

多台脉冲X光机出光时间间隔的量测

陈善良 金辉

(中国科学院力学研究所)

多台脉冲X光同步照相技术在爆炸力学等各个领域得到了广泛的应用^[1]。数控脉冲X光同步机^[2]解决了多台同步运行时的同步精度,为精确地确定动态现象的照相时间,还必须测定每台脉冲X光机准确的出光时间。过去通常以脉冲X光机的放电电流或电压讯号代表出光时间讯号进行测量。由于脉冲X光的测试是在高压大电流脉冲放电的环境中进行,各种干扰往往导致以假乱真,而多台同步运行时,系统间的相互干扰,使多台同步运行时的出光时间间隔的测量变得相当困难。国内早期使用了火花计时仪记时,以后又使用罗果夫斯基(Rogowski)线圈从放电电流取得时间讯号^{[3][4]},用螺旋扫描示波器记录。

本文分析、研究了各种干扰情况,采取了满足时间测量要求的干扰抑制措施,用闪烁法直接测量了脉冲X光讯号^[5],并以所得到的X光讯号作为出光时间讯号,用数字计时仪记录了多台脉冲X光机同步运行时的出光时间间隔,提高了计时精度。

1. 脉冲X光-电的转换

在X射线摄影领域里,脉冲X光的辐射波长大约在 10^{-4} — 10^{-1} 毫微米^[3]。我们采用塑料闪烁体和强流光电管组成的闪烁变换器实现脉冲X光-电的转换(图1)。

闪烁体将波长为 10^{-4} — 10^{-1} 毫微米量级的X光辐射转换为微米量级的光辐射(辐射波长决定于闪烁体的种类);光辐射经强流光电管实现光电转换,输出电流脉冲,这个讯号可以直接用高压脉冲示波器记录。

图2是脉冲X光讯号测量系统方框图。根据记录到的X光强度随时间变化的波形,可获得脉冲X光机的闪光时间(脉冲最大值一半处的宽度 τ 定义为脉冲X光机的闪光时间)^[3]。

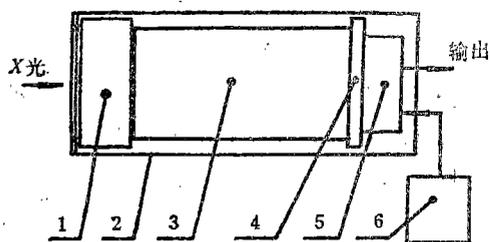


图1 闪烁变换器结构图

1. 塑料闪烁体; 2. 屏蔽暗盒; 3. 光电管;
4. 管座; 5. 供电电路; 6. 电源。

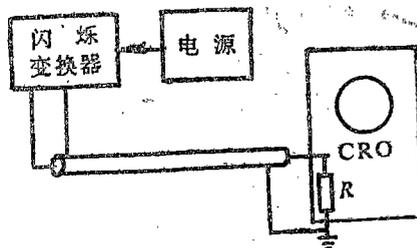


图2 闪光时间测试系统

2. 出光时间间隔的测量

图3是脉冲X光机出光时间间隔测试系统的方框图。

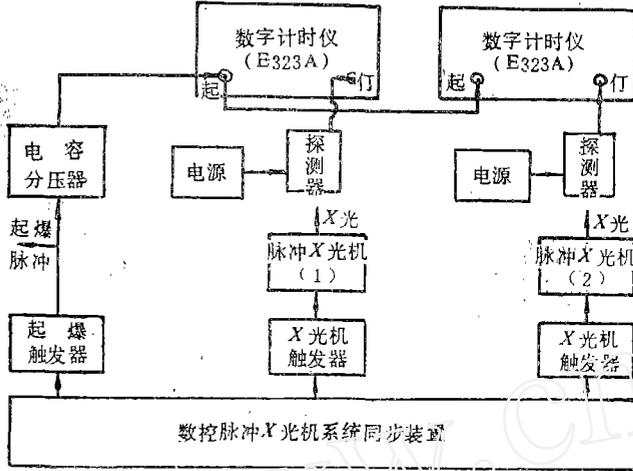
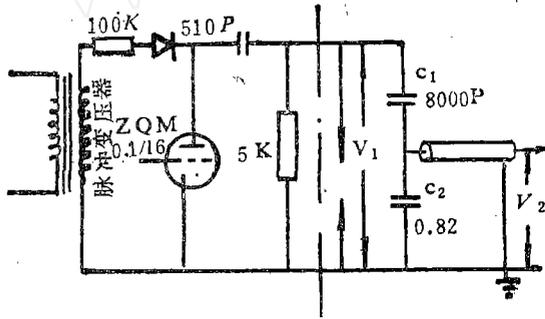
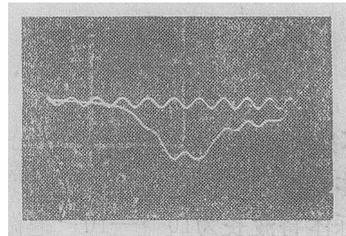


