

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.02.03

线角复合振动测量技术研究综述

李昱宪, 张大治*

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 总结了线角复合振动测量的主要技术方法并进行分类, 介绍了基于振动传感器的接触式测量手段, 以及激光多普勒测振与机器视觉法等非接触式测量手段, 阐述了各类方法在线振动与角振动同步检测中的典型应用, 并从测量精度、频率响应、抗干扰能力等方面分析了各技术方法的适用条件与局限性。展望了线角复合振动测量技术的未来发展方向, 指出未来将基于光学设计创新和硬件与智能算法融合两个方面优化线角复合振动测量技术; 需研究和以激光干涉法绝对校准技术为核心的线角复合振动校准体系, 构建溯源链条; 推动接触式与非接触式两类技术向系统集成化与场景定制化方向演进, 以更好地适应复杂工况与现场应用需求。

关键词: 线角复合振动; 多自由度; 振动传感器; 频率响应; 激光干涉; 机器视觉; 智能算法; 系统集成

中图分类号: TB9; TP212

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 02-0040-20

Review of combined linear and angular vibration measurement technologies

LI Yuxian, ZHANG Dazhi*

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

Abstract: This paper summarizes and classifies the main technical methods for the combined measurement of linear and angular vibration. It reviews contact-based measurement methods using vibration sensors, as well as non-contact techniques such as Laser Doppler Vibrometry (LDV) and machine vision method, discusses typical applications of these methods in the synchronous detection of linear and angular vibrations, and analyzes their applicability conditions and technical limitations comparatively in terms of measurement accuracy, frequency response, and interference resistance. This paper further discusses future development trends in the combined measurement of linear and angular vibration. Future advances are expected to focus on two aspects for optimizing the combined measurement of linear and angular vibration: innovations in optical design and the integration of hardware with intelligent algorithms. In addition, a calibration system for the combined measurement of linear and angular vibration needs to be developed on the basis of absolute calibration using laser interferometry, so as to establish a complete traceability chain. Both contact and non-contact techniques are also expected to evolve toward greater system integration and scenario-specific customization to better adapt to the demands of complex operating conditions and practical field applications.

Key words: linear and angular composite vibration; multiple degrees of freedom; vibration sensor; frequency response; laser interference; machine vision; intelligent algorithm; system integration

收稿日期: 2025-11-18; 修回日期: 2026-04-12; 录用日期: 2026-04-13; 发表日期: 2026-04-28

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础科研项目(JSJL2024205XXXX)

引用格式: 李昱宪, 张大治. 线角复合振动测量技术研究综述[J]. 计测技术, 2026, 46(2): 40-59.

Citation: LI Y X, ZHANG D Z. Review of combined linear and angular vibration measurement technologies [J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(2): 40-59.



0 引言

作为状态监测、动态性能评估与优化的关键技术,振动测量广泛应用于机械工程^[1]、航空航天^[2-3]以及结构健康监测^[4]等重要领域。在实际工程中,线角复合振动是一类普遍存在的现象,其特征在线性振动与扭转振动耦合形成复杂的复合模态。该现象具有多种典型形式,如弯扭耦合、沉浮-俯仰耦合等,广泛存在于航空航天、土木工程及机械装备等领域,例如飞机机体的颤振现象。飞机颤振是一种气动-弹性-惯性耦合不稳定现象,当飞行速度超过颤振边界时,振动幅度迅速放大,机翼等结构的弯曲振动与扭转振动相互激励,最终导致飞机结构的破坏。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在早期飞机颤振测试的报告中记载了多起因颤振导致飞机结构损坏的案例^[5]。大跨度斜拉桥或悬索桥在风荷载作用下,也极易发生由竖向、横向弯曲与扭转耦合形成的颤振,严重时会造成桥梁损坏,例如著名的塔科马海峡大桥事故,因初始平移振动过度致使弯扭耦合颤振,导致桥体损坏^[6]。除此之外,高速旋转的机械设备运行时也会出现线角复合振动现象,如涡轮发电机转子在旋转时存在横向弯曲振动或径向振动,影响运转稳定性,导致机械疲劳。线角复合振动在多场景下表现出复杂性与潜在危害性,发展高精度、高效率的线角复合振动测量技术与分析方法,准确捕捉与辨识其动态响应,成为保障结构安全、优化系统设计与推动技术进步的重要手段。

