

内 容 简 介

本书在第1版基础上做了较多的修改和补充,由原来的10章增加到13章,包括原有的带电粒子在电磁场中运动的基本规律以及在二维和三维磁场中运动的稳定条件,各种非理想场对粒子运动的影响,线性与非线性共振,高能带电粒子的辐射损失对运动产生的影响以及束流稳定等问题。新增加的三章内容涉及直线加速器的粒子动力学、强流加速器与束流发射度的理论问题,目的是满足我国研制和发展这两种装置的需要。本书可作为核物理专业本科或研究生教材,也可供从事加速器设计和研究的人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933
本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

加速器理论/刘乃泉主编;刘乃泉,林郁正,刘国治,黄文会编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2004.8

ISBN 7-302-08468-8

I. 加… II. ①刘… ②刘… ③林… ④刘… ⑤黄… III. 加速器—理论 IV. TL501

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第032890号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 朱红莲

文稿编辑: 黎 强

封面设计: 傅瑞学

版式设计: 刘祎森

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

装 订 者: 三河市春园印刷有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 170×230 印张: 20 字数: 363千字

版 次: 2004年8月第2版 2004年8月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-08468-8/O·357

印 数: 1~2000

定 价: 39.80元(平装)

49.80元(精装)

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103或(010)62795704

前言

本书原来是根据原子核物理教材编审委员会于 1985 年 7 月在青岛召开的会议上确定的加速器或束流物理专业的本科教学大纲编写的教材(试用),1990 年正式出版。10 多年来,我国在加速器领域又有许多新的发展,为了适应新形势的需要,我们在修改和补充的基础上,编写了这本第 2 版《加速器理论》。

自从自动稳相原理提出以来,各种共振高能加速器相继出现,随着 1952 年强聚焦加速原理的提出,人们认识到,要建造性能良好的加速装置,没有事先大量的理论计算和研究工作是不可想像的。例如,在强聚焦加速器中,粒子自由振荡的稳定区是很狭小的,对于不同的磁场参数(n, N, L),必须保持诸参数之间一定的比例关系,才能保持粒子稳定加速。又比如,在 高能电子加速器中,必须事先对同步辐射损失予以充分考虑,否则辐射损失将导致共振加速条件的破坏,电子无法被加速到高能。

加速器理论除了研究理想场中带电粒子运动的稳定性外,还必须讨论非理想场的影响,即无论事先进行的设计有多么周密,实际制造出来的加速器绝不可能处处满足理想情况。理论工作者的任务就是必须对各种可能的非理想场(如磁场不均匀分布、高频频率不稳定等)进行计算,并对各种非理想场提出不同的公差要求。公差要求过严,对加速器正常工作的增益不多,但会给制造及安装增加困难。相反,公差要求过宽,又往往会使加速器处于低效率的工作状态(如束流强度不高,或能量达不到设计指标等),甚至会造成加速器本身局部返工。

近年来,为了适应物理研究的需要,人们常常提出这种或那种新的加速器原理,这些新的想法也必须经过周密的理论计算才能判断其实现的可能性和局限性。有些新想法,如强聚焦原理,粗略地

看,似乎令人难以相信,因为在这个原理被提出以前,大家都认为,只有在 $1 > n > 0$ 的磁场中粒子运动才是稳定的。但是,严格的理论计算证明:交变梯度磁场能够保持粒子的稳定运动,而且这种磁场具有强的聚焦效果。这样,大家都被这种新的加速方法吸引了。另外也有一些新的加速方法,看来好像是很有道理的,譬如,为了克服回旋加速器中粒子因为质量随能量增加,不能维持共振加速的缺点,有人曾建议将回旋加速器的加速盒不是做成D形,而是做成八卦形,使粒子每次穿过加速缝时高频电场相位不变,这样,回旋加速器的能量不就可以无限制地提高了吗?但是,通过理论计算却发现,粒子在这种电场中的运动是不稳定的。相反,人们却发现了托马斯加速器原理,后来证明这是提高回旋加速器能量的一个成功的想法。因此,无论是从事加速器设计和制造工作,还是从事新的加速器原理探讨工作,加速器理论的训练都是十分重要的。当然,本课程不可能讨论到有关理论的每个方面,只是希望使学生在不多的学时内,将最基本的理论要领及处理问题的方法学到手,将来工作时,可以从这些基础知识和方法出发,着手解决面临的具体问题。

