

高能所试验束介绍

实验物理中心 李家才

试验应用平台 世界各主要高能物理实验室，在 高能加速器上都建有若干条试验束 (Test Beam)。

基于加速器的粒子束流，应用研究覆盖了粒子探测器模型的束流试验和验证(模型研究，校准刻度等)；加速器的部件性能试验；在束流物理，粒子物理和核物理等领域的创新思想和新颖的实验方法的检验，或者说还不成熟的思想 and 实验方法的试验；不同的射线产生试验 (X 射线，中子， π 介子，质子和正负电子等) 以及射线在材料和生物样品方面的应用试验研究。**所以说它具有试验性，原创性，是不同交叉学科的粒子束 (或射线源) 试验应用平台。是可能的创新研究的生长点。**

试验束是寄生模式运行，它利用储存环的长时间束流稳定储存间隔 (3-4 小时的对撞模式，10-12 小时的同步辐射模式)，使用直线加速器的剩余束流，所以说它是寄生模式运行，是对加速器束流资源的充分利用，同时也促进了加速器应用水平和运行效率的提高。

运行开放和受理，按国际合作惯例，试验束装置向各实验室开放，以提高试验束的利用率。面向全国开放，受理可能的创新试验和应用课题，培植创新研究生长点。为了统一调配运行机时，机时申请受理机构是高能所 BEPC(北京正负电子对撞机)运行协调委员会。

20 世纪 80 年代初，郑林生先生积极推动在 高能加速器的基础上建立试验束流线，并亲自领导参加了初期试验束线的设计和建造。2000 年高能所申请 BEPC 的升级改造 (BEPCII)，包括北京谱仪 (BESII) 升级为 BESIII，所以也急需合适的试验束流对其子探测器模型做束流试验，以及其他对初级电子束流应用的要求 (包括国家科学基金和科学院支持的慢正电子装置)。BEPC 及其电子直线加速器 (LINAC) 的长期稳定运行也提供了有利条件。为此，在 BEPC 的电子直线加速器上改建和新建起了具有多种用途的 3 条束流线。BEPCII 直线加速器的先期改造将在 2004 年底完成 50 赫芝和每秒 100 个强束流脉冲的调试运行，届时寄生在直线加速器上的试验束性能将大幅度提高，应用范围也将进一步扩大。

试验束计划运行时间表 (引用 BEPCII 改造计划)

Y \ M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2004	BSRF/TB				直线加速器安装/调试 BESII 拆除							
2005	BSRF/TB		设备拆除/水电拆旧安新/隧道装修/BEPCII 安装/准直/硬件调试									
2006	储存环联调/调束		BSRF/TB			BESIII 移入对撞点/对撞区恢复/探测器联调/大联调						
2007	BSRF/TB		高能物理实验				准备验收					

E1, E2 和 E3 试验束流线

* 国家 BEPC 改进专项经费
1) E-mail: lijc@ihep.ac.cn

一般加速器上的试验束通过‘慢切引出’来实现（这样本底很小，但花钱太多），或者在储存环内设置内靶，利用边缘束打靶¹，这样可以很好解决次级粒子多重数问题，也可获得较高的计数率。基于加速器现有的条件，我们从电子直线加速器末端引出电子束流打靶的办法来建立试验束。这种办法简单易行，但是因为直线加速器束流重复频率低（目前 12.5pps），而且低能电子和光子的本底很大²，所以，压低本底和提高计数率是试验束工程和技术面临的关键问题。

为了充分利用大厅空间，开辟多条应用束流线，所以，在 BEPC 电子直线加速器末端对原电子束流线进行了改造，把原电子束流线分叉成为 E1 和 E2 两条初级束流线，扩展了初级电子和正电子束流的应用空间。新增加的 E2 束流线平行于实验厅东墙。用 E2 电子束打靶，靶往后为 E3 次级束流线，即高能 e^\pm ， π^\pm 单粒子束流线。打靶产生多种宽能谱的次级粒子，利用四极磁铁 LQ1, LQ2 收集从 15 度‘产生角’出射的带电粒子。偏转磁铁 D1, D2 与狭缝一起选择所需电荷（正电荷粒子或负电荷粒子）和所需动量的粒子，动量连续可调。具体的试验束流线布置如图 1。

