

BFEL 电子束能量的调节

戴建枰^{1;1)} V. Mytrochenko²

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (NSC KIPT, Kharkov, UKRAINE)

摘要 自由电子激光(FEL)相比于传统激光最大的优点之一便是能够较大范围、连续调节输出激光的波长. 通常, 较大范围调节FEL波长的方法是调节电子束的能量. 通过对BFEL进行大量的模拟计算, 重点讨论了其在保持电子束优良性能的前提下, 大范围调节电子束能量的方法, 包括: 改变加速管的加速梯度、调整电子束的加速相位以及改变电子束的流强等.

关键词 BFEL 电子束能量 模拟计算

1 引言

与传统激光相比, 自由电子激光(FEL)的最大的优点之一便是能够较大范围、连续调节输出激光的波长. 对北京自由电子激光(BFEL)这类振荡器型FEL, 大范围调节激光波长时, 需要解决光学谐振腔的调节以及在保持电子束优良性能的前提下, 大范围调节电子束能量的问题. 后者是本文的研究内容.

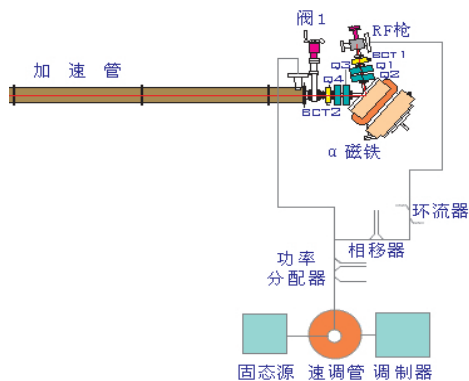


图1 BFEL加速器布局示意图

BFEL的加速器采用热阴极微波电子枪和Alpha磁铁为注入器, 通过一根3m长的SLAC型加速管进行加速, 如图1所示. 由于注入器的能量变化范围非常有限, 对电子束能量的调节主要是通过加速管, 具体的方法包括: 改变加速管的加速梯度、调整电子束的加速相位以及改变电子束的流强等. 本文通过模拟计算,

对此进行了研究和讨论.

2 计算方法

对BFEL加速器从头至尾的动力学计算主要采用了PARMELA程序, 对PARMELA程序无法计算的特殊元件——Alpha磁铁, 则是利用传输矩阵进行了计算. Alpha磁铁入口处电子束的坐标由前一元件的计算结果(tape2文件)得到, 出口处的坐标则被转换成后一元件的输入文件(Input0). 另外, 电子枪腔体中的电磁场分布由SUPERFISH程序计算得到, 阴极发射电子束的纵向分布采用了10个盘片的模型^[1].

在用PARMELA程序模拟加速管中的粒子动力学时, 需要设定加速管各单元的加速电场. 考虑束负载效应时, 加速管第 n 个单元的电场为

$$E(n) = \sqrt{2\alpha(n)Z_{ef}(n)P(n) - Id \sum_1^n \alpha(n)Z_{ef}(n)},$$

式中 $\alpha(n)$ 为该单元的衰减系数, $Z_{ef}(n)$ 为有效分流阻抗, $P(n)$ 为不考虑束负载时的功率, I 为电子束的平均流强, d 为各单元的长度. $\alpha(n)$, $Z_{ef}(n)$ 等参数可通过SUPERFISH程序计算得到^[2], $P(n)$ 可通过求解下列方程得到

$$\frac{dP(z)}{dz} = -2\alpha(z)P(z)$$

1) E-mail: jpdai@ihep.ac.cn

3 计算结果

3.1 热阴极微波电子枪

在不同的加速电场 E_0 下, 热阴极微波电子枪出口处的能量分布如图 2 所示. 图中的曲线从上至下, 对应的加速电场依次为 31MV/m, 30MV/m, 26MV/m 以及 24MV/m. 图中底部的曲线是电子枪中部分粒子在腔体中多次振荡产生的结果.

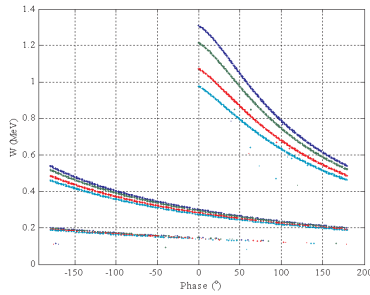


图 2 热阴极微波电子枪出口处的能量分布

3.2 Alpha 磁铁

对应于不同的微波枪参数, Alpha 磁铁的场梯度 G_α 及相邻 4 个四极磁铁的参数需要适当优化. 模拟计算结果表明, 当微波枪工作在较低场强时 (24MV/m), 加速管出口处的束团长度最短. 这种情况下, Alpha 磁铁出口处的参数计算结果如表 1 所示.

表 1 Alpha 磁铁出口处电子束参数

输入参数		电子束参数	
E_0	24MV/m	$\varepsilon_{xn\text{rms}}$	$4.1\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$
I_b	200mA	$\varepsilon_{yn\text{rms}}$	$0.66\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$
G_α	0.9T/m	Δx (99% of pat.)	2.4mm
Q_1	0.8T/m	Δy (99% of pat.)	1.8mm
Q_2	0.8T/m	$\Delta\Phi$ (99% of pat.)	7.6°
Q_3	0.6T/m	$\Delta W/W$ (99% of pat.)	16.0%
Q_4	0.4T/m	W_{max}	0.94MeV

3.3 加速管

在不同输入功率和束流负载下, SLAC 型等梯度加速管各单元的加速电场分布如图 3 所示.

