

# 北京谱仪(BES III)的飞行时间测量精度的一些影响因素的分析

刘继国 安琪

(中国科技大学近代物理系快电子学实验室 合肥 230026)

**摘要** 在飞行时间测量中,噪声,幅度测量误差,以及信号本身的差异等因素,都会导致时间测量误差.本文对这些因素的产生原因、影响机制进行分析,并且以 GEANT4 模拟 BES III 的 TOF 探测器得到的输出信号为对象,进行了定量的模拟研究.结果表明,为了获得好的时间测量精度,选择合适的甄别域非常重要.如果要获得更高的时间测量精度,则有必要进行信号形状的分析.

**关键词** 飞行时间 BES III GEANT4 时间测量精度

## 1 引言

在北京谱仪的改造中,飞行时间探测器的分辨率将大幅度提高. BES III 的飞行时间探测器仍然采用塑料闪烁体,其桶部 TOF 由 64 块闪烁体组成,闪烁体采用 Bicron 公司生产的 BC404,光电倍增管采用 HAMAMASTU 公司生产的细网型光电倍增管 R5924.光电倍增管输出的信号首先经过 15 倍的差分前置放大后,通过 18m 的电缆传输到测量系统.信号经过差分接收后,负信号送到甄别器进行前沿定时甄别,甄别的输出送到 HPTDC 进行时间测量;正信号送到幅度测量电路进行幅度测量.幅度测量的分辨能力为 10bit,要求保证 8bit 的有效位.幅度测量的结果用来修正时间游动效应带来的误差.

弄清楚影响 TOF 测量的影响因素、各种因素的作用机制以及影响的大小,对提高 TOF 测量的精度,以及进一步研究新的 TOF 测量方法,都是很有帮助的.

## 2 影响时间测量的因素分析

影响时间测量误差的因素包括电子学系统的测

量误差和信号本身的差异.

### 2.1 电子学系统的测量误差

在对信号进行处理的时候,不可避免的要引入电子学误差.电子学误差的来源包括噪声和干扰.

(1) 噪声:电子学系统是由电阻、电容、电感、晶体管 and 集成电路等元器件组成.这些元器件内部的载流子的随机运动或者数量上的涨落,都会在电路上产生随机变化的无用信号,这就是噪声.

(2) 干扰:一个大的电子学系统的各子系统往往会共用电源线和地线,由于电源线和地线内部存在的电阻,使得一个子系统的电流在电源和地线上产生的电压会影响其他系统.此外电子学系统在工作过程中产生的空间电磁场,也会对别的系统造成干扰.噪声是直接叠加在信号之上的,比较容易进行分析.干扰则来源于系统之外,有些干扰(例如空间电磁干扰)的影响会叠加到信号上,起到类似于噪声的作用.对这种情况,不区分是噪声还是干扰,而是将二者一起进行分析.无论噪声和干扰,都会带来测量误差.对于电源和地线上的干扰,在系统设计的时候会采取抗干扰措施,本文不予考虑.

## 2.2 信号本身的差异

探测器产生的信号在幅度、形状以及时间等方面,都会存在着差异.

影响信号幅度的主要因素包括两个:一个是粒子击中闪烁体的时候沉积的能量,其大小服从朗道分布;另一个因素是光传输过程中的损耗,不同击中位置的事例,光传输的损耗是不同的.显然沉积的能量越多,击中位置越靠近光电倍增管,则信号的幅度越大.幅度的影响,可以通过幅度测量来消除.此外,光电倍增管放大过程中的随机涨落,同样会影响最终的信号幅度.

击中位置除了影响信号的幅度外,还会影响脉冲的形状.目前的“幅度-时间”修正中,都会考虑击中位置  $Z_0$  的影响.文献[1],[2]中,都采用  $Z_0$  的三次多项式对时间进行修正.

即使相同的击中位置,脉冲的形状还是会有所不同.目前的修正中,由于只对脉冲进行幅度测量,所以这种差异带来的误差是没有办法消除的;唯一的办法是将甄别阈设置的尽量低,以减小由形状差异带来的时间误差.

