

北京谱仪 μ 子计数器离线数据刻度研究*

黄亮 毛泽普 赵维仁 孙良峰 张长春 马秋梅

邱进发 黄秀萍 袁野

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 介绍了北京谱仪(BES) μ 子计数器的结构,分析了 μ 子计数器 z 向位置分辨变坏的主要因素.通过研究 μ 子计数器离线数据刻度基本原理和刻度方法,采用新的刻度方法解决了 μ 子计数器 z 向位置分辨变坏的问题.使 μ 子计数器 z 向位置分辨提高了20%.

关键词 北京谱仪 μ 子计数器 离线刻度 电荷分配法

1 引言

北京谱仪(BES)是工作在北京正负电子对撞机(BEPC)上的大型通用磁谱仪^[1],用于2—5GeV能区的正负电子对撞物理研究.从1989年以来分别运行于 J/ψ , $\psi(2S)$, $\psi(3770)$, D_s 等能区,取得了一些具有世界水平的物理结果,如 τ 质量的测量^[2],粲偶素物理的研究和在2—5GeV能区的 R 值精确测量等.

北京谱仪由顶点探测器、主漂移室、簇射计数器桶部和端盖部分、飞行时间计数器桶部和端盖部分、亮度监测器与 μ 子计数器(MUON)等子探测器以及束流管、磁铁、触发判选与电子学等子系统组成^[3].其中 μ 子计数器用于 μ 子的空间位置测量并与其他探测器联合作为 μ 子鉴别,因为 μ 子是物理分析中最基本和最重要的粒子之一,而且双 μ 末态常常用于检查磁谱仪工作正常与否的标准,所以 μ 子计数器的运行和 μ 子的测量是BES的一个重要工作.

2 μ 子计数器及其 z 向测量

2.1 μ 子计数器的结构和功能

μ 子计数器安装在BES的最外层^[4],由3层吸收体和3层 μ 子计数管组成.3层吸收体利用磁铁的八边形轭铁构成,其厚度分别为12cm,14cm,14cm.

μ 子计数管放在各层轭铁后面,整个 μ 子计数器系统共有1512根正比计数管,每八根计数管组合在一起形成一个组件,共有189个组件.第一层共53个组件424根正比管,第二层62个组件496根正比管,第三层74个组件592根正比管.每个组件中的8个正比管分成上下两排,左右相互错开半个管孔用以解决 μ 子的左右分辨问题,排列阵列如图1所示.

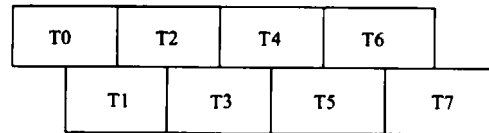


图1 正比计数管排列阵列

μ 正比计数管是由铝材冲压而成的方形铝管.第一层管长为4212mm,第二层和第三层的管长为4638mm.3层 μ 子计数管的覆盖立体角分别为 $67\% \times 4\pi$, $66\% \times 4\pi$ 和 $62\% \times 4\pi$ 左右,探测效率大于95%.

北京谱仪的设计使得能到达 μ 子计数器第三层的粒子基本是 μ 子,通过测量粒子在各层击中点的位置来确定粒子飞行轨迹,与谱仪内层探测器的粒子径迹相匹配,从而达到探测和鉴别 μ 子的目的.

2.2 μ 子计数器的 z 向定位

μ 子计数器通过正比管在 x, y 平面的几何位置

2003-04-15 收稿

* 国家自然科学基金(19991480)资助

确定粒子在空间各点的 x, y 坐标. 而 z 向坐标的测量采用电荷分配法. 如果每个正比管两端都要读出电荷信号, 电子学道数将达 3024 道. 为了减少读出电子学道数, 将每个组件 8 个正比管按照 T0-T4, T1-T5, T2-T6, T3-T7 的规律, 两两串接. μ 子计数器的信号输出如图 2 所示.

