

质子直线加速器原理

王书鸿 罗紫华 罗应雄 著



原子能出版社

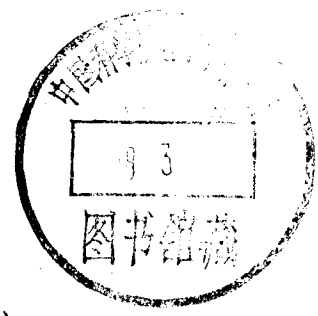
53.83123
122

质子直线加速器原理

王 书 鸿
罗 紫 华
罗 应 雄

著

方 守 贤 审



原子能出版社

8810093

2413/2915
内 容 简 介

本书着重叙述质子直线加速器的原理和束流动力学,并介绍这类加速器的设计原则、设计步骤、主体设备以及主要技术关键。全书共分十二章,包括绪论,加速腔的高频结构,加速腔的理论设计,纵向运动,横向运动,耦合运动,空间电荷效应,瞬态耦合效应与束流负载效应,稳态误差扰动,这种加速器的主体设备、现状与发展以及应用等。

本书可供从事加速器设计、建造、运行和使用的科学工作者、工程技术人员以及高等院校有关专业的师生参考。

质子直线加速器原理

王书鸿

罗紫华 著

罗应雄

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张 17 1/4·字数427千字

1986年7月北京第一版·1986年7月北京第一次印刷

印数1—1000·统一书号: 15175·630

定价: 3.50 元

序

质子直线加速器自二十世纪四十年代问世至今，已发展到了它的第三代。世界上许多科学技术比较先进的国家，几乎都拥有这类加速器。它对于原子核物理、高能物理、放射化学、放射医学、材料科学、核武器以及能源研究等方面，都有重要的意义。近十年来，这类加速器在设计、结构、工艺等各个方面又取得了许多新的进展。

本书是在我国第一台质子直线加速器物理设计的基础上，结合预制研究的实践过程编写的。全书共分十二章。包括绪论，加速腔的高频结构，加速腔的理论设计，纵向运动，横向运动，耦合运动，空间电荷效应，瞬态耦合效应与束流负载效应，稳态误差扰动，主体设备，质子直线加速器的现状与发展以及应用等。

本书中各章的叙述，以物理概念为主，即使对加速器主体设备的介绍，也是从加速器物理及整台机器的性能要求出发，说明这些设备应该具备的结构特点和技术指标。这种侧重于加速器物理而不是每个设备细节的描述方法、对于涉及多种学科和技术（诸如电动力学、统计物理、等离子体物理、离子光学、相对论和高频、机械、真空、热工、电子学、计算机、自动控制、电磁测量等）的质子直线加速器来说，也许更为恰当；对于帮助读者深入了解这种复杂机器的关键以及各系统之间的相互关系，也可能是有益的。

我们感谢中国科学院高能物理研究所方守贤研究员对本书写作的指导及对全部书稿的审阅；感谢张亦勤同志对我们撰写第三章所给予的帮助；感谢张竹湘同志帮助我们绘制了全书的插图。由于我们的学识有限，错误或不当之处在所难免。我们诚恳地希望读者给以批评和指正。

作 者

1980年10月于中国科学院高能物理研究所

本书常用符号表

A	漂移管芯管的内直径
A	盘荷波导中盘片的内孔直径
$A_{\parallel}$	加速器的纵向接受度
A_n	瞬态电场按本征模式电场展开的系数
$A_{\perp}$	加速器的横向接受度
A_x	在 (x, x') 相平面上的加速器接受度
a	漂移管芯管的内半径
a	RFQ加速器束流通道的最小半径
a_n	第 n 个空间谐波的振幅
a_x, a_x^*	粒子横向运动的起始参数
a_{x1}, a_{y1}, a_{z1}	在实验室坐标系中束团椭球体的三个半轴
a_{xm}, a_{ym}, a_{zm}	在质心坐标系中束团椭球体的三个半轴
B	磁感应强度矢量
B_n	瞬态磁场按本征模式磁场展开的系数
B_r	剩磁
$B_{x1}^{SC}, B_{y1}^{SC}, B_{z1}^{SC}$	分别为实验坐标系中空间电荷磁感应强度在 x, y, z 方向上的分量
B_x, B_y	分别为磁感应强度在 x, y 方向上的分量
B_{Δ}	RFQ加速器的横向聚焦参数
C	电容
c	光速
D	电位移矢量
D	加速腔的内直径
D	盘荷波导的内直径
D	散焦节
D_s	表征束流在 (x, x') 相平面上匹配程度的一个参量
d	漂移管的外直径
E	电场强度矢量
$E_n(z, \gamma, \theta)$	第 n 个本征模式的电场矢量
$E(z, \gamma, \theta, t)$	瞬态电场矢量
$E_A \cdot \pi$	粒子相轨迹所围的面积
$E_{Am \cdot \pi}$	粒子最大相轨迹所围的面积
$E_s(z, t)$	束流在加速腔中感应的电场
E'_z	四极电透镜的电场梯度
E_{xx}, E_{yy}	四极电透镜的电场在 x 和 y 方向上的分量
E_0	加速间隙中的平均电场
E_0	轴上峰值平均电场

