

基于线阵图像传感器的新型空间滤波测速仪

何鑫,周健,聂晓明,龙兴武

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要: 为了实现对固体表面运动速度的高精度测量,建立了一套基于线阵图像传感器的新型空间滤波测速仪系统,提出了一种确定系统误差来源的新方法。图像传感器在系统中既作为探测器又作为空间滤波器使用,系统结构得到了很大的简化。在理论上对线阵图像传感器的空间滤波特性进行了分析,并设计了图像传感器的驱动电路、信号采集和预处理电路。测量了由高精度转台作为主动轮的传送带速度和日光灯的发光频率。实验结果表明,传送带速度测量精度在 0.77% 以内,11 min 内的测量不确定度为 0.66%; 而在不使用成像系统的条件下直接测量日光灯的发光频率时,测量不确定度在 0.056% 以内,提高了一个数量级。总之,该测速仪能够基本满足传送带表面运动速度测量的实时、非接触、稳定和高精度等要求。

关键词: 固体表面速度测量; 线阵图像传感器; 空间滤波测速仪; 电路设计; 误差来源
中图分类号: TN247; O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4117-06

Novel spatial filtering velocimeter based on a linear image sensor

He Xin, Zhou Jian, Nie Xiaoming, Long Xingwu

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to realize the velocity measurement of moving solid-surface, a novel spatial filtering velocimeter based on linear image sensor was established and a new method was proposed to ensure the error source of the system. The image sensor was employed both as a detector and as a pair of differential spatial filters so that the system was simplified. The spatial filtering characteristics of the linear image sensor were investigated theoretically and the driving circuit and the signal acquiring and preprocessing circuit were designed. The velocity of a conveyor belt using a high-precision turn table as the driving wheel and the radiating frequency of a lamp were measured. The experimental results show that the measurement error of velocity of conveyor belt was within 0.77% and the measurement uncertainty within 11 minutes was 0.66%; the radiating frequency of a lamp was measured under the condition of no imaging system, and the measurement uncertainty turned out to be 0.056%, which was an order better. In a word, the velocimeter can satisfy the requirements of non-contact, real-time, high precision and high stability velocity measurement of a conveyor belt.

Key words: velocity measurement of solid surface; linear image sensor; spatial filtering velocimeter; circuit design; error source

收稿日期:2014-04-13; 修订日期:2014-05-15

基金项目:国家自然科学基金(61308060)

作者简介:何鑫(1987-),男,博士生,主要从事光电检测方面的研究。Email:wthexin@gmail.com

导师简介:龙兴武(1958-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事激光和光电子技术等方面的研究。Email:xwlong110@sina.com

0 引言

随着光电子技术的迅速发展,基于各种原理的光学测速仪已相继提出并应用于物体速度测量。其中应用最为广泛的主要有三种:即激光多普勒测速仪^[1-2]、激光散斑测速仪^[3]和空间滤波测速仪^[4-5]。相比于前两种测速仪,空间滤波测速仪还没有引起人们较多的关注。事实上,空间滤波测速仪较之激光多普勒测速仪和激光散斑测速仪不仅具有更简单的光学、机械装置,而且不再必须使用激光器做光源,因而具有更好的光源选择性和较低的成本,是一种具有巨大潜力和发展前途的光学测速仪。

传统的空间滤波测速仪的空间滤波器通常由一个透射型光栅构成。透射型光栅有可能是一组间隔相等的平行狭缝组成^[6],或者由一组棱镜组成^[7]。这种类型的光栅主要缺点就是结构较复杂,加工难度比较大,而且光栅周期不能调整。特别是当要测量二维速度^[8],或者进行差分探测时^[9],要增加另外一路探测子系统,进一步增加了系统结构的复杂性和安装难度。针对透射型光栅的这一缺点,图像传感器被应用到空间滤波测速系统中来,大大简化了系统结构,提高了系统的灵活性和稳定性^[10-11]。但是,由于图像传感器的帧频有限,给高速运动物体测量带来了限制。尽管可以采用像素合并(pixel binning)技术来提高帧频,但是使图像传感器的设计变得很复杂,增加了设计的难度。

