

文章编号: 1001-4322(2008)01-0135-05

# 100 MeV 电子直线加速器的物理设计\*

顾 强, 戴建枰, 戴志敏, 赵振堂

(中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800)

**摘 要:** 能量为 100 MeV 左右的高性能电子直线加速器是第三代同步辐射光源注入器和自由电子激光注入器的重要组成部分, 采用热阴极栅控电子枪、聚束系统和 4 根 SLAC 型加速管作为加速器主体结构, 一套 45 MW 的速调管调制器系统和波导系统作为微波功率源系统。设计中, 使用了国际通用的模拟软件对加速器的动力学特性进行了数值模拟和参数优化, 电子束能量达到 100 MeV 以上, 能散小于 1%, 归一化发射度小于 30 mm · mrad。

**关键词:** 电子直线加速器; 粒子动力学; 数值模拟; 参数优化

**中图分类号:** TL53 **文献标识码:** A

能量为 100 MeV 左右的高性能电子直线加速器是第三代同步辐射光源注入器和紫外波段自由电子激光注入器的重要组成部分。为了掌握建造上海光源注入器和上海深紫外自由电子激光注入器所需的关键技术, 上海应用物理研究所在 2002~2005 年期间研制了一台 100 MeV 电子直线加速器, 这台电子直线加速器的束线主要由热阴极栅控电子枪、聚束系统和 4 根 SLAC 型加速管以及一套 45 MW 的 S 波段速调管微波功率系统组成<sup>[1]</sup>。该加速器已于 2005 年经完成调束, 各项指标均达到了设计要求。本文报告这台 100 MeV 直线加速器的物理设计, 包括电子枪、聚束器和主加速器的动力学模拟计算结果。

## 1 直线加速器的优化和粒子动力学研究

100 MeV 电子直线加速器的总体设计指标如表 1 所示, 其粒子动力学的研究和优化主要用 EGUN 计算电子枪的动力学<sup>[2]</sup>; 将其计算结果作为用 PARMELA 输入<sup>[3]</sup>, 进行直线加速器的动力学跟踪; 同时, 用 TRANSPORT 优化直线加速器的四极磁铁参数<sup>[4]</sup>。

表 1 100 MeV 直线加速器总体设计指标  
Table 1 Main parameters of the 100 MeV linac

	energy /MeV	energy spread /%	non-normalized emittance /(mm · mrad)	bunch length /ns	average current /mA
single bunch mode	100	<1	<1	1	1.2
multi-bunch mode	100	<1	<1	100~300	5.0~180.0

### 1.1 电子枪

直线加速器的电子枪采用上海光源 SSRF 预制研究中成功研制的栅控热阴极电子枪<sup>[5]</sup>。近年来同步辐射光源的 Top-up 注入模式要求其注入器可以提供稳定的弱束流, 这就进一步要求电子枪能以弱流强模式运行。表 2 列出了 EGUN 计算得到的 3 种运行模式电子束流发射度和特征长度的大小。

表 2 EGUN 计算得到的 3 种运行模式电子枪的发射度和束斑大小  
Table 2 Electron beam parameters of three electron gun operation modes simulated by EGUN

	peak current/A	normalized emittance/(mm · mrad)	characteristic length/m
single bunch mode	2.00	4.40	0.500
multi-bunch mode	1.00	6.00	0.020
low charge mode	0.09	7.85	0.005

### 1.2 聚束系统的优化

聚束系统由预聚束器、聚束器、单透镜和磁场线圈组成, 其作用是将电子枪发出的电子束流进行纵向聚束,

\* 收稿日期: 2007-09-12; 修订日期: 2007-12-05  
作者简介: 顾 强 (1975—), 男, 博士研究生, 主要从事加速器技术研究; guqiang@sinap. ac. cn.

并加速到接近光速;同时控制发射度在聚束过程中的增长。聚束系统的优化主要包括预聚束器输入功率的优化、聚束器相对于预聚束器的相位的优化以及磁场分布的优化等。由于预聚束器和聚束器等关键部件已经在 SSRF 预制研究阶段研制成功<sup>[6]</sup>,所以在物理设计中采用了基于实物的模型。聚束系统的布局如图 1 所示。

