

串列式靜电加速器的現狀和展望

叶銘漢 陈鑑璞

本文綜合介紹了串列式靜电加速器的目前概況，扼要地討論了它的一些主要技術問題，並提出了它的主要發展方向。

目 前 概 况

近年來，低能核物理工作者都十分關心串列式靜电加速器的發展，對它抱有極大的興趣。世界上一些重要的低能原子核物理研究中心都先後建立了串列式靜电加速器。串列式靜电加速器把能量精確可調的加速粒子的能量第一次從 8.6 兆電子伏提高到了 15 兆電子伏（對單電荷離子，下同）¹⁾。在最近幾年內可能提高到 20—22 兆電子伏^[1]，在 10 年內可能達到 30 兆電子伏^[2]。這是一個極為重要的進展，它在低能核物理實驗技術方面開辟了全新的一面，對於原子核物理和原子能利用的基礎研究都有極其重大的作用。

靜电加速器一向是以它的精確性和靈活性聞名的，是進行精細的核物理實驗所不可缺少的工具。現在低能核反應實驗工作的特點是往更精密和更細致的方向發展。從做精細工作的要求來衡量各種低能加速器，可以這樣認為：高壓倍加器的能量沒有靜电加速器高，結構不及靜电加速器緊湊。實際上在 2 兆電子伏以上的領域內，現在已很少有人考慮使用高壓倍加器了。迴旋加速器和質子直綫加速器的能量雖然可以很高，但離子束經過分析後，如果以靜电加速器很容易達到的 0.1% 的能量分布來要求，則它的強度就很小了。迴旋加速器在這種情況下的離子束密度約為 1 微安/厘米²^[3]，而串列式靜电加速器可達到數十微安/厘米²。質子直綫加速器的平均離子流強度只有微安數量級，能量分布約千分之几^[4]，如果經過分析，也要比串列式靜电加速器弱得多。此外，迴旋加速器的能量一般是不可調的，而且本底很大；質子直綫加速器的能量基本上是不可調的。這些都是不利於做精細的核反應工作的。因此，從低能核反應工作的需要來看，靜电加速器無疑是一個很理想的實驗工具，唯一的缺點是能量還不夠高。正因為這樣，提高能量一直是靜电加速器三十多年來的發展方向。

單級靜电加速器（即非串列式的）的最高能量由於加速管的真空管實際上限制在 6 兆電子伏以下，只有兩架達到了 8 兆電子伏左右。大概從 1952 年開始，這方面的提高就停滯了（圖 1）。因此，當 1951 年阿爾瓦里斯（Alvarez）^[5]重新提出本涅特（Bennett）的原始想法^[6]，即用串列加速方法來提高靜电加速器的能量時，受到了大家的重視。1956 年初懷恩曼（Weinmann）等^[7]作出了能產生 30 微安負氬離子的負離子源。這一進展使大家相信串列式加速器的建造已有了現實的基礎，在 1955 年和 1956 年間，美國高壓工程公司和英國原

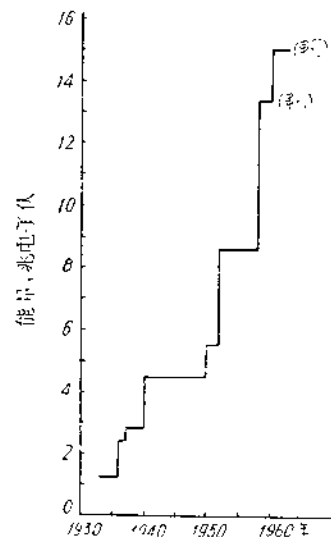


圖 1 靜电加速器能量的提高過程

1) 1960 年底達到的水平。

子能委员会就分别开始串列式静电加速器的建造工作。1958年底高压工程公司为加拿大乔克河(Chalk River)原子能中心建造的二级串列式静电加速器获得成功,第一次从静电加速器获得了13.4兆电子伏的质子束,分析后的流强为1.5微安,能量分布为 $\pm 0.02\%$ ^[9]。十分显然,这是静电加速器发展中的一个里程碑。英国原子能委员会同时开始建造的两架二级串列式静电加速器也在1959年上半年建成,质子或氘核的能量达到11.5兆电子伏,较低能量下束流强度为8微安^[9]。在1958年到1961年底的四年间,世界上已建立和开始建造的串列式静电加速器共有19架之多(不包括社会主义国家,下同),其中两架是三级串列,在二级串列式静电加速器中,6架是在1960年底以前建成的,10架约在1962年底以前建成。二级串列式静电加速器中,除英国已完成的两架和日本正在建造中的一架外,其余全是高压工程公司的产品。串列式静电加速器的建造地点见表1。