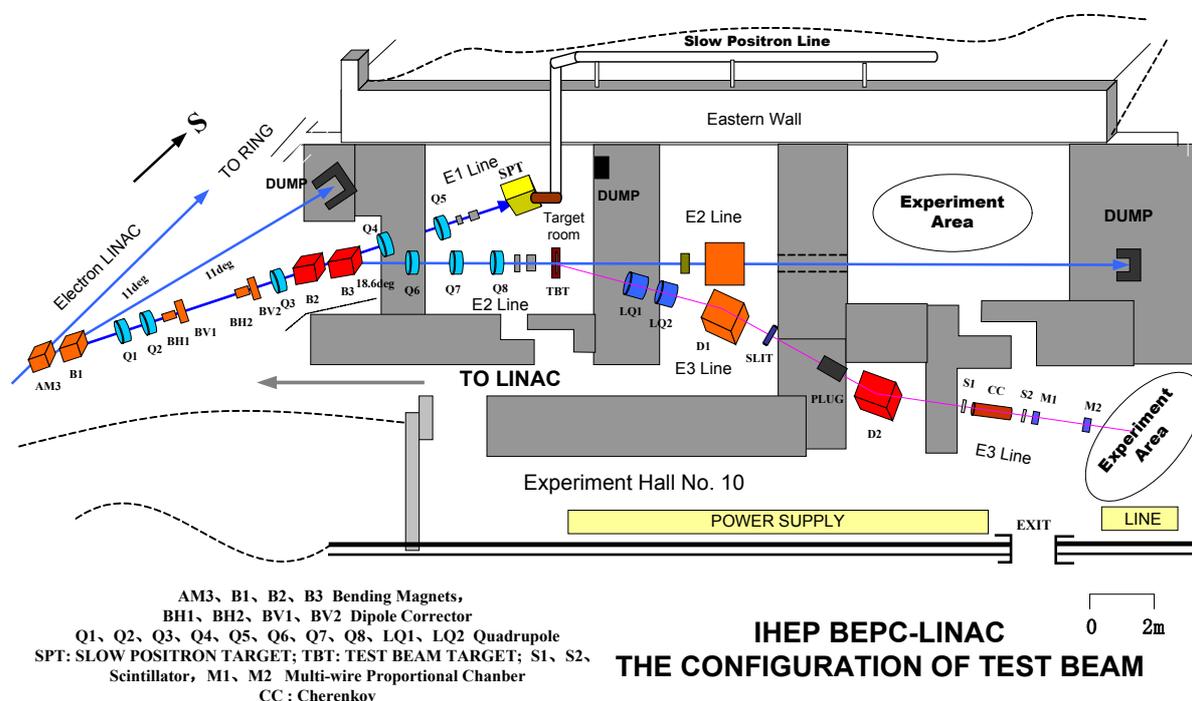


图 1 实验厅的屏蔽结构和束流线布置示意图

E1 电子束流线

原有的电子束流线^[3]，是由 BEPC 直线加速器末端经 2 块二极磁铁偏转 22 度，沿相应的束流运输系统进入实验大厅。对这条束流运输线进行的改造，主要是 Q3 下游插入 2 块偏转磁铁 B2 和 B3。所以原有 Q3 和 Q4 分别向上下游移动，间距增加到 557 厘米，以便插入 B2 和 B3。同时 Q5 向下游移动

¹ K.Oide, H.Fukuma, S.Kamada et al, Gamma ray source using internal targets in the TRISTAN accumulation ring, KEK, National laboratory for high energy physics, Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan 305; K.Ogawa, K.Hayashi et al, INTERNAL TARGET BEAM LINES FOR ELETRON/POSITRON IN TRISTAN ACCUMULATION RING, KEK Internal 85-2 May 1985

² ZHANG Liang-sheng, Monte-Carlo Simulation for Background of Test Beam, Classified Archives HA3983, N0.1419-1 (Chinese)
(张良生, 蒙特卡罗模拟, 档案分类 HA3983, 1419-1)

* 国家 BEPC 改进专项经费
1) E-mail: lijc@ihep.ac.cn

1.5 米，便于延长打靶距离。这样电子束线由原来的 20.82 米长增加到 22.32 米。这样的结构安排保留了束流线末端透镜组的基本聚焦性能。该线的束流垃圾桶（DUMP， $0.5 \times 0.5 \times 0.2$ 立方米铁块）安装在离 E1 束流出口 3 米远的水泥墙中。目前这条 E1 电子束线已专用于核分析实验室的慢正电子装置。

根据束流线改造对束流输运线结构空间的要求，在保证束流的基本输运和聚焦性能情况下，确定了 E1 线的改造方案和磁铁的空间位置。按已限定的元件排布结构做了束流输运元件参数和束流输运性能的计算³，计算结果表明，在 Q5 出口处的束流截面近似为 $2.5 \times 0.6 \text{ cm}^2$ 的椭圆，作用靶（慢正电子产生靶）上入口束流截面近似 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ，以及束流能散为 0.8%，满足了使用要求。束流线结构和束流包络如图 2。具体参数是：AM3:7028.1Gs；B1:7028.1Gs；Q1:550；Q2:-400；Q3:155.5；Q4:-240；Q5:354.3（参数对应能量 $E=1.1 \text{ GeV}$ ，Q 铁场强单位 Gs/cm）。

