

叶铭汉等著
陈鑑璞

静电加速器

科学出版社

靜 电 加 速 器

叶銘汉 陈鑑璞 等著

赵忠尧 审校

內 容 簡 介

在本书中,作者根据实际工作经验和文献资料,比較全面地介紹和討論了质子靜电加速器的各个主要部件的原理、設計以及調整运行等。这些主要部件是:靜电起电机、分析器、高頻离子源、加速管、聚焦系統和真空系統。书中还介紹了靜电加速器的发展簡史和应用。对于串列式靜电加速器及其負离子源也作了介紹。

本书材料丰富,可供設計和使用靜电加速器的有关科学技术人員和大学有关专业师生参考。

靜 电 加 速 器

叶銘汉 陈鑑璞 等著

赵忠尧 审校

*

科学出版社出版

北京朝阳門内大街 117 号

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

上海新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1965 年 9 月 第 一 版 开本: 850×1108 1/32

1965 年 9 月 第 一 次 印 刷 印 張: 21

精 裝: 0001-1,750 插 頁: 3

平 裝: 0001-1,450 字 數: 535,000

統一書号: 13031·2059

本社書号: 3158·13-3

定 价: [科六] 精 裝 本 3.60 元
平 裝 本 3.10 元

序 言

加速器是研究原子核物理必不可少的设备之一。在原子核物理学的发展过程中,静电加速器作为一种重要的实验工具,一直起着很大的作用。由于它具有独特的精确性(被加速粒子的能量均匀和可以精确测定等等)和灵活性(能量可以连续调节和可以加速多种粒子等等),因而一直是 1—6 兆电子伏能量范围内最常用和最接近理想的加速器。

1958 年,第一架串列式静电加速器建成,这是静电加速器发展中的一个重要的里程碑。它保持了静电加速器原有的特点,而将被加速粒子的能量提高到 10 兆电子伏以上(对单电荷粒子而言),这对于原子核物理和原子能利用的基础研究工作有着极其重要的意义。从 1958 年以来,世界各国低能核物理研究中心竞相建立 10 兆电子伏(质子)以上的串列式静电加速器,已建成和正在建造中的就有二十多架。由于串列式静电加速器的出现,静电加速器已成为 1—12 兆电子伏能量范围内最重要的加速器之一,在低能核物理实验室中,保持着独特的重要地位。目前,串列式静电加速器正在向更高的能量发展,估计在最近几年内,有可能把加速粒子(单电荷粒子)的能量提高到 20 兆电子伏以上;在十年内,有可能提高到 30 兆电子伏。由此看来,静电加速器的发展前景是十分远大的。

近年来,静电加速器已越出传统的核物理领域,在工农业和医学等各方面也获得了广泛的应用。在有些国家中,静电加速器已经有了工业生产。

根据不完全统计,现在全世界已有静电加速器约 375 架,其中

有 358 架是动带型的。随着静电加速器在各方面应用的进一步扩大以及静电加速器本身技术的进步而引起的更新,显然,它的数目还会继续不断地迅速增加。可以想象,接触到静电加速器的人也将越来越多。

本书于 1959 年开始撰写,当时还没有一本系统地论述静电加速器的专著¹⁾。为了掌握静电加速器的某一个问题,人们时常必须查阅大量散见于各杂志的有关文献。我们写这本书的目的,就是企图弥补上述缺陷,为有关人员提供一本比较全面地系统介绍和讨论静电加速器的工作原理、设计以及维护、运转等方面的参考书,以便他们能在本书的基础上较快地掌握静电加速器。但是,由于我们的水平所限,这本书距离原定目标恐怕还有一定的距离。

本书第一章对静电加速器的发展过程作了较详细的介绍,目的是帮助读者了解现代的静电加速器是怎样演变发展而来的,它曾经遇到了哪些技术困难,等等。

第二、三章讨论电场和高电压系统的设计以及输电系统,这一部分是静电加速器高电压产生的关键。在这两章中,对于气体介质的性质、最佳比例、总体设计、具体部件的结构设计、各种输电方法、输电电流的限制等等,都作了比较详细的讨论。

第四章讨论电压(能量)测量及其稳定,对分析器(特别是静电分析器)的原理和结构有较详尽的讨论,介绍了稳定电压的各种方法。在能量校正方面,所述材料比较详细和实用,对有关的实验技术作了较多的介绍。

