

# 激光-CCD 微位移传感器测振研究

林有义 陈振富 伊立言

(南京航空学院, 210016)

**提要:** 本文介绍了利用激光-CCD微位移传感器测振的原理和方法。这种测量技术适用于检测较大的振幅值( $>60\mu\text{m}$ )。在 $60\sim 800\mu\text{m}$ 范围内,最大绝对误差 $<10\mu\text{m}$ ,相对误差 $<6\%$ 。

**关键词:** 激光-CCD 传感器, 振动测量

## Study on laser-CCD microdisplacement sensors for vibration measurements

Lin Youyi, Chen Zhenfu, Yi Liyan

(Nanjing Aeronautical Institute, Nanjing)

**Abstract:** This paper presents the principle and the method of vibration measurements by means of laser-CCD microdisplacement sensors. This measurement technique can be applied for larger amplitudes ( $>60\mu\text{m}$ ). In  $60\sim 800\mu\text{m}$  range, the absolute maximum error is  $<10\mu\text{m}$ , and the relative error  $<6\%$ .

**Key words:** laser-CCD sensors, vibration measurements

### 一、引 言

众所周知,全息、散斑及云纹干涉法等都可以用于振动测量,这些测试方法具有一次测量就能观测到全场位移分布的优点,但属非实时测量。ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometer)<sup>[1]</sup>和激光多普勒测振技术<sup>[2]</sup>,都能对物体振动作实时检测,但要借助较复杂的电子设备才能完成实时检测。

本文提出一种新的测振技术——激光-CCD(Charge Coupled Devices)微位移传感器测振的原理和方法。这种测振新方法仍具有一般光学计量法精度高、非接触测量等的优点,但整个系统比ESPI和激光多普勒测振系统简单。实测结果表明,这是一种方法简单、操作方便、易于推广的新技术。这种技术也适用于作动态离面位移的测量。

### 二、原 理

基本原理如图1所示。激光光源通过小孔 $S_0$ ,沿物表面法向经透镜 $L_1$ 成像于物面 $S$ 处。

$S$  由透镜  $L_2$  成像在像平面(即 CCD 接收面)上。若物面沿法向产生  $\Delta z$  位移, 接收方向与物面法线成  $\theta$  角, 则  $S$  在像平面上的移动量  $\Delta x_i$  为

$$\Delta x_i = M \Delta z \sin \theta \tag{1}$$

式中  $M$  为  $L_2$  的横向放大倍数。在焦深范围内, 取适当  $M$  值,  $\Delta x_i$  与  $\Delta z$  呈线性关系。当  $M$ 、 $\theta$  不变时,  $S$  在 CCD 接收面上的像点与  $S$  的运动规律是相同的。

设像点的强度为  $I$ , 并以匀速度  $v_i$  运动, 则 CCD 的任一光敏单元的总曝光量为

$$E = \int I dt = \int_{x_i-l/2}^{x_i+l/2} I \frac{dx_i}{v_i} = \frac{I}{v_i} l \tag{2}$$

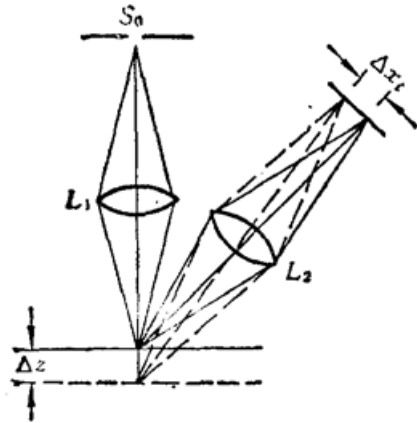


Fig. 1 Principle of laser-CCD sensor

式中  $l$  为光敏单元的宽度。上式说明在光积分时间内每一光敏单元的总曝光量是相同的, 输出信号的强度分布如图 2 所示。离面位移  $\Delta z$  由图中初始和终止信号对应的光敏单元序数  $n_1$  和  $n_2$  确定:

$$\Delta z = \frac{l(n_2 - n_1)}{M \sin \theta} \tag{3}$$

当物体作正弦振动时, 即

$$x_i = AM \sin \omega t \tag{4}$$

式中  $A$  为振幅,  $\omega$  为角频率。令  $K = AM \sin \theta$ , 在光强不变条件下, 任一光敏单元的总曝光量为

$$E = \frac{I}{\omega} \int_{x_i-l/2}^{x_i+l/2} \frac{dx_i}{\sqrt{K^2 - x_i^2}} = \frac{I}{\omega} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{x_i+l/2}{K} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{x_i-l/2}{K} \right) \right] \tag{5}$$

