

加速器原理

徐建铭 编著

科学出版社

53.833057
497

加 速 器 原 理

徐 建 铭 编 著

53.833057

科 学 出 版 社

内 容 简 介

本书介绍了十多种主要加速器的工作原理、物理过程和主要部件的设计原则及性能要求等。全书共分十一章,依次介绍了高压加速器(包括静电加速器、倍压加速器、绝缘磁芯变压器、高频高压发生器及强脉冲电子流发生器等)、感应加速器、回旋加速器、稳相加速器、同步加速器、强聚焦同步加速器、电子回旋加速器、直线加速器、重离子加速器及新加速原理。

本书可供从事加速器设计、制造、运行和使用的技术人员以及大学有关专业的师生参考。

加 速 器 原 理

徐建铭 编著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1974年4月第一版 开本:850×1168, 1/32

1974年4月第一次印刷 印张:16 3/8

印数:0001—8,350 字数:432,000

统一书号:13031·199

本社书号:334·13—3

定价:2.00元

序 言

二十世纪三十年代以来，加速器在科学研究、工农业生产、医疗卫生、国防等方面的应用日益广泛，加速器物理和技术获得了重大发展。现在，加速器所产生的粒子的最高能量已达到数千亿电子伏，常用的加速器类型已有二十余种。有些类型的加速器已经小批投入工业生产。

解放后，我国的加速器技术，在党的英明领导下，在毛主席无产阶级革命路线指引下，遵循自力更生、奋发图强的方针，取得了重大成就。1958年我国建成了质子静电加速器，回旋加速器也开始运行。1963年我国又建成了电子静电加速器。这些成就为我国在加速器技术方面赶超世界水平奠定了一定的物质基础。

本书是根据作者在中国科学技术大学讲授加速器物理所编的教材改写而成的，这次出版前又作了一些修改补充。由于加速器物理和很多科学、技术有关，例如电动力学、等离子体物理、高频电子学、真空技术、精密加工和测量、自动控制、计算技术以及电机工业、冶金工业、机械工业等，因此，本书显然不可能把所有与加速器有关的问题都加以介绍，只是着重讨论了十余种主要加速器的工作原理、物理过程和它们的主要参数以及部件的设计原则、性能要求等。另外还比较具体地介绍了一些典型例子。每章后附有参考文献目录，以备查阅。

本书的编排是按加速器种类分章的，全书共分十一章。第一章绪论，综合介绍加速器的发展及其用途。从第二章起依次介绍高压加速器（包括静电加速器、倍压加速器、绝缘磁芯变压器、高频高压发生器、强脉冲电子流发生器等）、感应加速器、回旋加速器、稳相加速器、同步加速器、强聚焦同步加速器、电子回旋加速器、直线加速器和重离子加速器。最后一章介绍近来加速器中采用的一

些新技术和在研究中的新加速原理。有关加速器的一些共同问题，则分别集中起来介绍。例如回旋式加速器中粒子的横向运动问题(聚焦问题)，集中在第三章和第七章介绍；第三章中讨论了粒子在旋转对称磁场中的横向运动问题，第七章讨论粒子在交变梯度磁场中的横向运动问题。第七章里还讨论了四极透镜系统的聚焦性能和边缘磁场聚焦问题。谐振加速器中的自动稳相问题主要在第五章中介绍。有些比较复杂的数学推导集中在附录里。

本书的编写是在党组织的关怀和支持下进行的。在编写过程中，赵忠尧同志经常给予关心和支持；谢家麋同志审阅了全部书稿，提出了宝贵意见。我所和科技大学一些同志对部分章节进行了审阅，提出了有益的建议。张竹湘同志不辞辛苦绘制了大部分插图。谨在这里向他们表示感谢。

