

文章编号: 0258-7025(2008)07-1050-05

# 基于激光散射的高速微粒测速系统

贾哲新 巩 轲 何淑芳 霍玉晶

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要** 高速微粒速度测量技术是空间高速粒子地基模拟系统中的一项关键技术。设计并实现了一种利用激光光幕对高速运动微粒的非接触式速度测量系统,分析了测量误差以及进一步提高测量精度的方法。该系统以高功率半导体激光器作为光源,同时采用 PIN 光电二极管作为光电探测器,利用接收侧向散射光脉冲作为起始和结束信号以测量微粒的平均速度。实验结果表明,该系统可对速度范围为 1~10 km/s,直径大于 100  $\mu\text{m}$  的高速微粒进行测速,精度优于 1.8%。

**关键词** 测量;高速微粒;激光光幕;散射光

**中图分类号** TB 934;TP 212.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20083507.1050

## High-Speed Flyer Velocity Measurement System Based on Laser Scattering

Jia Zhixin Gong Ke He Shufang Huo Yujing

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** High-speed flyer velocity measurement is one of the key technologies in simulating impact of space flyer driven by ground-based system. A non-contact velocity measurement system for high-speed flyer is developed, and the sources of measurement error and the way to improve the measurement accuracy are also analyzed. A high-power laser diode module is used as the light source, and a PIN photodiode is used as the photo-detector. This system utilizes lateral scattering light as the start and the end signal to measure the average velocity of flyers. Experimental results show that this system is adequate to measure the flyers larger than 100  $\mu\text{m}$ , with the velocity varying from 1 km/s to 10 km/s. And its accuracy is higher than 1.8%.

**Key words** measurement; high-speed flyer; laser screen; scattering light

## 1 引言

高速空间碎片对航天器安全运行构成严重威胁,为充分了解空间碎片对航天器表面的影响,需通过地基设施,在可控条件下模拟空间中的高速碰撞过程。这样成本低、重复性好、能得到规律性结果,还可与天基探测结果、数值模拟结果进行比较<sup>[1]</sup>。通过高强度激光<sup>[2,3]</sup>、二级轻气炮等产生的高速微粒轰击待测靶,研究不同速度微粒对材料的冲击效应,其中微粒速度是一个重要参数。自 20 世纪 70 年代以来,对激光测速技术展开了许多研究。激光粒子测速仪<sup>[4]</sup>对高速微粒的测量<sup>[5]</sup>需造价昂贵的高速摄像系统,且技术难度高;激光多普勒测速仪和激

光速度干涉仪的后续电子器件频响有限成为对高速微粒测量的主要限制<sup>[6]</sup>。激光光幕测速法具有很强的抗干扰能力及很高的测量精度,更适于高速测量,但传统的激光光幕法只针对弹丸等较大飞行物,对于直径低于毫米量级的微粒由于灵敏度等原因难以响应。本文提出用激光光幕散射法对高速微粒进行测速,具有精度高、成本低的优点。

## 2 系统设计与实现

### 2.1 测量原理

系统原理基于“速度等于距离/时间”。系统的总体结构主要分为激光散射装置和微弱光信号接收

收稿日期:2007-10-22;收到修改稿日期:2008-01-15

作者简介:贾哲新(1982—),男,陕西人,硕士研究生,主要从事光电检测和激光测速方面的研究。

E-mail:jia-zx05@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介:霍玉晶(1946—),男,河北人,教授,博士生导师,主要从事固体激光与光电子技术方面的研究。

E-mail:hyj-dee@tsinghua.edu.cn

及信号处理装置。当微粒先后经过两光幕时,微粒产生的散射光由光探测器接收后进行信号调理形成测时脉冲信号,测量前后两脉冲的时间间隔及两光幕间距,即可计算出微粒在这一区间的飞行速度。

