

北京正负电子对撞机的建造和调束¹⁾

方 守 贤

(中国科学院高能物理研究所)

本文介绍北京正负电子对撞机的结构特点、工程建设情况以及能在短期内建成的原因。

一、北京正负电子对撞机结构特点

北京正负电子对撞机(BEPC)是我国建造的第一台高能加速器,它可以把正、负电子加速到1.4—2.8GeV的能量,并使正、负电子束团在储存环内积累、加速、储存和在预定的地点发生对撞。正负电子对撞时产生的高能物理现象及新粒子由大型探测器——北京谱仪进行观测,供物理学家进行研究。这项工程于1983年4月25日正式批准,同年12月列入国家重点工程。1984年10月7日破土动工,1988年10月16日首次实现对撞,宣告基本建成。建造BEPC的目的有两个,一是进行基本粒子物理研究,主要是粲物理及 τ 轻子物理的研究。在这一能区内,美国SPEAR等机器多年已积累了大量的实例,实验结果表明,仍然有很多有兴趣的问题值得探讨,但要求BEPC必须有高亮度。第二个目的是提供真空紫外、软X射线和硬X射线波段的同步辐射光,以供给其它学科领域的研究工作使用。

目前,北京正负电子对撞机和北京谱仪已基本建成,投入运行。同步辐射实验室仍在建设中。

下面简单介绍这项工程的基本情况。

北京正负电子对撞机由四部分组成,即注入器、储存环、谱仪和同步辐射光实验室,见图1。

1. 注入器——电子直线加速器

这台直线加速器就能量而言占世界第五位,它作为储存环的注入器,有一些难度大的要

物理

求,如:

(1) 束流的能散度(能量为1.1GeV时) $\leq \pm 0.6\%$ 。

(2) 束流的发散度小于 $2\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

(3) 要有较强的正电子产额。

(4) 电子与正电子加速状态转换的间隔要短(1—2分钟)。

直线加速器中难度较大的部件有:盘荷波导加速管(共56根,每根长3.05m),能量倍增器共14台,微波功率源中的大功率速调管及其脉冲调制器各16台(速调管的输出功率大于20MW,寿命不少于10000小时)和脉冲电流达5A的毫微秒电子枪等。

2. 储存环

目前世界上正、负电子对撞机共有九台, BEPC在能量上占第七位。为满足“一器二用”和高亮度要求,储存环的特点如下:

(1) 在聚焦结构的设计方面,吸取了国外储存环之长,补其之短,跳出了大型对撞机将消色散与正常周期分开的典型设计方法。发展了一种新的将两者统一考虑的紧凑结构。在较短的周长内有八个2m长的直线段,其中四个供同步辐射光安放扭摆磁铁。目前的结构对非线性场不灵敏,因此有较大的动力学孔径,这保证了束流有好的稳定性,为高亮度打下了基础。

