

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.06.02

三维激光多普勒振动测量方法研究综述

张懿文, 张大治, 段小艳

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 激光多普勒频移对面内振动测量不敏感的特性使三维激光多普勒测振成为了一道难题。为解决此难题, 各研究机构开展了相关研究并提出了多个解决方案。本文介绍了四种基于不同原理的三维激光多普勒振动测量方法——基于多个光学头的三维振动测量方法、基于一台 LSV 测振的三维振动测量方法、结合频闪方法的三维振动测量方法、基于单光学头的三维振动测量方法, 总结每种方法的优缺点及实际应用效果, 并针对测量目标坐标系设置和测量精度两方面进行了展望, 未来三维激光多普勒测振技术会向未知待测目标坐标系和高精度等方向发展。

关键词: 多普勒频移; 面内振动; 三维测振; 光学串扰; MEMS

中图分类号: TB936

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)06-0009-06

Overview of the Research on Three-dimensional Laser Doppler Vibration Measurement Methods

ZHANG Yiwen, ZHANG Dazhi, DUAN Xiaoyan

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Laser Doppler frequency shift is not sensitive to internal vibration, which makes 3 D laser Doppler vibration measurement a difficult problem. To solve this problem, various research institutions have carried out relevant research and put forward several solutions. In this paper, four methods of 3 D laser Doppler vibration measurement based on different principles are introduced, including three-dimensional vibration measurement method based on multiple optical heads, three-dimensional vibration measurement method based on one LSV, three-dimensional vibration measurement method combined with stroboscopic method, and three-dimensional vibration measurement method based on single optical head. The advantages and disadvantages of each method and its practical application effect are summarized and prospected. The future development direction of 3 D laser Doppler vibration measurement technology.

Key words: doppler frequency shift; in-plane vibration; three-dimensional vibration measurement; optical coupling; MEMS

0 引言

振动是外力作用在弹性体后产生周期运动的一种自然现象, 例如: 空调在工作时外机的振动直接影响噪音的大小, 车辆行驶时的振动直接影响驾驶性能与乘坐的舒适度, 旋转机械的振动直接反映设备运转状态, 机械加工设备的振动直接影响加工的精度与有效性, 等等^[1-5], 振动的研究与测试在工程应用和科学测量中占有非常重要的地位^[6], 为了更好地控制振动的不良影响, 准确地测量出振动的相关数据具有重要意义。

测振方法主要分为接触式测量和非接触式测量两类, 其中, 非接触式测量不会影响振动的原有状态, 目前被更为广泛地应用于振动测量中^[7]。激光多普勒测振是非接触式测量的主要应用方法之一。激光多普勒测振具有精度高、动态响应快、测量范围大、不影

响被测物体的振动等优点, 但激光多普勒频移对面内振动测量不敏感, 是三维激光多普勒测振的一道难题。在 1998 年 Mitchell^[8]提出将激光多普勒原理应用于三维测振的设想之前, 所有运动学变量的测量都使用一维测振方案。当时的换能器质量较差, 激光测振仪需要牺牲空间分辨率来提高应变估计的质量。随着技术的发展, Schuessler 于 2007 年证明了 3D 激光测振法可用于估计应变。当时使用的多普勒三维测振方案是基于多个光学头的三维振动测量方法, 随着科技的进步, 目前主流的三维激光多普勒测振技术有基于多个光学头的三维振动测量方法、基于一台 LSV 测振的三维振动测量方法、结合频闪方法的三维振动测量方法、基于单光学头的三维振动测量方法四种方法。本文将总结每种方法的特点及应用效果, 并对三维激光多普勒振动测量技术的未来发展进行展望。

1 多普勒测振原理

三维激光多普勒测振的基础原理是通过测量多普勒频移的值从而得到实时速度。当运动物体和激光器发出的光之间发生相对运动时,激光器发出的光和最后接收的光之间会存在频移,此频移被称为多普勒频移^[9]。多普勒测振原理如图 1 所示,激光器的出射光经过分光棱镜分为测量光和参考光,参考光打在固定的反射镜上并反射回分光棱镜,测量光打在振动的被测物上并同样反射回分光棱镜,最终两束光在分光棱镜处重新合束。携带有多普勒频移信息的光被光电探测器接收,最终经信号处理系统计算得到物体的振动信息。

