

北京谱仪 II 带电径迹测量误差矩阵的修正*

洪涛 吕峰¹⁾ 张长春 童国梁 沈肖雁 毛泽普
李卫国 孙良峰 卞建国 王君 俞国威 袁建明

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 研究了北京谱仪(BES) II 带电径迹测量误差矩阵的修正,使运动学拟合 TELESIS 方法在 BES II 物理数据分析中得到应用. 1) 在 BES II 数据重建程序中,加入了适当的 MDC 重建单丝分辨率(250 μm)和 Q 修正. 2) 在 TELESIS 程序中,放入了 BES II 有效物质量对 BES II 误差矩阵进行多次库仑散射和 dE/dX 能损效应的修正. 3) 在此基础上,通过 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 的数据样本分析,完成了 BES II $24 \times 10^6 J/\psi$ 事例 RUN-by-RUN 的误差矩阵刻度,同时对 BES II MC 数据也作了相应的刻度. 经上述误差矩阵修正后, BES II 的 TELESIS 可以较好地满足 BES II 数据分析工作的要求.

关键词 运动学拟合 误差矩阵 漂移室 单丝分辨率 蒙特卡洛模拟

1 引言

北京谱仪(BES)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],用于 2—5GeV 能区的高能物理实验研究,如 J/ψ , τ , $\psi(2S)$ 及 D_s 物理等. 它在 1994 年至 1995 年进行了改进升级,升级后的 BES 称为 BES II^[2],而升级前的称为 BES I. 在升级后的 BES II 中,以 MARK-III 的稻草管式顶点探测器(VC)取代了 BES I 的中心漂移室(CDC),完全更新了主漂移室(MDC),发展了新的主漂移室重建程序 DCJULIE 以取代 BES I 的 DCFIND^[3].

主漂移室可以精确测量带电粒子飞行径迹的空间坐标,电荷和能损,通过离线数据处理,将 MDC 对该带电径迹测量的一系列击中点进行单径迹拟合后,重建出该带电径迹的参数(ϕ , $k = 1/p_{\text{xy}}$, $s = \text{ctg}\lambda$)及其误差矩阵,由此得到该带电径迹的动量.

如果一个事例的所有粒子均可被 BES 探测到,则这些粒子服从总四动量守恒定律,那么就可以进行运动学拟合(TELESIS);根据 MDC 的误差矩阵对各带电径迹的参数(ϕ ,

2000-10-31 收稿,2000-12-29 收修改稿

* 国家自然科学基金(19991480)和中国科学院重大及特别支持项目(KJ95T-03)资助

1) 联系人:luf@hpws3.ihep.ac.cn

k, s) 进行满足四动量守恒约束条件下的最小二乘法拟合. 运动学拟合是 BES 物理分析中常用且非常重要的一个处理工具, 可以显著改善粒子动量分辨, 进而提高共振态的质量分辨, 大大压低本底事例, 以提高信噪比水平选出目标事例. 运动学拟合的好坏可以用 $pull$ 分布来检查, $pull_i = \frac{Y_i - \eta_i}{\sqrt{\sigma^2(Y_i) - \sigma^2(\eta_i)}}$, ($i = 1, 2, 3$ 分别对应 ϕ, k, s 径迹参量), 其中 $Y_i, \sigma^2(Y_i)$ 为第 i 个径迹参量的 MDC 测量值及其方差, $\eta_i, \sigma^2(\eta_i)$ 为其拟合值及其方差. 对每个测量值, 理想的 $pull$ 分布应满足标准正态分布, 否则就说明作为 TELESIS 输入值的径迹参量测量值或其误差值不可靠.

运动学拟合的数学原理是严格的, MDC 测量的带电径迹参量中心值一般准确度较好, 合理地确定这些参量误差所组成的误差矩阵往往十分重要. TELESIS 的拟合成功与否与误差矩阵的正确与否关系甚大. 如果输入的误差值偏小, 则 TELESIS 将造成信号的丢失, 如果输入的误差值为偏大, 那么将不能有效排除本底, 这两个情况都使事例筛选的信噪比变坏. 只有当误差矩阵准确时, 才可获得最大的信噪比. 本文利用 BES II 获取的第一批约 $24 \times 10^6 J/\psi$ 事例的数据, 仔细研究了带电径迹误差矩阵的修正方法, 经过修正后的误差矩阵用于 TELESIS 拟合, 具有提高信噪比及降低系统误差的显著效果.