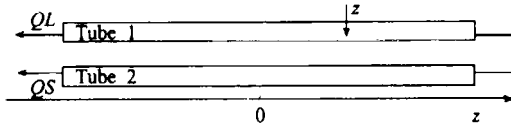


图 2 μ 子计数器的信号输出和电荷分配法示意图

两两相连的一对管子, 假如一个 μ 子从 z 处穿过 Tube 1, 在两个管子的最左端都有读出信号. 通过比较读出信号的大小, 可以判断究竟哪一根管子被击中. 其中击中管的信号较大, 电荷量为 QL , 相连管的信号较小, 电荷量为 QS . 令电荷比 $X = QL / (QL + QS)$ (显然 X 总是大于 0.5). 按电荷分配原理, 击中点位置 z 与电荷比 X 近似地有线性关系^[5]:

$$z = A \times X + C, \quad (1)$$

由此可计算粒子入射的 z 向位置. 由(1)式可见, μ 子计数器共有两个刻度常数 A, C . 这里假定 QL 和 QS 的读出系统是完全一致, 并且两根管子的气体放大也是一样的. 实际情况并非如此, 所以还应该有一个常数表示 QL 与 QS 的关系, 设为 B , 它主要表征相应两个线性放大器放大倍数的比例关系. 为简化计算, 常数 B 仅对每个组件的后 4 根管子进行修正, 修正方法如下:

a) 如果 μ 子击中的是前 4 根管子, 修正公式为

$$X = \frac{QL}{QL + QS \times B};$$

b) 如果 μ 子击中的是后 4 根管子, 修正公式为

$$X = \frac{QL \times B}{QL \times B + QS}. \quad (2)$$

在进行 μ 子计数器的事例重建时, 将在线获取的 QL, QS 和先前刻度产生的刻度常数 A, B, C 一起代入(1)式和(2)式, 就可得到该事例的击中点 z 向坐标.

3 μ 子计数器的离线刻度

3.1 μ 子计数器离线刻度的基本原理

μ 子计数器离线刻度的主要目标是产生一组用

来计算 μ 子击中点位置的刻度常数 A, B, C . 这组常数将被用在 μ 径迹重建的过程中, 将电子学脉冲转换到 z 向位置信息. μ 子计数器离线刻度的主要过程是程序初始化, 事例重建和挑选双 μ 事例以及 μ 子计数器的刻度 3 个过程^[6].

μ 子计数器刻度的基本原理为: 把双 μ 事例的一条径迹从 MDC 外推到 μ 子计数器, 得到粒子到达 μ 子计数器的预期 z 坐标 z_{MDC} , 并把 z_{MDC} 作为精确值. 使用电荷量 QL 和 QS 和常数 B 代入(1)式和(2)式, 计算出粒子到达 μ 子计数器 z 坐标的测量值 X . 假定理想 z 坐标 z_{MDC} 与测量值 X 是线性关系, 即 $z = A \times X + C$. 对同一根管子进行大量统计得到不同 z 向坐标的 z_{MDC} 和 X , 并对它们作直线最小二乘法拟合, 即得到每根 μ 子计数的刻度常数 A, C ^[1]. 对应于测量值 X 的刻度后的 z 坐标为

$$z_{\text{cal}} = A \times X + C.$$

将 z_{MDC} 作为精确值, 与 z_{cal} 比较就可得到两者的差值 Δz :

$$\Delta z = z_{\text{MDC}} - z_{\text{cal}}.$$

对大量的 μ 径迹作 Δz 分布, 其标准偏差 σ_z 为 μ 探测器的 z 向分辨率, 影响 z 向分辨率高低的原因很多, 例如 μ 探测器性能的变化、双 μ 事例的挑选和数据质量、拟合方法等.

3.2 双 μ 事例的挑选

由于在线获取数据时混入了相当一部分坏事例, 例如宇宙线事例、束流干扰以及探测器本身的电子学干扰信号造成的本底事例等. 为了拟合刻度常数, 需要有很纯的双 μ 事例样本. 所以在刻度之前要进行双 μ 事例的挑选. $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事例选择条件如下:

- 1) 径迹顶点要求: 顶点位置 $R_{\text{v}} \leq 1.0\text{cm}$, $z \leq 20.0\text{cm}$;
- 2) 主漂移室: $N\text{CHRG} = 2$; $\sum Qi = 0$ (---正一负), $1.348\text{GeV}/c \leq P_{\mu} \leq 1.748\text{GeV}/c$, 径迹的 θ 角 $\cos\theta \leq 0.6$, 两根径迹的夹角 $\cos\alpha \leq -0.995$ (背对背);
- 3) 桶部簇射计数器: 径迹在 BSC 的淀积能量 $E_{\text{BSC}} \leq 0.7\text{GeV}$;
- 4) 飞行时间计数器: μ 子从原点飞行到 TOF 的时间 $T \leq 7.0\text{ns}$, 两个粒子的飞行时间差 $\Delta T \leq 4.0\text{ns}$.

