

驻波电子直线加速器的设计

宋忠恒 王晓敏
(中国原子能科学研究院)

本文给出了从L带到X带四个微波波段的驻波电子直线加速器工程计算的主要数据,可作为工程设计的基础。

关键词: 边耦合腔 稳定态 贮能态

电子直线加速器分行波和驻波两种类型。驻波电子直线加速器一般都采用谐振腔作为加速节,所用功率源的微波按频率可分为四个波段,即L、S、C和X带,频率范围分别为390—1550、1550—5200、3900—6200和5200—11000MHz。实际上C带包括了与其相邻的S带上面的两个边带,以及与其相邻的X带下面的三个边带。

由于应用的需要以及微波元器件、精加工和高真空技术的发展,即使象X波段的微型腔在工程上也已实现。目前,在这四个微波波段范围都有加速器在为科研和生产服务^[1-4]。本文将以前较多采用的边耦合腔结构为例,分别给出四个加速器的物理设计实例。这类结构的微波场是 $\pi/2$ 模,但束流感受到的场仍是 π 模。

一、谐振腔的理论计算

在如图1所示的圆柱形谐振腔里,可用作加速的场是横磁 TM_{010} 波,具有三个非零的电磁场分量,即 H_θ 、 E_r 和 E_z 。先对其中的一个分量所满足的波方程求解,然后利用它们之间的关系求出其它分量。这种复杂形状的腔不可能有满意的分析解,只有通过电子计算机作数值计算。

数值计算首先要建立所解问题的波方程的有限差分方程组,可用四边形网格法^[5]或三角形网格法^[6]。这两种方法都满足本问题的要求。

谐振腔的优劣直接关系着加速器的质量,因为微波场的性能决定于加速腔的设计,而谐振腔单位长度上的有效分路阻抗 ZT^2/L 是衡量腔的加速效应的重要参数,其关系式是

$$ZT^2/L = (\Delta\epsilon)^2/P_s \cdot L \quad (1)$$

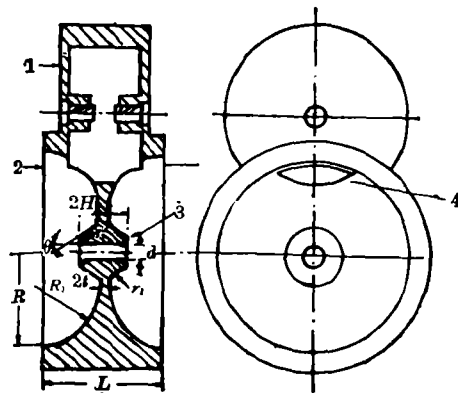


图1 边耦合腔结构示意图

1. 耦合腔 2. 加速腔 3. 鼻锥 4. 耦合孔

Fig. 1 Cross section of a side-coupled accelerating structure

1. Coupling cavity 2. Accelerating cavity
3. Nose cone 4. Coupling hole

式中, Z 为腔的分路阻抗; T 为渡越因子; L 为谐振腔的长度; Δe 为电子通过谐振腔时获得的能量增益; P_s 为谐振腔内表面的功率损耗。

由于谐振腔工作在很高的场强下, 提高加速场的梯度将受到腔的表面电场击穿的限制, 所以, 腔的表面上最大场强 E_{ch} 与轴上平均场强 E_0 的比 A 不能太大。另外, 腔的几何形状直接影响加速器的性能, 由于受工艺条件等因素的限制, 在实际设计时要根据各方面的可能性作综合考虑后作最佳选择。

作为实例, 现将四个波段的加速腔的几何参数和电磁特性参数列于表 1 和表 2。

表1 加速腔的几何尺寸

Table 1 Geometry of the accelerating cavity (see Fig.1)

波段 f(MHz) Wave band	t(cm)	H(cm)	d/2(cm)	r(cm)	r ₁ (cm)	R ₁ (cm)	L(cm)
1300	0.6	2.4	1.0	0.4	0.9	4.5	11.5
2998	0.36	0.9	0.5	0.2	0.4	1.94	5.0
4998	0.3	0.75	0.35	0.15	0.25	1.10	3.0
9300	0.18	0.4	0.25	0.1	0.2	0.6	1.6

