

# BEPC II 正电子源物理设计

苟卫平 裴国玺

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 正电子产额是正电子源的一个重要物理量,它的高低直接关系到加速器性能的优劣.此次 BEPC(北京正负电子对撞机)改进,要全面升级到 BEPC II,正电子源系统的许多参数都要发生变化,必须对系统的各个部件参数重新优化设计,从而得到最大产额.本文采用全新方法,将 EGS4(Electron-Gamma Shower)程序包和 PARMELA(Phase and Radial Motion in Electron Linear Accelerator)程序紧密结合起来,完成正电子源优化设计工作.首先使用程序包 EGS4,对高能电子在介质中的电磁级联过程进行了模拟,优化了靶厚度,讨论了影响打靶产额的因素.然后用 PARMELA 程序,接收 EGS4 的计算结果,对正电子在靶后的匹配、聚焦和加速系统中的运动逐个跟踪模拟,讨论了俘获节相位的选取,得到在正电源出口处的产额.

**关键词** 正电子源 匹配系统 俘获节 产额

## 1 引言

正电子的产生是基于高能电子轰击高原子序数金属或合金而产生的电磁级联过程,这种以簇射形式产生的正电子束能谱宽,横向发散严重,很难被后面的加速系统直接俘获.在正电子产生靶后面必须要有一匹配段,使从靶上出来的尺寸小、张角大的正电子束转换成张角小、尺寸能被后面加速系统接收的正电子束.正电子源就是性能良好的正电子束产生系统,包括正电子转换靶、靶后匹配和聚焦加速系统.正电子源靶后匹配主要用两种方式<sup>[1]</sup>,1/4 波长变换器和绝热匹配系统.

图 1 是 BEPC 正电子源示意图,它由正电子产生靶(钨)、匹配过渡线圈及套在 3 节等梯度加速管上的 9m 长均匀磁场聚焦线圈组成,这三节加速管由两台速调管提供功率.

1987 年 4 月首次在国内直线加速器上得到正电子束,曾一度得到过 9mA 的正电子束,产额( $e^+/e^- \cdot \text{GeV}^{-1}$ )也达到过 2.4% 的水平.后由于运行经费不足,不能及时更换老化部件,早期设计和运行也存在一定的问题,近年逐渐暴露并造成隐患,使得产额逐年降低.目前正电子流强只有 4—5mA,产额( $e^+/e^- \cdot \text{GeV}^{-1}$ )也只有 1.4%,不能满足 BEPC

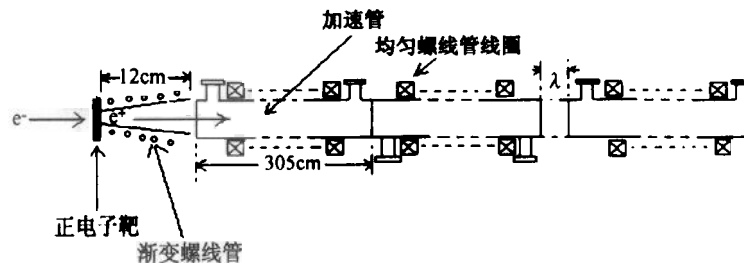


图 1 BEPC 正电子源示意图

稳定、快速注入的需求,构成 BEPC 目前运行和下一步发展(BEPC II)的瓶颈,必须对其进行彻底的改造.

BEPC II 设计指标要求为:正电子源末端产额( $e^+/e^- \cdot \text{GeV}^{-1}$ )3.8%;在直线加速器末端产额( $e^+/e^- \cdot \text{GeV}^{-1}$ )2.7%;正电子流强 30mA;注入速率 30mA/min. 要达到这些设计指标,现有设备水平根本无法满足要求. 为此我们要做以下改进:打靶电子束能量从 150MeV 提高到 240MeV;打靶电子束流强从 2.5A 提高到 4.5A;匹配绝热渐变磁场由  $2.6\text{T} \searrow 0.35\text{T}$  变为  $4.5\text{T} \searrow 0.5\text{T}$ . 我们将采用 EGS4 与 PARMELA 结合的方法,完成 BEPC II 正电子源物理设计,最终得到正电子源末端的产额.

