

# 1GeV/c 广量程磁谱仪\*

毛振麟、王子华、张勤俭、后晓江、  
王功利、陈绍兴\*\*、赵忠尧  
(中国科学院高能物理研究所,北京,100039)

## 摘 要

本文简要叙述 1GeV/c 广量程磁谱仪的结构,包括谱仪磁铁系统和探测器及数据获取系统。推导了在扩展边缘场情况下,非聚焦型磁谱仪的动量公式。用蒙特卡罗方法计算了该谱仪的动量分辨、立体角和动态范围等参数。讨论了多次散射和探测器位置分辨对谱仪动量分辨的影响。

## 一、引 言

电子对原子核和核子的散射一直是研究原子核和核子结构的重要工具。北京正负电子对撞机的注入器是 1.4GeV 电子直线加速器<sup>[1]</sup>,目前,贮存环的束流寿命已达 8—9 小时,因此这台电子直线加速器有相当多的空余时间可以用来开展多方面的中能物理工作,中高能电子散射是其中的一个重要方面。

迄今为止,中高能电子散射实验所用的磁谱仪都是聚焦型的<sup>[2]</sup>。随着粒子动量增高,粒子在磁场内的曲率半径将线性增加。如果用聚焦方式,则磁铁长度和物距都要随着增加,物距增加了,如果要保持一定的立体角,势必要增大磁铁孔径,并且要仔细地进行象差修正。孔径大、长度长、加工复杂的磁铁,费用是非常昂贵的。

为了降低中能磁谱仪的造价,我们提出了为中高能电子散射用的非聚焦型广量程磁谱仪的设计原理<sup>[3]</sup>。最简单的非聚焦型磁谱仪包括一块谱仪磁铁和两个位置灵敏探测器,根据靶点和两个位置灵敏探测器上记录的粒子位置,可以决定粒子在磁场内的轨迹,因而决定粒子的动量。为了减少靶点可能晃动的影响,在磁铁前增加了一个位置灵敏探测器。这样,由三个位置灵敏探测器所记录的三个位置,可以用来决定粒子的动量。磁铁前的位置灵敏探测器,由于靠近靶,面积小,计数率高,选用多丝正比室。磁铁后的两个位置灵敏探测器面积较大,计数率较低,选用多丝漂移室。除此之外,在第二个多丝漂移室后面,还放有闪烁计数器,它提供多丝漂移室的零时信号,也可作为整个探测器系统的触发信号。在闪烁计数器之后,还有铅玻璃簇射计数器,作为粒子鉴别用。

本文 1990 年 8 月 25 日收到。

\* 国家自然科学基金资助课题。

\*\* 现在地址是:北京,北方工业大学。

这种非聚焦型广量程磁谱仪,具有结构简单、动态范围大、使用灵活、价格便宜等优点。在动量分辨的要求不是非常高的情况下有着广泛的应用。

## 二、1 GeV/c 广量程磁谱仪的结构

图1表示1GeV/c广量程磁谱仪的结构。从靶(T)上散射出来的粒子经多丝正比室(MWPC)、磁铁(M),再经多丝漂移室(MWDC1)和(MWDC2)到闪烁计数器(S)和铅玻璃簇射计数器(SD)。由多丝室和两组漂移室所记录的粒子位置,通过计算机软件来确定粒子在磁场中的轨迹,从而确定粒子的动量。

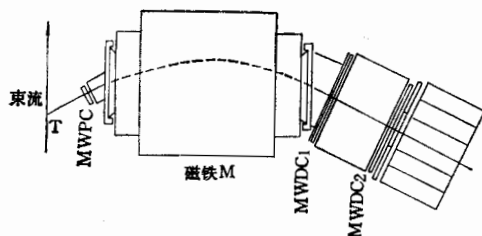


图1 1GeV/c广量程磁谱仪结构的示意图

广量程磁谱仪包括谱仪磁铁系统和探测器及其数据获取系统两大部分,现将它们的主要构造和性能测试结果分别简述于下:

