

文章编号 1004-924X(2013)05-1102-08

扩展光束型激光多普勒速度测量系统

李秀明*, 黄战华, 朱 猛

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了获得高速弹丸在出膛后的瞬时速度以及在不同位置时的速度分布, 提出了一种基于扩展光束的激光多普勒测速系统。该系统对出射的激光束进行两次扩展, 使扩展后的相干光束在空间某一位置相交来形成具有一定延展范围的探测体。该方法有效避免了经典双光束多普勒测速系统由于探测体积小而导致的物体偏离探测区域的情况, 因此, 在实际测量弹丸速度的过程中能够解决传统多普勒系统因弹道偏差而导致的无法测速的问题。该系统也可以采用并联方式来监测弹丸在弹道不同位置上的速度分布。通过实验对激光束进行了不同尺度的径向扩束, 并在此基础上获得了不同散射面积下的多普勒信号。分析结果显示: 在速度为 10~25 m/s 时, 测量值与实际值的平均误差可以达到 1%~2%, 表明这种测量方法是有效且可行的。

关键词: 激光多普勒测速系统; 扩展光束; 高速弹丸; 速度测量

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1102

Differential laser Doppler system with expanded beams for velocity measurement

LI Xiu-ming*, HUANG Zhan-hua, ZHU Meng

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology of the Ministry of Education,
College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: lixiuming@tju.edu.cn

Abstract: To acquire the instantaneous velocity outside the chamber of a high-speed bullet and its velocity distribution at different positions, this paper proposed a velocity measurement system with expanded beams based on the laser Doppler effect. The system expanded the exiting laser beam for two times and then made the two coherent beams intersect in the space to form a new probe volume with two dimensional broadening lengths. The system efficiently overcame the object deviation from the measurement region caused by the smaller probe volume in the traditional Laser Doppler Velocimeter (LDV). Therefore, it could measure the velocity of high-speed bullet that traditional LDV could not implement because of the trajectory deviation. Moreover, the system could also monitor the velocity distribution of the high-speed bullet at different positions in the trajectory by a parallel mode. Experi-

收稿日期: 2012-12-10; 修订日期: 2013-01-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61275009)

ments for expanding different lasers were performed in different illuminating lights, and the Doppler signals were obtained from the photo-detector finally. The analysis results show that the average error of the measured velocities at 10–25 m/s can reach 1%–2%, which indicate that the proposed method is effective and feasible.

Key words: Laser Doppler Velocimeter (LDV); expanded beam; high-speed bullet; velocity measurement

1 引言

弹丸出膛后的速度是产品合格验收的必要环节和重要指标,它对弹丸推力、弹道设计以及武器毁伤效果的评估等研究具有重要意义。基于靶面的弹丸速度测量方法有网靶法、钢板靶法、线圈靶测速法、天幕靶测速法以及光幕靶测速法等,其它的测速方法还有雷达测速法和多普勒测速法^[1-5]。其中,基于靶面的测量方法通常得到的是一段距离内的平均速度,因此在加速度较高的情况下,测量结果会有较大的误差。激光多普勒测量是一种非接触瞬态测量方法,它能够测量物体在不同位置的速度分布,获得物体的瞬时速度,这将为物体的加速度设计提供有用的参考。因此,激光多普勒测速方法在高速弹丸测量中的应用研究具有重要价值。

多普勒测速仪有参考光型和双光束型,而后者较为普遍^[6]。双光束激光多普勒测量仪主要应用于流体速度测量、风速测量以及悬浮粒子的动态分析等领域^[7-8]。其特点是探测体积小,空间分辨率高,获得的信号质量较高等。此外,该类测量仪还可以用于测量物体的表面速度^[9-11]。为了获得高空间分辨率,双光束多普勒测量系统的探测体部分一般都很小。因此,在测量固体表面速度时,必须严格控制固体的运动轨迹,使它经过多普勒测量系统的探测体,否则测量无法进行^[12-13]。显然,双光束多普勒测量方法只适用于运动轨迹精确控制的情况,不适用于非精密控制的情况。

多点分层差动激光多普勒测速仪采用多个探头的设计,多个探头依次分层分布^[14],这样做在加大探测范围的同时,不至于使被测目标偏离探测体;但随着探测范围的增大,探测单元的组数也增多,进而使测量系统过于繁琐,不便于集成且增加了成本。扫描型激光多普勒测速系统通过在某一