表1 串列式静电加速器建造地点

国 别	地 点	能量(质子), 兆电子伏	建成时间
加 拿 大	乔克河原子能中心*	12	1958
英 国	哈威尔原子能研究中心	11.5	1959
英 国	阿德马斯顿原子武器研究中心	11.5	1959
美 国	威斯康辛大学*	12	1960
美 国	佛罗里达大学*	12	1960
美 国	赖斯学院*	12	1962(?)
美 国	加利福尼亚理工学院*	12	1961
美 国	国立橡树岭实验室*	12	1961
美 国	国立阿贡实验室*	12	1962(?)
美 国	宾夕耳法尼亚大学*	12	1962(?)
美 国	特克萨斯大学*	17.5(三级)	
英 国	利物浦大学*	12	1961
英 国	牛津大学	20—22(三级)**	
日 本	东京大学	10	
法 国	萨克莱原子核研究中心*	12	1962
瑞 士	邦立苏黎世工业学院*	12	1962(?)
丹 麦	理论物理研究所*	12	1961
西 德	海德堡大学*	12	1960
澳大利亚	国立澳大利亚大学*	12	1961

* 美国高压工程公司产品。

** 二级串列加单级,二级串列为美国高压工程公司产品。

低能核物理实验工作者之所以对串列式静电加速器会抱有极大的兴趣,主要是它为原子核物理实验和原子能利用的基础研究开辟了一系列新的重要方面。在1959—1961短短三年间,在乔克河和英国的串列式静电加速器上已作出了不少很有价值的成果^[10,11]。这就可以证明串列式静电加速器的确是十分理想的实验工具。现将各方面的主要应用概述如下:

1 能级特性研究 单级静电加速器(6兆电子伏以下)只适于用来研究轻核和中重核,而串列式静电加速器(13.4兆电子伏)可研究元素周期表中任何一种元素的核。过去10兆电子伏以上是回旋加速器的工作范围,前面已指出,由于它的性能所限,不太适宜于作某些细致精确的工作。测定重核(例如铀)和中重核(例如裂变产物)的能级特性,对原子能的利用有重要意义。英国原子能委员会建造两架串列式静电加速器的主要目的之一就是研究这些能级。

2 核反应机构的研究 串列式静电加速器的能量可以从2—13兆电子伏连续调节,是其

他加速器作不到的。这不但适合于作某一能量下的细致精确的工作，也非常适合于用来研究不同能量下核反应机构的变化。由于能量范围广，加速粒子的种类很易改变，所以这种加速器既可用于系统地作两种互相可逆的反应的研究，也可以通过不同途径来得到相同的复合核能级等等，并以此验证核反应的一些重要理论。

3 单能中子源 串列式靜电加速器可以提供从几千电子伏到将近 30 兆电子伏的单能中子。过去一直缺少 8—12 兆电子伏单能快中子，现在正好填补了这个缺口。毫无疑问，系统地测定中子所引起的核反应的截面和各种元素对中子的吸收截面等等，对于原子能利用和核反应理论都是有极重大的意义的。

4 重离子反应 串列式靜电加速器已加速了氦核、氮 3 核、氦核以及氧、氮、碳、氟、氯等重离子。可以用来研究一些质子或氦核所不易或不能激发的能级，或用来研究一些新的反应机构。重离子和重离子的散射过去几乎是空白，乔克河原子能中心在这方面已获得了极优异的结果，他们发现了一种“膺分子作用机构”。重离子所引起的库伦激发，也是大家很感兴趣的。

5 其他 (ρ , γ) 大共振的研究、基本粒子散射的研究、阈能的精确测定等方面也是串列式靜电加速器的主要应用。此外，很多人希望在串列式靜电加速器上用极化负离子源。但目前为止，还没有作出极化负离子源。

几个技术问题

二级串列式靜电加速器如图 2 所示。负离子从加速管的一端（地电位）加速到高压电极（正高压）。在高压电极内，负离子通过一段电子剥除装置而转变为正离子。正离子在另一侧的加速管内又受到加速。如果负离子和正离子都带一个单位电荷，则得到的总能量为加速器电压的两倍。除了负离子源和电子剥除装置之外，串列式靜电加速器和单级靜电加速器相比较，只是在结构上有所不同，技术上的要求在很多方面都是相同的。必须指出，由于它的负离子源是位于钢桶之外，比之单级靜电加速器中正离子源位于高压电极之内的结构具有两大优点：(1) 因为离子源是加速器中最容易出故障的部件，串列式靜电加速器运转的可靠性因而大大提高。乔克河的那架加速器在刚建成后的 22 个月内，月平均运转时间达到 250 小时。(2) 离子源不受功率和空间的限制，因而各种离子源（甚至包括极化源在内）都易于用上。