针对微波电子枪和 Alpha 磁铁参数如表 1 所示的情形, 分别模拟了在不同的输入功率 P_0 和电子束流强 I_b 下, 加速管出口处电子束的参数, 如上表 2 和图 4 所示.

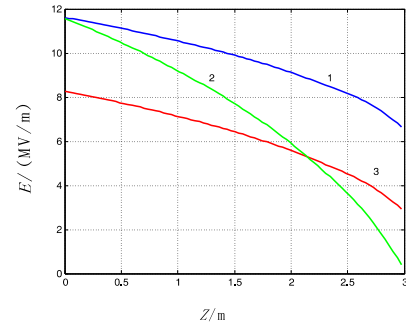


图 3 加速电场沿加速管的分布

- 1) $P_0 = 12\text{MW}$, $I_b = 200\text{mA}$; 2) $P_0 = 12\text{MW}$, $I_b = 400\text{mA}$; 3) $P_0 = 6.1\text{MW}$, $I_b = 200\text{mA}$.

表 2 不同输入功率和流强下, 加速管出口处电子束参数

加速管出口处 电子束参数	$P_0=12\text{MW}$ $I_b=0.2\text{A}$	$P_0=12\text{MW}$ $I_b=0.4\text{A}$	$P_0=6.1\text{MW}$ $I_b=0.2\text{A}$
$\varepsilon_{xn\text{rms}}$ ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$)	3.4	3.0	5.5
$\varepsilon_{yn\text{rms}}$ ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$)	2.8	4.4	5.4
$\Delta x/\text{mm}$ (99% of pat.)	11.0	7.0	16.5
$\Delta y/\text{mm}$ (99% of pat.)	10.3	10.9	15.6
$\Delta\Phi/(\text{degrees})$ (99% of pat.)	2.0	5.4	2.0
$\Delta W/W$ (%) (99% of pat.)	0.52	0.37	0.73
$W_{\text{max}}/\text{MeV}$	29.7	22.5	19.2

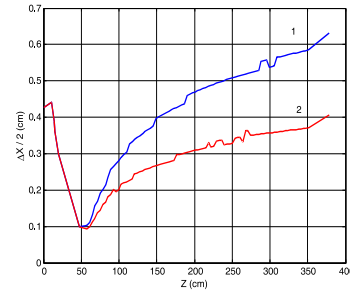


图 4 电子束包络沿加速器的分布

- 曲线 1: $P_0=6.1\text{MW}$; 曲线 2: $P_0=12\text{MW}$.

另外, 计算了加速管与微波枪之间的相位差对电子束参数的影响. 图 5 是 12MW 和 6.1MW 两种功率下, 电子束束长 $\Delta\Phi$ 和能散 $\Delta W/W$ 随相位的变化. 曲线 1, 4 为 $P_0=6.1\text{MW}$ 时的束长和能散曲线 2, 3 为 $P_0=12\text{MW}$ 时的束长和能散.

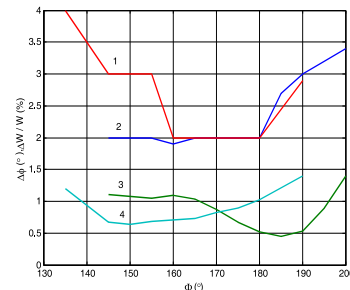


图 5 电子束束长和能散随相位的变化

4 结论

通过对 BFEL 加速器的模拟计算, 可以看出:

- 1) 加速管工作在较低的加速梯度时, 电子束能散和包络较大, 品质较差. 这与实验结果是一致的;
- 2) 电子束能量随加速管相位的变化不太大, 而能

散等参数对加速管相位的变化比较敏感, 容易导致不稳定, 因而通过调节加速相位来调节能量不可取;

- 3) 调节电子束能量, 较好的方法是保持加速管的场强不变, 而调节电子束的流强. 在这种情况下, 束流稳定性较好, 电子束品质变化不大. 然而, 现有热阴极微波电子枪的流强调节范围非常有限, 为采用这一方法调节能量, 需要对现有电子枪进行较大改进.

参考文献(References)

- 1 Kushnir V A et al. Simulations of Transient Phenomena in Thermionic RF Guns, Proceedings of EPAC 2002, Paris, France, 2002. 1649—1651.4
- 2 Loew G A, Miller R H, Early R A et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1979, **NS-26**, 3701

Adjustment of Energy of the BFEL Linac

DAI Jian-Ping^{1;1)} V. Mytrochenko²

1 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing, 100049, China)

2 (NSC KIPT, Kharkov, UKRAINE)

Abstract One of the advantages of free electron lasers (FEL) compared to the conventional laser is the possibility of changing the radiation wavelength in a wide range. However, a series of problems arise under the realization of this advantage. In this paper, the problems, related with the adjustment of energy of the BFEL linac, are investigated mainly with the method of simulation. Three adjustment means are discussed, including changing the gradient of accelerator section, the beam phase and the beam current.

Key words BFEL, energy, simulation

1) E-mail: jpdai@ihep.ac.cn