

高能粒子加速器

徐建铭

(中国科学院高能物理研究所)

摘要

本文介绍了近十年来已在运行、正在建造和计划建造的高能加速器,包括正、负电子对撞机,质子-反质子对撞机,电子-质子对撞机,κ工厂,高能重离子加速器和重离子对撞机等。介绍了它们的工作原理、主要参数、布局 and 性能等。

带电粒子加速器从三十年代开始,就随着人类探索微观世界的需要而发展,它的最高能量已从 MeV(10^6eV) 量级提高到 TeV(10^{12}eV),约提高了六个数量级。随着人们对微观世界认识的深入,要求探索更小尺度和更大能量的新现象,因而也就要求建造更高能量的加速器。

近十年来,建造的高能加速器多属于对撞机型。用高能粒子束轰击实验室中静止的靶时,有效作用能只占打靶的高能粒子的能量的一小部分,并且打靶粒子的能量愈高,有效作用能占的比例也愈小。在很高的能量下,有效作用能只和粒子动能的平方根成正比,即

$$E_{\text{有效}} = \sqrt{2EE_0},$$

式中 E 是打靶粒子能量, E_0 是粒子的静止能量。高能粒子的能量的利用率太低,使得建造满足高能物理发展所需要的高能加速器,在经济上和技术上都遇到很大困难。如果用两束相对运动的高能粒子进行对撞,粒子能量的利用率要大得多。两束相同能量的同种粒子或正、反粒子(如正、负电子或质子与反质子)相碰撞,则有效作用能是两束粒子能量之和,或者说相撞粒子的能量全部得到利用。因此,利用高能粒子束对撞是有效地进行高能物理实验的手段。我们把产生高能粒子束并使它们进行对撞的加速器叫对撞机。图 1 是粒子能量和有效作用能的关系曲线。从图 1 可以看出,1000GeV 质子轰击静止质子靶,有效作用能约 40GeV,即相当于 20GeV 的质子对撞;而 100GeV 质

子对撞,相当于 $2.2 \times 10^4\text{GeV}$ 质子轰击静止质子。至于电子对撞,这一效应尤其显著,例如 20GeV 电子对撞,作用能为 40GeV,相当于 $1.5 \times 10^6\text{GeV}$ 的电子轰击静止电子。另一方面,对撞机虽然在作用能有显著的优点,可是由于对撞粒子种类有限,所研究的反应有限,同时反应事例又较少。所以,有些高能实验还是要利用高能加速器引出的束流或所产生的次级粒子束轰击静止靶,以便和对撞机实验互相补充。

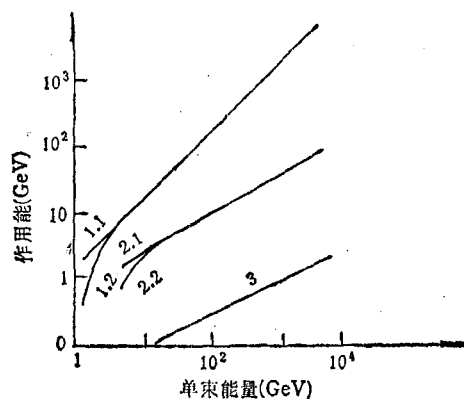


图 1 有效作用能和粒子能量的关系曲线

1.1——电子与电子对撞； 1.2——质子与质子对撞；
2.1——电子轰击静止质子； 2.2——质子轰击静止质子； 3——电子轰击静止电子

到目前为止,在现有的对撞机中,除一台是直线对撞机外,其他都是环形对撞机。环形对撞机也要利用另一台加速器或加速器组合先把粒子束加速到较高能量,再入射进来,并且要多

次注入,在对撞机中积累尽可能多的粒子,以提高粒子碰撞的几率(又称对撞机的亮度)。同时,还要加强对撞点附近的聚焦力,缩小束流截面,提高粒子密度,从而提高对撞亮度。大多数对撞机的入射能量低于对撞机的最高能量,当对撞机中积累足够的粒子以后,还要进行加速,把粒子加速到需要的能量后进行对撞。

