

激光多普勒测速技术进展

张艳艳, 巩 轲, 何淑芳, 霍玉晶
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要:综述了激光多普勒测速技术的最新进展。首先简单介绍了激光多普勒测速技术的基本原理;然后对差分混频单频激光多普勒测速仪等6种单频激光多普勒测速仪和正交偏振双频激光多普勒测速仪的结构、工作原理及其优缺点进行了详细讨论;最后对清华大学最新研制出的可显著扩大测速量程的HH型双频激光多普勒测速仪进行了较为全面的介绍,并探讨了未来激光多普勒测速技术的发展方向。

关键词:激光多普勒测速;单频;双频

中图分类号:TN06 **文献标识码:**A

Progress in laser Doppler velocity measurement techniques

ZHANG Yan-yan, GONG Ke, HE Shu-fang, HUO Yu-jing
(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper gives a review of the latest advances in laser Doppler velocity measurement techniques. A brief introduction of the principle of laser Doppler velocity measurement techniques is given in the beginning, then the structures, principles, advantages and disadvantages of several classical laser Doppler velocimeters, including differential mixing and other six kinds of single-frequency laser Doppler velocimeters and orthogonally polarized dual-frequency laser Doppler velocimeters, are discussed in detail. Besides that, this paper gives a comprehensive introduction of HH type dual-frequency laser Doppler velocimeter which is developed by Tsinghua University recently to increase the measurable range significantly. The development trend of laser Doppler velocity measurement techniques is also discussed at the end.

Key words: laser Doppler velocity measurement; single-frequency; dual-frequency

1 引言

激光多普勒测速技术是伴随着激光器的诞生而产生的一种新的测量技术,它是利用激光的多普勒效应来对流体或固体速度进行测量的一种技术,广泛应用于军事、航空、航天、机械、能源、冶金、水利、钢铁、计量、医学、环保等领域^[1-2]。

激光的多普勒效应是激光多普勒测速技术的重要理论基础,当光源和运动物体发生相对运动时,从运动物体散射回来的光会产生多普勒频移,这个频移量的大小与运动物体的速度、入射光和速度方向的夹角都有关系^[1]。激光多普勒效应的示意图如图1所示,其中, O 为光源, T 为运动物体, S 为观察

者的位置。激光的频率为 ν ,运动物体的速度为 \vec{u} ,那么由于物体运动所产生的多普勒频移量可表示为:

$$f_D = \frac{\nu}{c} |\vec{u} \cdot (\vec{e}_s - \vec{e}_o)| \quad (1)$$

由式(1)可知,可以通过测量激光多普勒频移量的值来获得运动物体的速度信息。1964年, Yeh和 Cummins首次通过测量激光多普勒频移量来获得流体的运动速度^[3],这标志着激光多普勒测速技

作者简介:张艳艳(1986-),女,硕士研究生,从事全固态激光器及双频激光多普勒测速技术研究。E-mail: zyybj1986@gmail.com

收稿日期:2010-08-03;修订日期:2010-09-05

术的开端。经过40多年的发展,激光多普勒测速技术经历了产生、发展到广泛应用的过程。凭借其非接触测量、不干扰目标运动、空间分辨率高、响应速度快、测量精度高及量程大等优点,这种测速技术获得了长足发展。

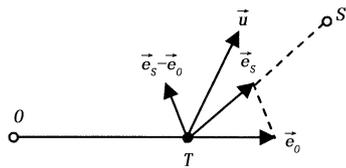


图1 激光多普勒效应示意图

根据采用的激光器类型的不同,本文对已有的单频激光多普勒测速仪和双频激光多普勒测速仪的原理及各自的优缺点分别进行了讨论,并指出了未来激光多普勒测速技术的发展方向。

2 单频激光多普勒测速仪

采用单频激光器作为光源的单频激光多普勒测速仪,通过测量由于运动物体对光的散射所产生的多普勒频移量来获取待测物体的速度。这种测速仪已经有40多年的历史,在很多领域得到广泛应用,发展的也较为成熟,但是它也存在着直流漂移,抗干扰能力差的缺点,应用受到一定的限制。下面介绍几种常见的单频激光多普勒测速仪的原理及其优缺点。