3.3 μ 子计数器刻度方法的研究和改进

3.3.1 BES I μ 子计数器的刻度和 z 向分辨率的变化

1) 范晓聆等, μ 子计数器离线数据刻度, 内部报告

BES μ 子计数器的 z 向分辨率设计初值对应于第 1、第 2 和第 3 层大约分别为 5cm, 7cm, 9cm. BES I (从 1994 年到 1996 年, BES 进行了升级改造, 改进后的北京谱仪称为 BES II, 改进前的北京谱仪称为 BES I) μ 子计数器的离线刻度用线性拟合办法得到常数 A, C , 常数 B 由硬件电子学“三点定标法”^[7] 提供. 相连两根正比管共同使用一组刻度常数 A, B, C , 即 μ 子计数器共有 756 组刻度常数. 在 BES I 运行期间, 这种刻度方法基本达到了设计要求^[8]. 随着 μ 子计数器运行时间的增加, 特别是升级到 BES II 之后, μ 子计数器的 z 向分辨率大幅度下降. 图 3 是用 BES I 的方法刻度 RUN16826—16844 所得到的 z 向分辨率. 从图 3 看到, μ 子计数器 3 层 z 向分辨率大约为 10cm, 14cm 和 16cm 左右, 大大低于 μ 子计数器的设计要求, 而且峰值平均值明显偏正半个厘米左右. μ 子计数器 z 向分辨率下降的原因可能是: 1) 相应两个线性放大器放大倍数的比例有所变化, 由硬件刻度提供的常数 B 多年没有更新. 2) 探测器多年运行, 各个部件不同程度上有所老化或更换, 如两根正比管连接阻抗的变化, 以及两根正比管变化的不一致性等, 所以相连的两根正比管共用一组常数 A, C 的刻度方法过于简单.

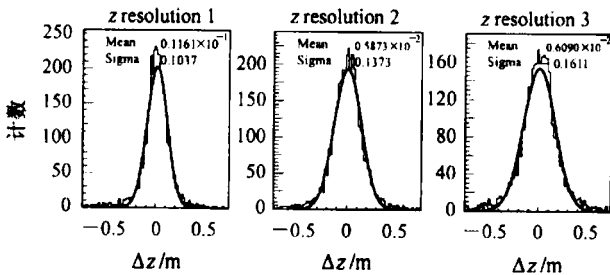


图 3 用 BES I 的方法刻度 RUN16826—16844 的 Δz 分布

3.3.2 BES II μ 子计数器刻度方法的改进

为了提高 z 向分辨率, 改善探测器老化带来的性能下降问题, 我们试图用改进刻度方法来改善 μ 子计数器的 z 向分辨率. 刻度组在 1999—2000 年对 μ 子计数器的刻度方法做了改进, 调整刻度程序, 使 z 向分辨率显著提高. 这种刻度方法主要在以下几处做了改动^[9]: 1) μ 子计数器的 3 个刻度常数 A, B, C 全部由离线刻度得到. 2) 两根相连的正比管不再使用同一组参数 A, C , 即 μ 子计数器 1512 根正比管共有 1512 对 A, C 和 756 个 B . 3) 把线性拟合改为非线性拟合. 拟合程序使用 CERN 库的一个非线性拟合函数 DFUNFT, 每次产生两根串联正比管

的 5 个常数 $A1, A2, B, C1, C2$.

用此方法 (简称 BES II 方法) 刻度数据 RUN16826—16844 得到的 z 向分辨率如图 4, 3 层 z 向分辨率分别为 6cm, 8cm, 11cm 左右, 和 BES I 的刻度方法相比, BES II 方法使 μ 子计数器每层的 z 向分辨率提高了大约 4—5cm, 特别是第一层的 z 向分辨率基本接近 μ 子计数器的设计要求. 而且峰值平均值接近零 (BES I 刻度方法的峰值普遍偏正 0.5cm 左右).

