

神通广大的射线装置——带电粒子加速器

方守贤 梁岫如 编著



清华大学
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

3 11

TG58
F-28

神通广大的射线装置

——带电粒子加速器

方守贤 梁岫如 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

带电粒子加速器的发展,不仅为高能物理(粒子物理)研究提供了强大工具,而且被广泛应用到工业辐照、医疗设备消毒、肿瘤医疗、食品保鲜、材料改性等方面,神通广大,令人称奇。本书深入浅出地介绍了各类加速器的原理、发展过程和应用,并介绍了最新的发展动向。

书 名: 神通广大的射线装置——带电粒子加速器

作 者: 方守贤 梁岫如 编著

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

责任编辑: 蔡鸿程

印 刷 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 7 插页 1 字数: 182 字

版 次: 2001 年 2 月第 1 版 2001 年 2 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-01064-1/TL·6

印 数: 0001~4000

定 价: 16.00 元

第一部分

带电粒子加速器的发展

- ⊙ 什么是“粒子加速器”
- ⊙ 查根问源——加速器家族的三个根系
- ⊙ 第二根系的大发展——由低能走向中、高能
- ⊙ 高能加速器的今天和明天



什么是“粒子加速器”

加速器的全名叫做“带电粒子加速器”。它是利用电磁场来加速带电粒子如电子、质子、离子等的装置,可以使粒子的速度达到几千千米/秒、几万千米/秒,甚至接近光速(光在真空中传播的速度是 30 万千米/秒)。由加速器产生的高速带电粒子神通广大,既可以用来变革原子核,进行物质基本结构的研究,又可以应用到国民经济中的许多领域和国防建设。

我们将在本书中简要介绍一些主要粒子加速器的原理、结构、性能和发展历史,使读者了解为什么要发明加速器,在近几十年的时间里加速器为什么有如此巨大的发展,为什么要花费巨额资金建造高能加速器等等。在后面的章节里,再来介绍加速器在国民经济各领域中的广泛应用。

1.1 加速器就在你的身边

显像管是加速器的雏形 科学发展到今天,作为高科技产品的电视机和电脑已普及到了千家万户。当你看电视或者操作电脑时,你可曾想到,你眼睛盯着的屏幕背后的显像管其实就是一个小小的电子加速器,也可以说是粒子加速器的雏形。

我们就从显像管的结构说起,来看看使屏幕上出现文字或图像的电子束是如何产生的,从而了解粒子加速器的基本结构。

图 1.1 是显像管的示意图。它有一个密封的玻璃外壳,里面被抽成真空。一端是电子枪,依次是高压电极和偏转系统,到另一端的荧光屏。由电子枪产生的电子束,其强度受影像信号的控制。电子束从电子枪射出后先经过聚焦,在高压电极的作用下加速,能量得到

提高,高速向前运动,并受到电极的偏转作用,使电子束自上而下,作水平方向的扫描,在荧光屏上形成明暗程度不同的亮点。可见,它的最基本部件是产生电子束的电子枪,使电子束聚焦的聚焦线圈,以及使电子获得能量的高压电极和控制电子束流横向运动的偏转系统。这些部件被封在抽成一定真空度的玻璃管里。

