

我国 90 年代加速器发展展望

Development of China's Accelerator in the 1990s

刘乃泉

(中国科学技术大学 合肥 230026)

本文是根据国内各主要加速器研究、生产和使用单位所提供的材料综合而成的。提供材料的单位有:北京高能所、兰州近代物理所、原子能研究院、上海核子所、国防科委九院、工程物理研究院、北京医疗器械研究所、上海先锋电机厂、北京师范大学、北京大学、清华大学、中国科学技术大学等。

在过去的十多年里,我国粒子加速器的研究、设计、制造和应用有了巨大的发展和长足的进步。80 年代,我国三大加速器工程建成,使我国成为拥有高、中能加速器的国家。众所周知,大型加速器反映着一个国家的科学技术水平和工业能力。我国靠自力更生建成三大加速器并已达到国际水平这件事标志着我国的科学技术和工业加工的许多方面已达到或接近国际水平。在 80 年代,我国的低能加速器在工业、农业、医学和科学技术上的应用日趋广泛。某些低能加速器(如医用加速器)的制造开始走向系列化、商品化。这表明我国低能加速器的制造技术已日趋成熟。总之,在目前,除了高能质子加速器外,可以说我国加速器品种基本齐全,能区连续,有较好的工业基础,并有一支高水平的技术队伍。相信 90 年代我国加速器将会有更大的作为。

一、三大加速器工程

北京正负电子对撞机(BEPC)、兰州重离子加速器(HIRFL)和合肥国家同步辐射光源(HESYRL)为我国 80 年代建成的三个大型加速器。由于这三大加速器都是在 80 年代末先后安装调试成功的,90 年代的任务是进一步改进和提高机器性能、稳定运行,并做出物理成果。

1. 北京正负电子对撞机

北京正负电子对撞机自 1988 年 10 月实现对撞以来,工作在 J/ψ 能区,束流能量为 2×1.55 吉电子伏,亮度为 2×10^{30} 厘米⁻²秒⁻¹,能散为 0.64 兆电子伏,该能区亮度指标是美国 SPEAR II 的 4~5 倍,成为目前世界上粲粒子物理能区性能最佳的机

器。当 BEPC 工作在专用同步辐射模式时,束流强度为 100 毫安,发射度为 7.6×10^{-8} 米·弧度,接近目前世界上第二代同步辐射光源的水平。

根据 BEPC 的设计目标,要求工作在 $2 \times (1.6, 2.2, 2.8)$ 吉电子伏,亮度分别为 $(0.2, 0.7, 1.7) \times 10^{30}$ 厘米⁻²秒⁻¹,1994 年以后,再将亮度提高到 5×10^{31} 厘米⁻²秒⁻¹。

改进的措施包括:

(1)改善正电子注入器的性能,使注入器的正电子流强提高到 10 毫安(现为 6 毫安),能量 1.4~1.5 吉电子伏。

(2)提高速调管的输出功率,由目前的 17~20 兆瓦提高到 25~30 兆瓦;

(3)提高储存环高频系统在双腔工作状态下的稳定性;

(4)把整机的运行效率从 80% 提高到 90%;

(5)对提高亮度的 mini- β 方案和改进高频系统的方案进行研究。

BEPC 是一台高能物理与同步辐射应用的两用机,除了高能物理的研究任务外,还有同步辐射的应用。预计高能物理实验的任务将会在 5~10 年内完成,同步辐射的应用将会逐步扩大,并逐步向专用同步辐射光源过渡。在同步辐射应用方面将进行以下三项工作:

(1)研究兼用模式下的机器性能,并研制 Wiggler 和 Undulator 插入元件;

(2)扩建新的光束线;

(3)设计并建造第三代同步光源。

2. 兰州重离子加速器

兰州重离子加速器从 1976 年开始建造到 1988

年建成,历时 12 年。目前已正常运行,供束做实验了。

从基本设计参数看,HIRFL 已达到同类重离子加速器的国际水平,然而从目前的运行状态看,离国际水平尚有一定差距。90 年代,有下列几个问题须解决。

(1)提高运行水平 为了使 HIRFL 的运行达到国际水平,计划用三年时间完成下列工作:

——根据物理工作的需要,扩展加速离子的种类,能加速从 C(碳)到 Ta(钽)的任一能量的任何一种离子;

——积累运行经验,提高供束效率,实现长时间稳定运行,争取做到每个物理实验能不间断地一次取完数据;

