

0571
7423

966584

高等教育试用教材

加速器物理基础

陈佳洱 主编

刘迺泉 主审

原子能出版社

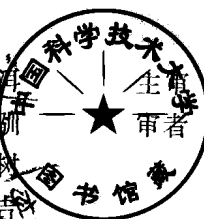
高等教育试用教材

加速器物理基础

(初 版)

主 编
编 者

陈佳洱
方家柳
李国树
裴元吉
郭之虞



刘迺泉
余觉先
林郁正
金玉明
汪达基
王书鸿

原子能出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了现代各主要类型加速器的工作原理、结构、性能要点、它们之间的联系与共同规律,以及加速器的主要应用和加速技术的发展前景。本书可作为高等学校加速器专业的加速器物理课程的教材或参考书,也可供从事加速器领域工作的研究生或工作人员参考。

☆

☆

☆

本书由刘迺泉主审,经原子核物理教材委员会加速器课程组于1990年7月召开的审稿会审定作为高等教育试用教材。

高等教育试用教材

加速器物理基础

(初版)

主 编 陈佳洱

主 审 刘迺泉

责任编辑 陈进贵

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张18.125·字数470千字

1993年6月北京第一版·1993年6月北京第一次印刷

印数1—1500

ISBN 7-5022-0727-9

TL·455(课)定价:10.00元

前 言

本书是根据原核工业部原子核物理教材委员会1985年7月青岛会议上确定的提纲编写的加速器专业本科生的试用教材，它也可作为加速器专门化课程的教科书或加速器领域研究生的教学参考书。

半个多世纪以来，粒子加速器科学技术取得了极为巨大的成就。作为人类探索微观世界重要手段的加速器最初只是实验室内的一种设备，如今超高能的加速器和对撞机已发展成周长达数十公里的世界上规模最大的巨型高技术工程，它们的加速粒子能量比早期加速器至少提高了6个量级以上！今天加速器的应用范围也已远远超出了基础研究的领域，数以千计的各类加速器在工业、农业、医药以及国防建设的各条战线上发挥着重要作用。面对着如此迅速发展，内容如此丰富的这样一门综合性的科学技术，我们显然没有可能将一切最有趣、最先进的东西都包括到书中来；相反，作为一本教科书，我们首先强调的是粒子加速器的基本概念、基本原理和基本知识。我们期望学生通过本课程的学习，深入了解各类加速器的概念和原理、它们的结构、性能要点、主要应用以及各类加速器之间的内在联系与共同规律。只有这样才能为进一步学习加速器的其它课程或创造性地从事加速器有关领域的工作，打下坚实的基础。

本书在内容的选取上着重于当前常用的、性能比较先进的加速器，简略趋于或已经淘汰的加速器，但对历史上一些富有启发性的概念和尝试，则作为加速器技术的发展过程适当予以介绍以活跃学生的思想。鉴于近十年来，我国加速器发展的巨大进展，因此，我们既注意介绍国内加速器的成就、现状及有关的数据，同时也注意介绍国际的先进水平和发展趋势。本书在内容的阐述上注意原理讲解与实物形象相结合，力求给出比较清楚的物理图

3A356107

像而不拘泥数学的严格推导。为了便于学生系统的学习和掌握,我们将不同加速器中共同的问题适当地归纳集中以减少繁琐重复。

本书共分十一章。前二章对粒子加速器的概貌和加速粒子的产生及其光学特性作了全面介绍;第三章集中讨论了直流高压型加速器包括倍压加速器、静电加速器和串列式加速器以及强脉冲电子束加速器的有关原理和工作特性;第四章阐述了带电粒子在磁场中运动的一般规律,这是加速粒子在各种圆形轨道加速器中运动的共同规律;在此基础上,第五、六、八和第十章分别介绍了电子感应型加速器、回旋加速器、同步加速器和电子回旋加速器等圆形轨道加速器;第七章中集中讨论了自动稳相原理,这是同步加速器、直线加速器和电子回旋加速器(第八至第十章)共同的理论基础,最后一章介绍了加速技术的发展,其中包括新原理、新技术及它们的发展前景。

本书全部讲授约需90学时,要求学生在学习本课程前学过高等数学、普通物理、理论力学、电动力学以及高频电子学等基础课程。

本书第一、六章由陈佳洱编写,第二、五、十章由李国树编写,第七、九章由方家驯编写,第八、十一章由裴元吉编写,此外李国树和裴元吉合编了第四章,郭之虞和陈佳洱合编了第三章,最后由陈佳洱对全书作了统稿工作,刘迺泉同志主审了全书各章节。

