

L-带行波电子直线加速器束流动力学计算

张振海 宋忠恒

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要

本文以自由电子激光(FEL)用L-带行波电子直线加速器的注入器为例,用增补后的PARMELA程序对其作了束流动力学的三维计算,并给出了有关束流性能的各种参量。

一、前 言

随着电子直线加速器的应用范围日益展宽,电子直线加速器的各向束流性能更为人们所关注。自由电子激光对加速器输出的电子束品质提出了很高的要求,如高亮度、低能散度、低发射度等,因此迫切要求发展强流三维束流动力学计算程序,以期更为详细地了解束流性能和提出更符合实际的计算结果。在强流短脉冲电子加速器中模拟粒子运动的最主要问题是在低能区对束流空间电荷效应的处理,在这方面已经有了一些工作^[1]。

PARMELA程序是目前世界上用得较多的电子直线加速器束流动力学计算的三维程序,其在处理空间电荷效应时,将束流理想化为若干个超粒子,并将超粒子等效为一自由空间里的电荷环,而在动力学计算过程中却又将其看作单电子。这一点与电子直线加速器束流计算中惯用的方法不同。另外,程序中还对束流的初始状态作了多种设置,以适应各种实际需要。

在移植程序时,发现我们的版本中没有包括工作在行波状态,特别是强流短脉冲的情况,所以在消化吸收原程序的基础上,为其增加了行波腔和纵向任意场型聚焦线圈的动力学计算功能,结合计算机的具体情况,编写了功能较强的后处理程序。本文就是用增补后的PARMELA程序,以FEL用L-带行波电子直线加速器的注入器为例,作了束流动力学的三维计算,并给出了有关束流的各种参量。

二、粒子运动方程和束流均方根发射度

在强流短脉冲行波电子直线加速器中,各组件基本上都是圆对称的,利用圆柱坐标比较方便。圆柱坐标系里带电粒子的运动方程在用时间 t 作自变量时,其各向分量的运动方程如下:

$$\frac{d(\gamma\beta_z)}{d\omega t} = \frac{e\lambda}{360m_0c^2} \left[E_0 I_0 \left((K_r r) \sin \varphi + \frac{1}{2} k r \beta_r \cos \varphi \right) + E_{zsc} \right]; \quad (1)$$

$$\frac{d(\gamma\beta_r)}{d\omega t} = \frac{e\lambda}{720m_0c^2} \left[E_0 r k \cos \varphi \left(\frac{1}{\beta_p} - \beta_x \right) + r E_0 \alpha \sin \varphi - \frac{r e B_z^2}{2m} + 2E_{rac} \right]; \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi}{d\omega t} = 1 - \frac{\beta_x}{\beta_p}; \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{d\omega t} = \frac{e B_z \lambda}{720 m_0 c \gamma}. \quad (4)$$

式中 $\omega t = 360ft$, f 是行波场频率; $k = \omega/c$; $K_z^2 = k^2 - \frac{2\pi m}{D}$, D 是盘荷波导周期, $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$; λ 是微波波长; E_0 是轴线上行波场的纵向分量; α 是衰减系数; β_p 是行波场的相速; B_z 为纵向聚焦磁场. E_{zac} , E_{rac} 分别为空间电荷场的纵向和径向分量, 在自由空间中, 一内外半径分别为 r_1 和 r_2 , 长为 L 的环状束流在空间任意一点的电位是:

$$\Phi(r, \theta, \xi) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\pi(r_2^2 - r_1^2)L} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \frac{\rho d\rho d\theta dz}{[r^2 + 2r\rho\cos\theta + (z - \xi)^2]^{1/2}}. \quad (5)$$

空间电荷场由下式给出:

$$E_{zac} = -\text{grad}_z \Phi \quad (6)$$

$$E_{rac} = -\text{grad}_r \Phi$$

粒子动力学三维计算的主要目的是要研究束流的各项品质, 能较好地反应束流品质的一个重要参数是其各向均方根发射度, 通常按下列各式计算^[2]:

$$\epsilon_{x rms} = [\overline{x^2 x'^2} - (\overline{xx'})^2]^{1/2}; \quad (7)$$

$$\epsilon_{y rms} = [\overline{y^2 y'^2} - (\overline{yy'})^2]^{1/2}; \quad (8)$$

$$\epsilon_{z rms} = [\overline{z^2 z'^2} - (\overline{zz'})^2]^{1/2}. \quad (9)$$

