

# 北京谱仪

中国高等科技中心(世界实验室)高能物理和  
同步辐射中心,中国科学院高能物理研究所

叶铭汉 席德明 郑志鹏

北京谱仪是准备用在北京正负电子对撞机上的高能物理实验装置。本文介绍将来可能在北京谱仪上进行的物理工作,谱仪本体结构及其电子学以及目前进展情况。

## 一、引言

北京正负电子对撞机(Beijing Electron-Positron Collider,简称BEPC)工程是我国为了发展高能物理而进行的重点科研工程。我国从1956年起就把发展高能物理列入国家科学发展十二年远景规划。高能物理实验基地的建设方案在随后二十多年内几经改变,始终未能着手进行。1981年底经过广泛的讨论论证,决定建造一台每束能量为2.2-2.8GeV的正负电子对撞机。这是经过二十多年的探索,比较了各种方案以后所得到的最佳方案<sup>[1]</sup>。

建设北京正负电子对撞机的主要目的有二:一是进行高能物理实验。二是利用电子(或正电子)所发射的同步辐射,进行凝聚态物理、生物、化学、医学、表面物理、微电子学(光刻)等学科的研究和应用工作。此外,还有其他多种用途。注入器产生的高能电子(1.1-1.55GeV)可以用来进行中、高能核物理实验;也可以用来打靶产生 $\pi$ 、 $\mu$ 束作为探测器的试验束;其中 $\mu$ 束还可以用来进行 $\mu$ SR实验, $\mu$ SR是近年来发展很快的用于固体物理、化学的一种新的“探针”。将来,在储存环和注入器上还可以进行自由电子激光研究。

选择正负电子对撞机作为建设我国高能物理实验基地的起步,首先是由于在北京正负电子对撞机的工作能区(质心能量3-5.6GeV)内,有重要的物理问题尚未解决。大家知道,对撞机只能在设计的能量值工作,能量高的对撞机所能作的工作不能复盖能量低的对撞机的工作,因此,北京正负电子对撞机的能量虽不高,在她的工作能区范围内,完全可以作出国际上领先的重要工作。其次,这一台加速器是一器多用,尤其是同步辐射的应用是当前国际上飞速发展的领域。第三,建设规模适中,比较符合我国当前的经济能力。第四,北京正负电子对撞机工程本身是高技术,在建设过程中所发展、带动的各种技术,对于我国国民经济的发展可以起促进作用。

图1是北京正负电子对撞机示意图,分为四大部分:注入器、北京谱仪、储存环、同步辐射实验装置。注入器是一台电子直线加速器,可以把电子或正电子加速到1.4到1.55GeV,然后通过正、负电子输运线注入储存环。储存环可以进一步加速电子和正

电子,使它们最高各达2.8GeV。电子和正电子达到预定能量后,就可以使它们对撞。有两个对撞点,限于预算,现只有一个对撞点上建造一套物理实验探测装置,即北京谱仪(Beijing Spectrometer,简称BES)。同步辐射从储存环的第三、第四象限引出。共五条光束线,八个实验站。

本文介绍北京谱仪可能进行的物理工作,谱仪主体结构及其电子学,以及目前进展情况。

## 二、物理工作

3-5.6GeV是粲物理能区。SPEAR、DORIS、DCI等对撞机曾在此能区工作,作出了重大发现,如 $J/\psi$ 粒子和 $\tau$ 重轻子的发现等等。从理论和已有的实验结果看来,在这一能区内还有很多重要的物理问题没有解决,需积累大量数据才能深入。目前,MARK III还在SPEAR上继续在此能区内工作,我们要超过他们,必须首先在数据的积累上超过,即对撞机的亮度要高,图2是北京正负电子对撞机的设计亮度与SPEAR的亮度的对比。如果北京正负电子对撞机达到了她的设计亮度,北京谱仪工作一、二年后,积累的数据量可以超过MARK III十年所积累的,北京正负电子对撞机就可以成为国际高能物理研究的主要基地之一。

下面是北京谱仪可能进行的物理工作。

### 1. $J/\psi$ 物理

自从1974年发现 $J/\psi$ 粒子以来, $J/\psi$ 事例已经积累了约 $1.8 \times 10^7$ 个,见表1。要进一步深入,第一步就应至少再积累同数量级的事例,或者甚至 $10^8$ 个事例<sup>[2]</sup>。

表1  $J/\psi$ 事例数

$J/\psi$ 事例数	获取日期	工作组
~ 150,000	1974-1975	MARK I
$1.3 \times 10^6$	1978秋, 1979春	MARK II
$2.2 \times 10^6$	1978秋, 1979春, 1970秋	Crystal Ball
$8.6 \times 10^6$	1982, 1983秋	DM 2
$5.8 \times 10^6$	1982秋, 1983春, 1985春	MARK III

在3.1GeV(质心能量),北京正负电子对撞机的设计亮度(峰值)

$$L = 5 \times 10^{30} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$$

假定平均亮度 $\bar{L} = 1/4 L$ ,这是考虑了实际运行时所需的注入时间等因素而这样取的。

$J/\psi$ 的产生截面 $\sigma = 1.05 \times 10^{-26} \text{cm}^2$ ,半宽 $\Gamma = 63 \text{KeV}$ 。半宽比北京正负电子对撞机束流的能散 $\Delta E$ 小得多, $\Delta E(3.1\text{GeV}) \cong 0.63\text{MeV}$ 。由于能散大,实际截面

$$\bar{\sigma} = (\Gamma / \sqrt{2} \Delta E) \sigma = 7.4 \times 10^{-30} \text{cm}^2$$

$J/\psi$ 事例数

$$N = \bar{\sigma} \bar{L} T$$

如运行时间 $T = 10^7$ 秒(即约四个月),则事例数

$$N \cong 9 \times 10^7$$

当然，一开始时亮度不可能达到设计要求，假设为设计值的十分之一，这样在运行的第一年（1989）内可以积累  $9 \times 10^6$  事例（运行四个月），即已超过 MARK III 所积累的。第二年（1990）假设亮度达到设计值的五分之一，则可得  $1.8 \times 10^7$  事例（运行四个月）。这样总共  $2.7 \times 10^7$  例，为 MARK III 的 4.7 倍。

