



冯宝树 梁岫如

丁：王叔叔，您好！听说你们正在忙着设计一台正负电子对撞机怎么也有人说是贮存环，这是怎么回事呀？

王：我们要搞的叫“北京正负电子对撞机”，它的英文名字是“Beijing Electron-positron Collider”，缩写成 BEPC，它主要包括注入器和贮存环两部分。注入器是一台可加速正、负电子束流的直流加速器。贮存环实际上就是一台环形加速器。

丁：它和“同步辐射光源”有什么不同呢！

王：“同步辐射光源”也有注入器和贮存环。它的注入器是只加速负电子的直线加速器，在贮存环中，也只有一股电子束流在循环，不断地辐射射线，把射线引向实验室做各种应用。在 BEPC 工程中，直线加速器可加速正、负两种束流，正、负电子束流进入到贮存环中，沿相反的方向循环，当积累到一定流强时，在指定地点相碰，产生高能物理反应。因此对撞机的贮存环不同于辐射光源的贮存环。贮存环是对撞机工程的主体部分，讲到对撞机时，可以是对整个工程而言，也可以专指贮存环。由于对撞机也有贮存粒子流的能力，所以也有人把对撞机也叫成贮存环，又由于对撞机贮存粒子流的目的是使两股粒子流对撞，因此还应该叫对撞机。

丁：噢，那么对撞机和加速器有什么区别呢？

王：这倒是说来话长。简单地说，就是在对撞机中粒子流能量的利用率高。

丁：我不明白这是什么意思？

王：我打一个简单的比方，有两件车祸，一件是一辆高速行驶的汽车撞到了停车场上静止不动的汽车；一件是两辆高速行驶的汽车面对面正撞，你说那一场车祸严重呢？

丁：当然第二场车祸严重了。

王：在高能物理实验中，粒子流在对撞时，损失的能量越多，对实验越有利，也就是原来的粒子流的有效利用率大。我们可以把加速器比作第一种车祸的

情况。也就是说，我们先用加速器将粒子加速，而后打在静止靶上。把对撞机比作第二种车祸情况，它是让两股运动的粒子流对面正撞，这时用于高能物理实验的能量比前者大多了。

丁：这么一说，我倒有点懂了。看来如果粒子束能量相同，那么还是造对撞机好。

王：是的！

丁：刚才说的是对撞机的优点，它当然也还有缺点了。

王：当然有，概括地说，它的缺点是：工作能区窄，技术难度大。

丁：请您讲的细致一些，我对此很感兴趣。

王：好吧，先说说对撞区的工作能区。设计对撞机时，首先要选择粒子流的能量，对撞机的许多参数都和能量有关，可以求得一个与这个能量相对应的最大的“亮度”值，高于设计能量或低于设计能量时，亮度都会大大下降。因此，每一台对撞机都只工作在一个很窄的能区中。

丁：您刚才讲的亮度是什么意思？

王：不是，这和发光无关。亮度这个概念比较难理解，简单的说，我们可以把粒子想象成一个小球，在两股束流对撞时，沿运动方向，每个小球都有一个面积，即小球的最大的截面，我们把这个截面叫反应截面，两股粒子流对撞时，只有两个粒子在它们的反应截面内对撞才发生反应，否则不发生反应，我们把每秒内每个平方厘米的反应截面内产生的粒子对撞数叫做亮度，亮度越高说明粒子相碰的次数越多，也就是说亮度越高越好。

丁：粒子流相撞了，又可能不发生反应，这是什么意思？

王：所谓电子流，实际上是一个电子团，在团内并不是一个电子挨一个电子的挤在一起，而是电子之间有比较大的空隙。比如两队排列的十分松散的队伍相遇之后，它们彼此互相穿过，绝大多数人从空档中走过去了，少数的人彼此擦肩而过，只有个别的人与对方队伍中的人相碰了。队伍越松散，个

别人相碰的机会就越少。

丁：那末，对撞机中正负电子对撞的几率有多大呢？
王：很小，比如说每个束团中有一万亿到十万亿个粒子，也就是说有 10^{12} — 10^{13} 个粒子，它们基本上以光速运动，设每秒内束团对撞一百万次，即 10^6 次，那么按目前世界上的水平而言，每秒也就是有十对左右正负电子，发生对撞。

丁：啊！那么少啊！束团对撞十万次才产生一对正负电子对撞，真是太少了。为什么这么小啊？

王：因为反应截面太小了。为了充分利用粒子流中的粒子，所以人们让粒子流在对撞机中不断地循环、对撞，直到束团中的粒子数变少了，在束团相撞时，几乎不可能发生正负电子对撞了，那么就不要再这两股粒子流了，再重新注入，循环，对撞。从注入粒子流到不要粒子流的时间叫束流的寿命通常寿命为几小时到几十小时。