## 2.2 激光散射装置

激光散射装置主要由两个平行光幕构成。如图 1 所示,两光幕光源分别选用输出功率 1 W,中心波长为 807.7 nm 的激光二极管(LD)。用光纤透镜对 LD 产生光束的快轴进行准直,得到 1 mm 厚,30 mm 宽的平行光束。采用自制的 HH-V 型激光器驱动电源为 LD 提供工作电流(稳流精度优于 1 mA),并精密控制激光器的工作温度(控温精度优于 0.1 °C);同时采用光学滤波方法,降低非测量用光谱范围大部分其他背景光(包括高温颗粒自身发射的光等)的影响;采用消光器消除光幕在测量室内的散射光。

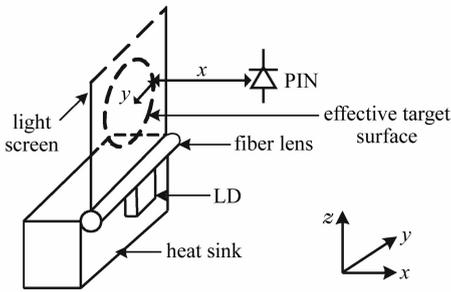


图 1 光幕靶及光探测器位置示意图

Fig. 1 Schematic of light screen and the optical detector

对  $x$  方向,两光幕光强的差异会影响距离测量的精度。对  $y$  方向,光强在光幕有效靶面(直径 3 cm)范围内存在 10% 的波动。光探测器置于距有效靶面中心  $y$  方向 1.5 cm,  $x$  方向 3.5 cm 处。因为微粒经过两光幕时可能分布在有效靶面的任何位置,而微粒发生散射位置的变化会导致接收到的光功率存在差异,这将引起时间测量误差。由于散射光光源与光探测器之间距离的最大值为  $\sqrt{3.5^2 + 3^2}$  cm  $\approx$  4.61 cm,最小值为 3.5 cm,根据光功率与光源到探测器距离的平方反比关系,两次接收光功率之比为  $(4.61/3.5)^2 \approx 1.73$ 。由光接收器的光电转换关系,光接收器输出两脉冲峰值之比最大为 1.73,同时考虑  $y$  方向光强 10% 的波动及微粒翻滚等其他原因,故输出脉冲峰值之比上限为 2。

## 2.3 微弱光信号接收及信号处理装置

PIN 光电二极管具有使用方便、可微型化的优点,但不具有内部增益,因此整个系统后续的处理精度主要依赖于前置放大器输出信号的精度<sup>[7]</sup>。由于

散射光信号微弱,前置放大器不仅要有一定的带宽,而且灵敏度要高,因此对其设计是一个难点。前置放大器采用噪声低、带宽大的互阻抗结构<sup>[7]</sup>,前置放大器输出端级联高通滤波器,以衰减低频  $1/f$  噪声及低频干扰信号,从而获得较高的信噪比,提高灵敏度。最后级联主放大器,从而得到具有一定幅度的脉冲信号。整个光接收器总的互阻增益为 160 dB $\Omega$ ,带宽为 1 MHz。

对光接收器输出的脉冲信号鉴别采用恒定阈值鉴别法,将模拟脉冲信号转化为数字脉冲信号。恒定阈值鉴别法可能存在误判,而要使误判概率达到  $10^{-5}$  左右,阈值和噪声方差的比值必须大于 4<sup>[8]</sup>。光接收器输出的噪声为 63 mV,则阈值取 252 mV,此时系统对应灵敏度为 -50.01 dBm。最后通过标称测时精度可达皮秒量级的 ACAM 公司 TDC-GP1 芯片测量两次数字脉冲信号前沿的时间差<sup>[9]</sup>,就可得到微粒经过两光幕的时间。