### (1) 谱仪磁铁系统

谱仪磁铁系统包括谱仪磁铁、磁铁电源及其控制系统、磁测装置等。文献[3]提出了这台1GeV/c广量程磁谱仪的物理设计,对谱仪磁铁的要求是:  $\int Bdz$  大于2.2T·m, 磁场均匀区宽度~30cm, 磁场稳定度好于0.05%。

谱仪磁铁是由 DESY 实验室的 MA 型偏转磁铁改装而成的。磁极形状的设计是通过在 VAX-780 计算机上运行 POISSON 程序,计算磁场分布决定的,调节磁极倒角  $\theta$  和直角边  $l$  反复计算磁场分布,得到  $\theta = 45^\circ$  和  $l = 40\text{mm}$  时,均匀区宽度最大,约为300mm (图3)。改装后谱仪磁铁的主要参数见表1。

表1 谱仪磁铁的主要参数

最大磁场强度 ( $I = 580\text{A}$ )	2.1T
气隙高度	60mm
磁极宽度	483mm
线圈电阻 (20°C)	0.16 $\Omega$
电源功率	50kW
总重量	17.1t

磁铁电流是由西安整流器厂生产的 KYS 550A/90V 可控硅稳流电源供给的。该电源的额定最大输出电流为 550A, 电流稳定度好于 0.01%。一套可用微机控制的远控装置<sup>[4]</sup>已经建立。该装置的主要功能为: 可以在远距离利用微机或手动操作来启动或断开 KYS 电源; 设置和监测 KYS 输出的电流值; 监视 KYS 电源或其它设备的工作状态; 采集和处理有关实验数据。利用这套远控装置后, KYS 电源的电流稳定度由原来的  $8 \times 10^{-5}/24\text{h}$  提高到  $3 \times 10^{-5}/24\text{h}$ 。

谱仪磁铁的磁场测量是用局部恒温的砷化钢霍尔探头做成的霍尔测磁仪完成的, 其长时间的测磁稳定度为  $2.5 \times 10^{-4}/24\text{h}$ 。磁场的绝对值是用核磁共振仪标定的, 霍尔电压和磁场值的拟合公式<sup>[5]</sup>为

$$B = 0.00138 + 5.78636H + 0.136H^2 + 15.402H^3 + 6.8H^5,$$

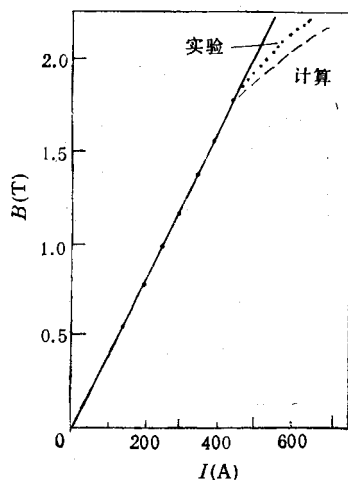


图 2 谱仪磁铁的  
激磁曲线

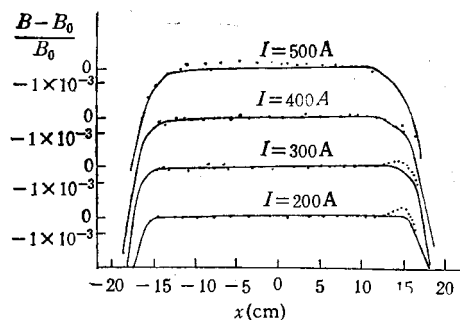


图 3 谱仪磁铁中央处 ( $z = 0$ ) 的横向磁场分布  
虚线: 实验 实线: 计算

其中  $B$  的单位为 T, 霍尔电压  $H$  的单位为 V。利用霍尔测磁仪对中心平面的磁场进行了逐点的仔细测量, 得到激磁曲线, 磁场的横向分布和纵向分布曲线分别表示在图 2—4 中。

从图 2 的激磁曲线可知, 直到  $B = 1.7\text{T}$ , 激磁曲线是线性的,  $B/I = 0.003964\text{T/A}$ 。而当  $I = 580\text{A}$  时, 最大磁场强度达到  $2.1\text{T}$ 。

