

我国低能加速器的发展

陈佳洱 赵渭江

(北京大学)

梁岫如

(中国科学院高能物理研究所)

为发展我国的基础学科研究而建造的几台大型加速器工程已相继完成,同时,各类具有广泛用处的小型低能加速器也得到了发展,这标志着我国加速器技术具有相当的水平。本文简要地回顾了我国低能加速器发展的历史,并介绍了几种典型的低能加速器的性能和有关技术的发展情况。

一、低能加速器发展概况

我国粒子加速器的发展始于 50 年代,核物理学家赵忠尧教授领导的小组在北京近代物理研究所研制成功第一台质子静电加速器^[1]。同期,引进苏联两台 25MeV 电子感应加速器和一台 1.2m 回旋加速器,分别在有关高等学校和科研单位投入运行。60 年代,在核科学基础研究和国防科研的推动下,主要在科研单位和高等学校先后研制成功高压倍加器、静电加速器、感应加速器和电子直线加速器等。其中以谢家麟教授领导的于 1964 年建成的 30MeV 电子直线加速器的能量为最高^[2]。在此期间,工业部门如原第一机械工业部电器院、上海先锋电机厂和保定变压器厂等单位设计和制造了回旋加速器、静电加速器、高压倍加器和电子感应加速器等。到 60 年代中期,国产低能加速器已有 50 余台,为以后的发展奠定了良好的基础。70 年代,国内开始了医用电子直线加速器的研制和生产,并投入临床应用,现在已有了小批量生产。为适应半导体工业的发展,有几个工厂和研究所研制成功离子注入机,已生产了几十台。80 年代以来,辐照加工和辐射技术的发展对粒子加速器的需要日渐迫切,机械电子工业部自动化研究所和上海先锋电机厂分别制造了绝缘芯变压器型加速器、电子帘加速器和中、高频高

压加速器。中国科学院科辐公司正在研制国内功率最大的高频高压加速器。在东北、北京、西南等地区,新兴的辐照加工中心以引进机器为主进行辐照加工生产。早期的静电加速器、高压倍压器和电子直线加速器中有一些已转向辐照技术的研究和生产。近几年引进了一批小型串列静电加速器,主要进行核技术分析。此外,还研制成功单级和串级的静电加速器、强流的高能的直线加速器。北京正负电子对撞机、兰州重离子扇形加速器、合肥同步辐射光源和 35 MeV 质子直线加速器都是 80 年代兴建的大、中型粒子加速器装置,它们代表着我国加速器技术的新水平。

图 1 是我国现有各类低能加速器的数量分布。从图 1 可以看出,数量最多的是离子注入

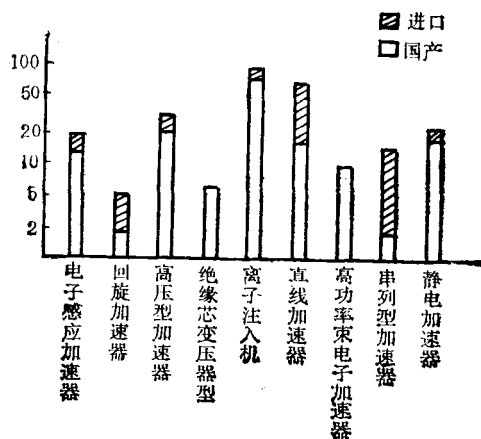


图 1 我国现有各类低能加速器的数量分布

机,它在一定程度上反映了微电子工业的发展。医用电子直线加速器数量增加很快,80%以上是近几年来由国外买进的¹⁾。由粒子加速器生产的医用短寿命同位素基本依赖进口。国内已有若干台机器可生产医用同位素,如机械电子工业部自动化研究所引进的美国 CS-30 等时性回旋加速器,中国科学院上海原子核研究所和四川大学经过改造的回旋加速器,和中国科学院高能物理研究所新建成的质子直线加速器,均可生产诸如 ^{67}Ga , ^{123}I , ^{201}Te 等同位素,如果能形成配套生产,则可满足需要。辐照加工工业是新兴的很有发展前途的工业,目前国内有二十几台电子加速器在电缆改性、辐照硫化、热缩材料、涂层固化及聚乙烯发泡等方面进行工作。辐照装置的束流总功率仅有 230kW,还没有形成真正的生产线,所需要的大量辐照产品如耐热、耐压电缆要靠进口。从以上几方面可以看出,实用小型加速器的生产是值得大力发展的。

