



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

粒子加速器技术

■ 赵籍九 尹兆升 主编

Particle Accelerator Technology



高等教育出版社
Higher Education Press



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

粒子加速器技术

■ 赵籍九 尹兆升 主编

Particle Accelerator Technology



高等教育出版社
Higher Education Press

内 容 提 要

本书是中国科学院高能物理研究所的研究人员在中国科学院研究生院多年授课的讲义基础上整理而成的。全书以高能加速器为对象,讨论加速器各个系统的主要技术问题,包括:高能加速器的磁铁技术、磁铁电源技术、高频技术、真空技术、束流测量技术、自动控制技术、电子直线加速器技术和加速器辐射防护技术等。

本书反映了当今国际高能加速器科学技术研究的前沿水平,可作为高等院校物理系相关专业的研究生教材或教学参考书,也可供相关专业的研究人员和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

粒子加速器技术 / 赵籍九, 尹兆升主编. —北京: 高等教育出版社, 2006. 11

ISBN 7-04-020142-9

I. 粒... II. ①赵...②尹... III. 加速器—研究生—教材 IV. TL501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 115965 号

策划编辑	王 超	责任编辑	王 超	封面设计	王凌波
责任绘图	朱 静	版式设计	史新薇	责任校对	俞声佳
责任印制	韩 刚				

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 36
字 数 660 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2006 年 11 月第 1 版
印 次 2006 年 11 月第 1 次印刷
定 价 63.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20142-00

主要符号表

A	矢量磁势、单位长度表面面积、放射性活度
B	磁感应强度
B_n	n 阶($2n$ 极)磁场
B_r	剩磁磁场、磁场径向分量
B_θ	磁场方位角分量
c	真空中的光速
E_{cm}	质心能量
e	电子电荷
f_{rf}	加速腔工作频率
f_0	回转频率
G (或 B')	磁场梯度
g_\perp	电极覆盖系数、形状因子
H	磁场强度、当量剂量
H_c	矫顽磁力
H_p	个人剂量当量
H_n	中子剂量当量
H_γ	光子剂量当量
I_p	谐振电流
I_d	平均电流
$IACS$	导电率指标
J 或 j	导体的电流密度
K	总冲击量、高频变压器变比
L	电感、长度、对撞亮度
L_s	寄生电感
L_N	第 N 个漂移管长度
L_{eff}	磁铁的等效长度
M	互感、气体摩尔质量
m	质量
N	活化核数量
NI	励磁安匝数

n	磁场阶数、磁场谐波数、注入圈数
P 或 p	功率、动量、压强
Q	流量、品质因数、共振工作点、自由振荡波数
q	粒子电荷、出气率
R	电阻、磁铁孔径半径
R_T	分路阻抗
R_{ep}	并连谐振阻抗
S_0	名义抽速
S_{eff}	有效抽速
T	温度、热力学温度、时间、开关周期、居留因子
T_r	上升时间
T_{ir}	入射波前沿上升时间
T_{rf}	高频周期
U_{Lp}	谐振时电感电压
U_{Cp}	谐振时电容电压
u_d	平均电压
X	电抗、照射量
X_0	韧致辐射长度
Y	导纳
Z	粒子电荷数、阻抗
Z_0	特性阻抗
α	晶闸管的控制角、回路的衰减回数
α_k	脉冲磁场偏转角
β	相对论速度、耦合系数
β_p	波相速
κ	波数
v_p	相速
v_g	群速
ε	介电常数、回路相对失谐
ε_x	束流水平发射度
ε_i	注入束流水平发射度
ε_r	相对介电常数
λ	波长、线电荷密度
λ_c	同步光临界波长
μ	磁导率

μ_0	真空磁导率
μ_r	相对磁导率
φ_s	同步相位
ρ	偏转半径、电阻率、谐振回路的特性阻抗、残余气体密度
τ	束流寿命、时间常数
τ_r	上升时间
δ	单层传输时间
σ	反应截面、束团尺寸、长度、电导率
σ_B	张应力
ω	角频率
δ	集肤深度
Δ	线偶极子密度
ΔP	磁铁线圈冷却水压降
ΔT	磁铁线圈的温升
ξ	回路一般失谐

