

# 带电粒子加速器的基本类型及其技术实现\*

陈思富, 黄子平, 石金水

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 现代粒子加速器的发展已有 100 年的历史。给出了粒子加速器主要类型的简单分类图表, 从粒子加速器发展过程中相关概念演变和加速器技术逻辑发展的角度, 概述了粒子加速器的基本类型、基本工作原理、相应的技术实现途径以及各类加速器的典型的技术特征。

**关键词:** 粒子加速器; 静电场; 时变电磁场; 单次加速; 累积加速

中图分类号: TL5

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190424

## Basic types and technological implementation of charged particle accelerators

Chen Sifu, Huang Ziping, Shi Jinshui

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** The modern particle accelerators have developed greatly over the last 100 years. This article provides an overview of all main types of particle accelerators. Simple charts are given to exhibit conceptual and technological evolutions of major particle accelerators. It also briefly introduces the basic types, fundamental principles, technological approaches, and typical technical features of various types of particle accelerators.

**Key words:** particle accelerator; electrostatic field; time-varying electromagnetic field; single-pass acceleration; repeated acceleration

带电粒子加速器, 通常简称为“粒子加速器”或“加速器”, 是通过电磁场将微观带电粒子限制在特定的区域(多数是真空区域)里并进行加速, 从而使之达到更高能量的特种电磁装置。使用这种装置可以产生各种能量的电子、质子、 $\alpha$  粒子以及其他一些重离子等带电粒子; 还可利用这些加速出来的带电粒子与物质(或粒子)相互作用, 产生多种带电的和不带电的次级粒子<sup>[1-5]</sup>。

粒子加速器的发展历史可以追溯到 1919 年, 当时, 英国物理学家卢瑟福利用天然放射源实现了历史上首次人工核反应, 激发了人们通过人为方法获得粒子种类可变、粒子流强大、易于控制的高能量粒子束的强烈愿望, 这被认为是现代意义上粒子加速器科学和技术的开端<sup>[2-3]</sup>。

综合作用强度和作用距离, 在人类所知的 4 种自然界基本作用力中, 电磁力是将微观粒子加速到更高能量最便于利用的一种力<sup>[4-6]</sup>。在一个世纪的历史演变中, 基于电磁力加速的带电粒子加速器经过不断创新发展, 谱写出了令人振奋的光辉篇章, 一部加速器发展史实际上就是一部科技创新史<sup>[3-4,7-8]</sup>。加速器的应用范围从最初的原子核、基本粒子及核能利用研究领域, 扩展到工业、农业、生物医学、地质采矿、材料科学以及国防军事科学等多种领域。加速器科学领域的许多成果也为人类今天的文明和高生活质量奠定了基础。对于当今社会而言, 假如没有粒子加速器技术, 那将是不可想象的。粒子加速器是一种复杂的高技术工程设备, 主要由粒子源、真空加速室、束流输运系统、导引聚焦系统 4 个基本部分构成, 此外通常还设有各种束流监测与诊断装置、电磁场的稳定控制装置、真空设备以及供电与操作设备等。建造高性能加速器涉及许多高精尖技术, 因此加速器的研发水平也成为衡量一个国家科学技术发展水平的重要标志之一<sup>[2-3]</sup>。

关于加速器, 有两点需要特别指出: (1) 由于粒子速度不能超过光速, 但能量增加不受限制, 因此准确地说, 加速器实际上是“增能器”, 其增加的能量通常指粒子的动能, 粒子加速器实际上是沿用了在其发明初期所取的名

\* 收稿日期: 2019-11-11; 修订日期: 2020-02-09

基金项目: 中国工程物理研究院流体物理研究所规划发展研究课题

作者简介: 陈思富(1971—), 博士, 研究员, 主要从事直线感应加速器物理及应用技术研究; csfcaep@163.com。

字;(2)加速器中被加速的不是单个微观粒子而是大量的、非整齐划一的“粒子集团”,电磁场除了要它们进行加速外,还必须保证在整个加速过程中“粒子集团”不散开。因此,粒子加速器中的“粒子”实际上是指大体沿某一特定方向(称为纵向)运动的能量差别不大的带电粒子流,常称之为粒子束或束流。在加速器研制中,正确揭示粒子束中粒子能量差异、位置分散的演化机制,提出合适的控制措施让束流有效稳定地沿中心轨道传输与聚焦,都是加速器束流动力学研究领域中极为重要的内容。

粒子加速器种类繁多,各种加速器在性能和技术上各有所长,能量范围不同、种类不同的粒子,它们既互相补充、相辅相成,又相互竞争、不断发展完善。世界上许多大型加速设备往往由多种不同类型的加速器串接组合而成。

加速器的研制和发展,需要综合考虑加速原理的正确性、技术实现的可行性、建造及运行的经济性,因此各类加速器的发展很不平衡。在人类研制的数十种粒子加速器中,有的已经被淘汰,有的还处在原理探索阶段,被广泛采用和定型的有十余种,其特点各不相同。

本文从粒子加速器发展过程中相关概念演变和加速器技术逻辑发展的角度出发<sup>[6]</sup>,以不同类型电场对带电粒子的加速作用、磁场对带电粒子的导向聚束作用为主线<sup>[3]</sup>,概述加速器基本类型中技术较为成熟的加速器的不断改进和创新过程,以期展示不同类型加速器之间共同的内在逻辑联系。

## 1 加速器的分类

可根据不同特征将加速器进行分类:根据加速粒子种类分类,有电子加速器、轻离子加速器、重离子加速器、微粒子团加速器等;根据中心粒子理想运动轨道形状分类,有直线型加速器,圆形加速器中的(近似)螺旋外转型加速器和环型加速器,非圆形循环型加速器等;根据加速电场种类分类,有高压静电场型加速器、时变电磁场型加速器等。此外,还可以根据聚焦方式强弱差异、加速粒子能量的高低范围、束流强度的大小、是否使用超导技术等方式进行分类,因此很难对所有加速器给出一种统一而明晰的分类。

如图1所示,为了便于了解加速器现状和未来发展的可能性,本文按照加速电场的类型将发展较为成熟的加速器分为以下两种基本类型:高压静电场型加速器和时变电磁场型加速器<sup>[9-10]</sup>。相应地,从加速获能的技术过程来看,高压静电场型加速器采用单次加速技术,也称电压降加速技术——在提供一个与基准电位(一般指地电位)有较高电位差的前提下,一次性获得较高能量;而时变电磁场型加速器采用累积加速技术——带电粒子通过多次较小电位差的累积获得更高的能量,系统与地电位之间无较高的电位差。

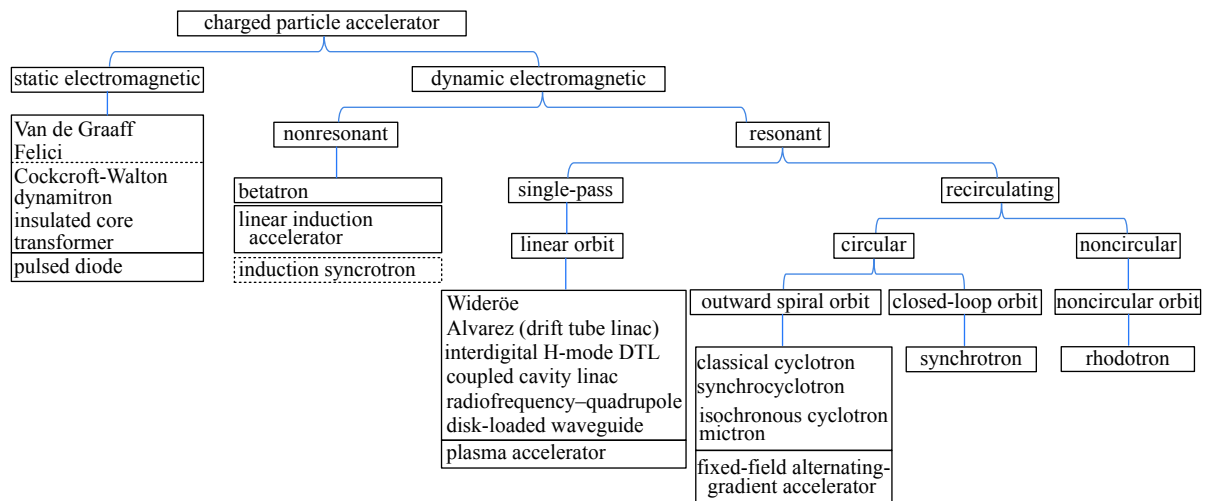


Fig. 1 Simple classification of charged particle accelerators(modified from Ref.[10])

图1 带电粒子加速器的简单分类<sup>[10]</sup>

## 2 高压静电场型加速器及单次加速技术

高压静电场型加速器,也称高压加速器,是指通过一个高压电源在真空加速管电极之间提供高压静电场来加速带电粒子的一类加速器,其原理如图2所示。高压加速器最为直观地利用了直流静电场加速带电粒子,是最基本的一类加速器。

如图2(a)所示,在加速粒子过程中,许多高压加速器的高压电极只被利用一次。如果能够让带电粒子改变电荷极性,就有可能得到更高的能量,为此人们设计了串列加速器,如图2(b)所示。在串列加速器中,高压电极具有

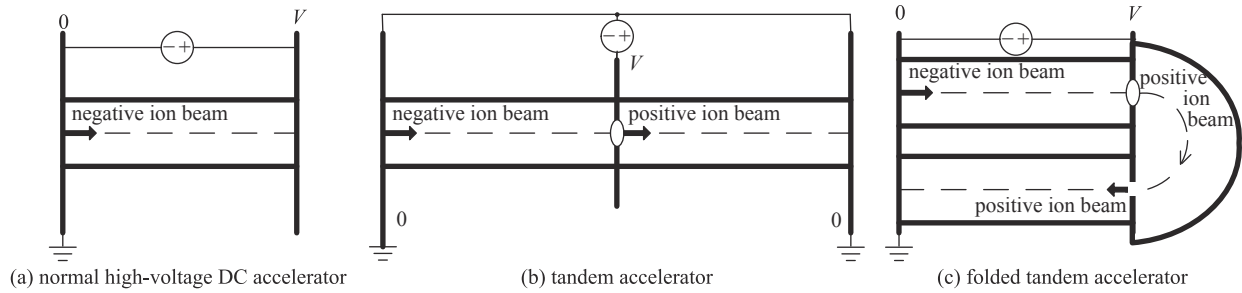


Fig. 2 Principle of the high-voltage DC accelerators

图2 高压静电场型加速器原理图

正电压,位于地电位的离子源产生负粒子,负离子被电场加速到高压电极,经电子剥离器后被剥除掉若干个电子而转变为正离子,正离子又再次在同一电源提供的正高压场的作用下加速到加速管的另一接地端。如果想要缩短加速器的长度,可以采用图2(c)所示的两个加速管“折叠式”放置的结构,即将已被剥离的正离子用 $180^\circ$ 偏转磁铁将其折回到另一个加速管中,随后加速到接地端。

根据高压电源类型的不同,可将高压加速器分为静电加速器、串激倍压加速器(Cockcroft-Walton型)、并激高频倍压(dynamitron型)加速器、绝缘芯变压器型加速器(ICT)、强脉冲二极管加速器(pulsed diode)等。其中,静电加速器通过机械方式传递电荷,又分为Van de Graaff静电加速器和Felici静电加速器<sup>[4]</sup>。其他高压加速器则是由不同种类的电路来产生高压的,能引出帘状电子束的辐照用电子帘加速器也属于高压型加速器。

