

高等学校试用教材

加速器理论

刘 迺 泉 主编

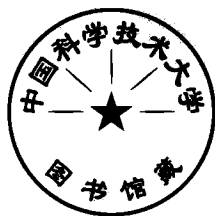
陈 佳 洱 主审

原子能出版社

高等学校（试用）教材

加速器理论

（初 版）



原子能出版社

高等学校(试用)教材

加速器理论

(初 版)

主编	刘遵泉	主审	陈佳洱
编者	林郁正	审者	方家训
	王 垞		徐建铭
	金玉明		国智元
			茅乃丰
			裴元吉
			赖启基

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 13.375 ·字数 300 千字

1990年12月北京第1版·1990年12月北京第1次印刷

印数1—10000

ISBN7-5022-0262-5

TL·102(课) 定价: 2.65元

前 言

本书是根据原核工业部原子核物理教材委员会于1985年7月在青岛召开的会议上确定的编写提纲编写的加速器或束流物理专业的本科生（试用）教材。

随着加速器装置的日益复杂和完善，近年来，加速器的理论工作有了迅速的发展。如果说在加速器发展的初期，人们不需要进行过多的理论计算工作就可以着手建造各种能量的加速装置的话，那么从自动稳相原理被提出以后，并随之发展了各种共振高能加速器，特别是1952年强聚焦加速原理被发现以来，如果事先没有大量的理论计算工作，要建造这些加速装置是不可想像的。如强聚焦加速器中，粒子自由振荡的稳定区是很狭小的，对于不同能量的加速器必须选择不同的磁场参数（ n ， N ， L ）并保持诸参数之间一定的比例关系，才能保持粒子稳定加速。又如高能电子同步加速器，必须事先对电子辐射损失予以充分考虑，否则辐射损失将可能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，即无论事先进行如何周密的设计，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，徒然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。

这些年来，为了适应核物理发展的需要，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，粗略地看来，似乎是不易令人信服的，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，经过严格的理论计算证明了交变梯度磁场能够保持粒子的稳定运动，而且具有强的聚焦效果。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由于粒子质量随能量增加而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，理论计算结果发现，粒子在这种电场中的运动是不稳定的，而托马斯加速器则是解决回旋加速器能量提高的一个成功的想法，但能量也不能无限提高。因此，无论从事加速器设计和制造工作，或从事新的加速器原理探讨工作，加速器理论的训练都是重要的。当然，本课程不可能讨论到上述理论问题的每个方面，只是希望使学生在不多的学时内，将最基本的理论概念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。

课程共分十章。第一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，从而得到在不同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，从而确定加速器的基本参数，如轨道半径、磁场强度及高频频率范围等。通过对自由振荡的研究可以得出粒子在磁场中维持稳定运动的条件，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，我们便得到粒子在电场中运动的稳定条件，从而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。第二章则是结合几个有典型意义的弱聚焦加速器和直线型加速器，将第一章的方法用于解决这些加速器中的理论问题。第三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，聚焦节与散焦节的排列次序不同，都会使聚焦的条件变化。另外，在周期场中相振荡又有许多不同于弱聚焦的许多新特点。第四、五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；一是共振现象，即当外力的频率与粒子振动的固有频率合拍的时候，粒子的固有振荡幅度不断被加强（需要指出：加速器中的共振也有个别情况不是由外力激发的，而是由场的非线性项引起的）。前一种，即强迫振动的研究，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，则力求在选择加速器物理参数时避免共振发生。如一般弱聚焦加速器中磁场对数梯度 n 的选择要避开 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缩小其危害性。譬如采取措施使振幅的增加不致过大。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

这以前所有问题的研究中，我们都是采用了线性近似，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，必须考虑到非线性项发生共振的可能。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，非线性项就变得不重要了，即可以忽略不计。非线性共振的研究在数学上较烦，我们这里只限于讨论其最基本的概念及发生的条件。第六章是哈密顿表示法，这在解决某些问题时是方便的。因此，我们也作了简要的介绍。第七、八章分别介绍了同步辐射对高能带电粒子运动的影响。第九、十章分别介绍了束流寿命和束流稳定问题。这主要是考虑到近年来各种类型储存环的迅速发展，所涉及的理论问题很多，特别是电子储存环，不仅对高能物理研究十分重要，而且也在生物、化学、材料以及大规模集成电路的研究和制造上发挥着巨大作用。特别是随着超导技术的发展，电子储存环将逐步小型化，从而开创其广泛的应用前景。

本书不是按每个加速器的系统叙述，而是把其中共同的问题提出来讨论。但谈到每个问题时，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可能较多一些，必要的数学工具大家一定要**细心掌握**，不可轻视，但也不要只陷入数学之中，对其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。因而也无法由此得出简明的物理结论来。又如，研究自由振动时，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，要求大家能做到：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概念。