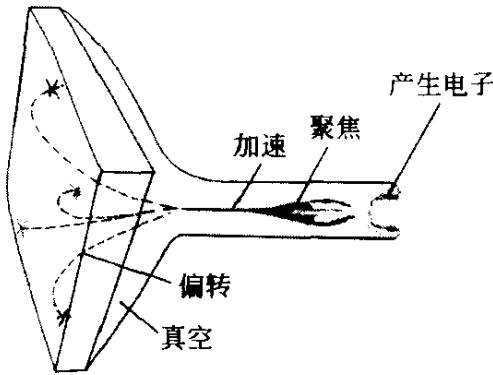


图 1.1 显像管中的电子束

麻雀虽小,五脏俱全 在粒子加速器中,被加速粒子的能量要比显像管里的电子能量高千万倍到亿万倍甚至更高。因而,它是比显像管大得多的装置。但是它们在结构上可以类比。如显像管中的电子枪对应于加速器的电子枪或离子源,只是式样不同和结构更复杂,显像管中加速电子用的高压电极相应于加速器中的高压加速电极及加速腔;在显像管中控制电子运动的是电偏转板,使电子聚焦的是磁聚焦线圈,而在加速器中,用于控制粒子运动轨道和使束流聚焦的元件是品种多样的电磁部件,如导向磁铁、电聚焦元件或磁聚焦磁铁、多极校正磁铁等,此外,还有电磁偏转元件以供注入或引出用。在加速器中,为了减少粒子运动过程中因与残余气体碰撞而造成粒子的丢失和束流性能的变坏,所要求的真空度比显像管高几千倍到几万倍或更高,因而设置了专门的真空系统。

由此看来,粒子加速器并不神秘,它是一种用电磁场来加速和约束粒子的装置。由于对粒子能量和流强的不同要求,也由于每一种加速器都有各自的局限性,因而就发明了不同原理和不同结构的多种加速粒子的机器。图 1.2 是一台环形加速器结构示意图,由图可

见,显像管与加速器很相似,显像管虽小,也是“五脏俱全”。

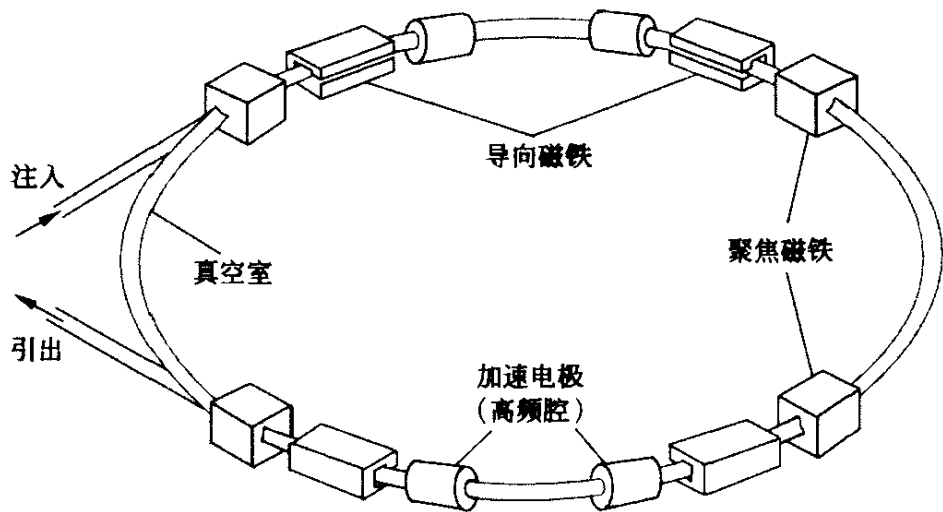


图 1.2 加速器结构示意图
(图中未把粒子拐弯时的导向磁铁全部画上)

在介绍加速器的种类和发展之前,我们先了解一些基本概念。

1.2 加速器其实是加能器

根据相对论原理,粒子的速度只能接近光速而永远不能超过光速,但是粒子的能量可以不受限制的增長。通常,用以光速 c 为单位的相对速度 β 来描述粒子的速度 v , $\beta = v/c$ 。在速度为 β 时,相应的总能量为 E ,如果用粒子速度为零时的静止质量 E_0 作单位,则粒子总能量与速度之间的关系式为:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{1.1}$$

能无限地接近光速,却不能等于光速 表 1.1 列出了电子能量 E_e 、质子能量 E_p 与其相应的速度关系。由表中的数据可以看出,粒子在低能时,速度随能量变化很明显,但粒子在能量很高时,粒子加速过程中速度 β 变化并不大,只不过是 在小数点后面不断地增加 9,无限地接近 1,但永远不等于 1,其能量 E/E_0 却会迅速增长。因此,加速器实际上是增加了粒子的能量,准确地说是“加能器”。“粒子加