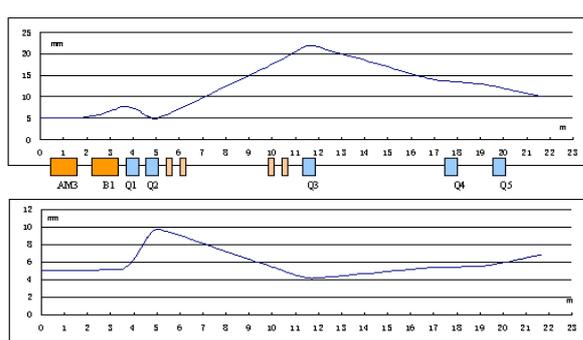


图 2 E1 初级束线结构和束流包络

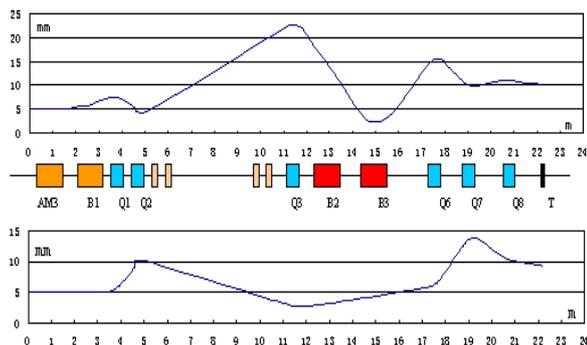


图 3 E2 束流线结构和束流包络

E2 束流线

E1 线上的 Q3 下游插入 2 块偏转磁铁 B2 和 B3，在束流已偏转 22 度的基础上再偏转 18.6 度，使之与实验大厅的东墙平行，成为 E2 束，它距离实验厅东墙 3.5 米，可以方便地引出初级电子束或初级正电子束。考虑应用对束流的要求，在 B2 偏转磁铁下游增加了一个紧凑的 3 元透镜聚焦组^[4]。新增加 3 块聚焦磁铁，改善了束流的输运品质，束流出口近似平行束。束流线结构和束流包络如图 3。具体磁铁设定值如下：AM3:7028.1Gs；B1:7028.1Gs；Q1:550；Q2:-400；Q3:155.5；B2:5932.2Gs；B3:5902.6Gs；Q6:521.4；Q7:-429.6；Q8:143.9（参数对应能量 $E=1.1 \text{ GeV}$ ，Q 铁场强单位 Gs/cm）。能散 0.8%。在线束流输运参数调试，出口束流截面达到 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 。另外，这条束流线上的偏转磁铁可以很方便地改变供电极性，以满足电子或正电子选择的要求。E2 束流垃圾桶（ $0.8 \times 0.8 \times 0.9 \text{ m}^3$ 铁块）安装在 E2 束线末端 5 米厚的水泥构件中。

E2 束流线引出的一个应用是高能电子和正电子在介质中的辐射实验研究。目前在 E2 线上完成了基础设备安装，设备布置如图 4。束线上的狭缝组合用于进一步选择平行电子束。单个狭缝是 1 毫米的方孔，纵向深度 10 厘米，2 个狭缝相距 1.6 米，刚性连接，并安装在准直基座上。专门检测部门的计量检测报告给出，狭缝组合的线性度为 0.147 毫米。3 维定角仪用于调整辐射体角度，角度分辨为 0.008° 。园型极头磁铁用于带电粒子的清除，最大工作磁场 1.7 特斯拉。

³ HU Chun-Liang, The Parameters Computing of The Beam Transport For Test Beam and A Upgrade of Branch Line on BEPC-LINAC, Classified Archives HA3983, N0.1419-4 (in Chinese) (胡春良, BEPC 电子直线加速器的分支线改进和 e/π 试验束的束流输运参数计算, 档案分类 HA3983, 1419-4)

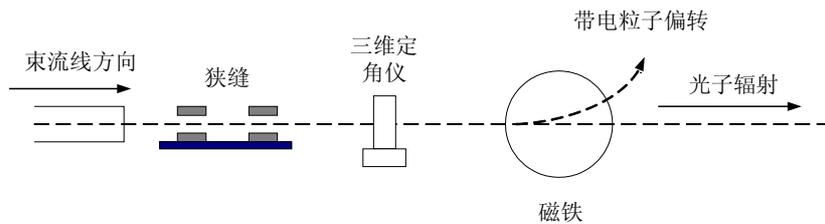


图 4 辐射实验研究基础装备示意图

E3 试验束流线

从 BEPC 电子直线加速器(LINAC)引出的初级电子束, 能量为 1.1—1.5GeV, 脉冲重复频率 12.5Hz, 脉冲宽度 2.5ns, 最大峰值流强 600mA。它经分叉后的 E2 束, 引入靶区打靶产生次级粒子 (γ , e^\pm , π^\pm , P , 以及 π^\pm 衰变产生的 μ^\pm 等), 因此, E3 是混合型粒子试验束。电子引出采用钨碳复合靶或铜靶, 强子引出 (π^\pm 和质子 P) 采用碳靶或铍靶。这些未经分离的混合粒子, 经过磁铁, 狭缝, 多种探测器组成的望远镜系统的选择, 获得了较低的本底水平; 利用‘在线数据获取’判选出被测到的粒子的种类, 再配合‘离线数据分析’分别得到 e^\pm , π^\pm 及 P 等单粒子束。