第五章介绍静电加速器最常用的一种离子源——高频离子源。对于有关的各个问题都作了相当详细的介绍。关于离子源的桌上试验,在这一章中也有一定的介绍,目的是帮助初次制作高频

1) 从 1959 年到 1963 年年中,陆续出版了一些会议论文集和评述性文章,如 (1) Herb, R. G., Handbuch der Physik, Band XLIV (Springer-Verlag, Berlin, 1959), 64; (2) Вальтер, А. К., Электростатические генераторы (Атомиздат, Москва, 1959); (3) 日本静电加速器论文集(科学出版社,北京, 1960); 等等。在写作本书的过程中,曾参考了这些材料。

离子源的讀者,使他可以比較順利地开展工作。

加速管是现代静电加速器的心脏,往往是它限制了加速器的最高电压,因而是加速器的最关键部分。目前对于加速管击穿机制的了解还是不很清楚的。对于这样一个复杂的问题,在第六章中力求从已有的各种假说、理论和实验结果的分析中得出一些设计中应该遵循的原则,其中特别注意了对已有加速管的运行特性进行分析。

对于聚焦系统的设计,在第七章中提出了一整套的计算方法,并附有计算的例子。对于想掌握聚焦计算的读者说来,这都是十分有用的。

静电加速器的真空系统有它自己的一些特殊的问题,如扩散泵抽氩气问题、加速管气导计算以及水银扩散泵和油扩散泵的选择问题等等。第八章主要就是对这些问题进行讨论。此外,结合静电加速器真空系统的设计和维修,在这一章里对真空系统的某些部件、真空测量、探漏等也作了介绍。

第九章是介绍静电加速器的应用。正如前面已提到的,静电加速器的应用范围正在日益扩大,了解已有的这些应用,将有助于使静电加速器在各个方面更好地发挥它的作用。

串列式静电加速器在技术上和单级静电加速器基本上是相同的,但它也有一些特殊问题,如负离子源等。此外,在串列式静电加速器如此迅速发展的时候,已有的和正在建造中的这些加速器的技术参数和进展情况,读者想必是很关心的。所有这些,都将分别在第十、十一两章中介绍。

本书虽然只限于讨论动带型质子静电加速器的有关问题,但由于电子静电加速器的许多问题与它是相同的,有些问题甚至还要简单一些,所以本书绝大部分内容也适合于电子静电加速器的工作者阅读。关于应用的一章也包括了电子静电加速器的各种应用。

本书由叶铭汉主编。各章的作者如下:第一、三、九、十、十一

章——叶銘汉,第二、六、七章——陈鑑璞,第四章——夏广昌,第五章——叶銘汉、張华順、阮同澤、陈鑑璞和李根澧,第八章——陈鑑璞、張仲木和叶銘汉。

我們愿借此机会謹向赵忠尧先生致以衷心的感謝,我們是在赵先生的指导下开始工作的。赵先生对本书手稿作了很細致的审校,提出了很多宝贵的意見。

本书是在有关领导的鼓励下开始写作的。五年来,我們的工作得到了很多同志的帮助和关心,特别是和我們一起工作的同志們,沒有他們的支持,这本书是难以完成的。李整武先生和謝家麀先生曾审閱了部分手稿,徐建銘先生曾审閱了全部手稿,刘雪光等同志为本书繪制了絕大部分插图,作者謹在此一併表示感謝。

我們在写作本书时,力求包括最新发展材料,但是,由于靜电加速器有关技术的迅速发展,遺漏总是难免的。由于学識所限,也难免有錯誤之处。我們衷心希望讀者协助,多多提出批評和指正。

作者 1963年10月

目 录

序言	iii
第一章 发展簡史、现状	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 发展簡史	4
1.2.1 早期发展	4
1.2.2 大气型静电加速器	6
1.2.3 高气压型的发展	14
1.2.4 电流的提高	19
1.2.5 5兆电子伏技术关	20
1.2.6 12兆电子伏静电加速器的建造	23
1.2.7 串列式静电加速器	26
§ 1.3 现状	32
参考文献	36
第二章 电場和高电压系統的設計	39
§ 2.1 引言	39
§ 2.2 起电原理	40
§ 2.3 气体絕緣介质	41
2.3.1 气体放电理論	43
2.3.2 电場均匀度和气压对击穿电压的影响	44
2.3.3 静电加速器中常用的一些气体介质	48
2.3.4 气体湿度的影响	52
§ 2.4 加速器的最高电压	53
§ 2.5 基本尺寸的确定——最佳比例	54
2.5.1 最佳比例	55
2.5.2 修正系数	57
2.5.3 基本尺寸的确定	62
§ 2.6 中間电极	65

