

单周期层栅激光多普勒测振系统的研究*

王宝成 卢杰持

(大连工学院)

摘要: 应用单周期层栅和基于旋转场辨别速度方向的激光多普勒测振系统是近年来研制出的一种新型测速手段, 本文综述其机理方面的理论与实验研究工作。

Study on single periodic layered grating laser Doppler vibrometer

Wang Baocheng, Lu Jiechi

(Dalian Institute of Polytechnoly, Dalian)

Abstract: By means of single periodic layered phase grating and based on the revolving field principle for velocity direction discrimination, a laser Doppler vibrometer system has been developed, which provides a potential method of velocity measurement. The theoretical analysis and experimental results of the system are presented.

一、引言

六十年代发展起来的激光多普勒测速技术具有非接触测量、空间分辨率高、测量范围广、动态响应快等特点, 可用来测量风洞、水工模型、射流元件中流体的速度场, 也适于边界层流和二相流的测量以及喷气过程与燃烧过程的研究, 还可以测量固体或粉状颗粒的速度。

回收处理粗糙金属表面或流体中颗粒的弱散射光是激光多普勒测速技术中的一个关键问题。由于振幅光栅部分栅面被复盖而分光效率常低于 50%, 且最好的振幅光栅尚有 25% 的光集中于零级, 以致用来叠加光时信号光过弱。

层栅近年来在测试技术中获得了重要应

用, 其中单周期层栅的栅型简单且可使 90% 的衍射光集中于 ± 1 级和 ± 3 级, 较振幅光栅衍射效率提高 8 倍^[1], 从而可充分利用回收的信号光, 提高测量灵敏度和扩大测量范围。

辨别速度方向是激光多普勒测速技术中难以处理的另一个关键问题。目前常用的移频法须将恒定频率 ν_s 预置到多普勒频变 ν_D 上而使信号频率与待测速度成单值函数。采用旋转光栅移频虽然装置简单, 但光能利用差且移频范围受限。应用激光多普勒测振仪 (LDV)^[2] 的光电移频可以灵活方便地辨别速度方向, 但系统复杂昂贵且难以测量垂直于入射光方向上的运动速度。七十年代末, 西德汉诺威工业大学测试技术研究所应 DISA

收稿日期: 1985 年 12 月 5 日。

* 中国科学院科学基金资助的课题。

公司的要求,以单周期层栅为光束结合器和 Wollaston 棱镜为分光器并基于旋转场辨别速度方向研制出一种新型测速系统。我们采用本院精密计量室研制的单周期层栅和国产普通光电元件,于1984年底自行建成了相似的测振系统并成功获得可以辨别速度方向的双路多普勒信号。

二、旋 转 场

文献[3]制订了构成旋转场的各种信号合成方案,但无深入的分析。下面以其中的一种方案为例简介以琼斯矢量进行分析的一般方法,进一步阐明层栅激光多普勒测振系统的机理。

激光器的输出光经分光器和不同的偏振器件并基于多普勒效应,有可能获得振动方向不同、频差很小的两束单色光。将此两单色光波沿互相垂直的坐标轴方向分解并经光结合器分别迭加而混成若干路光,再经 Wollaston 棱镜将混合光加以分解且由光电元件接收而构成旋转场。若两单色光波的光矢量和振动频率为 \bar{E}_{0j} 和 ν_j ($j=1, 2$), 经不同器件混成 m 路光,则由琼斯矢量^[4]构成的行矩阵 $A=(\bar{E}_1, \dots, \bar{E}_m)$ 和 $B=(\bar{E}_{01}, \bar{E}_{02})$ 同 $(m \times 2)$ 矩阵 $X=(G_{kj})$ 存在下述关系:

$$A^T = XB^T \quad (1)$$

式中 G_{kj} 为第 k 路 ($k=1, \dots, m$) 混合光中的第 j 束 ($j=1, 2$) 单色光所经器件的琼斯矩阵, A^T 和 B^T 分别为 A 和 B 的转置阵。上式可改写为

$$\bar{E}_k = \sum_{j=1}^2 (G_{kj} \cdot \bar{E}_{0j})_{\nu_j} \quad (k=1, \dots, m) \quad (2)$$

