

高等学校试用教材

粒子加速器原理

桂 伟 燮
洪 忠 悌
陈 佳 洱

编

主审

原子能出版社

内 容 简 介

本书介绍了现代主要类型的带电粒子加速器。内容以阐述加速器的工作原理为主，同时简要地讨论了加速器的离子源、粒子束的聚焦等问题；对加速器的现状、性能、结构和用途只作了示意性地叙述。

本书可作为高等学校非加速器专业的学生学习加速器原理的教材或参考书，也可供加速器束流的使用者及有关工程技术人员参考。

粒子加速器原理

桂 伟 燮 编

洪 忠 悌

陈 佳 洱 主审

责任编辑：刘荣久

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

八九九二〇部队印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 850×1168 $1/32$ ·印张 $13\frac{5}{8}$ ·字数360千字

1984年10月第一版·1984年10月 第一次印刷

印数1—3,000·统一书号：15175·549

定价：1.85元

前 言

粒子加速器涉及到许多门科学技术，几十年来发展很快，束流能量提高了上百万倍，束流品质也有很大的改进。常用的加速器类型已有二十多种，总数已达五千台，某些类型的加速器已经投入工业生产。

最初，加速器是为了进行原子核物理和基本粒子物理的基础研究而研制的。随着科学技术的发展，加速器的应用已远远超出原子核基础研究的范围，它已遍及核能利用、工农业生产、医疗卫生及其它科技领域。现在用于非核科学领域的加速器数量约占总量的五分之四左右。

本书是为非加速器专业的学生学习加速器基础知识而编写的。重点介绍离子源和加速器的基本原理及性能特点，对带电粒子束的聚焦也作了分析讨论。至于与加速器有关的技术问题，只是有选择地作了简略说明。

本书共分十三章。前两章对加速器的共同问题，包括粒子动力学性质、带电粒子的产生等，作了阐述。从第三章起，依次介绍了倍压加速器、静电加速器（包括串列式静电加速器）、回旋加速器（包括等时性回旋加速器）、电子感应加速器、稳相加速器、电子回旋加速器、同步加速器（包括强聚焦类型）、驻波和行波直线加速器；最后介绍了加速器的用途。

本书第一至六章、第十一和十二章由兰州大学洪忠悌编写，第七至十章和十三章由清华大学桂伟燮编写。最后由桂伟燮对全书作了统稿工作，并改写、审校了部分章节。陈佳洱同志主审了全书除第六章和第十二章外的其余章节。

本书大纲在征求意见的过程中，得到了清华大学、北京大学、北京原子能研究所等单位的热情支持，他们提出了不少宝贵意

见。复旦大学、中国科学院近代物理研究所和上海原子核研究所的有关同志提供了不少资料和照片。兰州大学现代物理系的一些同志以及北京大学张英侠同志审阅了某些章节，并提出了有益的建议。兰州大学杨美华同志绘制了部分插图。对他们的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于编者学识所限，出书时间紧迫，书中难免有缺点和错误，敬请读者批评指正。

编者

1983年1月

目 录

第一章 绪论

一、带电粒子加速器发展简史	1
二、带电粒子加速器的分类及基本组成	5
三、带电粒子加速器的束流性能	6
(一)粒子品种	6
(二)能量	8
(三)束流强度及时间特性	9
(四)束流品质	10
四、带电粒子在恒定电磁场中的运动	14
(一)带电粒子在电磁场中的运动方程	14
(二)带电粒子在静电场中的运动	16
(三)带电粒子在均匀恒定磁场中的运动	17
(四)粒子运动参数的相对论力学表达式	19

第二章 带电粒子的产生——电子枪和离子源

一、电子枪	25
二、离子源	27
(一)概述	27
(二)几种常用的等离子体离子源	30
(三)固体表面离子源	40
(四)其它离子源	41
附录：极化离子源	42
参考文献	52

