

# 北京正负电子对撞机 (BEPC) 正电子源的优化

裴国玺 谢家麟 周述 孙松岚

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

## 摘 要

本文在模拟计算和粒子跟踪的基础上,进行了 BEPC 正电子源的优化设计,作了实验检验,说明了实验与理论符合得很好。文中给出了一些重要的结论,如从束斑论证了电子枪流强增加的效果;从产额论证了过渡线圈和长螺线管的磁场强度及匹配磁场的峰值位置的影响;两个最佳注入相位的存在及其重要意义;以及实践证明正、负电子可以不必分离,因而无须使用昂贵、复杂的高频分离器等等。

## 一、引 言

自从 Stanford 于 1958 年在 Stanford Mark III 直线加速器上产生正电子束<sup>[1]</sup>之后,由于正电子束有许多用途<sup>[2]</sup>,世界上许多实验室都先后建立了正电子加速器<sup>[3-7,17]</sup>。在正电子加速器上,正电子源使用高能电子轰击金属靶,在电子-伽玛簇射的基础上产生正电子。由这种级联簇射产生的正电子有着很宽的能谱和很大的横向动量分量,并且非常难于被后面的加速系统所俘获。所以必须用一个前面很强后面逐渐减弱的纵向磁场,把横向动量( $p_x$ )很大而束流截面(半径  $r$ )很小的相空间,转换为横向动量较小横截面虽大但可被加速管的孔径所接收的相空间,然后,正电子束在合适的相位进入加速管得到加速,并受到相当长的均匀螺线管磁场的聚焦。此外,打靶电子束流的性能也将严重地影响正电子的产额  $\eta(I_{e+}/I_{e-}\text{GeV})$ , 这里  $I_{e+}$  是由加速系统所俘获的正电子束流强度,  $I_{e-}$  是轰击正电子靶的电子束流强度,它的能量则以 GeV 表示, GeV 同时也是它的能量单位。

BEPC 是由两束能量各为 2.8GeV 的正负电子实现对撞。为了达到设计的峰值亮度  $1.7 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  和适当的平均亮度,正电子产额必须足够强,在半小时之内应积累到  $3 \times 10^{11}$  个。正电子的优化就是在给定的条件下,选择系统的参数,以求获得最高产额。

正电子源是由正电子转换器(包括正电子靶和正电子透镜)、过渡线圈、聚焦线圈和加速部件等组成。图 1 是 BEPC 正电子源结构的示意图。正电子是由大约 150 MeV 的电子

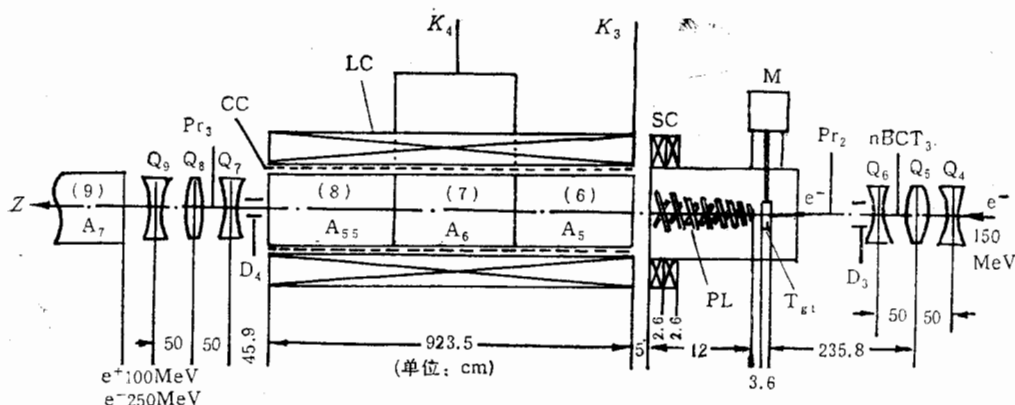


图 1 BEPC 正电子源结构示意图

- $A_i$ : 第  $i$  号加速管;(上面括号中的数字表示加速管的序号)  
 CC: 补偿线圈;  $D_i$ : 第  $i$  组导向磁铁;  
 $K_i$ : 第  $i$  个速调管; LC: 长螺线管聚焦线圈;  
 M: 步进电机; nBCT $_i$ : 第  $i$  个束流探测器;  
 PL: 正电子透镜(锥形线圈); Pr $_i$ : 第  $i$  个束流截面探测器;  
 $Q_i$ : 第  $i$  个四极透镜; SC: 过渡线圈;  
 Tgt: 正电子产生靶; z: 加速器轴和轴向坐标(在正电子源系统中,原点在出靶面)