中国科学院研究生院教材编审委员会

主 任：白春礼

顾 问：余翔林

副 主任：马石庄(常务) 刘志鹏 韩兴国 苏 刚

委 员(以姓氏笔画为序)：

石耀霖 刘嘉麒 杨 乐 李伯聪 李 佩 李家春
吴 向 汪尔康 汪寿阳 张文芝 张增顺 徐至展
黄荣辉 黄 钧 阎保平 彭家贵 裴 钢 谭铁牛

物理学科编审组

主 编：李家春

副 主编：苏 刚

编 委：丁亦兵 马中骥 邓祖淦 王鼎盛 叶甜春 李国华

张肇西 洪友士 赵 刚 詹文山 詹明生

总 序

在中国科学院研究生院和高等教育出版社的共同努力下，凝聚着中国科学院新老科学家、研究生导师们多年心血和汗水的中国科学院研究生院教材面世了。这套教材的出版，将对丰富我院研究生教育资源、提高研究生教育质量、培养更多高素质的科技人才起到积极的推动作用。

作为科技国家队，中国科学院肩负着面向国家战略需求，面向世界科学前沿，为国家作出基础性、战略性和前瞻性的重大科技创新贡献和培养高级科技人才的使命。中国科学院研究生教育是我国高等教育的重要组成部分，在新的历史时期，中国科学院研究生教育不仅要为我院知识创新工程提供人力资源保障，还担负着落实科教兴国战略和人才强国战略，为创新型国家建设培养一大批高素质人才的重要使命。

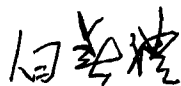
集成中国科学院的教学资源、科技资源和智力资源，中国科学院研究生院坚持教育与科研紧密结合的“两段式”培养模式，在突出科学教育和创新能力培养的同时，重视全面素质教育，倡导文理交融、理工结合，培养的研究生具有宽厚扎实的基础知识、敏锐的科学探索意识、活跃的思维和唯实、求真、协力、创新的良好素质。

研究生教材建设是研究生教育中重要的基础性工作。由一批活跃在科学前沿，同时又具有丰富教学经验的科学家编写的中国科

学院研究生院教材,适合在校研究生学习使用,也可作为高校教师和专业研究人员的参考书。这套研究生教材内容力求科学性、系统性、基础性和前沿性的统一,使学习者不仅能获得比较系统的科学基础知识,也能体会蕴于其中的科学精神、科学思想、科学方法,为进入科学研究的学术殿堂奠定良好的基础;优秀教材不但是体现教学内容和教学方法的知识载体、开展教学的基本条件和手段,也是深化教学改革、提高教育质量、促进科学教育与人文教育结合的重要保证。

“十年树木,百年树人”。我相信,经过若干年的努力,中国科学院研究生院一定能建设起多学科、多类型、多品种、多层次配套的研究生教材体系,为我国研究生教育百花园增添一枝新的奇葩,为我国高级科技人才的培养作出新的贡献。

中国科学院 常务副院长
中国科学院研究生院 院长
中国科学院 院士



二〇〇六年二月二十八日

本书编写委员会

主编 赵籍九 尹兆升

编委(按姓氏笔画排列)

马 力	尹兆升	李建国	李铁辉	张 闯
赵籍九	曹建社	董海义	韩 谦	程 健
裴国玺				

前 言

高能粒子加速器是大型实验设施。粒子加速器的技术十分复杂,涉及很多学科的尖端技术,因此准备从事加速器方面工作的学生和技术人员需要了解和掌握粒子物理、磁铁技术、磁铁电源技术、高频技术、真空技术、束流测量技术、自动控制技术、辐射防护技术等多学科的专业知识。本书是中国科学院高能物理研究所的研究人员在科研一线长期工作经验的积累。他们把在中科院研究生院多年授课的讲义整理出来,编写了这本教材。本书反映了当今国际高能加速器科学技术研究的前沿水平。