式中用下标 ν_j 区别频率不同的两束单色光。单周期层栅以速度 \bar{V} 运动(图1),若两束1级衍射光为光强相等的线偏振光,其光矢量 \bar{E}_0 与 x 轴夹角为 $\varphi=45^\circ$, 振动频率分

别为 $\nu_1=\nu_0+\nu_D$ 和 $\nu_2=\nu_0-\nu_D$ 。光栅常数为 g 的层栅 m 级衍射光的多普勒频变为^[3,4]

$$\nu_{Dm} = m \frac{v}{g} \quad (3)$$

故1级衍射光的多普勒频变为 $\nu_D=v/g$ 。第2束单色光经 $\lambda/4$ 片(快轴沿 y 轴方向), 则由式(2)和第1路混合光中两束单色光所经器件的琼斯矩阵可得第1路混合光光矢量的二分量为

$$\begin{bmatrix} E_1(x) \\ E_1(y) \end{bmatrix} = \frac{|\bar{E}_0|}{\sqrt{2}} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}_{\nu_1} + \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}_{\nu_2} \right)$$

由此可知初相差为 $\delta(x)=0, \delta(y)=-\frac{\pi}{2}$, 故由振动方向相同、频差很小的两单色光波迭加公式可得合成波光强正比于

$$\left. \begin{aligned} E_1^2(x) &= |\bar{E}_0|^2 (1 + \cos 2\pi \Delta \nu t) \\ E_1^2(y) &= |\bar{E}_0|^2 (1 + \sin 2\pi \Delta \nu t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中频差 $\Delta \nu = 2\nu_D$ 。器件 N 的分光符合能量守恒定律,故第2路混合光有

$$\left. \begin{aligned} E_2^2(x) &= |\bar{E}_0|^2 (1 - \cos 2\pi \Delta \nu t) \\ E_2^2(y) &= |\bar{E}_0|^2 (1 - \sin 2\pi \Delta \nu t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

渥氏棱镜 W 按式(4)、(5)表示的两路混合光的二分量均分解为 e 光和 o 光, 经由光电元件产生的光电流按图示方式输至差动放大器, 以消除直流分量和抑制干扰信号并获得由正弦信号和余弦信号构成的旋转场。

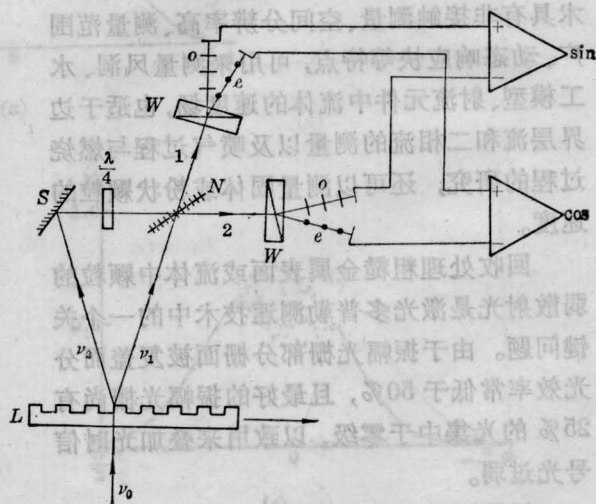


图 1

三、单周期层栅激光多普勒测振系统

氦-氖激光器输出的线偏振光经透镜 L_1 和转向镜 T 射向测试对象——铝板 K (图 2(a)), 速度 \bar{V} 垂直于入射光方向, 散射光由透镜 L_2 和遮光板 M 回收, 再经透镜 L_3 聚焦到光栅常数 $g=20\mu\text{m}$ 的单周期层栅 L 上。由于选择 $\beta_0 = \beta'_0 = \sin \frac{\lambda}{g}$, 故铝板沿图示方向运动时频率增大的第 1 束散射光(振动频率