2.1 迈克尔逊干涉型测速仪

1965年, Barker等人发明了如图2所示的迈克尔逊干涉型测速仪^[4]。激光器输出的单频激光经前置透镜L₁入射到分束器BS上,被BS分为两束光。其中,反射光束射到以速度u运动的待测运动物体上,透射光束射到反射镜M₁上。来自M₁的反射光束的频率为激光器自身的频率ν,作为参考光束。由于多普勒效应,经待测运动物体反射回来的光束的频率变为ν+2uv/c(2uv/c为光的多普勒频移量),作为信号光束。信号光束和参考光束经过BS合束,经透镜L₂准直后,由光电探测器接收,光电探测器输出的拍频信号的频率为:

$$f_D = \frac{2uv}{c} \quad (2)$$

于是,可以得到待测物体的速度u:

$$u = \frac{c}{2\nu} f_D \quad (3)$$

由式(2)可知,这种测速仪产生的信号频率与待测运动物体的速度成正比,由于光频很高,样品速度不高时也会产生很高的信号频率,对信号检测系统的带宽会有较高的要求。此外,激光器频率的不

稳定也会导致测量精度的降低,还存在光路调节难度大的缺陷,应用受到很大的限制。

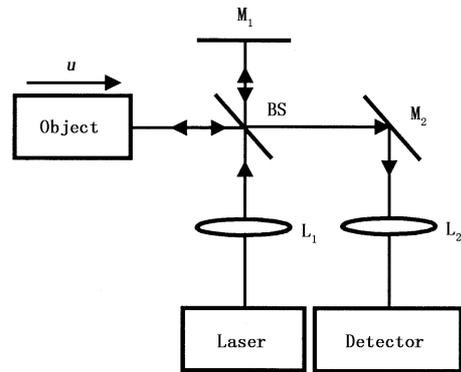


图2 迈克尔逊干涉型测速仪

2.2 差分混频单频激光多普勒测速仪

为了能够降低对信号检测系统带宽的要求,需要有效降低测量信号的频率。1969年 D. Simpson和 P. R. Smy设计了如图3所示的差分混频单频激光多普勒测速仪^[5]。其中,激光器输出频率为ν的单频激光,经过一块平面平行平晶分束器BS₁分束后,与透镜L₁一起形成夹角为Δα的两束光,二者同时入射到以速度u运动的待测物体表面。从样品反射回来的两束光均具有多普勒频移,经透镜和平面平行平晶BS₂合束后,由光电探测器D接收。两束光和待测运动物体的夹角相差一个角度Δα,那么二者产生的多普勒频移量是不同的。由多普勒效应可知,光电探测器D输出的拍频信号的频率为:

$$f_B = \frac{2uv}{c} [\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin\alpha] \quad (4)$$

由于Δα很小,式(4)可近似为:

$$f_B = \frac{2uv}{c} \cos\alpha \cdot \Delta\alpha \quad (5)$$

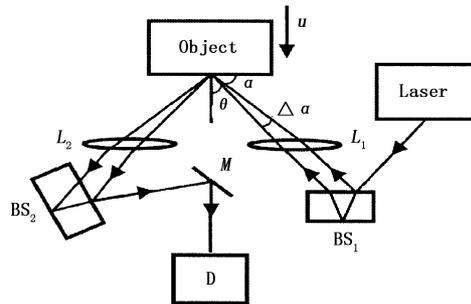


图3 差分混频单频激光多普勒测速仪

由式(5)可知,在这种测速方法中,可以通过选择合适的α和Δα,来降低测得拍频信号的频率,从而降低对检测系统带宽的要求。但是这种技术在实际应用中存在着局限,由于角度Δα很小,精度很难控制,从而会引起速度的测量误差。在实际应用中,