$J/\psi$  的衰变道很多，理论预言在衰变中可以形成：

qq “普通”介子（即由 u, d, s 夸克组成的），  
 $gg, ggg$  胶子球态  
 qqg 夸克、胶子混合态，  
 qqqq 四夸克态。

我们准备作的工作如下：

### （1）寻找胶子球态、混合态等新粒子态

在  $J/\psi$  辐射衰变中， $J/\psi \rightarrow \gamma + X$ ，X 可以是胶子球态、混合态、四夸克态或普通介子。胶子球态和混合态是量子色动力学（以下简称 QCD）所预言的新粒子态，对于它们的寻找将是对于 QCD 的特定的检验，十分重要。 $J/\psi$  辐射衰变是寻找胶子球态混合物的最好的窗口。 $J/\psi$  的共振产生截面大，而它的辐射衰变约占所有衰变的 8%。胶子球态和混合态的质量，理论只能给出大致估计，各种理论给出的质量范围大致在  $1 - 2.5 \text{ GeV } c^2$  左右。 $J/\psi$  衰变产物的质量正好在此范围内。跟  $\Upsilon(9460)$  相比， $J/\psi$  衰变得到从胶子球态的几率要比从  $\Upsilon$  大约 4000 倍<sup>[2]</sup>。

实验上已发现了几个可能是胶子球态或混合态的态，

$\chi/\eta(1460)$ ， $\theta/f_2(1720)$ ， $\xi(2230)$ 。

其中  $\chi/\eta(1460)$  和  $\theta/f_2(1720)$  很可能是胶子球态，但还需要更多的数据才能最后确定。关于  $\xi(2230)$ ，它是否存在还有争论，MARK III 观察到了，但 DM2 没有观察到，而他们两家所积累的数据量是差不多的。现在国际上一致认为，要解决这个问题要等待北京谱仪的数据来作出判断<sup>[2,3]</sup>。要弄清楚  $\xi(2230)$  的自旋宇称，大约至少得有  $2.5 \times 10^7$  个  $J/\psi$  事例<sup>[4]</sup>。

### （2） $J/\psi$ 衰变的普通介子谱

$J/\psi$  的强子衰变和辐射衰变都是研究普通介子  $q\bar{q}$  和四夸克态  $q\bar{q}q\bar{q}$  的好窗口。在  $1 - 2.5 \text{ GeV } c^2$  质量范围内还有不少普通夸克态尚未弄清楚。对于这些态的测量不但检查 QCD 所需要的，它们跟胶子球态等新奇态可能重叠，因此为了寻找新奇态，也必须把这些普通夸克态也弄清楚。

#### 2、 $c\bar{c}$ 粲子素

粲子素 ( $c\bar{c}$ ) 谱虽已有很好的测量，但迄今为止某些态的质量值尚待进一步确定。 $\eta_c(3950)$  的测定值尚待肯定， $\psi'(3685) \rightarrow \eta_c(3590)$  的质量差对于计算粲子素位势的自旋-自旋力是重要的数据。 $\psi(4030)$  和  $\psi(4160)$  的数据还不太肯定，需要重新测定<sup>[5]</sup>。长期以来在实验上尚未观测到  $^1P_1$  态，理论估计它的质量可能约  $3.5 \text{ GeV } c^2$ ，可以通过  $\psi'(3685) \rightarrow ^1P_1 + \pi^0$  衰变来得到<sup>[6]</sup>，实验有待于北京谱仪来解决。粲子素谱数据对于 QCD 的重要检验，一般把它跟氢原子光谱对于量子力学的检验相比拟。

#### 3、D 介子衰变

关于 D 介子的各个衰变道的精细测量也是北京谱仪的研究工作的主要方面之一。 $\psi''$

(3770) 共振是产生DD的最好反应,  $\psi'$  (3700) 几乎全部衰变到DD。MARK III 在  $\psi'$  积累了22,700个  $D^0\bar{D}^0$  事例和16,800个  $D^+D^-$  事例。大家知道, Cabibbo 禁戒事例约为 Cabibbo 允许过程的  $1/400$ 。MARK III 已有的数据显然是不够的, 即使例如 Cabibbo 允许过程  $D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+$  也只有141个事例。

除了在对撞机上, 近来固定靶试验, 例如费米实验室的E691实验, 对于D的衰变寿命和一些衰变道作了测量。E691实验已记录了约  $10^6$  个粲粒子事例, 其中好的D衰变事例有  $5 \times 10^4$  个<sup>[7]</sup>。固定靶实验将是北京谱仪的竞赛对手, 但固定靶实验为了去掉本底, 适宜于作有两个或两个以上带电粒子径迹的衰变, 对于只有一个带电粒子的衰变, 例如  $D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+$ , 本底就不太容易去掉, 而北京谱仪在这方面有优势。

北京正负电子对撞机如能达到设计亮度, 即在3.77GeV (质心能量), 亮度为  $7.7 \times 10^{30} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ , 则四个月, 工作可以积累约  $1.9 \times 10^7$  个事例 (假定平均亮度为峰值的  $1/4$ ,  $\psi'$  产生截面用MARK III给出的数值, 即  $10.0 \text{nb}^{[8]}$ ), 约是MARK III的5倍。

关于  $D^0 - \bar{D}^0$  混合的寻找的实验已有几个实验组作过, 但数据的统计太少, 只给出混合比  $r$  的数据限值约  $10^{-2}$  ( $r=0$  意为无混合,  $r=1$  意为完全混合)。北京谱仪积累一定数据后即可对此问题作出贡献, 也将是对标准模型的一个重要检验。

现有的Ds的衰变数据大都是由工作在10GeV (质心能量) 的CLEO, ARGUS 和固定靶实验E691等作出的, 数据还比较少。质心能量4.0-4.2GeV是研究  $D^+D^-$  事例的能区, 现在还不清楚选哪一能量最合适, 需要等待实验决定。

#### 4. $\tau$ 重轻子

质心能量3.67GeV, 正好在  $\psi'$  (3685) 共振之前, 是产生  $\tau^+\tau^-$  的合适的能量。 $\tau^+\tau^-$  产生截面过了阈值后增加很快, 在此能量已达最大值的50%<sup>[9]</sup>, 而粲粒子本底很小。

将重轻子物理有很多工作可作。首先是  $\tau$  子型中微子  $\nu_\tau$  质量的精密测量, 中微子的质量一直是粒子物理的重要问题, 也是天体宇宙学的重要问题。目前测出  $m(\nu_\tau) < 50 \text{MeV}/c^2$ 。有的理论认为  $\nu_\tau$  有质量, 预言  $m(\nu_\tau) = m^2_\tau / m^2_e \cdot m(\nu_e)$ , 如果这种理论是正确的话。那么对于  $m(\nu_\tau)$  的测量精度如能到  $1 \text{MeV}/c^2$ , 则对  $m(\nu_e)$  的精度相当于约  $0.1 \text{eV}/c^2$ 。

