

文章编号: 1001-3806(2005)02-0176-04

## 激光多普勒测振技术的最新进展

吕宏诗, 刘 彬

(燕山大学, 秦皇岛 066004)

**摘要:** 介绍了激光多普勒测振技术的发展, 着重介绍了激光多普勒测振技术的最新进展。

**关键词:** 激光; 多普勒技术; 扭转振动; 弯曲振动; 颤振

**中图分类号:** TH825 **文献标识码:** A

### La test development of laser Doppler technique in vibration measurement

LÜ Hong-shi, LIU Bin

(Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The development of laser Doppler technique in vibration measurement is presented with emphasis on latest methods

**Key words:** laser; Doppler technique; torsional vibration; bending vibration; oscillation

#### 引 言

自 1960 年以来, 激光多普勒技术由于在测量中具有高的空间和时间分辨率, 不接触测量物体, 不扰动测量对象, 能测量原有测速技术难以测量的对象而引人注目。1964 年, YEH 和 CUMMUS 发表了第 1 篇关于激光多普勒技术测速的论文后, 此项技术立即受到各方面的重视并进行了大量的理论分析和试验研究, 取得了显著的成果。70 年代后, 国外厂商已经开始向市场提供比较完备的产品并在不断更新。激光多普勒测振技术现在成为科学技术及许多行业中不可少的检测方法, 已经从流体和固体的速度测量发展到了振动测量领域。

振动测量因为能反映物体的动态特性, 特别是高速运动的物体, 在工程技术中十分重要。激光多普勒测振仪从 1983 年南安普敦大学的光振研究所的发明开始, 从单光束、交叉光束测量发展到了多光束测量。激光振动测量最一开始是利用差动式激光多普勒测速仪进行扭转振动测量, 随后激光扭转振动仪的理论开始独立发展, 已经取得了很大的成果。世界著名的生产激光多普勒测振仪的厂家 B&K 公司研究并制造出商品型号为 2523 的激光扭振仪。该产品中使用了单个激光干涉仪。而同样知名的德国 Polytec 公司 4000 系列中的产品中包含了两个激光干涉仪, 测量效果得到

了进一步的提高。国内天津大学、西安交通大学等研究部门也进行了相应的研究。

结合国内外激光多普勒测振技术的研究成果, 简要介绍激光多普勒测振技术的发展, 着重讲述了激光多普勒测振技术的最新进展, 并从光路结构出发, 分析了各种结构的优缺点。

#### 1 激光多普勒测振技术的原理和进展

##### 1.1 激光多普勒测速技术 (LDV)

激光多普勒测振技术最早是从激光测速技术发展来的。其物理原理在于探测从运动物体散射回来的反射光的多普勒频移<sup>[1]</sup>。图 1 为单光束测速光路结构。

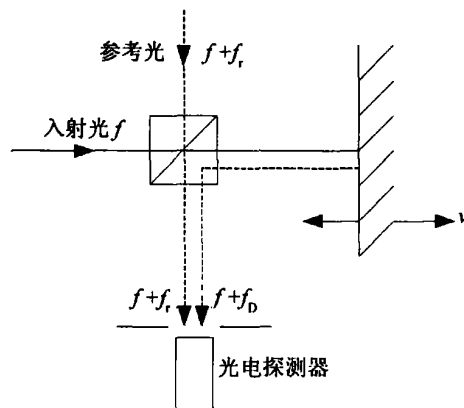


图 1 单光束测速光路结构

由激光器发出的频率为  $f$  激光束经分光镜入射到被测表面, 由于测量表面的运动, 反射光将产生多普勒频移  $f_d$ :

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad (1)$$

作者简介: 吕宏诗 (1979-), 女, 硕士, 主要从事光电检测及信号处理等方面的教学与科研工作。

Email: hongshilv@88mail ysu.edu.cn

收稿日期: 2004-03-19; 收到修改稿日期: 2004-06-04

式中,  $v$  为表面运动速度,  $\lambda$  为激光的波长。频率为  $f + f_r$  的参考光束和频率为  $f + f_b$  反射光混合并投射到光电探测器上产生了拍频信号, 经过电子信号处理系统, 最后得到频率为  $f_b - f_r$  的拍频的电信号, 对其进行分析和处理就可得到所需的振动信号。由于混合了参考光束, 这种光路结构能够分辨出被测表面的运动方向。