本书大纲制订和编写过程中得到了北京大学、清华大学、原子能科学研究院、中科院高能物理所、兰州近代物理所和上海原子核所、复旦大学和中国科技大学的专家教授的热情支持,他们提出了不少宝贵意见;机械电子工业部自动化所、上海先锋电机厂等有关同志提供了不少资料、图片和有益的建议,陆元荣同志为本书成稿做出宝贵贡献,在此一并致谢。

由于本书编者学识所限,书中难免有缺点和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

1991年5月

本书常用符号表

本书所用的符号尽量做到一个符号只代表一个物理量，但也有的符号在不同的地方代表了不同的物理量，请读者注意。现把本书所用符号按字母顺序列出并注明其物理意义。

A	束椭圆的相面积、对撞机中两束对撞的束流截面积
A_x	径向自由振荡的振幅
A_z	轴向自由振荡的振幅
a	RFQ加速器束流通道的最小半径
a_n	第 n 次空间谐波的振幅
B	磁感应强度矢量
B	亮度
B_i, B_f	磁感应强度的初始、终止值
B_n	归一化亮度
B_r, B_θ, B_z	磁感应强度在径向、辐向、轴向的三个分量
b	输电带的宽度
b_{rk}, b_{zk}	径向、轴向磁场畸变量 k 次谐波的幅值
C	电容、周长、常数
c	光速
D	加速腔的内直径、散焦节
d	双圆筒电极的间隙宽度
E	电场强度矢量
E_b	击穿电场强度
E_n	一个单元内轴上峰值平均电场
$E_z(z, t)$	轴上电场的分布
E_r, E_θ, E_z	E 在圆柱坐标中径向、辐向、轴向三个分量
F	聚焦节、扇形磁场的调变度、粒子所受到的作用

力、组合透镜的焦距

f	频率、透镜的焦距
f_c	粒子回旋频率、电磁波在波导中传播的截止频率
f_r	高频加速电场频率
f_s	理想粒子的回旋频率
G	粒子回旋一圈被加速的次数、磁刚度
g	漂浮管间加速间隙的宽度
$\mathbf{H}$	磁场强度矢量
H_c	直流临界磁场
H_r, H_θ, H_z	磁场强度 $\mathbf{H}$ 在圆柱坐标中径向、辐向、轴向三个分量
h	谐波系数或倍频系数
H_{sh}	超热临界磁场
I	束流强度、单元矩阵
I_0, I_1	修正贝塞尔函数
J	刚体的转动惯量
$J_m (m=0, 1, 2, \dots)$	贝塞尔函数
$\mathbf{j}$	热或场致发射电流密度矢量
j	单位虚数
K	回旋加速器的能量常数、四极透镜的聚焦常数
K_0, K_1	修正贝塞尔函数
$K_{5/3}$	第二类分数阶修正贝塞尔函数
k	四极透镜的梯度、倍频系数或谐波系数
$k=\omega/c$	角频率为 ω 的波在自由空间中的传播系数
$k=2\pi/\beta\lambda$	与粒子同步的谐波分量的传播系数
L	轨道长度、电感
L'	传输线单位长度上的电感值
l	腔长、加速管长度
l_0	直线节长度

l_n	相邻两个漂浮管间隙中心的长度
M	互感系数、带电粒子运动的转换矩阵
M_0	自由空间的转换矩阵
M_x	磁场中粒子径向运动的转换矩阵
M_z	磁场中粒子轴向运动的转换矩阵
M_{px}, M_{pz}	边缘磁铁的转换矩阵
m	RFQ 加速器电极调制系数、粒子的质量
m_0	粒子的静止质量
m_{11}	束流转换矩阵的矩阵元
N	倍压电源的级数、扇形磁铁的数目、轨道磁场的周期数
n	单元链中的单元序数、磁场降落指数或磁场对数梯度
O	漂移节
P	高频功率及功率损耗
p	粒子的动量矢量
p_r, p_θ, p_z	动量的径向、辐向、轴向分量
p_x, p_y, p_z	动量在直角坐标系中的三个分量
Δp	粒子的动量分散
Q	腔的品质因子、高压加速器高压电极上积累的电荷量
Q_L	腔的有载品质因子
q	粒子的电荷数
R	电阻
R_{BCS}	材料的表面电阻
r	半径
r_e	瞬时轨道半径
r_s	平衡轨道半径
S	面积

