

北京谱仪 II 主漂移室和顶点探测器的径迹联合重建^{*}

曾瑜¹⁾ 刘靖 毛泽普 邱进发 黄秀萍 袁野 马秋梅

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 首次实现了将北京谱仪 - II (BES II) 的两种探测器(主漂移室和顶点探测器)中的带电径迹联合起来一起重建,并给出了相应的离线刻度方法.经过真实数据和蒙特卡罗样本的检查,联合重建后 BES II 带电粒子的动量分辨提高了 20% 以上,结果证明本文采用的联合重建和离线刻度方法是有效的.

关键词 联合重建 刻度 动量分辨

1 引言

北京谱仪 II (BES II) 是工作在北京正负电子对撞机(BEPC)上的一台大型通用磁谱仪^[1],它由束流管、顶点探测器(VC)、主漂移室(MDC)、飞行时间计数器(TOF)、簇射计数器(SC)以及 μ 子计数器(MUON)等子探测器组成,用以探测和记录正负电子对撞产生的各种末态粒子的信息,从而进行 τ 轻子和粲物理的研究.

BES II 顶点探测器(VC)由 640 根稻草管组成,它们分布于 12 层,其中内外 4 层为轴丝层,用于 r - ϕ 方向寻径迹;中间 4 层为斜向丝层,用于 z 向寻径迹^[2,3].其作用是作一级触发以压低因 BEPC 升级后亮度提高所带来的高本底;同时用于 BES 带电粒子的径迹寻找从而提高动量分辨和空间分辨.

VC 紧靠束流管,与 MDC 比较有覆盖立体角大的优势,但由于 z 向丝层太少,使 z 向定位精度很差,从而使径迹动量分辨很差^[2,4].与 VC 相比,MDC 正好具有丝层多并且其重建软件 DCJULIE 运行结果良好的优点^[5,6],但具有立体角较小的不足.如果将 MDC 与 VC 联合径迹重建就能达到优势互补的目标.根据 Gluckstein 公式,动量分辨可由下式计算:

$$\frac{\sigma_p}{P} = \frac{P_T \sigma}{0.3 QBL^2} \sqrt{\frac{720}{N+5}}$$

如果增加取样点数 N 和加大取样长度 L ,动量分辨 σ_p 将会减小.但是要具体实现这一目标还需在软件和硬件上作仔细的研究.

2 联合重建的方法

经过调研,有很多方法可以将 VC 和 MDC 两个不同探测器的径迹联合起来.我们对如下的几种方法进行了研究:

1) 分别用 VCJULI^[2,4] 和 DCJULIE 软件重建 VC 和 MDC 中的带电径迹,将重建得到的螺旋线径迹按照螺旋线参数匹配起来,放在一起作螺旋线拟合.

2) 分别用 VCJULI 和 DCJULIE 软件寻找轴向丝层决定的圆弧径迹,将 MDC 和 VC 中的圆弧径迹按照圆弧参数匹配起来,再一起作 z 向重建和螺旋线拟合.

上述两种方法编写程序简单,但是径迹匹配效率较低,消耗机器 CPU 较多,而且两个探测器的状况相互影响.

3) 将 VC 和 MDC 看作是一个整体,产生字典并进行径迹寻找和螺旋线拟合.

该方法的缺点是无法找出 VC 和 MDC 之间的安装偏差,而且两个探测器互相影响,一个探测器不能正常工作将影响另一个探测器;软件上该方法的

2004-03-18 收稿

^{*} 国家自然科学基金(19991480)资助

1) E-mail: zengy@mail.ihep.ac.cn

实现也很困难.

4)用 DCJULIE 软件找到 MDC 的轴向丝层的圆弧径迹后,将圆弧径迹延伸到 VC 中,并在此圆弧径迹的路径上一定的宽度内收集 VC 的着火点,然后重新作圆拟合,找出圆参数,以后的 z 向重建及螺旋线拟合与 DCJULIE 中的处理类似,只是多加了 VC 的着火点(包括斜丝).

