

doi: 103969/j.issn.0490-6756.2017.03.018

# 单标记方法在 $\psi(3686)$ 重子对衰变中的应用研究

陈平亮<sup>1</sup>, 郑波<sup>1</sup>, 王至勇<sup>2</sup>

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

**摘要:** 基于 BOSS 软件框架, 利用  $5.06 \times 10^8$   $\psi(3686)$  蒙特卡罗样本, 对单标记方法与遍举方法在  $\psi(3686)$  重子对衰变测量中的应用开展了研究. 结果表明在未考虑次级衰变分支比的情况下单标记方法探测效率达到了 34.35%, 而遍举方法探测效率仅有 3.79%. 通过对比两种方法得到的探测效率、信噪比、信号事例数等, 我们发现单标记方法在粲偶素衰变到重子对末态的测量中具有更大的优势.

**关键词:** BESIII 探测器; 单标记方法;  $\psi(3686)$  衰变

**中图分类号:** O572 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)02-0330-05

## Application of single tag method in $\psi(3686)$ baryonic pair decay

CHEN Ping-Liang<sup>1</sup>, ZHENG Bo<sup>1</sup>, WANG Zhi-Yong<sup>2</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on BOSS framework, we studied the single tag method and exclusive method in  $\psi(3686)$  baryonic pair decay. The results show that the detection efficiency, without include the intermediate resonance decay branching fractions, can be reached up to 34.35% with single tag method, while to 3.79% with exclusive method. According to our study, the single tag method shows advantage in detection efficiency, signal to noise ratio and signal yields, which is recommended to be employed in study of  $\psi(3686)$  baryonic pair decay.

**Keywords:** BESIII detector; Single tag method;  $\psi(3686)$  decay

## 1 引言

自从 1974 年发现了  $c\bar{c}$  的束缚态  $J/\psi$  粒子以来<sup>[1-3]</sup>, 人们又相继发现了  $\psi(3686)$ ,  $\psi(3773)$  等粒子, 这些粒子组成了粲偶素家族<sup>[4]</sup>. 经过四十多年的研究, 人们对粲偶素主要衰变道的测量日趋精确, 这些丰富精确的实验数据为我们了解其衰变机制等信息提供了宝贵的资料. 对于在  $e^+e^-$  湮灭中产生的粒子  $\psi(3686)$ , 其衰变到重子-反重子对过程的末态粒子即重子服从一定的角分布. 实验上,

研究角分布系数可为我们提供衰变粒子的衰变机制、强相互作用和极化等丰富的信息. 同时通过  $\psi(3686)$  到重子-反重子对的衰变是一个很好的探寻夸克质量效应在螺旋度破坏中所起的作用的场所.

然而, 在  $\psi(3686)$  衰变到重子对的过程中, 绝大部分重子会有较多的次级衰变, 末态粒子数也较多, 因而末态粒子动量较低. 如果将所有末态粒子全部重建出来, 探测效率非常低, 能够观测到的信号事例数偏少, 不利于开展精确的测量. 如果仅将

收稿日期: 2016-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(11575077, 11475090); 南华大学 2016 年研究生创新基金(2016XCX20)

作者简介: 陈平亮(1989-), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为核物理.

通讯作者: 郑波. E-mail: zhengbo\_usc@163.com

重子对末态部分重建, 则可以大幅度提高数据统计量, 以减少统计误差, 得到更加精确的实验结果. 本工作将深入探讨这种方法的可行性.

## 2 方法介绍

遍举方法: 在  $\psi(3686)$  重子对衰变末态中, 末态为两个质量相同的重子与反重子. 除基态重子外, 其他的重子均无法直接测量, 需要通过它们的衰变来进行重建. 在开展这种衰变的研究时, 通常将重子与反重子全部重建出来, 则其衰变分支比可通过下式进行计算:

$$Br(\psi(3686) \rightarrow B\bar{B}) = \frac{N^{\text{obs}}}{N_{\psi(3686)}^{\text{tot}} \cdot Br(B \rightarrow f)^2 \cdot \epsilon},$$

其中,  $Br(B \rightarrow f)$  代表中间态重子  $B$  衰变到末态  $f$  (全部为稳定的粒子) 过程的分支比;  $\epsilon$  是该过程的探测效率;  $N_{\psi(3686)}^{\text{tot}}$  是单举  $\psi(3686)$  样本的总事例数;  $N^{\text{obs}}$  是  $\psi(3686) \rightarrow B\bar{B}$  衰变过程所观测到的总事例数. 由于本方法将重子和反重子完全重建出来, 事例信号非常干净, 但探测效率低.