## 3 测量误差分析

### 3.1 时间测量误差

#### 3.1.1 漂移误差

漂移误差是由于光接收器输出的两脉冲信号的幅度和形状存在差异,在确定起止时刻时引入的测量误差<sup>[10]</sup>。漂移误差的主要来源有:两光强信号的幅度和形状;光接收器的带宽和动态范围;以及判别阈值电平的高低。从脉冲的起始点到阈值电平  $V_{th}$  的判别点,对于两个峰值不同的脉冲,则会引起两延时  $t_{p1}, t_{p2}$  的不同,进而引入漂移误差  $t_w$ <sup>[11,12]</sup>

$$t_w = |t_{p1} - t_{p2}| = \left| \frac{V_{th}}{V_{p1}} t_r - \frac{V_{th}}{V_{p2}} t_r \right| = \frac{V_{th} t_r}{V_{p1}} \left| 1 - \frac{V_{p1}}{V_{p2}} \right|, \quad (1)$$

式中  $V_{p1}, V_{p2}$  分别为延时  $t_{p1}, t_{p2}$  对应的电平,  $t_r$  为上升沿延时。从(1)式知,为减小漂移误差,应选择较低的判别阈值,同时加强输入光强,以提高信噪比,从而得到峰值较大的脉冲信号。在实际应用中,前后两个脉冲峰值变化最大不会超过 2 倍,故最大漂移误差  $t_{w \max} = \frac{V_{th} t_r}{2V_{p1}}$ 。由于  $V_{th} \leq V_{p1}$ ,故  $t_{w \max} \leq t_r/2$ 。

上升沿  $t_r$  可由经验公式估算:  $t_r = 0.35/B$ ,  $B$  为光接收器的带宽。故最大漂移误差  $t_{w \max} \leq 0.35/2B = 175$  ns。

#### 3.1.2 时间抖动误差

时间抖动误差是由于噪声存在于阈值电平上而产生的统计误差<sup>[13]</sup>,主要由光接收器的带宽和信噪

比决定,可估计为<sup>[12]</sup>  $t_j \approx 0.35/(2BR_{\text{SNR}})$ ,  $R_{\text{SNR}}$  为光接收器输出信号的信噪比,是输出信号的峰值与噪声的均方根(RMS)值的比值。由于本系统是单次测量,无法通过对信号进行相关或累加处理来提高信噪比,因此对单次测量的时间抖动估计,必须考虑噪声的峰值影响,因此有  $t_j \leq \frac{0.35 \times 6}{2BR_{\text{SNR}}}$ 。光接收器带宽 1 MHz,输出噪声的 RMS 值为 63 mV,输出信号幅度一般在 1.5 V 左右,故  $t_j \leq \frac{0.35 \times 6 \times 0.063}{2 \times 1 \text{ MHz} \times 1.5} = 0.0441 \mu\text{s} \leq 45 \text{ ns}$ ,取  $t_{j \text{ max}} = 45 \text{ ns}$ 。

### 3.1.3 传输延时误差

传输延时误差是两个信号通过比较器时传输延时不同引起的误差。采用高速器件可以显著降低这类误差。根据芯片数据手册,传输延时误差在 5 ns 之内,因此  $t_{d \text{ max}} = 5 \text{ ns}$ 。

上述各种误差可能会同时出现最大值,因此总的时间测量误差为  $dt = t_{w \text{ max}} + t_{j \text{ max}} + t_{d \text{ max}} \leq 225 \text{ ns}$ 。

## 3.2 距离测量误差

由文献[14]可知,各项距离测量误差计算如下:

1) 运动轨迹运动与光幕不垂直引起的误差

通过补偿可降低误差,即在位移  $s = 20 \text{ cm}$  基础上预估一段小位移  $\Delta s'$ ,根据计算取  $\Delta s' = 0.05 \text{ cm}$ ,可以使误差最小,为此有  $\Delta s_1 \leq 0.05 \text{ cm}$ 。

2) 光幕距离测量误差:  $\Delta s_2 \leq 0.1 \text{ cm}$ 。

3) 两光幕不平行引起的误差:  $\Delta s_3 \leq 0.05 \text{ cm}$ 。

4) 光幕厚度及能量不均引起的误差:  $\Delta s_4 \leq 0.05 \text{ cm}$ 。

上述各种误差通常不会同时出现最大值,采用均方和的形式表达测距误差较为合理<sup>[14]</sup>,最终距离测量误差为

$$ds = \sqrt{\Delta s_1^2 + \Delta s_2^2 + \Delta s_3^2 + \Delta s_4^2} \leq 0.132 \text{ cm}.$$