II

E_s	表面电场
$E_{s,max}$	金属表面最大电场
E_x 、 E_y	分别为 x 和 y 方向上的电场分量
E_x	(x 、 x') 相平面上粒子运动的不变量
E_{x1}^{SC} 、 E_{y1}^{SC} 、 E_{z1}^{SC}	实验室坐标系中的空间电荷电场
E_{xm}^{SC} 、 E_{ym}^{SC} 、 E_{zm}^{SC}	质心坐标系中的空间电荷电场
E_x 、 E_r 、 E_θ	电场强度在柱坐标中的各分量
$E_{\text{正}}$	正向波的电场强度
$E_{\text{反}}$	反向波的电场强度
$E_{\text{驻}}$	驻波电场强度
$e_z(r, z)$	轴向电场在座标 (r 、 z) 上的振幅
e	电子电荷
F	聚焦节
F_s	电场对粒子的作用力
F_{sx} 、 F_{sy}	分别为粒子在 x 和 y 方向受到的电场作用力
F_m	磁场对粒子的作用力
F_{mx} 、 F_{my}	分别为粒子在 x 和 y 方向受到的磁场作用力
F_r	作用在粒子上的径向力
F_s	空间电荷作用力
F_s	束团长度形状因子
f	高频场的频率
$f_x(z)$ 、 $f_x^*(z)$	x 方向的弗洛克函数及其共轭函数
G_s	四极电透镜沿径向的电场梯度
G_m	四极磁透镜沿径向的磁场梯度
G'_m 、 G''_m	分别为磁场梯度对 z 的一阶和二阶导数
g	漂移管间的间隙长度
$H(z, r, \theta, t)$	瞬态磁场强度矢量
$H(r, t)$	高频磁场强度矢量
$H_n(z, r, \theta)$	第 n 个本征模式的磁场矢量
H	哈密顿函数
H_s	纵向稳相区边界对应的哈密顿函数值
H_x 、 H_r 、 H_θ	磁场在柱坐标中的各分量
h	横截面呈矩形或“T”形的调谐块的高度
h_u	四极透镜作用区因子
h 、 h'	分别为 r 和 z 方向上相邻两网格点之间的距离
I	束流强度
Im	复数的虚部
I_{max}	极限流强
I_n	第 n 个等效电路中的电流幅值

I_0	虚宗量零阶贝塞尔函数
i_s	腔壁表面上高频面电流密度
$\mathbf{J}$	电流密度矢量
J_0, J_1	分别为零阶和一阶贝塞尔函数
j	单位虚数
$k = \omega/c$	角频率为 ω 的波在自由空间中的传播常数
$k_c = \omega_{c_i}/c$	角频率为截止频率和相速度为光速的波的传播常数
k_{c011}	四极磁透镜中绕组的填充系数
k_l	粒子纵向振荡波数
k_{lN}	以加速单元长度作长度单位的粒子纵向振荡波数
k_q	有量纲的四极磁透镜聚焦参数
k_t	粒子横向振荡波数
k_{tN}	以加速单元长度作长度单位的粒子横向振荡波数
$k_{t,sc}$	空间电荷作用引起横向振荡波数的改变量
$k = \omega/v_0$	与粒子同步的谐波分量的传播常数
k_c, k_o, k_1, k_2	单元链中的耦合常数
$k_n = \omega_n/c$	第 n 个本征模的传播常数
$k_p = \omega/v_p$	角频率为 ω 和相速度为 v_p 的波的传播常数
$k_{p,n}$	第 n 个空间谐波分量的传播常数
L	电感
L_c	加速单元长度
L_d	聚束器中心至直线加速器入口的距离
L_n, R_n, C_n, V_n	分别为第 n 个共振回路中电感、电阻、电容和驱动电压
L_p	聚焦结构周期的长度
L_q	四极磁透镜的有效长度
L_T	加速腔长度
l_1, l_2	分别为左、右半个加速单元的长度
M	互感系数
M_x, M_y, M_z	质心坐标系中椭球体形状因子
M_{13x}	色散系数
m_0	质子静止质量
$m_0 c^2$	质子静止能量
N	聚焦结构的周期数
N	单元链的单元数
NI	四极磁透镜每个极头绕组的安匝数
$\mathbf{n}, \boldsymbol{\tau}$	分别为外法向和切向单位矢量
n	单元链中的单元序号
$n(x, y, z, x', y', z')$	粒子在六维相空间上的密度分布函数
O	漂移节