高能加速器的历史表明,新原理的提出,促进了新技术的发展。所有的加速器新原理都是通过新技术所创造的条件实现的。新技术的发展又为新原理的产生提供了土壤和水分。粒子加速器不仅在过去,而且在现在和将来都是其所在时代高科技的结晶。实际的加速器都是由一系列高精度的设备系统和精密控制系统组成的。例如在一台正负电子对撞机里,束流以接近光的速度,在有限周长的储存环真空管道内长时间运行。因此,需要有高精度的磁铁系统和高精度、高稳定度的磁铁电源来提供十分精确的磁场和磁场形态,以保持束流的轨道及轨道的稳定性;需要有腔频率自动微调、相位和幅度稳定的高频系统提供准确、同步的高频电场,使束流不断获得能量;需要为束流提供超高真空的管道以保持其长时间运转;需要各种束流测量设备来实时观察和诊断束流强度、截面、位置、发射度、能散度,以及自由振荡频率、闭轨位置、束团形状与尺寸等参量;还需要精确的定时系统、高度自动化的计算机控制系统和信息管理系统,以及现代化的中央控制室和本地控制站等等;为了确保加速器工作人员和周围公众的安全,必须对加速器产生的辐射和有害物质进行分析、监测和防护。

本书以高能加速器为研究对象,讨论加速器各个系统的主要技术问题,包括系统的组成、相关设备的工作原理和技术,以及系统的设计建造等问题。第一章高能加速器导论中介绍高能加速器在基本粒子研究中的意义,概述高能加速器的发展前沿及不同类型的加速器。第二章讨论加速器各类磁铁的原理、设计、建造和磁场测量的技术和方法。第三章介绍普通电源技术及功率器件的基本知识,并讨论加速器磁铁电源的特点,以及对磁铁电源技术的特殊要求。第四章介绍高频系统在加速器中的作用,讨论高频腔及高频系统的工作原理和设计方法。第五章讨论加速器真空系统的基本要求和真空物理的基础知识,加速器真空获得、测量方法以及真空材料和工艺等。第六章讨论同步加速器的注入与引出技术,包括注入引出的物理机制,切割磁铁

II 粒子加速器技术

和冲击磁铁两大类特种磁铁和特种电源的基本原理和技术。第七章讨论加速器束流测量的物理概念和技术,以及束流测量系统的组成。第八章讨论加速器控制系统的相关技术,系统的体系结构和组成,以及控制系统开发与集成方法等。由于电子直线加速器是一个完整的加速器,本书不可能对其进行全面的阐述,因此第九章电子直线加速器中选择了高频加速结构、电子枪、正电子源等内容进行介绍。第十章介绍辐射防护的理论体系、辐射防护的基础知识、高能粒子加速器辐射原理、辐射防护的设计、加速器辐射监测和安全技术等方面的知识。

加速器的种类很多,其工作原理和结构有很大的差别。本书主要向读者介绍国内外高能粒子加速器及其相关技术,没有涉及诸如各类低能加速器、质子直线加速器和其他类型加速器的技术。

本书由赵籍九和尹兆升主编。第一章高能加速器导论由张闯编写,第二章加速器磁铁技术由尹兆升编写,第三章加速器磁铁电源技术由程健编写,第四章加速器高频技术由李建国编写,第五章加速器真空系统由董海义编写,第六章同步加速器的注入与引出技术由韩谦编写,第七章加速器束流测量技术由马力、曹建社编写,第八章加速器控制技术由赵籍九编写,第九章电子直线加速器技术由裴国玺编写,第十章加速器辐射防护与安全技术由李铁辉编写。刘姝、薛鹏、黄松为本书做了许多文本编辑工作,在此表示感谢。

由于各位作者工作繁忙,时间仓促,书中的缺点错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2006 年 5 月