由于电子倍增过程的统计性,电子轨道的不同时性,以及电子的起始速度、方向的统计差别等因素,导致了光电倍增管的渡越时间分散.渡越时间分散的存在,使得信号在时间上也会存在差异.R5924 的单光电子渡越时间分散的半高宽为 440ps<sup>[3]</sup>.减小渡越时间分散影响的惟一办法,是增加倍增过程中的电子数,以减少统计涨落的影响.在信号刚刚开始的时候,电子的数目很少,因此,由渡越时间分散带来的时间晃动很大;随着幅度的增加,电子的数目越来越多,随机涨落带来的时间误差会逐渐减小.所以对于前沿定时,渡越时间分散带来的时间误差会随着甄别阈的增加而减小.

接下来将对各种因素的影响进行逐一分析.

## 3 噪声的影响

### 3.1 噪声的作用机制

图 1 是对信号过阈部分进行放大后的图.斜线是信号,斜线上的三角是叠加在上面的噪声,水平的线代表甄别域.可以看到,由于噪声的存在,使得信号过阈的时间从  $t_0$  改变到了  $t_1$ .通过简单的几何关系可以看到:

$$\Delta t = \Delta V / \operatorname{tg} \theta.$$

如果将幅度  $V$  作为变量,而时间  $t$  作为因变量,则上式可以写成下面的形式:

$$\Delta t(V) = \Delta V \cdot t'(V), \quad (1)$$

就是说,时间误差和噪声的幅度成正比,和信号过阈点的斜率成反比.

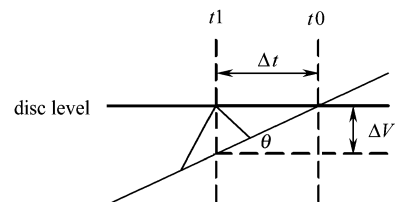


图 1 噪声对信号过阈时间的影响示意图

### 3.2 噪声的特征

首先明确一点,这里不考虑物理噪声,即  $\delta$  电子和 Back Scatter 的影响,而只是考虑电噪声的影响,因为通过阈值设置,可以将物理噪声的影响消除.并且,为了使结果符合实际情况,这里使用的信号是由 GEANT4 模拟得到的<sup>[3]</sup>.由于不考虑信号的形状差异,因此从 GEANT4 模拟得到的信号中随机选择了一个作为研究对象.虽然信号的选择会对结果造成影响,但是考虑到信号本身的形状差异并不很大,因此定量的结果不会相差太多.

要分析噪声引起的时间误差,首先要确定噪声的特征.要对电路中的噪声进行实际测量是困难的,所以只能对噪声的参数进行估计.噪声是随机性的,要对它进行描述,需要确定其 3 个特征:

(1) 噪声的幅度分布.由于噪声的来源很多,所以噪声的幅度分布难以确定,而且也不大可能是单一的简单分布.由于时间误差和噪声的幅度成正比,因此,无论采取哪种分布,只要噪声的幅度的 RMS 相同,则时间误差的 RMS 相同.

(2) 噪声的幅度大小.噪声的幅度大小用幅度的均方根描述,由于无法进行实测,所以目前用估算的方法来确定.首先对信号的幅度进行归一化,记满量程为 1. BESⅢ 的 TOF 测量中,幅度测量要求为 10bit A/D 变换,保证 8bit 有效位,量化噪声的 RMS 为 0.000289,总的噪声的 RMS 为 0.00113,因此噪声本身的 RMS 最大只能为 0.0011.在分析的时候,假定噪声的 RMS 为 1/1000,这个值接近最差的情况,因此是可靠的.

(3) 噪声的频谱.噪声的频谱应该不超过所采

用的放大器带宽,所以在产生序列的时候要特别进行考虑.下面介绍在模拟中所采用的产生噪声序列的方法.

1) 首先产生一个长度为 10000ns 的噪声序列,通过调节相邻点之间的时间间隔,就可以控制噪声的频率.

