

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.06.006

新型高精度多段光纤爆速仪的设计*

姜爱华 焦 宁 王 高 李仰军 刘丽双
中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室(山西太原,030051)

[摘 要] 为了提高炸药的性能,设计一种新型高精度多段爆速仪,以光纤作为传感器采集爆炸信号,通过峰值电压采样保持电路,保证了光纤获取爆炸信号波形峰值间的计时,并由 FPGA 进行数据处理,提高了系统的测试精度和稳定性,简化了电路设计和调试。文中对峰值电压采样保持电路、光电转换部分电路进行了详细的设计,并结合实验和误差对比分析系统的精度,结果表明本系统在精度上有很大的提高。

[关键词] 多段爆速 光纤 FPGA 高精度

[分类号] TD235.2+2

引言

炸药爆速的常用测量方法有两种:电测法和导爆索法,另外还存在着高速摄影法、连续示波法、光纤光栅法等^[1-3]。导爆索法测试精度不高,自动化程度低,不易客观地说明问题。电测法多用单片机为主处理芯片,用电探针作为信号采集方式;单片机一般计时误差都在 0.1 μs 以上,精度不高,并且在多段测量时外围电路复杂,调试困难^[4];电探针无法确定电离的精确位置,进而不能准确确定计时的起始和结束时间,严重影响测试精度,并且电磁干扰强的情况下电探针对弱电离信号难以采集^[5]。

鉴于单段爆速仪无法从测试结果中分析出爆速的稳定性,且计时精度不高;而光纤直径小,质量轻,电绝缘性好,可快速传递光信号,不受电磁干扰,准确确定爆炸传导的位置,耐腐蚀,以及 FPGA 的计时精度高^[6];本文提出一种基于 FPGA 计时晶振 50 MHz 的高精度多段光纤爆速仪的设计方案,并利用实验验证方案的可行性^[7]。

1 测试原理

炸药爆炸时伴有强烈的光效应。通过光纤端面将定长两点间爆轰波波阵面的闪光信息向外传导^[8]。经过光电转换和峰值电压采样保持电路,最多可精确应用于 11 路爆炸信号,利用 10 个计数器分别计算 11 个脉冲间的时间间隔,进而计算各段的爆炸速度,LCD 显示各段爆速及多段爆速的平均速度,通过 4×4 键盘输入靶距和选择显示页面。测试系统的连接如图 1 所示。

1.1 多段计时原理

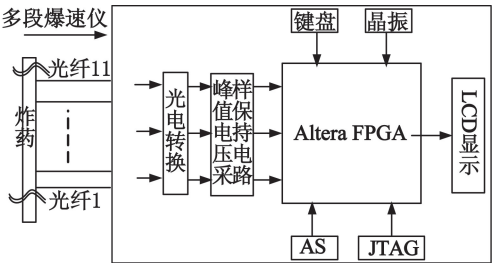


图 1 测试系统连接示意图

Fig.1 Schematic diagram of test system

爆速仪的计时部分是爆速仪的核心部分,利用前端处理电路精确确定计时的起始部位,并采用 10 个计数器高精度地对各段时间分别计算,对于单片机来讲需要 10 个外部中断,这是很不容易做到的。系统的多段时钟计时原理如图 2,当第 1 根光纤采集到爆炸的光信号时,FPGA 内部设定的对应于第 1 段靶距的计数器开始计数。当第 2 根光纤采集到爆炸的光信号时,对应于第 1 段靶距的计数器停止计

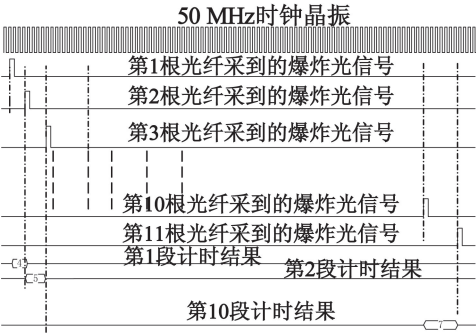


图 2 时钟计时原理

Fig.2 Clock timing schematic diagram

* 收稿日期: 2013-06-05
作者简介: 姜爱华(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向:光电检测。E-mail:jiangaihua0408@163.com

数,对应于第 2 段靶距的计数器开始计数,并将计数结果储存,为爆速的运算做准备。以此类推,完成 10 段时间的计算。系统的计时精度可达到 0.02 μs 。由于系统采用独立的 10 个计数器计时,使得系统不易出现因少采集到中间的某一个爆炸信号而无法给出正确的爆炸速度的情况,提高了系统的稳定性和可靠度。

