

文章编号: 1001-1455(2005)06-0564-05

光纤色散及损耗对光纤探针信号传输的影响*

王荣波, 何莉华, 田建华, 吴廷烈, 李泽仁

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 对光纤色散及损耗给光纤探针信号前沿和幅度造成的影响进行了理论估算。通过实验对这种影响进行了实际测量。实验中采用四种长度不同的光纤。结果表明, 在采用数值孔径为 0.37 的阶跃石英光纤传输时, 光纤色散对光纤探针信号前沿的展宽为 54 ± 14 ns/km, 光纤损耗对光纤探针光信号的影响为 4.4 ± 0.2 dB/km。因此, 在光纤需要长距离传输时, 有必要采取措施对色散的影响加以控制。

关键词: 爆炸力学; 光纤色散; 冲击波; 光纤探针; 损耗; 上升时间

中图分类号: O389

国标学科代码: 130 · 3520

文献标志码: A

1 引 言

光纤探针技术由于具有响应快且不受电磁干扰的优点, 在冲击波物理和爆轰物理实验中得到越来越广泛的应用。该技术可用于测量飞片速度^[1]、冲击波速度^[1]、飞片平面度、炸药爆速和爆轰波形^[2]等。它可以对非金属材料进行直接测量, 在较低的冲击压力下它的响应仍然保持在纳秒的水平。在信号需要长距离传输的情况下, 由于光纤的带宽很宽且芯径细, 采用光纤传输信号的光纤探针比采用电缆传输信号的电探针就更具优势^[3]。

光纤探针的光信号在光纤中传输的过程中, 由于光纤色散的影响, 信号将会被展宽, 影响测试的精确度; 同时由于光纤的损耗, 光信号的强度也会随着传输距离的增加而降低, 从而使信号的信噪比变差, 影响判读的精确度。在一些特殊的场合, 光纤探针的光信号需要通过光纤传输 1~2 km 后才能到达记录系统, 在这种情况下, 光纤色散和损耗的影响尤为明显。因此, 有必要对色散和损耗对光纤探针信号的影响进行理论估算和实验研究, 以确定主要的影响因素, 并据此提出控制措施。使快响应光纤探针在长距离传输的场合也能达到较高的测试精确度。

2 光纤探针原理及系统组成

光纤探针测量原理^[1,4~5]是, 当冲击波或飞片撞击光纤端面时, 光纤探针产生一个瞬时光信号, 这个光信号经光纤传输到光电探测器, 转换为电信号, 再由示波器记录, 通过判读就可以知道冲击波或飞片到达光纤探针的时刻。

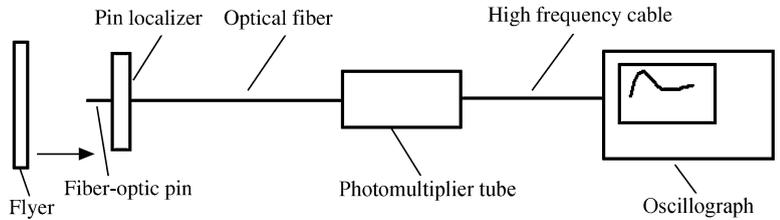


图 1 单路光纤探针测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single channel fiber-optic pin measurement system

图 1 给出了单路光纤探针测量系统的示意图。由图可知, 示波器最终记录的电信号的上升时间除了与光信号上升时间有关外, 还将受到传输光纤色散对信号的展宽、光电倍增管的脉冲上升时间、高频电缆对信号前沿的拉宽效应以及示波器脉冲上升时间等因素的影响。示波器信号最终给出的信号上升

* 收稿日期: 2004-12-06; 修回日期: 2005-01-26

作者简介: 王荣波(1976—), 男, 助理研究员。

时间由这些因素共同决定,它可由下式来进行计算

$$t_{rr} = \sqrt{t_{rs}^2 + t_{rd}^2 + t_{rp}^2 + t_{rc}^2 + t_{ro}^2} \quad (1)$$