E3 试验束流线为 2Q2D 结构的磁谱仪系统^[5]。该试验束流线长 22 米, 其中前 10 米为真空盒。主要由磁谱仪, 契伦科夫计数器, 闪烁计数器 SC1 和 SC2, 两个 2 维读出的多丝正比室组成。次级束流截面尺寸和动量误差由狭缝决定, 目前的电子束流试验, 狭缝宽度是 3 厘米时, 聚焦面上的束流宽度为 (FWHM) 5-6 厘米。

试验束流线上的主要装置和性能

磁铁

带电粒子通过磁场, 受劳伦兹力而偏转, 所以可根据设备安装空间, 设计束流输运线的偏转角。依据场强与偏转角等可知动量大小。所以磁铁既是束流线上必不可少的设备, 也是测量带电粒子动量的有效工具。试验束上使用的磁铁总共 19 块。其中新加工的四极磁铁 1 块, 借用 BEPC 工程备用的 50TQ 磁铁 2 块。另外, 对 DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) 早年借用的 5 块大功率磁铁进行了检修, 内容包括水路, 接线端子, 线包耐压实验, 极头定位等。在检修过程中, 还更换了磁铁的过温测量探头, 以及磁铁过温保护连锁。试验束上增加的不同类型磁铁参数列表如下:

表 1 磁铁的参数

磁铁类型	最大磁场(Gs)	磁铁有效长度(cm)	备注
Q6 (50TQN)	963Gs/cm	50.4	BEPC
Q7 (50TQA)	882Gs/cm	50.3	BEPC
Q8 (50TQ43)	907Gs/cm	50.4	北重厂
B2 (MC03)	14660	100.97	DESY
B3 (MC01)	14600	100.425	DESY
LQ1 (QD1-2)	1750Gs/cm	53.505	DESY
LQ2 (QD1-9)	1750Gs/cm	53.855	DESY
D1 (BM03)	11000	107.2	检修
D2 (MC02)	12000	106.42	DESY

* 国家 BEPC 改进专项经费
1) E-mail: lijc@ihep.ac.cn

屏蔽结构

E1 初级电子束流线末端（靶室内）安装慢正电子产生靶（金属钽： $\phi 30$ 毫米 $\times 15$ 毫米）。束流出口到靶心 110 毫米，打靶后的剩余束流在 2.5 米远的 DUMP(束流吸收装置)中吸收。根据次级慢正电子引出的结构要求，靶室 1.5 米厚的顶棚预留 $\phi 300$ 毫米的垂直引出孔。为了有效屏蔽打靶后的辐射，利用蒙特卡罗模拟计算方法进行了辐射本底估计。

为压低 E3 单粒子束本底，我们建立了多道水泥屏蔽墙，并事先通过蒙特卡罗模拟，对各种屏蔽结构的效果进行比较，以选择较好的屏蔽结构，屏蔽结构平面图如图 1。产生靶与实验区之间由 2-3 米厚的水泥墙隔开，蒙特卡罗模拟表明，初级电子束（ 10^9 电子/脉冲）入射到 11 厘米厚的碳靶上，实验区本底计数为每脉冲 0.11/平方厘米，屏蔽结构满足要求。实时剂量测量表明，当电子束停留在束流垃圾桶（DUMP）中，实验区剂量率接近于天然本底，为 0.14-0.21 μ Sv/h。从实验大厅（BEPC 10 号厅）进入直线加速器隧道的防护铁门附近，其剂量率是实验区的 40 倍左右。剂量率的测量值如表 2（加速器中心防护组提供）。

表 2 实验区实时剂量测量值

测量区域	最大瞬时剂量率 (μ Sv/h)
试验区域	0.21
第 3 靶室南墙外区域	0.15
D2 铁区域	0.14
D2 铁前束线引出口	0.15
第 1 靶室外长走廊中部	0.20
第 1 靶室外入口墙角	3.20
第 1 靶室外距铁防护门 4 米	0.90
第 1 靶室外距铁防护门 1 米	6.30
第 1 靶室外贴近铁防护门（进入直线加速器隧道入口）	13.30

出自试验束运行的辐射安全考虑，进入靶室的门已改造成安全联锁平开自动门，当 AM3 磁铁加电时（这意味着束流已有可能进入 10 号厅）安全联锁门有效锁闭。联锁信号起点来自直线加速器 AM3 磁铁电源柜，终点到试验束的实验大厅控制室。E2 束流线上的 B2、B3 磁铁电源与第 3 靶室的水泥门联锁。

磁铁供电电源及控制

总共 18 套大小功率电源，最大运行总功率为 293kW。大功率电源采用 12 相可控硅整流，数字触发电路和双环控制方案。E1 和 E2 线上的聚焦磁铁和校正磁铁用了较小功率的电源，采用脉宽调制型开关电源。通过大功率磁铁的供电极性切换来实现正负粒子运行方式的切换，这种切换采用了我们早年研究设计的无触点大功率电子换向开关。这种开关简化了功率主回路的设计，降低了造价。实际运行证明开关切换安全可靠。电源的长期稳定性都达到或好于 2×10^{-4} 。束流线运行时，上述控制操作都在控制室的控制台上进行。控制结构是基于现场总线（RS-422/485）方式的电源控制系统⁴。该系统