## 3.3 速度测量误差

由位移  $s = 20 \text{ cm}$ ,  $ds \leq 0.132 \text{ cm}$ ,  $dt \leq 225 \text{ ns}$ ,取速度上限  $v = 10 \text{ km/s}$ (此时对应的误差最大)时,则微粒经过两光幕所花时间为  $t = s/v = 20 \mu\text{s}$ ,由此可得测速误差为

$$\frac{dv}{v} = \frac{ds}{s} + \frac{dt}{t} \leq \frac{0.132}{20} + \frac{225}{20000} = 0.01785 \leq 1.8\%.$$

## 4 实验及讨论

### 4.1 速度测量范围

空间微粒的速度范围在 1~10 km/s,目前尚不

能按需要产生具有精确速度的微粒,因此对于系统能否满足实际测量要求必须采用实验方法验证。实验室测试平台如图 2 所示,首先用声光调制器调制连续激光;再将其产生的 1 级衍射光进行衰减,即得到可用于模拟散射光的微弱光脉冲信号;调节脉宽和两次光脉冲的时间间隔,可模拟不同速度微粒穿过光幕的散射光脉冲;最后经由测速系统接收并进行时间测量,若系统正常工作,即证明系统对这一速度范围的微粒能够进行测速。整个实验在暗室条件下进行,以避免外界杂散光的干扰。

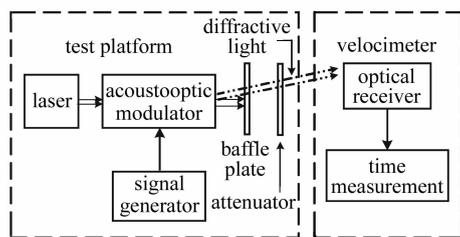


图 2 测试平台部分示意图

Fig. 2 Schematic of testing platform

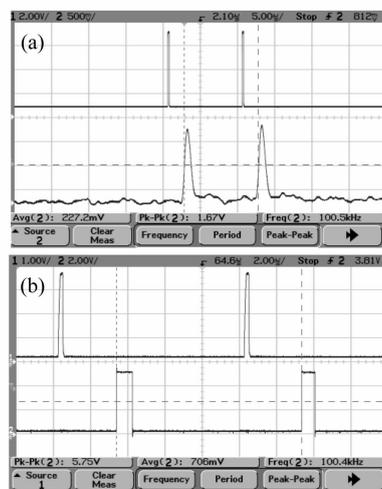


图 3 各个模块的输出波形图。(a) 光接收器的输出脉冲信号;(b) 脉冲鉴别后的数字信号

Fig. 3 Output waveform of each module. (a) output pulses from optical receiver; (b) digital signals after pulse discrimination

最大速度 10 km/s 的微粒穿过 1 mm 光幕会产生 100 ns 散射光脉冲,设定调制产生的光脉冲宽度为 100 ns。图 3(a),(b) 上半部分是信号发生器所产生的标准脉冲,(a) 下半部分是光接收器的输出波形,整体工作性能稳定,无明显的过冲,(b) 下半部分是脉冲鉴别后向计时芯片输入的数字信号。可见,系统对 100 ns 光脉冲响应明显,工作正常,对 10 km/s 的高速微粒能够进行测速。同时根据图 6,

系统也能够测量 1.268 m/s 的低速微粒。因此，该系统可满足 1~10 km/s 的测速要求。

### 4.2 测时误差标定

如图 2,测速系统测量两次光脉冲的时间间隔,与信号发生器产生的标准时间间隔比较,可得到测时误差。图 4 给出了时间抖动与脉冲峰值之间的测量结果。横坐标表示光接收器输出脉冲的峰值(两个脉冲峰值相等),纵坐标表示时间抖动的绝对误差。脉冲峰值越大,信噪比越大,时间抖动越小。时间抖动误差本质上由噪声引起,是随机分布的,因此实测值在仿真值上下波动。

