文章编号：1000-5773(2005)03-0279-05

宽脉冲网络信号源及应用*

王 翔，贾路峰，傅秋卫，马 云

（中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900）

摘要：通过对电探针工作原理的分析，提出采用宽脉冲网络源代替传统窄脉冲网络源的技术措施，以解决时常遇到的“提前导通”问题。模拟计算和实验测量结果表明：尽管受到提前导通的影响，采用宽脉冲网络源的电探针信号仍然能够分辨出冲击波或飞片、自由面到达观测点的时间信息，从而给出真实可信的时间测量值。

关键词：脉冲网络源；电探针；提前导通；到达时间测量

中图分类号：O521.3 **文献标识码**：A

1 引 言

在冲击波物理和爆轰物理实验中，电探针测试方法由于技术相对成熟、安装简单、成本低，因而被广泛地用于冲击波速度、飞片速度以及自由面速度等的测量实验中[1]。近年来，由于精密物理测量的需要，特别是金属材料状态方程参数精确测量工作的需求，使电探针技术得到了进一步的完善和发展，达到了很高的测量精确度[2~4]。

但是，由于电探针技术在实际应用过程中，随着具体的使用条件和环境的变化，测量中会遇见各种各样的问题。较为突出的问题便是“提前导通”问题，即电探针先于要观测的物理事件到达预定的位置而提前“工作”，从而输出虚假信号[5,6]。

如图 1 所示，由于某种原因，探针在冲击波到达之前已经动作，输出一个前沿较缓的脉冲信号，而后面的小脉冲才是真正冲击波到达的时刻，这就使得测量结果具有很大误差，甚至造成实验失败。

为解决该问题，除了尽量避免造成电探针提前导通的物理条件外[6~8]，通过改进电探针网络源电路参数，也可以有效地提高实验测试成功率和时间测量的精确度。

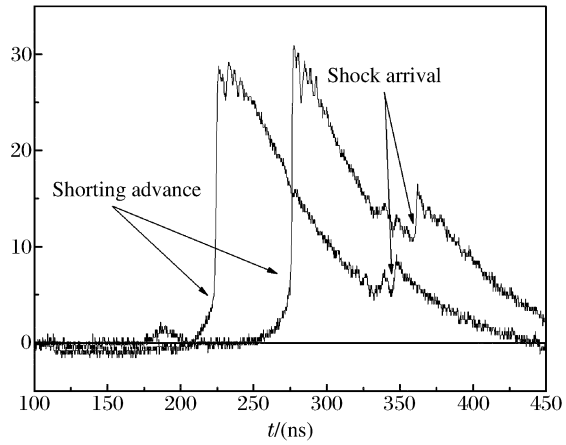


图 1 电探针“提前导通”信号波形

Fig. 1 The waveform of advance shorting of electrical pins

2 电探针测量原理及提前导通信号分析

电探针和网络源的典型电路如图 2 所示，网络偏压为 $-V$，电源限流电阻为 R_1，探针尾部匹配电阻为 R_p，示波器输入端电阻 R_L，设探针接通时的等效电阻为 R_x，示波器记录的信号电压为 V_L，它就是负载电阻 R_L 两端的电压。当忽略线路中的分布电感、电容的影响时有

* **收稿日期**：2004-02-11；**修回日期**：2004-08-17

作者简介：王 翔(1968—)，男，副研究员，主要从事冲击波物理与爆轰物理测试技术的研究.
E-mail：xiangwang_102@126.com

$$V_{\mathrm{L}}=\frac{R_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{p}}+R_{\mathrm{x}}}V_{\mathrm{C0}}\,\mathrm{e}^{-t/\tau} \tag{1}$$

$$\tau=(R_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{p}}+R_{\mathrm{x}})C \tag{2}$$

在强冲击波作用下，$R_{\mathrm{x}}=0$，故 $\tau=(R_{\mathrm{L}}+R_{\mathrm{p}})\mathrm{C}$。但如果冲击压力较低，探针导通的弛豫过程较长，$R_{\mathrm{x}}$ 不会立即为零，这会造成探针信号缓慢上升，从而影响时间测量精度，这就是金属状态方程测量中的电探针工作压力一般不小于 20 GPa 的原因[2]。