因  $[(x_i \pm l/2)/K]^2 < 1$ , 上式用级数展开取近似有

$$E = \frac{Il}{K\omega} + \frac{Il^2}{24K^3\omega} + \frac{Il}{2K^3\omega} x_i^2 \tag{6}$$

令常数  $Il/K\omega + Il^2/24K^3\omega = C_1$ ;  $Il/2K^3\omega = C_2$ , 则式(6)为

$$E = C_1 + C_2 x_i^2 \tag{7}$$

在光积分时间(设等于振动周期的整数倍)内, 输出信号的强度分布由式(7)可用图 3 表示。振动的振幅为

$$A = \frac{1}{2} \Delta z = \frac{l(n_2 - n_1)}{2M \sin \theta} \tag{8}$$

实际像点光强呈高斯分布, 所以输出信号的强度分布不同于式(7)。原则上可用解析法导

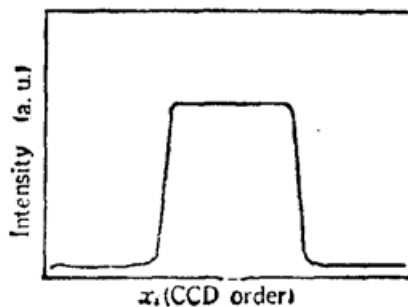


Fig. 2 Intensity distribution of the output signals at uniform image point movement

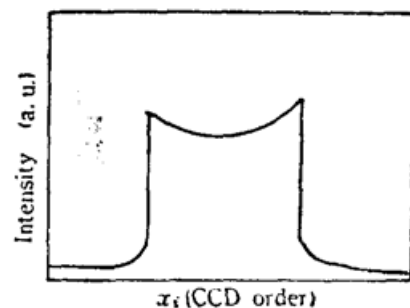


Fig. 3 Intensity distribution of the output signals at image point sine vibration

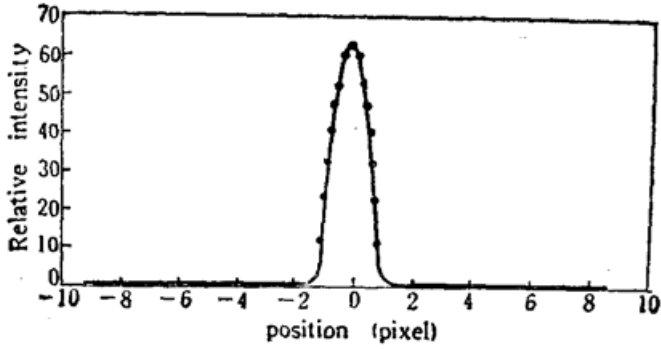


Fig. 4 Intensity distribution of the image point

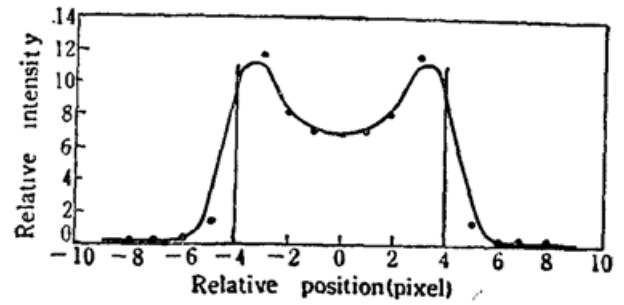


Fig. 5 Intensity distribution of the output signals at the image point sine vibration simulated by computer

出其关系, 但用数值方法由计算机模拟而得出同样令人信服的结论。图 4 为所选像点的强度分布。模拟像点作正弦振动时输出信号的强度分布见图 5。

图 5 中  $\cdot$  表示的振幅点相应强度并不是强度分布的峰值, 而是在其外侧。外移距离可用光敏单元数  $\Delta n$  与  $l$  的乘积表示。则振幅值为

$$A = \frac{l(n_2 - n_1) + l\Delta n}{2M \sin \theta} \quad (9)$$

由高斯型的像点强度分布很难精确确定  $l\Delta n$  值。根据标定法, 取  $A - l\Delta n / 2M \sin \theta$  为标定振幅值  $A_s$ , 由式(9)则有

$$A_s = \frac{l}{2M \sin \theta} (n_2 - n_1) = C(n_2 - n_1) \quad (10)$$

式中  $C (= l / 2M \sin \theta)$  为灵敏度, 它完全由实验测定。将修正  $C$  值输入计算程序, 就可以自动快速地测出振幅值。

### 三、实 验

实验装置见图 6。照明光学系统用空间滤波系统, 其目的是为了减小  $S$  尺寸, 并使像点强度分布的前、后沿变得陡斜。空间滤波器的扩束比  $\beta = f_2 / f_1$  ( $f_1, f_2$  分别为  $L_1, L_2$  的焦距)。经