串列式靜电加速器的很多技术问题，例如输电、加速管、电压稳定等等，都是和单级靜电加速器相同的。一般讲来，串列式靜电加速器还需要解决下列三个主要技术问题。

1. 横式结构问题 为了便于检修、节省加速器大厅土建造价，以及更重要的，为了将来有可能改建为三级串列，串列式靜电加速器的横式结构比之直立式结构显得要优越得多。但是横式结构要求同时解决分压柱的机械刚度和高电压绝缘问题，对大多数国家来说，这方面的把握是不大的。英国已经建成的两架和日本正在建造中的一架串列式靜电加速器都还是采用直立式结构。其实，串列式靜电加速器的横式结构比之单级靜电加速器的要容易解决一些。因为它在高压电极两侧各有一段绝缘支柱，是两端固定的梁而不是单级靜电加速器的单臂悬梁。高压工程公司所生产的串列式靜电加速器是采用横式结构的，分压片和绝缘块交错粘接成一

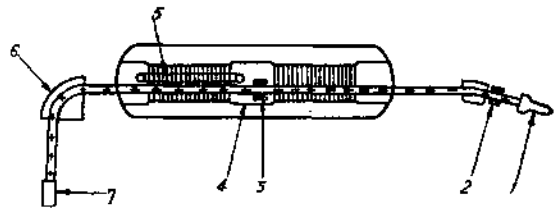


图 2 二级串列式靜电加速器示意图

1—离子源； 2—电子附加孔道； 3—电子剥除孔道； 4—高压电极； 5—输电带； 6—分析磁铁； 7—靶子。

个整体而构成分压柱。看来这是解决横式结构问题的一个很好的方法。

2. 负离子源 在正离子穿过物质时与物质分子相碰撞的过程中,在合适的条件下,有一部分正离子可能转换为负离子。这是目前串列式静电加速器上用的负离子源用来得到负离子的基本原理。负离子流的强度决定于下列两个因素:(1)正离子流强度;(2)从正到负的转换系数。不同的条件下,转换系数是不同的,而在达到最大的转换系数之后,主要问题是要有足够大的正离子流以获得所要求的负离子流。

并不是所有的元素都可以形成负离子。实验上观察到的原子负离子已有 33 种(见表 2)。现在我们只就 H^- 离子源作一些讨论。

表 2 实验观察到的原子负离子

周期 \ 类	1	2	3	4	5	6	7	8	0
1	H^-								He^{--*}
2	Li^-		B^-	C^-	N^-	O^-	F^-		
3	Na^-		Al^-	Si^-	P^-	S^-	Cl^-		
4	K^-					Cr^-			
	Cu^-			Ge^-	As^-	Se^-	Br^-		
5	Rb^-								
	Ag^-			Sn^-	Sb^-	Te^-	I^-		
6	Cs^-								
	Au^-	Hg^-	Tl^-	Pb^-	Bi^-				

* He^{--} 离子是处在亚稳的激发态。

使 H^+ 转换为 H^- 的方法有两个:(1)让 H^+ 通过固体薄膜而转换为 H^- 。当 H^+ 的能量为 4 千电子伏时,通过几微克/厘米²铝箔, $H^+ \rightarrow H^-$ 的转换系数为 6%。这种方法的转换系数最大而且简便,但薄膜只能承受很弱的正离子流袭击, H^+ 离子流强度限于几微安/厘米²以下。这种方法只能给出 0.1 微安数量级的 H^- 离子流,不能满足加速器的要求。(2) H^+ 通过气靶而转换为 H^- 。对 H^+ 的流强没有限制。现在实际上在加速器上所采用的负离子源就是采用这种方法的。其中又可以分为三类:(i)利用高频离子源出来的氦离子通过吸极孔道时与氦气分子的碰撞,使其中一部分转换成 H^- 。希尔雷伊(Хирный)采用内径 2.5 毫米、长 45 毫米的吸极,曾得到了 20—22 微安的 H^- 离子流^[12]。(ii)用氦气作气靶,但把正离子的引出和转换两个过程分开。由于正离子引出的最佳条件并不和得到最大转换系数的条件相同,分开之后,就可以使两者都处在最佳条件下,从而提高负离子流。用氦气作气靶,当 H^+ 的能量为 9—15 千电子伏时, $H^+ \rightarrow H^-$ 的转换系数为 2%。怀恩曼等^[7]在 1956 年就是用这种方法获得了 30 微安 H^- 离子流。(iii)用蒸汽作为气靶,在真空系统内用冷凝法捕集,然后再蒸发,循环使用,可以不必用抽气速率很高的真空泵。弗盖里(Фогель)等^[13]用超音速汞蒸汽靶,得到了 70 微安 H^- 离子流。道顿(Dawton)^[14]也用这种蒸汽靶,得到了 200 微安 H^- 离子流。

