

文章编号:1673-0062(2012)01-0014-05

BES III 探测器寻迹效率的蒙特卡罗研究

郑 波¹, 荣 刚²

(1. 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049)

摘 要:通过分析蒙特卡罗模拟 BES III 探测器在 BEPC-II 上正负电子对撞质心系能量为 3.773 GeV 处采集的 $e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$ 的数据, 研究了 BES III 主漂移室对带电 p 介子和 K 介子的寻迹效率. 同时, 利用这一方法, 可以确定数据和蒙特卡罗样本中的带电 p 介子和 K 介子寻迹效率之间的差异.

关键词:寻迹效率; $\psi(3770)$; $D\bar{D}$ 介子

中图分类号: O572.2⁺2 **文献标识码:** A

Monte Carlo Study of the Tracking Efficiencies at BES III

ZHENG Bo¹, RONG Gang²

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: By analyzing the Monte Carlo events for $e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$ generated at center-of-mass energy of 3.773 GeV, we studied the tracking efficiencies of the charged pion and kaon of the Main Drift Chamber at BES III. The difference of tracking efficiency between data and Monte Carlo also can be determined by using this method.

key words: tracking efficiency; $\psi(3770)$; $D\bar{D}$ mesons

0 引 言

工作在北京正负电子对撞机-II (BEPC-II) 上的北京谱仪-III (BES III)^[1]已于 2010 年 1 月 18 日开始在正负电子对撞能量 $E_{\text{cm}} = 3.773 \text{ GeV}$ 处采集 $\psi(3770)$ 数据, 至今已采集了 2.9 fb^{-1} 的 $\psi(3770)$ 数据. 为了理解探测器的性能、数据的质量、蒙特卡罗对粒子与探测器相互作用模拟的准

确性以及带电径迹的重建等, 利用 $\psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$ 蒙特卡罗事例研究了穿过主漂移室 (MDC) 的带电径迹的寻迹效率. 寻迹效率直接影响到探测效率, 而探测效率又直接影响到物理分析所得到的观测事例数. 同时, 由寻迹效率的不确定性带来的系统误差也占了物理分析得到最终结果的系统误差的很大一部分. 利用 BES III 所采集的大的数据样本, 有机会对 $\psi(3770)$ 和 D 介子的衰变特性做

收稿日期: 2012-01-06

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目 (1093500); 南华大学博士科研启动基金资助项目 (2011XQD28)

作者简介: 郑 波 (1983-), 男, 湖南衡阳人, 南华大学核科学技术学院讲师, 博士. 主要研究方向: 粒子物理实验.

精密的研究. 精密的实验测量工作首先要求要对 BES III 探测器有充分的了解, 并尽可能的降低物理分析过程的系统误差. 本文讨论如何利用在 3.773 GeV 处采集的 $\psi(3770)$ 数据确定主漂移室的寻迹效率及寻迹效率的误差.

1 BES III 探测器

BES III 探测器^[1]是通用型的磁谱仪, 它是工作在 τ -粲能区的一台大型粒子探测装置, 其技术指标满足在高亮度多束团对撞下的粒子物理实验要求. 整个探测器主要由以下部分构成: 1) 主漂移室 (MDC), 其单丝分辨率好于 120 μm , 电离能损 (dE/dx) 分辨率好于 6%. 在 1 T 磁场强度下, 1 GeV/c 的带电径迹的动量分辨率好于 0.5%. 2) 电磁量能器 (EMC) 由 6000 多块碘化铯晶体组成, 对 1 GeV 的光子和电子的能量分辨率好于 2.5%, 位置分辨率好于 6 mm. 3) 飞行时间计数器 (TOF) 本征时间分辨率好于 90 ps. 4) 低温超导磁铁提供中心磁场强度达 1 T 的工作磁场. 5) μ 子探测器 (MUC) 由九层阻性板室 (RPC) 构成, 空间分辨率好于 2 cm.