高压加速器采用单次加速技术,其特点是高压源需要提供一个较高的电压给加速管,一般情况下,加速管的高压电极只被利用一次,带电粒子在真空加速管中被高压电场一次性加速。虽然串联静电加速器能够巧妙地利用离子电荷符号的改变对离子束进行有限的多次加速,但是这不具有普遍的多次累积加速意义。高压加速器的加速电压直接受高压技术限制(高压电源及加速管中的介质击穿),因此加速器的能量不高,一般不超过50 MeV。

高压加速器除了具有因高压技术限制导致的能量很难有效地进一步提高这一缺点外,还有一个缺点就是系统处于相应的高电压状态,存在高压隐患,感应电荷的存在也会对仪器的运行造成影响。

### 3 时变电磁场型加速器及累积加速技术

要进一步提高带电粒子的能量,一个很自然的想法是累积加速(甚至直接连续加速),即将 $N$ 个加速结构串联从而使带电粒子束获得 $N$ 倍的能量增量,或者是通过使带电粒子束的轨道弯转从而重复 $N$ 次通过同一加速结构获得 $N$ 倍的能量增量。上述技术手段对静电场来说是难以实现的。要有效地实现累积加速,需要利用时变电磁场。

#### 3.1 时变电场实现累积加速

##### 3.1.1 静电场实现累积加速的困境

如图3(a)所示,对于静电场来说,如将单独的电压源串联,后续电压源与基点电位(一般为地电位)之间存在高电位差。这样,与单独的高压电源一样,串联后的电压源(包括加速结构)由于耐受高压的限制,不可能达到很高的电压。

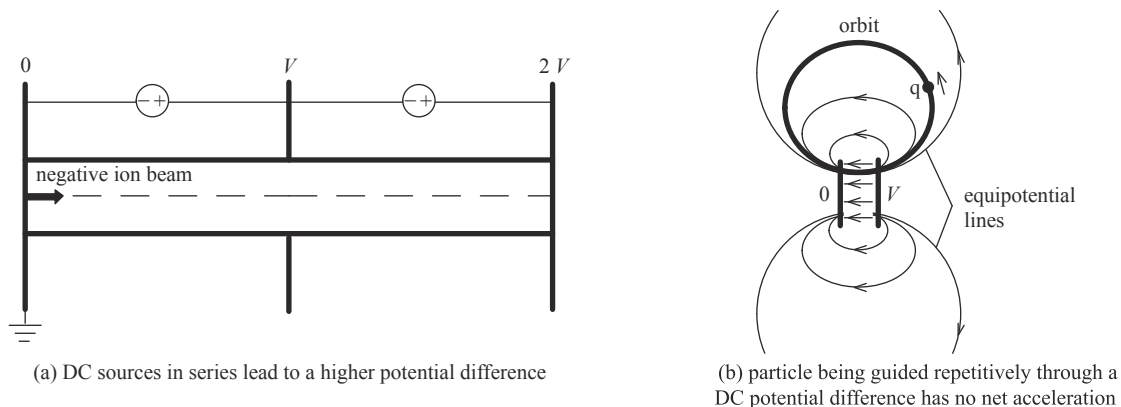


Fig. 3 Difficulties in accelerating repeatedly by electrostatic fields

图3 静电场难以实现累积加速示意图

如图3(b)所示,对于静电场来说,重复进入同一加速间隙进行累积加速也是行不通的<sup>[1]</sup>:带电粒子经过加速结构的直流电位差而得到加速后,尽管可以让其弯转(比如可利用静磁场将其偏转)而回到原来的位置而让其再次进行加速,但由于静电场存在于整个空间,有限长度的电极的边沿场将会使粒子在返回的过程中减速,粒子在回到最初加速位置时的净能量增益为零,根本达不到累积加速的目的(请注意对比图2(c)中等电位电极里的偏转情况)。

### 3.1.2 时变场实现累积加速的途径

想要实现带电粒子的累积加速,加速场必须是局域的时变电场<sup>[6,11]</sup>,可以采用的基本技术途径有:加速场与粒子同步(沿环形或直线)而连续累积加速(见图4(a))、通过众多相同(或相似)的加速结构(见图4(b))以及重复通过同一加速结构(见图4(c))而间断累积加速。

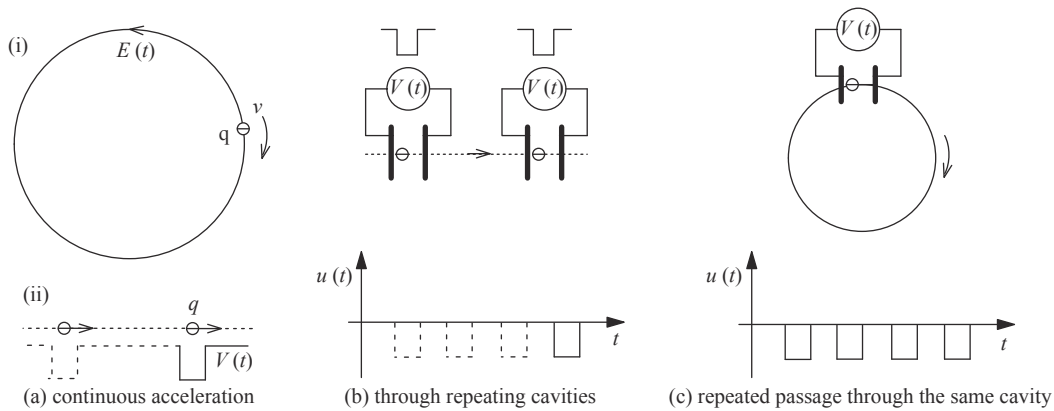


Fig. 4 Repeated acceleration with time-varying electromagnetic fields

图4 利用时变场实现累积加速

利用时变场来进行累积加速时可以做到在加速结构无电位累加的情况下将带电粒子多次低电压加速以获得更高能量,其技术实现有三个关键点:一是产生合适的局域时变场;二是有效控制粒子与加速场同步,存在减速场时还需利用时间差控制粒子以便有效避开减速场;三是合适的聚焦聚束机制。为此,无明显加速电极的加速结构(电子感应环形加速室)、内部提供时变场而外部无电位累加的两种基本加速结构(谐振腔和感应腔)得到了发展<sup>[6]</sup>。由于采用了时变场加速,束流只能以分离的束团形式被加速。

按照时变电磁场的加速电场不同又可以将时变电磁场加速器分为非共振型(脉冲电压)和共振型(交变电压)加速器两类。

## 3.2 非共振型时变电磁场加速器

### 3.2.1 回旋式电子感应加速器(Betatron)<sup>[2-3]</sup>

类似于变压器,将带电粒子作为变压器的次级来进行加速是一种很自然的想法,回旋式电子感应加速器正是依据电磁感应原理,通过随时间变化的磁通量所产生的涡旋电场来连续加速电子( $\beta$ 粒子)的一种加速器,又称Betatron(人们最早研究这类加速器时就称之为“射线变压器”<sup>[7]</sup>)。由于质子等较重的粒子对磁通变化量的利用效率太低,故Betatron不适于加速质子等较重的粒子。回旋式电子感应加速器使用环形真空加速室,没有大多数加速器中常见的加速电极或加速腔(见图5)。

在Betatron加速器中,通常采用随时间变化的轴对称磁场,轨道所包围的中心磁通随时间增强而产生用于加速的涡旋电场,涡旋电场的电力线是封闭圆;用于使电子偏转的轨道上磁场(主导磁场)的磁感应强度也随时间增加,以使电子的轨道半径也为一个封闭圆。在中心加速磁通的平均磁感应强度和轨道上主导磁场的磁感应强度满足2:1及磁场分布满足横向(径向和轴向)稳定性条件下,电子可在恒定不变的圆形平衡轨道上循环连续地获得加速(一般每转一圈可获得几十eV的能量),经过多次的积累能得到较高的能量。

一般的电子感应加速器中产生涡旋电场的中心加速磁通与控制轨道的轨道磁场共用一块磁极,并由同一绕组

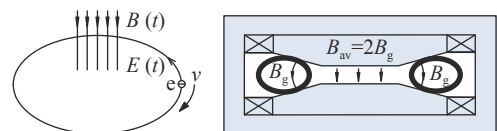


Fig. 5 Principle of the betatron and a schematic of the annular vacuum chamber

图5 Betatron 加速原理及环形真空室示意图



激励,由交流电源供电,轴向主导磁场和加速磁场均随时间作正弦变化,利用磁场由零变到峰值的  $1/4$  周期进行加速,引出的电子束是脉冲的,脉冲重复频率与励磁电源的频率相同,一般为  $50\sim 200$  Hz,脉冲宽度决定于加载偏移线圈上脉冲电流的形状。通过改变引出时间,可以灵活地调节最终加速能量。由于电子加速运动导致辐射损失等方面的限制,电子感应加速器的能量上限约  $500$  MeV,但涡旋电场需求的磁体尺寸随能量明显增大,从经济性方面的角度来看,其最佳能量范围为  $15\sim 35$  MeV。一般情况下, Betatron 的平均流强为  $\mu\text{A}$  量级,脉冲流强几十  $\mu\text{A}$ 。

普通电子感应加速器结构简单、结实耐用、价格便宜。俄罗斯托木斯克理工大学可系统生产小型电子感应加速器用于医学和无损检测等领域,基于能量为几 MeV 的 MIB 系列电子感应加速器开发的小型轻便的 X 射线源,适用于海关货物等的检查<sup>[12]</sup>。苏联实验物理研究所开发了 BIM 系列强流无铁芯电子感应加速器,用于闪光照相。最大的 BIM-M 装置,束流达  $280$  A,能量达  $70$  MeV,可用于三脉冲闪光 X 射线照相<sup>[13]</sup>。高平均流强的 Betatron 也在发展中,以期能够增加流强并减小磁铁的涡流损耗<sup>[14]</sup>。另外,在 Betatron 的发展过程中,提出了 Betatron 的横向振荡(自由振荡或 Betatron 振荡)理论,解决了带电粒子在加速过程中的稳定性问题。该理论适用于各种类型常梯度磁场聚焦的加速器,因此在加速器的发展史上,电子感应加速器的进步对加速器的发展起到了重要的作用<sup>[2]</sup>。

### 3.2.2 直线感应加速器(LIA)

依循图 4(b)的通过众多相似加速结构的思路, G. Ising 提出了脉冲电压加速方案,它是将方波脉冲用不同长度的延时线传输到合适的加速结构(如一串圆筒电极,称为漂移管),从而在各个间隙间逐级建立合适的加速场,实现外部电位不累积而能量逐级累积(见图 6)。采用这种方案,需要精确的方波脉冲时序控制技术,并且每级加速结构需要随着粒子速度的增加而相应地越来越长<sup>[7,15]</sup>。