2.6.1	电极尺寸的确定	65
2.6.2	电极电势的确定	71
§ 2.7	鋼桶	72
2.7.1	型式和結構	72
2.7.2	鋼桶尺寸	75
§ 2.8	高压电极	76
2.8.1	形状	76
2.8.2	电极材料和光洁度	77
2.8.3	电极尺寸	78
§ 2.9	分压柱	79
2.9.1	絕緣柱(或絕緣块)	79
2.9.2	分压片(分压环)	82
2.9.3	分压柱的結構	85
2.9.4	橫式結構	86
§ 2.10	分压系統——电阻或电量針	88
§ 2.11	过电压保护	92
	参考文献	94
第三章 电荷的輸送		97
§ 3.1	引言	97
§ 3.2	大气压下的輸电	99
3.2.1	輸电电流的限制	99
3.2.2	提高电荷密度的方法	100
§ 3.3	高压压下的輸电	107
3.3.1	輸电帶表面电場的控制	107
3.3.2	电荷密度的限制和費利西型起电机	110
3.3.3	临界气压	111
3.3.4	較高高压压下的輸电	114
§ 3.4	輸电系統的各个部件	116
3.4.1	輸电帶	116
3.4.2	噴电、吸电針排	118
3.4.3	分压棍和保护棍	122
3.4.4	其他	125
§ 3.5	其他輸电方法	127
§ 3.6	两种新型大电流高压起电机	128

3.6.1 絕緣磁心变压器	128
3.6.2 高頻高压倍加器	132
参考文献	134
第四章 电压的测量和稳定	136
§ 4.1 电压的測量	136
4.1.1 引言	136
4.1.2 几种測量方法	137
§ 4.2 分析器	142
4.2.1 聚焦关系和分辨率	142
4.2.2 静电分析器	149
4.2.3 磁分析器	170
4.2.4 静电分析器和磁分析器的比較	180
§ 4.3 电压的稳定	182
4.3.1 引言	182
4.3.2 誤差訊号的取得	184
4.3.3 穩压方法	186
4.3.4 均能器法	197
§ 4.4 能量校正	199
4.4.1 能量校正	200
4.4.2 能量分布的實驗測定	206
4.4.3 实验技术	211
参考文献	229
第五章 高頻离子源	233
§ 5.1 引言	233
5.1.1 对离子源的一般要求	233
5.1.2 静电加速器离子源概述	234
5.1.3 高頻离子源发展簡史、现状	238
5.1.4 一般結構	244
§ 5.2 离子的产生	247
5.2.1 第一类放电	247
5.2.2 第二类放电	252
5.2.3 氢气的电离和质子比問題	254
§ 5.3 附加磁場的影响	261
§ 5.4 离子的引出	266

5.4.1 简单理论	266
5.4.2 实验结果	270
5.4.3 其他	275
§ 5.5 离子束的能谱、调制特性和散角	280
5.5.1 离子束的能谱	280
5.5.2 离子束的调制特性	282
5.5.3 离子束的散角	283
§ 5.6 桌上试验	285
5.6.1 引言	285
5.6.2 测量方法及其他	287
5.6.3 几个问题	290
§ 5.7 典型源介绍	300
5.7.1 谢尔比诺夫源	300
5.7.2 莫克源	302
§ 5.8 应用在加速器上的一些问题	304
5.8.1 线路安排和安装	305
5.8.2 元件的选择和要求	306
5.8.3 控制和观察系统	308
§ 5.9 静电加速器用的其他离子源	309
5.9.1 氘离子源	309
5.9.2 氦离子源	310
5.9.3 氦和氦 ³ (He ³)离子源	312
5.9.4 锂离子源	312
参考文献	314
第六章 加速管	318
§ 6.1 对加速管的要求	320
6.1.1 高电压和聚焦	320
6.1.2 高真空和密封	321
6.1.3 高气压和强度	322
§ 6.2 加速管内的放电	322
6.2.1 真空击穿现象和理论的发展	324
6.2.2 “电子负载”——加速管的不完全击穿	328
§ 6.3 抑制电子负载的一些方法	332
6.3.1 适当地降低加速管内真空度	332
6.3.2 抑制场	333