(2) 储存环真空室的孔径为 $58 \times 120\text{mm}$,比同类加速器大得多,而且在真空室结构方面

1) 本文原部分内容在本刊1989年第5期刊登的叶铭汉的“北京正负电子对撞机工程”一文中已有介绍,故本文刊出时作了删改。有关对撞机的内容请参考叶铭汉文。

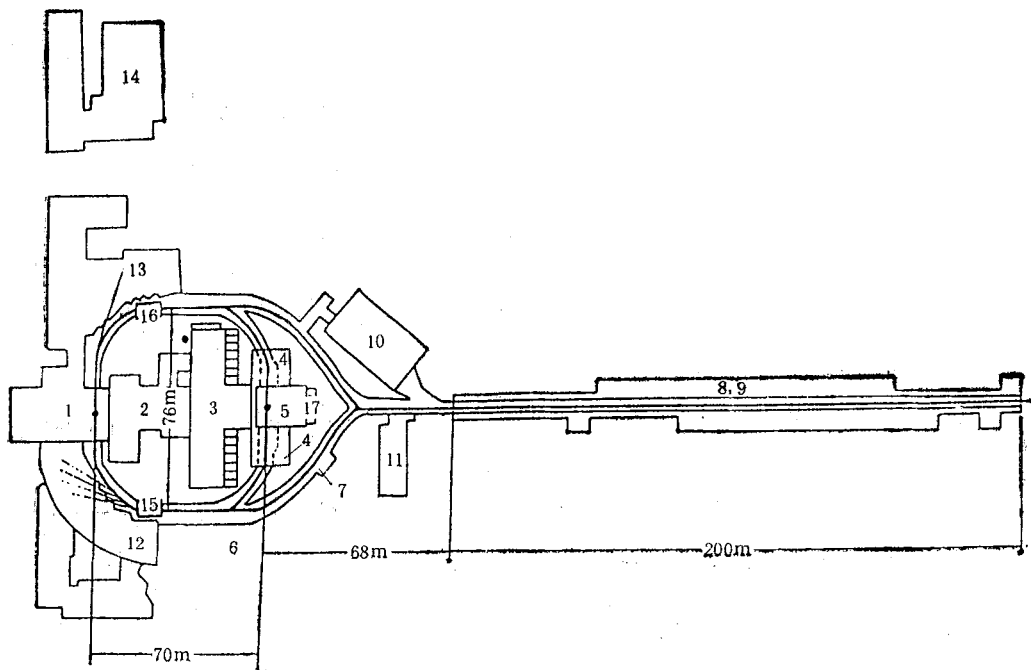


图1 BEPC 示意图

1,2——第一对撞点实验厅; 3——储存环电源厅中央控制室; 4——高频站; 5——第二对撞点实验厅; 6——储存环隧道; 7——输运线隧道; 8——直线加速器隧道; 9——速调管走廊; 10——核物理实验厅; 11——输运线直线加速器电源厅; 12——同步辐射实验东厅; 13——同步辐射实验西厅; 14——计算中心; 15,16——同步辐射光测量站; 17——排风站

做到了尽可能光滑,从而提高了流强不稳定阈值。

(3) 采用了控制发射度的扭摆磁铁,使亮度有可能按能量的平方下降。

(4) 保留了将来采用 $\text{Min } \beta$ 的可能性,以进一步提高亮度。

储存环主要部件中难度较大的是主环的磁铁系统(为 FODO 分离型);难度最大的是 60 块长 40cm 的四极聚焦磁铁及 40 块长 1.6m 的二极弯转磁铁,还有供应这些磁铁的各种大电流高功率稳流电源,超高真空系统与抽速为 100l/s 及 500l/s 的小体积离子泵,高频加速功率源系统和注入元件(如静电分离板、脉冲磁偏转板、切割磁铁等)。

3. 加速器的控制系统

BEPC 的中央控制系统是在“复制”美国 SLAC 实验室 1984 年完成的新 SPEAR 控制系统基础上,经发展改进而成的,主机是一台 VAX11/750 计算机,配有 4MB 内存,912MB

磁盘等外部设备。控制台有三个,由彩色图像显示器、触摸屏和程序控制可调旋钮组成。数据的收集及处理系统是由 VAX-CAMAC 导通(VCC)来完成,并用串行光导进行通讯。共有 30 台 CAMAC 机箱,40 多种共 500 个 CAMAC 标准插件和 700 多个转接器与 900 多个加速器部件相连接。并配有各类控制件,对加速器及其设备进行控制及实时调度,加速器的定时系统是参照日本 KEK 储存环方案设计的,定时时间的抖动小于 200ps。在“复制”的同时,对硬件及软件都有发展和创新。

输运线及主环的全部近 200 台电源的各种操作全部计算机化,各区段的真空及真空泵状态均能在中央控制室显示。

4. 北京谱仪 (BES)

由于经费限制,两个对撞区中只建造了一台大型探测器-北京谱仪,用于高能物理实验,它的设计原则是:

(1) 具有尽可能大的立体接收角。

(2) 对带电粒子有较好的识别能力和动量、空间的高分辨本领。

(3) 对低能光子有较高的探测效率和较好的能量、空间分辨本领。

这台谱仪的主体部分由中心漂移室、主漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器、 μ 子鉴别器、磁铁及大型螺旋管线圈组成，配有气体系统、快电子学系统以及计算机数据获取系统等。

5. 同步辐射实验室

在储存环的南侧，建有两个同步辐射实验大厅，各有七个同步辐射光引出窗口。第一阶段只从三个窗口引出五条光束线，建成七个实验站。

储存环有“兼用”和“专用”两种工作模式，可满足“一器两用”的目的。

第一个窗口的光来自扭摆磁铁，分成 BL-1 和 BL-2 两条光束线，BL-1 建有 X 射线形貌学及医学站，BL-2 建有广延 X 射线原子精细结构 (EXAFS) 站及漫散射站。

