

亚毫米级弹丸光电探测技术

任磊生, 罗锦阳, 罗庆, 龙耀, 黄洁

(中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

摘要:本文在片光遮挡式弹丸探测技术基础上发展了光电阵列探测亚毫米级弹丸技术, 论述了光电阵列探测亚毫米弹丸的技术原理, 详细介绍了光电阵列探测系统的探测光路和探测电路设计方案, 研制了光电阵列探测系统的动态试验验证装置。在超高速碰撞靶上开展了动态验证试验, 试验结果表明, 采用光电阵列探测技术, 大幅提高了弹丸信号的信噪比, 能够可靠探测直径为 0.6mm 的高速弹丸, 通过分析表明该技术能可靠应用于直径为 0.1mm 高速弹丸的探测。

关键词:光电阵列; 探测; 亚毫米弹丸; 碰撞靶

中图分类号: TJ06

文献标识码: A

Research on photoelectric detection of submillimeter projectile

Ren Leisheng, Luo Jinyang, Luo Qing, Long Yao, Huang Jie

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: The single flake light projectile detecting technology is used for measuring the projectile velocity exactly in hypervelocity impact test that are usually carried out for space debris research. For detecting projectiles with diameter less than 1mm, we develop the photoelectric array projectile detecting technology based on the single flake light projectile detecting technology. The key problem of detecting projectile with diameter less than 1mm is to increase the intensity of detected signal. It could be resolved by increasing the ratio of the projectile diameter to the flake light width. A test device for the photoelectric array detection system is developed and installed at the hypervelocity ballistic range. A series of tests were carried out at the hypervelocity range, which show that the SNR is enhanced and projectile with diameter of 0.6mm was able to be reliably detected with the photoelectric array detection technology. Data analysis shows that the technology can be used for reliably detecting projectile with diameter of 0.1mm.

Key words: submillimeter projectile; detecting; photoelectric array; collide range

0 引言

通过在地面靶室进行航天器抗空间碎片防护性能试验研究是提高航天器防护水平和生存能力的有效途径之一。就目前国内外的技术水平而言, 开展航天器抗空间碎片防护性能和毁伤机理试验最成熟的设备是超高速碰撞靶。在超高速碰撞靶的模拟试验中, 只有成功探测弹丸, 才能对弹丸进行速度测量和控制其他测试设备测量撞击过程的瞬态参数。

目前国内外对弹丸无干扰探测的方法主要有高速摄影法、磁感应法和光电探测法等多种技术途径。高速摄影法是采用炮口火光启动高速摄影机, 利用高速相机, 拍摄弹丸姿态, 然后通过计算照片中弹丸位

置的改变量和拍摄间隔时间, 得到弹丸速度。该方法一是价格太高, 一般要几百万元; 二是亚毫米弹丸在高速摄影底片中判读难度较大, 测量误差较大, 导致测速精度较低。磁感应法是在发射装置附近安装多个感应线圈, 线圈中通有电流, 这样便在线圈周围形成一个电磁场, 当飞行弹丸经过线圈时就会引起磁场的变化产生信号, 根据信号的间隔时间及线圈的距离计算出弹丸在两个线圈区段的速度均值, 达到测速的目的。磁感应法要求弹丸必须为金属材料或增加磁环, 对材料要求较高。光电探测法是以光电转换为基础的高速弹丸速度测量装置。它以平行激光光幕为靶面, 当弹丸高速穿过光幕时, 光电接收部分收到的光通量发生变化, 经过光电转换元件转换成电信号的

收稿日期: 2013-06-09; 修订日期: 2013-11-27

通讯作者: 黄洁, E-mail: liuchuanruil@126.com

引用格式: Ren L S, Luo J Y, Luo Q, et al. Research on photoelectric detection of submillimeter projectile. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(4): 89-93. 任磊生, 罗锦阳, 罗庆, 等. 亚毫米级弹丸光电探测技术. 实验流体力学, 2014, 28(4): 89-93.

