

# 激光与光电子学进展

## 激光多普勒测振技术应用的新进展

张驰<sup>1</sup>, 王顺<sup>1</sup>, 关向雨<sup>2</sup>, 金锐博<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>武汉工程大学光电信息与能源工程学院光学信息与模式识别湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205;

<sup>2</sup>福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108

**摘要** 近年来,伴随着现代工业的高速发展,非接触式测量技术受到越来越多的关注。激光多普勒振动测量作为一种干涉测量技术,能够适用于难以通过加速度计或其他表面接触传感器获得振动测量的应用场景。激光多普勒测振仪(LDV)自1983年诞生以来,凭借其高精度、高效率、便于携带等特点,逐渐成为目前应用最广泛的非接触式振动测量设备,被广泛应用于各行各业。本文在分析激光多普勒测振技术基本原理的基础上,介绍了近年来LDV在农业、生命医学、航空航天,以及建筑工程领域的应用。

**关键词** 仪器,测量与计量;激光多普勒测振仪;激光多普勒频移;多普勒效应;非接触式测量

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1900006

### New Progress in Application of Laser Doppler Vibration Measurement Technology

Zhang Chi<sup>1</sup>, Wang Shun<sup>1</sup>, Guan Xiangyu<sup>2</sup>, Jin Ruibo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Hubei Key Laboratory of Optical Information and Pattern Recognition, School of Optical Information and Energy Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China;

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China

**Abstract** In recent years, with the rapid development of modern industry, the non-contact measurement technology has attracted more and more attention. As an interferometric measurement technique, the laser Doppler vibration measurement can be applied to application scenarios where it is difficult to obtain vibration measurements through accelerometers or other surface contact sensors. Since the birth of the laser Doppler vibrometer (LDV) in 1983, it has gradually become the most widely used non-contact vibration measuring equipment in various fields due to its advantages of high precision, high efficiency, and portability. Based on the analysis of the basic principles of LDV, this paper discusses the applications of LDV in agriculture, life medicine, aerospace, and construction engineering in recent years.

**Key words** instruments, measurement, and metrology; laser Doppler vibrometer; laser Doppler frequency shift; Doppler effect; non-contact measurement

## 1 引 言

1842年,奥地利物理学家多普勒(Doppler)提出了由于波源或观察者的运动而出现观测频率与波源频率不同的现象,后人以其名字命名,将这一现象称为多普勒效应<sup>[1]</sup>。在1960年激光被发明后不久,人们就开始探索激光多普勒技术。Yeh等<sup>[2]</sup>在1964年研究流场时,引入了激光多普勒技术,设计了激光多普勒流速计,通过散射激光的频移来测量微观单分散聚苯乙烯球的运动速度。Massey<sup>[3]</sup>于1968年提出了一种具有

扫描能力的外差式激光多普勒系统,用于测量和分析振动表面。20世纪80年代,随着光纤振动仪、扭转振动仪和面内振动仪的发展,激光多普勒技术开始走向实用化<sup>[4]</sup>。南安普敦大学光振研究所在1983年成功研制出激光多普勒测振仪(LDV),用于测量固体的振动速度<sup>[5]</sup>。20世纪90年代至今,LDV的相关技术逐渐成熟,进入商业化的阶段。人们先后发明了扫描式LDV和显微式LDV,测量能力也从1维增加到3维,从单点扩展到曲面,甚至出现了超远距离激光测振仪、旋转式激光测振仪、高速型激光测振仪等特殊应用激光测振

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-10-04; 录用日期: 2021-10-19

通信作者: jin@wit.edu.cn

仪,相关软件和硬件设施都取得很大的进步。

LDV 通常采用干涉仪的结构。按照参与干涉的两束光频率的差异,可以把干涉仪分为零差干涉仪、外差干涉仪、自混合干涉仪和正弦相位调制干涉仪,而 LDV 常采用外差干涉仪的形式。振动信号的解调是激光测振技术的关键之一,传统的信号解调方法包括主动零差法、伪外差法、 $3 \times 3$  耦合同源载波法和相位生成载波法这 4 种。其中,相位生成载波法具有高灵敏度和高精度的优点,其测试的动态范围大,且不受待测物体运动过程产生的散斑噪声的影响,成为当前激光多普勒测振技术最佳解调方案之一<sup>[6]</sup>。