⁴ KONG Xiang-Cheng, References of Technology for Field-bus Driven, Classified Archives HA3983, N0.1419-4 (Chinese) (孔祥成, 总线驱动技术参考, 拟档案分类 HA3983, 1419-4)

控制磁铁电源开关和调节电流大小, 改变束斑大小及位置。产生靶的自动更换, 束流强度监测, 真空系统的监测, 摄像监视, 及相应的配套设备等均集中在控制台上。

计数器和电子学

计数器和电子学仪器提供试验束的位置信息, 粒子种类和飞行径迹等数据。在试验束上安排了塑料闪烁计数器 3 套, 气体契仑可夫计数器 1 套, 多丝正比室及其前端电子学 3 套, 以及相应的电子学仪器, 如模拟数字转换器 ADC, 高压电源, 快甄别器, 恒比定时甄别器, 逻辑单元以及延迟线等。

试验束上的探测器在线数据获取由 PC 机控制, 在 LINUX 操作系统下采集数据。它包括 E2 束流线上通过束流传感器 (BCT) 的脉冲电荷积分数据采集系统, 以及 E3 试验束上来自各种计数器的数据获取。数据获取在线机可通过局域网由束流线运行控制台操作取数, 以及图形显示和实时监控, 实现了单一地点的控制台操作。

真空系统与支架

包括离子泵, 分子泵机组, 气动平板阀, 真空闸板阀, 真空计, 电阻规, 电离规等。E1 和 E2 束流线真空度保持在 1.3×10^{-5} Pa, E3 试验束线真空度 1×10^{-5} Pa。总真空管道长 43 米。磁铁和真空管道支架共 40 余台件, 其中油压支架 3 台。

E3 试验束的性能

在线系统简介

E3 试验束的在线系统^[5], 由 PC 机管理控制, 在 LINUX 系统平台上采集数据。数据包括粒子飞行时间和 2 个正比多丝室的 X, Y 平面上的电荷。粒子的选择是通过闪烁计数器 SC1 和 SC2 与契仑科夫计数器, 以及两个多丝正比室 MWPC1 和 MWPC2 构成的五重符合实现的。

闪烁计数器 SC1 和 SC2 用于粒子飞行时间测量和在线束流粗定位。它的时间分辨为 200ps 左右, 每个计数器的效率 ≥ 0.91 ; 气体阈式电子契仑科夫计数器^[7]用于选择电子或强子, 其对电子探测效率为 $(99.0 \pm 0.5)\%$, 配合飞行时间谱将 π 、P 分开; 多丝正比室^{[8][9]} MWPC1 和 MWPC2, 阴极感应读出, 用于单粒子选择和粒子运动方位的确定, 整个在线控制系统对粒子的探测效率为 62%。

数据离线分析主要是多丝室的数据。根据感应条电荷分布以及粒子击中位置等来确定单粒子事件, 根据感应电荷重心法计算得到的空间位置, 重建粒子的飞行径迹。分析程序包括: calcoe (感应条效率计算); calcped (台基计算); analy (分析); fit (径迹拟合)。常规的分析结果包括: 粒子分布 (X, Y), 方向角, 单电荷积分, 散点图等。

E3 试验束主要性能参数:

粒子种类: e^{\pm} , π^{\pm} , P

动量范围:

电子	200MeV/c---1.1GeV/c (可以提高至 1.3GeV/c)
介子	400MeV/c---900MeV/c
质子	500MeV/c---1GeV/c

动量误差: $\Delta P/P \leq 1\%$

粒子定位误差: 0.2-0.4 毫米
 计数率: 3-4 赫兹

动量的测定及其误差

1 中心动量 P_0 确定:

在二极磁场中 (D2 磁铁) 粒子动量为

$$P_0 = 0.29979 \times B \times L_{eff} \frac{1}{2 \sin(\phi_0 / 2)}, \quad (1)$$

式中 B 表示磁场强度 (单位 Tesla); L_{eff} 而为粒子运动轨迹的曲率半径 (单位 M); ϕ_0 粒子偏转角; 动量单位取 GeV/c.