文中在充分了解空间滤波测速原理的基础上,提出了一种基于线阵图像传感器的新型空间滤波测速仪。该 CMOS 不仅拥有普通图像传感器的功能,而且跟普通的图像传感器相比,在帧频一样的情况下,数据率约减小了一个数量级,极大地降低了对电路系统和信号处理系统的要求。利用该系统对由高精度转台作为主动轮的传送带的速度进行了测量,并提出一种确定该系统的误差来源的新方法。

1 空间滤波测速仪的构成及其基本原理

1.1 空间滤波测速仪的构成

图 1 为空间滤波测速仪的结构示意图。它主要由光学系统和信号采集与处理系统两大部分组成。

光学系统由照明子系统和成像子系统构成。照明子系统主要包括 LED 光源、聚焦和准直透镜,透镜把 LED 发出的光先聚焦再准直后均匀地照射在被测物体表面。成像子系统主要由一个平凸透镜构成,该透镜把被测物体被照亮部分成像在线阵 CMOS 光敏面上。信号采集与处理系统由高速模/数转换模块、FPGA 以及个人计算机等组成。线阵 CMOS 的驱动时钟以及高速模/数转换器的采集时钟都由 FPGA 产生。高速模/数转换器把从 CMOS 采集到的信号存储在 FPGA 的双端口 RAM 里,经过初步处理后由串口传输到计算机进行进一步处理,从而得到物体的具体运动速度。

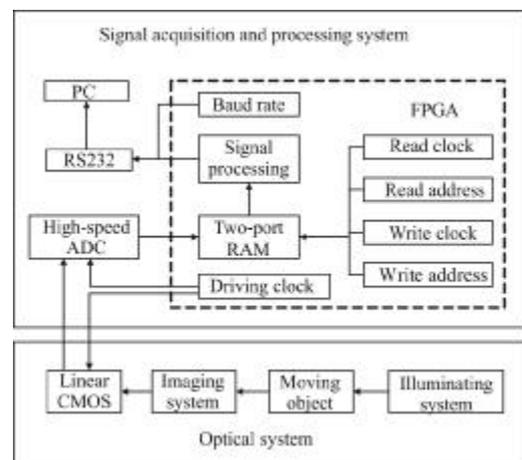


图 1 空间滤波测速仪的结构示意图

Fig.1 Schematic of configuration of spatial filtering velocimeter

1.2 空间滤波测速仪的基本原理

空间滤波测速仪的基本原理和一般光学系统如图 2 所示。光源照射到运动物体表面时,散射光就将运动物体表面的图像信息经过接收物镜传到等距光栅(空间滤波器)上,如图 3 所示。空间滤波器黑色部分为挡光部分,白色部分为透光部分。运动物体表面某个粒子的像在空间滤波器上运动,从而该粒子的速度信息被空间滤波器转换成一个频率与粒子运动速度成正比的光强信号,再通过聚焦透镜将光强信号汇聚在探测器上,被探测器转换成同频率的时域信号。如果物体表面的粒子在与光轴垂直的平面上具有速度 v ,方向与平行狭缝之间的夹角为 θ ,则粒子在滤波器上的像的速度为 v' , v' 在与平行狭缝垂直方向的速度分量为 $v' \cos \theta$ 。则物体表面粒子的运

动速度 v 与时域信号频率 f 之间的关系为:

$$v = \frac{pf}{M \cos \theta} \quad (1)$$

式中: p 为滤波器中平行狭缝之间的间隔, 即空间周期; M 为成像系统中物镜的放大倍数, 即 $v' = Mv$ 。通过测量探测器输出的时域信号的频率, 就可以得到物体运动的速度。