在这种方法中,对 MDC 轴向丝层寻迹的处理与 DCJULIE 中的处理方式完全一样,也是先利用一个由各种可能构成圆弧径迹的单元模式而组成的字典,将每个 MDC 着火单元按照字典的内容填入一个与字典大小相同的模式数组,然后用一种类似人工智能的方法将径迹挑出来^[5],不同的地方在于:完成 $r-\phi$ 平面 MDC 轴丝层寻迹和 z 向寻迹时分别加上 VC 的轴丝信息和斜丝信息一起作拟合.采用这种方法虽然程序编写比较困难,但是可以使 MDC 和 VC 两个子探测器互相独立,通过在 MDC 寻迹的基础上加进 VC 的触发点,从而集中了 VC 和 MDC 的优点.我们最后采用了这种方法,其程序流程图见图 1.

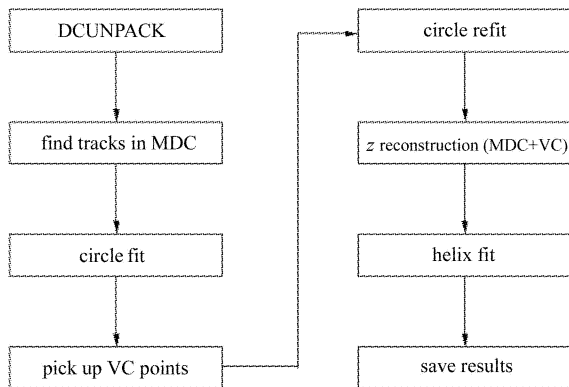


图 1 联合重建程序的流程图

3 VC 和 MDC 的联合离线刻度

由于 VC 和 MDC 是两个硬件系统,虽然在 BES 硬件组装时都在 BES 坐标系统下进行了修正和测试,但是两个硬件系统的信息用在一起时则会出现一些系统的偏差,所以要提高联合重建的精度,精细的软件刻度也是关键的一步,即利用联合重建的径迹对 VC 和 MDC 进行软件修正,其中主要是刻度 VC 每根灵敏丝的 T_0 和丝位修正,修正中要考虑的主要因素为:由于带电粒子穿过丝平面时产生正负离子位置的统计涨落,电离电子由于扩散引起信号的涨落,电子学读出系统时间晃动等因素的影响,使每

根丝的零时间不同,即每根丝的 T_0 值不同^[7];VC 各稻草管的几何位置可以由计算得到,但由于各种环境因素如丝重力,环境温度,压力,磁场等的影响以及安装定位时的偏差,运行时各稻草管的丝位置与计算值会有一定差别,因此 VC 和 MDC 信号作为一个系统使用时,它们之间不可避免地有一定偏差.

刻度方法如下:由于 MDC 可以得到较好的动量分辨和位置分辨,假定相应的 MDC 离线刻度常数是可信的,并将它固定不变,在螺旋线拟合时取 VC 击中点的权重为 0,这样径迹螺旋线拟合过程中,径迹的多次迭代逼近真值时完全由 MDC 的击中位置所决定,从而找出 VC 各丝相对于 MDC 系统的 T_0 和位置偏离,并将这些微量作为对 VC 系统的修正量加到 VC 各根丝的 T_0 信息和几何位置上,整个过程通过多次迭代方法完成.

径迹重建中 VC 的每根灵敏丝的拟合残差为:

$$\sigma = D_m - D_f.$$

其中 D_m 是由漂移时间计算得到的漂移距离, D_f 是由拟合曲线计算的最小漂移距离.

对每根丝的 T_0 修正量,由下式计算得到^[8]:

$$\delta_{T_0} = \frac{\langle \sigma_R \rangle - \langle \sigma_L \rangle}{2V}.$$

迭代多次后,各根丝的 T_0 可由 $T_0 = T_0 + \delta_{T_0}$ 计算得到.其中 $\langle \sigma_R \rangle$ 和 $\langle \sigma_L \rangle$ 分别是径迹穿过灵敏丝右边和左边时得到的残差分布的平均值. V 是漂移电子的漂移速度.图 2 是第一次刻度 VC 各根丝的 T_0 时,每根丝的 T_0 的修正量,修正量较大;图 3 是多次迭代刻度后每根丝的 T_0 的修正量,这时修正量很小,说明刻度过程是收敛的.