关于  $\tau$  重轻子质量的测定数据主要来自DELCO实验组, 这是一个很重要的数据, 应该进一步提高精确度。这一数值也影响  $\tau$  子型中微子质量的测定。

$\tau$  重轻子的各种衰变道, 特别是 Cabibbo 禁戒的衰变, 数据还不够好。在  $\tau$  重轻子的稀有衰变中, 是否存在轻子数不守恒的衰变, 现在实验得的极限还较高,  $\sim 10^{-4}$ , 应该进一步降低。在  $\mu$  子衰变中, 轻子数不守恒衰变的极限已低到  $10^{-10}$ 。

#### 5. 粲重子物理

北京正负电子对撞机设计的最高能量5.6GeV (质心能量), 目的是可以用来研究粲重子。关于粲重子的研究数据不多, 已测量了  $\Lambda_c^+(2281)$ ,  $\Sigma_c^+(2450)$ ,  $\Xi_c^+(2460)$ ,  $\Omega_c^0(2740)$  等的质量和  $\Lambda_c^+$ ,  $\Xi_c^+$ ,  $\Omega_c^0$  的寿命。 $\Lambda_c^+$  的强衰变有些数据,  $\Lambda_c^+$  的半轻子衰变, 只测了  $\Lambda_c^+ \rightarrow e^+ X$  的分支比<sup>[9]</sup>。总之, 关于它们衰变的数据还缺很多。

#### 6. 其他

$R = \sigma(ee \rightarrow \text{强子}) / \sigma(ee \rightarrow \mu\mu)$  值的精细测量, 特别是在4.0-4.5GeV区域内十分重

要。前面已经提到 $\psi(4030)$ 和 $\psi(4160)$ 的问题,还有选择研究 $D,^*D$ 的最合适的能量的问题,都依赖于R值的精细测量。

寻找Higgs粒子是粒子物理的重大问题,现在正在建造的高能加速器(例如SLC, LEP)的物理目的之一就是寻找Higgs。关于它的质量,有的理论对于它的下限并无限制。在实验上一般认为 $m_H < 15\text{MeV}$ 。果如 $m_H < 3\text{GeV}$ ,则可能存在 $J/\psi \rightarrow \gamma K$ 过程,理论估计其分支比<sup>[11]</sup>约为

$$\text{BR}(J/\psi \rightarrow \gamma H) \sim 3 \times 10^{-6} \times (1 - (m_H^2/m_{\psi}^2)^2)$$

我们可以寻找 $H \rightarrow \mu\mu$ 过程,假定 $m_H < 2.5\text{GeV}$ ,

$$\text{BR}(J/\psi \rightarrow \gamma H) / \text{BR}(H \rightarrow \mu\mu) \sim 10^{-6}$$

估计积累 $10^7$ 个以上 $J/\psi$ 事例,在大量数据中寻找。

综合上面关于北京谱仪准备进行的物理工作的简要介绍,可以这样说,现在等待北京谱仪来解决的物理问题很多,也很重要。北京谱仪将发现新粒子态,将提供有关稀有过程的数据,将以更为精确的测量结果来替代现在已有的数据,将澄清目前不同实验结果之间的分歧和疑难。只要北京正负电子对撞机的亮度能达到设计水平,就可以成为国际高能物理和重轻子物理的主要中心之一。

### 三、主体结构

北京谱仪的设计思想是:一、按照物理工作要求,性能上尽可能超过现在正在同一能区工作的同类型的探测装置,例如MARK III。二、尽量采用当前国际上比较成熟的技术,例如采用漂移室来测量带电粒子径迹而不采用时间投影室。三、立足于我国现有的工业技术水平,例如磁体线圈采用常规设计而不采用超导线圈。上述第一点是为了保证谱仪性能的先进性。第二、三点是为了保证在性能先进的条件下,能在计划规定的时间内建成。在谱仪的性能上,我们着重下列四点:

- (一) 尽可能大的立体角,力求接近 $4\pi$ 。
- (二) 对于带电粒子的动量有较好的分辨本领。
- (三) 能较好地鉴别带电粒子。
- (四) 对于光子有较高的探测效率,特别是对于低能光子的探测截止阈要尽可能低(约 $100\text{MeV}$ ),具有较好的位置分辨本领和适当的能量分辨本领。

图4是北京谱仪的示意图。表2是谱仪的主要部件的机械参数。

#### 1、束流管道

束流管道的理想材料是铍,但我国目前还不掌握制造铍束流管的技术。现在所作的束流管为炭素纤维缠绕加固的薄壁铝等。炭素纤维层厚 $2\text{mm}$ ,铝管壁厚 $0.3\text{mm}$ 。束流管的外径为 $15.4\text{cm}$ 。拟在工作一段时间之后改用铍来制造束流管。

#### 2、中心漂移室

中心漂移室内径 $17.8\text{cm}$ ,外径 $30.2\text{cm}$ 。信号丝长 $110\text{cm}$ 。探测的立体角为 $98\% \cdot 4\pi$ 。信号丝布在四层同心圆柱面上,每层48根。每一根信号丝和周围的电场丝组成一个探测单元。相邻两层的探测单元相互错开半个单元。中心漂移室模型经加速器束流测

表2 北京谱仪部件机械参数

名称	内径 (mm)	外径 (mm)	沿Z长度 (有效) (mm)	距对撞点 (mm)	重量 (t)
束流管道	150	154	850		~0.07
中心漂移室	178	302	1100		~0.02
主漂移室	310	2300	2200		1.5
飞行时间计数器					
桶部	2314	2115	2840		2.0
端盖	700	2100	厚25	1210	1.0
簇射计数器					
桶部	2470	3382	3850		33
端盖	746	1920	厚411	1251	8
螺旋管线圈	3450	1170	3604		31
钨铁					390
第一层			4260	2140	
第二层			4700	2110	
第三层			4400	2700	
$\mu$ 子鉴别器					10.1
第一层			4212	2273	
第二层			4638	2563	
第三层			4638	2860	
亮度监测器				1920	

试, 单丝空间分辨率 $\sigma_r$ 为160 $\mu$ m。Z向测量用电荷分配法,  $\sigma_z$ 为2.5cm。所用的气体为大气压88%Ar、10%CO<sub>2</sub>和1%甲烷。图5是中心漂移室示意图。