第二个窗口的光来自储存环的偏转磁铁，分成 BL-3 和 BL-4 两条光束线。BL-3 建有小角度散射、衍射站及光电子谱仪站。

第三个窗口的光来自偏转磁铁，建有一条光束线 BL-5，供光刻站研究用。

二、BEPC 的建造

质量、进度与投资，这三个因素对任何工程来说都是至关重要的，对于 BEPC 这样的大型科研工程更有特殊意义。要缩短工期和加快进度，势必增加投资或忽视质量，而要提高质量则往往又会要求增加投资或延缓工期。为了使这三个方面均达到满意的程度，除了客观条件外，人的主观能动性起决定的作用。这里包括两个环节，即强有力的高效管理系统和在这个系统指挥下的全体工作人员的积极性。回顾 BEPC 建设的全过程，正因为抓住了这两个环节，才有今天这样质量好、速度快、投资省的局面。下面仅就这三个方面介绍一下 BEPC 工程的建造情

况。

1. 质量

没有质量就没有速度，更谈不上节省投资。尤其是对 BEPC 这样错综复杂的高技术工程，丝毫不能有半点侥幸心理。BEPC 工程的各级领导都强调要把质量放在第一位。国务院重大设备办公室多次指示全体参战的工程技术人员要把拼搏精神用在确保质量上。在建造的各个阶段都采取了相应的措施。例如在非标准设备的研制及批量生产阶段，派遣工程技术人员驻厂，一方面解决各种工艺困难，另一方面便于把问题发现并解决在设备出厂之前。在设备到所后，规定必须按将来的运行要求进行热测试，特别是长期的稳定测试，把问题尽量暴露在进隧道安装之前。在安装过程中制定了严格的操作规程。所以，总的说来，BEPC 绝大部分的非标准设备质量是好的，不少部件还达到了国际先进水平。下面仅介绍加速器某些主要设备的质量。

(1) 直线加速器

盘荷波导加速管是直线加速器的主体。1984 年前，国内医疗加速器用加速管的生产能力为每四个月到半年一根。为了工程需要，中国科学院高能物理研究所工厂在 1985 年建成一台 5m 深的大型氢炉，用以进行整体钎焊，形成了一条生产线，产量最高为每月六根，成品率在 90% 以上，实测性能达到国际先进水平，目前美国、巴西有关实验室已向我国定货。

能量倍增器在组装及焊接方面也存在着不少困难，经过不断努力探索，在我所工厂制造成功，其主要性能指标达到了美国 SLAC 实验室相同的水平。

S 波段的高功率速调管最大输出功率国内原有水平仅 16MW，寿命也仅 1000 小时。我所与有关工厂合作，在引进消化吸收的基础上，改进了原有设计和生产工艺，加强了质量控制和监督，使新生产的速调管的各项指标都达到了设计值，最大输出功率可达 30MW，寿命有显著提高。正在运行的 16 台速调管在输出功率 20MW 的条件下已经工作了近 5000 小时

(2) 储存环

储存环磁铁极面的精度必须控制在 $\pm 25\mu\text{m}$ 之内,它是采用0.5mm厚的硅钢片,用冲模冲压成形,然后叠加而成.当时国内的冲模精度在0.1mm左右,不能满足要求.我所工厂与上海先锋电机厂分别承担了四极聚焦磁铁和二极偏转磁铁的研制与生产任务,制成了大型高精度冲模,掌握了叠装、焊接技术,出色地完成了磁铁生产任务.磁场测试结果表明,二极与四极磁铁的有效长度偏差比理论设计小一倍多,质量可以与世界上同类加速器的磁铁相比.

供应磁铁的电源约有175台,分17种,部分电源要求大电流、高功率和极高的电流稳定度.例如,二极磁铁的电源要求输电电流为4000A,输出功率为1.2MW,稳定度 ≤ 10 在国内是首次制造,达到了要求.

为延长束流寿命,减少对撞时的物理实验的本底,储存环真空室内的真空度必须小于10 Torr.由于真空室的焊接清洗及安装都严格遵守规章制度、从而使装有各种元件和有400多个法兰接口的长240m的真空室在安装后不到一个星期的抽真空实验中,静态真空度就达到了 10^{-9} Torr左右,经过束流的清洗,动态真空度达到了 3×10^{-10} Torr.

加速器各个部件沿束流线安装精度也是一个重要的环节,它直接影响初期的调束效率.特别是储存环磁铁沿240m轨道的安装精度要求最高,如四极磁铁的垂直均方偏差 $\Delta Z \leq 0.1\text{mm}$,二极磁铁绕束流线的角度均方偏差 $\alpha \leq 0.2\text{m}\cdot\text{rad}$ 为保证安装精度,在合理的准直测量方案基础上,又制订了严格而详尽的操作规程,以减少系统误差及随机误差.这就保证了储存环磁铁安装准直,其精度大大优于设计要求.

