文章编号：1000-5773(2003)01-0075-06

用于一级轻气炮的弹速激光测量系统*

王 翔，王 为，傅秋卫

（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：研制了用于 ϕ57 mm 一级轻气炮的激光测速系统，采用红光 LD 作光源，PIN 作为光电探测器，并研制了专用前置放大器，整个系统集成于炮管延长段中，不仅具有结构简单紧凑、抗振动、易于准直，而且避免了弹丸的自由飞，保持了极小的碰撞角。采用该系统已成功地测量了非标准异型弹丸和非金属弹丸的速度，速度测量的相对不确定度小于 0.2%。

关键词：LD 激光器；光电探测器；轻气炮；弹速测量；不确定度

中图分类号：O521$^+$.3 **文献标识码**：A

1 引 言

一级气体炮是研究材料在冲击压缩下的动力学特性、状态方程以及物理、化学特性常用的一种冲击加载设备[1~3]。而在气炮加载实验中，弹丸（或飞片）的速度是确定材料中冲击状态的最重要的参数之一，因此，精确测量弹速是十分必要和重要的。

通常，一级轻气炮的弹速测量方法主要采用“刷子”电探针方法，也可在靶装置上安装测速探针[1,4]。电探针方法的优点是安装简单、费用低、测量距离短，经仔细安装，理论上可达到较好的速度测量精度。但是其速度测量的不确定度及稳定性较差（几组探针测量数据的分散性可从千分之几到百分之十几变化），飞片的倾斜和弯曲会引起较大的系统误差，而且当气炮工作介质为 H_2 时，逃逸到弹丸前的 H_2 易使电探针提前电离而使测速失败[1]。此外，电探针方法无法测量异型弹丸或非金属弹丸的速度，并且只能一次性使用，每次实验前都要重新组装探针块并用显微镜测量探针间距，准备工作较繁杂，不利于提高实验工作效率[5]。

为解决上述问题，人们又发展了激光测速系统并在轻气炮上获得了成功应用[4,6,7]。但这些系统采用 He-Ne 激光管为光源，并用分光镜等分束，光路较为复杂，调整与准直较难。1997 年，在前人的基础上研制了采用半导体 LD 激光器的激光测速系统，本文详细报道该系统的工作原理、探头和测量电路的结构以及实验结果，并对测量误差进行较全面地分析。

2 LD 测速系统的工作原理及结构

2.1 基本测量原理

激光光束遮断式测速原理较为简单，如图 1 所示，两支半导体激光器发出的激光分别照射在相距 l 的两个光电二极管（PIN）上，PIN 产生直流光电流；当弹丸飞过时依次遮断这两束激光，则 PIN 管的光电流变为零，输出光电脉冲。测量这两个光电脉冲的时间间隔，则可计算出弹速。

2.2 LD 激光测量装置

采用红光半导体激光器作光源，波长为 670 nm，连续光功率近 5 mW，光束直径 2 mm，置于专门设

* **收稿日期**：2002-01-16；**修回日期**：2002-03-30

作者简介：王 翔（1968—），男，学士，助理研究员.

计的定位插头中。光电探测器采用 PIN 管(GT101),光敏面积为 1 mm,响应时间 1 ns;为和电缆匹配并得到较快的响应,采用低阻 50 Ω 作负载,在 50 Ω 负载上得到的光电信号仅有几十毫伏,必须进行放大,为此设计了宽带前置放大器,电路见图 2。前置放大器的电压放大倍数为 26 dB,响应时间为 10 ns,带宽 0～35 MHz。