作为 Ising 方波累积加速的现代版,直线感应加速技术提供了另外一种技术途径,该技术通过使用感应加速腔结构实现间隙内部提供时变场而外部无电位累加。对于带磁芯的感应腔(见图 7),这是通过装载在环形不锈钢腔中磁芯的感应隔离实现的:所有相同的加速腔的外壳接地,由脉冲发生器产生的大电流高压脉冲(一般为方波)馈入到感应腔间隙处,形成两个回路,其中一路环绕磁芯形成高阻回路以防高压源短路,另一路直接加在加速间隙上。在脉冲期间如果磁芯不饱和并成为高阻抗部件,由精确控制时序的脉冲发生器产生的脉冲电压在加速间隙处就得以维持并用于加速带电粒子。由于所有加速腔的金属外壳始终处于地电位,因此多个腔可连接在一起,不存在电压源的电位叠加升高问题;在加速间隙外的束流管道区域,电场被金属管道屏蔽,束流不会被减速,这就实现了带电粒子的多级累积加速。装载在加速腔中的螺线管线圈产生的磁场用来约束束流的径向扩散。

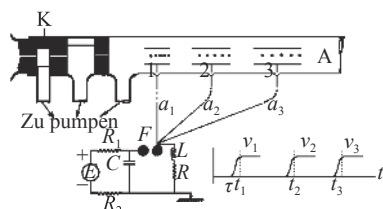


Fig. 6 Diagram of the principle of multiple acceleration from professor G. Ising's pioneer publication(1924)

图 6 Ising 方波累积加速原理示意图

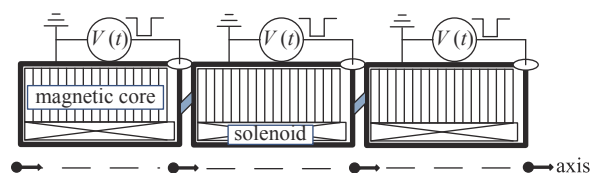


Fig. 7 Principle of the linear induction accelerator

图 7 直线感应加速器加速原理示意图

感应腔属于低  $Q$  值加速腔,适合加速强流束(电子束流强可达  $\text{kA}$  量级)。感应腔的脉冲发生器系统一般采用高功率脉冲技术领域的 Marx-Blumlein 技术来产生高功率单脉冲方波(电流几  $\text{kA}$ ,电压几百  $\text{kV}$ )。尽管理论上通过增加加速腔数量可以不受限制地提高被加速电子束的能量,但造价一般与其能量成正比。根据应用需求(如为流体动力学研究提供精密闪光 X 射线照相手段),直线感应电子加速器的能量一般不超过  $20$  MeV。

直线感应加速器的平均加速梯度较低,约为  $0.5$  MV/m。为了提高直线感应加速器的加速梯度,避免使用价格昂贵的磁性材料,人们曾经也设计研究了无磁芯的径向线感应加速器,但是总体说来未达到期望。直线感应加速器最主要的应用领域是闪光 X 射线照相,即电子束打靶产生脉冲 X 射线;在重离子惯性约束聚变、高功率微波等领域也有应用,但发展较为缓慢<sup>[9-10,16-17]</sup>。

一般的直线感应加速器都是单脉冲运行,但人们也在追求直线感应加速器的多脉冲运行。近年来,以中国已

建成的强流猝发三脉冲直线感应加速器为代表, 猝发多脉冲直线感应加速器正在迅速发展<sup>[18-21]</sup>。另外, 由于固态脉冲调制器技术的发展, 使得研制在高重复频率下连续运行的脉冲感应加速组元成为可能, 比如环形加速器的射频加速单元替换为高重复频率连续运行的脉冲感应加速组元后, 将具备新的性能特点和应用领域, 日本高能加速器研究机构(KEK)在这方面开展了大量的研究和实验工作(如 induction synchrotron 等)<sup>[22]</sup>; 国内也有将感应加速应用于 FFAG 加速器的研究<sup>[23]</sup>。

需要指出的是, 直线感应加速器是否属于电磁感应型加速器是存在争议的。一般认为直线感应加速器是直线型的磁感应加速器, 初级的脉冲发生器经由一个单匝绕组对磁芯进行激励产生涡旋电场并在开路的次级绕组两端产生电压, 电子束作为变压器的次级绕组完成次级回路的闭合并得到能量。但是也有人认为直线感应加速器中的加速场是由脉冲发生器直接提供在加速间隙(类似于电容器极板)的准静电场<sup>[24]</sup>, 磁芯的感应场只是用于抵消围绕磁芯的回路中的静电场, 使得脉冲发生器高压端虽通过加速腔的不锈钢壳体直接与地相连而不短路, 磁芯限制了漏电流而主要起感应隔离的作用<sup>[25-26]</sup>。我们也持这一观点, 认为直线感应加速器是感应隔离加速器, 属于准静电加速器, 而不是通常意义上利用磁芯产生的涡旋感应场进行加速的直线型磁感应加速器。

### 3.3 共振型时变电磁场加速器

共振型时变电磁场加速器利用交变电磁场对带电粒子进行多次共振加速。因传统交变电磁场的工作频率一般为 0.1 至几十 GHz(可分为 L, S, X, W 等波段), 因此也常称之为射频加速器; 新型的等离子体加速器频率已达 THz 量级<sup>[27]</sup>。共振型时变电磁场加速器有以下特点: (1)用交变电场进行加速, 交变电场存在加速相位和减速相位(参见图 8); (2)采取特殊的结构设计使粒子的周期性运动与加速电场的周期性变化保持同步, 使中心粒子始终处于加速相位, 进行共振加速。绝大多数情况还需对某个(些)参量采取一定形式的调变, 以使中心粒子(称为同步粒子)满足共振条件, 相位(称为平衡相位)保持不变; 与此同时, 一定范围内的非同步粒子, 基于自动的能量调节机制, 遵循自动稳相原理, 最终达到与同步粒子相当的能量(参见图 8); (以直线加速为例)假设一定范围内的粒子初始能量一致, 与同步粒子相比, 先行的粒子在经过某加速场区时因获能较小而需较长时间到达下一加速场区, 后行的粒子因获能较大而需较短时间, 即非同步粒子逐渐向同步粒子靠拢, 其加速相位将围绕同步粒子的平衡相位来回摆动, 从而得以围绕同步粒子“平均”地得到加速, 粒子运动的纵向稳定性也就得到了保证。

共振型时变电磁场加速器是目前应用最广泛的一类加速器, 按照加速方式可将其分为驻波型加速器和行波型加速器两类, 按照中心粒子理想运动轨道又可细分为直线型、螺旋外转式轨道型、环型、非圆形循环型加速器。

#### 3.3.1 直线型共振时变电磁场加速器

是利用交变电磁场沿直线轨道将带电粒子加速到更高能量的装置, 一般称为(射频)直线加速器(LINAC), 它的快速发展与高频、微波技术的发展及自动稳相原理的发现分不开。

##### 3.3.1.1 传统射频加速结构

直线加速器采用驻波与行波两种加速结构对带电粒子进行加速, 可以粗略地认为: 在使用驻波结构进行加速时, 加速场已提前建立, 加速场不沿粒子前进方向推进, 场的空间分布不变, 只随时间变化; 在使用行波结构进行加速时, 加速电场需要不断向前推进并与粒子同步。尽管行波加速结构和驻波加速结构在结构和性能上有很大差异, 但从分析的角度来说, 由于驻波电磁场可以分解为行波电磁场的迭加, 驻波场完全可以用行波场的观点来分析。

##### (1) 驻波加速结构

受到 Ising 方案(图 6)的启发, 挪威的 R. Widerøe 不使用方波源而使用容易获得的交流电压源, 首先实现了使粒子沿直线多次通过一个不大的加速电位差逐步累积能量的实际装置, 该装置的工作原理如图 9 所示。由玻璃封装的加速器的加速电极由一串圆筒电极(称为漂移管)组成, 它们的奇数、偶数电极分别同一射频电源的两个输出

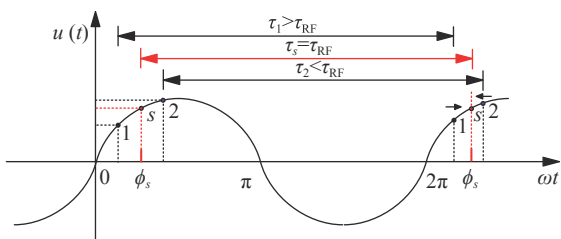


Fig. 8 Alternating voltage and principle of phase stability

图 8 交变电压及自动稳相原理示意图

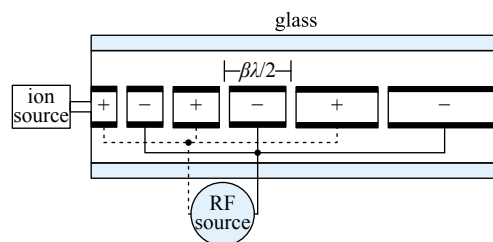


Fig. 9 A schematic of the Widerøe linac structure<sup>[28]</sup>

图 9 Widerøe 型驻波直线加速器结构和原理示意图<sup>[28]</sup>

端相连。当粒子通过缝隙电场的加速后进入合适长度的漂移管内(无场区)时刚好实现电场方向的转换,使粒子每次到达下一加速缝口时,缝隙电场刚好是加速电场,由此实现了共振加速。由于粒子速度不断增加,为了维持共振条件,要求漂移管的长度越来越长。Widerøe 型加速结构是工作在低频范围( $<100\text{ MHz}$ )的一种重要的直线加速结构,工作在 $\pi$ 模式(相邻加速单元的高频相移为 $\pi$ )。

对于 Widerøe 型加速结构,当提高场的频率时,每个漂移管可以相应缩短。但在高频率(几百 MHz 到 GHz)时,这种开放式的漂移管结构的效率变得越来越低,此时,加速器的径向尺度可以和波长比拟,故可将加速器做成高频谐振腔的形式,在内部激发可适于粒子加速的合适的驻波电磁场。高频谐振腔可看成是将波导(参见后文)在电磁波传播方向上的两端用导体封闭后的结构,其中的驻波电磁场则为行波电磁场反射迭加后形成。图 10 表示在光滑圆柱形空腔(又称为 Pillbox 腔)中激励  $\text{TM}_{010}$  型驻波的情形<sup>[29]</sup>。光滑圆柱形谐振腔中最低模式行波的相速度都大于光速,且驻波场随时在变,不能直接用于粒子的有效加速,需要在谐振腔结构上采取措施(比如周期性地加装一些金属结构)减慢相速成为慢波系统并使加速场与粒子同步。

L. Alvarez 开发了带漂移管的谐振腔加速结构(见图 11):将 Widerøe 结构中的玻璃外壳改为金属导体(一般为铜)并用金属杆支撑漂移管以形成有确定固有频率的分布参数的谐振腔链结构,在腔内建立驻波加速电场;合适长度及直径的漂移管使粒子总是在通过漂移管间隙时获得加速,而在电场改变方向时粒子恰好进入漂移管中受到屏蔽作用。这种 Alvarez 谐振腔型驻波直线加速器结构又称漂移管直线加速器(DTL)结构,是最早出现的一种现代直线加速结构,其工作模式为 0 模,常用于低能粒子或重离子的加速。现代加速器的设计追求更高的加速效率,将已从普通 DTL 进行初步加速后、但不利于采用耦合腔(CCL)加速结构的能区采用一种改进后的 DTL 加速结构,常用的有 SDTL(分离型 DTL)和 CCDTL(腔耦合 DTL)<sup>[30]</sup>。

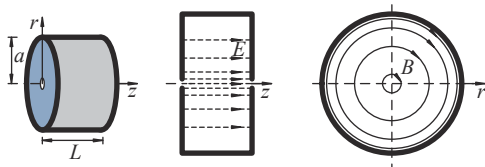


Fig. 10 A pillbox cavity and the  $\text{TM}_{010}$  mode electric and magnetic fields in it<sup>[29]</sup>