表2 加速腔的特性参数

Table 2 Character parameters of the accelerating cavity

波段 f(MHz) Wave band	P_s^* (MW) ($\times 10^{-5}$)	Z (M Ω)	Z/L (M Ω /m)	T	ZT^2 (M Ω)	ZT^2/L (M Ω /m)	Q	ZT^2/LQ (M Ω /m) ($\times 10^3$)	A	t_f (μ s)
1300	1.7	11.371	98.881	0.827	7.771	67.571	26435	2.556	4.23	3.23
2998	0.5362	6.966	139.317	0.818	4.656	93.125	17295	5.385	3.64	0.918
4998	0.36	4.316	143.864	0.756	2.470	82.363	12525	6.572	2.85	0.399
9300	0.144	2.698	168.601	0.809	1.764	110.27	8341	13.22	3.15	0.143

* 按 1MV/m 归一化的值

二、加速腔的载束性能

加速腔的载束性能在文献[7]已作了详细讨论, 现根据实际需要简述如下。

从能量增益方程, 可求得加速腔能驱动的最大电流为

$$\begin{cases} I_{\max} = 2(P_0 \beta_c / ZT^2)^{1/2} & (\text{稳定态}) \\ (It)_{\max} = 2t_f(P_0 \beta_c / ZT^2)^{1/2} & (\text{贮能态}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, t_f 为建场时间; β_c 为耦合系数。

在其它参数一定时, 从能量增益的角度看一定有一个最佳分路阻抗。将能量增益方程对分路阻抗求极值, 得

$$\begin{cases} I = \frac{1}{2} I_{\max} & (\text{稳定态}) \\ It = \frac{1}{2} (It)_{\max} & (\text{贮能态}) \end{cases} \quad (3)$$

谐振腔的束流负载因子是

$$\begin{cases} B_f = -[1/(1 + \beta_c)] ZT^2 & (\text{稳定态}) \\ B_f = -[1/(1 + \beta_c)] (ZT^2/t_f) & (\text{贮能态}) \end{cases} \quad (4)$$

这说明谐振腔的分路阻抗越大,束流负载因子越大,即束流负载导致能量增益的减小越大。对贮能态来说,束流负载是束团电量的效应,而稳定态是指束流强度。

对高频束流转换效率而言,稳定态是指高频功率到束流功率的转换,贮能态是高频能量到束流能量的转换。由定义可得

$$\begin{cases} \eta = \frac{2}{1+\beta_c} \left(\frac{ZT^2\beta_c}{P_0} \right)^{1/2} I \left[1 - \frac{I}{2} \left(\frac{ZT^2}{P_0\beta_c} \right)^{1/2} \right] & (\text{稳定态}) \\ \eta = \frac{2}{1+\beta_c} \left(\frac{ZT^2\beta_c}{P_0} \right)^{1/2} \frac{I_t}{t_f} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{ZT^2}{P_0\beta_c} \right)^{1/2} \frac{I_t}{t_f} \right] & (\text{贮能态}) \end{cases} \quad (5)$$

将(5)式对 ZT^2 或对 I 取极值,都可得与(3)式相同的表达式。将(3)代入(5)式得谐振腔的最大高频束流转换效率:

$$\eta_{\max} = \beta_c / (1 + \beta_c) \quad (6)$$

能量增益最大时的耦合系数是

$$\begin{cases} \beta_{opt} = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{ZT^2}{P_0} \right)^{1/2} + \left(1 + \frac{1}{4} \frac{I^2 ZT^2}{P_0} \right)^{1/2} \right]^2 & (\text{稳定态}) \\ \beta_{opt} = \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{ZT^2}{P_0} \right)^{1/2} \frac{I_t}{t_f} + \left[1 + \frac{1}{4} \frac{ZT^2}{P_0} \left(\frac{I_t}{t_f} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^2 & (\text{贮能态}) \end{cases} \quad (7)$$

因为加速器总是载束运行,故要求 β_c 大于 1。

四个波段的加速腔的主要载束性能列于表 3。

表 3 加速腔的载束性能

Table 3 Characteristics of the accelerating cavity with electron beam

波段 f (MHz) Wave band	状态 State	ΔW (MV)	$I_{\max}, Q_{\max}$ (A), (μ C)	I_{opt}, Q_{opt} (A) (μ C)	η (%)
1300	稳定态 Steady state	$-3.886 \times I$	$0.717 \times P_0^{1/2}$	$0.359 \times P_0^{1/2}$	45(0.2A, 1MW)
	贮能态 Storage state	$-1.203 \times 10^{-3} \times (I t)$	$2.317 \times P_0^{1/2}$	$1.159 \times P_0^{1/2}$	12(50A, 3ns, 1MW)
2998	稳定态 Steady state	$-2.382 \times I$	$0.927 \times P_0^{1/2}$	$0.464 \times P_0^{1/2}$	26(0.1A, 0.5MW)
	贮能态 Storage state	$-2.536 \times 10^{-3} \times (I t)$	$1.203 \times P_0^{1/2}$	$0.602 \times P_0^{1/2}$	22(50A, 3ns, 0.5MW)
4998	稳定态 Steady state	$-1.235 \times I$	$1.723 \times P_0^{1/2}$	$0.862 \times P_0^{1/2}$	29(0.05A, 0.05MW)
9300	稳定态 Steady state	$-0.882 \times I$	$0.506 \times P_0^{1/2}$	$0.253 \times P_0^{1/2}$	22(0.03A, 0.03MW)