利用这种测速仪只能测量很低的速度,应用受限。

2.3 单频激光速度干涉仪

单频激光速度干涉仪是为克服接收系统频响不够高的缺点而研究出来的一种激光多普勒测速仪^[6],它的测量原理如图4所示。激光器发出的频率为 ν 的光照射到以速度 u 运动的待测运动物体上,从运动物体上反射回来的光束经分束器 BS_1 分成两束,其中,反射光束经过由反射镜 M_1 和 M_2 组成的延迟支路后,与 BS_1 的透射光束经第二个分束器 BS_2 合束后送入光电探测器D。在光电探测器D中发生混频的两个频率的光对应于不同时刻的信号光。当样品速度有变化时,二者的多普勒频移量是不同的。由多普勒效应可知,在时刻 t ,光电探测器输出的差拍信号的频率为:

$$f_B(t) = \frac{2\nu}{c} [u(t) - u(t - \tau)] \quad (6)$$

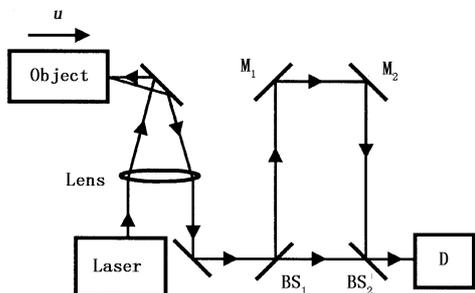


图4 单频激光速度干涉仪

由式(6)可知,单频激光速度干涉仪的光电探测器输出信号的频率是对应两个时刻信号光的差拍频率。当速度变化特别大时,可以通过减小时间 τ ,使速度变化引起的差拍频率在检测系统的频响范围内。从系统频响的角度来看,单频激光速度干涉仪测量高速运动物体速度的能力是不受限制的,很好地解决了系统频响不够高的问题。但是,单频激光速度干涉仪是对加速度敏感的,当物体匀速运动时,光电探测器输出的信号频率为零,只有速度有变化时才会有拍频信号,不能测量匀速运动物体的速度。这种测速仪在本质上是一种加速度测量仪,不是速度测量仪,从而限制了它的应用范围。

2.4 可测任意反射表面的速度干涉仪(VISAR)

VISAR是Velocity Interferometer System for Any Reflector的简称,即为可测量任意反射表面的速度干涉仪^[7-8],它的测速原理如图5所示,激光器发出的光经带孔反射镜 M_1 、前置透镜 L_1 和光线转折反射镜 M_2 照射到运动物体上,从运动物体上返回的散射光由同一透镜 L_1 收集,通过由透镜 L_2 和 L_3 组

成的望远镜系统缩束后经过起偏器P,由分束器 BS_1 分束。其中, BS_1 的透射光由分束器 BS_2 分为两束,其中一束通过标准具延迟后返回分束器 BS_2 ,与 M_3 反射的另一束光叠加,由偏振分束器PBS分束后,相位相差 $\pi/2$ 的S偏振光和P偏振光分别由光电探测器D2和D3接收,形成两套正交编码信号。 BS_1 上的反射光经过由 M_5, M_6, M_7 和 M_8 组成的延迟支路延迟后,与信号光路等光程,由光电探测器D1接收,用于检测激光束光强的变化,可以用于在数据处理时消除激光器光强波动引起输出信号幅度的变化,提高测量精度。VISAR能够测量任意反射表面的关键是采用了满足虚拟零程差条件的标准具来形成信号光的延迟支路。满足虚拟零程差条件的标准具可以实现以下功能:可以使 BS_2 的透射光束经过标准具延迟后对于 BS_2 的表观光路和 BS_2 的反射光束的光路相对于 BS_2 对称,并且,经过标准具的光具有一定的延迟,和反射光束对应于不同时刻的光信号,形成速度干涉仪。满足虚拟零程差的速度干涉仪可以测量任意反射表面的原理如下:待测运动物体表面的激光光斑内含有许多散射颗粒,由于散斑效应,从待测物体反射回来的光束的波面是不规则的,不同点的相位有很大差异。当标准具满足虚拟零程差条件时,待测物体表面不同散射点的光经历不同的路径到达分束器表面时,各点的光波是自相叠加,具有恒定的相位关系,可以发生差拍干涉。另外,VISAR通过起偏器P, $\lambda/4$ 波片和偏振分束器PBS可以获得两套正交的编码信号,可以提高测量精度,鉴别运动过程中加速和减速的变化。