图 10 圆柱形空腔中激励  $\text{TM}_{010}$  型驻波<sup>[29]</sup>

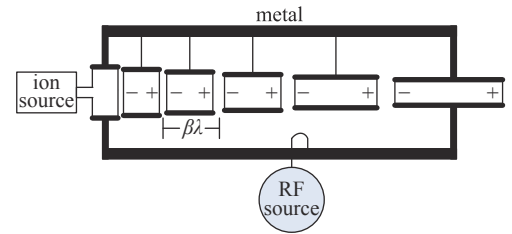


Fig. 11 A schematic of the Alvarez drift-tube linac structure<sup>[9]</sup>

图 11 Alvarez 型驻波直线加速器结构和原理示意图<sup>[9]</sup>

IH-DTL(Interdigital H-mode DTL)是另一种驻波加速结构(如图 12 所示),其特点是在圆柱腔轴线上排列的一串漂移管分别通过直杆交叉固定在腔的两个对边上,腔内有纵向高频磁场(近似于  $\text{H}_{110}$  模),因此称为 IH-DTL。由于漂移管的引入,近轴线间隙附近产生了纵向电场,工作时,相邻的漂移管处在相位相反的高电位,离子由一个间隙到下一个间隙时正好经历半个高频周期,因而处于不断的加速状态。IH-DTL 工作在 $\pi$ 模式,主要加速离子。该结构的优点是加速间隙多、加速效率很高(比分路阻抗很高),但对加速离子的种类和加速能量范围的适应性很差,并且在漂移管中需装进径向聚焦元件以取得离子径向运动的稳定性。对于加速一定能量的离子来说, IH 型谐振腔仍是一种取得较高能量增益的合适加速腔,多工作在  $100\sim 150\text{ MHz}$ 附近的频率范围用作后加速器,是现在常用的加速结构之一<sup>[31-32]</sup>。

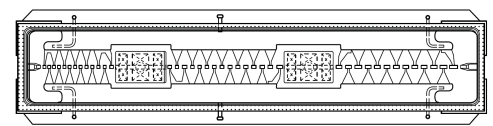


Fig. 12 A schematic of the interdigital H-mode DTL<sup>[31]</sup>

图 12 IH-DTL 结构示意图<sup>[31]</sup>

上述结构是非均匀单周期(串联谐振腔具有单一的谐振频率)驻波加速结构。当粒子速度近光速时,可采用均匀单周期结构,如均匀盘荷波导。为了提高加速效率和工作稳定性,后期又发展了双周期耦合腔(CCL)结构,如轴耦合、边耦合、环耦合等<sup>[2-3]</sup>,如图 13 所示。

此外,还开发了一种利用高频四极电场同时实现横向聚焦及纵向聚束与加速的新型的高频四极场(RFQ)驻波加速结构。RFQ 可以看成是由静电四级透镜演变而来:静电四级透镜仅有聚焦作用,将其电极表面作波浪形调制,可产生纵向电场;用射频电场代替静电场,可实现连续的同步加速。传统的四翼型 RFQ 结构如图 14 所示,工作在  $\text{H}_{210}$  模式。采用 4 个带调制的电极分布在中心四周,电位极性相同的相对的电极形状也相同,相邻的电极调制错开半个周期,使得电场具有横向分量和纵向分量,分别用于约束和加速。如果电极在开始阶段变化缓慢,而后



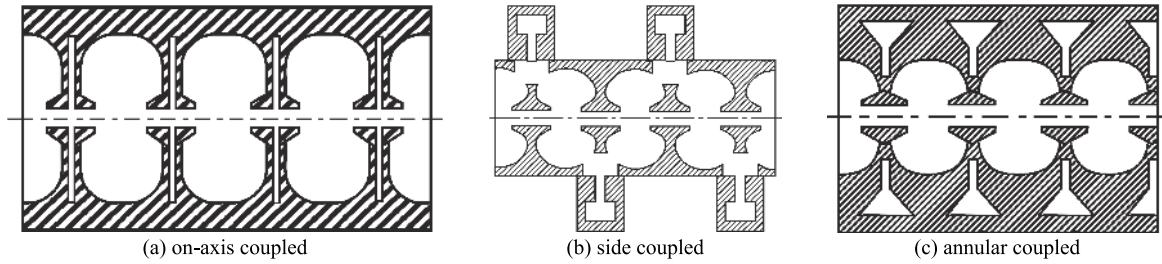


Fig. 13 Standing wave coupled cavity structures

图 13 三种不同耦合方式的驻波耦合腔结构剖视图

逐渐增加,则在横向聚焦的同时,可以提供较小的加速电场,实现对束流的准绝热俘获,俘获效率可达 90% 以上<sup>[30]</sup>。RFQ 加速器是一种强流、高效率、束流品质好、结构紧凑、使用方便的低能直线加速器,适合于加速低速离子,现已成为紧接粒子源后取代高压倍加器的最重要的低能离子加速器和注入器。除了传统的四翼型结构外,人们又在原有基础上发展了叶耦合环和四杆型等结构<sup>[2]</sup>。

### (2) 行波加速结构

依循直流(或方波)思路,尝试让类似于图 2(a)的宏观加速结构以与粒子相同的速度直线前进,粒子一直处于加速间隙中,从而达到连续累积加速,如图 15 所示。对于这种宏观的加速结构,若用机械方法去推动其达到很高的速度,实现起来较为困难。另外的想法是,通过图 6 中介绍的有延迟作用的传输线将脉冲电压先后加在漂移管上,或者用运动的小车把加速粒子所需的电压依次加在加速电极上,这些方案都需要漂移管越来越长,电压加载方式也很原始。如果粒子束的速度很高(接近光速),这种加速方式的效率则太低。

考虑自由空间的电磁波具有一定形态的电场,且以光速传播,但是其电场是横向的而且是随时间变化的,不能在传播方向充分地加速带电粒子。总的说来,需要寻找有效的加速结构,它有纵向电场分量的某种形态的电场,且电场能以与光速比拟的速度向前运动。研究发现,沿均匀圆波导传播的电磁场在传播时可以有多种空间模式,尤其是基模  $TM_{010}$  在轴上的电场具有最大值。但由于均匀波导中的相速大于真空中的光速,因此不能直接用于加速粒子。

为了能够实现纵向加速粒子,需要降低波导中波的相速,只有相速与带电粒子速度同步的谐波才能对带电粒子进行连续累积加速。最成功地用于行波直线加速器、结构也较为简单的慢波系统是圆型盘荷波导系统。这是一种在光滑的圆波导内周期性地放置带圆孔的金属圆盘膜片的慢波结构,又分为等阻抗和等梯度两种结构,如图 16 所示。

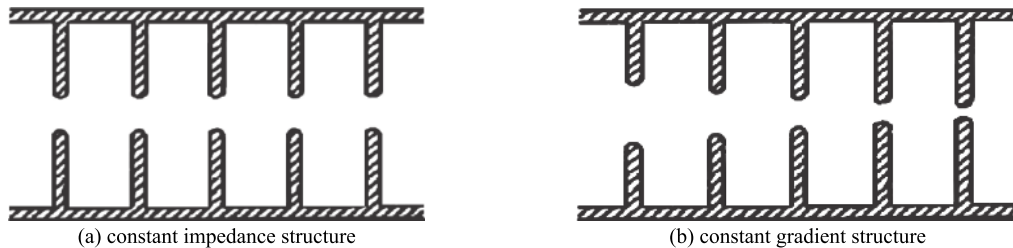


Fig. 16 Disk-loaded waveguide structures

图 16 盘荷波导结构示意图

### 3.3.1.2 传统射频直线加速器

传统射频直线加速器采用了上述基本加速结构和加速方式来对带电粒子进行加速。因被加速粒子速度(能量)的不同,所采用的加速方式和加速结构有所不同<sup>[33]</sup>。

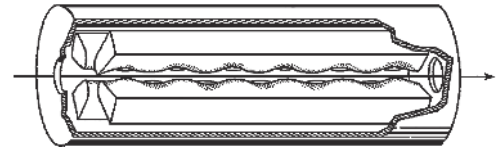


Fig. 14 A schematic of a four-vane RFQ structure

图 14 四翼型 RFQ 加速腔结构

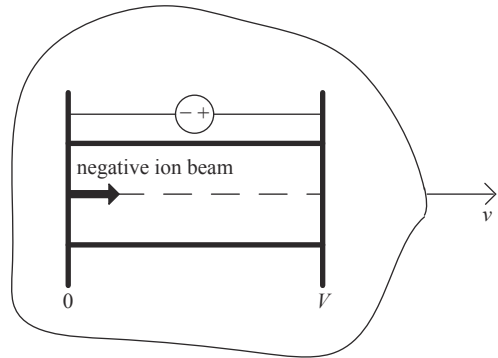


Fig. 15 Intuitive model of traveling wave acceleration

图 15 行波直线共振结构直观模型



(1)超相对论能区( $\beta$ 接近1)、短脉冲结构适于使用行波加速。行波的优点是束流随电场峰值一起运动,加速效率高,但RF功率利用率不高。高 $\beta$ ( $\beta \geq 0.8$ )结构一般采用盘荷波导加速结构、行波加速方式。

(2)其余情况适于采用驻波加速。受渡越时间因子的影响,驻波加速效率较低,但可以加速长脉冲和连续波(CW)的束流。中 $\beta$ ( $0.3 \leq \beta \leq 0.8$ )结构一般采用边耦合(轴耦合)加速结构,低( $\beta \leq 0.3$ )结构,一般采用 Wideröe, Alvarez, RFQ 和 IH 等结构。

目前通常的做法是在不同的 $\beta$ 区域,采用不同的加速结构来加速,以保持在不同 $\beta$ 区域都有较高的加速效率。

直线加速器具有很多优点:如束流的注入和引出系统相对简单,效率高,可以提供高流强的束流;易于对束流进行横向聚焦和纵向聚束,提供高品质的束流;可提供占空比可调的脉冲束流;粒子束直线运动,辐射损失极微弱,可以忽略不计;能够逐段进行设计、安装和调整及分期建造,逐节加长,逐步提高最终加速能量,灵活性较大,其加速能量可以从较低能量(keV量级)到很高能量(GeV甚至TeV)。但是其加速结构高频损耗大,高频设备(如磁控管、速调管等)费用昂贵,单位束流功率的制造安装和运行费用昂贵,这一直是限制其发挥作用的重要原因。

随着射频超导技术的发展,射频超导直线加速器也得到了迅速的发展。超导射频加速腔极大地降低了射频损耗,不仅节省大量电能和设备费用,而且还可由此带来射频加速器的一系列优越的特性,如可以CW运行、加速腔由于较少受到射频功耗的限制而可以得到更好的优化等,这不仅使束流强度大幅提高,而且束流品质和稳定性也得到很大改善。

目前,射频直线加速结构是从低能到高能加速器装置中常用的方案。射频直线加速结构,从S波段、C波段到X波段,工作波长越来越短,稳定运行时的加速梯度一般也越来越高,为几十MV/m量级<sup>[34-35]</sup>。想要提高加速梯度,可以在加速能量一定的情况下有效缩短加速结构长度,或者在加速结构长度一定的情况下有效提高加速能量,降低建造费用,提高装置建设的可行性<sup>[35]</sup>。将加速梯度提升到100 MV/m量级的高梯度是传统射频直线加速器的发展趋势之一,而限制高梯度加速结构实现的主要因素之一为射频腔的射频击穿现象,其对加速结构和被加速束流均有着严重的破坏<sup>[36]</sup>。