2 误差矩阵修正的必要性

径迹误差矩阵是在利用 MDC 击中点位置进行径迹重建时计算的, 它包括击中点拟合残差和位置分辨权重因子的贡献. 带电粒子穿越探测器四层物质 (束流管壁、顶点室 VC, MDC 内壁及其内层丝和气体) 产生多次散射和 dE/dX 能量损失. 这两项因素, 对于径迹测量误差的贡献应在 TELESIS 拟合之前作出估算和修正.

Mark-III 和 BES I 事例重建数据的误差矩阵曾分别做过研究和修正, 并用于物理分析. 苑长征利用置信度方法研究了 $\psi(2S)$ 数据的 MDC 带电径迹误差矩阵及桶部簇射计数器 (BSC) 中性径迹误差矩阵的可靠性^[4]. 所用 MDC 径迹误差矩阵已做过多次散射和 dE/dX 能损的修正. 他对实际数据样本 (DATA) 和蒙特卡洛样本 (MC) 分别使用 TELESIS 拟合, 分析表明: 对于带电径迹, DATA 相对 MC 有负的系统偏差 (-14% , $CL > 1\%$); 对于中性径迹, DATA 相对 MC 有正的系统偏差 ($+9\%$, $CL > 1\%$).

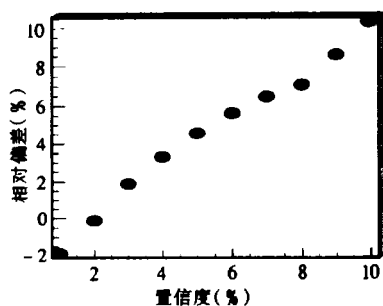


图 1 BES I 实际数据与模拟数据的相对偏差 ($\psi(2S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi$)

首先用 MC 产生 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事例, 检查 BES I 的 TELESIS. 经过 MDC 误差矩阵修正后 3 个 $pull$ 分布都是标准正态分布, 置信度曲线是平的, 与预期的分布相符, 说明 TELESIS 的数学算法是严格的. 在实际数据中, 选取既有中性径迹又有带电径迹的 $\psi(2S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi \rightarrow \gamma\gamma\gamma\mu^+ \mu^-$ 的样本, 经 BES I 的 TELESIS 的分析, 结果与苑长征结果是一致的. 结果如图 1 所示. 可见 BES I 运动学拟合输入的 DATA 和 MC 误差矩阵都需要进一步修正, 否则不可避免地引入系统误差.

图 1 中相对偏差定义为使用 TELESIS 的结果与不使用 TELESIS 的结果的差异与不使用 TELESIS 的结果之比,图中表示带电和中性径迹混合末态的 DATA 相对于 MC 的系统偏差,其值由带电系统偏差加上 1.15 倍的中性系统偏差而来.

3 BES II 的运动学拟合的研究

BES II 运动学拟合软件是在 BES I 的相应软件基础上修改的. 开始研究时, BES II 只有两批 J/ψ 数据 (MDC 单丝空间分辨率设定为 $200\mu\text{m}$): RUN12034—12070 和 RUN12099—12121. 本文首先从这两批数据中挑选出 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 的样本, 来研究实际数据的带电径迹测量误差. 其优点为: 此样本很容易选择, 纯度很高 (大于 95%), 统计量大.

3.1 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 样本事例选择

1) 带电径迹数 $N_{\text{chg}} = 2$, 中性径迹数 $N_{\text{neu}} = 0$, 总电荷 $N_{\text{totchg}} = 0$;

2) 两条带电径迹的选择条件:

(a) 有好的螺旋线拟合, $MFIT = 2$; (b) 极角 $|\cos\theta| \leq 0.8$; (c) 顶点坐标 $R_{xy} \leq 1.5\text{cm}$, $|z| \leq 15\text{cm}$; (d) 动量范围为 $1.0\text{GeV}/c < p < 2.0\text{GeV}/c$; (e) BSC 中沉积能量与 MDC 动量之比满足: $0 < E/p < 0.4$; (f) 共面角 $\theta_{\text{cop}} > 179^\circ$, 共线角 $\theta_{\text{col}} > 177^\circ$; (g) 不变质量 $2.6\text{GeV}/c^2 < M_{\mu^+ \mu^-} < 3.6\text{GeV}/c^2$.

利用 BES I 的运动学拟合程序分析上述 BES II $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事例样本, 对于第一批事例样本, $pull$ 分布的标准偏差为 (1.228, 1.856, 2.103), 动量分辨率为 $\sigma_p = 59.8\text{MeV}/c$; 对于第二批, 标准偏差为 (1.452, 2.355, 2.467), $\sigma_p = 86.4\text{MeV}/c$. 这表明, 径迹参数的 $pull$ 分布与标准正态分布相差很大, 以至于完全不适合在物理分析中使用. 分析表明, 这一状况是由 BES II 数据中设定的 MDC 径迹参数误差偏小或 TELESIS 中输入误差的修正量不恰当造成的.