2 确定寻迹效率的原理与方法

本分析利用丢失径迹的方法来确定 MDC 寻迹软件系统对 $\pi^\pm$ 和 $K^\pm$ 介子的寻迹效率^[2]. 由于 $\psi(3770)$ 主要衰变到 $D\bar{D}$ 介子对, 因此选择 $D\bar{D}$ 衰变的事例来研究 $\pi^\pm$ 和 $K^\pm$ 介子的寻迹效率. 对于某一个特定的衰变模式, 除了要确定寻迹效率的粒子 (X) 之外, 我们先要重建出其他所有的粒子. 假设丢失的径迹为 X 粒子, 所有其他重建出来的粒子和这一条丢失的径迹做能动量守恒的运动学约束. 根据 $\psi(3770)$ 衰变特性, 在重建出来的粒子中必定可以组成一个 $\bar{D}$ (或 D) 介子. 约束这个 $\bar{D}$ (或 D) 介子衰变出来的粒子的不变质量为 $\bar{D}$ (或 D) 介子的质量. 利用重建出来的这些粒子的运动学量, 在实验室系下计算丢失质量的平方 (M_{miss}^2):

$$M_{\text{miss}}^2 = (p_{\text{tot}} - p_{\text{other}})^2, \quad (1)$$

这里 p_{tot} 是 e^+e^- 的四动量, p_{other} 是所有重建出来的粒子总的四动量. M_{miss}^2 在 M_X^2 处形成一个峰, M_X^2 是 X 粒子质量的平方. 然后在每个事例剩余的径迹中寻找丢失粒子 X, 并把这些事例分成两部分: 如果找到了丢失粒子 X, 将之归为 “found” 类, 如果没有找到丢失粒子 X, 则归为

“missed” 类. 对这两类事例的丢失质量平方谱进行拟合可以分别得到这两类事例的信号事例数 (N_{found} 和 N_{missed}). 利用这些事例数, 可以确定寻迹效率 (ε^{trk}) 为:

$$\varepsilon^{\text{trk}} = \frac{N_{\text{found}}}{N_{\text{found}} + N_{\text{missed}}} \quad (2)$$

利用这个方法, 分别分析实验数据和蒙特卡罗样本, 即可分别确定数据的寻迹效率 $\varepsilon_{\text{data}}^{\text{trk}}$, 蒙特卡罗模拟样本的寻迹效率 $\varepsilon_{\text{MC}}^{\text{trk}}$. 利用这些结果, 即可确定实验数据和蒙特卡罗模拟之间的差异为

$$\varepsilon_{\text{MC}}^{\text{trk}} / \varepsilon_{\text{data}}^{\text{trk}} - 1 \quad (3)$$

3 蒙特卡罗样本和数据分析

3.1 $\psi(3770)$ 蒙特卡罗样本

本研究利用的蒙特卡罗事例是在 3.773 GeV 处产生的 1000 万 $e^+e^- \rightarrow \psi(3770)$ 事例, 其中 $\psi(3770)$ 衰变到 $D\bar{D}$ 介子对, 中性和带电的 $D\bar{D}$ 事例分别占 58% 和 42%. $D\bar{D}$ 介子及其衰变出来的共振态粒子都按《粒子物理》手册——PDG^[3] 给出的分支比衰变到任何可能的模式. 此项研究在 BES III 离线软件系统 (BOSS)^[4] 下进行的. BOSS 系统是基于 Gaudi^[4] 开发出来的. BOSS 系统中模拟算法基于 GEANT4 工具包^[5]. 蒙特卡罗也真实模拟了 BES III 上事例产生时 e^+e^- 22 mrad 的对撞夹角.

3.2 事例初选和径迹筛选

在进行初始的径迹选择时, 要求每一条带电径迹都必须在 MDC 有好的螺旋拟合优度, 并且带电径迹的极角满足 $|\cos \theta| < 0.93$, 此处 θ 是径迹与 e^+ 束流方向在 MDC 中之间的夹角. 带电径迹 (除用于重建 K_S^0 介子外) 都必须来源于对撞区, 即要求 $R_{xy} < 1.0$ cm 和 $|V_z| < 10.0$ cm ($R_{xy} < 10.0$ cm 和 $|V_z| < 20.0$ cm), R_{xy} 和 V_z 是在 xy 平面和 z 方向上离原点最近的距离.