### 3.3.1.3 等离子体加速器<sup>[2, 37-42]</sup>

这里的等离子体加速器是指近几十年来在世界范围内进行大量研究的一种新型的高加速梯度粒子加速器,主要利用高梯度等离子体结构的电场加速带电粒子(与产生高速度、高密度等离子体射流的等离子体加速器<sup>[43]</sup>不同)。

传统射频加速器由于射频腔场强局限,加速梯度通常小于100 MV/m,粒子能量越大,粒子加速距离就越长,加速器规模和投资也越庞大,建造周期也越长。由于等离子体加速器的加速介质为已经被击穿的等离子体,不受传统射频加速结构击穿阈值的限制,可以支撑100 GV/m的电场强度,这将为实现小型化的高能粒子加速器提供全新的技术途径。

等离子体加速器有很多不同的加速机制,但利用尾波场加速机制的居多。这里主要介绍尾波场加速情况。按照驱动束的不同,尾波场加速又分为激光驱动的尾波场加速(LWFA)和粒子驱动的等离子体尾波场加速(PWFA)。尾波场加速带电粒子的主要机制为:合适参数的驱动束在等离子体中传播时,会推动等离子体中的电子(称为背景电子)向前运动;等离子体中的离子(称为背景离子)由于质量大,几乎保持不动;当入射束超越背景电子后,由于正负电荷分离产生的静电力使背景电子在空间纵向振荡,形成电子等离子体波,也称为尾波,而电荷分离所形成的电场称为尾波场;若待加速带电粒子(由外部注入或者是等离子体中的部分背景粒子)与大振幅且接近光速运动的尾波场的加速相位同步时,可以被尾波场以行波加速的方式在短距离内进行连续累积加速而获得很高的能量,直到电子的速度超过尾波场的速度而慢慢进入到尾波场减速部分时为止。图17(a)为短脉冲激光在等离子体中激发的激光尾波场结构示意图,其中纵向加速场强可达100 GV/m。

在已开展的等离子体尾波场加速研究中,驱动束主要是强激光束和电子束。最近,欧洲核子研究中心(CERN)也在AWAKE项目中成功完成了质子束驱动的等离子体尾波场加速电子束的实验验证<sup>[44]</sup>。在这些研究中,被加速粒子以电子居多。在激光尾波场加速方面,目前世界上多个实验室均可以通过单级激光等离子体加速,在cm尺度的加速距离内产生能量超过1 GeV的准单能电子束;较长距离加速方面,美国伯克利实验室的激光加速器BELLA继2014年将电子在9 cm长的等离子管(见图17(b))中加速到4.25 GeV<sup>[45]</sup>,最近又将电子在20 cm长的等离子管中加速到7.8 GeV<sup>[46]</sup>;电子束和质子束驱动等离子体尾波加速方面,在82 cm长的电子驱动等离子体尾波加速器中实现了电子平均加速52 GeV/m,在10 m的质子束驱动等离子体尾波加速器中,实现了电子平均加速0.2 GeV/m。

在加速离子方面,离子加速的发展晚于电子加速,目前也处于蓬勃发展,尤其是激光离子加速研究极为活跃<sup>[40-41]</sup>。

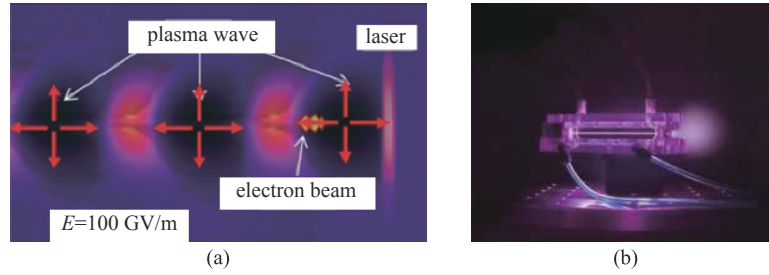


Fig. 17 Principle of laser wake field acceleration (LWFA) and the capillary discharge waveguide of Berleeley Lab Laser Accelerator (BELLA)<sup>[44]</sup>

图 17 激光尾场加速示意图<sup>[40]</sup>及美国激光加速器 BELLA 的蓝宝石毛细管放电波导<sup>[44]</sup>

激光离子加速有靶背壳层加速、光压加速等不同加速机制。北京大学基于光压加速的紧凑激光等离子体加速器 CLAPA<sup>[47]</sup>已经建成,初步完成了从等离子体“加速”原理性研究到等离子体“加速器”建造的跨越。

等离子体加速器技术虽然取得了长足的进步,但也面临着一些问题与挑战。对于电子加速而言,目前电子束的能量已经满足如自由电子激光等应用的需求,但电子束的其他品质,如能散、电荷量和发射度等,还达不到这些应用的要求,因此阻碍了等离子体加速电子的实际应用。对于离子加速而言,目前离子能量低于癌症治疗等应用的要求,暂时仅能开展一些对离子能量需求较低的应用,比如生物、材料辐照等。

总体说来,在非高能加速领域,激光尾波场和电子尾波场的关键技术已日趋成熟,有望逐渐在科研和工业等领域实现初步应用(慕尼黑大学研究人员现已开发出由一台紧凑的激光尾波场加速器同时产生具有不同能量的成对电子束的技术<sup>[48]</sup>),而面向高能物理应用的超高能等离子体加速器,则需要更长的时间发展和完善。

### 3.3.2 螺旋轨道型共振时变电磁场加速器

#### 3.3.2.1 经典(常规)回旋加速器(Classical cyclotron)

经典(常规)回旋加速器是 E. O. Lawrence 从 Wideröe 型直线加速结构中得到启发而发明的一种加速器,如图 18 所示。回旋加速器的思路是借助于磁场使带电粒子沿圆弧形轨道旋转,多次反复地通过高频加速场,这样可以避免直线共振加速器过长、加速效率低的问题。根据拉摩定律,在非相对论情形下,任意一种既定的带电粒子,在均匀的恒定磁场中运动时,其对应的回旋角频率是一个常数。因此,在恒定磁场下将合适恒定频率的高频电压加在两个 D 形电极上,可以使回旋共振得以实现,加速粒子在磁场能够约束的范围内重复通过同一加速间隙而获得累积加速,由于能量逐步增加,粒子从中心沿着外旋的螺旋形轨道运动。

回旋加速器每个高频周期加速和输出一团粒子,即束流的时间结构是 CW 型(连续波)。回旋加速器中引入磁场并实现了回旋共振,在加速器的发展史上具有重要意义。

在经典回旋加速器的发展过程中,速度聚焦、相位聚焦及磁聚焦等问题得到了研究。由于经典回旋加速器采用恒定的均匀磁场(实际上为了轴向聚焦磁场随轨道半径的增加而有所减小)和恒定频率的高频电压,在加速过程中,粒子的回旋周期随着加速粒子质量相对论性增长和轨道磁场的下降而明显地增加,这与高频周期无法协调一致,造成加速相位移动(即“滑相”),从而限制了能量的进一步提高。回旋加速器适合于加速电子以外的任何种类离子,每核子最高能量限于 20 MeV,流强约 1 mA。

#### 3.3.2.2 同步回旋加速器(Synchrocyclotron)

在“自动稳相原理”被发现后,发展了采用调频方法解决经典回旋加速器因加速粒子质量相对论性增长而引起的不同步问题的加速器,称为同步回旋加速器,也称为“调频回旋加速器”或“稳相加速器”。这类加速器与经典回旋加速器基本相似,只是起加速作用的“D 形电极”的共振回路中使用可变电容器以调变频率,使粒子在被加速过程中加速电场的频率随粒子的回旋频率同步下降而保持谐振加速条件,从而突破了经典回旋加速器中相对论性质量增加对提高能量的限制。由于同步回旋加速器是按频率调制周期工作的,每个调制周期中只有一团粒子被加速和引出,因此其输出的是一串脉冲束,平均流强只是回旋加速器的千分之几,仅为 0.1~1  $\mu\text{A}$ 。另外,能量增大时

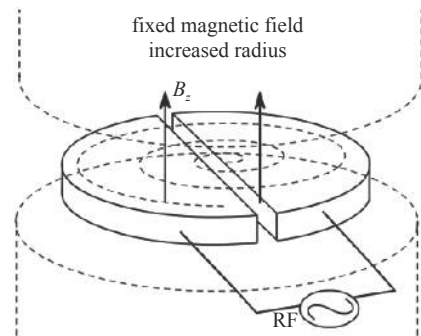


Fig. 18 Schematic drawing of a classical cyclotron

图 18 经典回旋加速器示意图

实心磁铁迅速变大,建造大磁铁的经济性成为新的限制。与经典回旋加速器一样,同步回旋加速器只适于加速离子,加速质子能量可达 1 GeV。同步回旋加速器的建造曾一度趋于停滞;目前随着超导技术的发展,由于采用极高的磁场,同步回旋加速器可实现小型化,并且由于其结构简单,因此,超导同步回旋加速器有望在质子治疗方面得到广泛应用<sup>[49-50]</sup>。

### 3.3.2.3 等时性回旋加速器 (Isochronous cyclotron)<sup>[2-3, 50-53]</sup>

为了解决回旋加速器中加速粒子质量相对论性增长和磁场沿径向的减弱而引起的加速相位移动问题,也提出了等时性回旋加速器方案:轨道磁场的磁感应强度不随时间变化但沿半径方向随粒子的能量同步增长,使加速粒子的回旋周期保持恒定,而磁场沿径向增加造成的轴向散焦问题则用磁场沿方位角调变所产生的聚焦作用来解决。如图 19 所示,人们成功地发展了利用磁极上附加多块(至少三块)扇形垫铁(直边扇形或螺旋扇形)或者由若干分立的扇形磁铁构成的等时性回旋加速器,加速电极为一一定张角的谐振腔体。

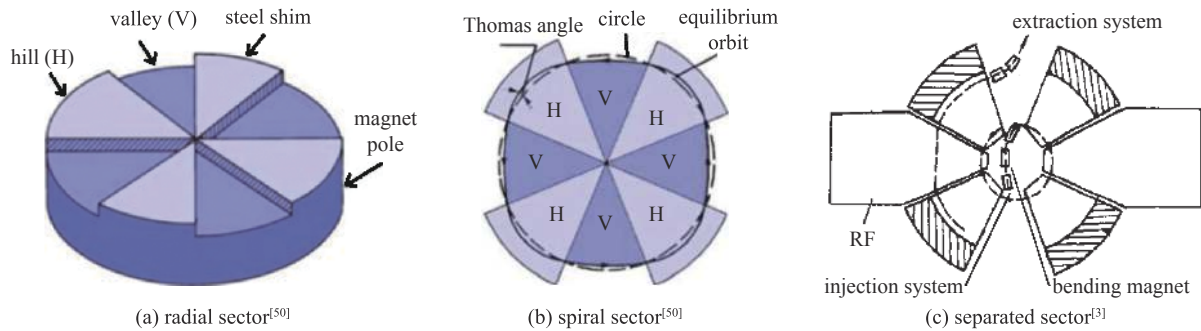


Fig. 19 Pole faces of the isochronous cyclotrons

图 19 等时性回旋加速器磁极结构示意图

径向扇等时性回旋加速器中,产生了托马斯轴向聚焦力,一般可加速质子能量到 50 MeV(中国原子能科学研究院研制的国际上最大的紧凑型强流质子回旋加速器 CYCIAE-100 由于采取强的轴向聚焦而采用径向扇垫铁结构将质子加速到了 100 MeV<sup>[52]</sup>);螺旋扇等时性回旋加速器的弯曲垫铁产生了额外的轴向聚焦力,一般可以将质子加速到 70 MeV;分离扇等时性回旋加速器由于磁场调变度大,有较强的轴向聚焦作用,一般可将质子加速到 100 MeV(瑞士 PSI 的分离扇高功率质子回旋加速器能量达 590 MeV、中国原子能科学研究院正在研制 800 MeV 的分离扇高功率质子回旋加速器<sup>[51-52]</sup>),多用于低能核物理研究或短寿命放射性同位素的生产。由于在能量及束流品质方面性能优异,能量较高的分离扇加速器,多加速重离子,但因平均磁场较弱,加速器半径较大,磁铁较重。另外,分离扇加速器一般不单独使用。

