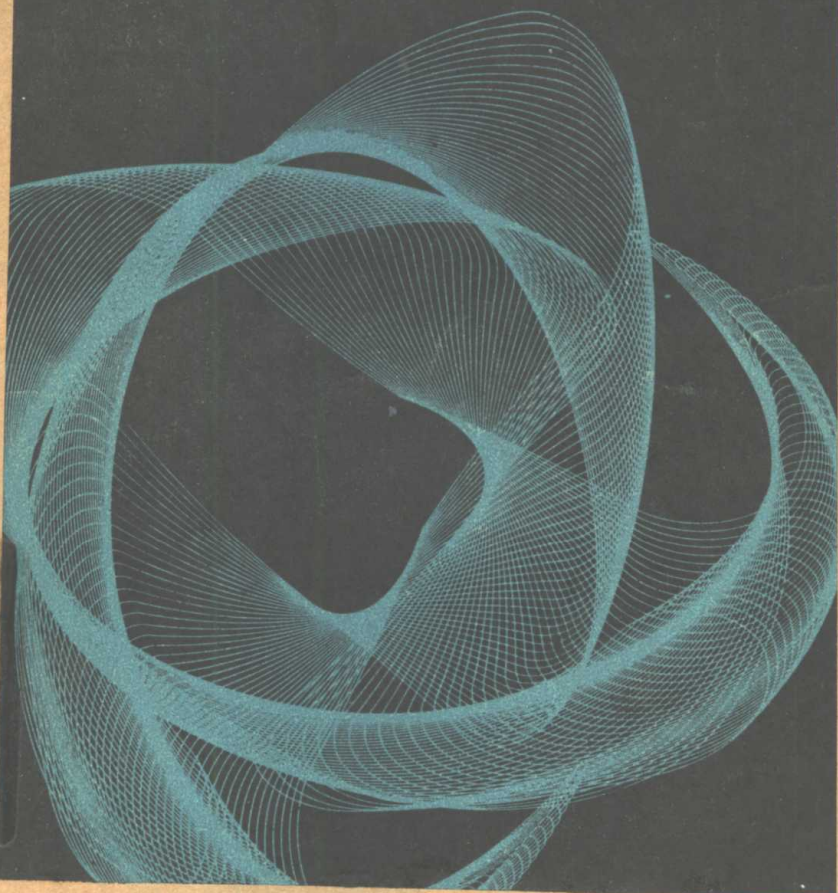


(工业农业医用)

低能加速器的应用

张朝汉 方承炜 何有余 编



(工业农业医用)

低能加速器的应用

张朝汉 方承炜 何有余 编

机械工业出版社

本书共分四部分：低能加速器简介；低能加速器在工业方面的应用；低能加速器在医疗卫生方面的应用；低能加速器在农业方面的应用。

书中概述了几十种常用的低能加速器的工作原理、结构特点、主要性能及用途；较详细地介绍了低能加速器在工业、农业、医疗卫生方面的用途、应用特点以及技术上可行、经济效益较显著的典型应用实例。

本书可供工业、农业、医疗卫生等领域从事辐射应用工作的科技人员、干部、工人和大专院校有关专业的师生参考。

(工业 农业 医用)

低能加速器的应用

张朝汉 方承炜 何有余 编

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张10³/₈·字数 227 千字

1985年12月北京第一版·1985年12月北京第一次印刷

印数 0,001— 1,390·定价 2.50 元

*

统一书号：15033·6060

前 言

一提起带电粒子加速器（简称加速器），人们就自然而然地把它跟原子物理学和原子核物理学的研究联系在一起。的确，自加速器问世的那天起，它就是为原子物理和原子核物理研究服务的，成为物理学家研究原子结构的有力武器。但是，为了适应科学技术和客观形势发展的需要，加速器的这种单一用途的局面开始发生变化。例如，第二次世界大战的时候，由于战争的需要，一批主要的核科学家都暂时转到更重要的国防规划中去了。为了重武器材料的常规检查，生产了相当数量的超高压电子加速器和电子感应加速器。战争结束后，为了弥补因战争给研究和医疗计划带来的损失，又建造了一批新的加速器。不久，由于石油化工对核辐射技术的实际应用所引起的兴趣，迎来了加速器在高分子聚合物领域应用的一个小高潮。同位素在疾病诊断和治疗方面的应用给加速器的应用开辟了另一新途径，而且发展异常迅速，现在它已成为“核医学”中的重要一员。以上事实说明，工农业生产的发展，科学技术的进步，人民生活的需要，推动加速器一步一步向前进。反过来，加速器的不断完善与发展又能更好地为国民经济各部门服务。今天，加速器辐射技术的应用范围已十分广泛，遍及到了国民经济的许多部门。它效率高，省能源，无公害，技术先进，经济效益显著，被誉为原子能工业中的“轻工业”部门之一。据统计，全世界已有四千台以上的各种低能加速器在不同的应用领域运行着，