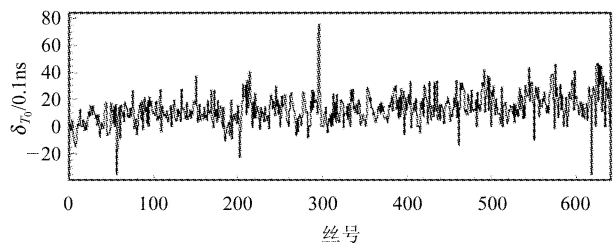


图 2 第一次刻度时 T_0 的修正量

横坐标为丝号,纵坐标为 T_0 的修正量,单位为 0.1ns.

每根丝的位置在 ϕ 平面的修正由下式计算^[8]:

$$\delta_s = \frac{\langle \sigma_R \rangle + \langle \sigma_L \rangle}{2}.$$

用 δ_s 对每根丝的几何位置作修正,多次迭代后,可以得到 MDC 坐标系下 VC 各丝在 ϕ 平面上的

位置与设计值之间的偏移量.图 4 是第一次刻度时各根丝的位置修正量,修正值较大.从图可以看出,VC 信号丝相对于 MDC 系统在 x - y 平面(即 ϕ 平面)内的最大偏移量约 $500\mu\text{m}$.同时可以看出,约在 ϕ 角 90° 和 270° 的方向上对应 VC 的各层信号丝丝位修正量为 0,且 ϕ 角 0° — 90° 范围内丝丝位修正为正值,所以丝丝位偏移主要以朝 y 轴负方向为主;而由于 ϕ 角 0° 时各层对应丝丝位修正并不是最大值,说明各信号丝丝位在 x 方向也有一定的偏移.图中的曲线反映了 VC 各层信号丝丝位偏离情况(1—4 层每层 40 根丝,为轴丝层;5—8 层每层 40 根丝,为斜丝层;9—12 层每层 80 根丝,为轴丝层),由于 9—12 层每层丝数是 1—8 层丝数的两倍,因此形状约比前 8 层的情况宽 1 倍;图 5 是多次迭代后各丝的位置修正量,修正值越来越小,说明刻度过程是收敛和有效的.

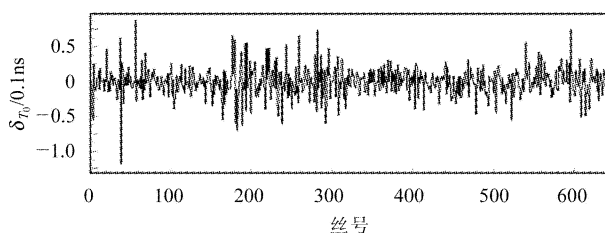


图 3 多次刻度后 T_0 的修正量

横坐标为丝号,纵坐标为 T_0 的修正量,单位为 0.1ns .

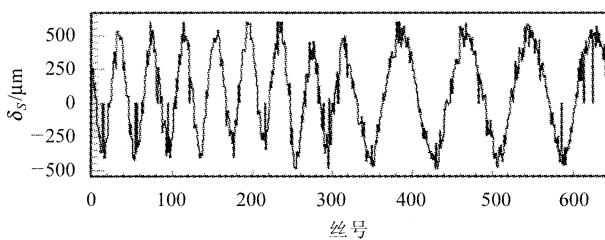


图 4 第一次刻度时丝位的修正量

横坐标为丝号,纵坐标为丝位的修正量,单位是 μm .

