



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 16

加速器物理基础

陈佳洱 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT

中外物理学精品书系

前沿系列 · 16

加速器物理基础

陈佳洱 主编

陈佳洱 方家驯 郭之虞
李国树 裴元吉 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

加速器物理基础/陈佳洱主编. —北京:北京大学出版社,2012.9

(中外物理学精品书系·前沿系列)

ISBN 978-7-301-21270-7

I. ①加… II. ①陈… III. ①加速器-高等学校-教材 IV. ①TL501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 222081 号

书 名: 加速器物理基础

著作责任者: 陈佳洱 主编

责任编辑: 刘 啸

标准书号: ISBN 978-7-301-21270-7/O·0887

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038
出版部 62754962

电子邮箱: zpup@pup.pku.edu.cn

印刷者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 29.75 印张 567 千字

2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 80.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

《中外物理学精品书系》 编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王 牧	王鼎盛	石 兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱 星
向 涛	刘 川*	许宁生	许京军	张 酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭 卫*
资 剑	龚旗煌	崔 田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘 书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础，同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天，物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴，而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到，改革开放三十多年来，随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展，我国物理学取得了跨越式的进步，做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下，近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势，在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看，尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书，但系统总结物理学各门类知识和发展，深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源，并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考，仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展，特别是展现近年来中国物理学家的研究水平和成果，北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了《中外物理学精品书系》，试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家，确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富，涵盖面广，可读性强，其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结，也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示；既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态，也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说，《中外物理学精品书系》力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

《中外物理学精品书系》另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,《中外物理学精品书系》还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子亲身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套《中外物理学精品书系》的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

《中外物理学精品书系》编委会 主任
中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

内 容 简 介

本书首先系统地讲解了粒子加速器的基本概念、原理和加速器物理的相关基础知识,包括加速器基本构成、发展概况、分类方法、粒子运动的相对论描述、粒子源和粒子束的光学特性等.之后,本书对各种类型的加速器作了全面、详细的介绍和分析.这些加速器包括高压加速器、感应型加速器、回旋加速器、同步加速器、高能加速器组合,以及直线加速器等.同时,本书还讨论了带电粒子在恒定磁场中的运动和聚焦,以及在加速器研究发展中产生过重要影响的自动稳相原理.最后,本书还对加速器的新技术和新原理做了介绍,并探讨了它们的发展前景.

本书是面向加速器专业本科生的教材,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.同时,本书也可供加速器物理相关领域的研究人员参考.

序

近一个世纪以来,作为人类探索微观世界的重要手段,粒子加速器科学技术取得了巨大的成就.最初粒子加速器只是实验室中的一项设备,如今超高能的加速器和对撞机已发展成周长达数十千米的规模巨大的国际巨型高新技术工程,它们加速粒子的能量比早期加速器提高了7个数量级以上!粒子加速器的应用范围现在也已经远远超出基础研究领域,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.面对一门发展如此迅猛,内容如此丰富的综合性的科学技术,我们显然难以将一切最有趣、最先进的东西包括到书中来.因此,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、原理和基础知识.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、原理、结构、性能要点、主要应用,以及它们之间的内在联系和共同规律.只有这样,才能为进一步学习加速器相关的其他课程或创造性地从事加速器相关领域的研究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,而对趋于或已经淘汰的加速器只作简要的介绍.但对于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讨论,以活跃学生的思想.鉴于近些年来我国加速器领域的巨大进展和未来的发展需求,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像而不拘泥于严格的数学推导.为了便于学生系统地学习和掌握相关知识,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.第一、二章对粒子加速器的概貌,以及加速粒子的产生和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、串列式加速器、强脉冲电子束加速器等的相关原理和工作特性.第四章阐述了带电粒子在磁场中运动的一般规律,这是加速粒子在圆形

轨道加速器中运动的共同规律. 在此基础上, 第五、六、八、十章分别介绍了电子感应加速器、回旋加速器、同步加速器, 以及电子回旋加速器等圆形轨道加速器. 第七章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共同的理论基础. 第九章讨论了直线加速器, 包括离子直线加速器、电子直线加速器和超导直线加速器等. 最后一章介绍了加速技术的新发展, 其中包括新原理、新技术以及它们的发展前景.