3.2 BES II MDC 单丝空间分辨率

利用 MC 的模拟产生 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事例, 研究 MDC 单丝空间分辨率与 MDC 误差矩阵的关系, 结果如图 2. 结果表明: 1) MC 数据重建时的 MDC 丝分辨率设定为 $200\mu\text{m}$, 有效物质由 BES I (4.447% X_0) 变为 Mark-III (1.116% X_0) 时, 比较两者的运动学拟合 $pull$ 分布, 发现仅 $pull1(\phi)$ 发生了较大的变化, 而 $pull2(k)$ 和 $pull3(\lambda)$ 变化相应较小, 所以可以说 BES II $pull$ 分布偏离标准正态分布原因主要不在于 TELESIS 中径迹参数误差因多次散射和 dE/dX 能损的修正的不足, 而在于径迹参数误差的设定值偏小. 2) 当事例重建时, MDC 丝分辨率设定为 $REC = 200\mu\text{m}$, 而利用 MC 产生事例, 丝分辨率在 $GEN = 310\text{—}440\mu\text{m}$ 之间变化时, 比较运动学拟合的 $pull$ 分布, 发现当产生丝分辨率越大时, $pull$ 分布的宽度也越大, 运动学拟合效果越差. 通过分析 MDC 误差矩阵及其重建丝分辨率和产生丝分辨率的关系 (见图 3), 发现用重建程序中设定的重建丝分辨率来重建出的

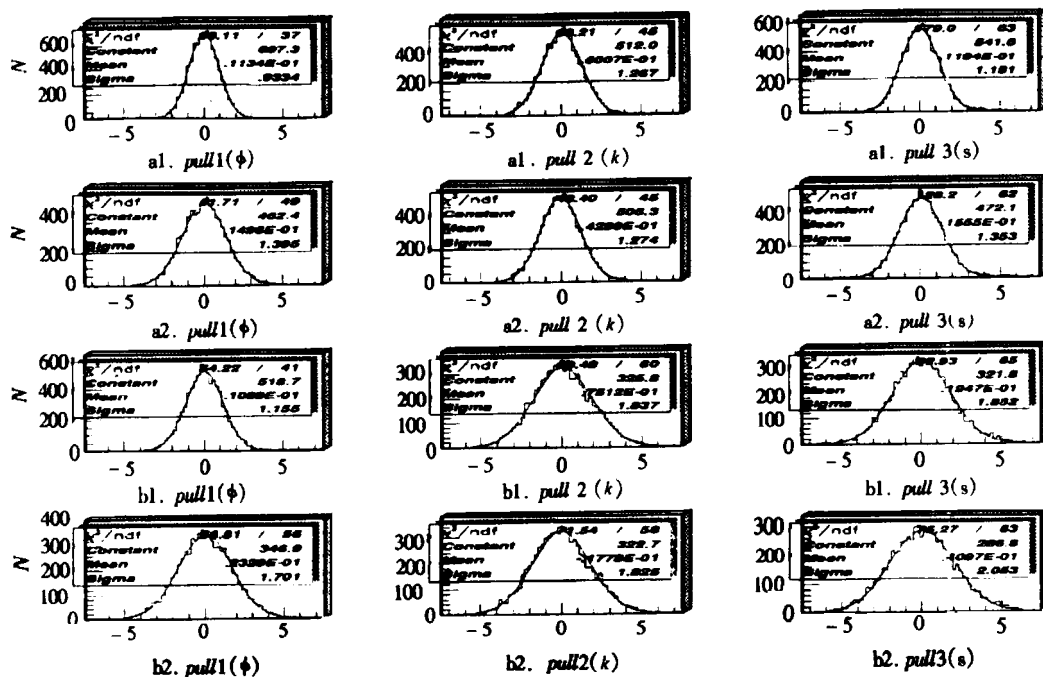


图 2 不同条件下 MC 模拟的 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事例相应的径迹参数 *pull* 分布

a, b 表示 MC 模拟中 MDC 单丝分辨率分别设定为 $200\mu\text{m}$ 和 $358\mu\text{m}$;

1, 2 表示有效物质量分别为 $4.447\% X_0$ 和 $1.116\% X_0$.