我国低能加速器经历了近 40 年的发展,加速器品种齐全,设计、加工和建造的技术也有相当的水平。已有 300 多台低能加速器应用于半导体生产、材料加工、辐照改性、生物研究、肿瘤治疗、地质分析、考古以及广泛的基础研究中。它对科学技术发展和工业技术水平的提高所起的重要作用必将越来越受到重视。近年来几项大型加速器工程的建成充分说明国内在技术和加工力量方面有力量支持低能加速器的发展。下面简要介绍几种国产低能加速器的性能特点和发展情况。

二、离子注入机

离子注入机主要用于半导体工业和材料改性等方面。1976 年以来,北京、长沙、宝鸡等地生产了 200kV 的机器约 60 多台,400kV, 600kV 和 750kV 的机器约七台。表 1 是用于半导体工业的国产 200kV 离子注入机的主要指标。

表 1 国产 200kV 离子注入机主要指标

型 号	产 地	时间(年)	电压 (kV)	电流 (μA)	均 匀 性
J95-200/ZM	北京	1980	20-200	200	$<3\%$
J59200B/ZK	宝鸡	1981	30-200	120	$\leq 1.4\%$
LC-2B	长沙	1984	30-200	≥ 150	$<5\%$
ZLZ-200	北京	1985	30-200	250	$\leq 2\%$

这些机器在离子加速之前用 90° 双聚焦分析器对离子进行质量分析。典型的质量分辨率为 $M/\Delta M \geq 100$ 。为了扩大离子种类和提高离子束的亮度,研制单位对潘宁源、双等离子体源、弗利曼源以及微波离子源进行了研究改进。中国原子能科学研究院在弗利曼源放电室上下两端安装了钨制反射屏后,明显改善了电离效率。在 BF 放电中 B 的成分为 38.5%,总引出束流为 30mA,气耗为 3.5cc/mm,灯丝寿命大于 10 小时^[3]。北京大学发展了多种永磁微型离子源,典型的永磁边引出源具有电离效率高、功耗小的优点。在总束流为 1-2mA 时, N^+ 约占 60-70%, B^+ 约占 20-50%,并有较丰富的多电荷离子^[4]。中国科学院上海冶金研究所设

计建造的 C-600 注入机可加速质量为 1-210 AMU 的离子到 200-630kV。靶流为: $\text{Ar}^+ \cong 200\mu\text{A}$; $\text{P}^+ \cong 105\mu\text{A}$; $\text{Mg}^+ \cong 75\mu\text{A}$; $\text{Cd}^+ \cong 65\mu\text{A}$ 。高压离地面 7m,通过 40 路光导纤维在地电位对 820 型离子源等头部设备进行控制和测量^[5]。该机为先加速后分析方式,磁分析器的曲率半径为 1.2m,分辨率为 208。机械电子工业部某研究所于 1988 年底完成了 750kV 全离子注入机的研制,离子能量调节范围为 20-750kV,最大离子流为: $\text{B}^+ \geq 100\mu\text{A}$; $\text{P}^+ \geq 200\mu\text{A}$; $\text{As}^+ \geq 200\mu\text{A}$ 。

1) 梁岫如、赵渭江等,我国低能加速器发展决策研究,国家科委新技术局编,(1986),87。

三、高压型加速器

上海先锋电机厂于 60 年代生产了一批 JJ-2 型电子静电加速器,主要用于科研,近年来陆续开始应用于辐照加工.它的能量为 2MeV,流强为 200 μ A 扫描宽度为 40 cm,均匀度在 90% 以上.辐照加工工业从考虑经济效率出发,要求辐照装置的束流平均功率至少大于 5 kW.从 70 年代起,国内开始研制大功率低能加速器.机械电子工业部自动化研究所研制成

