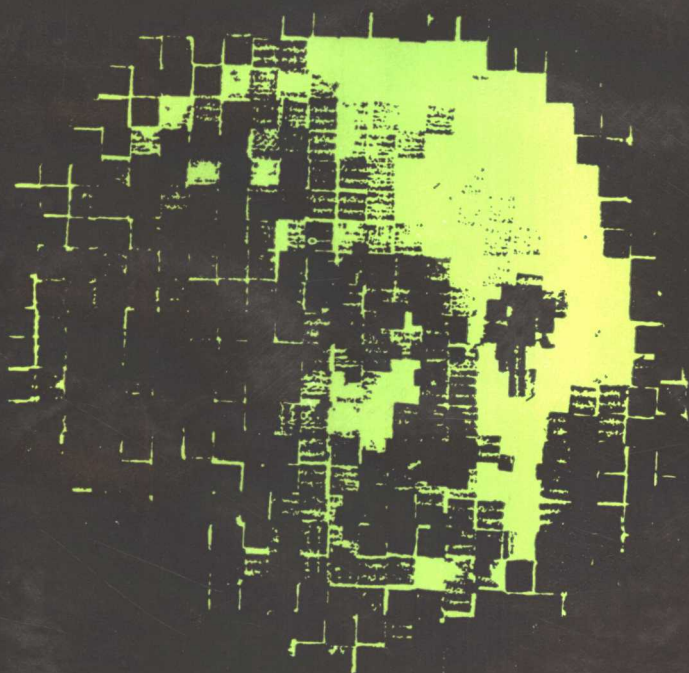


浙江大学出版社

高能微波电子学

尤田铎 著



高能微波电子学

尤田 鍊 著

浙江大学出版社

高能微波电子学

尤田鍊 著

责任编辑 应伯根

*

浙江大学出版社出版

(杭州玉古路 20 号 邮政编码 310027)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

德清第二印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

*

850×1168 32 开 6 印张 168 千字

1995 年 11 月第 1 版 1995 年 11 月第 1 次印刷

印数:0001—1000

ISBN 7-308-01613-7/TN·038 定价:5.20 元

目 录

1 绪 论	1
1.1 加速器	1
1.2 粒子和射线	1
1.3 加速器的分类	3
1.4 加速器的用途	4
1.5 加速器的一般构成	6
1.6 加速器的主要指标	7
2 电子直线加速器概述	10
2.1 电子直线加速器的一般构成	10
2.2 高频行波电场的加速作用	12
2.3 电子在加速过程中速度变化规律	16
2.4 同步加速条件	18
3 相对论效应修正	21
3.1 电子速度的相对论效应	21
3.2 电子质量的相对论效应	22
3.3 相对论的质能关系定律及速度修正系数	24
3.4 计及质量变化引起的修正	27
3.5 计及电子束本身磁场效应的修正	30
4 慢波结构——盘荷波导加速管	32
4.1 引言	32
4.2 电磁波在光滑圆波导中的传播	32

4.3	慢波结构	35
4.4	盘荷波导的色散方程	39
5	电子在直线加速器中的运动	72
5.1	相运动及聚束器	72
5.2	电子动力学	81
5.3	束流聚焦	103
5.4	聚束器的指标及设计原则	110
5.5	本章小结	121
6	微波功率传输特性及盘荷波导设计计算	124
6.1	加速场强与微波功率、盘片孔径的关系	124
6.2	微波功率在盘荷波导壁上的损耗	129
6.3	束流对微波功率的吸收	137
6.4	群速度、充电时间和品质因素	141
6.5	有束流负载时盘荷波导尺寸的计算方法	144
6.6	常阻抗结构与常梯度结构	149
7	加速器的工作特性	152
7.1	加速器的工作特性	152
7.2	影响加速器工作特性的因素	158
7.3	对各系统稳定度的要求及措施	172
7.4	加速器输出参数变化的原因及事故判断	176
附录一	与求特征值和特征函数相联系的变分问题	179
附录二	贝塞尔函数	183
主要参考文献		188