MDC 误差矩阵, 不能反映数据测量误差的真实情况, 即表明只有正确的重建丝分辨率才可获得正确的 MDC 误差矩阵. 通过比较 MC 和实际数据之间 *pull* 分布的标准偏差, 可以估计 MDC 的真实丝分辨率, 发现 BES II 的 MDC 重建丝分辨率设定值 ($200\mu\text{m}$) 偏小. 借助实际数据仔细测量, 得到 BES II 的 MDC 单丝分辨率为 $250\mu\text{m}$, 经二次数据重建后, *pull* 分布有了明显的改善. 对于 RUN13711—13750, *pull* 分布的标准偏差为 (1.191, 1.300, 1.508), $\sigma_p = 45.79\text{MeV}/c$; 对于 MC, *pull* 分布的标准偏差为 (1.0028, 1.2235, 1.3344), $\sigma_p = 45.38\text{MeV}/c$, 两者较为接近.

3.3 多次库仑散射和 dE/dX 能损效应的修正

在 MDC 形成径迹之前, 带电粒子已穿越束流管管壁、VC(丝、气体及外壁) 和 MDC 内壁及其内层丝和气体. 带电粒子将因多次库仑散射效应改变运动方向, 又因 dE/dX 电离能量损失而丢失动量. 因此, 估算束流管区物质量, 按 dE/dX 能损对 MDC 径迹动量进行补偿, 并对 MDC 径迹误差矩阵进行修正, 是十分必要的. MDC 径迹动量与误差矩阵需经过这些修正之后, 才可用于 TELESIS 拟合的输入量. 上述修正的有关程序是 BES I TELESIS 软件的一部分. 升级到 BES II 时, 用 BES II 物质量替换 BES I 的值(见表 1), 就可以完成对 BES II MDC 误差矩阵的修正^[5].

带电粒子的电离能量损失 dE/dX 是用 Bethe-Block 公式计算的^[6], 包括密度效应的修正. 高能电子主要以韧致辐射形式损失能量, 应当另外加以考虑.

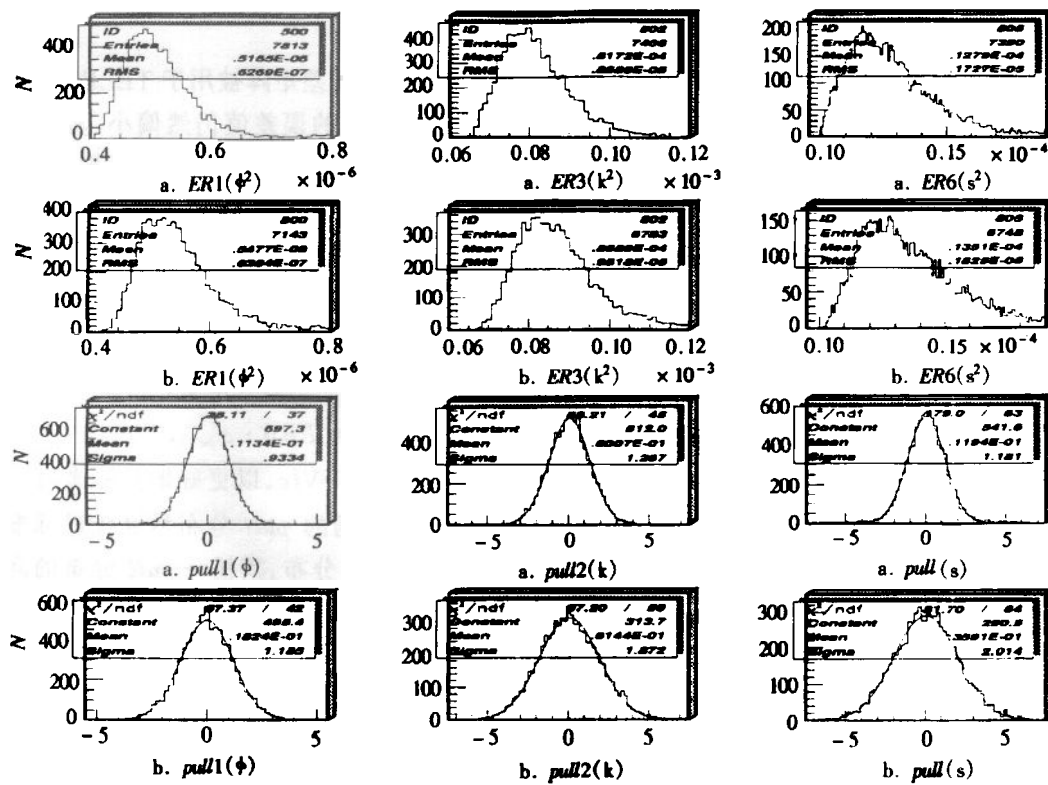


图 3 不同条件下 MC 模拟的 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事例相应的径迹参数的误差和 pull 分布

a, b 表示 MC 模拟中 MDC 单丝分辨分别设定为 $200\mu\text{m}$ 和 $375\mu\text{m}$;

ER 1,3,6 分别为径迹参数 ϕ^2, k^2, s^2 的标准偏差.

