

海关集装箱检测用电子直线加速器 聚焦线圈磁场设计与测试

李泉凤 刘耀红 汪富生

(清华大学物理系, 北京, 100084)

介绍了在电子直线加速器粒子动力学基础上进行聚焦线圈轴向磁场的设计;利用 LINE-ACC/PC 程序模拟计算,给出了不同初始发射度情况下满足束流包络要求的各种聚焦磁场数据。对已经加工好的聚焦系统进行了磁场分布测量,并将实际磁场与理论计算进行了比较。上述工作为确定聚焦线圈的设计方案和加速器的出束实验提供了可靠、丰富的数据。

关键词 轴向聚焦磁场 聚焦线圈 束流包络 初始发射度 相速度

海关集装箱检测用加速器采取工作在 9MeV、6MeV 两档的电子行波直线加速器。针对此种加速器的特点,根据粒子动力学分析^[1],为了保证电子横向运动的稳定,必须加外设的轴向聚焦磁场。这种磁场一般由螺线管线圈来提供。

一般设计聚焦线圈只进行横向动力学计算^[2]即能完成此项工作,但在计算中需要从纵向粒子动力学的计算结果中索取大量数据。数据的传递工作费时费力,易出差错,且影响计算的精度。

本文介绍的工作是利用编写的专用程序 LINE-ACC/PC,它将加速器中的横向设计与纵向计算联立进行,提高了计算精度,并且在轴向聚焦磁场设计的同时根据加速管的实际结构对纵向的设计结果进行校核。

1 进行粒子动力学计算、设计聚焦线圈的主要公式

1.1 纵向运动方程

在只考虑行波加速场基波成份作用的情况下,电子的纵向运动满足^[3]:

$$\frac{d\gamma(z)}{dz} = -\epsilon_0^* \sin\varphi \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi(z)}{dz} = k \left(\frac{1}{\beta_p} - \frac{1}{\beta} \right) \quad (2)$$

其中: $\gamma(z) = mc^2/(m_0c^2)$ 为电子的归一化能量; $\epsilon_0^*(z) = eE_{z0}(z)/(m_0c^2)$ 为归一化的电场纵向分量辐值; $\beta_p(z) = v_p/c$ 为基波的归一化相速度; $k = 2\pi/\lambda$ 为行波场的自由空间传播常数;

收稿日期:1994-10-31 收到修改稿日期:1994-12-15

$\beta = v_0/c$ 为电子的相对速度; $\varphi(z)$ 为电子相对于行波场的相角。

1.2 横向运动方程

对于行波加速器, 在考虑空间电荷效应(采用圆柱模型)外加聚焦线圈的情况下, 束流的包络线方程^[3]为:

$$R'' + \frac{(\beta\gamma)'}{\beta\gamma}R' + \frac{N(z)}{\beta\gamma}R - \frac{\epsilon^2}{(\beta\gamma)^2 R^3} = 0 \quad (3)$$

其中: R 为与特定入口相位 φ 相联系的束包络; ϵ 为束流的横向发射度。

$$N(z) = \frac{B_z^*{}^2}{4\beta\gamma} - \frac{k\epsilon_0^*}{2} \left[\frac{1}{\beta\beta_p} - 1 \right] \cos\varphi - \frac{\epsilon_0^*}{2\beta} \sin\varphi - \frac{eI(1-\beta^2)}{2\pi\epsilon_0 m_e R^2 \beta^2 c^3} \quad (4)$$

式中: $B_z^* = eB_z(z)/(m_0c)$ 为归一化的磁感应强度轴向分量; I 为束流强度; R_s 为束团半径; ϵ_0 为真空介电常数。

令 $P_R = R'$, 即:

$$dR/dz = P_R \quad (5)$$

则式(3)可化作:

$$\frac{dP_R}{dz} = \frac{\epsilon^2}{(\beta\gamma)^2 R^3} - \frac{(\beta\gamma)'}{\beta\gamma}P_R - \frac{N(z)}{\beta\gamma}R \quad (6)$$

1.3 螺线管磁场计算公式

螺线管轴线上的磁场可以从毕奥-萨伐定律出发, 通过积分直接求得。计算公式为:

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 I}{2} \left[(l+z) \ln \frac{R_b + \sqrt{R_b^2 + (l+z)^2}}{R_a + \sqrt{R_a^2 + (l+z)^2}} + (l-z) \ln \frac{R_b + \sqrt{R_b^2 + (l-z)^2}}{R_a + \sqrt{R_a^2 + (l-z)^2}} \right] \quad (7)$$