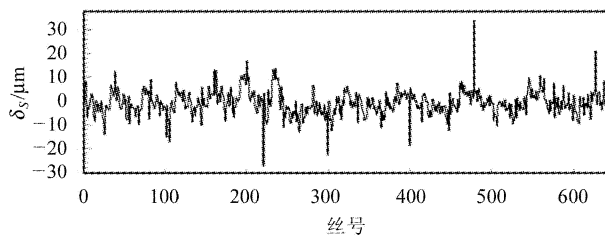


图 5 多次刻度后丝位的修正量

横坐标为丝号,纵坐标为丝位的修正量,单位是 μm .

4 程序性能检查

用类似于 VC 重建软件由 HP-Unix 平台到 PC-Linux 平台移植的处理方法^[9],在完成联合重建程序 HP 平台到 PC 平台的移植和检查后,利用联合重建程序 DCJULIE2 对 BES II 的实验数据和蒙特卡罗 (MC)数据进行事例重建,结果表明程序的各项指标都达到预期效果.

径迹重建所需的时间是衡量程序工作效率的重要指标.研究表明 DCJULIE2 对同一数据的事例重建所用时间约是 DCJULIE 所用时间的 1.5 倍,由于加入了 VC 的触发丝,增加一定的 CPU 时间是合理的.

径迹重建效率是程序可靠性的标志.(1)首先用 MC 数据作检查,即利用 MC 数据求出重建得到的径迹数与 MC 产生的径迹数之比,得到重建的效率.研究表明对于高动量部分(大于 200MeV 部分)联合重建的效率接近于 100% .图 6 是 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 反应道的径迹重建效率随 $\cos\theta$ 变化时重建效率的变化情况示意图,其上图是 MDC 单独重建的情况,下图为联合重建后的情况.对 $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ 作同样的效率检查,结果基本类似,在 θ 方向的效率均显示了良好的均匀性.(2)利用真实的实验数据检查联合重建的效率,即利用单事例扫描的方法,得到的联合重建的效率为 97.2% .(3)利用由真实数据所挑出的干净的 Bhabha 事例样本进行分析,得到联合重建相对于 MDC 单独重建时的效率为 99.8% .

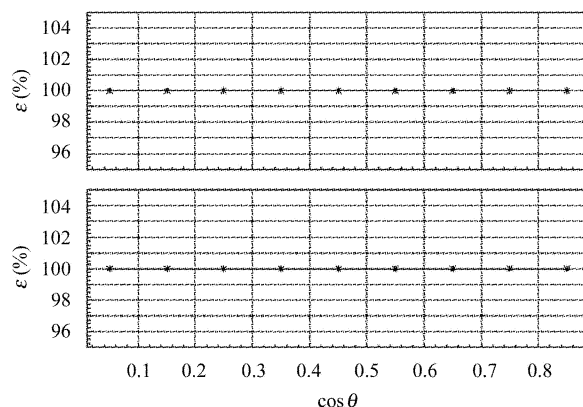


图 6 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 随 $\cos\theta$ 变化时效率变化的情况

动量分辨是衡量联合重建程序 DCJULIE2 的另一个重要指标.利用 BES II 的实验数据 RUN14368-14453 中 $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ 重建后得到的动量分布如图 7 所示,其上图 MDC 单独重建的结果,下图为联合

重建的结果.可以看出 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 的动量分辨提高了约 10MeV. $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$ 的结果与其基本类似.

