

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.06.03

# 基于非机械调制光的激光测振仪校准技术进展

王听言, 张大治, 梁志国

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 随着激光测振仪使用场景和测量范围的不断扩大, 其校准也愈发重要。但依据目前测振仪校准标准, 无法实现高频高速环境下的整机校准, 因此迫切需求完善此方面的校准方法。近几年, 研究人员将非机械调制光用于测振仪校准测试中, 构建了理论模型并取得了校准试验数据。本文对这些理论模型和试验数据进行了分析, 根据光调制产生位置和核心调制器件的不同对相关方法进行了分类, 同时对其工作原理、系统结构组成和主要参数等进行介绍, 再对比分析不同方法的校准功能与适用范围, 最后展望了相关方法的发展潜力和研究方向, 为测振仪校准技术进一步研究提供了借鉴。

**关键词:** 激光测振; 校准; 声光调制; 电光调制; 调制光

**中图分类号:** TB96

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2022)06-0017-10

## Progress in calibration technology of laser vibrometer based on non-mechanically modulated light

WANG Tingyan, ZHANG Dazhi, LIANG Zhiguo

(Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 10095, China)

**Abstract:** With the continuous expansion of application scenarios and measuring range of laser vibrometer, its calibration becomes more and more important. However, according to the current calibration standard of vibrometer, the whole machine calibration under high frequency and high speed environment cannot be realized, so it is urgent to improve the calibration method in this respect. In recent years, researchers have used non-mechanically modulated light in the calibration and testing of vibrometers, built theoretical models and obtained calibration test data. This paper analyzes these theoretical models and experimental data, classifies relevant methods according to different optical modulation generation positions and core modulation devices, and introduces their working principles, system structure and main parameters. It then compares and analyzes the calibration functions and application scope of different methods, and finally looks forward to the development potential and research direction of relevant methods. It provides a reference for further research on the calibration technology of vibrometer.

**Key words:** laser vibrometer; calibration; acousto-optic modulation; electro optic modulation; modulated light

## 0 引言

激光多普勒测振仪 (Laser-Doppler Vibrometer, LDV) 是基于激光的多普勒效应的, 能够对物体位移、速度以及加速度等物理量进行精确测量的激

光干涉测量设备, 具有测量精度高、动态响应快、测量范围大、非接触性测量、抗电磁干扰等诸多优点。通用型的测振仪在测量的振动频率上大多可以从 Hz 级覆盖到 MHz 级, 部分应用于超声领域的测振仪可以达到几十 MHz 级, 部分特种仪器最

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2022-10-31

基金项目: 航空工业计量所创新基金(ZC02101580)

引用格式: 王听言, 张大治, 梁志国. 基于非机械调制光的激光测振仪校准技术进展[J]. 计测技术, 2022, 42(6): 17-26.

**Citation:** WANG T Y, ZHANG D Z, LIANG Z G. Progress in calibration technology of laser vibrometer based on non-mechanically modulated light[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(6): 17-26.



高可以达到GHz级；测量的速度可以从微米每秒到几十米每秒。随着现在如微电子机械系统和超声医疗诊断等经常需要在高频高速工况下进行动态振动测试的领域越来越多，测振仪的测量范围也随之不断增加，也就更需要在制造和测试时对测振仪在高频高速工况进行校准。但与上述参数范围对应的校准标准并没有完全建立，国内发布的JJF 1219-2009《激光测振仪校准规范》<sup>[1]</sup>和2011年发布的国际标准ISO 16063-41《Methods for the calibration of vibration and shock transducers—Part 41: Calibration of laser vibrometers》<sup>[2]</sup>中均只规定了振动频率范围在0.4 Hz~50 kHz之间时使用机械振动法校准，高于50 kHz时，采用电信号校准法作为补充，即不计入光学接收前端的影响，只考虑运算电路部分的校准。

理论上只要有振动范围足够的激振器和经验证的参考激光测振仪，测振仪的高频校准可以在任何频率下进行。但国内外标准中规定的方法都是机械振动校准法，经典机械振动法的测量频率范围一般在100 kHz以下，这是因为随着振动频率的增加和振幅的降低，这种机械振动校准装置的非垂直方向振动与表面形变等误差急剧增加，振源对环境的要求也更加苛刻。虽然以激光干涉仪作为测量标准的初级对比校准方法消除了这些影响，但也受限于电动激振器的振幅和频率范围而无法进一步提升<sup>[21-22]</sup>。故此类校准方法的动态范围和测量不确定度无法满足评估激光测振仪高频高速环境下的需求。校准范围与校准精度两大问题促使激光测振仪校准方法的研究方向需要进行根本性的转变。

2020年前，激光测振仪校准方法研究基本可以分为两类：一类是对于现有国内外标准校准装置的局部改动，如探讨装置改进与补偿校准误差等<sup>[3-9]</sup>；另一类是针对电信号校准方法中各种测试信号的计算分析方法与不确定度分析<sup>[10-20]</sup>。极少有针对扩大校准范围的新型整体校准方法的提出与具体实验。