表 1 BES II 束流管区的有效物质 (X/X_0 , (%) 相对辐射长度)

名称	材料	厚度(mm)	半径(mm)	总和 X/X_0 (%)
束流管	镍	0.015	47.62	0.536
	铍	1.270	48.26	
	钛	0.025	48.907	
VC	Mylar 膜	0.500		1.193
	钨	0.0022		
	氢和乙烷	86.411		
VC 外壁	Kapton 膜	0.051	135.36	1.568
	碳纤维	0.762	135.76	
	铝	0.076	136.18	
MDC 内壁	铝	0.050	155.00	2.675
	碳纤维	2.000	156.05	
	Kapton 膜	0.254	157.18	
	铜	0.038	157.32	

3.4 MDC 误差矩阵的刻度

经过多次散射和 dE/dX 修正后的带电径迹参量值及其误差矩阵被用于 TELESIS 拟合的输入, 经 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 数据样本检查, 发现 MDC 径迹参数的误差值仍然偏小, 所以需要 MDC 误差矩阵作进一步的刻度. 对 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 真实数据样本进行 TELESIS 拟合, 得到的 $pull_{1,2,3}$ 分布的标准偏差 $\sigma_{pull_{1,2,3}}$, 以此来刻度 MDC 径迹的误差矩阵. 误差矩阵是对称矩阵, 它的 6 个独立矩阵元在刻度前后的关系如下: (下式中左边为刻度后的值, 右边为刻度前的数值)

$$\begin{aligned} ER1'(\phi^2) &= ER1 \cdot \sigma_{pull1}^2, ER2'(\phi \cdot k) = ER2 \cdot \sigma_{pull1} \cdot \sigma_{pull2}, \\ ER3'(k^2) &= ER3 \cdot \sigma_{pull2}^2, ER4'(\phi \cdot s) = ER4 \cdot \sigma_{pull1} \cdot \sigma_{pull3}, \\ ER5'(k \cdot s) &= ER5 \cdot \sigma_{pull2} \cdot \sigma_{pull3}, ER6'(s^2) = ER6 \cdot \sigma_{pull3}^2. \end{aligned}$$

利用上面选取的 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 样本, 进一步要求 $P_\mu > 1.4 \text{ GeV}/c$, 以更好地排除来自于 $J/\psi \rightarrow p\bar{p}$ 的本底. 对于数据, 调节 MDC 的误差矩阵, 使得数据的 $pull$ 分布尽量接近标准正态分布, 但由于调优后的数据 $pull$ 分布仍不是标准的正态分布, 其任一 $pull$ 分布的高斯拟合 χ^2/ndf 大于 1, 所以相应的置信度曲线不是平的. 对于 MC, 也重新刻度另外一套参数, 使得 MC 的运动学拟合效率与数据的效率在置信度 (C.L.) 为 1%—10% 的范围内尽可能相同, 结果发现 MC 的 $pull1, pull2$ 的高斯拟合 χ^2/ndf 接近于 1.0, 说明它们非