### 1.2 差动多普勒技术测振技术

虽然参考光方法十分有用, 而且特别适用于实验室里测量来自固体表面散射光的情况, 但是大多数使用的装置并不含参考光, 而是将两束等强度的光聚焦并相交在测量点处<sup>[2]</sup>。差动多普勒测振仪提供了一种测量转轴切向速度的方法, 不需要表面接触就可得到扭转振动速度, 如图 2 所示。在这种光学结构中, 光电探测器输出的多普勒拍频  $f_b$  为:

$$f_b = \left[ \frac{2v}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{\theta}{2} \right] \quad (2)$$

式中,  $v$  是在光束交叉点处的切向表面速度,  $\lambda$  是激光波长,  $\theta$  是入射激光束的夹角。解调多普勒信号产生了一个时变的电压模拟, 它的波动部分和扭振速度成正比。

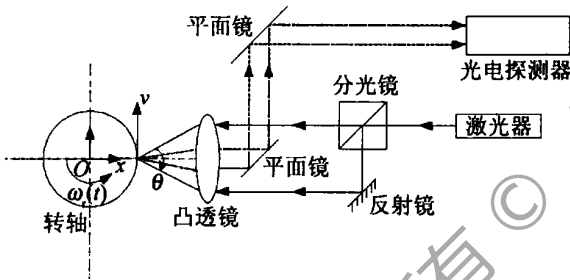


图 2 交叉测量扭振光路图

虽然由于差动技术的出现, 使得激光多普勒技术在很多场合得到实用, 但这种技术有两大缺点。一是激光束的交叉域一般小于 1mm, 因此, 被测体表面在测量过程中都必须在这个区域内, 仪器要以固定的距离用三角架安装好。显然, 被测对象或仪器的移动将会影响测量精度。二是在实际中, 被测对象会出现横振现象, 该振动在切向上的分量将会混淆数据, 差动结构不能把横振从扭振中区分出来。这些缺点使激光测振技术停滞了十多年, 直到激光扭振仪的出现。

### 1.3 激光扭振技术 (LTV)

激光扭振技术具有新颖的光路设计, 扭振测量不再受被测对象横截面形状和横振的影响<sup>[3~6]</sup>。如图 3 所示,  $\hat{z}$  是转动轴线的单位向量, 垂直于激光束的入射平面。 $\hat{i}$  是入射激光方向上的单位向量。转轴横截面的形状是任意的, 转轴横振速度为  $\vec{v}$ 。

激光器发出的激光束由分光镜分成两束间距为  $d$  的等强度的光, 并以  $\hat{i}$  定义的方向入射到转轴表面上的  $A$  和  $B$  点两点, 这两点的瞬时速度分别为  $\vec{v}_1$  和  $\vec{v}_2$ 。

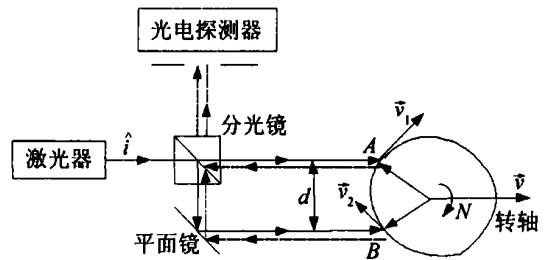


图 3 激光扭振仪

经运动表面散射后激光束增添了多普勒频移  $f_b$ 。因此, 从  $A$  和  $B$  后向散射回来的光分别有了多普勒频移:

$$\begin{cases} f_A = \left[ \frac{2}{\lambda} \right] (\vec{i} \cdot \vec{v} + \vec{v}_1) & (3) \\ f_B = \left[ \frac{2}{\lambda} \right] (\vec{i} \cdot \vec{v} + \vec{v}_2) & (4) \end{cases}$$

反射光混合照在光电探测器表面上时, 产生“拍”的现象, 探测器的输出被“拍”调制, 即:

$$f_b = f_A - f_B = \frac{2}{\lambda} \hat{i} \cdot \vec{v} - v_2 \quad (5)$$

由简单的几何关系可得:

$$f_b = \frac{4\pi d}{\lambda} (\cos\theta) N \quad (6)$$

式中,  $N$  为每秒的转数,  $\theta$  是垂直于入射光束平面法线方向和转动轴线的夹角,  $d$  为两束平行光之间的垂直距离。从 (6) 式中的可以看出, 反射的光的频移不依赖被测对象的横振和径向距离, 因此, 消除了横振和横截面形状对测量结果影响。