——改善束流品质和时间特性,以更好地满足某些实验的要求;

——加强维修,消除设备薄弱环节,降低设备故障率,把故障停机时间减到最少。

(2)建设电子回旋共振(ECR)离子源 HIRFL 原设计使用 PIG 离子源,与主加速器串接,不能加速重于 Xe 的离子。为了发挥主加速器具有的加速全粒子的潜力,决定增设 80 年代后期发展成熟的 ECR 离子源,把加速的离子扩展到 Ta 附近。并且 ECR 源的投入使用还会大大提高束流稳定性和供束效率。这对 HIRFL 的运行达到国际水平具有极重要的作用。

(3)后加速系统设想 从物理上考虑,再建第二注入器来增加离子种类,不如续建后加速系统进一步提高离子能量和改善束流品质更有意义。这个后加速系统可以是超导回旋加速器,也可以是具有冷却和加速功能的储存环。这项工作还将进一步研究。

3. 合肥国家同步辐射光源

该光源在 80 年代末(1989)出光后,经过一年的初步调试,目前储存束流已超过 100 毫安(在能量 200 兆电子伏时)。现正继续进行机器的调试工作。90 年代首先要使机器能稳定运行,提供一个强度足够大,寿命足够长的稳定束流给同步辐射用户使用,以期做出出色的同步辐射实验研究成果。此外,为提高注入能量,改进光源性能,90 年代还计划执行合肥国家同步辐射实验室的第二期工程,包括:

(1)提高注入能量,并增建正电子源 利用直线加速器坑道已经预留的空间,将现存的 200 兆电子伏的直线加速器延长,使注入器的能量提高到 400 兆电子伏。这对提高储存束流,从而增加光源亮度将会起重要作用。

为避免离子俘获效应,增加束流寿命,国际上通常采用正电子注入。因此,一个正电子靶的设计

和制造也将被纳入第二期工程。

(2)插入元件 在第一期工程中已经列入,后因经费等原因缓建的三个插入元件 Undulator、常规 Wiggler 和超导 Wiggler,将在“八五”期间进行研制并投入使用。

(3)新的同步辐射实验线、站的建设 在现有五条光束线、五个实验站的基础上,拟在 90 年代再增建八条光束线、九个实验站,它们是:EXAFS 实验站、SXRF 实验站(与 EXAFS 共用一条光束线)、SRCT 实验站、光电子能谱第二实验站、高分辨光谱实验站、光热偏转与椭圆偏谱实验站、软 X 射线—真空紫外光谱辐射计量实验站、同步辐射化学(凝聚相)实验站、亚微米光刻第二实验站。

二、我国用于实验核物理方面的加速器发展之设想

80 年代,北京大学自行设计和建造的 4.5 兆伏静电加速器,上海核子所自己设计和建造的 2×6 兆伏串列静电加速器都将在 90 年代继续进行调试工作。上海复旦大学、北京大学、北京师范大学和原子能研究院分别从美国进口的 9SDH—2 型、5SDH—2 型、4117 型和 HI—13 型串列加速器在 80 年代都已经稳定运行,并已初步取得若干成果,90 年代将进一步改善机器的性能,使某些零部件国产化。上海核子研究所 6.8 兆电子伏回旋加速器改造成 30 兆电子伏的扇形聚焦回旋加速器的工作在 80 年代中期已经完成,并已为核物理研究和同位素生产做了大量工作。因为这是在一台已运行了二十几年的老加速器上改造成的加速器,设备陈旧老化已成为突出的问题,今后重要设备的更新已成为十分迫切的任务。上述加速器加上北京大学 2×6.5 兆伏的串列加速器、四川大学的 1.2 米回旋加速器、机械工业自动化研究所的 CS—30 型等时性回旋加速器、高能所的 35 兆电子伏质子直线加速器,都是分别用于原子核物理、同位素生产、表面物理、离子注入和加速器质谱仪等研究领域的,90 年代都将进入出成果阶段。

此外,原子能研究院打算建造一台中能质子强流加速器。90 年代先搞一些预研究工作,做一台能量 4~5 兆电子伏,流强为 20 毫安的注入器。具体方案尚未选定。

三、我国用于自由电子激光器方面的加速器的发展计划

自由电子激光器(Free Electron Laser)是电子

加速器发展或应用的重要方面,也是提高同步辐射光源性能的重要途径。80年代国内在这方面已经起步,已经得到一些阶段性成果。90年代,当国内已经有了若干台能量超过30兆电子伏的电子直线加速器和两个电子储存环后,自由电子激光的研究将会以更坚定的步伐向前迈进。参加这一行列的有工程

