

离线轴对称耦合腔结构小型驻波 电子直线加速器的设计

周 立 农

(中国科学院高能物理研究所)

关键词 离线轴对称箭形截面耦合腔, 尺寸, 动力学计算, 参数。

一、前 言

单位长度上对带电粒子的最大可能的加速能力是直线加速器应用的一个最重要的指标。边耦合驻波加速结构具有高分路阻抗、高稳定性等一系列优点。我们知道, 低能行波型电子直线加速器, 采用射频反馈或小的耦合孔方法固然能减小加速器体积。但前者使系统复杂化; 而后者将使束流通过增加困难。近十年来, 有关边耦合腔结构驻波电子直线加速器国内外有不少报道^[1-4]。然而, 他们都是使用加载耦合腔, 谐振频率对加载部份尺寸非常敏感。本文讨论的 $\pi/2$ 模双周期驻波加速器是采用不加载的箭形截面不“在线”轴对称耦合腔^[5]。不加载的耦合腔进一步放松了加工公差要求。

下面将具体讨论一台输出能量 4 MeV 和束流 100 mA 的加速器的设计、腔形状和尺寸的选择、粒子动力学的计算等结果。

二、腔形状和尺寸的选择

腔形状和尺寸的选择都是为得到高的分路阻抗, 即在工作频率上具有最佳化的腔型。为了使加速器稳定工作, 工作模式即 $\pi/2$ 模与最邻近的模式要有足够宽的间隔。本设计取加速腔与耦合腔间的耦合系数 k_1 为 2%, 那样的选择满足模式间隔和高分路阻抗的要求。一旦确定了加速器的工作频率, 腔的设计频率有几种方法可供选择: 无耦合孔腔频率等于加速器工作频率; 或等于对 k_1 、 k_2 (加速腔间耦合系数) 及 k_3 (耦合腔间耦合系数) 作修正后的 $\pi/2$ 模的频率; 及取前两种的折衷值。本文为了使腔具有最优化而选择第二种方法。故无耦合孔时腔 (加速腔和耦合腔) 设计的固有频率应较加速器的工作频率为大。

由双周期耦合腔列色散方程^[6]可得:

$$\begin{cases} f_1 = f_{\pi/2}(1-k_2)^{1/2}, \\ f_2 = f_{\pi/2}(1-k_3)^{1/2}. \end{cases} \quad (1)$$

式中 f_1 和 f_2 分别为无耦合孔时加速腔和耦合腔的固有频率即设计的腔频率, $f_{\pi/2}$ 为对 k_1 作修正的 $\pi/2$ 模频率。故计及 k_1 、 k_2 和 k_3 的影响^[5,7]并作修正由 (1) 式得设计的加速腔频率 (f_1) 和耦合腔频率 (f_2)。加速腔和耦合腔的部份尺寸是根据文献^[3, 5]按波长比例关系确定的。最后确定的腔形状和尺寸示于图 1 (a)。试验腔的测量是在 $\beta=1$ 中完成的 (β 为粒子相对于光速 c 的速度值)。耦合孔面积取 200 mm²。测得的加速腔轴向电

场分布示于图 1(b)。由电场空间 Fourier 分析即 $E(z) = \sum b_n \sin \frac{n\pi z}{d}$ 给出系数: $b_1 = 29.65$, $b_3 = 2.10$, $b_5 = -2.65$, $b_7 = -1.73$ 。式中 d 为腔的周期长度。实测的轴向场分布为下面粒子动力学计算提供数据。

三、聚束腔的计算

一旦腔形状被确定,为了得到好的捕获率和电子束能谱,我们将通过电子计算机对电子运动进行详细计算来确定加速腔间隙长度或漂移管长度。电子运动方程可写为^[8]:

$$\omega \frac{d m v}{d \theta} = e E(z) \cos(\theta + \theta_0). \quad (2)$$

式中 m , v 及 e 分别为电子的质量、速度及电荷; θ 为电子相对于波的相位; θ_0 为电子的初始位相; ω 为射频源的角频率; $E(z)$ 为沿轴 z 的电场分布。为简便,假定聚束腔中场分布类似于图 1(b) 的规则段 ($\beta=1$) 和沿轴场分布的 E_0 为峰值场。积分式(2)得电子相对于光速 c 的速度 β 为:

$$\beta = \frac{\frac{e E_0}{m_0 c^2} \cdot \frac{\lambda}{2 \pi} [\sin(\theta + \theta_0) - \sin \theta_0] + \frac{\beta_0}{\sqrt{1 - \beta_0^2}}}{\sqrt{1 + \left\{ \frac{e E_0}{m_0 c^2} \cdot \frac{\lambda}{2 \pi} [\sin(\theta + \theta_0) - \sin \theta_0] + \frac{\beta_0}{\sqrt{1 - \beta_0^2}} \right\}^2}}. \quad (3)$$