单标记方法: 根据  $\psi(3686)$  重子对衰变过程末态的特殊性, 即两个重子动量大小相等, 方向相反, 可以只重建其中一个重子来标记该反应过程, 这种方法叫做单标记方法. 该方法最早应用在利用阈附近产生的  $D\bar{D}$  来研究  $D$  介子的衰变特性<sup>[5-6]</sup>. 本工作将尝试将该方法运用于  $\psi(3686)$  重子对衰变的研究. 在考虑电荷共轭的情况下, 利用单标记方法计算分支比的公式如下:

$$Br(\psi(3686) \rightarrow B\bar{B}) = \frac{N^{\text{obs}}}{2 \cdot N_{\psi(3686)}^{\text{tot}} \cdot Br(B \rightarrow f) \cdot \epsilon},$$

其中  $Br(B \rightarrow f)$  代表中间态重子  $B$  衰变到末态  $f$  (全部为稳定的粒子) 过程的分支比,  $\epsilon$  是该过程的探测效率,  $N_{\psi(3686)}^{\text{tot}}$  是单举  $\psi(3686)$  样本的总事例数,  $N^{\text{obs}}$  是  $\psi(3686) \rightarrow B\bar{B}$  衰变过程所观察到的总事例数.

## 3 探测器及环境介绍

北京谱仪 III(简称 BESIII) 是工作在北京正负电子对撞机 II 上的大型通用型粒子探测器, 主要开展  $\tau$ -粲能区的实验<sup>[7]</sup>. 它由主漂移室(MDC)、飞行时间计数器(TOF)、电磁量能器(EMC)和  $\mu$ 子计数器(MUC)等及对应的电子学系统组成, 还包括提供 1 T 工作磁场的低温超导磁铁. 更多关于 BESIII 探测器各部分结构、功能与参数的说明可

参考文献[7].

本工作是在 BESIII 离线软件系统(BOSS664.p03)<sup>[8]</sup>下进行的. 本研究利用了事例总数约为  $5.06 \times 10^8$  的单举  $\psi(3686)$  蒙特卡罗样本. 在产生该样本时,  $\psi(3686)$  已知过程的衰变均按照《粒子物理评论》(PDG)上的分支比设定, 其对应的分布由实验数据得到的分布确定. 剩余的未知衰变由 LUNDCHARM 产生子<sup>[9]</sup>随机抽样产生. 本工作还采用相空间产生子产生了 130 万个  $\psi(3686) \rightarrow \Omega^- \bar{\Omega}^+$  遍举事例和 140 万个  $\psi(3686) \rightarrow \Omega^- \bar{\Omega}^+$  单举事例.

## 4 事例初选

$\psi(3686)$  重子对衰变过程比较多, 本工作利用  $\psi(3686) \rightarrow \Omega^- \bar{\Omega}^+$  这个过程来开展研究. 从 PDG 可知,  $\Omega^-$  主要衰变到  $\Lambda K^-$ , 其次级粒子  $\Lambda$  主要衰变到  $p \pi^-$ . 因而利用遍举方法研究  $\psi(3686) \rightarrow \Omega^- \bar{\Omega}^+$  的末态粒子为  $K^+ K^- p \bar{p} \pi^+ \pi^-$ , 单标记方法研究该过程的末态粒子为  $K^- p \pi^-$  或  $K^+ \bar{p} \pi^+$ .

### 4.1 径迹初选

本工作所研究的过程仅包含带电粒子. 带电径迹由 BESIII 探测器的 MDC 中的信息来重建. 由于  $\Omega^-$  和  $\Lambda$  都是长寿命粒子, 它们飞行一段距离后再进行衰变, 因而在筛选带电径迹时, 仅要求带电径迹满足其在  $z$  方向上和  $xy$  平面上与对撞顶点最近的距离小于 100 厘米、极角  $|\cos\theta| < 0.93$ .