图 3 总结了不同激磁电流下磁场的横向分布, 它与 POISSON 程序计算的结果是一致的。磁场均匀区宽度  $\sim 30\text{cm}$ 。

从图 4 可知, 磁场纵向分布的一般特征为: 中间是坪, 然后有小的隆起, 最后在边缘附近缓慢地下降。H. Enge<sup>[6]</sup> 指出, 磁场纵向分布的下降部分可写成

$$B(s) = B_0 / (1 + e^s)$$

的形式, 其中  $B_0$  是均匀区的场强,  $s$  为以气隙  $g$  为单位的场点到有效边界的距离,  $t$  为  $s$  的多项式,

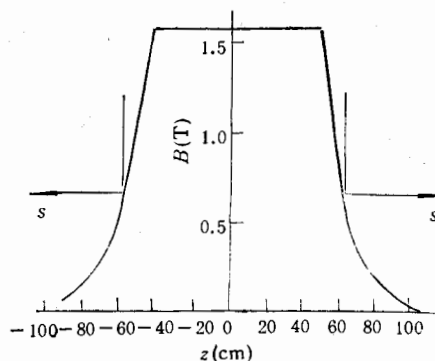
$$t = c_0 + c_1s + c_2s^2 + c_3s^3 + c_4s^4 + c_5s^5,$$

其中  $c_i (i = 0, 1, 2 \dots 5)$  为边缘场系数。表 2 列出了在  $400\text{A}$  情况下, 由磁场纵向分布得到的入口和出口的边缘场系数。对每一条磁场纵向分布曲线可以计算出  $\int B dz$  积分值,

在  $-15\text{cm} \leq x \leq 15\text{cm}$  的均匀区内,  $\int B dz$  值在  $0.1\%$  误差范围内近似地为常数。不同激磁电流下  $\int B dz$  值列在表 3。

表 2  $I = 400\text{A}$  情况下入口和出口的边缘场系数

	入口	出口
$C_0$	0.4165	0.4164
$C_1$	0.5548	0.5398
$C_2$	-0.03378	-0.04541
$C_3$	0.07095	0.07827
$C_4$	-0.02866	-0.02766
$C_5$	0.003216	0.002776

图 4 谱仪磁铁中央处 ( $x = 0$ ) 的纵向磁场分布 ( $I = 400\text{A}$ )表 3 不同激磁电流下的中心磁场和  $\int Bdz$  值

激磁电流 (A)	200	300	400	500
中心磁场 $B_0$ (T)	0.8012	1.2274	1.5856	1.9166
$\int Bdz$ (T-m)	0.9620	1.4717	1.9531	2.3695

## (2) 探测器和数据获取系统

1 GeV/c 广量程磁谱仪的探测器和数据获取系统的方块图表示在图 5。现将各类探测器的主要性能指标简要地分述如下:

### 1. 多丝正比室

在磁铁前放有多丝正比室<sup>[7]</sup>, 它的有效面积为  $12 \times 32\text{mm}^2$ 。阳极丝为  $\phi 12\mu\text{m}$  的镀金钨丝, 丝距为 1mm。阴极平面由  $\phi 100\mu\text{m}$  的镀铜丝做成, 丝距也为 1mm。阳极丝与阴极平面的距离为 4mm。多丝室前后各有  $20\mu\text{m}$  的 Mylar 薄窗, 使粒子通过时具有较小的散射。室内充 1atm 的混合气体 ( $89\% \text{Ar} + 10\% \text{CO}_2 + 1\% \text{CH}_4$ )。多丝正比室采用单丝读出方式, 其电子学系统<sup>[8]</sup>包括 32 路前置放大、32 路放大甄别电路、CAMAC 编码器插件等。从阳极丝获得的信号经 32 路前置放大和放大甄别电路后进入编码器, 并由微机读出。用放射源测得位置分辨为 1.07mm (FWHM)。

