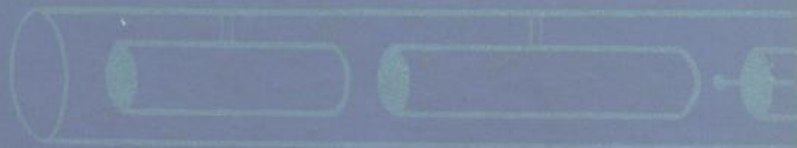
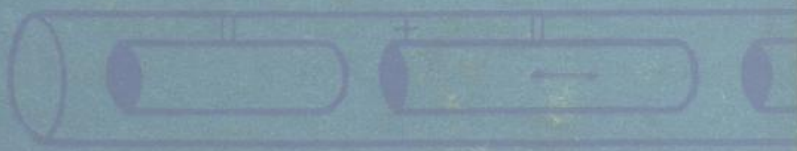


电子直线加速器

姚充国 著



科学出版社

53.9312-2

427

1

电子直线加速器

姚充国 著



科学出版社

1986

9610247

内 容 简 介

本书系统阐述电子直线加速器的基本原理,束聚焦理论、束负荷效应、加速波导的设计、计算方法和各种型式电子直线加速器的工作机制与主要特性,同时也论述了实验测量加速波导参数、加速管加工工艺和加速器调整方面等许多有关的问题,并着重介绍了许多国际上正在应用的电子直线加速器的理论和实验研究方法。

本书可供从事电子直线加速器方面研究和生产的广大科技人员和有关专业师生使用和参考。

电 子 直 线 加 速 器

姚 充 国 著

责任编辑 荣毓敏

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

*

1986年1月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1986年1月第一次印刷 印张:23 7/8

印数:精 1—1,000 插页:精 3 平 2

印数:平 1—1,200 字数:548,000

统一书号:13031·3048

本社书号:4191·13—3

定价: 布脊精装 6.20 元
平 装 5.60 元

序 言

本书中不可能对各方面的问题都作详细的论述，一些重要的问题也可能有所遗漏，望读者提出宝贵意见。

陈益梅同志参加了本书部分章节的编写工作。

在本书编著过程中，施士元教授给予了热情支持。谢羲研究员于1980年曾阅读过部分初稿。1982年夏刘乃泉副教授和林郁正同志阅读过大部分稿子。他们都提出了很好的意见。贾仲良同志在改进文字表述方面也提出了许多有益的建议。对他们一并表示谢意。

谢家麀教授承担了本书的审校工作。早在1979年底，谢先生阅读了本书初稿之后，就对内容安排和一些问题的具体论述提出了详细的书面修改意见。在以后的几次修改中又给予作者许多有益的指教，谨表示衷心感谢。

作者

1983年初于南京大学物理系

D035/01

符 号 表

如无特殊说明,本书用下列符号表示相应的物理量。采用 MKS 单位制。

$c = 299792456$ 米/秒——真空中光速;

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 法拉/米——真空中介电常数;

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利/米——真空中导磁率;

$e = 1.601 \times 10^{-19}$ 库仑——电子电荷;

$Z_0 = 120\pi$ 欧姆——自由空间波阻抗;

$m_0c^2 = 0.511$ 兆电子伏——电子静止能量;

r, θ, z ——圆柱坐标系中的坐标;

E, E_r, E_θ, E_z ——电场矢量及其分量;

H, H_r, H_θ, H_z ——磁场矢量及其分量;

F, F_r, F_θ, F_z ——力矢量及其分量;

$u, \gamma = \frac{u}{m_0c^2}$ ——电子总能量,相对总能量;

u_0 ——注入时或在加速段始端电子总能量;

φ, φ_s ——电子相对波的相位,平衡相位;

$\beta_e = v_e/c$ ——电子相对速度;

$\beta_p = v_p/c$ ——波相对相速;

$P_r, p_r = P_r/m_0c$ ——电子径向动量,相对径向动量;

P ——射频功率流;

η_p ——基波所占功率相对份数;

η ——射频功率转换成电子束功率的效率;

E_0 ——基波加速场振幅或加速段始端场振幅;

$A = \frac{eE_0\lambda}{m_0c^2}$ ——加速场强参数;