IV

P	功率和功率损耗
P_m	四极磁透镜的励磁功率
$(p-p_s)_m$	动量振荡振幅
p_s	同步粒子的动量
p_x	粒子的动量在 x 方向的分量
Q	品质因子
Q_{ext}	腔外波导系统的品质因子
Q_L	高频腔的有载品质因子
Q_n	第 n 个模式的品质因子
q	束团的电荷量
q	横向振荡波数与纵向振荡波数之比
q	模式序数
R	加速腔的内半径
R	电阻
R_e	漂移管端面外圆弧半径
R_{coil}	四极磁透镜每个极头上的绕组电阻值
Re	复数的实部
R_e^b	漂移管端面内圆弧半径
R_r	反射系数
R_s	单位长度的腔壁表面电阻
R_x, R_y	分别为RFQ加速器的加速电极在 x 和 y 方向的曲率半径
R_{xF}, R_{xD}	分别为 x 方向聚焦节和散焦节的转换矩阵
R_{xO}	在 x 方向的漂移节的转换矩阵
$R_{x,rf}$	在 x 方向的高频场散焦作用矩阵
$R_x(z_i z_f)$	在 x 方向自 z_i 至 z_f 处的转换矩阵
R_0	RFQ加速器极尖的特征半径
$\mathbf{r}$	三维空间的座标矢量
r	径向座标
r_s	四极磁透镜的极尖内接圆半径
r_s	“库仑半径”
$r_x(\tau), r_y(\tau)$	束流在 x 和 y 方向的包络
r_t	横截面呈半圆形的调谐块半径
S	四极磁透镜绕组截面积
S, S', S''	动力学系数
S_1	四极磁透镜绕组窗口的总横截面积
S_{eff}	调谐块的有效截面积
s	面积
T	渡越时间因子
T', T''	动力学系数

T_B	聚束腔的渡越时间因子
T_C	非同步粒子通过一个加速单元所需的时间
T_{rf}	高频周期
t	时间变量
t_F	填充时间
$U = rH_0$	场分布计算函数
U	x 和 y 座标的代号
u	电压
V	四极电透镜的电极电位; 体积
$V(r, \theta, z, t)$	RFQ加速器中近轴区的势函数
$V_{\phi}(\Delta\phi)$	势函数
$V_{rf}, V_{m, rf}$	分别为高频电压及其幅值
v	粒子的速度
v_B	聚束器高频电压幅值
v_b	测量电场用的金属小球微扰体的体积
v_g	波的群速
v_p	波的相速
v_s	同步粒子的速度
v_z	粒子在 z 方向的速度
W	加速腔单位长度上的高频储能
W_t	加速腔的总储能
W	粒子的动能
W	横截面呈矩形的调谐块宽度
x, y, z	直角坐标系
x_{max}	束流在 x 方向上的包络
$x^{(0)}, x_m^{(0)}$	分别为光滑近似下横向运动齐次方程的解及其振幅
$\bar{x}, \bar{y}$	束流在 x 和 y 方向上的均方根包络
x, y, z	经变换 (如 $x = x/\sqrt{\beta}, y$, 等) 后的直角坐标系
Z_c	腔的特征阻抗
Z_g	波导特征阻抗
Z_0	良导体的波阻抗
Z_{eff}	有效分路阻抗
Z_s	分路阻抗
z	非同步粒子所处的轴向位置
z_c	束团中心的轴向位置
z_s	同步粒子所处的轴向位置
z_{tc}	四极磁透镜的边缘区中心的轴向位置
$\alpha = E_{max}/E_0$	最大表面电场与轴上平均电场之比
α, β, γ	发射度椭圆参数