变化,根据信号的间隔时间及激光光幕的距离计算出弹丸通过光幕的平均速度。它具有测试精度高、灵敏度调节灵活、便于维护操作和成本低等特点,是最好的高速弹丸探测方法^[1-3]。

国内用于高速弹丸速度测量的光电探测系统主要是针对大尺寸弹丸,如中国空气动力研究与发展中心用于不同口径二级轻气炮的 TC-300、TC-100 和 TC-50 光电探测器^[4],西安工业大学电子信息工程学院研制的光电探测靶^[5],西北核技术研究所用于毫米级弹丸速度测量的光电检测装置等。其中中国空气动力研究与发展中心的 TC-50 光电探测器可以探测 $\Phi 0.5\text{mm}$ 的弹丸,但在探测 $\Phi 0.5 \sim 1.0\text{mm}$ 的弹丸时,弹丸信号幅值小。为适应 1mm 以下弹丸超高速碰撞试验的需要,中国空气动力研究与发展中心的自由飞弹道靶研究室开展光电阵列探测技术研究,以满足试验和研究的需要。

本文对光电阵列探测方法的探测光路和探测电路进行设计,并对验证装置的设计和验证试验结果进行介绍。

1 片光遮挡法的光电探测原理

片光遮挡法的弹丸探测采用点激光光源作为探测光源,图 1 为片光遮挡法弹丸探测示意图。半导体激光器能量主要集中束腰半径内,通过光阑对光束进行约束后,可近似认为在矩形探测视场范围内光强呈均匀分布^[6]。

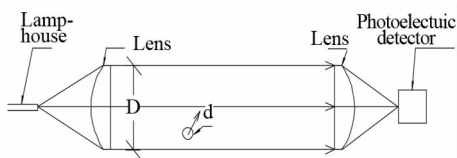


图 1 片光遮挡法弹丸探测原理图

Fig. 1 Principle of particle detecting by cutting off the flake laser

其工作原理为当光电二极管在光电导工作模式下,且工作在线性区域时,光电二极管产生的光电流与其接收的光通量成正比;当弹丸高速穿越探测光路时,弹丸遮挡部分光线,使得光电二极管接收的光通量发生改变,光电二极管产生变化的光电流,从而使得负载电阻产生变化的电压信号。

设片光光强为 ϕ ,片光宽度为 D ,弹丸直径为 d ,在弹丸高速穿越探测光路时光电探测模块所产生的变化电压为:

$$\begin{aligned} \Delta U &= IR = \{I_0[\exp(\frac{qIR_L}{kT}) - 1] - I_L\}R \approx -I_L R \\ &= (\frac{\eta}{h\nu} \cdot \frac{\phi d}{D})R = (\beta\phi \frac{d}{D})R \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\beta = \eta q / h\nu$ 为响应系数, η 为量子效率, q 为电子电荷, h 为玻尔兹曼常数, ν 为光波频率, R 为转换电路电阻阻值。

由公式(1)可见,产生的电压信号与 d 成正比关系。当探测弹丸直径逐渐减小,弹丸对片光的遮挡程度将逐渐减弱, U 值也将逐渐减小,当 U 值小到与噪声信号接近时,将无法识别弹丸信号。

2 光电阵列探测技术原理

2.1 光电阵列探测亚毫米弹丸的设计原理

根据式(1),小弹丸对片光遮挡效应产生的电压信号与 β 、 ϕ 、 d/D 和 R 等参数成正比关系。但是对于探测电路而言,增大 β 、 ϕ 、 R 等 3 个参数时,对应的噪声信号也随之增加,难以达到改善这种遮挡效应的抗噪声干扰的目的,所以在此考虑通过增大 d/D 来提高小弹丸对片光遮挡效应产生的电压信号,从而提出了光电阵列探测技术。

2.2 光电阵列探测技术原理

光电阵列探测技术的原理是改变传统光电探测器接收端的单个光电接收模块模式,在光电探测器的接收端用光电二极管阵列接收来自发射端的光信号,并进行光电转换,光电二极管阵列输出的多路电信号经过处理后成为一路电信号。在光电探测器的接收端将来自发射端的平行片光拆分成多路光束后汇聚到光电二极管阵列的多个接收窗口,以减小单个探测视场的宽度。图 2 为光电阵列探测原理图。当小弹丸穿过探测光路的任意一路分光路时,接收该分光路的光电二极管的光通量发生改变,输出变化的电信号;而其他光电二极管的光通量未发生改变,输出的电信号不发生改变;于是该光电模块产生的电信号经后端处理电路的处理后被数据采集系统采集成为弹丸穿过探测光路时的弹丸信号。这样就将式(1)中的探测视场和弹丸直径比转换为分探测光路的宽度和弹丸直径比,大幅度降低了探测视场和弹丸直径比。