(1) 磁铁有效长度测量值

$$L_{eff, at Y=0} = 106.42, \quad \Delta L_{eff} = \sqrt{0.09^2 + 0.3353^2} = 0.347.$$

(2) D2 磁铁的偏转角: 利用经纬仪测量偏转角 ϕ (角度分辨率 $2''$)。3 次测量的平均值为

$$\phi \pm \Delta\phi = 17.5769^\circ \pm 0.00254^\circ \Big|_{Max}$$

根据式 (1), 代入 D2 磁铁中实时的磁场测量值, 以及磁铁有效长度和磁铁的偏转角, 计算得到中心动量值。

2 动量误差

磁谱仪中主磁铁 (D2) 的实时磁场 B 的测量误差: $\Delta B = 0.1\% B$, 磁铁有效长度 L_{eff} 的误差, 偏转角 ϕ 的准直测量误差等, 决定了粒子的动量误差。由误差传递得最大相对误差为:

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta L_{eff}}{L_{eff}} + \frac{\cos(\phi_0 / 2)}{\sin(\phi_0 / 2)} \frac{1}{2} \Delta\phi \quad (2)$$

根据以上各种测量误差, 计算最大动量误差。式中磁铁有效长度误差 $\Delta L_{eff} = 0.347$; 偏转角误差

$\Delta\phi = \left| \pm 0.00254^\circ \right|_{Max} = 4.4 \times 10^{-5} \text{ Rad}$, 计算得到最大相对动量误差为: $\Delta P / P = 0.44\%$ 。由磁场测量误差, 机械准直误差和粒子散射引入的动量测量误差 (0.85%), 总的均方根误差为 (聚焦面测量截面为 1×3 平方厘米):

$$\frac{\Delta P}{P} \leq (0.44^2 + 0.85^2)^{1/2} \% < 1\% \quad (3)$$

单粒子判选和位置分辨

1 次级粒子多重数

从电子直线加速器引出的 1.3 GeV/c 电子束, 重复频率 12.5 赫兹 (每脉冲 10^9 个电子), 这样的电子束流作用到厚靶上 ($> 0.1X_0$), 其中韧致辐射的最大光子能量接近入射电子的能量^[10]。主要相互作用:

电生和光生强子^{[11][12]}: $e + p \rightarrow \pi^+ + n + e$; $e + n \rightarrow \pi^- + p + e$; $e + p \rightarrow \pi^0 + p + e$;
 $\gamma + n \rightarrow \pi^- + p$; $\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p$; $\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$;

其中共振态衰变: $\gamma N \rightarrow \begin{pmatrix} \Delta(1232) \\ N(1440) \\ N(1520) \end{pmatrix} \rightarrow N\pi, N\pi\pi$;

π 介子衰变: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$; 以及电磁簇射等。

所以 E3 束原本是多粒子混合束, 这里包含的粒子成分如 γ , e^\pm , p , π^\pm , μ^\pm 等。混合粒子飞行时间谱直方图如图 4。不同粒子的计数比如表 3 (最远的探测器离开靶 20 米远)。

表 2-3 (在离开靶 20 米远处测量得到)

动量 (MeV/c) (未刻度)	C 靶 $e^+ : \pi^+ : p$	W+C 复合靶 $e^- : \pi^-$
400	1 : 0.3 : --	
500	1 : 0.6 : 1.4	1 : 0.1
600	1 : 1.5 : 6.9	

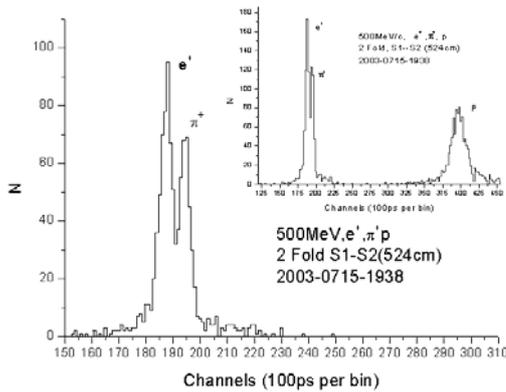


图 4 500MeV/c 混合粒子 TOF 谱

当利用试验束测量探测器对粒子的响应特性时 (通常是单个粒子), 如果一个脉冲中有两个或两个以上的粒子, 探测器在时间上无法区分, 形成脉冲重叠, 而误认为是一个粒子。这样就出现了窄脉冲引出的多粒子问题。这也是前面所说的次级粒子产生上的多重数带来的多粒子问题。另一方面, 实验总是希望有较高的计数率。要使实验的计数率不致过低, 又要获得 e , π 等单粒子束, 在窄脉冲多粒子的现实情况下, 除希望尽可能多的单粒子脉冲外, 还由于粒子散射和空间本底的影响, 应用多重符合技术和离线分析的单事例重建是必不可少的方法之一。

2 单粒子的判选

首先从理论上进行粗略的估计。如果每个脉冲中可能有的粒子数服从泊松 (Poisson) 分布: 对于 LINAC 的电子束打靶引出 12.5 赫兹的束流脉冲, 在每脉冲时间内 (2.5ns 宽度) 希望仅有 1 个粒子在测量点得到。因为每脉冲可能有的粒子数服从 Poisson 分布:

$$P(x = k) = \lambda^k e^{-\lambda} / k! \quad (4)$$

λ : 为每脉冲粒子个数期待值; k : 为每脉冲可能的粒子个数

考虑粒子在飞行过程中的散射和介子衰变损失, 取: $\lambda=1, 2, 3$; $k = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ 。根据式 (4), 当 $\lambda=1$ 时: 每脉冲 1 个粒子的产生几率是 0.368, 至少有 2 个粒子产生的概率为 0.264, 空脉冲的几率为 0.368。考虑多重符合效率 (70%), 以及束流输运效率 (估计值 75%, 主要是粒子散射), 到达次级束末端, 最大可获得单粒子计数率为 2.25 赫兹, 2 个粒子以上脉冲将有 1.7 赫兹。所以, 有粒子计数的总和是 4 赫兹 (计算包括直线加速器的束流频率), 其中单粒子占 56%。这是物理上估计所能达到的最高单粒子计数率。

