

BESIII 飞行时间计数器 1:1 模型的束流测试

孙志嘉^{1;1)} 衡月昆¹ 赵小健¹ 吴金杰¹ 石峰¹ 吴冲¹ 薛生田¹
赵玉达² 赵力³ 蒋林立³ 王凤梅⁴ 郑志鹏¹

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (南京大学 南京 210039)

3 (中国科技大学 合肥 230036)

4 (郑州大学 郑州 450052)

摘要 在北京正负电子对撞机直线加速器实验束上进行了 BESIII 飞行时间计数器 1:1 模型的束流测试. 利用动量为 $800\text{MeV}/c$ 的电子束, 对应用不同包装材料(铝膜和 Tyvek)的不同闪烁体(BC408 和 EJ200)的时间分辨率和光传输衰减长度分别进行测量, 以铝膜包装 EJ200 为最佳选择, 其本征时间分辨率(标准偏差)好于 90ps , 达到 BESIII 的设计指标.

关键词 粒子鉴别 飞行时间探测器 塑料闪烁体 时间分辨率 衰减长度

1 引言

北京正负电子对撞机(BEPC)及其探测器——北京谱仪(BES), 自 1989 年建成以来, 已成功地运行了十多年, 得到了许多重要的物理成果. 北京正负电子对撞机升级工程 BEPC II / BESIII 正在进行, BESIII 探测器性能将比 BES II 有较大的提高.

飞行时间探测器是其中的一个用来测量带电粒子飞行时间的子探测器, 其主要功能是通过所测量的飞行时间信息, 结合主漂移室测得粒子的动量和径迹, 从而辨别粒子的种类; 同时它也参加第一级触发判选; 还可以利用飞行时间计数器击中单元之间的时间关系来排除宇宙线本底.

BESIII 飞行时间探测器计划采用双层方案: 双层塑料闪烁体, 或一层塑料闪烁体和一层 CCT, 其设计指标为桶部单层 TOF 本征时间分辨率对于动量为 1GeV 的 μ 子为 $80\text{--}90\text{ps}$ ^[7]. 塑料闪烁体飞行时间探测器具有结构简单, 探测效率高, 响应时间快, 造价便宜等优点. 在飞行时间计数器的建造中, 1:1 模型的束流实验测试是必不可少的步骤. 本文介绍在 BEPC 直线加速器实验束平台上对 BC408, EJ200 等不同型号的闪烁体性能进行测量的实验装置及相应的实验结

果.

2 实验装置和测量

2.1 实验束平台

BEPC 实验束平台提供的入射粒子为电子、质子和 π 介子, 它们是由直线加速器给出的 1.2GeV 的电子(频率为 12.5Hz)打靶产生的, 入射粒子的能量、方向、发散度及入射粒子种类由一系列磁铁来控制的. 实验中选取动量为 $800\text{MeV}/c$ 的电子作为入射粒子.

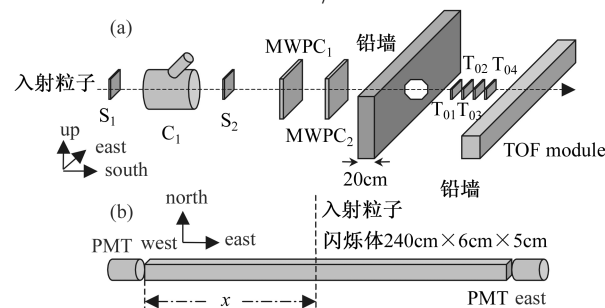


图 1 (a) 实验大厅中的探测器分布图; (b) 飞行时间探测器 1:1 模型的结构图

实验大厅中的辅助探测器及其功能为(如图1(a)):
a) 切伦科夫探测器(C_1)区分电子、质子和 π 介子^[7]; b) 闪烁体探测器(S_1, S_2)给出快速触发信号; c) 多

丝正比室(MWPC₁, MWPC₂)给出位置信息,其水平方向上精度为0.5mm; d) 高精度闪烁体探测器(T₀₁, T₀₂, T₀₃和T₀₄)组合给出起始参考时间。