本书内容共分13章。第1、2章着重介绍在加速器中处理粒子运动的一般方法,即从牛顿力学方程出发,将不同形式的电磁场代入,从而得到在环形加速器中的粒子运动方程组,然后将运动分解为三个部分——平衡运动、自由振荡(快变化)和相振荡(慢变化),通过对平衡运动的研究可以得出维持粒子平衡运动的条件,从而确定加速器磁铁系统结构的特点。通过对相振荡的研究,得到粒子在电场中运动的稳定条件,由此可以确定加速器基本参数(如轨道半径、磁场强度及高频频率)之间的配合关系。第3章是研究周期场加速器,这种加速器的稳定条件不像弱聚焦加速器那样简单,而且往往因具体结构不同,稳定条件也相差很远,如有无直线节,聚焦节与散焦节的不同排列次序,都会使聚焦的条件发生变化。另外,在周期场中相振荡又有许多不同于弱聚焦的特点。第4、5章是研究非理想场对粒子运动的影响,非理想场对粒子运动的影响可以概括为两个方面:一是外力引起的强迫振动;另一个是共振现象,即当外力的频率与粒子振动的固有频率合拍时,粒子的固有振荡幅度不断被加强。前一种,即强迫振动的研究,可作为对非理想场提出公差要求的依据;后一种,即共振的研究,则力求在设计和调束时合理选择加速器的物理参数,避免共振发生。如在弱聚焦加速器中磁场对数梯度 n 一定要避开0.5, 0.75等数值。但在某些情况下,共振不能避免,注定要发生,这时理论工作者的任务就是要力求减小其危害性。在这两章中除讨论线性共振外,还提出了非线性共振问题。因为在这以前的研究中,我们都是采用线性近似,即略去所有的高次项。这样处理问题在多数情况下,已经足够准确地描述了粒子运动的规律。但是,当我们讨论各种共振发生的可能性的时

候,必须考虑非线性项导致共振的可能。当然,这与以前线性近似处理问题的方法并不矛盾,因为我们研究非线性共振的目的恰恰是要采取措施避开它。避开了非线性共振后,非线性项就变得不那么重要了。非线性共振的研究在数学上很复杂,我们这里只限于讨论其最基本的要领及发生的条件。第6章是哈密顿表示法,尽管这种方法应用并不十分普遍,但在解决某些问题时是方便的,因此我们也作了简要的介绍。第7、8章分别介绍了同步辐射对高能带电粒子运动的影响。第9、10章分别介绍了束流寿命和束流稳定问题。第11章集中讨论了直线型加速器的理论问题。第12章针对近年来强流加速器的新发展,介绍了强流加速器涉及的各种理论问题,以扩大本书的应用范围。第13章专门讨论了束流发射度,这是人们普遍关注的提高加速器束流品质的一个关键问题。

本书不是按每个加速器的系统叙述,而是把共同的问题提出来讨论。但在谈到每个问题时,又是从具体加速器(或具体电磁场形态)的举例出发,以便于理解。有些加速器不被提到,并非这里的分析方法不适用于这些加速器。应该具体问题具体分析,学习要灵活运用。课程中涉及到的数学问题较多,必要的数学工具学生应该细心掌握,不可轻视,对各种数学问题所表示的物理意义也必须给以同样的注意。数学毕竟是工具,用什么工具,要从物理问题的需要提出。譬如,粒子在磁场中的运动方程,准确的写法可以包含十几项,甚至更多,但如果不分主次,单纯追求数学上的严格,那么就不能用数学分析法得出方程的解来,因而也无法由此得到简明的物理结论。又比如,研究自由振荡时,外界微扰力可以略去,但研究共振现象时,则必须考虑某些微扰力。因此,要求读者能做到:物理问题能用合适的数学形式表达,从数学的运算中又能抓住物理要领。

