

大面积闪烁计数器飞行时间测量

王 殿 荣

一、飞行时间测量原理和用途

在高能物理实验中，重要的工作是确定高能带电粒子的动量及其质量。

带电粒子在磁场中运动，其运动轨迹发生弯曲。弯曲的程度依赖于磁场强度和粒子的动量。当带电粒子运动方向与磁场方向垂直时有如下简单关系：

$$p = 300H\rho$$

其中 p 为带电粒子的动量； H 为磁场强度， ρ 为在磁场作用下，粒子运动轨迹弯曲的曲率半径。

当某一带有未知动量的带电粒子通过已知场强的磁场时，只要测得其轨迹曲率半径，就可确定该带电粒子的动量。

在普通物理中，运动物体的动量 $p = mv$ ， m 、 v 分别为运动物体的质量和运动速度。测得该运动物体的动量和速度，就可以求出物体的质量。在高能物理中，粒子运动都接近光速，因此动量和质量及速度的关系要利用相对论公式：

$$p = m_0 r \beta$$

其中 $r = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ ，为劳伦兹因子， $\beta = v/c$ ， v 为高能带电粒子的运动速度， c 为光速， m_0 为粒子的静止质量。

测量带电粒子运动速度的方法很多，这里介绍一下飞行时间测量方法。其原理十分简单，比如在百米跑道的起跑线上，裁判员喊“预备”“咻”，枪响人出，秒表启动；在终点线上，人到秒表停。裁判员喊出成绩，则运动员的速度为 $100/t$ 。在高能带电粒子飞行时间测量方法中，也要设立“起跑线”和“终点线”。只不过“起跑线”和“终点线”不是划在地上的线，而是探知高能带电粒子通过与否的探测器。一般使用闪烁计数器。粒子飞行距离只有几米，时间仅为几亿分之一秒。精密

的时间测量求助于快电子学技术，精度可达 $10^{-9} - 10^{-12}$ 秒。

当带电粒子通过“起跑线”的闪烁计数器 S_1 时，闪烁体闪烁并通过光导由光电倍增管收集，

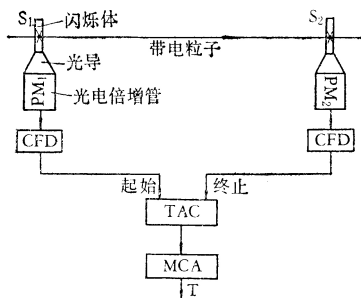


图1 CFD——恒比定时甄别器
TAC——时间幅度转换器
MCA——多道脉冲幅度分析器

并转换为电脉冲，由恒比定时甄别器甄别（挑选），成形，给出一个标准的定时脉冲做为起始信号，送到时间幅度转换器。同样，当带电粒子通过“终点线”的闪烁计数器 S_2 时，由恒比定时甄别器给出一个标准的定时脉冲做为终止信号，送到时间幅度转换器。时间幅度转换器把从起始信号到终止信号这段时间间隔转换为脉冲幅度，送到多道脉冲幅度分析器去分析，所得到的道址表示相应的时间。事先，要用已知的时间间隔来刻度多道脉冲幅度分析器，标出每道代表多少微微秒。由此可以测得带电粒子从“起跑线”到“终点线”的飞行时间。“起跑线”的计数器 S_1 和“终点线”的计数器 S_2 之间的距离是已知的，所以可以求出它的飞行速度。

飞行时间测量方法不但可以测量带电粒子的飞行速度，而且还可以测量闪烁光在闪烁体内的传播时间，从而可以确定带电粒子落入闪烁体的位置。

这种测量方法在日常生活中是不难见到的，比如在南京长江大桥的中央位置（O点）有二个人，如图2所示，他们同时以相同的速度分别向二个桥头走去。则他们在同一时刻到达各自的桥头。如果他们不是在中央位置（O点），而是在离O点为 x 的A点同时以相同速度向各自桥头走去，则甲少走了 x 这段距离，而乙却多走了这段距离，所以他们到达各自的桥头时间不同，如果我们事先知道他们行走的速度，并能测出他们到达各自桥头的时差 Δt ，就可以确定他们在动身前距中央位置（O点）为 x 的A点位置。

$$x = \frac{1}{2} \Delta t \cdot v \quad v \text{ 为二人行走的速度}$$

当带电粒子落入闪烁体时，在落入的位置附近产生闪烁光，并以相同的速度向闪烁体二端传播（犹如在大桥某一位置的两个人，同时以相同的速度分别向各自的桥头行走一样）。如果事先测量出它的传播速度，则通过测量闪烁光传播到闪烁体二端的时间差，就可以确定带电粒子落入闪烁体的位置。