式中 $m_0 c^2$ 为电子静止能量; β_0 为电子相对于光速的始速度; λ 为自由空间波长。又据式

$$\frac{2}{\lambda} \pi z = \int_{\theta_0}^{\theta} \beta d\theta \quad (4)$$

和

$$V = m_0 c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (5)$$

则得各相位角上的电子能量。由式(4)得电子在漂移管内的相移 $\Delta\theta = \omega D / c \beta$ (式中 c

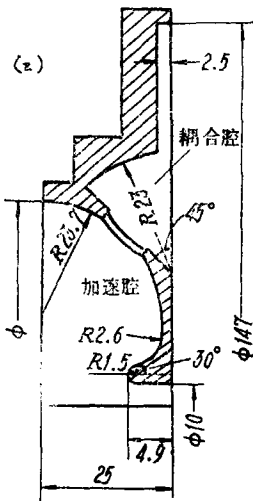


图 1 (a) 加速腔和耦合腔形状和尺寸 ($\beta=1$)
(b) 加速腔轴上电场 E_z 分布

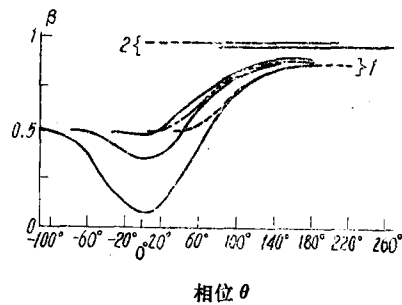
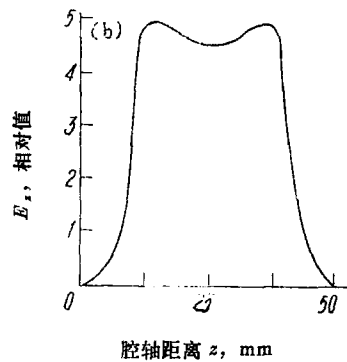


图 2 在第 1 腔(线簇 1) 和第 7 腔(线簇 2) 出口处的电子速度 β 与相位 θ 的关系

$P_0 = 1.5 \text{ MW}$; $V_{1,2} = 80 \text{ kV}$ 。

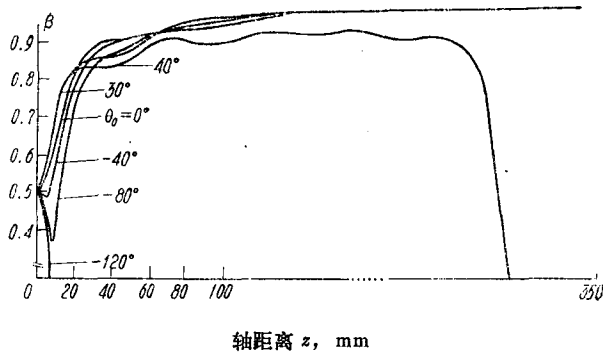


图 3 电子速度 β 随结构轴距离 z 的变化曲线
 $P_0=1.5 \text{ MW}$; $V_{in,1}=80 \text{ kV}$ 。

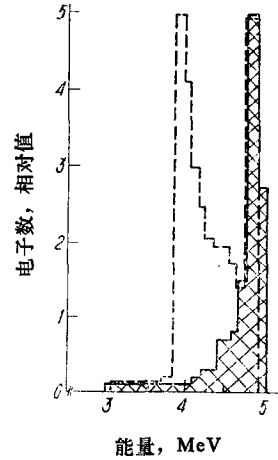


图 4 没有考虑束流时的计算能谱
 $P_0=1.5 \text{ MW}$; $V_{in,1}=80 \text{ kV}$ 。

为光速, D 为漂移管长度)。 $\Delta\theta$ 即为在下一个间隙入口处电子的位相。重复使用上面各式, 可得整个加速器出口处粒子的相位和速度(或能量)。

电子运动更详细的情形将由电子计算机对式 (3)、(4) 及 (5) 详细的迭代计算来确定。此时轴向电场分布 $E(z)$ 是轴距离 z 的函数, 即 $E(z) = \sum b_n \sin \frac{n\pi z}{d}, n=0, 1, 2, \dots$ 。对于输入功率 $P_0=1.8 \text{ MW}$ 和腔列单位长度有效分路阻抗 $ZT^2 \approx 80 \text{ M}\Omega/\text{m}$ 来说, 在无束流负载时, 若要得到 5 MeV 输出能量, 至少需要五个规则段的加速腔。因此对电子注入条件 $V_{in,1}=80 \text{ kV} (\beta_0=0.5)$, 由计算结果表明, 选择 $\beta_1=0.8$ 和 $\beta_2=0.95$ 的两个聚束腔和五个加速腔组成的加速器具有满意的聚束特性。这里需要说明, 我们选择 80 kV 的注入条件是由于已经有这样的电子枪了, 不然更理想的设计应是低电压注入为宜。下面将给出计算结果。