第三章 倍压加速器

一、概述	53
二、倍压电源	55
(一)倍压原理	55

(二)负载电流对倍压线路输出电压的影响	59
(三)倍压线路的局限性及其可能的改进途径	67
三、高压的稳定和测量	69
(一)倍压电源电压的稳定	69
(二)高压的测量	70
四、带电粒子的加速	70
(一)真空度对加速粒子的影响	70
(二)加速管的组成及其作用	71
五、带电粒子的聚焦	73
(一)加速电极间隙电场的聚焦作用	74
(二)倍压加速器的聚焦系统	79
六、倍压加速器的性能特点及发展现状	80
(一)加速粒子的种类	80
(二)能量特性	81
(三)流强特性	81
(四)束流时间特性	81
七、其它倍压型高压电源所组成的加速器	84
(一)绝缘磁芯变压器	84
(二)高频高压发生器	85
(三)强脉冲电子束发生器	89
参考文献	89

第四章 静电加速器

一、概述	91
二、静电起电机	93
(一)工作原理	94
(二)输电电流的限制和提高	97
(三)电压的限制和提高	99
三、加速管	104
(一)小孔径加速管	106
(二)斜场加速管	106
(三)磁抑制加速管	108

四、带电粒子束的聚焦	108
(一)圆孔膜片透镜	109
(二)均匀电场	110
(三)等梯度加速管	111
五、串列式静电加速器	112
(一)概述	112
(二)基本原理和组成	113
(三)进一步提高加速粒子能量的几种方案	116
(四)负离子源和电子剥离器	119
六、电压和能量的测量及稳定	123
(一)高压测量	124
(二)粒子能量的测量	126
(三)电压的稳定	131
七、束流输运系统	134
八、静电加速器的性能特点	135
(一)能量特性	135
(二)束流强度特性	135
(三)加速粒子种类	136
九、静电加速器的发展概况和实例	136
(一)单级静电加速器	136
(二)串列静电加速器	138
附录: 能量校准	141
参考文献	146

第五章 回旋加速器

一、回旋加速器的工作原理	147
(一)基本原理和组成	147
(二)加速过程和谐振加速条件	150
(三)离子的能量和轨道形状	153
二、回旋加速器的电磁聚焦	155
(一)电聚焦及其性质	155
(二)磁聚焦及其性质	159

(三)电、磁轴向聚焦的共同作用	167
(四)中心区域中离子运动的特点和电聚焦的改进	168
三、经典回旋加速器中的相移和极限能量	170
(一)相移现象和相移规律	170
(二)极限能量和阈电压	175
四、等时性回旋加速器	177
(一)等时性条件	178
(二)径向扇型(托马斯型)回旋加速器	180
(三)螺旋扇型回旋加速器	187
(四)分离扇型回旋加速器	195
五、加速电压和高频系统	200
(一)高频电源	200
(二)D形电极和共振线电压放大系统	201
(三)高频加速电压的性能及其对束流性能的影响	203
六、束流的引出	205
七、束流能量的调节和刻度	208
(一)能量的调节	208
(二)能量刻度	212
八、束流性能	213
(一)束流能量和能量可变性	213
(二)束流能量的分散度和稳定度	214
(三)束流强度	214
(四)束流发射度	215
(五)束流负载因数	216
(六)加速粒子种类的可变性	217
九、回旋加速器的现状和实例	218
参考文献	223

第六章 电子感应加速器

一、感应加速原理	225
(一)沿恒定轨道加速电子的条件	226
(二)电子能量增长与加速磁通变化的关系	226

(三)加速磁感应强度与导引磁感应强度间的二比一条件	228
(四)电子感应加速器的工作状态与概貌	228
二、电子束的聚焦	231
三、电子的能量和辐射损失	232
四、电子束的强度	233
五、电子束的偏移和引出	236
六、电子束的性能	238
(一)能量特性	238
(二)束流特性	238
(三)韧致辐射特性	238
七、发展概况	239
参考文献	240