1.2 多段爆速计算

键盘设定靶距,各段靶距除以相应计数器所测得的时间,算出每一段的爆炸速度。最后计算 10 段爆炸速度的平均值,以减少测量的随机误差,提高系统测试精度。

$$v_i = \frac{S_i}{t} = \frac{S_i}{K_i T}; \tag{1}$$

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6 + v_7 + v_8 + v_9 + v_{10}}{10}。 \tag{2}$$

式中: v_i 为炸药的第 i 段爆炸速度; S_i 为预设的第 i 段光纤探针之间的距离; K_i 为内部计数器记得的晶振时钟脉冲的个数; \bar{v} 为 10 段爆炸速度的平均速度; T 为时钟周期。

2 系统设计

系统设计主要是爆轰波光信号获取部分的设计和峰值电压采样保持电路部分的设计。爆轰波光信号获取部分以光纤获取信号、光电转换、峰值电压采样保持电路为核心,是信号的来源部分,直接关系到系统的精度。信号处理部分以 FPGA 为核心,通过 FPGA 对采集的信号进行处理,最终得出爆速。

2.1 光电转换

光电转换部分将爆轰产生的光信号转换为电信号并对其进行放大。设计利用 400 nm 到 1100 nm 的 PIN 光敏二极管,工作在光电导模式下,这样既可以减小光生载流子的渡越时间和集结电容,又可以在负载电阻 R_L 两端得到随光照度变换的电信号,从而完成光信号到电信号的转换,光电转换原理如图 3。

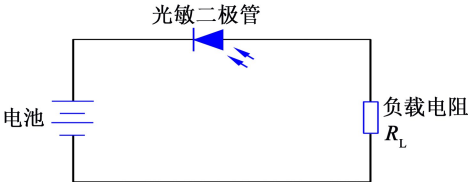


图 3 光电转换原理

Fig. 3 Photoelectric conversion schematic diagram

2.2 峰值电压采样保持电路的设计

光纤作为探测器,它的最大受光角可达 60°,当爆轰波的波阵面的光信号传到光纤的垂直位置(即一段靶距的起始/结束位置)时光通量达到最大,也

就是光电转换后电信号波形的峰值位置,利用采样保持芯片 HTS-0010 的输出电压和输入电压通过 TLC374 进行比较,当 $V_i > V_o$ 时,TLC374 输出高电平,送到 HTS-0010 的逻辑控制端 5 脚,使 HTS-0010 处于采样状态;当 V_i 达到峰值而下降时, $V_i < V_o$,电压比较器 TLC374 输出低电平,HTS-0010 的逻辑控制端置低电平,使 HTS-0010 处于保持状态,比较器 TLC374 的输出低电平为计时的起始和结束信号。

当电路处于保持状态也就是爆炸信号的峰值位置,FPGA 开始计时,高精度地测量出爆炸信号峰值之间的时间差。峰值电压采样保持电路如图 4。

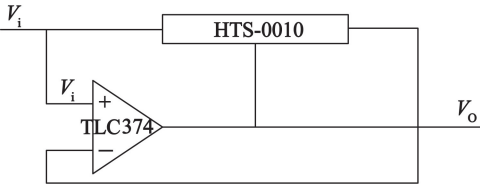


图 4 峰值电压采样保持电路

Fig. 4 Peak voltage sample-holding circuit

3 实验验证

某靶场对导爆索爆速进行实验,靶距设定为 1000 mm,利用 3 个单段电探针爆速仪与多段光纤爆速仪同时测量爆炸速度,光纤爆速仪用 20 m 的光纤探针作为探测器,依次采集导爆索爆炸的光信号,测量爆速,如表 1。从表 1 可以看出,3 个单段光纤爆速仪测量的数据和多段光纤爆速仪测试的数据一致性较好,证明了该方法的可行性。

表 1 速度对比

Tab. 1 Speed comparison

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
某型号爆速仪速度	多段光纤爆速仪速度
7047.32	7034.79
7036.95	7027.91
7052.84	7047.93

4 系统精度分析

精度反映测量结果与真值的接近程度,同误差的大小相对应。系统误差和随机误差同时存在时,多次重复测量系统误差为固定的值 a ,而随机误差对称分布在以系统误差为中心的 2δ 内,所以对随机误差和系统误差分别分析对比,体现基于 FPGA 的光纤爆速仪与其他爆速仪相比系统精度的优势。

在系列测量中算术平均值

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}。 \tag{3}$$

被测量的真值为 L_0 ,测量值为 l_i ,则测量当中的

随机误差为 δ_i 。

$$\delta_i = L_0 - l_i; \quad (4)$$

$$L_0 = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}。 \quad (5)$$

由正态分布随机误差的特征可知: $n \rightarrow \infty$ 时, 有

$$\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} \rightarrow 0, \text{ 所以 } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} \rightarrow L_0。$$