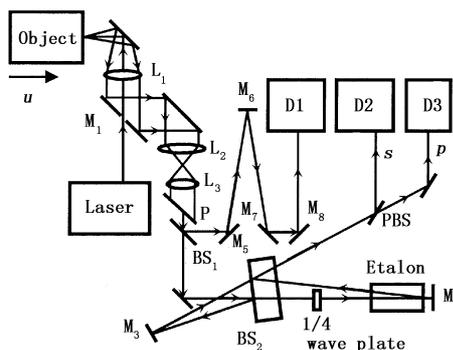


图5 VISAR原理图

VISAR最大的优点是可以测量任意反射面的待测运动物体,能够鉴别待测物体速度的加减变化过程,还具有高的时间分辨率、高测量精度、非接触测量的优点。但VISAR结构复杂,造价昂贵,调试困难,难以小型化。同时,VISAR同速度干涉仪一样是对加速敏感的仪器,本质上是一种加速度计,不

能用于匀速运动的目标的速度测量,应用受到一定的限制。

2.5 激光多普勒测速仪(LDV)

LDV的全称是 Laser Doppler Velocimeter,即激光多普勒测速仪。LDV是一种利用运动物体散射光的多普勒频移来获得速度信息的非侵入速度测量技术,在流体速度测量中应用广泛^[9-12]。典型的LDV的测量原理如图6所示,激光器发出的光经分束器BS和反射镜M后,变成两束平行的激光束,这两束激光束经透镜L聚焦相交,确定一个测量区域。

当一个以速度 u 运动的待测粒子通过测量区域时,两束入射光在光电探测器方向上的散射光频率分别为:

$$\nu_1 = \nu \left[1 + \frac{\vec{u} \cdot (\vec{e}_s - \vec{e}_{o1})}{c} \right] \quad (7)$$

$$\nu_2 = \nu \left[1 + \frac{\vec{u} \cdot (\vec{e}_s - \vec{e}_{o2})}{c} \right] \quad (8)$$

其中, ν 为激光器的频率。

由式(7)和式(8)可知,光电探测器输出的拍频信号的频率为:

$$f_B = \nu_1 - \nu_2 = \frac{2\nu v \sin(\theta/2)}{c} \quad (9)$$

由式(9)可知,由 f_B 的值,可确定速度 u 的大小。

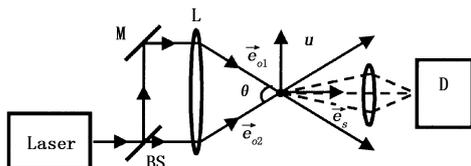


图6 LDV原理图

LDV具有非接触测量,高的空间分辨率、线性响应的优点,但是在测量时对系统有一定的防震要求,需保证光学系统与待测系统无相对运动,结构复杂、造价昂贵,使其应用受到一定的限制。

2.6 基于自混频效应的激光多普勒测速仪

基于自混频效应的激光多普勒测速仪^[2,13-18]的装置原理图如图7所示,由于激光二极管对光反馈很敏感,少量的重注入光就会使二极管的发光特性发生敏感的效应。当待测物体以速度 u 运动时,由运动物体表面散射回来的一部分光注入激光二极管的谐振腔内,从而在腔内产生干涉,由激光二极管后面的监测光电二极管接收腔内发生干涉的光信号,光电二极管输出的是腔内自混频干涉信号,经放大器放大后,由频谱仪分析,可以得到与运动物体