B_z 为轴线上轴向磁感应强度, T; μ_0 为真空导磁率, $4\pi \times 10^{-7}$ H/m; R_a 、 R_b 为线圈的内、外半径, m; l 为线圈的半长度, m; z 为所求场点距线圈中心的距离, m。

在程序中实际采用的公式为:

$$B_z(z) = \frac{\pi O_i \times 10^{-7}}{l(R_a - R_b)} \left[(l+z) \ln \frac{R_b + \sqrt{R_b^2 + (l+z)^2}}{R_a + \sqrt{R_a^2 + (l+z)^2}} + (l-z) \ln \frac{R_b + \sqrt{R_b^2 + (l-z)^2}}{R_a + \sqrt{R_a^2 + (l-z)^2}} \right] \quad (8)$$

其中, O_i 为线圈安匝数。

LINE-ACC/PC 程序采用四阶自动变步长的龙格-库塔法求解(1、2、5、6)式组成的微分方程组, 根据加速管已经确定的工作频率 f 、基波归一化相速度等参数得到 $E_{z0}(z)$, 调节聚焦线圈安匝数, 可以获得束流出口能量、能散、束流包络以及发射度增长情况等数据。

2. 聚焦线圈的设计及不同初始发射度对聚焦线圈的要求

2.1 聚焦线圈设计

设计要求聚焦线圈提供磁场分布能分别满足 9MeV 和 6MeV 两档工作情况, 加速管内径限制束流半包络应控制在 5mm 以内, 出口处束流直径小于 2mm。

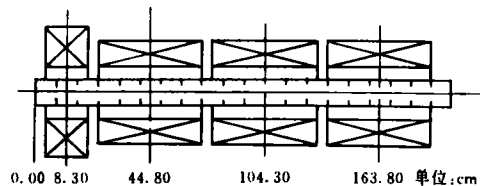


图 1 螺线管线圈分布示意图

Fig.1 Distribution of the solenoids

根据上述条件,利用 LINE-ACC/PC 程序反复计算,确定聚焦线圈设计如图 1 所示。

在 6MeV、9MeV 两档满足要求的束包络如图 2 所示,提供上述磁场分布的聚焦线圈电流值列于表 1。

表 1 初始发射度为 4mm·mrad 时的聚焦线圈参数

Table 1 Parameters of solenoids for initial emittance of 4mm·mrad

螺线管号	匝数	9MeV 档安匝数	9MeV 档电流/A	6MeV 档安匝数	6MeV 档电流/A
1	160	19750	123.5	18010	112.5
2	480	12600	26.3	16100	33.5
3	480	22100	46.0	14000	29.2
4	480	16000	33.3	30000	62.5

2.2 不同发射度对聚焦线圈磁场的要求

考虑到电子枪发射影响到加速器入口初始发射度^[4],利用计算程序模拟了发射度为 4mm·mrad、10mm·mrad 和 15mm·mrad 时电子在加速过程中的束流包络,调节各组聚焦线圈电流,得到与 2.1 要求相匹配的磁场,对应的聚焦线圈电流值列于表 2。表 2 数据间接地反映了初始发射度变大时,需要聚焦线圈提供更大的聚焦磁场。

在确定聚焦线圈设计参数时,兼顾了两档工作以及初始发射度变化产生的影响,选择内水冷、大电流工作的聚焦线圈设计方案。

表 2 满足电子束横向运动束包络要求条件下的不同发射度时各组聚焦线圈电流

Table 2 Current satisfying the beam envelop of transverse movement with different emittance of the focusing coil groups

初始发射度/mm·mrad	线圈	6MeV 档电流/A	9MeV 档电流/A
4	1 2 3 4	112 33 29 62	123 26 46 33
10	1 2 3 4	119 32 30 58	119 30 35 60
15	1 2 3 4	116 29 36 63	119 30 38 63