为 ν_1) 和频率减小的第 2 束散射光(振动频率为 ν_2) 经层栅 L 混成 3 路强度可观的混合光。为表示振动方向不同、频差很小的 1 级与 3 级衍射光的混光情况, 图 2(b)、(c) 用正(负)号和数字分别表示频率的增(减)和衍射级次。由于充分利用了 1 级和 3 级衍射光, 则理论上回收光的有效利用率高达 90%。实验表明: 从粗糙金属表面所回收的散射光虽然很弱, 但信号质量很好。层栅是可以扩大测量范围和提高测量灵敏度的。可调束角棱镜 W 将 3 路混合光分成上下各 3 束光(e 光和 o 光)。

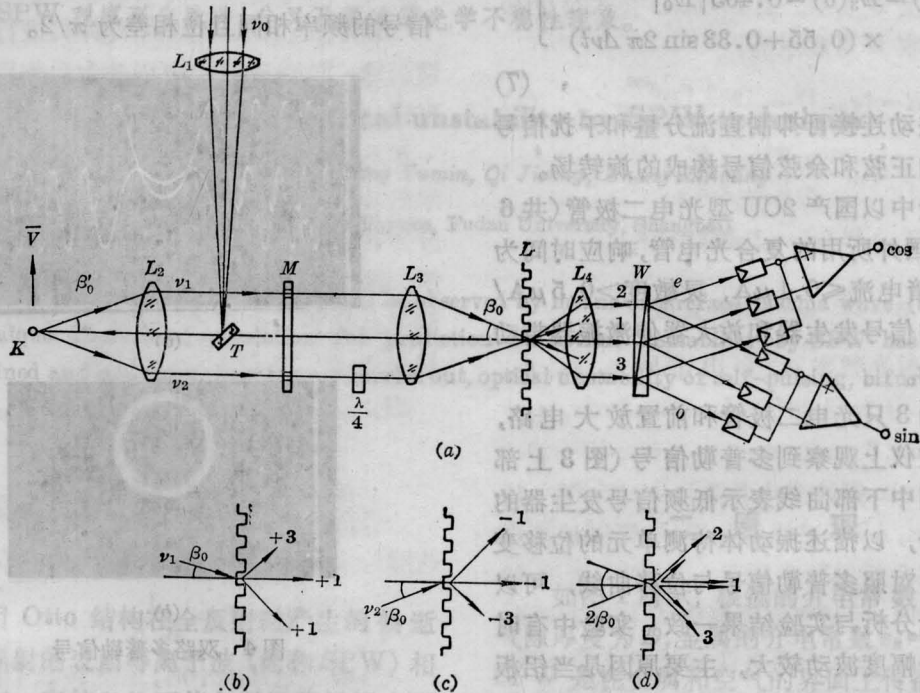


图 2

铝板以速度 \bar{V} 运动时, 两散射光束的振动频率分别为 $\nu_1 = \nu_0 + \nu_D$ 和 $\nu_2 = \nu_0 - \nu_D$ 。若两散射光束均为线偏振光且光矢量 \bar{E}_0 与 x 轴夹角为 45° , 其中第 2 束散射光经过快轴沿 y 轴方向的 $\lambda/4$ 片。由单周期层栅的衍射效应可知 3 级与 1 级衍射光强之比 $\eta = 4.5/40.5 = 0.11$, 由混成 k 路 ($k=1, 2, 3$) 的 j 束 ($j=1, 2$) 单色光所经器件的琼斯矩阵 G_{kj} :

$$G_{11} = \sqrt{0.405}, \quad G_{21} = \sqrt{0.045},$$

$$G_{31} = \sqrt{0.405}$$

$$G_{12} = G_{22} = \sqrt{0.405} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix},$$

$$G_{32} = \sqrt{0.045} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$$

和式 (1) 可得 3 路混合光琼斯矢量的列矩阵为

$$A^T = \begin{bmatrix} \bar{E}_1 \\ \bar{E}_2 \\ \bar{E}_3 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{0.405}{2}} |\bar{E}_0| \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0.33 & 1 \\ 1 & 0.33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ -i \end{bmatrix} \quad (6)$$