带电径迹是利用 dE/dx 和 TOF 的测量信息来进行鉴别的. 利用这些测量信息, 计算假设为 $\pi^\pm$ 和 $K^\pm$ 介子的联合置信度 (CL_π 和 CL_K). 候选 $\pi^\pm$ 和 $K^\pm$ 介子分别要满足 $\text{CL}_\pi > \text{CL}_K$ 和 $\text{CL}_K > \text{CL}_\pi$. 利用 EMC 的测量信息来选择光子, 要求候选好光子必须满足以下三个选择条件: 1) 桶部 (端盖) EMC 中沉积能量大于 25 (50) MeV; 2) 光子的时间窗落在 0 ~ 14 之间 (时间单位为 50 ns); 3) 光子与最近的带电径迹的夹角应大于 10° . 本分析利用 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 这个衰变道来重建 π^0 介

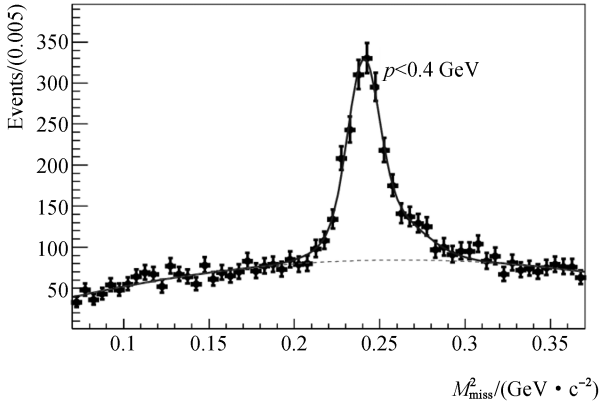
子,利用 $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 来重建 K_s^0 介子. 数据分析中对 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 做质量约束的运动学拟合,对 $K_s^0 \rightarrow \pi^+ p^-$ 做次级顶点拟合,并且要求 $\gamma\gamma$ 的不变质量 ($M_{\gamma\gamma}$) 满足 $0.10 < M_{\gamma\gamma} < 0.15$ GeV, $\pi^+ \pi^-$ 组合的不变质量在 K_s^0 质量 ± 9 MeV 范围内.

3.3 带电径迹样本的选择

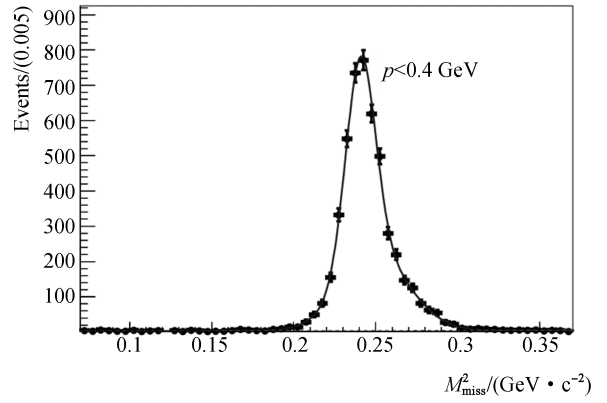
为了精确确定 $\psi(3770)$ 数据样本中 π^+ 和 K^+ 介子的寻迹效率,本分析采用了以下 $D\bar{D}$ 衰变模式: $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 且 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ (本分析也利用了所有的电荷共轭模式), $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^- \pi^+$ 且 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0$ 且 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 且 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$, $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^- \pi^+$ 且 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$, $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0$ 且 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ $\pi^+ \pi^-$. 为了方便起见,我们仅用 $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 且 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ 这个衰变模式举例说明. 首先选择三条带电径迹且分别被鉴别为 $K^+ \pi^- K^-$, 然后对这三条径迹 $K^+ \pi^- K^-$ 和一条假设为 π^+ 的丢失径迹作四动量守恒的运动学约束. 同时约束 $K^+ \pi^-$ 的不变质量为 $\bar{D}^0$ 的质量. 运动学约束时考虑了 BEPC-II 的能散和 $e^+ e^-$ 的对撞夹角. 为了压低背景,

要求运动学拟合的 χ^2 小于 10. 为了确定寻迹效率,要求由运动学拟合得到的丢失粒子的动量的极角的余弦值满足 $|\cos \theta| < 0.90$, 这个值比探测器的接收角 $|\cos \theta| < 0.93$ 要小. 此要求是为了保证在考虑了探测器动量分辨因素之后,这条径迹也能处于探测器的接收范围之内. 在做了上述选择之后,用方程(1)计算 M_{miss}^2 .