物理研究院、高能物理所、原子能研究院、北京大学、清华大学、上海原子核所、安徽光机所、中国科学技术大学等单位。所使用的加速器大抵有电子直线加速器、感应直线加速器和电子储存环等。

90年代用于自由电子激光研究的加速器的部分发展计划列于下表:

单位	加速器类型	能量 (兆电子伏)	流强 (安培)	微脉冲宽度 (每秒)	工作频率 (兆赫)	激光波长 (微米)
工程物理研究院	电子直线加速器	100	100~300	10~30	1300	1
原子能研究院	电子直线加速器	100	~100	<20	1300	1
上海原子核所	电子直线加速器	90	10	5		0.6~3
高能所 中国科技大学	电子直线加速器	30	10	5	2856	10

除上表所列的加速器外,中国科学技术大学还将利用现有的电子储存环进行自由电子激光器的研究。

此外,北京大学和清华大学将进行自由电子激光器有关部件和技术的研究,如电子注入器超导腔和混频加速腔的研究,高能电子束发射度的测量研究,高发射电流密度电子枪的研究等。上海光机所与高能所还将合作进行用于自由电子激光器的光学系统的研究。

四、低能医用加速器

我国医用加速器自70年代开始生产,80年代有了长足的进步,而90年代某些产品将系列化和商品化。

90年代,北京医疗器械研究所将研制实用的系列化驻波加速管:4兆伏、6兆伏全密封驻波加速管,12兆伏可拆密封驻波加速管,因此也将会推出相应的系列化的医用加速器产品。此外,带微波电子枪的驻波加速管和超高梯度加速管等新型加速管的研究也已列入计划。清华大学将同有关单位合作研制并推出新一代的轴耦合驻波电子直线加速器,能量为6,14,20兆电子伏。南京大学将研制一种由微电脑管理、功能新颖的20兆电子伏的双光子或三光子医用直线加速器,并投入商品化生产。基础研究方面,重点放在提高加速系统(包括行波、驻波加速结构)的加速管梯度和能量转换效率,同时对提高BBU阈值进行研究,以期加速梯度达到67兆伏/米。这样,仅30厘米的加速结构就可得到20兆电子伏的电子束。

五、小型工业用加速器

工业用加速器主要是指辐照加速器和探伤加速器。上海先锋电机厂在80年代研制成功的高频高压型电子加速器(GT-2)和中频倍加型电子加速器(ZJ-0.5)的基础上,90年代将进一步提高能量和流强。高频高压型电子加速器,能量从2兆电子伏提高到2.5兆电子伏,流强从10毫安提高到15毫安;中频倍加型加速器,能量从0.5兆电子伏提高到1兆电子伏,流强为30~50毫安。并致力于改进现有产品的某些零部件,提高产品质量,实现产品的商品化。中国科学院科辐公司也将研制这种高频高压型电子加速器用于电缆辐照。此外,先锋电机厂还将研制70年代后才发展起来的电子帘加速器。自80年代北京机械工业自动化研究所研制成功第一台DZL-200型电子帘辐照装置后,电子帘加速器已引起科技和工业界的重视。90年代,这种加速器在我国将会有较大的发展。

在工业探伤方面,清华大学与北京原子能研究院合作计划研究9兆电子伏驻波探伤用电子直线加速器,以及工作波长为3厘米的微型便携式可移动驻波探伤电子直线加速器。

六、强流脉冲加速器

我国70年代才开始研制强流脉冲加速器(也叫高功率粒子束加速器),至今已有20余台。90年代的主要任务是提高性能和开展应用研究。这类加速器主要是用Marx发生器储能的加速器,能量都小于10兆电子伏。

90年代,工程物理研究院建造两台直线感应加

速器,能量分别为 10 兆电子伏和 18~20 兆电子伏,流强分别为 3 千安和 2 千安,一台已于 1992 年建成,一台将于 1998~2000 年建成,主要用于 X 光照相之用。

七、加速器关键技术及关键部件的研究

加速器的关键部件如离子源、电子枪、加速管、高频腔等,关键技术如真空技术、磁场技术、微波技术、束流测量技术等对加速器的性能起着十分重要的作用。有时甚至一个部件或一项技术会成为一台加速器成败之关键。