2. 时间

时间对于竞争十分激烈的基本粒子物理研究来说就是生命.尤其是在 BEPC 的能区上,已有美国 SLAC 实验室在 SPEAR 机器已经积累了大量的事例,但要作出定量的结论,至少还要收集比目前多四、五倍的事例.因此 BEPC

能否尽快的建成并早日达到高亮度,将决定我们高能物理实验成果的大小及成败.一般说来,工业基础比较先进的国家建造这样一台对撞机周期大约为4—5年.这样的速度中国行不行?事实上, BEPC 从破土动工到调束成功共化了四年多一点时间,超过了人们的预料.其成功的原因可简单归结如下:

(1) 先进而正确无误的设计

BEPC 的设计,从总体到部件得到国际上很多有经验的专家的帮助和指导,在设计过程中认真总结了国际上对撞机的运行经验,并经过多次讨论及论证,做到既先进又准确无误,总的说来没有出现大的反复,保证了工程的进展.个别系统如直线加速器的水冷、温控及连锁保护系统考虑过于简单,储存环的水冷系统设计中有错误等,一经发现立刻纠正,没有造成大的失误.

(2) 成熟的先进技术

为保证加速器的先进性,我们尽量采用先进、成熟的技术.对于一些基础十分薄弱、差距较大、研制投资高的项目,要充分利用开放的有利条件,在引进、消化、吸收的基础上加以发展,做到稳中求快,避免片面追求先进性.

(3) 实行科学管理

在工程建设中,我们采用了 CPM 管理法.实行指挥部、室、组三级 CPM 管理,工程指挥部根据总体要求制订出土建及各大系统的总的 CPM 计划,各室制定出各分系统的 CPM 计划,每个组又制订出各项任务的实施计划.由于不确定的因素太多,因此很难用数学方法对各环节加以分析,尤其在开始时,不容易找到真正的紧急路线.但坚持做下去,通过不断摸索,耐心分析,找出每一段时间内的紧急路线,然后加以重点突破.当紧急路线缓解成一般路线,又找到另一条紧急路线,一步一步把工程推向前进.

在整个 BEPC 建设过程中,由于各种因素的影响,土建、安装、分系统调束等各项工作不得不高度交叉进行.这不光是为了抢进度,更重要的是我们必须使设备或系统尽早投入调试或按实际需要加以运行,以便尽早暴露问题,早日

采取补救措施,把问题解决在总调之前。

3. 投资

BEPC工程总预算为二亿四千万人民币,在最近几年来物价有较大幅度的上涨和外汇比价有较大调整的情况下,总投资仍控制在概算范围内。没有超支的主要原因有以下几方面:

(1) 非标准设备的生产必须以自力更生为主

BEPC的很多非标准机电设备都有一定的难度,达到了当前工业水平的“极限”,但我们坚持了自力更生为主的精神。凡是国内有一定基础,或是经过努力可以完成的设备就坚决在国内研制并生产。如各类磁铁及电源、高频发射机、真空泵、盘荷波导加速管、调制器、速调管及各种控制器等,大约有90%以上非标准设备都是在国内生产的,这就节约了大量外汇及总投资。

