

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.06.01

非接触式测振技术最新进展及应用

——2016 非接触式激光测振国际会议评述

茹宁^{1,2}, 张力¹

(1. 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 非接触式测振技术以其在振动测量方面优良的特性, 越来越受到广泛关注。本文介绍了 2016 年第十二届非接触式激光测振会议的主要内容。会议分为测量技术领域和应用领域两大类, 涉及的内容包括全场干涉测量、激光多普勒测振技术、叶尖定时测量及其传感器等。同时介绍了其他非接触式测振技术的最新应用。

关键词: 非接触式测振; 全场干涉测量; 激光多普勒测振; 叶尖定时; 激光

中图分类号: TB936

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)06-0001-03

The Latest Development and Application of Non Contact Measurement Technology

——Review of the 2016 International Conference of Non Contact Laser Vibration Measurement

RU Ning^{1,2}, ZHANG Li¹

(1. Changchen Institute of Metrology & Measurement, Beijing 10095, China;

2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Non contact measurement technology is paid more and more attention for its unique advantages in vibration measurement. This paper introduces the main content of the 12th International Conference on Vibration Measurements by Laser and Non contact Techniques. The conference is divided into two categories of measurement technology and application areas, and includes the interference measurement, laser Doppler vibration measurement technology, tip timing measurement and its sensors etc. And the latest application of other non-contact measurement technologies are introduced.

Key words: non contact vibration; the interference measurement; laser Doppler vibration; tip timing; laser

0 引言

由于激光测振技术的快速发展和广泛的工程应用, 第一届非接触式激光测振国际会议于 1994 年 10 月举办, 为该领域内的专家提供学术思想、先进技术创新平台的同时, 也确立了其在激光测振专业的国际性论坛地位。

本次第十二届非接触式激光测振国际会议(12th International Conference on Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques)于 2016 年 6 月 29 日至 7 月 1 日在意大利安科纳召开, 共有近 200 名来自世界各地的专家、学者参会, 会议论文集共收录了 42 篇文

章, 内容包括全场干涉测量、连续扫描激光测振技术、叶尖定时测量技术、光学传感器等。涉及到的应用领域有计量校准、模态分析、无损检测、质量和过程控制、生物医学应用、土木工程监测和诊断等。

北京长城计量测试技术研究所(CIMM)派出专家出席本次会议, 并针对相关领域的最新研究成果作了 3 个技术报告, 主要涉及激光干涉法动态扭矩校准、转动惯量校准以及基于原子干涉的重力加速度测量^[1-3]。

1 非接触式振动测量主要手段评述

随着现代工业的快速发展, 高精度非破坏性检测技术越来越重要。在许多极端环境下检测, 对检测技术提出更高要求。利用光的干涉现象来测量位移、速度等物理量的方法称为光学干涉计量, 光学干涉计量以其高精度、高灵敏度、非接触、非破坏、实时性等优点, 具有广阔的应用背景和发展前景, 在精密机械

收稿日期: 2016-10-25

作者简介: 茹宁(1980-), 女, 博士, 专业为精密仪器及测量, 研究方向为量子计量; 张力(1964-), 男, 研究员, 主要从事动态测量研究。

加工、军工以及航空航天领域中都具有很高的实用价值。光学干涉计量大体上可以分为两大类：一类是基于图像采集系统的全场干涉测量法；另一类是基于光探测器 (Photodetector) 的激光多普勒测振法 (Laser Doppler Vibrometry)。两类方法分别对应光的干涉在空间和时间的两种表现形式，具有高精度和非破坏的优点。

光学干涉计量方法以其独有的优势，已经广泛应用于各种工业和科学研究领域，在动态测量领域的研究也越来越深入，技术也越来越成熟。作为两大类光学干涉计量法——全场干涉计量法和激光多普勒测振法具有互补的优势和特点。

1.1 全场干涉测量法

全场干涉测量法范畴包含全息干涉测量法 (HI)^[4]、电子散斑干涉法 (ESPI)^[5-7]、剪切散斑干涉法等^[8]，可实现三维信息的记录和显示，广泛应用于干涉计量、无损检测、三维形貌测量等领域。

1.1.1 现阶段研究进展

和机械法、电学法等传统测振方法相比，激光全场测量法有诸多优点：不受电磁场干扰、测量精度高、非接触式方式适用性广。全场测量中三维图像处理方式越来越复杂，已从过去的图像采集比较处理发展到综合了电子光学、计算机技术的新光电子计量技术。近年来发展迅速的数字图像相关法对非接触式激光测振技术起到了一定的推动作用。该方法自上世纪 80 年代提出，经过 30 余年的发展，凭借其对环境条件要求低、测量设备简单、应用广泛等优势逐渐被接受和认可。数字图像相关法具有以下优点：