由于加速器类型很多，本书涉及的范围比较广，作者学识有限，又缺乏实践，书中难免有错误或不恰当之处，希望读者随时批评指正。

作者

1973年10月于中国科学院原子能研究所

目 录

序 言	i
第一章 绪论	1
§ 1.1. 加速器的发展概况	1
§ 1.2. 加速器的种类	4
§ 1.3. 加速器的用途	6
第二章 高压加速器	14
§ 2.1. 静电加速器的发展简史	15
§ 2.2. 静电加速器的工作原理	18
§ 2.3. 高压气体的采用	21
§ 2.4. 高压电极系统的设计	25
§ 2.5. 绝缘支柱	33
§ 2.6. 输电系统	35
§ 2.7. 加速管	40
§ 2.8. 加速管的最高工作电压	42
§ 2.9. 离子源和电子枪	45
§ 2.10. 电压和能量的测量方法	54
§ 2.11. 电压的稳定	59
§ 2.12. 单级静电加速器的几个实例	62
§ 2.13. 串列式静电加速器	65
§ 2.14. 倍压加速器	68
§ 2.15. 绝缘磁芯变压器	79
§ 2.16. 高频高压发生器	82
§ 2.17. 强脉冲电子束发生器	84
§ 2.18. 高压加速器的用途	85
参考文献	88

第三章 电子感应加速器	91
§ 3.1. 带电粒子在恒定磁场中的运动.....	91
§ 3.2. 感应加速器的工作原理.....	98
§ 3.3. 加速磁通变化量和电子能量改变量的关系.....	101
§ 3.4. 粒子的横向运动.....	103
§ 3.5. 使电子在恒定轨道上加速的条件.....	127
§ 3.6. 电子的入射俘获过程.....	132
§ 3.7. 电子束的偏移和引出.....	138
§ 3.8. 感应加速器的工作程序.....	141
§ 3.9. 辐射损失的影响.....	143
§ 3.10. 感应加速器的磁铁系统	145
§ 3.11. 真空室和电子枪	152
§ 3.12. 电子感应加速器的用途和发展情况	154
参考文献	157

第四章 迴旋加速器	159
§ 4.1. 发展简史.....	159
§ 4.2. 迴旋加速器的工作原理.....	161
§ 4.3. 迴旋加速器中的相移现象.....	167
§ 4.4. 横向聚焦.....	180
§ 4.5. 磁铁系统.....	185
§ 4.6. 真空室.....	199
§ 4.7. 高频系统.....	202
§ 4.8. 离子源.....	205
§ 4.9. 靶.....	209
§ 4.10. 引出系统	210
§ 4.11. 能量的调节	215
§ 4.12. 各种不同的 D 形电极系统	217
§ 4.13. 粒子在中心区域的运动	219
§ 4.14. 现状	222
§ 4.15. 等时性迴旋加速器的工作原理	224
§ 4.16. 等时性迴旋加速器的结构特点	234
§ 4.17. 迴旋加速器及等时性迴旋加速器的用途	236

参考文献	238
第五章 稳相加速器	241
§ 5.1. 稳相加速器的工作原理	241
§ 5.2. 加速频率的调变规律	245
§ 5.3. 自动稳相原理	247
§ 5.4. 相运动方程	255
§ 5.5. 相运动方程的分析	258
§ 5.6. 相振荡的摆模型	260
§ 5.7. 相图	263
§ 5.8. 相振荡的衰减	272
§ 5.9. 实现谐振加速的途径	274
§ 5.10. 稳相加速器中粒子的俘获过程	275
§ 5.11. 平均粒子流强度	279
§ 5.12. 稳相加速器的结构	280
§ 5.13. 粒子流的利用	284
§ 5.14. 稳相加速器的现况和几个实例	287
参考文献	290
第六章 同步加速器	291
§ 6.1. 电子同步加速器的工作原理	292
§ 6.2. 电子的入射和俘获	296
§ 6.3. 利用电子束的方法	304
§ 6.4. 电子的辐射损失对同步加速器工作状态的影响	306
§ 6.5. 电子同步加速器的磁铁系统	307
§ 6.6. 电子同步加速器的加速系统	310
§ 6.7. 电子同步加速器的真空室	313
§ 6.8. 电子同步加速器的发展情况	313
§ 6.9. 质子同步加速器的工作原理	317
§ 6.10. 真空室尺寸的选择	322
§ 6.11. 质子同步加速器的磁铁系统	323
§ 6.12. 真空系统	334
§ 6.13. 高频加速系统	335
§ 6.14. 内靶和粒子流的引出	340