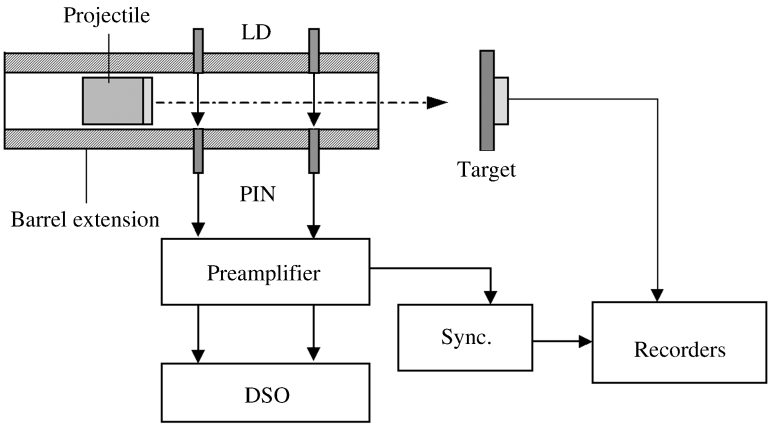


图 1 LD 激光测速系统框图

Fig. 1 Block diagram of measurement system

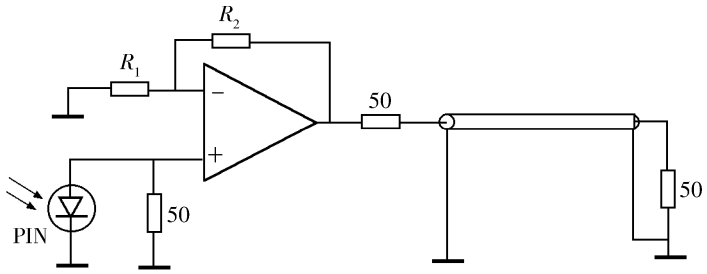


图 2 前置放大器电路

Fig. 2 The preamplifier circuit

测速系统的激光光源组件和光电探头组件装配于专门设计的炮管测速延长段中,和其它的激光测速系统相比[1,6,7],这样的结构的好处是:弹丸在炮管延长段中完成测速,弹丸在撞靶时其后半部仍约束在炮管中,从而保持了气体炮具有较小的碰撞角;整个装置紧凑简单、易于准直,没有复杂的光路;抗震动,不须采取防震措施。

3 实验及结果

为保证激光测量法的成功进行,必须确认在一级轻气炮发射时,靶室内和炮口处没有杂散光影响 PIN 管。我们对一级轻气炮发射时在弹丸出炮口前后几百微秒时间内的光辐射响应进行了测量,实验结果表明,在这个时间范围内,PIN 没有探测到可分辨的光电信号。

激光测速系统安装调整完毕后,在∅57 mm 一级轻气炮上进行了弹丸速度测量实验,同时用“刷子”探针进行了测量,以便对这两种方法的测量结果进行对比。实验结果见表 1,图 3 为典型的实验波形。由表 1 可见,激光测速的结果是令人满意的,与“刷子”探针相比,不仅有较高的测速精度,而且有较高的测量成功率,可测量各种形状、结构和材料的弹丸速度,并且不产生电磁干扰。

表 1　LD 激光测速结果

Table 1　The measured results for gas-gun experiments

Experiment No.	Velocity results for two probes /(m/s)	Velocity results for single probe /(m/s)	Velocity results for electricity pins / (m/s)	Dispersion of pins (%)
970107	543.48±1.09	540.54	548.40	0.1
970325A	514.69±1.03	513.98	514.67	0.8
970325P	728.04±1.46	726.58	Failed(1)	—
970617	357.82±0.72	354.99	Failed(1)	—
980312A	156.60±0.31	156.125	Undo(2)	—
980312P	634.63±1.27	631.57	Undo(2)	—
980422	746.27±1.49	—	Undo(2)	—

Note:(1) The measured results of pins were so dispersive that they were invalid.

(2) The pins can not work for this shot.

从图 3 可以看出,PIN 管输出的光电脉冲的宽度与弹长及弹速有关,我们利用这点可进行单探头测速。实验前我们测量了弹丸的总长度,实验后除以实际测量的光电脉冲波形的宽度(半高宽)得到一组弹速,计算结果列于表 1。结果表明单探头测速与双探头测速结果最大相差 0.5%,不过由于有些弹丸长度的精确测量比较困难;此外,光电脉冲波形的后沿受弹后驱动气体的影响而使上升时间变长,影响了脉宽时间的测量精度,从而使单探头测速的精度不如双探头测速精度高。但有了单探头测速作为参考,提高了测量的可靠性,在其中一对测速探头失效时,仍然可得到一定精度的弹速数据,从而大大提高了实验成功率。