由于篇幅所限,本书重点围绕环形、直线型及周期聚焦型的加速器展开讨论,有些类型的加速器,如普通静电加速器并未涉及,有关对撞机的一些专门问题也未涉及。

另外,为了便于读者学习和了解相关的知识,本书最后给出了一个索引。

符号说明

本书所用的符号尽量做到一个符号只代表一个物理量,但有的符号在不同的地方表示不同的物理量,也只好按一般习惯沿用下来,请读者注意。现把本书中所用到的主要符号按字母顺序列出并注明其物理意义。

A	矢量磁位
A	相振荡幅值
A	轨道接受度
A	常数
a	真空盒半宽度
a	束流半径
B	磁感应强度
B_r	径向磁感应强度
B_θ	辐向磁感应强度
B_z	轴向磁感应强度
B_s	平衡轨道上的磁感应强度
b	真空盒半高度
C	粒子轨道周长
C_s	同步粒子轨道周长
c	光速
d	阴阳极间距
E	矢量电场强度
E_r	径向电场强度
E_θ	辐向电场强度
E_z	轴向电场强度

E	粒子的总能量
E_0	粒子静止能量
E_s	同步粒子总能量
E^*	归一化电场强度
f	电场频率
f_s	谐振频率
$f_{x,z}$	边缘场聚焦常数
f_e	空间电荷中和度
G	粒子轨道曲率
G	母函数
$g(\theta, E)$	束流密度分布函数
H	哈密顿函数
H	磁场强度
H	相振荡能量
I	电流
\mathbf{I}	单元矩阵
I_c	临界电流
\mathbf{i}_z	轴向单位矢量
\mathbf{i}_r	径向单位矢量
\mathbf{i}_θ	辐向单位矢量
J_i	阻尼分配系数
J	电流密度
K	磁场聚焦函数
k	倍频系数
k	谐波系数
k	电磁波在自由空间的传播常数
L	拉格朗日函数
L	磁铁元件排列周期长度、漂移室长度
l	曲线坐标中轨道长度
M	轨道上束团数目
m	偏转磁铁中的轨道弧长
m	粒子的质量
m_0	粒子的静止质量
N	轨道磁场周期数

N	粒子数
n	磁场对数梯度
n	束团耦合模式
n_0	单位体积内的气体分子数
P_γ	同步辐射功率
P	高频功率
P	几率
p	残余气体压强
p	粒子动量
p_s	同步粒子动量
p^*	粒子归一化动量
Q_r, Q_r	径向自由振荡频率
Q_z	轴向自由振荡频率
Q	广义坐标
q	广义坐标
q	过电压系数
R	平均轨道半径
R	束包络半径
R_p	漂移室半径
R_c	阴极半径
r	粒子的轨道半径
r_s	平衡轨道半径
r_0	瞬时平衡轨道半径
S	束流截面
s	轨道直线级长度
T	渡越时间因子
T	粒子运动周期
T_f	高频电场周期
T_ϕ	相振荡周期
$U(\phi)$	位能函数
U	位能
U_s	粒子每圈平均辐射能量
u	量子辐射的能量、电子速率
u_e	电子密度

u_i	离子密度
u_g	中性气体分子密度
V	高频电压
V_0	高频电压幅值
v	粒子运动的速度
W	粒子的动能
W	自由振荡能量
X	粒子的矢量半径
x	粒子轨道的径向偏移
y	粒子轨道的横向偏移
z	粒子轨道的轴向偏移
Z	原子序数
Z	阻抗
$\alpha(l)$	横向振荡 α 函数
α_p	轨道膨胀因子
α_i	辐射阻尼系数
β	相对速度
$\beta(l)$	横向振荡 β 函数
β_p	基波的归一化相速度
γ	归一化能量
σ_x	自由振荡径向均方根偏差
σ_z	自由振荡轴向均方根偏差
σ_ϵ	能量振荡均方根偏差
τ_i	辐射阻尼时间常数
τ_c	库仑散射寿命
τ_q	量子寿命
τ_T	Touschek 寿命
τ	非同步粒子相对同步粒子的时间偏移
τ	加速周期
φ	高频电场相位
φ_s	平衡相位
Ψ	粒子轨道包围的总磁通
Ω	相振荡角频率、电子在磁场中的回旋频率
ω	粒子回旋角频率

