

BTF 加速器物理设计*

朱雄伟^{1;1)} 裴国玺¹ 池云龙¹ 戴建枰¹ 陈森玉¹ 杜应超²
何小中² 黄文会² 林郁正² 唐传祥²

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)
2 (清华大学工程物理系加速器实验室 北京 100084)

摘要 北京 X 射线自由电子激光试验装置(BTF)将“寄生”在 BEPC II 直线注入器这一国内能量最高,性能最好的电子直线加速器上. BTF 将弃用现有直流枪予注入器,采用光注入器(photoinjector)经低能输运线斜注入到 BEPC II 直线加速器主加速器,同时拆掉三节加速管以安装两级磁压缩器,并在 A46 后拆掉二节加速管引出束流,经高能输运线后进入波荡器.模拟结果表明改造后的直线加速器 BTF 电子能量可达 1.18GeV、能散 0.15%、归一化发射度小于 2.5mm-mrad.

关键词 X 射线自由电子激光 光注入器 磁压缩 输运线

1 引言

北京 X 射线自由电子激光试验装置(BTF)将“寄生”在 BEPC II 直线注入器这一国内能量最高,性能最好的电子直线加速器上. BTF 将采用级联 HGHG 工作模式,最终工作波长 9nm. 为获得 BTF HGHG FEL 所需的低发射度(2.5mm-mrad)、短束团高峰值电流(1.6ps, 600A)的高品质电子束团,须弃用现有直流枪予注入器,采用光注入器(photoinjector)经低能输运线 DL1 斜注入到 BEPC II 直线加速器主加速器,同时拆掉三节加速管以安装两级磁压缩器(BC1, BC2),将光注入器产生的峰值电流百余安培、长度 10ps 束团压缩至 1.6ps, 600A,并在 A46 后拆掉二节加速管引出束流,经高能输运线 DL2 后进入波荡器.改造后的直线加速器布局如图 1, BTF 加速器全长分成四段(L0, L1, L2, L3),电子能量可达 1.18GeV.

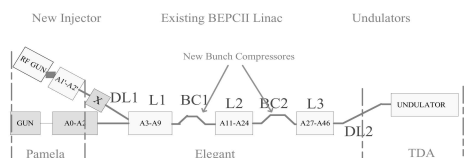


图 1 BTF 布局图

2 束流动力学

为了获得波荡器所需要的高峰值电流、小能散的电子束团,束团须由磁压缩器完成压缩,即在直线加速器中引入由四块二极铁组成的磁压缩器(chicane),磁压缩器的位置与空间安排使得在压缩和加速过程中由纵向尾场、RF 曲率、二阶动量压缩等引起的非线性大部分抵消掉^[1],经最后一级压缩后的相关能散须由纵向尾场补偿和 RF 补偿抵消掉,磁压缩器的设计应减轻相干、非相干同步辐射引起的发射度增长.

为了达到 BTF 所要求的束流参数,需要选择加速器各段参数以达到正确的加速、压缩、加速器出口能散,可以改变的参量有:压缩器的强度(R_{56})、加速相位、压缩器的能量(位置). BTF 加速器各段优化参数如表 1.

表 1

	$E_{in}/$ GeV	$E_{out}/$ GeV	$\sigma_{z-in}/$ nm	$\sigma_{z-out}/$ mm	$\sigma_{\delta-in}$ (%)	$\sigma_{\delta-out}$ (%)	$\phi_{rf}/$ (°)	$R_{56}/$ mm
L1	0.136	0.344	0.87	0.87	0.16	1.53	-29	-
BC1	0.344	0.344	0.87	0.33	1.53	1.53	-	-31.5
L2	0.344	0.70	0.33	0.33	1.53	1.11	-29.8	-
BC2	0.70	0.70	0.33	0.12	1.15	1.15	-	-15
L3	0.70	1.18	0.12	0.12	1.15	0.15	40	-

主加速器出口电子束纵向分布图如下,峰值电流

* 国家自然科学基金(10575114)资助
1) E-mail: zhuxw@mail.ihep.ac.cn

大于 600A, 归一化发射度小于 2.5mm·mrad.

