

# 神龙一号电子束束参数测量系统猝发式的 精确触发方式研究\*

江孝国<sup>1)</sup> 李成刚 王远 代文化 夏连胜 陈楠 杨国君

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

**摘要** 为了准确了解电子束随时间变化的性能,在神龙一号直线感应加速器上进行电子束束参数测量时要求测量系统精确地同步于电子束的产生和输运.其功率系统开关放电波形后沿幅度高达250kV,下降时间约20ns,并且从该下降沿到电子束打靶的时间有145ns,抖动1—2ns,非常稳定;如果以陡峭的后沿作为测量时间基准,则可以获得与其抖动同量级的同步精度.因此通过对其波形的下降沿进行微分来获取测量系统的触发信号,选择合适的微分参数可以得到对应于下降沿约ns级精度的测量时间基准,通过采用光纤驱动电路完全消除了高压开关对低压测量系统的干扰,保证测量系统正常工作.该方法消除了传统触发方式因延时长、精度低、抖动大等对确定测量时间基准的不利影响,满足了使用高速测量设备准确获取电子束不同时刻的束参数波形的精确触发要求.

**关键词** 直线感应加速器 脉冲功率开关 电磁干扰 触发模式 高速分幅相机

## 1 引言

在神龙一号直线感应加速器<sup>[1]</sup>的束参数测量工作中,采用的同步触发系统主要是由延时同步机如DS310完成的,它虽然可以产生较大时间范围内的延迟,但由于其工作主频为100MHz,其延迟时间设置的步长则为10ns,加上时基自身的精度,能够获得的延迟精度不会高于10ns;而直线感应加速器的其他环节(主要是发散以前的环节,如偏置Marx)在动作时也存在一定量的抖动,经实际测量约20—30ns,这样就无法很精确地确定测量时刻.因此在要求准确了解测量时刻及具有时间分辨测量要求的研究工作中,这种触发方式就不能满足要求了.通过对神龙一号直线感应加速器从点火机开始到其注入器产生电子束的工作过程进行分析,发现Blumlein主开关(简称B线开关)触发波形稳定、触发沿较陡,而且时间抖动小,该信号与电子束的产生存在严格的时间关系,并且在电子束到达靶位前约145ns产生,适合用于作触发测量的时间基准.由于Blumlein主开关触发波形后沿较陡,

其约250kV的下降沿时间约20ns,如果对其进行微分,则可以得到更陡的信号,说明这种方法也可以得到更准确的时间基准;因此,鉴于功率系统开关动作的同步稳定性非常高及其后沿较陡的原因,提出了从神龙一号直线感应加速器功率系统最后一级主开关上获取基准较高的触发信号的设想,并通过对其波形的后沿进行微分来获取测量系统的触发信号,得到了约ns级精度的测量时间基准.采用这种方法避免了神龙一号直线感应加速器中时间抖动最大的偏置Marx环节的影响,且由于只需考虑约100ns以内的延时触发,根本不涉及神龙一号直线感应加速器主开关动作之前因其他原因要求的长延时(约几十 $\mu$ s)问题,本触发系统仅需通过连接不同长度的短电缆就可以满足调节触发延迟时间的要求,并获得ns级精度的时间基准.为了避免神龙一号直线感应加速器工作时对相关测量系统的干扰,触发信号的传输线采用了高速的光纤传输线结构以将测量系统与加速器在电气上完全隔离开来;针对触发信号的“猝发”产生特点,还专门研究了适用于“猝发”触发特点的光纤驱动(发射端)和光纤接收转

2005-11-02 收稿

\* 国防科技基础研究基金资助

1) E-mail: J\_xg\_caep@sina.com, J\_xg\_caep@sohu.com

换线路, 满足了使用要求.

### 2 常规同步触发系统

在神龙一号直线感应加速器上采用的同步触发系统及工作流程如图 1 所示. 简化的工作过程如下: 输入触发信号经延迟同步机 DS310 后产生两路延迟同步信号, 一路用于触发测量设备, 另一路用于触发神龙一号直线感应加速器的点火机; 为了达到同步测量的目的, 需要仔细调整 DS310 的两路延迟时间以保证电子束到达靶的时刻与测量设备工作的时刻同步. 在该流程中, 延迟同步机 DS310 的精度约 10ns (不含时基的精度), 而神龙一号直线感应加速器中偏置 Marx 环节及与发散之间的环节引进的触发抖动约 20—30ns, 因此测量设备工作与电子束到达靶位时的同步不确定时间范围至少约 30ns. 由于这种工作流程包含了抖动较大的偏置 Marx 环节和延迟同步机, 从根本上就无法消除这些环节引起的同步不确定问题.