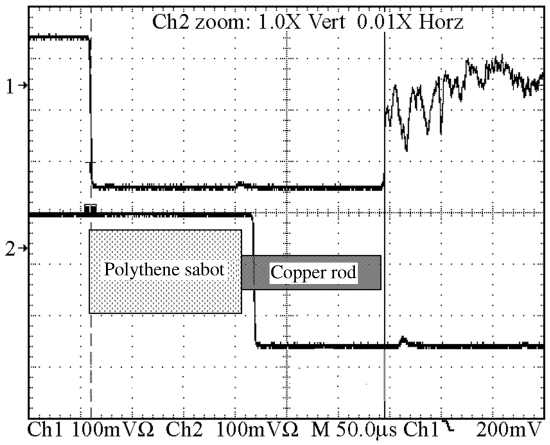


图 3　LD 激光测速实验波形和弹丸结构 (v=634.63 m/s)

Fig. 3　A typical waveform and the projectile characteristics, v=634.63 m/s

4　误差分析

遮断式激光测速方法的测速公式为

$$v = l/t \tag{1}$$

式中:l 为两探头间距,t 为两探头信号间的时间差。根据误差传递理论[8],速度测量的误差等于距离测量误差与时间测量误差之和

$$\delta v = \delta l + \delta t \tag{2}$$

则速度测量的相对标准不确定度[9]可表示为

$$\frac{u(v)}{v} = \sqrt{\left[\frac{u(l)}{l}\right]^2 + \left[\frac{u(t)}{t}\right]^2} \tag{3}$$

因此,遮断式激光测速方法的误差源主要分成三类,它们是 PIN 光电探头(Probe)的定位不确定度、时间间隔测量不确定度及人为时间判读不确定度。

4.1 光电探头的定位不确定度

光电探头安装孔的定位误差、光电探头与安装孔之间的配合误差、PIN 管的光敏区与管壳之间的相对偏心误差，以及光束倾斜误差，它们造成光电探头间距的不确定度。光电探头安装孔是在坐标镗床上定位、钻孔，其定位的公差为±0.02 mm；光电探头组件与安装孔的安装偏心约为±0.05 mm；而 PIN 二极管芯与管壳偏心约为±0.05 mm，取决于 PIN 的制造、封装工艺，见图 4。在激光测速系统中，还必须考虑由于激光束准直问题带来的实际定位误差。

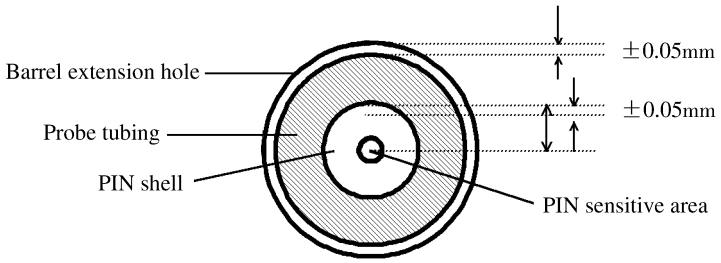


图 4 光电探头结构及机械公差

Fig. 4 The probe structure and location clearance

4.2 光束准直误差

为简化分析，设弹丸为平行于炮管轴线、并位于轴线上的一条细杆，激光束直径比光敏面大，这时可把 PIN 管光敏区看成一个点 A，有效的光线为 CA（见图 5），经简单推导可得

$$x=(D-d)\Delta l/(2D) \tag{4}$$

其中：D 为光源到 PIN 管的设计距离，x 表示由于光束准直不好造成的光电探头的定位误差，d 为弹丸直径。由公式(4)可见，该误差随弹丸直径增加而减小，当 $d\to D$ 时，$x\to 0$。通常情况下实验采用标准弹丸，对于本系统，由于采用炮管延长段，弹丸直径 d 接近，故该项误差可以忽略。

因此，合成的定位标准不确定度为 $u_c(l)=\sqrt{0.05^2+0.05^2+0.02^2}=0.07$ mm 。

此外公式(4)的结论对激光测速系统方案的选择提供了理论指导。在其它类似的激光测速系统中，由于采用 He-Ne 激光管做光源，必须置于气炮靶室外，此时 d 远小于 D，而且 Δl 也不易控制得足够小（不易准直，一般 $\Delta l\approx 0.5$ mm），使得该项误差较大，有时成为影响测量精度的主要误差来源。图 6 给出弹丸直径与准直误差的计算结果，同时给出不同 D 的误差曲线，计算表明：当 $D=2$ m、$d=60$ mm 时，准直误差增加到 0.25 mm。