实验上要实现单粒子的选择，必须经过在线判选和离线分析。首先是用磁场选择正粒子或是负粒子（选 e^+ , π^+ , P , 或选 e^- , π^- ），第二步用探测器‘在线’判选。由于阈式契伦科夫计数器只对电子灵敏，与闪烁计数器符合，记录的就只是电子，而反符合，就记录了 π 与 P 两种粒子。第三步，因为质子很重，它比同样动量的 π 慢得多，可依据飞行时间的差别把质子与 π 区分出来，这样原则上就区分开了所有粒子。第四步，进一步利用多丝正比室（MWPC）的空间分辨与电荷幅度分辨本领。因为两个或两个以上的粒子虽然在同一个脉冲中，它们的位置一般是不同的，可以依据在多丝室中不同的击中点来判断。另一方面，两个或两个以上的粒子同时进入多丝正比室，其能量损失（ dE/dX ）比一个粒子大，所以可通过能量损失来分辨单粒子或多粒子。

在测量中应用 $3 \times 3 \text{cm}^2$ 截面的闪烁计数器定位，3 重符合（契伦科夫参与符合选择电子）最大计数率 2 赫兹（0.8GeV/c）。在线判选的单粒子选择效率（60–70%）接近物理估计值。 5×5 截面的闪烁计数器定位，最大计数率 4–5 赫兹（0.8GeV/c）

3 束流中粒子位置的定位精度

通过束流在线测量，得到多丝室的位置分辨能力，从而得到粒子定位的精度。测量方法是在 2 个丝室之间插入第 3 个丝室（左边距离 80 厘米，右边距离 80 厘米），由电荷重心法求出每个室每次击中点位置坐标。取每一次事例在每个丝室上击中点位置数据做线性拟合，再分别求出击中点位置坐标相对该直线的残差。MWPC1 和 MWPC2 的击中点的位置残差分布如图 5。运行在 1.1GeV/c 电子束引出模式下，这个在线定位 σ 好于 0.2 毫米。取 2 倍的 σ 偏差，束流中粒子的定位好于 0.4 毫米。

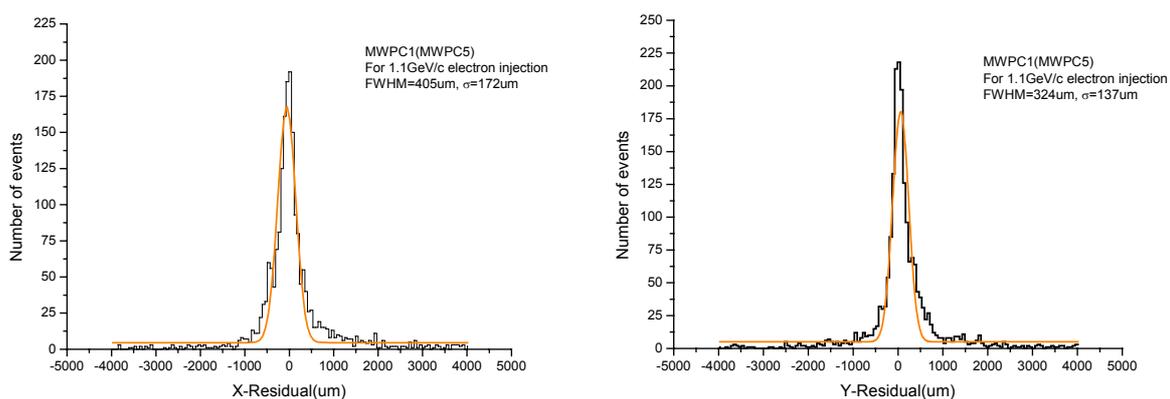


图 5 MWPC1 X 和 Y 方向残差分布

4 中心动量附近的事例选择

在探测器的束流测试中，一般要知道粒子的入射角，在离线数据分析中根据要求选取满足入射角要求的事例。另一方面，由于粒子在空气和计数器上的散射，造成某一确定动量的粒子位置不确定，或确定位置上的粒子动量分散。例如，D2 磁铁出口粒子沿切线方向飞出，而没有被空气和计数器物质散射，在有限区间内，将是平行束。或者因为散射粒子方向改变，方向角增大并且角分布变宽。根据多丝室 MWPC1 和 MWPC2 位置信息重建得出的粒子方向角分布如图 6（纵坐标为计数，横坐标为 Tangent 值）。在离线分析中选取束流截面上一定宽度的束流，这样也就确定了动量误差。选取一定方向角以内的粒子，从而降低 D2 下游因散射引起的粒子位置和动量的不确定。