第七章 自动稳相式准共振加速器基础

一、自动稳相式准共振加速器的共同特点	241
二、准共振加速条件	242
三、实现准共振加速的各种途径	244
四、自动稳相原理	245
(一)自动稳相原理在加速器领域中的重要意义	245
(二)自动稳相基本原理及典型的相运动过程	246
(三)相振荡方程及相振荡规律	255
附录 I 粒子加速周期和粒子能量间关系的推导	264
附录 II 相迹方程 $\dot{\phi}(\phi)$ 的推导	268
参考文献	269

第八章 回旋型准共振加速器

一、稳相加速器——用频率调变法实现共振加速	270
(一)稳相加速器工作原理及调频规律	270
(二)粒子的入射和俘获	274
(三)相运动特点及最佳平衡相位 ϕ_s	276
(四)结构特点	279
(五)性能特点	286

(六)现状和发展趋向	287
二、电子回旋加速器——变倍频系数法共振加速	288
(一)工作原理	288
(二)同步加速条件及基本参数的选择	290
(三)相运动的特点	293
(四)结构特点	294
(五)性能特点	298
(六)发展概况和实例	298

第九章 环型准共振加速器

一、同步加速器——磁场调变法共振加速	301
(一)工作原理及同步加速条件	301
(二)磁场、频率调节规律	304
(三)相运动的特点	307
(四)同步加速器的起动(或预加速)问题	309
(五)结构特点	311
(六)性能特点	316
(七)发展概况和实例	317
二、强聚焦原理及其在加速器中的应用	321
(一)强聚焦原理及光学模型	321
(二)强聚焦四极透镜系统	326
(三)强聚焦同步加速器	329
(四)增强器	342
(五)储存环	344
(六)同步辐射光源	346
(七)对撞机	348
附录: 相对运动粒子间有效作用能的推导	354

第十章 直线型准共振加速器

一、驻波直线共振加速器	359
(一)漂移管式驻波直线加速器结构及基本原理	359
(二)同步加速条件及漂移管长度的变化规律	360

(三)相运动的特点及其与束流聚焦的矛盾	362
(四)驻波腔结构的改进方案(带耦合腔的加速结构)	363
(五)性能特点	366
(六)发展概况和实例	367
二、行波直线加速器	368
(一)行波加速原理	368
(二)同步加速条件	370
(三)光滑波导中的波速及对波速调变的要求	370
(四)盘荷波导慢波结构——电子行波直线加速器	373
(五)螺旋线波导慢波结构——离子行波直线加速器	375
(六)相运动特点	376
(七)性能特点	379
(八)发展概况和实例	380

第十一章 重离子加速器

一、概述	382
二、对重离子加速器束流性能的要求	382
(一)能量	383
(二)能量可变性	383
(三)能量分散度	383
(四)束流发射度	384
(五)束流强度	384
(六)束流的时间特性	384
(七)加速离子的种类	384
三、重离子能量与几种加速器主要参数间的关系	385
(一)静电加速器	386
(二)回旋加速器	388
(三)直线加速器	388
四、多电荷离子源和电子剥离器	389
五、各种重离子组合加速器系统	393
(一)各种类型的注入器与等时性回旋加速器的组合系统	394
(二)各种类型的注入器与直线加速器的组合系统	399

(三)高能重离子加速系统	401
参考文献	401

第十二章 加速器的用途

第十三章 粒子加速技术发展的展望

第一章 绪 论

一、带电粒子加速器发展简史

带电粒子加速器是用人工方法使带电粒子在电场中加速达到高能量的电磁装置，一般简称为“加速器”。

加速器最初是为原子核物理研究的需要而发展起来的，不论过去或现在，人们在研究原子核和基本粒子方面所取得的成就，都是和加速器的发展密切联系在一起的。然而，现今加速器的应用已远远超出了核物理领域。

本世纪二十年代初期，物理学家为了揭示原子核的奥密及其内在规律，希望能获得具有足够高能量的粒子，作为“炮弹”来轰击原子核，以期穿透核外的势垒、进入核内而引起核反应。