方向上移动探测体来获取较大的动态测量范围,有效地避免了探测体与固体表面偏离的情况。P. Sriram 等提出了固体表面速度分布的扫描型测量系统,通过旋转镜面来改变探测体的汇聚位置以达到扫描的目的。但由于该系统是通过机械装置进行旋转的,所以其动态响应以及扫描速度等受到机械惯性的制约,无法满足高速测量需求^[15]。在此基础上,Koichi Maru 等提出了一种基于可调谐激光器的轴向扫描系统和基于可调谐激光器的垂轴扫描多普勒测速系统^[16-18]。这两种扫描系统都采用了波长可调的激光器以及衍射光栅等器件,通过改变激光波长使双光束的汇聚角发生变化,进而使探测体在指定方向上进行扫描。扫描过程无需机械装置,所以系统具有很高的动态响应特性。但这两种系统限定在单一方向扫描,同时随着探测距离变远衍射光束的发散角度变大,将直接影响系统的测量精度。

如此可见,上述几种多普勒测速方法在弹丸速度的测量中都受一定条件的制约,因此本文提出了一种基于扩展光束的激光多普勒速度测量方法,该方法可实现对弹丸瞬时速度以及速度分布的测量。

2 系统测量原理

2.1 差动激光多普勒测速原理

双光束激光多普勒测速原理如图 1 所示,两相干光束 K_1 和 K_2 同时照射到运动粒子 P 的表面,在同一方向上的散射光汇集到光电探测器表面进行外差。

由多普勒效应可知,在接收探测器的表面同时存在两个频率的散射光^[6],分别为:

$$f_{s1} \approx f_0 \left[1 + \frac{\mathbf{U} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_{o1})}{c} \right] = f_0 + \frac{1}{\lambda} \mathbf{U} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_{o1}), \quad (1)$$

$$f_{s2} \approx f_0 \left[1 + \frac{\mathbf{U} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_{o2})}{c} \right] = f_0 + \frac{1}{\lambda} \mathbf{U} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_{o2}), \quad (2)$$

式中： \mathbf{U} 代表物体的速度矢量， f_0 为入射光频率， λ 为入射光在介质中的波长， \mathbf{e}_{o1} 和 \mathbf{e}_{o2} 分别为沿光束 K_1 和 K_2 方向上的单位矢量， \mathbf{e}_s 为散射光到探测器方向上的单位矢量。由公式(1)和(2)导出多普勒频移为：

$$f_D = f_{s1} - f_{s2} = \frac{1}{\lambda} |\mathbf{U} \cdot (\mathbf{e}_{o1} - \mathbf{e}_{o2})|. \quad (3)$$

由公式(3)可见，多普勒频移只与两束入射光方向有关，而与散射光方向无关。当光学系统结构确定之后，多普勒频率与物体的速度成线性关系，所以通过获取多普勒频率信息便可以根据式(3)推算出物体的瞬时速度。

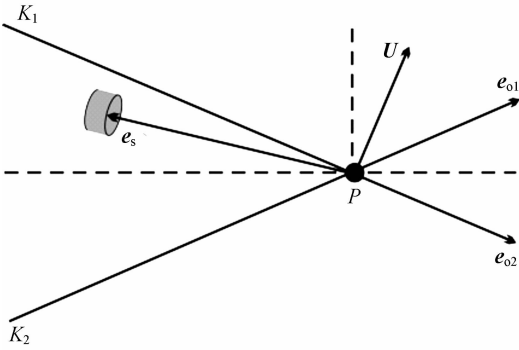


图 1 双光束多普勒测速原理简图

Fig. 1 Schematic diagram of dual-beam LDV

2.2 扩展光束的多普勒测速系统

基于扩展光束的激光多普勒测速系统的光学结构如图 2 所示。出射激光波长为 532.8 nm，光束经反射镜折转后入射到径向扩束系统，然后经过分光棱镜产生两束光强近似相等的相干光。两束相干光再次折转之后分别入射到第二个扩束系统，形成具有一定厚度的小角度扇形光束。将两相干扇形光束在空间某位置相交，形成具有一定拓展宽度的探测体。当物体经过该探测区域时，经过物体表面反射的散射光由后向收集系统汇聚到雪崩光电二极管 (Avalanche Photo Diode, APD) 的表面，不同频率的光在探测器表面发生干涉形成拍频信号，此拍频信号即为多普勒频移信号。多普勒频移信号最终以电信号的形式输出，并分别经过滤波放大模块及运算处理系统处理后，求得物体的瞬时速度。