在激光多普勒测振技术发展的过程中,也出现了一些有代表性的公司。国外的公司有:德国的宝利泰(Polytec)公司、丹麦的丹迪动态(Dantec Dynamics A/S)公司、英国的欧迈特(Ometron)公司、美国的自动精密工程(API)公司、日本的理音(RION)公司等,但这些公司生产的 LDV 往往价格比较昂贵,且维护成本较高<sup>[7]</sup>。在国内,生产激光测振仪的公司有舜宇光学等,其针对不同应用场景开发出了不同型号的激光测振仪。受益于多普勒效应,LDV 能够感应远程物体表面的小振幅振动,进而提取振动目标的特征。LDV 已经成功地应用在许多远程测量上。这些应用

包括机械诊断<sup>[8]</sup>、组合导航系统<sup>[9]</sup>、结构健康监测<sup>[10-11]</sup>、声学监测和声学表征<sup>[12]</sup>等。本文对近年来激光振动测量技术应用方面的一些新进展进行了综述。首先分析了激光多普勒效应和 LDV 的基本原理;然后介绍了 LDV 在当今各领域的具体应用;最后展望了激光测振技术的未来。

## 2 基本原理

激光多普勒测振技术是一种利用外差干涉原理和多普勒效应测量物体表面振动的技术。激光多普勒测振的一个典型光路如图 1 所示。该光路图基于外差干涉原理,激光器发出的频率为  $f$  的激光在通过偏振分束器 1(PBS1)时,被分为参考光束和测试光束两束激光。其中,参考光束经过直角棱镜的反射后,通过声光调制器(AOM)发生布拉格衍射,光的频率变为  $f + f_{AOM}$ 。这里  $f_{AOM}$  为 AOM 的调制频率。测试光束经过偏振分束器 2(PBS2)后到达被测物体,在物体表面发生漫反射。反射光的频率变为  $f + \Delta f$ ,其中  $\Delta f$  为物体运动所产生的多普勒频移。反射光经过偏振分束器 2(PBS2)和分束器(BS)后,与参考光束发生干涉,最后的光信号被光电探测器接收,后续再进行信号的处理与解调。

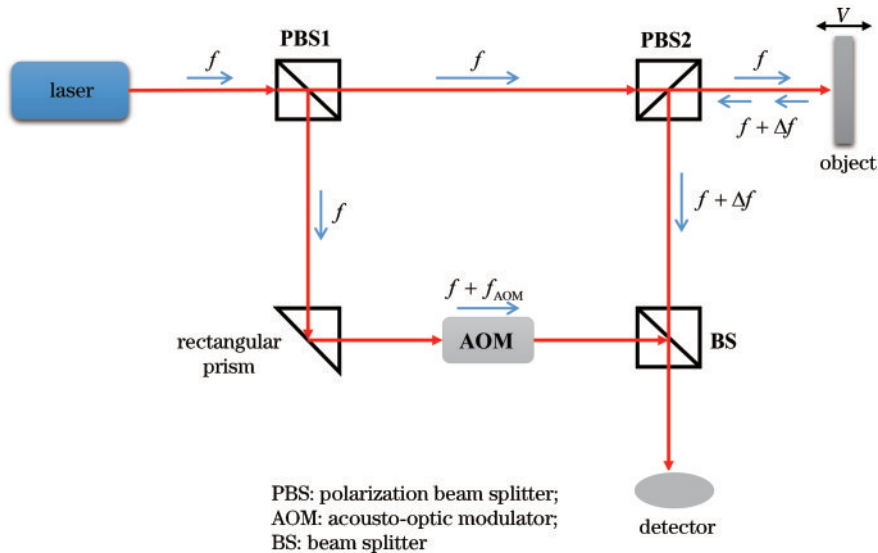


图 1 激光多普勒测振的光路图

Fig. 1 Optical path diagram of laser Doppler vibration measurement

结合图 1 的光路图,可以将多普勒效应的物理情景简单理解为:波源发出的波到达运动物体上后,被反射并被探测器接收,接收到波的频率会发生改变。其频率的变化量,即多普勒频移  $\Delta f$  可以用下式表示<sup>[13]</sup>:

$$\Delta f = \frac{2V}{\lambda}, \quad (1)$$

式中:  $V$  表示物体的运动速度;  $\lambda$  为入射波的波长。而在实际应用中,由于激光具有良好的相干性,通常使用激光器作为波源,并将在此条件下的多普勒效应称为