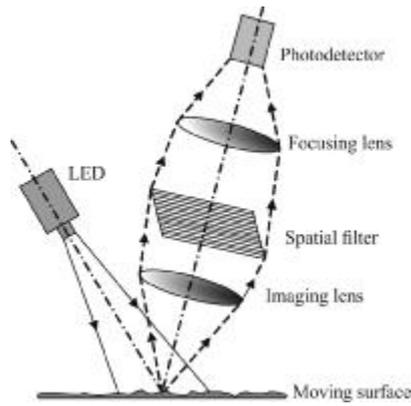


图 2 空间滤波测速仪的基本原理

Fig.2 Basic principle of spatial filtering velocimeter

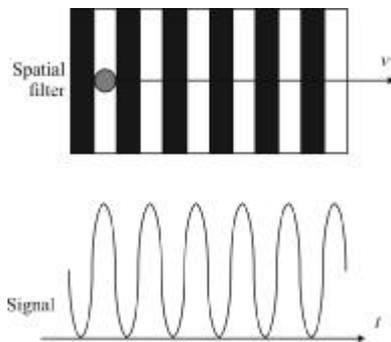


图 3 运动物体的像经空间滤波器后产生的光强时域信号

Fig.3 Light intensity temporal signal of image of moving object out of spatial filter

2 线阵 CMOS 空间滤波器的滤波特性

线阵 CMOS 图像传感器实质上是一组探测器阵列, 每一个像元就是一个探测单元。当把所有奇(偶)数位像元的灰度值累加起来时, 该图像传感器在空间滤波测速仪中就相当于一个空间滤波器和一个光电探测器。所有奇(偶)数位像元就相当于平行狭缝的透光部分, 所有偶(奇)数位像元就相当于挡光部分。假设线阵图像传感器在 x 方向的尺寸为 X , 为了计算方便假设其在 y 方向上尺寸为无限大, 则

由线阵图像传感器构成的空间滤波器的振幅透过率函数为:

$$t(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq 2mb \leq x \leq (2m+1)b \leq X \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为非负整数; b 为 CMOS 像元在 x 方向的大小, 则公式(2)的功率谱密度可以表示为:

$$|T(\mu)|^2 = \left(\frac{\sin \pi \mu n p}{n \sin \pi \mu p} \right)^2 \left(\frac{\sin \pi \mu b}{\pi \mu p} \right)^2 (np)^2 \quad (3)$$

式中: $|T(\mu)|$ 为滤波器的调制传递函数; μ 为 x 方向的空间频率; $X = np$, p 代表滤波器的空间周期大小, 而 n 是指空间滤波器在 x 方向的尺寸 X 内所包含的空间周期数。若每隔一个像元取一个组成空间滤波器, 则 $p = 2b$; 若每隔 4 个像元取 4 个组成空间滤波器, 则 $p = 8b$, 依此类推。当 $p = 8b, n = 16$ 时, 公式(3)所描述的归一化的功率谱密度如图 4 所示。图 4 证明了该滤波器的空间频率选择特性。空间频率成分中满足条件 $\mu p = 0, \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ 的部分能够通过滤波器, 而其他成分则被过滤掉。从图中还可以看出当 $\mu p = \pm 3, \pm 5, \dots$ 时, 透过率已经很低了, 而且频率越高, 透过率越低。因而这部分频率成分通常被忽略不计。真正对产生周期性时间信号有用的是频率成分 $\mu p = \pm 1$, 通过该部分频率能够得到相应的时间信号频率为 $f = uv = v/p$, 由此就可以确定物体在平行于像元阵列方向的运动速度。