### 2. 多丝漂移室

在谱仪磁铁后安放两个多丝漂移室<sup>[9]</sup>, 它们的有效面积为  $560 \times 80\text{mm}^2$ 。阳极丝为  $\phi 20\mu\text{m}$  镀金钨丝。阴极平面由  $\phi 100\mu\text{m}$  镀铜丝做成, 丝的间隔为 2mm。场丝也为  $\phi 100\mu\text{m}$  镀铜丝。阳极丝和场丝的距离为 8mm, 处在同一平面上, 阳极丝、场丝和阴极平面的距离为 6mm。多丝漂移室前后各有  $20\mu\text{m}$  的 Mylar 薄窗, 所用气体与多丝正比室相同。从阳极丝获得的信号经 49 路前置放大-甄别电路后, 进入 Lecroy 2228A TDC 插件, 由微机读出其信息以决定漂移时间。漂移室位置的左右分辨是通过从场丝取出的信号实现的, 首先将场丝进行奇偶编组, 从奇偶两组场丝取出的信号经电荷灵敏前置放大

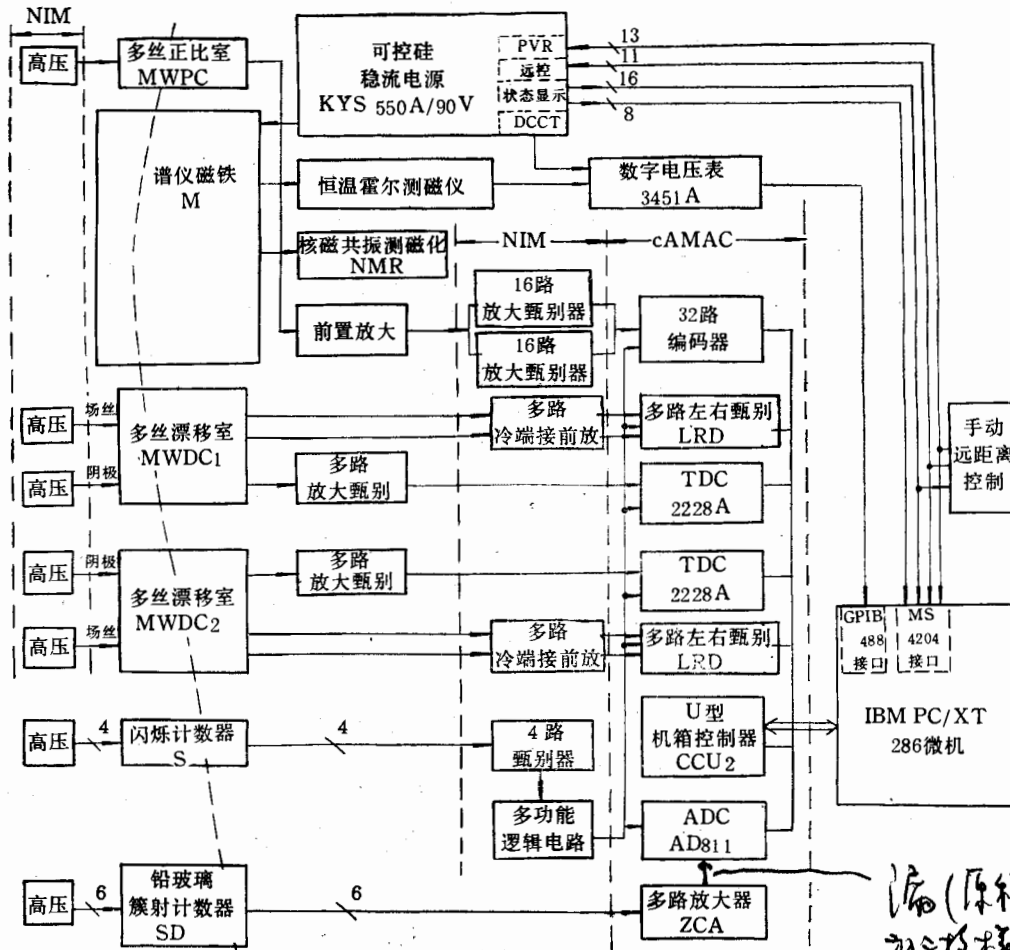


图 5 磁谱仪各部分电子学和数据获取系统

流(原稿) 加心核子学组提出 倪树刚同志

器放大后,进入左右鉴别电路 CAMAC LRD 插件<sup>[40]</sup>,以决定粒子的左右分辨。LRD 给出的信息,也由微机读出。用放射源测得漂移室的性能为:对<sup>55</sup>Fe X 线的能量分辨~20%, 气体放大 10<sup>4</sup>—10<sup>5</sup>, 坪长~300V, 电子漂移速度~50 μm/ns, 位置分辨~280 μm。