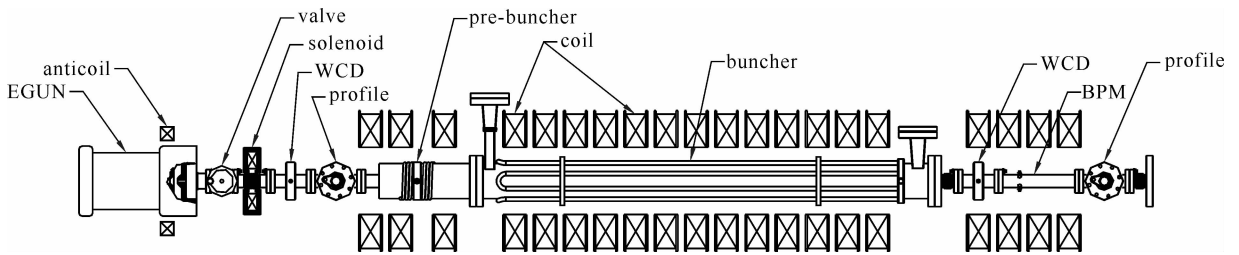


Fig. 1 Layout of the electron gun and the bunching system

图 1 电子枪和聚束系统布局图

图 2 给出了考虑相对论效应、忽略空间电荷效应时,预聚束器在不同的调制电压下产生的聚束结果。可以看出,调制电压在 15 kV 左右时,预聚束器的聚束效果较好。图 3 和图 4 是聚束器在 7 MW 的输入功率下,不考虑空间电荷力,不同能量(中心能量 100 kV)和相位的电子聚束情况。从图中可以看出,对于均匀束流,有 50% 以上的束流被汇聚到相位  $\pm 30^\circ$ ,能散  $\pm 3\%$  的区间内;同时,预聚束器调制电压越高,俘获相位越宽,能散越大。

磁场设计的目的是约束低能电子束的包络,使其高效传输;减小低能电子束在漂移空间中的发射度的增长;补偿高频场的散焦力。同时,必须注意调节反向线圈,使得电子枪阴极处的磁场为 0。

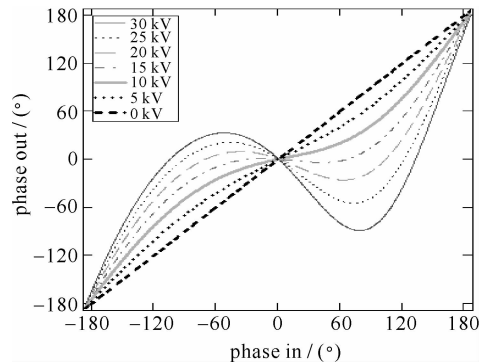


Fig. 2 Bunching effect with various voltage of the pre-buncher

图 2 不同预聚束器调制电压下的预聚束器出口的聚束效果

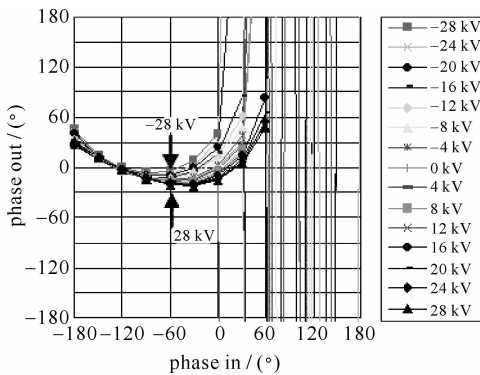


Fig. 3 Electron beam phase output vs phase input of the buncher

图 3 聚束器的粒子输入输出相位分布

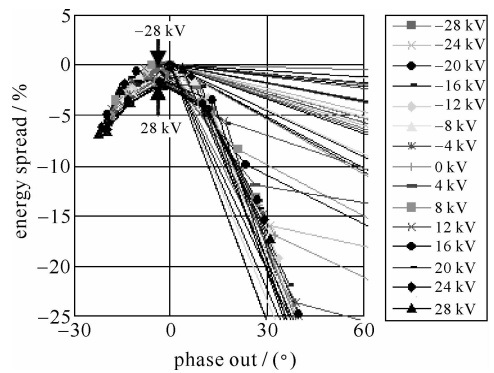


Fig. 4 Electron beam phase distribution and energy spread at buncher output

图 4 聚束器的粒子输出相位能散分布

为了约束电子束包络,在电子枪的出口放置一个短透镜。假设短透镜是均匀磁场,其产生的聚焦作用可以表示为<sup>[8]</sup>

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{e}{2m_e c \beta \gamma} \right)^2 B^2 l \quad (1)$$