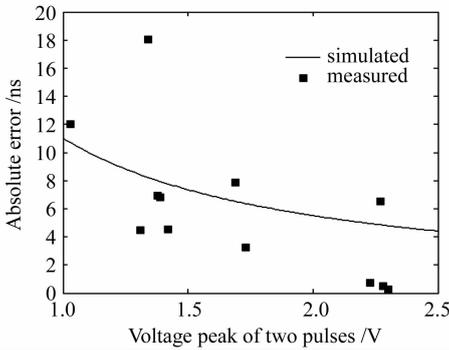


图 4 两脉冲峰值相等时时间测量的绝对误差  
Fig. 4 Absolute error versus voltage peak value

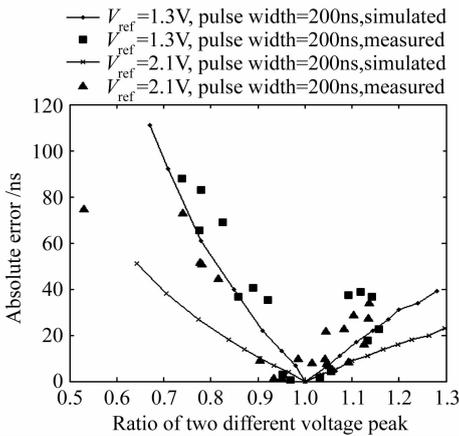


图 5 两脉冲峰值不同所引入的绝对误差  
Fig. 5 Absolute error versus ratio of two different voltage peak values

两脉冲峰值的不同对测量误差的影响如图 5 所示,其中参考脉冲峰值  $V_{ref}$  分别为 1.3 V 和 2.1 V,横坐标是另一脉冲峰值与参考峰值的比值,纵坐标是测时的绝对误差。虽然时间抖动无法避免,实测数据出现随机波动,但实测值与仿真图的变化趋势相同:两脉冲峰值越接近,绝对误差越小,测量的绝对误差小于 100 ns。根据误差分析,理论时间测量误差小于 225 ns。由此可见,实际测量误差完全符合理

论分析,因此,在 10 km/s 以内,测速精度小于 1.8%。

### 4.3 可测量微粒的粒径范围

测量直径 200  $\mu\text{m}$  的金属微粒速度,其输出波形如图 6,下半部分是光接收器检测散射光的输出响应,而上半部分是经过脉冲鉴别得到的起始时间信号和结束时间信号。

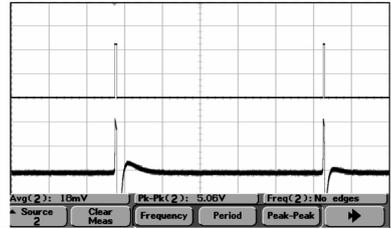


图 6 实测波形图

Fig. 6 Measured waveform

可见,直径 200  $\mu\text{m}$  的微粒产生的散射光,经过光接收器检测可输出峰值(单向脉冲峰值)为 2.53 V 的脉冲信号,光接收器输出趋于饱和,信噪比为 39.7。由于信噪比为 9 时仍可进行测量,同时 LD 的功率可相应增大,根据粒径与散射光强的关系<sup>[15]</sup>可估算出信噪比为 9 时微粒直径约为 100  $\mu\text{m}$ ,故该系统可测直径 100  $\mu\text{m}$  以上微粒的速度。

## 5 结 论

设计并实现了基于激光光幕散射的高速微粒速度测量系统,并进一步分析了阈值判别与漂移误差对测量精度的影响。经实验室环境检验,系统可对最小直径为 100  $\mu\text{m}$ ,速度范围为 1~10 km/s 的微粒进行测速,测量精度优于 1.8%。该系统具有成本低、响应迅速、灵敏度高的特点,如采用更高精度的距离测量装置和计时装置,可以进一步提高测量精度。