速度 u 相关的多普勒频移量:

$$f_D = \frac{2u}{\lambda} \quad (10)$$

其中, u 为运动物体沿光轴方向的运动速度; λ 为激光器的波长。由式(10)可知,可以通过测定 f_D ,进而得到运动物体在光轴方向的速度分量。

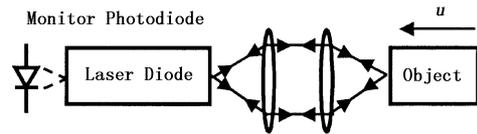


图7 基于自混频效应的激光多普勒测速仪

这种测速仪具有尺寸小,造价低,结构简单,无需严格的光学对准的优点。但是,这种测速仪的几何设置在测量流体速度时,不够实用。另外,利用这种测速仪还存在光斑效应,将带来测量误差,信号处理的难度也较大。

3 双频激光多普勒测速仪

双频激光多普勒测速仪不同于单频激光多普勒测速仪,采用双频激光器作为光源,能够克服单频激光多普勒测速仪易受测量环境影响的缺点,抗干扰能力强,具有较高的信噪比。

3.1 正交偏振双频激光多普勒测速仪

正交偏振双频激光多普勒测速仪^[19-25]的测量原理如图8所示。双频激光器发出的光为偏振方向相互垂直的线偏振光,频率分别为 ν_1 和 ν_2 (其中, ν_1 垂直于纸面, ν_2 平行于纸面)。激光器输出光束经分束器BS分为两束。其中,反射光束穿过透振方向和纸面成 45° 的检偏器P1后,由光电探测器D1接收,得到的拍频信号作为参考信号,频率为 $\Delta\nu = |\nu_1 - \nu_2|$ 。透射光束经过偏振分光棱镜PBS后,偏振方向相互垂直的线偏振光 ν_1 和 ν_2 相互分离,其中偏振方向垂直于纸面的 ν_1 光被反射到静止的参考角锥棱镜M₁上,偏振方向平行于纸面的 ν_2 光穿过PBS,照射到可动角锥棱镜M₂上。当M₂以速度 u 运动时,由于多普勒效应,返回光的频率将会变为 $\nu_2 + f_D$,其中 f_D 是 ν_2 光的多普勒频移量。M₂的返回光重新通过PBS,并与 ν_1 光经M₁的返回光在PBS再度会合,经反射镜R反射后,通过透振方向与纸面成 45° 的检偏器P2,被光电探测器D2接收,得到的拍频信号作为测量信号,频率为 $|\nu_1 - \nu_2 - f_D|$ 。将参考信号与测量信号进行混频后,可得到带有速度信息的多普勒频移量 f_D ,待测速度 u 可由 f_D 表示为:

$$u = \frac{f_D}{2\nu_2} c \quad (11)$$

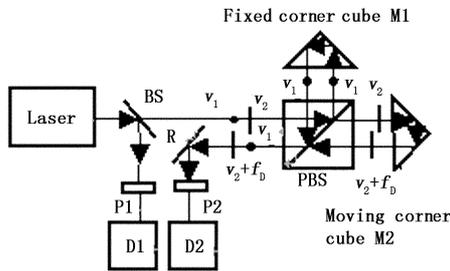


图8 正交偏振双频激光多普勒测速仪

在这种测量方法中, D2 探测到的拍频信号频率为 $|\nu_1 - \nu_2 - f_D|$, 无论运动物体速度 u 是否为零 (对应的 f_D 为零), $\Delta\nu$ 始终存在, 起了载波的作用, 测量镜 M_2 的移动只是使这个频差增加或减少, 不存在单频激光多普勒测速仪的直流漂移问题。另一方面, 这种测速方法要求 $f_D \leq \Delta\nu$, 这就决定了外差式双频激光多普勒测速仪的最大测量速度取决于双频激光器的频差。至今已见报道的此类测速仪所用的双频激光器的频差还不够高, 限制了它们的测速范围。例如, 美国 Agilent 公司生产的外差式双频激光测速仪的光源采用的是频差为 4 MHz 的纵向塞曼双频激光器, 其最大测速只有 1000 mm/s; 美国 ZYGO 公司采用结构更为复杂, 造价更为昂贵的频差为 20 MHz 的声光调制双频激光器作为光源, 最大测速也只能达到 5.1 m/s; 国内生产的外差式双频激光测速仪的最大测速在 300 mm/s 以下; 均无法满足目前对高速运动物体进行速度测量的需求。