而且还在以每年20%左右的增长率增长。

但是，加速器的这些新应用并不为大多数人所知道。不少人对射线有“恐惧感”、“神秘感”，觉得它既神秘又可怕。这种情绪和心理状态对射线辐射技术的推广应用是一大障碍。事实上，射线既不神秘也不可怕，只要防护严密，使用得当，它是可以为人类造福的。今天，家庭中的电视机，医院中普遍使用的X光机，各种医用加速器等等都是会产生射线的装置，但是，人们并没有拒绝接受它们。

在已有的有关加速器的论著中，大多侧重讲述加速器的工作原理、结构和计算方法。而加速器的应用则叙述很少，更没有一本专门论述这方面的著作。为此，我们撰写了这本书。目的是向广大读者介绍辐射应用方面的知识，期望能够推动这一技术在我国得到发展应用，见到成效。书中重点介绍各种低能加速器在工业、农业、医疗卫生等方面的用途、应用特点和原理，列举了一些应用实例。有些章节还对应用中应注意的问题和具体工艺方法作了说明，这些说明对于有兴趣在自己所从事的工作中采用这项技术的读者来说是有裨益的。为了保持叙述的完整性，在涉及到中能加速器的某些应用方面，我们也作了简略介绍。由于加速器的用处很多，本书不可能把它们的所有方面都包括进去一一加以叙述。这样做有利于突出重点。另外，书中出现了一些内容交叉的情况，例如，中子活化分析的应用在工业的应用中讲了，在叙述农业和医疗卫生方面的应用时又讲了，这是由于本书按工、农、医三大领域的应用进行叙述所造成的。

最后，我们希望通过本书能够对在工业、农业、医学等领域工作的科技工作者、干部、工人及大专院校有关专业的师生有所帮助。由于本书内容广泛，涉及的专业面较多，限

Ⅳ

于作者学识水平，错误之处在所难免。诚恳欢迎有关方面的专家、学者和广大读者赐教指正。

本书第一、三、四章由何有余同志负责编写，第二章由方承炜同志负责编写。全书由张朝汉同志负责审阅。书中所有的照片均由何燕明同志提供，在此表示感谢。

作者 1983年10月

目 录

前言

第一章 带电粒子加速器概述	1
第一节 加速器发展概况	1
一、加速器发展概况	1
二、加速器的分类	7
三、加速器用途简介	8
第二节 高压加速器	9
一、静电加速器	10
二、绝缘芯变压器型加速器	13
三、倍压加速器	18
四、高频高压加速器	21
五、电子帘加速器	25
六、离子注入机	27
第三节 回旋加速器	31
一、普通回旋加速器	31
二、等时性回旋加速器	34
第四节 电子感应加速器	36
一、基本原理	37
二、特点及用途	39
第五节 低能电子直线加速器	43
一、基本原理	44
二、优点及用途	47
第六节 电子回旋加速器	50
一、基本原理	53
二、特点	55

三、应用范围	57
附录1-1 美国辐射动力公司生产的高频高压加速器	61
附录1-2 美国能源科学公司生产的电子帘加速器	61
附录1-3 国外离子注入机的主要性能指标	62
附录1-4 国外电子感应加速器一览表	64
附录1-5 国外电子回旋加速器一览表	66
附录1-6 国外工业射线无损检测用电子直线加速器一览表	68
第二章 低能加速器在工业上的应用	69
第一节 在辐射化学方面的应用	70
一、辐射源	71
二、辐射化学反应的优点	75
三、射线在高分子聚合物中的应用	76
第二节 在工业无损探伤中的应用	132
一、工业无损探伤概况	132
二、射线探伤的原理、方法及其特征	133
三、几种射线源	136
四、射线探伤用加速器	137
五、射线照相法探伤的几个具体问题	138
六、射线照相探伤的应用范围	148
七、应用举例	149
第三节 在材料科学方面的应用	150
一、概况	151
二、离子注入在半导体材料和器件中的应用	153
三、离子注入在金属材料中的应用	157
四、模拟中子辐照研究材料损伤	170
五、离子注入用低能离子加速器的选择	172
第四节 在分析技术方面的应用	173
一、快中子活化分析及其应用	174
二、带电粒子活化分析及其应用	178