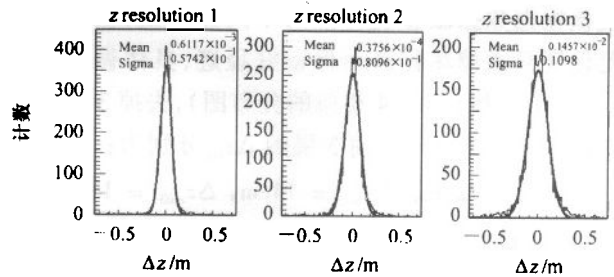


图 4 用 BES II 方法刻度 16826—16844 的 Δz 分布

3.3.3 BES II μ 子计数器刻度方法的进一步改进

BES II μ 子计数器刻度方法使 μ 子计数器每层的 z 向分辨率有了较大改善, 但尚未达到 μ 子计数器设计初值的要求, 从图 4 可见, 第二层和第三层的分辨率逐层下降较大, 第三层的 z 向分辨率已经达到了 11cm. 刻度常数 A, B, C 的分布如图 5 所示, 比较离散, 很多刻度常数的数值严重偏离中心值. μ 子计数器 z 向分辨率变差的原因之一是 μ 子计数器硬件系统的变化, 由图 5 还可见描写两根正比管关系的系数 B 呈“两条带”分布, 这是明显不合理的. 而且所选用的非线性拟合函数数学模型不清晰, 使用的时候性能不好控制.

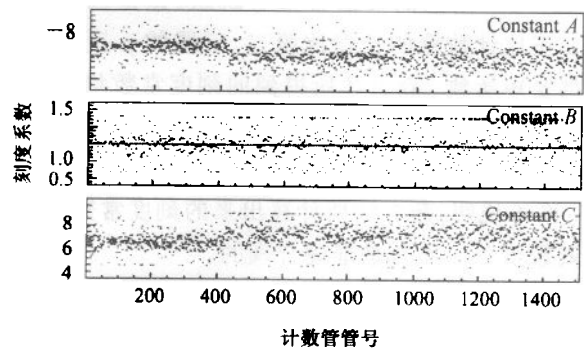


图 5 BES II 的常数 A, B, C 数值分布

通过对两种刻度方法的仔细研究、分析和实验之后, 对 μ 子计数器离线刻度作了进一步改进^[6]:

- 1) 拟合函数选用 CERN 库的一个新的线性拟合函数“LFIT”;
- 2) 用叠代法计算刻度常数 A, B 和

C, 即利用已有的刻度常数 A, C, 用(2)式反推常数 B, 再由常数 B 求 A, C. 求 B 和 A, C 的过程反复进行多次, 使刻度常数逐渐趋向准确值, 即使 z 向分辨率逐渐收敛. 具体的循环次数可以根据数据质量和收敛情况决定; 3) 避免一些坏径迹扰乱拟合, 在 μ 子计数器 3 层正比计数管设置不同的径迹选择条件, 挑选较好的击中信息进行刻度, 即主漂移室外推的坐标 z_{MDC} 与 μ 子计数器重建的坐标 z_{cal} 之间的误差 ($\Delta z = z_{MDC} - z_{cal}$) 作为选择条件. 选择数值的确定应该根据数据段和统计量的不同而改变, 基本原则是保证只去掉坏径迹而保留好径迹, 具体做法是根据 Δz 分布图(与图 4 相似分布图), 去掉 3 倍 σ 左右的坏径迹. 目前 3 层的 Δz_{cut} 分别为:

$$\Delta z_{cut1} = 12\text{cm}, \Delta z_{cut2} = 14\text{cm}, \Delta z_{cut3} = 18\text{cm}.$$