功绝缘芯变压器型加速器和自屏蔽电子帘加速器.上海先锋电机厂研制成功高频高压型加速器,均已投入生产^[6].中国科学院科辐公司于 1988 年开始组织力量研制更大功率的高频高压型加速器,计划在 1989 年建成电缆辐照生产线.中国原子能科学研究所和西南核物理和化学研究所等单位正在以形成辐照中心为目标,开发大功率电子加速器和辐照技术.预计今后几年内将有五台新建电子加速器投入运行,合计新增加的辐照功率约为 120 kW.表 2 是国内高压型电子加速器的参数.

表 2 国产高压型电子加速器参数

类 型	电压/电流 (MV/mA)	扫描宽度 (m)	扫描均匀度 (%)	研制单位
静电加速器	2—2.5/0.2	0.4	90	上海先锋电机厂
中、高频倍加器	0.5/40	1.0	85	上海先锋电机厂
	2.0/10	0.8	85	上海先锋电机厂
	2.5/30 (设计值)	1.0		中国科学院科辐公司
绝缘芯变压器型	0.3/30	1.0		机械电子工业部自动化研究所
	0.6/30—50	1.0		机械电子工业部自动化研究所
	1.5/10			机械电子工业部自动化研究所
电子帘型	0.15/30			机械电子工业部自动化研究所

表 3 国产强流电子束加速器性能

单 位	型 号	V(MV)	I(kA)	t(ns)	用 途
中国工程物理研究院	FL-1	6.8	75,100	85	闪光照相
	EPA-1	0.4,0.7	4	90	微波 FEL
	EPA-2	0.65	150	50	准分子激光
中国原子能科学研究所	NO.1	1.	80	80	准分子激光
	NO.2	0.7	150	40	与束物理
西北核技术研究所	NO.1	1.	30	25	多方面应用研究
	NO.2	0.9	900	70	

由于 1MV 以下辐照加工成本随束流功率的增加而迅速下降,因此国外辐照加速器的功率正在向 10²—10³ kW 水平推进,如美国生产了 4MV/50mA 的高频高压型加速器,日本研制的 5MV/60mA 加速器,苏联正在研制的功率为 3MV 的加速器.

强流脉冲电子束加速器主要用于闪光照相、惯性约束聚变研究以及强激光发生器等^[7].其主要性能见表 3.

在这些装置上已经得到了有意义的结果,例如利用 EPA-1 提供的 100A, 50ns 的脉冲电流在喇曼型自由电子激光实验中可使功率为

30W 频率为 34GHz 的信号放大到 1.4MW, 还将提高到 10MW.

四、重离子静电加速器

北京大学研制成功国内最大的 4.5MV 单级静电加速器^[8], 目前高压已提高到 3.8MV, 分析器前的束流强度为 $10\mu\text{A}$ 左右. 其特点是头部装有高效率的毫微秒束流脉冲化设备, 包括一个双谐波切割器和一个紧凑的双漂移谐波聚束器.^[9] 初步实验表明, 双谐波切割器束效率比普通切割器高 47%, 双漂移谐波聚束器的束效率比普通正弦波聚束器高 70%^[10].

国产串列静电加速器有两台. 中国科学院兰州近代物理研究所制造的 $2 \times 2\text{MV}$ 串列加速器于 1986 年建成投入运行^[11]. 它的端电压范围为 0.3—2MV (稳定度 $\leq \pm 1\text{kV}$), 经磁铁分析之后的质子束流强度为 1—3 μA , 束斑 $\phi \leq 3\text{mm}$. 它的感应输电系统采用金属梯链, 链的运行速度为 12m/s, 耐压为 2.06MV/m, 充电电流为 440mA. 加速管采用压力扩散焊接的钛-陶瓷结构, 有效长度为 1.15m, 加速管的漏气率为 $9 \times 10^{-9}\text{Torr} \cdot \text{l/s}$. 该加速器已投入运行, 用作离子束分析. 中国科学院上海原子核研究所正在研制的 $2 \times 6\text{MV}$ 串列加速器是国产静电加速器中能量最高的机器, 其输电系统和加速管结构与上述一台相类似, 现已完成加工、部件验收及安装, 正在进行调束准备工作.