图3 脉冲X光机出光时间间隔测试系统框图

图4给出了电容分压器的电原理图^[3,4]及其实际输出脉冲波形,其前沿时间小于25毫微秒。



(a) 电容分压器电原理图



(b) 输出波形 (时标: 10毫微秒)

图 4

3. 干扰的抑制和讯号的鉴别

1) 主要干扰源及其抑制

脉冲X光测量的困难在于,高压大电流系统运行时产生很强的、复杂的干扰,脉冲X光机运行时的放电电流高达数千安培,极短时间的X光辐射将产生很强功率的电磁辐射,而整个测试系统又必须在距X光机很近的地方工作,因此整个测试系统所接受的干扰是相当复杂的,影响测量的主要干扰源是:起爆触发器和脉冲X光机系统运行时产生的很强的空间电磁辐射,其影响与X光机所产生的X光线强度和测试系统距X光源的距离、位置有关;X光机系统运行时地电位的突然变化;以及通过电网形成的干扰。图5给出的是1米导线在控制室内所接受的,由于X光机系统各部分运行时产生的空间电磁辐射造成的干扰讯号,图6给出的是1

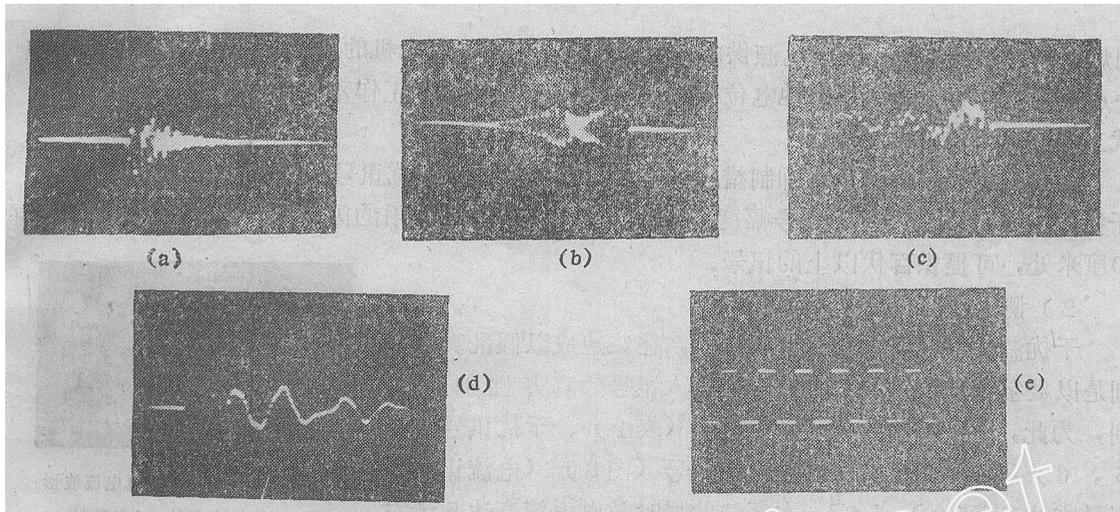


图5 干扰信号及标定信号

- (a) 起爆触发器运行时 (扫描全程 $10\mu\text{s}$) (b) X光机触发器运行时 (扫描全程 $10\mu\text{s}$)
 (c) 1MV 脉冲X光机运行时 (扫描全程 $20\mu\text{s}$) (d) 400kV 脉冲X光机运行时 (扫描全程 $20\mu\text{s}$)
 (e) 标定信号 $V=10$ 伏

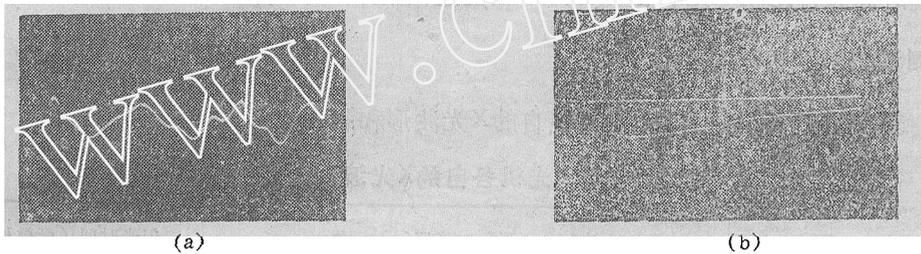


图6 测试系统接受的干扰讯号 (扫描全程 100 毫微秒) (a) 及其标定讯号 (峰值约 300 伏) (b)

