

# 北京谱仪的触发判选系统

过雅南 郁忠强 丁慧良 盛俊鹏  
杨熙荣 顾松华 李启明 吴熙东  
张春燕 董艾平 林丰成 赵棣新

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

## 摘 要

本文叙述了北京谱仪触发判选系统的作用和判选过程, 并分别介绍了系统各部分的物理考虑和构成。

## 一、概 述

北京谱仪 (BES) 是位于北京正负电子对撞机 (BEPC) 第一对撞点的通用谱仪, 用以探测和记录正负电子对撞产生的基本粒子<sup>[1]</sup>。

北京正负电子对撞机的设计亮度 ( $L$ ) 在 2.8 GeV 能量时为  $1.7 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。在 2.8 GeV 以下,  $L \propto E^2$ , 而轻子对的产生截面为:

$$\sigma_1(e^+e^- \rightarrow l^+l^-) = 86.8/E^2 \text{cm}(\text{nb}).$$

$e^+e^- \rightarrow l^+l^-$  的事例率  $n_l = L \cdot \sigma_1 = 0.05 \text{s}^{-1}$ , 近似地和能量无关。强子产生事例率  $n_h = R \cdot n_l \approx 0.2 \text{s}^{-1}$ 。在  $J/\psi$  共振峰处, 事例率要高得多。设束团的能量分散  $\sigma_E = 0.7 \text{MeV}$ , 按 1.55 GeV 能量下现已达到的亮度计算, 假定谱仪探测效率  $\varepsilon = 0.8$ , 产生  $J/\psi$  的事例率为:

$$n_{J/\psi} = \int \sigma_{J/\psi}(E) dE \cdot \frac{L\varepsilon}{2\sqrt{\pi}\sigma_E} = 3.4 \text{s}^{-1}.$$

但与此同时存在着大量的本底。例如飞行时间计数器的宇宙线本底计数率约为  $1600 \text{s}^{-1}$ , 束流-气体本底和对撞区束流管内的真空度有关, 约为  $2 \times 10^4 \text{s}^{-1}$  左右, 而同步辐射在飞行时间计数器上造成的本底可达  $10^5 \text{s}^{-1}$ 。北京谱仪电子学读出系统使用了 CAMAC 总线和 BADC, 一个 BADC 最多要变换 1700 多路模拟存储的信号, 约需 20ms。再加上 VAX785 在线计算机的中断响应、读入和记带, 共需要约 40ms。离线分析事例重建所需机时为在线计算机的十倍以上, 它们都不允许记录和处理那么多的本底。即使每秒钟多记一个本底事例, 也会使有效亮度损失 4%。

触发判选系统是北京谱仪的快速实时事例选择和控制系统。它的任务是对来自探测

器的几千路信号进行快速判选,把本底从  $10^5\text{s}^{-1}$  压缩到  $1\text{s}^{-1}$  左右,同时保留所有的好事例,而引入的死时间尽可能地小。此外,还要求系统能够适应物理实验的不同要求<sup>[5,6]</sup>。

世界上各个对撞机谱仪触发判选的原则大同小异,但如何实现则强烈地依赖于对撞机的运行指标和探测器的具体结构。在 BEPC 能区,飞行时间计数器仍是一种重要的探测器,可以用它来进行时间选择。在该能区,终态全是中性粒子的事例约占 2%,所以必须考虑对中性事例进行判选,而在末态多重数很高的高能对撞机上就没有这个必要了。多数正负电子对撞机的周期较长,可以从容判选,但 BEPC 的对撞周期仅 800ns,除掉簇射计数器的漂移时间、电缆和各种电路的延迟时间以及足够宽度的还原脉冲后,在一个周期内留给触发判选系统的时间大约只有 100ns。

为了减少死时间,触发判选系统做成多级判选,其流程见图1。第一级判选速度最快,在一个对撞周期内就能完成。如果一级判选没有通过,就及时还原整个读出电子学和触发判选系统,准备接受下一个对撞事例,所以它不引入任何死时间。通过一级判选的事