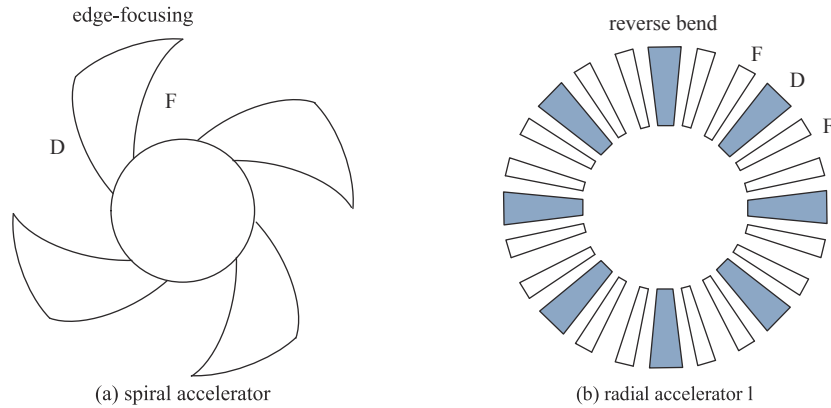
等时性回旋加速器不仅开拓了中能区等领域,而且在低能区完全取代了经典回旋加速器,发展令人瞩目。目前,强流高功率、超导化、小型商业化等是等时性回旋加速器的发展方向<sup>[51-52]</sup>。

### 3.3.2.4 固定场交变梯度(FFAG)加速器<sup>[51, 53-56]</sup>

FFAG 加速器在这里特指在交变梯度聚焦原理(见后文)发现后提出的一类介于回旋加速器与同步加速器之间的加速器,兼有分离作用强聚焦同步加速器和弱聚焦回旋加速器的特点<sup>[51]</sup>。它采用方位角调变的、磁场随平均半径变化的固定磁场,磁场在空间中交替排列,中心通常无磁铁,但电场频率变化自由,是一类具有组合作用、固定磁场及交变梯度聚焦的加速器。由于主磁铁的磁场在粒子加速过程中不随时间变化,加速重复频率将只受到加速腔的限制;由于沿径向向外的螺旋轨道和高的动量压缩因子的影响,使得这类加速器有较大的径向接受度和动量接受度,从而可以得到高束流流强。固定场交变梯度加速器按照磁铁结构的不同,又分为螺旋扇和径向扇两种,如图 20 所示。

根据磁聚焦结构的不同及其束流轨道是否呈比例外展,FFAG 又分等比 FFAG 和非等比 FFAG 两种。最先研究的是等比 FFAG,理论成熟,要求磁场满足零色品特性,横向自由振荡频率(工作点)固定(或变化范围小),可避免共振线穿越,加速束流稳定,束流轨道成比例向外扩展;后来提出非等比 FFAG,取消了满足零色品特性的限制,需穿越共振线,因而比较适合快加速的情况。非等比 FFAG 快加速在 EMMA 上得到了实验验证<sup>[56]</sup>。FFAG 概念提出很早,但未被充分发展。由于 FFAG 具有高重复频率、高流强、大动力学孔径、高输出功率、小体积、低成本等优点,近来 FFAG 加速器在加速器驱动次临界洁净核能系统(ADS 系统)、次级束流装置、医学治癌等领域又受到高度重视。



Fig. 20 A spiral and a radial fixed-field alternating-gradient (FFAG) accelerator<sup>[54]</sup>图 20 螺旋扇和径向扇 FFAG 加速器示意图<sup>[54]</sup>

### 3.3.2.5 电子回旋加速器(Microtron)

电子回旋加速器中用微波谐振腔取代常规回旋加速器中的 D 形电极。适当选择加速器参数,使得电子每加速一次其质量相对论性增长引起的相移增大到刚好为  $2\pi$  的整数倍,相应的回旋周期的增量也恰好是加速电场周期的整数倍,从而使得加速相位保持不变,电子轨迹是半径逐渐增加的一系列相切的圆,如图 21 所示。电子回旋加速器是另一类解决常规回旋加速器中因粒子质量按相对论规律增长引起困难取得成功的典型加速器。采用小型直线加速器和分裂式磁铁组合构成的跑道式电子回旋加速器可以进一步提高能量<sup>[2]</sup>。

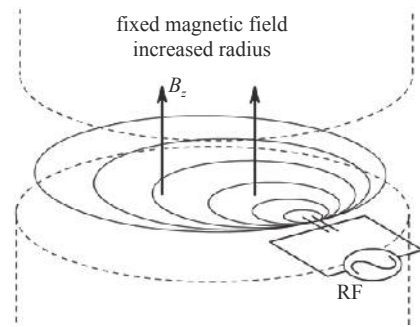


Fig. 21 Sketch of a microtron

图 21 电子回旋加速器示意图

### 3.3.3 闭合环型共振时变电磁场加速器<sup>[2-3]</sup>

回旋型加速器的粒子轨道逐步向外展开,恒定的主导磁场必须覆盖不同半径的回旋轨道,所需的实心磁铁极为笨重,因此人们希望实现具有封闭轨道的共振加速。借鉴电子感应加速器技术,使用谐振腔受激励产生的高频电场取代涡旋场,但其轨道磁场与感应加速器仍基本相同,这种具有封闭轨道的、用调变轨道上主磁场的方法来实现同步加速的共振加速器叫做同步加速器(synchrotron),如图 22 所示。

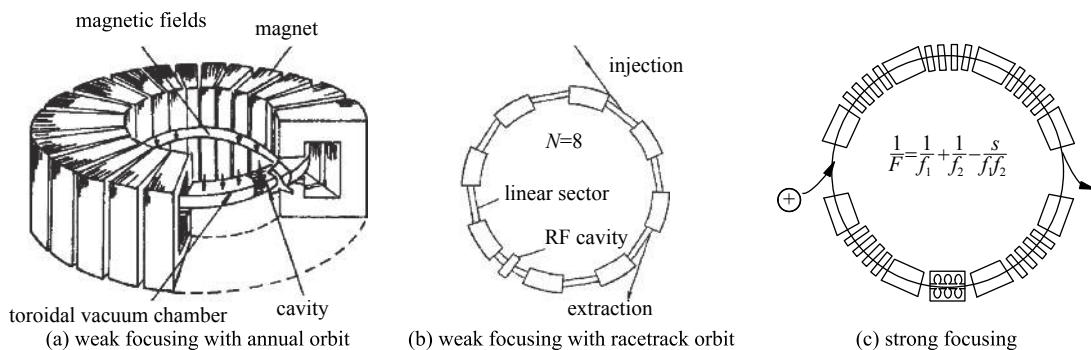


Fig. 22 Sketch of the synchrotrons

图 22 同步加速器示意图

多数同步加速器还在环形轨道上设有直线节,粒子轨道类似于跑道,如图 22(b)所示。由于常规轨道磁场的横向聚焦能力弱,因此,这类加速器也称为弱聚焦同步加速器,为了得到足够的束流,其真空室截面尺寸以及相应的磁铁很大,造价高昂。减小粒子束的横向振幅是这类加速器的改进方向之一,为此提出了“交变梯度聚焦原理”,以解决粒子运动的横向稳定性问题。

光学组合透镜中,在合适的条件下,光线通过聚焦透镜和散焦透镜组成的组合透镜系统时,组合透镜可以是聚焦的(见图 23)。与此类似,将合适参数的聚焦与散焦磁铁沿粒子轨道交替地排列,就可以使粒子在轴向和径向都受到聚焦作用,且组合的聚焦效果超过一般的聚焦方式,这被称为“强聚焦原理”、“交变梯度聚焦原理”或“周期

聚焦原理”。

根据强聚焦原理建造了强聚焦同步加速器(见图 22(c)), 粒子束的横向振幅得到明显压缩, 与弱聚焦相比, 在造价相当的情况下能量提高了一至两个数量级。根据磁铁功能的不同, 又可将强聚焦同步加速器分为两种: 一种是主导磁场和聚焦磁场结合在一起的组合作用强聚焦同步加速器; 另一种是主导磁场和聚焦磁场分开的分离作用强聚焦同步加速器。

在同步加速器中, 由于高速电子在磁场中转弯时会辐射能量发出光辐射, 称为同步辐射。这种辐射是阻碍电子加速能量进一步提高的重要因素; 但另一方面, 同步辐射又是一种具有优异特性的辐射光源。

由于同步加速器中粒子是沿固定的轨道被加速, 因此它不能单独组成一台加速器, 需要一台或几台加速器先把带电粒子加速到一定的能量, 再注入主同步加速器进行加速。

### 3.3.4 非圆形循环型共振时变电磁场加速器<sup>[57-59]</sup>

非圆形循环型共振时变电磁场加速器这类多次累积型加速器, 以 IBA 公司生产的花瓣形加速器 Rhodotron(见图 24)为代表, 粒子(电子)的轨道不是通常的循环型加速器中较为简单的开螺旋形或闭合环形等轨道, 而是在借助加速腔周边二极偏转磁铁的多次偏转情况下, 电子束反复穿越加速腔, 得到累积加速, 电子轨道呈现比较复杂的形状, 这里笼统称之为非圆形循环式轨道<sup>[57]</sup>。

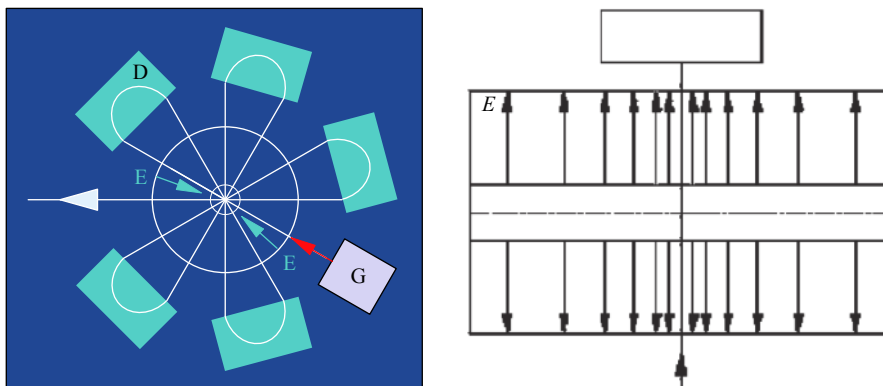


Fig. 24 Rhodotron acceleration scheme

图 24 花瓣形加速器加速结构示意图<sup>[58]</sup>

花瓣形加速器用于加速电子, 加速腔为准半波长的同轴谐振腔, 工作模式为 TEM, 谐振频率在米波范围, 其电场和磁场都只有横截面内的分量; 在腔的中央截面处电场最强, 磁场最弱(基本为零)。花瓣形加速器加速原理如图 24 所示: 从电子枪出来的电子束以合适的相位进入此横截面内受到径向电场加速, 经过腔体中心的空腔结构避开减速相位(在此期间高频电场反向), 在进入加速腔另一边时再次得到径向电场的加速, 直至出腔; 电子束在腔外由二极偏转磁铁产生弯转, 使其重新被送入加速腔内进行加速, 如此反复, 电子束因累积加速而获得更高的能量。花瓣形加速器中电子束的每段直线加速过程可看成是驻波加速过程<sup>[58]</sup>。