三、光子活化分析及其应用	181
四、离子束分析及其应用	181
第五节 在纺织工业中的应用	188
一、纤维和织物的辐射改性处理	189
二、非织造织物的粘接——无纺布	195
三、织物的表面涂层整理	196
四、纺织品的印染加工	197
第六节 在环境保护方面的应用	200
一、废烟气的辐照处理	201
二、废水的辐照处理	203
三、废物的辐照处理	205
四、污泥的辐照处理	207
第三章 加速器在医疗卫生方面的应用	212
第一节 在放射治疗方面的应用	213
一、放射治疗的发展概况	214
二、放射治疗对加速器的基本要求	231
三、放射治疗用加速器	249
第二节 在诊断方面的应用	261
一、射线照相	263
二、同位素诊断	280
三、快中子活化分析	285
第三节 在医疗器械、医用材料和药品的消毒灭菌 方面的应用	287
附录3-1 国外医用电子直线加速器一览表	291
第四章 低能加速器在农业上的应用	294
第一节 辐射育种	298
一、辐射育种的基本原理	299
二、辐射育种的优点	300
三、辐射育种若干成果简介	303

VI

四、辐射育种对加速器的要求	306
第二节 辐射保藏食品	307
第三节 辐射刺激生长	313
第四节 在其他方面的应用	314
一、快中子活化分析在农业上的应用	314
二、应用加速器生产的短寿命放射性同位素研究施肥及 土壤管理	314
三、防止农业害虫的危害	317
参考文献	318

第一章 带电粒子加速器概述

用人工方法加速带电粒子，使其动量增加的装置叫“带电粒子加速器”，一般简称加速器。

利用加速器不仅能加速电子、质子、氘核、 α 粒子，而且还能加速周期表上全部元素的离子，使它们获得不同能量。利用这些直接加速出来的带电粒子与物质相互作用，还可以产生各种带电或不带电的次级粒子，象 γ 粒子、中子及介子、超子、反粒子等等。被加速出来的带电粒子或由它产生的次级粒子不仅可以用于高能物理、重离子物理、低能物理各研究领域，而且也可以应用于工业、农业、及医疗卫生等部门。

第一节 加速器发展概况

一、加速器发展概况

1919年英国物理学家卢瑟福利用天然放射性物质放出的7.7兆电子伏能量的 α 粒子作为弹核实现了第一个核反应。物理学家为了进一步开展核物理领域内的研究工作，提出了建造加速器的要求。利用加速器不仅可以得到能量更高、流强更大的带电粒子束，而且还可以连续地改变带电粒子的能量，从而使原子核物理的研究工作进入兴旺时期，使加速器技术迅速发展起来。

1932年科克劳佛(J. D. Cockcroft)和瓦尔顿(E. T. S. Walton)用倍压线路作电源，建成了一台倍压加速器，获

得了能量约700千电子伏的质子流，打到锂靶上，实现了第一个利用人工加速粒子进行的核反应。

1931年范德格拉夫 (R. J. Van. de Geraaff) 建成了世界上第一台静电起电机，其电势差达1.5兆伏。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。这种加速器比倍压加速器容易达到较高的能量，并且粒子的能量较均匀，所以发展很快。到本世纪五十年代初，质子静电加速器的最高能量已达到5兆电子伏。1958年美国高压工程公司建成了世界上第一台串列式静电加速器，以获得更高的能量。到目前为止，串列式静电加速器已有80多台，分布在20多个国家。近来，端电压20兆伏以上的所谓超级“串列静电加速器”也已投入运行。现在静电加速器已能产生30兆电子伏的质子流，50~60兆伏范围的串列式静电加速器也在研究设计之中。

在高压加速器发展的同时，回旋式加速器也迅速发展起来。

1930年劳伦斯 (E. O. Lawrence) 提出了建造回旋加速器的设想。1931年建成了第一台回旋加速器能把 H^+ 加速到80千电子伏，证实了回旋加速器的工作原理。1932年又建成了一台磁极直径约27厘米的回旋加速器，能把质子加速到1兆电子伏。到1939年左右，回旋加速器所产生的粒子的最高能量已超过同时期其他类型加速器的能量，当时已能产生约20兆电子伏的氘核。1956年建成了世界上第一台等时性回旋加速器，以后这种结构紧凑、能量较高的回旋加速器发展很快。目前这种回旋加速器已取代了普通回旋加速器，在中能范围取代了稳相加速器。医用等时性回旋加速器现在已商品化。有的国家已有定型产品。到目前为止，已建成的和正在