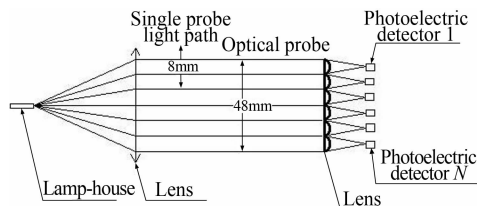


图 2 光电阵列探测原理图

Fig. 2 Principle of particle detecting by photoelectric array

在图 2 所示的光电阵列探测原理图中,探测视场被等分拆成 6 个分探测光路,每个光电模块接收的分光路宽度是整个探测光路宽度的 $1/6$ 。由式(1)可知,

如果分探测光路的光强为 ϕ , 那么采用光电阵列探测技术能够将光电探测器的信噪比提高至 6 倍, 能够将光电探测器可靠探测的弹丸直径下限缩小至 $1/6$ 。

2.3 探测光路设计

探测光路设计主要的难点是把来自发射端的平行片光拆分成多路光束后汇聚到光电二极管阵列的各个接收窗口。在光电探测器接收端对探测光路拆分时, 要减小分探测光路间的缝隙, 避免形成探测盲区。由于探测的弹丸直径为亚毫米级, 则探测光路的缝隙要达到 0.01mm 级别。在探测光路设计时, 采用了复眼透镜和透镜组合两种方式对探测光路的拆分汇聚。

2.3.1 复眼透镜方式

复眼透镜是由一系列小透镜组合形成, 每个透镜都能单独成像。平行片光经过复眼透镜时, 照射在同一透镜的光线被汇聚在该透镜的焦点处, 相邻透镜间的缝隙能够达到 0.01mm 级别, 满足设计要求。

2.3.2 透镜组合方式

透镜组合方式是将多个小透镜打磨后粘接排列在薄的光学玻璃板上, 组合成为一系列排列紧密的透镜组, 每个透镜单独成像。为了降低透镜的加工精度、粘结精度及成本, 将探测光路先扩束放大后再进行拆分。

2.4 探测电路设计

2.4.1 光电转换模块设计

光电转换选用高灵敏度 PIN 光电二极管。所用光电二极管的响应频率和响应波长与探测光源相对应, 其结电容大, 并联电阻大。大的结电容可增加带宽, 同时具有较小的噪声; 而大并联电阻的光电二极管具有小的暗电流, 可减小信号噪声。根据光电二极管的伏安特性曲线, 设计其工作于反向电压模式。光电二极管的工作点通过对半导体激光光源的光功率来进行设计, 既要满足在光功率变化范围之内, 光电二极管工作于线性区域, 同时又要满足取样电压能适合后级放大电路^[7-9]。

信号取样设计为电压取样, 取样电阻通过电容和光电二极管并联。

2.4.2 光电阵列模块信号处理电路设计

由于每个光电模块都会产生一路电信号, 需将多个光电模块产生的多路电压信号处理成为一路电信号。

探测光源的波动是光电探测器的一个重要噪声源^[10]。在将几路电信号整合时, 需避免光源波动产生的噪声被叠加、放大, 降低信噪比。在该模块设计中采用差分放大电路处理多路电信号。其原理是将光电模块按位置分为两组, 每组光电模块产生的多电

压信号经加法电路处理为一电压信号, 然后与另一个加法电路处理的电信号进行差分放大, 输出一路电压信号。光电模块信号处理电路如图 3 所示。

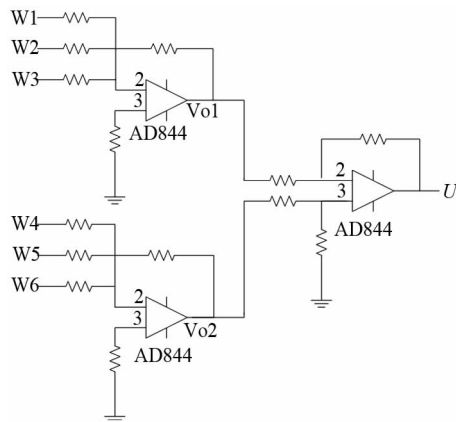


图 3 光电模块信号处理电路

Fig. 3 Circuit diagram of photoelectric module

2.4.3 后级放大电路设计

放大电路要满足宽带宽、低噪声和高放大倍数。为了实现高增益、宽带宽, 整个电路采取两级放大器串联, 使单个放大器工作于低增益、宽带宽状态, 通过两级串联来获得高增益。对于降低噪声, 一是采用失调电压和温度漂移相互补偿的二级运放电路, 利用参数基本一致的两块放大器 AD844, 第一级正向放大, 第二级反向放大, 通过相互补偿减小失调电压和温度漂移; 二是通过仿真分析, 选择合适的电阻阻值和进行电阻滤除噪声设计; 三是对印制板的走线进行细致分析设计, 减小电源和接地点对电路噪声的影响。