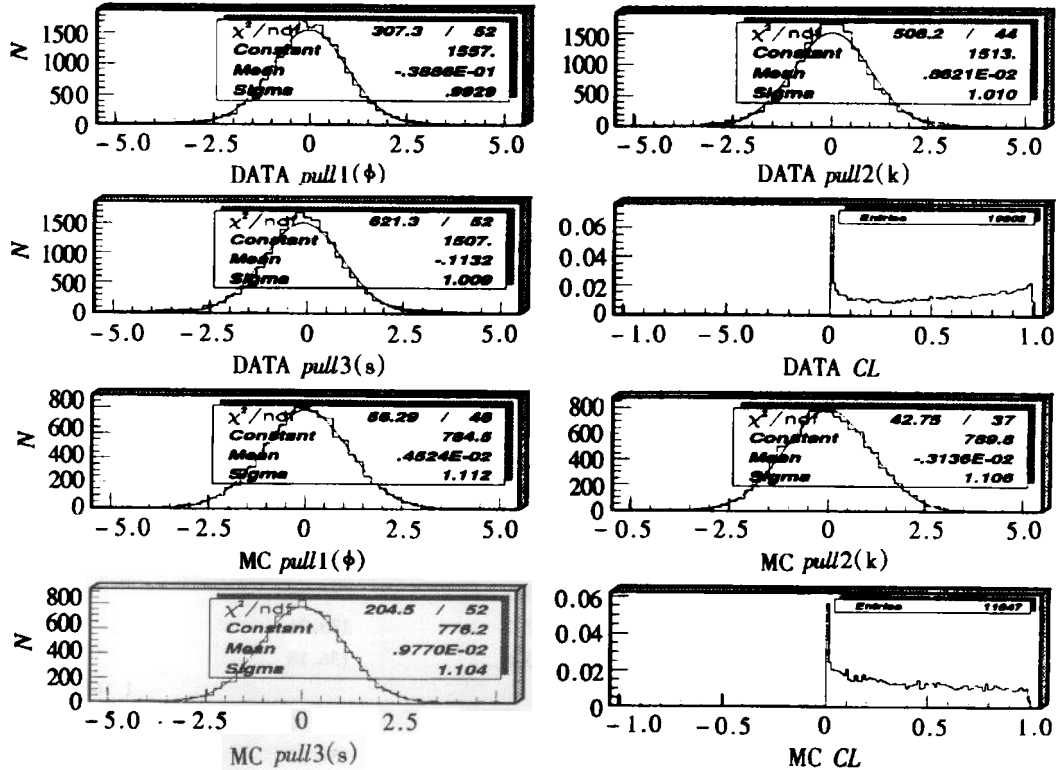


图 4 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 的模拟数据 (MC) 和实际数据 (DATA) 用误差矩阵径迹修正后的 TELESIS 拟合得到的 $pull$ 分布

常接近标准正态分布,但 $pull3$ 的 χ^2/ndf 仍远大于 1.0. 由于 MC 无法模拟 MDC 的真实噪音水平,MC 的效率偏高,为求与数据效率一致,所以 MC $pull$ 分布标准偏差应比 1.0 略大. 结果见表 2,表 3 和图 4. 对于具有大的 dE/dX 能量损失的带电粒子,由于 MDC 的测量误差变小,而导致经我们修正的 $pull$ 分布的标准偏差小于 1. 另外由于各种粒子的动量及电离特性的差别,在信号丝上感应到的脉冲信号幅度 Q 是大小不等的,所以引起电子学开门的时间上的晃动,从而引起漂移时间的偏置. 因此在 MDC 径迹重建时通过 dE/dX 脉冲高度信息 Q 对漂移时间作修正,从而使误差矩阵修正不存在对粒子种类的依赖关系.

表 2 MDC 误差矩阵刻度前的运动学拟合效率

置信度 > (%)	$\chi^2 <$	实际数据 (%)	MC (%)	相对偏差 (%) [*]
0.0	50.0	97.24	98.67	-1.48
5.0×10^{-4}	30.0	93.95	97.45	-3.72
5.2×10^{-3}	25.0	91.92	96.44	-4.92
5.0×10^{-2}	20.0	88.35	94.39	-6.83
0.473	15.0	81.51	89.17	-9.40
1.0	13.25	77.96	85.78	-10.04
2.0	11.67	73.68	81.25	-10.27
3.0	10.72	70.62	77.62	-9.91
4.0	10.02	68.03	74.86	-10.05
5.0	9.49	65.88	72.16	-9.54
6.0	9.04	64.08	69.79	-8.90
7.0	8.67	62.55	67.79	-8.38
8.0	8.34	60.86	65.74	-8.03
9.0	8.05	59.24	63.90	-7.87
10.0	7.78	57.78	62.22	-7.69

* 相对偏差 = (实际数据效率 - 蒙特卡洛模拟效率) / 实际数据效率

表 3 MDC 误差矩阵刻度后的运动学拟合效率

置信度 > (%)	$\chi^2 <$	实际数据 (%)	MC (%)	相对偏差 (%) [*]
0.0	50.0	99.43	99.44	-0.01
5.0×10^{-4}	30.0	98.35	98.53	-0.19
5.2×10^{-3}	25.0	97.66	98.14	-0.50
5.0×10^{-2}	20.0	96.58	97.43	-0.88
0.473	15.0	94.40	95.69	-1.47
1.0	13.25	93.19	94.57	-1.48
2.0	11.67	91.48	92.81	-1.46
3.0	10.72	90.08	91.14	-1.17
4.0	10.02	88.84	89.56	-0.81

续表

置信度 > (%)	$\chi^2 <$	实际数据 (%)	MC (%)	相对偏差 (%) [*]
5.0	9.49	87.85	88.10	-0.28
6.0	9.04	86.78	86.69	+0.11
7.0	8.67	85.86	85.27	+0.68
8.0	8.34	84.90	83.88	+1.21
9.0	8.05	84.08	82.70	+1.64
10.0	7.78	83.30	81.33	+2.35

* 相对偏差 = (实际数据效率 - 蒙特卡洛模拟效率) / 实际数据效率

另外通过对同一事例 MDC 的 TDC 击中层数和有效的击中层数的对比研究,发现不同批的数据间的噪音水平不一样. 例如 RUN12034—12121 要比 RUN13700—16835 的噪音水平明显地大. 研究表明:数据噪音越大,它的真实误差越大,如果固定重建分辨率重建出的径迹参数误差与其误差真实值间差别也越大. 所以我们认为 BES II 的重建分辨率不应该固定在 $250\mu\text{m}$, 而应该对数据作 RUN-by-RUN 的修正.