E_T, β_T, θ_T ——总场振幅,相速和相位;

λ, λ_g ——自由空间波长,波导波长;

$\kappa = 2\pi/\lambda$ ——波数;

β_0, β_n ——基波和第 n 次空间谐波传播常数;

$\chi_n = \sqrt{\kappa^2 - \beta_n^2}$ ——第 n 次空间谐波横波数;

f, ω, f_0 ——射频场频率,角频率和腔的固有谐振频率;

$\xi = z/\lambda$ ——以波长为单位的纵坐标

V_0, V_a ——注入电压,调制电压;

$\omega_\varphi, Q_\varphi = \omega_\varphi/\omega$ ——相振荡角频率及其相对角频率;

D_{rf}, D_b ——射频占空因子,束占空因子;

τ_{rf}, τ_b ——射频脉宽,束脉宽;

f_p ——脉冲重复频率;

s ——加速器俘获系数;

B ——聚束系数;

$\Delta\varphi$ ——束团相宽;

ϕ ——工作模式;

$\beta_g = v_g/c$ ——相对群速;

t_F ——波导建场时间;

τ ——波导衰减常数;

α ——电压衰减系数;

R_M, R_s ——特征阻抗,串联阻抗;

R_{s1} ——横向串联阻抗;

Q_0, Q_L ——固有品质因数,有载品质因数;

ω, W ——结构中贮能密度,总贮能;

E_p ——结构金属表面极大电场强度;

H_p ——结构金属表面极大磁场强度;

β_c ——外部波导与结构的耦合系数;

B_w ——通带宽度;

k_0 ——相邻加速腔和耦合腔之间的耦合系数;

k_1 ——最近两个加速腔之间直接耦合系数;

k_s ——最近两个耦合腔之间直接耦合系数;
 A_s ——加速系统允许发射度;
 D_p, D_s ——电子束发射度;
 L ——加速波导段长度;
 D ——结构周期;
 a, b, t ——栏片孔半径,腔内半径,栏片厚度;
 ρ ——栏片孔圆弧半径或束团中电荷密度;
 I_s, I_t ——脉宽无限时和有限时的束流崩溃阈电流;
 $I_p(I)$ ——脉内平均束流(即脉冲束流);
 I_s ——平均电子束流;
 I_t ——电子枪输出脉冲束流;
 P_s ——电子束功率;
 E_s ——束辐射场强;
 J_0, J_1, J_2 ——实宗量零阶,一阶和二阶贝塞耳函数;
 I_0, I_1, I_2 ——虚宗量零阶,一阶和二阶贝塞耳函数;
 N_0, N_1 ——零阶和一阶诺依曼函数。

目 录

符号表	vii
第一章 绪论	1
§ 1.1 电子直线加速器的历史	4
§ 1.2 电子直线加速器的现状和应用	12
§ 1.3 电子直线加速器的组成部件及其特点	39
第二章 电子直线加速器的基本原理	67
§ 2.1 稳相原理	68
§ 2.2 盘荷波导中的电磁场	72
§ 2.3 主要参数及其选取标准	80
§ 2.4 电子在行波电磁场中的运动	92
§ 2.5 腔式预聚器	102
§ 2.6 射频斩波器	111
§ 2.7 在常相速段中电子的运动	117
§ 2.8 低压注入技术	129
§ 2.9 变相速聚束段	134
§ 2.10 常阻抗加速波导	139
§ 2.11 常梯度加速波导	143
§ 2.12 反馈行波电子直线加速器	150
§ 2.13 驻波电子直线加速器	159
§ 2.14 超导电子直线加速器	162
§ 2.15 腔式耦合器对电子纵向运动的影响	170
第三章 横向运动	181
§ 3.1 横向运动的特点	181
§ 3.2 聚焦磁场的确定	188
§ 3.3 在漂移空间和主加速段中电子的横向运动	202