工作一段时间后将改用空间分辨率更好的径迹探测器来取代这一中心漂移室。

### 3、主漂移室

主漂移室内径31cm, 外径230cm, 信号丝长220cm。探测的立体角为96% $\cdot$ 4 $\pi$  (第二层)。探测单元为多信号丝结构(见图6), 每一单元有4根信号丝, 彼此间距1cm。信号丝之间加有电位丝, 以减少信号丝之间的串扰。信号丝各分别左右偏离探测单元的中心面半0.35mm。这样可以提供粒子径迹的左右分辨。当每一单元内有三根或四根信号丝有信号时即可给出一小段径迹向量。全室共十层探测单元, 每层的单元数各为48、48、60、58、48、68、78、88、98、108(从最内层向外数), 总共702个单元, 2808根信号丝, 连同电位丝等, 总共有19,380根丝。信号丝定位孔在端盖板上的位置精度为 $\pm$ 40 $\mu$ m。十层探测单元中, 第2、4、6、8、10层信号丝沿Z轴的方向, 其余五层的信号丝与Z轴成一定的角度, 名叫斜丝, 这样由于丝的方向的交叉可以给出Z向定位的信息, 设计的 $\sigma_z$ 为3-5mm。每一根信号丝同时给出位置和带电粒子的能量损失 $\Delta E$ 、 $\Delta X$ 两种信息。设计的单丝空间分辨率 $\sigma_r$ 为200 $\mu$ m, 主漂移室模型经加速束流测试, 得 $\sigma_r$ 为170至210 $\mu$ m(随粒子径迹离信号丝的距离而异)。 $\Delta E$ 、 $\Delta X$ 的取样数为40, 从模型的束流测试得到, 能量损失分辨率 $\sigma_{\Delta E}$ 对于动量为0.5GeV/c的e、 $\pi$ ,

$p$ 分别为14%、17%、13%，此处 $\sigma_{\Delta E}$ 为能量损失的偏差标准， $\overline{\Delta E}$ 为平均能量损失。 $\Delta E/\Delta X$ 的数据可用来作为鉴别带电粒子的一种信息。主漂移室所用的气体同中心漂移室。

#### 4、飞行时间计数器

飞行时间计数器分为桶部和端盖两大部分，立体角复盖各为80%和15%· $4\pi$ 。桶部飞行时间计数器由48块NE110塑料闪烁体组成，每块长24.8cm，宽15cm，厚5cm，我们曾对光的传导效率与厚度的关系作了研究，对于这样的长度，5cm厚度是最佳设计。桶部与端盖用鱼尾形光导接XP2020光电倍增管。端盖飞行时间计数器共两个，每个由24块NE102A塑料闪烁体组成一个圆环，圆环的内径为70cm，外径210cm。每块闪烁体厚2.5cm。闪烁体的一边接鱼尾形光导，光导与闪烁体成90°，单端输出，光电倍增管也是XE2020。桶部和端盖飞行时间计数器的时间分辨各为200ps和250ps。带电粒子从对撞点飞行到桶部探测器的垂直距离为1.17m，对于200ps的时间分辨率，可以分离动量 $P = 1.7\text{GeV}/c$ 的 $\pi^+k$ 和 $P = 1.78\text{GeV}/c$ 的 $k/p$ （以上均为 $2\sigma$ 分离， $\pi$ 、 $K$ 、 $p$ 各为 $\pi$ 介子、 $K$ 介子、质子）。图7、8所示各为桶部和端盖飞行时间计数器的探测单元。

#### 5、簇射计数器

簇射计数器分为桶部和端盖两大部分，立体角复盖各为80%和14%· $4\pi$ 。桶部由24层Al-Pb-Al吸收板（Al层各厚0.6mm，Pb层厚2.8mm）和24层气体放电计数器层交互重叠构成（见图9），总厚度相当于12辐射长度。用一个内径2.17m、壁厚31mm的大铝桶作为基底，基底上加加强筋，每个吸收层用不锈钢带捆扎在加强筋上，每个气体放电计数器层由工字铝分隔为560个探测单元，24层总共13,440个单元。每个单元高13mm，宽14.2至18.7mm（随每层的半径增大而增加）。每单元有一根50 $\mu\text{m}$ 的不锈钢丝作为信号丝。

端盖簇射计数器共两个，每个由两个半园柱构成。半园柱各由23层Al-Pb-Al吸收板（厚度同桶部）和24层方形截面铝管交替粘接而成。铝管壁厚0.6mm，截面为12.8×12.8mm<sup>2</sup>。每根铝管中心有一根37 $\mu\text{m}$ 的不锈钢丝作为信号丝。前8层每层174至188个单元（每层递增2单元），后16层每层190个单元。每个端盖簇射计数器共1488个探测器单元，两个共8976个单元。

簇射计数器采用自淬灭流光放电（SOS）工作模式，输出信号较大，在50 $\Omega$ 输出阻抗上，信号可达50mV以上，工作气体为一大气压30%Ar和70%CO<sub>2</sub>通过0℃正戊烷。由于这种混合气体能够燃烧，不够完全，现决定暂时在运行初期用30%Ar和70%CO<sub>2</sub>，不通过正戊烷。Z向读出用电荷分配法， $\sigma_z$ 约为信号丝长度的0.7%，约3cm。簇射计数器模型经加速器束流测试，能量分辨率 $\sigma_E/E$ 为16% $\sqrt{E}$ （E以GeV为单位）。

常规型螺线圈磁体，由线圈和轭铁两部分组成。线圈用铝导线绕成，共6层，内径3.45m，外径4.22m，长3.6m。总重约31吨，导线截面为方形52×52mm<sup>2</sup>，中间空间的温度由磁体发热而升高。桶部轭铁为八边形，用10号钢制成，分为3层，每层轭铁又作为 $\mu$ 子鉴别器的强子吸收体，各厚12cm、14cm和14cm（自中心向外数）。励磁电流为3500A时，直流功率为890KW，磁场强度达4.5KG。在径迹区（即安装漂

移室的空)内, 磁场强度的均匀度实测好于3%, 好于设计值5%。我们设计了专用的自动化磁场测量装置, 在一个月的时间内, 测出了线圈腔内一万多个点的磁场强度, Z向磁场强度的测量精度达0.2%。

### 7. $\mu$ 子鉴别器

$\mu$ 子鉴别器分为3层, 每层由强子吸收体(即钨铁)和气体计数器组成。每层计数器包括两层正比计数管, 上下错开半个单元。计数器为铝型材, 每单元包含四个正比计数管, 每个计数管为长方形截面, 高50.8mm, 宽60.9mm(见图10)。信号丝为 $15\mu\text{m}$ 不锈钢丝。正比气体放电工作模式。用电荷分配法读Z向位置,  $\sigma_z$ 约5cm。各层的复盖立体角分别为68%、67%、63% ( $\cdot 4\pi$ , 自中心向外数)。工作气体为一大气压90%Ar和10%甲烷。