### 4.2 粒子鉴别

带电末态粒子利用 MDC 测得的电离能损  $dE/dx$  和 TOF 测得的飞行时间进行鉴别. 对于质子, 要求其被鉴别为质子的置信水平大于鉴别为  $K$  和  $\pi$ , 即  $CL(p) > CL(K)$  且  $CL(p) > CL(\pi)$ , 对于  $K$  (或  $\pi$ ) 要求其被鉴别为  $K$  的置信水平大于质子和  $\pi$  (或  $K$ ), 即  $CL(K) > CL(p)$  且  $CL(K) > CL(\pi)$  (或  $CL(\pi) > CL(p)$  且  $CL(\pi) > CL(K)$ ).

### 4.3 $\Lambda(\bar{\Lambda})$ 的重建

为提高顶点的径迹参数动量分辨, 对  $\Lambda(\bar{\Lambda})$  做次级顶点拟合, 并要求单标记方法和遍举方法重建  $\Lambda(\bar{\Lambda})$  的末态粒子不变质量满足  $1.108 \text{ GeV}/c^2 < M_{p\pi} < 1.122 \text{ GeV}/c^2$ .

### 4.4 $\Omega^-(\bar{\Omega}^+)$ 的重建

将由次级顶点拟合重建得到的  $\Lambda(\bar{\Lambda})$  与  $K^-(K^+)$  重建  $\Omega^-(\bar{\Omega}^+)$ . 为筛选候选  $\Omega^-(\bar{\Omega}^+)$  重子, 要求它们的不变质量位于  $\Omega^-(\bar{\Omega}^+)$  信号区, 即  $1.667 \text{ GeV}/c^2 < M_{K\Lambda} < 1.677 \text{ GeV}/c^2$ .

## 5 遍举方法分析

### 5.1 事例筛选及探测效率

由于末态共有六条带电径迹,且它们的动量较低,遍举方法需要将它们全部重建出来,为提高事例选择效率,仅要求每一对  $K, p, \pi$  候选径迹中的一个被鉴别为  $K, p, \pi$ . 挑选正确的  $\Lambda, \bar{\Lambda}$ , 在重建过程中对  $\Lambda, \bar{\Lambda}$  做次级顶点拟合,并要求组成其末态粒子的不变质量满足  $|M_{p\pi} - M_{\Lambda}| < 0.05 \text{ GeV}/c^2$ , 通过  $\Delta_1 = (M_{p\pi^-} - M_{\Lambda})^2 + (M_{p\pi^+} - M_{\Lambda})^2$ , 取  $\Delta_1$  最小值优化  $\Lambda, \bar{\Lambda}$  末态粒子组合,同时通过  $\Delta_2 = (M_{Kp\pi^-} - M_{\Omega})^2 + (M_{Kp\pi^+} - M_{\Omega})^2$ , 取  $\Delta_2$  最小值优化  $\Omega^+, \Omega^-$  的末态粒子组合. 我们利用  $E_{\text{meas}}/E_{\text{cm}}$  的分布从候选事例中提取信号,其中  $E_{\text{meas}}$  是指所有径迹探测的能量之和,  $E_{\text{cm}}$  是指质心系能量,对于信号事例该比值为期望值为 1 的高斯分布. 通过对遍举信号蒙特卡罗样本  $\psi(3686) \rightarrow \Omega^- \bar{\Omega}^+$ , 其中  $\Omega^- \rightarrow \Lambda K^-, \bar{\Omega}^+ \rightarrow \bar{\Lambda} K^+, \Lambda \rightarrow p\pi^-, \bar{\Lambda} \rightarrow \bar{p}\pi^+$  的研究,得到遍举方法的探测效率为  $(3.79 \pm 0.03)\%$ .

### 5.2 背景分析

由于  $\Lambda, \bar{\Lambda}$  的寿命比较长,在探测器里飞行一段距离后才会衰变,其中  $p\pi$  粒子并非来自束流对撞中心,事例选择中含有  $\Lambda(\bar{\Lambda})$  衰变顶点寻找的判选,因此,主要本底来自包含有  $\Lambda(\bar{\Lambda})$  中间共振态的衰变过程,成分比较复杂,通过单举 MC 样本研究本底发现,本底在信号区对  $E_{\text{meas}}/E_{\text{cm}}$  谱的贡献是一个比较平滑的分布(见图 1). 研究  $\Omega^-$  和  $\bar{\Omega}^+$  信号的边带区事例显示  $\Omega^-$  和  $\bar{\Omega}^+$  信号的边带区事例在信号区间分布平滑(见图 2),其中  $\Omega^-$  信号边带区的质量范围为  $[1.653, 1.663] \text{ GeV}/c^2$  和  $[1.681, 1.691] \text{ GeV}/c^2$ ,  $\bar{\Omega}^+$  信号边带区的质量范围为  $[1.653, 1.663] \text{ GeV}/c^2$  和  $[1.681, 1.691] \text{ GeV}/c^2$ .

