

正电子直线加速器俘获节加速场 梯度对俘获率的影响

罗应雄 周述

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

关键词 俘获节, 加速场梯度, 匹配段, 相宽, 能散度。

一、引言

在正电子直线加速器中, 正电子在靶上生成, 经过一段匹配段, 进入加速管。通常称这根加速管为俘获节。俘获节的加速场梯度如何影响正电子的俘获率, 是在加速器设计和运行过程中很感兴趣的一个问题。所谓俘获, 指的是, 粒子在横向不碰到系统管壁, 在纵向聚到一定相位范围, 且在俘获节末端的能散度不超过某个限度。这样, 正电子在以后的加速过程中, 一定相宽内粒子数的多少将决定最终束流能谱的好坏。

正电子直线加速器有两种工作模式: 一种是正电子在俘获节中先减速, 经过聚束, 再加速(以下简称模式1); 另一种是直接加速(以下简称模式2)。在加速场梯度不太高的情况下, 模式1明显优于模式2, 这已为实验和理论计算所证明^[1]。

BEPC正电子直线加速器工作在模式1。1990年6月, 曾测出一条试验曲线, 见图1。从这条曲线似乎可得出结论: 俘获节输入功率 P (场梯度 $E_0 \propto \sqrt{P}$)增加到一定水平后, 正电子的俘获呈饱和状态。换言之, 再增加输入功率并不能提高正电子流强。对BEPC来

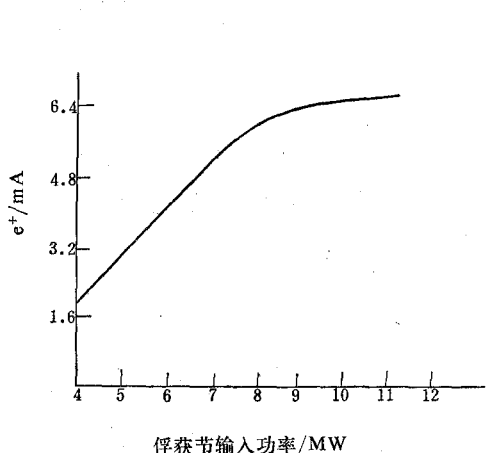


图1 BEPC俘获节输入功率与 e^+ 流强的关系

Fig. 1 e^+ current versus input power of the capture section of the BEPC

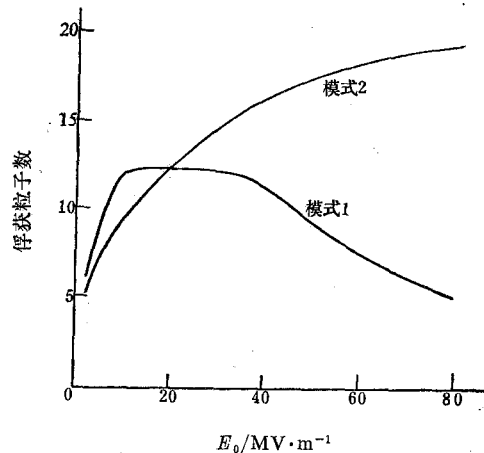


图2 俘获粒子数与俘获节加速场梯度的关系 (试验粒子30个)

Fig. 2 Captured particle number versus accelerating gradient of the capture section (a total of 30 particles)

说, 由于微波功率源的输出水平有限, 不能做更高输出功率的试验。

本文通过理论计算证实以上结论, 并指出在多大范围内该结论是正确的。

由于正电子从靶上出来能谱较宽, 加上匹配段有陡升陡降的轴向磁场存在, 正电子的运动比较复杂。必须对横向运动方程和纵向运动方程联立求解。

二、运动方程及计算结果

正电子的运动由以下方程描述:

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{dz} &= e E_0 \sin\varphi / m_0 c^2 \\ \frac{d\varphi}{dz} &= \frac{2\pi}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \\ \frac{dP_r}{dz} &= \frac{\pi e E_0 R}{\lambda m_0 c^2} \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \cos\varphi - \frac{R}{4\gamma\beta} \left(\frac{e B_z}{m_0 c} \right)^2 \\ \frac{dR}{dz} &= \frac{P_r}{\beta\gamma}, \\ \beta &= \left[\gamma^2 - 1 - \left(\frac{e B_z R}{2 m_0 c} \right)^2 - P_r^2 \right]^{1/2} / \gamma \end{aligned}$$