经过对逐个数据 RUN 的 MDC 误差矩阵的修正, BES II 的运动学拟合较之以前有了很大的改进,信噪比大为提高,各 RUN 基本保持一致的信噪比(见图 5.6).

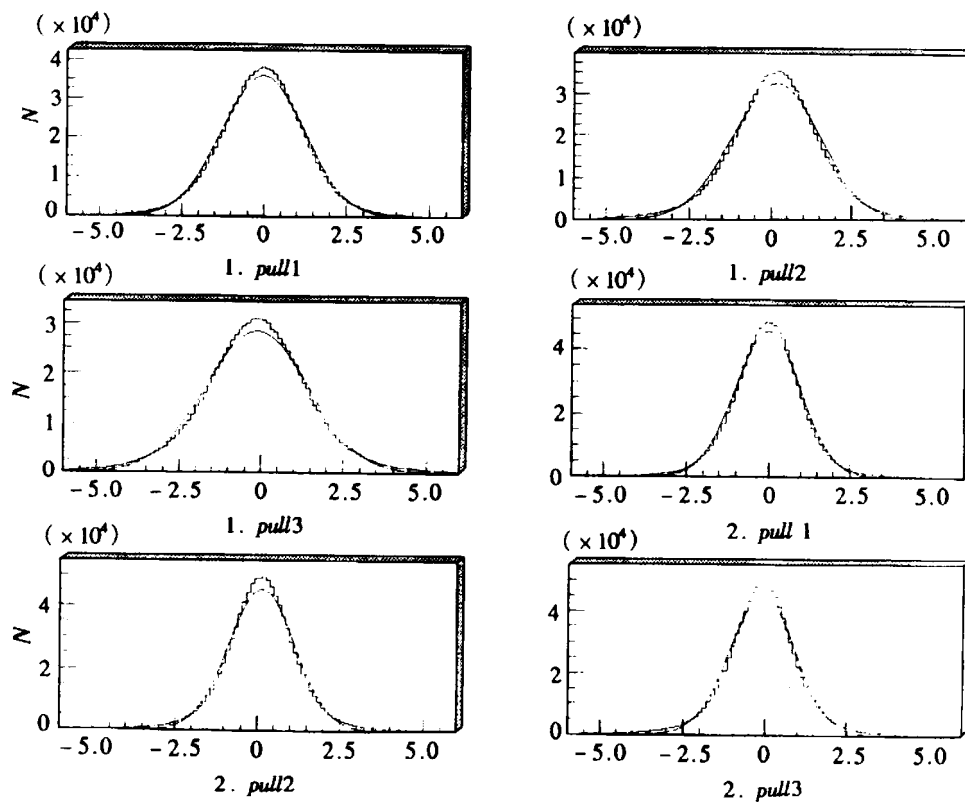


图 5 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 数据误差矩阵修正前后 pull 分布对比

1: 修正前, 2: 修正后.