激光多普勒效应。

由式(1)可以推导出式(2)。在进行激光测振时,由于激光的波长已知,只需测得反射光的频移  $\Delta f$ ,即可根据式(2)计算出运动物体的速度,而频移量则是通过激光外差干涉原理来进行测量的<sup>[14]</sup>。

$$V = \frac{\lambda}{2} \Delta f. \quad (2)$$

原理上,LDV 除了可以直接测量出振动速度外,还可以计算得到振动的位移量和加速度。假设振动物体作

简谐运动,其位移关于时间  $t$  的函数可表示为

$$X(t) = A \sin(2\pi ft), \quad (3)$$

式中:  $A$  为振幅;  $f$  为物体振动频率。则振动物体表面的速度为

$$V(t) = 2\pi f \times A \cos(2\pi ft), \quad (4)$$

振动物体的加速度可以表示为

$$a(t) = -(2\pi f)^2 \times A \sin(2\pi ft). \quad (5)$$

因此,对于作简谐运动的物体,测量到频率  $f$ ,即可根据式(3)~(5)计算出物体振动的位移、速度和加速度<sup>[15]</sup>。

### 3 LDV 在各领域的应用

作为一种非接触式测量方法,LDV 具有传统接触式传感器无法比拟的测量优势:不受被测物体的尺寸、温度和位置的限制<sup>[16]</sup>。它具有测量距离远、空间分辨率高、测量时间短、无附加质量等优点,已被广泛应用于结构探伤<sup>[17-18]</sup>、农产品质量检测<sup>[19]</sup>、医疗<sup>[4]</sup>、航天结构模态分析<sup>[16]</sup>等领域。下面将具体举例介绍 LDV 在农业、生命医学、航空航天,以及建筑工程这 4 个领域的应用。

#### 3.1 LDV 在农业领域的应用

农产品质量评价是种植者、经销商和消费者都十分重视的一个问题。而在水果的运输、储存和销售过程中,根据质量对其进行分类是很重要的。但往往很难用非破坏性的手段来检测西瓜等大型厚皮水果的内在品质。农产品的声振动特性与其结构特性有关,可用于质地评价、成熟度分类和缺陷检测<sup>[19]</sup>。而非接触测量可以满足快速无损测量的要求,特别适用于在线

检测。这种技术可以用于水果采后加工过程中的质量评估。目前的非破坏性技术模式更有效、更便宜,能够产生更快、更准确的结果。近年来,一些研究人员采用了一种新的无损振动检测技术,即用 LDV 检测水果的品质<sup>[20]</sup>。其中位移测量比速度测量更适用于低频测量,因此有助于评估水果。通过将能量施加到物体上(例如敲击或声音扫描),测量物体的共振频率<sup>[21]</sup>。

目前,国内外已有多位学者研究了利用 LDV 进行水果品质的检测。Landahl 等<sup>[21]</sup>以牛油果作为模型水果,在保质期内记录标准的力-变形测量,以及单次或同时的双振动时间信号,并根据呼吸和非结构性碳水化合物含量进行评估。他们发现在成熟过程中,通过 LDV 从水果中测得的共振频率降低了 2~4 倍,这对应于硬度的相应降低(253~2 N)。该结果证明了 LDV 能够提供快速、可靠的信息,以实施工业筛选。Zhen 等<sup>[22]</sup>对扫描型 LDV 用于芒果品质评价的非破坏性检测做了分析研究。如图 2 所示, Cui 等<sup>[23]</sup>采用基于 LDV 的硬度检测实验系统,利用 LDV 获取第二共振频率,实现了麒麟西瓜采后振动响应的获取。Jie 等<sup>[20]</sup>在其综述文章中,介绍了西瓜内部品质无损检测技术的最新进展;总结了西瓜品质检测的主要技术和方法,其中包括用 LDV 进行检测;同时分析了各技术在应用中的优势和局限性,并介绍了基于现有技术的商用在线设备和生产线的现状。Ding 等<sup>[24]</sup>采用 LDV 在线检测系统,通过采集翠冠梨的声振动响应信号进行硬度检测,监测梨在贮藏过程中化学成分的变化,研究通过穿刺试验获得的最佳硬度变量以及不同分类和回归模型中梨硬度与振动参数的关系。