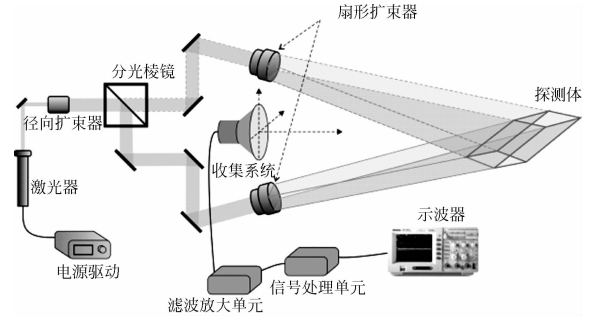


图 2 光学系统结构简图

Fig. 2 Configuration of optical system of differential laser Doppler system with expanded beams

由图 2 可以看出，物体在运动过程中不必保持严格的直线运动，只需要确保物体在运动轨迹方向上的摆动不偏离探测区域，系统就能够探测到多普勒频移信号。因此，本测量系统允许物体在其运动轨迹上保持一定的不确定度，这样不仅有效地解决了双光束多普勒测速系统动态捕捉范围小的问题，同时也可以克服扫描系统测量时初始定位难及单方向扫描的问题。

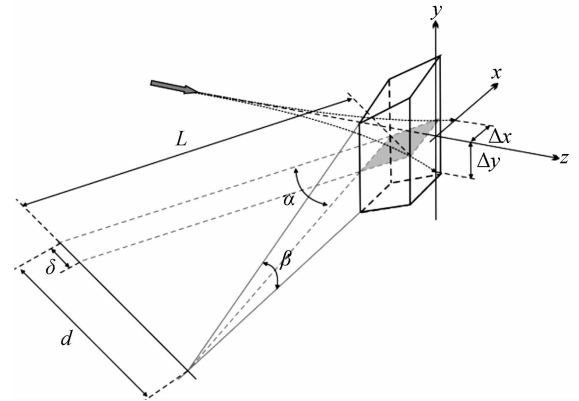


图 3 探测体结构

Fig. 3 Configuration of probe volume

光学系统中探测体的结构如图 3 所示。 d 为两光束出射位置中心的距离， L 代表探测体中心到出射点的距离， α 和 β 分别代表两光束的中心夹角和扇形光束， δ 为光束宽度。由以上结构参数可以估算出探测体的两个扩展宽度，即 x 方向扩展 L_x 和 y 方向扩展 L_y ，分别为：

$$L_x = \frac{\delta}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (4)$$

$$L_y = \frac{d \tan \frac{\beta}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (5)$$

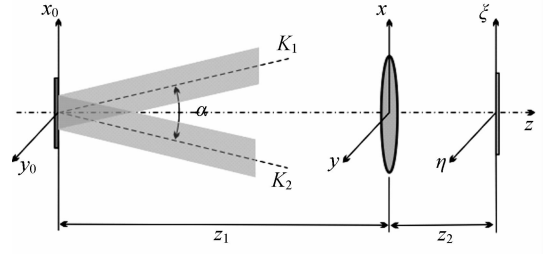
式中:夹角 α 由 $\tan(\alpha/2) = d/2L$ 给出; d 由光学结构确定; β 和 δ 分别为扩展光束参数,不随光学结构的变化而改变。假定双光束夹角 α 及光束扩展角 β 分别为 5° 和 2° ,光束宽度为 10 mm,双光束在出射位置的间距 d 为 200 mm,由公式(4)和(5)计算得到探测体在 x 和 y 方向上的两个扩展宽度分别为 229 mm 和 80 mm。由于物体经过探测体时其轨迹具有一定的不确定性,故这里假设它在 x 和 y 方向上的偏移量与 z 轴的距离分别为 Δx 和 Δy 。只要该偏移量小于探测体在 x 和 y 方向上的长度,系统就能够获得物体在 z 方向上的速度信息。因此,可以预先估计出物体运动的不确定度范围,再根据此范围来调整光学结构参数及探测体的初始位置,以保证物体能够经过探测区域。