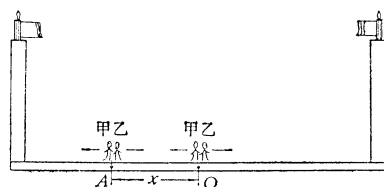


图2

如果事先测量出它的传播速度，则通过测量闪烁光传播到闪烁体二端的时间差，就可以确定带电粒子落入闪烁体的位置。

如果把带电粒子的动量测量和飞行时间测量结合起来，就可以辨认带电粒子的种类。比如我们用测得的动量和飞行速度，确定该带电粒子的静止质量在

140 MeV 左右,则可判断该带电粒子是 π 介子,而不是 k 介子或质子。如果确定它的静止质量在 500 MeV 左右,则可判断它可能是 k 介子。若静止质量在 940 MeV 左右,则可能是质子 p 。所以,只要这套测量系统的质量测量精度足够好,就可以分辨 π 、 k 、 p 等粒子。

带电粒子的质量可以通过它运动的动量和飞行时间确定。

二、国外大面积闪烁计数器飞行时间测量概况

早在 1972 年,芝加哥大学研究 $A \rightarrow p + e^- + \nu$ 过程中,为了甄别质子 p 和电子 e^- ,使用了飞行时间测量方法。用六条闪烁体测 e^- ,用七条闪烁体测 p 。每条闪烁体为 $150\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 0.6\text{ cm}$,二端配有光电倍增管。对 $\beta = 1$ (接近光速)的电子,该系统的时间分辨为 2.4 毫微秒。

1975 年,意、德、英、瑞士等 16 名科学家合作为 Ω 谱仪研制了一套大接收度、高时间分辨的大面积闪烁计数器飞行时间测量系统,其灵敏面积为 $200 \times 100\text{ cm}^2$,分成五条,每条 $200 \times 20\text{ cm}^2$,为了提高时间分辨,使用了 5 cm 厚的 NE 110 闪烁体。时间分辨为 0.5 ns,位置分辨为 5.5 cm。

1976 年,西德 DESY 的一个组为在电子对撞机上做实验的双臂谱仪研制了一套飞行时间测量系统。每臂的灵敏面积为 $172 \times 620\text{ cm}^2$,分成 31 条,每条为 $172 \times 20 \times 2\text{ cm}^3$ 。时间分辨为 0.6 ns。

最近在美国 SLAC 的电子对撞机上的大型探测器 Mark-III,用了 48 条 $320 \times 15 \times 5\text{ cm}^3$ 的闪烁计数器包围住中心探测器,进行飞行时间测量,用来分辨 π 、 k 、 p 等高能带电粒子。其系统的分辨时间为 200 ps。

飞行时间测量系统分辨时间的好坏,取决于该系统的指标和闪烁体的几何条件,还取决于测量方法。

三、大面积闪烁体计数器飞行时间测量

1. 影响飞行时间测量精度的几个主要因素

飞行时间测量精度主要取决于大面积闪烁计数器的定时精度,它包含各部分的时间分辨或时间离散。

(1) 光电倍增管的时间分辨。

从光电倍增管阴极发射出的光电子经过倍增级到达阳极的时间称为光电倍增管的渡越时间。随着光电子数目的增加,时间分辨率迅速变好。当光电子数目到达 200~300 时,时间分辨率趋于一个常数,即手册上时间分辨率的典型值。

(2) 闪烁体的发光时间、发光效率及自吸收系数。

要提高测量精度,必须选用发光时间短、发光效率高、自吸收系数小的闪烁体。在飞行时间测量中,一次闪烁过程发出的光子数多少直接影响时间测量精度,也直接影响光电倍增管产生光电子数目的多少。所以除了选用发光时间短、发光效率高、技术衰减长度长的闪烁体外,还适当地增加闪烁体的厚度,一般为 3—5 cm。

(3) 定时精度。

对于大面积闪烁计数器,要获得好的时间分辨率,除了选用快速光电倍增管和闪烁体外,更主要的是如何获得精确的定时脉冲。

带电粒子落入闪烁计数器时,由于不同粒子在闪烁体内的能量损失不同,产生的光子数目也不同,因而产生的光电子也不等。这就影响了光电倍增管的时间分辨率。就是相同粒子,当落入闪烁体的不同位置时,由于距离不同,产生的光衰减程度不等,在光电倍增管最后输出时的脉冲幅度也不等,影响了定时精度。

现采用恒比定时甄别器,定时性能得到极大的改善。定时精度可达几十微微秒。

由于闪烁光脉冲在闪烁体内的传播具有一定的速度,当带电粒子落入大面积闪烁体内的不同位置时,所产生的闪烁光脉冲到达光电倍增管光阴极的时间不同。对于一米长的闪烁体,其时间差异可达 6—7 ns。

因此,对于同一时刻到达的带电粒子,由于落入闪烁体的位置不同,所得到的定时脉冲的定时也不同。

2. 大面积闪烁计数器飞行时间测量方法

(1) 时间坐标补偿(或时间平均)法

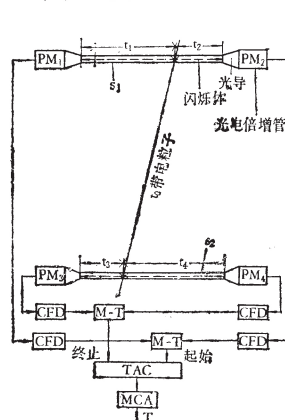


图3 时间平均法原理图

CFD——恒比定时甄别器

MT——时间平均器

TAC——时间幅度转换器

MCA——多道脉冲幅度分析器

了时间平均器,它的功能是不管带电粒子落入大面积闪烁体的任何位置,其输出脉冲的时间(即定时脉冲的定时)是不变的。即它能给出精确的定时脉冲。时间平均法的原理图如图3所示。当带电粒子从闪烁计数器 S_1 飞行到 S_2 时,其飞行时间为 t_0 。