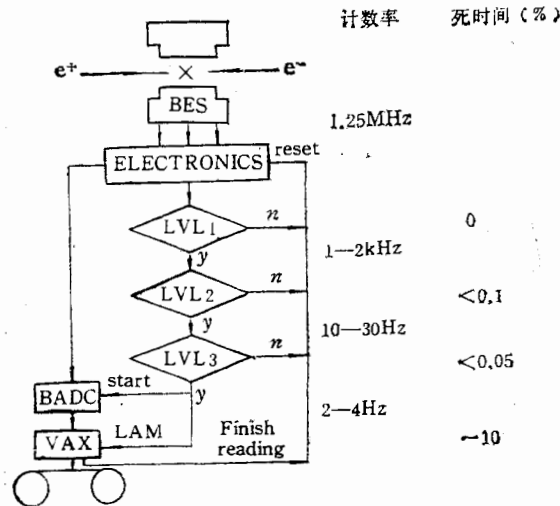


图1 北京谱仪触发判选流程

例率为 1—2 kHz, 再在第二级中作较细致的判选,不能通过的事例也被及时还原。通过二级判选的事例率为 10—30  $\text{s}^{-1}$ , 它们进入第三级判选。二级判选占用第二个对撞周期,平均每秒内引入的死时间占 0.1%。第三级判选所占用的周期数可以根据需要设置,不能通过的事例仍被还原,能通过三级判选的就被认为是“好事例”,这时启动 BADC 进行 A/D 变换,并通知在线计算机准备读数。计算机读数完毕后通知触发判选系统适时还原读出电子学,准备接受新的事例。好事例变换、读出、记带的死时间约为 10—20%。

图2为北京谱仪触发判选系统的总框图。从模式识别的观点看,触发判选系统可以分成特征抽取和判定分类两大部分。北京谱仪的每种探测器都有相应的判选电路,它们对该探测器的信号进行处理,得到代表一定特征的信号(触发条件)送到主触发电路,按照触发条件表进行判选。此外还有定时电路给出控制读出电子学和触发判选系统工作的各种时标和门信号。定标器则监视谱仪的工作情况。本文以下各部分将分别叙述触发判选