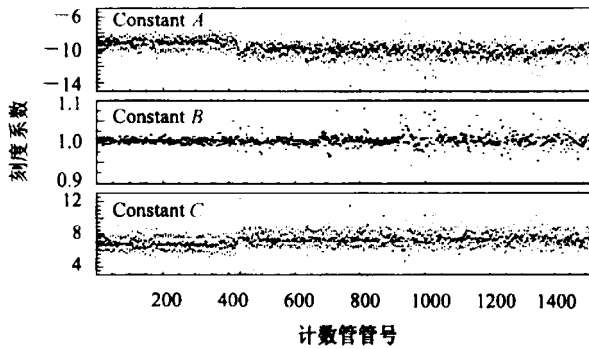


图 6 新的刻度常数 A, B, C 数值分布

图 6 是用这种新方法求出的每根丝的刻度常数 A, B, C 数值分布图(横坐标为正比计数管管号, 纵坐标为刻度常数数值). 可以看到刻度常数 B 不再像 BES II 的刻度方法的常数 B 一样呈两条带状分布, 而是以 1 为中心做均匀随机分布. 常数 A, C 在第 424 号丝附近的数值分布有跳跃, 这是因为第一层 μ 正比计数管的长度比第二、三层的 μ 正比计数管都要短所致. 新方法所得到的刻度常数均集中在一个比较狭窄的区域内, 不再像 BES II 的刻度方法那样出现很多刻度常数超出边界远离中心区的现象. 图 6 说明, 新方法所计算出来的刻度常数 A, B, C 就数值分布而言是准确合理的.

4 结果和讨论

图 7 是用新方法刻度双 μ 数据所得到的 z 向分辨率. 横坐标是 $\Delta z = z_{MDC} - z_{cal}$, 纵坐标是统计量. z 向分辨率可由图中的第四项参数 σ 这一项直接读出, 第三项平均值表示 $z_{MDC} - z_{cal}$ 的平均值. 图 7 上 3

层的 z 向分辨率分别为 4.8cm, 6.8cm 和 8.7cm. 峰值平均值大约为 2mm 左右.

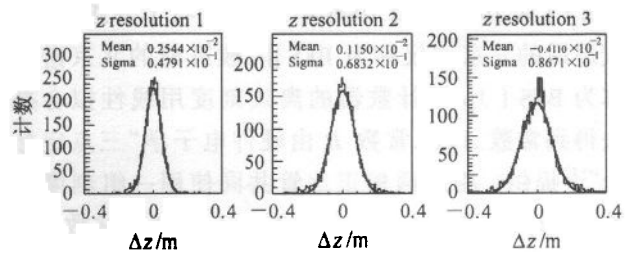


图 7 用新方法刻度 RUN16826—RUN16844 的 Δz 分布

图 8 是用新方法刻度蒙特卡洛(SOBER)数据所得到的 z 向分辨率. 由于 SOBER 是 BES 的简化模拟, 探测器中的一些复杂情况没有考虑进去, 所以获得的 z 向分辨率比实际数据要小一些, 3 层的分辨率分别为 4cm, 6cm 和 8cm 左右.

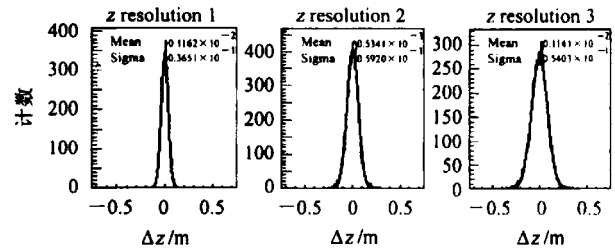


图 8 用新方法刻度蒙特卡洛数据的 Δz 分布

和前两种刻度方法相比, 新的刻度方法的主要优点是: 1) 与 BES II 刻度方法相比, μ 子计数器的 z 向分辨率大约提高 20%, 3 层的 z 向分辨率都达到了 μ 子计数器的设计要求. μ 子计数器多年运行之后, z 向分辨率下降是正常现象, 但通过新的刻度方法能将 z 向分辨率得到恢复. 2) 消除了 z_{MDC} 与 z_{cal} 之间的系统误差, 即使得 Δz 分布的平均值非常趋近零点. 由于 μ 子在穿越北京谱仪的过程中存在库仑散射以及 μ 子计数器的测量误差使 Δz 分布有一定宽度, 但是 Δz 分布的平均值应该接近零, 才能证明刻度常数的统计正确性. 3) 新方法所得到的刻度常数均集中在一个合理的区域内, 不再像前几种刻度方法那样出现很多刻度常数超出边界远离中心区的现象. 常数 B 也不再像 BES II 刻度方法的 B 一样呈两条带状分布, 而是以 1 为中心做均匀随机分布. 说明新方法所计算出来的刻度常数 A, B, C 就数值分布而言是准确合理的. 4) 新方法恢复使用线性拟合刻度常数 A, C, 让每根丝有自己的常数 A, C. 由于所有的刻度常数均由软件实时求出, 所以该刻度常数与数据的符合很好, 克服了硬件老化