1) 对测量设备及环境要求较低

光路设计相比于其他测量方法简单，实验条件要求较低，无需特殊防振设备和暗室条件，对实验试件的预处理相对简单，便于实际应用。

2) 非接触式测量性好

对于一些较小的、难以安装传感器的试件，以及对于质量轻、不适合安装影响其自身振动特性的传感器的试件，非接触式测量具有较大的优势。

3) 全场测量效果

通过测量，既能得到被测物表面上某一点的形变和位移量，还可以获取被测物表面某一个区域的完整形变量和位移量。

近些年来，随着计算机性能、图像采集技术和信号处理技术的快速发展，数字图像相关法的优势也越来越明显，图像采集技术的提高加快了图像数据采集的速率和图像的分辨力，计算机性能的提高加快了搜索算

法的运算速度，信号处理技术的提高使其测量的精度也越来越高，从而加深对三维物体识别和姿态评估方面的研究。

Seppé Sels 提出一个新的扫描激光多普勒测振方法，用 3D 相机辅助全自动校准扫描激光多普勒测振测试仪对产品进行结构设计和测试 (如汽车、飞机部件)，即使用一个自动校准程序和三维时间飞行相机来测量对象的位置和方向，再和被测物的三维 CAD 模型进行比较。该方法采用了计算机辅助设计模型和振动测量的自动映射，这种映射可以用来直接对三维模型进行可视化测量，也可以用于直接比较测量和数值模拟结果^[9]。

1.1.2 全场干涉测量法的应用

由于电子散斑干涉法可用于对物体微小形变的位移及其内部应变与面内位移测量，从而很好地解决微小振动和瞬变问题。剪切散斑干涉技术作为一种光学传感技术，利用激光照射在构件上产生的散斑，对构件的表面破损、变形进行全面检测，可应用于许多不同材料的检测。现阶段复合材料越来越广泛应用到大范围可视性检测领域中。V. Pagliarulo 利用电子散斑干涉法和剪切散斑干涉法对碳纤维压层材料进行了低速冲击测试。将两种尺寸的样品分别施加 13 J 和 10 J 的冲击，对检测的数据分别用电子散斑干涉法和剪切散斑干涉技术对其内部、外部损伤进行分析，通过对比两个样品的损伤面积，得出两种检测技术具有很好的—致性^[10]。

1.1.3 全场干涉测量法的发展趋势

比较以上三种主要的全场测量技术，全息干涉法作为高效的非接触式无损检测技术，需要在相对安静、避震的环境下发挥功效；电子散斑干涉法对光学粗糙表面的信息记录与全息干涉法对光学粗糙表面的信息记录极为相似，而电子散斑干涉法在使用过程中却更为灵活。电子散斑干涉法现阶段主要用途是对物体应变和振动的检测，同时还可以用于对物体表面微小形变的离面位移以及其内部应变与面内位移的测量，可以很好地解决物体微小振动和瞬变问题。该技术更容易在工程现场应用和推广。剪切散斑干涉法是全息干涉法的一种简化和改良，物体表面的散斑光场以其随机性，易获取等特点使得在测量过程中对工作环境的要求并不高。利用数字剪切散斑方法不需要通过直接解调干涉条纹的方式来获取物体表面的相位信息，使得利用该方法在测量过程中不会丢失太多的光场信息，提高了测量精度。利用数字剪切散斑方法还可以用于

实时测量, 具有需求的设备简单、易操作等特性, 易于在测量过程中实现自动化或半自动化。

1.2 连续扫描激光多普勒测振法

激光多普勒测振法同样用于非接触式的全场振动测量。自 1983 年南安普敦大学光振研究所发明激光多普勒测振仪开始, 测量方式从单光束、交叉光束测量发展到了多光束测量。激光振动测量最早是利用差动式激光多普勒测速仪进行扭转振动测量, 逐渐发展到利用激光多普勒测振仪对物体进行径向振动测量, 平面内振动测量以及复合振动测量。激光多普勒测振法分为单点测量和多点测量, 同全场干涉计量法相比, 单点测量的激光多普勒测振方法的时间分辨力高, 但空间分辨力却很低, 使其在一些应用领域如振型测量方面受到限制, 多点同步激光多普勒测振方法采用连续扫描, 通过在待测物体上快速移动测量点实现多点测量功能, 从而实现对全场离面位移的测量, 其特点是空间分辨力高、测量精度高、测试自由度完备、测点密集等。此次会议中介绍的点同步测振技术, 将原来的 8 点同步测量扩展到最多 64 点同步测量, 进一步提高了大面积同步测量能力。