花瓣形加速器兼有大功率输出的直流高压型加速器和高能量的高频谐振型加速器的优点, 电子束的输出能量范围为 1~20 MeV、输出功率高至 500 kW, 属于高平均功率的 CW 电子束加速器, 适用于辐照加工的各个领域。此外, 利用花瓣形加速器可产生具有较高束流品质(能散度约 0.5%, 归一化发射度约 5 mm·mrad)的电子束, 再加上特殊设计的旋转靶装置, 能产生尺寸约 0.2 mm 的微焦斑, 因此花瓣形加速器也有望在高分辨率工业 CT 领域占有一席之地。

## 4 其他加速器技术及相应设备

此处所述的其他加速器技术指的是不属于加速器基本类型中的技术而在其他加速器(尤其是高能加速器)中采用的一些重要设备对应的技术。

### 4.1 增强流强技术及增强器

一般新建的高能同步加速器均趋向于在它与前级入射器之间增设一台小型同步加速器作为中间加速器, 称为

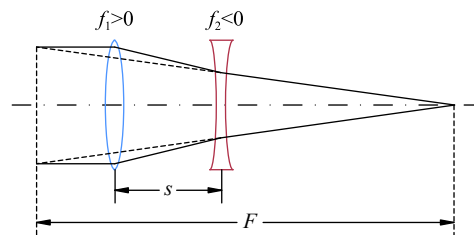


Fig. 23 Sketch of a combinative optical system

图 23 光学组合透镜系统

增强器。因此,增强器实际上是一台同步加速器,除了提高主加速器入射能量、改善入射束流性能外,最主要的作用是增强主加速器的脉冲流强,使能量、束流时间结构等参数与下一台加速器匹配。

#### 4.2 储存粒子技术及储存环

储存粒子技术及储存环(通常为同步加速器)是随着对撞机和同步辐射光源技术的发展而起来的,主要功能不在于加速粒子,而主要用于积累带电粒子,即不断地让具有较高能量的粒子注入并进行积累,使储存的束流达到要求值并长时间地在加速器中循环。在储存环中,粒子也可以进一步加速到更高能量,这种加速器可称为储存加速器。

#### 4.3 提高有效作用能技术及对撞机<sup>[60]</sup>

对更高能量和更强亮度的追求是当前高能(粒子)物理加速器的两大前沿。在高能物理研究中,需要对微小的“基本”粒子进行研究,高能粒子加速器作为研究微观粒子的“显微镜”,它的分辨能力(德布罗意波长)与其能量相关,能量越高,波长越短,其研究的分辨率也越高。若能量为 1 GeV,波长就与质子的直径(约  $10^{-15}$  m)相当。因此,为了研究质子和中子的结构,束流的能量就必须高于 1 GeV。这样 1 GeV 成为中能和高能的分界线。现在,加速器已经能把质子的能量加速到 1 TeV,相应的实验分辨率达到  $10^{-18}$  m,可以深入到强子的内部。另外,根据相对论,能量和质量可以互相转换,在粒子的相互作用中,更高能量加速器产生的粒子可以撞出更大质量的新粒子。寻找新粒子以及研究已知粒子的性质成为高能物理研究进一步发展的动力之一。

在打静止靶时,高能加速器动能的使用效能不高。为了提高动能的使用效能,人们想出了将两个粒子分别加速后相向碰撞的办法,使高能粒子进行反方向运动并发生对撞作用的机器叫做对撞机。对撞机可以大幅提高有效作用能量,特别是在束流能量远高于其静止能量的情况下更为明显。在近 20 年粒子物理激动人心的进展中,对撞机已成为一种占主导地位的高能加速器。为了提高单位面积、单位时间内发生对撞的几率,需要积累尽可能多的粒子和尽可能地减小束流横向发射度和能散度,为此,储存环技术、“冷却”技术(“电子冷却”、“随机冷却”等)得到了发展。现在,各种传统类型加速器的能量提高都趋于饱和状态,等离子体加速器还未完全成熟,而对撞机的等效能量还在提高,对撞机也几乎成了高能物理的代名词。从大幅度地有效提高能量的角度来看,对撞机的出现也同自动稳相原理的发现、强聚焦原理的采用一起,被认为是粒子加速器发展史上的三大革命<sup>[4]</sup>。

### 5 各类典型加速器的相互联系<sup>[3]</sup>

加速器的应用本质上为荷能粒子束及其次级射线束的应用,主要是能量效应的利用和信息的提取,众多需求和应用(从最初的核物理研究到现在的各类大科学工程如对撞机、高性能光源、散裂中子源<sup>[60]</sup>以及国计民生等)催生了各类加速器的蓬勃发展。各类加速器并不是按部就班地逐步线性演进的,其发展也不平衡,当然各类加速器相互之间也并不孤立,图 25 展示了各类加速器之间的相互联系<sup>[3]</sup>。

由两种典型的电场形式导致诞生了高压静电型和时变电磁场型两类典型加速器。

单极加速的高压静电型加速器,其能量受介质击穿电压的限制。利用感应电场及高频交变电场等时变场对带电粒子多次累积加速的实现是加速器发展阶段的一个技术和原理上的进展。

高频共振型加速器由早期直线型发展到恒定轨道磁场的回旋型(具有回旋轨道,包括经典回旋、同步回旋、等时性回旋、电子回旋)和 FFAG 型,同时成功地运用了磁场对带电粒子的弯转和聚束作用进行累积加速,又是在原理、结构和加速技术上合乎逻辑的进展。将电子回旋加速器中高效加速的微波谐振腔与电子感应加速器中恒定不变的加速轨道技术相结合,促使加速器发展中期诞生了环型同步共振加速器,它将束流约束在环型真空盒内,解决了最初回旋型加速器中因主导磁场必须覆盖不同半径的螺旋线轨道而导致的磁铁庞大问题。原常规轨道磁场弱聚焦加速器真空盒截面太大,限制了加速器能量的进一步提高,从而出现了交变梯度即强聚焦加速器。常规磁铁的局限性和高频腔的功率损耗限制了加速器向更高能区推进,促进了超导技术在加速器中的应用。而让两束相向运动的粒子对撞来提高有效作用能的对撞机,则把束流的等效能量推向了新的高度。常规射频加速器的射频击穿电场的限制促进了等离子体加速器的发展,这也是加速原理上的重大突破。对于环型加速器,特别是电子环型加速器中,存在同步辐射阻碍其向更高能区推进的问题,由此促进了直线型加速器的新发展。高频、微波腔系列的发展导致现代行波直线加速器和驻波直线加速器的诞生。直线感应加速器技术与环形加速器技术相结合,促进了感应同步加速器的发展。

加速器科学就是这样在基于加速原理正确性、技术实现可行性、建造及运行的经济合理性的基础上,发散、混合、交错地发展起来的。



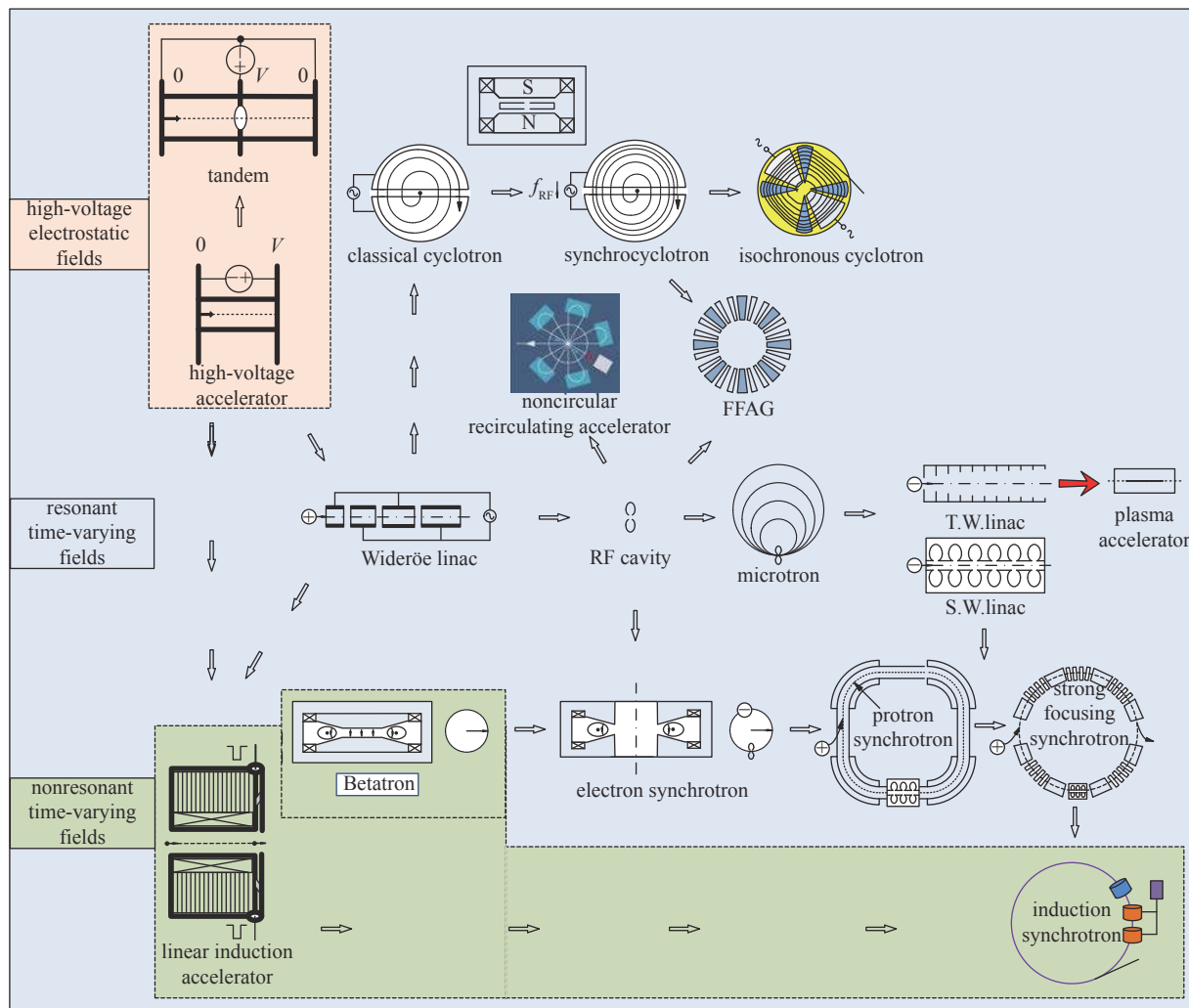


Fig. 25 Evolution of acceleration mechanism(modified from Ref.[3])