6.3.3 小孔径	335
6.3.4 “倾斜电场”加速管	342
§ 6.4 电离负载	344
§ 6.5 加速电极	345
6.5.1 加速电极材料的选定和表面光洁度的影响	345
6.5.2 加速电极形状	350
§ 6.6 绝缘环	356
6.6.1 绝缘环的材料	358
6.6.2 绝缘环的设计	360
§ 6.7 电极和绝缘环的密封方法	364
6.7.1 对粘接的一些要求	365
6.7.2 维尼西耳	365
6.7.3 БФ-4 胶	366
6.7.4 阿腊迪特	368
6.7.5 定位	369
6.7.6 粘接工艺对单节加速管绝缘性能的影响	369
参考文献	371
第七章 离子光学和加速器的聚焦系统	374
§ 7.1 离子光学	376
7.1.1 离子光学和几何光学的相似性	376
7.1.2 规范化电势	378
7.1.3 旁轴轨迹方程式	379
7.1.4 静电透镜的性质	381
§ 7.2 静电透镜	384
7.2.1 浸没透镜	384
7.2.2 膜片透镜	389
7.2.3 单透镜	391
§ 7.3 加速管的离子光学性质	395
7.3.1 圆筒电极加速管	396
7.3.2 等梯度加速管	402
7.3.3 变梯度加速管	407
§ 7.4 总体聚焦和初聚系统	409
7.4.1 关于“匹配”	409
7.4.2 初聚系统	410
7.4.3 周期场透镜	418

7.4.4 总体聚焦	419
7.4.5 离子束位置的调节	430
参考文献	432
附录	434
第八章 真空系统	444
§ 8.1 真空系统的计算和设计	444
8.1.1 加速管气导的计算	444
8.1.2 泵速的确定	450
§ 8.2 泵、前级罐、冷阱	453
8.2.1 油扩散泵和水银扩散泵	453
8.2.2 扩散泵抽氦气的问题	455
8.2.3 扩散泵在使用中的一些问题	457
8.2.4 机械泵在使用中的一些问题	462
8.2.5 前级罐	466
8.2.6 冷阱	468
§ 8.3 真空测量	474
8.3.1 皮氏真空计和热偶真空计	475
8.3.2 电离真空计和磁放电真空计	477
§ 8.4 真空检漏	480
8.4.1 漏孔的特性	482
8.4.2 打气试漏	483
8.4.3 分部隔离法	485
8.4.4 用探测气体进行的检漏	485
8.4.5 漏孔的修复	494
§ 8.5 真空连接	496
8.5.1 焊接	497
8.5.2 橡皮和金属密封	499
8.5.3 瓣形管连接	507
8.5.4 活动连接	508
§ 8.6 真空阀门	511
8.6.1 直通式阀门	512
8.6.2 针阀	515
§ 8.7 真空系统的安装、调试和运行	516
参考文献	519

第九章 应用	521
§ 9.1 引言	521
§ 9.2 原子核物理上的应用	522
§ 9.3 中子物理、反应堆物理和中子源方面的应用	523
§ 9.4 作为其他加速器的注入器	530
§ 9.5 教学培干方面的应用	531
§ 9.6 其他基础学科上的应用	532
§ 9.7 化学工业、食品工业等方面的应用	533
9.7.1 辐照处理的一些实例	534
9.7.2 工业应用方面的辐射源的选择	537
§ 9.8 探伤	540
§ 9.9 医学治疗	541
§ 9.10 活化分析、物体表面层的分析	542
9.10.1 活化分析	542
9.10.2 物体表面层的分析	544
§ 9.11 生产短寿命同位素	544
§ 9.12 宇宙航行研究	545
§ 9.13 静电加速器的一个重要发展方向——更可靠、更方便、更经济	546
参考文献	547
第十章 串列式静电加速器	549
§ 10.1 引言	549
§ 10.2 串列加速方法	552
10.2.1 基本原理	552
10.2.2 最高能量	555
10.2.3 三级串列和四级串列	558
10.2.4 其他提高能量的方法	560
§ 10.3 几个技术问题	562
§ 10.4 建造概况	566
10.4.1 已经建成的二级串列式静电加速器	568
10.4.2 正在建造中的串列式静电加速器	579
§ 10.5 应用	581
参考文献	586
第十一章 负离子源	588