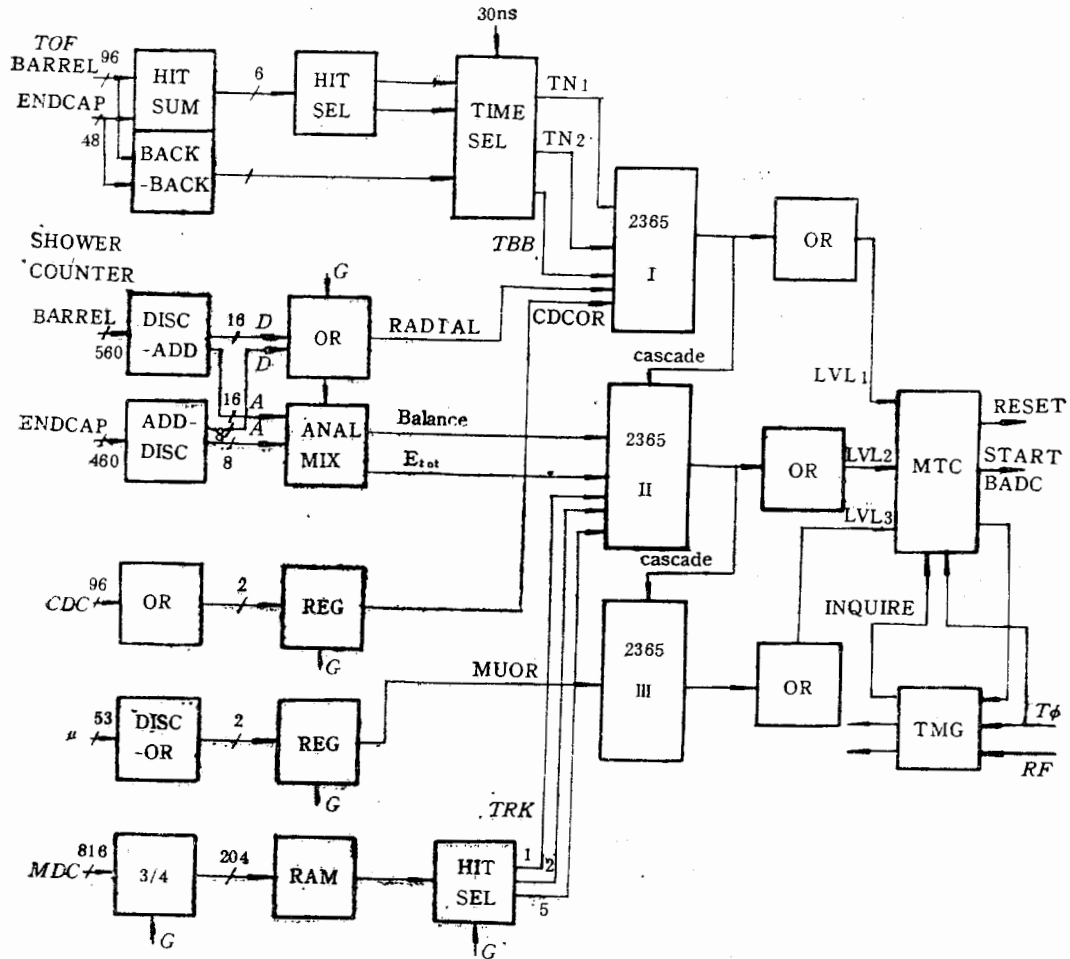


图 2 北京谱仪触发判选系统框图

电路的物理考虑和实现方法。

## 二、飞行时间计数器 (TOF) 判选电路

北京谱仪的飞行时间计数器包括一个  $\phi 2.89 \times 2.84\text{m}$  的桶部 (48 个塑料闪烁体, 两端读出) 和东、西两个端盖 (各有 24 个梯形闪烁体, 单端读出)。计算给出了正负电子束团对撞后, 从对撞点以各种角度 ( $\theta, \phi$ ) 发射出来的不同动量和质量的次级粒子击中桶部飞行时间计数器所需的飞行时间  $t_{of}$ 。图 3 表示各种粒子  $t_{of}$  的范围。可以看出, 如果选择  $t_{of}$  在 3—33ns 期间内, 即设置一个宽度为 30ns 的时间窗, 则桶部飞行时间计数器可以记录击中它的全部电子、 $\pi$  介子, 几乎所有的 K 介子和大部分质子。计算还给出了次级粒子从对撞点出发, 击中飞行时间计数器, 直到光脉冲传输至塑料闪烁体和光导接口处所需的时间  $t_{1p}$ 。在图 4 中, 斜线区为没有时间选择时 TOF 的接受度, 虚线和实线分别表示对  $t_{of}$  和  $t_{1p}$  设置 30ns 时间窗时三种粒子的接受度下限。由图可知, 对桶部

TOF, 用  $t_{of}$  和  $t_{ip}$  作时间选择所能接受的动量范围相差无几, 但前者需要用许多昂贵的时间平均器, 而后者只需要把计数器两端的输出信号相“或”即可完成。端盖 TOF 是单