2) 根据上面的噪声序列,进行内插,就可以产生一个频谱没有改变,而长度为所需要的随机序列.在内插的过程中,噪声的幅度分布可能发生改变,但是这不会影响模拟的结果.

在进行模拟的时候,每次随机从前面产生的随机序列中抽取长度为 100ns 的一段,叠加在没有噪声的波形上,然后再计算波形的过阈时间.

我们发现,当噪声频谱在一定范围内变化的时候,只要噪声的幅度不变,则由噪声导致的时间误差也不变.例如,对于幅度为 1 的信号,在甄别域为 0.2,噪声 RMS 值为 1/1000 的情况下,模拟了相邻点时间间隔分别为 2ns, 1ns, 0.5ns, 0.25ns 和 0.0625 ns 的情况,对每种情况计算 10000 次,统计结果见表 1.

表 1

时间间隔/ns	0.0625	0.125	0.25	0.5	1	2
时间误差/ps	5.8797	5.9315	5.9158	6.0061	5.9873	5.9657

### 3.3 噪声引起的时间误差的变化规律

在 BES III 中,PMT 输出的信号经过 15 倍前放后,最小幅度的信号大约为 450mV,大约为满幅度的 20%,因此,在分析的过程中,将最小信号的幅度设置为 0.2.

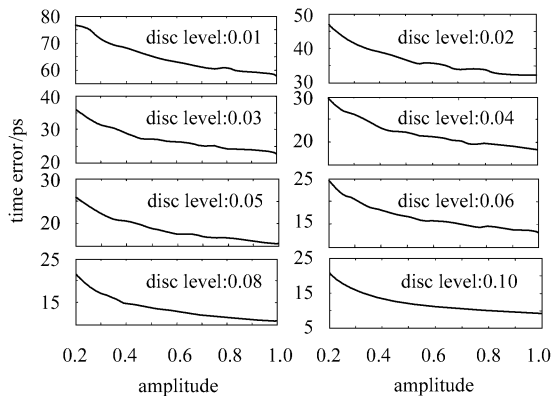


图 2 不同甄别域下,噪声带来的时间误差随幅度变化的模拟结果

设定不同的甄别域,然后模拟在该甄别域下时间误差随着信号幅度的变换规律.由于最小幅度的信号为 0.2,因此将甄别阈的范围定在 0—0.1 之间.结果如图 2 所示,从图中可以得到两个结论:

(1) 对于任意一个甄别域,信号的幅度越大,则噪声带来的定时误差越小.

(2) 对于任意幅度的信号,甄别域越高,则噪声带来的定时误差越小.因此,为了减小噪声带来的定时误差,应该将甄别域尽量提高.

## 4 幅度测量误差的影响

在利用幅度修正 time walk 的时候,幅度测量的误差必然会带来时间误差.如图 3 所示,对于一个幅度为  $V_F$  的脉冲(横轴为幅度,纵轴为时间),假设对于某个甄别阈  $V$ ,其过阈时间为  $t$ .如果测量误差为  $\Delta V$ ,那么实际进行测量时,测出的结果会在  $V_F - \Delta V$  到  $V_F + \Delta V$  之间变化,那么在对这个脉冲进行时间修正的时候,修正的结果就会在  $t - \Delta t$  到  $t + \Delta t$  之间变化.这个  $\Delta t$  就是时间测量的误差.

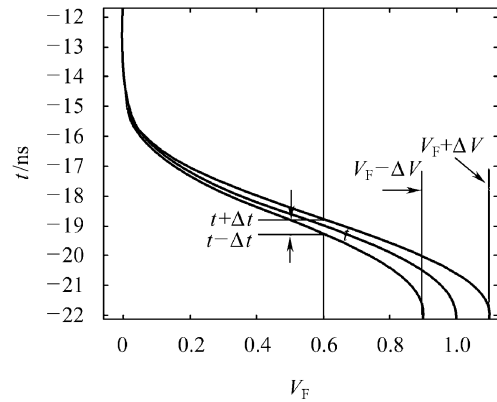


图 3 幅度误差导致时间误差的示意图

按照上面的图,以  $t$  为纵轴,令  $t = t(V)$ .由于在分析时假定脉冲形状相同,而幅度不同,所以幅度测量的误差,实际上相当于将函数  $t = t(V)$  在横轴上进行了拉伸,拉伸的比例记为  $\beta$