## 2 BEPC II 靶参数优化

对于正电子转化靶,最先需要考虑的是靶材料和靶厚度. 现各大实验室多采用钨和铌钨合金靶<sup>[2]</sup>,后者主要是考虑到它的机械强度. BEPC 每个脉冲的打靶束流功率为 0.92W,采用纯钨靶, BEPC II 设计每个脉冲的打靶束流功率为 1.08W,与 BEPC 设计值差不多,因而也准备用纯钨靶. 另外经过计算,对于 BEPC II,纯钨靶也是能够满足机械强度的要求. 利用 EGS4 程序,我们可以对高能电子轰击钨靶,产生正电子的过程进行模拟计算,从而来选择在打靶电子能量为 240MeV 时, BEPC II 正电子源靶厚度,同时也可对影响产额的因素进行分析讨论.

### 2.1 靶厚度选择

EGS<sup>[3,4]</sup>是光子-电子在任意几何中耦合输运的蒙特卡罗模拟的通用软件包,由美国 Stanford Linear Accelerator Center 编写. 它可以模拟光子、电子(正或负电子)在任意元素、化合物和混合物中的辐射迁移,现在采用的是 EGS 程序的第 4 版.

用 240MeV 的电子轰击钨靶,事例数取 2 万,可以得到,在 0.75cm—0.85cm 之间有较平坦的极大分布,因此我们选 BEPC II 正电子源靶的厚度为 0.8cm.

### 2.2 打靶产生的正电子物理状态分析

打靶产生的正电子在相空间有很大的发射度,我们可以用 EGS4 来计算统计,得到正电子能谱、角度分布、以及随半径的分布. 打靶电子事例数  $N = 5000$ .

图 2(a) 是正电子的能谱. 我们可以看到正电子充满整个能量范围(0—100MeV), 在低能段很多, 随着能量增加, 电子数指数下降. 因此为了获得更多的正电子, 要把俘获能量选在低能段. 图 2(b) 是正电子径向分布, 与能量分布有类似的规律, 正电子主要集中在半径小的范围内, 随着半径增加, 电子数指数下降. 图 2(c) 是正电子的角分布, 可以看到在整个角空间(0°—90°)都存在正电子, 但主要集中在小角度范围内.

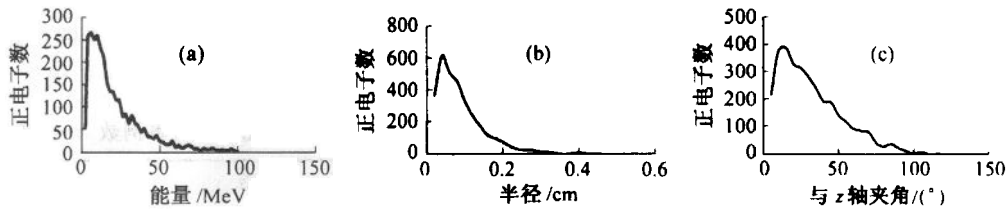


图 2 正电子相空间分布图

(a) 正电子的能谱; (b) 正电子沿径向分布; (c) 正电子的角分布.

### 2.3 提高正电子产额的因素讨论

正电子产额不仅取决于本系统的参数选取, 还与打靶束流截面有很大的关系, 在设计时需要充分考虑. 在用 EGS4 计算产额时, 根据系统的接受度, 选择严格的 EGS4 输出截断条件. 对于 BEPC II 设计打靶能量  $E = 240\text{MeV}$ , 考虑两组截断条件值: (1) BEPC II 设计值. 接受度  $A_e = 0.31\pi(\text{MeV}/c) \cdot \text{cm}$ , 截断条件为: 打靶出来的正电子束流半径  $R \leq 0.22\text{cm}$ ; 横向动量  $P_T \leq 1.41\text{MeV}/c$ ; 能量范围 (0.7—14MeV). (2) 对比参考值. 接受度  $A_e = 0.22\pi(\text{MeV}/c) \cdot \text{cm}$  (原 BEPC 设计值), 截断条件为: 正电子束流半径  $R \leq 0.22\text{cm}$ ; 横向动量  $P_T \leq 1.0\text{MeV}/c$ ; 能量范围 (0.7—14MeV). 在不同的束流截面下, EGS4 计算结果如图 3, 可以看到正电子的产额随着打靶束流截面变大急剧变小. 同时也可以看到, 对接受度大的系统, 产额对打靶束流截面, 反应更为明显. 因此如果我们能尽可能减小打靶束流截面, 正电子的产额将会有很大的提高, 这是我们今后要努力的方向.