§ 6.15. 现况	343
参考文献	343
第七章 强聚焦同步加速器	347
§ 7.1. 引言	347
§ 7.2. 机械运动和光学系统中的类似情况	349
§ 7.3. 强聚焦四极透镜系统	350
§ 7.4. 交变梯度聚焦原理在同步加速器主导磁场上的应用	365
§ 7.5. 强聚焦同步加速器中的相振荡	385
§ 7.6. 分离作用强聚焦系统	389
§ 7.7. 入射和引出问题	390
§ 7.8. 强聚焦同步加速器的结构特点	395
§ 7.9. 几个例子	397
§ 7.10. 边缘聚焦-零梯度同步加速器	401
§ 7.11. 恒定磁场强聚焦加速器	408
§ 7.12. 利用相对运动的两束粒子进行实验的方案	414
参考文献	424
第八章 电子迴旋加速器	426
§ 8.1. 工作原理	426
§ 8.2. 谐振加速条件	427
§ 8.3. 电子迴旋加速器中的自动稳相现象	430
§ 8.4. 电子迴旋加速器的结构	433
§ 8.5. 电子的入射	435
§ 8.6. 电子的引出	437
§ 8.7. 发展情况	439
参考文献	442
第九章 直线加速器	443
§ 9.1. 引言	443
§ 9.2. 直线加速器中的加速电场	444
§ 9.3. 直线加速器中的相运动	450
§ 9.4. 粒子的横向运动	455
§ 9.5. 质子直线加速器	455

§ 9.6. 质子直线加速器的用途和几个实例	460
§ 9.7. 行波电子直线加速器	462
§ 9.8. 行波电子直线加速器的几个实例	464
§ 9.9. 驻波电子直线加速器	466
参考文献	468
第十章 重离子加速器	469
§ 10.1. 重离子能量与加速器主要参数的关系	469
§ 10.2. 重离子迴旋加速器	470
§ 10.3. 重离子直线加速器	472
§ 10.4. 重离子源	473
参考文献	474
第十一章 新技术的应用和新加速原理	475
§ 11.1. 计算技术和自动化技术的应用	475
§ 11.2. 超导磁体	476
§ 11.3. 超导腔	478
§ 11.4. 新加速原理的研究	479
参考文献	482
附录 I 电场时间聚焦作用的分析	483
附录 II 粒子在中心区域的运动方程	486
附录 III 粒子加速周期和粒子能量间的关系的推导	489
附录 IV 转换矩阵的行列式等于 1 的证明	491
附录 V 运动方程的两个独立的周期性解的求法	493
附录 VI 非平衡粒子封闭轨道形状的计算	498
附录 VII 在等时性迴旋加速器里, 磁场误差引起的相角移动	505
附录 VIII 电子迴旋加速器的相运动方程的推导	509
附录 IX 聚焦系统的容纳度和粒子流的发散度	512

第一章 绪 论

§ 1.1. 加速器的发展概况

加速器是用人工方法使带电粒子加速到较高能量的装置。利用这种装置可以产生各种能量的电子、质子、氦核、 α 粒子以及其他一些重离子，如氧、碳、氮、氯、以至氙离子，铀离子。利用这些直接加速出来的带电粒子与物质相作用，还可产生多种带电的和不带电的次级粒子，象 γ 粒子、中子及多种介子、超子、反粒子等。

医学界广泛应用的 X 射线管可算是最早的一种加速器，到 1920 年已能把电子加速到 100—200 千电子伏。1919 年卢瑟福 (E. Rutherford) 利用天然 α 源进行了第一个原子核反应实验以后，物理学家开始提出建造人工加速粒子装置的要求。

1932 年科克劳佛 (J. D. Cockcroft) 和华尔顿 (E. T. S. Walton) 用倍压线路作电源，建成了一台高压加速器——倍压加速器，获得了能量约为 700 千电子伏的质子流，用来轰击锂靶，实现了第一个利用人工加速的粒子进行的核反应。

1931 年范德格拉夫 (R. J. Van de Graaff) 建成了静电起电机，可以获得 1.5 兆伏的电势差。1933 年人们又先后建成了能把质子加速到 0.6 兆电子伏和 1.2 兆电子伏的静电加速器。从三十年代开始，随着科学研究逐步深入的需要，加速器技术迅速地发展起来。大约到 1951 年，静电加速器的最高能量已提高到 5 兆电子伏以上。最近利用串列加速原理，已经把能量提高到 30 兆电子伏左右，40 兆电子伏或更高能量的串列式静电加速器也在研究之中。