注入、积累和加速都是准备阶段,只有在两粒子束对撞时才能进行物理实验。为了延长束流在环形对撞机中作回旋运动并进行对撞所持续的时间,提高束流利用效率,对撞机的真空盒中要维持 10^{-8} — 10^{-9} Torr 的超高真空。

粒子束由于相互作用和气体分子散射以及其他因素的影响,它的强度会逐渐减弱。这时就要重新注入、积累并加速。然后再储存、对撞。束流强度降低一半的时间称为束流寿命,一般对撞机的束流寿命约一、二小时到十几小时,随对撞机能量和粒子种类不同而异。由于对撞机能较长时间储存束流,故又称为储存环。

文献[1—4]已分别介绍了七十年代和八十年代初的高能加速器的情况,下面按加速器种类分别介绍近十年来正在运行、建造和计划建造的高能加速器。

一、正、负电子对撞机

它是近年来建造最多的高能加速器。这是因为它和质子对撞机相比,具有规模、投资较小,技术比较成熟等优点。并且正、负电子对撞时没有强作用参加,反应简单。表1列出了主要的正、负电子对撞机的参数。

1. 北京正、负电子对撞机

这是我国的第一台高能加速器,1983年4月批准建造,计划在1988年建成。建成以后,除用来进行高能物理实验,还可利用电子束发射的同步辐射,进行生物、化学、材料科学、表面物理、光刻等方面的实验研究。

图2是它的布局图。北京正、负电子对撞机由注入器、储存环和束流输运线、北京谱仪、计算中心和同步辐射光束系统等五大部分组

物理

表1 主要的正、负电子对撞机参数表

名称	地点	建成时间(年)	能量(GeV)
ADONE	意大利	1969	1.5
SPEAR	美国	1972	4.2
DORIS	联邦德国	1974	4.5
VEPP-2M	苏联	1975	1.3
DCI	法国	1975	3.7
VEPP-3	苏联	1977	3.0
VEPP-4	苏联	1978	7.0
PETRA	联邦德国	1978	19
CESR	美国	1978	8
PEP	美国	1980	18
TRISTAN	日本	1987	30
BEPC	中国	1988	2.8
LEP	日内瓦	1989*	50—100
SLC	美国	1988*	50

* 计划建成时间。

成。

注入器能产生1.1—1.4 GeV的正、负电子束,电子从电子枪发出后,经预注入器加速到30 MeV,再经120 MeV直线加速器进一步加速,到150 MeV。当需要产生正电子时,把钨靶推到电子轨道上。电子束和钨靶作用,产生正、负电子。收集正电子后,经后面的一台直线加速器加速到1.1—1.4 GeV。需要电子流时,不推入钨靶,电子束一直加速到注入器末端。正或负电子束从直线加速器末端出来后,经过一块磁铁偏转,正、负电子束偏转方向相反,分别进入各自的束流输运线。输运线有二极磁铁偏转粒子轨道,并有四极磁铁对束流进行聚焦。正、负电子束经各自的输运线,输运到储存环注入点。

北京正、负电子对撞机的储存环是一个周长约240m的近似椭圆形的环形加速器,它能储存最高到2.8 GeV的正、负电子束,并使它们对撞。表2列出了北京正、负电子对撞机的主要参数。