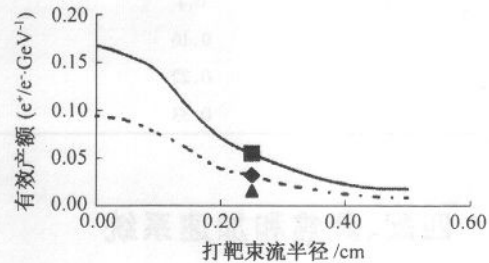


图 3 不同接受度产额与入射束流截面半径关系  
——0.31, - - - -0.22, ▲ 现运行值.

对于提高正电子产额, 靶后匹配系统参数的选取也是非常关键的因素, 并且取值与打靶束流截面的大小有密切的关系. 从转换靶出来的正电子束是充满整个相空间的, 但一定的相空间内, 正电子数对打靶电子束流截面的依赖性很大. 考虑 BEPC II 设计加速系统的接受度为  $0.31\pi(\text{MeV}/c) \cdot \text{cm}$ , 表 1 是 EGS4 的计算结果, 它反映了正电子相空间分布及其随打靶束流截面的变化. 可以看到打靶电子束流截面越小, 正电子集中在越扁的竖椭圆内, 随着打靶电子束流截面的增加, 正电子在相空间内的分布也趋于均匀.

为了获得更多的正电子, 首先要减小打靶电子的束流截面, 然后在此截面下, 用沿轴

渐变的轴向磁场  $B_z$  选定正电子数密度最大相空间椭圆(由  $B_{z, \max}$  决定<sup>[5]</sup>),并限制转换成同加速管接受度形成一致的相空间. 举例来说,如打靶电子束流截面  $r = 0.1\text{cm}$ ,可以看到在相椭圆(0.16cm, 1.94MeV/c)内,正电子密度最大,此时要取  $B_{z, \max} = 8.5\text{T}$ . BEPC II 设计打靶电子束流截面  $r = 0.25\text{cm}$ ,可以看到在相椭圆(0.22cm, 1.41MeV/c)内,正电子密度最大,此时要取  $B_{z, \max} = 4.5\text{T}$ ,不光如此,在打靶电子束流截面  $r = 0.2\text{cm}$  时,在这一椭圆内的正电子密度也是最大的,因此如打靶束流截面减小了,这一磁场仍然可得到较大的产额. 权衡各方面的因素我们认为取  $B_{z, \max} = 4.5\text{T}$  是比较合适的,这也是我们预期的设计值.

表 1 正电子相空间分布及其随打靶束流截面的变化 (事例数  $N = 20000$ )

打靶电子束流 截面半径/cm	正电子束流 最大半径/cm	最大横向 动量/(MeV/c)	绝热渐变磁场 最大值/T	正电子数目
0.1	0.1	3.1	18	690
	0.16	1.94	8.5	820
	0.22	1.41	4.5	690
	0.33	0.94	2.0	406
0.2	0.1	3.1	18	244
	0.16	1.94	8.5	345
	0.22	1.41	4.5	383
	0.33	0.94	2.0	301
0.25	0.1	3.1	18	170
	0.16	1.94	8.5	243
	0.22	1.41	4.5	265
	0.33	0.94	2.0	233

### 3 匹配、聚焦和加速系统

电子束打靶产生的正电子只有经过正确的聚焦和加速后,才能提供尽可能大的正电子流强,最终实现产额的提高. 本文用 PARMELA<sup>[6]</sup> 程序完成这一过程,用单粒子输入数据类型,接收 EGS4 的计算结果,对每一个正电子逐个进行跟踪,再经过纵向接受度的筛选最终得到正电子源末端产额. 取三节加速管的轴向场都为 12MV/m. 为了保证所有可能被系统俘获的正电子都被 EGS4 选出来,对 EGS4 输出数据的截断条件,尽量取大些,选系统的接受度  $Ae = 0.6\pi(\text{MeV}/c) \cdot \text{cm}$ ,能量范围(0.7—30MeV).

#### 3.1 磁场模拟

对于匹配聚焦的渐变螺线管场,以及后面加速管内均匀螺线管场都可以用 PARMELA 中的 COIL 来模拟,每厘米排一个. 图 4 是 10cm 长的匹配绝热渐变磁场的模拟结果,磁场从最大 4.5T 逐渐变到最小 0.5T,可以看到模拟的结果都是比较理想的<sup>[5]</sup>. 也可以模拟出接近理想的 0.5T 均匀螺线管磁场.