其中, β 是正电子轴向速度与光速之比, γ 是正电子的总能量 (以 $m_0 c^2$ 为单位), $m_0 c^2$ 是正电子的静止能量 (0.511 MeV), P_r 是正电子横向动量 (以 $m_0 c$ 为单位), φ 是正电子相对于微波的相位, R 是对于轴线的距离, B_z 是轴向聚焦磁场, λ 是微波波长。

聚焦磁场的表达式可写成 $B_z(z) = f(z) \cdot B_0$, B_0 表示俘获节中的均匀聚焦磁场, $f(z)$ 保证在靶附近有一陡然上升接着陡然下降的磁场形状, 其目的是把一个横向坐标很小横向动量很大的相空间变成横向坐标较大横向动量较小的相空间。在计算中, 我们选取 30 个正电子作为代表粒子, 其初相宽为 10° , 初能量分别为 1, 2, 3, ..., 10 MeV, 初始径向位置 $R_0 = 0.002$ m, 对轴线的初始倾角为 15° 。这些初值与世界上若干台正电子直线加速器的运行值比较接近。

匹配段长 0.2 m, 俘获节长 3 m, $B_0 = 0.2$ T, $\lambda = 0.105$ m。

计算结果列于表 1 中。俘获粒子满足下列条件: (1) 横向离轴线距离小于 9 mm; (2) 纵向相宽在 20° 以内; (3) 粒子在俘获节末端的能量分散在 10 MeV 以内。图 2 给出两种工作模式中俘获节加速场梯度与相对俘获率的关系。

三、结 论

1. 在俘获节加速场梯度不太高的情况下, 加速器工作在模式 1 可俘获较多的正电子。

2. 加速器工作在模式 1 时, 随着俘获节加速场梯度增高, 正电子的俘获率也增高, 渐渐到达一饱和值 (对应的场梯度为 10 MV/m 左右)。加速场梯度再增高时, 俘获率反而下降。这是因为, 当场梯度很高时, 正电子滑不到最大加速相位附近。结果, 在俘获节末端的能散度过大, 很多粒子不符合俘获条件 3。

3. 模式 2 的俘获率在高达 80 MV/m 的加速场梯度范围内保持单调上升。因此, 如果条件允许的话, 俘获节工作在尽量高的加速场梯度下是有利的。由图 2 看出, 若俘获节的

表 1 俘获节加速场梯度与俘获粒子数的关系 (试验粒子30个)
Table 1 Captured particle number versus accelerating gradient of the capture section (a total of particles)

场梯度 $E_0/\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$	减 速 相 位 注 入				加 速 相 位 注 入			
	俘获粒子数	相对俘获率/%	$\varphi/\text{度}$	γ	俘获粒子数	相对俘获率/%	$\varphi/\text{度}$	γ
2	6	20	70~90	11~14	5	16	40~60	17~21
4	8	26	75~95	18~21	7	23	64~84	29~33
6	10	33	80~100	27~34	8	26	70~90	41~45
8	11	36	80~100	38~44	8	26	75~95	53~57
10	12	40	85~105	47~55	9	30	77~97	64~70
12	13	43	87~107	57~65	9	30	77~97	76~82
15	12	40	88~108	73~80	10	33	80~100	93~100
20	12	40	90~110	101~109	12	40	82~102	121~129
30	12	40	75~95	162~169	15	50	85~105	176~191
40	11	36	99~119	195~212	16	53	88~108	237~250
50	9	30	117~125	215~235	17	56	88~108	294~310
80	5	16	120~128	352~366	19	63	79~99	472~485

加速场梯度在 30 MV/m 以上, 则应工作在模式 2 为宜。

参 考 文 献

- [1] 罗应雄, 正电子直线加速器注入相位研究, 高能物理与核物理, 待发表。
 - [2] 肖意轩等, 正电子源的简明设计方法, 中国科学院高能物理研究所资料, 1985。
 - [3] Moffeit, K., Positron source, first 50 nanosecond, SLAC, Collider note 268, May, 1984。
- (编辑部收到日期: 1990年9月10日)

HOW THE ACCELERATING GRADIENT OF THE CAPTURE SECTION TO EFFECT ON THE CAPTURE RATE IN THE POSITRON LINAC

LUO YINGXIONG ZHOU SHU

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT

In the paper, It is calculated that the accelerating gradient of the capture section how to effect on the capture rate in a positron linac, and the result is used to compare with the measurement value of the BEPC. It is indicated that how wide is the region in which the capture rate is independent on the accelerating gradient, and why pursuing the higher gradient is still significant.

Key words Capture section, Accelerating gradient, Matched section, Phase width, Energy spread.