

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0122-03

相干探测在物体表面振动谱测量中的应用

杨春平, 吴健, 何毅, 陈长庚

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 提出了利用零差相干探测进行远距离、非接触振动测量的方法,并详细分析了振动物体在激光照射下的多普勒效应及其在相干探测中的信号表现形式,分析表明:激光光波频率变化率就是物体的振动频率,且与激光入射方向和照射位置以及激光波长无关。最后用连续 CO₂ 相干雷达进行了验证实验,结果表明:通过检测振动物体表面的散射回波来提取其特征频谱是可行的,这为远距离物体的特征识别提供一种新的可能方式。

关键词 精密工程测量; 相干探测; 多普勒效应; 振动测量; CO₂ 激光雷达; 特征识别

中图分类号 TN247

文献标识码 A

Application of Coherent Detect in Vibration Measurement of Far Object

YANG Chun-ping, WU Jian, HE Yi, CHEN Chang-gen

(*Opto-Electronic Information Department, University of Electronic Science & Technology of China,
Chengdu, Sichuan, 610054 China*)

Abstract A new method of measuring vibration is proposed based on Doppler effect with coherent detection when the objects to be measured are incidented on by laser beams. By the means of this method, it is possible to obtain information about displacement, velocity and vibrated frequency of the objects. This approach allows a non-contact measurement of small vibrations in a far distance. A series of experiments have been done. Vibration signatures from the object were obtained using a coherent CO₂ laser radar. Experimental results show that it is a possible method to distinguish a object by means of vibration measurements in the distant range.

Key words precision engineering measurement; coherent detection; Doppler effect; vibration measurement; CO₂ laser radar; character recognition

1 引言

基于多普勒效应的激光测振技术是从20世纪60年代初发展起来的^[1]。与传统的方法相比,该技术具有测量精度高,空间分辨率高,测量范围大和非接触等特点,但是基本上都只能对近距离物体振动的振幅和相位进行测量^[2-4]。在国防军事、航空航天等领域中装有发动机的物体非常普遍,当发动机工作时,其表面会产生机械振动。如果用激光照射它,将对照射其表面的激光引起幅度调制和多普勒频移^[5]。静止的物体在雷达扫描场中引起的自调制是一种幅度调制,运动的物体在扫描幅度调制的基础上还有多普勒频移。因此相干探测能同时检测其自调幅信号和多普勒信号,而直接探测只能探测自调幅信号。

相干探测信号与信号光场电场强度成正比,完整地记录了信号光的振幅、频率和初相位,这显然比直接探测携带了更多的信息。相干探测根据载波频率可以分为外差探测和零差探测两种,信号光与本振光的频率不同时的相干探测称为外差探测,信号光与本振光的频率相同时的相干探测称为零差探测。零差探测方式的光学天线结构比外差探测方式的简单,而同等条件下探测灵敏度差不多。另一方面,由于CO₂激光器发出激光的相干性可以比常用的He-Ne激光器的好,构成的激光器功率高,克服了He-Ne激光器相干探测系统作用距离短的缺点,因此适用于远距离非接触的振动测量,本文采用零差相干式CO₂激光跟踪雷达来测量物体的振动特性。

2 物体振动引起激光多普勒频移

振动是一种最基本、最普遍的物理现象。任何复杂的振动都可以分解为一系列简谐振动的组合, 对某一具体振动现象, 测量其振动的频率分布, 在实际工程技术中有着重要的实际意义。设照射在物体表面上的激光频率为 f_0 , β 是物体运动速度与激光束轴线方向的夹角, v 是物体运动速度, c 是光速, 则物体运动引起的多普勒频移为^[6]

$$\Delta f = \frac{2vf_0}{c} \cos\beta \quad (1)$$

如果物体以速度 v 运动的同时还有表面振动, 则多普勒频移量将包含运动和振动的信息^[7,8]。先考虑振动物体表面上一面元的情况, 设该面元的的振动由下式描述

$$y_i = A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (2)$$

式中 A_i 为该面元的振幅; f_i 为该面元的振动频率。

根据(1),(2)式, 该面元相对激光束的总运动速度为

$$v_i = v \cos\beta + 2\pi A_i f_i \cos(2\pi f_i t - \varphi_i) \cos\alpha \quad (3)$$

其中 α 为该面元的振动方向与激光束的夹角。

将(3)式代入(1)式, 于是振动物体面元产生的多普勒频移

$$\Delta f = \frac{2vf_0}{c} \cos\beta + \frac{4\pi A_i f_i f_0}{c} \cos(2\pi f_i t - \varphi_i) \quad (4)$$

可见, 振动物体的一面元产生的多普勒频移有以下特点: 接收到的信号中含有由物体运动产生的多普勒频移项 $\frac{2vf_0}{c} \cos\beta$, 以及由表面振动引起的多普勒频移项 $\frac{4\pi A_i f_i f_0}{c} \cos(2\pi f_i t - \varphi_i)$; 由表面振动引起的多普勒频移量的变化频率与表面振动频率相同, 其规律不受物体的运动速度大小、物体运动方向、激光照射角等因素的影响。由于在任何瞬间的总信号频谱携带了照明区域内物体振动的所有特征, 因此可以通过检测物体回波的光频频移来提取物体的振动特征。

3 零差相干探测测振实验系统

图 1 是零差相干式 CO₂ 激光跟踪雷达光学系统示意图。具体的工作原理如下:

CO₂ 激光器发射的水平线偏振光束经 3 倍预扩束器扩束后, 由反射镜 M_1 反射完全透过布儒斯特片 BP, 并入射到 $\lambda/4$ 波片(98%透射, 2%被反射); $\lambda/4$ 波片把线偏振光变为圆偏振光, 由反射镜 M_2 和 M_3 准确地反射到主天线副镜 T_1 上, 再反射到主天线主

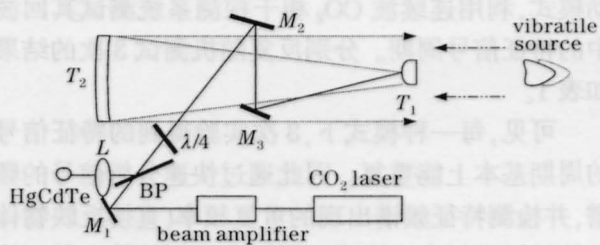


图 1 相干式 CO₂ 激光跟踪雷达光学系统

Fig.1 Schematic of CO₂ laser trace system

镜 T_2 上, 形成发散角为 0.2 mrad 的探测光束射向物体。

物体后向散射的椭圆偏振光按原光路返回, 再次经过 $\lambda/4$ 波片后被还原成线偏振光, 布儒斯特片将一部分信号光(50%)反射到场镜 L , 这部分光被修正为完全垂直的线偏振光, 这就是物体散射回来的信号光。

从布儒斯特片 BP 出射的光入射到 $\lambda/4$ 波片后, 被 $\lambda/4$ 波片与空气的第二界面反射, 然后再沿原路返回, 透出第一界面后变成了垂直偏振光; 被布儒斯特片反射后具有与信号光完全相同的偏振态。信号光与本振光一起由场镜聚焦到 HgCdTe 探测器光敏面上叠加产生相干探测信号, 该信号经数据采集、放大、处理, 从中即可提取物体的振动信息。

4 振动特性的实验测试和分析

在利用图 1 装置进行实验过程中, 用函数发生器和功率放大器驱动的扬声器振动膜作为振动源, 在距离光学天线系统 50 m 处任意设定了 10 个振

表 1 振动物体的测试数据表

Table 1 Experimental data of vibration objects

	Firs	Second	Third
Mode 1 / μ s	33.5	33.0	33.0
Mode 2 / μ s	28.0	29.0	28.0
Mode 2 / μ s	19.0	19.5	19.0
Mode 4 / μ s	14.0	13.0	14.0
Mode 5 / μ s	24.5	24.0	25.0
Mode 6 / μ s	25.0	24.5	25.0
Mode 7 / μ s	18.0	18.0	18.0
Mode 8 / μ s	16.0	16.0	15.5
Mode 9 / μ s	10.0	10.0	10.0
Mode 10/ μ s	5.0	5.5	5.0

动模式,利用连续波 CO₂ 相干探测系统测试其回波中的特征信号周期。分别反复随机测试 3 次的结果如表 1。

可见,每一种模式下,3 次实验得到的特征信号的周期基本上能重复。因此通过快速分析信号的频谱,并检测特征频谱出现的重复频率(直接反映物体的特征振动频率),用零差测振来识别物体也是可能的一种方案。

5 结 论

本文分析了利用多普勒频移测量运动物体振动特性的基本原理和实验系统,结果表明,零差探测方式在检测微弱的次声振动方面具有一定的优势,可以通过具有高探测灵敏度的零差相干探测方式来检测远距离振动物体表面的振动特性来识别目标。这在实际工程技术中也有着重要的意义。

物体使用不同动力源或者物体处于不同的工作状态等都会使物体表面振动特性呈现出不同特征,但是物体的这种特征总是有规律可寻的,这就使我们有可能通过研究和测量物体的振动特性而

寻求一种新的目标识别方法。

参 考 文 献

- 1 Yeh Y, Cummins H Z. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, 4(10):176-178
- 2 Wabinski W, Von Martens H J. Time interval analysis of interferometer signals for measuring amplitude and phase of vibrations[C]. *Proc. SPIE*, 1996, 2868:166-177
- 3 Peter Rank. Richard laser radar based vibration imaging of remote objects Lutzmann[C]. *Proc. SPIE*, 2000, 4035:436-443
- 4 Bell J R, Rothberg S J. Rotational vibration measurements using laser Doppler vibrometry: comprehensive theory and practical application [J]. *J. Sound and Vibration*, 2000, 238:(4):673-690
- 5 Schultz Kenneth, I. Fisher. Measurements of satellite vibrations[C]. *Proc. SPIE*, 1992, 1633:172-178
- 6 Rothberg S J, Alliwel N A. Practical application of laser Doppler vibrometry for machinery vibration measurement[C]. *Computational Mechanics Publ*, 1994, 327-333
- 7 Zhang Jing, Luo Qingming. Low frequency vibration measurement with backscatter-modulated laser diode[C]. *Proc. SPIE*, 1998, 3726:550-554

Table 1 Experimental data of vibration objects

Mode	Period (s)	Frequency (Hz)	Amplitude (μm)
Mode 1	0.25	4.00	1.00
Mode 2	0.25	4.00	2.00
Mode 3	0.25	4.00	1.00
Mode 4	0.25	4.00	1.00
Mode 5	0.25	4.00	2.00
Mode 6	0.25	4.00	2.00
Mode 7	0.25	4.00	1.00
Mode 8	0.25	4.00	1.00
Mode 9	0.25	4.00	1.00
Mode 10	0.25	4.00	2.00