在加速器问世以前，人们曾用天然放射性核素放出的射线来进行原子核的实验研究。英国物理学家卢瑟福在1919年成功地实现了第一个原子核反应，就是利用 RaC' （即 ^{214}Po ）所放出的能量约为7.7兆电子伏的 α 粒子作为入射粒子的。

但是，实践表明，靠放射源提供的入射粒子来研究核反应，缺点很多：

首先是入射粒子的强度太弱，因此产生核反应的机会很少。其次是能量不高，穿透势垒的几率很小，因而核反应的几率也就很低。卢瑟福在他所做的实验中，发现四十万个 α 粒子中只有八个引起了核反应，就是这个道理。

此外，入射粒子的种类很有限，而且能量也不可调节。

来自宇宙空间的高能宇宙射线，固然能量可高达 10^{21} 电子伏，

但它强度极弱，能观察到的核反应机会极小，而且无法用人工加以控制。

为此，物理学家提出了建造人工加速带电粒子装置的设想。

1932年第一台加速器在英国问世。这是一台采用整流倍压原理获得 700 千伏直流高压的倍压加速器。在这台加速器上加速质子，第一次实现了用人工加速粒子激发的核反应。

同一时期，美国范德格拉夫(R.J.Van.de.Graff)研制成电压高达 1.5 兆伏的静电高压发生器，随后用它成功地建成了静电加速器。

1932年一种利用高频电压多次共振加速原理的回旋加速器也宣告建成，加速质子能量达1.22兆电子伏。六、七年后，这种加速器得到了一定程度的发展，已可获得氘核的最高能量为20兆电子伏和 α 粒子能量为40兆电子伏，大大超过了天然放射源及当时直流高压型加速器所产生的粒子的最高能量。

1940年另一种利用电磁感应电场加速电子的感应加速器获得成功，能量达 2.3 兆电子伏。在这一类型的加速器里，揭示了在恒定圆轨道上加速带电粒子的可能性，这给以后加速器的发展以重要启示。

1944年发现了共振加速器中粒子加速过程的自动稳相现象，为加速器发展到中、高能奠定了基础。从此以后，一系列能量愈来愈高的新型加速器便迅速地发展起来。以后几年中，相继建成了同步回旋加速器（即稳相加速器）和电子同步加速器，加速粒子能量超过了 300 兆电子伏。与此同时，质子同步加速器也开始设计建造。1952年能量为3000兆电子伏的质子同步加速器（也称同步稳相加速器）在美国投入运行。

1952年以后在设计加速器中，采用了交变梯度的强聚焦原理，它使粒子的轨道偏离大大压缩，从而在相同能量条件下，减小了加速器的规模和造价，使建造更高能量的加速器成为可能。1959年第一台强聚焦质子同步加速器宣告建成，能量达 28000 兆

电子伏。在七十年代中，能量为 4×10^5 兆电子伏和 5×10^5 兆电子伏的同类加速器相继在西欧核子研究中心和美国国家实验室建成。强聚焦原理也同样用于电子同步加速器，能量由 1 —— 12×10^3 兆电子伏的强聚焦电子同步加速器均先后建造成功。

从五十年代开始，随着微波技术的发展，近代直线加速器也相应地迅速发展起来。目前质子驻波加速器最高能量已达800兆电子伏，规模最大的电子行波加速器，长达3.2公里，能量为 22×10^3 兆电子伏。

在此期间，等时性回旋加速器和串列式静电加速器也先后研制成功并获得飞速的发展，它们为低能核物理的实验研究开辟了新的前景。六十年代以后，重离子加速器也相继建立，极化粒子的加速技术也有较大的发展，某些加速器还向强流方向发展。

中能加速器，诸如早期建成的稳相加速器及后来发展的等时回旋加速器和质子直线加速器，都已为介子物理研究作出了重要的贡献。

在高能范围内，在强聚焦同步加速器的基础上，对撞机及专门用于同步辐射光源的电子储存环（中、高能）也有了较大的发展。同时还注意了对加速器束流品质的研究，并取得了显著的成果，为高能物理实验研究及推动其它学科的发展，作出了积极的贡献。