相较线角复合振动测量,传统的单维度振动测量技术已经相当成熟。线振动测量方法有传感器法、激光干涉法^[7-8]、激光三角法^[9]、机器视觉法^[10]等;角振动测量方法有陀螺仪等传感器法^[11]、圆光栅法^[12]、激光干涉法^[13-14]、机器视觉法^[15-16]等。在校准领域,基于ISO 16063国际标准^[17-18],线振动传感器的校准频率范围为1 Hz ~ 10 kHz;基于衍射光栅的校准方法,校准角振动传感器的校准适用频率范围为1 Hz ~ 1.6 kHz。目前,各国计量机构普遍采用激光干涉原理,分别建立了线振动与角振动的溯源校准装置。直线振动校准方

面,德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)实现了0.4 Hz ~ 20 kHz^[19]的校准,最佳扩展不确定度为0.1%;日本计量研究所(National Metrology Institute of Japan, NMIJ/National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST)的校准装置覆盖0.1 Hz ~ 10 kHz的直线振动校准范围^[20];中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM)建立的线振动校准装置可实现0.1 Hz ~ 50 kHz的校准^[21]。角振动校准方面,德国PTB所建立的装置校准范围为0.3 Hz ~ 1 kHz,扩展不确定度为0.2% ~ 0.5%^[22];韩国标准科学研究院(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)研制的校准装置能够在8 Hz ~ 5 kHz条件下进行初级角振动校准^[23];NIM基于激光干涉法与圆光栅等技术建立了频率范围为0.000 5 Hz ~ 1.2 kHz的角振动校准装置^[24-26]。在多维度校准方面,德国PTB的三轴线振动校准装置频率范围为1 Hz ~ 1 kHz^[27];日本AIST与中国NIM皆利用三轴振动台与3台激光干涉仪系统进行三轴校准^[28-30],其中,NIM实现了5 Hz ~ 1.6 kHz的频率校准。由此可见,单一维度的线与角振动校准技术已相当成熟,且三轴线振动校准装置已取得实用化进展。国内外计量领域中线与角振动校准主要采用分离式方法,其优点是简化了校准过程,但难以再现实际工程中线角振动耦合的空间运动,导致传感器性能评估不全面。目前,国际上缺乏成熟的复合振动计量标准与溯源链,标准装置尚未建立。

随着航空航天、土木工程及高端装备制造等领域的发展,风洞颤振试验、大型结构现场监测、工业机械状态诊断等多样化的应用场景对振动测量技术提出了更高要求,需要振动测量技术具备较大范围、高精度、宽频带、线角参数同步获取等能力。现有测量技术在测量范围、复杂条件下的高精度测量等方面仍存在局限,难以完全满足在测试与维护监测等过程中的振动测量需求。因此,开展线角复合振动测量研究,对于更加全面地掌握结构动态特性、提高系统运行精度与可靠性具有重要意义。近年来,随着传感技术、光学测量与机器视觉等研究领域的快速发展,更多研

究聚焦于线角多维度的振动检测中,形成了基于传感器、激光多普勒测振(Laser Doppler Vibrometry, LDV)、机器视觉等技术的测量方法。

本文首先介绍线角复合振动各测量技术的原理,然后在对现有方法进行归纳总结的基础上,比较各类方法在不同应用场景下的适用性与局限性,最后对线角复合多维振动测量系统的未来发展方向进行展望,以为相关领域的研究人员在技术路线创新与测量方案优化方面提供参考。

1 接触式振动传感器

1.1 多轴加速度计

多个多轴加速度传感器组合可用于多自由度振动或线角速度测量。该方法可大致分为两类:①基于“刚体运动学”,通过测量刚体上多个点的运动,利用几何关系反演刚体整体的六自由度运动;②通过传感器的特殊布置(如对置或特定角度放置),利用物理关系分离运动分量,该方法主要用于旋转机械的线角振动测量。

复杂旋转机械在高转动工况下具有典型的线角复合振动特征,轴系柔度增大时齿轮系统会出现扭转—横向耦合,柔性支撑下线作用方向振动显著增强,斜齿轮还会表现出附加的轴向与摇摆运动。KANG M R等人^[31]通过在轴法兰上安装3个三轴加速度计(以 0° 、 90° 、 180° 的位置角切向安装),利用切向加速度信号消除重力分量,经二次积分得到扭转角位移;测量径向加速度信号,结合齿轮旋转角度,解算水平和垂直加速度,得到齿轮的横向运动参数。绕旋转直径的角加速度由轴向加速度信号的差分得到。研究中横向运动等直线振动的振幅在微米级或亚微米量级,摇摆与轴向运动振幅在微米量级。该研究团队利用多组三轴加速度计在不同位置、不同方向的测量结果,通过物理关系把扭转、横向、轴向和摇摆等分量从复合运动中分离出来。