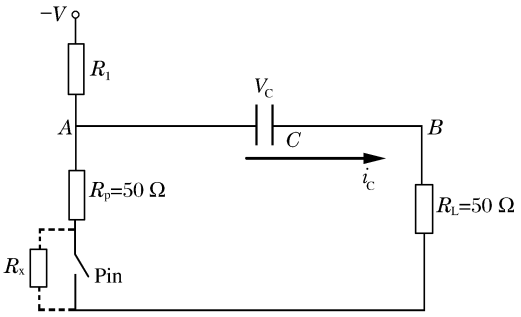


图 2 网络信号源等效电路原理图

Fig. 2 Operational schematic of pulse forming circuit

在二级轻气炮高弹速发射实验中也存在同样的问题[9]：高速弹丸压缩弹前的气体，形成脱体击波先于弹丸作用在靶上，在靶中传入一个弱的压缩波，使探针前 Mylar 膜的绝缘性遭到一定程度的破坏，即 R_{x} 在压缩波的作用下先减小到某一阻值，这样会造成探针网络电容提前“放电”，而当真正的冲击波到达时，网络电容上剩余电压较低，甚至已基本“无电可放”，从而影响冲击波到达时间的测量，这就是所谓的提前导通问题。

3 提前导通过程的模拟计算

可用图 3、图 4 所示的简化模型来描述 R_{x} 的变化规律，其中探针提前导通 50 ns。根据实际经验，绝大多数情况下提前导通时 $R_{\mathrm{x}}=30\ \Omega$。将该模型代入公式(1)，可以计算出探针信号的响应波形。分别计算了当电容分别为 2 nF 和 100 nF 的探针信号波形，还计算了提前导通 200 ns 时两种情况下的探针信号波形，计算结果见图 5、图 6。

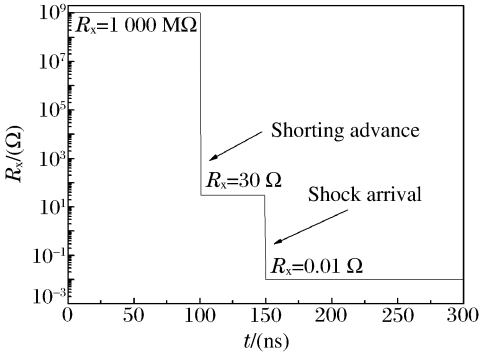


图 3 探针导通模型(提前导通 50 ns)

Fig. 3 Shorting advance mode(advance 50 ns)

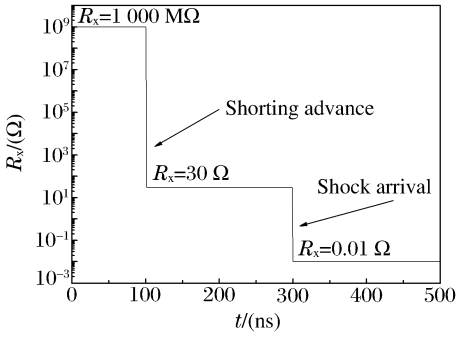


图 4 探针导通模型(提前导通 200 ns)

Fig. 4 Shorting advance mode(advance 200 ns)

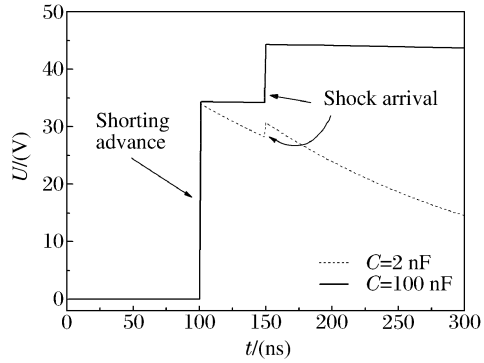


图 5 探针信号计算波形(提前导通 50 ns)

Fig. 5 Simulation waveform of pins(advance 50 ns)

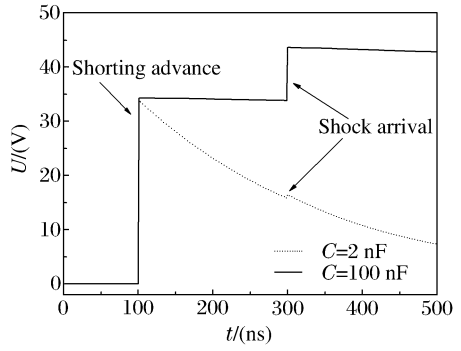


图 6 探针信号计算波形(提前导通 200 ns)