VI

α_n	第 n 个模式的振幅衰减常数
$\alpha_x, \beta_x, \gamma_x$	x 方向的弗洛克椭圆参数
$\alpha_y, \beta_y, \gamma_y$	y 方向的弗洛克椭圆参数
$\beta = v/c$	粒子的相对速度
β_c	同步粒子到达加速单元中心时的相对速度
$\beta_g = L_g/\lambda$	加速单元的几何速度
β_i	注入时粒子的相对速度
β_s	同步粒子的相对速度
$\beta_{x, N_{max}}$	以 τ 为自变量的 x 方向最大振幅函数
β^+	以 τ 为自变量的横向最大振幅函数
γ	相对论因子
γ_s	同步粒子的相对论因子
Δ_N	无量纲的归一化的高频散焦参数
$\Delta_{r, f}$	高频场的径向散焦作用参数
ΔW_B	聚束器的能量调制参数
ΔW_c	非同步粒子经过一个加速单元的能量增益
$\Delta W_{c, r}$	非同步粒子经过一个加速单元的径向能量增益
$\Delta W_{c, s}$	同步粒子经过一个加速单元的能量增益
$(\Delta W)_m$	能量振荡振幅
$\Delta\beta$	非同步粒子与同步粒子的相对速度之差
$\Delta\varphi$	非同步粒子与同步粒子的相位差
$\Delta\varphi^{(0)}, \Delta\varphi_m^{(0)}$	分别为相振荡方程的零级近似解及其振幅
$ \Delta\varphi _{AC}$	纵向稳定区的相宽
$(\Delta\varphi)_m$	相振荡的相位振幅
$\Delta\epsilon_x$	束流在 (x, x') 相平面上的发射度变化
δ	δ 函数
δ	集肤深度
δ_B	四极透镜磁场梯度的相对误差
$\delta_e(t), \alpha(z)$	分别为轴上平均电场的振幅相对误差和相位相对误差
$\delta E_{0, z}$	轴上平均电场相对设计值的偏离
δf	单元频率相对腔的谐振频率偏离
δf	微扰体引起的频率偏离
$\delta\omega(z)$	单元误差导致的局部频偏
ϵ	介电常数
ϵ_0	真空中的介电常数
ϵ_A	束流在相平面上的运动不变量
ϵ_s	束流的发射度
ϵ_N	归一化发射度
$\epsilon_{r, m, i}$	束流的均方根发射度

ϵ_x	在 (x, x') 相平面上的束流发射度
ζ	均方根空间电荷线性力系数
η	四极磁透镜长度的相对误差
η	束流的纵向俘获效率
η_1	四极透镜分组后与分组前的长度之比
η_0	波导中介质的固有阻抗
θ^2	无量纲的归一化的磁透镜聚焦参数
θ	四极透镜相对腔轴的倾斜角误差
ϑ_i	粒子横向振荡的相角
λ	电磁波的波长
μ	导磁率
μ_0	真空中的导磁率
$\mu_{xc, 1}$	纵向空间电荷作用因子
μ_{xN}	无量纲的一个聚焦周期长度上横向振荡的相移量
μ_x	一个聚焦周期长度上横向振荡的相移量
ν_x	单位长度上横向振荡的相移量
$\xi_x(z)$	弗洛克函数的相角函数
ρ	腔壁或导线的电阻率
ρ_s	空间电荷密度
ρ_1	实验室坐标系中空间电荷密度
ρ_m	质心坐标系中空间电荷密度
σ	电导率
σ	发射度椭圆矩阵
$\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{21}, \sigma_{22}$	发射度椭圆矩阵的四个元素
σ_s	边缘发射度椭圆矩阵
σ_{rms}	均方根发射度椭圆矩阵
τ	以 β, λ 为单位的轴向座标自变量
τ	以高频周期为单位的无量纲的时间自变量
τ_n	第 n 个模式振荡振幅的衰减常数
Φ	磁通量
φ	高频场的相位
φ	相邻两单元间的相移
φ_c	束团中心到达加速间隙中心时所处的高频相位
φ_i	注入时粒子所处的高频相位
φ_s	同步粒子到达加速间隙中心时所处的高频相位
Ψ_m	磁标势
$\Psi_m(z)$	复磁势
ω	高频电磁场的角频率
ω_s	加速单元的谐振角频率

VIII

ω_b	通带的宽度
ω_c	耦合单元的谐振角频率
ω_{c_r}	波导的截止角频率
ω_q	第 q 个模式的谐振角频率
$\omega_0, \omega_{\pi/2}, \omega_\pi$	分别为 0 、 $\pi/2$ 、 π 模的振荡角频率
Ω_1	相振荡角频率
Ω_r	有阻尼时的电磁振荡角频率
$\Omega_x(z)$	横向运动方程的系数