近年来，研究人员尝试使用非机械调制光模拟标准振动信号方法，即尽可能用纯光电调制方法模拟标准振动。对于测振仪来说，其发出的是已知频率和偏振状态的测量光，在理想测量振动

物体的条件下，接收到的是携带振动信息的回光，所以当无法精确生成机械振动时，直接通过光调制器件产生可精确产生与控制的和理想振动回光相同的调制光信号来作为等效替代的标准信号，是一种可行的校准思路。又由于现在可用的非机械调制光方法比机械振动的频率精度高；同时光信号直接从测振仪的光学系统入射测振仪，完整经历了光学部分和电路处理部分，有效满足了整机校准的需求，整机校准和大校准范围两大主要问题都可以得到解决。这种方法可以将调制在光信号中的振动参数溯源到更基本的物理量上，例如铷钟上精确的时间和频率。故此方法的关键是在覆盖待校频率与速度的范围内获得足够精确的调制光作为模拟振动信号。但因为具体实验数据结果较少，其校准范围边界与不确定度都有待进一步研究。

本文对近年来激光多普勒测振仪测试校准领域中使用的非机械调制光的相关研究进行原理介绍，并从方法分类和试验效果方面进行分析与评述，探讨了每种或每类方法的深入研究方向，最后对校准测振仪的非机械调制光方法的优缺点进行总结，预测了下一代国内外测振仪校准标准的建立方向，为制造或校准激光测振仪的相关单位提高对下一代校准方法的认知与实践提供了有力的支撑。

## 1 非机械调制光校准方法

国际上最早可追溯的研究是2012年德国联邦物理技术研究院（Physikalisch Technische Bundesanstalt, PTB）与Plotecy于美国物理联合会（American Institute of Physics, AIP）会议上的文献<sup>[23]</sup>，国内最早报道调制光法校准是在2015年，由北京长城计量测试技术研究所的张合富、朱振宇等人<sup>[24]</sup>提出，但均停留于理论和基础实验阶段。之后少有研究者进一步跟进，大部分工作仍然围绕改进原有的机械、对比校准方法而展开。直到近两年，国际上的众多国家计量研究所才使用非机械调制光校准方法，取得了一定的理论和实验成果，并在IMEKO会议上做了汇报。

调制光校准方法可以按照对光的调制方式分类。根据激光多普勒频移原理，测量标准振动

的回光信号为调频信号，要调制出调频光信号有许多种方法，按光调制源的位置可以分为内调制和外调制，按调制手段可以分为旋转光栅、声光、电光与磁光等。本文将详述已有实验数据的研究成果，包括声光、电光两种外调制光校准方法和飞秒激励、电控激光二极管两种内调制光校准方法。

### 1.1 外调制光校准方法

外调制光法的原理是依照振动返回光电场强度与返回光瞬时频率对光进行调制。

返回光电场强度为

$$E_{ce} = E_0 \sin\left(2\pi f_g t + 2\pi \cdot \frac{2A(t)}{\lambda}\right) \quad (1)$$

式中： $E_{ce}$ 为测量光电场强度，V； $E_0$ 为强度幅值，V； $f_g$ 为光频，Hz； $A(t)$ 为振动位移，m； $\lambda$ 为光波长，m。

返回光瞬时频率为

$$f = f_g + \frac{2V(t)}{\lambda} \quad (2)$$

式中： $f$ 为瞬时频率，Hz； $V(t)$ 为振动速度，m/s。式(1)和式(2)中的 $A(t)$ 与 $V(t)$ 在一般标准校准中为正弦函数。

使用外调制光的校准方法中，光调制方法有光栅调制、声光调制、电光调制和磁光调制。现阶段只有声光和电光的方法有实验性成果，其它方法受限于速度与频率，尚无研究。声光调制是通过外加驱动信号和晶体布拉格衍射直接改变光频，属于频率调制光信号，校准方法中依照式(2)调制；电光调制则是使用横向调制模式改变光程附加相位，属于相位调制光信号，校准方法中依照式(1)调制。这两种调制方法都属于通过相位角度调制携带模拟振动信息，在电信号生成

时可以进行等效转换。

#### 1.1.1 声光校准法

声光调制器 (Acousto Optic Modulation, AOM) 一般被当作光开关或进行光强调制，但同样广泛用于光学移频。不同于干涉光路中常见的固定移频，在声光校准法中使用的是可调制移频。对AOM施加的调制信号是一个计算设计过的调频信号时，调制器出射的衍射光就会与理想情况下的振动回光相同，即衍射光瞬时频率的调制信号部分就是振动信号。即当将理想正弦振动速度信息以调频形式调制进AOM基频的高频信号中时，调制器可以将此信息调制入光频信号中完成对振动的模拟，之后模拟光返回测振仪，就完成了测振仪获得标准信号的过程。

2015年，张合富、朱振宇等人<sup>[24]</sup>最先提出使用声光调制的测振仪校准方法时，只简要说明了频率的模拟调制方法。到2020年，美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 的Michael Gaitan等人进行了使用声光调制器测试LDV频率特性的初步实验<sup>[25]</sup>。