3 实验及结果分析

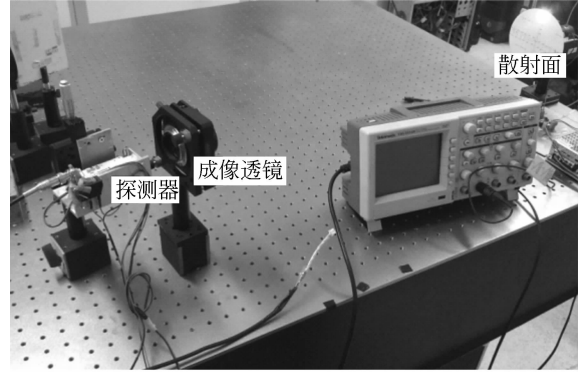
为验证散射面大小对测量结果的影响以及方便光路调整,实验中暂不进行第二次扩束(扇形扩束的作用在于增大 y 方向上探测体的长度,当物体分别经过一次扩束后的光束交汇区与二次扩束后的光束交汇区时,二者仅在散射面形状上有差异,而这一差异对测量结果的影响不大)。

激光束首先经过径向扩束系统,随后经分光棱镜产生光强相当的两束相干光,两扩展光束经折转后在空间某位置相交,形成稳定的干涉光场(探测体)如图 4(a)所示。将模拟速度的转盘调整到探测体内的某一位置,经转盘反射的散射光通过成像透镜汇聚到探测器表面,如图 4(b)所示。

如图 4(a)所示,入射的两束扩展光可近似地看作平面波,并忽略时间 t 和 z 因子,那么 K_1 与 K_2 方向上的两平面波的复振幅可分别表示为



(a) 原理简图
(a) Schematic diagram of test principle



(b) 与(a)对应的实物图
(b) Experimental setup

图 4 接收实验装置

Fig. 4 Experimental setup of collecting system

$\exp[jkx \sin(\alpha/2)]$ 和 $\exp[-jkx \sin(\alpha/2)]$ 。因此在散射面前入射光复振幅为两平面波的叠加,即:

$$\tilde{E}(x_0, y_0) = 2\cos[kx \sin(\alpha/2)]. \quad (6)$$

经转盘反射后紧靠转盘表面的光波复振幅分布 $\tilde{E}'(x_0, y_0)$ 增加了一个随机相位因子。该相位因子是由散射面运动产生的,可以表示为 $\exp[j\varphi(x_0 - v_x t, y_0 - v_y t)]$ 。其中, v_x 和 v_y 分别为 x_0 和 y_0 方向上的速度,因此该复振幅可表示为:

$$\tilde{E}'(x_0, y_0) = 2\cos[kx \sin(\alpha/2)] \times \exp[j\varphi(x_0 - v_x t, y_0 - v_y t)]. \quad (7)$$

本实验中, $v_y = 0$ 。由菲涅尔衍射及成像关系,忽略了常量因子,可导出探测器表面的复振幅分布为:

$$\begin{aligned} \tilde{E}(\xi, \eta; t) = & \exp\left[\frac{jk}{2z_2}(\xi^2 + \eta^2)\right] \times \int_{\xi_1} \int_{\xi_2} \int_{\xi_2} 2\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}x_0 \sin(\alpha/2) + \frac{2\sin(\alpha/2)}{\lambda}v_x \pi t\right] \times \exp[j\varphi(x_0, y_0)] \times \\ & \exp\left\{\frac{jk}{2z_1}[x_0 + v_x t]^2 + y_0^2\right\} \times \exp\left\{-j2\pi\left\{\frac{x}{\lambda z_2}[M(x_0 + v_x t) + \xi] + \frac{y}{\lambda z_2}(M y_0 + \eta)\right\}\right\} \times dx_0 dy_0 dx dy, \end{aligned} \quad (8)$$

式中： z_1 与 z_2 分别代表转盘到透镜中心的距离及透镜中心到接收探测器表面的距离， M 为放大率， Σ_1 和 Σ_2 分别为散射表面及临近透镜表面的面积， (ξ, η) 代表探测器平面。公式(8)中积分号内的第一项包含两个部分，后一部分为多普勒频率项，频移量用 f_d 表示：

$$f_d = \frac{2\sin\frac{\alpha}{2}}{\lambda} \times v_x. \quad (9)$$

公式(9)给出了 x 方向的速度与对应多普勒频率的关系，当双光束夹角以及激光波长确定后，二者呈线性关系。公式(3)和公式(9)是完全等价的。两式的区别是由散射面产生的信号品质要比粒子情况下的低，也就是说由散射面产生的多普勒信号对比度比较低，而且随着散射面的增大信号对比度将随之下降。