式中: $f$  是需要的焦距; $m_e$  是电子质量; $c$  是光速; $e$  是电子的电荷量; $\beta \gamma$  是归一化的电子动能; $B$  是短透镜的磁场强度; $l$  是短透镜磁场的长度。当电子束的动能为 100 kV,所需要的焦距是 10 cm,短透镜磁场长度为 5 cm 进行估算, $B_0 = 0.0316$  T。

为了抵消聚束器中横向散焦的高频场,在聚束系统和第一根加速管上套上聚焦线圈,所需磁场可以表示为<sup>[8]</sup>

$$B_0 = \frac{2\sqrt{\pi}m_e c}{e} \sqrt{\frac{eE_0 \lambda}{m_e c^2 \beta \gamma}} \quad (2)$$

式中:  $E_0$  是微波加速场强;  $\lambda$  是微波的波长。当电子束的动能为 100 kV, 微波加速场强是 11 MV/m 时, 所需要的磁场 0.107 T。

由于横向发射度对纵向聚束没有显著的影响, 所以在用 PARMELA 进行优化时, 我们分别对横向发射度和纵向聚束分步骤进行了优化: 首先通过调节预聚束器的调制电压和预聚束器和聚束器的相对相位, 来优化聚束系统俘获束团的能散和束长; 然后通过调节磁场分布, 来优化聚束系统俘获束团的发射度。

对于不同的预聚束器的调制电压和预聚束器和聚束器的相对相位, 我们可以获得不同的俘获束团的束长、能散以及聚束系统的俘获效率。以单束团模式为例, 图 5, 6 分别是在不同的预聚束器调制电压和聚束器相对相位下, 对应的俘获束团的束长、能散。综合考虑束团长度和能散, 预聚束器调制电压优化在 20 kV, 预聚束器和聚束器的相对相位优化在  $110^\circ$ 。

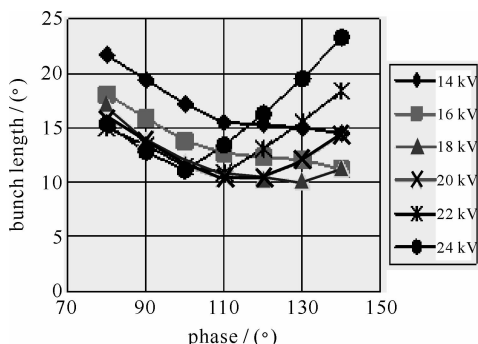


Fig. 5 Bunch length of bunched beam with different voltage and phase

图 5 聚束系统俘获束团的束长的变化

由于短透镜决定了进入聚束系统的束流包络, 从而对发射度变化产生重要影响; 第一个聚焦线圈位于预聚束器中心的下游, 此处束流相对能散最大, 磁场大小直接影响进入聚束器束流的初始发射度大小, 所以, 我们将直线加速器磁场分布的优化集中在短透镜磁场和第一个聚焦线圈的磁场上, 优化的目标是发射度最小。对于不同运行模式, 电子枪的束流参数不同, 相应的优化的聚焦磁场分布也有所不同。同样, 以单束团模式为例, 改变短透镜和第一聚焦线圈的电流, 通过模拟计算可以得到不同的发射度, 如图 7 所示。从图中可以看到, 短透镜和第一线圈优化电流分别应为 1 250 和 8 000 A · 匝。

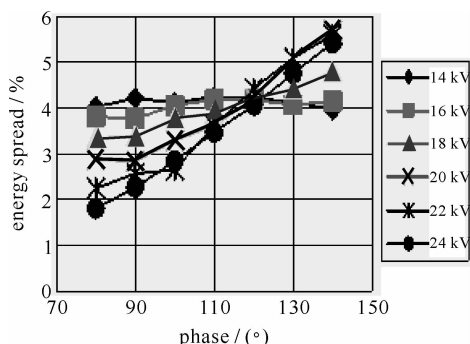


Fig. 6 Energy spread of bunched beam with different voltage and phase

图 6 聚束系统俘获束团的能散的变化

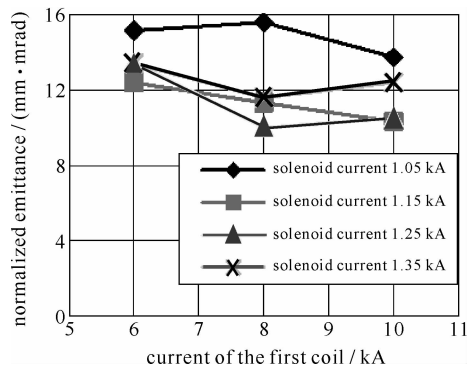


Fig. 7 Emittance optimization using focusing coils

图 7 聚束系统发射度的变化

PARMELA 计算的不同运行模式下聚束器出口的束流性能如表 3 所示, 其中弱流模式的俘获很低, 这是因为束流在电子枪后的漂移过程中, 部分束流损失在真空管壁上。