我国早期生产的 2.5MV 静电加速器, 目前已在上海复旦大学和四川大学进行了改造, 提高了加速电压并获得了脉冲束.

中国原子能科学研究所和北京大学引进的 HI-13 和 EN-18 串列加速器将在核物理研究和核分析技术方面开展工作. 还有十几台引进的 $2 \times 1.7\text{MV}$ 和 $2 \times 3\text{MV}$ 小型串列加速器已投入运行, 主要用于核分析.

五、回旋加速器

60 年代引进的和国产的回旋加速器共四

台, 它们在 80 年代基本都进行了改造, 扩大了使用领域. 中国原子能科学研究所的一台已在服务三十年之后“退役”了; 中国科学院上海原子核研究所的一台于 1978 年改建成等时性回旋加速器, 将能量由 6.8MeV(p) 提高到了 30 MeV, 并在 10—30MeV 范围内可调. 他们根据实测电磁场的分布和经计算机优化得到的参数, 实行轨道束流规划, 使引出束的能散度由原来的 1.5% 降至 0.43—0.7%. 中国科学院兰州近代物理研究所的一台回旋加速器改造为分离扇重离子加速器的注入器.

清华大学和机械电子工业部自动化研究所共同研制的 DHJ-25 电子回旋加速器是 80 年代的产品, 可输出 5—27MeV 和 18mA 的电子束, 可供进行剂量研究之用. 引出束的能量散度小于 $\pm 1\%$, 束斑为 $2 \times 2\text{mm}^2$. 输出 25MeV 的 X 射线的剂量率为 400—1000R/min · m.

中国科学院兰州近代物理研究所新建成的分离扇型重离子加速器在国际上只有少数几台. 它由一台 $K = 69$ 的扇型回旋加速器 (SFC) 和一台 $K = 450$ 的分离扇回旋加速器 (SSC) 组成. 这台装置可使碳离子加速到 100 MeV/A, 使 Xe 离子加速到 5MeV/A, 流强为 10^{10} — 10^{12}pps , $\Delta E/E \sim 10^{-3}$. 注入器 (SFC) 于 1987 年调试出束, 引出了 C, O 等离子. 它的磁极上有三个螺旋形卷边扇形坛, 平均磁场 $B = 6$ —16KG, D 极上高频电压的峰值为 100 kV, 频率范围为 6—18MHz 可调. SFC 除作注入器外, 还独立地为核物理和核化学实验提供束流^[12]. 主加速器 SSC 有四个 52° 的独立扇形磁体, 总重量为 $4 \times 450\text{t}$, 最高磁场强度为 17kG, 极面有 36 对调补线圈, 可将平均半径上的磁场沿方位角的不均匀性减少至 1G, 径向平均场相对偏差在 2×10^{-3} — 5×10^{-4} 之内. 磁场按规定循环设置时重复性可达到 3×10^{-4} . 产生高频加速电场的两台“燕式”谐振腔是异型半波长结构, 由 D 形盒及波纹状调谐板等部件组成. 每台腔由一台 120kW 的高频机供电, 可产生 250kV 的加速电压, 工作频率范围为 65—14MHz. 加速器的真空室是一个形状十分复杂

的多面形结构,它把磁体的极芯,调补线圈、注入与引出元件以及加速腔体都安装在真空中。这个容积约 100m³、重 65t 的巨型真空室在安装之后,一次试抽真空成功,在抽真空 100 小时之后,真空度达 6×10^{-9} Torr,这是加速器建造中难度最大而又最成功的部件。这台加速器已于 1988 年 12 月 12 日出束,1989 年 1 月 24 日引出流强为 10 μ A,每核子能量为 50MeV 的碳离子束。