### 8. 亮度监测器

亮度监测器分为四个相同的单元, 分布在对撞点的两边(Z向), 每边两个, 水平液面紧贴束流管的两侧。每一单元由粒子探测器、反冲粒子探测器和量能器(从对撞点向外排列)组成。粒子探测器为厚3mm、截面 $24 \times 76\text{mm}^2$ 的NE110塑料闪烁体。反冲粒子探测器用同样的闪烁体, 厚9mm, 截面 $55 \times 96\text{mm}^2$ 。量能器由11层厚5.9mm的铅片和厚6mm的NE110闪烁体交互叠成, 总厚度相当于12辐射长度, 截面为 $87 \times 120\text{mm}^2$ 。亮度监测器的整体尺寸由北京谱仪的结构尺寸所限, 接收度(不考虑束团长度)上限为55mrad。

### 9. 触发系统

触发筛选分两级进行。对于带电粒子事例, 第一级判选用飞行时间计数器的30ns时间窗, 以排除约96%的宇宙线本底。第二级判选用径迹判读逻辑, 利用在主漂移室最内四层的径迹, 用随机存取存储器(RAM)构成一个可编程序寻迹处理器, 事先按照一定的横动量功切割要求输入数据。第二级判选在两个对撞周期的时间内(即小于1600ns)完成。

对于中心事例, 把簇射计数器的径向能量沉积条件作为第一级判选。第二级用总能量的高甄别阈值切割和径向能量沉积平衡和 $\mu$ 子鉴别器的否决作出判选, 也在两个对撞周期内完成。

### 10. 在线数据获取系统

北京谱仪的读出电子学将在本文第四部分介绍, 这里所指的是读出电子学所输出的数据的计算机在线获取系统。硬件方面采用斯坦福直线加速器中心(简称SLAC)所发展的智能插件VAX-CAMAC-CHANNEL(简称VCC)作为计算机与CAMAC系统的接口, 采用VAX11-785作为在线计算机。软件方面工作量很大, 约20万条语句, 几千个文件。从西欧核子中心(CERN)的ALEPH合作组引进了UPI(User Interface Package)系统, 这是一种先进的人机对话型软件, 使用和维护都比较方便, 在国外一些新的实验装置上已得到广泛应用。UPI已经初步移植到北京谱仪上, 正在完善之中。在线数据获取系统可以实现数据获取、事例记录与分析、探测器电子学运行的监测与控制、在线刻度、直方图与单事例图的显示等。

### 11. 离线分析系统



为了分析北京谱仪所获得数据，必须及早准备好离线分析所需的大量软件，主要可分为两大类。一类是通用的计算分析和作图程序；一类是北京谱仪的专用程序。

通用软件方面，大量软件已经移植到VAX/VMS环境，有的已使用了好几年，对它们有较好的理解和维护。例如CERN的通用程序库（提供各种算法程序），CERN的HBOOK和SLAC的HANDY PAK（作直方图和数据点分布图），CERN的HPLOT和SLAC的TOPDRAWER（数据作图），SLAC的UGS（绘图程序包）和EGS（电磁辐射程序包）等。

专用软件方面主要为两个大程序包。一个是作Monte-Carlo模拟的程序包，名叫SOBER（Simulation Of BEs Spectromter），一个是数据的径迹重建和显示的程序包，名叫DRUNK（Display and RecontrUction Kit）。这两个程序包工作量很大，现已写出了初步版本。SOBER已能模拟Bhabha散射、 $J/\psi$ 辐射衰变、 $\mu$ 子对产生、DD对产生等。DRUNK已完成了其中重建主漂移室和簇射计数器的径迹的两个程序包，它们分别名叫DCFIND和SHANAL，各含有约60个以上子程序，各超过一万条FORTRAN语句。

北京谱仪专用软件的规模很大，为了便于管理、维护，采用了先进的源程序管理程序PATCH来管理所有的源文件。北京谱仪离线分析系统正在逐步完善之中。

## 12、气体系统

北京谱仪共用三种不同混合比的气体。气体的混合比应十分稳定，特别是用于主漂移室的气体，要求CO<sub>2</sub>的比例为 $(10 \pm 0.1)\%$ ，CH<sub>4</sub>的比例为 $(1 \pm 0.05)\%$ 。目前我国用分压配气精度的水平是：CO<sub>2</sub>  $(10 \pm 0.5)\%$ ，CH<sub>4</sub>  $(1 \pm 0.2)\%$ 。现在第一步采用由工厂配好的混合气体。同时正在发展质量流配气法在现场用自动控制装置直接配制混合气，精度预期为0.1%，稳定性也可好于0.1%，将大大节省气体费用。

气体系统备有一系列检测设备，监测气体的成分、杂质成分（O<sub>2</sub>，N<sub>2</sub>，H<sub>2</sub>O）、气压、温度、气体的泄漏，周围环境中泄漏、周围环境中泄漏气体的浓度等等。另外在各探测器的气体入口和出口处取样通入监测器，以测量气体放大倍数等。以上数据由在线系统记入磁带，用来对实验结果加以校正。

## 13、机械结构及其他

北京谱仪由多种探测器组合而成，是一项复杂、精密的工程。现在北京谱仪已经组装成功，说明各部件的设计、加工、组装和整体的设计、安装都是成功的。完成的大量机械工作如下：

(1) 谱仪总体结构，各个部件的机械尺寸，以及安装间隙的分配，电缆、冷却水、气路等的通道等等。

(2) 各种探测器的机械设计，特别是主漂移室、簇射计数器的结构的应力计算。

(3) 各种探测器的制造工艺、组装工装，如布丝、精接工艺及其工装，桶部簇射计数器的捆扎工艺和组装工作台架等。

(4) 螺线管线圈磁体的设计及其绕制工艺和工装。

(5) 轭铁的设计。

(6) 谱仪的移动机构，整个重约180吨的谱仪安装在一个可以移动的底座上。轭

铁端盖部件的开启移动装置。

- (7) 各种探测器的安装工装。
- (8) 束流管道的设计及其制造工艺。
- (9) 谱仪的安装定位测量方案及其实施。
- (10) 自动化磁场测量装置。
- (11) 亮度监测器的安装定位装置。
- (12) 一些特殊的工艺、工法,例如主漂移室的换丝方法及工具等。