NIST在文献中记录了使用声光调制的LDV性能表征装置及部分相关实验。图1给出了NIST研制的基于声光调制器的LDV测试装置示意图，图中光路先用300 mm和30 mm的透镜将激光束准直，以产生符合AOM工作要求的光束直径，再依次经过两个AOM后通过反射镜将光返回镜头。

光束经过第1个AOM将光频下移 $f$  ( $f$ 为AOM中心频率，Hz)，接下来通过第2个AOM将光频上移 $f + \delta$  ( $\delta$ 为AOM调制附加频率，Hz)，然后光束通过反射镜沿着它的入射路径反射回来，将AOM的频移效果加倍并回向射入LDV，这种回光的总

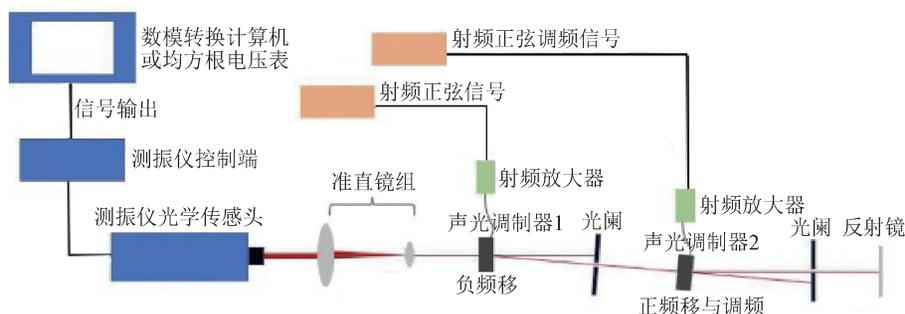


图1 基于声光调制器的测振仪测试装置<sup>[25]</sup>

Fig.1 Frequency characteristic characterization system diagram of vibrometer based on acousto-optic modulator<sup>[25]</sup>

频移为2倍的调制附加频率。此时LDV测得的速度 $V$ 就是总频移与LDV使用的激光波长的乘积。研究中采用2个AOM产生频移,因为具有调制带宽的AOM均是在高频基带附近工作,不能直接产生例如1 MHz或更低频率的直接频移。此实验研究给出了三种情况的实验结果(测试对象为OFV-500的VD-09解调卡的1 m/s档位):

1) 模拟匀速运动的测试结果,即对返回光附加固定频移,数据显示在所测试的速度范围内(31.6 mm/s ~ 1 m/s)最大的相对偏差绝对值为0.04%,比LDV生产商报告的相对不确定度1%小一个数量级。

2) 模拟标准正弦振动的测试结果,即返回光附加调制正弦信号时,此测试中第2个AOM的驱动信号是使用标准信号发生器产生的正弦调频信号,目标是表征LDV系统各档位的带宽。测试中将110 MHz基频下的正弦调制频率从100 Hz扫频至3 MHz,记录LDV显示的均方根速度值。测试结果显示LDV解调控制器被测档位的频率响应在低于1 MHz时均匀平坦,在高于1 MHz时迅速下降。

3) 使用速度阶跃函数激励的测试结果,采用任意波形发生器产生1 Hz方波,模拟速度阶跃函数,方波中低电平0 mV,高电平300 mV。

以上三种情况的结果表明,声光校准法可以

作为评价LDV系统整体的直流、正弦稳态和瞬态响应以及其数据采集和控制系统性能的工具。

### 1.1.2 电光校准法

电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM),是利用某些晶体材料附加电场后折射率变化达到调制效果的调制器件,同样常用于光强调制和光开关。但根据其入射光方向、外加电场方向和晶体光轴方向的不同,有不同的调制模式,用于电光校准法的是相位调制。在调相模式中,可以依照理想情况下的振动回光电场强度表达式(1),将振动的位移信号调制入光的相位中,达到对高频振动的直接模拟的效果。

日本国家计量院(NMIJ)的Hideaki Nozato等人于2021年提出电光调制的校准方法,并进行了高频环境下校准激光多普勒测振仪和激光干涉仪<sup>[26-28]</sup>的实验,随后将实验数据在IMEKO会议上做了报告。研究人员搭建并测试了一种利用电光调制器的光调制激励对LDV进行初步校准的装置,并通过两种对比实验侧面验证了该方法的测试校准能力。一种对比实验是和传统机械振动台激励方法测试比较;另一种是同时使用外差和零差激光干涉仪进行测试,具体系统组成如图2所示。