§ 3.4	影响电子横向运动的因素及克服办法	210
§ 3.5	空间电荷效应	224
§ 3.6	束流横向包络线方程	232
第四章	束流与波导中电磁场的相互作用	241
§ 4.1	功率平衡方程	241
§ 4.2	束负荷问题的性质	249
§ 4.3	束负荷引起的相位滑移	254
§ 4.4	束团相对外部射频场存在相移时束的辐射场	258
§ 4.5	在一般情形束的辐射场	263
§ 4.6	空间电荷对纵向运动的影响	266
§ 4.7	在加速波导中电磁场的合成问题	278
§ 4.8	基于功率平衡方程的瞬时束负荷理论	283
§ 4.9	束流崩溃	290
§ 4.10	束流崩溃机制的分析	304
§ 4.11	提高束流崩溃阈电流的方法	321
第五章	盘荷波导的计算	338
§ 5.1	场直接匹配的方法	338
§ 5.2	用变分法计算盘荷波导参数	361
§ 5.3	有限差分方法在计算盘荷波导特性上的应用	387
§ 5.4	混合模式电磁波	392
§ 5.5	有关盘荷波导参数的一些资料	407
第六章	电子直线加速器总体设计考虑	436
§ 6.1	加速器设计计算的一般说明	436
§ 6.2	盘荷波导尺寸确定和工作特性计算	442
§ 6.3	常 α 结构的设计	447
§ 6.4	反馈加速器的设计	450
§ 6.5	常阻抗加速波导特性的确定	457
§ 6.6	常梯度加速结构的设计	460
§ 6.7	改善能谱的方法	470
§ 6.8	短脉冲、强电流的获得	480

§ 6.9	正电子加速器	488
§ 6.10	射频粒子分离器	498
§ 6.11	能量倍增系统	520
第七章	加速波导的加工工艺和参数的实验测量	533
§ 7.1	加速管的加工工艺	533
§ 7.2	加速波导色散特性的傅里叶表示	538
§ 7.3	谐振法	541
§ 7.4	活塞探针法	545
§ 7.5	$\frac{R_M}{Q}$ 的测量(谐振扰动法)	550
§ 7.6	群速、 Q 值和衰减的测量	556
§ 7.7	加速波导的校正	562
§ 7.8	非谐振扰动测量技术	567
§ 7.9	加速波导的通带特性和耦合器的匹配	572
§ 7.10	加速波导的高功率试验	588
第八章	公差的影响	591
§ 8.1	尺寸的公差	592
§ 8.2	频率不稳定的影响及稳频	598
§ 8.3	温度不稳定性	609
§ 8.4	相位不稳定性	612
§ 8.5	功率和束流变化的影响	619
§ 8.6	射频系统	621
§ 8.7	调整相位的方法	624
第九章	双周期结构	633
§ 9.1	引言	633
§ 9.2	双周期结构的耦合电路理论	637
§ 9.3	加速腔的计算	646
§ 9.4	结构参数的选取	658
§ 9.5	加速器设计计算方法	666
§ 9.6	束聚焦的分析	678

§ 9.7 加工工艺和调谐	685
§ 9.8 高梯度加速结构	703
§ 9.9 三周期结构	710
参考文献	713

第一章 绪 论

按加速粒子的种类,加速器可以分为电子加速器、质子加速器和重离子加速器。而按在加速器中加速粒子运动的轨道,又可分成直线加速器和圆形加速器。各种类型加速器的原理在文献[1]中已作了详细的分析。本书主要讨论电子直线加速器。电子直线加速器,顾名思义,以直线形式加速电子。但它与静电加速器、直线电子感应加速器等又有不同,主要在于它采用射频场加速电子。它有两种基本形式:驻波型与行波型。

驻波型电子直线加速器的简单原理可见图 1.1(a)。图中 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 表示不等长度的铜质漂移管。这些漂移管主要起两个作用,一是电极,在相邻两漂移管之间建立电场,用以加速电子;二是屏蔽,使电子在漂移管内部运动时不受电场的作用,作漂移运动。当射频电压(对电子它的频率约为 3 千兆周,对质子约为 200 兆周)加在漂移管上时,漂移管的极性以射频频率改变,因此管间电场方向与大小也以射频频率改变。为了使电子不断受到加速,必须保持这样一个条件,当电子通过漂移管间的间隙时,漂移管的极性正好使电子处于加速电场,也就是说,电场的相位变化要与电子的运动同步,它们之间保持确定的相位关系。由于电子速度在增加,而射频电场的频率并不改变,因此必须随着电子速度的增加,而加长漂移管的长度。由于工作频率很高,加速结构常采用谐振腔形式,如图 1.1(b) 所示。电子速度随能量增加,迅速趋于光速,加速结构通常采用盘荷波导。漂移管结构主要用于加