3.2 HH 型双频激光多普勒测速仪

由清华大学研制的 HH 型双频激光多普勒测速仪^[26]的测量原理如图 9 所示。不同于正交偏振双频激光多普勒测速仪必须采用偏振方向相互垂直的线偏振双频激光器作为光源, 这种测速仪既可以采用同偏振的线偏振双频激光器作为光源, 也可以采用垂直偏振的线偏振双频激光器作为光源。图 9 是采用同偏振的线偏振双频激光器作为光源的情况。激光器发出的双频激光为偏振方向相同的线偏振光, 频率分别为 ν_1 和 ν_2 , 频差 $\Delta\nu = |\nu_1 - \nu_2|$ 。输出光经分束器 BS 分为两束光。一束反射光由光电探测器 D1 接收, 测得的拍频信号 f_{D1} 作为参考信号。另一束透射光照射到以速度 u 运动的待测物体上, 经待测物体反射后, 光束中两个频率的光产生不同的多普勒频移, 反射光由光电探测器 D2 接收, 测得的拍频信号 f_{D2} 作为测量信号。由激光的多普勒效应和光电探测器的平方律效应可知, 探测器 D1 测得的参考信号的频率为:

$$f_{D1} = |\nu_1 - \nu_2| = \Delta\nu \tag{12}$$

探测器 D2 探测到的测量信号的频率为:

$$f_{D2} = \Delta\nu \left(1 + \frac{2u}{c} \right) \tag{13}$$

参考信号 f_{D1} 和测量信号 f_{D2} 的频率差 f_s 正比于待测速度 u , 可表示为:

$$f_s = \Delta\nu \frac{2u}{c} \tag{14}$$

于是, 由式(14)可知, 通过测量 f_s 的值, 可以得到待测物体的速度 u 。

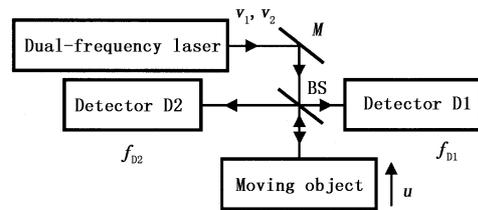


图9 HH 型双频激光多普勒测速仪

由式(14)可知, 这种测速仪的 f_s 是正比于双频激光器的频差 $\Delta\nu$ 的, 当待测物体的速度 u 很大时, f_s 也很小, 因此, 它能够测量很高的速度。这种测速仪的优点是结构简单, 使用方便, 测速上限高, 具有大的测速范围。

4 结论

根据前面对已有激光多普勒测速技术的原理及各自的优缺点的介绍可知, 目前的单频激光多普勒测速仪存在着直流漂移, 抗干扰能力差的缺陷; 正交偏振双频激光多普勒测速仪不存在直流漂移, 抗干扰能力强, 但是, 它的测速上限受限于所采用双频激光器的频差, 无法满足对高速运动物体进行速度测量的需求, 可以通过研制大频差双频激光器来提高这种测量方法的测速上限; 采用双频激光同时照射到运动物体上以传感运动速度的 HH 型双频激光多普勒测速仪能够有效提高可测速度上限, 扩大测速范围。已有的激光多普勒测速技术都有着各自的优缺点, 未来激光多普勒测速技术的研究方向是研究新的激光多普勒测速技术, 使其具有更高的测速精度, 更大的测速范围, 更强的抗干扰能力。

参考文献:

[1] 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.
 [2] Julien Perchoux, Thierry Bosch. Multimode VCSELs for self-mixing velocity measurements [C]. 2007 IEEE Sensors, 2007: 419 - 422.
 [3] Yeh Y, Cummins H Z. Localized fluid flow measurements