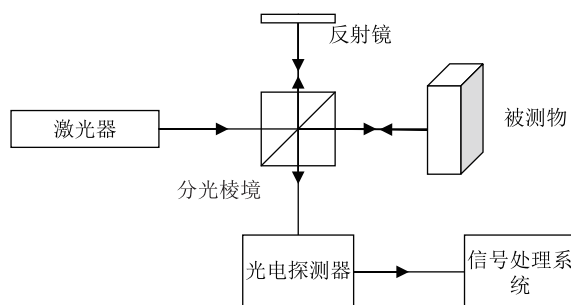


图 1 多普勒测振原理

多普勒频移是由光程长度变化产生的,当物体振动方向与观测方向在同一直线上时,在折射率恒定的介质中,多普勒频移为

$$f_D = 2knv(t) \quad (1)$$

式中: k 为波数; n 为介质折射率; $v(t)$ 为振动实时速度。

考虑到多普勒频移对面内振动(振动方向与待测表面平行的振动,如图 2 所示)不敏感,需要增加与探测面法线不同的接收方向,故引入多普勒频移的矢量式

$$f_D = \frac{1}{2\pi} [\vec{v} \cdot (\vec{k}_{\text{det}} - \vec{k}_{\text{in}})] \quad (2)$$

式中: $\vec{v}$ 为振动实时速度; $\vec{k}_{\text{det}}$ 为探测方向的方向矢量; $\vec{k}_{\text{in}}$ 为入射方向的方向矢量。由式(2)可知,多普勒频移与振动实时速度和探测方向与入射方向的矢量差的点积成正比。故只需要得知多普勒频移即可计算出振动实时速度,并由此得到其他振动数据。

2 针对较大待测物的三维激光多普勒振动测量方法

目前,针对待测物不是微机电结构的情况,一般采用基于多个光学头或者基于一台激光扫描测振仪(Laser Scanning Vibrometer, LSV)的方案进行三维

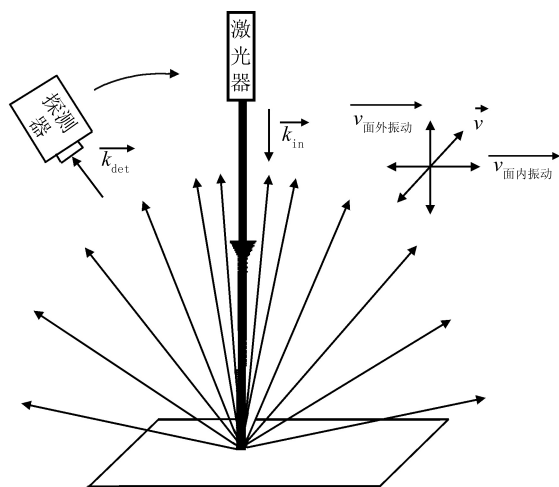


图 2 接收方向和激光出射方向不一致的多普勒测振

测振。

2.1 基于多个光学头的三维测振方法

基于多个光学头的三维测振方法目前已得到广泛使用。东京大学通过将三个激光多普勒测振仪(Laser Doppler velocimeter, LDV)的实测振动乘以由激光束角度的方向余弦组成的变换矩阵,确定了车身的矩形三维振动分量。该方案设置了三个单点型 LDV,其中 LDV1 和 LDV2 被约束在水平方向上移动,而 LDV3 被约束在垂直方向上移动。因此只需设定一个激光束的角度即可完整地描述每个激光器的方向。

论文[10]中分别使用加速度计和东京大学研发的装置进行测试,并对比二者的振动数据。测试距离为 3.3 m,采样频率为 1000 Hz,对测试信号进行数值积分和信号处理后,得到的面内面外分量与来自 LDV 的速度一致性很高;论文[10]将垂直面内分量的差异归因于 LDV 的 3 束激光束角度的不准确及垂直方向振动本身引入的测量误差。