### 3. 闪烁计数器

由 4 块 150×170×10mm<sup>3</sup> NE110 型塑料闪烁体和 4 个国产 GDB50L 光电倍增管组成的大面积 600×170mm<sup>2</sup> 塑料闪烁计数器<sup>[41]</sup>, 给出漂移室的零时信号和整个系统的触发信号。4 个扭曲光导作为塑料闪烁体和光电倍增管之间的光耦合。闪烁计数器的输出脉冲,经 4 路甄别器进入多功能逻辑电路,然后送到 TDC、ADC 和编码器等插件作为起始信号和门信号。用<sup>60</sup>Co 放射源测得大块闪烁计数器的时间分辨为 1.4ns。

### 4. 铅玻璃簇射计数器

用 6 块 115×115×400mm<sup>3</sup> 国产 ZF1 型铅玻璃和 6 个国产 GDB100 型光电倍增管组成了体积为 690×115×400mm<sup>3</sup> 的大型铅玻璃簇射计数器<sup>[42]</sup>。光电倍增管的输出信号经放大器放大后,送入 AD811 ADC CAMAC 插件,然后由微机读出。观察了宇宙线

和 $^{60}\text{Co}$ 放射源产生的脉冲谱。

### 三、粒子在扩展边缘场下的运动

粒子在扩展边缘场下的运动已由一些作者讨论过了<sup>[6]</sup>，常用的方法是将扩展边缘场代入公式求得边缘场系数。把粒子的初始位置、运动方向、动量以及边缘场系数等数据一起输入到 RAYTRACE 程序，就可计算出粒子在末态时的位置和运动方向。在实际工作中，已知粒子末态位置、运动方向以及初态位置，要求决定粒子的动量，这样，在使用 RAYTRACE 程序时必须把动量作为参量，调节动量使粒子在初态和末态的位置和方向与实验结果相符合，从而决定粒子的动量，这样使用 RAYTRACE 程序，不仅花费大量计算机时间，而且也很不方便。因此我们宁可直接研究粒子在实际测得的扩展边缘场中的运动。

在磁场区取一小的面积元  $\Delta S = \Delta z \cdot \Delta x$ ，并假定在这小区域内磁场  $B$  可看作为均匀的。设在中心平面上运动的一个带电粒子，在  $P_1(z_1, x_1)$  位置以  $\theta_1$  方向进入该面积元，又在  $P_2(z_2, x_2)$  位置以  $\theta_2$  方向离开此面积元(图 6) 很容易证明转移公式为：

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \sin \theta_1 - \frac{z_2 - z_1}{\rho} \right), \quad (1)$$