表 3 中所有量取实用单位制。由上表可以得到加速器各参数的具体数据。现分述如下:

对 L 带电子直线加速器,若取六腔结构,即相速为 0.7 和 0.9 的聚束腔各一个加上四个加速腔。若要求四个腔将稳态 0.2A 的束流加速到大约 8MeV,则轴上的平均场强需 20MV/m;根据计算,这时气隙中心轴上的最大场强约 38MV/m。若输入功率为 5MW,通过该加速器可将稳态 0.2A 或贮能态 50A, 3ns 的脉冲束流加速到 7MeV 或 10MeV。这台加速器的有效长度是 64.4cm。

对 S 带电子直线加速器,仍取上述六腔结构。若要求粒子通过四个加速腔获得 4MeV 的能量,则要求轴上的平均场强为 20MV/m;根据计算,这时气隙中心轴上的最大场强约 34MV/m。

若输入功率 1.8MW, 可将稳态 0.1A 或贮能态 25A, 3ns 的束流加速到约 4.5MeV。这台加速器的有效长度为 28.25cm。

对 C 带电子直线加速器, 采用由 12 个腔组成的结构, 即相速为 0.5 和 0.75 的两个聚束腔和 10 个加速腔。这种加速器小巧, 一般工作在稳定工作状态。若要求粒子通过 10 个腔获得 2MeV 以上的能量, 则要求轴上的平均场强为 15MV/m, 这时气隙中心轴上的最大场强约 30MV/m。若输入功率为 1MW, 可将 0.05A 的束流加速到 2—4MeV。这个加速器的有效长度为 32.25cm。

对 X 带电子直线加速器, 采用由 14 个腔组成的结构, 即相速为 0.5 和 0.75 的聚束腔各 2 个以及 10 个加速腔。若要求粒子通过 10 个加速腔获得大于 2MeV 的能量, 则要求轴上平均场强为 15MV/m, 这时气隙中心轴上的最大场强约 30MV/m。若输入功率为 1MW, 可将 0.03A 的束流加速到额定能量。这台加速器的有效长度为 20cm。

三、粒子动力学计算

本文意在给出四个微波波段各加速器的性能参数, 为了不失一般性, 以稳态为基点, 即在研究束流的纵向运动时不考虑束流效应, 在解横向包络线方程时空间电荷取长柱模型。这样, 在驻波电子直线加速器中, 粒子运动的动力学方程组为

$$\begin{cases} \frac{d\gamma}{dZ} = -\frac{eE_z(r, Z)}{m_0 C^2} \sin\varphi \\ \frac{d\varphi}{dZ} = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\gamma}{(\gamma^2 - 1)^{1/2}} \\ \frac{d^2 R}{dZ^2} + \frac{1}{\beta^2} \frac{d}{dZ} (\ln\gamma) \frac{dR}{dZ} + \frac{1}{\gamma\beta} N(r, Z) R - \frac{V_0^2}{\pi^2 \gamma^2 \beta^2 R^3} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $N(r, Z) = \frac{B_z^2}{4\gamma\beta} - \frac{1}{m_0 C^2 \beta} \frac{eI}{2\pi\epsilon_0 C \beta^2 \gamma^2 R^2} - \frac{e}{m_0 C^2 \beta} \cdot \frac{1}{2} [E_r(r, Z) \sin\varphi + \beta H_\theta(r, Z) \cos\varphi]$;

V_0 是粒子的初始横向发射度; γ 是粒子运动的相对论因子; φ 是微波场的相位; $B_z = eB_z/m_0 C$ 是归一化磁感应强度; e 和 m_0 分别为电子的电量和静止质量; I 是脉冲束流。

根据变步长龙格-库塔法编制了计算机程序来求解此方程组。该程序可同时给出所需的各种数据曲线。四个波段的电子直线加速器都据此作了束流动力学计算机模拟。

对于一个 X 波段驻波电子直线加速器, 若电子枪电压为 20kV, 注入电流为 0.2A, 束流的初始横向相面积为 $0.001m_0 C\text{-cm}$ 。计算结果如图 2 所示。

