

光电振动传感技术新进展 *

张毅 张书练

(清华大学精密仪器系精密测试技术与仪器国家重点实验室,北京,100084)

摘要: 光电振动传感器在振动测量领域占有重要地位,概要叙述了光电振动传感器近年来的最新进展。按测量原理分类介绍了相关技术的发展和取得的成果,并对技术趋势做了总结归纳,指出了一些热点方向。

关键词: 光电技术 振动传感器 振动测量

Recent advancement of optoelectronic vibration sensing technology

Zhang Yi, Zhang Shulian

(The State Key Lab of Precision Measurement Technology and Instruments,
Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: This paper gives a depiction of the recent advancement optoelectronic vibration sensors, which play an indispensable part in the field of vibration measurement. The improvement of related techniques, the developing trend and some hot subjects are introduced.

Key words: optoelectronic technology vibration sensor vibration measurement

引 言

光电振动传感器具有灵敏度高、响应速度快、可进行非接触测量的优点,一直在振动测量领域占有重要地位。近年来,随着半导体、光电子和计算机技术的迅猛发展以及光学器件的完善,传统的振动传感技术得以改进,而新原理的振动传感技术也不断涌现,呈现一派新旧交汇的新气象。下面对光电振动传感技术的新进展分类概述。

1 几何光学法

1.1 激光三角法

激光三角法是利用几何光学成像原理,当被测目标表面相对照射光路有位移时,其在接收光路中成像位置会产生变化,使用对位置敏感的传感器,如位置敏感元件(PSD)和 CCD,就可接收到这一信息。通过信号处理可得到被测目标位移和振动信号,测量精度小于 $10\mu\text{m}$ 。激光三角法具有非接触、结构简单、精度

适中等优点,发展也较成熟,特别适于工业现场安装使用。但由于一般采用会聚光照明,目标位移会使照射光束离焦从而降低测量精度,所以,被测目标的运动范围,即量程受到限制。若采用照射光自动对焦方法,则只适于静态或准静态测量。为扩大量程,近年来,有人提出使

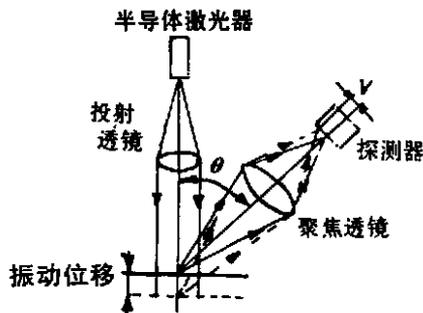


图 1 大范围激光三角法原理

用平行光照射被测目标的方法^[1],如图1所示。该方法从理论上量程没有限制,在实验中测量范围达到100mm左右性能仍然理想,其测量精度达到10 μ m以下。

1.2 光强法

光强法^[2~4]是利用被测目标相对投射光束,或反射光束相对探测光路的位置变化导致探测光强的变化来探测振动。该方法既可是接触式的^[2],也可是非接触式的^[3,4]。由于光强法具有结构简单、信号处理方便、成本较低等优势,使得这种方法在各种场合都有广泛应用。近年来,光强法与光纤的结合日益紧密^[2~4],光强法的简单与光纤的灵活相结合,进一步拓展了