速器”只是沿用了在它发明初期所取的名字,延用至今未变。

表 1.1 电子、质子的能量和速度的关系

β	E/E_0	$E_e/\text{MeV}^{①}$	E_p/MeV
0.9	2.294	1.17	2151
0.99	7.09	3.61	6649
0.999	22.37	11.40	20979
0.9999	70.71	36.1	66328
0.99999	223.6	114.0	209744
0.999999	707.1069	360.6	663266

1.3 怎样来描述一台加速器的性能

加速器的主要性能指标是:能量、流强、发射度和能散度。

能量 对于微观粒子如电子、质子等,以电子伏(eV)为能量单位。它的定义是:带有一个电子电量的粒子,通过1伏电位差所获得的能量,叫做一个电子伏(1eV), $1\text{eV}=1.602\times 10^{-19}\text{J}$ (焦耳)。

在粒子加速器发展历史上,把加速器的能区划分为三段:100 MeV 以下为低能,100 MeV 到 1GeV 为中能,1GeV 以上为高能。

在微观世界里,1GeV 可不是个小数 要得到能量大于 1GeV 的粒子,必须建造很大的高能加速器,其规模比几座大楼还大。而在宏观世界中,1GeV 的能量是微不足道的。比如,一个 1 瓦的小灯泡在 1 秒钟内消耗的能量为 $6.3\times 10^9\text{GeV}$ 。但若是把 1GeV 或 1TeV 的能量集中到一个电子或一个质子的身上,那么就变成了一种神奇的力量。然而,做到这一点,并不是容易的事情。

流强 单位是安[培](A);

毫安(mA), $1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$;

① 关于粒子能量的单位见下节。

微安(μA), $1\mu\text{A} = 10^{-3}\text{mA}$;

纳安(nA), $1\text{nA} = 10^{-3}\mu\text{A}$ 。

有时也用每秒钟输出粒子的数目来表示流强。1 安[培]流强相当于每秒钟输出 6×10^{18} 个电子, $1\mu\text{A}$ 相当于每秒钟输出 6×10^{12} 个电子。通常加速器以脉冲方式输出束流, 如每秒钟 n 个脉冲, 脉冲的时间宽度为 τ , 则脉冲流强比平均流强大 $1/(n\tau)$ 倍。能量为 1GeV , 流强为 1mA 的电子流, 其功率为 1MW , 是相当大的。

发射度 当一束粒子流(束流)在加速器的真空盒里向前运动时, 束中的粒子在垂直于前进方向的横向平面中有一个空间分布范围, 即有一定尺寸。向前运动时, 还有一定的张角(角散度)。发射度定义为束流尺寸与张角的乘积, 单位是 $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ (毫米·毫弧度)。例如, 束流截面的水平尺寸为 1mm , 水平张角为 1mrad , 则束流水平发射度就为 $1\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。发射度是描写束流几何特性的物理量。

束流的截面与张角不可能同时减少 为什么要这样来定义束流的发射度呢? 因为这里有一个基本的物理定理——刘维定理。据此定理, 在保守系统中, 即如果粒子的能量不变, 发射度是一个不变量。也就是说, 虽然可以用聚焦透镜来改变束流横向尺寸, 以达到减少束流截面的目的, 但此时张角却增大了, 两者的乘积是不变的。如图 1.3 所示, 从图中可见, 聚焦前后的尺寸(a, a')及张角(φ, φ')的乘积不变, 即 $a\varphi = a'\varphi'$ 。所以发射度的大小直接表征了束流性能的好坏。