实验中信号发生器产生标准调制信号输入EOM对光进行调制,LDV的光路部分接收反射回

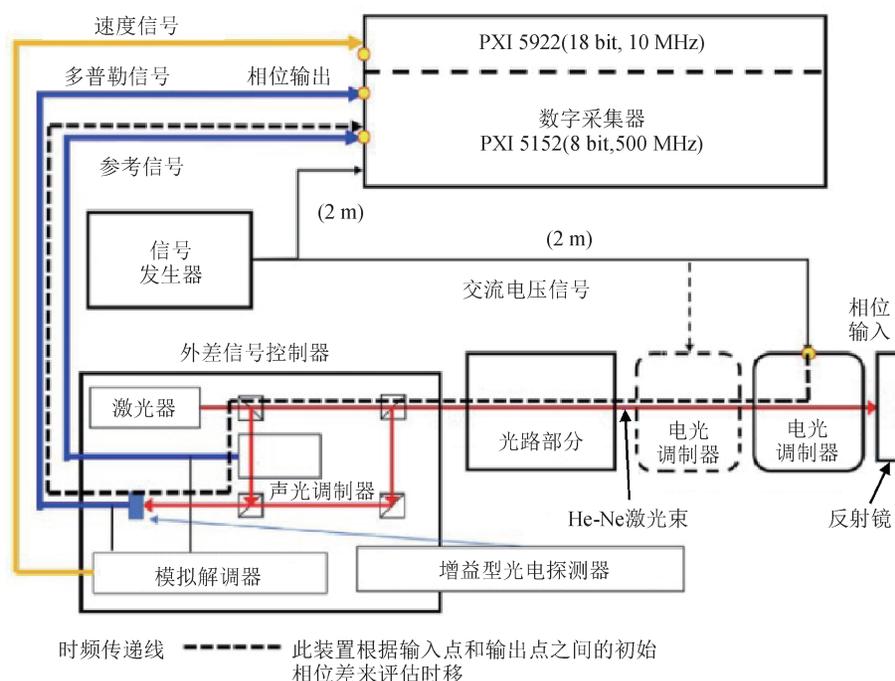


图2 LDV的初步校准评估装置示意图<sup>[26]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of preliminary calibration evaluation configuration of LDV<sup>[26]</sup>

光, LDV 控制器的测量信号与标准调制信号同时被数字采集卡记录。实验装置中使用 EOM 来调制光学相位, 其输入电压的光学相位灵敏度在 633 nm 处约为 25 mrad/V。

此实验进行了 EOM 校准系统的基本功能测试, 在 160 kHz 的频率下模拟振动记录了数据; 在 100 Hz~1 MHz 的振动频率范围内做了机械法与电光调制法的对比, 结果表明电光调制法相比机械调制激励具有更好的速度灵敏度和频率响应平坦度; 在相同的振动频率和速度下分别对外差和零差测振仪进行测试, 结果表明两种测振仪均可通过图 2 中的系统来校准, 频响校准结果显示偏差在可接受范围之内; 分析并计算了 EOM 校准系统的各部分不确定度, 得出了综合不确定度在 2% 以下的结论。

## 1.2 内调制光校准法

科研人员同样尝试使用内调制光方法进行校准测试, 试图直接通过可调制的专用激光器产生用于测试的模拟回光。

### 1.2.1 飞秒脉冲光校准法

2012 年由 Poltecy 与 PTB 合作的高频激光测振仪校准问题展望<sup>[31-32]</sup>一文中最早提出飞秒脉冲光校准法, 此方法的原理是利用飞秒脉冲中各个频率间隔成分在时间上已经对齐并压缩入同一脉冲的特点, 将飞秒激光入射 LDV 的光电探测器后, 记录 LDV 显示的不同频率成分测量结果。实验中以 Polytec 的高频 LDV 系统 UHF-120 为例, 其载波频率约为 618 MHz<sup>[33]</sup>, 首先用飞秒激光输入测振仪的光学前端, 获得并分析由示波器记录的 LDV 光学前端的传输特性, 再记录实验中飞秒激光器的参数作为对比。实验中飞秒激光器的光脉冲宽度为 80 fs, 中心波长为 810 nm, 重复频率为 76 MHz, 对应于约 13.16 ns 的脉冲间隔, 脉冲能量为 6.6 pJ, 其常用于表征采样率高达数十 GHz 的示波器的时间响应。为了准确计算脉冲响应, 实验以 40 GHz 的采样率测量了大约 38000 个连续脉冲, 并将其平均值作为前端的脉冲响应, 最后计算示波器信号得出测振仪的频响曲线。

总体来说, 此实验的信号输入不是通常的正弦信号激励, 而是利用飞秒激光脉宽极短的特性, 将不同频率的信号谱线压缩入同一个脉冲来用作

脉冲光信号。相比于产生 GHz 量级的精确调频光信号, 脉冲激励光信号确实是更容易实现的方法。但带来的问题是, 不能对各种不同的振动方式做充分模拟, 只能表征其频响曲线。根据飞秒光频梳时频传递技术, 可以考虑将电信号频率不确定度极小的光学频率梳作为频率信号源, 从而使振动频率与幅度量值传递的不确定度进一步减小。但是这种结合需要深入的理论分析工作, 实际的激励光光源与输入方式也需要重新设计。