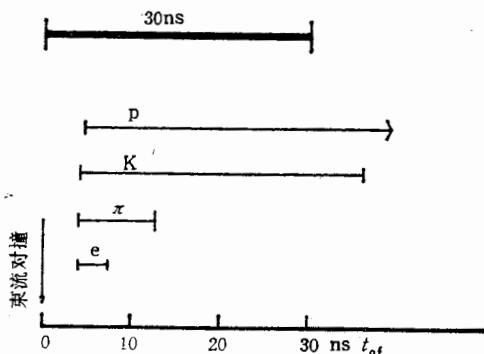


图3 各种粒子击中 TOF 桶部的飞行时间范围

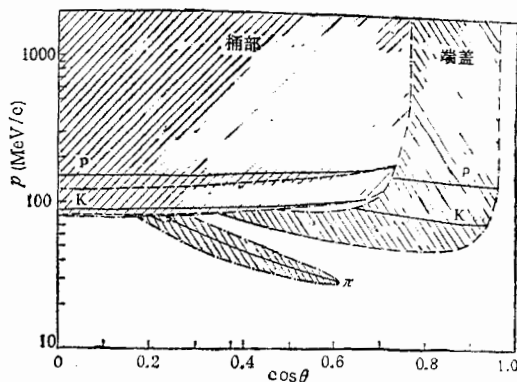


图4 BES TOF 的接受度

端输出, 不可能测  $t_{of}$ , 所以决定都用  $t_{ip}$ . 在每次对撞后用一个宽 30ns 的门对来自 TOF 的 144 个甄别信号进行时间选择, 可以排除 96% 的宇宙线等和束流无关的本底。这比 MARKIII 用内漂移室加延时器作时间选择好三倍。此外还用背对背符合和 15ns 门选取可能的 Bhabha 事例和双  $\mu$  事例。这种背对背符合也在宇宙线运行时用来选择通过谱仪中心的宇宙线。

测量了在有束流的情况下, TOF 击中数  $\geq 1$  (TN1) 和背对背符合 (TBB) 的延迟符合曲线。结果见图 5。可以认为 TN1 的平区是由束流-气体本底和同步辐射击中闪烁计数器各部分引起的。30ns 时间窗置在背对背符合计数率最高处。实际运行中测到了预期的 Bhabha 事例率。

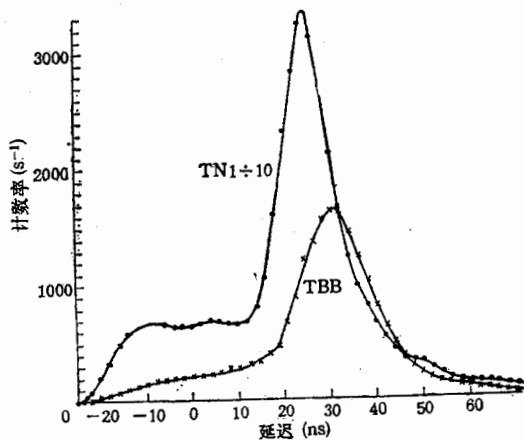


图5 BES TOF 判选信号的延迟符合曲线

### 三、主漂移室寻迹电路<sup>[3]</sup>

北京谱仪的主漂移室 (MDC) 是一个  $\phi 230 \times 220\text{cm}$  的圆柱形探测器, 位于 TOF 计

数器的内部,共有 10 层,每层分别有 48—108 个单元,每个单元内有四根信号丝,奇数层是斜丝,偶数层为轴向丝.由  $e^+e^-$  对撞产生的带电粒子在轴向磁场中偏转,其轨迹在  $r-\phi$  平面内的投影为一个通过束流轴的圆弧.寻迹电路用来自主漂移室最内四层的 816 个信号选择出通过束流轴且偏转半径大于 83cm 的带电粒子(在 0.4T 的磁场下相应于带电粒子的横动量  $p_t > 100\text{MeV}/c$ ),从而可以在空间上排除 95% 的宇宙线本底和从  $p_t$  方面排除 99.9% 与束流有关的本底.选择内四层信号进行寻迹使其覆盖的立体角和飞行时间计数器相匹配,同时又有足够的着火点来确定一根径迹.  $204 \times 4$  个信号先经过四选三逻辑单元<sup>[4]</sup>,它要求一个单元的四根丝至少有三根着火,才认为该单元有一个击中.这样既避免了主漂移室中随机着火本底造成的假径迹,又减小了由于漂移室的单丝效率引起的损失.204 个击中信号送到 RAM 插件以确定是否有好径迹.在 12 个 RAM 插件中存放着好径迹在第 I、II、III、IV 层上击中的单元号的各种可能的组合(图 6).以 204 个击中信号作为地址检查该组合是否构成一个好径迹.最后由 LRS4448 符合寄存器和 TR36 相加甄别器得到表示该事例中好径迹数  $N_{\text{trk}} \geq 1, 2, 3, 5$  等的信号,送到主触发电路.

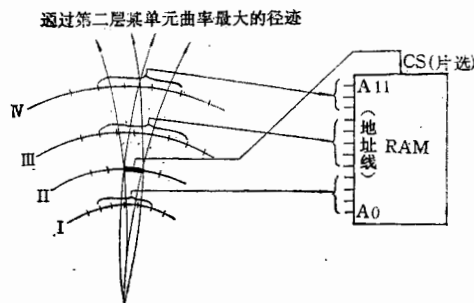


图 6 MDC 寻迹电路的原理图

好径迹组合表是在每次开始运行时通过 CAMAC 加载至 RAM 插件中去的,所以如果要改变切割横动量  $p_t$  或改变磁场,只要重新计算好径迹组合表,加载进去即可,无需改变任何硬件和连线.