1 绪 论

1.1 加速器

加速器的全名是“带电粒子加速器”。它是一种利用电磁场使带电粒子加速到高能装置。只有带电粒子才能在电场作用下获得加速，从而得到能量。中性粒子必须先进行电离然后再加速。经加速的带电粒子可以用来产生次级射线，例如 γ 射线、中子、多种介子、超子、反粒子等。

从上述角度看，X 射线管就是一种用静电场加速电子，从而获得次级 X 射线的加速器。

1.2 粒子和射线

上面提到的所谓“粒子”其实是一种泛称。我们所说的基本粒子并不是构成物质的最最基本的单元。所谓的“基本粒子”也是无限可分的，它是人类对原子结构认识的一个阶段。

我们知道，地球上的所有物质都是由 92 种不同的元素组成。最轻的元素是氢，其次是氦、锂、铍……。第 92 种，即最重的是铀。后来在实验室里借助于高能加速器又制造出 13 种，一直到 105 号超铀元素。构成元素的最基本单位是该元素的原子。原子的直径只 10^{-8}cm 左右。氢原子质量只有 $1.6733 \times 10^{-24}\text{g}$ 。最重的原子也只有 $3.951 \times 10^{-22}\text{g}$ 。

原子由原子核和轨道中的电子组成。原子核是很小很小的，其直径只有整个原子的大约十万分之一。原子核带正电，电子带负电，两

者电荷相等,原子呈中性。当原子失去一个或几个外层绕行电子时,它就带有正电,称为“正离子”。

到1932年,人们知道了原子核由质子和中子组成。质子带正电荷,它的正电荷量与电子的负电荷量相等,其质量为 $1.67243 \times 10^{-24} \text{g}$ 。中子是不带电的中性粒子,质量比质子质量略大一些,为 $1.6747 \times 10^{-24} \text{g}$ 。

电子的质量只有质子质量的1836分之一,即 $9.1085 \times 10^{-28} \text{g}$ 。

质子、中子、电子都是构成原子的“基本粒子”。

根据各元素的原子外层绕行电子的数目顺序,以及各元素化学性质相似的规律,排列成元素周期表。在元素周期表上占有相同位置的不同元素称为同位素。同位素的原子核是由相同数目的质子,不同数目的中子组成的。

同位素有稳定的,也有不稳定的。不稳定的同位素会自发地放出 α 射线或 β 射线,或其它射线,然后衰变成稳定的同位素,常称为放射性同位素。

所谓“射线”通常是指具有一定能量的“粒子流”。 α 射线(甲种射线)就是具有一定能量的 α 粒子流。 α 粒子就是由两个质子和两个中子组成的氦原子核,带有两个正电荷。

β 射线(乙种射线)是具有一定能量的电子流。

γ 射线不带电,是一种电磁波,和光线一样,但波长比可见光短得多。也就是说, γ 射线的能量比可见光大得多。

α 射线、 β 射线、 γ 射线均可以在加速器上用人工方法直接或间接地获得。

氦核在电场力作用下加速到一定能量,就成为 α 射线。

电子在电场力作用下加速到一定能量,就成为 β 射线。一般称人工得到的 β 射线为电子束或电子线。

γ 射线不带电,无法直接用电场加速。但它可以用经加速后具有一定能量的电子束轰击由重金属制成的靶而得到。因电子束与靶作用时突然减速引起轫致辐射,它就是 γ 射线。当能量偏低时称为 $\times$ 射