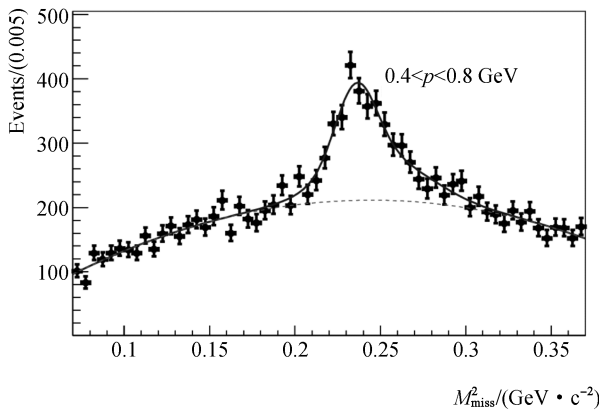
在得到上述事例之后,在每一个事例剩余的径迹中寻找满足 3.2 节中选择条件(除了粒子鉴别条件之外)的径迹,进一步要求找到的这一条带电径迹的动量方向与其他所有的带电径迹总动量的反方向的夹角小于 5° (对动量小于 0.4 GeV/c 的径迹此要求为 10°). 把通过上述选择的事例归为“found”这一类,其他的事例归为“missed”这一类. 图 1 和图 2 显示了这两类事例的丢失质量平方的分布. 用高斯函数描述信号,用多项式描述背景,对这两类事例的丢失质量谱进行拟合,可以分别得到这两类事例的信号事例数 (N_{found} 和 N_{missed}).



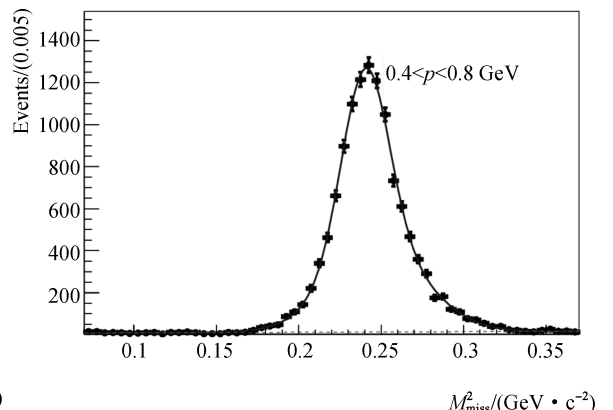
(a)



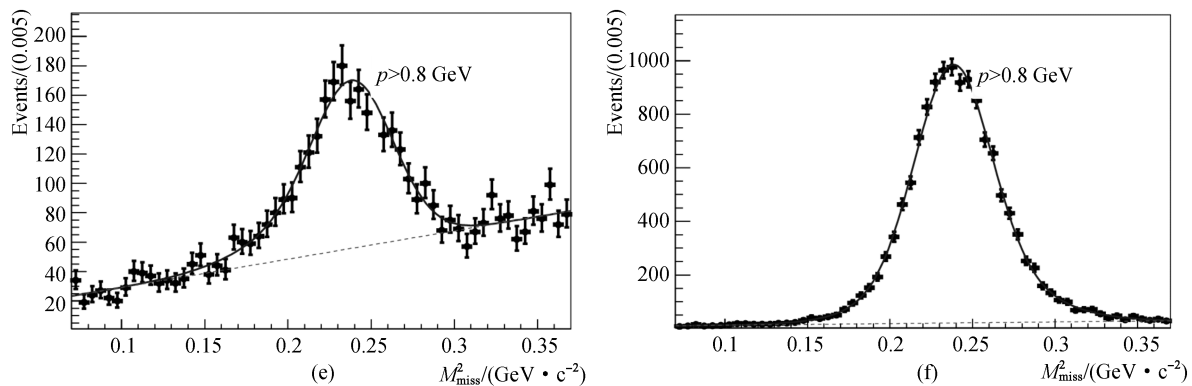
(b)