可以看出, 在没有外加磁场的条件下, 其俘获效率大约为 15%。在 20mA 的范围内, 能散度小于 2%, 束流的横截面半径为 1.25mm。

从对四个波段驻波电子直线加速器的粒子动力学计算知, 驻波型电子直线加速器加速场的某些相位具有径向聚焦力, 所以, 即使没有外加磁场, 只要注入束流的性能不是太坏, 仍可将一部分束流加速到额定能量。若要提高俘获效率, 必须外加聚焦磁场, 因为即使束流纵向性能很好, 并且有一部分相位的粒子受到微波场径向聚焦力的作用, 但是在其它相位上的粒子受到的是径向散焦力, 在没有外加磁聚焦时将会丢失。

四个微波波段的电子直线加速器各具特点。L 带和 S 带加速器可以实现强流加速, 但必须附加外聚焦磁场, 它们都可以工作在稳定态和贮能态, 都可以驱动较大的脉冲束流。C 带和 X 带加速器很小巧, 但工艺难度大, 束流较弱。这四个波段的加速器在工程上都已实现。

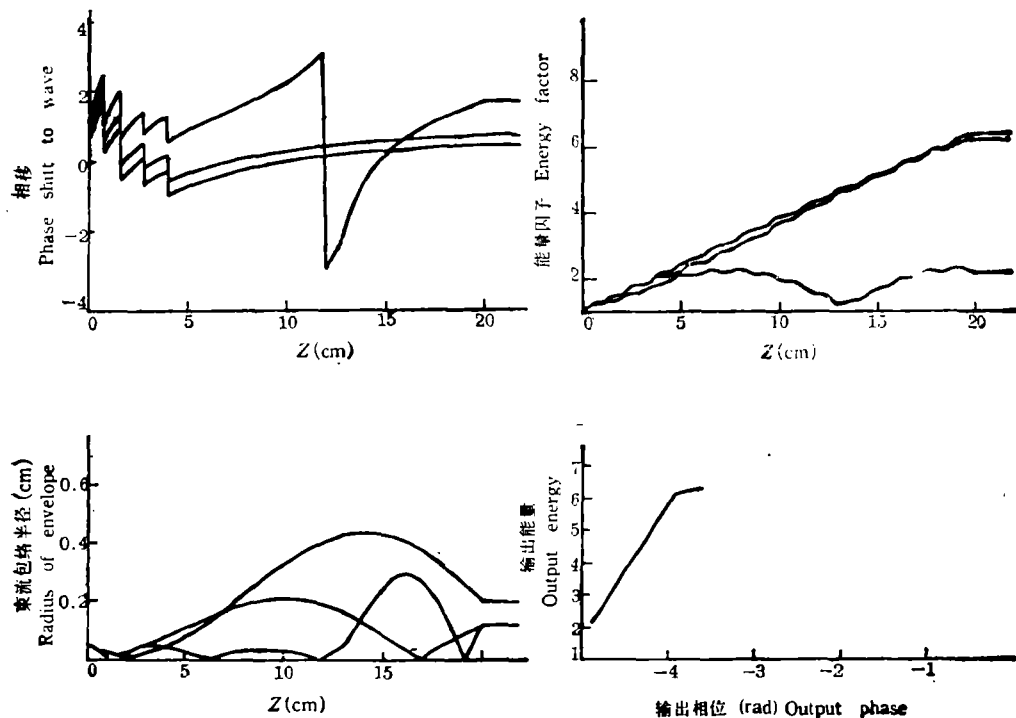


图2 X波段加速器的计算曲线

Fig. 2 Calculation curve of the X band electron linac

参 考 文 献

- [1] William E. Stein et al., *J. Quant. Electronics*, 21 (1985), 7:889.
- [2] Katsuhiko Ono et al., *Particle Accelerators*, 5 (1973), 207.
- [3] J. S. Fraser, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 26 (1979), 1(part. 2): 1435.
- [4] R. G. Schouberg et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 32 (1985), 5:3234.
- [5] Walter F. Rich, LA4219 (1969).
- [6] K. Halbach et al., *Particle Accelerators*, 7(1976), 213.
- [7] 朱忠恒, 核技术, 12(1989), 7:400.

Data for design of standing wave type electron linacs

Song Zhongheng Wang Xiaomin

(Institute of Atomic Energy of China)

Abstract

The main data for engineering calculation of designing S.W. electron linacs of four wave-bands (from L-band to X-band) are given in this paper. It can be used as a basis of engineering design.

Keywords: Side coupled cavity Steady state Storage energy state

(1989年2月13日收到)