本书是加速器专业本科生的适用教材, 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. 本书全部讲授约需要 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、十一章由陈佳洱编写, 第二、五、十章由李国树编写(陆元荣整理), 第七、九章由方家驯编写, 第八章由裴元吉编写, 此外由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.

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、中科院高能物理研究所、兰州近代物理研究所、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, 也提供了不少资料、图片和有益的建议. 北京大学的陆元荣同志为本书成稿做出了很大贡献. 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.

中国科学院院士 陈佳洱

2012 年 4 月

于北京大学物理学院

常用符号表

一般一个符号只代表一个物理量,但有的符号在不同地方代表了不同的物理量.现将本书所用符号及其物理意义按字母顺序排列如下:

A	束椭圆的相面积、对撞机中 两对撞束的束流截面积	F	聚焦节、扇形磁场调变度、 粒子受到的作用力、组合透 镜焦距
A_x	径向自由振荡的振幅	f	频率、透镜的焦距
A_z	轴向自由振荡的振幅	f_c	粒子回旋频率、电磁波在波 导中传播的截止频率
a	RFQ 加速器束流通道的最 小半径、束流半径	f_r	高频加速电场频率
a_n	第 n 次空间谐波的振幅	f_s	理想粒子的回旋频率
\mathbf{B}	磁感应强度矢量	G	粒子回旋一圈被加速的次 数、磁刚度
B	亮度	g	漂浮管间加速间隙的宽度
B_i, B_f	磁感应强度的初始值和终 止值	\mathbf{H}	磁场强度矢量
B_n	归一化亮度	H_c	临界磁场强度
B_r, B_θ, B_z	磁感应强度在径向、角向、 轴向的三个分量	H_r, H_θ, H_z	\mathbf{H} 磁场强度在圆柱坐标中径 向、角向、轴向的三个分量
b	输电带的宽度	h	谐波系数或倍频系数
b_{rk}, b_{zk}	径向、轴向磁场畸变量 k 次 谐波的幅值	H_{sh}	超热临界磁场
C	电容、周长、常数	I	束流强度、单位矩阵
c	光在真空中的速度	I_0, I_1	修正贝塞尔函数
D	加速腔的内直径、散焦节	J	刚体的转动惯量
d	双圆筒电极的间隙宽度	$J_m (m=0, 1, 2, \dots)$	贝塞尔函数
\mathbf{E}	电场强度矢量	j	热或者场致发射电流密度 矢量
E_b	击穿电场强度	j	单位虚数
E_n	一个单元内轴上峰值平均 电场	K	回旋加速器的能量常数、四 极透镜的聚焦常数
$E_z(z, t)$	轴上电场分布	K_0, K_1	修正贝塞尔函数
E_r, E_θ, E_z	E 在圆柱坐标中径向、角 向、轴向的三个电场分量	$K_{5/3}$	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	Q_L	腔的有载品质因数
$k = \omega/c$	角频率为 ω 的波在自由空间的传播系数	q	粒子的电荷数
$k = 2\pi/\beta\lambda$	与粒子同步的谐波分量的传播系数	R	电阻
L	轨道长度、电感	R_{BCS}	材料的表面电阻
L'	传输线单位长度上的电感值	r	半径
l	腔长、加速管长度	r_c	瞬时轨道半径、回旋加速器的封闭轨道半径
l_0	直线节长度	r_s	平衡轨道半径
l_n	相邻两个漂浮管间隙中心的长度	S	面积
M	互感系数、带电粒子运动的转换矩阵	s	轨道变量
M_0	自由空间的转换矩阵	T	粒子运动周期、时间渡越因子、热力学温度
M_x	磁场中粒子径向运动的转换矩阵	T_c	非理想粒子的运动周期、充电时间
M_z	磁场中粒子轴向运动的转换矩阵	T_r	高频电场的周期
M_{pz}, M_{pz}	边缘磁铁的转换矩阵	T_s	同步粒子运动周期
m	RFQ 加速器电极调制系数、粒子的质量	T_{sN}	第 N 圈电子的回旋周期
m_0	粒子的静止质量	t	时间变量
m_{ij}	束流转换矩阵的矩阵元	U	粒子每回旋一圈所辐射的能量
N	倍压电源的级数、扇形磁铁的数目、轨道磁场的周期数	$U(\varphi)$	位能函数
n	单元链中的单元序数、磁场降落指数或者磁场对数梯度	$U(r, \theta, z)$	RFQ 电极在傍轴附近产生的空间电位分布
O	漂移节	U_r	径向一周的振荡能
P	高频功率及功率损耗	U_z	轴向一周的振荡能
p	粒子的动量矢量	V	相体积、相邻电极间的电位差、高频电压
p_r, p_θ, p_z	粒子动量的径向、角向、轴向分量	V_a	高频电压的幅值
p_x, p_y, p_z	动量在直角坐标系中的三个分量	v	粒子运动的速度矢量
Δp	粒子的动量分散	v_r, v_θ, v_z	粒子运动的速度分量
Q	腔的品质因数、高压电极上积累的电荷量	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	λ	电磁波的波长
x	粒子轨道的径向偏移	μ	周期聚焦结构中一个周期的相移量、磁导率
Z	阻抗、原子序数	μ_0	真空磁导率
Z_0	传输线的特性阻抗	ν	粒子一圈内的振荡次数
Z_{eff}	有效分路阻抗	ν_r	粒子径向振荡次数
Z_{in}	谐振腔的输入阻抗	ν_z	粒子轴向振荡次数
Z_s	谐振腔的分路阻抗	ξ	膜片透镜的孔径修正系数、色品
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	ξ_0	谷场区轨道对中心的张角
α	加速管设计及工艺常数、粒子的动能与静止能量之比	ρ	粒子在磁场中的轨道曲率半径
$\alpha(s), \beta(s), \gamma(s)$	自由振荡函数	σ_s	输电带表面平均电荷密度
α_l, α_r	轨道因子	σ_{sm}	输电带表面最大电荷密度
β	粒子的相对速度	Φ	磁通量
γ	能量的相对论因子	φ	高频电场相位
ε	发射度、粒子总能量	φ_1	注入时粒子的高频相位
ε_0	真空介电常数、粒子静止能量、流强峰值处能量	φ_s	平衡相位
ε_n	归一化发射度	$(\Delta\varphi)_m$	相振荡的振幅
ε_{lr}	临界能量	Ω	相振荡的角频率
$(\Delta\varepsilon)_m$	相振荡的能量振幅	ω	粒子回旋角频率
$\delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_{1/2} / \varepsilon_0$	能散度	ω_0, ω_π	0 模、 π 模的振荡角频率
η	正电子产额、动量分散函数	ω_c	波导的截止角频率、粒子的回旋角频率
η_0	峰场区轨道对中心的张角	ω_r, ω_z	径向、轴向的振荡角频率