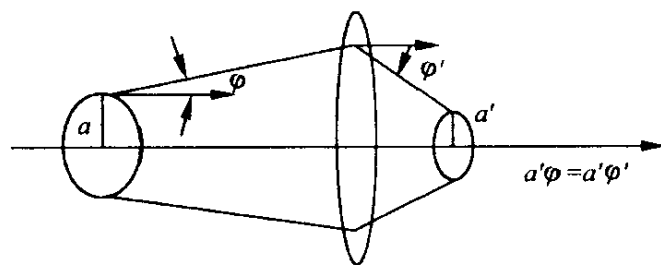


图 1.3 发射度



2

查根问源 ——加速器家族的三个根系

20 世纪初期,由于利用天然放射性粒子实现了原子核的变革,激发了人们寻求更高能量的粒子来作为“炮弹”的愿望。在当时科学技术发达的西方国家,发明家们几乎在同一时期提出了静电加速器(1928 年)、回旋加速器(1929 年)、倍压加速器(1932 年)的设想。并在 30 年代前后,建成了一批加速装置,得到了比天然放射性粒子能量高得多的质子、电子等。从世界上第一台粒子加速器运行以来,差不多已有 60 多年的历史。纵观带电粒子加速器的发展,可以按照其加速原理和结构的不同,分成三个根系,分别对应于三种不同的加速方法。下面按照三个根系的思路,介绍各自的发展历程和应用。

2.1 第一根系——高压型加速器

1. 人类科学史上的第一个人工核反应

第一条根系可追溯到 1919 年。英国科学家卢瑟福用天然放射源中能量为几 MeV、速度为 2×10^9 cm/s 的高速 α 粒子束(即氦核)作为“炮弹”,轰击作为“靶”的很薄的(厚度为 0.0004cm)金属箔,实现了人类科学史上第一次人工核反应。利用放在靶后的硫化锌荧光屏测得粒子散射的分布,发现了原子核本身有结构,从而激发了人们用快速粒子束来变革原子核的强烈愿望。

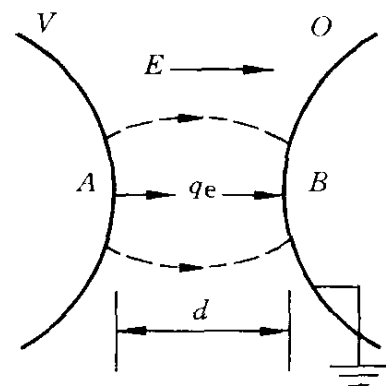
卢瑟福认为,要继续这一试验,至少需用比 α 粒子能量更高(大于几 MeV)的粒子,这超过了当时的“静电”机器的加速能力。

1928 年,伽莫夫预言,基于量子隧道效应,即便能量低于天然放射性 α 粒子,也可以透入到原子核内部引起核反应,也许 500 keV 就

够了。这个推断激发了科学家研制加速粒子的装置的兴趣和决心。1932 年,在卢瑟福的支持下,他的学生考克饶夫特和瓦尔顿建成了第一台倍压加速器,成功地把质子的能量加速到 700 keV。在进行试验时,当用 600keV 的质子束去轰击锂靶时,就发生了核反应。这是用人工方法加速粒子引起的第一次核反应。为此,考克饶夫特和瓦尔顿获得了 1951 年的诺贝尔物理奖。这台加速器由于流强高,使用了许多年,现在陈列在英国博物馆里。

用高电压加速粒子 几乎同时,美国科学家范德格拉夫发明了静电加速器,并建成了能量为 1.5MeV 的静电加速器。经长期改进后,到 1932 年开始进行核物理实验。

上面两种加速器都是利用如图 2.1 所示的直流电压来加速粒子的。图中 AB 为两个电极,电位分别为 V 和 0。当一个电荷为 qe (e 为电子电荷量,取正)的粒子从 A 走到 B 时,就会得到加速,相应的粒子能量增加为 $\Delta E=qeV$ 。所以要得到高能量的粒子,就要求提高电压 V 。电压越高,电极表面的电场强度也就越大,到一定程度就会引起火花放电,此时 V 就不能再提高了。因此,利用直流高压加速粒子的能量不可能太高。