表 3 不同运行模式聚束器出口的束流性能 (PARMELA 计算结果)

Table 3 Beam parameters at the buncher output (simulated by PARMELA)

	capture efficiency	energy	micro-bunch length	energy spread	normalized emittance
	/%	/MeV	/ps	/%	/(mm · mrad)
single bunch mode	94	14.5	10.3	$\pm 1.8$	10.0
multi-bunch mode	94	14.5	10.3	$\pm 1.8$	17.6
low charge mode	33	14.5	9.8	$\pm 1.7$	27.2

### 1.3 主加速段的优化

主加速段共由 4 根 SLAC 型的等梯度加速管组成<sup>[7]</sup>, 如图 8 所示。其中第 1 根加速管前半段有聚焦线圈以抵消加速管中的横向微波散焦场; 在第 2 根加速管和第 3 根加速管之间和加速器出口共有两组三合一四极磁铁组对电子束聚焦; 此外, 在第 1 组三合一四极磁铁后有一个 3 m 左右的预留段, 用于以后安放磁压缩系统进行束团长度磁压缩实验。

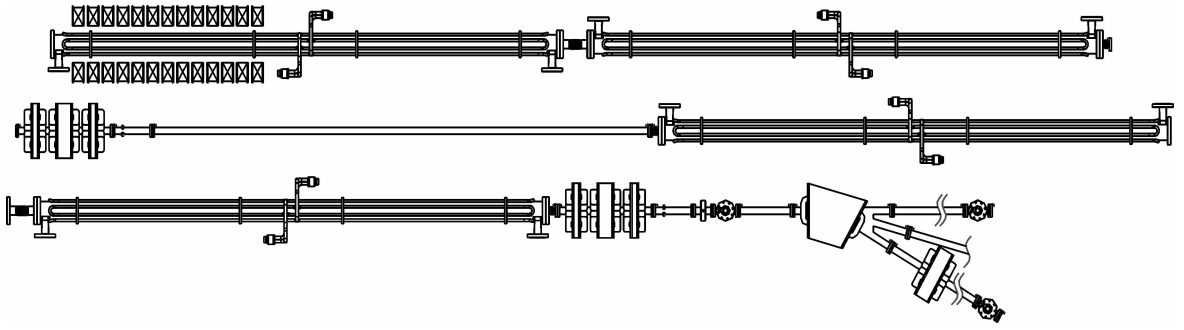


Fig. 8 Layout of the main linac

图 8 主加速段的布局

对束流从聚束器出口到加速器出口的运动过程,我们把它分为两步,首先用 PARMELA 模拟到第 1 组四极磁铁组前,然后用 TRANSPORT 程序进行束包络的匹配,最后用 PARMELA 程序进行了全段的校核计算。第 1 根加速管上的聚焦线圈和两组三合一四极磁铁组的聚焦磁场同时进行了优化。表 4 列出 PARMELA 计算得到的 3 种运行模式加速器出口的束流性能。比较表 3 和表 4 可以看出,主加速段束流发射度有不同程度的增长;同时,由于束流能量的增加,相对能散变小。

表 4 不同运行模式加速器出口的束流性能(PARMELA 计算结果)

Table 4 Beam parameters at the linac output (simulated by PARMELA)

	capture efficiency /%	energy /MeV	micro-bunch length /ps	energy spread /%	normalized emittance /(mm · mrad)
single bunch mode	87	123.9	10.1	±0.24	22.8
multi-bunch mode	83	123.9	10.1	±0.25	24.5
low charge mode	20	123.9	10.0	±0.25	29.4

## 2 束流负载效应及补偿

由于动力学模拟只是针对单个束团,当直线加速器运行在多束团工作模式时,应当考虑束流负载效应<sup>[8]</sup>。为了使强流多束团模式电子束的能散达到设计指标,使整个宏脉冲内的所有束团都能顺利地通过低能输运线注入增强器,必须对束流负载效应进行补偿。