线。能量超过 1MeV 时常称为 γ 射线。常用钨、金、铂做靶材料。

用加速重氢核(氘核),轰击氘靶或氚靶(引起核反应)可以得到中子。

1.3 加速器的分类

由于加速器本身所具有的特点,随着科学研究、工农业生产、医药卫生、国防对加速器需要的增长,以及科学技术、生产水平的不断提高,自 30 年代以来,特别是第二次世界大战之后,加速器获得了迅速的发展。不同类型的加速器相继出现。到目前为止,被广泛应用的加速器就有 20 多种,近三 ~ 四千台左右。

对于这样繁多的加速器可以有不同的分类方法。

根据被加速粒子的种类,可以分为:一、电子加速器;二、离子加速器;三、重离子加速器;现在还有全粒子加速器,它可以加速氢到铀的全部离子。

。还可以按被加速粒子的运动轨道来分类:一、直线轨道;二、圆形轨道;三、螺旋线轨道。

但更多的是按加速原理来分,可以归纳为四大类:

一、高压加速器

它是利用直流高压的静电场进行加速的。这类加速器可以加速电子,也可以加速质子、氘核、氦核以及其它重离子。例如倍压加速器、静电加速器、绝缘芯变压器式加速器、高频高压发生器、脉冲电子加速器、串列加速器、转子发电机加速器等都属于这一类。粒子的运动轨道是直线的。

二、感应加速器

它是利用电磁感应涡旋电场加速的。电子感应加速器就是这类加速器,它只能加速电子。电子运动的轨道是圆形的。

三、回旋式加速器

它是利用高频驻波电场加速的。这类加速器利用轴向磁场使粒子作回旋运动,多次通过高频驻波电场来获得加速。属于这一类型的加速器有回旋加速器、等时性回旋加速器、稳相加速器、同步稳相加速器以及电子同步加速器和电子回旋加速器等。

四、直线加速器

这是用微波电场加速的。例如电子行波直线加速器,电子驻波直线加速器和质子驻波直线加速器。

几十年来,我国的加速器事业获得了迅速的发展,已经能成功地制造出十几种加速器。包括倍压加速器、质子静电加速器、电子静电加速器、回旋加速器、等时性回旋加速器、绝缘芯变压器式加速器、高频高压发生器式加速器、电子感应加速器、中子管、电子回旋加速器、电子直线加速器和重离子加速器。这些加速器在科学研究、工农业生产、国防建设、医药卫生方面发挥了很大的作用。高能质子加速器、重离子加速器、正负电子对撞机和同步辐射加速器的建造,使我国的加速器事业进入了世界的先进行列。

1.4 加速器的用途

加速器在科学研究、工农业生产、国防建设、医药卫生等方面有着广泛的应用。

一、在原子核物理、高能物理、中子物理方面的应用

加速器技术首先就是由原子核物理的需要发展起来的。人们称加速器为“轰击原子核的大炮”,把加速的带电粒子喻为“轰击原子核的炮弹”。随着高能加速器的出现,在原子核物理的基础上又发展了高能基本粒子物理。高速运动的粒子,不但可以轰击原子核,而且还

可以轰击“基本粒子”，研究各种“基本粒子”的产生、湮灭、衰变和散射运动的规律，从而探索“基本粒子”的内部结构。

二、在工农业辐照处理方面的应用

工农业上常用加速器作为强辐射源，进行各种辐射处理。辐射可以使聚合物分子形成交联结构，改善性能。聚乙烯经电子束辐照后，耐热性由 70°C 升到 200°C ，而且具有了热塑性。我国工业生产中已经采用了这一工艺。辐射方法还可以代替天然橡胶和人造橡胶的硫化处理。用辐射方法不但可以省去硫化设备，而且橡胶不易老化，提高了抗磨性。

