

北京正负电子对撞机工程¹⁾

叶 铭 汉

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文介绍北京正负电子对撞机工程的建造目的和意义,工程的主体结构以及对于我国工业技术和高技术所起的促进作用。

一、建造目的和意义

北京正负电子对撞机(简称 BEPC)工程是我国国家重点工程。对撞机是高能加速器的一种。一般的加速器是让带电粒子轰击固定的靶子,对撞机是让两束带电粒子在加速器内互相对撞。北京正负电子对撞机工程包括三大部分:(1)对撞机,它由注入器(即一台电子直线加速器)和储存环组成,可以把电子和正电子各加速到 28GeV。(2)北京谱仪(简称 BES),它是一台大型的、由多种粒子探测器组成的通用型磁谱仪。(3)同步辐射光束线及其相应的试验站。

北京正负电子对撞机工程的建造目的是多方面的,可以说是“一器多用,基础研究和应用兼顾”。首先是用来进行高能物理实验。高能物理研究物质结构的最基本的层次,即研究比质子、中子更深一个层次的、更基本的粒子的相互作用和运动规律。人类发展历史表明,基础研究在研究的当时往往看不到什么实用价值,但最终毫无例外地都给人类带来了想象不到的巨大利益。例如,科学家开始研究原子核时,完全是纯之又纯的基础研究,而核裂变的发现却开辟了人类利用原子能的道路。原子能的和平利用和原子武器极大地改变了世界的面貌。今天的高能物理研究最终也必然会给人类带来极其巨大的利益。

第二个目的是同步辐射的应用。电子或正

电子作高速圆周运动时,伴随着有很强的光放出,名叫同步辐射。它有种种突出的优点:光谱连续,频率范围广,从可见光一直到X射线;光通量大,X射线的亮度比常用的转靶X光机的强三至六个数量级;光束准直性好;有特定的时间结构等,是一种理想的光源。同步辐射现在已经广泛地用于固体物理、表面科学、生命科学、化学、化工、微电子学(光刻)等方面的研究和应用。目前全世界运行的、正在建造中的和拟建的同步辐射光源(包括兼用的如北京正负电子对撞机)共48台,其中第三世界有六台,即巴西、印度和南朝鲜各一台,我国三台。我国除北京正负电子对撞机外,还有二台能量较低的同步辐射专用加速器正在建造中,一台在安徽合肥(0.8GeV),一台在台湾新竹(1.3GeV)。

第三个目的,根据国外经验,通过高能加速器和高能物理探测装置的研制,可以带动和发展一批高技术,从而促进工业技术的发展。设于瑞士日内瓦的西欧核子研究中心(简称西欧中心),是欧洲14个国家共同投资的高能物理研究中心。该研究中心所长 Schopper 曾对上述问题作过调查研究,他的结论是:欧洲每投资于西欧中心的一元资金,使欧洲工业界在由此而发展的高技术中平均获得三元的收益。北京正负电子对撞机工程的建造也不会例外,在这方面也已初见成效,将在下面第三节中较详细地介绍。

1) 本文于1988年11月收到。

北京正负电子对撞机还可以用于自由电子激光研究。位于法国 Orsay 的同步辐射研究中心 (LURE) 正在准备在他们的电子储存环 Super-ACO 上进行自由电子激光研究。另外,北京正负电子对撞机的注入器可以把电子加速到 1.4 至 1.55 GeV, 这样高能量的电子可以用来进行中能核物理实验研究, 或者用来产生 μ 子束以进行 μ 子自旋转动 (μ SR) 实验。 μ SR 是一种用于研究凝聚态物理物性的“探针”。

1983 年,北京正负电子对撞机工程经政府批准,列为国家重点工程。1984 年 10 月 7 日破土奠基。中国科学院高能物理研究所和国务院十多个部委的几百个工厂、研究所和中国科学院的广大科技人员、工人、管理人员共同团结协作,努力奋斗,为这一工程研制各种设备。工程按计划进行,进展迅速,1988 年 10 月 16 日比原定计划提前约两个多月实现了正负电子对撞。从奠基到初次实现对撞只花了四年零十天,这一建造速度可以跟国际上的高能加速器的建造速度相比,国际上一般需四至六年,而我们初次建造,缺少经验,所以四年时间是很短的。