1932 年能把质子加速到 1.22 兆电子伏的迴旋加速器开始运

行。它和上述两种加速器的工作原理不同，它不用很高的直流电压来加速粒子，而是用一个不大的高频电压多次加速粒子。大约到 1939 年，迴旋加速器所产生的粒子的最高能量已超过天然放射源及当时其他加速器的能量，当时已能产生约 20 兆电子伏的氘核和 40 兆电子伏的 α 粒子。1956 年第一台等时性迴旋加速器建造成功，以后这种新型迴旋加速器发展很快，在一些国家先后建成了从医用小型加速器到能把质子、氘核等离子加速到数十至一百兆电子伏以上的科研用加速器。目前，能把质子加速到 200 甚至到 500 兆电子伏以上的等时性迴旋加速器也正在建造中。

1940 年第一台电子感应加速器建造成功，它能把电子加速到 2.3 兆电子伏。1942 年已经建成 20 兆电子伏的感应加速器，从而把人工加速电子的能量提高了很多。

四十年代初，在进一步提高加速器能量方面遇到很大困难，直到 1944 年发现了谐振加速器中的粒子具有自动稳相现象，才从理论上解除了谐振加速器能量的上限，从此一系列能量更高的新型加速器便迅速地发展起来。

1946 年能把氘核加速到 190 兆电子伏， α 粒子加速到 380 兆电子伏的稳相加速器建造成功，把重粒子加速器的能量提高了近十倍。之后，短短的几年中就建成了近十台这种加速器，能量在 100—600 兆电子伏范围内。这些加速器不只能加速质子、氘核和 α 粒子，有的还能产生高能中子、 π 介子、 μ 介子等次级粒子，供核物理实验用。

1947 年 70 兆电子伏的电子同步加速器建造成功，随后在短短几年中建造了近十台这种加速器，能量在 300—500 兆电子伏范围内。

与此同时，质子同步加速器也开始建造。1952 年布鲁海汶实验室设计能量为 3 千兆电子伏的质子同步加速器开始运转，把质子加速到 2.3 千兆电子伏，1954 年达到设计的最高能量。1954 年伯克利实验室的 6.4 千兆电子伏的同型加速器开始运转。1957 年联合原子核研究所的 10 千兆电子伏的质子同步加速器建造成

功。

1952年交变梯度磁场的强聚焦原理受到重视,采用这种聚焦方案以后,可以使粒子对理想轨道的偏离减小,从而减低加速器造价。1959年日内瓦欧洲原子核研究中心建成的28千兆电子伏质子同步加速器,就采用了这种聚焦方案。1960年布鲁海汶33千兆电子伏的同型加速器也开始运转。现在利用这种类型加速器已把质子加速到400千兆电子伏。这种聚焦原理也同样应用在电子同步加速器上,能量从1千兆电子伏、6千兆电子伏直到12千兆电子伏的强聚焦电子同步加速器也先后建造成功。

在圆形轨道加速器(回旋式加速器)迅速发展的同时,由于微波技术的发展,近代直线加速器也开始发展起来。大约在1947年已经开始建造行波电子直线加速器和驻波质子加速器。随着工农业生产及医疗的需要,电子直线加速器已小批投入工业生产;由于基础研究的需要,质子直线加速器技术也迅速发展。目前,利用直线加速器已经能够产生约22千兆电子伏的电子;能把质子加速到800兆电子伏的质子直线加速器也正在调整中。

最早开始发展的高压加速器,由于工农业生产的需要,又发展了几种新型的大功率高压源,象1960年建造成功的绝缘磁芯变压器和高压高频发生器等,由于它们能产生比较大的平均束流功率,工业上应用较广,都已投入小批工业生产。