### 1.2.2 电控激光二极管校准法

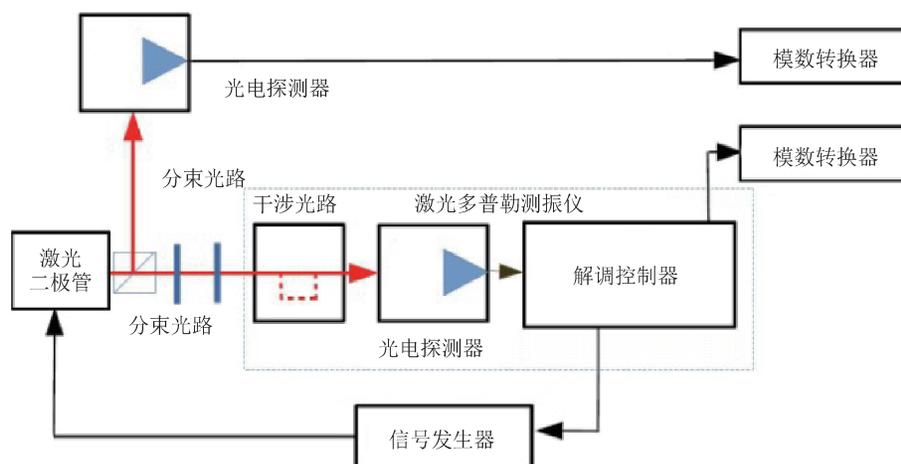
电控激光二极管 (laser diode, LD) 校准法最早于 2020 年在 PTB 发布的文章<sup>[33]</sup>中提出。试验装置利用电信号激励高速激光二极管产生调制输入光, 输入的模拟光光强为

$$I(t) = I_0 \cdot \sin\left(2\pi F \cdot t + 4\pi \cdot \frac{x(t)}{\lambda}\right) \quad (3)$$

式中:  $I$  与  $I_0$  为光强信号幅值, V;  $F$  为载波 (专指外差测量时的载波) 频率, Hz;  $x(t)$  为随时间变化的位移, m;  $\lambda$  为激光波长, m。

这种方法的基本思想是从公式 (3) 演变而来的。作为 LDV 的中心传感部分, 光电探测器无法分辨光强变化是由光干涉引起还是由调制外光源引起。当输入光的光强为式 (3) 时, LDV 的响应将与真实运动引起的速度相同。在图 3 所示校准装置中, 光源是波长与 LDV 发出激光波长一致的普通 10 mW 激光二极管。调整偏置电流使进入 LDV 的平均光束功率小于 1 mW, 与 LDV 激光器的典型输出功率大致匹配。

光信号由激光二极管产生, 具有相位调制能力的射频发生器为激光二极管提供调制电流, 调制深度设置在 30%~50% 范围内, 然后用一个非偏振分束器将约 50% 的 LD 光分离出来经过一个带宽为 400 MHz、已知时延的参考光电探测器作为监测信号, 另外 50% 经过 LD 和 LDV 之间设置的偏振片和四分之一波片, 保证其以圆偏光形式进入干涉仪。已使用电控激光二极管校准法验证了速度小于 1 m/s (即对应频偏小于 3.16 MHz), 频率小于 50 kHz 的振动信号。对于高达 100 kHz 的振动频率, 相对不确定度小于 0.01%, 即电控激光二极管校准法在高频范围同样适用。

图3 电调制激光二极管激励法校准装置<sup>[33]</sup>Fig.3 Calibration device of electrically tunable laser diode excitation method<sup>[33]</sup>

## 2 校准方法对比

从五个角度对本文所述的激光测振仪的校准方法——声光、电光两种外调制光校准方法和飞秒激励、电控LD两种内调制光校准方法进行对比分析说明。

### 2.1 光源

前文所述的方法虽然均采用非机械调制光来进行测试，但内外调制校准的两类方法使用的光源不同，二者有本质区别：外调制校准方法是对测振仪发出的光进行调制再使其返回，调制结构不需要产生光；内调制校准方法则不使用测振仪发出的光，由调制结构控制并产生测试光输入测振仪。

因此，外调制校准方法对测振仪使用的激光频率不敏感，被校仪器使用激光的频率在校准装置给定的测试频段内即可。而内调制校准方法需要选择与被校仪器使用激光的频率等性能参数尽可能接近的半导体激光器，以保证模拟测试时的激光频率响应结果与实际使用情况一致。所以外调制方法更符合计量溯源标准的要求，可作为之后LDV校准方法的主要发展方向。

### 2.2 校准装置的光路

从各方法所用校准装置的光路分析，外调制光方法和内调制光方法有着较大区别：外调制光的光路需要根据调制光器件需要的光束输入输出参数来设置，例如声光调制光校准方法中，根据

AOM的调制特性和第一级衍射光角度的变化，不仅需要聚焦调整输入AOM的光斑大小，还需要调整光轴的旋转角度，整体装置调整使用较为复杂。当AOM被调制时，随着瞬时频移的改变，射向反射镜的光线会有位置和角度上的偏移，这会导致回光无法有效的再、进行两次声光调制。这个问题在速度频移较低时影响较小，但会随着信号频率与带宽提升而放大，从而制约此方法充分发挥其调制频带较宽的优势。又例如电光调制法中，只需要准直光以确定的偏振方向入射EOM即可，光路不需要专门设计，比较简单。在内调制光方法中，光路保证从外部光源产生的调制光直接正射入LDV的前端光学头即可，需要考虑的是激光功率不要超出LDV中探测器的测量范围，尽可能和实际使用场景保持一致。