A,B 为电极,A 处于高电位 V ,B 接地

图 2.1 高压加速原理示意图

高压加速器按照高压电源的类型不同,可分为倍压加速器、静电加速器、高频高压加速器、绝缘芯变压器型加速器和强流脉冲加速器

等类型。它们主要的区别在于产生高压的方法不同。倍压加速器最多可产生(700~800) kV 的电压,而静电加速器最多也只可得到十几 MV 的电压,对于更高的能量要求就难以满足了。静电加速器早期在核物理研究及应用中占有重要的位置。下面就以静电加速器为例作具体介绍。

2. 静电加速器

质子静电加速器的结构示意图见图 2.2。它与其它高压加速器一样,由高压电源、高压电极、离子源或电子枪、加速管和绝缘支柱等部件组成。唯一不同的是它的高压电源采用了传送带式的静电起电机。它由输电带、上下转轴、喷电梳与刮电梳、喷电电源以及辅助设备组成。喷电电源通过喷电梳将正电荷交给了约半米宽的输电带,转轴把输电带转移到高压电极内部,再由刮电梳将正电荷刮下后传给高压电极。高压电极是一个半径(r)很大的中空金属半球,正电荷分布在高压电极的外表面。随着电荷密度的不断增加,半球的电压逐步升高,形成很高的对地电位。一根被抽到 10^{-6} 托^①的真空加速管,一端与高压电极相连,另一端接地,在管内形成加速电场。处于半球内部的离子源将所需要的正离子注入到加速管内,离子被加速管内的电场加速到另一端获得能量。离子得到的能量为所带电荷 qe 与高电压 V 的乘积,即 $E=qeV$ 。

尖端放电限制了电压的进一步提高 静电加速器的发展主要是围绕着如何提高端电压这一目的进行的。在早期,电压主要受到高压电极打火放电的限制。正如大家都熟悉的日常生活中会遇到的尖端放电现象,它是作为绝缘介质的空气被电击穿的现象。物体的曲率半径越小,就越容易击穿。所以为了达到高电压,电极半径要尽可能大。高压电极是一个半径非常大的球形。1933 年,范德格拉夫最初建造的两个高压电极的直径各有 4.5m。他们希望在这样大的一

① 托(torr)是真空压强的单位,1 托 = 133.322Pa。

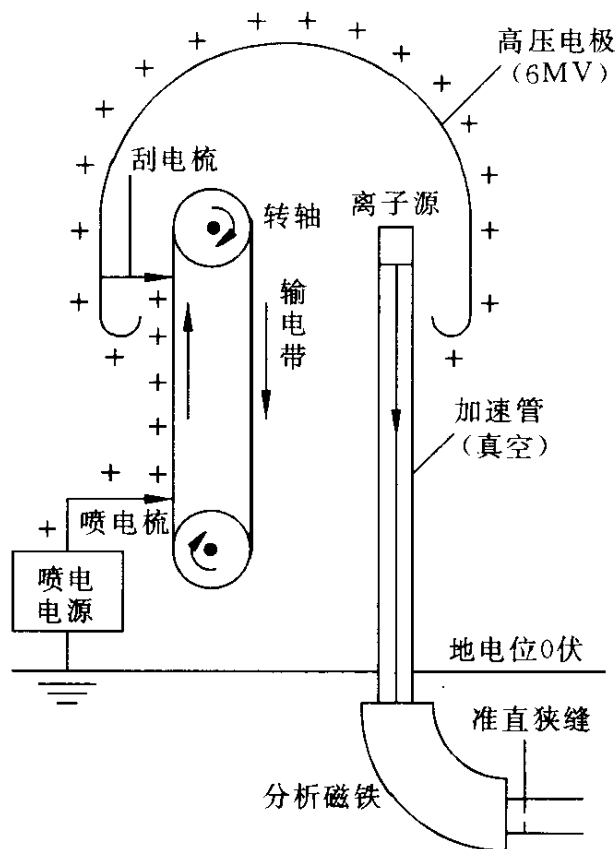


图 2.2 质子静电加速器结构示意图

正一负两个电极之间获得 10MV 的电位差。但事与愿违，在 1936 年调试时，正负极间电位差只达到 5.1MV。事实表明，击穿电压并不随高压电极直径的加大而线性上升。在大间隙大电位差的情况下，气体的击穿场强比小间隙小电位差的情况低得多。