目 录

主要符号表	I
第一章 高能加速器导论	1
1.1 高能加速器在基本粒子研究中的意义	1
1.2 加速器的能量提高与技术创新	2
1.3 高能加速器的发展前沿	7
1.3.1 高能量前沿	7
1.3.2 高亮度前沿	14
1.4 基于加速器的多学科平台	21
1.4.1 同步辐射装置	22
1.4.2 自由电子激光	24
1.4.3 散裂中子源	25
1.5 加速器技术——高能加速器建造和发展的保证	27
参考文献	28
第二章 加速器磁铁技术	30
2.1 加速器磁铁的主要类型	30
2.2 加速器磁铁磁场的基本形态和磁场分析	33
2.2.1 磁场的基本特性	33
2.2.2 磁场的基本形态和磁场分析	36
2.3 加速器常规磁铁的设计和建造	40
2.3.1 铁心磁铁设计的给定要求和设计的一般考虑	40
2.3.2 常规磁铁的极面设计	41
2.3.3 磁极极体和铁心回路	47
2.3.4 磁铁的端部效应	49
2.3.5 铁心磁铁的端部垫补与端部削斜	51
2.3.6 铁心材料特性和磁铁运行特性	64
2.3.7 铁心磁铁的扰动效应	67
2.3.8 磁铁磁场分布的数值计算	71
2.4 永磁磁铁	72
2.4.1 永磁磁铁的特殊性质	72
2.4.2 永磁材料	73

II 粒子加速器技术

2.4.3 永磁多极磁铁的工作原理	74
2.4.4 永磁磁铁的扰动效应与磁场微调技术	80
2.4.5 永磁磁铁的组装技术	81
2.5 超导磁铁	82
2.5.1 超导材料	83
2.5.2 超导多极磁铁多极磁场的产生	84
2.5.3 铁轭的影响	93
2.5.4 线圈端部的磁场	96
2.5.5 超导磁铁的机械精度和磁场力	97
2.6 加速器磁铁的磁场测量	98
2.6.1 霍尔片磁场测量	98
2.6.2 移动长线圈磁场测量	101
2.6.3 旋转线圈磁场测量	103
参考文献	109
第三章 加速器磁铁电源技术	110
3.1 电源技术的发展及磁铁电源在加速器中的作用	110
3.1.1 电源技术及功率器件简介	110
3.1.2 加速器电源的基本概况	117
3.2 几种磁铁电源的基本工作原理	122
3.2.1 晶闸管调相直流电源	122
3.2.2 开关型直流电源	143
3.3 BEPC II 储存环磁铁稳流电源简介	158
3.3.1 BEPC II 对储存环磁铁稳流电源的基本要求	158
3.3.2 BEPC II 典型稳流电源介绍	159
[本章附录 1] 稳定电源术语定义	162
[本章附录 2] 零磁通电流传感器工作原理(简称:DCCT)	164
参考文献	168
第四章 加速器高频技术	169
4.1 高频系统在加速器中的作用	169
4.1.1 用直流电压产生的电场加速带电粒子	169
4.1.2 多节累积加速	170
4.1.3 直线共振型加速器	171
4.1.4 回旋加速	172
4.1.5 稳相加速	174
4.2 高频谐振器——从 LC 电路到高频腔	179
4.2.1 RLC 振荡电路	180
4.2.2 高频谐振腔	193
4.2.3 谐振腔和束流在实际电路中的等效	203

4.3 储存环高频系统的设计	207
4.3.1 设计中的储存环高频系统应达到的基本要求	207
4.3.2 高频加速腔设计思想	207
4.3.3 耦合器与陶瓷窗	209
4.3.4 高频功率放大器的方案选择	210
4.3.5 低电平控制系统	235
参考文献	238
第五章 加速器真空系统	239
5.1 加速器真空系统基本要求	239
5.2 真空物理基础	241
5.2.1 真空概念和测量单位	241
5.2.2 常用公式	241
5.3 真空系统的计算	242
5.3.1 流导计算	242
5.3.2 抽气方程	243
5.3.3 压强分布计算	245
5.3.4 蒙特卡罗模拟计算	246
5.4 真空获得方法	247
5.4.1 涡轮分子泵	249
5.4.2 溅射离子泵	249
5.4.3 钛升华泵	253
5.4.4 非蒸散型吸气剂泵	255
5.4.5 分布式真空泵	260
5.5 真空测量和检漏方法	262
5.5.1 真空测量方法	262
5.5.2 真空检漏方法	268
5.6 真空材料与工艺	270
5.6.1 真空材料	270
5.6.2 真空部件表面处理	272
5.7 储存环真空系统的设计	276
5.7.1 束流与残余气体相互作用寿命	277
5.7.2 同步辐射功率	279
5.7.3 同步辐射光引起的气体负载	279
5.7.4 真空盒的设计	280
5.7.5 RF 屏蔽波纹管	284
5.7.6 结束语	284
参考文献	285
第六章 同步加速器的注入与引出技术	286