Fig. 6 Simulation waveform of pins(advance 200 ns)

从上述计算结果可见,当电容为 2 nF 以及电探针以 30 Ω 等效电阻提前导通 50 ns 时,电探针响应冲击波到达的二次起跳信号幅度较低。实际测量中由于受分布参数或受其它探针接通时干扰的影响,电探针信号的后沿存在有振荡和高频干扰等噪声(见图 1、图 9),二次起跳信号的信噪比较差。而当提前导通 200 ns 时,二次起跳信号幅度更低,其信噪比就更差了,甚至无法判读起跳时间。

当电容加大到 100 nF 时,网络脉冲宽度较宽,在示波器量程范围内可近似为方波,冲击波到达时电容上还有足够的电荷,因此二次起跳信号明显,具有较高的信噪比,因此可以得到较为精确可靠的、表示冲击波到达的二次起跳时间。换言之,计算表明:与窄脉冲网络源相比,输出近似为方波的宽脉冲网络源使电探针具有连续绝缘电阻测量的能力,可直观地反映探针导通规律,通过波形分析即可得到相应的时间信息。

4　网络信号源电路参数的改进

原网络信号源的参数为 $C=510$ pF,回路电阻 $R=100$ Ω(其中示波器匹配电阻 50 Ω,探针尾部匹配电阻 50 Ω),则电容放电时间常数 $\tau=RC=51$ ns。按电容放电规律,探针信号的脉冲底宽约为 $4\tau=200$ ns,实测波形见图 7,在加网络偏压 100 V 的情况下(此时 $V_{C0}=100$ V),信号上升时间为 1 ns 左右,幅度约为 50 V。

为得到较宽的脉冲宽度,根据公式(2),可以增加放电电阻值 R,或增加电容 C 的容量,两种效果基本相同,只是增大 R 会减低示波器记录信号的幅度,而后者除脉冲宽度增加外,其它波形参数几乎没有变化,故采取增加电容量的方案较为适宜,设计依据为上述模拟计算的结果,取 $C=100$ nF。图 8 是将 C 更换成 100 nF 时的波形。此时,$\tau=RC\approx10$ μs,脉冲宽度增加为 40 μs 左右,增加了 200 倍。

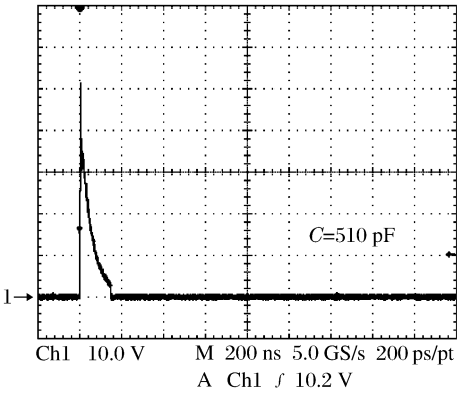


图 7　原网络对应的探针信号波形

Fig. 7　Pins waveform of narrow pulse forming circuit

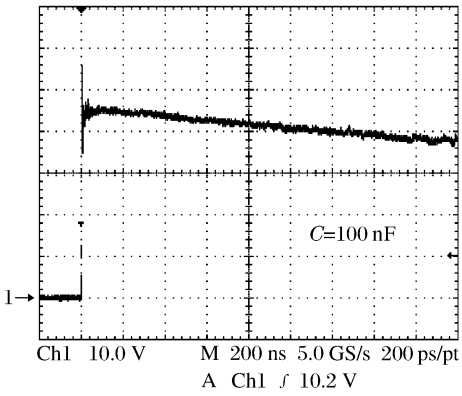


图 8　电容加大后的探针信号波形

Fig. 8　Pins waveform of broad pulse forming circuit

再看改进后探针信号的其它特性参数会不会变化,特别是关系到时间测量精度的参数——上升时间会不会受到影响? 在网络源电路图 2 中,理论上电容与探针信号的上升时间无关,仅决定放电时间的长短,应该强调的是,电容应采用无感电容,否则不同的分布电感会影响探针信号前沿。