### 3.2 俘获节相位选取

在直线加速器出口处,对正电子束团纵向发射度的要求是:在 1.55GeV 时,相对于中心粒子,能散  $\leq \pm 0.5\%$ ,即能量差  $\leq \pm 7.75\text{MeV}$ ;相散  $\leq \pm 5^\circ$ . 对于光速粒子来说,在束团相散很小时,在整个加速过程中能量差基本不变. 可得到在正电子源末端对束流纵向发射度的要求是:相对于中心粒子,相散:  $\Delta\Phi \leq \pm 5^\circ$ ;能量差:  $\Delta E \leq \pm 7.75\text{MeV}$ . 而从转换靶出来的正电子能散很大,能量也不是很高,一般为几个 MeV,会滑相,因此如果不进行纵向聚束,正电子的相散最终会很大,无法被后面的加速系统接收. 我们采用的方法是先减速后加速达到纵向聚束的目的. 为满足这一要求,俘获节(靶后第一节加速管)相位的选取是非常关键的因素. 为此选 3 个试验粒子,根据对正电子能谱分析,选它们的能量分别为 1MeV,6MeV 和 13MeV,其中 6MeV 为参考粒子,另两个粒子相对于参考粒子的初相位为零,它们的  $x, x', y, y'$  也为零. 在不同的俘获节相位下,计算经过第一节加速管后这 3 个粒子的相位关系. 图 5 是计算结果. 可以看到在  $-90^\circ$  到  $-40^\circ$  范围内,这 3 个粒子的相差较小. 在  $-50^\circ$  有最小值,我们就选它为俘获节的相位.

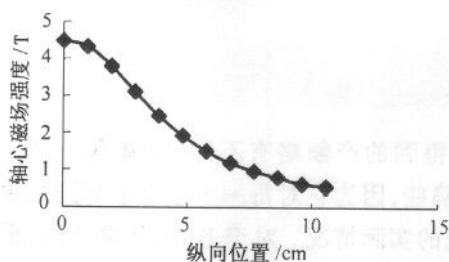


图 4 匹配绝热渐变磁场

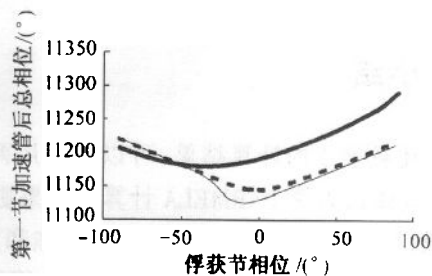


图 5 通过第一节加速管后 3 个粒子总相位与俘获节相位关系  
- - - 6MeV(参考粒子), — 13MeV,  
—— 1MeV.

### 3.3 计算结果

通过三节加速管后正电子束流的横向发射度及发射度椭圆参数见表 2(有效值,包括 90% 的粒子). 经 PARMELA 计算,可以通过靶后三节加速管的正电子只是满足了横向接受度的要求,只有同时满足纵向接受度要求的正电子才能最终被系统俘获. 图 6(a)是通过三节加速管后正电子能谱,图 6(b)是通过三节加速管后正电子总相分布. 初始能量为 6MeV 的参考粒子,最后的能量和总相位分别为  $(87.7\text{MeV}, 32196.4^\circ)$ ,如果取它为中心粒子,可以看到在  $(87.7 \pm 7.75)\text{MeV}$ , 及  $(32196.4 \pm 5)^\circ$  范围内,基本上可以得到最多的正电子数,因此我们取参考粒子作为进行纵向接受度条件筛选的中心粒子. 表 3 列出了用这种方法计算的结果,同时也列出了用 EGS4 计算的结果. 图 6(c)正电子数目沿纵向衰减.