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	6
第四节 加速器的应用	8
第五节 粒子运动参量的相对论表述	12
参考文献	14
第二章 带电粒子源	15
第一节 带电粒子束的主要参数	15
一、能散度	15
二、发射度	16
三、亮度	18
第二节 离子源的工作原理与结构	20
一、对离子源的要求	20
二、离子源的工作原理及主要组成部分	21
第三节 离子源的主要类型	26
一、离子源的分类	26
二、加速器中几种常用的离子源	26
第四节 电子和正电子源	45
一、电子枪	45
二、正电子源	47
参考文献	49
第三章 高压加速器	50
第一节 概述	50
第二节 高压发生器	53
一、串激倍压电源	53
二、静电起电机	55

三、几种大电流高压发生器	59
四、强脉冲高压发生器	63
第三节 高压电场与绝缘介质	65
一、绝缘介质	65
二、高压电极系统	67
三、绝缘支柱	69
四、高压击穿	71
第四节 加速管	74
一、加速管的基本结构与光学特性	74
二、真空击穿	76
三、几种高梯度加速管	79
四、加速管的锻炼	81
第五节 高压加速器的其他技术	82
一、电压和能量的测量与稳定	82
二、电子剥离	87
三、束流的运输、聚焦与脉冲化	90
第六节 典型高压加速器及其应用	94
一、倍压加速器	94
二、静电加速器	96
三、几种大功率高压加速器	100
四、强脉冲加速器	101
参考文献	101
第四章 带电粒子在恒定磁场中的运动与聚焦	102
第一节 粒子的封闭轨道和运动方程	102
一、粒子的封闭轨道	102
二、带电粒子在恒定电磁场中的运动方程	103
第二节 带电粒子在均匀磁场中的运动方程	104
一、拉莫尔定理	104
二、粒子特性参数与磁场参数间的关系	105
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	109
一、横向运动方程	110
二、横向运动的稳定条件	112
三、自由振荡的频率与振幅	115