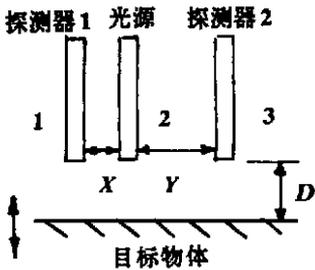


图2 双光束光强法测振动原理图
1,3—接收光纤 2—出射光纤

应用领域。光强法的主要局限在于光强易受光源和外界环境干扰的影响,精度不高。最近,对光强法的改进主要集中在如何提高抗干扰能力上。一般采用的方法有多光束、多波长等。图2就是采用三光纤头的方案^[3],利用照射光束与多路接收光束的特殊相对位置布置,经过信号解算来消除光源光强变化、目标表面反射率变化等误差来源。日本 Takaoka Electric 公司研制的 FA2010 光纤振动传感器以一个用玻璃制成的悬臂梁感受外界振动,而悬臂梁的端部做成了反射镜,由光纤射出并经梯度折射率透镜准直的光束在反射镜上反射,外界振动会引起反射光强的变化。引人注目的是在光纤出射端面上粘接了1块钹玻璃,由光致发光效应发出的1.064 μ m 波长的光作为参考信号。用这种方法可以有效地对光纤、连接器处的光强损失和波动进行补偿。目前,光强法测量振幅的分辨率一般在微米量级,测量范围在1~10mm左右。

2 干涉法

2.1 传统干涉术

传统干涉术是指迈克尔逊干涉法、马赫-曾德干涉法等传统原理和光路结构的干涉方法以及它们的变形。在传统干涉测量方法中,迈克尔逊干涉法是最常用的。在振动测量中,该方法也是使用最广泛的。在最近对传统干涉测量方法的改进中,主要侧重于抗干扰能力的增强、精度的提高以及简化易用。

在对振动这样的动态量进行测量时,如何实时地消除干扰和进行补偿一直是一个主要问题。多波长、多偏振态、多位相差等处理方法得到了应用。外差干涉是消除外界扰动的有效方法,也是普遍采用的方法。图3为采取了多波长干涉的外差干涉方法^[5],由于多波长的作用,其测相的分辨率特别高,换算为振动幅值相当于0.5nm。乌拉圭和德国的研究人员用两个不同偏振态的光束进行外差干涉^[6],并采用了相位差细分的方法,实现的最小可测量振幅为25nm。在信号处理方面,为提高精度,也采取了很多措施,如相位偏置,反馈稳相和多路平均等。

2.2 F-P干涉术

在F-P干涉测振法中,其中一个腔镜固定在被测物体上。振动导致腔长的变化,从而使出射光的光强或者波长谱线发生变化,探测这一变化,就可以得到振动参数。由于F-P腔的固有特点,F-P干涉测振法具有分辨率和灵敏度高的优势,同时,也存在测量范围小、调整安装困难

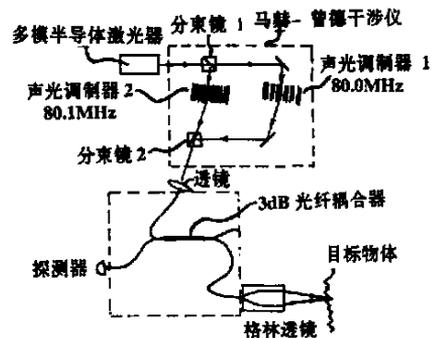


图3 外差干涉仪测振动

的缺点。近来新发展主要是发挥其灵敏度高的优点,避开或解决其缺点。

东京大学的 Norikatsu Mio 等人通过采用高精度的超短 F-P 腔和反馈跟踪原理得到很高的灵敏度^[7]。其光源采用 LD 泵浦的 YAG 固体激光器。根据他们的分析,F-P 腔的最终灵敏度取决于激光的发射噪声,即激光出射功率和波长的随机波动。发射噪声对 F-P 腔的影响与腔的精细度成反比,提高 F-P 腔的精细度,就能有效减小激光发射噪声。实验中 F-P 腔的精细度为 10^5 时,发射噪声只有 $8 \times 10^{-21} \text{m/Hz}^{1/2}$ 。同时,高精度的腔对激光频率波动噪声(FM 噪声)很敏感。研究表明,F-P 腔对腔长变化的灵敏度与腔长无关,而激光 FM 噪声水平与腔长成正比。减小腔长能很大程度上减小噪声影响,腔长为 $100\mu\text{m}$ 的 F-P 腔的 FM 噪声水平在 $7 \times 10^{-18} \text{m/Hz}^{1/2}$ 。综合上述因素,被测振动在 1kHz 时, $150\mu\text{m}$ 的 F-P 腔的等效噪声水平在 $1.3 \times 10^{-16} \text{m/Hz}^{1/2}$,实现了很高的分辨率和灵敏度。他们用双折射腔镜构成的 F-P 腔测振传感器^[8],利用双折射效应锐化 F-P 腔透射光谱线,使灵敏度进一步提高。