上式没有考虑相空间中束流偏心的情况, 在束流偏心时发射度计算公式如下:

$$\epsilon_{x rms} = [(\overline{x^2} - \overline{\bar{x}^2})(\overline{x'^2} - \overline{\bar{x}'^2}) - (\overline{xx'} - \overline{\bar{x}\bar{x}'})^2]^{1/2}; \quad (10)$$

$$\epsilon_{y rms} = [(\overline{y^2} - \overline{\bar{y}^2})(\overline{y'^2} - \overline{\bar{y}'^2}) - (\overline{yy'} - \overline{\bar{y}\bar{y}'})^2]^{1/2}; \quad (11)$$

$$\epsilon_{z rms} = [(\overline{z^2} - \overline{\bar{z}^2})(\overline{z'^2} - \overline{\bar{z}'^2}) - \overline{zz'} - (\overline{\bar{z}\bar{z}'})^2]^{1/2}. \quad (12)$$

在电子加速器中一般不考虑这一点. 发射度的单位为 (m_0c -cm), 需要指出的是, 对于纵向取 z' 为 $(p_z - p_{zr})/p_{zr}$, 用粒子相对于微波场的相位来表示粒子位置, 故纵向发射度单位是($^\circ$).

三、程序简介

PARMELA 是 Phase and Radial Motion In Electron Linear Accelerator 的缩写, 它是 PARMILA 程序的变种, 其模拟大量粒子在加速器中的动力学过程, 并且既可模拟加速过程, 又可模拟传输过程. 这个程序的主要特点是对束流的初始状态设置了多种选择, 以及在自由空间取环状束流模型处理空间电荷效应. 束流的初始状态由子程序 Iuput 产生, 其既可在六维相空间中产生多种分布的初始束流, 又可在各种分布的束流按用户要求的比例叠加在一起形成更符合实际的初始束流. 束流在相空间用下列边界方程约束:

$$\gamma_x x^2 - 2\alpha_x x x' + \beta_x x'^2 = \epsilon_x; \quad (13)$$

$$\gamma_y y^2 - 2\alpha_y y y' + \beta_y y'^2 = \epsilon_y; \quad (14)$$

$$\gamma_z z^2 - 2\alpha_z z z' + \beta_z z'^2 = \epsilon_z. \quad (15)$$

束流的空间电荷效应由 Scheff 子程序处理,假定束流为圆对称束,在开始时将一个二维 $R-Z$ 网格叠加在束流上,令由该网格确定的每一源柱带有单位电荷,利用公式(5)和(6)即可求出源柱在任一网格点上产生的场分量 E_{r1c} 和 E_{z1c} 。

在计算中考虑了真实束流的非圆对称性。如果束流为非圆对称束,则将其变换为一近似等效的圆对称束,每一个超粒子所带的电荷根据空间位置而分配到与其相近的源环上,求出每一源环上的电量,即可算出任一网格点上的总的空间电荷场。带电粒子所受空间电荷场由其相近的网格点上的场的内插而获得。网格之外的粒子对空间电荷场没有贡献,但受到空间电荷场的作用,该作用等效为将束团电荷集中于束团中心时该粒子所受的作用。该程序还可考虑多束团的影响。

PARMELA 是一个比较好的电子加速器多粒子束流动力学模拟程序,然而,我们的版本没有求解方程(1)–(4)的功能,为了适应具体情况的要求,在消化吸收的基础上,将其移植到 Cyber-825 机上,并作了如下增补和改动。

(1) 增加行波腔动力学计算功能。可能是由于受到 PARMILA 的影响,PARMELA 没有行波动力学计算功能,为了沿用原程序,我们在原程序的框架下增补了计算方程(1)–(4)的功能。增补后的 PARMELA 程序不仅能进行驻波电子直线加速器的动力学计算,而且能计算行波电子直线加速器的动力学问题。

(2) 增加纵向可变聚焦磁场计算功能。强流短脉冲电子直线加速器的一个重要特点是沿束流线设置纵向可变的聚焦磁场,而原程序没有这一功能,为此修改 Solenoid 子程序使得纵向聚焦磁场沿纵向可任意调节。