s	轨道变量
T	粒子运动周期、时间渡越因子、热力学温度
T_e	非理想粒子的运动周期
T_r	高频电场周期
T_s	同步粒子运动周期
T_{SN}	第 N 圈电子的回旋周期
t	时间变量
$U(\varphi)$	位能函数
U	粒子每回旋一圈所辐射的能量
$U(r, \theta, z)$	RFQ 电极在 z 轴附近产生的空间电位分布
U_r	径向一周的振荡能
U_s	轴向一周的振荡能
V	相体积、相邻电极间的电位差、高频电压
V_a	高频加速电压幅值
$\mathbf{v}$	粒子运动的速度矢量
v_r, v_θ, v_z	速度在径向、辐向、轴向的三个分量
v_g	波的群速度
v_{nf}	第 n 次正向行波的相速度
v_{nb}	第 n 次反向行波的相速度
v_p	波的相速度
W	粒子的动能
W_m	回旋加速器中粒子的极限能量
W_t	谐振腔的电磁总储能
W_{tr}	粒子的临界动能
ΔW_n	粒子第 n 次加速时所获得的动能增量
x	粒子轨道的径向偏移
Z	阻抗、原子序数
Z_{eff}	有效分路阻抗
Z_{in}	谐振腔的输入阻抗

Z_s	谐振腔的分路阻抗
Z_0	传输线的特征阻抗
z	粒子轨道的轴向偏离、直线加速器中粒子所处的轴向位置
$\alpha(s), \beta(s), \gamma(s)$	自由振荡函数
α	加速管设计及工艺常数、粒子的动能与静止能量之比
α_L, α_r	轨道因子
β	粒子的相对速度
γ	能量的相对论因子
ϵ	发射度
ϵ_n	归一化的发射度
ϵ_0	真空中的介电常数
ε	粒子的总能量
ε_{tr}	临界能量
$(\Delta\varepsilon)_m$	相振荡的能量振幅
$\delta\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon_{1/2}}{\varepsilon_0}$	能散度
φ	高频电场相位
φ_i	注入时粒子的高频相位
φ_s	平衡相位
Φ	磁通量
$(\Delta\varphi)_m$	相振荡的相位振幅
ρ	粒子在磁场中偏转的轨道曲率半径
ξ	膜片透镜的孔径修正系数、色品
ξ_0	谷场区轨道对中心的张角
η	正电子产额、动量分散函数
η_0	峰场区轨道对中心的张角
λ	电磁波的波长

μ	周期聚焦结构中一个周期的相移量、导磁率
μ_0	真空中的导磁率
ν	粒子一圈内的振荡次数
ν_r	粒子转一圈径向振荡次数
ν_z	粒子转一圈轴向振荡次数
σ_s	输电带表面平均电荷密度
σ_{sm}	输电带表面最大电荷密度
ω	粒子回旋角频率
ω_c	波导的截止角频率
ω_r, ω_z	径向、轴向的回旋角频率
ω_0, ω_π	分别为 0 模、 π 模的振荡角频率
Ω	相振荡的角频率

目 录

第一章 绪论	1
第一节 加速器的基本构成	1
第二节 加速器的发展概况	2
第三节 加速器的分类	8
第四节 加速器的应用	11
第五节 粒子运动参量的相对论表述	17
参考文献	19
第二章 带电粒子源	20
第一节 带电粒子束的主要参数	21
一、能散度	21
二、发射度	22
三、亮度	25
第二节 离子源的工作原理与结构	27
一、对离子源的要求	27
二、离子源的工作原理及主要组成部分	30
第三节 离子源的主要类型	34
一、离子源的分类	34
二、加速器中几种常用的离子源	35
第四节 电子和正电子源	60
一、电子枪	60
二、正电子源	62
参考文献	65
第三章 高压加速器	66
第一节 概述	66
第二节 高压发生器	70
一、串激倍压电源	70
二、静电起电机	74
三、几种大电流高压发生器	79

四、强脉冲高压发生器	83
第三节 高压电场与绝缘介质	87
一、绝缘介质	87
二、高压电极系统	89
三、绝缘支柱	92
四、高压击穿	94
第四节 加速管	99
一、加速管的基本结构与光学特性	99
二、真空击穿	101
三、几种高梯度加速管	105
四、加速管的锻炼	108
第五节 高压加速器的其它技术	109
一、电压和能量的测量与稳定	109
二、电子剥离	116
三、束流的输运、聚焦与脉冲化	120
第六节 典型高压加速器及其应用	126
一、倍压加速器	126
二、静电加速器	127
三、几种大功率高压加速器	133
四、强脉冲加速器	134
参考文献	135
第四章 带电粒子在恒定磁场中的运动与聚焦	136
第一节 粒子的封闭轨道和运动方程	136
一、粒子的封闭轨道	136
二、带电粒子在恒定电磁场中的运动方程	138
第二节 带电粒子在均匀磁场中的运动方程	139
一、拉摩定理	139
二、粒子特性参数与磁场参数间的关系	140
第三节 带电粒子在常梯度磁场中的运动	
——磁场的弱聚焦作用	145
一、横向运动方程	146
二、横向运动的稳定条件	149