光源和探测手段也是 F-P 干涉测振法中的重要因素。为了保证测量范围,光源一般采用宽带光谱或者多波长的光源,这样就要求探测设备能探测到出射光的光谱成分变化或相对光强变化。由于振动传感是动态测量,所以,探测设备又应该有较好的动态响应。文献[9]中采用多波长 LD 作为光源,用单色仪作为探测器,然后用线阵 CCD 来接收,这种方法动态范围较大,可达 50dB 。缺点是要使用单色仪这样的大型设备。如果振动频率较高,对 CCD 的采样速率还会提出更高要求。

光纤的广泛使用很大程度上解决了 F-P 干涉测振仪安装调整中的困难。文献[9]中以光纤为传光介质,同时光纤的出射端面即作为 F-P 腔的一个腔镜,出射光也通过光纤传回到探测器,使安装调整得到简化。光纤不仅可以作为传光介质,还可以作为敏感元件来感受振动。文献[10]中,光纤的出射端面作为 F-P 腔的一个腔镜,而以一段光纤做成悬臂梁来感受振动。振动会导致 F-P 腔长的变化,在一定范围内,这个变化是线性的。该方法的灵敏度很高,低频测量特性较好。

2.3 全息干涉术

全息干涉测振可以对整个振动面上的点位置进行测量,通过比较不同时刻的全息干涉图,就能够描绘出被测振动面上各点的振动情况。最大特点就是可以进行面测量,同时获得多点的数据。但由于传统的全息干涉法需要对全息图照相,使其不能实时测量,从而大大限制了它在振动传感中的应用。

近年来,光热塑材料和光折变晶体作为记录介质被引入到全息干涉法中,使全息干涉法迈向了实时处理的新阶段,也使全息干涉测量振动更加实用化。一种新的自稳定全息干涉测振系统^[11]使用光折变晶体 $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ 来实时记录干涉图,如图 4 所示。系统测量了一个扬声器表面的振动,并由摄像头实时读出干涉图,送入计算机进行图像处理,获得了扬声器表面的振动形态。加州理工学院的 R. Hofmeister 和 A. Yariv 采用 KTN/ KLTN 晶体作为记录介质测量薄膜的振动,得到了一个全光的振动传感器^[12]。

2.4 数字散斑干涉法

数字散斑干涉法是散斑干涉法与计算机图像处理技术结合的产物。它克服了散斑干涉法

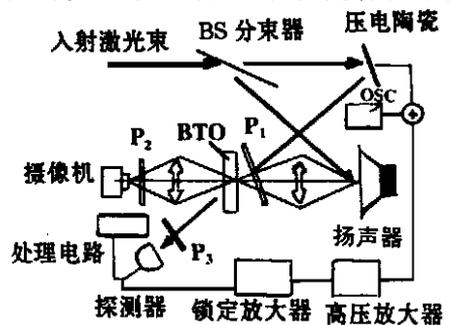


图 4 自稳定全息干涉振动传感器
BTO— $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ 晶体 P₁,P₂,P₃—偏振片

实时性差、质量较低的缺点,可实时地测量物体几何形状和振动振幅以及相位。与全息干涉类似,它也可进行面测量或全场测量,用途十分广泛。福特汽车公司的 Fang Chen 等人用散斑干涉法对汽车模型做轮廓和振动型态的快速测量,实现了很好的效果^[13],尤其在交互式设计优化、CAE 快速成型和非破坏性实验中已成为一个强有力的工具。随着数字成像元件、光电设备、计算机技术和算法的迅速进步,该法的性能和质量都将得到很大提高,应用也会越来越广。