舜宇公司对东京大学提出的三维测振方案进行了一些改进。该公司的三维测振系统基于五个激光测振单元,每个测振单元的原理如图 3 所示。

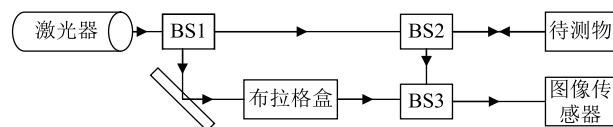


图 3 舜宇公司三维测振单元原理图

He-Ne 激光器发出偏振光,经过聚焦系统,聚焦于被测对象上一点,散射光束返回到激光测振模块形成干涉,激光测振模块内部设置的探测器探测干涉信号,解调出被测对象回光光束方向的投影分量,利用

空间矢量算法计算得出振动物体的三维振动信息。舜宇公司实现了对激光光束的自动检测和校准^[11]，并补偿了机械安装带来的误差。该方法的测量准确度比三个单点测振仪测量三维振动的测量准确度更高^[12-13]，且该方法可将几个单独的激光测振单元结合起来共同测量，可预防其中的激光测振单元发生损坏，这种使用方式仅需进行软件算法切换或改变硬件采集通道即可。三维振动测量系统框架图如图4所示。

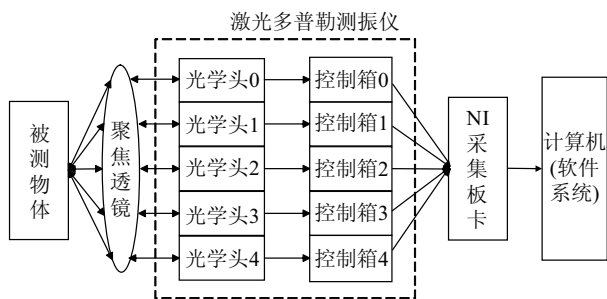


图4 三维振动测量系统框架图

然而，采用多个光学头进行三维测振仍存在一些問題。测量光点理想位置图如图5所示，其中上方两个大光点的直径均为 $5.5\ \mu\text{m}$ ，下方小光点的直径为 $2.5\ \mu\text{m}$ 。为了避免通道间的串扰，测量光点不能重叠。但是由于各光学头是独立的，且包含频率不稳定的激光单元，在光学头的探测带宽内，有可能存在两个或三个激光器发射波长相等的情况，如果光学头之间存在光耦合（测量点有交集或重合），速度解码器将无法区分耦合光和由于物体振动而产生的含有频移信息的光，导致三个测量点无法重合，使系统的空间分辨率降低到 $30 \sim 35\ \mu\text{m}$ ^[14]。为了避免将耦合光代入计算，影响对振动信息的测量，解调带宽需要调低，同时有限的解调带宽限制了最大可测振动频率的数值。另外，振动幅值也会影响测量角度变化，引入测量误差。

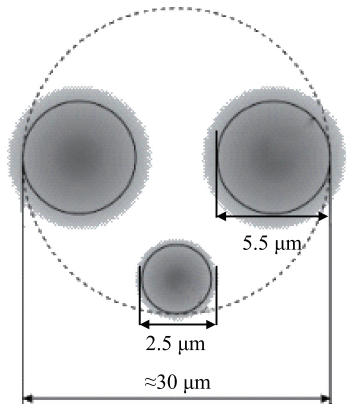


图5 测量光点理想位置图

2.2 基于一台 LSV 测振的三维测振方法

多个光学头的测振方案机械结构体积较大，为了节约空间以及降低机械结构的复杂度，基于一台 LSV 测振的三维测振方案应运而生，其原理如图6所示。

基于电机旋转激光束的激光扫描仪 (LSV) 可以方便地测量多点运动。对于任意表面上的三维振动测量，可以使用指向相同测量点的单个 LSV 测量三个不同位置的表面振动。由于基于频域的振动分析与基于时域测量的振动信号无关^[15]，因此该方法与使用三组 LSV 具有相同的效果。在实验模态分析中，当施加随机信号或正弦扫描信号作为激励信号时，通常假定振动条件是稳定的，而不考虑时间变化。