对寻迹电路进行的 Monte-Carlo 模拟表明,当径迹离束流轴的最小距离  $r_0$  大于 12cm 时,被误认为是好径迹的几率  $\eta$  小于 25% (图 7a); 当径迹与对撞点的轴向距离  $z_0$  大于 106cm 时,被误认为是好径迹的几率小于 50% (图 7b); 从对撞点各向同性地发出的径迹被确认的效率和径迹动量的关系见图 7c. 在宇宙线运行中,由寻迹电路和飞行时间计数器背对背符合选出的径迹都通过中心漂移室,证明了图 7a 的结论.

MDC 最大漂移时间达 600ns,所以寻迹电路只能放在第二级判选中.在四选三逻辑单元中还有一些替代寄存器,如果 MDC 某一单元失效,可以将该寄存器中相应的一位置成 '1',这样可以避免由于该单元失效而造成的触发效率的损失.替代寄存器还可以用于寻迹电路的计算机检测.

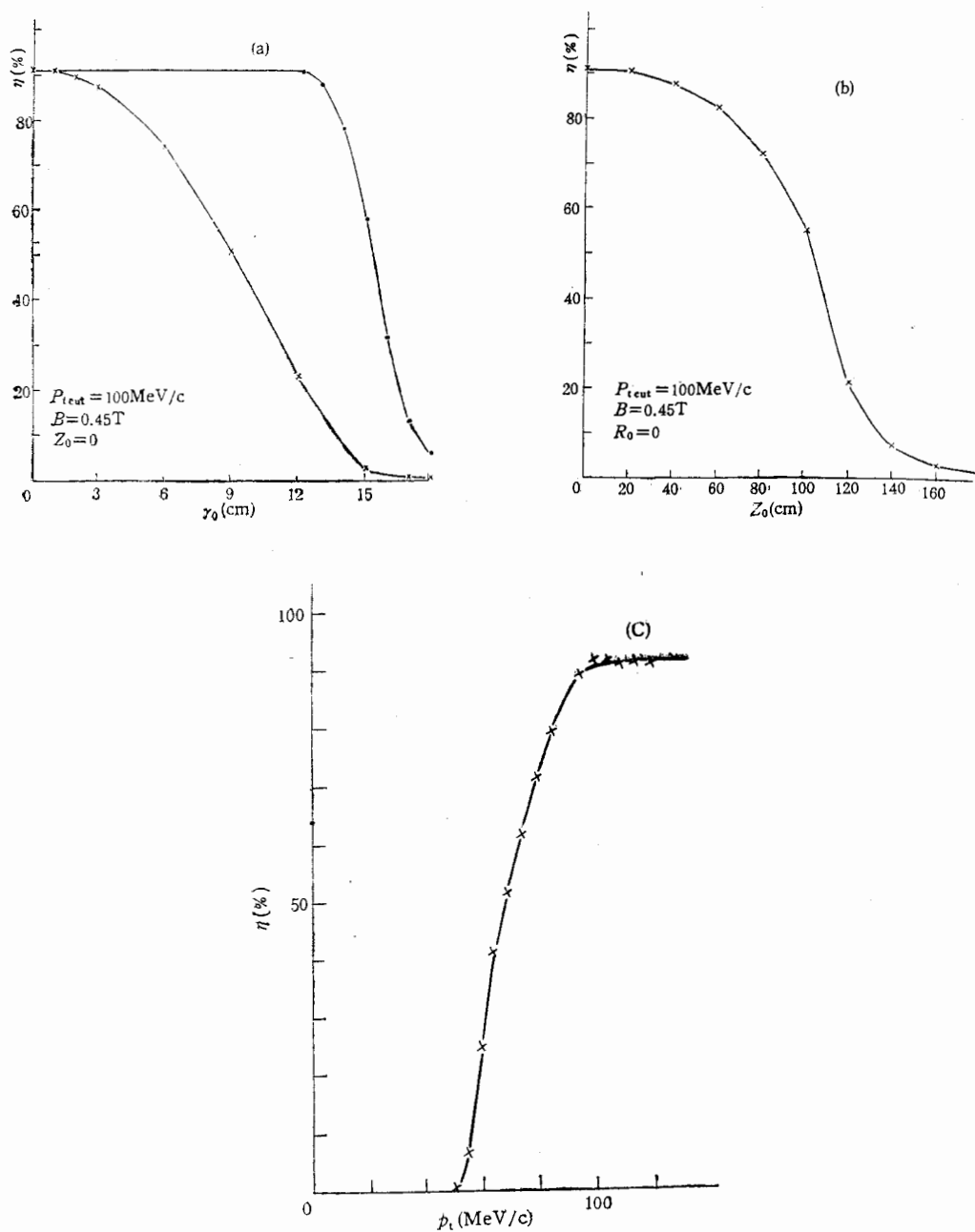


图7 MDC 寻迹电路的 Monte-Carlo 模拟

- 通过 3/4 逻辑的几率
- ×— 通过寻迹逻辑的几率

#### 四、簇射计数器判选电路

北京谱仪的簇射计数器 (SC) 是夹层型气体取样量能器, 位于 TOF 计数器的外