对爆速进行无限次的测量就可以得到不受随机误差影响的测量值, 由于实际上都是有限次测量, 所以多段光纤爆速仪每次最多测量 10 个结果, 然后求平均值, 这样大大减小了随机误差的出现, 从而使测量的爆速值更接近于真值。

本系统的系统误差主要存在于系统的计时误差, 电探针的爆速仪不能确定电探针通断的确定位置, 所以计时的时间间隔存在误差, 而常见的光纤爆速仪均为同固定的比较电平相比后给出信号控制计时的开始和结束, 所以误差也较大。

一般测量炸药爆速时靶距均在 50 mm 以上, 工业炸药爆速为 2300 m/s 到 8000 m/s, 设被测炸药的爆速为 6000 m/s, 则两靶间爆轰波传播的时间为: $t_1 = 50 \times 10^{-3} / 6000 = 8.3 \mu\text{s}$, 本测试仪晶振为 50 MHz, 计时的绝对误差为 $\pm 0.02 \mu\text{s}$, 所以测时相对误差为 $\pm 0.24\%$, 常用的单片机爆速仪的晶振为 10 MHz, 计时绝对误差为 $\pm 0.1 \mu\text{s}$, 所以测时的相对误差为 $\pm 1.2\%$ 。相比单片机系统, 基于 FPGA 的多段光纤爆速仪的相对误差精度有很大的提高。

通过基于 FPGA 的多段光纤爆速仪的系统误差分析, 可以看出基于 FPGA 的多段光纤爆速仪在系统的随机误差和系统误差都有显著的提高。

5 结语

基于 FPGA 的多段光纤爆速仪与传统爆速仪相比具有精确确定爆炸计时位置、计时精度高、抗电磁干扰强、多段测量结果独立等特点, 使得测量精度、

稳定性、可靠性都大幅提高。

参 考 文 献

- [1] 王星河. 光纤爆速仪在导爆索爆速测试中的应用[J]. 爆破器材, 2011, 40(6): 27-28.
Wang Xinghe. Application of fiber optical detonation velocity meter in the detonation velocity measurement of detonating cord [J]. Explosive Materials, 2011, 40(6): 27-28.
- [2] Rodriguez G, Sandberg R L, McCulloch Q, et al. Chirped fiber bragg grating detonation velocity sensing [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(1): 015003-015012.
- [3] Lebedev V B, Feldman G G, Karpov M A, et al. Application of K008 camera in diagnostics of shock and detonation waves [J]. Measurement Techniques, 2007, 50(5): 524-528.
- [4] 丁建宏, 周广来, 赵晓东. 单片机在测试炸药爆速中的应用[J]. 爆破器材, 1998, 27(2): 1-3.
Ding Jianhong, Zhou Guanglai, Zhao Xiaodong. Application of microprocessor to the measurement of detonation velocity [J]. Explosive Materials, 1998, 27(2): 1-3.
- [5] 高志强, 王高, 魏林, 等. 新型光纤爆速仪的设计与应用[J]. 火工品, 2011(3): 43-45.
Gao Zhiqiang, Wang Gao, Wei Lin, et al. Design and application of a new fiber detonation velocity meter [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2011(3): 43-45.
- [6] 高志强. 基于 FPGA 的新型单段光纤爆速仪设计[D]. 太原: 中北大学, 2011.
Gao Zhiqiang. Design of a new single fiber detonation velocity meter based FPGA [D]. Taiyuan: North University of China, 2011.
- [7] 顾泽慧, 高见. 基于 CPLD 的多通道智能爆速仪的设计[J]. 工业控制计算机, 2011, 24(10): 106-107.
Gu Zehui, Gao Jian. Multi-channel intelligence explosive rate instrument of based on CPLD [J]. Industrial Control Computer, 2011, 24(10): 106-107.

Design of a New High-precision Multiple Fiber Optical Detonation Velocity Meter

JANG Aihua, JIAO Ning, WANG Gao, LI Yangjun, LIU Lishuang

Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of Ministry of Education,

North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] In order to improve the performance of dynamite, a new high-precision multiple detonation velocity meter was designed. Fiber optical was used as the detonator signals received by the transducer. By peak voltage sample-holding circuit, the time between wave peaks of detonator signals obtained from fiber optical was identified, and the data were processed by FPGA. By this means, the test accuracy and stability of the system were improved, and the circuit design and debugging were simplified. In this paper, peak voltage sample-hold circuit and photoelectric conversion circuit were designed in detail. The precision of the system was comparatively analyzed combining with experiments and error. The results show that the system ensures a great improvement in accuracy.

[KEY WORDS] multiple detonation velocity, fiber optical, FPGA, high precision