通过提前注入电子束可以对束流负载作一定的补偿。图 9 给出了多束团模式在提前注入补偿后不同流强和宏脉冲长度情况下,加速管的能量增益。图 10 则给出了多束团模式在提前注入补偿后不同流强和宏脉冲长度情况下,束流的最大能散。可以看出对于不同的束流长度和流强,通过适当地提前注入,可以使多束团模式的能散控制在 1% 以内。

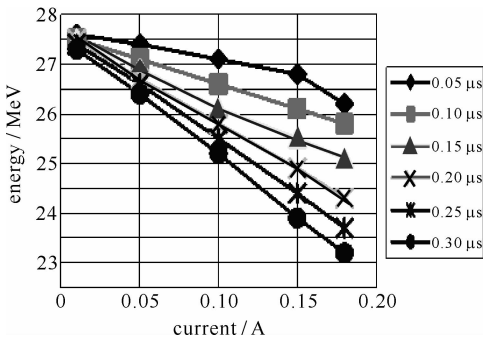


Fig. 9 Beam energy after compensation

图 9 补偿后束流的最大能量

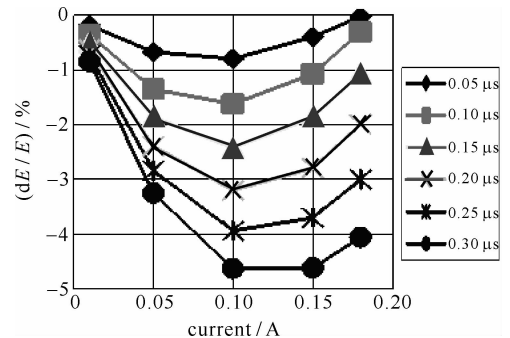


Fig. 10 Beam energy spread after compensation

图 10 补偿后束流的最大能散

## 3 结 论

本文报道了一台 100 MeV 直线加速器的物理设计,主要涉及了聚束系统和主加速系统的优化和模拟计算。研究表明,我们的设计方案能够很好地满足设计目标要求。2005 年的调束结果表明,这台直线加速器具有良好的动力学性能,达到和优于设计所确定的性能指标。

**参考文献:**

- [1] 陈森玉, 赵振堂, 徐洪杰, 等. 上海同步辐射装置概念设计报告[R]. 上海: 中国科学院上海原子核研究所, 2001. (Chen S Y, Zhao Z T, Xu H J, et al. Conceptual design report of Shanghai Synchrotron Radiation Facility. Shanghai: Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences, 2001)
- [2] Herrmannsfeldt W B. EGUN—an electron optics and gun design program[R]. SLAC Report-331, 1988.
- [3] Young L M. PARMELA[CP]. LA-UR-96-1835, 1998.
- [4] Carey D C. Third-order transport with MAD input—a computer program for designing charged particle beam transport systems[CP]. Fermilab-Pub-98-310, 1998.
- [5] Sheng S G, Lin G Q, Gu Q, et al. Electron gun for SSRF[J]. *Nuclear Techniques*, 2003, **14**(1):20-23.
- [6] 戴建枰, 罗应雄, 李德明, 等. SSRF 直线加速器聚束器的研制[J]. 核技术, 2003, **26**(7):497-500. (Dai J P, Luo Y X, Li D M, et al. Development of the bunching system of the SSRF Linac. *Nuclear Techniques*, 2003, **26**(7):497-500)
- [7] 任文彬, 吴文泰, 罗应雄, 等. 北京正负电子对撞机研制报告[R]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 1989. (Ren W B, Wu W T, Luo Y X, et al. Development report of Beijing electron-positron collider. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 1989)
- [8] 姚充国. 电子直线加速器[M]. 北京: 科学出版社, 1986. (Yao C G. Electron linear accelerator. Beijing: Science Press, 1986)

## Physical design of 100 MeV electron linac

GU Qiang, DAI Jian-ping, DAI Zhi-min, ZHAO Zhen-tang

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, P.O. Box 800-204, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** The main part of the 100 MeV electron linac consists of a thermionic electron gun, a bunching system and 4 SLAC type accelerating tubes. The bunching system and the accelerating tubes are fed by a 45 MW S-band microwave power source. The beam dynamics of the linac is studied and optimized using several beam dynamics simulation programs. After optimization, the beam energy, energy spread and the normalized emittance is designed to be greater than 100 MeV, less than 1% and 30 mm · mrad, respectively.

**Key words:** Linac; Beam dynamics; Numerical simulation; Parameters optimization