二、主体结构

图 1 是北京正负电子对撞机示意图。注入器是一台电子直线加速器(即图 1 的 1、2、3、4),可以把电子或正电子加速到 1.4 到 1.55 GeV,然后通过正、负电子输运线注入储存环。储存环可以进一步加速电子和正电子、最高使它们各达 2.8 GeV。电子和正电子达到预定的能量后,能量便保持不变,使它们在一定的地方(对撞点)对撞。对撞时,正负电子束团中仅有极少数几个电子、正电子相撞,其余绝大多数相擦而过,继续在储存环内回旋运动,正电子和电子逐渐减少,大约几小时后,减少到某一数值(例如只剩 30%),此时需要重新注入。北京正负电子对撞机有两个对撞点,由于经费所限,只在一个对撞点上安装一台大型探测装置(即北京谱仪),用来探测正、负电子对撞时所产生的各种粒子。同步辐射在储存环的第 III 和第 IV

两个象限引出。

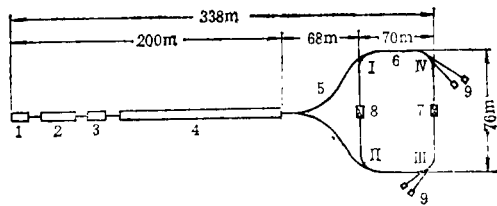


图 1 北京正负电子对撞机示意图

1——30 MeV 预注入器; 2——120 MeV 加速段;
3——正电子产生靶; 4——1.4 GeV 正负电子加速段(1至4组成注入器); 5——输运线; 6——储存环;
7——第一对撞点,北京谱仪; 8——第二对撞点; 9——同步辐射实验站

1. 注入器

注入器是一台全长 200m 的电子直线加速器,主要参数列于表 1。它分为四大部分:(1) 电子枪;(2) 30 MeV 预注入器,把电子加速到 30 MeV;(3) 正电子产生和正电子束形成部分,把电子从 30 MeV 加速到 150 MeV,轰击一个可以插入、移出的正电子产生靶(钨块),产生正电子,紧接着的聚焦器把正电子聚成束(加速电子时移出正电子产生靶,让电子通过);(4) 1.4 GeV 直线加速段,可分别把电子或正电子加速到 1.4 至 1.55 GeV。

采用等梯度盘荷波导为加速结构(简称加速管),每节长 3.05m,共 56 节。加速管内的加速电场由输入的微波产生,微波频率为 2856 MHz。在微波系统中采用了一种压缩脉冲宽度的机构,名叫能量倍增器,可以将速调管的输出的峰值功率提高约 50%。

加速管和能量倍增器都是由中国科学院高

表 1 注入器主要参数

项 目	数 值
电子/正电子能量	1.4—1.55 GeV
电子枪输出脉冲电流	5 A
正、负电子束脉冲宽度	2.5 ns
正、负电子束脉冲重复率	可调,最大 50 次/s
速调管工作频率	2856 MHz
速调管功率(单个)	>20 MW
速调管数量	16
加速管数量	56
能散度 $\Delta E/E$	$\pm 0.6\%$

能物理研究所工厂制造的,其性能达到国际水平。产生微波功率的速调管是高能物理研究所和机械电子工业部汉光电厂联合研制的,输出功率达 30MW 左右。

注入器的最高能量已达 1.55GeV,电子流最强达 800mA,从 1987 年 10 月开始运行,至 1988 年底,累计已运行了 5000 小时以上。

2. 储存环

储存环的主要参数列于表 2。环周长 240.4m,由两个差不多为半圆的圆弧和两个 27.4m 长的长直线节构成。在长直线节中部为对撞点。注入时,储存环工作在注入能量。电子和正电子分别先后注入并储存,当有足够的电子和正电子注入储存后,储存环开始同时加速电子和正电子,磁场同步增强。当达到预定能量后,磁场随即保持不变,正、负电子开始对撞。