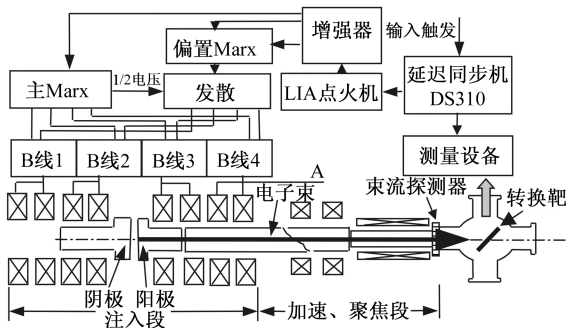


图 1 同步触发系统结构及电子束传输流程示意

经过对过去的开关动作测量波形和束流探测器信号进行分析, 发现功率系统开关动作的同步稳定性非常高, 一般在 ns 量级; 而开关波形后沿到束流探测器信号前沿间的时间也很稳定, 该间隔时间约为 145ns, 多次测量结果表明该间隔时间稳定, 抖动约 1—2ns. 因此通过对开关波形陡峭的后沿进行微分可以获取精确的、相对于束流信号的触发信号时间基准, 消除了传统触发方式因延时长、精度低、抖动大等对确定测量时间基准的不利影响, 将大大地提高同步的精度.

### 3 最后一级主开关的动作波形及其与电子束产生的时间间隔

为了准确掌握最后一级主开关动作时到电子束产生的时间间隔以确定具体的延迟时间, 首先对其进行了测量, 测量的原理图如图 2(a) 所示. 原则上, 测量设备在靶室附近, 而为了获得足够的延迟时间, 最

后一级主开关选择在最靠近测量设备一端的. 最后一级的主开关动作信号经同轴电缆传输到宽带示波器的通道 1, 为了保证波形不发生畸变和超出示波器的测量范围, 在传输电缆的终端加匹配的衰减盒; 而从束流位置探测器 BPM 过来的 (电子束) 波形信号经过同样长度的传输电缆后也送入示波器的通道 2, 为便于观察, BPM 信号偏置于 10V 水平上 (BPM 本身是负信号). 对两个波形的有效沿进行比较, 就可以得到最后一级主开关信号到电子束到达靶位的间隔时间. 图 2(b) 是典型的测量波形, 该间隔时间约为 145ns, 抖动约 1—2ns.

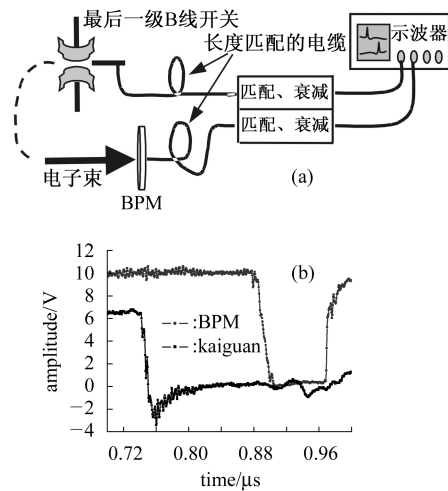


图 2 最后一级主开关信号与电子束产生的间隔时间测量

(a) 测量系统建立; (b) 典型测量结果.

### 4 束参数测量系统的精确同步触发原理

使用高速分幅相机的电子束束参数测量的精确同步触发系统结构如图 4 所示. 为了考查微分电路的性能, 对 5 次开关信号及微分信号进行了实际的测量, 如图 3 所示. 图中幅度是相对幅度, 为了便于观察, 微分信号偏置于 +4V 处. 从图中可知开关信号后沿经微分后的稳定性在 1—2ns 间, 并且前沿时间约 8ns, 为提供较高精度的时间基准奠定了基础.

高速分幅相机从触发信号输入到内部快门打开的固有延迟时间为 35ns, 稳定性较高, 其抖动远小于 1ns<sup>[2]</sup>; 光纤传输线路 (含发射端与接收端、2m 光纤的延迟) 的延迟时间为 45ns, 其抖动约 1ns 左右<sup>[3]</sup>, 而图 5 是利用主开关动作信号进行触发的实际测量波形 (2m 光纤), 多次测量结果表明稳定性是很好的; 而从最后一级主开关到测量位置的最短距离约为 10m, 用特性阻抗为 75Ω 的测量电缆连接, 其上的延迟时间约 55ns;

那么,以图4所示线路为例,最后一级主开关动作到高速分幅相机快门打开的最小固有延迟时间为135ns.从测量结果来看,高速分幅相机刚好可以在电子束到达转换靶前约10ns的时候打开快门,说明这种触发方式是可行的.如果在发射端施加合适的直流偏置电流及直接使用接收端高速电平比较电路的输出(标准TTL电平)作为系统触发的信号<sup>[3]</sup>,虽然抗干扰能力有所降低,却可以进一步将光纤传输线路的延迟时间从45ns缩短到约20ns,使触发调节更灵活.