轰击钨靶而产生。这一产生能量是权衡了许多因素而选择的,如,正电子的产额和它被加速到注入器终端时的能量、衰减时间、稳定性阈值和辐射损伤等等,以便达到较高的平均亮度<sup>[8]</sup>。正电子源中的钨靶尺寸为  $\phi 10 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ; 作正电子俘获用的锥形螺线管长 120mm,由 6kA 脉冲电源供电,磁场强度  $\sim 2.7\text{T}$ ;套在三节加速管上的 9m 长均匀磁场螺线管最高场强  $\sim 0.35\text{T}$ ;在锥形线圈和加速管之间还有过渡线圈,用来保证磁场逐渐下降。利用 SLAC 的 EGS 程序<sup>[9]</sup>和作者之一编制的其它程序<sup>[10]</sup>,计算得到在现有状态下正电子相对产额  $I_{e^+}/I_{e^-}$  为 0.39%,也计算了正电子产额与正电子源系统参数的相互关系,如正电子产额与加速场高频相位、电子轰击钨靶时的束流截面、脉冲磁场峰值位置的关系以及与过渡线圈励磁电流的关系等等。某些计算结果与实验进行了比较。测量的正电子相对产额为 0.32%,与计算结果相符合。束流测量实验证明,在现有情况下,无须分离电子与正电子(如研制昂贵、复杂的高频分离器)而能监测正电子束流。以上结果无论是对于提高正电子产额或者对于 BEPC 注入器的调整、运行都是有用的。

## 二、正电子产额计算与 BEPC 正电子源的优化

正电子产额的计算包括两个部份:模拟正电子在金属靶中的产生和跟踪正电子在匹配和加速系统中的运动。利用 EGS 程序模拟高能电子在金属靶中的电子-伽玛簇射,并把计算结果储存在一个数据过渡文件里。然后利用粒子跟踪程序跟踪正电子直到正电子源末端。这一方法的优点是精密度高,适合于正电子源设计与系统优化,但较复杂且需很多计算时间。

### 1. 正电子的产生

设用 150 MeV 电子(取 2 万个)轰击钨靶,在厚度为 6—7 mm 处出现正电子产额为最大的平坦分布。切割条件为:正电子束能量范围  $2 \leq E_{e^+} \leq 10$  MeV,束半径  $r \leq 2.2$  mm, 横向动量  $P_{\perp} \leq 0.68$  MeV/c 也计算了正电子的相空间分布以选择合适的匹配与聚焦系统。由电子-伽玛簇射可知,原子序数高的材料,所得到的正电子产额也高。但是正电子在这种材料里的散射也较为严重。实际上我们只关心发射度一定的那些正电子。计算了下述材料的正电子产额: W, Ta10W, Hf 10 W, Ta, 并发现 Ta 10 W, W 与 Ta 的正电子产额几乎相同,但是复合材料的机械强度比纯金属高<sup>[10]</sup>。为了找到打靶电子束与正电子产额的影响,计算了正电子产额与打靶电子束流截面和角度的关系,发现产额与束

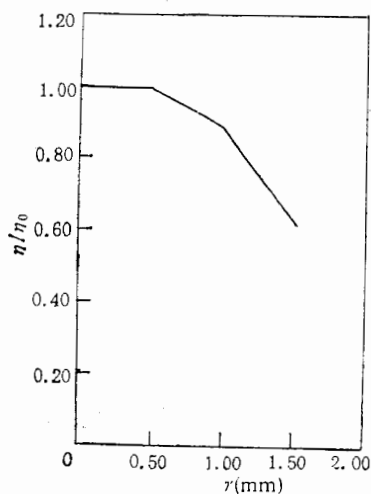


图2 正电子产额相对值  $n/n_0$  与打靶电子束流截面半径的关系。其中  $n_0$  是指  $r = 0$  时的产额  
靶材料: 钨; 靶厚: 5.5mm;  
打靶电子束能量: 150MeV;  
角散: 3.3mrad