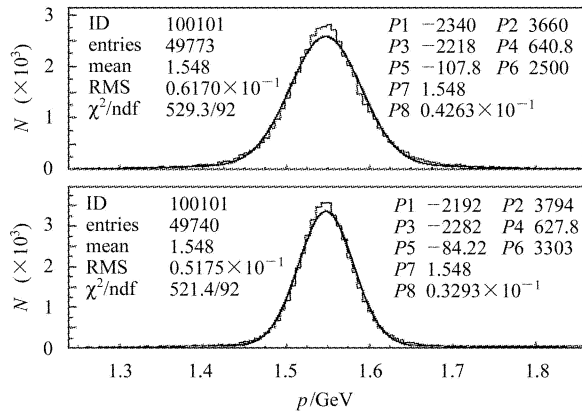


图 7 联合重建前后动量分布的比较

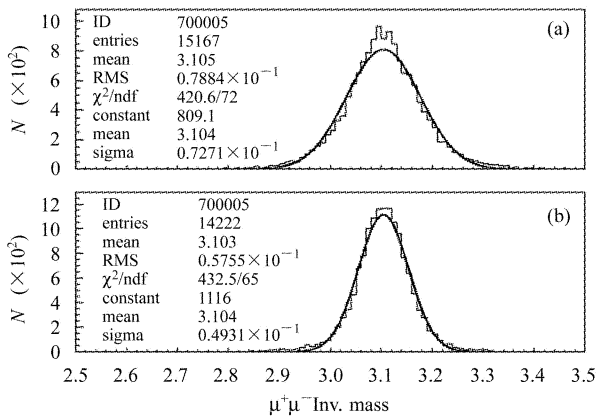


图 8 联合重建前后 $\mu^+ \mu^-$ 不变质量分布

联合重建与 MDC 单独重建的 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 的不变质量谱的比较见图 8. 图 8(a) 为 MDC 单独重建的结果, (b) 为联合重建后的结果. 可以看出, 联合重建后不变质量的宽度比 MDC 单独重建时改善了约 32%.

5 结果

本文首次实现了 MDC 和 VC 两个探测器径迹的联合重建, 经过离线刻度得到适当的刻度常数, 对 BES II 所取的数据 RUN14368-14453 中 $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 进行重建, 得到的空间分辨和角度分布与联合重建前基本一致, 动量分辨有很大的改善. 联合重建前后一些结果的比较见表 1.

表 1

	MDC 单独重建	MDC 和 VC 联合重建
$\Delta P(\mu^+ \mu^-)$	43MeV	33MeV
$\mu^+ \mu^-$ 不变质量宽度	73MeV	49MeV
空间分辨 ΔD (MDC)	190—220 μm	无明显变化
空间分辨 ΔD (VC)	98—102 μm (轴丝层)	斜丝层无法测定 260 μm 左右 (斜丝层)
ϕ 向分布	两者基本一致	
θ 向分布	两者基本一致	

以上结果证明本文采用的联合重建方法是有效的, 刻度过程也是合理的.

感谢中国科学院高能物理研究所刻度组在程序调试与改进中的帮助.

参考文献 (References)

- BES Collab. Nucl. Instr. Meth., 2001, **A458**:627
- CHEN Guang-Pei et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, **22**:985 (in Chinese)
(陈光培等. 高能物理与核物理, 1998, **22**:985)
- Walter H. Toki, SLAC-PUB-5232, March, 1990
- CHEN Guang-Pei et al. The 4th BES Annual Meeting, 1995, 115
- LIU Jing et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, **22**:587 (in Chinese)
(刘靖等. 高能物理与核物理, 1998, **22**:587)
- LIU Jing et al. The 5th BES Annual Meeting, 1996, 149
- MAO Ze-Pu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1996, **12**:1073 (in Chinese)
(毛泽普等. 高能物理与核物理, 1996, **12**:1073)
- CHEN Guang-Pei et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, **24**:1167 (in Chinese)
(陈光培等. 高能物理与核物理, 2000, **24**:1167)
- ZENG Yu, MAO Ze-Pu. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2003, **27**:808 (in Chinese)
(曾瑜, 毛泽普. 高能物理与核物理, 2003, **27**:808)

Combinative Track Reconstruction with MDC and VC Hit Points at BES II *

ZENG Yu¹⁾ LIU Jing MAO Ze-Pu QIU Jin-Fa HUANG Xiu-Ping YUAN Ye MA Qiu-Mei

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The method of combinative track reconstruction with the hits in main drift chamber and vertex chamber at BES II detector is described, and the corresponding calibration method is also given. Checked by experimental data and Monte Carlo generated data, the results show that the correctness and reliability of these methods have been proved, and the momentum resolution for charged particles has been improved by more than 20% .

Key words combinative track reconstruction, calibration, momentum resolution

Received 18 March 2004

* Supported by National Science Foundation of China(19991480)

1)E-mail: zengy@mail.ihep.ac.cn