3 光纤和微机械振动传感器

光纤的应用使光电振动传感器的结构布置更加灵活,抗干扰能力大大提高。光纤可将光束经过各种路径导入到被测目标上,很适于复杂结构空间和环境条件下的振动传感。前述的各种测量方法都可与光纤相结合,构造出各种各样的光纤传感器。光纤不仅可作为光传输介质,还可直接作为敏感元件来感受振动。如前提到的光纤 F-P 干涉仪^[10]。文献[14]中也是以一段光纤作为悬臂梁,利用振动时悬臂梁被迫振动造成的光纤传输光强变化来测量振动。这样的传感器适合于集成或嵌入在材料和结构中,形成灵巧结构和灵巧材料^[15],而灵巧结构、灵

巧材料在未来的航空工业、土木建筑业以及机械行业中将会得到广泛应用。

微机械产品或微型电子机械系统(MEMS)正越来越广泛地应用于科研和生产的各个领域。特别是在传感器领域,由于其微型化和集成化的特点,MEMS 产品已经显示出强大的生命力。光纤与 MEMS 技术相结合的振动传感器成为振动传感领域的一支新秀。在这些微光机电传感器中,

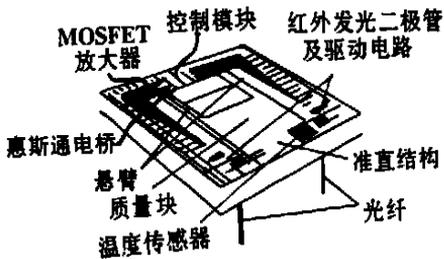


图5 带有光纤接口的集成芯片振动传感器

光纤有时是作为传光介质,为传感器提供光连接^[16],如图5所示。传感器内部的电信号经由发光二极管转变为光信号,再输出到外部设备,这样可以大大减小外界的电磁干扰(EMI)对测量结果的影响。光纤有时也用来构造光路,成为集成传感器的一部分^[17],如图6所示,悬臂梁感受外界振动,引起通过光纤的光强产生变化,测量此光强变化就可以实现振动传感。这样的全光集成传感器对外界电磁干扰具有更好的免疫能力,也适用于许多避免使用电信号的场合。随着微光机电技术的快速进步,这类传感器还会大量出现。

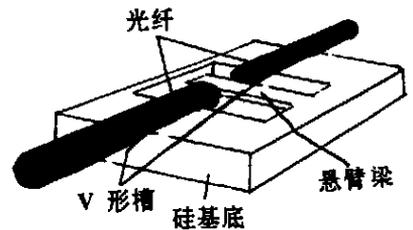


图6 芯片内的光纤振动传感器

4 结束语

还有许多其它种类的光电振动传感技术,如激光多普勒振动传感,双折射激光频率分裂振动传感^[18],激光腔外反馈振动传感^[19]等。它们各有特点,拓宽了光电振动传感技术的领域和应用范围。在此不作详述。

综上所述,可以看出,光电振动传感技术有如下发展趋势:(1)由于光纤和微光机电集成技术的发展,光电振动传感器越来越趋向小型化和灵巧化。在功能完善的前提下,传感器的体积和重量大为减小,同时对复杂结构和环境条件下的适应能力也有很大提高。出现了像灵巧结构、灵巧材料这样的将结构、材料和传感器集成到一起的新概念产品。(2)工业现场实用化。