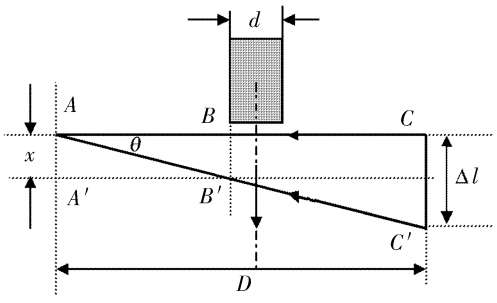


图 5 准直误差示意图

Fig. 5 The illustration for collimation error

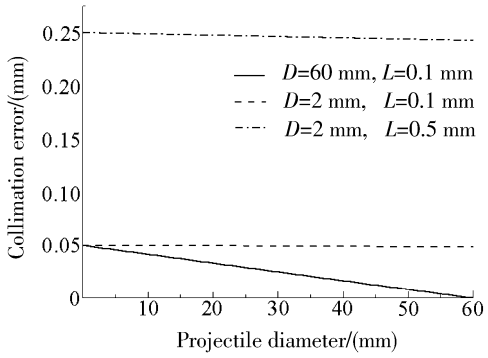


图 6 准直误差与弹丸直径的关系

Fig. 6 The collimation error vs. projectile diameter

4.3　时间间隔测量不确定度

在保证各探头之间电缆长度一致(必要时可实际测量各电缆长度并进行修正)及放大器时间响应(10 ns)一致的条件下,可忽略电缆延时分散及放大器响应、延时分散造成的误差。时间间隔测量误差与弹速有关,对于一级炮的最低弹速(100 m/s),当两探头距离为 100 mm 时,相对的时间间隔为 1000 μs,用 TEK TDS744 数字示波器记录信号,采样间隔设置为 20 ns/point,则时间间隔测量误差为 ±20 ns(不插值)±时间间隔×10^{-5}=±30 ns,这是最坏的情况,弹速提高时后面一项会减小。故时间间隔测量的标准不确定度 $u_1(t)=30/\sqrt{3}=17.3$ ns(设为均匀分布,$k=\sqrt{3}$)。

4.4　时间判读不确定度

这项误差主要与光电信号波形的质量有关(如上升前沿、信噪比等)。由于 PIN 管光敏区有一定的面积,弹丸遮挡光束过程引起飞越时间,造成脉冲信号的上升/下降沿。我们把信号前沿上升到最大电压值的 1/2 处作为判读点,如果两探头输出信号的上升沿不同会引起判读误差。显然飞越时间是弹速的函数,其分散性主要取决于光敏面直径的差别,故选取 PIN 管时尽量选取光敏面直径相同的管子,可在显微镜下测量,这样可基本消除该误差。

在光电探头安装过程中,光敏面与炮管轴线不平行也会造成光电信号前沿的不一致而引起判读系统误差,一般探头安装不平行造成有效光敏面直径的变化范围小于或等于 10%,则引起的时间测量相对极差为 0.1%(按探头间距 100 mm 计算)。故时间判读相对标准不确定度 $u_2(t)/t=0.05/\sqrt{3}=0.03\%$(设为均匀分布,$k=\sqrt{3}$)。

综上所述,根据公式(3),速度测量的相对扩展不确定度为

$$u(v)=2\sqrt{\left[\frac{u_c(l)}{l}\right]^2+\left[\frac{u_1(t)+u_2(t)}{t}\right]^2}<0.2\%,P=0.95$$

5　讨　论

该激光测速系统除了结构紧凑、有较高的测速精度外,另一个主要的应用是测量非金属及异型弹丸的速度,这是电探针无法测量的。我们用该系统测量了聚乙烯弹托(ϕ57 mm)+(ϕ25 mm)尖头铜杆组成的组合弹丸的速度,弹丸结构和实验波形见图 5。

对于实用的一级气体炮而言,用无限长等截面气室一维不定常流和准等熵膨胀两种模型的近似计算表明,弹丸在出炮口时的加速度较小[6],因此,用测量距离内的平均速度代替弹丸击靶速度是合理的,同时表 1 的对比数据也提供了证明。

此外,在该系统上进行改进,如增加 LD 的光功率、PIN 管前加滤波片等,可以在二级炮上进行弹速测量,测量精度与 MAVIS 相当,特别是对减小飞片碰撞角有利。因为该测速装置在炮管延长段内进行测量,不像 MAVIS 或闪光 X 光测量系统必须使弹丸有一段自由飞,使碰撞角很难进一步减小。