$$x_2 = x_1 + \rho(\cos \theta_2 - \cos \theta_1), \quad (2)$$

其中  $\rho$  为粒子在磁场  $B$  中的曲率半径

$$\rho(\text{cm}) = \frac{333.56 p(\text{GeV}/c)}{B(\text{T})}. \quad (3)$$

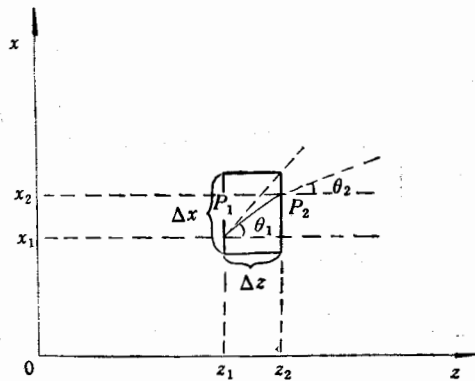


图 6 粒子在磁场中运动的坐标转移

对公式 (1) 在整个磁场区进行多次叠代，得到：

$$\sin \theta_f - \sin \theta_i = \frac{-\int B dz}{333.56 \rho}, \quad (4)$$

其中  $\theta_i$  和  $\theta_f$  分别为粒子在初态和末态的运动方向。(4) 式的意义是：不管场分布是怎样的，只要  $\int B dz$  相同，则相同  $p$  和  $\theta_i$  的粒子得到的  $\theta_f$  是相同的。所谓截断近似，即取  $\int B dz = B_0 L_0$ ，其中  $B_0$  是

磁铁中心的磁场强度， $L_0$  称为磁铁的有效长度。按 (4) 式截断近似和扩展边缘场计算得到的  $\theta_f$  是相同的。

对末态位置  $x_f$ ，用扩展边缘场计算时需要将 (2) 式进行多次叠代才能得到。一般用数字计算。用锐截止近似，末态位置  $x'_f$  可写成：

$$x'_f = x_i + \rho_0(\cos \theta_f - \cos \theta_i),$$

其中  $\rho_0$  为粒子在磁场  $B_0$  时的曲率半径。 $x_i$  是粒子的初始位置。计算表明  $\Delta x_f = x_f -$

$x'_i$  不为零, 而是一个需要修正的小量、或

$$x_f = x_i + \rho_0(\cos \theta_f - \cos \theta_i) + \Delta x_f.$$

(4) 式还可写成

$$P = \frac{-\int B dz}{333.56(\sin \theta_f - \sin \theta_i)}, \quad (5)$$

这就是在扩展边缘场情况下, 非聚焦型磁谱仪的动量公式。测量出  $\theta_i$  和  $\theta_f$  后, 即能由 (5) 式得到粒子的动量  $p$ , 进一步可得到动量分辨

$$\frac{\Delta p}{p} \sim \frac{(\cos^2 \theta_f \Delta \theta_f^2 + \cos^2 \theta_i \Delta \theta_i^2)^{1/2}}{\sin \theta_i - \sin \theta_f}. \quad (6)$$

#### 四、结果和讨论

在实际的扩展边缘场和探测器位置分辨情况下, 用蒙特卡罗模拟方法计算了这台谱仪的主要性能。结果列在表 4

表 4 广量程磁谱仪的主要参数

中心动量 800MeV/c	径向接受角 32—50mrad
中心磁场 1.5856T	横向接受角 12—20mrad
$\int B dz$ 1.9531 T·m	立体角 1.5—4msr.
中心轨道半径 168.3cm	动态范围 $p_{\max}/p_{\min}$ 1.5—2
偏转角 43°	动量分辨 0.5%(氦)—0.8%(空气)

用公式 (6) 计算了在不同探测器位置分辨的情况下谱仪的动量分辨, 并与蒙特卡罗计算结果相比较, 结果列在表 5.

表 5 不同探测器位置分辨情况下谱仪的动量分辨

探测器位置分辨 ( $\mu\text{m}$ )	蒙特卡罗模拟结果 (FWHM)	公式 (6) 结果 (FWHM)
200	0.35%	0.354%
300	0.45%	0.458%
400	0.59%	0.572%
500	0.70%	0.691%
600	0.81%	0.814%

从表 5 可知, 用公式 (6) 计算的结果和蒙特卡罗模拟结果是相符合的。

图 7 表示了探测器之间不同物质的多次散射对谱仪分辨率的影响。从图 7 可知, 当要求谱仪动量分辨  $\sim 1\%$  时, 漂移室位置分辨  $< 600 \mu\text{m}$ , 用空气介质就能满足了。而当要求动量分辨为  $0.4\%$  时, 则要求漂移室位置分辨  $\sim 200 \mu\text{m}$ 。需要用氦气包以减少多次散射的影响。

漂移室粒子位置的左右分辨是依靠 LRD CAMAC 插件来决定的,利用径迹拟合法也能进行左右分辨,在一定取舍条件下,成功率达 85%。如果用三个漂移室,则成功率将增加到 93%。