辐射处理可以提高钢材的机械强度。据我国有关单位反映，刀模具经辐照后可提高机械强度几倍到几十倍，正在设法用于研制长寿命的汽缸和钻井钻头。

辐射还可以用于化学的合成工艺。用辐射合成 666，反应快、产量高。还可以用于辐射固化。

农业上，可使用加速器辐射处理，改良品种、提高产量、杀菌、灭虫、延长储存期。

在辐射处理方面，电子直线加速器由于本身具有束流功率大的特点，占有重要地位。

三、在无损伤方面的应用

γ 射线穿透力强，能使照像底片感光，在工业上用于无损探伤。用这种方法可以对大的钢铁部件（如大发电机主轴、反应堆的压力外壳、火箭外壳、火箭的固体燃料、锅炉及其它高压容器）进行无损探伤。我国生产的电子感应加速器在这一方面已作了大量工作。电子直线加速器由于剂量率高，在工业探伤上的应用有明显的优越性。

四、在医疗卫生方面的应用

目前世界上已有几百台加速器用于治疗肿瘤。我国保定变压器

厂、一机部机电所、保定玻璃厂和日坛医院试制成功医用电子感应加速器对癌的疗效良好,填补了我国医疗设备的一项空白。

除利用加速器产生的电子线和 γ 射线治癌外,目前世界上正研究利用中子和 π^- 介子治癌。由于 π^- 介子在人体内有着更好的剂量吸收曲线,以及 π^- 介子辐照对严重缺氧状态的癌细胞具有相同的杀伤能力(γ 射线和电子线对缺氧癌细胞杀伤作用差,常留后患,引起复发),因此疗效更好。

五、其它方面的应用

除上述各方面应用之外,加速器还可用于电子束焊接、钻孔、切削、活化分析、固体物理研究、半导体渗杂、模拟原子弹爆炸、反应堆材料的考验、同位素生产等。总而言之,加速器在科学研究、国防建设、工农业生产、医疗卫生方面已成为不可缺少的重要工具。

1.5 加速器的一般构成

各种加速器(无论是电子、质子还是各种离子的,也无论是直线轨道的或是圆形、螺旋线形轨道的)一般均由五大主要部分组成,如图 1.1 所示。

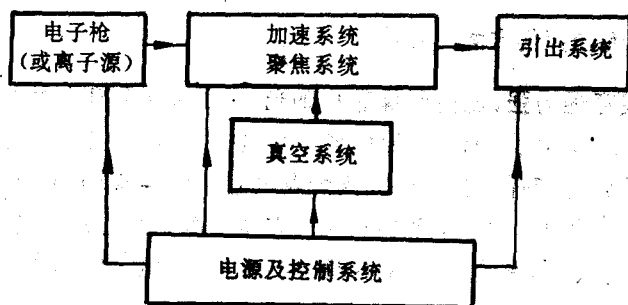


图 1.1 加速器一般构成方框图

一、产生带电粒子的系统

一般称为电子枪或离子源。电子一般由热发射或场致发射获得。离子一般由游离方法获得。然后用电场将它们注入到加速系统。

二、加速及聚焦系统

这是加速器的主体。它保证带电粒子从电子枪或离子源注入加速系统后,能顺利地获得能量。聚焦系统是利用电磁场力的作用来约束带电粒子,使之在整个加速过程不散开,不丢失。

三、真空系统

它保证带电粒子在加速过程中尽量避免和加速腔中的气体分子碰撞而丢失。通常要求真空度在 2×10^{-5} mmHg 以上。

四、引出系统

它的任务是使加速后的带电粒子,借助于电场或磁场偏离原来的轨道,或输送到所需要应用的方向上去。

五、电源及控制系统

它是使加速器各系统协调动作,保证加速器正常运行及防止事故发生的系统。

加速器是综合了各种先进技术的一种装置。它涉及机械精密加工、无线电、超高频、电工仪表、自动控制、真空技术,甚至化工、电子计算机等。因此,它的发展一方面取决于其它方面对它的需要,另一方面也取决于上述诸方面技术基础的发展。