与刻度常数不符合使 z 向分辨率变坏的问题. 为了使拟合程序更准确地拟合刻度常数, 得到最佳的 z 向分辨率, 应该保证适当的统计量, 让每对正比管有 10 个以上的径迹数. 具体的统计量可根据数据种类、数据质量和统计要求灵活使用. 用新方法对同时期的 J/ψ , $\psi(2S)$, ψ'' 与蒙特卡罗数据进行了刻

度, z 向分辨率均优于几种旧的 μ 子计数器刻度方法. 这说明新方法的 z 向分辨率好坏与取数时间和取数类型基本无关, 不再出现由于数据段不同而使 z 向分辨率波动较大的情况.

感谢电子学室顾树棣教授多次有益指导和讨论.

参考文献(References)

- ZHENG Zhi-Peng, ZHU Yong-Sheng. Beijing Spectrometer and e^+e^- Physics. Nanning: Science and Technology Publishing Homes of Guangxi, 1998, 34—58 (in Chinese)
(郑志鹏, 朱永生. 北京谱仪正负电子物理. 南宁: 广西科学技术出版社, 1998, 34—58)
- DING Hui-Liang et al (BES Collaboration). HEP & NP, 1992, 16(10): 865—875 (in Chinese)
(丁慧良等 (BES 合作组). 高能物理与核物理, 1992, 16(10): 865—875)
- DING Hui-Liang et al (BES Collaboration). HEP & NP, 1992, 16(9): 769—789 (in Chinese); BAI J Z et al. NIM, 1994, A344:319—334
(丁慧良等 (BES 合作组). 高能物理与核物理, 1992, 16(9): 769—789)
- ZHU Yong-Sheng et al. HEP & NP, 1989, 7(13):586—593 (in Chinese); 1990, 3(14):102—109 (in Chinese)
(朱永生等. 高能物理与核物理, 1989, 7(13):586—593; 1990, 3(14):102—109)
- Radeka V, Rehak P. IEEE NS-25, 46(1978); Radeka V. IEEE NS-21, 1974, 51
- HUANG Liang. IHEP Master Thesis, 2003, 42—48 (in Chinese)
(黄亮. 高能物理所硕士论文, 2003, 42—48)
- GU Shu-Di. The Pceedings of Second National Symposium of Nuclear Electrons & Detectors, 1984, Kunming (in Chinese)
(顾树棣. 第二次全国核电子学与核探测器学术会议论文集, 1984, 昆明)
- MAO Ze-Pu et al. HEP & NP, 1996, 24(12):1073—1081 (in Chinese)
(毛泽普等. 高能物理与核物理, 1996, 24(12):1073—1081)
- SUN Liang-Feng. IHEP Master Thesis, 2000, 25—40 (in Chinese)
(孙良峰. 高能物理所硕士论文, 2000, 25—40)

Offline Calibration of BES II Muon Detector

HUANG Liang MAO Ze-Pu ZHAO Wei-Ren SUN Liang-Feng ZHANG Chang-Chun MA Qiu-Mei
QIU Jin-Fa HUANG Xiu-Ping YUAN Ye

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The Structure of BES II μ Detector and its original offline calibration method is introduced, The calibration method is improved after careful study of the basic principle of various offline calibration method and the main reasons which caused the z position resolution of the μ Detector worsened. Using the improved offline calibration method, the z position resolution of the μ Detector is improved about 20 % compared with the previous method.

Key words Beijing spectrometer, μ detector, offline calibration, charge division

Received 15 April 2003

* Supported by NSFC(19991480)