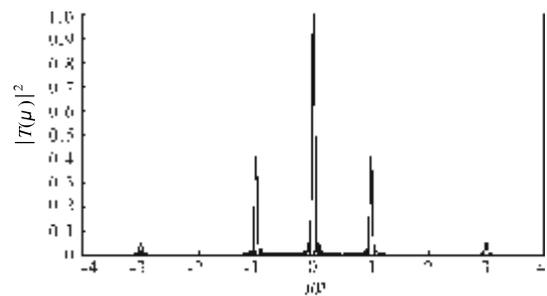


图 4 线阵 CMOS 图像传感器型滤波器的功率谱 $p = 8b, n = 16$
Fig.4 Power spectra $|T(\mu)|^2$ for a spatial filter constructed by a linear CMOS image sensor with $p = 8b, n = 16$

3 线阵 CMOS 图像传感器信号的产生与采集

为了提高测速仪的实时性和设计的灵活性, 在设计时选择了图像传感器而非工业相机。同时为了满足对高速运动物体的测量要求, 选择了一种新型的高速线阵 CMOS 图像传感器。其最大数据率虽然

只有 10 MHz, 最大帧频却能达到 64 kHz, 完全能够满足陆地上一般交通工具速度测量的要求。

3.1 图像传感器的驱动电路设计

由图 1 可知, 图像传感器的驱动时钟信号由 FPGA 产生。FPGA 输出的脉冲信号高电平是 3.3 V, 而图像传感器工作在高性能情况下时, 所需的驱动脉冲信号高电平为 5 V。所以 FPGA 输出的脉冲信号要经过放大才能有效地驱动图像传感器工作。

数字信号的方波中含有丰富的高频谐波分量, 边沿越陡峭, 高频成分越多, 如果遇到特性阻抗不连续, 就会发生反射, 使部分信号沿传输线反射回源端。如果电路设计不合理, 反射信号就会与原始信号叠加在一起, 使原始输入信号产生畸变。反射现象的产生是随着信号上升时间的不断减小而产生的, 其产生的根本原因是信号传输过程中阻抗的不匹配。因此可以通过采用阻抗匹配的方法来解决信号反射问题。阻抗匹配典型的作法就是在信号末端接入匹配电阻。实验中在 CMOS 引脚处接入电阻后, 驱动脉冲信号质量得到了很大的改善。

3.2 图像传感器的信号预处理和采集电路设计

该 CMOS 信号预处理电路也可设计得非常简单, 只需一个电压跟随器即可。电压跟随器的主要特点是输入阻抗很大, 输出阻抗很小。它的作用主要有三个: 输入电阻高, 可减小放大电路对信号源(即图像传感器)索取的信号电流; 输出电阻低, 可以提高原来电路带负载的能力; 用做中间级以隔离前、后级之间的影响。在电路调试阶段, 用示波器等可以测量前置跟随放大器的输出信号而避免直接测量图像传感器的输出管脚。这样就可以避免测量时错误操作引起的短路, 烧坏图像传感器芯片内部的输出放大器, 从而保护了图像传感器^[12]。图 5 为用示波器采集的驱动频率为 1.25 MHz 时 CMOS 的输出信号, 图中高电平部分为有效的图像信号, 而低电平是无效的哑元信号。

数据采集用的是 AD 公司的 8 位 AD9280 芯片, 该芯片的数据转换速率为 32 MSPS, 完全可以满足图像传感器的数据采集。AD 采样时钟由 FPGA 产生, 转换后的数字信号存储在 FPGA 的双口 RAM 里, 并由 FPGA 进行初步的处理。由于采用的是商用 AD 模块, 故不再做过多介绍。

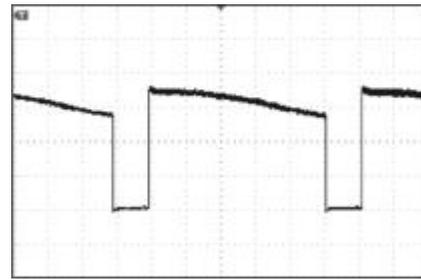


图 5 示波器采集到的 CMOS 输出信号

Fig.5 Output signal of CMOS acquired by an oscilloscope

4 测量实验与结果

4.1 实验装置

为了验证该空间滤波测速系统进行速度测量的可行性, 以由高精度转台带动的传送带为测量对象对传送带线速度进行了测量, 实验装置如图 6 所示。

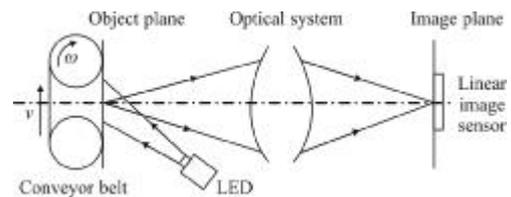


图 6 空间滤波测速仪的实验装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of experimental setup of spatial filtering velocimeter