1.6 加速器的主要指标

对各种不同加速器来讲,最主要的指标有两个:一是加速粒子的

能量,另一个是加速粒子束流的强度(简称流强)。除此以外还有束流功率、能谱等指标。

能量这个指标,可反映加速后的粒子轰击原子核时的轰击能力。能量越高,贯穿原子核的能力越强。粒子质量越大,速度越高则能量越大。

能量的单位,可以采用电子伏(eV)。

一电子伏是指具有一个电子电荷量的带电粒子在电场力作用下,经过一伏特电位差时所获得的能量。

然而,一般在加速器技术中,嫌这个单位太小,而习惯采用兆电子伏(MeV)为单位,即一电子伏的100万倍。

对加速器的能量要求并不是越高越好,而要根据加速器的用途而定。如对聚乙烯辐射,电子能量在3~6MeV范围就可以了。辐射薄膜还可以低一些。若对肿瘤进行 γ 射线的深部医疗,则电子能量在几兆电子伏或更高一些的范围为宜。但在高能物理研究方面,为了探索原子核“基本粒子”的内部结构,则希望有更高能量的加速器。例如,目前已经能把质子加速到400千兆电子伏以上,把电子加速到22千兆电子伏。

束流强度是反映被加速粒子数量多少的指标。单位时间内加速粒子越多,则束流强度越高。

束流强度的单位,在低能加速器中一般多采用微安(μA),个别的也有用毫安(mA)、安培(A)来表示的。

束流功率也是加速器常用的参数。它反映被加速的束流从加速电场所吸收的功率。

在加速器出口,输出的带电粒子流并不是都具有相同的能量。刚才提到的加速能量只是一个平均值的概念。实际上加速粒子流的能量是有一个分布的。束流按能量的分布情况称为能谱。能谱的指标,常用能谱半宽度 $\Delta V/V$ 表示,如图1.2所示。有些加速器,如用在科学研究上的,或用于医疗的电子直线加速器(要求束流偏转后使用的),要求束流的能谱要窄。而有些加速器,如用来辐射处理、电子束焊接、

切削加工等,则对能谱没有严格的要求,而着重要求束流功率要大。

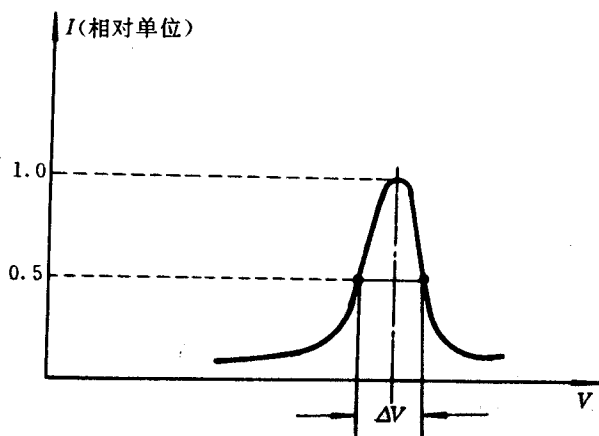


图 1.2 加速粒子流按能量的分布

2 电子直线加速器概述

2.1 电子直线加速器的一般构成

电子直线加速器是利用超高频电磁波的电场,加速电子到高能
的装置。由于在加速过程中电子的轨道是直线的,因此称为电子直线
加速器。

为了实现加速,首先要有电子。电子是由电子枪热发射产生。其
次还要有加速场。加速场给电子以作用力,使电子能量增加。另外,为
了避免电子在加速过程中和其它残余气体分子碰撞,加速还必须在
真空条件下进行。