在测试模型前边有一道铅墙,它能有效屏蔽本底。

2.2 1:1模型和电子学读出

所测试模型的结构和尺寸与BESIII桶部飞行时间探测器每个单元相同(共有88个单元),故称之为1:1模型(见图1(b))。实验采用双端读出,光电倍增管选用的是HAMAMATSU生产的精细网格型高增益抗磁光电倍增管R5924。光电倍增管和闪烁体采用空气耦合(便于比较不同包装和闪烁体材料之间的差异),入射位置的起始点是以模型的西端算起。

数据获取(DAQ)和触发系统如图2所示。由触发探测器(S₁, S₂)、粒子鉴别(C₁)符合后给出数据获取系统的触发信号,再通过软件选择具有位置信息的事例作为有效事例。电子在闪烁体中沉积能量而产生荧光,荧光通过在闪烁体中的直接传播、闪烁体表面的全反射和包装反射层反射等过程传播到待测模型两端

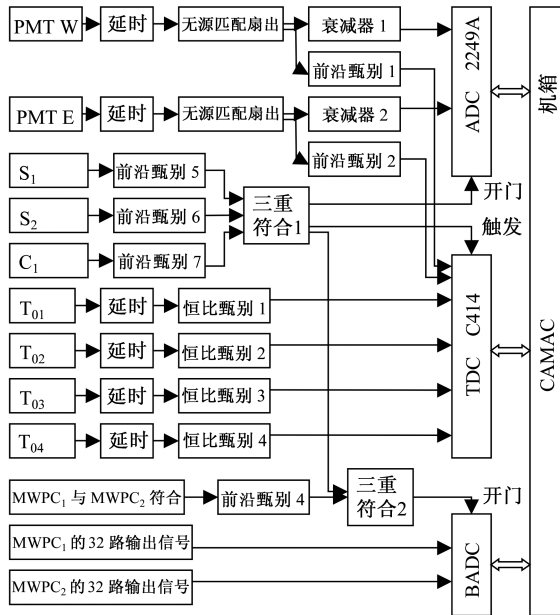


图 2 触发和读出电子学电路框图

的光电倍增管。光电倍增管将收集到的光子转化为光电子,并且进行放大,形成电流脉冲信号。信号扇出两路,一路经过前沿甄别用于测量时间,另一路经过适当衰减,用于测量幅度(因为在无磁场下该光电倍增管的增益很大,衰减后适于ADC测量)。通过前沿甄别测量的时间会随着幅度的变化而产生时间晃动,利用得到的幅度信息可以修正这一时间晃动。由于用来测试模型性能的电子束的束斑比较大,其直径约6cm,而入射位置的分散会带来时间晃动,通过由MWPC重

建得出的入射位置信息来进行修正。

通过此系统可以得到如下重要实验数据: a) TOF模型两端的光电倍增管所接收的信号的时间(T_W , T_E)和幅度(A_W , A_E); b) 参考时间 t_{T01} , t_{T02} , t_{T03} 和 t_{T04} ,由它们可以给出平均时间参考值; c) 由多丝正比室得到的位置信息可以推算出入射电子击中到闪烁体的位置。

3 测量结果与分析

3.1 TOF时间分辨率分析

BESIII上的飞行时间计数器的时间分辨率受多种因素影响,其总的时间分辨率可表示为^[7]

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{TOF}}^2 + \sigma_{\text{bunch-time}}^2 + \sigma_{\text{bunch-length}}^2 + \sigma_{\text{Z-position}}^2 + \sigma_{\text{electronics}}^2 + \sigma_{\text{expect}}^2 + \sigma_{\text{time-walk}}^2,$$

其中 σ_{TOF} 为TOF的本征时间分辨率。对于实验测量的1:1TOF模型,上式中其他各项贡献之和约为60ps,飞行时间探测器的分辨率 σ 主要是由 σ_{TOF} 决定的。