带电粒子通过 S_1 时,其两端的脉冲,经过定时后送到时间平均器,取时间平均后的

脉冲送到时间幅度转换器 TAC 的起始端。当带电粒子通过 S_2 时,其两端脉冲也经过定时后送到时间平均器,取平均后加到 TAC 的终止端。经过时间幅度转换后送多道脉冲幅度分析器 MCA,测到的时间 T 为:

$$T = t_0 + \frac{ts_2}{2} - \frac{ts_1}{2}$$

在此认为各回路的电子学线路固有延迟时间相等,并且认为时间平均器的延迟单元的总延迟时间相等。 ts_1 和 ts_2 分别表示光脉冲在 s_1 和 s_2 内的总传播时间。如果 s_1 和 s_2 的尺寸,材料和时间性能相同,测到的时间 T 就是粒子的飞行时间 t_0 ,它与带电粒子落入的位置无关。

(2) 时间求和法。时间求和法的原理就是用两个

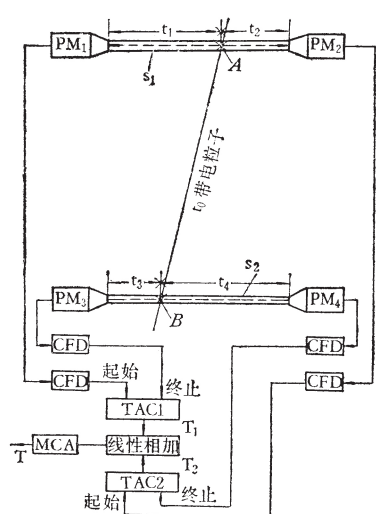


图 4 时间求和法原理图

TAC 输出线性相加, 用多道脉冲幅度分析器去分析, 所得时间与位置无关。见图 4。

当带电粒子穿过闪烁体 S_1 的 A 点和 S_2 的 B 点时, 它的飞行时间为 t_0 。 A 、 B 点的闪光向两端传播, 向左边传播的时间为 t_1 和 t_3 , 向右边传播的时间为 t_2 和 t_4 。由 TAC1 测量向左边传播的时间差 $T_1 = t_0 + t_3 - t_1$ 。由 TAC2 测量向右边传播的时间差 $T_2 = t_0 + t_4 - t_2$ 。经线性相加后由多道脉冲幅度分析器分析, 所测得的时间 T 为 $T_1 + T_2 = 2t_0 + t_2 - t_1$ 。如果 S_1 和 S_2 的尺寸、材料和时间性能相同, 则 $t_2 = t_1$ 。那么测得的时间 T 等于二倍于带电粒子飞行时间。与带电粒子落入的位置无关。

在使用上述两种方法时, 要求带电粒子飞行距离 (即闪烁器 S_1 和 S_2 之间的距离) 远远大于闪烁体的长

度, 以减少误差。

四、大面积闪烁计数器飞行时间的综合测量

在实际测量中, 常常把时间平均法和时间求和法以及位置测量结合起来, 就构成了综合测量。其原理见图 5 所示。用时间数字转换器 TDC 代替时间幅度转换器 TAC 和多道脉冲幅度分析器 MCA, 直接由计算机分析处理。见图 5 所示

由 TDCO 测得的 T_0 是用时间平均法测量的带电粒子的飞行时间。由 TDC1 和 TDC2 测得的 T_1 和 T_2 , 取其和 $T_1 + T_2$ 是用时间求和法测量的带电粒子的飞行时间。由 TDC3 和 TDC4 测得的 T_3 和 T_4 可分别确定带电粒子穿过闪烁体 S_1 和 S_2 的位置。

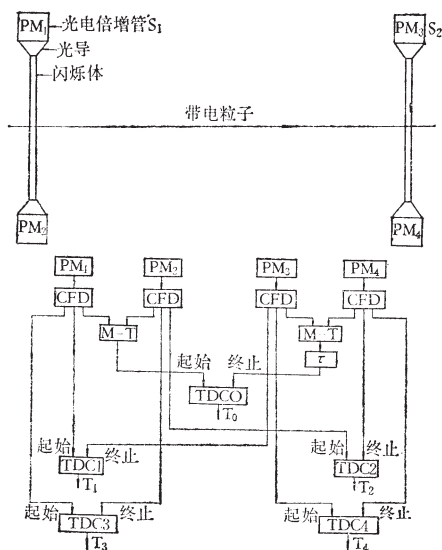


图 5 飞行时间综合测量原理图