(3) 可间断连续计算功能。在束流动力学计算中,为了获得理想的动力学参数,往往要经过多次反复计算,对于一个较大的系统,如加速器由电子枪、分频预聚器、预聚器、加速节等系统组成,如果每次都从头开始,势必要浪费许多时间,如果能分段计算,必将大大提高效率。

(4) 输出处理程序。一个好的程序不但要能满足计算数据结果的要求,还要能够提供更为直观明了的图形结果,本输出处理程序能提供各向发射度图形及其变化曲线,还能给出粒子的能量和相位分布曲线,计算结果一目了然,而且使用方便。

四、计算结果及分析

现以一个 L 波段 (1300 MHz) 行波电子直线加速器的注入器(图 1) 为例进行计算。该注入器由一个 12 分频预聚器和一个 3 分频预聚器以及 6 个行波聚速加速段组成,前 3 个行波腔是相速线性上升的聚速腔,后 3 个腔是相速为 1.0 的加速腔,运行在 $3\pi/4$ 模,前四个腔的加速场强按 10% 递增,加速腔按等梯度处理。在注入器的整个束线上加有纵向聚焦线圈,磁场可变。

从电子枪出来的电子束能量为 100keV, 流强 $I = 6.0A$ 脉冲宽度 $\tau = 3ns$, 束流半

径 $R = 1.0\text{cm}$, 初始束流模型选 $N\text{TYPE} = 5$, 即起始粒子在 $x-x'-y-y'$ 四维相空间中随机分布, 能散 $\Delta E = 0.0$, 纵向在 $-720^\circ - +720^\circ$ 之间随机分布, 初始发射度为 $\varepsilon = 0.005 (m_0c\text{-cm})$, 当两个分频预聚束器的调制电压和漂移空间分别为 40kV , 55kV , 120cm , 25cm 时, 聚束加速段初始场强为 6MV/m , 聚束磁场的纵向分布为 $0.035 - 0.180\text{T}$, 对 300 个超粒子的计算结果如图 2—图 11.

图 2—图 9 都是束流的发射度图示, 在 $x-x'$ 和 $y-y'$ 相空间中, 发射度开始均为正椭圆 (图 2, 图 3), 其归一化发射度为 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.0045 (m_0c\text{-cm})$, 由于被跟踪的粒子有限, 该值与初始设置略有不同. 图 4, 图 5, 图 6, 是束流各向发射度的变化曲线, 从图示和对计算数据的分析可以看出, 通过分频预聚束系统的调制, 使注入的束团在