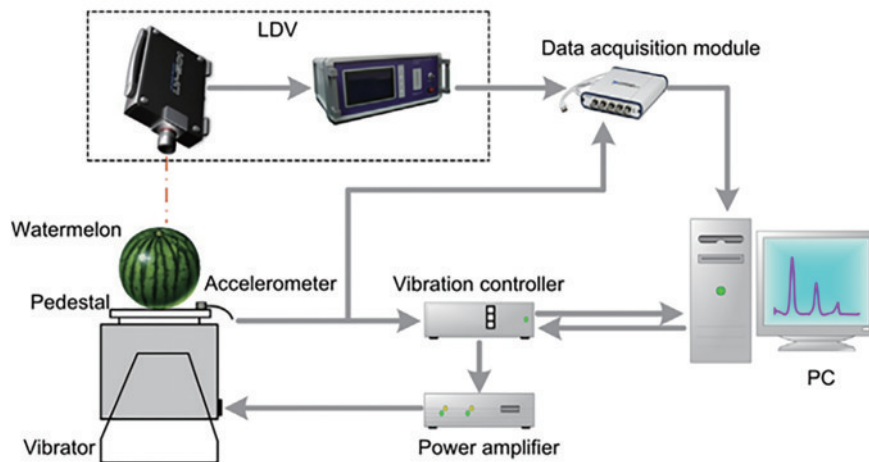


图 2 从西瓜上测量振动光谱的系统设置<sup>[23]</sup>

Fig. 2 System setup for measuring vibration spectrum from watermelon<sup>[23]</sup>

#### 3.2 LDV 在生命医学领域的应用

近年来,非接触式健康监测已经成为生物医学的一个研究课题。它在重症监护、家庭保健、康复、老年人护理、体力监测、司机压力测量和人机交互等应用中具有多种优势<sup>[4]</sup>。有多种方法可以用来检测重要生命

体征,其中 LDV 具有适合于生命体征检测的计量特性。

LDV 可用于测量听骨链的连续运动。对听骨链固定程度的了解有助于外科医生确定最佳的行动方案,并最大限度地提高术后听力恢复。这种分析通常

是手动进行的,外科医生按压听小骨并观察它们的反应。但这是一种相对粗糙的方法,非常难学。LDV 作为一种非接触光学仪器,通常用于听力力学的基础研究,可用于测量鼓膜振动和中耳功能。如图 3 所示,通过将 LDV 安装在手术显微镜上,使用非接触式 LDV 系统在活体人的听骨链上的多个点测量速度,并根据

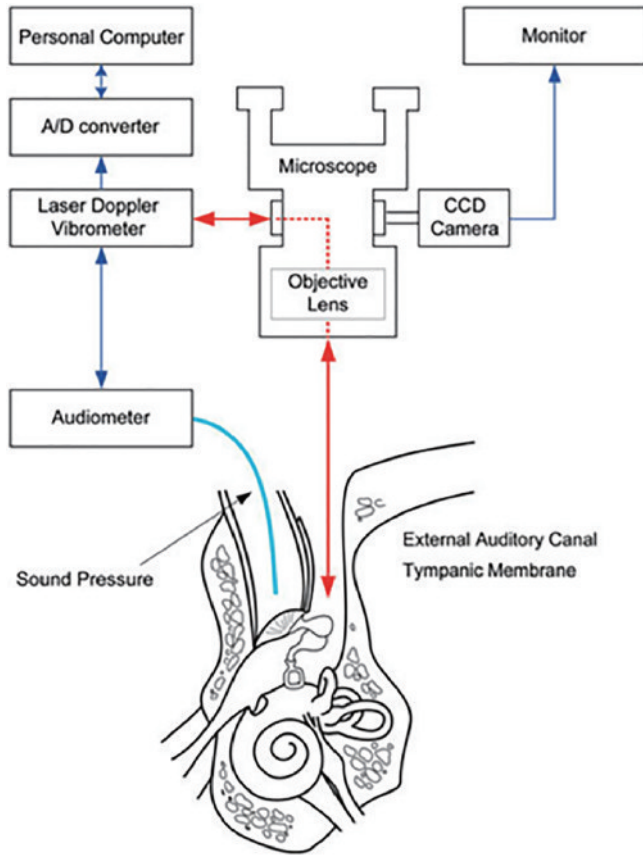


图 3 LDV 测量听骨链的连续运动的装置<sup>[25]</sup>

Fig. 3 Measuring continuous movement of ossicular chain using LDV<sup>[25]</sup>

测量结果计算每个听骨链的相对运动,分析了每个点的连续运动,可以很方便地了解听骨链的固定程度<sup>[25]</sup>。

LDV 可以从皮肤振动中检测颈动脉狭窄。早期发现无症状的颈动脉狭窄可能有助于识别有中风风险的个体。颈动脉听诊通常被认为是一种适当的筛选试验,但它的灵敏度较低,且依赖于操作者,是一种可能被背景噪声混淆的主观测量。此外,在医院中常规用于狭窄诊断的颈动脉超声对于一线筛查来说过于昂贵和复杂。而激光多普勒振动测量法已被证明特别适用于检测皮肤水平运动的生理信号,用于测量脉搏波速度、呼吸或心率。最近, Mancini 等<sup>[26]</sup>探索了一种基于激光多普勒振动测量的新方法,该方法可以从皮肤振动中非接触检测颈动脉狭窄。由于动脉狭窄后血液流动不稳定,会将能量传递给动脉壁,产生通过软组织传播到皮肤的机械波,用 LDV 即可用于检测浅表动脉的狭窄。