总体的作用并不等于单个作用的总和 所以人们开始探索改变绝缘介质的办法。1940 年，赫布等人将整个静电加速器安装在一个密封的钢筒里。钢筒里充有含少量氟里昂气体的 8 个大气压的高压气体作为绝缘介质。在高压电极外面增加了两个中间电极，用以改善高压电极到钢筒间的电场分布形态等。采取了这些办法之后，静电加速器的能量提高到了 4.5MeV。此时受到加速管耐压性能的限制，再进一步提高能量就十分困难了。1946 年，美国科学家设计了 12MeV 的静电加速器，也由于加速管耐压问题而未能达到设计指

标。加速管在分段试验时,每段可达 1.7MV,但 4 段连在一起却只能稍稍高于 5MV。

静电加速器主要用来加速质子,也可用来加速电子。在 50 至 60 年代,电子静电加速器有过较大的发展,主要应用于辐照加工、探伤、医疗等方面,但后来又逐步被电子直线加速器所取代。

目前,静电加速器输出的粒子(质子、氘核)流强一般为 $10\mu\text{A}$,最高可到数百微安。如加速电子可达数百微安甚至几毫安。据不完全统计,世界上投入运行的静电加速器有 400 多台。

3. 串列加速器

顾名思义,串列加速器就是把两台静电加速器串联起来。由于静电加速器所能达到的最高能量为(5~6)MeV,如果串连两台这样的加速器,能量是否加倍呢? 1937 年,有人提出了这样的设想,但是由于当时负离子源强度太低,未能实现。到 50 年代中期,应用电荷交换的方法,发展了负离子源技术,串列加速器的建造被提到了日程上。

离子变号,能量加倍 图 2.3 是串列加速器的示意图。它的基本思想是利用同一个高压电极进行两次离子加速。具体安排是:在钢筒中心有一个高压电极,使它处于正高压。在其两边各连接一根加速管,将负离子源安放在钢筒的外边,处于地电位。负离子源中的中性原子或正离子束通过一个有大量电子的孔道,一部分中性原子或正离子就得到了附加电子,转化为单价的负离子。负离子在加速场的作用下被加速到高压电极。此时,被加速的单价负离子穿过安置在高压电极内的一段低压气体或固体薄膜,至少被剥离掉两个电子,使负离子变成正离子。这时,正离子就会再一次被高压电极的正高压加速到另一端,使离子得到两次加速,实现离子能量的加倍。

50 年代末到 60 年代初的几年里,美国高压工程公司先后推出了能量在(13~20)MeV 的串列静电加速器。现在,世界上有能量在 10MeV 以上的这类加速器约 20 多台。它成为低能核物理及中子物

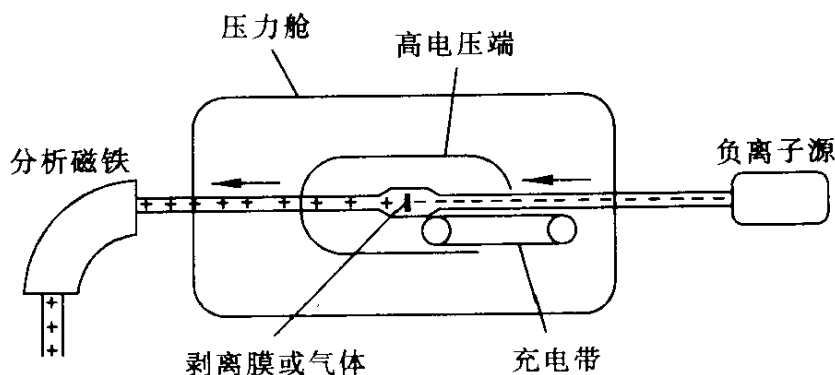


图 2.3 串列加速器示意图

理进行精密实验的主要工具。

其它类型的高压加速器的能量都比较低(小于几 MeV),但有高的束流强度,如高频高压加速器、绝缘芯变压器型加速器、电子帘加速器等,很适合于工业领域的应用,如辐照加工等。有的如倍压加速器,后来被用作中子发生器及质子直线加速器的注入器。在国防科研领域,用来进行模拟核武器效应研究的加速器,如强流脉冲加速器,也属于这种类型。