安装在机械电子工业部自动化研究所的 SC-30 回旋加速器是用作同位素生产的装置,是 1983 年由美国引进的,引进目的是生产短寿命同位素和仿制加速器,以满足国内需要。

六、直线加速器

国产直线加速器已有二十多台用于放射治疗、科研教学、辐照加工以及应用研究。表 4 给出了医疗用电子直线加速器的性能参数,其中 BJ-10 和 BJ-4 是北京医疗器械研究所生产的电子直线加速器,已分别有二台和六台用于临床。BJ-4 是他们近年来制造的一种结构紧凑

的轻便型装置,从电子枪到靶全长 38 cm,采用高梯度边耦合驻波腔加速电子,平均梯度为 14.5MeV/m,分路阻抗为 78M Ω /m,当馈送功率达 16MW 时,能产生 4MeV 的 X 射线,剂量率达 500R/m \cdot min;整个加速腔与电子枪束靶焊接在一起,形成全密封的结构,其特点是使用方便,寿命长,由于它占地面积小和无需大的机房而适宜于推广。NDZ-20 是南京大学设计的一台行波反馈式大型电子直线加速器,可提供两种能量的 X 射线和七种能量的电子线,可适应不同肿瘤及其在不同深度分布的治疗要求^[13]。由于采用了反馈式行波加速方式,使高频效率提高了 1.3 倍。该机采用双腔稳频系统和自动剂量均整、稳定系统等,保证长时间的工作稳定。近年来国外在反馈式行波加速器有较大发展,分路阻抗达到 50M Ω /m,加速场强提高到 50MV/m,最高可达 146MV/m。这表明行波反馈式直线加速器有着良好的发展前景。

中国科学院高能物理研究所研制成功一台能量为 35MeV 的质子直线加速器它可输出 70 mA 的质子束,可用于生产短寿命同位素和进行中子治癌的研究及其它物理目的的研究。这

表 4 国产医用电子直线加速器的性能参数

型 号	BJ-10		BJ-4	DZ-10		NDZ-20	
	X 射线	电子线	X 射线	X 射线	电子线	X 射线	电子线
能量 (MeV)	8	5,8,10	4	8	6,8,10	10,15	5,20
源皮距 (cm)	100	100	80	100	100	100	100
剂量 (R/m min)	350	500	500	500	100—500	300—500	300—1000
束斑点 (mm)			2		2		3,5
照射野 (cm \times cm)	24 \times 24	14 \times 14	22 \times 22	20 \times 20	12 \times 15		20 \times 20
均匀度 (%)	3	5	3	3	5	3	5
加速结构	行 波		驻波	行 波		行波反馈	
频率 (MHz)			2998	2998		2856	
馈送功率 (MW)			1.6	1.8		4.5	
全长 (m)			38	233.3		257.7	
运行台数	2		4—6	6		1	
研制单位	北京医疗器械研究所 清华大学			上海核子仪器厂 中国科学院高能物理研究所		南京大学等	

台加速器已于 1987 年调试成功并试制成同位素碳 11, 正式投入运行以后可提供同位素 ^{67}Gn 和 ^{201}Te 等. 当 35MeV 质子束轰击 Be 靶时可产生 20MeV 中子, 距靶 1m 处的剂量是 140R/min. 这台质子直线加速器由一个双等源、一台 750 keV 倍压器、聚束器、加速腔及输运线组成, 它是我国目前规模最大的质子直线加速器^[44].