(2) 结合国内工业条件提出合理的方案及工艺要求

必须实事求是地按照我国自己的工业条件,提出各类设备的技术精度要求及加工工艺,以降低造价。

(3) 在消化、吸收的基础上引进国外技术在进口设备和开展国际合作方面国家给BEPC工程以极大的优越条件。但是,我们除1987年2月: 250MeV区段开始调束。

4月21日: 在该区段末端第一次得到能量为80MeV、流强为0.38mA的正电子束,不久分别提高到100MeV、2.5mA

10月中旬: 直线加速器整体第一轮调束开始。

11月30日: 直线加速器终端第一次得到能量为800MeV、流强为30mA的电子束,不久提高到1.17GeV, 240mA。

1988年4月中: 第二轮调束开始。

5月中: 电子束能量达1.2GeV、流强为800mA

6月27日: 直线加速器末端第一次得到能量为1GeV、流强为1mA的正电子束,不久分别提高到1.1GeV, 6mA。

9月18日: 第三轮调束开始。

2. 储存环调束

1988年5月5日: 第一次调束开始。

5月19日: 获得第一次有高频加速场时的储存束,流强为几个 μA 。

6月18日: 发现 Q_1 , Q_2 插入聚焦磁铁的电源接错,改正后储存环的流强达到50

了计算机、光电子谱等国内无法在短时间内研制成功的设备整机引进外,其余的引进项目总是化整为零,只进口整机中的一些必要的元器件,自行研制组装,大大节约了投资。

(4) 提倡埋头苦干为科学献身的精神

全体参战人员许多年来勤勤恳恳、不计报酬、埋头苦干,为祖国科学事业献身的精神,在这项工程建设中得到了充分的体现。

(5) 实行投资包干责任制

实行项目负责制。经理向领导小组签定了投资包干合同,工程内部实行投资包干责任制。对投资切块管理,土建按工号核算,工艺设备按系统共划分成11个大项80个子项,经费切块下达,按月逐项核算。项目负责人不但对技术进度负责,而且在经费上也要保证不超投资。

(6) 严格的审查制度

经费的使用实行审批制度,层层把关。各级领导都担负了管理经费的责任,都设法节约经费。

三、调束情况

下面列出注入器与储存环自1987年开始调束的大事记。

1. 注入器调束

μA , 能量为 1.1GeV 时寿命达 1 小时, 并且 19 套电源实现了计算机同步跟踪控制, 束流能量由 1.1GeV 提高到 1.6GeV.

1988 年 7 月 3 日: 储存正电子束成功, 流强达 12mA, 并且由 1.1GeV 加速到 1.6GeV, 损失值为 7%, 比预计要好得多. 天气太热, 隧道温度高而停机.

7—9 月: 完善及改进有关系统.

10 月初: 第二轮调束开始.

10 月 16 日: 第一次实现了能量为 1.6GeV 的正、负电子对撞, 亮度峰值达 $8 \times 10^{28} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

10 月 18 日: 2mA 正电子与 3mA 负电子在能量 1.6GeV 时实现对撞, 亮度值为 $8 \times 10^{29} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

11 月 1 日: 峰值亮度达 $1 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 寿命约 4 小时.

12 月中: 峰值亮度升到 $2 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

总的说来 BEPC 的调束是十分顺利的. 从第一次调束开始到达亮度值为 $2 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 仅相隔了 5 个月的时间, 而且中间两个半月是停机, 速度之快是世界少有的, 这说明机器各方面的性能是良好的.

四、今后的改进

亮度是 BEPC 的生命线. 提高亮度可分两个方面, 一是提高峰值亮度, 二是提高平均亮度.

1. 关于峰值亮度: 这主要决定于储存环的性能. 初步的运行结果表明, 储存环的理论设计值是先进的, 有很大的粒子动力学孔径, 部件及安装的质量也属第一流. 因此实验上测得的

快头尾不稳定性流强的阈值, 远高于当时理论的估计值, 已经达到世界同能区正负电子对撞机的最高水平. 今后的改进重点是高频系统、束流诊断系统的测试精度和采用 $\text{Min } \beta$.

2. 关于平均亮度: 首先是取决于加速器部件设备及系统的长期稳定和可靠运行, 今后要努力提高运行率. 解决正电子的产量较少和正、负电子加速状态的转换效率不稳定的问题.

BEPC 已经跨出了决定性的一步, 下一个难度更大的战役是提高对撞机的亮度并作出第一流的物理实验.

本文所述及的工作和取得的成绩是 BEPC 工程全体参加人员多年辛勤劳动的结晶. 我谨向他们表示衷心的感谢.

(上接第 586 页)

- Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, JAPAN, (1987), 90.
- [8] J. E. Chen, Preceedings The First Japan China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, JAPAN, (1980), 19.
- [9] A. S. Xu et al., *Rev. Sci. Instrum.*, No.5 (1986), 25.
- [10] X. P. Jiang et al., Preceedings The Third Japan China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, JAPAN, (1987), 212.
- [11] M. C. Zhang, Preceedings The Third Japan China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, JAPAN, (1987), 207.
- [12] E. H. Zhang, Preceedings The Third Japan China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, JAPAN, (1987), 3.
- [13] Y. L. Wang, Preceedings The Third Japan China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, JAPAN, (1987), 22.
- [14] Q. Y. Zhou, Preceedings The Third Japan China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, JAPAN, (1987), 53.
- [15] Xie Jialin, Proc. 9th Internayional FEL conference, Williamsberg, (1987).
- [16] Guang Gexin, Preceedings The Third Japan China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, JAPAN, (1987), 204.
- [17] J. E. Chen, Preceedings The Third Japan China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, JAPAN, (1987), 116.
- [18] J. X. Fong, *IEEE, Trans. NS-325* (1985), 2891.