流截面的依赖关系很灵敏(示于图2),但与打靶时电子束的入射角度关系不大,这是因为正电子的角分布远比入射电子的大。由图2可见,当电子束半径  $r$  从 0 到 1.5mm 变化时,正电子产额大约减少 55%。这一结果有很大的实际意义。一般说来,为了获得高质量的正电子束,靶后面系统的参数都需要调整,如匹配与聚焦磁场及加速场的高频相位等等。上述结果表明,不仅靶下游系统的参数,而且上游系统的参数对提高正电子产额都是很重要的。打靶电子束的束团长度及斑点尺寸与上游的聚束聚焦系统有着密切的关系。此外,为了增加正电子流强,主要方法之一就是增加打靶电子束流强。但是要增加打靶束流强度,电子枪的流强必须增加。电子枪流强增加之后,空间电荷力也会增加,在低能段里束流的能量分散要受到影响。而且由于束流输运线的色品和 Lawson-Penner 定则,束流的发射度将要增大,因而导致打靶束流斑点的扩大,正电子产额随之减小。所以当电子束流强度增大到一定程度之后,正电子产额提高速度放慢。显然应当有一个优化的折衷方案,这是设计中应当研究的重要问题。

电子直线加速器物理组给出的计算结果<sup>[11]</sup>表明,当电子枪流强由 2A 增加到 10A 时,在第一节加速管末端,31.6% 的电子的能量分散增大到 3.1%。用 TRANSPORT 程序<sup>[12]</sup>计算表明,在 150 MeV 段末端(正电子靶靶位处)电子束的截面随动量变化缓慢。动量  $p_z$  由 30.6MeV/c 变化到 32.6MeV/C 时,束流半径  $r$  由 0.55mm 变化到 0.67mm, 相对变化 18%, 所以正电子产额受  $p_z$  影响不大,而发射度只按流强的平方根变化。所以为了获得更大的正电子产额,应当使用强流电子枪。另外,由于产额正比于打靶电子束能量,故应将功率最高的速调管用于正电子产生。

## 2. 正电子的聚焦与加速

世界上现有的许多正电子加速器,其正电子源的主要差别是匹配装置。有两类匹配装置: 1/4 波长转换器与渐变场螺线管。匹配装置的主要作用是把张角大截面小的正电子

束议

式

式的曲线合 b 在构子 (2 受遇这

/ 如 个 7 ;

束流转变到张角小截面大到可以由后面的加速管所接收的束流。按照 Leboutet 的建议<sup>[13]</sup>, 使用如下描述轴向磁场分布曲线的经验公式:

$$f_z = [SK_1/(1 + SK_2)](CN + SK_2e^{-z/b})(1 - ge^{-z/a})P,$$

式中

$$CN = \begin{cases} \cos(\pi z/2LL) \\ 0, \end{cases} \quad P = \begin{cases} 1 & z \leq LL \\ e^{-(z-L_2)/d} & z > LL, \end{cases}$$

式中  $z$  是系统的轴向坐标, 原点在出靶面;  $L_2$  是匹配段的长度;  $LL$  是一个稍大于  $L_2$  的参数;  $SK_1, SK_2, a, b, d, g$  与  $LL$  都是可调参数, 用以求得所需要的场形分布曲线, 如场的峰值及其位置, 场分布的变化率等等。此式也可用于拟合实际测量的磁场分布曲线, 如锥形螺线管<sup>[14]</sup>。磁场的测量与拟合曲线示于图 3, 可见两条曲线符合较好。拟合中选择的参数为:  $SK_1 = 9.0, SK_2 = 0.6, g = 0.51, LL = 150 \text{ mm}, a = 7 \text{ mm}, b = 80 \text{ mm}$  以及  $d = 40 \text{ mm}$ 。参考 TRAJE 程序<sup>[15]</sup>, 编写了 LILY 程序<sup>[18]</sup>, 跟踪正电子在匹配、聚焦和加速系统中的运动。EGS 程序和 LILY 程序由一个过渡文件连接, 它们构成计算正电子产生与跟踪的一套完整程序。由出靶的正电子能量分布可知, 多数正电子处于低能区, 所以为了加速较多的正电子, 选择在低能区俘获正电子, 所选择的能区为 (2—10) MeV。被俘获的正电子在注入加速场时如遇到减速相位, 开始时能量减低, 同时受到聚束作用并自动滑相到加速区而提高能量。另一注入方式正好相反, 进入加速场时遇到加速相位, 能量虽继续提高, 但无聚束作用。因此前者束流较后者为大且能散较小。这一点已由调束实验所证实, 见图 4。在 LILY 程序中用  $FO(3), FO(6), FO(10)$  三