ω_i	高频电场角频率
ω_x, ω_r	径向自由振荡角频率
ω_z	轴向自由振荡角频率
ω_s	同步粒子回旋角频率
ω_0	中心区或非同步粒子回旋角频率
$\gamma(l)$	横向振荡 γ 函数
δ	趋肤深度
ϵ	某一微小量、介质常数
ϵ	粒子的能量偏移
ϵ	束流发射度
ϵ_n	归一化发射度
η	跳相因子
$\eta(l)$	色散函数
η_A	电流修正因子
θ	辐角
Δ	束流发生扰动的角频率
λ	自由空间的波长
λ	某一常数
$\lambda(\theta)$	线电流密度
Ψ	自由振荡相位
μ	磁导率
μ	每个磁场周期内自由振荡的角度
$\mu(l)$	轨道磁场 μ 函数
ν	粒子运动的圈数
ξ	色品
ξ_0	自然色品
ξ_s	附加色品
ζ	某一变量
$\rho(l)$	轨道曲率半径
ρ_s	平衡轨道曲率半径
ρ	电荷密度
σ	常系数

目
录

第 1 章	圆形加速器中带电粒子的运动方程与	
	横向运动	1
1.1	带电粒子在电磁场中的运动	1
1.2	带电粒子在磁场中的运动	3
1.2.1	带电粒子在均匀磁场中的运动	3
1.2.2	带电粒子在均匀磁场中运动的稳定性	6
1.2.3	带电粒子在径向不均匀磁场中的运动	6
1.2.4	带电粒子在径向不均匀磁场中运动的 稳定性	7
1.2.5	带电粒子在三维磁场中的运动	11
1.3	带电粒子在电磁场中的加速运动	17
1.4	平衡运动	19
1.4.1	恒定磁场共振加速(稳相加速器)	20
1.4.2	恒定轨道共振加速(同步加速器)	20
1.4.3	恒定电场频率的加速方法(等时性 回旋)	21
1.4.4	感应场加速的平衡运动	22
1.5	自由振荡(快振荡)	23
1.5.1	参数不变时的自由振荡	23
1.5.2	考虑参数慢变化时的自由振荡	24
	参考文献	25
	习题与思考题	26
第 2 章	圆形加速器中带电粒子的纵向运动	27
2.1	感应加速器中电子轨道的收缩	27
2.2	圆形轨道加速器中的相振荡	28

2.2.1	相振荡方程	28
2.2.2	相振荡稳定条件	29
2.2.3	相振荡的周期与幅度	31
2.2.4	相振荡引起粒子轨道和能量分散性的变化	33
2.3	粒子在普通回旋加速器中的相运动	34
2.3.1	回旋加速器中心区粒子的聚相过程	34
2.3.2	粒子在普通回旋加速器中的相移和最大能量	36
2.4	等时性回旋加速器中的相运动	38
2.4.1	中心区滑相	38
2.4.2	平均磁场分布误差与加速电压频率误差所引起的 相移	39
2.5	分离轨道等时性回旋加速器中的相运动	40
	参考文献	41
	习题与思考题	41
第3章	粒子在理想周期场中的运动	42
3.1	用矩阵法研究粒子横向运动的稳定性	42
3.1.1	周期场中粒子的横向运动方程	42
3.1.2	横向运动的稳定性判据	45
3.1.3	FODO结构的稳定性	47
3.2	粒子在周期场中的自由振荡	49
3.2.1	Hill方程及其解	49
3.2.2	发射度和接受度	52
3.2.3	动量色散	54
3.3	粒子在周期场中的相振荡	58
3.3.1	相运动方程	58
3.3.2	小角度振荡	59
3.3.3	大角度振荡	59
	参考文献	60
	习题与思考题	60
第4章	加速器中粒子运动的共振	62
4.1	几种常见的共振形式	62
4.1.1	非理想场对粒子运动的影响	62