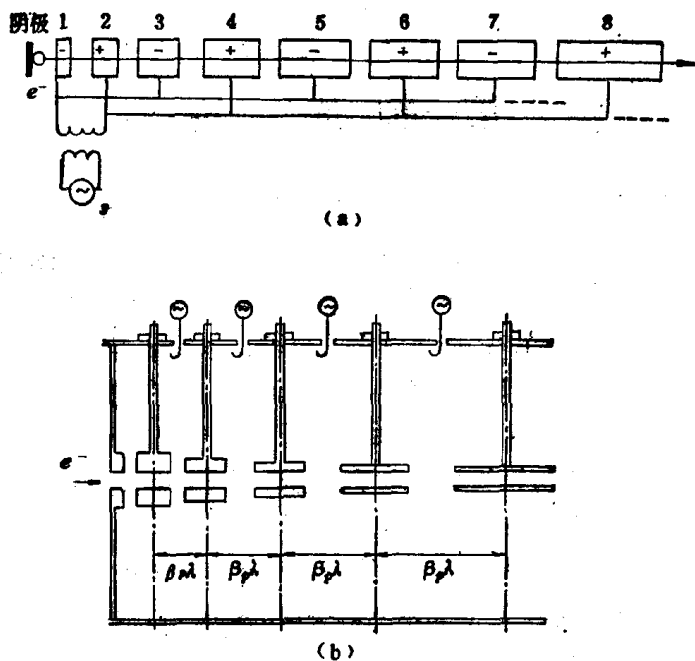


图 1.1 直线加速器原理图
(a) 射频电压直接加在漂移管上。 (b) 谐振腔结构

速质子。

在行波型电子直线加速器中,电子处于一行波场中,不断受到行波场的加速,能量逐渐增加。在此同样重要的问题是保持电子与加速场(这里是行波)的同步。

电子直线加速器是电子加速器中很主要的一种类型。能量和束流强度是衡量一种加速器性能的重要指标。由于电子直线加速器是利用射频场不断加速电子,因而不象静电加速器需要建立非常高的电压,只要适当的射频场强就能够把电子加速到较高的能量。而在环形同步加速器中,加速粒子走

圆形轨道。由于辐射要损失能量,而且随电子能量的提高,每圈的辐射损失迅速增加,因此,圆型加速器加速电子的能量有一个上限(单就加速而言,同步辐射是一个缺点,但最近几年发现,这种辐射是研究固体物理、光化学、生物物理和表面物理等的有力工具)。目前这个能量上限约为 12 千兆电子伏左右。采用超导加速腔,可望提高到 15 千兆电子伏。而在电子直线加速器中,电子在加速过程中走直线路径,几乎不存在辐射损失,可以达到更高的能量。目前最高已达 23 千兆电子伏左右,能量的进一步提高,原则上也没有重大困难。在输出电子束流强方面,直线加速器比同步加速器几乎要高 100 倍,因而有更高的束功率。束的注入和引出也较方便,出射束的发散角较小。根据需要,还可以方便地引出几种不同能量(直到加速器最高能量)的电子束。这些都是电子直线加速器的优点。它的缺点是技术比较复杂,造价较高,需要较多的高功率射频源(采用超导加速腔和再循环工作方式可克服这个缺点)。当加速器能量较高时,加速波导将很长,以 SLAC 加速器为例,能量 23 千兆电子伏,长度达 3 公里^[2,3]。

有关电子直线加速器的资料是非常丰富的。在这里值得特别提一下《斯坦福 2 英里直线加速器》(文献[2])和《直线加速器》(文献[4])这两本书。前者是电子直线加速器 SLAC 的详细设计报告,总结了斯坦福大学电子直线加速器中心多年的工作经验。鉴于斯坦福大学在电子直线加速器的发展过程中所起的先驱和主导作用,该书的价值是显而易见的。后者是一部巨著,由全世界许多著名的直线加速器专家分章执笔,共同写成。前半部分讨论电子直线加速器(后半部分论述质子直线加速器,最后一小部分讨论超导直线加速器),对电子直线加速器设计、制造和调整中涉及的许多专门问题有较详细的论述。苏联也出版了一系列关于电子直线加速器的小册子