LDV 可进行心跳检测。目前国际上对心率的采集方法分为接触式检测和非接触式检测这两种<sup>[27]</sup>。其中,评估心率的常规方法是心电图(ECG)和光电容积描记法(PPG),但两者都是接触式检测。由于接触设备, ECG 可能会导致未消毒导线引起的感染危险。与 ECG 相比, PPG 更不准确,因为 PPG 可能受到运动伪影的影响,而且 PPG 的长期记录不太可靠。非接触式心脏监测系统用于以非侵入性方式连续记录个人的生命体征。LDV 是一种很有前途的非接触式心跳检测方法。通过将激光多普勒测速仪激光束指向颈部,在颈动脉上方获得的 LDV 信号可用于测量颈总动脉脉搏。图 4 显示了 LDV 用于心跳数据集的测量装置<sup>[28]</sup>。该装置中 LDV 指向受试者颈动脉上方的皮肤,激光多普勒测速信号由数据采集板(DAQ)产生并传送到计算机(PC)。在测试时可以同时记录来自颈动脉和胸部的 LDV 信号,并与 ECG 进行比较。

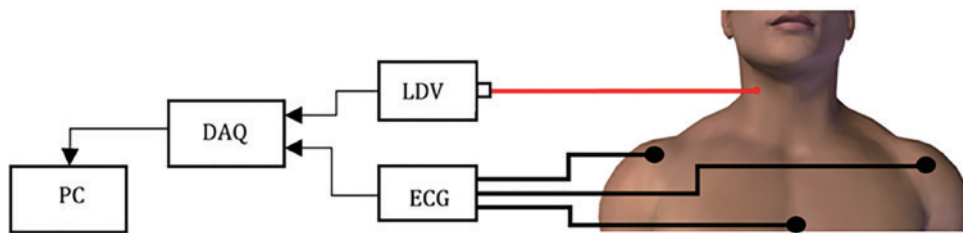


图 4 用于收集 LDV 心跳数据集的测量装置<sup>[28]</sup>

Fig. 4 Measuring device used to collect LDV heartbeat data set<sup>[28]</sup>

LDV 可进行帕金森个体的震颤检测。如今一个重要的诊断挑战是帕金森病和震颤综合征(即原发性或老年性震颤)之间的鉴别诊断。目前还没有用于震颤定量的标准方法,并且帕金森病和原发性震颤的诊断主要基于临床标准并通过使用等级量表来完成。因此,为临床医生提供帕金森病症状的客观定量测量是很重要的,以帮助诊断和个性化治疗。使用非接触技

术 LDV 和 Kinect for Windows 设备,可以客观和非侵入性地评估与所引用疾病相关的震颤。如图 5 所示,受试者被要求放松,坐在有扶手的椅子上。LDV 的激光束垂直对准病人的手,距离为 1 m;信号以 1 kHz 的采样频率进行采样。与此同时, Kinect 设备的深度相机在测试期间录制视频,用于记录受试者测试时的身体状态<sup>[29]</sup>。

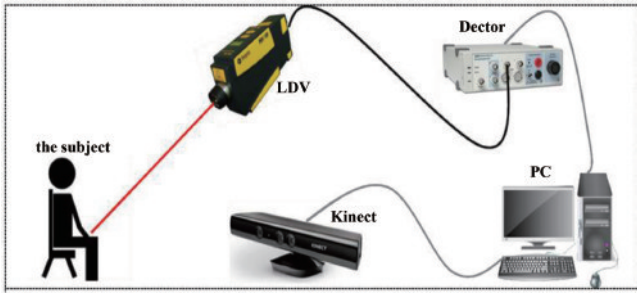


图 5 震颤测量设置图<sup>[29]</sup>

Fig. 5 Setting diagram of tremor measurement<sup>[29]</sup>

### 3.3 LDV 在航空航天领域的应用

LDV 在航空航天中用于飞机叶片模态测试。为了防止机械振动引起的运行故障的发生,工程师经常需要对航空发动机涡轮叶片进行振动特性试验,以获得结构的动态特性,从而预测和实现叶片振动水平的控制。模态分析是掌握结构动态特性的重要手段之一。飞机叶片结构的振动响应大多是三维的,而传统传感器采集的振动响应信号得到的模态数据是单向的,导致测试结果不能正确描述实际的模态振动模式。三维扫描 LDV (3D-SLDV) 是一种新的振动测量技术,其将 3 个独立的 LDV 同时聚焦到一个点,以收集响应。如图 6 所示,通过坐标分解,可以得到该点在空间任意 XYZ 方向的振动速度。3D 扫描激光多普勒模态测试方法可以在不受附加质量影响的情况下,获得轻质小尺度结构模态参数的 3D 全场模态<sup>[16]</sup>。