束流实验要测量的是TOF本征时间分辨率 σ_{TOF} 。根据经验公式^[7]:

$$\sigma_{\text{TOF}} \approx \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{2.35}\right)^2 \left\{ \tau_{\text{scin}}^2 + \left[\frac{n(n-1)L}{2c} \right]^2 + \tau_{\text{PMT}}^2 \right\}}}{\sqrt{N_{\text{pe}}}}$$

其中 τ_{scin} 是闪烁体的衰减时间, L 是入射粒子击中闪烁体的位置到光电倍增管的距离, n 是闪烁体的折射率, τ_{PMT} 是光电倍增管中光电子的渡越时间涨落, N_{pe} 是光电子数。 N_{pe} 与闪烁体的光产额、厚度、衰减长度、光传输距离和光电倍增管的量子效率都有关系:

$$N_{\text{pe}} \propto \int N_0(\lambda) L_t e^{-L/L_a} \epsilon(\lambda) d\lambda.$$

其中 λ 是光波长, $N_0(\lambda)$ 是单位厚度闪烁体的光产额, L_t 是粒子穿过闪烁体的厚度, L_a 是闪烁体的衰减长度, L 是入射粒子击中闪烁体的位置到光电倍增管的距离, $\epsilon(\lambda)$ 是光电倍增管的量子效率函数。

根据上式,BESIII飞行时间探测器单层TOF的本征时间分辨率的预期值90ps是可以达到的,但需通过作束流实验来验证其可行性。

3.2 实验数据处理和分析

首先,对于取得的事例样本要进行筛选,这里采用了以下选择条件: a) 去除电子束击中塑料闪烁体的位置距离中心位置大于3cm的事例; b) 由于几何尺寸和厚度的原因,高精度闪烁体探测器的探测效率约为70%,通过对时间谱的限制,去除没有有效参考时间

的事例; c) 对幅度 (A_W , A_E) 做限制, 选择单粒子入射事例.

为获得 TOF 模型的本征时间分辨率, 需要对测量到的实验数据进行如下修正:

a) 位置-时间修正: 入射电子束的光斑比较分散, 入射位置在水平方向上的不确定会带来测量时间的晃动. 实验中通过入射位置和闪烁体中光的平均传播速度来修正这一晃动. 如图 3 所示, 模型两端的光电倍增管测量到的时间和入射位置基本成线性关系, 可以

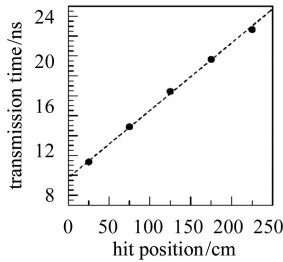


图 3 传输时间与入射位置的关系

增管测量到的时间和入射位置基本成线性关系, 可以

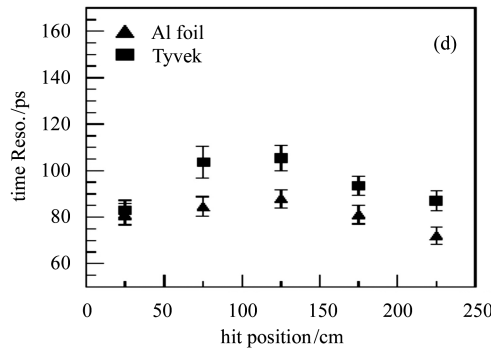
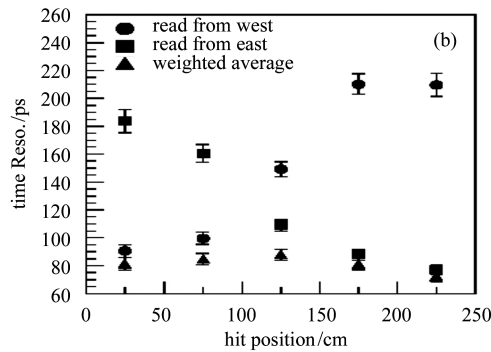
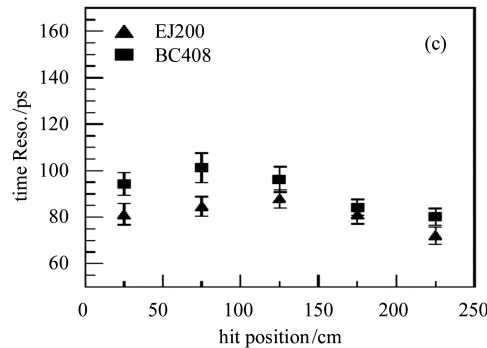
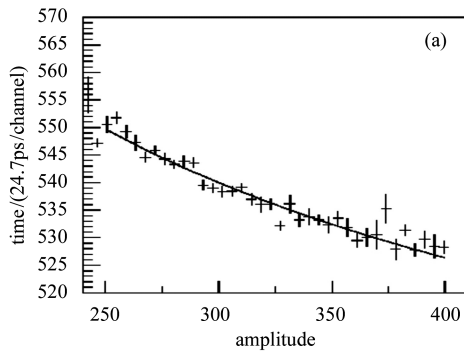