这台对撞机是由我国自行设计、自己制造的,绝大多数高技术部件达到了国际同类设备的先进水平。整个对撞机已经建造并调试成功,于1988年10月实现了正、负电子束对撞。

2. 日本高能物理研究所的正、负电子对撞机

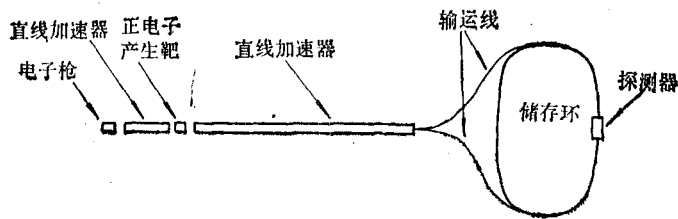


图2 北京正、负电子对撞机布局图

表2 北京正、负电子对撞机主要参数

e^\pm 的能量	1.4—2.8GeV
注入能量	1.1—1.4GeV
注入器长度	约 200m
储存环周长	240.4m
2.8GeV 时设计最高亮度	$1.7 \times 10^{31}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$
对撞点数目	2
储存环最大弯转磁场	9.028KGs
轨道弯转半径	10.345m
每束最大环流	65mA
每束的粒子数目	3.3×10^{11}
粒子回旋频率	1.247MHz
高频加速频率	199.53MHz
峰值加速电压	1.35MV
电子每圈辐射损失	0.521MeV

TRISTAN

这台对撞机 1986 年末开始对撞，单束能量达到 25GeV，亮度为 $10^{30}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。它的物理目标是寻找顶夸克，正在调试和改进之中。它的主环周长 3018m，设计能量 25—30GeV。用一个 6—8GeV 的积累环注入。积累环除了积累正、负电子束，用以注入主环外，本身也可以进行正、负电子对撞实验。积累环则利用该研究所原有的一台 2.5GeV 的直线加速器作注入器。TRISTAN 的主环和积累环的主要参数见表 3。

3. LEP

它是正在建造中的最高能量的正、负电子对撞机，建造在日内瓦欧洲原子核研究中心。第一期工程能量达到 55 GeV，计划 1989 年建成。以后增加高频加速站的数量，并使用超导加速腔，计划把能量提高到 125GeV。

它的注入器是电子直线加速器，可产生 600MeV 的正、负电子束。正、负电子束进入正、负电子积累环进行积累。积累的强正、负电

子流再注入到增强器系统进一步加速。LEP 的增强器系统是利用原有的质子同步加速器改装的。正、负电子先在 PS (28GeV 质子同步加速器) 中加速到 3.5GeV，入射到 SPS (450GeV 质子同步加速器) 后继续加速到 20GeV，然后注入到 LEP。LEP 的主要参数见表 4。

表3 TRISTAN 主环和积累环的主要参数

主要参数	主环	积累环
能量 (GeV)	25—30	6—8
注入能量 (GeV)	6—8	2.5—3
周长 (m)	3018	377
轨道曲率半径 (m)	246.5	23.2
长直线节长度 (m)	194.4(×4)	19.5(×2)+19.1(×2)
加速腔总长 (m)	318	29.6
加速频率 (MHz)	508.6	508.6
最大环流 (mA)	22	35
每圈辐射损失 (MeV)	290 (30GeV)	4.6 (6GeV)
峰值加速电压 (MV)	400	10
设计最大亮度 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	8×10^{31}	2×10^{31}
对撞点束流截面 (σ_x^*/σ_y^*)(mm)	0.434/0.027 (30GeV)	0.71/0.036 (6GeV)

LEP 的物理目标是对 Z^0 粒子进行细致的研究，这一目标和下面介绍的直线正、负电子对撞机的目标相同。

4. 直线正、负电子对撞机 (SLC)

这是建造中的唯一的一台直线对撞机。在环形对撞机中，正、负电子回旋运动辐射的能量随粒子能量的四次方增加，使得环形正、负电子对撞机进一步提高能量遇到很大困难。象前面介绍的 LEP，周长已达 26.6km，高频连续功率需要 16MW (能量才 60GeV)。因此，不少

实验室都在进行正、负电子直线对撞机的研究。因为电子在直线加速器中作直线运动，所以不会由于辐射损失引起困难。SLC 是利用斯坦福实验室已有的二英里长的电子直线加速器改建的。建成以后，除可进行高能物理研究外，还能为直线对撞机提供宝贵的经验。