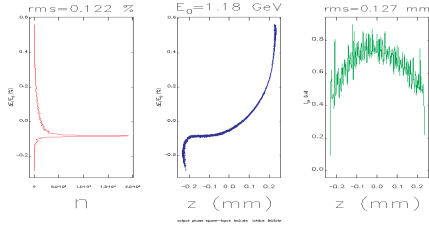


图 2 电子纵向分布图

3 电子束团压缩器

由于 A5 为正电子打靶节, A5, A6, A55 为正电子俘获加速段, 为了保证正电子的正常运行, 又尽可能在较低能量处安装第一级磁压缩器, 使束团较早进入短束团状态以减小横向尾场带来的发射度增长. 选择拆除 A10 以安装第一级磁压缩器 (BC1), A10 前后各有一组三合一聚焦四极铁. 第二级磁压缩器 (BC2) 拟安装在 A24 后、A27 前处 (拆除 A25, A26 及一组三合一聚焦四极铁). 第一级磁压缩器 BC1 长 3m, 参数见表 2.

表 2 BC1 参数

参数	数值
能量/MeV	344
能散(%)	1.53
束团压缩比/mm	2
动量压缩因子(%)	-31.5
总长/mm	3.05
二极铁总数/块	4
二极铁长度/m	0.2
偏转角/(°)	7.28

BC2 总长 7.77m, 也是一个由 4 块二极铁组成的 chicane, 它将束团长度从 0.335mm(rms) 压缩到 0.12mm(rms), BC2 的长度应最小化, 尽可能少拆 BEPC II 直线部分, 因此在 BC2 前后的加速节上套装上三合一四极磁铁, 用来匹配 twiss 参数, 同时节省了空间位置. BC2 的动量压缩因子 R_{56} 为 -15mm, 由 BC2 引起的 L3 的相位延迟为 25.7°, BC2 参数见表 3.

表 3 BC2 参数

参数	数值
能量/MeV	700
能散(%)	1.11
束团压缩比/mm	3
动量压缩因子(%)	-31.5
总长/mm	7.77
二极铁总数/块	4
二极铁长度/m	0.2
偏转角/(°)	3

4 X-band 谐波补偿结构

电子束在加速过程中, 电子束纵向相空间中能量-时间的相关并非完全线性的, 而是随着加速相位的不同引入了不同大小的高阶非线性项, 其中最主要为二阶非线性项. 正因为如此, 导致电子束团在经过压缩后电子束纵向分布严重不均匀, 出现了很高的峰值电流, 而这大的峰值电流又导致了在压缩过程中 CSR 效应加重, 从而导致了横向发射度的增长和局部能散的变坏.

利用一个工作在 11.424GHz 的 X 波段的加速段^[1], 可以补偿在 L0 和 L1 中产生的二阶非线性项. 由于 BTF 的直线加速段是寄生在 BEPC II 的注入器上, 在现有直线上没有空间安装 X 波段加速段. 在设计中, 将 X 波段加速段放在新增的注入器后. 模拟计算结果表明这种布局同样能对 RF 二阶非线性项进行很好补偿. 引入 X 波段加速段对 RF 二阶非线性项进行补偿后, 束团的纵向分布变得均匀, 由 CSR 效应引起的横向发射度基本上没有增长.

5 束流输运线

在 BEPC II 直线加速器上需要增加两段束流输运线, 低能输运线 (DL1) 将电子从离轴的光注入器输运到主加速器, 高能输运线 (DL2) 将电子从主加速器输运到波荡器, 同时避免波荡器受可能出现的束晕和暗电流的破坏.

低能输运线 DL1 的功能是传输 136MeV 的电子束团从光注入器注入到 BEPC 直线主加速器, DL1 设计为简单的消色散输运线, 完成以下功能: 完成 35° 水平偏转、不改变束团长度 (准等时, $R_{56}=6.3\text{mm}$)、发射度增长小、提供色散段用作束团诊断. 满足这些要求的一个简单系统是由二块二极铁 (每块偏转 17.5°) 组成的线性消色散节.