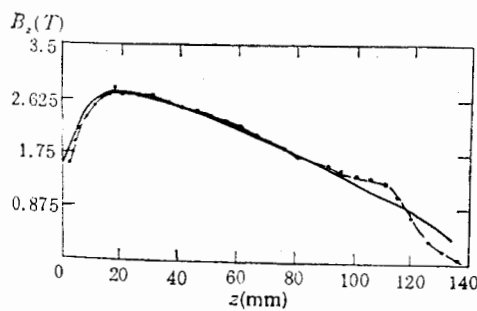


图 3 匹配磁场场形  
—●— 测量值, — 拟合值

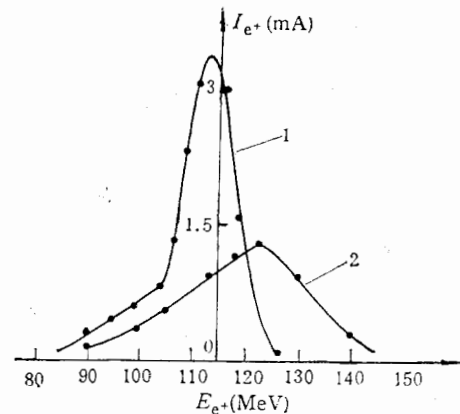


图 4 初始加速相位对正电子流强的影响  
1. 减速相位, 2. 加速相位

个数组元素表达正电子在三节加速管注入时的初始相位。计算表明, 第一个加速管的初始相位  $FO(3)$  严重地影响正电子的俘获效率, 见图 5。计算时系统的参数取为: 速调管功率 16MW, 锥形线圈的励磁电流为 6kA, 最大磁场强度为 2.88T, 过渡线圈电流为 700A, 均匀场长螺线管场强为 0.35T。改变前述磁场公式中的  $g$  因子并相应地调节  $SK_1$ , 可以在一定范围里改变场峰值的位置。结果表明, 正电子产额随着场峰值位置远离正电

子靶而下降,它与  $g$  因子几乎为线性关系,见图6. 图中曲线上所标数字即场峰值位置,当此位置达到 23mm 时,正电子产额减小了大约 50%. 对此有一个物理解释: 如令  $r_0$ 、 $\theta_0$  为束流在漂移区  $L_m$  的初始束流半径与初始张角,在漂移区末端,半径与张角应为  $r = r_0 + L_m \tan \theta_0$ , 所以峰值场强所看到的束流截面特征为  $r$  与  $\theta_0$ , 随着束流截面的扩

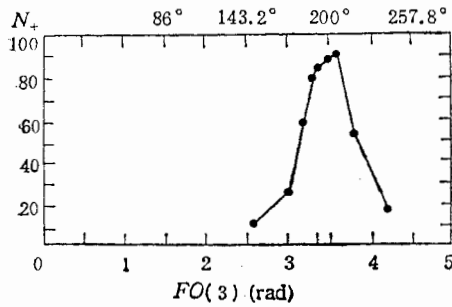


图5 正电子产生数  $N_+$  与第一节加速管相位  $FO(3)$  的关系

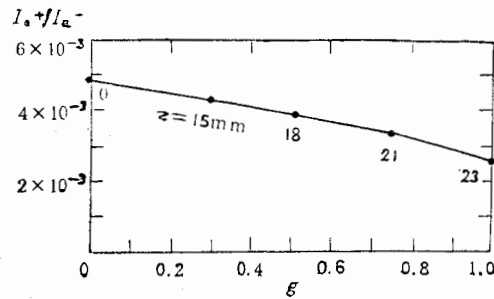


图6 正电子相对产额与  $g$  因子的关系

大,正电子在相空间的分布也发生变化,因此漂移距离越大,就越有严重的影响。

改变  $LL$  因子可以稍微改变场形的倾斜度,计算结果指出这也稍微影响正电子产额. 计算还表明,随着匹配场强的增加(调节  $SK_1$ ),正电子产额也有缓慢地增长,但它随着过渡线圈的励磁电流  $I$  的改变很快,见图7.