有关实验室缩写索引

ANL	美国阿贡国立实验室
BNL	美国布鲁克海文国立实验室
CERN	欧洲原子核研究中心
Fermilab	美国费米实验室
KEK	日本高能物理实验室
LASL	美国洛斯·阿拉莫斯科学实验室
LBL	美国劳伦斯·伯克利实验室
LLL	美国劳伦斯·利文摩实验室
NEN	美国新英格兰核子公司

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 质子直线加速器与电子直线加速器的差别	2
§ 1.3 质子直线加速器发展简史	3
参考文献	5
第二章 加速腔的高频结构	6
§ 2.1 高频加速电场	6
2.1.1 行波加速电场	6
2.1.2 驻波加速电场	9
§ 2.2 质子直线加速器工作原理	11
§ 2.3 加速腔近轴区的场分布	13
2.3.1 E_z 表示式	13
2.3.2 E_r 表示式	15
2.3.3 H_θ 表示式	16
§ 2.4 加速腔高频结构的主要参量	17
2.4.1 分路阻抗 Z_s	17
2.4.2 渡越时间因子 T	17
2.4.3 有效分路阻抗 Z_{eff}	19
2.4.4 品质因子 Q	19
2.4.5 Z_s/Q	20
2.4.6 工作频率 f	20
§ 2.5 单周期加速单元链的特性	21
2.5.1 等效电路模拟	22
2.5.2 色散关系	24
2.5.3 带宽与模的间隔	26
2.5.4 正向波型通带与反向波型通带	26
2.5.5 各种模的有效分路阻抗	27
2.5.6 损耗引起电场的相移	28
2.5.7 工作模的选择	30
§ 2.6 双周期单元链的特性	31
2.6.1 双周期单元链的导出	31
2.6.2 双周期单元链的色散曲线	31
§ 2.7 加速腔的稳定结构	35
2.7.1 中速稳定结构	35
2.7.2 高速稳定结构	39
参考文献	42
第三章 加速腔的理论设计	44
§ 3.1 加速单元中场分布的数值计算	44

3.1.1	场方程表示式	44
3.1.2	边界条件	46
3.1.3	加速单元各电参量的计算	48
3.1.4	计算方法	51
3.1.5	关于计算精度	56
3.1.6	杆的影响	59
§ 3.2	加速单元横向尺寸的选择	59
§ 3.3	同步粒子的运动及加速单元链尺寸的计算	62
3.3.1	同步粒子的定义及其运动方程	62
3.3.2	同步粒子在一个加速单元中的能量增益	63
3.3.3	加速单元的长度表示式	64
3.3.4	加速间隙、漂移管长度及其安装位置的确定	66
3.3.5	计算加速单元链尺寸所需参量	67
3.3.6	计算步骤	69
	参考文献	69
第四章	纵向运动	70
§ 4.1	纵向运动方程	70
§ 4.2	纵向运动的稳定性	72
§ 4.3	纵向运动方程的解	76
§ 4.4	同步相位的选择	78
§ 4.5	轴上峰值平均电场 E_0 的选择	79
	参考文献	80
第五章	横向运动	81
§ 5.1	高频场的横向散焦作用	81
§ 5.2	四极透镜	82
5.2.1	四极电透镜与四极磁透镜	82
5.2.2	交变梯度聚焦系统	83
§ 5.3	横向运动方程	83
§ 5.4	横向运动方程的解	85
5.4.1	横向运动的转换矩阵	85
5.4.2	运动方程系数的周期化	86
5.4.3	弗洛克函数及其矩阵表示	87
5.4.4	弗洛克椭圆参数	90
§ 5.5	加速器的接受度	92
§ 5.6	稳定图	92
§ 5.7	聚焦系统的选择	94
§ 5.8	工作路线的选择	96
§ 5.9	束流的发射度	98
5.9.1	发射度及其矩阵表示	98
5.9.2	发射度椭圆沿加速器轴向的变化	99
5.9.3	归一化发射度与非归一化发射度	100