图 2 表示第 1 腔和第 7 腔出口处电子速度 β 与相位 θ 间的关系曲线。整个结构中电子速度 β 随轴向距离 z 的变化曲线示于图 3。可见, 初始速度 $\beta_0=0.5$ 的电子, 在第一腔出口处被捕获的电子, 其速度达到 $\beta=0.85 \sim 0.90$, 而在第二腔的出口处为 $\beta=0.9 \sim 0.97$, 这种关系即便各电子的初始相位 θ_0 非常不同 ($-110^\circ \sim +40^\circ$), 其速度之相差也是很小的。由图知道, 虽然第 1 个加速腔内丢失的电子数目相当多 (达 50%), 但在 $\beta=1$ 的加速腔内却很少丢失。图 4 表示在没有考虑束流负载下的能谱。计算表明, 当输入功率 $P_0=1 \sim 2 \text{ MW}$ 时, 具有好的能谱和捕获率。 $P_0=1.3 \sim 1.5 \text{ MW}$ 时, 俘获率约为 38%; 当 $P_0=1.8 \sim 2 \text{ MW}$ 时, 俘获率提高至 $\sim 42\%$ 。为了比较, 图 4 中同时也给出了 $\beta_1=0.65$ 和 $\beta_2=0.85$ 所组成聚束段的加速器能谱 (虚线), 显然, 其能谱情况变坏。图 5 给出了在各腔出口处的相位能量分布。考虑到对于 100 mA 的输出束流负载下的束流功率 (约 $0.3 \sim 0.4 \text{ MW}$), 对于进入加速结构的功率 $P_0=1.8 \text{ MW}$, 其标准状态, 即输出束流为 100 mA 的工作状态相当于没有束流的空载时的输入功率 $P_0=1.5 \text{ MW}$ 时的工作状态。

四、馈电波导与加速结构的耦合

由 6 个耦合腔和 7 个加速腔 (其中 2 个为聚束腔) 组成的加速结构的示意图示于图 6

(a), 图 6(b) 为加速结构沿轴向 z 的电场分布。RF 功率借助于渐变馈电波导经位于加速结构中心部位加速腔外缘的耦合孔向结构馈入。耦合孔所引起的频率变化可由稍微改变加速腔的鼻圆锥来补偿。结构的工作频率由切削加速腔鼻圆锥或稍微改变相邻腔间的耦合孔面积来得到。可见, 试验腔是不可避免的。

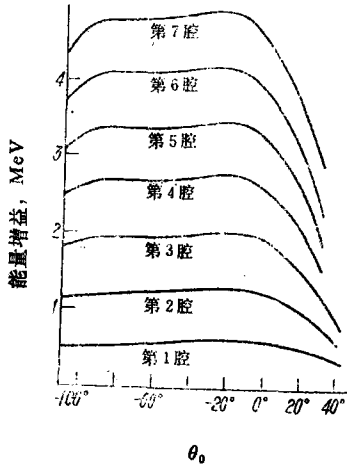


图 5 各腔出口处计算的
能量相位分布

$l_1=40\text{ mm}; l_2=47.5\text{ mm}; l_3=\dots=l_7=50\text{ mm}; P_0=1.5\text{ MW}; V_{\text{inj}}=80\text{ kV}$

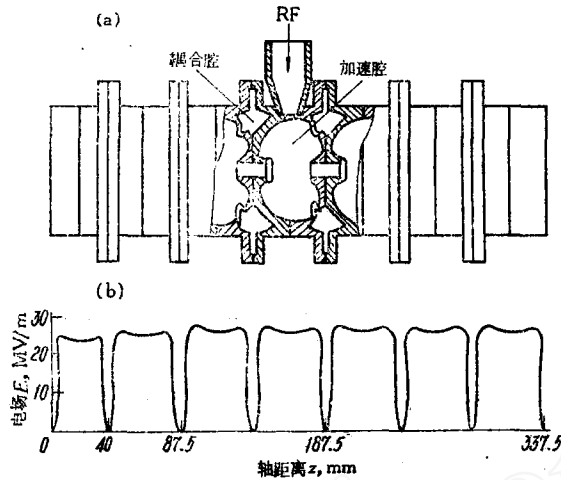


图 6 由 7 个加速腔和 6 个耦合腔及馈电波导组成的
加速结构的示意图(a)和它的电场分布

考虑到束负载效应, 为了使电子能量得到最大增益, 要求馈电波导与加速结构间具有最佳的耦合系数 $K_{opt}^{[9]}$, 此时返回源的功率最小:

$$V = \frac{1}{1+K} \left[2\sqrt{KP_0 ZT^2 L} \cdot \cos\varphi - I_b ZT^2 L \cos^2\varphi \right] \cdot \left[1 - e^{-\frac{\omega l}{2Q_L}} \right], \quad (6)$$

$$K_{opt} = \left[\frac{I_b \cos\varphi \sqrt{ZT^2 L}}{P_0} + \sqrt{1 + \frac{I_b^2 ZT^2 L \cos^2\varphi}{4P_0}} \right]^2. \quad (7)$$