表 4 LEP 的主要参数

周长 (km)	26.658883
平均半径 (km)	4.242893
轨道曲率半径 (km)	3.096175
每束内束团数目	4
加速频率 (MHz)	352.20904
总高频功率(一期工程) (MW)	16
加速腔总长 (m)	272.377
加速电压梯度 (MV/m)	1.474
总加速电压 (MV)	400
注入能量 (GeV)	20
最大能量(一期) (GeV)	~60
计划总加速电压 (MV)	4086
计划最大能量 (GeV)	125

电子束加速到 33GeV 时，被引出直线加速器，轰击钨靶以产生正电子。正电子束经束流输运线输送到直线加速器起始端，加速到 1.21GeV 后，引出直线加速器，注入到正电子衰减环。在环内，正电子作回旋运动，放出同步辐射，它的聚焦性能和能量均匀度都得到改善。电子枪发出的另一束电子流，经直线加速器加速到 1.21GeV 以后，也被引出直线加速器，注入到电子衰减环。经过适当的衰减作用以后，正、负电子束分别从各自的衰减环引出来，送回直线加速器，一直加速到直线加速器的末端，达到 50GeV。经过磁场把正、负电子束分开，经各自的束流输运及偏转系统，使正、负电子束作相对运动，进行碰撞。正、负电子束只能碰撞一次，和环形对撞机中的正、负电子束在储存环里长时间作回旋运动并多次碰撞不同。为了提高碰撞几率，在对撞区附近，要加强对正、负电子束的聚焦力，把束流直径压缩到微米以下。这台对撞机计划在 1988 年建成。

二、质子-反质子对撞机

第一台质子-反质子对撞机是西欧原子核研究中心利用 SPS 同步加速器改建而成的，单束能量为 270GeV，利用它发现了 W^\pm 和 Z^0 粒子。之后，美国费米实验室利用原有的 500 GeV 质子同步加速器作注入器，又建造了一个超导磁体环 TEVATRON，已能进行 900GeV 的质子、反质子对撞。设计的最高能量为 1000 GeV，对撞亮度为 $10^{30}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

建造质子-反质子对撞机的一个主要困难是获取较强的反质子束。以 TEVATRON 为例，为了获得较强的反质子束，增建了反质子源^[5]。它包括反质子散束环、积累环和有关的束流输运线。质子在常温同步加速器中加速到 120GeV 以后，引出来打靶，产生的 8.9GeV 的反质子注入到散束环，进行初步的“冷却”，以后再注入到积累环，继续“冷却”。经过束流冷却过程，反质子束的能散度和发射度都得到改善，束流中反质子密度增加。之后再入射到常温的质子同步加速器加速到 120GeV，引出并注入到超导环，加速到对撞能量，与质子束对撞。关于束流冷却技术在文献[6]中已作了介绍。

三、电子-质子对撞机 (HERA)

HERA 是当前唯一的一台电子-质子对撞机，它正在联邦德国汉堡的 DESY 实验室建造，计划 1990 年建成。电子和质子分别有各自的储存环，两环在四个地方交叉，电子和质子束就在交叉点对撞。两个环的主要参数见表 5。

电子环采用常温磁体，质子环则采用超导磁体。注入器系统充分利用已有的一些加速器。该实验室原有电子同步加速器 DESY 及正、负电子对撞机 PETRA。PETRA 可产生 14GeV 的电子流注入到电子环。质子流则先利用新建的 50MeV 质子直线加速器产生 50MeV 质子束，注入到改建的 DESY，加速到 8GeV，再注入到改建的 PETRA，把质子加速

到要求的 40GeV, 供质子环注入用。

表 5 HERA 对撞机主要参数

主要参数	质子环	电子环
能量 (GeV)	820 (200—820)	30 (10—30)
环周长 (m)	6336	6336
对撞点数目	4	4
长直线节长度 (m)	360	360
磁场强度 (T)	4.50	0.1849
注入能量 (GeV)	40	14
加速频率 (MHz)	208.189	499.667
加速电压 (MV)	25	165
电流 (mA)	480	58
束团数目	210	210
亮度 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.6×10^{32}	