北京正负电子对撞机和合肥同步辐射光源的注入器均是大型电子直线加速器, 其能量分别为 1.4GeV 和 200MeV. 这两台加速器的建成, 表明我国生产此类加速器的技术在主要方面已达到了世界水平. 中国科学院高能物理研究所还为开展自由电子激光研究重建了 30 MeV 电子直线加速器^[45], 要求机器性能为 $E=10-30\text{MeV}$, $I(\text{bbu})=300\text{mA}$, $\tau(\text{电子束})=4\mu\text{s}$, $\tau(\text{调制器})=5\mu\text{s}$, $\delta r/r=0.5\%$, $\delta f/f=10^{-6}-10^{-7}$. 中国原子能科学研究院也在为自由电子激光研究工作研制成功一台高亮度注入系统, 其方案是采用同轴平面型栅控电子枪, 加上二级 1/24 和 1/6 分频聚束系统, 电流脉冲峰值为 100A, 束流脉宽为 20ps, 能量散度 $< \pm 1\%$. 现已在电子枪上获得了 19A, 脉宽为 2.4ns, 能量为 80keV 的脉冲束^[46].

产生高强度束流的另一个途径是感应直线加速器. 由中国工程物理研究院设计制造的一台直线感应加速器由六个组元构成, 可加速 40 kA、脉宽 90ns 的电子束至 1.5MeV, 将用于自由电子激光研究.

射频四极透镜 (RFQ) 是离子直线加速器研究的新方向. 北京大学的研究组致力于低频重离子 RFQ 的研究^[47]. 他们发展了一种由整体型分离环激发的四杆型 RFQ 结构, 可在 14—90 MHz 的射频功率下工作. 模型测试结果为: 工作频率 $f=27.26\text{MHz}$, $Q=1190$, 横向和纵向的场分布符合要求^[48]. 进一步的计划是做成 RFQ 加速器, 以加速 C, Be, B, N, O 等离子至 300—500keV, 用于进行离子掺杂的研究, 也可用作 EN-18 串列加速器的注入器. 中国科学院高能物理研究所也在进行 RFQ 的研

究, 对质子 RFQ 的动力学参数和四扇形结构进行了计算, 并通过模型实验改善了四个扇极之间的耦合, 增加横向间隔和场分布的均等性.

近十年是我国粒子加速器事业兴旺发达、成绩卓著的十年. 在这期间, 全国建成了大、中、小约二十几台加速器, 其中有为基础研究而建造的大、中型加速器, 也有为各种用途而制造的小型加速器. 今后若干年内的一项重要任务是使已运行的加速器充分发挥作用, 在基础研究和应用研究中取得成果. 对数量更大的各类小加速器来说, 需要进一步提高运行可靠性和自动化操作程度, 以适应批量生产的要求来满足市场的需要. 目前在发展实用小型加速器方面存在的问题是没有统一归口领导和缺乏经费支持, 因此在短期内难以形成一定的生产能力, 当然也影响着应用技术的推广和开发. 对粒子加速器新原理和新技术 (尤其是对下一代加速器发展和应用有重要影响的新技术, 如超导加速技术、自由电子激光技术等) 的跟踪和开拓工作, 要给予足够的重视. 我国在加速器研制和生产方面已经有了一支较高水平的技术队伍, 有能力制造从低能到高能的各种加速器. 有了这个基础, 再加上有效的组织机构和相应的经费支持, 就可以使粒子加速器在我国科研和工业发展中的作用得到充分的发挥.

本文作者谨向谢家麟、孙祖训、汪达基、余觉先、曾乃工、王书鸿、王大明、张恩厚、顾本广、赖启基、陈茂柏、陶祖聪、陈树择、孙官清等同志衷心致谢, 感谢他们提供的信息和资料.

- [1] 叶铭汉, 物理学报, 19(1963), 60.
- [2] Xie Jialia, GSI-84-11 Proc., 1984 Linear Accelerator Conference, (1984), 14.
- [3] S. Cui and D. J. Wang, Preceedings The Third Japan China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications, JAPAN, (1987), 87.
- [4] Z. Z. Song, Vacuum, 136-11(1986), 12.
- [5] X. Y. Jiang, Proc. 4th National EIPB Conference NOV, (1986), 59.
- [6] 王宝发等, 核技术, 10—11(1987), 8.
- [7] Huang Sunren, Preceedings The Third Japan China

(下转第 592 页)