6　结　论

我们研制的用于 ϕ57 mm 一级轻气炮的激光测速系统,采用红光 LD 作光源,快响应 PIN 二极管作为光电探测器,并研制了专用前置放大器,整个系统集成于专门设计的炮管延长段中,不仅具有结构简单紧凑、抗振动,易于准直,而且避免了弹丸的自由飞,保持了极小的碰撞角。

文中对激光测速系统的测量误差进行了详细的分析,给出了误差的来源和控制、减小误差的技术。特别是导出了光束准直误差与弹丸直径的关系,这对激光测速系统方案的选定和光电探头及准直结构的设计具有指导意义。

该系统已成功地用于测量金属、非金属弹丸以及非标准异型弹丸的速度,速度测量的相对扩展不确定度小于 0.2%,完全可以代替电探针方法作为一级轻气炮的标准弹丸速度测量手段。

该系统在研制过程中得到了王金贵研究员的热心指导;陈志云师傅在炮管延长段的安装调整过程中做了认真细致的工作,作者在此表示衷心感谢!

References:

[1] Wang J G. Principle and Technology of Gas Gun [M]. Beijing: The Publishing Company of National Defence Industry, 1997. (in Chinese)
王金贵. 气体炮原理及技术 [M]. 北京:国防工业出版社. 1997.

[2] Zhang L, Cai L C, Wang W, et al. The Dynamic Mechanic Characteristics of Tantalum under Shock Loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(4): 265－270. (in Chinese)
张 林,蔡灵仓,王 悟,等. 钽在冲击载荷下的动态力学特性 [J]. 高压物理学报,2001,15(4):265－270.

[3] Peng Q X, Hu S L, Tan X X. Ruby Luminescence R-Line Shift under Shock Loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(3): 209－213. (in Chinese)
彭其先,胡绍楼,谭显祥. 冲击载荷下红宝石荧光频移研究 [J]. 高压物理学报,2000,14(3):209－213.

[4] Wang J G. To Measure the Projectile Velocity and Tilt for Gas Gun [J]. Detonation and Shock Waves, 1991, (1): 24－27. (in Chinese)
王金贵. 一级轻气炮弹速和碰撞角的实验测量 [J]. 爆轰波与冲击波,1991,(1):24－27.

[5] Hutchings I M. Direct Display of Gas-Gun Projectile Velocity [J]. Rev Sci Instrum, 1997, 48(7): 923－925.

[6] Shi Y C, Liu F Q. A Laser System for Measuring the Projectile Velocity in Gas Gun [J]. Explosion and Shock Waves, 1986, 6(1): 71－79. (in Chinese)
史有程,刘风琴. 一个测量气体炮弹速的激光测量装置 [J]. 爆炸与冲击,1986,6(1):71－79.

[7] Zhang G J, Tian C J, He P. The Projectile Impacting Velocity Measurement Technique with Splitting Laser Beams [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1997, 11(2): 156－160. (in Chinese)
张光军,田常津,何 鹏. 弹体撞击速度的激光分束测量技术 [J]. 高压物理学报,1997,11(2):156－160.

[8] Xiao M Y. The Error Theory and Application [M]. Beijing: The Publishing Company of Measure, 1985. 84. (in Chinese)
肖明耀. 误差理论与应用 [M]. 北京:计量出版社,1985. 84.

[9] The Compiling Group of Measure Department of National Quality and Technology Administer Bureau. The Guide for Assessing and Expressing Measure Uncertainty [M]. Beijing: The Publishing Company of Measure of China, 2000. (in Chinese)
国家质量技术监督局计量司. 测量不确定度评定与表示指南 [M]. 北京:中国计量出版社, 2000.

A System Utilizing Laser Diode for Gas-Gun Projectile Velocity Measurement

WANG Xiang, WANG Wei, FU Qiu-Wei

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

Abstract: A new system utilizing laser diode and PIN for gas-gun projectile velocity measurement were developed in 1997. The system is integrated in a barrel extension. It not only has the advantages of simple structure and vibration resistance but also has easiness of collimation. In addition, it is helpful to keep smaller tilt and to avoid projectile free-flying before it impacts the target. It has been used successfully to measure the velocity of irregular or nonmetallic projectile. The relative measurement uncertainty is less than 0.2%.

Key words: laser diode; O/E detector; gas-gun; projectile velocity measurement; uncertainty