整个环共有 40 块弯转磁铁,最大磁场强度为 0.9028T; 60 块四极(聚焦)磁铁;八块插入节四极磁铁,位于对撞点附近,使束团在对撞点聚焦;四块低场弯转磁铁,最大磁场强度为 0.45 T; 32 块六极磁铁,用来补偿储存环磁聚焦系统的色差。注入系统包括铁切割器二台,静电分离器四台,冲击偏隔板六台。环的真空室材料为铝,束流通过的真空室截面为 56mm 高,120mm 宽。

弯转磁铁是上海先锋电机厂制造的,四极磁铁是中国科学院高能物理研究所工厂制造的,这两种磁铁的实测性能均优于理论设计要求,达到国际先进水平。磁铁电源的电流稳定度好于万分之一。环上有两个高频腔,带电粒子通过腔时受到腔内高频电场加速,逐步达到预定能量。在此之后,高频电场只补偿电子和正电子由于放出同步辐射而损失的能量,使它们的能量保持不变。每个高频腔由 4 台 25kW 的高频发射机并机输入功率,可达 100kW。

能量和亮度是储存环的两个最重要的性能指标。亮度正比于环内回旋的电子和正电子流的流强的乘积。亮度与反应截面的乘积等于每秒内发生这一反应的事例数。亮度愈大,单位

表 2 储存环主要参数

项 目	数 值
电子/正电子能量	最高 2.8GeV
亮度 (2.8GeV 时)	$1.7 \times 10^{31}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$
每束束团数	1
每束环流流强	65mA
储存环周长	240.4m
平均半径	37.9m
弯转磁铁最高磁场强度	0.9028T
弯转半径	10.345m
β_x^*	1.3m
β_y^*	0.1m
均方根能散	7.4×10^{-4}
均方根束团长度	5.8cm
垂直方向均方根束团大小	0.069mm
水平方向均方根束团大小	0.89mm
高频频率	199.53MHz
高频功率	200kW
同步辐射功率(每束)	34kW

时间内实验所得的数据愈多。对撞机有一特点,即亮度一般随 E' 变化(E' 是质心能量,即电子和正电子能量之和)。如果对撞机在低于它的设计能量 E 处运行,亮度急剧下降,也就是说实验事例数将急剧下降,因此能量高的对撞机不能取代能量低的,各有各的工作能量范围。这一特点说明了,为什么在国际上对撞机最高能量即将达到 100GeV (质心能量)时,还有必要建造最高质心能量为 5.6GeV 的北京正负电子对撞机。北京正负电子对撞机的工作能区是 3 至 5.6GeV,是研究聚层子物理的能区。在这一能区内很多很重要的物理问题还没有解决。目前国际上只有一台名叫 SPEAR 的对撞机在此能区工作。北京正负电子对撞机的设计亮度比 SPEAR 的高得多,在 3.1GeV (质心能量)处,亮度为 $5.2 \times 10^{30}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$,为 SPEAR 的九倍。北京正负电子对撞机在达到它的设计亮度之后,将是这一能区内性能最好的对撞机,我国科学家完全可以利用这一优越条件作出国际领先的工作。

目前储存环的亮度已达 $1.6 \times 10^{30}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ (质心能量 3.1GeV)。

3. 自控和束测系统

自控系统采用一台 VAX 11/750 计算机作为主控机。数据收集、部件运行、控制等电子线路采用 CAMAC 标准,远距离信号传输采用光导传送,共用 20 根光导,30 多台 CAMAC 机箱,30 多种 400 多件 CAMAC 插件。整个系统还配有近千件控制插件和接口插件,与近 800 台部件(磁铁电源、真空系统、高频系统、束流测量等)相连接。自控系统测量对撞机的各个部件所输出的 5000 多个信号,对近 800 台部件进行控制。束流系统是指有关束流性能的测量系统,装有多种探头:束流位置探头、束流强度探头、壁电流探头、束流损失探头、同步辐射光探头、荧光屏监视器等。