LDV 可用于兰姆波无损检测。可重复使用运载火箭 (RLV) 通常使用新开发材料的组件。对于低温加压结构 (如燃料箱) 而言,由于使用复合材料和暴露在极端环境条件下,这种结构的质量控制和维护需要可靠的检查方法,以避免潜在的灾难性故障。兰姆波作为一种由横波和纵波合成的特殊形式的波,它可以用来对结构组件进行探伤。基于超声导波和 3D 激光多普勒振动测量的损伤识别的方法,根据对称和反对称兰姆波模式在面内和面外振动振幅不同的事实,通

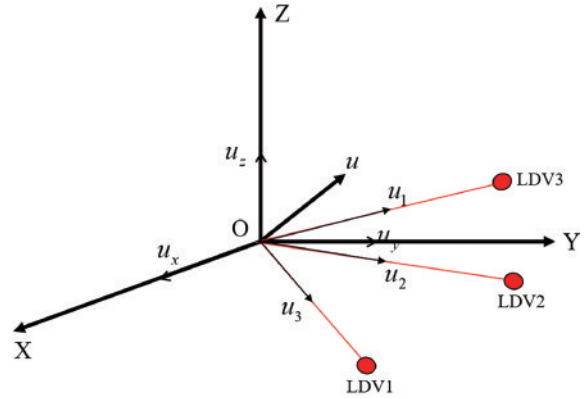


图 6 3D 激光测试坐标分解图<sup>[16]</sup>

Fig. 6 Exploded view of 3D laser test coordinates<sup>[16]</sup>

过比较面内和面外波矢量分量,可以检测模式转换,从而实现卓越和可靠的损伤检测。兰姆波由低剖面、表面粘结压电陶瓷换能器激发,LDV 用于表征兰姆波传播场。在大多数情况下,一维激光测振仪被用来测量平面外的兰姆波分量。最近, Pieczonka 等<sup>[30]</sup>开发了一种新的基于兰姆波的损伤检测信号处理方案,有效利用 3D-SLDV 提供的信息,3D 面外和面内测量也被使用,允许新的信号处理开发和损伤检测策略的改进。

### 3.4 LDV 在建筑工程领域的应用

LDV 可用于检测混凝土结构表层附近的内部缺陷。人们已经开发了许多混凝土结构的无损检测方法,但其需要接近或接触混凝土表面。因此,一个人在高处工作时需要脚手架或高空作业车。此外,作为从 5 m 以外的地方进行无损检测的方法,红外和激光遥感方法是已知的,但每种方法都有自己的难度。前者取决于温度等环境条件,后者需要超强激光,存在用户安全的问题。为了克服这些缺点, Sugimoto 等<sup>[17]</sup>开发了使用扫描 LDV (SLDV) 和远程声学设备 (LRAD) 的非接触声学检查 (NCAI) 方法, NCAI 方法的基本设置如图 7 所示。该方法可以在 10 m 距离处产生高于 100 dB (参考压力 20  $\mu$ Pa) 的声压。当混凝土表层存在