最后可得 6 束光 (e 光和 o 光) 的光强正比于

$$\left. \begin{aligned} E_1^2(e) &= 0.405 |\bar{E}_0|^2 (1 + \cos 2\pi \Delta\nu t) \\ E_2^2(e) &= E_3^2(e) = 0.405 |\bar{E}_0|^2 \\ &\quad \times (0.55 + 0.33 \cos 2\pi \Delta\nu t) \\ E_1^2(o) &= 0.405 |\bar{E}_0|^2 (1 + \sin 2\pi \Delta\nu t) \\ E_2^2(o) &= E_3^2(o) = 0.405 |\bar{E}_0|^2 \\ &\quad \times (0.55 + 0.33 \sin 2\pi \Delta\nu t) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

按图示差动连接可抑制直流分量和干扰信号并获得由正弦和余弦信号构成的旋转场。

实验中以国产 2CU 型光电二极管 (共 6 只) 代替国外所用的复合光电管, 响应时间为 10^{-7} s, 暗电流 $\leq 0.1 \mu\text{A}$, 灵敏度 $> 0.5 \mu\text{A}/\mu\text{W}$ 。由信号发生器和放大器使激振器带动铝片振动。

借助 3 只光电二极管和前置放大电路, 可在示波仪上观察到多普勒信号 (图 3 上部曲线)。图中下部曲线表示低频信号发生器的输出信号, 以描述振动体待测单元的位移变化规律。对照多普勒信号与位移曲线, 可以判断理论分析与实验结果一致。实验中有时发现信号幅度波动较大, 主要原因是当铝板振动振幅较大时引起待测单元轴向移动和法线变化以及表面光学性质的离散性。顺便指出, 信号频率为

$$\Delta\nu = 2\nu_D = 2 \frac{v}{g} \quad (8)$$

光栅常数 $g = 20 \mu\text{m}$ 、待测速度 $v = 10 \text{ m/s}$ 时, 信号频率 $\Delta\nu = 1 \text{ MHz}$ 。

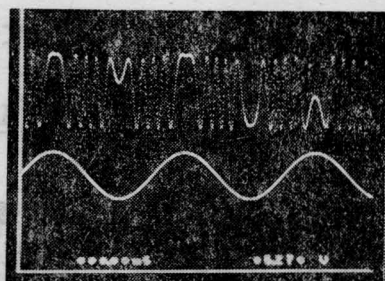
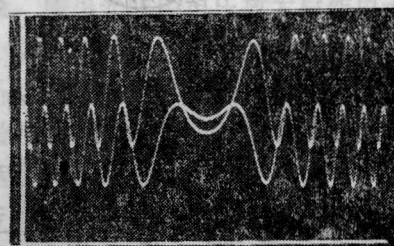
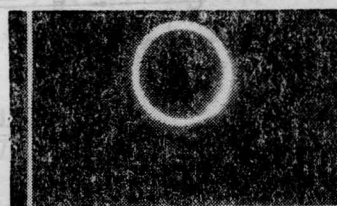


图 3 多普勒信号和待测单元位移变化

借助 6 只光电二极管和前置放大电路获得双路多普勒信号 (图 4(a)), 在待测单元速度方向改变前后发生了位相超前和滞后变化。图 4(b) 所示的圆图象也证实双路多普勒信号的频率相同且位相差为 $\pi/2$ 。



(a)



(b)

图 4 双路多普勒信号

参 考 文 献

- [1] 王宝成;《中国激光》,1986,13, No 2, 86.
- [2] 王宝成;《大连工学院学报》,1982,21, No. 2, 19~27.
- [3] Hock F.; Photoelektrische Messung der Änderung von Längen oder Winkelpositionen mit Hilfe von Beugungsgittern. Dissertation, Stuttgart, 1976.
- [4] 梁铨廷;“物理光学”,北京机械工业出版社,1981.