§ 5.10 束流的匹配	102
5.10.1 匹配概述	102
5.10.2 直线加速器的束流匹配	103
5.10.3 匹配点与弗洛克椭圆参数	104
参考文献	105
第六章 耦合运动	106
§ 6.1 引言	106
§ 6.2 横向与纵向之间的耦合运动	106
6.2.1 运动方程	106
6.2.2 耦合共振	108
6.2.3 横向归一化发射度的增长	109
§ 6.3 水平方向与垂直方向之间的耦合运动	110
6.3.1 四极透镜的边缘场	110
6.3.2 边缘场的耦合作用	111
6.3.3 边缘场引起的横向发射度的变化	112
参考文献	114
第七章 空间电荷效应	116
§ 7.1 引言	116
§ 7.2 束团模型与线性空间电荷力	117
§ 7.3 纵向空间电荷效应	119
§ 7.4 横向空间电荷效应	121
§ 7.5 极限流强	123
§ 7.6 横向归一化发射度的增长	125
§ 7.7 K-V方程与自洽解	126
7.7.1 自洽解应满足的方程组	126
7.7.2 四维相空间中的一种自洽解	128
§ 7.8 均方根包络方程与均方根发射度	132
7.8.1 均方根方法概述	132
7.8.2 均方根包络方程	133
7.8.3 均方根发射度	137
7.8.4 均方根值与边缘值之间的关系	139
参考文献	142
第八章 瞬态耦合效应与束流负载效应	143
§ 8.1 引言	143
§ 8.2 谐振腔的强迫振荡方程	143
§ 8.3 损耗的影响	146
§ 8.4 加速腔与功率馈送系统的耦合效应	151
§ 8.5 束流负载效应	155
8.5.1 束流感应的场	155
8.5.2 束流负载的影响	160

8.5.3 前馈补偿	161
8.5.4 克服束流负载效应的改进措施	162
参考文献	163
第九章 稳态误差扰动	164
§ 9.1 引言	164
§ 9.2 加速单元的频率误差	164
§ 9.3 加速腔的失谐	168
§ 9.4 透镜横向位移误差	169
§ 9.5 透镜倾斜误差	171
§ 9.6 透镜绕纵轴旋转误差	172
§ 9.7 透镜磁场梯度误差	174
§ 9.8 透镜长度误差	175
§ 9.9 加速电场误差	175
参考文献	176
第十章 加速器主体设备	177
§ 10.1 引言	177
§ 10.2 注入器	177
10.2.1 高压发生器	178
10.2.2 加速管	178
10.2.3 离子源	180
§ 10.3 低能束流输运系统	182
10.3.1 概述	182
10.3.2 聚束原理与聚束器	183
10.3.3 静电切束器	188
10.3.4 导向线圈	189
§ 10.4 加速腔系统	190
10.4.1 概述	190
10.4.2 加速腔体	190
10.4.3 漂移管	193
10.4.4 高频场的调整与测量	194
§ 10.5 四极磁透镜	198
10.5.1 磁场谐波分析	198
10.5.2 透镜的极面形状	200
10.5.3 透镜的安匝数与功耗	202
10.5.4 等长度的透镜组	203
10.5.5 四极透镜的制造	203
10.5.6 四极透镜的磁场测量	204
§ 10.6 高频功率源	210
10.6.1 概述	210
10.6.2 主通道	211
10.6.3 调制器	212

10.6.4	快速保护	212
10.6.5	馈电系统	213
10.6.6	频率、幅度及相位控制环	214
§ 10.7	束流测量	216
10.7.1	概述	216
10.7.2	束流强度的测量	218
10.7.3	束流截面的测量	219
10.7.4	发射度测量	223
10.7.5	动量与动量散度的测量	224
	参考文献	226
第十一章	现状与发展趋势	226
§ 11.1	现状与实例	226
11.1.1	现状概述	226
11.1.2	BNL与Fermilab的200兆电子伏直线加速器	229
11.1.3	LASL的800兆电子伏直线加速器	230
11.1.4	CERN的新50兆电子伏直线加速器	231
11.1.5	美国NEN(新英格兰核子公司)的45兆电子伏质子直线加速器	232
11.1.6	北京35兆电子伏质子直线加速器	234
§ 11.2	直线加速器现存的几个问题	235
§ 11.3	RFQ加速器	235
11.3.1	概述	236
11.3.2	RFQ近轴区的电场表达式	240
11.3.3	带电粒子在RFQ中的运动	243
11.3.4	关于RFQ的设计	245
§ 11.4	交变相位聚焦结构	248
§ 11.5	永磁透镜	250
	参考文献	252
第十二章	质子直线加速器的应用	252
§ 12.1	放射治疗与医用同位素生产	254
§ 12.2	裂变材料增殖	256
§ 12.3	材料的中子辐照损伤的研究	257
	参考文献	