如果放置仪器使入射光束平面和转轴横截面平行, 使  $\theta = 0$ , 可得:

$$f_b = \left[ \frac{4\pi d}{\lambda} \right] N \quad (7)$$

将光电探测器输出的多普勒频移解调可得到被测对象转速的时域电压模拟信号, 其中波动部分就是扭振。

### 1.4 纯扭振和纯弯曲振动的激光多普勒测量

LTV 光路结构和以往的结构相比有很大的进步, 但是对各种角横振和弯曲振动还有敏感性, 不能提供纯的扭振测量<sup>[7~9]</sup>。

转轴上的任意点在转动过程中具有多个自由度。设主坐标系  $O-x-y-z$  固定在无偏斜时的转动轴线上,

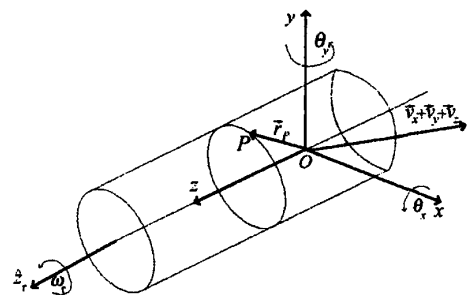


图 4 转轴上任意点的运动

$\hat{z}$ 为该轴线的单位向量,  $x, y, z$ 的方向在运动过程中保持不变。由于转轴的角横振动,  $\hat{z}$ 产生了波动,  $\hat{z}_r$ 为波动后转动轴线的单位向量,几何关系如图4所示。转动时,转轴上任意点  $P$  的速度可写为:

$$\vec{v}_p = (\vec{v}_x + \vec{v}_y + \vec{v}_z) + \dot{\theta}_x (\hat{x} \times \vec{r}_p) + \dot{\theta}_y (\hat{y} \times \vec{r}_p) + \omega_r (\hat{z}_r \times \vec{r}_p) \quad (8)$$

用激光扭振测量仪测量时,测量仪和被测轴的相对位置可分解成两个相互垂直的平面,如图5所示。 $\alpha$ 表

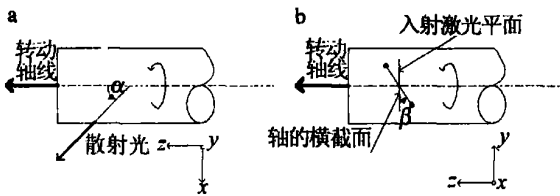


图5 激光扭振测量仪和转轴夹角示意图  
a—平面图 b—主视图

示  $\hat{z}$ 和  $\hat{z}_r$ 的夹角,  $\beta$ 表示入射激光平面和转轴的横截面的夹角。这时由多普勒拍频公式可得:

$$f_{beat} = \frac{2}{\lambda} \omega_r(t) d \{ (-\cos\beta \sin\alpha) + [\dot{\theta}_y(t) \cos\alpha \cos\beta] + [-\dot{\theta}_x(t) \sin\beta] \} + d \{ [\dot{\theta}_x(t) \cos\beta \cos\alpha] + [\dot{\theta}_y(t) \sin\beta] \} \quad (9)$$

从式中可以看出,拍频对各种振动尤其是与入射角  $\alpha$  和  $\beta$  相关的角横振的敏感性,不能分辨扭振和角横振。

为了得到转轴纯的扭转振动和弯曲振动, MLES 等人提出了一种基于两个激光扭振测量仪同时测量的技术。如图6所示。

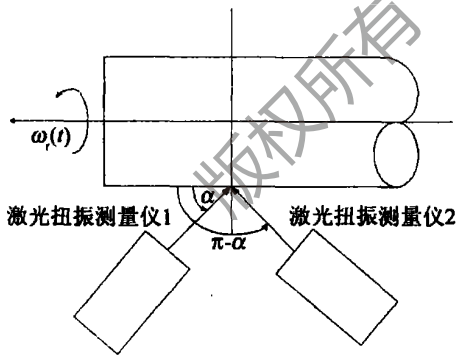


图6 纯扭振激光多普勒测量示意图

测量时一般令  $\beta = 0$ , 在激光扭振测量仪1和激光扭振测量仪2的拍频分别为:

$$f_1 = \frac{2}{\lambda} d / \omega_r(t) \times \sin\alpha - [\omega_r(t) \dot{\theta}_y(t) + \dot{\theta}_x(t)] \cos\alpha / \quad (10a)$$

$$f_2 = \frac{2}{\lambda} d / \omega_r(t) \times \sin\alpha + [\omega_r(t) \dot{\theta}_y(t) + \dot{\theta}_x(t)] \cos\alpha / \quad (10b)$$