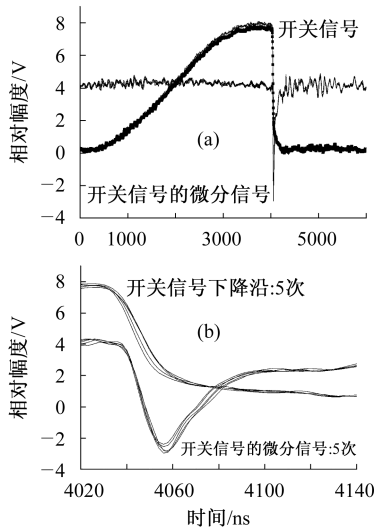


图 3 典型开关波形及微分信号波形  
(a) 5次测量波形; (b) 微分信号稳定性示意.

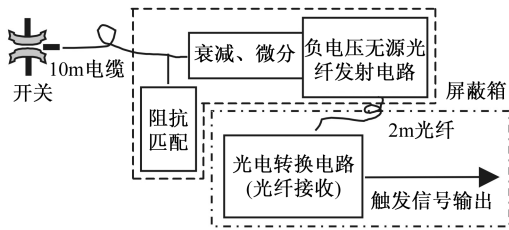


图 4 精确同步触发系统结构原理

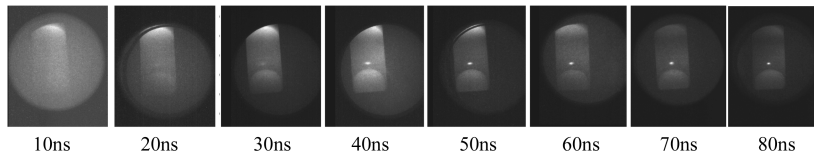


图 6 电子束打靶的发光过程

为了确定电子束作用于靶后,靶材料因高温高热而熔化及形成等离子体喷射的时间,用该相机从靶的侧面以看不到靶表面发光点的角度进行拍摄.图7显示了以10ns的曝光时间和320ns的幅间间隔时间拍摄的情况,第一幅图像对准电子束脉冲的中部,拍摄电子束与靶直接作用最强时的发光,该图像已饱和;第

从原理上讲,通过改变(主要是增加长度)图4中10m电缆或2m光纤的长度就能满足精密调节延迟触发时间的要求,达到对电子束的任意位置进行测量的目的.而由于需要进行调节的延迟触发时间较短(约几十ns以内),线缆(电缆或光纤)的长度不需要较长,因此这种方法也是现实可行的.

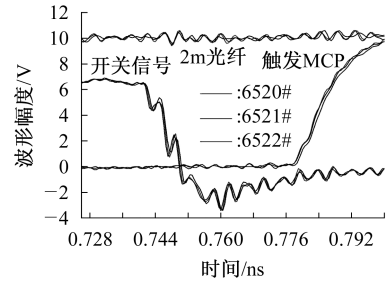


图 5 线路固有延迟时间测量结果及稳定性

图4中的短光纤主要起电磁干扰的隔离作用,防止来自开关的高压信号对测量系统产生冲击.在该触发系统中,将多种功能的电路集合在一起置于屏蔽盒内以减少干扰,提高信号的质量,进而提高触发的可靠性和稳定性;这些电路完成开关信号传输的匹配、衰减、微分以及光纤发射器件的无源驱动等功能<sup>[3]</sup>.

### 5 使用效果

在用八分幅高速分幅相机观察电子束打靶时对靶的破坏情况的实验中,使用了这种触发方式.为了观察到电子束前沿对靶的作用情况,传输电缆长度取为14m,此时将在电子束打靶后约10ns开始拍摄;以10ns的曝光时间和10ns的幅间间隔时间拍摄到电子束(半高宽90ns)打靶过程的发光图像如图6所示,图中亮斑位置为电子束打靶位置,亮框为观察的石英玻璃窗口,多次拍摄结果表明发光现象基本相同,也说明了各次拍摄的起始时刻是相同的.