三、自由振荡的频率与振幅	154
四、自由振荡振幅的衰减	159
五、粒子动量发散与轨道分散	162
六、磁场畸变与强迫振荡	164
第四节 带电粒子在交变梯度磁场中的运动	
——磁场的强聚焦作用	168
一、强聚焦原理的提出与光学模型	168
二、强聚焦四极透镜系统及其离子光学特性	171
三、带电粒子在不同磁场元件中的运动及其转换矩阵	177
四、带电粒子在周期交变梯度磁场聚焦结构中的运动	187
附录 粒子横向运动稳定性的实例	204
参考文献	208
第五章 感应型加速器	209
第一节 电子感应加速器工作原理	210
一、感应涡旋电场与电子的加速	210
二、电子感应加速器的平衡轨道	213
三、电子感应加速器中电子的横向运动	216
四、电子的注入、俘获与偏移、引出	218
五、辐射对电子运动的影响	226
第二节 电子感应加速器的结构	228
一、电磁铁	229
二、真空室	231
三、电子枪	232
四、同步线路	233
第三节 电子束的性能及电子感应加速器的应用	234
一、电子束的性能	234
二、电子感应加速器的应用	236
第四节 直线感应加速器	236
一、原理	237
二、结构	239
三、特点和应用	242
参考文献	244

第六章 回旋加速器	245
第一节 前言	245
第二节 经典回旋加速器	246
一、工作原理	246
二、电磁场的聚焦	249
三、相位滑移与加速器的能量上限	256
第三节 等时性回旋加速器原理	260
一、等时性磁场	260
二、扇形磁场中离子的运动	263
第四节 离子在中心区和引出区的运动	281
一、中心区	281
二、离子束的引出	288
第五节 高频与磁铁系统	293
一、高频系统	293
二、磁铁系统	301
第六节 回旋加速器的发展概况和实例	309
一、小尺寸等时性回旋加速器	311
二、兰州重离子加速系统	312
三、介子工厂	316
四、超导等时性回旋加速器	318
附录一 高频电隙的聚焦作用	320
附录二 扇形聚焦磁场中离子的径向运动	322
参考文献	326
第七章 自动稳相原理	328
第一节 自动稳相原理的提出	328
一、稳相加速器概述	328
二、自动稳相原理	334
第二节 相运动方程及小振幅下的相振荡	341
第三节 相运动的摆模型及位能函数	344
第四节 相图	348
第五节 相运动的衰减	355
附录 粒子加速周期随能量变化的关系	357

参考文献	358
第八章 强聚焦同步加速器及高能加速器组合	359
第一节 同步加速器的发展概述及工作原理	359
第二节 两种强聚焦系统方案	362
一、组合作用磁铁系统	363
二、分离作用磁铁系统	364
第三节 同步加速器结构	365
一、主导磁铁(二极磁铁)	367
二、聚焦磁铁	370
三、校正磁铁	370
四、真空室	372
五、高频加速腔	375
第四节 共振现象及工作点的选取	376
一、主导磁场畸变导致闭轨畸变	377
二、动量分散导致闭轨畸变	378
三、横向运动的共振现象	379
四、工作点的选取	381
第五节 跳相及临界能量	382
第六节 粒子的注入和引出	383
一、偏转电极或偏转磁场法进行单圈注入	384
二、轨道扰动法注入	384
三、负离子注入法	386
四、凸轨法注入	387
五、粒子的引出	393
第七节 增强器和储存环	394
一、增强器	395
二、储存环	394
第八节 光子工厂	396
一、发展概述	396
二、同步辐射特性及其应用	398
三、同步辐射光源的结构及举例	405
第九节 对撞机	413

一、有效作用能	414
二、对撞束的亮度	418
三、对撞机举例	418
第十节 高能加速器的组合和现状	419
一、高能加速器的组合	419
二、现状	421
三、高能加速器实例介绍	423
第十一节 超导同步加速器	427
附录	430
参考文献	431
第九章 直线加速器	432
第一节 概述	432
一、发展概述	432
二、加速原理: 驻波与行波加速	436
第二节 直线加速器的射频加速结构	440
一、波导与谐振腔	440
二、慢波结构	443
三、几种主要加速结构的特性	450
第三节 粒子在直线加速器中的运动	468
一、慢波结构中的近轴电磁场	468
二、粒子的加速与相运动	470
三、粒子的横向运动	473
第四节 离子直线加速器	474
一、离子直线加速器的组成和实例	474
二、高频四极场(RFQ)加速结构	479
第五节 电子直线加速器	485
一、行波电子直线加速器	485
二、驻波电子直线加速器	489
第六节 超导直线加速器	490
一、高频超导体	490
二、超导加速结构	492
参考文献	494