MV脉冲X光机运行时, 因测试系统屏蔽不良而接受到的辐射干扰, 这些干扰具有与被测讯号相当的频谱。另外还记录了脉冲X光系统运行时通过电网引入的干扰, 这些干扰具有与图5给出的干扰波形相似的形式, 这里不再列出。所有这些干扰往往通过电源线、输入电缆等引入测试系统, 使仪器误动作, 打坏设备或直接影响测试数据的取得。

根据时间测量和干扰源的特点, 干扰抑制措施必须适合于时间测量的要求。为此, 我们采取了严格的屏蔽、合理地选择接地点和电网退耦滤波等措施抑制干扰^[5]。

(1) 屏蔽 为了抑制X光机系统运行时产生的空间电磁辐射对测试系统的影响, 我们将闪烁变换器置于金属屏蔽罩内, 讯号引线通过金属管道引入测试室, 记录仪器置于专门设计的双层金属网组成的测试屏蔽室内 (屏蔽效果可达 120 分贝)。

(2) 滤波 测试系统的电源加高频滤波网络 (图7), 可以克服从电源进入的干扰。

(3) 合理接地 脉冲X光机系统运行时, 瞬时放电电流高达数千安培, 即使地线的接地电阻做得相当小 (我们实验室地线的接地电阻约 1.2Ω), 仍将导致地电位的局部升高, 为避免造成环流, 整个测试系统应一点接地, 否则, 还可能影响同步机的正常工作。为了不改变同步机原先的工作状态, 我们所用的X光-电变换方式,

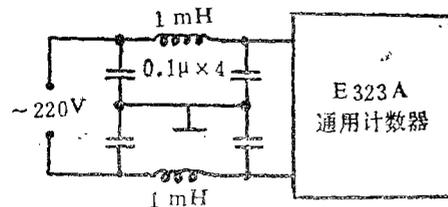


图7 交流电源的去耦滤波

闪烁变换器采用与地隔离的电源供电，做到了测试系统与X光机的隔离，保证了测试系统的一点接地，有效地解决了因地电位的突变而造成的测试系统工作不正常的现象，这是X光测试工作中相当关键的问题。

虽然采取了有效的干扰抑制措施，引入到测试系统的干扰讯号仍相当大，因此，关键在于提高输入到记录仪器的讯号幅度，提高讯噪比，本工作采用的闪烁变换器在距离X光机前10厘米处，可提供百伏以上的讯号。

2) 测试结果的分析 and 鉴别

干扰源的存在及其所具有的特点，往往造成以假乱真，特别是以数字仪器记录时，更应对其输入讯号的真实性加以识别，为此，我们分别记录了X光讯号（表1）、干扰讯号（图5，6）和脉冲X光机的放电电流讯号（图8）（电流讯号的测量方法参考[3]，[4]），本系统的瞬时放电电流高达5千安培），通过分析和比较，确认输入计时仪“停止”输入端的是X光机的出光讯号。另外，还对输入计时仪的“起劲”讯号进行了鉴别。最后将测量结果与同步机预置时间进行比较（见表2—4），验证测试结果的正确性。

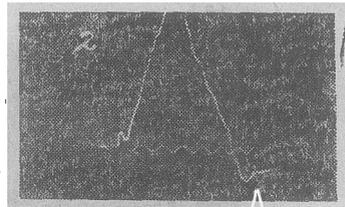


图8 脉冲X光机放电电流波形
扫描全程约100毫微秒
时标：10毫微秒，电流峰值约5000安

4. 测试结果

(1) 表1给出了四台脉冲X光机各自的X光波形和相应的闪光时间。

表1 四台脉冲X光机各自的X光波形和闪光时间

机 型	波 形 照 片	闪光时间 (毫微秒)
1MV (I)		18
1MV (II)		18
400kV (I)		25
400kV (II)		15
标定讯号		峰值：300V

注：扫描全程约100毫微秒，时标100兆赫

(2) 表 2 给出的是 1 MV 脉冲 X 光机单独出光时, 同步机预置时间和出光时间间隔的实际测量结果。

表 2 1MV(II) 脉冲 X 光机出光时间间隔测试结果 (计时精度 20 毫微秒)