二幅图像中没有任何信息,第3幅图像中开始有很弱的发光,说明在该靶表面已有发光的高温“熔融物”喷射出或产生了等离子体,第4—8幅图像显示了其演变的过程.由于能够较准确地计算现象发生的时间及相关的变化情况,这些现象的获取可以为各种靶的研究提供非常有用的实验数据.

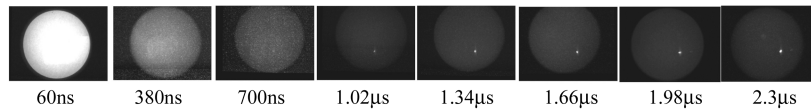


图 7 电子束打靶后, 靶面的变化过程

## 6 结论

从功率系统的最后一级主开关的动作波形上获取测量系统的触发信号, 具有延迟时间稳定、抖动小、精度高的优点, 采用这种触发方法较好地解决了神龙一号直线感应加速器电子束参数测量时的精确同步要求, 并将原来的同步触发精度从 20—30ns 缩短到约

1—2ns 的水平上, 满足了从电子束前沿任意位置开始进行测量的要求; 正是由于神龙一号直线感应加速器的 B 线开关动作的稳定性高才使得这种触发方式达到了较高的精度, 否则, 即使采用了这种方法, 但由于开关动作的离散性较大仍将使同步的精度大大下降<sup>[4]</sup>. 这种触发方式不仅对神龙一号加速器上的相关测量工作具有实际意义, 而且对在类似系统上(如阳加速器)<sup>[5]</sup>进行有准确时间基准要求的测量也有重要意义.

## 参考文献(References)

- DING Bo-Nan, DENG Jian-Jun, WANG Hua-Cen et al. HEP & NP, 2005, **29**(6): 604—610(in Chinese)  
(丁伯南, 邓建军, 王华岑等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(6): 604—610)
- JIANG Xiao-Guo, GUO Bao-Ping, DENG Jian-Jun et al. Opto-Electronic Engineering, 2006(accepted)(in Chinese)  
(江孝国, 郭宝平, 邓建军等. 光电工程, 2006(已录用))
- JIANG Xiao-Guo, LI Cheng-Gang, WANG Yuan et al. Detonation and Shock Waves, 2005, **1**: 19—22(in Chinese)  
(江孝国, 李成刚, 王远等. 爆轰波与冲击波, 2005, **1**: 19—22)
- XUE Fei-Biao, YANG Jian-Lun, LI Zheng-Hong. High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(1): 149—152(in Chinese)  
(薛飞彪, 杨建伦, 李正宏. 强激光与粒子束, 2005, **17**(1): 149—152)
- GAO Ping, LIU De-Ben, DAI Gang et al. Eighth Symposium on High Power Particle Beam and High Voltage. Sanya, 2001. 272—274(in Chinese)  
(高平, 刘德本, 代刚等. 第八届高功率粒子束暨高压学术交流会. 三亚, 2001. 272—274)

# Accurate Burst Trigger Mode for Dragon- I Electron Beam Measurement System<sup>\*</sup>

JIANG Xiao-Guo<sup>1)</sup> LI Cheng-Gang WANG Yuan DAI Wen-Hua XIA Lian-Sheng  
CHEN Nan YANG Guo-Jun

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** The electron beam measurement system for Dragon-I must work synchronously with the beam production and transportation accurately in order to obtain correct data. The synchronization with about 1ns is important. The output waveform of Blumlein lines in pulsed-power system is of amplitude of about 250kV and 20ns active edge time(following edge). The electron beam will hit the conversion target in about 145ns later steadily and the jitter time is about 1—2ns. The synchronization precision with the same level of the jitter time will be reached if the sharp following edge of waveform is selected to be the time base. The synchronization trigger signal for measurement system can be obtained by the way of differentiating the following edge and the accuracy of about ns can also be reached with suitable circuit parameters. The optical fiber is also adopted to remove the interference on the measurement system from the high voltage system. This kind of burst trigger mode overcomes many disadvantages such as low accuracy, long delay time, large jitter in normal trigger mode and can provide the trigger time accurately. It can meet the need to measure the electron beam parameters at any required time.

**Key words** linear induction accelerator, pulsed-power switch, electromagnetic interference, trigger mode, multi-frame camera

Received 2 November 2005

<sup>\*</sup> Supported by Fundamental Research Foundation of Defense Technology

1) E-mail: J\_xg\_caep@sina.com, J\_xg\_caep@sohu.com