### 2.3 光调制方式

从光被调制的方式分析，外调制光方法是对测量光的电场相位或频率进行调制，光强和偏振不随调制变化：在声光调制光校准方法中，AOM对光进行频率调制，频率调制的频偏与调频均在MHz量级，与实际振动物体的多普勒回光信号频偏最接近；在电光调制光校准方法中，EOM对光进行相位调制，由于可以通过调相间接实现调频，故部分调制光信号情况与AOM相同；飞秒脉冲光校准方法中的调制光从原理上直接由飞秒激光器完成；电控LD校准方法中是对光强度的直接调制，从原理上并不涉及光学干涉部分，与测振仪

实际工作时接收光信号有一定的差异,不及其它三种校准方法方法符合实际工况。

#### 2.4 电控驱动信号

除了飞秒脉冲光校准方法只考虑测试激光测振仪的频响而不考虑对振动进行模拟之外;另三种方法的光驱动信号均为标准信号发生器或标准任意波形合成器生成的调制电信号,即在信号中包含了模拟振动的参数,但具体形式又各有不同:

在声光校准方法中,根据AOM的工作要求,电信号要首先经过射频信号放大器后再输入AOM中,此信号是将测试振动的多普勒频移信号调制到AOM的工作基频上,每3.16 MHz调频信号频偏对应1 m/s的振动速度,调制频率与振动频率相同,即振动的两个参数均能溯源到标准信号发生器产生信号的频率上。

在电控LD校准方法中,直接控制光强的电信号应与测振仪正常工作时内部光电探测器的输出信号相同,即振动的频率与速度溯源到标准信号发生器产生信号的频率上。

在电光校准法中,根据EOM原理可知,一定范围内加在EOM晶体上的电压值与通过EOM附加的光学相位成正比。故依照激光测振仪回光信号的电场表达式(1),所需电压信号幅值与振动位

移值成正比,即振动的频率和位移溯源到标准信号发生器产生信号的频率和电压幅值上。在振动速度超过EOM半波电压能直接调节的范围时,需要通过载入计算后等效的合成数字信号波形来完成对光的调制。但由于信号发生器产生信号的频率比幅值的不确定度更低,故电光校准法信号不确定度较声光、电控LD两种校准方法处于劣势。

#### 2.5 预估校准范围

从理论上的校准范围角度分析,现有的AOM的调制带宽约为数十MHz,声光校准法的上限可以覆盖大部分需要测试校准的振动速度与频率范围,从低频低速到高频高速均可。现有的EOM的调制带宽根据波长不同而有所差异,从数十MHz到GHz均有,但受限于信号电压幅值的噪声下限和半波电压上限,部分位移极小的振动参数并不能模拟,部分位移较大的振动需要专门计算对应驱动信号。AOM和EOM受限于原理,调制的理论计算值和实际调制值并不严格精确相等,需要引入监测信号和计算不确定度后,再计算校准的偏差。现有LD主要问题是其激光的方向性和单色性比LDV中使用的激光器差且受温度的影响较大,可能会引入额外的误差。

以上所述激光测振仪校准方法的对比见表1。

表1 校准方法对比

Table.1 Comparison of calibration methods

校准方法	光源	光路复杂度	光调制方式	驱动信号种类	预估校准频率带宽
声光校准	LDV提供	较复杂	外部光频率调制	调频	< 50 MHz
电光校准	LDV提供	简单	外部光相位调制	正弦或其他	< 2 GHz
飞秒脉冲光校准	外部飞秒激光器	简单	内部,多频叠加	无	~ 2 GHz
电控LD校准	外部LD	简单	内部,光强调制	调相	< 5 GHz

### 3 总结与展望

综上所述,在对国内国际振动校准标准的延伸与新的校准方法探索中,机械振动法的频率限制在500 kHz以下,高频水听器校准的实验<sup>[34-35]</sup>仅可作为参考;模拟电信号激励法由于没有校准LDV前端的光学部分,现仅在对电路处理部分进行误差分析时使用。而应用非机械调制光校准激光多普勒测振仪的几种方法在校准范围上相比于现有校准标准均有很大提升。其中,声光调制校

准方法适合频率在数十MHz以下的全参数范围振动的校准,电光调制校准法适合频率在MHz到GHz的微小位移的振动校准,飞秒脉冲光校准法只适合频率高达GHz及以上的测振系统的频响测试。

根据这些校准方法的研究现状,可以预测今后研究工作的方向:①使用AOM或EOM的校准方法的校准范围有较大提升空间,在不高于现有标准不确定度的前提下,有希望做到覆盖全部待校准范围;②随着近十年飞秒光频梳的发展,使用飞秒激光器的测试方法应有更周密精确的实验设

计；③本文所述校准方法使用的装置理论上均可以采用光纤光路，这样不仅可以提高集成度，还能达到在避免光轴对准工作的同时增加系统稳定性的效果，但具体效果有待进一步实验测试；④按照半导体激光器调制光校准方法的原理，AOM和EOM同样可以做到对光强度的调制，此方向尚无人研究，有待进一步的实验和测试。