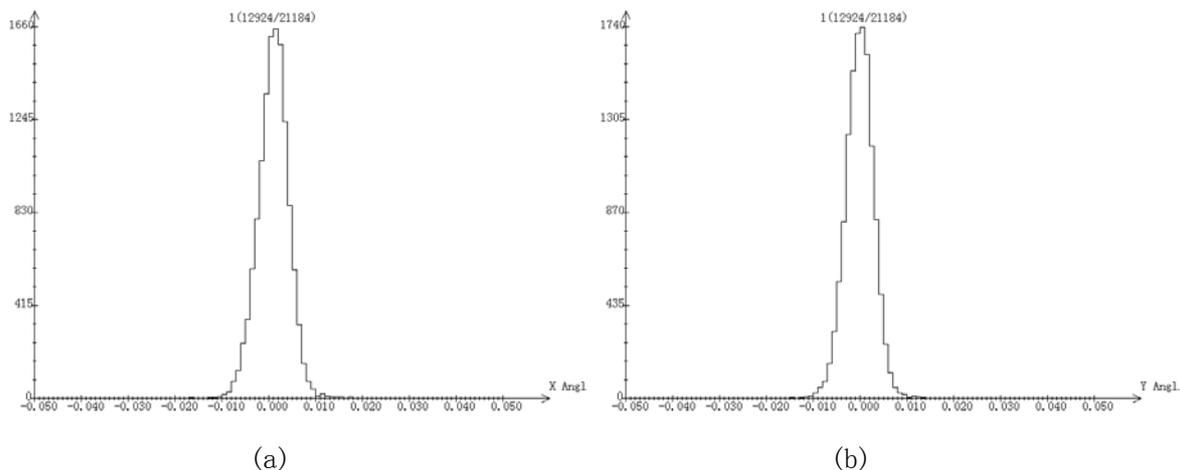


图 6 粒子方向角分布 (030610 数据) (a)水平方向角分布, (b)垂直方向角分布

5 本底

试验束运行时, 利用 5*6 平方厘米闪烁计数器, 在束流线末端的束流中心平面上, 测量不同水平位置上的本底计数 (独立计数), 闪烁计数器的阈值为 100 毫伏, 本底计数 $N_{pb}=N_{all}-N_B$ (N_{all} : 总计数; N_B : 无束流本底计数)。测量说明离开中心束流线, 在 7-22 厘米范围内的本底计数率 0.02-0.05 个每秒, 是 3 重符合计数的百分之一到百分之二。这些本底包括光子和各种低能带电粒子。

试验束在建成后的一年运行期间, 应用研究包括:

E1 束流线已稳定提供给核分析实验室应用。束流的出口位置和截面可根据应用要求调节。初级电子束作用到钨靶上, 产生慢正电子强束流并从靶站垂直引出。核分析实验室目前已完成了脉冲慢正电子性质的检测工作, 束流系统验收指标的测定工作。当加速器电子束流较强时, 脉冲慢正电子束流强度实际最高可以达到 $8 \times 10^5/s$, 直流化后的正电子数量达到 $8.5 \times 10^4/s$ 。在目前的束流状态下, 核分析实验室与合作单位完成了 7 组样品的测量工作, 系统持续正常运行。

在 E3 试验束上, 利用 800MeV/c 的电子, 已完成了 BESIII 上桶部 TOF 探测器和端盖 TOF 探测器主要性能测量。如闪烁体的衰减长度测量, 不同包装材料的比较, 不同规格的闪烁体的时间分辨差异等。目前已获得时间分辨测量的初步结果 (闪烁体为 BC408, $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 240\text{cm}$, 包装材料为纯铝箔), 时间分辨率最差点已经可以达到 80ps, 可满足 BESIII 设计要求。BESIII 簇射探测器的前期束流试验。

利用 E2 束流打靶产生的混合粒子辐射场, 进行农作物性状突变研究。该项工作是与中国农科院合作的国家自然科学基金项目, 今年是该项目研究的第一年。目前已完成第一轮小麦品种的辐照试验。

E1 电子束在材料和空气中产生的辐射环境 (低能 γ , 低能电子) 用于不同材料和探测器的辐照损伤试验。

试验束工程建设和系统调试得到了各级领导的大力支持, 李卫国副所长、吕军光研究员始终给予了热情的帮助和指导, 尤其是李金研究员在试验束立项建造和成功的调试运行过程中, 始终给予的关心和指导, 王贻芳研究员在多丝正比室制造和试验束应用方面给予的大力促进, 实验物理中心同仁的大力帮助。在此一并表示衷心感谢。

在试验束工程设计建设中, 加速器中心的徐刚、孔祥成、程健、石才土、宋洪等给予了全力的协助, 运行室承担了设备安装和低压配电柜选型订货等全部工作。在此表示衷心感谢。