量愈低,“频移”愈大,增强器在注入主圈时如果“频移”是在允许的范围之内,那么向这个增强器本身注入同样多粒子时,“频移”就将是大得不能接受了。这是一个根本性的矛盾。为了解决这个矛盾,人们提出了各种各样的方案,使用不同类型的增强器。下面分别地加以简单的介绍。

(1) 快速增强器(图(四)(a))

快速增强器是一种重复率较主圈(或下一级加速器)高几十倍的同步加速器。它将加速的粒子多次地注入主圈,填满圆周后主圈方开始加速。这样,增强器每次加速的粒子数就远较主圈为少,因而不致引起过大的“频移”了。这个方案的主要优点是简单易行。高重复率的问题人们在建造电子同步加速器中已积累了丰富的经验(电子同步加速器都是高重复率的);同时它本身又是个强流加速器,在主圈加速时可安排其他用途。缺点是因为重复率高,磁铁和高频系统都较昂贵;同时注入时间较长并且占用了主圈的工作时间。现有两、三个高能加速器采用了这个方案。

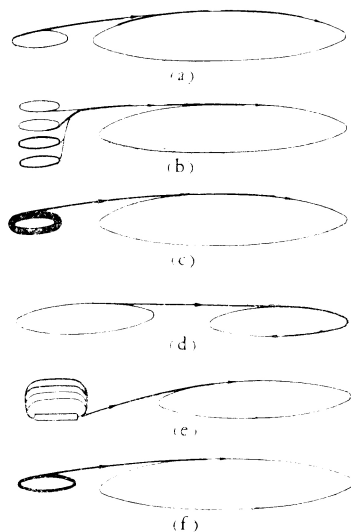


图4 各种类型增强器工作原理示意图
(a) 快速增强器, (b) 多圈增强器, (c) 慢速增强器, (d) 大圈增强器, (e) 直流增强器, (f) 快慢增强器。
图中用细线表示闭合轨道,粗线表示束流,束流愈大,线条愈粗。

(2) 多圈增强器(图(四)(b))

多圈增强器是由几个小同步加速器组成的。图中所示是一个四圈增强器。它们的重复率较低,与主圈相近,但因将主圈的加速粒子数分散在四个器里,故每器的粒子数不致超过“频移”效应允许的范围。加速后各圈将束流依次注入主圈。这个注入过程很快,所以不大占用主圈的工作时间,这是它的优点。缺点则是束流输送系统和控制系统都比较复杂,部件繁多。图(一)所示的西欧中心高能加速器的增强器(PSB)就是这种类型。

(3) 慢速增强器(图(四)(c))

慢速增强器是一种接受度很大的加速器。它的真空盒里可以容纳很多的粒子,重复率与主圈相近。在加速终了时,束流被均匀地多圈引出,填满主圈圆周。这个方案的优点是比较经济,同时注入主圈的过程很快。但是,均匀地多圈引出的技术是要求很高的;另外,加速的粒子数很大,束流会产生各种的不稳定性。西欧中心使用280亿电子伏质子同步加速器注入4000亿电子伏质子同步加速器,与此类型的工作状态有些相近。

(4) 大圈增强器(图(四)(d))

大圈增强器与主圈大小相等,但用较少的磁铁使平均场强较低,以适应较低的能量。它的接受度则要比主圈大。在技术上这是比较简单的方案,注入需要的时间也很短。缺点是造价较高,同时向它注入时剩磁场干扰较大,工作比很小。美国费米实验室的高能加速器计划注入到同一隧道里的超导加速器中以便将能量提高一倍,这在某种程度上可以看成是大圈增强器。

(5) 直流增强器(图(四)(e))

直流增强器利用微波加速器原理,由直线加速器和直流磁铁系统组成。它是介于环形同步加速器多次加速和直线加速器一次加速之间的一种加速器。由它引出的束流的性能是很好的,而且注入时间很短。缺点则是向它注入的能量和它本身

的造价都较高。至今尚未见实用。

(6) **快慢增强器** (图(四)(f)) 快、慢增强器是快速增强器与慢速增强器的结合。它的重复率较快速增强器为低,这就减少了磁铁电源和高频设备的费用;它的引出圈数较慢速增强器为少,这就减少了技术困难的程度。不过至今也还未见实用。

除了上述一些类型的增强器在总体布局中可供考虑以外,一种很容易想到的布局就是使用能量够高的直线加速器直接注入主圈。这在技术上是最为简单,但在经济上却最为昂贵的方案。