图 4 (a) 时间幅度关系; (b) 铝膜包装的闪烁体 EJ200, 双端读出法得到的时间分辨; (c) 两种塑料闪烁体 EJ200 和 BC408 的时间分辨率比较; (d) 闪烁体 EJ200 用两种包装材料铝膜和 Tyvek 的时间分辨率比较

由两端读出的时间通过不等精度测量方法加权计算^[7], 可以得到双端读出的时间分辨率, 如图 4(b) 所示. 时间分辨率随入射位置靠近光电倍增管而变好, 两端加权平均后得到的时间分辨率呈现中间差而两端好的规律. 镀铝薄膜包装的 EJ200 型闪烁体得到的时间分辨率好于 (87.9 ± 3.9) ps.

图 4(c) 和 4(d) 显示了不同的闪烁体 (BC408,

用平均速度这一物理量来描述, 由实验数据拟合得到光在闪烁体中的平均传播速度为 65 ps/cm , 这一结果和其他实验得到的结果符合^[7]. 再利用多丝正比室得到的入射位置就可以修正由于入射的不确定带来的时间晃动, 修正采用 $\Delta T_{\text{position}} = A + Bx$, x 为入射位置.

b) 幅度-时间修正: 通过测量的幅度, 利用时间和幅度的近似关系可以拟合得到修正时间 Δt_A , 如图 4(a). 修正^[7]采用 $\Delta T_Q = C + D/\sqrt{Q}$.

c) 参考时间: 由 4 个高性能时间探测器给出起始参考时间 T_0 , 其时间晃动为 $54.0 \pm 1.4 \text{ ps}$.

这样就可以得到所需要的飞行时间:

$$T_1 = T_W - T_0 - \Delta T_{\text{position}W} - \Delta T_{QW},$$

$$T_2 = T_E - T_0 - \Delta T_{\text{position}E} - \Delta T_{QE}.$$

对 T_1 和 T_2 进行高斯拟合就可以得到时间晃动 σ_1 和 σ_2 , 由误差传递公式可以扣除参考时间带来的晃动, 得到时间分辨率 σ_W 和 σ_E , 也就是两端的本征时间分辨率.

EJ200) 和不同的包装材料对时间分辨率的影响, 由图可以看出: a) 对于包装材料: 相比其他包装材料, 镀铝薄膜有较好的时间分辨率, 能够达到设计指标, 而其他包装材料则超过设计指标; b) 对于闪烁体: EJ200 时间分辨率好于 BC408. 衰减长度是衡量闪烁体性能的重要指标, 实验中对其进行了测量. 光在闪烁体中传播近似满足指数衰减规律: $N(x) = N(0)e^{-\frac{x}{\lambda}}$. 其中

$N(0)$ 为 $x=0$ 的光子数; $N(x)$ 为在介质中传播 x 长度后得到的光子数; λ 为光子数下降到初始光子数 e^{-1} 倍时的传播距离, 即衰减长度, 它直接影响光的传播和收集, 从而影响时间的测量. 由于相同能量的电子束在穿越相同厚度的闪烁体时, 其沉积能量的最可几值相同, 所产生的光子数的最可几值也是相同的, 利用这一规律, 可以测量闪烁体的衰减长度.