对于激光扭振测量仪1, 设  $k_{1d}$  为其解调系数,  $K_1$  为总的比例系数, 这样, 激光扭振测量仪1的输出电压为:

$$v_1 = K_1 \left[ \omega_r(t) - \frac{\omega_r(t) \dot{\theta}_y(t) + \dot{\theta}_x(t)}{\tan\alpha} \right] \quad (11)$$

$$\text{式中, } K_1 = k_{1d} (2/\lambda) d \sin\alpha \quad (12)$$

同样的方式可以写出第2个激光扭振测量仪的输出电压。

如果用两个激光扭振测量仪同时进行测量, 输出之和可以提供对  $\omega_r(t)$  的测量:

$$\frac{v_1}{K_1} + \frac{v_2}{K_2} = 2\omega_r(t) \quad (13)$$

式中,  $K_2$  为对应于激光扭振测量仪2的比例系数。该量和转速成比例, 波动项提供了对扭振速度的明确测量, 而且不再对轴的横振和弯曲振动敏感。同样可以得到两个激光扭振测量仪输出之差:

$$\frac{v_1}{K_1} - \frac{v_2}{K_2} = 2/\tan\alpha [\omega_r(t) \dot{\theta}_y(t) + \dot{\theta}_x(t)] \quad (14)$$

从上式可以看出, 这种光路结构能够测量转轴弯曲振动。

### 1.5 激光多普勒颤振的测量

工程中经常遇到转动部件以单向角速度绕轴颤振情况, 针对这一问题, HALL WELL 等人提出一种从激光扭振测量仪光学结构改良而来的新的光路结构<sup>[10]</sup>, 能对角速度进行测量又能得到扭转颤振, 如图7所示。

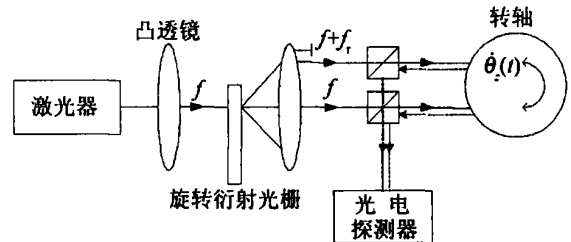


图7 颤振激光多普勒测量光路图

频率为  $f$  的激光束入射在以常速转动的衍射光栅上, 衍射光栅把激光分成带有频移  $f_r$  的两束平行光。平行光入射在测量对象表面。被测对象以角速度  $\dot{\theta}_z(t)$  绕轴线颤振, 而不是以平均速度转动。

当被测对象静止时, 探测器输出的拍频是常量  $f_r$ , 但是如果对象颤振, 可得拍频:

$$f_i = \left| f_r + \left( \frac{4\pi d \cos\alpha}{\lambda} \right) \dot{\theta}_z(t) \right| \quad (15)$$

式中,  $\dot{\theta}_z(t)$  在这这是瞬时局部角速度。如果没有频移装置, 就无法分辨颤振的方向。光电探测器输出经频率解调和  $f_{beat}$  “追踪”可得到角速度的时域电压模拟。这种方法适用有任意截面的有横振的被测对象。

### 2 激光多普勒测振技术的发展趋势

由于现代科学技术特别是半导体器件、光纤光学及计算机科学的发展, 使激光多普勒测振仪向仪器小型化、使用方便化的方向发展。近几年来, 采用新型半

导体激光器作为发射光源,用雪崩二极管或 PN 管作为探测元件,使得光学系统小型化成为可能。光纤的使用令测量探头的可动部分缩到最小。计算机的发展使时域内信号处理的可靠性提高,并向频域处理方向发展。随着电路器件水平的不断进步,FFT 运算速度的提高,使频域内的信号处理方法用于准实时测量,或趋向实时测量。近年来,还发展了一些新的信号处理技术,有的使激光扭振测量仪信号处理系统也趋于小型化,有的则使信号处理的自动化能力提高,使人工干预减小到最小。