4.1.2	强迫振荡	62
4.1.3	普通共振	63
4.1.4	参数共振	64
4.1.5	线性耦合共振	66
4.2	高次项与非线性共振	68
4.2.1	高次项对粒子运动的影响	68
4.2.2	一维非线性共振	70
4.2.3	横向非线性耦合共振	71
4.2.4	$n=0.2$ 的横向非线性耦合共振	72
4.3	用 Bogolyubov 法求解非线性方程	74
4.3.1	Bogolyubov 逐次渐进法	74
4.3.2	用逐次渐进法解半整数共振方程	76
4.3.3	共振线宽度	78
4.4	相振荡中的共振	79
4.4.1	外力作用下的相振荡方程	79
4.4.2	相振荡中的强迫振荡和共振	80
	参考文献	81
	习题与思考题	81
第 5 章	周期场中非理想场与非线性共振	82
5.1	多极子场	82
5.2	磁场偏差引起束流轨道的畸变与校正	85
5.3	磁场梯度误差效应	86
5.4	色品	88
5.5	非线性共振	90
5.5.1	弗洛克变换	90
5.5.2	谐波分析	91
5.5.3	耦合共振	94
5.5.4	三阶共振	94
5.6	动力学孔径	98
	参考文献	99
	习题与思考题	100
第 6 章	用哈密顿法研究粒子的运动	101
6.1	拉格朗日与哈密顿表示式	101

6.1.1	拉格朗日与哈密顿表示式	101
6.1.2	正则变换	102
6.2	线性运动	103
6.2.1	线性振荡	103
6.2.2	单摆	105
6.3	用哈密顿法研究非线性运动	106
6.3.1	曲线坐标系中的哈密顿方程	106
6.3.2	$\frac{1}{3}$ 倍数共振	108
	参考文献	110
	习题与思考题	111
第 7 章	同步辐射及其平均损失对粒子运动的影响	112
7.1	同步辐射	112
7.1.1	同步辐射的平均能量损失	112
7.1.2	同步辐射光的性质	114
7.2	能量振荡阻尼	118
7.2.1	考虑辐射损失时电子的能量振荡方程	118
7.2.2	能量振荡阻尼系数	122
7.2.3	\mathcal{D} 函数	124
7.3	自由振荡阻尼	127
7.3.1	垂直方向的自由振荡阻尼	127
7.3.2	径向自由振荡的辐射阻尼	129
7.4	辐射阻尼的时间常数与衰减分配数	133
7.5	扭摆磁铁与波荡器	133
7.5.1	插入件的特征参数 K	133
7.5.2	插入件中同步辐射光的特性	135
7.5.3	插入件磁场对粒子运动的影响	136
	参考文献	136
	习题与思考题	137
第 8 章	量子辐射损失对粒子运动的影响	138
8.1	量子辐射引起的电子能量振荡	138
8.1.1	能量振荡	138

8.1.2 束团长度	142
8.2 量子辐射引起的电子自由振荡	144
8.2.1 束团宽度	144
8.2.2 束团高度	148
8.2.3 耦合作用下的束团横向尺寸	149
参考文献	151
习题与思考题	151
第 9 章 束流寿命	152
9.1 束流量子寿命	152
9.1.1 横向振荡量子的寿命	152
9.1.2 纵向振荡量子的寿命	155
9.2 束流散射寿命	157
9.2.1 库仑散射寿命	157
9.2.2 韧致辐射损失	159
9.2.3 电子与剩余气体原子的壳层电子之间的弹性散射	160
9.2.4 电子与剩余气体原子的壳层电子之间的 非弹性散射	160
9.2.5 电子与剩余气体的散射总寿命	160
9.2.6 束流散射寿命的修正公式	160
9.3 Touschek 寿命	162
9.3.1 Touschek 效应	162
9.3.2 Touschek 寿命	165
9.3.3 Touschek 多重散射	166
9.4 离子捕获损失	167
参考文献	168
习题与思考题	168
第 10 章 束流集体不稳定性	170
10.1 尾场与阻抗	170
10.1.1 尾场函数	170
10.1.2 阻抗	173
10.1.3 加速器中常见的阻抗	174
10.1.4 寄生损失	176