$$\beta = \frac{\Delta V + V_F}{V_F},$$

$$\Delta t = t(\beta V) - t(V) = t\left(V + \frac{V \cdot \Delta V}{V_F}\right) -$$

$$t(V) = t'(V) \cdot \frac{V \cdot \Delta V}{V_F},$$

即:

$$\Delta t(V) = \frac{V}{V_F} \Delta V \frac{dt(V)}{dV}. \tag{2}$$

下面根据公式(2),对幅度误差的影响进行分析:

(1) 相同的信号幅度和甄别阈的情况下,时间测量误差正比于幅度测量误差  $\Delta V$ .

(2) 将时间误差分成两个乘积项,  $\frac{V}{V_F}$  和  $\Delta V \frac{dt(V)}{dV}$ . 对于某个甄别阈  $V$ , 信号幅度  $V_F$  越大, 则  $\frac{V}{V_F}$  越小; 而  $\Delta V \frac{dt(V)}{dV}$  则恰好就是 § 3.1 中的公式(1), 根据 § 3.3 中的结论, 它会随着信号幅度的增大而减小. 因此, 可以得出结论, 信号的幅度越小, 则幅度测量误差带来的时间误差越大.

(3) 当甄别阈在 0—0.1 之间变化的时候, 随着  $V$  的增大,  $\frac{dt(V)}{dV}$  会逐渐变小, 因此直观上无法确定  $\Delta t$  随着  $V$  的变化趋势, 只有根据公式(2)进行计算.

由于已经证明幅度越小的信号, 幅度测量误差带来的时间误差越大, 因此只需要对最小幅度的信号进行计算. 图 4 是幅度为 0.2, 幅度测量误差为 8bit 的时候, 根据公式(2)计算得到的曲线, 可以看到, 甄别域设置越高, 则幅度测量误差导致的时间误差越大.

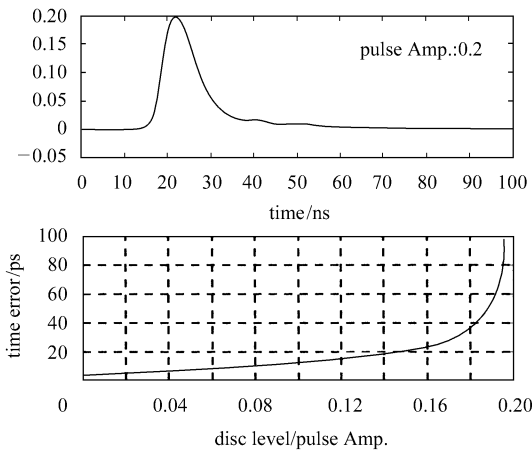


图 4 8bit 幅度测量精度时的时间误差随着甄别阈的变化曲线

我们还用随机模拟的方法对幅度引起的时间误差进行计算. 假设对于某个信号, 由测量得到的结果为  $A$ , 由于测量是有误差的, 因此, 实际的信号幅度应该满足一个平均值为  $A$ , 均方根误差为  $2^{-ENOB}/\sqrt{12}$  的随机分布. BESⅢ中, 幅度测量精度要求为 8bit 有效位, 因此幅度均方根误差为 0.00113. 模拟的方法是, 随机产生平均值为 0.2, 均方根误差为 0.00113(8 比特有效位)的随机数, 乘以幅度归一

化后的脉冲, 然后计算脉冲的过阈时间. 图 5 中, 连续的线为直接用公式(2)计算得到的结果, 而方框则是用随机模拟的方法得到的结果. 两种结果吻合的非常好, 这证明公式(2)是正确的.