为了保证谱仪正常运行,环境监测除有关气体的监测器,还有磁场监测、温度监测、安全监测、完全防火监测等等。

## 四、电子学

北京谱仪探测器的输出信号需要有选择地读出和处理,这就是北京谱仪电子学的任务。通常将经过处理后的数据读出并存放在磁带上,供离线分析用,以便得到有意义的物理结果。

图11是一个示意框图,从图中可以看出整个系统的工作原理。探测器的输出信号经过读出电路处理后,部分信息送入触发判选电路。触发判选电路根据各种物理判据作出判决后,将结论送回读出电路。如属不合格事例,则使读出电路复原以等待下一个事例;如属合格事例,则将已接受的信息进行数字化和数据预处理后送入在线计算机,并记录在磁带上。在获取探测器输出信号数据的全过程中,在计算机的控制下,反复地对读出电路进行校准,力求在何任时候都能获取满足精度要求的数据。整个系统在定时信号控制上,与对撞机同步地有序地进行工作。此外,各种环境参量信息,作巡回读出后供计算机作物理数据的修正用。

北京谱仪探测器是电子学计数器式的探测器,其特点是精度高、速度快,而探测单元也多。这就决定了北京谱仪电子学具有一定规模,而且性能要求很高。

表3 北京谱仪电子学信道量一览表

	读出信道量			提供触发判选的信道量
	时间	电荷	温度 电压	
中心漂移室电子学	384	384		96
主漂移室电子学	2008	2808		816
飞行时间计数器电子学	144	114	144	144
桶部簇射计数器电子学		6912		576
端盖簇射计数器电子学		5568		461
$\mu$ 子计数器电子学		1520		53
环境参数监测			144 416	
共计	3336	17336	288 416	2119

由表3可见,信号读出和处理的总信道量达三万三千多个。这样的规模,和当前国

实际上大型高能谱仪相比,尚属于小型的。但就其性能要求来说,则和国际上同类型的谱仪电子学是一致的。

### 1. 总体设计

#### (1) 系统考虑

为了节省成本,基于北京正负电子对撞机每秒对撞次数很高( $1.25 \times 10^6$ 次/秒),但真正需要读出的事例率很低(记磁带的事例率控制在 $1 \sim 5$ 个/秒),输入到谱仪电子学的信号是高速的、并行的,但输出时可以是串行的。这样就可以利用一个模数变换器来读出众多信道的信息。因此,北京谱仪电子学系统采用了模拟总线的概念。多达二千个信号暂存后可以须序地加到模拟总线上,由一个模数变换器进行数字化。

为了压缩每个事例的数字量,提高事例的数据质量,对于没有用数据的信号道不予读出。同时为了使大量同类型信道的性能保持一致,在数据送入计算机之前,必须进行预处理。预处理的内容包括对各信道的增益,台阶和非线性进行修正。这是在计算机控制下,通过校准系统来完成的。

基于上述考虑我们在系统中采用了智能模数变换器(BADC)来实现这些功能。

根据北京正负电子对撞机上近期内高能物理实验的要求,每秒记录的事例数控制在 $1 \sim 5$ 个。记录每个事例的时间控制在30毫秒左右。考虑到我国的具体条件,在系统中采用了CAMAC标准

由此构成的北京谱仪电子学系统框图见图12,探测器输出信号送入前端电路,每一个探测器的输出信号都需要有一个前端电路,无论是电路量、时间量、空间座标量,经过前端电路后的输出都是电压。利用模拟开关,可将众多的前端电路输出顺序地加到模拟总线上,供BADC顺序地进行数字化和预处理。BADC输出的数据,在计算机的控制下,经CAMAC机箱数据通道、专用机箱控制器,和分支接收器和分支驱动器联接到系统机箱,一个系统机箱可以驱动十几个分支。系统机箱中的各个分支经系统机箱的机箱控制器接到VAX-CAMAC通道,简称VCC。VCC实际上是系统机箱和在线主机VAX-11/785的智能接口。

#### (2) 布局设计

整个谱仪电子学系统计有前放板700多个,前端盒400个,19"机箱约200个。其中前放板及前端盒均直接装在探测器大厅中相应的探测器输出端上。约50个19"机箱安装在北京谱仪的两个端面上。这样可以大大缩短电缆长度,减小噪声和干扰。约150个19"机箱被安置在16个19"标准机架架上。机架分为三排放在电子学间(也称计数器厅)。探测器大厅中的电子学和电子学间中的电子学约由长25米的各种电缆连接。电缆的长度考虑了探测器的两种工作位置:即在对撞机束流线上运行的位置及离束流线8m的宇宙线实验位置

谱仪控制室及在线计算机室设在电子学间的东侧。

对电子学间,控制室及计算机房的供电、通风、用水、接地、照明等问题作了周密考虑,为今后系统运行创造了良好的条件。

#### (3) 技术路线

对于高能谱仪电子学,过去我们是没有经验的。我们参考了国外多种高能谱仪电子

学系统，其中主要参考了美国斯坦福直线加速器中心（SLAC）的MARK III以及更新后的MARK II谱仪的电子学系统。

但是，考虑到电子学技术的发展很快，又要结合我国现有的基础，因此，我们必须在立足国内的同时，力求采用电子学技术、新器件、新工艺。目前，谱仪电子学用的机柜、机箱（CAMAC机箱及专用机箱）、印制板（包括多层板）、电缆（同轴电缆及多股双绞屏蔽电缆）、稳压电源等都在国内解决。而关键元器件，尤其是高速、精密的器件、混合集成电路则采用国外先进技术。尽量做到在保证性能的前提下提高装配密度、增加系统的可靠性、降低功耗、节省开支。

## 2、基本系统和主要性能

北京谱仪电子学的框图如图14所示。由图可见，其主要部分包括：

- \* 主漂移室和中心漂移室电子学
- \* 飞行时间计数器电子学
- \* 桶部及端盖簇射计数器电子学
- \*  $\mu$ 子计数器电子学
- \* 环境参量监测

除环境参量监测外，上述各探测器电子学都有各自的在线校准系统。

由于电路板及插件数量众多，为了调试检测的目的，建立了基于微型机和小型机的各种电路及插件的检测系统。

为了进行分系统联合调试及性能测量，并最终为检测整个谱仪电子学系统，建立了多用户的基于PDP-11/73的在线检测系统。

上述各部分都有丰富的内容。在这篇文章中没有可能作详细、具体的介绍。请读者参阅发表的资料。

经过四年多的努力，完成了电子学预制研究工作。漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器及 $\mu$ 子计数器等探测器的电子学系统均已完成了规模不同的模型系统。对于几个基本系统的主要性能指标进行了反复的测量，其结果见表4。

这几个基本系统都已经和相应的探测器进行联合调试，证明工作正常，有的已获得清晰的宇宙线实验结果。

从这些结果可以表明：

- \* 实际达到的指标大都符合要求的指标，有的尚略有余地。
- \* 和国际上同类高能谱仪电子学（如美国SLAC的MARK III）相比，性能指标大体一致，部分性能有所提高。