光电传感器具有固有的非接触、灵敏度高等特点,适于工业现场使用;但是,传统的光电技术易受工业现场的空气环境和温度、湿度变化的影响,为了解决这些问题,近年来,人们创造了许多新技术以克服抗干扰性差的缺点,这使得光电振动传感器逐步在工业现场广泛应用。全息干涉和数字散斑干涉振动传感技术等全场振动传感方法为汽车、机械工业的设计和实验提供了新的手段。(3)灵敏度、分辨率以及精度进一步提高,测量振动的频率范围向高、低端扩展。以外差干涉术、F-P干涉术为代表的高精度振动测量技术不断向极限挑战,给未来高精度微小振动传感技术奠定了良好基础。同时也出现了一些超宽频带或超低频率的光电传感器。(4)信号处理过程实现了信息化和综合化。计算机和集成电子技术的采用使得振动量的测量和分析变为自动和实时处理,准确性和实用性大大提高。特别是随着计算机图像处理技术的进步,产生了一些新的测量方法,如数字散斑干涉术。计算机技术的发展也使得多传感器数据实时综合处理及分析变为可能,促进了灵巧结构、工业设备状态实时监测等新技术的发展。

预计新的光机电一体化、高灵敏度、高可靠性的振动传感器会不断诞生。同时,适于各种特定环境的和高精确度测量的光电振动测量方法还会不断涌现。光电子技术是下个世纪着力发展的前沿技术,随着它的不断进步,光电振动传感技术必将会有新的突破、新的发展,在整个振动传感领域内将占有愈来愈重要的地位。

参 考 文 献

- 1 Wang H. *Opt & Lasers in Engng*, 1997; 27: 191 ~ 200
- 2 Bogue R. *Noise & Vibration Worldwide*, 1994; 25(5): 13 ~ 16
- 3 Cockshott C P, Pacaud S J. *Sensors and Actuators*, 1989; 17: 167 ~ 171
- 4 Remo J L. *Opt Engng*, 1996; 35(10): 2798 ~ 2803
- 5 Dalhoff E, Gartner R, Hofbauer U *et al. J Modern Optics*, 1998; 45(4): 765 ~ 775
- 6 Usuda T, Dobosz M, Kurosawa T. *Meas Sci Tech*, 1998; 9(10): 1672 ~ 1677
- 7 Mio N, Tsubono K. *Appl Opt*, 1995; 34(1): 186 ~ 189
- 8 Mio N, Yuzawa T, Moriwaki S. *Appl Opt*, 1998; 37(1): 166 ~ 169
- 9 Ezbiri A, Tatam R P. *Meas Sci Tech*, 1996; 7: 117 ~ 120
- 10 Furstenu N, Schmidt M. *IEEE Trans Instrum & Measure*, 1998; 47(1): 143 ~ 147
- 11 Barbosa E A, Frejlich J, Prokofiev V V *et al. Opt Engng*, 1994; 33(8): 2659 ~ 2662
- 12 Hofmeister R, Yariv A. *A P L*, 1992; 61(20): 2395 ~ 2397
- 13 Chen F, Griffen C T, Allen T E, *Opt Engng*, 1998; 37(5): 1390 ~ 1397
- 14 Kalenik J, Pajak R. *Sensors and Actuators*, 1998; A68: 350 ~ 355
- 15 Leng J, Asundi A K, Du S *et al. Proc SPIE*, 1998; 3541: 110 ~ 115
- 16 Peiner E, Scholz D, Fricke K *et al. J Microelectromechanical Systems*, 1998; 7(1): 56 ~ 61
- 17 Peiner E, Scholz D, Schlachetzki A *et al. Sensors and Actuators*, 1998; A65: 23 ~ 29
- 18 Zhang Y, Deng Z, Zhang S *et al. Proc SPIE*, 1998; 3558: 118 ~ 124
- 19 Mignosi C, Griffiths R P, Bordovsky M *et al. Proc SPIE*, 1999; 3626: 14 ~ 22

*

*

*

作者简介:张毅,男,1974年1月出生。博士研究生。从事新型激光器、激光频率分裂技术和光电传感器等研究工作。

收稿日期:2000-06-16 收到修改稿日期:2000-12-01