(c)



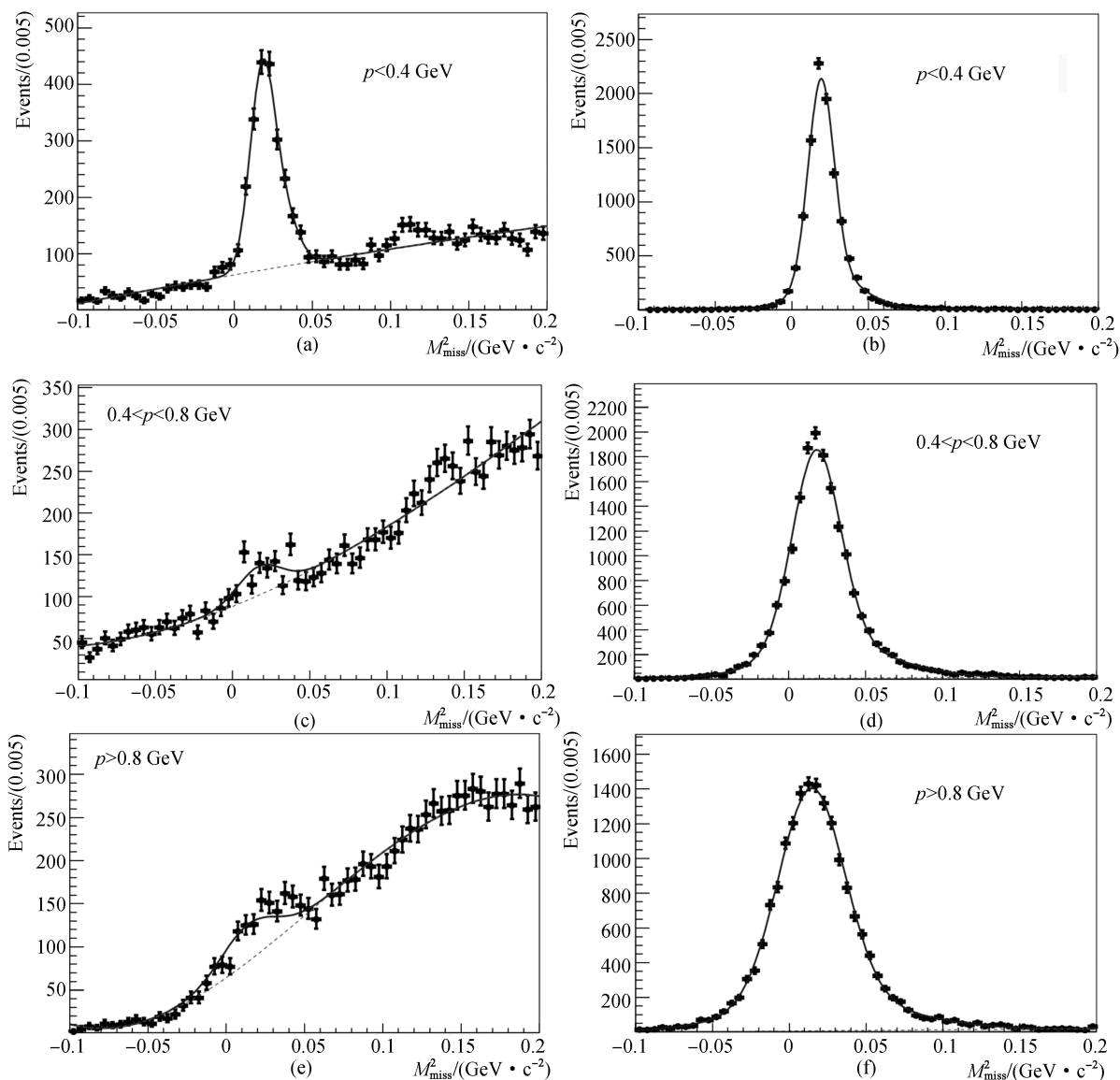
(d)



(a)/(b): $P < 0.4 \text{ GeV}/c$; (c)/(d): $0.4 < P < 0.8 \text{ GeV}/c$; (e)/(f): $P > 0.8 \text{ GeV}/c$.