4. 北京谱仪

北京谱仪是一台通用型磁谱仪(参看图 2),探测的立体角接近 4π ,能够分辨带电粒子的类型,并测量它们的动量。能够测量能量从几十 MeV 到几 GeV 的 γ 光子。它的主要部件有:束流管道、中心漂移室、主漂移室、桶部

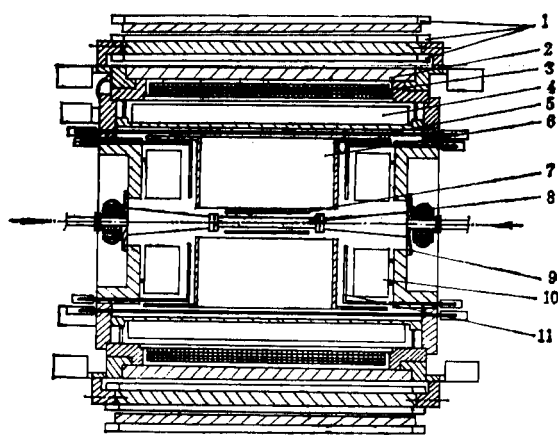


图 2 北京谱仪示意图

- 1—— μ 子鉴别器; 2——轭铁; 3——磁体线圈;
4——桶部簇射计数器; 5——桶部飞行时间计数器;
6——主漂移室; 7——中心漂移室; 8——束流管道; 9——亮度监测器; 10——端盖簇射计数器;
11——端盖飞行时间计数器

飞行时间计数器、端盖飞行时间计数器、桶部簇射计数器、端盖簇射计数器、螺线管线圈磁体、 μ 子鉴别器、亮度监测器、触发判选系统、电子学读出系统、在线数据获取系统、气体系统等。为了对实验数据进行分析,离线分析系统(软

物理

件)的建立也是北京谱仪的研制的主要工作之一。

北京谱仪的各种探测器一层一层地把束流管道包住。电子和正电子在束流管道内对撞。束流管道外面是中心漂移室和主漂移室,受磁场偏转的带电粒子在这两个漂移室内留下径迹,可以测出粒子的动量。带电粒子在主漂移室内的能量损失可以作为辨别粒子种类的信息。主漂移室的外面是飞行时间计数器,记录带电粒子从对撞点飞行至计数器的时间,借以分辨粒子种类。飞行时间计数器的外面是簇射计数器,记录光子和电子的能量。再外面是螺线管线圈,其最高磁场强度为 0.45T。线圈外面是重 390t 的轭铁。轭铁分三层, μ 子鉴别器分为三层,分别安装在每一层轭铁的外面。亮度监测器测量对撞机的亮度,安装在距对撞点两侧 1.9m 处,紧贴在束流管道管壁上。各种探测器和温度、气体气压等监测探头给出的电子学信号共 23000 多道,各种电子学插件共 2000 多件,机箱约 200 台。电子学读出系统也采用 CAMAC 标准。触发判选系统根据物理实验要求预先设置选择条件,有选择地记录对撞事例的数据。由一台 VAX11/785 计算机来控制、操作整个谱仪,记录数据。

北京谱仪的设计与现在 SPEAR 上工作的 Mark III 谱仪相比,有较大的改进,建成后将是这一能区内国际上最先进的谱仪。北京谱仪现在正在用宇宙线作整机调试,预期到 1989 年中可以开始进行实验工作。

5. 同步辐射

北京正负电子对撞机可以以两种工作模式提供同步辐射:一种是兼用模式,正、负电子对撞,兼顾高能物理和同步辐射;另一种是专用模式,只加速电子,专用来产生同步辐射,此时电子流流强可以比兼用模式时强,同步辐射强度相应提高。

围绕储存环的南半圈(图 1 的第 III, IV 象限),建有两个同步辐射实验大厅,每个大厅各有 7 个光束窗口。在第一阶段,只利用三个光束窗口,共建造五条光束线和八个实验站,以初