表 2 通过三节加速管后束流的横向发射度及发射度椭圆参数

	$\epsilon/(\text{cm} \cdot \text{mrad})$	$\alpha$	$\beta/(\text{cm}/\text{mrad})$
x 方向	5.308	-0.1646	0.12
y 方向	5.332	-0.1842	0.12

表 3 不同打靶能量不同接受度下正电子产额

		BEPC II 设计值	参考值	BEPC 原设计值	现运行值
打靶电子束团能量/MeV		240	240	150	150
系统接受度/ $(\pi(\text{MeV}/c) \cdot \text{cm})$		0.31	0.22	0.22	0.15
正电子源末端	PARMELA	5.25	3.48	3.7	1.47
产额/ $(e^+ / e^- \cdot \text{GeV}^{-1}) 10^{-2}$	EGS4	5.58	3.29	3.20	1.61

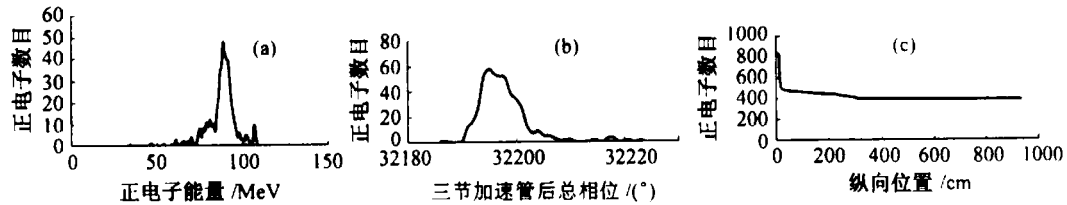


图 6 计算结果

(a) 通过三节加速管后正电子能谱; (b) 通过三节加速管后正电子总相分布; (c) 正电子数目沿纵向衰减.

## 4 小结

比较表 3 的计算结果, 可以看到用两种方法得到的产额略有不同, 但基本上是一致的. 应该认为用 PARMELA 计算的结果更真实准确些, 因为它对每一个正电子都进行跟踪模拟, 且具体考虑到了靶后匹配、聚焦和加速系统的实际情况. 对于 BEPC II 设计值, 采用  $4.5\text{T} \searrow 0.5\text{T}$  匹配绝热渐变磁场, 不论用那种方法计算, 在正电子源末端得到的产额 ( $e^+ / e^- \cdot \text{GeV}^{-1}$ ) 都会大于 5%, 考虑实际情况某些偶然因素的影响, 产额会略小一些, 但完全可以达到 3.8% 的 BEPC II 设计指标要求. 把 EGS4 和 PARMELA 结合起来, 非常好的解决了 BEPC II 正电子源物理设计的问题. 我们可以从电子打靶开始, 一直优化计算到靶后第三节加速管出口, 尤其是对靶后正电子匹配、聚焦和加速过程, 有了更准确直观的了解, 对影响俘获效率的因素考虑的更为全面, 因此这不失为一种好的优化设计方法.

## 参考文献 (References)

- 1 YAO Chong-Guo. Electron Linear Accelerator. Beijing: Science Publisher, 1986. 491—497 (in Chinese)  
(姚充国. 电子直线加速器. 北京: 科学出版社, 1986. 491—497)
- 2 Chehab R. Positron Sources. CERN Accelerator School, Fifth General Accelerator Physics Course, 1994. 2
- 3 Nelson W R. The EGS4 Code System. SLAC-265, UC-32, 1985
- 4 XU Shu-Yan. User Manual of EGS4 Software Package. Beijing, China Institute of Atomic Energy, 1994 (in Chinese)  
(许淑艳. EGS4 通用软件包用户使用指南. 北京, 中国原子能研究院, 1994)
- 5 Neal R B et al. The Stanford Two-Mile Accelerator. New York, 1968. 556—559
- 6 Young L M. PARMELA. Los Alamos National Laboratory Electron Linac Design Codes, PC Version, 1998

## Design of BEPC II Positron Source

GOU Wei-Ping PEI Guo-Xi

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** The positron yield is a very important parameter for positron source, and directly symbolizes the quality of an  $e^+$  accelerator. Now BEPC is planned to be upgraded into BEPC II, many parameters of positron source should be greatly improved to meet the requirements of intense  $e^+$  beam injection. We will optimize each section of the positron source to get the highest yield. EGS4 and PARMELA codes are used for positron source design. We use EGS4 code to simulate the electron-gamma shower of high-energy electrons in a medium, optimize target thickness, and analyze positron distributions in phase space. We discuss the positron yield's dependence on some system parameters. Then we use PARMELA code to track and simulate particle motion in the matching, focusing and accelerating systems, discuss how to choose capture section RF phase. Finally we get a reasonable positron yield at the end of positron source.

**Key words** positron source, matching system, capture section, yield