负离子源的根本问题实质上就是如何获得很强的正离子流的问题。近年来发展很快的阿登纳(Ardenne)型双等离子体离子源可以产生很强的正离子流^[15],已经被用来作为产生负离子的正离子源。

3. 电子剥除装置和聚焦的要求 常用的电子剥除装置有两类:(1)薄膜:在英国哈威尔原子能研究中心的串列式静电加速器中,负离子通过 4—5 微克/厘米²厚的碳薄膜而转换成正离

子。这种方法对負离子所成的象的大小和位置的要求不是很臨界的,但是薄膜所允許通过的离子流强度有限,大約数微安,所以这种方法的采用是有一定的限制的。(2)气靶:負离子通过一段名叫电子剝除孔道的細孔管道。英国阿德馬斯頓原子武器研究中心的串列式靜电加速器的电子剝除孔道长 609 毫米、直径 3.6 毫米,孔道内气压为 2×10^{-2} 毫米汞柱,气体是氧,气耗約 5 毫升/时。这种装置对离子束聚焦要求是很严的,为了使离子束穿过剝除孔道时的損失最小,要求在孔道的中心成象。当加速器的能量改变时,在长期運轉中,离子束的位置应固定不变。根据英国原子能委员会的两架串列式靜电加速器的經驗,对剝除孔道准直的要求很高,調整得很好时,約有 50% 的穿透率。

从上面分析看来,用薄膜方法剝除电子,需解决薄膜制备的問題,而聚焦系統的設計可方便一些。用剝除孔道时制造上沒有問題,但必須解决要求很高的聚焦問題。两者是各有优劣。

展 望

提高串列式靜电加速器的能量是它的主要发展方向。提高能量有两条途径可走。一条是进一步提高单級靜电加速器的能量,从而提高二級串列式靜电加速器的能量。另一条是采用三級或四級串列加速方法。第二条途径是在单級靜电加速器現有水平的基础上进行,看来最现实,因此在二級串列加速获得成功不久,就开始进行三級串列式靜电加速器的建造了。

实现三級串列的方法有两种:(1)将两架二級串列式靜电加速器串联起来,第一架是負高压,第二架是正高压,用中性粒子注入第一架,让它 在高压电极內轉換为負离子,然后受到加速,再进入第二架(图 3)。(2)在单級靜电加速器的高压电极內产生負离子,即将一个单級和一个二級串列式靜电加速器串連起来。

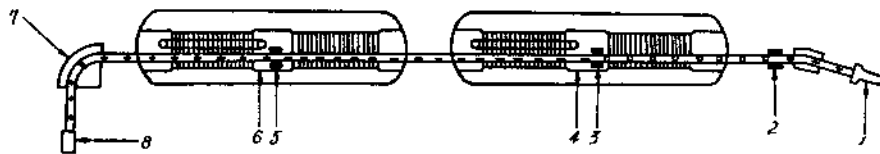


图 3 三級串列式靜电加速器示意图

1——离子源; 2——中和孔道; 3——电子附加孔道; 4——高压电极(負高压); 5——电子剝除孔道; 6——高压电极(正高压); 7——分析磁铁; 8——靶子。

第一种方法保持了离子源在鋼桶之外的优点,离子流强度在理論上可比第二种方法大。用氫气气靶,从 H^+ 轉換为 H^0 最多可达 87%, H^0 轉換为 H^- 也有 2.2%, H^- 轉換为 H^+ 則几乎是全部。但是中性粒子由于无法聚焦,以及和加速管内剩余气体分子碰撞等原因,在到达高压电极前的損失很大,因此最終的离子流很弱。高压工程公司采用这种方法的三級串列加速的初步試驗結果,最終离子流只有 0.15×10^{-3} 微安^[2]。在这种加速器中,必須提高加速管的真空度,特别是高压电极附近的加速管的真空度,在高压电极內應該安装鈹离子泵来輔助抽气。

鉴于第一种方法所遇到的困难,第二种方法虽然要把負离子源放到高压电极內,因而丧失了很多优点,但在目前技术上有把握的。因此,現在正在建造中的两架三級串列式靜电加速器都采用这种方法。高压工程公司为特克薩斯大学建造的三級串列式靜电加速器,預期質子能量为 17.5 兆电子伏,流强 4 微安(单級 5.5 兆电子伏)。英国牛津大学建造的一架三級串列式靜电加速器,預期質子能量为 20—22 兆电子伏(单級 8—10 兆电子伏)。