式中 K 为馈电波导与结构间的耦合系数, ZT^2 为加速结构单位长度的有效分路阻抗; I_b 为束流强度; ω 为工作角频率; Q_L 为加速结的负载 Q 。对于 $I_b=100\text{ mA}$ 和 $\cos\varphi \approx 0.7$ 使用的加速器, 由式可得本设计的最佳耦合系数即 $K_{opt}=1.40$ 。

本设计的主要参数汇总如下:

- (1) 输出能量为 4.5 MeV; 输出脉冲束流为 100 mA。
- (2) 加速结构。加速结构形式为箭形截面不“在线”轴对称耦合腔结构, 加速腔数目: 7 个; 耦合腔数目: 6 个; 总长度: 337 mm。
- (3) 射频源。型号, 磁控管 (776 厂国产 158 型); 频率, $2998 \pm 4\text{ MHz}$; 功率, 2 MW; 脉冲宽度, $2\text{ }\mu\text{s}$ 。
- (4) 平均峰值加速场强, 27 MV/m; 注入电压, 80 kV; 俘获率, 38%; 耦合系数 $K_{opt}=1.4$ 。

本设计的加速器现正在中国科学院高能物理研究所制造中。为了进一步简化加工和缩小加速结构的横向尺寸, 我们将同时采用别种形式的环耦合腔的结构^[10]。

本工作得到谢家馨先生的指导。感谢清华大学林郁正老师和冯嘉年同志的帮助和有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] K. Whitham, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-18 (3), 542(1971).
- [2] K. Irie et al., *Jap. J. Appl. Phys.*, 12, 277(1973).
- [3] 姚充国等, 原子能科学技术, 3, 212(1978).
- [4] 林郁正等, 高梯度电子直线加速器的设计, 北京医疗研究所、清华大学内部资料, 1979年。
- [5] 周立农等, 高能物理与核物理, 3, 165(1979)
- [6] D. E. Nagle et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 38, 1583(1967).
- [7] 周立农, 原子能科学技术, 4, 440(1981).
- [8] P. D. Coleman, *J. Appl. Phys.*, 28, 927(1957).
- [9] 小野勝弘, 东芝レビユ, 11, 98(1974).
- [10] 周立农, 粒子加速器 (1979年全国加速器技术交流会论文选集), 1980年, 158页。

(编辑部收到日期: 1981年9月4日)

串列加速器电晕针稳压系统模拟实验研究

伍玉敏 王大椿 于蕴峰

关键词 线性放大, 对数放大, 束流强度, 稳定度。

一、前 言

串列加速器加速的粒子种类繁多, 束流强度变化很大(可相差五、六个量级), 而能量稳定度可达万分之几。这主要是由于电晕针稳压系统用对数放大代替了静电加速器电晕针稳压系统的线性放大, 克服了误差信号与束流强度有关的缺点, 大大地压缩了动态范围。该系统结构简单、操作方便, 特别在加速各种重粒子、弱束流情况下对能量稳定有很大意义。因而对串列加速器电晕针稳压系统进行研究是必要的。但串列加速器尚未建成, 故在 $\Theta\Gamma-2.5$ 静电加速器上作模拟实验研究, 并为 $\Theta\Gamma-2.5$ 静电加速器在小束流下稳定运行提供条件。

二、工 作 原 理

$\Theta\Gamma-2.5$ 静电加速器电晕针稳压系统采用对数放大器, 其工作原理如图1所示。

在正常情况下, 当磁分析器的磁场强度不变时, 被加速的粒子经过加速管、磁分析器和缝隙仪, 一直打到靶上。若由于某种原因, 发生器的高压发生变化时, 则高于所需能量的粒子流打到缝隙仪的下板上; 反之, 则打到上板上。利用打到缝隙仪上的信号, 经过对数差分放大, 最后控制电晕针电位, 使电晕电流增加或减少, 从而使发生器的高压稳定在初始值。

所谓对数差分放大, 就是利用二极管PN结所呈现的指数关系, 用于运算放大器负反馈回路, 构成对数放大器, 其输出电压等于输入电流(电压)的对数:

$$V_{出} = \ln I_{入}.$$