能量为几十到几百千兆电子伏的高能加速器,目前较多使用直线-快速增强器-主圈这样的三级布局。这时,根据流强固定主圈的注入能量之后,前级(包括直线及增强器)的造价是与增强器的工作比(或直线加速器能量)有很大的关系的。美国费米实验室曾做过分析,一个能量为一万兆电子伏的增强器,如果用 50 兆电子伏的直线加速器作注入器,其造价(包括增强器及直线加速器)竟比用 150 兆电子伏注入时高出 50%。虽然这个结论是在他们的一些具体条件下得到的,但也有一定的参考价值。

(三) 加速器总体的几何安排

在总体布局的考虑中,首先的问题是根据流强要求来决定每级加速器的工作范围,也就是“步子”的大小,然后根据技术和经济条件选定各级增强器的类型。此外,还需要考虑这个加速器组合的几何安排和建造程序等问题。目前广泛采用的几何安排都是平列式的,即将各级加速器分别建造在一个大致的平面内,如图(五)(a)所示。但从经济的角度,图(五)(b)(c)所示的安排可能有一定的好处。图(五)(b)是将两个加速器重叠放在一个隧道之中。这就要求两器的半径相同。前面提到的大圈增强器,就有

这样安排的可能。图(五)(c)是使各级加速器的圆周大致相切,这对一些设备的共用会有些方便。至于建造程序,一个主圈可在半径固定之后,先做部份磁铁在较低能量运转,然后填满全部磁铁,或进一步将原来的常规磁铁换为超导磁体来提高能量。这样,整个工程可以分阶段进行,避免了在一个短时期中投资过大的困难,同时又可在较低的能量提前投入使用。

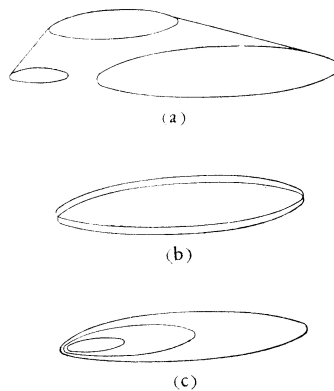


图5 加速器总体的几何布局图

对撞机由于它的等效能量非常高,如西欧中心能量为 280 亿电子伏质子交叉储存环约等效于 1700 千兆电子伏,西欧中心的一个建议方案,能量为 4000 亿电子伏质子交叉储存环如果兴建,则将约等效于 320000 千兆电子伏,所以尽管它们的等效流强极弱而且实验范围受到限制,仍然可以说是今后高能加速器不可缺少的特殊的实验设备。它的规模庞大,并不亚于加速器本身,因此在总体布局中也应统筹考虑。

(四) 一张白纸,正好写字

前面简单地讨论了关于高能加速器总体布局的一些问题。在六十年代初期建造高能加速器时,主要考虑的是能量。现代的高能加速器则普遍是强流加速器,流强对总体布局起着决定性的制约作用。其主要后果是现代高能加速器的工作比较早期的大为缩小了,由几百降到几十。加速器工作比愈小,性能愈

好,这是近些年来为大家所公认的。因此,有人建议将每级工作比降低到 10,以便进一步改进性能指标。当然,工作比过小,总的级数增多,造价的升高也会逐渐变得明显。所以,工作比的决定、增强器类型的选择以至几何布局、建造程序的规划都应根据具体的经济条件与技术条件,将经济指标与性能联系起来统一考虑。

考察国际上已有的高能加速器的布局,我们会发现有的布局属于“事后”被动的补救的性质,这可称之为“事后”布局;而有的则是在建造之前的主动的统筹安排,这可称之为“事前”布局。图(一)所示的西欧中心的高能加速器,原来由高压加速器,直线加速器和质子同步加速器 CPS 三级组成。为了提高流强,补建了第一增强器 PSB,随后为了进一步提高能量又增建了 4000 亿电子伏质子同步加速器 SPS,于是原来是主圈 CPS 就成为第二增强器,而总体变成由五级组成了。这是“事后”布局的例子。美国费米实验室的高能加速器能量与 SPS 基本相同,但它根据“事前”布局,采用 8000 兆电子伏增强器和 200 兆电子伏的直线加速器,总体只包括四级,造价较 SPS 为低而流强则较高。“事后”布局,生米已成熟饭,手脚受了束缚;而“事前”布局,则是一张白纸,正好写字。它的优越性是完全可以理解的。

我国是发展中国家,较晚开始高能加速器的研制工作,差距很大。但这也有它有利的一面,就是我们在“事前”布局的考虑中,可以结合自己的具体情况,有分析、有批判地研究人家的经验,采用最新的技术成果,从头做起,在一张白纸上,写出最美好的文字。后来居上,这正是事物发展的规律。