不論采用那一种三級串列加速方法,都需要用两台加速器,設備比較复杂。第一种方法离子流太弱,第二种方法負离子源在鋼桶內,最終离子流强度必然因此受到限制,加速器運轉的可靠性也必然大受影响。

从以上分析看来,要进一步提高串列式静电加速器的能量,看来还是走第一条路较好,应该从基础作起,即从提高单级静电加速器的能量作起.如果单级能达到10兆电子伏,则用二级串列就可达到20兆电子伏,比上面提到的用三级串列来达到20兆电子伏,肯定要优越得多.单级静电发生器最高电压曾达14兆伏,问题出在加速管上.估计用小孔径加速电极来提高加速管的耐压水平是有很大希望的.最近几年内制造出耐压10兆伏的加速管不是不可能的.因此,提高加速管的耐压水平仍是今后静电加速器设计制造中的一个极为重要的研究课题.

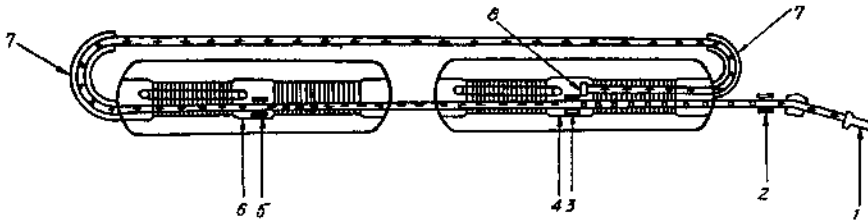


图4 四级串列式静电加速器示意图

1—离子源; 2—中和孔道; 3—电子附加孔道; 4—高压电极(负高压); 5—电子剥离孔道; 6—高压电极(正高压); 7—180°偏转磁铁; 8—靶子.

从目前静电加速器的发展看来,估计在今后5—10年内二级串列式静电加速器的最高能量可到20兆电子伏(质子),质子流可达数十微安,三级串列可到30兆电子伏(质子).

在用中性粒子入射的三级串列式静电加速器上,加两个偏转180°的磁铁,把三级串列加速的粒子总共偏转360°打到第一个二级串列式静电加速器(负高压)高压电极内,就构成四级串列(图4).四级串列虽可进一步提高能量,但限制很大.首先这种三级串列方法的离子流很弱.最重大的缺点是靶子在高压电极内,很难用来作核反应工作.但在实现中性粒子入射的三级串列式静电加速器后,再加两个磁铁就可做成四级串列式静电加速器.尤其加速重离子时,重离子带有多个正电荷,再加速一次,能量提高很多.如果三级串列能量为30兆电子伏(质子),氧核如带有6个正电荷,则二级串列为70兆电子伏,三级为80兆电子伏,而四级可达140兆电子伏.可用这种重离子产生某些同位素等.在此特定条件下,四级串列还有一定发展前途.

参 考 文 献

- [1] *Nuclear Power*, 6, No. 63, 63 (1961).
- [2] P. H. Rose, *Nucl. Instr. Methods*, 11, 49 (1961).
- [3] R. S. Bender et al., *Rev. Sci. Instr.*, 23, 542 (1954).
- [4] L. W. Alvarez et al., *Rev. Sci. Instr.*, 26, 111 (1955).
- [5] L. W. Alvarez, *Rev. Sci. Instr.*, 22, 705 (1951).
- [6] W. H. Bennett, U. S. Patent, No. 2206588 (1937).
- [7] J. A. Weinmann, J. R. Cameron, *Rev. Sci. Instr.*, 27, 288 (1956).
- [8] R. J. Van de Graaff, *Nucl. Instr. Methods*, 8, 195 (1960).
- [9] K. W. Allen et al., *Nature*, 184, 303 (1959).
- [10] H. E. Gove, *Nucl. Instr. Methods*, 11, 63 (1961).
- [11] K. W. Allen, *Nucl. Instr. Methods*, 11, 93 (1961).
- [12] Ю. М. Хярынь, *ПТЭ*, № 2, 51 (1958).
- [13] Я. М. Фогель и др., *ЖТФ*, 29, 1381 (1959).
- [14] R. H. V. M. Dawson, *Nucl. Instr. Methods*, 11, 326 (1961).
- [15] M. Von Ardenne, *Tabellen der Elektronenphysik, Ionenphysik und Ultramikroskopie* (Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1958), Band 1, 548.

(编辑部收稿日期1963年4月13日)