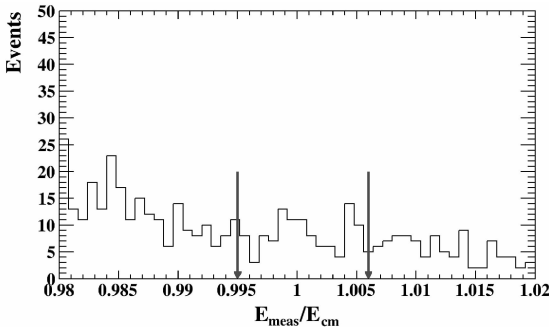


图 1 单举  $\psi(3686)$  MC 本底分布,箭头之间为信号区间  
Fig. 1 Background from inclusive  $\psi(3686)$  MC sample, signal region is shown between two arrows.

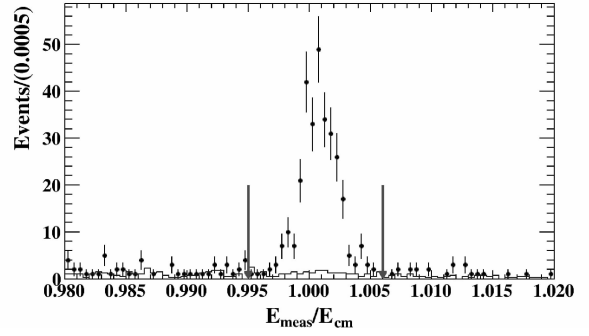


图 2  $E_{\text{meas}}/E_{\text{cm}}$  分布图. 带误差棒的点表示单举  $\psi(3686)$  MC, 实线表示  $\Omega$  边带区, 箭头之间为信号区.

Fig. 2 Distribution of  $E_{\text{meas}}/E_{\text{cm}}$ ; Dots with error bars represent signal and solid line represents  $\Omega$  sideband from inclusive  $\psi(3686)$  MC sample, signal region is shown between two arrows.

### 3.3 结果

单举 MC 样本的  $E_{\text{meas}}/E_{\text{cm}}$  谱如图 3 所示,为从候选事例  $E_{\text{meas}}/E_{\text{cm}}$  分布中提取信号,用高斯分布描述信号,用多项式函数描述本底,对  $E_{\text{meas}}/E_{\text{cm}}$  进行拟合,其结果见图 3,通过拟合得到信号事例数为  $280 \pm 18$ .

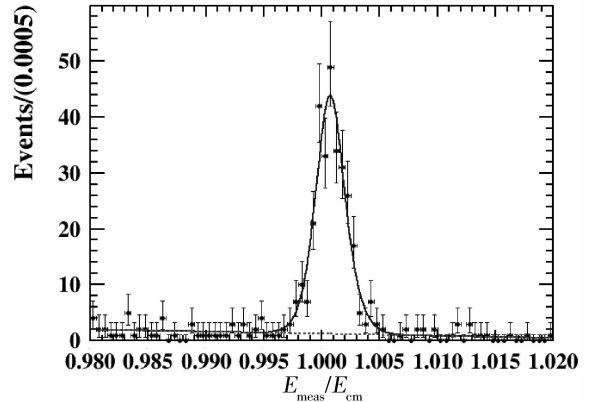


图 3 单举  $\psi(3686)$  MC 信号拟合结果.

Fig. 3 Fit results of  $E_{\text{meas}}/E_{\text{cm}}$  from inclusive MC  $\psi(3686)$  sample.