A. Dräbenstedt 介绍了 Polytec 新研发的激光多普勒测振仪。这种测振仪具有较高的灵敏度和分辨力, 波长从 633 nm 提高到 1550 nm 的红外波段, 从而提高了光源功率和测量距离, 可实现超过 100 m 的高分辨力振动测量距离, 此测振仪目前用于地震波的非接触式检测^[11]。

2 非接触式测振技术在其他领域的应用

2.1 叶尖定时测量法(BTT)

叶尖定时的核心原理是将多个定时传感器沿圆周方向安置在叶轮外壳上, 采集叶片经过传感器时产生的脉冲信号。正常状态下, 叶尖到达传感器的时间可根据旋转叶片分布角度和转速计算得出, 而振动状态下, 叶尖到达则会引起相对时间差。通过处理时间差序列, 可得到叶片实时的振动位移, 进而获取振幅、频率及振动阶次等信息。叶尖定时的本质是间断测量叶片末端的相对位移, 获取并分析叶片振动过程的相关参数。

D. H. Diamond 介绍了一种通过数码相机拍照方法来监测叶片的振动, 将采集到的信号描述为一组二维图像, 应用现有的图像处理技术可以获取叶片的振动信息。在一维图像中, 叶尖挠度可以通过位相信息计算得出。这种方法比传统的叶尖定时测量法精度更高, 同时数据采集系统的采样率下降^[12]。

P. Procházka 介绍了应用于叶尖定时测量的传感器, 并将电涡流传感器、霍尔效应传感器、磁感应传感器和磁阻传感器的参数、精度等主要性能进行了比较, 通过对各传感器在实际涡轮机操作环境和物理条件下的测试, 得出磁阻非接触式传感器性能最优^[13]。四种传感器性能比较如表 1 所示。

表 1 传感器性能比较

传感器类别	灵敏度	频响范围/KHz	最高温度/℃	优点	缺点
电涡流传感器	高	0~10	125	电磁干扰小; 可测量非铁磁材料叶片	不适合恶劣环境和长期测量
霍尔效应传感器	低	0~30	150	可实现叶片位移的三维测量	相对偏移高; 噪声高
磁感应传感器	较高	0~30	535	结构简单; 被动式不需要电流	不适用静态测量; 不适合旋转条件下的复杂动力学标定, 适用于无罩的自由叶片
磁阻传感器	高	0~300	200	线性度好; 噪声低; 可用于静态校准	

2.2 生物医学领域

激光测振技术已广泛地应用于生物学和医学研究, 主要应用于对生物体、器官、组织甚至细胞、神经等不同层面的结构和功能信息的获取, 对于辅助诊断、辅助医疗以至于揭示生命现象的本质等都具有重要意义。如 Simone Pasinetti 提出快速可靠的在宏观范围内的聚焦成像光学系统, 将 CCD 相机内嵌入一个液体透镜, 用电压控制焦距, 该装置可用于处理指纹等生物医学影像检测。

2.3 质量和过程控制

A. Liuti 介绍了在汽车行业中, 装配过程需要微米量级的几何精度, 但一般的开环控制器不能满足这个条件。他们提出一种干扰拟合实验过程, 压装过程中将压电致动器装入套筒, 通过一个光纤差动激光多普勒测振仪测量插头相对于套筒差动位移和速度, 并得出装配不同类型插头和套筒运动特征之间的关系。

(下转第 61 页)

0.01 mm 范围内波动, 测量结果较改善之前稳定, 重复性好。②测量时间: 改善前, 该零件尺寸的测量时间为 31 min 左右; 改善后, 该零件尺寸的测量时间为 11 min 左右, 较改善前缩短了约 20 min, 有效的提高了检测效率。

5 结论

以上分析可以看出: 该尺寸检测结论波动量得到了显著的控制, 检测时间明显缩短, 检测效率得到显著的提升。通过实验与理论计算, 对异型薄壁孔构造圆柱的测量方法具有测量重复性好、准确度高、测量数据稳定的优点, 是一种解决此类尺寸检测难题的有效方法。这种方法操作过程简单、便于掌握、具有良好的推广价值。