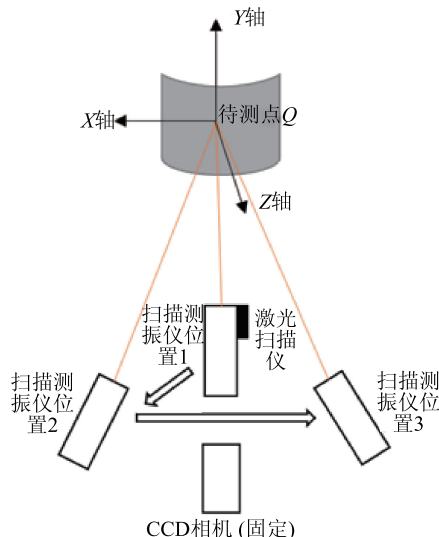


图6 基于一台 LSV 测振的三维测振方案

图6中，附着在扫描激光测振仪上的激光扫描仪用于确定激光测振仪的三维坐标，同时，通过不同位置测量点之间的相对几何信息获得坐标。该方法可以省去常规三维振动测量中使用机械框架或机械臂确定相对几何关系的步骤，与使用三套 LSV 具有相同的应用效果，并具有降低设备成本的优点。但该方法失去了实时性，用机械移动变换位置的时间换取了测量结构的简化。

3 针对 MEMS 微结构的三维激光多普勒振动测量方法

微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical Systems, 简称 MEMS)，通常指尺寸在几毫米甚至更小的高科技装置。在这样的微小结构上，多个光学头的测量方案测点过大；而一台 LSV 的测振方案又无法布置很多测点进行坐标计算。因此，产生了一些新的三维振动测量

方案。

3.1 结合频闪方法的三维振动测量方法

Polytec 开发了一种新的激光扫描、共聚焦激光多普勒振动计显微镜^[16]，如图 7 所示，它可以对亚微米级的结构进行振动研究，并集成到新的 MSA-400 系统中。该系统还可以利用白光干涉技术测量地形。图 7 中的摄像头可以可视化对象并实现云服务器的精确光束对准。样品用 LED 照明，该 LED 由透镜系统 5 成像到显微镜物镜的出射光瞳中。照明光路采用科勒照明方式，显微镜物镜和接近相机的透镜 1 将样品成像在相机芯片上。光纤前的透镜 4 用于准直外差激光多普勒干涉仪的 He-Ne 激光束（波长为 632.8 nm），之后激光束将打到 4 μm 的单模光纤上，该光纤是激光多普勒干涉仪共焦装置的空间模式滤波器，因此也是共焦显微镜装置的针孔。透镜 3 和 4 将针孔成像为中间像，中间像由透镜 2 和显微镜物镜成像在样品上。扫描镜系统由透镜 2 和 3 成像到显微镜物镜的出瞳。因此，光束平行于显微镜物镜的光轴入射样品。由于激光束以准直光束的形式入射显微镜物镜，激光束的焦点和相机传感器处的图像焦点可以通过显微镜物镜的 z 向偏移精确地移动相同的距离，对于小位移（几毫米或更小），入射角度没有明显变化，因此只需在 z 方向上移动显微镜物镜即可对系统进行聚焦。用于显微镜物镜 z 定位的压电工作台的最大偏转量为 250 μm ，因此，该系统可以测量约 250 μm 的高度差^[17]。