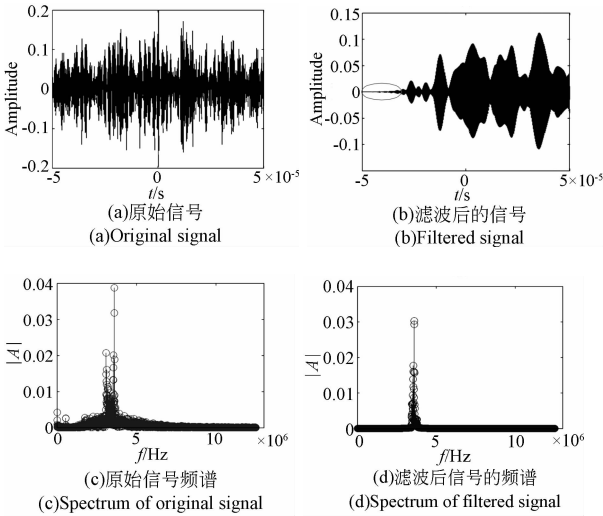


图 5 扩展光束照射下的实验结果

Fig. 5 Experimental results with expanded illuminating beams

本实验分别用扩展光束及直接采用激光束对转盘进行照射，并对两种情况下采集的信号进行了分析处理。图 5 所示为扩展光束照射下采集的信号，扩展光束直径为 10 mm，双光束半夹角 $\alpha/2 = 3.6022^\circ$ ，转盘旋转半径 $R = 5.9$ cm (以双光束照射中心为基准)，旋转周期 $T = 25$ ms，计算可得转盘在 x_0 方向上的速度 $v_x = 14.8283$ m/s。由图 5(a) 可知，原始多普勒信号的部分信号淹没在噪声之中。对噪声信号进行滤波处理后的结果如图 5(b) 所示，结果显示滤波处理后的信号品质得到了很大的提高，图中圈出区域为非实时处理产生的滤波延

时。信号处理的整个过程，如图 6 所示，输出信号首先经过前置放大器和带通滤波器的初步处理，随后对采集的处理信号进行快速傅里叶变换(FFT)；从变换的频谱中获取峰值频率 f_d 并以此作为窄带滤波带宽的中值， Δf 为带宽的半宽度，将二者的差与和分别作为窄带滤波的上限频率和下限频率；最后将滤波后的信号再次进行 FFT 变换，并确定变换后频谱中峰值对应的频率为多普勒频率。

图 5(c)、5(d) 分别代表原始信号和滤波后信号的频谱分布，通过对比可以看出原始信号中大部分噪声已经被滤除。多普勒频率由频谱的峰值给出，图 5(d) 中的峰值频率即多普勒频率 $f_d = 3.5950$ MHz，经计算得到的速度 $v = 15.0801$ m/s。测量得到的速度与转盘实际速度的相对误差约为 1.7%。