90 年代,许多单位都有针对自己的加速器(已有的或将要建造的)开展有关部件或有关技术研究的计划。这里择其要者简述如下:

清华大学计划在 90 年代进行混频加速腔的研究,高温超导微波腔的研究,液态金属离子源的研究,低发射度电子枪及高发射电流密度的阴极材料的研究,高能电子束发射度的测量研究等。

南京大学将把精力集中在医用直线加速器的加速系统(包括行波和驻波加速结构)的研究上。首先是优化加速器结构和加速系统的设计;其次是利用谐振反馈,提高加速管的加速梯度,期望加速系统的能量转换效率达到 80% 以上。此外,还将发展辐照用电子直线加速器的微机控制及高效扫描技术。

北京大学已计划进行 L 波段低温超导腔的研究

和高温超导腔的试验。

八、其他

除上面介绍的传统的加速器外,还有两种近十年来才发展起来的加速器,一是紧凑型同步辐射光源,一是 REQ(射频四极矩)加速器。

由于同步辐射在超大规模集成电路中的巨大经济价值,近些年来,许多工业发达的国家如日本、德国、法国和英国等都在计划建造和正在建造紧凑型的小储存环以用于光刻。目前全世界至少有十台这种专用于超大规模集成电路光刻的小储存环正在建造,其中日本就有 8 台。在我国,清华大学在工业部门的支持配合下,也将在 90 年代研制一台紧凑的小型储存环,作为专用于超大规模集成电路光刻的同步辐射光源。

RFQ 加速器在 80 年代初试制成功后得到迅速的发展。在我国,80 年代初首先是高能所曾对四翼型 RFQ 的腔体及其动力学特性进行过研究。从 1984 年开始,北京大学对四杆型 RFQ 加速腔又进行了系统的研究。在国家自然科学基金的支持下,1987 年以后,北京大学对这种四杆型 RFQ 加速腔又作了进一步的理论和实验研究,并设计和加工了一个直径为 50 厘米,长度为 90 厘米的加速腔。这个腔将在今年加工、调试完毕,并进行高功率与载束特性的研究。90 年代将在这个基础上进一步研究兆电子伏量级的、用作高能重离子注入的 RFQ 加速器。

(责任编辑 刘先曙)

(上接第 36 页)

轻子质量的精确测定,已使我国跻身于国际高能物理的行列,在 1.5~2.5 吉电子伏的能区内占据了一席之地。我们首先应充分利用 BEPC 在该能区内的高亮度优势,继续在 $\tau/\bar{\tau}$ 物理和 D_s 物理等方面做出有水平的物理成果。同时,通过增用某些技术,如 Mini- β 、单对撞点、增加发射度以提高流强等,进一步提高 BEPC 的亮度,并提高探测器的性能,使 BEPC/BES 具有更强的科学生命力,进而向粒子工厂的方向发展。

其次,由于国力有限,我国不可能象欧美那样,在近十年内建造超级对撞机,但我们应该充分利用高能物理和对撞机的国际环境和改革开放的有利形势,主动积极进入国际合作的大潮流,参加国际上提议或建造中的对撞机和探测器的设计、部件研制和批量制造,并直接参加在这些对撞机上的高能物理实验。一方面使中国对世界高能物理事业的发展继续作出贡献;另一方面,又使我们始终跟着国际发展的大潮流,在世界先进水平行列中前进。事

实上,国际高能物理事业的发展需要中国的参与和合作;而中国的自身发展又需要国际合作的环境条件。

此外,我们还应该充分重视新加速原理的研究,它的成功必将导致加速器和对撞机的革命。我国不可能走对撞机越造越大的道路,因此更需要这样的变革,保持少数精干力量,借助国际合作的渠道,有选择地开展某些较有希望的新原理的研究。

最后,国际和国内的经验都表明,加速器、对撞机和探测器的建成,必将在某些领域内推进本国工业技术水平的提高。这些大型科学实验装置,综合了多门学科和多种高技术,包括超导技术、微波和高频技术、快电子学技术、自控技术、超高真空技术、计算机和数据处理技术、核探测技术、精密机械和高精度安装测量技术等。应当促使这些高技术成果走向工业和应用领域,为发展我国的国民经济作出贡献。

(责任编辑 刘先曙)