10.2	宏粒子模型下的集体不稳定性	177
10.2.1	直线加速器中的束流崩溃效应	177
10.2.2	强头尾不稳定性	179
10.2.3	头尾不稳定性	180
10.2.4	纵向 Robinson 不稳定性	182
10.3	应用 Vlasov 方程的扰动分析法	185
10.3.1	Vlasov 方程	185
10.3.2	势阱扰动	186
10.3.3	线性化 Vlasov 方程	188
10.4	多束团不稳定性	193
10.5	朗道阻尼	194
	参考文献	197
	习题与思考题	197
 第 11 章 带电粒子在射频直线加速器中的运动		199
11.1	概述	199
11.1.1	射频直线加速器	199
11.1.2	射频直线加速器电磁场分布的一般表达式	200
11.1.3	同步加速条件	203
11.2	直线加速器中的纵向运动	204
11.2.1	直线加速器中电子的纵向运动	204
11.2.2	电子在行波电子直线加速器中的纵向运动	206
11.2.3	电子在驻波电子直线加速器中的纵向运动	213
11.2.4	粒子在漂移管型直线加速器中的纵向运动	216
11.3	直线加速器中的横向运动	219
11.3.1	直线加速器中电子的横向运动	219
11.3.2	电子在行波电子直线加速器中的横向运动	223
11.3.3	电子在驻波电子直线加速器中的横向运动	230
11.3.4	电子在直线加速器中纵向与横向运动的耦合	235
11.3.5	漂移管型质子(离子)直线加速器中的 横向运动	238
11.4	粒子在射频四极场加速结构中的运动	240
11.4.1	纵向运动	241
11.4.2	横向运动	243

参考文献	244
习题与思考题	245
第 12 章 强流相对论电子束物理基础	246
12.1 概述	246
12.2 强流相对论电子束的产生	249
12.2.1 阴极发射电子初始能量可以忽略时的理想无限大 平板二极管的空间电荷限制电流	250
12.2.2 阴极发射电子具有初始能量时的理想无限大 平板二极管空间电荷限制电流	253
12.2.3 平板型二极管空间电荷限制电流二维 修正因子	256
12.2.4 球头形阴极和针状阴极二极管的空间电荷 限制电流	257
12.2.5 自箍缩条件下的饱和顺位电流	258
12.2.6 外加磁场对二极管阻抗的影响	258
12.2.7 二极管产生的强流相对论电子束能谱	260
12.2.8 二极管的阳极物理过程	260
12.2.9 二极管空间电荷限制电流电压关系随时间的 变化	262
12.2.10 无箔二极管	264
12.3 强流相对论电子束的自电磁场限制电流	265
12.3.1 强流相对论电子束在封闭圆柱形金属腔内产生的 自电磁场	265
12.3.2 强流相对论电子束的自电场限制电流——空间 电荷限制电流	268
12.3.3 强流相对论电子束的自磁场限制电流	269
12.4 强流相对论电子束在中性气体中传输的物理过程	270
12.4.1 无外加磁场时的空间电荷中和	271
12.4.2 有外加磁场时的空间电荷中和	273
12.4.3 强流相对论电子束在传输过程中的电流中和	275
12.4.4 束流传输过程中的不稳定性	278
12.5 结束语	278
参考文献	279

习题与思考题	280
第 13 章 束流发射度	282
13.1 束流发射度的定义	282
13.1.1 束流发射度	282
13.1.2 均方根发射度	284
13.1.3 有效发射度	284
13.1.4 归一化束流发射度	284
13.2 直线加速器中束流发射度的增长	285
13.2.1 理想加速器中的束流发射度	285
13.2.2 非理想传输系统中束流发射度的增长	285
13.2.3 高能直线加速器中发射度的增长	286
13.3 同步辐射光源装置的束流发射度	287
13.3.1 储存环的束流发射度	287
13.3.2 DBA 聚焦结构的束流发射度	289
13.3.3 TBA 聚焦结构的束流发射度	290
13.3.4 FODO 聚焦结构的束流发射度	291
13.4 高能直线加速器及储存环中降低束流发射度的方法	292
13.4.1 电子束冷却	292
13.4.2 随机冷却	292
13.4.3 辐射阻尼冷却	292
参考文献	293
习题与思考题	293
 索 引	 294