面,分桶部和端盖两部分。桶部是一个内径 247cm, 外径 338cm, 长 385cm 的圆桶, 全周共分 560 个单元, 每个单元沿半径方向分为 24 层, 24 根丝连接成 6 个信号输出, 每两个单元称为一个楔形(图 8)。SC 判选电路对带电粒子事例进行能量选择, 还用于选择末态全是中性粒子的事例。 $\gamma$  光子在磁场中不偏转, 由它们引起的电磁簇射都沿径向发展。把一个楔形内的 12 个信号相加, 如果超过一定甄别阈, 就认为是沿径向发展的簇射, 以此来排除斜穿簇射计数器的宇宙线。各楔形已相加的信号进一步相加成象限能量信号, 判断事例的能量平衡。最后再把象限能量信号相加成总能量信号, 加以甄别, 从能量上排除同步辐射等低能本底。

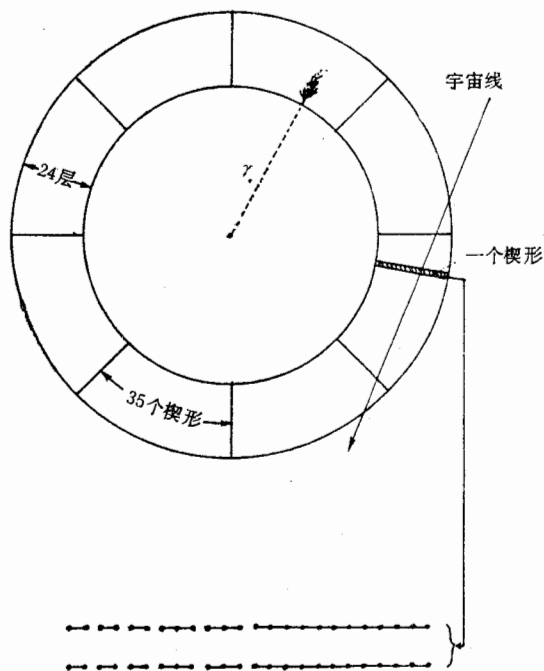


图 8 桶部簇射计数器径向判选原理

簇射计数器判选电路先用 24 个扇入/甄别插件对已在簇射计数器的取样保持电路前端相加得到的 1020 个楔形沉积能量信号进行甄别和进一步的线性相加。其逻辑信号送到逻辑混合插件相“或”成为径向条件信号 RADIAL, 参加第一级判选; 模拟输出信号送到模拟混合插件进一步相加处理, 给出能量平衡条件 BALANCE 和总能量条件参加第二级判选。在桶部, 能量平衡要求  $\phi$  方向象限对象限的符合; 在端盖, 它要求东端盖和西端盖的符合; 此外还有桶部东(西)端和西(东)端盖的符合。总能量条件分高阈和低阈两种。高阈用于对 Bhabha 事例和中性事例的判选, 低阈用于荷电粒子事例的判选。