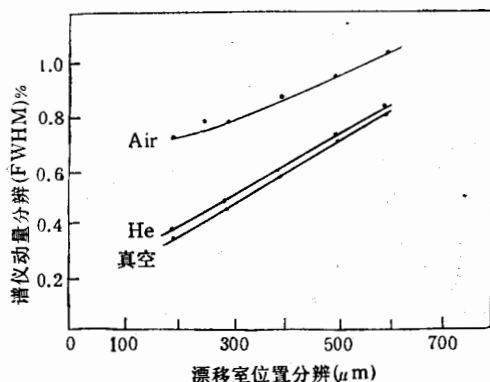


图 7 探测器在不同介质时对谱仪分辨率的影响

电子散射实验装置将包括束流线,靶和磁谱仪三部分,整个电子散射实验装置的动量分辨应包括这三部分的贡献。已知 1.4GeV 电子直线加速器引出电子束的动量分辨为 0.6—1%。因此整个电子散射实验装置的动量分辨预期为 1—2%。

对蒋延龄、曹瓚、厉斌方、赵滨、李佳、陈仁怀等同志在谱仪磁铁设计改装、供电、测磁等方面所给予的帮助和有益的讨论;

郑志鹏、马基茂、李忠珍、李如柏、刘荣光等同志在设计制造探测器方面所给予的帮助,深表谢意。力京、王辉、邢炎、刘秀娜、何英、张莉、张竹湘等同志参加了部分工作,在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 中国科学院高能物理所, 22/28 亿电子伏正负电子对撞机初步设计概要 (1982, 12)
- [2] R. Anderson et al. *Nucl. Instr. and Meth.*, **66** (1968), 328; H. Ehrenberg et al, *Nucl. Instr. and Meth.*, **105** (1972), 253; P. Leconte et al, *Nucl. Instr. and Meth.*, **169** (1980), 401; W. Bertogg et al, *Nucl. instr. and meth.*, **162** (1979), 211.
- [3] 毛振麟, “一个为中能电子散射用的广量程磁谱仪”, 高能物理与核物理, **12** (1988), 298.
- [4] 陈绍兴、王功利、王子华、邢炎、毛振麟, “电子散射磁谱仪磁铁电源的远距离程控和监察系统”, 原子能科学技术, 即将发表。
- [5] 王子华等, 核技术, **14**(1991), 193.
- [6] H. Enge, “Focusing of charged particles” Vol. 2.
- [7] 邢炎, “用于非聚焦型广量程磁谱仪的高分辨小型多丝室系统”, 研究生论文 (1989, 9).
- [8] 后晓江、邢炎、毛振麟, “用于电子散射实验的小型多丝室电子学系统”, 核电子学与探测技术, 即将发表。
- [9] 何英、张勤俭、后晓江、王辉、王功利、毛振麟, “用于电子散射谱仪的多丝漂移室”, 内部报告 (1990, 3).
- [10] 后晓江, “左右甄别 CAMAC 插件 LRD”, 全国第五次核电子学和探测器会议文集 (1990, 8)
- [11] 张勤俭, “用于电子散射磁谱仪的定时探测器”, 内部报告 (1987, 10)
- [12] 张勤俭, “用于电子散射磁谱仪的铅玻璃簇射计数器”, 内部报告 (1990, 2).



## 1GeV/c Wide Range Magnetic Spectrometer

MAO ZHENLIN, WANG ZIHUA, ZHANG QINJIAN, HOU XIAOJIANG,  
WANG GONGLI, CHEN SHAOXIN, ZHAO ZHONGYAO  
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

### ABSTRACT

The structure of an 1 GeV/c wide-range magnetic spectrometer is briefly described. The spectrometer includes the magnet system and the detector & data acquisition system. The momentum formula at extended edge field case for non-focusing magnetic spectrometer has been derived. The momentum resolution, solid angle, momentum acceptance and other parameters for this spectrometer are calculated by Monte Carlo simulation. The effects of the multiple scattering and position resolution of the detectors to momentum resolution of this spectrometer are discussed.