同步机预置时间 (微秒)	743	343	122	54	6
实测结果(平均值) (微秒)	743.10	343.10	122.06	54.21	6.26

(3) 为了观察多台脉冲 X 光机同步运行时相互之间的干扰情况, 我们安排了二台脉冲 X 光机同时出光, 把其中一台的运行作为干扰源, 测量另一台脉冲 X 光机的出光时间间隔, 表 3 是它们的同步预置时间和测试结果。从测试结果可见, 被测系统没有受另一台脉冲 X 光机运行的干扰, 测试结果是准确的。

表 3 在有干扰源条件下 1MV(I) 脉冲 X 光机出光时间间隔测试结果 (计时精度 0.1 微秒)

被测 X 光机预置 时间 (微秒)	733	203	46	8	534	324	4
作为干扰源的 X 光 机预置时间 (微秒)	400kV(I) 322	400kV(I) 512	400kV(I) 31	400kV(I) 2	1MV(I) 123	1MV(I) 743	1MV(I) 123
测量结果(平均值) (微秒)	733.25	203.4	46.25	8.25	534.1	324.2	3.85

(4) 表 4 给出了二台脉冲 X 光机同步运行时同时测量记录各自的出光时间间隔和同步预置时间。从测量结果可见, 测试系统在二台脉冲 X 光机同步运行条件下的工作是正常的,

**表 4 二台 1MV 脉冲 X 光机同步运行时出光时间间隔的测试结果
(计时精度 20 毫微秒)**

1MV(I) X 光机 预置时间 (微秒)	833	553	152	70	4
测量结果(平均值) (微秒)	832.17	552.87	151.79	69.93	3.63
1MV(II) X 光机 预置时间 (微秒)	646	756	255	21	7
测量结果(平均值) (微秒)	645.04	755.83	254.80	21.07	6.75

测量结果是正确的。进而,在四台脉冲X光机同步运行条件下,测量了1 MV (I)和1 MV (II)的出光时间,测试系统工作正常,结果正确。

5、讨 论

对影响出光时间间隔测试精度的主要因素的初步分析。

(1) “起动”讯号

“起动”讯号可能造成的计时误差主要取决于起爆脉冲的前沿和电容分压器的响应,实测了电容分压器的输出讯号[见图4(b)],其前沿时间小于25毫微秒。在X光照相时间是以起爆讯号为时间零点时要考虑它可能造成的计时误差,在只计照片的幅间时间间隔时,可以不予考虑。

(2) “停止”讯号

“停止”讯号可能造成的计时误差,分三部分:(a)塑料闪烁体的发光时间的分散性,ST-406空气等效型塑料闪烁体的发光时间 t_{r1} 小于3毫微秒;(b)强流光电管的脉冲响应速度的分散性,GD-10型上升时间 t_{r2} 小于2.5毫微秒;(c)实际测得的脉冲X光波形的的前沿上升时间 t_{r3} 小于5毫微秒(t_{r3} 中包括了 t_{r2})。

(3) 传输线^[4]

在10毫微秒级的精确时间测量中,要考虑传输线造成的传输延迟,对于以聚乙烯为绝缘介质的高频同轴电缆,波速度 $v \approx 200$ 米/微秒,每米造成的延迟大约为5毫微秒,不过,这项计时误差可以通过控制各讯号传输电缆的长度加以消除。

(4) 记录仪器

利用E323A通用计数器计时,时标为20毫微秒,可能产生 ± 1 个的时标误差。

综上所述,系统测时精度高于50毫微秒,而每幅X光照片之间的计时精度达到10毫微秒 ± 20 毫微秒。

本系统以脉冲X光机的出光讯号作为时间讯号,直接测量了多台脉冲X光机同步运行时的出光时间间隔,较之基于放电电流的测量方法更直接、更精确、也更说明问题。因此,可以用这个方法标定和检查脉冲X光同步机;在需要较高的时间精度时,可以直接由本系统给出动态过程的照相时间。

利用本文介绍的脉冲X光机闪光时间的测试方法,所得到的结果较之基于脉冲X光机放电电流波形的测试结果更直接、更精确,可以直接用来描述脉冲X光机的闪光性能。

工作中得到电子所张奇同志的帮助;黄良佐、边小兵、周燕军三位同志参加了实验工作,谨致谢意。

参 考 文 献

- (1)金辉,杨业敏等,脉冲X光照相技术在爆炸力学实验中的应用,力学学报,特刊(1981)。
- (2)杨业敏,数控脉冲X光同步机,仪器仪表学报,4(1980)。
- (3)F.Jamet, G.Thomer, Flash Radiography, Elsevier scientific publishing company (1976)。
- (4)清华大学动力系,冲击大电流技术,科学出版社(1978)。
- (5)W.O.Henry, 电子系统噪音抑制技术,人民铁道出版社(1978)。

(本文1983年1月11日收到)。