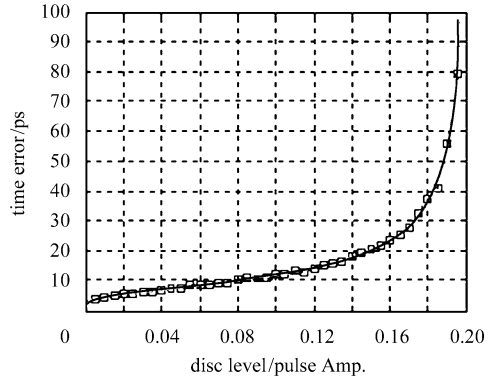


图 5 幅度误差引起的时间误差随甄别阈的变化图

## 5 信号本身的差异带来的时间测量误差

信号的差异体现在 3 个方面: 幅度, 形状以及时间.

对于前沿定时来讲, 信号幅度和形状的不同, 会使得信号过阈的时间不同, 这也就是所谓的时间游动效应. 在 BESⅢ的 TOF 测量中, 通过测量脉冲的幅度, 可以修正由幅度差别引起的时间游动. 但是对于由信号的形状差异引起的时间游动, 由于无法测量信号的形状, 因此没有办法进行修正, 目前人们对这一问题的解决办法, 是将甄别阈设置的尽量低, 以尽量减小形状差异带来的误差. 信号在时间上的差异是由光电倍增管的渡越时间分散引起的, 2.2 节中的分析表明, 甄别阈越低, 则由此引起的时间误差越大.

由于信号的形状差异和时间差异所带来的误差随着甄别阈变化的变化趋势是相反的, 导致无法通过简单的定性分析得出信号本身的差异所导致的误差随着甄别阈的变化规律, 所以只有通过计算机模拟分析来研究.

用 geant4 对桶部 TOF 进行模拟, 得到 500 个光电倍增管的输出脉冲. 由于这些脉冲的幅度不同, 为了模拟信号形状误差导致的时间误差, 首先对所有的信号统一缩放到 0.2. 将甄别阈从  $10^{-12}$  开始增加, 计算每个甄别阈下的时间误差. 图 6 是实际的模

拟结果,其中(a)采用对数坐标,(b)是在最小值附近的放大.从图中可以看到,在甄别阈在 0.002—0.004 之间的时候,时间误差最小.从这个甄别阈往上,形状误差的因素在总误差中所起的作用越来越大.

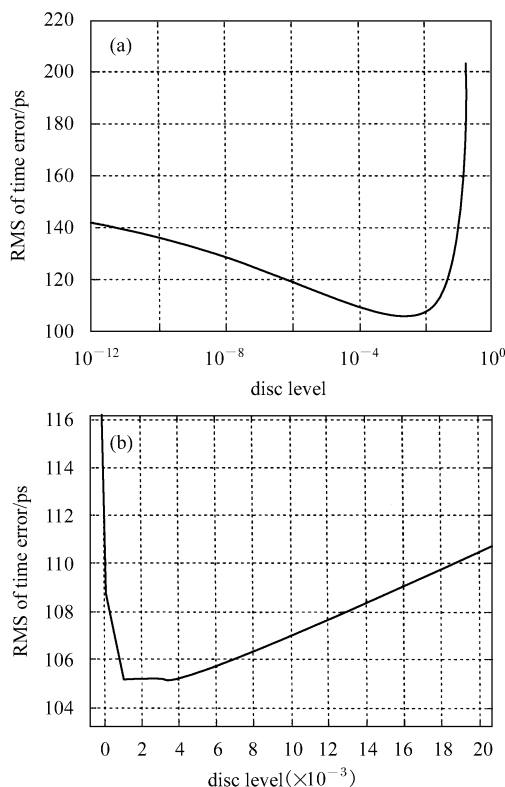


图 6 信号差异引起的时间误差随甄别阈的变化图(桶部)

## 6 各种影响因素带来的误差的综合分析

前面对各种误差产生因素进行了分析.分析结果表明:

噪声的影响随着甄别阈的升高而减小;幅度测量误差的影响随着甄别阈的升高而增大;由信号形状差异导致的误差在甄别阈太低的时候,主要由光电倍增管的渡越时间误差所决定,随着甄别阈的升高,形状误差所占的比重越来越大.