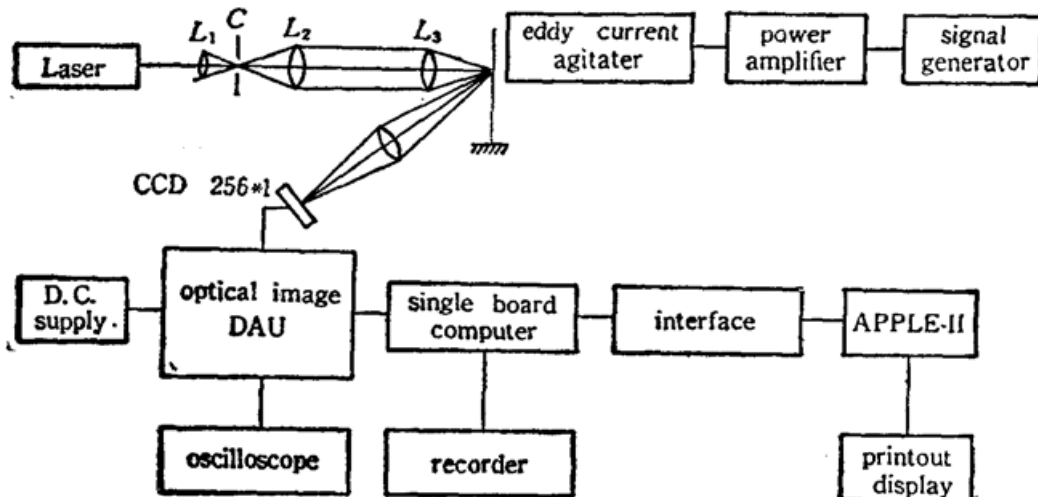


Fig. 6 Vibration measurement system of laser-CCD microdisplacement sensor

滤波后  $S$  点光强分布宽度压缩了近  $\beta$  倍<sup>[3]</sup>。摄像部分采用一般成像透镜。激振系统由信号发生器、功率放大器和涡流激振器组成。CCD 微位移传感器由 CCD 光学图像数据采集器及后续处理系统组成。

本实验数据采集用数值量化(ADC)方式,并在 Z80PCU 的控制下完成。为消除随机噪声干扰,采用多次采样算术平均、滤波及曲线拟合(最小二乘法曲线拟合),以精确确定两强度峰值点的坐标<sup>[4]</sup>。

根据不同材料的  $\Delta z$  与  $\Delta x_i$  关系( $M$  值不同)<sup>[3]</sup>,实测时取与铝材相近的冷轧钢板的  $M$  值。

实测了平板横向弯曲振动的振幅值。实测结果表明:激光-CCD 微位移传感器测得的值,与读数显微镜测得的数据相比较,当量程在  $60 \sim 800 \mu\text{m}$  范围内,最大绝对误差  $< 10 \mu\text{m}$ ,相对误差 ( $< 6\%$ ) 均小于工程允许误差。全场振幅规范化值分布与理论值<sup>[5]</sup>也是吻合的。

#### 四、讨 论

激光-CCD 微位移传感器测振,主要是依靠检测输出信号强度分布的峰值来实现。因此,在物体振动时,保持像点的信号强度分布是实现测振的关键。为避免光强分布不稳定的影响,实验时是依靠示波器监视并决定光学图像数据的采集。图 7 给出了在一般氦氛激光照明下位移前后的信号强度分布,从图可见由光学图像数据采集器获得的信号强度分布基本相似,能满足实验要求。

图 8 是由同一像点,用计算机模拟像点以不同振幅振动时输出信号的强度分布。当像点宽度约为振幅值 2 倍时,输出信号强度分布只出现一个峰值。所以这种方法适用于检测较大的振幅值。实测结果也证实了这一结论。压缩像点强度分布宽度,就能测得较小的振幅值。在焦深许可范围内,量程取决于 CCD 位数,采用高位数 CCD 器件可扩大量程。