光源使用的是高亮度的 LED 灯珠。线阵图像传感器在该系统中既作为一对差分空间滤波器, 又作为探测器。而传统的采用透射型空间滤波器的系统中, 滤波器和探测器没有集成在一起, 如果要配置一对差分滤波器, 则要额外再使用一组滤波器。这样会带来一个较严重的问题就是这对差分滤波器的对准比较困难, 很难做到两个滤波器严格相差半个空间周期, 从而导致差分后的信号恶化。在文中系统中, 使用线阵图像传感器作为空间滤波器和探测器, 大大简化了系统结构。当配置成一对差分滤波器的时候, 不用增加任何额外的器件, 并且也不存在两个滤波器之间的对准问题, 从而使系统的安装变得简单。

4.2 高精度传送带速度测量

第 4 节已经设计了该 CMOS 传感器的驱动电路, 并由示波器得到了 CMOS 的输出信号。为了进一步验证由该 CMOS 传感器为主要元件的空间滤波测速仪的有效性, 搭建了一套传送带系统作为速

度源。实验所用传送带由一个高精度转台作为主动轮,一个滚筒作为从动轮构成。该高精度转台转动误差为 10^{-5} 量级。

4.2.1 速度测量实验系统

搭建完毕之后,使转台以 $100 (^{\circ})/s$ 匀速转动,测得的时域信号如图 7 (a)所示,相应的快速傅里叶变换频谱如图 7(b)所示。由图可看出,频谱图中峰值谱

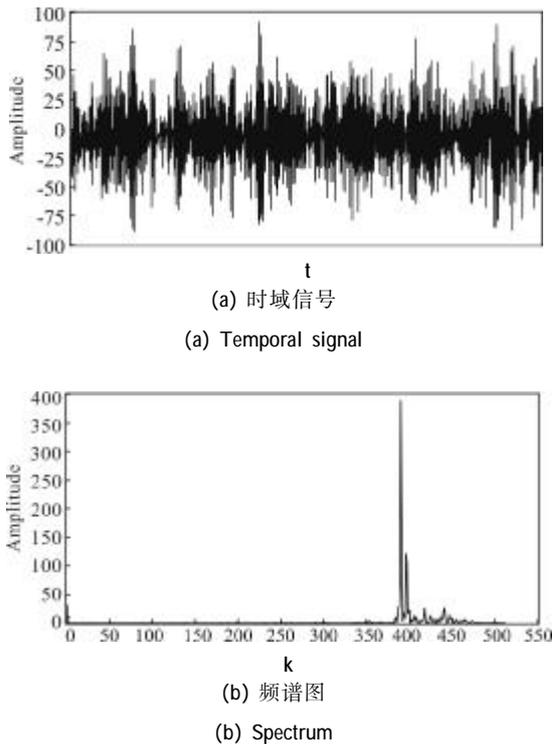


图 7 空间滤波测速仪的典型时域和相应频谱

Fig.7 Typical temporal signal and corresponding spectrum of spatial filtering velocimeter

线的位置在 390,转换成相应的信号频率为 257.62Hz。测得该实验系统中光学系统的放大倍数为 0.846。线阵 CMOS 图像传感器的像元阵列方向与传送带运动方向之间的夹角通过水平仪调整在 3° 以内,从而使由夹角带来的误差控制下 0.1% 以内。与测量误差相比,该项误差可忽略,从而可近似认为像元阵列方向与传送带运动方向平行。转台的半径为 180 mm,在这种情况下,由公式(1)计算得到的频率为 259.60Hz,测量误差小于 0.77%。