从近半个世纪的加速器发展情况来看，随着科学研究、工农业生产、医药卫生、国防建设等方面对加速器需求的增长，加速器已大大地开拓了应用的领域。

加速器的种类已超过二十种，加速粒子的能量已比初建时期提高了100万倍。统计表明，加速器能量每十年约增长一个数量级。各种加速器的数量也日益增多，特别是某些低能加速器已投入了工业生产，医用电子行波或驻波直线加速器、感应加速器以及专供工业辐照用的各类低能加速器，都获得了迅速的发展。目前世界上已有加速器总数不少于4—5千台。低能加速器中只有一

小部分用于核科学研究，其余的则广泛地应用于其它学科和工、农、医等各个部门。

加速器工作者，一方面围绕着改善束流性能和提高能量的问题继续进行研究；有的工作者还在探索新的加速原理，以期利用

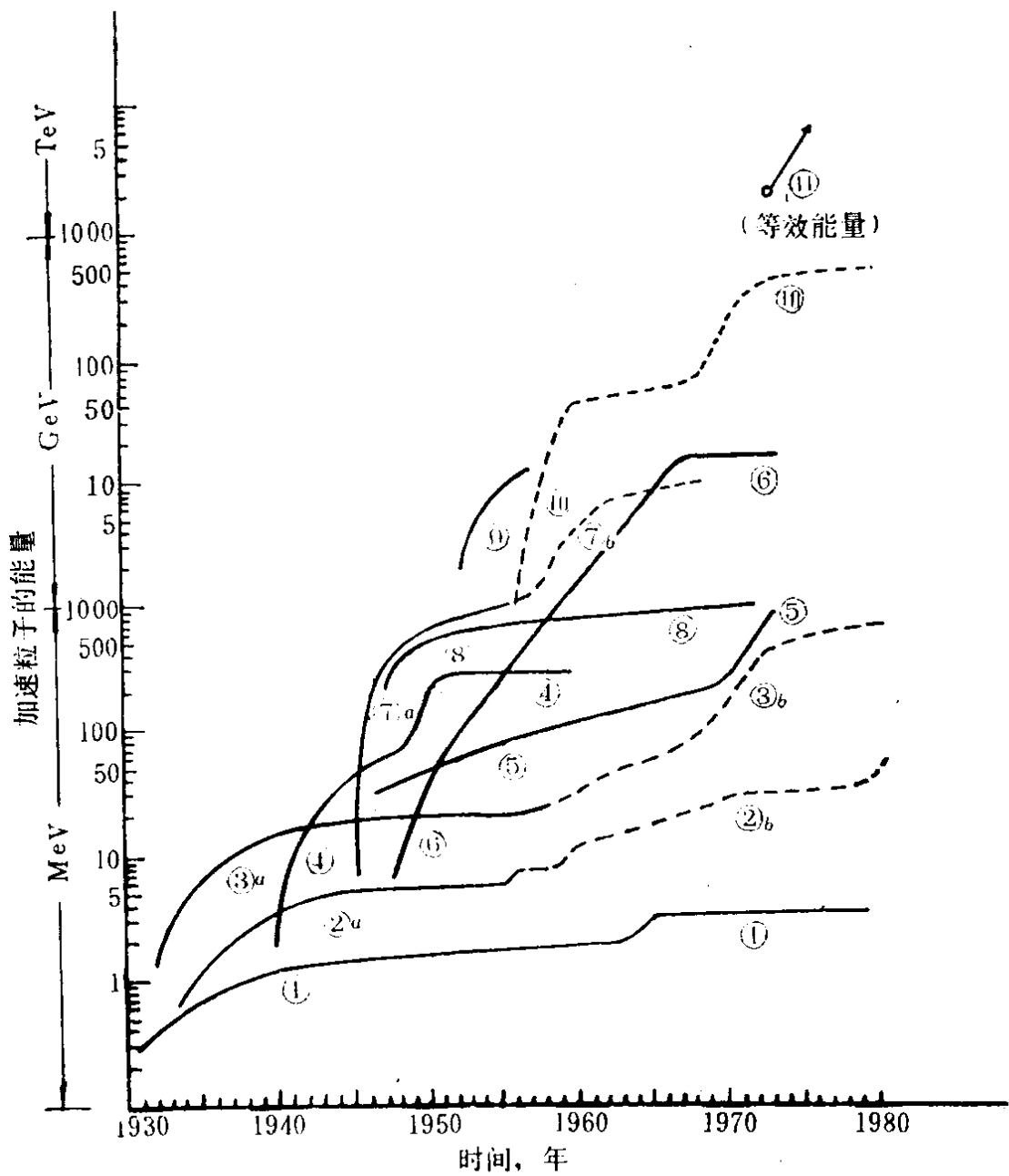


图1.1 加速器能量按年代的发展情况

①倍压加速器；②_a单级静电加速器；②_b串列静电加速器；③_a经典回旋加速器；③_b等时性回旋加速器；④电子感应加速器；⑤质子直线加速器；⑥电子直线加速器；⑦_a电子同步加速器（弱聚焦）；⑦_b电子同步加速器（强聚焦）；⑧同步回旋加速器；⑨质子同步加速器（弱聚焦）；⑩质子同步加速器（强聚焦）；⑪对撞机