丁：那么看来能量、亮度、寿命、粒子流的流强，这四点就代表了一台对撞机的性能，是吗？

王：是的，当然也还有一些其他的指标也是很重要，如造价大小，建造周期的长短，运行的稳定性，耗铁量、耗铜量、耗电量的大小等等，都是值得注意的。

丁：那么北京正负电子对撞机的能量是多大？

王：初步定为 2.2 京电子伏。

丁：为什么定为 2.2 京电子伏呢？

王：你还记得吗？前面我说过，对撞

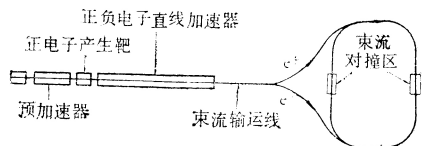


图1 北京正负电子对撞机示意图

机工作的能区很窄。目前世界上还没有能量大于 1.8 京电子伏，小于 4.2 京电子伏的正负电子对撞机，而且目前其他国家也没有在这个能区建造正负电子对撞机的计划，因此我们拟在这一能区中建造一台正负电子对撞机，它既符合于我国国情，又可做出有意义的物理工作。

丁：那么您们设计的对撞机的亮度指标是多少？

王：能量为 2.2 京电子伏时，亮度为 1×10^{31} 秒⁻¹ 厘米⁻²。

丁：要达到这样的指标，在理论上与技术上有多大困难呢？

王：看来你的问题还不少呢！这样吧，我先给你介绍一下“北京正负电子对撞”是个什么样子，再回来回答你的问题。

丁：我对水压机、轧钢机、钻井机倒还有点概念，对撞机是个什么样子，我还想不出来。

王：我画个草图，你看，A 是电子枪和预注入器，它可

产生一定强度的电子流，并将电子加速到一个较低的能量，如使电子的能量达到几十兆电子伏，而后电子流进入 B，B 是一台小型的电子直线加速器，可把电子加速到几百兆电子伏，C 是一个产生正电子的装置，当能量为几百兆的电子打到 C 上，它就可以产生正电子，D 又是一个直线加速器，它可加速正电子，也可加速负电子，电子经过 D 后，其能量可超过 1 京电子伏。E 是运输线，它分为两支，一支走正电子流，一支走负电子流，F 是贮存环部分，正负电子流在贮存环中作相反的方向运动，在 G 处对撞。在注入负电子流时，只要移开 C 就可以了。

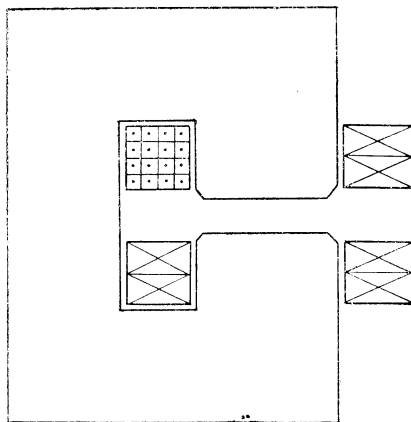


图2 弯转磁铁剖面图

丁：嘿！真不小，你看！快 400 米长了。

王：是啊！大型的正负电子对撞机还要大呢，目前美国和西德的大型正负电子对撞机仅贮存环的部分，一圈就有两千多米。在西欧，还打算造一个更大的正负电子对撞机，它一圈竟长 27 公里。

丁：那么大，真了不起！可是电子在贮存环内能循环地转圈是怎么一回事？电子为什么能拐弯。

王：你在物理中学过洛仑兹力吗？

丁：学过呀，电子在均匀磁场中受洛仑兹力作用作圆周运动。

王：对了，就是这个道理，这在中学物理中就讲了。

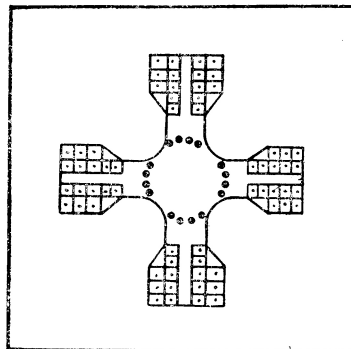


图3 四极磁铁剖面图
对撞机中主磁铁系统安排的示意图

丁：可是磁场怎么产生呀？

王: 用二极磁铁,我再给你画一个图。这是一块C型磁铁图,在S极和N极中间有均匀磁场,图中1为真空室,2为粒子流。沿着粒子的跑道放着许多二极磁铁,凡是在要求粒子转弯处就放二极磁铁。噢,说到磁铁,还应有四极磁铁,我再给你画一个图,这是对撞机中一小段上主磁铁安排的示意图,写记号B的是二极磁铁,一块二极磁铁,按我们的设计有差不多九吨重呢!

丁: 那么重呀! 那么写记号Q的是四极磁铁了,为什么有向上的有向下的呀?