图 5 显示了上述的衰减规律, 在图中用自然指数衰减拟合就可以得到衰减长度(这里只考虑了统计误差). 表 1 列出了两种材料和两种包装的衰减长度的测量结果, 可以看出 Tyvek 包装有利于光的传播和收集, EJ200 型和 BC408 型相差不多. 由于 Tyvek 是漫反射材料, 而镀铝薄膜是镜面反射材料, 所以 Tyvek 包装有利于光的传播和收集, 但同时时间分辨率变差.

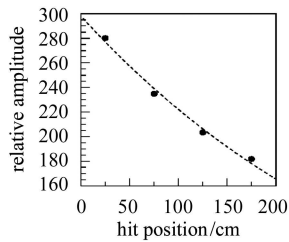


图 5 单粒子入射峰位和入射位置的关系

综合 BESIII 飞行时间探测器的设计考虑, 选择镀

铝薄膜更有利于达到设计要求.

表 1 不同包装材料和闪烁体的衰减长度比较

	镀铝薄膜	Tyvek 包装
BC408	(431.7±7.9)cm	(492.0±9.9)cm
EJ200	(443.4±7.3)cm	(515.5±9.8)cm

4 结论

在 TOF 1:1 模型的束流实验中, 时间分辨率随入射位置远离光电倍增管而变差, 加权平均后得到的时间分辨率呈现中间最差而两端比较好的规律.

从铝膜与 Tyvek 两种包装材料比较来看, 铝膜具有较好的时间分辨率和较好的衰减长度, 这也印证了世界上大部分飞行时间计数器都采用铝膜包装; Tyvek 有利于光的收集, 所以很多偏重于幅度测量的探测器常选用它作为包装材料. 两种塑料闪烁体相比, EJ200 与 BC408 的衰减长度和光产额相近, 测量的结果与厂家提供的衰减长度为 4m 相符.

对于镀铝薄膜包装的 EJ200 型塑料闪烁体, 测量到的最差本征时间分辨率(闪烁体中端)为 (87.9 ± 3.9) ps, 与设计指标接近, 这说明 BESIII TOF 的设计是合理而且可以达到的.

参考文献(References)

- Preliminary Design Report of The BESIII Detector. Internal Document, 2004. 110—128 (in Chinese)
(北京正负电子对撞机重大改造工程初步设计——探测器. 内部资料, 2004. 110—128)
CUI Xiang-Zong, LI Jia-Cai et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2004, **28**(8): 870—876 (in Chinese)

- (崔象宗, 李家才等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(8): 870—876)
CHI Peng-Cheng, HONG Wei-Zheng. Nucl. Instrum. Methods, 1986, **A252**: 67—74
Kichimi H et al. Nucl. Instrum. Methods, 2000, **A453**: 315
LI Ti-Bei. Mathematical Analyses of Experiments. Beijing: Science Press. 132—140 (in Chinese)
(李惕碛. 实验的数学处理. 北京: 科学出版社. 132—140)

Beam Test for a 1:1 Module of Time of Flight Counter of BESIII

SUN Zhi-Jia^{1,1)} HENG Yue-Kun¹ ZHAO Xiao-Jian¹ WU Jin-Jie¹ SHI Feng¹ WU Chong¹
XUE Sheng-Tian¹ ZHAO Yu-Da² ZHAO Li³ JIANG Lin-Li³ WANG Feng-Mei⁴ ZHENG Zhi-Peng¹

1 (Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2 (Nanjing University, Nanjing 210039, China)

3 (University of Science and Technology of China, Hefei 230036, China)

4 (Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract A 1:1 module of time of flight counter of BESIII is measured with the test beam of BEPC. Using 800MeV/c electron beam, the time resolution and attenuation length of light transition in plastic scintillators, BC408 and EJ200 packed with Al foil and Tyvek paper, are measured respectively. The optimum choice is EJ200 packed with Al foil. The measured time resolution of less than 90ps may satisfy the BESIII design requirement.

Received 14 March 2005

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

Key words particle identification, time of flight counter, plastic scintillators, time resolution, attenuation length