和论文集。

还有许多资料发表在有关的加速器会议集上。如：国际高能加速器会议(1956年于 CERN, 1959 年后每两年一次)，直线加速器会议(1961 年到 1964 年, 每年一次, 1964 年后每两年一次)，特别是 1966 年在美国洛斯阿拉莫斯科学实验室召开的会议 (LA-3609), 主要讨论电子直线加速器。

美国全国加速器会议从 1965 年开始，每两年举行一次，会议文集发表在杂志 **IEEE Transactions on Nuclear Science** 逢单年份第三期上。苏联从 1968 年到 1978 年，共召开了五次全苏加速器会议。

此外，有关电子直线加速器的论文也散见于许多期刊中。许多研究所的内部报告，也是重要的资料来源之一。

§ 1.1 电子直线加速器的历史^[4]

用射频场加速带电粒子的思想早就提出来了。艾欣 (G. Ising) 1924 年首次提出了一个离子直线加速器方案。1928 年维得罗 (R. Wideröe) 成功地把钠和钾离子加速到 50 千电子伏。1931 年金登 (K. H. Kingdon) 提出了一个电子直线加速器设计方案。两年之后，比姆斯 (J. W. Beams) 等人建立了第一台电子直线加速器。该加速器有 15 个漂移管，脉冲电压 15 千伏，电子的注入能量是 28 千电子伏，最终被加速到约 90 千电子伏。后来，他们利用 300 千伏的脉冲和四个电极，把电子加速到 1.3 兆电子伏。这个小组所获得的最高电子能量是 2.5 兆电子伏，由于技术上的困难，最后放弃了这种方案。

电子直线加速器取得真正迅速发展，是在第二次世界大战以后。在战争期间，雷达技术有了迅速的发展，出现了高功率源——多阳极磁控管，脉冲功率达到兆瓦数量级，工作频率达 3000 兆周以上。同时在 1945 年，麦克米伦 (E. M. McMil-

lan) 和维克斯列尔 (B. И. Векслер) 分别阐明了稳相原理。因此,战后几个实验室都开始从事电子直线加速器的研制,导致实用的、现代的电子直线加速器的迅速出现和发展。

由弗赖伊 (D. W. Fry) 和沃金肖 (W. Walkinshaw) 领导的一个物理小组,1946 年在英国原子能所首先建立了世界上第一台现代的电子直线加速器^[5]。该加速器的加速波导全长 40 厘米,注入电压为 45 千伏,电子最终被加速到 0.54 兆电子伏,脉冲束流 36 毫安。功率源是一个磁控管,工作频率约 3000 兆周,输出脉冲功率约 1 兆瓦,占空因子为 5×10^{-3} 。1948 年这个小组又建立了第一台反馈行波电子直线加速器^[6],使用 1.4 兆瓦磁控管作功率源,电子最高能量为 4.5 兆电子伏。文献[7—9]介绍了当时他们的研究工作。后来他们转移到哈威尔,在原子能研究中心先后建立了几台供中子物理研究用的电子直线加速器(见表 1.1)^[10]。其中 15 兆电子伏加速器^[11],由两段各长 3 米的加速波导构成。磁控管输出的 1.8 兆瓦功率一分为二,在每段波导中单独反馈。由于受到科克罗夫特(J. D. Cockcroft)建议的影响,英国建造的电子直线加速器能量不高,流强较强,主要供工业上辐照、探伤、医用治癌和中子谱仪用。有几家英国公司,从事这方面加速器的生产。

表 1.1 哈威尔原子能研究中心早期建立的几台电子直线加速器

实验运转日期	能 量 (兆电子伏)	脉冲束流 (毫安)	脉 宽 (微秒)	脉内中子产额 (中子数/秒)
1949—52	3.5	120	2	10^{12}
1952—59	15	250	0.2—0.8	10^{14}
1959—	35—45	600	0.1—1.5	10^{17}

在美国,电子直线加速器的发展主要集中在斯坦福大学^[12]。1947 年建立了第一台电子直线加速器 Mark I^[13],使用一个 S 波段磁控管,功率 0.9 兆瓦,电子能量 4.5 兆电子