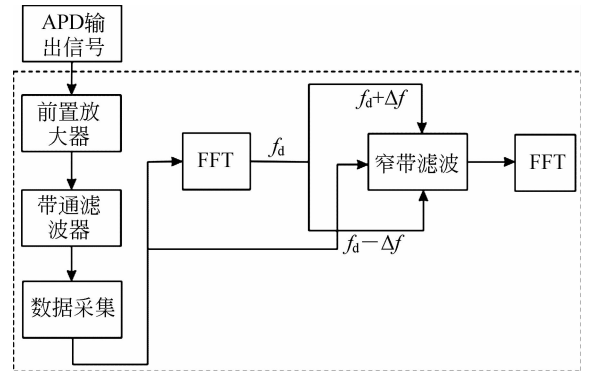


图 6 信号处理框图

Fig. 6 Signal processing block diagram

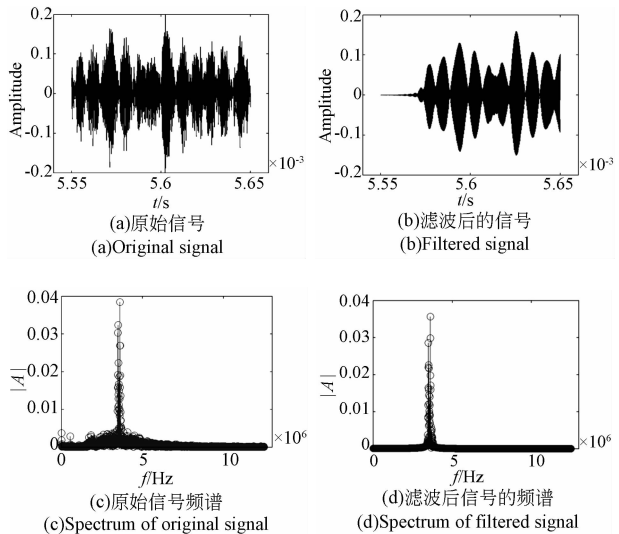


图 7 激光束照射下的实验结果

Fig. 7 Experimental results with laser beams

本文在同样条件下采用激光束直接照射转盘,获得的结果如图7所示。其中,转盘参数 $R=5.1$ cm,旋转周期 $T=21$ ms,其它参数不变,经计算得到的转盘速度 $v_x=15.2592$ m/s。图7(a)、7(b)分别为原始多普勒信号及去噪后的多普勒信号,图7(c)、7(d)为与之对应的频谱。从图7(d)频谱中可以得到多普勒频率 $f_d=3.6194$ MHz,经计算得到测量值 $v=15.3467$ m/s,测量值与实际值之间的相对误差为0.57%。

综上所述可以得出,扩展光束的测量系统获得的信号虽然信噪比下降,但是通过适当的处理后依然能够获得较为满意的结果。最后,实验通过固定

转盘转速并径向移动转盘来获取不同的速度值,多次测量的结果及相对误差如表1所示。从表中可以看出,在扩展光束条件下获得的测量结果的平均误差为1%~2%,在原始激光条件下测得结果的平均误差为0.5%~1.5%。两种方法的精度差异可能有几方面原因:首先是由光束的扩展而直接引起的信噪比下降;其次可能是由扩展光束不完善而引起探测体内条纹的不均匀;此外,由测量区域内转盘径向不同点的速度差异而引起的频谱加宽也可能对测量精度有影响,这些影响因素将会在后续工作中进行深入研究,这里暂且不做详细分析。

表1 测量结果对比

Tab.1 Comparison of experimental results

次数	扩展光束(直径约为10 mm)			准直细光束		
	实测值/(m·s ⁻¹)	真实值/(m·s ⁻¹)	相对误差	实测值/(m·s ⁻¹)	真实值/(m·s ⁻¹)	相对误差
1	10.983 5	10.839 4	1.33%	8.152 0	8.301 6	1.84%
2	15.080 1	14.828 3	1.70%	15.346 7	15.259 2	0.57%
3	16.462 7	16.259 1	1.25%	17.494 7	17.802 4	1.76%
4	20.789 6	20.368 6	2.07%	21.324 8	21.651 5	1.53%
5	25.013 7	24.388 7	2.56%	23.912 5	24.275 9	1.52%

4 总 结

本文提出了一种基于扩展光束的差动式激光多普勒测速方法。该方法对激光束进行两次光束扩展,并使扩展后的两相干光束在空间某位置相交,相交区域即为本系统的探测区域。与经典差动多普勒激光测速系统相比,经光束扩展后形成的探测体要比一般的椭球形探测体大得多。因此在实

际弹丸速度的测量过程中,本文所提出的方法有望解决因弹道偏差而导致的传统多普勒系统无法测量的问题。本系统不但可以测量弹丸的瞬时速度,还可以采用并联方式来监测弹丸在弹道不同位置上的速度分布,这对于一些指标的评估也具有一定的意义。由实验结果可知,速度在10~25 m/s内的测量值与实际值的平均误差可以达到1%~2%,这表明了扩展光束的差动多普勒测速系统在实际测量中是有效的。

参考文献:

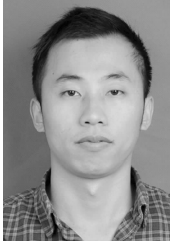
- [1] 何云峰,王昌明,柳光辽,等. 感应式线圈靶半径分布对区截信号的影响[J]. 南京理工大学学报, 2002,26(5):473-477.
HE Y F, WANG CH M, LIU G L, et al.. The in-

fluence of inductional coil targets radius distribution on induced signal [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2002, 26(5): 473-477. (in Chinese)