## 6 单标记方法分析

### 6.1 事例选择及探测效率

在单标记分析中,为增加统计量,重建  $\Omega$  时包括了电荷共轭. 为挑选正确的  $\Lambda(\bar{\Lambda})$ , 在重建过程中对  $\Lambda(\bar{\Lambda})$  做次级顶点拟合,要求组成其末态粒子的不变质量满足  $1.108 \text{ GeV}/c^2 < M_{p\pi} < 1.122 \text{ GeV}/c^2$ . 为了避免重复计数,定义  $\Delta E = E_{\text{beam}} - E_{\Omega}$ , 如果有多种组合满足以上事例选择条件,选择  $|\Delta E|$  值最小<sup>[10-12]</sup> 的组合,其中  $E_{\text{beam}}$  是束流能量,  $E_{\Omega}$  是  $\Omega$  的能量. 为提取信号,定义束流约束反

冲质量  $M_{\text{beam}}^{\text{rec}} = \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - |\vec{P}_{\Omega}|^2}$ , 其中  $E_{\text{beam}}$  是束流能量,  $\vec{P}_{\Omega}$  是  $\Omega$  的动量. 对于所研究的衰变末态, 该变量的期望值为  $\Omega$  的质量. 通过对遍举信号蒙特卡罗样本  $\psi(3686) \rightarrow \Omega^- \bar{\Omega}^+$ , 其中  $\Omega^- \rightarrow \Delta K^-$ ,  $\bar{\Omega}^+ \rightarrow \bar{\Delta} K^+$ ,  $\Delta \rightarrow p\pi^-$ ,  $\bar{\Delta} \rightarrow \bar{p}\pi^+$  的研究, 得到单标记方法的探测效率为  $(34.35 \pm 0.04)\%$ .

## 6.2 背景分析

与前述遍举方法类似, 由于事例选择中含有  $\Lambda$  ( $\bar{\Lambda}$ ) 衰变顶点寻找的判选, 主要本底来自包含有  $\Lambda$  ( $\bar{\Lambda}$ ) 中间共振态的衰变过程, 成分比较复杂. 通过单举 MC 样本研究本底发现, 本底在信号区间对  $\Omega$  束流约束反冲质量 ( $M_{\text{beam}}^{\text{rec}}$ ) 谱的贡献是一个平滑的分布 (见图 4). 研究  $\Omega$  信号的边带区事例显示  $\Omega$  信号的边带区事例在信号区间分布平滑 (见图 4), 其中  $\Omega$  信号边带区的质量范围为  $[1.648, 1.658]$   $\text{GeV}/c^2$  和  $[1.686, 1.696]$   $\text{GeV}/c^2$ .

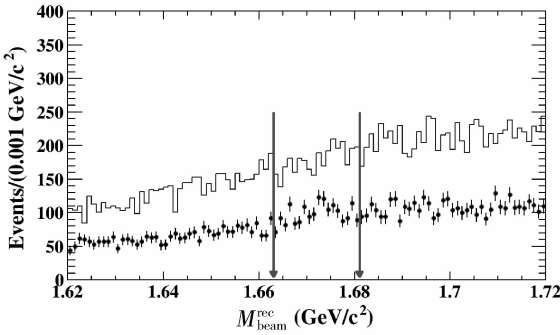


图 4 带误差棒的点表示单举  $\psi(3686)$  MC 本底分布, 实线表示  $\Omega$  边带区域, 箭头之间为信号区间

Fig. 4 Dots with error bars represent background and solid line represents  $\Omega$  sideband from inclusive  $\psi(3686)$  MC sample, signal region is shown between two arrows.

## 6.3 结果

单举 MC 样本的  $M_{\text{beam}}^{\text{rec}}$  不变质量谱如图 5 所示, 为从候选事例  $M_{\text{beam}}^{\text{rec}}$  分布中提取信号, 用高斯分布描述信号, 用多项式函数描述本底, 对  $M_{\text{beam}}^{\text{rec}}$  进行拟合, 其结果见图 5, 通过拟合得到信号事例数为  $5847 \pm 85$ .

## 7 结论

本工作利用  $\psi(3686) \rightarrow \Omega^- \bar{\Omega}^+$  过程研究了  $\psi(3686)$  重子对衰变时单标记方法的可行性, 并将单标记方法得到的结果与遍举方法得到的结果进行了比较, 具体可见表 1. 结果表明, 单标记方法只重建一个重子 ( $\Omega$ ), 大幅度提高了事例探测效率,

增加了信号事例的统计量. 本研究结果表明单标记方法能够应用于  $\psi(3686)$  重子对衰变的测量, 并有效提升实验测量精度.