前面只是一次测量的结果,为了检验系统的稳定性,对 $100 (^{\circ})/s$ 的转速进行了约 11 min 的测量,得到的 999 次结果如图 8 所示。所有结果的平均值为 258.58 Hz,标准差为 1.690 Hz,从而得到系统测量的

误差和标准不确定度分别为 0.4% 和 0.66%。

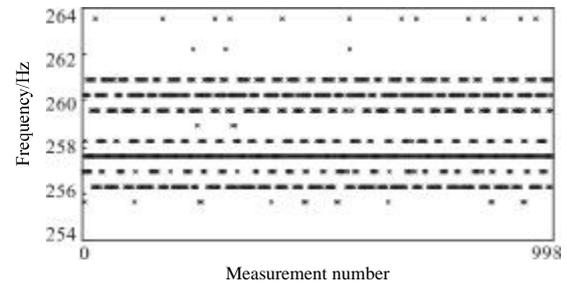


图 8 传送带速度测量的结果

Fig.8 Experimental result of velocity measurement of conveyor belt

4.2.2 误差分析

空间滤波测速仪的主要误差来源为光学系统和信号采集与处理系统。其中光学系统影响成像质量,是决定空间滤波测速仪性能的最主要因素。信号采集与处理系统也起到关键性的作用。文中实验系统的测量误差比较低,与德国 ASTECH 公司的产品相比,测量精度还相差一个数量级,系统的测量精度还有很大的提升空间。为了找出主要误差是来自于光学系统还是信号采集与处理系统,又对生活用日光灯发光频率进行了测量。

4.3 日光灯发光频率测量

国内供生产和生活用的是正弦交流电,其周期是 0.02 s,频率是 50 Hz。其交流特性使日常照明用日光灯以 100 Hz 的频率在闪烁,只是人眼的时间分辨率比较低,所以只能感觉到日光灯的平均强度。

4.3.1 日光灯发光频率测量原理和方法

测量日光灯的频率时,不用成像系统,CMOS 直接接收日光灯的光线。把日光灯类比为粒子的像。如图 3 所示,当日光灯最亮的时候,相当于粒子完全处于白色部分;当日光灯熄灭的时候,相当于粒子完全处于黑色部分。实际上,日光灯是同时照亮整个 CMOS 光敏面的,这就相当于有很多粒子的像布满了 CMOS 的光敏面,而实际情况恰好就是这样的。综上所述,通过用日光灯直接照射 CMOS 光敏面的方法就能测量其发光频率,从而可以避免由成像系统带来的误差。

4.3.2 日光灯发光频率测量结果和结论

采用 4.3.1 节所讲述的方法对日光灯的发光频率进行了约 8 min 的持续测量,得到了 223 个数据如图 9 所示。这组数据的平均值为 100.156 Hz,标准差

为 0.055 9 Hz, 8 min 内频率测量的不确定度在 0.056% 以内。生活用交流电的频率理论上为 50 Hz, 由于误差的存在, 实际上的频率应为 50 ± 0.1 Hz, 从而日光灯实际发光频率为 100 ± 0.2 Hz。此次实验测得的平均值在这个频率范围以内。从图 9 中还可以看出, 实验所测频率值有较明显的波动, 有可能是测量系统的系统误差的漂移, 也可能是日光灯的发光频率在变化。这需要有发光频率更加精确的灯来确定这个猜测。

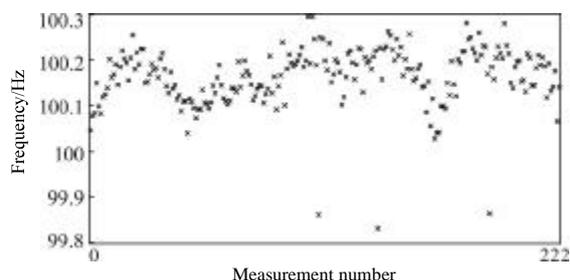


图 9 日光灯发光频率测量的稳定度测试结果

Fig.9 Experimental result of stability of radiating frequency measurement of lamp