从近四十年加速器的发展情况来看,随着科学研究、工农业生产、医药卫生、国防等方面对加速器需要的增长,在其他科学技术新成就的基础上,加速器技术也迅速地发展起来。目前加速器种类已超过二十种,人工加速粒子的能量也迅速提高。统计表明,大约每隔6—10年,人工加速粒子的最高能量就提高近十倍。各种加速器的数目也日益增多,有些类型的低能加速器已达数百台。象静电加速器、倍压加速器、绝缘磁芯变压器、高频高压发生器、电子直线加速器、感应加速器等均已投入小批工业生产,而且有了一系列产品。目前,各国加速器工作者除对已有加速器类型继续进行研究,改善性能,降低造价外,还正在探索和开辟新的加速粒子的

原理,以期用较少的投资,获得更强的粒子流和更高的能量。

§ 1.2. 加速器的种类

到目前为止,被广泛应用的加速器约有二十余种,每种加速器都有它适于工作的能量范围和被它加速的粒子种类。这许多种加速器各有特色,各自满足某些特殊的需要。尽管新型的更高能量的加速器陆续建成,原有的加速器类型并没有被淘汰,而是在科学技术新成就的基础上不断地获得发展、改善。按加速原理的不同,加速器大致可以分成下列几类:

1. 高压加速器 在这类加速器里,粒子一次(或两、三次)通过一个高电势差,以得到加速。象倍压加速器、静电加速器、绝缘磁芯变压器、高频高压发生器、脉冲电子加速器等都属于这种类型。目前这类加速器的最高能量已达到三十余兆电子伏(质子能量),平均粒子流强度约数十微安直到数十毫安。粒子束平均功率从数十瓦直到数十甚至数百千瓦。这类加速器可以加速电子,也可用来加速质子、氘核、氦核以及其他重离子。

2. 涡旋电场加速的迴旋式加速器 在这类加速器里,利用轴向磁场约束粒子,使粒子迴旋运动;并利用电磁感应所产生的涡旋电场来加速粒子。电子感应加速器就是这类加速器,它只能用来加速电子,一般能量为数十兆电子伏,平均流强约微安数量级。

3. 高频电场加速的迴旋式加速器 在这类加速器里,利用轴向磁场使粒子迴旋运动,多次通过高频加速电场,得到加速。这类加速器又可以分成两类:

一类加速器里没有自动稳相现象¹⁾,象普通迴旋加速器,等时性迴旋加速器都属于这一类。这一类加速器只用来加速质子等较重的离子,不能加速电子。用普通迴旋加速器加速质子时,能量最高可达 20 兆电子伏左右,平均粒子流强度约数百微安至毫安数量

1) 自动稳相现象的意义见第五章。

级(在加速器主真空室内)。等时性迴旋加速器可把质子加速到数百兆电子伏,平均粒子流强度也可达毫安级(在加速器主真空室内),引出粒子流强度可达数十至百微安。

另外一类是有自动稳相现象的,属于这一类型的加速器有:

1) 稳相加速器(即同步迴旋加速器,又名调频迴旋加速器),只能加速质子或更重的离子,不能用来加速电子。已经建成的这种加速器的能量从数十兆电子伏到数百兆电子伏(最大的一台为720兆电子伏),平均粒子流强度为微安到十微安数量级。

2) 质子同步加速器(又名同步稳相加速器),已经建成的这种加速器的能量从一千兆电子伏到数百兆电子伏,平均粒子流强度约 10^{-2} 微安到1微安。

3) 电子同步加速器(简称同步加速器)能量从数十兆电子伏到数千兆电子伏,目前已经建成的这种加速器的最高能量已达12千兆电子伏。平均电子流强度约 10^{-2} —1微安。

4) 电子迴旋加速器能量一般为十几到数十兆电子伏,平均电子流强度可达数十微安。

后面两种加速器仅用来加速电子,前两种用来加速质子,有的用来加速氦核及 α 粒子,甚至于氮离子等重离子。

4. 直线加速器 在这类加速器里,粒子大致沿直线轨道运动,在微波场的作用下得到加速,象行波电子直线加速器、质子驻波加速器等都属于这个类型。已建成的电子直线加速器的能量从数兆电子伏到22千兆电子伏。已建成的质子直线加速器的能量,从数十兆到800兆电子伏。直线加速器的平均流强约数十到数百微安。有些强流直线加速器的平均粒子流强度可达数十毫安,脉冲流强比较高,可达数百毫安甚至若干安培。