值得指出的是：

\* 吸取了他人的经验，少走了弯路。例如：飞行时间计数器电子学采用单阈定时甄别；不用大面积印制板等。

\* 自己设计了比较完整的计算机在线校准系统。 $\mu$ 子计数器电子学上用电荷分配法定位的三点定标法有一定特色。

\* 开发了积分式和跟踪式取样保持电路及其他多种混合集成电路。采用了混合集成电路前放，提高了装配密度和性能。

对质量严加控制, 包括认真筛选元件, 利用CAD技术设计印制板, 制订周密的电缆及插件的组装工艺要求, 把紧验收关。从各个模型系统的调试及运行情况来看, 效果是良好的。

表 4 北京谱仪电子学基本系统主要性能指标一览表

项目	指标	电荷			间时		
		分辨( $\sigma$ )	积分非线性	保持顶降	分辨( $\sigma$ )	积分非线性	保持顶降
漂移室 电子学	要求值	7 f.e.	3%	0.1%/6 ms	2 ns	1%	0.1%/6 ms
	达到值	5.5 f.e.	1.8%	0.1%/10 ms	2 ns	0.12%	0.1%/10 ms
飞行时间计 数器电子学	要求值	$\sim 0.5$ pc			20 ps		
	达到值	0.5 pc			20 ps		
簇射计数 器电子学	要求值		0.4%	0.1%/6 ms			
	达到值	0.74 ch	0.2%	0.1%/10 ms			
$\mu$ 子计数器 电子学	要求值	6 f.e.	0.2%	0.3%/10 ms			
	达到值	2 f.e.	0.1%	0.2%/12 ms			

## 五、进展情况

1981年初, 开始酝酿北京正负电子对撞机的设计方案。同年年底, 经过广泛深入的调研、讨论, 原则决定建造一台每束电子(或正电子)能量最高为2.8 GeV的正负电子对撞机和相应的实验装置。1982年上半年, 召开了两次工作会议讨论有关实验装置的种种问题, 开始北京谱仪的初步设计。9月完成初步设计, 开始进行必要的预先研究, 如关于飞行时间计数器的分辨时间的研究, 自猝灭流光放电的研究等等。在1983年冬的第二届高能实验物理讨论会和1984年中的第一届北京对撞束物理国际讨论会上, 广泛听取了国内、外专家的意见。1984年秋确定了设计方案, 开始工程设计。北京谱仪的各部件陆续在1985年内开始加工制造。1986年中, 中心漂移室、主漂移室、桶部和端盖簇射计数器等四种探测器的模型在日本高能物理研究所(KEK)进行加速器束流测试。1987年初, 螺线管线圈及其轭铁、谱仪底座等首先完成并安装在实验大厅内。中心漂移室、主漂移室、飞行时间计数器(桶部和端盖), 簇射计数器(桶部和端盖)陆续在1987年下半年分别组装完成, 开始性能检测。1987年底, 1988年初分别对上述探测器进行宇宙线在线测量, 检查探测器本身和在线数据获取系统的相应分系统。1988年5月完成螺线管线圈的磁场分布的测量。6月把桶部簇射计数器安装到螺线管线圈内。7月 $\mu$ 子鉴别器全部完成, 开始在谱仪上安装。8月主漂移室安装到谱仪上。电子学线路在1987年底开始在电子学间内的安装, 1988年8月基本完成安装工作。目前已开始进行北京谱仪的宇宙线测试。今年年底等北京正负电子对撞机实现正负电子对撞之后, 即将按原定计划要求把整个谱仪移到对撞点, 开始谱仪的束流测试和物理实验工作。

自从1984年秋最后确定设计方案以来, 历时四年, 在领导的大力支持、各工业部门和科学院的大力支援和北京谱仪全体工作人员的努力下, 北京谱仪的建造按计划进行, 现进入总体调试阶段, 建造速度可以与国外同类型探测装置相比。北京正负电子对撞机