式中: t_{rr} 为示波器最终记录信号的上升时间; t_{rs} 为光信号的上升时间; t_{rd} 为光纤色散对光信号前沿的展宽值; t_{rp} 为光电倍增管脉冲上升时间; t_{rc} 为电缆对信号前沿的拉宽; t_{ro} 为示波器的脉冲上升时间。

整个信号记录系统对最终示波器给出的信号的前沿的贡献不大于 1 ns。在信号传输和记录系统不变的情况下,影响示波器最终信号上升时间的主要因素是光纤探针的光信号上升时间与光纤色散对信号前沿的展宽。由文献[1]、[4]、[5]可知在 30 GPa 以上的冲击压力下,快响应光纤探针的光信号的上升时间一般是亚纳秒的,长距离传输时光纤色散值比它要大得多。

光纤探针系统最终给出的信号幅度跟传输到光电倍增管的光功率是成正比的。在记录系统不变的情况下,光纤损耗是影响信号幅度的关键因素。

3 光纤对光纤探针信号传输的影响的理论估算

3.1 光纤色散对光纤探针信号传输的影响

光纤色散包括模间色散、材料色散、波导色散和偏振色散^[6]。对于光纤探针测试系统所用的多模石英光纤而言,色散的主要贡献者是模间色散和材料色散。下面对这两种色散进行估算。

由光纤色散理论^[6]可知,单位长度光纤的材料色散对谱宽为 $\Delta\lambda$ 的光源脉冲展宽为

$$\Delta\tau_{\text{mat}} = -\frac{\lambda\Delta\lambda}{c} \frac{d^2n(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (2)$$

式中: $\Delta\tau_{\text{mat}}$ 为单位长度光纤的脉冲展宽; λ 为波长; c 为光速; $n(\lambda)$ 为波长为 λ 时的折射率。

光纤探针光信号的光谱主要在可见光的范围内(0.40~0.75 μm)^[5],记录系统所用的光电倍增管的阴极波长响应范围为 0.28~0.65 μm 。对材料色散有贡献的波长范围是 0.40~0.65 μm 。则由(2)式可知材料色散对光纤探针信号底宽展宽为

$$\tau_{\text{mat}} = \int_{0.40}^{0.65} -\frac{\lambda}{c} n''(\lambda) d\lambda = -\frac{1}{c} [\lambda n'(\lambda) - n(\lambda)]_{0.40}^{0.65} \quad (3)$$

熔石英的色散公式为

$$n^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2} \quad (4)$$

式中: λ 的单位为 μm 。将上式求导并连同上式一起代入式(3)可得 $\tau_{\text{mat}}(0.40, 0.65) = 132 \text{ ns/km}$ 。

模间色散是由于单个频率上每个模色的群时延不同引起的。对于光纤探针系统常用的阶跃型光纤而言,通常用下式估算由模间色散带来的单位长度的脉冲展宽

$$\tau_{\text{mod}} = \frac{n_1\Delta}{c} \quad (5)$$

式中: n_1 为光纤芯的折射率; Δ 与光纤数值孔径 NA 有关,它可由下式计算

$$\Delta = \frac{NA^2}{2n_1^2} \quad (6)$$

光纤探针所用光纤的数值孔径 $NA=0.37$, $n_1=1.405$,则由(5)式可以计算出由模间色散引起的光纤探针信号脉冲展宽为 162 ns/km。

综上所述,光纤色散对光纤探针光信号的展宽为

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{mat}}^2 + \tau_{\text{mod}}^2} = \sqrt{132^2 + 162^2} = 209 \text{ ns/km} \quad (7)$$