由于几种因素的影响随着甄别阈的变化规律是不同的,因此无法通过简单的定性分析得到时间误差随着甄别阈的变化规律,所以只有采用计算机模拟的方法进行分析.

这里以和 5 节中相同的信号为分析对象,首先对所有的信号统一缩放到 0.2,然后在信号上叠加均方根误差为 1/1000 的噪声信号.最后,采用和 4

节中相同的方法,将幅度测量的误差也加入进去.

将甄别阈从  $10^{-12}$  开始增加,计算每个甄别阈下的时间误差.结果如图 7 所示.从图中可以看到,当甄别阈在满幅度的 2%—4% 之间的时候,时间误差最小.对于 2V 的满量程,这相当于 40—80mV.在这个甄别阈范围内,由噪声引起的时间误差最大只有 45ps(图 2),而幅度测量误差引起的时间误差不到 10ps(图 4),因此,时间测量误差主要是由于信号本身的差异引起的.通过和图 6 的比较可知,在这个甄别域范围内,形状差异对总误差的贡献已经很大.

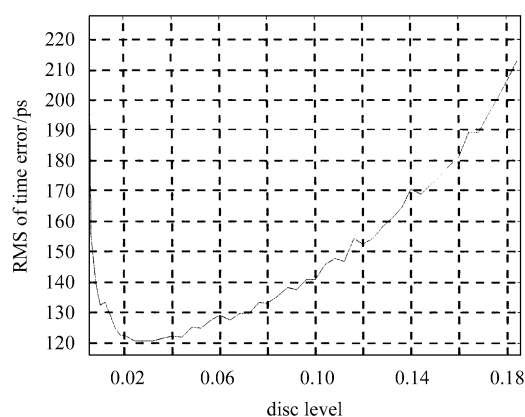


图 7 总误差随着甄别阈的变化(桶部)

## 7 结论

通过前面的分析可以看到,对于传统的前沿定时结合“幅度-时间”修正的 TOF 测量方案,噪声和信号的形状差异对时间误差的影响很大.由于不同的影响因素随着甄别域变化的规律是不一致的,为了获得最好的时间测量精度,必须选择合适的甄别域.

通过分析还可以看到,信号本身的差异对时间误差的贡献很大,如果要获得更高的时间测量精度,则有必要进行信号形状的测量.

本文中,对飞行时间探测器的模拟过程是严格的,因此我们进行的定量分析结果是可靠的.在文中分析的是闪烁体中部事例的信号,虽然不同击中位置的事例的时间分辨率是不同的,但是这里得到的定性分析结论同样可以应用于其他击中位置.

张黎明同学提供了桶部 TOF 模拟程序,邵明博士和作者进行了有益的讨论,在此一并致谢.

**参考文献 (References)**

- 1 LU J, HU J, ZHENG Y et al. Nucl. Instrum Methods, 1999, **A437**: 206—211
- 2 Brown J S, Burnett T H COOK V et al. Nucl. Instrum Methods, 1984, **A221**:503—522
- 3 ZHANG Li-Ming et al. HEP & NP, 2003, **27**:1109—1113 (in Chinese)  
(张黎明等. 高能物理与核物理, 2003, **27**:1109—1113)

**Analysis of the Factors that Influence the Time Resolution of TOF in BES Ⅲ Detector**

LIU Ji-Guo AN Qi

(Depart. of Modern Physics, USTC, Hefei 230026, China)

**Abstract** In TOF measurement, the factors that can increase the time resolution include noise, amplitude measurement error, and the difference of pulse amplitudes and shapes. This article discusses how these factors affect time resolution, and performs quantitative analysis based on the GEANT4 simulation result of the BES Ⅲ's TOF detector. The result shows that the discriminator level must be selected carefully. To get better time resolution, pulse waveform digitizing is necessary.

**Key words** time of flight(TOF), BES Ⅲ, GEANT4, time resolution