- with an He-Ne laser spectrometer [J]. Applied Physics Letters, 1964, 4(10): 173 - 178.
- [4] Barker L M, Hollenbach R E. Interferometer technique for measuring the dynamic mechanical properties of materials [J]. Review of Scientific Instruments, 1965, 36 (11): 1617 - 1620.
- [5] Simpson D, Smy P R. Optical mixing of laser radiation reflected from a shock wave [J]. Journal of Applied Physics, 1969, 40(12): 4928 - 4932.
- [6] Hilliard R L, Shepherd G G. Wide-angle michelson interferometer for measuring doppler line widths [J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(3): 362 - 369.
- [7] 胡绍楼. 激光干涉测速技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [8] Zwick H H, Shepherd G G. Defocusing a wide-angle michelson interferometer [J]. Applied Optics, 1971, 10(11): 2569 - 2571.
- [9] Maron Y. Interferometric method for measuring high velocities of diffuse surface [J]. Review of Scientific Instruments, 1978, 49(11): 1598 - 1599.
- [10] Alain Le Duff-Guy Plantier, Jean-Christophe Valiere, Thierry Bosch. Velocity measurement in a fluid using LDV: low-cost sensor and signal processing design [C]. IEEE 2002, 2002: 1347 - 1350.
- [11] J W Czarske. Laser doppler velocimetry using powerful solid-state light sources [J]. Measurement Science and Technology, 2006: 71 - 91.
- [12] C Tropea. Laser doppler anemometry: recent developments and future challenges [J]. Measurement Science and Technology, 1995: 605 - 619.
- [13] Thierry Bosch, Noel Servagent. Optical feedback interferometry for sensing application [J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 20 - 27.
- [14] Lorenzo Scalise, Nicola Paone. Laser doppler vibrometry based on self-mixing effect [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 38: 173 - 184.
- [15] Guido Giuliani, et al. Laser diode self-mixing technique for sensing applications [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2002, 4(6): 283 - 294.
- [16] S. Sudo, et al. Detection of small particles in fluid flow using a self-mixing laser [J]. Optics Express, 2007, 15(13): 8135 - 8145.
- [17] Lorenzo Scalise, et al. Self-mixing laser diode velocimetry: application to vibration and velocity measurement [C]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(1): 223 - 232.
- [18] Fu Si-yu, Han Dao-fu, Ma Li. Research of laser-doppler velocimetry based on the self-mixing effect [J]. Journal of Nanchang University: Natural Science, 2007, 31 (3): 264 - 267. (in Chinese)
付似愚, 韩道福, 马力. 激光自混合多普勒测速法 [J]. 南昌大学学报: 理科版, 2007, 31(3): 264 - 267.
- [19] 关信安, 袁树忠, 刘玉照. 双频激光干涉仪 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1987.
- [20] Nejad S M, Olyae S. Accuracy improvement by nonlinearity reduction in two-frequency laser heterodyne interferometer [C]. 13th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2006, 1(3): 914 - 917.
- [21] Taebong Eom, Taeyoung Choi, et al. A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer [J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(2): 222 - 225.
- [22] Yan Ju-qun, Wu Jian, Gao Sai, et al. Dual-frequency laser interferometer with high measurement speed and its performance testing [J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(1): 251 - 253. (in Chinese)
闫聚群, 吴健, 高赛, 等. 高测速双频激光干涉仪及其性能检测 [J]. 计量学报, 2005, 26(1): 251 - 253.
- [23] Gao Sai, Yin Chun yong. High measurement speed dual-frequency laser interferometer [J]. Optical Technology, 2001, 27(3): 238 - 239. (in Chinese)
高赛, 殷纯永. 高测速双频激光干涉仪 [J]. 光学技术, 2001, 27(3): 238 - 239.
- [24] 张琢. 激光干涉测试技术及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 1 - 15.
- [25] 孙渝生. 激光多普勒技术及其应用 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1995: 1 - 10.
- [26] Yanyan Zhang, Yujing Huo. A novel velocity measurement method with dual-frequency laser [C]. The 2nd Asia-Pacific Optical Sensors Conference, 2010.