该结果指的是光纤色散对光信号底宽的展宽,对于测试而言,最主要的是色散对光信号前沿的展宽,因为这关系到信号判读的精确度。假设光纤探针光信号的前沿与底宽的比值为 k ,则长度为 l 的光纤色散对光信号前沿的展宽为

$$t_{rd}(l) = k\tau l \quad (8)$$

式中的 k 值可以通过实验来确定。

3.2 光纤损耗对光纤探针信号传输的影响

光纤损耗定义为长度 l (km)的光纤输出端光功率 P_{out} 与输入端光功率 P_{in} 的比值,用分贝表示为

$$\alpha = \frac{10}{l} \lg \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (9)$$

对于长度分别为 l_1 、 l_2 的光纤来说,在输入功率相同的情况下,其输出功率 P_1 、 P_2 之比可由上式推导出来。由于光纤探针系统最终由示波器给出的信号幅度与光信号功率成正比,在实验装置相同的情况下,光纤长度为 l_1 、 l_2 的两个测试通道给出的信号幅度 V_1 、 V_2 之比可由下式表示

$$\lg \frac{V_1}{V_2} = \frac{\alpha}{10} (l_1 - l_2) \quad (10)$$

4 实验研究

4.1 实验装置

为了确定光纤色散对光纤探针光信号前沿的影响因子和光纤传输对光纤探针光信号的损耗因子,设计了如下实验来考察光纤色散对光纤探针信号的影响。实验布局如图2所示。

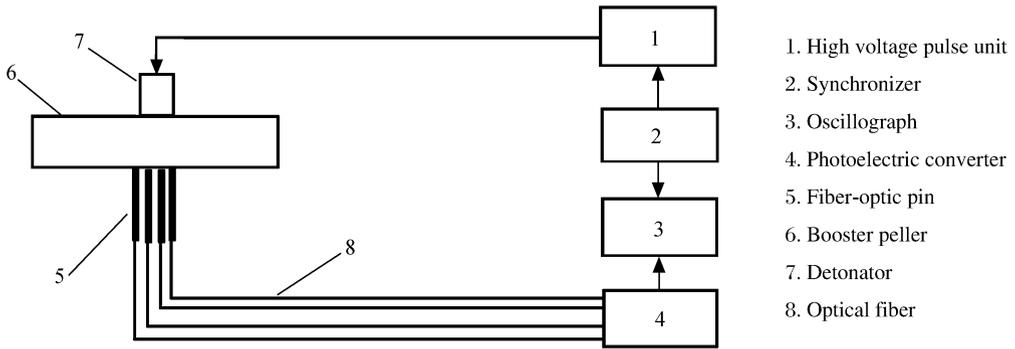


图2 实验布局图

Fig. 2 Schematic diagram of experiment

实验中采用了 13.7、22.7、123.7、943.8 m 这四种长度的阶跃型石英光纤来传输光纤探针的光信号。实验采用 $\varnothing 32 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ 的特屈儿药柱作为加载装置,由于是一点起爆,爆轰波阵面应为球面。为了将球面爆轰给四根光纤探针信号造成的差异降到最低,四根光纤探针安装在一个 $\varnothing 1.5 \text{ mm}$ 的圆孔中。

4.2 实验结果及分析

实验中取得信号如图3所示。这四个信号的前沿时间、幅度和起跳时刻均列于表1中。可见光纤色散对信号前沿的影响及光纤损耗对信号幅度的影响都是比较明显的。

表1 实验取得的信号数据

Table 1 Data of signals obtained in experiment

光纤长度/m	信号幅度/V	信号上升时间/ns	信号起跳时刻/ns
13.7	4.06	2.09	5409
22.7	4.04	2.42	5453
123.7	3.66	8.29	5920
943.7	1.58	39.62	9750

由公式(1)和(8)得

$$t_{rr} = \sqrt{t_{rs}^2 + (k\tau l)^2 + t_{rp}^2 + t_{rc}^2 + t_{ro}^2} \quad (11)$$