§ 11.1 引言	588
§ 11.2 负离子的产生	589
§ 11.3 $H^-(D^-)$ 离子源	596
11.3.1 电子碰撞型	596
11.3.2 电荷交换型	598
11.3.3 电荷交换型 H^- 离子源的几个问题	611
§ 11.4 重离子负离子源	614
§ 11.5 中性粒子源	619
§ 11.6 负离子到正离子的转换	621
参考文献	625
附录 1 静电加速器统计表	627
参考文献	644
附录 2 世界各国工业生产的静电加速器规格	646
参考文献	650
人名对照表	651
内容索引	654

第一章 发展簡史、現狀

§ 1.1 引 言

大約在 2500 年以前, 希腊人就已經知道用毛皮摩擦过的琥珀具有吸引羽毛等輕小物体的性质. 大約在 1900 年前, 我国东汉时代的学者王充(公元 27—97 年)在“論衡”一书中也記載了“頓牟掇芥”. 頓牟就是琥珀, 掇芥就是吸引輕小物体的意思. 这种靜电現象虽然知道得很早, 但是一直到 1600 年左右, 才为吉伯(Gilbert)所注意研究, 从而开始了对于靜电現象的科学研究. 1670 年左右, 以馬德堡半球实验著名的盖里克(Guericke)在研究靜电現象时, 曾用手摩擦一个装在軸上轉动的硫磺球, 使它带电. 这可以說是最早的一个靜电起电机. 大家所熟悉的吐普勒-霍耳茲(Toepler-Holtz)感应起电机和韦姆修斯特(Wimshurst)感应起电机也已有将近一百年的历史了. 这些起电机虽然电流很小, 而且易受湿度的影响, 但却是当时实验室中常用的高压电源.

后来这种高压电源被更为可靠而方便的由变压器、整流管所构成的高压电源所代替. 因此, 靜电起电机已不大受人重視, 有些只作为教学示教用的仪器. 直到 20 世紀 30 年代, 原子核物理研究工作迫切需要几十万到几百万伏的高压装置来加速带电粒子, 随着这种实际需要的推动, 靜电起电机才又重新受到重視.

靜电起电机可以按照起电方法分为很多种. 其中在产生高压方面最为成功的是范德格喇夫的动帶型起电机, 它得到了广泛的应用和发展. 这种起电机配上离子源和加速管等, 就构成了动

带型靜电加速器,一般叫作靜电加速器。

除此之外,还有两种靜电起电机已用来构成靜电加速器。

一种是粉末型靜电起电机,用鼓风机吹动带电的粉末来运送电荷^[1]。目前用这种类型起电机所构成的加速器只有一架,电压达1兆伏^[2]。

另外一种是由費利西(Félici)作出的圓筒轉子型靜电起电机^[3],用圓筒形固体絕緣体作为电荷的輸送器。这种起电机輸出的电流比較大。在低电压(1兆伏以下)大电流(几毫安)方面,是很有发展前途的一种起电机。用它所构成的靜电加速器已經有十几架了。

本书主要討論加速离子的动带型靜电加速器(以后簡称为质子靜电加速器)的一些問題。在以后,如果没有特別說明,所提到的靜电加速器,都是指的加速离子的动带型靜电加速器。

* * *

随着原子核物理学的发展,加速器所加速的粒子(以后簡称为被加速粒子)的能量愈来愈高,目前已达300亿电子伏。那末为什么还要建造电压只有几兆伏(被加速粒子的能量約合高能加速器的万分之一)的低能加速器?这个問題不难回答。原子核在不同的能量状态下,具有不同的性质。为了全面了解原子核的性质,必須用不同能量的粒子去轰击它,使它发生变化,从而研究它的各种性能。各种加速器所加速的粒子能量各有一定的范围,因此各种能量的加速器都不能偏廢。在低能范围内,目前有关原子核的种种問題,离完全解决也还有很大一段距离,还需要做很多工作。所以尽管今天被加速粒子的能量愈来愈高,但低能加速器也絲毫沒有失去它的重要性,仍旧在繼續发展和大量建造中。

在低能加速器中,目前应用最多的一种是靜电加速器,这是由于靜电加速器具有一系列的优点,因此它在1—12兆电子伏范围内占有十分重要的地位。

我們先討論一下理想的低能加速器所应具备的性能,然后討