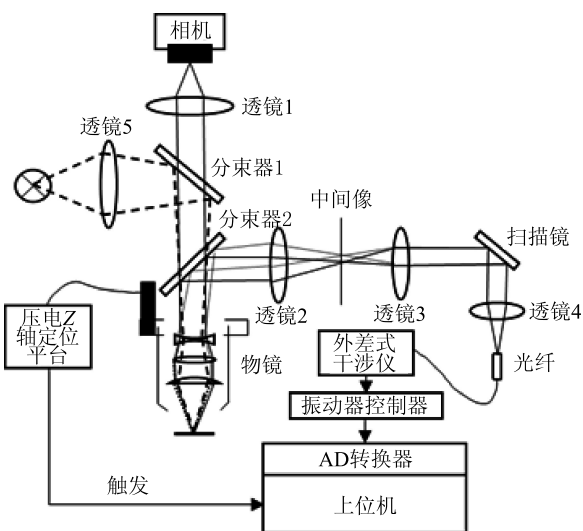


图 7 结合频闪方法的三维振动测量

实际测量时，频闪 LED 以一定频率亮起，通过棱镜、分光镜、透镜镜组照射到待测物表面；待测物表

面的散射光再通过透镜镜组、分光镜传输到相机镜头中，从而记录下不同时间的面内振动形态。使用这种方法测量面内振动的精度远低于测量面外振动的精度。该型号测振仪测量面外振动频率可达 2.5 GHz，位移分辨力达亚皮米级；测量面内振动频率可达 2.5 MHz，位移分辨力达纳米级。通过扫描白光干涉法测量表面形貌可提供亚纳米级的垂直分辨力和亚微米级的水平分辨力。

虽然频闪显微镜^[18-20]及频闪干涉成像技术^[21-23]现已成功应用于 MEMS 以研究平面内振动，但该方法也存在一定的缺陷。频闪成像方法振幅分辨力较低（大约 10 ~ 100 nm），测量过程耗时较长，且仅适用于周期性的对象运动。

3.2 基于单光学头的三维振动测量方法

Polytec 的仪器 MSA-100-3D 采用马赫·曾德尔干涉仪原理，即从单独光源分出两束光，经过不同路径观测它产生的相对相移变化，如图 8 所示。

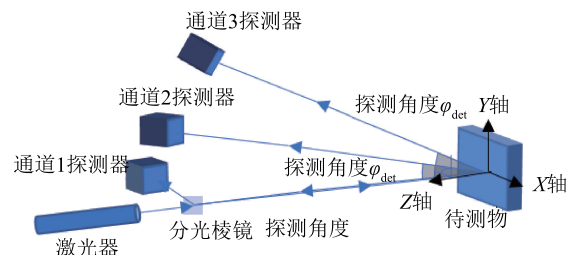


图 8 MSA-100-3D 三维测振原理图

MSA-100-3D 使用一台激光器和多个探测器进行接收，其探测角度 φ_{det} 为 38.7°，该探测角度的选择综合考虑了测量点尺寸、足够的离面位移测量范围、足够的振动信号分辨力等因素。为了在实现低像差、大工作距离的同时实现高数值孔径，该设计使用了特殊的远程显微镜物镜，其优点是：测量光斑的大小仅由样品上高斯光束腰的直径定义，而该直径是由通道 1 的准直光束直径和显微镜物镜的焦距决定的。对于离轴干涉仪通道 2 和 3，只有当采集的散射光与光电探测器上的高斯参考光束有效干涉时才能获得外差信号强度。因此，检测干涉仪通道的光束传播路径由通道 2 和 3 的检测器处的高斯参考光束定义，通道 2 和 3 的检测器由样品上的接收光学器件虚拟成像。入射光束路径和探测光束路径之间的重叠度越高，离轴通道的灵敏度就越好。仅就横向分辨力而言，干涉仪通道 2 和 3 的高斯光束在测量点的腰径可以大于测量点大小，因为作为被动检测器，它们不影响物体上的空间分辨力。通道 2 和 3 的较大腰

径改善了对准公差和测量深度，但牺牲了一定的灵敏度，因为接收的数值孔径较小，导致收集的散射光光强较小。最终综合考虑评估选择的透镜组为：通道一采用 10 × 物镜(焦距为 20 mm)，数值孔径为 0.2；通道 2 和 3 采用 3.6 × 物镜，数值孔径为 0.1^[24]。在该布置下所得到的工作距离为 31 mm。最终得到的光斑直径小于 3.5 μm，是多个光学头的三维振动测量技术测量光斑直径的 1/10。该仪器可达到 25 MHz 的高带宽、亚皮米级别的位移分辨率(无论面内、面外振动)，且单点和全场扫描测量兼备。MSA-100-3D 可对测量点直径小于 35 μm、振动