2.2 第二根系——谐振型加速器

为了研究原子核的形状、核内结构以及各种性质,需要设法变革原子核。核物理学家希望加速器专家能够提供更高能量的机器,这就必须另辟途径,寻求新的加速原理。

1. 谐振加速原理的提出

求助于交变电场 1924 年,瑞典科学家依辛提出用交变电场加速粒子的思想,即所谓“谐振加速”。

他的基本想法是既然直流电压无法提得很高,那么能否让粒子多次通过由同一个电压建立起的静电场,这样自然能比一次通过电压间隙得到更多的能量。最直观的设想是用一静磁场让粒子作圆周运动时多次通过轨道上某处的直流电压,每通过一次,就获得一份能

量。但这是不可能的。因为在由直流电压形成的静电场中,粒子从某点起始到达另一点时,粒子得到的能量正比这两点之间的电位差。如果粒子转完整整一圈再回到起始点,该粒子能量就不会增加。这一点可由图 2.4 清楚地看到。该图中的细线是电场分布,粗线为粒子轨道。粒子从 $A \rightarrow B$ 得到加速而从 $B \rightarrow O \rightarrow A$ 时受杂散电场的减速,一圈后总的能量增益为 0。

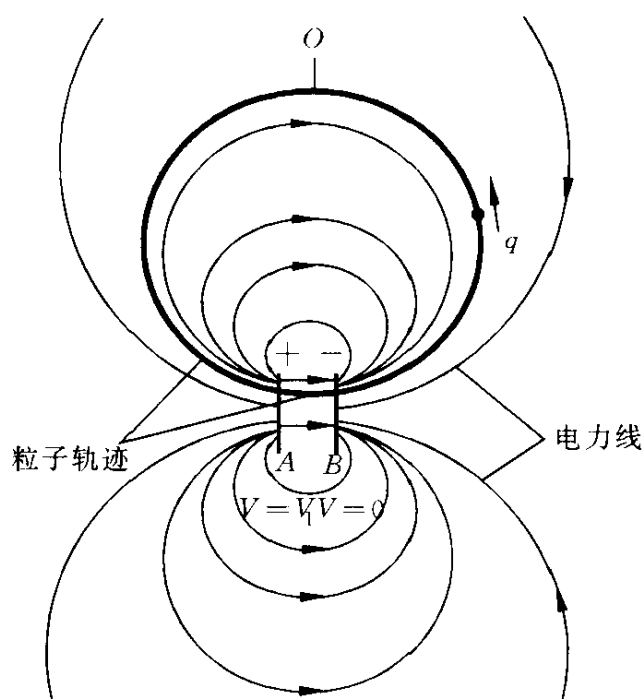


图 2.4 粒子多次通过同一个静电场,得不到加速

谐振加速使粒子能量得到飞跃 于是,依辛就想要利用一个随时间交变的电场。具体想法是沿直线排列一系列的叫做漂移管的金属筒状电极(图 2.5),把奇数的漂移管和偶数的漂移管分别联结到高频电源的两个电极上。设该粒子电荷为正,当粒子到达第一和第二漂移管的间隙时,这两个漂移管分别处于正、负电位,有一电场指向它运动的方向,使粒子得到加速。而当粒子在第二个漂移管内部运动时,由于电场被屏蔽,所以既无加速,也无减速。如果第二根漂移管的长度选择得恰好使得粒子通过它的时间等于高频场的半周期(或半周期的奇数倍),那么当粒子到达第二、第三根漂移管间隙时,