图 25 各类典型加速器的相互联系示意图

## 6 结 论

从人类认识到需要用人工方法获得粒子种类可变、流强大、易于控制的高能量带电粒子束开始,基于电磁力加速的带电粒子加速器在 100 年的历史演变中,家族不断壮大,品种逐渐增多,技术不断翻新,应用日益广泛,发展蔚为壮观。而以提高束流性能、加速效率和效费比为目标的新原理和新技术的不断涌现和应用,必将开创加速器科学的崭新局面。

**致谢** 本文的写作得到了中国工程物理研究院流体物理研究所代志勇、李勤、何小中、廖树清、杨国君、魏涛、夏连胜等专家的大力帮助,在此表示衷心感谢。

## 参考文献:

- [1] 方守贤, 梁岫如. 神通广大的射线装置: 带电粒子加速器[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. (Fang Shouxian, Liang Xiuru. Infinitely resourceful ray facilities: charged particle accelerators[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001)
- [2] 陈佳洱. 加速器物理基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012. (Chen Jiaer. An introduction to the physics of particle accelerators[M]. Beijing: Beijing University Press, 2012)
- [3] 桂伟燮. 荷电粒子加速器原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. (Gui Weixie. Principles of charged particle accelerator[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994)
- [4] 谢家麟. 加速器与科技创新[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. (Xie Jialin. Accelerators and technological innovations[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000)
- [5] Wiedemann H. Particle accelerator physics[M]. New York: Springer International Publishing, 2015.
- [6] Teng L C. Conceptual and technological evolutions of particle accelerators[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2009, 33(s2): 112-114.

- [7] Sessle A, Wilson E. Engines of discovery, a century of particle accelerators[M]. Singapore : World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2014.
- [8] Chao A W, Tigner M. Handbook of accelerator physics and engineering[M]. Singapore : World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2006.
- [9] Humphries S. Principles of charged particle acceleration[M]. New York: Wiley, 1999.
- [10] Takayama K, Briggs R J. Induction accelerators[M]. New York: Springer International Publishing, 2011.
- [11] Edwards D A, Syphers M J. An introduction to the physics of high energy accelerators[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH&Co KGaA, 2004.
- [12] Chakhlov S V, Kasyanov S V, Kasyanov V A, et al. Betatron application in mobile and relocatable inspection systems for freight transport control[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 671: 012024.
- [13] 刘锡三. 强流粒子束及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. (Liu Xisan. Intense particle beams and its applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007)
- [14] Boucher S, Agustsson R, Frigola P, et al. High average current betatrons for industrial and security applications[C]//Proceedings of PAC. 2007.
- [15] Wilson P B. Electron linacs for high energy physics[J]. *Reviews of Accelerator Science and Technology*, 2008, 1: 7-41.
- [16] 邓建军. 直线感应电子加速器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. (Deng Jianjun. Linear induction accelerator for electrons[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006)
- [17] Vintzenko I. Linear induction accelerators for high-power microwave devices[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [18] Zhang C, Fang S X. Particle accelerators in China[J]. *Reviews of Accelerator Science and Technology*, 2017, 9: 265-312.
- [19] Crawford M, Barraza J. Scorpius: The development of a new multi-pulse radiographic system[C]//IEEE 21st International Conference on Pulsed Power. 2017.
- [20] Akimov A, Akhmetov A, Bak P, et al. Single-triple pulse power supply for 2 kA, 20 MeV linear induction accelerator[C]//IEEE 21st International Conference on Pulsed Power. 2017.
- [21] Vermare C. Investigations on dual-pulse technologies for future upgrade of CEA flash X-rays LIA[C]//IEEE 21st International Conference on Pulsed Power. 2017.
- [22] 黄子平, 吕璐, 陈思富, 等. 脉冲感应加速在环形加速器中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 020201. (Huang Ziping, Lü Lu, Chen Sifu, et al. Application of pulse induction module in circular accelerators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29: 020201)
- [23] 徐玉存. MOSFET调制器关键技术及氦离子FFAG感应加速腔模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011. (Xu Yucun. Study of the MOSFET modulator and conceptual design of an induction cavity for the He<sup>2+</sup> FFAG accelerator[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011)
- [24] Smith I D. Induction voltage adders and the induction accelerator family[J]. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2004, 7: 064801.
- [25] Melissinos A C. Nicholas C Christofilos: His contributions to physics[C]//CERN Accelerator School Fifth Advanced Accelerator Physics Course. 1995, 2: 1067-1081.
- [26] 周良骥. 快脉冲直线变压器驱动源(LTD)技术初步研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2006. (Zhou Liangji. Research of linear transformer driver (LTD)[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2006)
- [27] 盛政明, 张杰. 由激光在等离子体中激发的尾波场产生的超强太赫兹电磁辐射[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(12): 35-36. (Sheng Zhengming, Zhang Jie. Super electromagnetic radiation produced by a laser-plasma wakefield[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(12): 35-36)
- [28] Amaldi U. Particle accelerators: from big bang physics to hadron therapy[M]. New York:Springer International Publishing, 2015.
- [29] Tang Chuanxiang. Low energy accelerators for cargo inspection[J]. *Reviews of Accelerator Science and Technology*, 2015, 8: 143-163.
- [30] 刘渭滨. 高能(射频)直线加速器物理[R]. 北京: 中国科学院高能物理研究所加速器中心, 2011. (Liu Weibin. Radio frequency linear accelerator physics[R]. Beijing: Institute of High Energy Physics Accelerator Center, 2011)
- [31] Wangler T P. RF linear accelerator[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH&Co KGaA, 2008.
- [32] 杜衡. IH-DTL直线加速器的设计及实验研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2017. (Du Heng. Design and experiment study of IH-DTL linac[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017)
- [33] 刘乃泉. 加速器理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (Liu Naiquan. Theory of particle accelerator[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004)
- [34] 王国林. 基于高梯度加速结构高功率测试平台控制和测量的研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2015. (Wang Guolin. The research of control and measurement of the high power testing platform based on high-gradient accelerating structures[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015)
- [35] 黄晓霞. X 波段高梯度加速结构及尾场效应研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2017. (Huang Xiaoxia. Study of the X-band high gradient accelerating structure and wakefield effects[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017)
- [36] 邵佳航. 高梯度加速结构中射频击穿现象的研究[D]. 北京: 清华大学, 2016. (Shao Jiahang. Investigations on rf breakdown phenomenon in high gradient accelerating structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016)
- [37] Ioshi C. The development of laser- and beam-driven plasma accelerators as an experimental field[J]. *Phys Plasmas*, 2007, 14: 055501.
- [38] Hogan M J. Electron and positron beam-driven plasma acceleration[J]. *Reviews of Accelerator Science and Technology*, 2016, 9: 63-83.
- [39] Adli E, Muggli P. Proton-beam-driven plasma acceleration[J]. *Reviews of Accelerator Science and Technology*, 2016, 9: 85-104.
- [40] 盛政明, 陈民, 翁苏明, 等. 超短超强激光驱动新型粒子加速器: 机遇和挑战[J]. *物理*, 2018, 47(12): 753-762. (Sheng Zhenming, Chen Min, Weng Suming, et al. Novel particle accelerators driven by ultrashort and ultraintense lasers: opportunities and challenges[J]. *Physics*, 2018, 47(12): 753-762)
- [41] 胡荣豪, 颜学庆. 激光等离子体加速器: 原理、现状以及展望[J]. *现代物理知识*, 2017(5): 35-39. (Hu Ronghao, Yan Xueqing. Laser-driven plasma accelerators: principles, status and expectations[J]. *Modern Physics*, 2017(5): 35-39)

- [42] Bolton P R, Parodi K, Schreiber J. Applications of laser-driven particle acceleration[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [43] 高著秀, 黄建国, 韩建伟, 等. 等离子体加速器动力学理论探索[J]. *航天器环境工程*, 2010, 27(3): 285-289. (Gao Zhuxiu, Huang Jianguo, Han Jianwei, et al. Dynamics of plasma driven micro-particle accelerator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(3): 285-289)
- [44] Pepitone K, Doeberst S, Apsimon R. The electron accelerators for the AWAKE experiment at CERN—baseline and future developments[J]. *Nuclear Inst and Methods in Physics Research A*, 2018, 909: 102-106.
- [45] Greene K.. World record for compact particle accelerator[R]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2014.
- [46] Gonsalves A J, Nakamura K, Daniels J, et al. Petawatt laser guiding and electron beam acceleration to 8 GeV in a laser-heated capillary discharge waveguide[J]. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 084801.
- [47] Zhu Jungao, Zhu Kun, Tao Li, et al. Distribution uniformity of laser-accelerated proton beams[J]. *Chinese Physics C*, 2017, 41: 097001.
- [48] Wenz J, Dopp A, Khrennikov K, et al. Dual-energy electron beams from a compact laser-driven acceleration[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 263-269.
- [49] Smirnov V, Vorozhtsov S. Modern compact accelerators of cyclotron type for medical applications[J]. *Physics of Particles and Nuclei*, 2016, 47(5): 863-883.
- [50] Pearson E, Kleeven W, Nuttens V, et al. Development of cyclotrons for proton and particle therapy[M]//Particle Radiotherapy: Emerging Technology for Treatment of Cancer. New Delhi: Springer India Ltd, 2016:21-36.
- [51] 唐靖宇, 魏宝文. 回旋加速器理论设计[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2008. (Tang Jinyu, Wei Baowen. Theory and design of cyclotrons[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2008)
- [52] 张天爵, 吕银龙, 王川, 等. 中国原子能科学研究院回旋加速器创新与发展60年[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(10): 2023-2030. (Zhang Tianjue, Lü Yinlong, Wang Chuan, et al. 60 years of innovation and development for cyclotron at CIAE[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(10): 2023-2030)
- [53] Craddock M K, Symon K R. Cyclotrons and fixed-field alternating-gradient accelerators[J]. *Reviews of Accelerator Science and Technology*, 2008, 1(1): 65-97.
- [54] Ruggiero A G. Brief history of the FFAG accelerator[R]. BNL-75635-2006-CP, 2006.
- [55] 罗焕丽. 驱动离子束FFAG加速器与C-ADS输运中若干物理问题的探索研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013. (Luo Huanli. Research on several problems in heavy ion FFAG accelerator and C-ADS particle transporting[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013)
- [56] Sheehy S L. Fixed-field alternating-gradient accelerators[R]. CERN Yellow Reports, 2017.
- [57] Dubinov A E, Ochkina E I. Recirculating electron accelerators with noncircular electron orbits as radiation sources for applications[J]. *Physics of Particles and Nuclei*, 2018, 49(3): 431-456.
- [58] 陈勇, 黄文会, 唐传祥. Rhodotron型加速器粒子动力学研究[J]. *高能物理与核物理*, 2005, 29(2): 180-185. (Chen Yong, Huang Wenhui, Tang Chuanxiang. Dynamics study of the Rhodotron accelerator[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005, 29(2): 180-185)
- [59] 陈勇. Rhodotron型加速器的动力学研究[D]. 北京: 清华大学, 2005. (Chen Yong. Dynamics study of the Rhodotron accelerator[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005)
- [60] 赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. (Zhao Jijiu, Yin Zhaosheng. Particle accelerator technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006)