除楔形沉积能量外, 其他各模拟信号的甄别阈均可通过计算机设置。

## 五、中心漂移室和 $\mu$ 计数器判选电路

中心漂移室 (CDC) 位于束流管道和主漂移室之间, 外径  $\phi 29.6\text{cm}$ , 长 110cm, 共四

层,每层分为48个单元。中心漂移室判选电路把来自中心漂移室第3、4层(第1、2层本底太大)经过甄别的96个信号相“或”并锁存起来,以选取击中它的带电粒子,从空间上( $r$ 方向和 $z$ 方向)排除大部分本底。

$\mu$ 计数器在北京谱仪的最外层。它的判选电路把来自内层 $\mu$ 计数器各组件的53个模拟相加信号甄别并相“或”、锁存,用以标记能够穿过簇射计数器和磁铁线圈的 $\mu$ 子。

由于 $\mu$ 计数器的取样保持电路信号延迟较大,10%在第二级判选之后才到来,所以 $\mu$ 的判选在第三级中进行。

## 六、主触发电路

主触发电路是触发判选系统的判定分类部分(参见图2)。所有上述各特征信号都汇集到主触发电路,根据触发条件表(表1)逐级进行判选。触发条件表被翻译成 $18 \times 3$ 个控制字,这些控制字在每次运行启动时加载到三个LRS 2365插件中。LRS2365<sup>[7]</sup>是一种可编程的 $16 \times 8$ 逻辑矩阵插件,它根据加载的控制字对16个输出信号进行8种不同的

表1 触发条件表

条件 \ 类型	Bhabha	荷电	$\mu^+\mu^-$	中性	备用	宇宙线	备用	
参加取数?	Y	Y	Y	Y	N	N	N	N
TBB	Y	—	Y	—	—	—	—	Y
TN1	—	—	—	—	—	Y	—	—
TN2	Y	Y	Y	—	Y	—	—	Y
RADIAL	Y	—	—	Y	—	—	—	—
中性反符合	—	—	—	N	—	—	—	—
备用	—	—	—	—	—	—	—	—
备用	—	—	—	—	—	Y	—	—
$N_{trk1}$	Y	Y	Y	N	—	Y	—	Y
$N_{trk2}$	Y	Y	Y	N	Y	—	—	Y
$N_{trk5}$	N	—	N	—	N	N	—	—
$\mu^-$ -或	—	—	Y	N	Y	Y	—	—
CDC-或	Y	Y	Y	—	—	—	—	Y
BALANCE	—	—	—	Y	—	—	—	—
总能量(低)	Y	Y	—	Y	—	—	—	Y
总能量(高)	Y	—	—	Y	—	—	—	—

注: Y: 对相应类型的事例,该条件必须满足。

N: 对相应类型的事例,该条件必须不成立(反符合)。

—: 无关。

逻辑组合运算,给出8个逻辑输出。这样就可以同时选择8种不同类型的事例。每次运行要选择哪几种事例,每种事例应该满足哪些条件都可以根据需要灵活改变。某级LRS2365的8个输出信号相“或”后送到主触发控制插件(MTC),表示该级至少有一种事例的要求被满足,MTC在相应周期的第420ns时进行询问(INQUIRE),如果这时相“或”信号



存在, 就可以进入下一级判选或给出“好事例”信号。如果该级所有各种事例的触发条件都不满足, 就在询问后发出还原信号, 使所有电子学读出系统和触发判选系统还原, 准备接受下一个对撞事例。对一个好事例, 还可以通过读 LRS2365 的输出和输入得知该事例可能属于哪一类型以及哪些触发条件被满足。这些信息在单事例图上同时显示出来。

当运行在非共振峰区时, 由于 Bhabha 事例率远高于其他事例率, 在高亮度时必须作预定标, 即对于满足 Bhabha 判选条件的事例, 每  $N_{bb}$  个才有一个发出“好事例”信号。在 MTC 中可以实现这一功能。

在主触发电路中, 从各种触发条件信号输入, 到“好事例”触发信号或还原信号输出, 最短的延迟时间为 45ns。和 MARKIII 相比, 我们的主触发电路做到了在每个对撞周期的固定时刻还原, 使各取样保持电路有固定的台阶, 线路也比较简洁。