四、自由振荡振幅的衰减	120
五、粒子动量分散与轨道分散	122
六、磁场畸变与强迫振荡	123
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	126
一、强聚焦原理的提出与光学模型	126
二、强聚焦四极透镜系统及其离子光学特性	129
三、带电粒子在不同磁场元件中的运动及其转换矩阵	133
四、带电粒子在周期交变梯度磁场聚焦结构中的运动	140
附录 粒子横向运动稳定性的实例	154
参考文献	157
第五章 感应型加速器	158
第一节 电子感应加速器工作原理	159
一、感应涡旋电场与电子的加速	159
二、电子感应加速器的平衡轨道	161
三、电子感应加速器中电子的横向运动	163
四、电子的注入、俘获与偏移、引出	164
五、辐射对电子运动的影响	170
第二节 电子感应加速器的结构	171
一、电磁铁	172
二、真空室	175
三、电子枪	175
四、同步线路	176
第三节 电子束的性能及电子感应加速器的应用	177
一、电子束的性能	177
二、电子感应加速器的应用	178
第四节 直线感应加速器	178
一、原理	179
二、结构	180
三、特点和应用	183
参考文献	184
第六章 回旋加速器	185
第一节 前言	185
第二节 经典回旋加速器	186

一、工作原理	186
二、电磁场的聚焦	188
三、相位滑移与加速器的能量上限	193
第三节 等时性回旋加速器原理	197
一、等时性磁场	197
二、扇形磁场中离子的运动	199
第四节 离子在中心区和引出区的运动	212
一、中心区	212
二、离子束的引出	218
第五节 高频与磁铁系统	221
一、高频系统	221
二、磁铁系统	227
第六节 回旋加速器的发展概况和实例	233
一、小尺寸等时性回旋加速器	235
二、兰州重离子加速系统	235
三、介子工厂	238
四、超导等时性回旋加速器	239
附录一 高频电隙的聚焦作用	241
附录二 扇形聚焦磁场中离子的径向运动	242
一、径向运动方程	242
二、平衡轨道半径	243
三、沿参考圆半径的等时性场	244
四、径向自由振动	245
参考文献	246
第七章 自动稳相原理	247
第一节 自动稳相原理的提出	247
一、稳相加速器概述	247
二、自动稳相原理	252
第二节 相运动方程及小振幅下的相振荡	257
第三节 相运动的摆模型及位能函数	259
第四节 相图	263
第五节 相运动的衰减	268
附录 粒子加速周期随能量变化的关系	269
参考文献	270

第八章 强聚焦同步加速器及高能加速器组合	271
第一节 同步加速器的发展概述及工作原理	271
第二节 两种强聚焦系统方案	273
一、组合作用磁铁系统	274
二、分离作用磁铁系统	275
第三节 同步加速器结构	275
一、主导磁铁(二极磁铁)	277
二、聚焦磁铁	278
三、校正磁铁	279
四、真空室	281
五、高频加速腔	283
第四节 共振现象及工作点的选取	284
一、主导磁场畸变导致闭轨畸变	284
二、动量分散导致闭轨畸变	286
三、横向运动的共振现象	286
四、工作点的选取	287
第五节 跳相及临界能量	288
第六节 粒子的注入和引出	289
一、偏转电极或偏转磁场法进行单圈注入	290
二、轨道扰动法注入	290
三、负离子注入法	291
四、凸轨法注入	292
五、粒子的引出	297
第七节 增强器和储存环	298
一、增强器	298
二、储存环	298
第八节 光子工厂	299
一、发展概述	299
二、同步辐射特性及其应用	302
三、同步辐射光源的结构及举例	308
第九节 对撞机	314
一、有效作用能	314
二、对撞束的亮度	317
三、对撞机举例	317