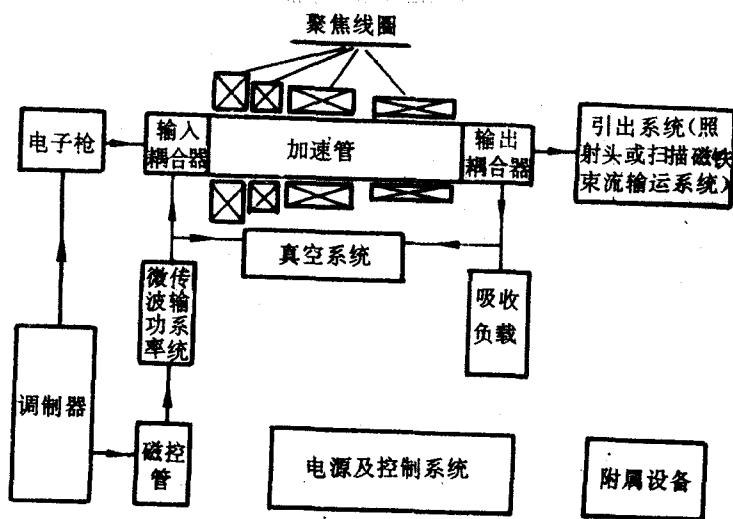


图 2.1 电子直线加速器主要系统方框图

本书着重讨论能量低于 $15 \sim 20\text{MeV}$ 的电子直线加速器中的问题。

电子直线加速器各主要系统组成的方框图如图 2.1 所示。

电子直线加速器的核心部分是加速系统,包括加速管和套在外面的聚焦线圈,它们保证电子的顺利加速。

其他还有:

一、微波功率传输系统

它包括磁控管、波导元件、输入输出耦合器、吸收负载等。它们提供加速电子所需要的微波功率,并保证微波功率的匹配传输。

二、束流系统

它包括电子枪、束流聚焦、导向线圈或偏转磁铁、束流输运管道等。它们提供加速所需的电子,并保证电子从发射到引出的整个过程中能无发散地沿轴线输运。

三、真空系统

它包括冷钛泵(或扩散泵)、升华泵(也可不用)、高真空阀门、充气阀、真空管道、预抽真空机组等。它们的作用是使整个加速系统内具有 $10^{-5} \sim 10^{-6}\text{mmHg}$ 以上的高真空,以保证电子在加速过程中不致和气体分子碰撞而丢失,以及避免加速系统内发生高频放电。

四、调制器

它是磁控管的电源,同时也是电子枪的负脉冲高压电源。

五、电源及控制系统

它包括全部的交流电源、稳压电源及伺服控制系统,以保证加速器的正常动作、运行及事故保护。

六、引出系统

引出系统的组成由加速器的用途而定。医用加速器其引出系统是一个照射头。辐射处理的加速器,其引出系统是一个扫描磁铁及扁长的真空引出窗。无损探伤的加速器,其引出系统最简单,只剩下一个真空引出窗了。

七、附属设备

附属设备由每一个加速器的具体用途而定。对医用加速器来说,它包括旋转的大机身、医疗床、手控盒、工业电视等。辐射处理的加速器,则包括辐射处理用的传输带、滚筒系统等。而工业无损探伤用加速器,则包括大型天车、地面手控盒等。

本书只讨论加速器的核心部分,即加速系统的问题。其中包括加速的原理、加速管的高频特性、微波功率传输特性、加速器的工作特性以及加速系统对其它系统的要求。

2.2 高频行波电场的加速作用

加速电子可以用静电场,也可以用交变的电磁场。静电场对电子的作用是一直存在的,连续不断的(如电子静电加速器)。交变电场对电子的作用是间断的。让电子流通过“加速缝”受到加速,出了加速缝后电子进行漂移运动。为了让电子再次通过“加速缝”受到加速,可用磁场使电子作圆周运动,而在加速缝上的电场是交变的(例如按照正弦规律变化)。如果电子每次通过加速缝时,正处在交变电场能使之加速的半波之内,则电子能间断地得到反复加速(电子回旋加速器就是这样的)。

如在一根轴线上放置一系列加速缝,电子穿过一个加速缝就被加速一次。这些加速缝上的电场可以是静电场,也可以是交变电场。倍压加速器是用静电场的。用静电场的加速器,其极限能量受到产生