由于采用的记录系统是相同的,可以认为 t_{rp} 、 t_{rc} 、 t_{ro} 对于两根探针是相同的,在加载装置的影响降到最低的情况下可以认为 t_{rs} 是相同的。于是可以得到

$$k = \sqrt{(t_{rr}^2 - t_{rr}'^2) / (\tau^2 (l^2 - l'^2))} \tag{12}$$

将表 1 中的信号前沿时间和光纤长度数据代入式(12)，计算得到光纤探针 $k = 0.26 \pm 0.07$ $(\text{km})^{-1}$ 。则光纤色散对光纤探针信号前沿的展宽为 $k\tau = 54 \pm 14$ ns/km。

将表 1 中的信号幅度值和光纤长度值代入式(10)，计算得到光纤对光纤探针光信号的损耗为 4.4 ± 0.2 dB/km。

从实验结果可以看出，在长距离传输时，光纤的色散将对光纤探针信号的前沿产生较大的影响，进而影响测试的精度。有必要采取措施控制色散带来的影响。采用梯度型光纤传输光信号是一种有效的方法。由于梯度型光纤具有自聚焦的特性，它所引起的模间色散值比阶跃型光纤要小得多。由梯度型光纤的色散理论^[6]可以计算出，数值孔径 $NA = 0.37$ ，中心折射率 $n(0) = 1.5$ 的梯度型石英光纤由模间色散引起的光信号展宽仅为 2.3 ns/km。这样材料色散成为影响光纤探针信号前沿的最主要因素。由公式(3)可知材料色散值与光源的谱宽有关，通过添加窄带滤光片限制光电倍增管接受到的光信号的谱宽将是减小色散的有效方法。表 2 给出了不同波长宽度下石英光纤的材料色散值。从表 2 可以看出，限制光源谱宽的方法对减小材料色散是有很有效的。结合光纤探针光信号光谱和所用光电倍增管阴极响应曲线，可知对于光纤探针系统，选择 $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 的波长范围是最合适的。这样既可以将色散的影响降到可以接受的范围内，也不致使信号幅度损失过大。

5 结 论

采用光纤传输对光纤探针信号的前沿时间及信号幅度有较大的影响。对目前实验中使用较多的数值孔径为 0.37 的阶跃石英光纤而言，光纤色散对光纤探针信号前沿的展宽为 54 ± 14 ns/km，光纤损耗对光纤探针光信号的影响为 4.4 ± 0.2 dB/km。在光纤需要长距离传输时，有必要采取措施对色散的影响加以控制。

参考文献：

[1] 王荣波, 吴廷烈, 王贵朝, 等. 冲击作用下快响应光纤探针研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(4): 375—379.
 WANG Rong-bo, WU Ting-lie, WANG Gui-chao, et al. A fast rise time fiber-optic pin for shock wave measurement[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 375—379.

[2] 王荣波, 王贵朝. 测量 10 GPa 爆压炸药爆轰波波形的光电技术[J]. 爆轰波与冲击波, 2003, (4): 159—163.

[3] Veaser L R, Clark D A, Holtkamp D B, et al. Subcritical plutonium experiment at the Nevada test site[R]. Physics Division Progress Report, California: California university, 1997—1998: 94—101.

[4] Sandival J S, Idzorek G C, Ortega D. Fiber Optic Diagnostic for Z-experiments[A]. IEEE International Conference on Plasma[C]. New Mexico, United States: Los Alamos National Laboratory, 2001: 785—787.

[5] Roeske F. A Fast Rise-time Fiber Optic Pin[A]. James M. Eleventh International Symposium on Detonation[C]. Arlington, Virginia: Office of Naval Research, 1998: 422—427.

[6] 张明德, 孙小菡. 光纤通信原理与系统[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999: 48—60.