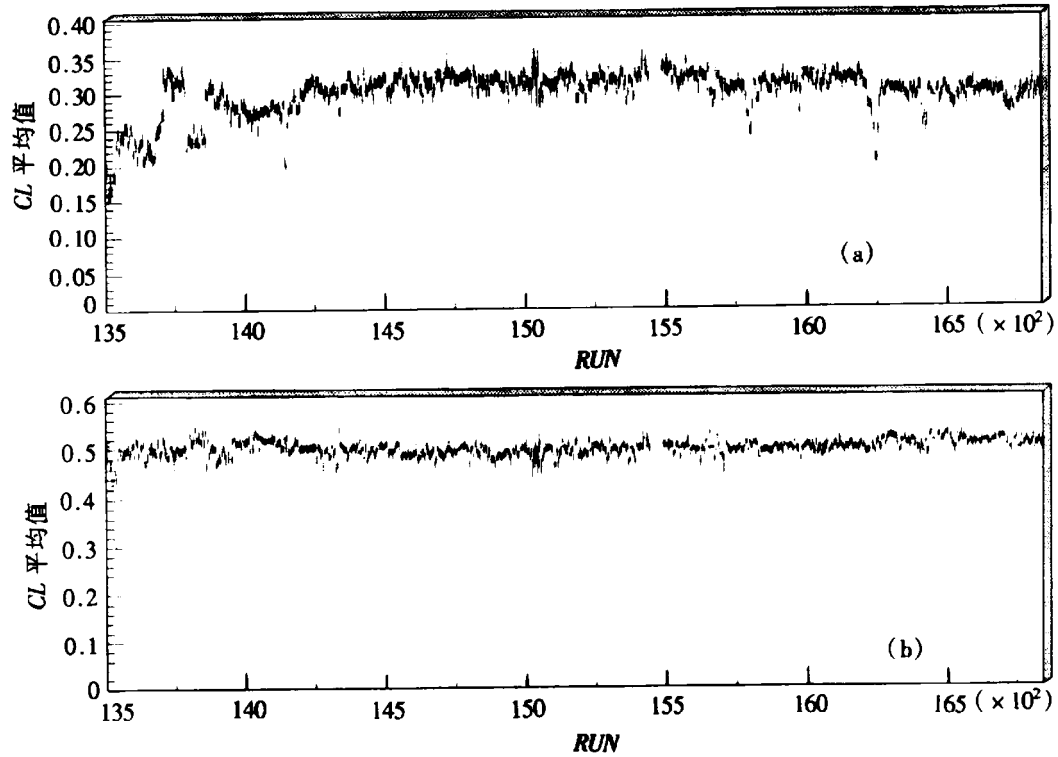


图6 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 数据误差矩阵修正前后,TELESIS拟合CL平均值随RUN变化
(a)修正前;(b)修正后.

4 结语

BES II 的 TELESIS 较 BES I 的 TELESIS 有如下改进:1) MDC 前面的有效物质量从 BES I 的 $4.447\% X_0$ 降为 BES II 的 $2.675\% X_0$;2) BES II 动量 dE/dX 能损补偿大小相对 BES I 下降 1 个 MeV/c 左右;3) 对 BES II 所取的 $24 \times 10^6 J/\psi$ 事例样本,作了 MDC 误差矩阵 RUN-by-RUN 的刻度. 这些改进使 TELESIS 对 BES II $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事例的运动学拟合效率提高 20% 以上,并保证 DATA 与 MC 间由于使用 TELESIS 而造成的系统误差小于 5%,为 BES II 的数据分析提供了很好的支持.

参考文献(References)

- 1 BAI Jing-Zhi et al. NIM,1994,A344:319—334
- 2 BAI Jing-Zhi et al. NIM,2001,A458:627
- 3 LIU Jing et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys.,1998,22(7):587—595 (in Chinese)
(刘靖等. 高能物理与核物理,1998,22(7):587—595)
- 4 ZHU Yong-Sheng. Probability and Statistics in Experimental Physics. Beijing:Science Publisher,1991 (in Chinese);
(朱永生. 实验物理中的概率和统计,北京:科学出版社,1991);
YUAN Chang-Zheng. The Search of Charmonium S Wave Spin Singlet η'_c and the Study of P Wave Triplet χ_{c1} , PH.D

Thesis, 1997

(苑长征. 粲夸克偶素 S 波自旋单态 η_c' 的寻找和相应过程 P 波三重态 χ_{cJ} 的研究, 博士论文, 1997)

Fvodesen A G et al. *Probability and Statistics in Particle Physics*. 1979. Norway

6 Particle Data Group. *Phys. Rev.*, 1996, **D54**:132

BES II Error Matrix Correction on Charged Channel

HONG Tao LÜ Feng ZHANG Chang-Chun TONG Guo-Liang SHEN Xiao-Yan
MAO Ze-Pu LI Wei-Guo SUN Liang-Feng BIAN Jian-Guo WANG Jun
YU Guo-Wei YUAN Jian-Ming

(*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China*)

Abstract The error matrix correction for charged track parameters of BES II detector is carefully studied. The proper MDC wire spatial resolution ($\sigma = 250\mu\text{m}$) and Q correction are incorporated into BES II data reconstruction program. The BES II effective material passed through by tracks from interaction point to MDC is taken into account in the kinematics fitting package TELESIS, to correct the multiple scattering and dE/dX energy loss effects. By analyzing the $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ data sample, the RUN-by-RUN error matrix calibration is completed for BES II 24×10^6 J/ψ events. After these corrections of the error matrix, TELESIS can be applied to BES II J/ψ data analysis with fairly good accuracy.

Key words TELESIS, error matrix, drift chamber, wire spatial resolution, Monte Carlo simulation

Received 31 October 2000, Revised 29 December 2000

* Supported by NSFS (19991480) and The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03)