频率带宽 350 kHz、最大速度为 100 mm/s 的三维振动进行测量。

单光学头三维振动测量方法存在的局限是只能测量表面粗糙度大于激光波长的目标。对于 MSA -100-3D 而言，它必须将测量光斑投射在具有反射面或任何光散射特征的器件的边缘、拐角、蚀孔上，以满足粗糙度要求。

4 现有三维激光测振方法及比较

总结对比上述三维激光测振方法的特点，如表 1 所示。

表 1 现有三维激光测振方法对比

三维振动测量方法	面内振动 测量精度	振幅对测量 角度的影响	是否降低 空间分辨 力以避免 光学串扰	所需解 调带宽	系统 复杂度	可测最大 振动频率	是否可实现 在线测量
基于多个光学头的	较低	有一定影响	是	需要降 低带宽	高	不仅受载波频率影响， 还与带宽有关	是
基于一台 LSV 测振的	较低	有一定影响	否	无需降 低带宽	较低	只受载波频率影响	否
结合频闪方法的	远低于面外 振动测量精度	频闪测量无 测量角度设置	否	无需降 低带宽	高	受频闪频率影响	否
基于单光学头的	较高	影响可忽略	否	无需降 低带宽	较低	仅受载波频率影响	是

三维多普勒激光测振方法随着应用需求的变化而不断发展。最初的基于多个光学头的三维振动测量方法系统复杂度高、需要降低空间分辨力以避免光学串扰，而考虑到光学串扰所带来的一系列问题，解调带宽也需降低，可测最大振动频率也受到了影响。为了简化光路结构，基于一台 LSV 测振的三维振动测量方法被提出，该方法并未提高面内振动的测量精度且牺牲了测量的实时性，但解决了需要降低空间分辨力以避免光学串扰的问题，同时还极大地降低了整体结构的复杂度。由于以上两种方案都存在斜入射目标表面的情况，振动时振幅会对实际测量角度存在一定影响。

结合频闪方法的三维振动测量方法和基于单光学头的三维振动测量方法是针对 MEMS 的三维测振方案，它们具有测点小、不需要额外增加测点来确定坐标等优点。结合频闪方法的三维振动测量方法的面内振动测量精度较低，最大可测振动频率受到频闪频率的影响，且无法实现实时测量。基于单光学头的三维振动测量方法则具有可实时测量、面内振动测量精度高、

可测最大振动频率仅受载波频率影响等优点，但该方法对待测目标有一定要求，测量目标须是粗糙度大于激光波长的对象，如具有反射面或任何光散射特征的器件的边缘、拐角、蚀孔。

5 总结与展望

三维多普勒激光测振系统的技术难点在于面内振动的测量。本文从激光多普勒测振原理出发，分别详细介绍了针对较大待测物的基于多个光学头的三维振动测量方法、基于一台 LSV 测振的三维振动测量方法，以及针对 MEMS 微结构的结合频闪方法的三维振动测量方法、基于单光学头的三维振动测量方法，对以上 4 种三维振动测量方法的原理、相关产品、应用效果进行了介绍，并对比分析了每种方法的优缺点。

目前，三维振动测量技术的应用领域已经越来越广泛，未来该技术或将在以下两个方面进一步发展完善：

1) 现有的三维测振大多并未建立在待测物坐标系

完全未知的情况下, 多个光学头测振需要其中一个光学头的出射方向为振动目标的 z 轴方向, 单光学头测振需要出射光方向与振动目标的 z 轴方向重合, 但实际摆放会带来一定的角度误差影响测量。可应用于待测物坐标系完全未知条件下的三维振动测量方法有待研究。

2) 振动测量精度仍需提高。虽然目前商用振动计足以满足大多数振动测量的需要, 但 RF-MEMS 以及移动电话 SAW 滤波器等器件需要振动测量频率达到千兆赫兹范围, 振幅达到皮米级别。为了满足这些要求, 仍需对三维振动测量领域进行更深一步的探索。