### 3 结束语

国外激光多普勒测振技术已由试验研究进入实用化,而国内的介绍和研究相对较少。作者希望通过介绍激光多普勒测振技术的发展和最近进展,促进我国激光多普勒振动测量仪器的开发和研制。

#### 参 考 文 献

[1] 杜斯特 F,梅林 A,怀特 J H. 激光多普勒测速的技术原理和

实践 [M]. 北京:科学出版社,1992. 1~7.

- [2] 叶昕,张海翔,蒋诚志 *et al* 激光多普勒测量技术及其应用 [J]. 航空计测技术,1998,18(3): 3~5.
- [3] 郁飞,王天容,许勃. 激光扭振仪调整、应用与误差 [J]. 激光技术,2002,26(1): 63~65.
- [4] 曾周末,孙家,闫明. 扭振的激光测量与自适应标定 [J]. 内燃机学报,1998,16(1): 123~126.
- [5] 葛维晶,王伟生. 激光多普勒技术用于内燃机等旋转轴系扭振测量的研究 [J]. 小型内燃机,1994,23(2): 53~57.
- [6] 傅忠广,杨昆,宋之平 *et al* 汽轮发电机组轴系扭振的激光测试技术 [J]. 现代电力,2001,18(1): 1~6.
- [7] MIES J, LUCA M, HKKWELL N A *et al* Torsional and bending vibration measurement on rotor using laser technology [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226(3): 441~467.
- [8] HALL WELL N A. The laser torsional vibrometer: a step forward in rotating machinery diagnostics [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 190(3): 399~418.
- [9] BEELL J R, ROTHBERG S J. Laser vibrometers and contacting transducers, target rotation and six degree-of-freedom vibration: what do we measure [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 237(2): 245~261.
- [10] HALL WELL N A, HOCKNELL A, ROTHBERG J. On the measurement of angular vibration displacement: a laser tiltmeter [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 208(3): 497~500.

(上接第 175 页)

### 4 结 论

应用耦合模方程分析解决了啁啾镜问题,此方法思路清晰、计算简便。加入边界连续性条件的影响后,分析计算的结果更加精确。推演过程和计算结果表明,应用耦合模方程时,考虑边界连续性条件的影响对解决啁啾镜的问题是合理和必要的。

#### 参 考 文 献

- [1] SZIPCS R, KÖCHÁZFKIS A. Theory and design of chirped dielectric laser mirrors [J]. Appl Phys, 1997, B65: 115~135.
- [2] SZIPCS R, KÖCHÁZFKIS A. Negative dispersion mirrors for dispersion control in femtosecond lasers: chirped dielectric mirrors and mult-cavity Gires-Toumois interferometers [J]. Appl Phys, 2000, B70(s1): 51~57.
- [3] SUN H, WANG Ch Y. Third-order dispersion produced by a  $\lambda/4$  dielectric cavity mirror in a femtosecond pulse laser [J]. Opt Commun,

1996, 123: 148~154.

- [4] MATUSCHEK N, GALLMANN L, SUTTER D H *et al* Back-side-coated chirped mirrors with ultra-smooth broadband dispersion characteristics [J]. Appl Phys, 2000, B71: 509~522.
- [5] MACLEOD H A. Thin-film optical filters [M]. Adam Hilger. Institute of Physics Publishing, 1985. 63~75.
- [6] TAM R T. Integrated optics [M]. 2nd ed, Berlin: Springer-Verlag, 1975. 110~125.
- [7] BROVELL IL R, KELLER U. Simple analytical expressions for the reflectivity and penetration depth of Bragg mirror between arbitrary media [J]. Opt Commun, 1995, 116: 343~350.
- [8] YAKOVLEV V, TEMPEA G. Optimization of chirped mirrors [J]. Appl Opt, 2002, 41(30): 6514~6520.
- [9] ERMOLIEV Y, WETS R J B. Numerical techniques for stochastic optimization [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 42~65.
- [10] 张颖,刘艳秋. 软计算方法 [M]. 北京:科学出版社,2002. 107~109, 126~134.
- [11] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京:国防工业出版社,1999. 123~130.