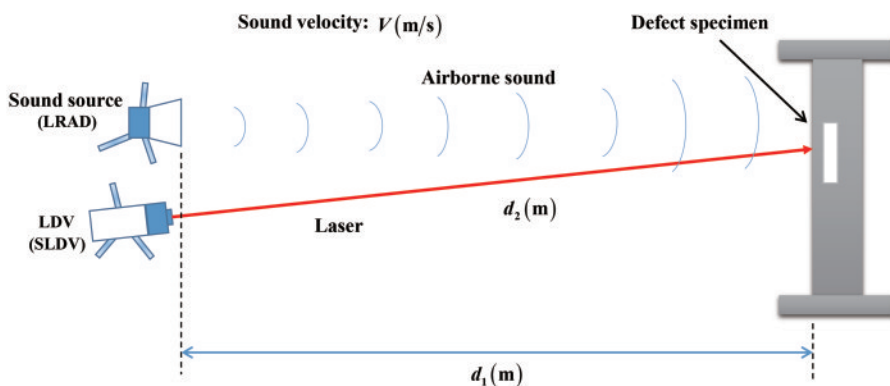


图 7 LDV 用于检测混凝土内部缺陷<sup>[17]</sup>

Fig. 7 Use of LDV for detecting internal defects in concrete<sup>[17]</sup>

内部缺陷时,会发生弯曲振动,通过 LDV 或 SLDV 以高灵敏度测量共振频率。根据在目标表面和 5 m 或更大的测量装置之间的距离处使用混凝土测试对象和真实混凝土结构的实验结果,发现所提出的技术具有与锤击测试几乎相同的检测精度。

LDV 可用于水电站大坝非平稳状态下的结构健康监测。对于许多老化的大坝,其功能和结构的健康维护正成为大坝工程界的主要挑战。由于水轮机长时间超负荷运转,造成各部位的损伤不断积累。其结构中损伤的累积导致动态特性的变化,可以通过振动监测来检测。文献[18]介绍了 LDV 在水电站厂房内非平稳条件下的应用,同时介绍了一种将非接触振动监测作为混凝土大坝结构健康监测的方法。在消除现场非平稳条件下固有的伪振动和测量噪声后,在特征频率中观察到随时间的显著变化,可以识别出发电站的不同结构元件的疲劳程度。图 8 是振动测量期间仪器的布局,其中振动计插入隔离变压器。振动是在主轴承壳体上测量的。整个方案运行时,在电磁线圈接通之前,加速度计输出中就出现了 50 Hz 的寄生频率。该方案中增加了一个隔离变压器,以在系统中引入电流隔离。

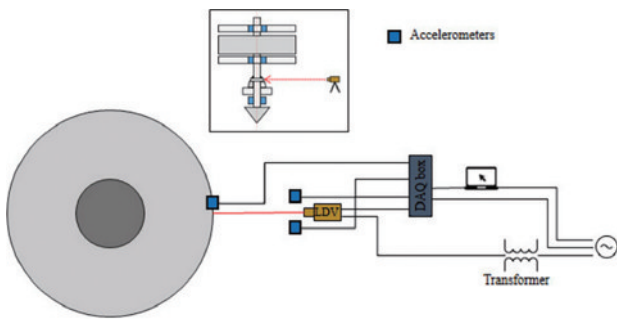


图 8 LDV 用于监测混凝土大坝<sup>[18]</sup>

Fig. 8 Use of LDV for monitoring concrete dams<sup>[18]</sup>

## 4 结 论

根据以上综述内容可知,激光多普勒测振技术的应用很广。上文列举介绍了 LDV 在农业中用于检测各种水果的品质;在生命医学中用于测量听骨链的连续运动、从皮肤振动中检测颈动脉狭窄、进行心跳检测、进行帕金森个体的震颤检测;在航空航天中用于飞机叶片模态测试和兰姆波无损检测;以及在建筑工程领域中用于检测混凝土结构表层附近的内部缺陷、用于水电站大坝非平稳状态下结构健康监测。当然,LDV 的应用将远不止上面举例的领域,更多领域的应用有待科研人员的持续探索。随着激光技术和光电产业的发展,相信未来 LDV 的应用必将更加广泛,相关技术也将得到蓬勃发展。

## 参 考 文 献

[1] 刘战存. 多普勒和多普勒效应的起源[J]. 物理, 2003,

32(7): 488-491.

Liu Z C. Doppler and the origin of his effect[J]. Physics, 2003, 32(7): 488-491.