高能输运线 DL2 的功能是将 1.18GeV 的电子束团从主加速器输运到波荡器, 完成以下功能: 消除来自 linac 的 dark current, 完成 8° 偏转以引出束流、引入二极铁用作束流诊断, 没有大的发射度增长 (CSR 效应)、调节 beta 函数完成 undulator-L3 匹配.

由于 BEPC II 直线加速器出口公用段长约 30m, DL2 设计长约 20m, BTF 波荡器长约 20m, 束团须提前引出, 可在 A46 后拆除两节加速管留出 6m 长的空间

以引出束流. BEPC II 直线加速器隧道宽约2m, DL2用4块水平偏转铁, 每块偏转 2° , 前两块偏转铁将束流向加速器外侧偏转 4° , 后两块偏转铁向内侧偏转 4° , 最终束流与主加速器平行引出到波荡器, 束流中心轴线与主加速器中心轴线距离0.85m, 四块二极铁中间有6块四极铁共同组成一个消色散系统, 二极铁长度1.8m, $R_{56} \approx 5.5\text{mm}$, 在能散0.15%情形下, DL2接近等时, 由CSR导致的发射度增长约2%, ISR导致的发射度增长在能量1.18GeV时忽略不计.

6 光注入器

光注入器由BNL1.6腔S-Band光阴极微波电子枪加两节S-Band加速结构所组成, 其能产生能量153MeV、能散0.14%、归一化发射度 $1-1.5\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、束团长度10ps、电量1nC的电子束团, 见图3. 拆除A2与A3之间的一组三合一聚焦四极铁, 光阴极微波电子枪出来的束流经过低能输运线DL1后从这里注入到A3进入直线加速器.

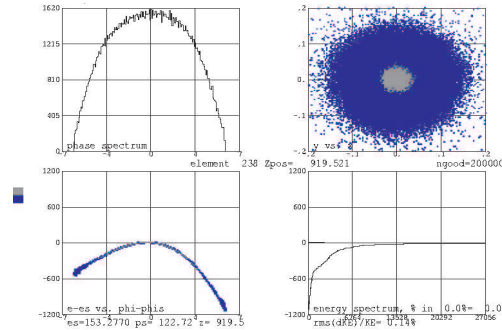


图3 光注入器出口典型相分布图

7 结论

经过一系列的措: 新挖隧道安装光注入器以及低能输运线, 拆除三节加速管安装磁压缩器, 拆除两节加速管安装高能输运线, 模拟结果表明BTF能提供满足BTF HGHG FEL要求的能量1.18GeV、能散0.15%、归一化小于 $2.5\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 的电子束团, 同时不影响BEPC II Linac的正常运行.

参考文献(References)

- 1 LCLS Concept Design Report, SLAC-R-593, 2002

Concept Design of the BTF Accelerator*

ZHU Xiong-Wei^{1;1)} PEI Guo-Xi¹ CHI Yun-Long¹ DAI Jian-Ping¹ CHEN Sen-Yu¹
DU Ying-Chao² HE Xiao-Zhong² HUANG Wen-Hui² LIN Yu-Zheng² TANG Chuan-Xiang²

1 (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2 (Accelerator Lab., Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Beijing X-ray free electron laser test facility (BTF) will reside in the BEPC II Linac, which is the best electron linac in China. The BTF will not use the existing DC gun pre-injector, but use photoinjector to obliquely inject beam to the main linac of the BEPC II. At the same time, three accelerator sections will be removed in order to install two magnetic compressors to compress the electron bunch. After the accelerator section A46, the beam is extracted and injected to the undulator through high energy transport line. The BTF will provide the electron beam with the energy of 1.18GeV, the energy spread of 0.15%, and the normalized emittance of less than $2.5\text{mm}\cdot\text{mrad}$.

Key words X-ray FEL, photoinjector, magnetic compressor, transport line

*Supported by NSFC(10575114)

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