- [2] 董华,倪晋平,王铁岭. 基于天幕靶的弹丸过靶信息探测提取方法的研究[J]. 核电子学与探测技术,

- 2009, 29(4): 844-848.
- DONG H, NI J P, WANG T L. Research of the information detect acquire method which the projectile flying the target based on sky screen target [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2009, 29(4): 844-848. (in Chinese)
- [3] 倪晋平, 蔡荣立, 田会, 等. 基于大靶面光幕靶 30mm 口径弹丸速度测试技术[J]. 测试技术学报, 2008, 22(1): 17-23.
- NI J P, CAI R L, TIAN H, *et al.*. Velocity measuring technology for 30 mm-caliber flying projectiles based on large area light screens [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2008, 22(1): 17-23. (in Chinese)
- [4] 彭登, 徐建闽, 曾翼. 基于 ARM920T 内核的雷达测速仪设计与算法研究[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(1): 99-102.
- PENG D, XU J M, ZENG Y. Algorithm research and design of radar velocity detector based on ARM920T core [J]. *Computer Engineering and Design*, 2011, 32(1): 99-102. (in Chinese)
- [5] 刘昌文, 程文明, 刘杰. 二维计数跟踪型激光多普勒测速系统的智能化及其应用[J]. 光学精密工程, 2002, 10(6): 639-643.
- LIU CH W, CHENG W M, LIU J. Intelligent control and application of two-dimensional counting-tracing LDA measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 639-643. (in Chinese)
- [6] 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- SHEN X. *Laser Doppler Velocimetry and Its Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [7] GILBERT T, FEKET C E. Riva laser Doppler measurements of blood velocity in human retinal vessels [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, 68(4): 526-531.
- [8] YEH Y, CUMMINS H Z. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, 4(10): 176-178.
- [9] TRUAX B E, DEMAREST F C, SOMMARGREN G E. Laser Doppler velocimeter for velocity and length measurements of moving surfaces [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(1): 67-73.
- [10] QUERCIOLO F, MANNONI A, TIRIBILLI B. Laser Doppler velocimetry with a compact disc pickup [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(25): 5932-5937.
- [11] PARK D J, PARK G J, AUM T S, *et al.*. Measurement of displacement and vibration by using the oblique ray method [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3728-3732.
- [12] 周健, 龙兴武. 差动激光多普勒测速仪在固体速度测量中的应用[J]. 应用光学, 2009, 30(2): 334-337.
- ZHOU J, LONG X W. Application of differential laser Doppler velocimeter in solid velocity measurement [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(2): 334-337. (in Chinese)
- [13] 邹泓, 赵洋. 激光多普勒技术在固体测量方面的运用[J]. 光学技术, 2000, 26(2): 101-106.
- ZOU H, ZHAO Y. Application of laser Doppler technique in solid surface measurement [J]. *Optical Technique*, 2000, 26(2): 101-106.
- [14] 周健, 龙兴武. 多点分层差动激光多普勒自身测速仪的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1837-1844.
- ZHOU J, LONG X W. Research on multipoint layer-type laser doppler self-velocimeter [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2010, 37(7): 1837-1844. (in Chinese)
- [15] SRIRAM P, HANAGUD S, CRAIG J, *et al.*. Scanning laser Doppler Technique for velocity profile sensing on a moving surface [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(16): 2409-2417.
- [16] KOICHI M. Axial scanning laser Doppler velocimeter using wavelength change without moving mechanism in sensor probe [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 5960-5969.
- [17] KOICHI M, TAKAHIRO H. Nonmechanical axial scanning laser Doppler velocimeter with directional discrimination [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4783-4787.
- [18] KOICHI M, TOSHIKI F, RYUSUKE I. Nonmechanical transverse scanning laser Doppler velocimeter using wavelength change [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(32): 6121-6127.

作者简介:



李秀明(1985—),男,吉林长春人,博士研究生,2009年于长春理工大学获得工学学士学位,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: lixiuming@tju.edu.cn



黄战华(1965—),男,湖北孝感人,教授,博士生导师,1986年于华中科技大学获得学士学位,1989年、1992年于天津大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光电图像处理与模式识别、光电子信息技术及多媒体计算机应用与控制的研究。E-mail: zhanhua@tju.edu.cn



朱 猛(1984—),男,河北秦皇岛人,博士后,2006年于燕山大学获得理学学士学位,2008年、2011年于天津大学分别获得硕士和博士学位,主要从事全息与散斑检测、光学信息处理等方面的研究。E-mail: zhumeng@tju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)