因此，今后此类校准方法的重点将会集中于以下三点：①对光进行稳定的高精度调制；②准确评估大速度与频率范围内的光电信号质量与不确定度；③分析高频电光信号互相影响的程度。同时，以上校准方法在经过更深入分析和优化对比试验验证后，再结合各自的优势区间综合校准测振仪的全部参数范围，有望为未来国际LDV校准标准提供新的选择方案。

### 参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. 激光测振仪校准规范: JJF 1219-2009[S]. 北京: 中国计量出版社, 2009.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Calibration specification for laser vibration meter: JJF 1219-2009[S]. Beijing: China Metrology Press, 2009. (in Chinese)
- [2] International Organization for Standardization. Methods for the calibration of vibration and shock transducers—part 41 Calibration of laser vibrometers: ISO 16063-41[S]. Switzerland: ISO, 2011.
- [3] 洪宝林, 郁振华. 9610型振动传感器校准系统[J]. 计测技术, 1990, 10(1): 6-10.  
HONG B L, YU Z H. 9610 vibration sensor calibration system [J]. Metrology and measurement technology, 1990, 10(1): 6-10. (in Chinese)
- [4] 马明德. 中频振动基准[J]. 中国计量, 1998, 4(11): 33.  
MA M D. Medium frequency vibration reference [J]. China metrology, 1998, 4(11): 33. (in Chinese)
- [5] 陆忠兵. 超低频标准振动台校准系统的关键技术及其实现方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.  
LU Z B. Key technology and implementation method of ultra low frequency standard vibration table calibration system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese)
- [6] MARTENS H J, LINK A, SCHLAAK H J, et al. Recent advances in vibration and shock measurements and calibrations using laser interferometry[C]. Sixth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications. SPIE, 2004, 55(3): 1-19.
- [7] 葛隽. 振动校准系统中激光测量及控制技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.  
GE J. Research on laser measurement and control technology in vibration calibration system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [8] 贺芳琪. 激光测振仪校准装置的设计与应用[D]. 浙江: 中国计量大学, 2016.  
HE F Q. Design and application of laser vibrometer calibration device[D]. Zhejiang: China University of Metrology, 2016. (in Chinese)
- [9] 孙旭朋. 外差式激光测振仪关键参数校准研究[D]. 浙江: 中国计量大学, 2016.  
SUN X P. Study on the calibration of key parameters of heterodyne laser vibrometer[D]. Zhejiang: China University of Metrology, 2016. (in Chinese)
- [10] 吴先梅, 钱梦騷. 用于换能器校准的激光干涉测振技术[J]. 声学技术, 2000, 19(2): 83-85.  
WU X M, QIAN M L. Laser interference vibration measurement technology for transducer calibration[J]. Acoustic technology, 2000, 19(2): 83-85. (in Chinese)
- [11] 贺芳琪, 周伦彬, 蔡晋辉. 激光测振仪校准装置的设计和应用[J]. 中国测试, 2017, 43(1): 74-77, 83.  
HE F Q, ZHOU L B, CAI J H. Design and application of laser vibrometer calibration device[J]. China test, 2017, 43(1): 74-77, 83. (in Chinese)
- [12] 钱向伟, 王雷, 张深逢, 等. 三维光电振动测量技术的校准方法研究[J]. 光学仪器, 2016, 38(2): 106-111.  
QIAN X W, WANG L, ZHANG S F, et al. Research on calibration method of three-dimensional photoelectric vibration measurement technology[J]. Optical instruments, 2016, 38(2): 106-111. (in Chinese)
- [13] 王月兵, 孙旭朋. 激光测振仪校准方法研究进展与述评[J]. 中国计量学院学报, 2015, 26(4): 399-405.  
WANG Y B, SUN X P. Research progress and review on calibration methods of laser vibrometer [J]. Journal of china institute of metrology, 2015, 26(4): 399-405. (in Chinese)
- [14] 于梅, 杨丽峰. 激光测振仪在振动标准装置校准中的