王: 对了,写记号Q的是四极磁铁,一块也差不多有三吨重呢! 它让粒子在预定轨道附近左一点、右一点、上一点、下一点地运动,正如我们骑自行车去一个地方,自行车绝不能走一条直线,而是左一拐、右一拐的向目的地走去。

丁: 您刚才说主磁铁系统,那还有辅助磁铁系统了,不然怎么叫主磁铁系统呢? 是不是?

王: 对了,不过不叫辅助磁铁系统,而叫特殊磁铁系统,花样可多呢! 如校正磁铁就有二极、四极、六极、八极、斜四极之分,此处还有凸轨磁铁,冲击磁铁等。

丁: 叔叔,您搞对撞设计就是计算电子运动轨道吧。

王: 可以这样讲,但是,也不光是计算轨道。让电子沿一定的轨道运动,这是最基本的要求。电子的跑道是被封闭在一个截面呈扁平形状的环形管道中,里面是真空。磁场的作用范围有限,束团在横方向没有多大的活动余地。如果一旦磁场值选得不合适,哪块磁铁的位置不合适,或者各种各样原因产生的磁场误差,都会使电子偏离轨道,撞到真空室的墙壁上,这不但会损失粒子流,还将产生其他麻烦。因此在设计计算时要考虑到多种因素,加上许多必须的条件,寻找最佳参数方案,达到对撞机的“亮度”指标。另外,还要做许多计算,比如,什么样的极面形状,最有利于保证有效场区的磁场均匀? 怎样才能把来自直线加速器的粒子流注入到环中? 同样,直线加速器也有许多的计算工作。

丁: 经过仔细计算之后,电子就可以在理想的轨道上无限期地循环了吧!

王: 这是不可能的,总是有相当一部分电子因某种原因偏离规定的轨道而损失掉。比如,在电子辐射过程中,电子还要受辐射光的反作用,使一些电子远离中心线而打在真空室壁上,也有些电子与残存的气体分子相撞而被弹出去打在壁上,还有束团内部电子相互之间的作用也会损失粒子。这样一来,粒子的数目越来越少,使“亮度”很快下降,到一定时间以后,就完全不能用了,需要再重新注入新的一批束团,继续进行实验。

丁: 那么,我们这台对撞机粒子流的“寿命”有多长呢?

王: 我们对撞机粒子流“寿命”的设计值是十小时。

丁: 在这样长的时间内,束团能跑多少圈呢?

王: 你可以算一下,电子运动的速度接近光速,每秒钟可以跑三十万公里,如果跑道周长是350米,那么,一秒种内,要跑85万多圈,10小时该跑多少圈呢?

丁: 再乘上3万6千秒,啊,这么大的数字!

王: 是呀,电子在10小时之内,行程长达一百亿公里。为了使它们尽可能少碰到壁上和减少与气体分子碰撞的机会,技术上有不少困难。

丁: 记得您在前面讲过,建造对撞机的难度大,是指达到高真空度难吗?

王: 这是对撞机的困难之一。

丁: 对撞机要求多高的真空度?

王: 一般要求达到 10^{-7} 托,在对撞区要达到 10^{-11} 托。电视机显像管中的真空度才 10^{-6} 托。

丁: 对撞机真空室比显像管大得不能比拟,要求又高得多,一定要用不少抽气效率极高的抽气泵吧。

王: 你说得对。一方面抽气泵效率必须高,另一方面,在选用真空室的材料,加工工艺等方面很讲究,减少漏气量。

丁: 还有哪些技术难题呢?

王: 比如高频功率源,大功率脉冲电源、真空室及磁铁的加工工艺等,都是必须攻克的难关。这里不可能讲得很细。我想,稍稍讲讲对撞点的控制问题。

丁: 您的意思是说束团在对撞点上不一定碰得上吗?

王: 是的让迎面来的两个束团碰上,是要进行严格控制的。

丁: 那一定比交警的控制系统复杂得多!

王: 你真有意思,又想到我刚才讲的交通事故上了。电子束团比汽车小多了。电子束团好比一段很薄的带子,长几厘米,宽几毫米,厚度只有零点几毫米,上下只差一点点就会碰不上。假如磁铁做得上下不对称,或安装位置有偏差,束团就碰不上。

丁: 做得再好,误差总会有的,是吗?

王: 是这样,因此,不但要实现严格的公差要求,还要有计算机跟踪系统。

丁: 怎样跟踪呢?

王: 在电子跑道上,放许多粒子流监测设备,它们向计算机控制中心发出讯号,指挥系统经过分析,向各个元件发出指令,调整参数,把有可能逃走的电子抓回到正常轨道上,让它们在是对撞区,发生对撞。

丁: 王叔叔,您的介绍使我明白了不少问题。谢谢您。