参 考 文 献

- [1] 纪国宜, 赵淳生. 振动测试和分析技术综述[J]. 机械制造与自动化, 2010, 40(3): 1-5.
- [2] 段小艳, 张大治. 一种基于光子多普勒原理的高温振动测量方法探究[J]. 计测技术, 2019, 39(3): 46-50.
- [3] 江东. 基于磁悬浮效应的振动测试系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011.
- [4] 付强, 戴晓彬, 魏元. 基于加速度计阵列的六自由度振动台测试方法研究[J]. 计测技术, 2019, 39(1): 28-33.
- [5] 孙浩琳, 吴娅辉, 朱振宇. 某航空发动机整体叶盘耦合振动特性分析[J]. 计测技术, 2015, 35(5): 28-30, 51.
- [6] 赵锦春. 激光测振在振动计量中的发展概况及作用[J]. 计量与测试技术, 2011, 38(06): 11-13.
- [7] 张深逢, 刘杰坤, 马修水, 等. 一种新型便携式二维激光测振仪研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(19): 201-205.
- [8] Scanning laser vibrometer for non-contact three-dimensional displacement and strain measurements[J].
- [9] 刘杰坤, 马修水, 马颢. 激光多普勒测振仪研究综述[J]. 激光杂志, 2014, 35(12): 1-5.
- [10] Takeshi, Miyashita, Yozo, et al. Development of three-dimensional measurement system using laser doppler vibrometers[J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu A, 2007.
- [11] 张深逢, 李路可, 陈士钊, 等. 多普勒三维激光运动姿态测量技术[J]. 光电工程, 2016, 43(11): 33-37.
- [12] 全燕鸣, 黎淑梅, 麦青群. 基于双目视觉的工件尺寸在机三维测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 1054-1061.
- [13] 王向军, 叶岗, 冯克猷, 等. 利用激光实时检测大量规则图形尺寸的平均值[J]. 激光杂志, 1986, 7(4): 199-204.
- [14] Kowarsch R, Ochs W, Giesen M, et al. Real-time 3D vibration measurements in microstructures[C]. 2012.
- [15] Kim D, Song H, Khalil H, et al. 3-D Vibration Measurement Using a Single Laser Scanning Vibrometer by Moving to Three Different Locations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(8): 2028-2033.
- [16] Rembe C, Drabenstedt A. The laser-scanning confocal vibrometer microscope[Z]. 698-709.
- [17] Measuring 3-D Geometries of Microstructures with the Laser-Scanning Confocal Vibrometer Microscope[J].
- [18] Rembe C, Tibken B, Hofer E P. Analysis of the dynamics in microactuators using high-speed cine photomicrography[J]. Journal of microelectromechanical systems, 2001, 10(1): 137-145.
- [19] Davis C Q, Freeman D M. Using a light microscope to measure motions with nanometer accuracy[J]. Optical Engineering, 1998, 37(4): 1299-1304.
- [20] Rembe C, Muller R S. Measurement system for full three-dimensional motion characterization of MEMS[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11(5): 479-488.
- [21] Novak E, Wan D, Unruh P, et al. MEMS metrology using a strobed interferometric system[Z].
- [22] Petitgrand S, Bosseboeuf A. Simultaneous mapping of out-of-plane and in-plane vibrations of MEMS with (sub) nanometer resolution[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004, 14(9): S97.
- [23] Emery Y, Aspert N, Marquet F. Dynamical topography measurements of MEMS up to 25 MHz, through transparent window, and in liquid by digital holographic microscope (DHM)[Z]. 71-77.
- [24] Rembe C, Kowarsch R, Ochs W, et al. Optical three-dimensional vibrometer microscope with picometer-resolution in x, y, and z[J]. Optical Engineering, 2014, 53(3): 34108.

收稿日期: 2020-11-04; 修回日期: 2020-11-24

基金项目: 科技部重大科学仪器专项(2014YQ350461)

作者简介



张懿文(1996-), 女, 山东鱼台人, 硕士研究生, 主要研究方向为三维激光多普勒测振技术。2018年毕业于天津大学测控技术与仪器专业, 获得学士学位, 2018年至今就读于北京长城计量测试技术研究所仪器科学与技术专业。