四、计划中的或建议建造的 几台高能加速器

下面介绍计划中的或建议建造的几台高能加速器, 它们或者将会付诸实现, 或者将修改方案, 也有可能被放弃。

1. 超级超导对撞机(SSC) 这是美国议计建造的高能质子-质子对撞机, 计划尚未得到国会批准. 它的目的是进行 20TeV (1TeV=1000GeV) 质子-质子对撞, 有效作用能为 40TeV, 这是有可能付诸实现的最大的高能加速器. 它的注入器是 1TeV 的加速器组合, 主环周长在 90—165km 之间, 依赖于最后选定的超导磁体的磁场强度(3—8T). 共需两个超导磁体环, 以 1984 年美元计算, 造价为 27—30 亿美元. 计划开工后六年建成。

2. LHC 西欧中心也在考虑在正、负电子对撞机 LEP 的隧道里加建超导磁体储存环, 以实现 4.5—10TeV 的质子和反质子对撞. 能量由采用的超导磁体所能达到的磁场强度决定。

3. ELONISATRON 意大利有人建议建造欧洲长插入直线节对撞机, 实现每束 100TeV 的质子与质子或质子与反质子对撞. 它的规模和投资比 SSC 更大, 需要多国合作, 估计为期还远, 方案也还会有不少变化。

4. K 工厂 (KAON) 这是加拿大 TRIUMF

实验室提议建造的强流高能加速器. 它将产生能量为 30GeV, 平均流强为 100 μ A 的质子流, 以产生强 K 子流、反质子流和多种强子流, 中微子流, 以进行较精密的高能物理实验研究. 这个建议计划利用该实验室现有的 520MeV 的负氢离子回旋加速器作注入器, 新建五个环形加速器, 最终得到 30GeV 的强质子流. 这五个环是积累环、增强器环、收集环、主环和延伸环. 前两个环的平均半径是 34.11m, 同在一个隧道中. 后三个环的平均半径是前两个环的五倍, 即 170.55m, 同在另一个隧道里. 积累环是直流磁铁环, 它的作用是积累回旋加速器引出的 440 MeV 的 H^- 束流, 积累 20ms 时间间隔内的束流, 供注入到增强器用. 增强器是每秒 50 次的快脉冲质子同步加速器, 它把从积累环注入的质子束加速到 3GeV. 从增强器引出的质子束注入到收集环, 收集环周长是增强器的五倍, 可以收集五个增强器脉冲, 然后一次引出, 注入到主环. 主环为每秒十次的快脉冲质子同步加速器, 可把注入的质子束从 3GeV 加速到 30GeV. 质子束加速到最高能量后, 既可直接从主环引出到物理实验站进行物理实验, 也可引出来注入到延伸环, 再从延伸环利用慢引出系统引出质子流, 进行物理实验。

5. UNK 它是苏联高能物理研究所早在七十年代末就提出来的计划, 最终目标是建成约 3TeV 的质子对撞环. 该项工程进展缓慢, 在文献[1—5]中已有过介绍。

6. 高能重离子对撞机 (RHIC) 它是美国布鲁海汶实验室设想建造的高能重离子对撞机, 这台加速器将安装在本来为建造 ISABELL (质子-质子对撞机) 所开掘的隧道里. 该隧道周长约 3.8km, 计划建造两个超导磁体环, 设计磁体的最大场强为 3.4T, 这样可使质量数小于或等于 200 的离子的能量达到 100GeV/核子, 以实行重离子对撞. 它的注入器将利用原有的同步加速器 AGS。

7. 高能重离子加速器 重离子物理实验也逐渐向高能领域发展, 有些实验室正在设想建造高

(下转第 246 页)