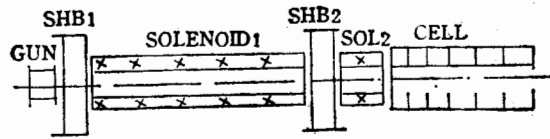


图 1 注入器示意图

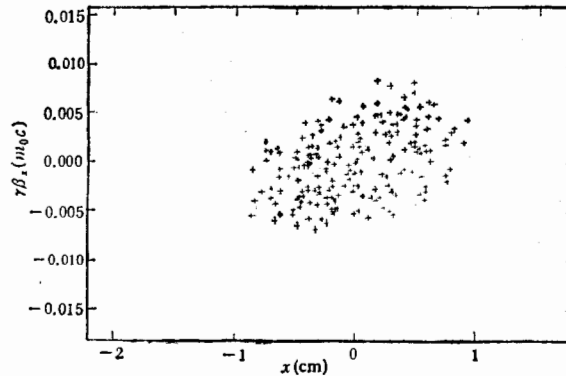


图 2 x -向初始发射度

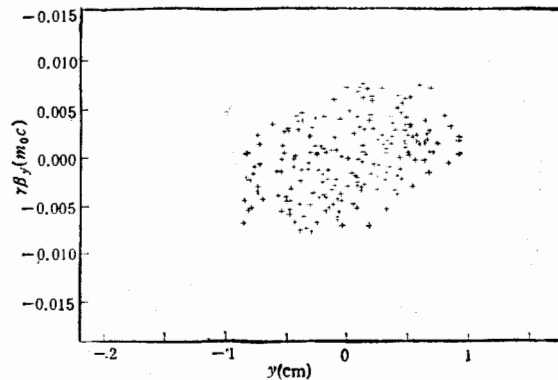
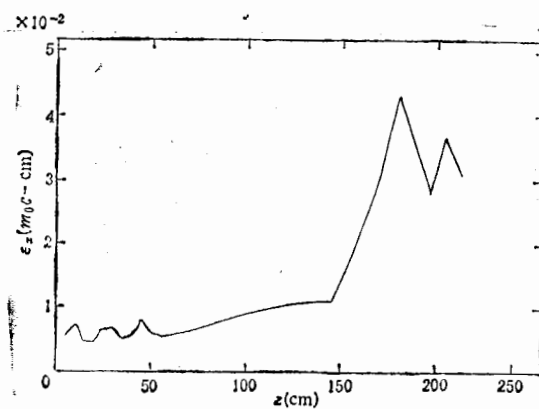
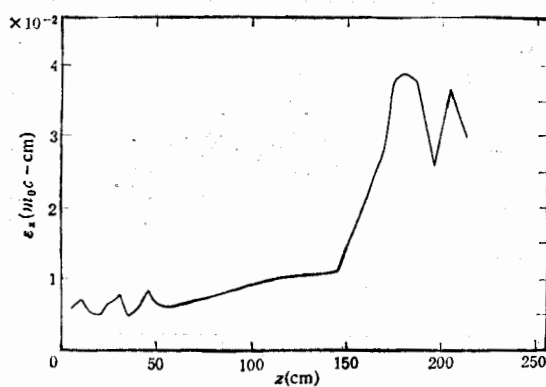
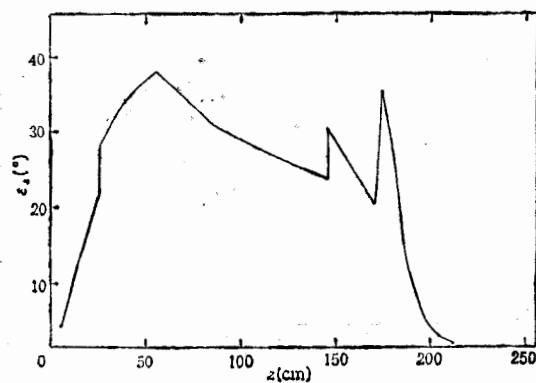


图 3 y -向初始发射度

图 4 ϵ_z 随 z 的变化曲线图 5 ϵ_r 随 z 的变化曲线图 6 ϵ_θ 随 z 的变化曲线

纵向发生了预聚束。

被预聚的束团可以送到聚束加速段的微波场 (1300 MHz) 的一个周期里,使之得到继续聚束和加速。由于束流的纵向聚束和空间电荷场的影响,束流的横向发射度增大。

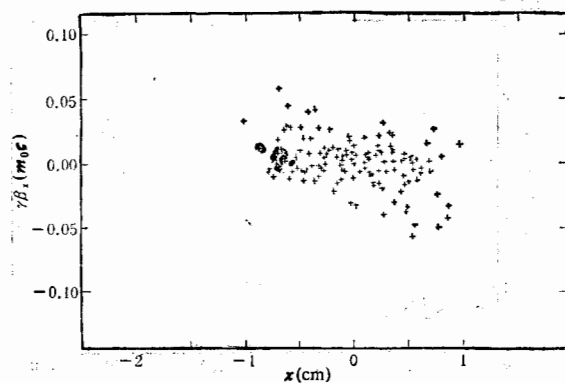
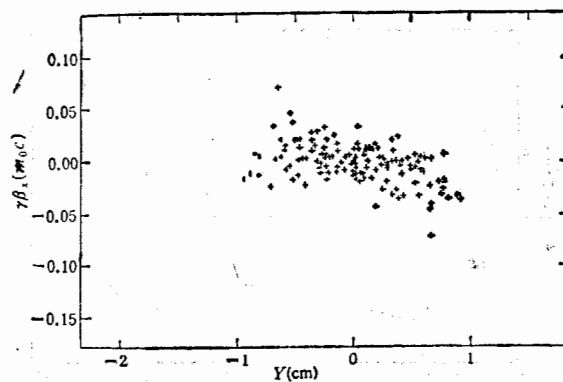
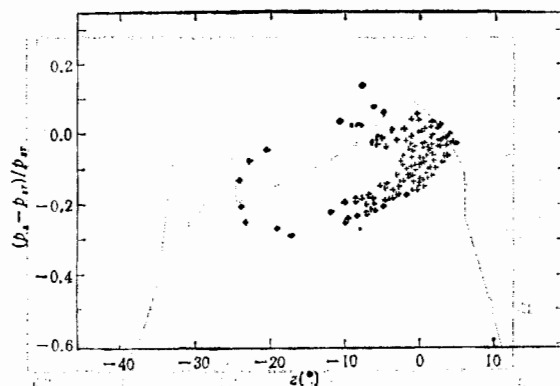
图7 注入器出口的 x -向发射度图8 注入器出口的 y -向发射度图9 注入器出口的 z -向发射度