为验证改进前后的效果,进行了多次测量及对比检验,表 1 中给出了实测数据,图 9 是两类网络源信号的比较。从图 9 和表 1 检测结果可以看到,增加电容的网络源信号波形与原波形的上升前沿非常一致,所有改动的网络源对探针信号前沿和输出幅度无影响,这说明增加电容的技术措施不会对时间测量精度带来影响,并且电路具有很好的稳定性和重复性。

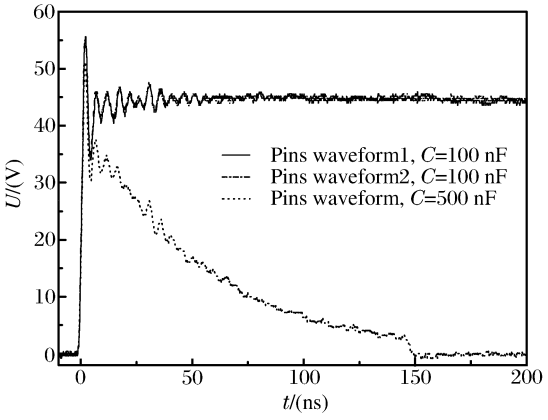


图 9　改进前后波形对比图

Fig. 9　The pin waveforms comparing the broad pulse forming circuit with the narrow pulse forming circuit

表 1 改进的宽脉冲网络检测统计表

Table 1 The statistical results of pins signals' parameter with broad pulse forming circuit

No.	Circuit 1		Circuit 2	
	t_r/(ns)	V_{max}/(V)	t_r/(ns)	V_{max}/(V)
1	1.23	53.6	1.29	52.4
2	1.19	54.0	1.29	53.6
3	1.32	51.6	1.25	54.8
4	1.11	57.6	1.18	57.6
5	1.21	51.6	1.18	51.6
6	1.12	58.8	1.22	56.4
7	1.12	54.8	1.27	52.8
8	1.17	52.8	1.14	58.0
Average	1.20	54.4	1.20	54.6

Note: The capacitance is 100 nF.

5 实际应用

在进行微物质喷射现象的实验研究中,需要准确知道自由面飞过空腔到达传感器的时间[9]。一般方法是利用 Asay 膜法或石英传感器测量微喷物质的总量和质量分布规律,同时在 Asay 膜或石英计的同一平面上安装电探针测量自由面到达时间。大量实验表明,微喷物质对电探针信号有严重影响,由于传统网络源的电路参数中充电电容偏小,探针输出仅为 100 ns 脉宽的窄脉冲,在受到微喷物质影响时,提前导通而不能有效地得到自由面到达传感器的时间。

将探针网络源中的充电电容加大,成功地测到了自由面到达传感器的时间,如图 10 所示。图中上面两个波形是用 VISAR 观测 Asay 膜在微喷物质作用下运动波形,第三个信号是反射光强监测信号,下面的信号就是采用宽脉冲网络源的探针波形。在对应 Asay 膜开始运动的时刻 t_1,表示微喷物质到达了 Asay 膜,同时也到达了电探针,使探针"提前导通"输出缓慢上升的信号。可以明显地看出,尽管受到微喷物质影响,电探针信号仍然能够输出表示自由面到达时刻(t_3)的快速二次起跳波形。而从光强监测信号上反映出 Asay 膜在自由面到达之前已经被破坏,没有激光返回光纤,自然不能给出自由面到达信息。t_4 时刻的脉冲表示自由面碰撞到了光纤探头端面。