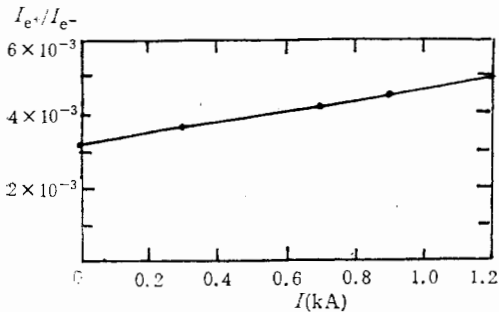


图7 正电子相对产额与过渡线圈励磁电流  $I$  的关系

由上述计算与分析可以看出: (1) 在 BEPC 注入器的运行状态由加速电子改变为加速正电子时,靶后第一节加速管的高频相位必须仔细地调整,因为它对正电子的能谱和正电子产额的影响很灵敏,其余的加速管则可同时调整. 目前先用电子把所有的加速管的相位都调成一致,然后在加速正电子时再同时调节靶后所有加速管的相位,使正电子流强最大. 这是由于正电子信号微弱且监测器数量不足,单独调节一个速调管所对应的加速管的相位容易造成混乱; (2) 应把匹配磁场的峰值尽量移向靶,使峰值磁场所遇到的束流截面减小; (3) 长螺线管的接受度正比于它的轴向磁场强度与加速管盘片半径平方的乘积,所以在加速管支架和冷却水管接头处不希望磁场减小太多; (4) 过渡线圈的电流最好能增大,比如加大到 1.2kA 以上.

从优化正电子源的观点,计算了锥形线圈安装位置不准对正电子产额的影响. 计算中使用了由该元件错位坐标表示的场的表达式<sup>[6]</sup>,然后用 LILY 程序来计算它对正电子产额的影响. 因此可以得出结论,平移位置公差应为 0.1mm,角度公差应为 2 mrad,这与 SLAC 的结果基本相同<sup>[7]</sup>.



表2 正电子产额与过渡线圈电流的关系

$I(A)$	0	300	600
$\eta/\eta_0$	1.0	1.18	1.35

较低。因此当这两股束流经过四极透镜组时,由于色散关系,大部分电子将会丢失。在实验中小心而重复地调节高频相位,在 nBCT<sub>4</sub> 看到了 1.63 mA 的正电子脉冲信号。改变分析磁铁的励磁方向,在 nBCT<sub>4</sub> 也看到了 0.39 mA 的电子束流脉冲信号。这一实验结果表明,无需分离正负电子束而监测正电子也是可能的。在 nBCT<sub>4</sub> 处正电子束脉冲信号的大小与高频相位有密切的关系,尤其是靶后第一节加速管的相位。也就是说,正电子束脉冲信号也反映了高频相位是否正确这一事实。这对于正电子直线加速器的调束与运行都有着实际的意义。

#### 四、小 结

本文对 BEPC 正电子源的初步设计进行了系统的研究,作了以下优化工作:(1) 在打靶电子能量取为 150 MeV 时用 EGS 和 LILY 程序重新计算了正电子产额,其计算结果和调束时实测结果相符;(2) 研究了 W, Ta10W, Hf10W, Ta 等不同金属或合金靶的正电子产额,发现材料的选择对产额影响不大;(3) 计算了打靶电子束流从 2A 增加到 10A 时束斑半径的相对增长 18%,对正电子产额带来的影响不大,这为提高正电子流强指出了方向;(4) 计算了过渡线圈的影响,证明它对收集正电子有利。调束结果表明过渡线圈励磁电流对提高正电子产额确有益处;(5) 计算表明正电子入射相位对正电子产额至关重要,调束时应仔细改变第 3 台束调管 K<sub>3</sub> 的微波输出相位以找到最合适的正电子注入相位,其中减速最佳注入相位在流强与能散方面要优于最佳注入相位。