与传送带速度测量的结果相比, 测量日光灯时的稳定度要高一个数量级, 测量精度也明显提高, 由此可以初步确定传送带速度测量时的主要误差来源为成像系统。

5 结论

文中根据现代工业检测精度高、速度快的要求, 采用空间滤波技术测量固体表面运动速度。使用了一种新型线阵图像传感器作为空间滤波测速系统的空间滤波器和光电探测器, 简化了系统结构, 提高了系统结构的稳定性。与以往采用图像传感器的空间滤波测速仪相比, 该系统的设计难度大大降低, 实验验证了该系统的性能。对高精度转台以 $100(^{\circ})/s$ 的速度旋转时传送带的线速度和生活用日光灯的发光频率进行了测量。传送带的速度测量标准不确定度在 0.66% 以内。测量日光灯发光频率时不确定度在 0.056%。通过对比两实验的结果, 得出了该空间滤波测速仪系统的误差主要来源于成像系统的结论, 为系统性能的进一步改善指明了方向。今后将从改善成像系统性能出发进一步提高系统的测量精度。

参考文献:

- [1] Zhou Jian, Long Xingwu. Laser Doppler velocimeter for vehicle inertial navigation system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(5): 1316-1321. (in Chinese)
周健, 龙兴武. 用于车载自主惯导系统的激光多普勒测速仪[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1316-1321.
- [2] Zhou Jian, Wei Guo, Long Xingwu. Research on direction discrimination and low-speed measurement for laser Doppler velocimeter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 632-638. (in Chinese)
周健, 魏国, 龙兴武. 激光多普勒测速仪方向辨别及低速测量的研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 632-638.
- [3] Francis D, Charrett T O H, Waugh L, et al. Objective speckle velocimetry for autonomous vehicle odometry [J]. Applied Optics, 2012, 51(16): 3478-3490.
- [4] Aizu Y. Principles and development of spatial filtering velocimetry [J]. Applied Physics B, 1987, 43: 209-224.
- [5] Xu Chuanlong, Li Jian, Wang Shimin. A spatial filtering velocimeter for solid particle velocity measurement based on linear electrostatic sensor array [J]. Flow Meas Instrum, 2012, 26: 68-78.
- [6] Tsuyoshi Ushizaka, Toshimitsu Asakura. Measurements of flow velocity in a microscopic region using a transmission grating[J]. Applied Optics, 1983, 22(12): 1870-1874.
- [7] Jakobsen M L, Hanson S G. Micro-lenticular array for spatial-filtering velocimetry on solid surfaces [J]. Measurement Science & Technology, 2004, 15: 1949-1957.
- [8] Ushizaka T, Aizu Y, Asakura T. Measurements of velocity using a lenticular grating [J]. Applied Physics B, 1986, 39: 97-106.
- [9] Yoshihisa Aizu, Tsuyoshi Ushizaka, Toshimitsu Asakura. Measurements of flow velocity in a microscopic region using a transmission grating: a differential type[J]. Applied Optics, 1985, 24(5): 627-635.
- [10] Klaus C Michel, Otto F Fiedler, Andreas Richter, et al. A novel spatial filtering velocimeter based on a photodetector array [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(1): 299-302.
- [11] Martin Schaeper, Nils Damaschke. Velocity measurement for moving surfaces by using spatial filtering technique based on array detectors[C]//AIS, 2011.
- [12] Xue Xucheng, Li Yunfei, Guo Yongfei. Design of analog front end of CCD imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1191-1195. (in Chinese)
薛旭成, 李云飞, 郭永飞. CCD 成像系统中模拟前端设计 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1191-1195.