由于 CCD 驱动电路的光积分周期并不一定等于振动周期的整数倍,因而使输出信号的

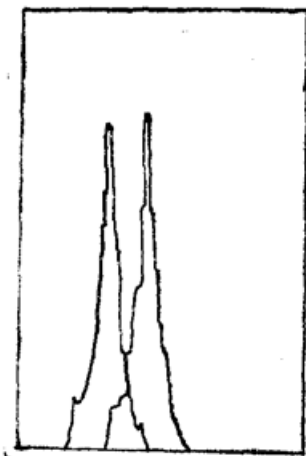


Fig. 7 Intensity distribution of the output signals before/after displacement

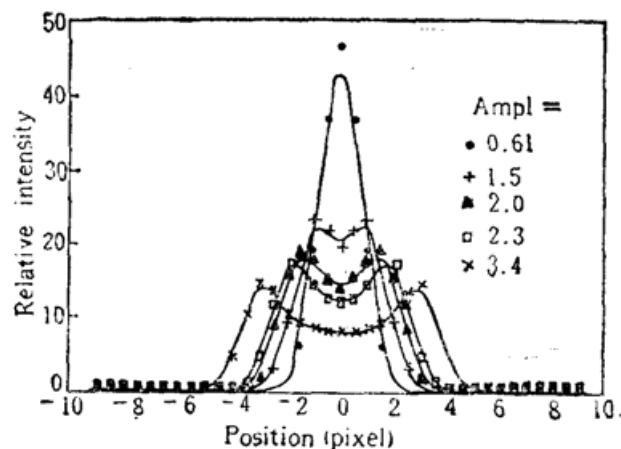


Fig. 8 Intensity distribution of the output signals of the same image point at different amplitude vibration, simulated by computer

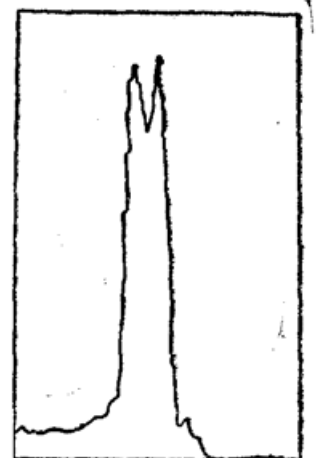


Fig. 9 Intensity distribution of the output signals of image point at sine vibration after processing

强度分布产生畸变。这种情况在低频振动时尤其明显。降低照明光强,采用多周期多次采样平均,可改善输出信号的强度分布,如图 9 所示。当光积分周期远小于振动周期时,只能获得不同时序对应的照明光斑的强度分布,调整光积分周期,可测出较低频振动的振幅值。

应当说明,用激光-CCD 微位移传感器测振,可测的最小振幅值及精度都不及激光多普勒测振技术。但由于设备简单、操作方便以及能实时逐点检测等的优点,仍不失为一可供选择的测振方法。

感谢航空航天科学基金的支持和资助。

### 参 考 文 献

- 1 Catherine Wykes, *Opt. Eng.*, **21**(3), 400~405(1982)
- 2 Instruction & Service Manual DISA 55X Laser Vibrometer
- 3 汪良才 *et al.*, *中国激光*, **15**(6), 379~381(1988)
- 4 朱红卫 *et al.*, *南京航空学院学报*, **22**(2), 80~83(1990)
- 5 清华大学工程力学系编, *机械振动*, 机械工业出版社, 1980, 329~337

## CLEO'93 征稿启事

CLEO'93 会议将于 1993 年 5 月 2 日~7 日在美国马里兰州巴尔的摩(Baltimore)会议中心举行。征文的主要内容包括: (1) 气体与自由电子激光器; (2) 固体和液体激光器; (3) 半导体激光器; (4) 非线性光学与激光光谱学的应用; (5) 相位共轭和光致折变器件; (6) 光学材料和制作; (7) 用于聚变与强场物理的激光器; (8) 超快光学和电子学; (9) 大气、空间和海洋光学; (10) 光开关、逻辑与存储系统; (11) 电-光与红外传感器件与技术; (12) 诊断、分析及工业应用; (13) 医学与生物学应用; (14) 电-光材料生长和加工中的激光器; (15) 光波通信。

CLEO'93 中国地区节目委员会主席徐至展, 通信地址: 上海 800-211 信箱 (邮政编码 201800), 电话: 9528896。

来稿请附中英文 35 字摘要和 200~500 字摘要各两份, 其中一份不写单位和姓名, 以利审稿。来稿务必书写清楚, 英文稿用打字机按英文通知的要求打字, 不合要求者不予受理。截稿日期为 1992 年 10 月 30 日 (以邮戳为准)。来稿请寄上海市 800-211 信箱《中国激光》编辑部 (邮政编码: 201800), 并注明“CLEO'93 征稿”字样。稿件切勿直接寄往国外, 以免延误时间。

CLEO'93 中国地区节目委员会