3 验证试验及分析

3.1 试验条件

验证试验在 FD-18A 超高速碰撞靶上进行, 试验弹丸尺寸: $\Phi 0.6\text{mm}$ 、 $\Phi 1.2\text{mm}$; 弹丸发射速度: 约 3km/s ; 靶室压力: 300Pa 。



图 4 FD-18A 超高速弹道靶

Fig. 4 Hypervelocity impact range

3.2 试验装置

光电阵列探测系统结构主要包括超高速碰撞靶

TC-50 光电探测器的发射端、发散透镜、复眼透镜和光电阵列探测模块:其中,TC-50 光电探测器的发射端用来发射平行片光形成宽 50mm 的探测视场,发散透镜用于将平行片光扩束,复眼透镜用于将来自发射端的平行片光分成 6 路光束后汇聚到光电二极管阵列的各个接收窗口,光电阵列探测模块用于接收光信号并进行处理。光电阵列探测系统如图 5 所示。由于在探测光路设计中选用透镜组合方式拆分光路需重新加工透镜组,透镜组的加工费用又较高,所以在验证试验中不采用透镜组合方式。

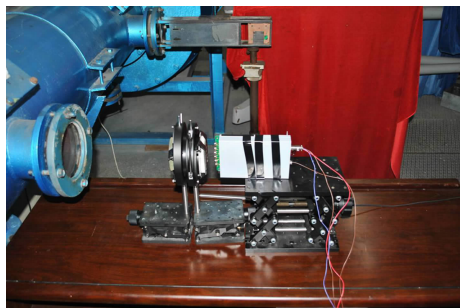


图 5 光电阵列探测系统
Fig. 5 Photoelectric array detection system

3.3 试验结果与分析

试验获得的弹丸信号如图 6 和 7 所示。图 6 为弹丸尺寸 $\Phi 0.6\text{ mm}$ 、速度 2.8 km/s 试验中光电阵

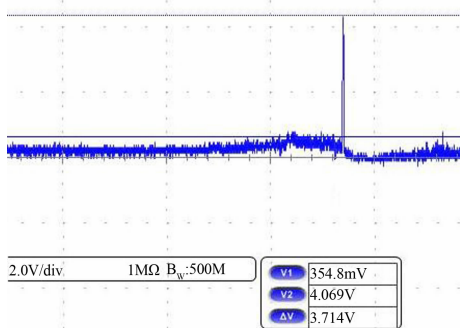


图 6 $\Phi 0.6\text{ mm}$ 弹丸信号
Fig. 6 Signal of pill of $\Phi 0.6\text{ mm}$

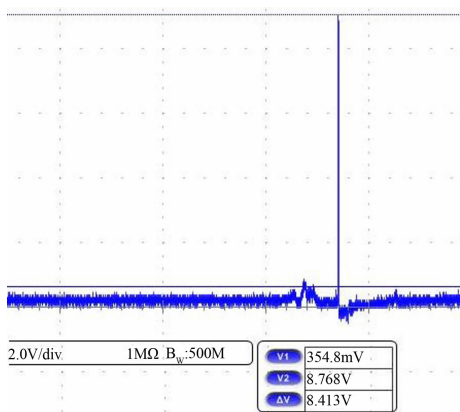


图 7 $\Phi 1.2\text{ mm}$ 弹丸信号
Fig. 7 Signal of pill of $\Phi 1.2\text{ mm}$

列探测系统的探测信号,信号峰值为 4.096 V ,噪声幅值为 0.354 V ;图 7 为弹丸尺寸 $\Phi 1.2\text{ mm}$ 、速度 3.0 km/s 试验中光电阵列探测系统的探测信号,信号峰值为 8.768 V ,噪声幅值为 0.354 V 。

根据光电阵列探测的原理,弹丸在高速穿过探测光幕时产生的电压信号与弹丸直径成正比关系。结合试验结果,对该光电阵列探测系统的响应度进行分析,并对该光电阵列探测系统的探测能力进行分析。