目前储存环的注入率已出现过 4 mA/min 的记录。稳定在此水平,已可满足 BEPC 亮度要求。本文的模拟计算和实验结果表明,打靶电子束流还可成倍的提高;过渡线圈和长螺线管的励磁电流还可增加;匹配线圈磁场的峰值位置还可向产生靶靠近等等,再加上大孔径四极磁铁的增设,这些都是进一步提高正电子流强的有效措施。如有必要,在进一步优化的基础上,正电子源流强的进一步增加还是有很大潜力和余地的。

感谢王淑琴、王泰杰、张灿英、曹围、李淑珍、吴文泰等同志在工作中所给予的帮助。

#### 参 考 文 献

- [1] D. E. Yount and J. Pin "Production of Positrons with the Stanford Mark III Accelerator", *Nucl. Instr. Meth.*, 15(1962), 145.
- [2] D. E. Yount "Positron Beams", *Physics Today*, February, 1969.
- [3] J. Miller et al., *J. Phys. Radi.*, 21(1960), 296.
- [4] D. E. Lobb "A Study of a Focussing System for Positron Beams", SLAC-5
- [5] I. Sati "Positron Generator Linac" Proc. The Meeting on Linear Accelerator in Japan (1982).
- [6] R. Boni et al. "A New System for Positron Focussing at the FRASCATI Linac" LNF-81/6(R), 28 Gennaio 1981.
- [7] R. B. Neal et al. The Stanford Two-mile Accelerator.
- [8] Xie JiaLin "On the Choice of Positron Producing Energy in Linac injected e<sup>+</sup> Colliders" IEEE NS-32, 5

[9]  
[10]  
[11]  
[12]  
[13]  
[14]  
[15]  
[16]  
[17]  
[18]

de  
ag  
as  
or  
cu  
se  
te  
ru  
p

(1985), P. 3080.

- [9] R. L. Ford and W. R. Nelson "The EGS Code System: Computer Programs for the Monte-Carlo Simulation of Electromagnetic Cascade Showers", SLAC-210, UC-32, June 1978.
- [10] H. L. Lynch et al. "Design of a High Yield Positron Source" SLAC-PUB-3635, April 1985.
- [11] Wu WenTai, private communication.
- [12] K. L. Brown et al. "TRANSPORT: A Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems" SLAC-91, UC-28(1/A).
- [13] H. Leboutet "Estimation of the Number of Positrons Which Can Be Focussed into the Accelerator" (lecture).
- [14] Cao Wei et al. "Tests of Pulse Magnetic Field Profiles of BEPC Positron Source" (inner report).
- [15] Luo Ying Xiong et al. "A computer Program TRAJE for Designing the Positron Collection Systems" (inner report).
- [16] P. F. Meads, jr. *Rev. Sci. Instr.*, **38** (1967), 1752.
- [17] K. Hübner, "Positron Production for Particle Accelerators", CERN/PS/88-19 (LP), 1988.
- [18] Pei Guoxi, LILY Programme, (internal report), 1986.

## OPTIMIZATION OF BEPC POSITRON SOURCE

PEI GUOXI, XIE JIALIN, ZHOU SHU, SUN SONGLAN

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing*)

### ABSTRACT

Based on Monte-Carlo simulation and particle tracking, the positron source of BEPC is designed and the predicted performance is compared with experimental measurement with good agreement. Important conclusions can be drawn from the study presented in this paper, such as up to 10A increase in electron gun current is beneficial in spite of the deterioration effect on the beam spot size at the target; positron current increase with the bridge coil and solenoid currents of the positron of matching field peak to the target; the existance of the injection phased and their significance; the electron and positron from the target do not have to be separated and the R. F. separator is not necessary etc. The above results serve the purpose of directing the tune-up and operation of BEPC, providing a useful reference for future design of positron accelerators.

在实  
改变  
实验  
信号  
子束  
运行

在  
十算  
或合  
. 2A  
E电  
吉果  
寸正  
合适

IPC  
器  
和  
口上  
挂一

办。

nsir.

Gen-

, 5