建造中的等时性回旋加速器已超过100台，能量多为几十兆电子伏，其中还有三台大型的分离扇形回旋加速器的能量已达几百兆电子伏。能量更高的超导分离扇形回旋加速器也在建造和设计中。

除了发展加速质子和重离子的回旋式加速器外，加速电子的感应加速器也很快发展起来。

1940年第一台电子感应加速器建造成功，其能量为2.3兆电子伏。1942年建成20兆电子伏的感应加速器多台，用于光核反应及无损检验。1945年，100兆电子伏的电子感应加速器也建造成功。目前，许多国家都有定型的产品。据不完全统计，目前全世界已有100多台这类加速器在工作着，其中大多数的能量都在20~30兆电子伏，仅有1台的能量高达315兆电子伏。

为了适应高能物理的发展，加速器也迅速地向中、高能发展。

1944年维克斯列尔 (В. Ц. Векслер) 发现谐振加速器中的粒子具有自动稳相现象，从此，一系列能量较高的加速器便陆续建成。于1946年建成了一台磁极直径466厘米的稳相加速器，能把氦核加速到190兆电子伏， α 粒子加速到380兆电子伏。曾建成近20台这种加速器，质子能量一般在几十到几百兆电子伏，能量最高的一台已达10亿电子伏。

1947年70兆电子伏的电子同步加速器建造成功。目前已运行的电子同步加速器的能量一般在几十到几千兆电子伏，能量最高的一台是美国康奈尔大学1967年建成的120亿电子伏电子同步加速器。

在同一时期，也着手建造质子同步加速器。1952年美国布鲁克海汶实验室建成30亿电子伏质子同步加速器。此后几

年内共建成这类弱聚焦质子同步加速器 7 台，其中美国普林斯顿和布鲁克海汶的 30 亿电子伏加速器已关闭，美国贝克莱的 62 亿电子伏质子同步加速器也已用于加速重离子。这类加速器中能量最高的是苏联联合核子研究所的 100 亿电子伏质子同步加速器。

1952 年美国库兰特 (E. D. Corant) 提出了交变梯度磁场的强聚焦原理。1959 年西欧原子核中心建成世界上第一台强聚焦质子同步加速器，能量为 280 亿电子伏。1960 年美国布鲁克海汶实验室的 330 亿交变梯度质子同步加速器也投入运行。这类强聚焦型质子同步加速器也称为组合作用型或普通强聚焦型质子同步加速器，加速器的磁铁同时起弯转和聚焦两种作用。组合作用强聚焦质子同步加速器在世界上共建成四台。其中，1967 年苏联在谢尔普霍夫建成 760 亿电子伏质子同步加速器，最高能量也达到超高能区，但其磁铁却重达 2 万吨。

近年来建造的一些质子同步加速器多采用分离作用的强聚焦系统，同时利用增强器把注入能量提高到 5 亿电子伏以上。这样使主加速器的技术性能指标得到了提高，并降低了造价。

1972 年美国费米研究所的 2000/5000 亿电子伏质子同步加速器投入运行，随后西欧中心的 4000 亿电子伏质子同步加速器和日本高能物理所的 120 亿质子同步加速器也陆续投入运行。美国和西欧中心均打算用超导磁铁环使其能量达到 1 万亿电子伏。能量高达 2 万亿电子伏，甚至 10 万亿电子伏的质子同步加速器也在讨论之中。

为了解决高中能电子加速器的注入问题，提高其脉冲流强，又出现了一种微波回旋式加速器，即电子回旋加速器。

1948年在加拿大建成第一台电子回旋加速器。随后许多国家也相继建成这类加速器，但当时由于流强很低，较长时期未得到重视。到本世纪六十年代初解决了粒子注入理论、粒子聚焦理论和一些技术问题之后，很快在一些国家研制成了高效率稳定工作的电子回旋加速器。