3.3.1 光电阵列探测系统响应线性度

通过电压幅值与弹丸直径的比值可确定光电阵列探测系统的响应度。

由图 6 可得探测系统对 $\Phi 0.6\text{ mm}$ 弹丸的响应度为:

$$4.096/0.6 = 6.826\text{ V/mm} \quad (2)$$

由图 7 可得探测系统对 $\Phi 1.2\text{ mm}$ 弹丸的响应度为:

$$8.768/1.2 = 7.306\text{ V/mm} \quad (3)$$

虽然不同片光位置的光强度不一致,但经过光阑对光束约束处理后其差别较小,可认为光电阵列探测系统对不同直径的弹丸的响应基本为线性。

3.3.2 光电阵列探测系统探测能力分析

由图 6 和 7 可得光电阵列探测系统的噪声为 0.354 V ,根据信噪比分析结果可推算光电阵列探测系统可探测最小弹丸直径为(响应度按 $\Phi 0.6\text{ mm}$ 弹丸的响应度计算):

$$\text{最小弹丸直径} = 0.354/6.826 = 0.05\text{ mm} \quad (4)$$

4 结 论

通过开展光电阵列探测技术研究和验证试验,可知光电阵列探测技术能够提高光电探测器的性能、提高信噪比和探测下限,其最小弹丸探测直径可达 0.1 mm ,满足超高速碰撞试验中亚毫米弹丸的可靠探测和测速控制的需求,进一步拓展了超高速碰撞靶开展空间碎片防护试验的范围。

参考文献:

- [1] 李翰山. 光电探测靶探测性能分析[J]. 电光与控制, 2008, 15(7): 72-74.
Li Hanshan. Detection performance analysis of optic-electric detecting target board[J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(7): 72-74.
- [2] 李翰山, 高洪尧, 江铭. 天幕靶光电探测性能改善研究[J]. 弹道学报, 2007, 19(1): 33-36.
Li Hanshan, Gao Hongyao, Jiang Ming. A study on improving the performance of photo-electricity detecting of sky-screen[J]. Journal of Ballistics, 2007, 19(1): 33-36.
- [3] 倪晋平, 王铁岭. 光电靶的工作原理及应用[J]. 西安工业学院学报, 1997, 17(1): 31-35.

- Ni Jinping, Wang Tieling. The principle and application of screens[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 1997, 17(1): 31-35.
- [4] 罗锦阳, 柳森, 罗庆, 等. 超高速碰撞靶微小弹丸/粒子激光片光测速技术[C]//中国兵工学会弹道专业委员会学术交流会, 山西太原, 2004.
- Luo Jingyang, Liu Sen, Luo Qing, et al. Hypervelocity impact target tiny projectile laser sheet velocity[C]//Professional Committee of China Ordnance Society Symposium Ballistic, Taiyuan Shanxi, 2004.
- [5] 倪晋平, 王铁岭. 高稳定性光幕靶研制[J]. 西安工业学院学报, 1997, 17(1): 42-45.
- Ni Jinping, Wang Tieling. A study on high stable screens[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 1997, 17(1): 42-45.
- [6] 罗锦阳, 黄洁, 邵绍清, 等. 片光反射遮挡式超高速亚毫米粒子探测技术[J]. 实验流体力学, 2012, 26(3): 82-83.
- Luo Jinyang, Huang Jie, Bu Shaoqing, et al. Research of hypervelocity particle detect technology by multi-reflect sheet laser[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(3): 82-83.
- [7] 郝晓剑, 李仰军. 光电探测技术与原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 100-110.
- Hao Xiaojian, Li Yangjun. Optical detection and technical principles[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2009: 100-110.
- [8] 范志刚. 光电测试技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 52-78.
- Fan Zhigang. Optical testing techniques[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003: 52-78.
- [9] 雷玉堂, 王庆友. 光电检测技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2004: 110-150.
- Lei Yutang, Wang Qingyou. Photoelectric detection technology[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2004: 110-150.
- [10] 王立刚, 建天成. 基于光电二极管检测电路的噪声分析与电路设计[J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33(2): 88-90.
- Wang Ligang, Jian Tiancheng. Noise analysis and circuit design of detection circuit based on photodiode[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2009, 33(2): 88-90.

作者简介:



任磊生(1983-),男,湖北老河口人,工程师。研究方向:弹道靶测控。通信地址:四川省绵阳市中国空气动力研究与发展中心(621000)。E-mail: skyandecho@163.com

(编辑:杨 娟)