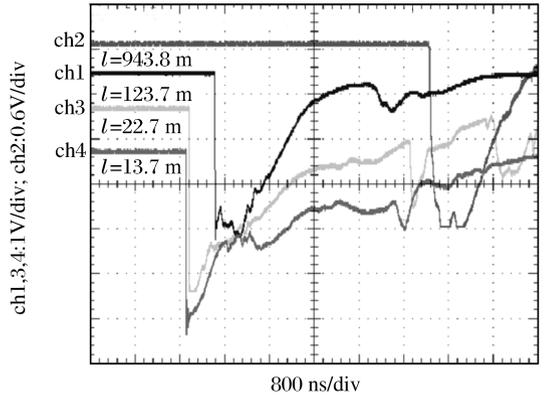


图 3 实验取得的信号

Fig. 3 Signals obtained in experiment

表 2 不同波长范围下光纤的材料色散值及其对光纤探针信号前沿的展宽值

Table 2 Dispersion of quartz optical fiber with various wavelength

波长范围 / μm	材料色散值 / (ns/km)	信号前沿展宽值 / (ns/km)
0.45~0.55	55	14
0.55~0.65	30	7.8
0.40~0.50	79	21
0.50~0.60	40	10

Influence of the optic fiber dispersion and loss on the fiber-optic pin signal transmission

WANG Rong-bo, HE Li-hua, TIAN Jian-hua, WU Ting-lie, LI Ze-ren
(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Influence of the optical fiber dispersion and loss on the transmission of fiber-optic pin signals has been estimated in theory. The influence has been measured by experiment. Four optic fibers of different lengths have been used in this experiment. The results indicate that when a step index quartz optical fiber with $NA=0.37$ is used, the influence of the optic fiber dispersion on rise time of signals of fiber-optic pin is 54 ± 14 ns/km, the loss of optic signals is 4.4 ± 0.2 dB/km. So when a long fiber is used, a method that can reduce the optic fiber dispersion is necessary.

Key words: mechanics of explosion; optic fiber dispersion; shock wave; fiber-optic pin; loss; rise time

* Corresponding author: WANG Rong-bo

E-mail address: wangrbo@tom.com

Telephone: 0816-2484178

数字延时同步机介绍

主要用于测试系统、控制系统中多台仪器的同步触发、延时同步、时序控制。

本机以 8031 单片机为核心,采用大规模集成电路将控制与计时电路集成在一块芯片内的高集成度高精度的延时同步设备。可提供二路同步输出、三路独立延时输出,每路延时均有两路同步输出。延时范围 $5\mu\text{s} \sim 599.99\mu\text{s}$,分辨率为 10 ns。

该机从 90 年代研制成功,经十多年的应用实践考核和改进,已完善,在所、院内广泛使用,并在国内许多重要科研生产部门推广应用,《数字延时同步机》已达到国内先进水平,荣获 2002 年军队科学技术进步奖三等奖。



数字延时同步机

主要技术指标

同步输出:第一路 $5 \sim 10$ V(50Ω) 极性(+) 前沿 ≤ 50 ns 脉宽 ≥ 100 ns

第二路 > 100 V(50Ω) 极性(+) 前沿 ≤ 50 ns 脉宽 ≥ 100 ns

延时输出:三个独立延时通道,每通道有两路同步输出

输出脉冲幅度: > 100 V(50Ω), 前沿 ≤ 50 ns, 脉宽 ≥ 100 ns

延时范围: $5 \mu\text{s} \sim 60$ ms

分辨率: 10 ns($5 \mu\text{s} \sim 599.99 \mu\text{s}$)

$1 \mu\text{s}$ ($600 \mu\text{s} \sim 60$ ms)

延时误差: ± 10 ns + 时基误差 \times 延迟时间($5 \sim 599.99 \mu\text{s}$)。

$\pm 1 \mu\text{s}$ + 时基误差 \times 延迟时间($600 \mu\text{s} \sim 60$ ms)。

(时基误差 $\leq 1 \times 10^{-4}$)

触发方式:手动触发

外触发:脉冲幅度 > 10 V, 脉宽 ≥ 100 ns, 前沿 ≤ 50 ns, 极性(+)

现已研制成功延时精度为 1 ns 的样机。