在回旋式加速器发展的同时，在第二次世界大战期间，由于雷达技术的发展，使微波直线加速器迅速发展起来。1947年在美国斯坦福建成世界上第一台微波电子直线加速器。随后电子直线加速器在物理、工业和医疗卫生方面得到了十分广泛的应用。电子直线加速器不仅在数量上而且在品种上都得到迅速的发展，成了目前发展最快的一类加速器。目前全世界已有1千多台电子直线加速器在工作着，许多公司都有定型的商业产品，其能量大部分都在几兆电子伏至几十兆电子伏，能量最高的一台是美国斯坦福直线加速器中心的220亿电子伏电子直线加速器。

由于核物理基础研究的需要，质子直线加速器也不断发展。但是由于这类加速器造价高、技术要求复杂，所以近年来发展缓慢。目前世界上最大的一台是1972年美国洛斯阿拉莫斯科学研究所建成的8亿电子伏质子直线加速器。

为了满足工农业生产的需要，还发展了几种新型的大功率高压电源，如绝缘芯变压器、高频高压发生器等。

此外，还发展了模拟核爆炸，用于军事等特殊用途的强脉冲电子束发生器。

由于基本粒子物理学研究的需要，各种不同类型的对撞机也迅速发展起来。1966年法国建成一台5亿电子伏的电子-正电子对撞机(ACO)。随后，联邦德国、美国、意大利、苏联等国也先后建成了电子-正电子对撞机，能量大多在几

十亿电子伏。目前能量最高的电子-正电子对撞机是联邦德国1978年建成的190亿电子伏电子-正电子对撞机(PETRA)。西欧核子中心也在计划建造700亿电子伏的大型电子-正电子对撞机(LEP)。

1971年西欧中心建成一台280亿电子伏的质子-质子对撞机(ISR)。美国布鲁克海汶研究所正在利用超导磁体,建造7千亿电子伏的连续束质子-质子对撞机(ISABELLE)。

1967年有人提出用电子束“冷却”反质子流,改善其性能,以获得密度大的强反质子流。由于通过实验证实了这种原理是行之有效的,所以有的实验室也在考虑把已有的高能质子同步加速器改建成质子-质子对撞机。1978年西欧中心开始建造世界上第一台质子-反质子对撞机,每束能量为3千亿电子伏。这个器叫反质子累积器(简称AA)。美国费米研究所正在设计2万亿电子伏的质子-反质子对撞机(即,每束能量为1万亿电子伏),1985年可望建成。

回顾50多年来加速器的发展过程,可以看到加速器是为了研究原子核而着手建造的,以后随着科学研究、工农业生产、医疗卫生、国防、能源等方面对加速器需要的增长,在电子、微波、自控、计算、超导、物理等科学技术成就的基础上,加速器技术发展十分迅速。不仅被加速粒子的最高能量每隔7~10年就提高约10倍,而且加速器的数量也以年增长率10%的速度递增。目前常用加速器的种类已超过20多种,全世界已有数千台加速器在不同的领域工作着。有的类型的低能加速器已超过1千台。象电子直线加速器、静电加速器、倍压加速器、绝缘芯变压器型加速器、高频高压加速器、电子感应加速器、等时性回旋加速器等均已投入小批量工业生产,并有系列产品出售,供各部门选用。

二、加速器的分类

我们知道现在常用的加速器器型已超过20多种，数量已多达几千台。人们从不同的角度，对这些加速器有不同的分类方法。

按被加速粒子的最终能量，人们通常认为被加速粒子的最高能量在1000兆电子伏以上的是高能加速器，能量在100兆电子伏以下的是低能加速器，能量在100至1000兆电子伏的是中能加速器。

按加速器的用途，加速器常被分为辐照用加速器、医用加速器、射线无损检测用加速器、离子注入机、中子发生器等。

按加速粒子的种类，人们常将加速器分为电子加速器、质子加速器、重离子加速器和全离子加速器等。

上述这些分类方法及加速器名称在有关加速器的一些文献中是经常出现的。不过比较系统的，能把现有加速器都能包括，而且也是最常用的加速器分类方法，是按粒子在加速过程中运动的轨迹与其加速原理相结合的分类方法。这样，加速器大致可分为以下四大类。

1. 高压加速器

这类加速器是让带电粒子一次或两、三次通过一个高压电势差，而得到加速的。这类加速器可以用来加速电子、质子、氘核、氦核以及其他重离子。这类加速器有倍压加速器、静电加速器、串列静电加速器、绝缘芯变压器型加速器、高频高压加速器、脉冲电子加速器等。

2. 涡旋电场加速的回旋式加速器

在这类加速器中，利用导向磁场约束粒子，使粒子作回旋运动，用电磁感应产生的涡旋电场加速粒子。电子感应加