较少的投资，获得更高的能量和更强的束流。另一方面，围绕小型化和操作维修简易化问题进行改进。各种加速器能量的发展情况见图 1.1 所示。

二、带电粒子加速器的分类及基本组成

加速器的种类繁多，可以按不同的原则加以划分。例如按加速粒子种类不同，可分为电子类和离子类加速器；按能量高低的差异，可分为低能、中能和高能加速器；按粒子运动轨道形式的不同，可分为直线型、环型和螺旋型轨道加速器。

现以加速电场及加速机理的不同特点为主要依据加以划分，同时参照上述不同特点，列出加速器的分类表，见表 1.1 所示。

不同的加速器，虽然特点各异，但基本组成大体都可分为三个部分（见图 1.2 所示）：

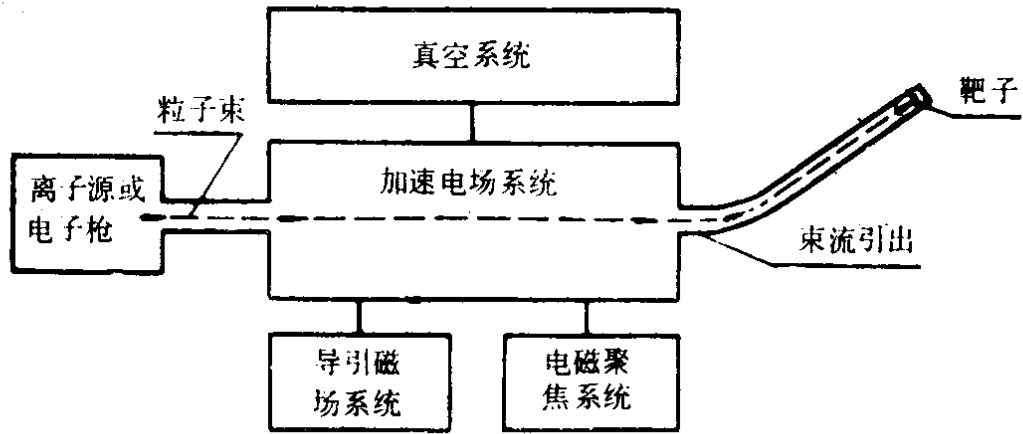


图1.2 加速器基本组成示意图

1. 产生带电粒子的机构——电子枪或离子源。
2. 加速带电粒子的机构——这是整个加速器的主体，主要为了保证把带电粒子顺利地加速到额定能量。它由下列四个系统组成：

（1）加速电场系统——加速带电粒子。