除了以上四类加速器以外,还有一些其他类型的加速器,如利用电磁感应电场加速的直线加速器,正在探索中的相干及集团加速原理(如电子圈加速器)等,都将在后面有关章节中介绍。

每一种加速器的发展都要依靠多种科学技术的发展,象高频微波技术,高真空技术,电子学、电机、精密加工、自动控制、计算机

技术、冶金工业等。本书显然不能把所有与加速器密切有关的技术问题都一一讨论,只能把几种主要加速器的工作原理、主要部件的性能要求和通常采用的方案等扼要地加以介绍。

§ 1.3. 加速器的用途

目前世界上的加速器主要是能量在 100 兆电子伏以下的低能加速器,其中一小部分用于原子核和核工程研究方面,大部分用在其他方面,象化学、放射生物学、放射医学、固体物理等的基础研究以及工业照相、疾病的诊断治疗、高纯物质的活化分析、某些工业产品的电子束处理、农产品及其他食品的电子束处理、模拟宇宙辐射和模拟核爆炸等。

中、高能加速器主要是供核物理和“基本”粒子物理等基础研究之用,有些加速器也兼顾其他方面的研究工作。特别是强流中能加速器(介子工厂或中子工厂),则是多学科共同使用的设备,象放射化学、固体物理学、放射生物学、医学以及核工程等。

1.3.1. 加速器用作辐射源的优点

辐射作用在工农业生产、医疗卫生及基础研究等方面应用日益广泛。目前最常用的辐射源是放射性同位素和加速器。此外,原子反应堆也可用作中子源,宇宙线中的高能粒子也被用于“基本”粒子的研究。加速器有下列一些优点,使它成为应用最广的一种辐射源。

1. 其他辐射源只能产生有限的几种粒子,象中子, γ 粒子, β 粒子, α 粒子等。加速器能产生的粒子种类要多得多,象质子, 氘核, He^3 核等都是其他辐射源不能产生的。建造中的几台重离子加速器,则能产生从氢到铀所有元素的离子,更是其他辐射源无法达到的。

2. 加速器产生粒子的能量、强度都可在大范围内平滑调节,还可以按给定程序自动调节。

3. 加速器产生的粒子流强度大、性能好。目前低能加速器的平均流强可达数毫安甚至数十毫安到数百毫安。并且聚焦性能好，粒子流密度大。例如，一克镭向 4π 立体角放射的 α 粒子也不过相当于 0.012 微安。宇宙线的粒子流就更弱了，用目前通用的探测仪器每天只能从宇宙线中探测到数百个能量为数十千兆电子伏的粒子，而数十千兆电子伏的高能加速器每秒则能产生 10^{12} 个高能质子。低能加速器平均束流功率一般可达数千瓦，大的可达 150 千瓦。而 67,000 居里的钴 60 的放射功率不过相当于 1 千瓦。所以一台 150 千瓦功率的加速器的辐射功率约相当于 10 兆居里的钴 60。中能和高能加速器的平均束流功率更强，已达 1 兆瓦。

4. 加速器可在任何需要的时候停机，停机以后即不再产生辐射。大多数加速器停机后即无放射性，可以检修。

5. 由于加速器束流聚焦性能较好，也易于控制，辐射利用率高，可达 70%。

1.3.2. 加速器辐射产额的计算公式

在选择工农业生产流水线上需要的加速器时，应该确定设备产量与加速器束流功率的关系。假设某辐射工艺要求的剂量为 R 兆拉德¹⁾，加速器平均束流功率为 P 千瓦，射线利用率为 η ，则设备产量 M 为

$$M = \frac{\eta P}{3R}, \quad (1.1)$$

M 用吨/小时为单位。例如，利用 15 千瓦束流功率的加速器进行聚乙烯交联反应，这个反应需要的剂量为 10 兆拉德，假设射线利用率为 60% 则每小时可生产 300 公斤。

利用电子束进行治疗或辐射处理时，常需要计算电子的透射深度 t ，它可用下式表示。

$$t = (0.33 \sim 0.35) \frac{W}{\rho}, \quad (1.2)$$

1) 当物质吸收的辐射能量为 100 尔格/克时，它所受到的辐射剂量叫 1 拉德。