### 参 考 文 献

- Zhang Wenbing. Velocity measurement technologies of space debris driven by ground-base dimulation devices [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2003, **23**(3):138~142  
张文兵. 地基模拟空间碎片速度测试技术[J]. *航天器环境工程*, 2003, **23**(3):138~142
- Gu Zhuowei, Sun Chengwei, Luo Lijun. Experimental research on laser driven flyer and its application possibility in simulation of aerospace particles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(5):428~431  
谷卓伟,孙承伟,罗利军. 激光驱动飞片实验研究及其应用分析[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(5):428~431
- Hua Yinqun, Zhang Yongkang, Yang Jichang et al.. Study on theoretical thickness of free limiting layer in laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):751~754  
花银群,张永康,杨继昌等. 激光冲击强化技术中自由约束层理论厚度的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):751~754

- 4 N. J. Lawson. The application of laser measurement techniques to aerospace flows [J]. *Aerospace Engineering*, 2004, **218**:33~57
- 5 J. Haertig, M. Havermann, C. Rey *et al.*. Particle image velocimetry in Mach 3.5 and Mach 4.5 shock-tunnel flows [J]. *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut.*, 2002, **40**(6):1056~1060
- 6 Gu Zhuowei, Sun Chengwei, Liu Cangli *et al.*. The measurement of the average velocity of flyer driven by mini size laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(3):309~312  
谷卓伟,孙承伟,刘仓理等.小型激光器驱动飞片的平均速度测量研究[J].*强激光与粒子束*,2001,**13**(3):309~312
- 7 Tarmo Ruotsalainen, Pasi Palojärvi, Juha Kostamovaara. A wide dynamic range receiver channel for a pulsed time-of-flight laser radar [J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2001, **36**(8):1228~1238
- 8 Ren Jianguo, Zhang Le, Zhang Baodong *et al.*. False alarm rejection measures of laser range finding [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(1):26~28  
任建国,张乐,张宝东等.激光测距中的几种虚警抑制措施[J].*光学与光电技术*,2005,**3**(1):26~28
- 9 Lei Linjun, Yang Yan, Chen Weibiao. High accuracy time interval unit for spaceborne laser range finder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1422~1426  
雷琳君,杨燕,陈卫标.星载激光测距仪的高精度时间间隔测量单元[J].*中国激光*,2007,**34**(10):1422~1426
- 10 Zhao Dalong, Chen Qiansong, Qin Laigui *et al.*. Study on walk error in pulsed laser range-finding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9):1112~1116  
赵大龙,陈千颂,秦来贵等.脉冲激光测距漂移误差的研究[J].*中国激光*,2004,**31**(9):1112~1116
- 11 Ari Kilpelä, Juha Ylitalo, Kari Määttä *et al.*. Timing discriminator for pulsed time-of-flight laser rangefinding measurements [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, **69**(5):1978~1984
- 12 Pasi Palojärvi, Tarmo Ruotsalainen, Juha Kostamovaara. A 250-MHz BiCMOS receiver channel with leading edge timing discriminator for a pulsed time-of-flight laser rangefinder [J]. *IEEE J. Solid State Circuits*, 2005, **40**(6):1341~1349
- 13 Waldemar A. Kielek. Random error in timing using weak light pulse, photomultiplier, and threshold crossing detection [J]. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 1998, **47**(2):543~550
- 14 Liu Qunhua, Shi Huanfang, Yan Bingxian *et al.*. The infrared light screen system and accuracy analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11):1409~1411  
刘群华,施浣芳,阎秉先等.红外光幕靶测速系统和精度分析[J].*光子学报*,2004,**33**(11):1409~1411
- 15 Liang Chunlei, Huang Huijie, Ren Bingqiang *et al.*. Study of miniature optical sensor for laser particle counter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1260~1264  
梁春雷,黄惠杰,任冰强等.激光尘埃粒子计数器微型光学传感器的研究[J].*光学学报*,2005,**25**(9):1260~1264