图 1 不同动量范围“missed”类(a,c,e)和“found”类(b,d,f)中K介子丢失质量平方分布。

Fig.1 The missing mass square of kaon from “missed” (a,c,e) and “found” (b,d,f) classes in different momentum range.



(a)/(b): $P < 0.4 \text{ GeV}/c$; (c)/(d): $0.4 < P < 0.8 \text{ GeV}/c$; (e)/(f): $P > 0.8 \text{ GeV}/c$.

图 2 不同动量范围“missed”类(a,c,e)和“found”类(b,d,f)中 π 介子丢失质量平方分布。

Fig.2 The missing mass square of pion from “missed” (a,c,e) and “found” (b,d,f) classes in different momentum range.

表 1 蒙特卡罗样本中带电 K 介子的寻迹效率

Table 1 The tracking efficiency of kaon
in Monte Carlo sample

动量/ ($\text{GeV} \cdot c^{-1}$)	N_{missed}	N_{found}	$\varepsilon/\%$
<0.4	1221 ± 48	5120 ± 75	80.75 ± 0.50
0.4-0.8	1559 ± 77	12510 ± 118	88.92 ± 0.26
>0.8	1290 ± 58	12795 ± 126	90.84 ± 0.24

表 2 蒙特卡罗样本中带电 π 介子的寻迹效率

Table 2 The tracking efficiency of pion
in Monte Carlo sample

动量/ ($\text{GeV} \cdot c^{-1}$)	N_{missed}	N_{found}	$\varepsilon/\%$
<0.4	383 ± 23	7086 ± 94	94.87 ± 0.26
0.4-0.8	244 ± 44	11017 ± 110	97.83 ± 0.14
>0.8	390 ± 49	14310 ± 142	97.35 ± 0.13

4 结 果

利用前面阐述的方法,用式(2)确定寻迹效率.不同动量范围内主漂移室对蒙特卡罗样本中的 $\pi^{\pm}$ 和 $K^{\pm}$ 介子寻迹效率分别总结在表 1 和表 2 的第四列.利用同样的方法可得到对应的数据中 $\pi^{\pm}$ 和 $K^{\pm}$ 介子寻迹效率,利用式(3)可确定数据和蒙特卡罗样本中寻迹效率的差异.如果数据与蒙特卡罗模拟存在差异,则可将这一差异进行修正,则系统误差为数据与蒙特卡罗样本寻迹效率的误差的平方和开方.经过这一处理之后,对 1000 万的 $\psi(3770)$ 数据,其系统误差可降低到 0.5%

左右.

5 结 论

利用确定 $\psi(3770)$ 数据样本寻迹效率的方法,模拟了 BESⅢ探测器的 MDC 重建软件系统对在 3.773 GeV 处采集的数据样本的寻迹效率.结果表明,1000 万 $\psi(3770)$ 数据,在经过寻迹效率的修正之后,寻迹效率的系统误差可以降低到 0.6% 左右.在 BESⅢ取得更大样本的 $\psi(3770)$ 数据后,寻迹效率的系统误差将可以得到进一步降低.

参考文献:

[1] 王贻芳.北京谱仪(BESⅢ)的设计与研制[M].上海:上海科学技术出版社,2011.

[2] 郑波,李蕾,荣刚,等.利用 $e^+e^- \rightarrow \psi(3770)$ 蒙特卡罗样本进行寻迹效率测量和粒子鉴别的研究[C]//第 14 届全国计算机、网络在现代科学技术领域的应用学术会议论文集.内蒙古:核电子学与核探测技术分会,2009:30-36.

[3] Nakamura K. (粒子数据组),Review of particle physics[J]. J. Phys.,2010,G 37:070521.

[4] 李卫东,刘怀民. BES 实验离线软件系统[C]//高能物理研究所,孟买:CHEP06 进展,2006.

[5] Barrand G. GAUDI—A software architecture and framework for building HEP data processing applications[J]. Comput. Phys. Commun. 2001,140:45-55.

[6] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. (Geant4 合作组). Geant4—a simulation toolkit[J]. Nucl. Instrum. Methods,2003,A506:250-303.