IV 粒子加速器技术

6.1	概述	286
6.2	注入方式	287
6.2.1	单圈单次注入	287
6.2.2	单圈多次注入	289
6.2.3	多圈注入——H ⁻ 电荷转换注入	293
6.3	引出方式	295
6.4	冲击磁铁系统	296
6.4.1	梯形波冲击磁铁系统	296
6.4.2	半正弦波冲击磁铁系统	307
6.4.3	高压脉冲谐振充电电源	315
6.4.4	冲击磁铁脉冲电源的发展趋势	319
6.5	切割磁铁	320
6.5.1	导流板型切割磁铁	320
6.5.2	涡流板型切割磁铁	325
6.5.3	Lambertson 切割磁铁	326
	参考文献	328
第七章	加速器束流测量技术	329
7.1	束流测量概述	329
7.2	束流测量物理	331
7.2.1	束流的电磁场	331
7.2.2	束流频谱	335
7.2.3	单束团	341
7.2.4	多束团	343
7.3	主要参数的测量方法和原理	345
7.3.1	流强测量:BCT,DCCT,WCM,法拉第筒	345
7.3.2	束流位置测量	347
7.3.3	束流截面测量	360
7.3.4	束流发射度测量	364
7.3.5	储存环束流能散度测量	366
7.3.6	束团长度测量	367
7.3.7	振荡频率测量	371
7.3.8	束流损失测量	375
7.4	逐束团束流反馈系统	377
7.4.1	系统的主要参数	377
7.4.2	系统组成	379
	参考文献	381
第八章	加速器控制技术	383
8.1	计算机控制系统的基本概念	383

8.1.1	计算机控制系统的组成	384
8.1.2	控制系统的发展史	385
8.1.3	分布式控制系统的体系结构	387
8.1.4	自动控制系统和控制规律	388
8.2	计算机控制技术	392
8.2.1	实时操作系统	392
8.2.2	网络通讯技术	394
8.2.3	现场总线技术	398
8.2.4	硬件接口和前端控制设备	401
8.2.5	数字信号处理和反馈技术	408
8.2.6	以数据库为核心的信息管理系统	410
8.2.7	抗干扰和容错技术	413
8.3	控制系统的开发与集成	415
8.3.1	系统设计和开发	415
8.3.2	硬件系统的配置和选型	416
8.3.3	组态软件	417
8.3.4	软件工程	423
8.3.5	质量控制	424
8.4	加速器控制系统	426
8.4.1	加速器控制系统的任务	427
8.4.2	加速器控制系统的功能	429
8.4.3	加速器控制系统的体系结构	429
8.4.4	系统集成工具 EPICS	432
8.4.5	加速器控制系统的组成	436
	参考文献	453
第九章	电子直线加速器技术	455
9.1	概述	455
9.2	电子直线加速器原理	459
9.2.1	稳相原理	460
9.2.2	盘荷波导中的电磁场	462
9.2.3	主要参数及其选取标准	465
9.2.4	纵向运动方程	467
9.2.5	聚束过程的分析	468
9.3	RF 加速结构	469
9.3.1	等阻抗加速管	470
9.3.2	等梯度加速管	470
9.3.3	等梯度加速结构设计的考虑	472
9.4	电子枪	473