图7和图8是在注入器出口的横向发射度图形, $\epsilon_x = 0.0301 (m_0c\text{-cm})$, $\epsilon_y = 0.0292 (m_0c\text{-cm})$.

图9, 图10和图11都是束团纵向品质参数的图示, 图9为束团在注入器出口的纵向发射度图象, 其均方根值 $\epsilon_z = 1.98(^{\circ})$, 图10和图11分别表示在注入器出口束团

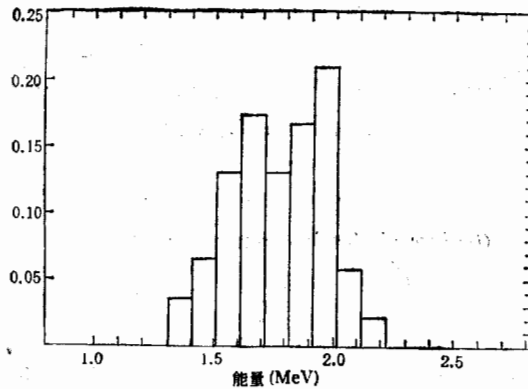


图 10 注入器出口的粒子的能量分布

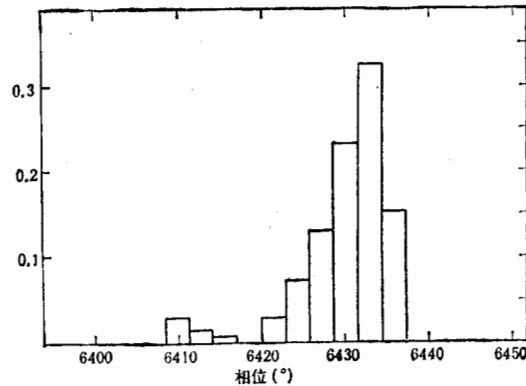


图 11 注入器出口粒子的相位分布

中粒子能量和相位的分布。从图示和对计算数据的分析可知,在注入器的出口,有大约 60% 的粒子被聚束到基波相位 40° 的范围内,能散为 200keV ,其中大约 25% 的粒子在 10° 范围内,即可得到 20ps ,平均能量 1.8MeV ,能散 100keV ,流强 100A 的脉冲束团。

以上所述是在没有仔细作参数调节的情况下,使用增补后的系统计算而得,该结果与已发表的参数是可比的,这说明,增加的功能是正确的,新系统已可以作为一可行的束流动力学计算工具。

感谢 PARMELA 程序的作者,感谢张东旭同志向我们提供 PARMELA 程序和有关资料^[3]。

参 考 文 献

- [1] M. B. James and R.H. Miller, IEEE Trans. NS-28, No.3 (1981), 3461.
- [2] M. Weiss, IEEE, Trans. NS-20, No.3 (1973), 877.
- [3] 张东旭, PARMELA 程序的开发和移植,清华大学毕业论文(1989).

Dynamics Calculation in a L-band Travelling Wave Electron Linac

ZHANG ZHENHAI SONG ZHONGHENG
(*Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*)

ABSTRACT

The PARMELA code is modified for three-dimensional dynamic calculation of the injector of a L-band travelling wave electron linac for FEL research. Various parameters in relation to characteristics of the beam are given in the paper.