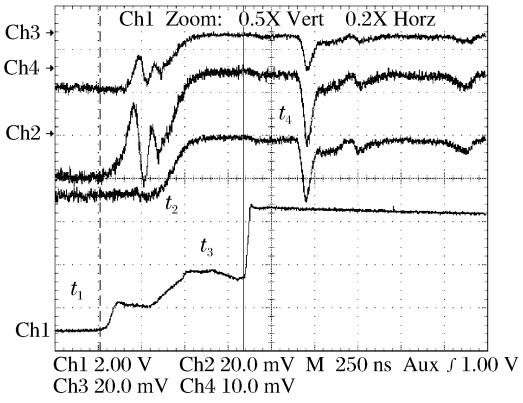


图 10 在微喷实验中宽脉冲网络源的探针信号典型波形

Fig. 10 The typical waveform of pins in ejecta experiments

此外,在二级轻气炮进行状态方程测量实验以及爆轰波形测量实验中,采用宽脉冲网络源的电探针均得到了成功应用。

6 结 论

为解决电探针"提前导通"问题,提高对探针信号的修正能力和测量精度,可采取加大网络电容的宽脉冲网络源技术。电路模型计算结果表明:当 $C=100$ nF 时,尽管电探针受到提前导通的影响,冲击波到达时网络源还能提供足够的偏压,从而可得到信噪比较高的二次接通脉冲信号。增加电容后,脉冲宽度比改动前增加了 200 倍(为 40 μs),近似为方波,而探针信号的上升前沿和输出幅度与改动前相比没有变化。

实际应用表明,宽脉冲网络源在一定程度上可以有效地解决由于各种因素造成的电探针“提前导通”问题,能够较为精确可靠地测量冲击波、飞片或自由面的到达时间,从而扩展了电探针的应用范围。

References:

[1] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State(2nd ed) [M]. Beijing:Science Press,1999. 199－200. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引(第二版) [M]. 北京:科学出版社,1999. 199－200.

[2] Mitchell A C,Nellis W J. Diagnostic System of the Lawrence Livermore National Laboratory Two-Stage Light-Gas Gun [J]. Rev Sci Instrum,1981,52(3):347－359.

[3] Mitchell A C,Nellis W J. Shock Compression of Aluminum,Copper and Tantalum [J]. J Appl Phys,1981,52(5):3363－3374.

[4] Wang J G. An Accurate Measurement Technique for Shock Hugoniot [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,1995,9(4):298－295. (in Chinese)
王金贵. 冲击压缩性的高精度测量技术 [J]. 高压物理学报,1995 ,9(4):289－295.

[5] Wang X,Wang W,Fu Q W. A System Utilizing Laser Diode For Gas-Gun Projectile Velocity Measurement [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2003,17(1):75－80. (in Chinese)
王　翔,王　为,傅秋卫. 用于一级气体炮的弹速激光测量系统 [J]. 高压物理学报,2003,17(1):75－80.

[6] Tang J Y,Wu S Z,Wang F H,et al. The Effect of Shock-Heated Gaseous Helium and Argon on Pin Shortening [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2000,14(4): 285－289. (in Chinese)
唐敬友,伍绍珍,王藩侯,等. 冲击波加热的氦气与氩气对电探针导通的影响 [J]. 高压物理学报,2000,14(4):285－289.

[7] Sun C W,Wei Y Z,Zhou Z K. Application Detonation Physics [M]. Beijing:Science Press,2000. 177－180. (in Chinese)
孙承伟,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理 [M]. 北京:科学出版社,2000. 177－180.

[8] Wang W,Wang X. Research on the Precursor Gas Accompanied with the Launch of Two-Stage Gas Gun [J]. ChineseJournal of High Pressure Physics,2004,18(1):94－96(in Chinese)
王　为,王　翔. 电探针提前导通现象的初步研究 [J]. 高压物理学报,2004,18(1):94－96.

[9] Asay J R,Mix L P,Perry F C. Ejection of Material from Shocked Surfaces [J]. Appl Phys Lett,1976,29(5):284－287.

[10] Fowles G R,Duvil G E,Asay J,et al. Gas Gun for Impact Studies [J]. Rev Sci Instrum,1970,41(7):990－992.

Broad Pulse Forming Circuit and Its Application

WANG Xiang,JIA Lu-Feng,FU Qiu-Wei,MA Yun

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics,CAEP,Mianyang* 621900,*China*)

Abstract:A measurement technique of electrical shorting pins based on broad pulse forming circuit is described here. The problem of pins shorting advance can be solved with this technique in place of the conventional narrow pulse forming circuit. The results of simulations and experiments show that the arrival time of shock-wave,flyer or free-surface can be determined precisely and reliably from the pins' signal with broad pulse forming circuit regardless of shorting advance somewhat.

Key words:pulse forming circuit;electrical pins;shorting advance;measurements of arrival time