## 七、定时电路

所有好事例都是伴随  $e^+e^-$  束团对撞而发生的, 所以北京谱仪的电子学读出系统和触发判选系统都要与束团对撞同步地工作。用束团通过时的拾取信号作为时间零点 ( $T_0$ ), 储存环的 200MHz 高频信号 RF 作为同步时钟, 送到三个时标产生器 (TMG)。它们在设定的时刻给出 10ns 宽的时标或给定宽度的门信号, 送到电子学读出系统和触发判选系统各部分, 使它们同步地运行。各信号产生的时刻和宽度也是可编程的。在宇宙线运行时, 由 100MHz 的本地晶振和由 TMG2 内设置的周期信号作为时钟和时间零点。

## 八、定标器

除了满足触发条件的好事例都被读出并记录到磁带上以外, 还必须监视在各级判选过程中产生的各种信号的计数率, 如各判选电路输出的触发条件信号和通过各级判选的计数率, 以及死时间等。这些信息没有被包括在好事例的读出中。为此, 设置了两套定标器。一套是 CAMAC 插件式的, 在线计算机定时地读出这些计数并记带, 以便作死时间校正。同时在控制台上还设有一个多路定标器, 实时地显示各种计数率, 通过这些计数率判断对撞机和探测器工作是否正常, 各甄别阈是否合适, 并且可以分析和完善触发条件表。

## 九、总结

对北京谱仪的触发判选系统进行了物理设计和逻辑设计, 制作了 41 种专用的插件, 在总装前后分别用 IBM-PC/XT 和 VAX-785 进行了分系统检测。测量了整个谱仪电子学读出系统和触发判选系统各部分的延迟时间, 确定了各个时标值和触发条件表, 并成功地进行了宇宙线运行(1988年10月)和对撞运行(1989年5月), 在运行中进一步改善了触发条件表, 在  $J/\psi$  能量下把宇宙线本底压缩到  $0.1s^{-1}$ , 束流相关本底  $0.4s^{-1}$ , 而  $J/\psi$  事例率为  $3s^{-1}$  左右。并于 1990 年 4 月实现了对中性事例的触发判选。在运行中证明

了触发判选系统设计的正确性,体现了它的灵活性和稳定可靠。

感谢 SLAC 的 M.Breidenbach 和 Univ. Illinois 的 J. Thaler 对 MARKII, MARKIII 触发判选系统的详细介绍和一些有益的建议。感谢席德明先生许多有益的讨论。感谢高能所一室和电子学室许多同志的真诚帮助和协作精神。

### 参 考 文 献

- [1] 22/28 亿电子伏特北京正负电子对撞机初步设计提要,1982.12.
- [2] 过雅南,郁志强,北京谱仪飞行时间计数器触发电路的设计计算《第四届全国计算机在核科学中的应用学术交流会议资料汇编》1987.11 苏州.
- [3] Z. YU et al., A Fast Track-finding Trigger Processor for the BES Detector, *Nucl.Instr.Meth.*, **A265**(1988), 336.
- [4] 丁慧良等,一个简单的四选三逻辑电路,第三届全国核电子学和核探测技术学术会议论文集,1986.10.安徽.
- [5] H. DING et al., Some Comments on the Trigger of BES, Proc. Workshop on Colliding Beam Physics, June 1984, Beijing.
- [6] 北京谱仪触发判选系统的预制研究,《北京谱仪探测器预制研究资料汇编》材料之十, 1988.
- [7] Manual of LRS2365 CAMAC Module, Le Croy Research System, Inc.

## TRIGGER SYSTEM OF THE BEIJING SPECTROMETER

GUO YANAN YU ZHONGQIANG DING HUILIANG SHENG JUNPENG  
 YANG XIRONG GU SONGHUA LI QIMING WU XIDONG ZHANG  
 CHUNYAN DONG AIPING LIN FENGCHENG ZHAO DIXIN  
 (*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing*)

### ABSTRACT

The role and selection procedure of the trigger system of BES are introduced. The physical considerations and construction of its various parts are described respectively.