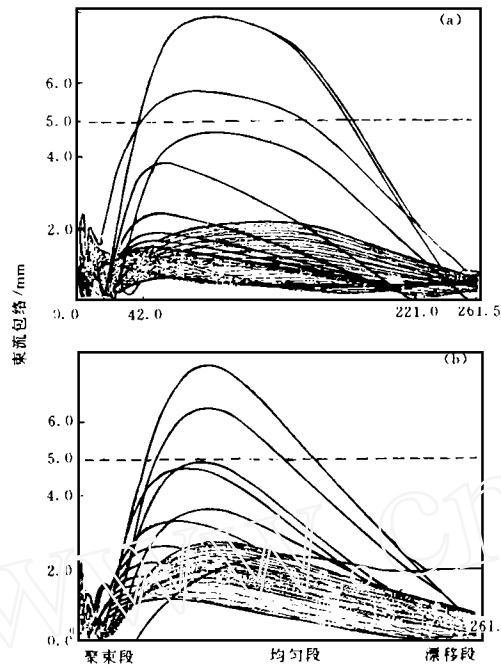


图 2 6MeV(a)和 9MeV(b)档束团的束流包络线簇(初始发射度 $4\text{mm}\cdot\text{mrad}$)

Fig. 2 Beam profiles of a bunch at 6MeV(a) and 9MeV(b) state (Initial emittance: $4\text{mm}\cdot\text{mrad}$)
最大半包络大于 5mm 的占 3.3%, 出口包络大于 1mm 的占 1.7%

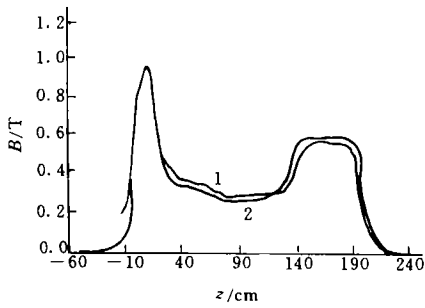


图 3 6MeV 档磁场分布

Fig. 3 Axial magnetic field for 6MeV state
1——理论值; 2——实验值

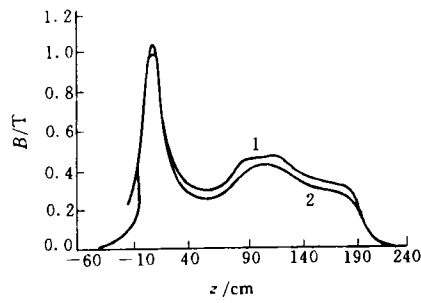


图 4 9MeV 档磁场分布

Fig. 4 Axial magnetic field for 9MeV state
1——理论值; 2——实验值

3 聚焦线圈磁场实测与理论值的比较

将设计加工好的聚焦线圈按图1安装好,按照表2第一组电流值通电,利用霍尔测磁仪测量整个系统的轴向磁场分布,6MeV、9MeV的数据分别用图3、图4表示,并把理论值画上去作比较,可以看出实际测量值比理论值约低10%,此差异主要是由于线圈漏磁所造成的,而在第一个线圈没有此现象,这是由于在线圈前面装配有屏蔽法兰的缘故。

4 结论

行波电子直线加速器聚焦线圈的设计是在进行加速器粒子动力学计算过程中完成的,设计还考虑了不同初始发射度带来的影响。全面综合各种因素,确定聚焦线圈设计方案,根据要求,它必须能够提供0.1T以上的最大磁场,主加速段最大轴向聚焦磁场一般在0.05T左右。

在加速器调机时,还应注意观察到聚焦线圈的实际磁场值与理论值之间的差异,以达到有效的聚焦作用。

参 考 文 献

- 1 谢曦,陈银宝,宋忠恒.电子直线加速器的束流横向包络方程.原子能科学技术,1978,(2):119-126.
- 2 张洁昌.螺线管聚焦系统设计方法研究[硕士论文].清华大学工程物理系资料,1980.
- 3 刘乃泉,林郁正,王垞,等.加速器理论.北京:原子能出版社,1990.95-118.
- 4 王晓敏,顾闰观.电子直线加速器注入器束流横向发射度的计算.原子能科学技术,1988,22(5):548-550.

MAGNETIC FIELD DESIGN AND MEASUREMENT OF THE FOCUSING COILS OF AN ELECTRON LINAC FOR CUSTOM CONTAINER INSPECTION SYSTEM

LI QUANFENG LIU YAOHONG WANG FUSHENG

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084)

ABSTRACT

The paper introduces a kind of design of axial magnetic field of focusing coil based on the solutions of simultaneous equations of particle dynamics in an electron linac. For various initial emittance the data of magnetic field which give satisfied beam envelopes are worked out by LINE-ACC/PC program. The actual magnetic field distribution of the focusing system is measured and the data are compared with theoretical results. All provide a reliable reference for the design of focusing coil and beam test.

Key words Axial magnetic field of focusing coil Focusing coil Beam envelopes Initial emittance Phase velocity