- 应用研究[J]. 质量技术监督研究, 2009, 16(2): 60.
- YU M, YANG L F. Research on the application of laser vibrometer in the calibration of vibration standard device [J]. Research on quality and technical supervision, 2009, 16(2): 60. (in Chinese)
- [15] 梁志国, 李新良, 孟晓风. 激光测振仪独立线性度的测量不确定度[J]. 计量学报, 2008, 29(3): 242-247.
- LIANG Z G, LI X L, MENG X F. Measurement uncertainty of independent linearity of laser vibrometer [J]. Journal of metrology, 2008, 29(3): 242 - 247. (in Chinese)
- [16] 梁志国, 李新良, 孟晓风. 外差式激光测振仪上升时间和延迟的测量评价[J]. 计量技术, 2007, 49(6): 7-10.
- LIANG Z G, LI X L, MENG X F. Measurement and evaluation of rise time and delay of heterodyne laser vibrometer[J]. Metrology technology, 2007, 49(6): 7 - 10. (in Chinese)
- [17] 梁志国, 李新良, 孟晓风. 外差式激光测振仪相移特性及延迟的测量评价[J]. 工业计量, 2007, 17(3): 10-12.
- LIANG Z G, LI X L, MENG X F. Measurement and evaluation of phase shift characteristics and delay of heterodyne laser vibrometer[J]. Industrial metrology, 2007, 17(3): 10 - 12. (in Chinese)
- [18] 梁志国, 李新良, 孟晓风. 激光测振仪误差限的测量不确定度[J]. 工业计量, 2007, 17(2): 40-43.
- LIANG Z G, LI X L, MENG X F. Measurement uncertainty of error limit of laser vibrometer[J]. Industrial metrology, 2007, 17(2): 40 - 43. (in Chinese)
- [19] 梁志国, 李新良, 孟晓风. 激光测振仪直流增益和直流偏移的测量不确定度[J]. 计测技术, 2007, 27(1): 34-39.
- LIANG Z G, LI X L, MENG X F. Measurement uncertainty of DC gain and DC offset of laser vibrometer [J]. Metrology and measurement technology, 2007, 27(1): 34 - 39. (in Chinese)
- [20] KANG M S, STANBRIDGE A B, CHANGH T G, et al. Measuring mode shapes with a continuously scanning laser vibrometer Hilbert transform approach [J]. Mechanical systems and signal processing, 2002, 16(2): 201-210.
- [21] BRUNS T, BLUME F, TAUBNER A. Laser vibrometer calibration at high frequencies using conventional calibration equipment [C]. Lisbon, XIX Imeko World Congress, 2009.
- [22] MARTENS H J V. Applicability of ISO standard methods to vibration measurements at high frequencies and high accelerations [J]. Aip conference proceedings american institute of physics, 2012, 1457(1): 181-199.
- [23] WINTER M, FUSER H, BIELER M, et al. The problem of calibrating laser-doppler vibrometers at high frequencies [J]. Aip conference proceedings american institute of physics, 2012, 1457(1): 165-175.
- [24] 张合富, 朱振宇, 朱国勤. 激光测振仪校准技术评述 [J]. 计测技术, 2014, 34(6): 5-8.
- ZHANG H F, ZHU Z Y, ZHU G Q. Review on calibration technology of laser vibrometer [J]. Metrology and measurement technology, 2014, 34(6): 5 - 8. (in Chinese)
- [25] GAITAN M, GEIST J, RESCHOVSKY B J, et al. Characterization of laser Doppler vibrometers using acousto-optic modulators [J]. Acta imeko, 2020, 9(5): 361-364.
- [26] NOZATO H, KOKUYAMA W. Calibration of laser Doppler vibrometer and laser interferometers in high-frequency regions using electro-optical modulator [J]. Precision engineering, 2021, 70: 135-144.
- [27] NOZATO H, KOKUYAMA W, HATTORI K, et al. Time delay evaluation for laser interferometer using electro-optical modulator [C]. Journal of Physics: Conference Series Iop Publishing, 2018, 1065(22): 222008.
- [28] NOZATO H, KOKUYAMA W, HATTORI K, et al. An investigation into the influence of mass inertia using primary calibration of the back-to-back accelerometer by laser interferometry [J]. Metrologia, 2019, 56(6): 65006.
- [29] ZHANG L, PENG J. Primary acceleration calibration by heterodyne laser interferometer and PXI instrument [C]. Sixth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications Spie, 2004, 55(3): 588-597.
- [30] KOKUYAMA W, NOZATO H, OHTA A, et al. Simple digital phase-measuring algorithm for low-noise heterodyne interferometry [J]. Arxiv preprint arxiv: 2016:1602.03701.
- [31] PALANI S. Signals and systems [M]. American, Springer International Publishing AG, 2021.
- [32] REMBE C, BOEDECKER S, DRABENSTEDT A, et al. Heterodyne laser-Doppler vibrometer with a slow-shear-

mode Bragg cell for vibration measurements up to 12 GHz [C]. Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications SPIE, 2008, 7098: 115-126.

[33] VOLKERS H, BRUNS T. Laser-Doppler-Vibrometer calibration by laser stimulation [J]. Acta imeko, 2020, 9 (5): 357-360.

[34] 陈毅, 贾广慧, 费腾. 5 Hz ~ 10 kHz 频率范围矢量水听器校准国际主导比对 [J]. 计量学报, 2020, 41 (10): 1279-1283.

CHEN Y, JIA G H, FEI T. International leading comparison of vector hydrophone calibration in 5 Hz~10 kHz frequency range [J]. Journal of metrology, 2020, 41 (10): 1279-1283. (in Chinese)

[35] 王世全. 100 kHz ~ 1 MHz 频率范围水听器灵敏度激光法校准及其验证 [J]. 宇航计测技术, 2019, 39 (3): 58 - 62.

WANG S Q. Laser calibration and verification of hydrophone sensitivity in the frequency range of 100 kHz~1 MHz [J]. Aerospace measurement technology, 2019, 39 (3): 58-62. (in Chinese)

(本文编辑:田艳玲)



第一作者: 王听言(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光测量技术。