步满足各方面的要求。第一个光束窗口位于第 IV 象限,从扭摆磁铁引出同步辐射,分成两条光束线,设立晶体形貌学实验站、医学研究站、扩展 X 射线吸收边精细结构 (EXAFS) 实验站和点缺陷漫散射(黄昆散射)实验站。第二个窗口也在第 IV 象限,由弯转磁铁引出,也分为两条光束线,设立衍射实验站、小角度散射实验站和光电子谱实验站。以上四条光束线将在 1989 年中建成。第三个窗口在第 III 象限,由弯转磁铁引出一条光束线,设立光刻实验站,将在 1990 年建成。

三、对我国工业技术和高技术的促进

前面已经提到,由于北京正负电子对撞机工程属于高技术,这一工程的建造必然能够带动、促进我国工业技术和高技术的发展。现在已初见成效。下面列举七个例子来说明:(1)精密机械加工。制造磁铁时需要能冲制铁片铁芯的大型精密冲模,精度到 $25\mu\text{m}$,当时国内没有一个工厂或研究所能够制造。由于工程需要,上海先锋电机厂和中国科学院高能物理研究所工厂分别研制出了弯转磁铁和四极磁铁的铁芯的冲模,提高了我国精密机械加工技术。(2)我国生产的 10cm 微波功率管(名叫速调管)的输出功率过去只能达到 16MW。通过工程引进了国外先进技术,中国科学院高能物理研究所和机械电子工业部汉光工厂联合研制出了 30MW 的速调管,所用的先进的工艺技术已

(上接第 262 页)

组进行研究工作,即 ALEPH, DELPHI, L3 和 OPAL。ALEPH 是由斯坦博格教授领导的。L3 是由丁肇中教授领导的。中国科学院高能物理研究所是这二个协作组的正式成员。

西德 HERA 电子-质子对撞机的电子束能量为 26GeV,质子束能量 820GeV,亮度达 $1.5 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,计划于 1990 年完成。

美国 SSC 超导超高能质子-质子对撞机的质心能量为 40TeV,亮度达 $10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,是目前计划中的能量最高和亮度最高的对撞机。

经推广到电视广播所用的功率管上。(3)磁铁所用大功率电源的最大电流为 3500A,稳定度要求长时间内好于万分之一。这样的要求过去是满足不了的。(4)机械电子工业部北京广播器材厂的 200MHz 大功率发射机的功率也由于高能的需要从 25kW 提高到 100kW。过去出厂验收只作 72 小时连续运行试验,现在稳定连续运行试验标准是 720 小时(即一个月)。(5)对撞机的自动控制系统每秒 2~3 次快速采集 5000 多个信号,对各个部件进行控制,其中有的控制精度要求很高,例如对于弯转和四极磁铁的电源以万分之一的精度作动态控制。这一系统是国际先进水平。(6)北京谱仪的电子学有 2 万 3 千多道信号。过去我国核物理实验的电子学一般只有几十道信号,现在规模提高了近千倍。(7)超高真空部件和泵已经成批生产,美国和巴西已来询问性能和价格。

特别值得提出的是,北京正负电子对撞机的部件,已经复制生产出口,开始创收外汇。作为注入器的电子直线加速器的性能良好,自制的加速管质量达到了国际水平。1987 年美国布鲁克海文国家实验室向中国科学院高能物理研究所订购两根加速管及其附件,价值 10 万美元,已在 1988 年 6 月交货。他们又加订了六根,价值 30 万美元。高能物理研究所与巴西签订了合作协议,帮助他们建造同步辐射专用加速器,现正在为他们加工加速管。美国 Argonn 国家实验室也将订购一批加速管。以上各项总计价值约 200 万美元。

计算表明,在这样高能量和高亮度的条件下,一定能对弱电作用的破缺机制作出判断。

二十世纪的最后十年的实验计划,比起六十年代施瓦茨、莱德曼、斯坦博格等人所做的二种中微子实验,从规模、经费与人员看,都是不可同日而语的。但是,我们面临的问题和困难也更为深刻而广泛。诺贝尔委员会决定把今年的物理奖授予这三位四分之一世纪以前作出杰出贡献的科学家,这一事实表明,在科学史的发展道路上作出过成就的人们,历史是不会忘记他们的。