由于篇幅所限，本书重点围绕环形及直线加速类型的加速器展开讨论，有些类型的加速器，如静电型的并未涉及，有关对撞机中的一些专门问题也未涉及。

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，但也有的符号在不同的地方表示不同的物理量，我们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_0	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
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
ε^*	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
G	粒子轨道曲率
G	母函数
$g(\theta, E)$	束流密度分布函数
G_m	四极透镜磁场梯度
H	哈密顿函数
H	磁场强度
H	相振荡能量
I	电流
I	单元矩阵
i_z	轴向单位矢量
i_r	径向单位矢量
i_θ	辐向单位矢量
J_i	阻尼分配系数
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

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
$p_\parallel$	同步粒子动量
$p^\perp$	粒子归一化动量
$Q_\perp, Q_\parallel$	径向自由振荡频率
$Q_\perp$	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	粒子的轨道半径
r_s	平衡轨道半径
r_p	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_r	粒子每圈辐射的能量
u	量子辐射的能量
V	高频电压
V_0	电压幅值
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_r	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_r	基波的归一化相速度
γ	归一化能量
X	

σ_r	自由振荡轴向均方根偏差
σ_d	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
ω	粒子回旋角频率
ω_f	高频电场角频率
ω_x, ω_y	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_o	中心区粒子回旋角频率

$\gamma(l)$	横向振荡 γ 函数
δ	趋肤深度
ε	某一微小量
ε	粒子的能量偏移
ε	束流发射度
ε^*	归一化发射度
η	跳相因子
$\eta(l)$	色散函数
θ	辐角
Λ	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
$\lambda(\phi_s)$	某一变系数
μ	导磁率
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
ξ	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
σ_x	自由振荡径向均方根偏差

内 容 简 介

本书共分十章，包括带电粒子在电磁场中运动的基本规律和在各种二维及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，线性共振与非线性共振，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问题。在研究方法上，除采用经典的牛顿力学方法外，还介绍了哈密顿表示式；除采用单粒子处理问题外，也讨论了束流自身场的影响。由于学时所限，本书仍是加速器理论的初步，许多问题有待专门研究。

本书由陈佳洱主审。经核工业总公司原子核物理教材委员会加速器课程组于1988年2月由陈佳洱主持召开的审稿会审定，同意作为高等学校（试用）教材。

目 录

第一章 加速器中带电粒子运动的一般规律

第一节 带电粒子在电磁场中的运动	1
第二节 带电粒子在磁场中的运动	5
第三节 带电粒子在电磁场中的加速运动	29
第四节 平衡运动	32
第五节 自由振荡 (快振荡)	39
第六节 相振荡	42
第一章习题及思考题	52
参考文献	55

第二章 粒子在圆形及直线加速器中的运动

第一节 感应加速过程中瞬时平衡轨道的收缩	56
第二节 粒子在回旋加速器中心区的运动	59
第三节 粒子在回旋及稳相加速器中的相运动	70
第四节 电子直线加速器中的纵向运动	90
第五节 电子直线加速器中的横向运动	112
第六节 粒子在漂移管型质子直线加速器中的运动	131
第七节 粒子在高频四极场加速结构 (RFQ) 中的运动	139
第二章习题及思考题	145
参考文献	147

第三章 粒子在理想周期场中的运动

第一节 用矩阵法研究粒子运动的稳定问题	148
第二节 粒子在各类周期场系统中运动的稳定条件	155
第三节 粒子在周期场中的自由振荡	174
第四节 粒子在周期场中的相振荡	182

第三章习题及思考题	197
参考文献	198
第四章 弱聚焦加速器中粒子运动的共振问题	
第一节 几种常见的共振形式	199
第二节 高次项与非线性共振	209
第三节 共振线的宽度	219
第四节 相振荡中的共振	230
第四章习题及思考题	233
参考文献	233
第五章 非理想场与非线性共振	
第一节 磁场偏差引起束流轨道的畸变与校正	235
第二节 磁场梯度误差效应	240
第三节 多极场对粒子运动的影响	246
第五章习题及思考题	261
参考文献	262
第六章 用哈密顿法研究粒子运动问题	
第一节 拉格朗日与哈密顿表示式	263
第二节 线性运动	266
第三节 用哈密顿法研究非线性问题	270
第六章习题及思考题	279
参考文献	279
第七章 平均辐射损失对粒子运动的影响	
第一节 辐射能量损失	281
第二节 能量振荡阻尼	283
第三节 自由振荡阻尼	298
第四节 辐射阻尼的时间常数和衰减分配数	306
第七章习题及思考题	307
参考文献	308
第八章 量子辐射损失对粒子运动的影响	