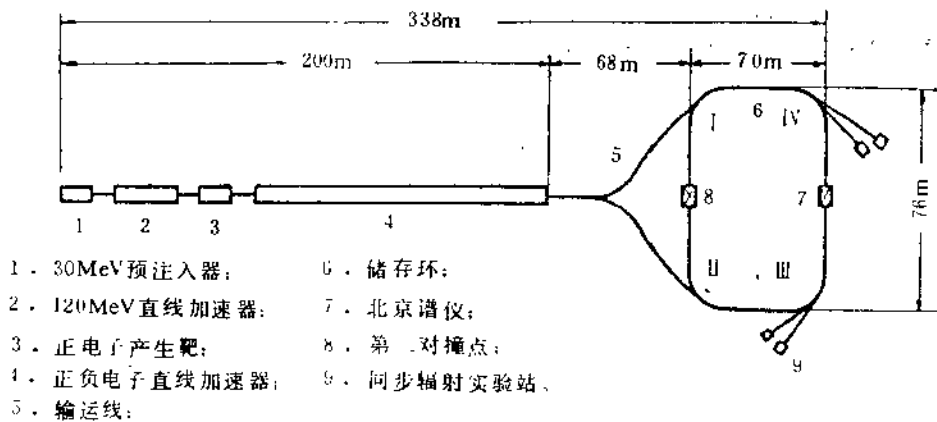


图1 北京正负电子对撞机示意图

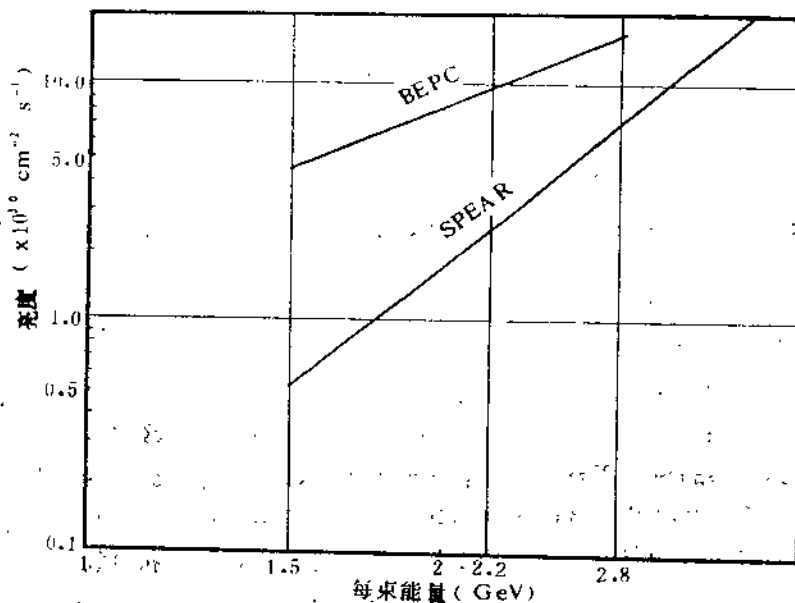


图2、北京正负电子对撞机 (BEPC) 和SPEAR的亮度



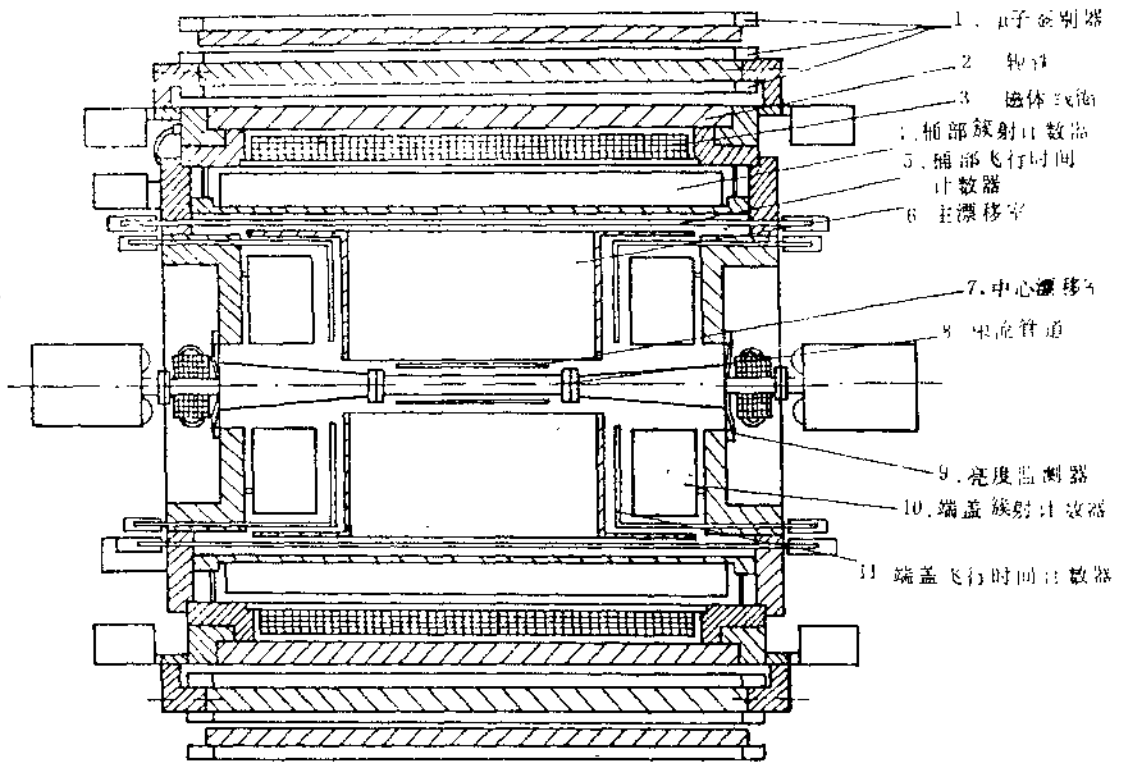


图4 北京谱仪示意图



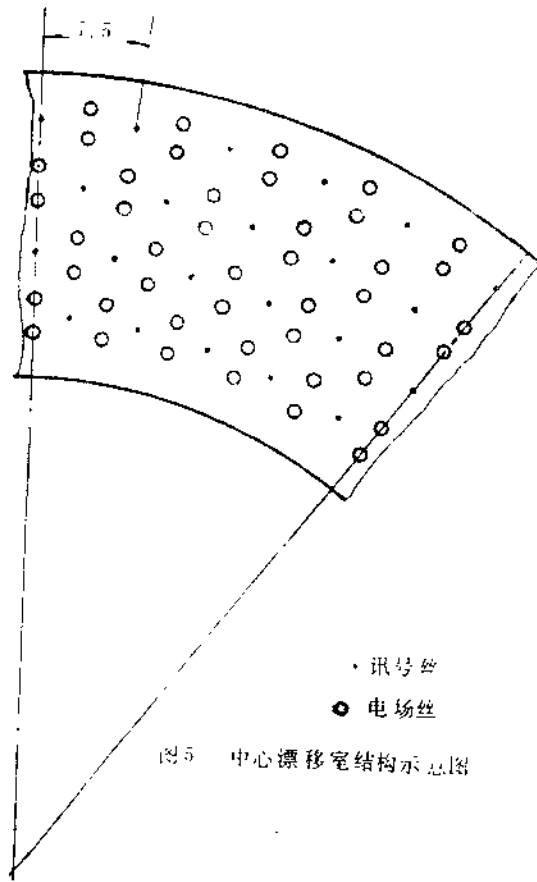


图5 中心漂移室结构示意图

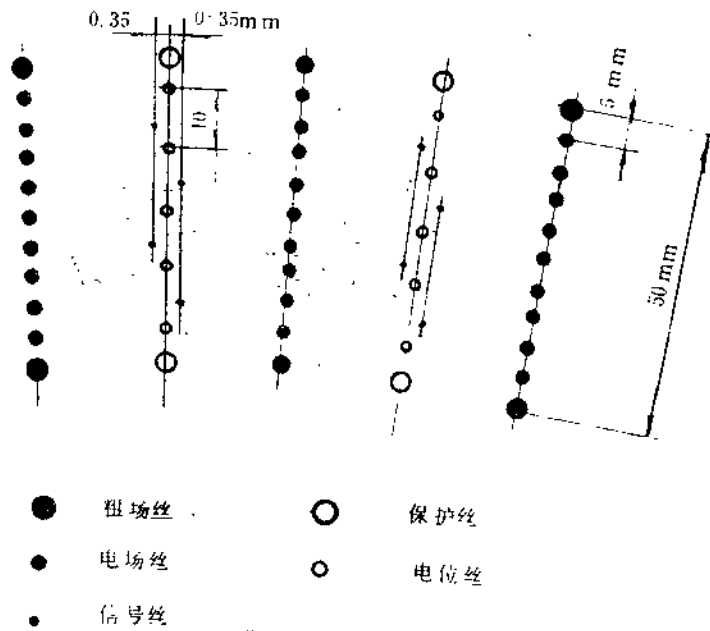


图6 主漂移室结构示意图