(上接第 3 页)

2.4 模态分析及建筑材料鉴定

N. Hasheminejad 提出了评价沥青混凝土力学性能的建模方法, 首先用扫描激光多普勒测振仪(SLDV)对沥青板进行扫描, 实现对铸坯表面网格的速度测量。SLDV 具有精确测量物体的振动模式的能力, 且测试时间短, 可实现非接触测量。

3 结论

本文对第十二届非接触式激光测振国际会议主要内容进行了评述, 重点介绍了全场干涉测量法和激光多普勒测量法, 并对其他非接触式测量方法如叶尖定时法等的最新应用进行了阐述。由于其非侵入性、空间分辨力高、测量时间短等优点, 非接触式测振技术是设备工作时的在线监控以及生产过程中工件在线高精度检测的理想测试方法, 应用前景十分广阔。应紧密联系各行业应用需要, 促进先进激光测振技术的快速发展, 为振动检测的发展发挥更大的作用。

参 考 文 献

- [1] Zhang Li, Wang Zhongyu, Yin Xiao. Mobile Seismic Exploration [C]. AIP Conference Proceedings 1740, 2016. doi: 10.1063/1.4952691.
- [2] Peng Jun, Zhang Li. An improved method in the measurement of the moment of inertia [C]. AIP Conference Proceedings 1740, 2016. doi: 10.1063/1.4952689.
- [3] Ru N, Zhang L, Wang Y, et al. Key technologies and applications of laser cooling and trapping 87Rb atomic system [C]. AIP

参 考 文 献

- [1] 袁茂兴. 基于 PC-DMIS 的三坐标测量机在发动机质检中的应用研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013.
 - [2] 马树元. 三坐标测量机测量与以往测量方法的比较 [J]. 计量技术, 1994(12): 11-13.
 - [3] 海克斯康测量技术(青岛)有限公司. 实用坐标测量技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
 - [4] 刘祚时, 倪潇娟. 三坐标测量机(CMM)的现状和发展趋势 [J]. 机械制造, 2004, 42(8): 32-34.
 - [5] 海克斯康测量技术(青岛)有限公司. PC-DMIS 培训手册 [Z].
 - [6] 刘利剑, 王春华, 贾立红. 三坐标测量机使用中的典型问题及其解决方案 [J]. 河北工业科技, 2006, 23(6): 350-352.
- Conference Proceedings 1740, 2016. doi: 10.1063/1.4952692.
 - [4] Liu Wenwen, Kang Xin, Dai Yiquan. Method for eliminating zero-order image in digital holography [J]. Journal of Southeast University, 2009, 25(1): 113-116.
 - [5] 赵瑞冬, 孙平. 利用电子散斑相移技术测量物体三维面形的方法 [J]. 光子学报, 2010, 39(11): 2045-2048.
 - [6] 陈玲玲, 杨吟飞, 何宁. 基于电子散斑干涉术的残余应力测量 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29(01): 108-110.
 - [7] 米红林. 基于激光的散斑干涉术及其测量中的应用 [J]. 激光杂志, 2013, 34(5): 23-24.
 - [8] 张力, 薛景峰. 激光测振技术的最新进展 [J]. 航空计测技术, 2004(5): 1-4.
 - [9] Sels S, Ribbens B, Mertens L, et al. 3D camera assisted fully automated calibration of scanning laser Doppler vibrometers [C]. AIP Conference Proceedings 1740, 2016. doi: 10.1063/1.4952688.
 - [10] Pagliarulo V, Lopresto V, Langella A, et al. Non-destructive evaluation of impact damage on carbon fiber laminates: Comparison between ESPI and Shearography [C]. AIP Conference Proceedings 1740, 2016. doi: 10.1063/1.4952661.
 - [11] Dräbenstedt A, Cao X, Polom U, et al. Mobile Seismic Exploration [C]. AIP Conference Proceedings 1740, 2016. doi: 10.1063/1.4952659.
 - [12] Dawie Diamond, Stephan Heyns, Abrie Oberholster. Using image processing techniques on proximity probe signals in rotordynamics [C]. AIP Conference Proceedings 1740, 2016. doi: 10.1063/1.4952655.
 - [13] Pavel Procházka. Sensors for noncontact vibration diagnostics in rotating machinery [C]. AIP Conference Proceedings 1740, 2016. doi: 10.1063/1.4952656.