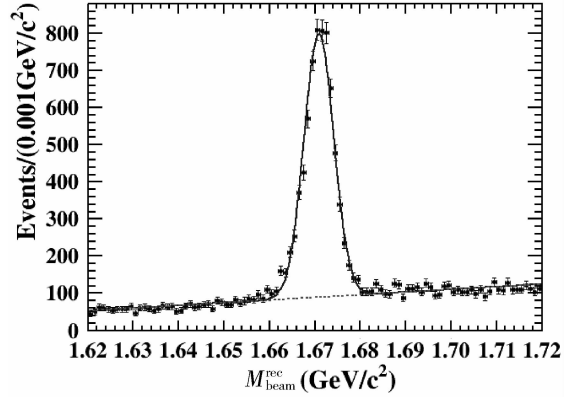


图 5 单举  $\psi(3686)$  MC 信号拟合结果

Fig. 5 Fit results of  $M_{\text{beam}}^{\text{rec}}$  from inclusive MC  $\psi(3686)$  sample.

表 1  $\psi(3686) \rightarrow \Omega^- \bar{\Omega}^+$  两种重建方法的结果比较

Tab. 1 The comparison between two reconstruct methods for  $\psi(3686) \rightarrow \Omega^- \bar{\Omega}^+$

项目	单标记方法	遍举方法
$N_{\psi(3686)}$	$5.06 \times 10^8$	
效率 $\epsilon$ (%)	$34.35 \pm 0.04$	$3.79 \pm 0.03$
事例数 $N^{\text{obs}}$	$5847 \pm 85$	$280 \pm 18$
背景事例数 $N^{\text{bkg}}$	可忽略	可忽略
分支比 $Br$ ( $10^{-5}$ )	$7.77 \pm 0.11$	$7.78 \pm 0.50$
输入值 $Br$ ( $10^{-5}$ )	7.9	7.9

## 参考文献:

- [1] Aubert J J, Becker U, Biggs P J, *et al.* Experimental Observation of a heavy particle [J]. *Phys Rev Lett*, 1974, 33(23): 1404.
- [2] Augustin J E, Boyarski A M, Breidenbach M, *et al.* Discovery of a narrow resonance in  $e^+e^-$  annihilation [J]. *Phys Rev Lett*, 1974, 33(23): 1406.
- [3] Abrams G S, Briggs D, Chinowsky W, *et al.* Discovery of a second narrow resonance in  $e^+e^-$  annihilation [J]. *Phys Rev Lett*, 1974, 33(24): 1453.
- [4] Bolz J, Kroll P, Schuler G A. Colour-octet contribution to exclusive charmonium decays [J]. *Phys Lett B*, 1997, 392: 198.
- [5] Baltrusaitis R M, Becker J J, Blaylock G T, *et al.* (Mark III Collaboration). Direct measurements of charmed-D-meson hadronic branching fractions [J]. *Phys Rev Lett*, 1986, 56(20): 2140.
- [6] Adler J, Becker J J, Blaylock, *et al.* (Mark III Col-

- laboration). Reanalysis of charmed-D-meson branching fractions [J]. *Phys Rev Lett*, 1988, 60 (2): 89.
- [7] 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.
- [8] 李卫东, 刘怀民. BES 实验离线软件系统, CHEP06 进展 [C]. 孟买: 高能物理研究所, 2006.
- [9] Chen J C, Huang G S, Qi X R, *et al.* Event generator for J/psi and psi(2S) decay [J]. *Phys Rev D*, 2000, 62: 034003.
- [10] He Q, Muramatsu H, Park C S, *et al.* (CLEO Collaboration). Measurement of Absolute Hadronic Branching Fractions of D Mesons and  $e^+ e^- \rightarrow DD$  Cross Sections at  $E_{c.m.} = 3773$  MeV [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 121801 [Erratum-ibid. 2006, 96: 199903].
- [11] Dobbs S, Metreveli Z, Seth K K, *et al.* (CLEO Collaboration). Measurement of Absolute Hadronic Branching Fractions of D Mesons and  $e^+ e^- \rightarrow DD$  [J]. *Phys Rev D*, 2007, 76: 112001.
- [12] Bonvicini G, Ginabro D, Smith M J, *et al.* (CLEO Collaboration). Erratum: Updated measurements of absolute  $D^+$  and  $D^0$  hadronic branching fractions and  $\sigma(e^+ e^- \rightarrow DD)$  at  $E_{cm} = 3774$  MeV [J]. *Phys Rev D*, 2014, 89: 072002 [Erratum-ibid. 2015, 91: 019903].