- [2] Yeh Y, Cummins H Z. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer[J]. Applied Physics Letters, 1964, 4(10): 176-178.
- [3] Massey G A. An optical heterodyne ultrasonic image converter[J]. Proceedings of the IEEE, 1968, 56(12): 2157-2161.
- [4] Kroschel K. Laser Doppler vibrometry for non-contact diagnostics[M]. Cham: Springer, 2020.
- [5] Halliwell N A. The laser torsional vibrometer: a step forward in rotating machinery diagnostics[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 190(3): 399-418.
- [6] 陈鸿凯. 激光多普勒微振动信号处理技术研究及硬件实现[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020: 4.
- Chen H K. Research on signal processing and hardware implementation of laser Doppler micro vibration[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020: 4.
- [7] Rothberg S J, Allen M S, Castellini P, et al. An international review of laser Doppler vibrometry: making light work of vibration measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 99: 11-22.
- [8] Abbas S H, Jang J K, Kim D H, et al. Underwater vibration analysis method for rotating propeller blades using laser Doppler vibrometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 132: 106133.
- [9] 厉文涛, 聂晓明, 周健. 基于二维激光多普勒测速仪建立新组合导航系统的方法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0310001.
- Li W T, Nie X M, Zhou J. Method for establishing new integrated navigation system based on two-dimensional laser Doppler velocimeter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0310001.
- [10] 吴志鹏, 黄丹平, 郭康, 等. 基于机器视觉的新型光缆节距检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 081505.
- Wu Z P, Huang D P, Guo K, et al. Optical cable pitch detection method based on machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 081505.
- [11] Jang J, Liu P P, Kim B, et al. Silicon wafer crack detection using nonlinear ultrasonic modulation induced by high repetition rate pulse laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 129: 106074.
- [12] Peng S P, Wu S S, Li Y Y, et al. All-fiber monostatic pulsed laser Doppler vibrometer: a digital signal processing method to eliminate cochannel interference[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 124: 105952.
- [13] Tomasini E P, Castellini P. Laser Doppler vibrometry [M]. Heidelberg: Springer, 2020.
- [14] Optomet. Measurement principle-laser vibrometry[EB/OL]. [2021-05-06]. <https://www.optomet.com/technology/measurement-principle/>.
- [15] 晏素平. 振动测量用的 LDV[J]. 现代科学仪器, 1991

- (4): 41-42.  
Yan S P. A laser Doppler vibration meter for vibration measurement[J]. *Modern Scientific Instruments*, 1991(4): 41-42.
- [16] Wang Q, Zhu J, Dai J, et al. Research on blade modal testing method based on 3D scanning laser Doppler vibration measurement technology[EB/OL]. [2020-05-06]. <https://www.clausiuspress.com/conference/article/artId/5409.html>.
- [17] Sugimoto T, Sugimoto K, Kosuge N, et al. High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave[J]. *Japanese Journal of Applied-Physics*, 2017, 56(7S1): 07JC10.
- [18] Klun M, Zupan D, Lopatič J, et al. On the application of laser vibrometry to perform structural health monitoring in non-stationary conditions of a hydropower dam[J]. *Sensors*, 2019, 19(17): 3811.
- [19] Zhang W, Lü Z Z, Xiong S L. Nondestructive quality evaluation of agro-products using acoustic vibration methods: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(14): 2386-2397.
- [20] Jie D F, Wei X. Review on the recent progress of non-destructive detection technology for internal quality of watermelon[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 151: 156-164.
- [21] Landahl S, Terry L A. Non-destructive discrimination of avocado fruit ripeness using laser Doppler vibrometry[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 194: 251-260.
- [22] Zhen O P, Hashim N, Maringgal B. Quality evaluation of mango using non-destructive approaches: a review[J]. *Journal of Agricultural and Food Engineering*, 2020, 1 (1): 1-8.
- [23] Cui D, Gao Z M, Zhang W, et al. The use of a laser Doppler vibrometer to assess watermelon firmness[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 112: 116-120.
- [24] Ding C Q, Wu H L, Feng Z, et al. Online assessment of pear firmness by acoustic vibration analysis[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 160: 111042.
- [25] Kunitomo Y, Hasegawa K, Arai S, et al. Sequential motion of the ossicular chain measured by laser Doppler vibrometry[J]. *Acta Oto-Laryngologica*, 2017, 137(12): 1233-1237.
- [26] Mancini V, Tommasin D, Li Y L, et al. Detecting carotid stenosis from skin vibrations using Laser Doppler vibrometry-an *in vitro* proof-of-concept[J]. *PLoS One*, 2019, 14(6): e0218317.
- [27] 孔令琴, 吴育恒, 庞宗光, 等. 基于心冲击描记术的心率检测方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207042.  
Kong L Q, Wu Y H, Pang Z G, et al. Measurement of heart rate based on ballistocardiography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207042.
- [28] Antognoli L, Moccia S, Migliorelli L, et al. Heartbeat detection by laser Doppler vibrometry and machine learning[J]. *Sensors*, 2020, 20(18): 5362.
- [29] Casacanditella L, Cosoli G, Ceravolo M G, et al. Non-contact measurement of tremor for the characterisation of Parkinsonian individuals: comparison between Kinect and Laser Doppler vibrometer[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 882(1): 012002.
- [30] Pieczonka Ł, Ambroziński Ł, Staszewski W J, et al. Damage detection in composite panels based on mode-converted Lamb waves sensed using 3D laser scanning vibrometer[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 99: 80-87.