若需要增加测量的自由度,可以通过增加1个三轴加速度计来设计布局构型,即利用4个三轴加速度计测量六自由度振动。利用刚体运动学和转换矩阵可得到振动信号。由运动学可知,任意加速度计输出 A_i 表达式为

$$A_i = [\ddot{R} + \dot{\Omega}L_i + \Omega\Omega L_i]\theta_i \quad (1)$$

$$A_i = [A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}, \dots, A_{i4}, A_{i5}, A_{i6}]^T \quad (2)$$

式中: $\ddot{R}$ 为载体质心加速度, Ω 为载体旋转角速度, $\dot{\Omega}$ 为载体角加速度, L_i 为第 i 个传感器在绝对坐标系中的安装位置, θ_i 为传感器的敏感方向。 $\ddot{R}$ 和 Ω 的计算公式为

$$\ddot{R} = [\ddot{R}_x, \ddot{R}_y, \ddot{R}_z] \quad (3)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\ddot{R}_x$ 、 $\ddot{R}_y$ 、 $\ddot{R}_z$ 分别为载体质心加速度在 x 、 y 、 z 方向上的分量, ω_x 、 ω_y 、 ω_z 分别为载体旋转角速度在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

焦健超等人^[32]设计了由4个三轴加速度计组成的阵列安装方案以测量六自由度复杂振动参数,三轴加速度传感器阵列方案如图1所示。该研究团队基于刚体运动学建立了4个传感器(共12个分量)的测量信号与载体运动参数中线加速度矢量、角速度矢量、角加速度矢量之间的数学模型,并通过仿真对该方法的可行性和误差特性进行分析。

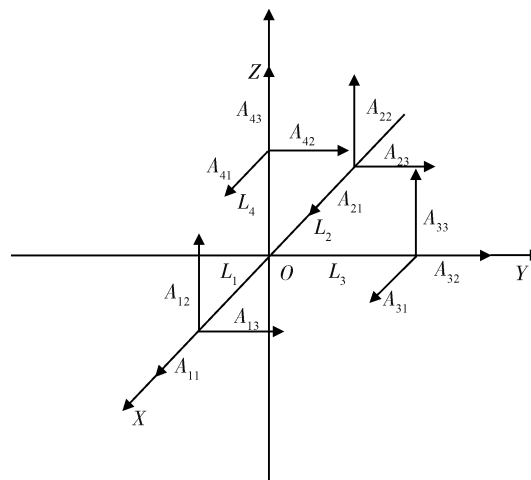


图1 三轴加速度传感器阵列方案

Fig.1 Design of a triaxial accelerometer array

针对传感器阵列法的积分累计误差问题,陈海龙等人^[33]沿用了文献[32]的4个三轴加速度传感器阵列构型,提出使用经验模态分解方法,根据各本征模态函数分量的频率特征及其与原始振动频段的对应关系,识别并分离出由积分漂移引入

的低频趋势项以及超出测试频段的高频误差成分,从而得到更接近真实运动的速度/位移结果,实验中角振动幅值为1 cm。与文献[32]主要关注阵列构型设计不同,陈海龙等人的研究专注于数据处理的后端误差抑制与信号提纯。叶嘉等人^[34]使用与图1相似的阵列安装方案(布局相同,坐标轴向上平行),研发了一体化的六自由度振动测量硬件装置。该研究团队向上平移传感器安装坐标系,设定4个加速度计在其各自坐标轴上的距离与基座高度关系,建立信号转换矩阵,推导出被测点(安装基座底部,原点)的六自由度加速度与4个三轴加速度计输出信号之间的信号转换矩阵,实现线加速度和角加速度的测量。经有限元与模态试验验证,在不高于160 Hz的频率条件下,线加速度测量误差小于1%,角加速度测量误差约为12.2%。

文献[35]的加速度计阵列排布与前文的研究略有不同,如图2所示,其中, l 为加速度计到原点的位置距离参数。该团队对该构型的运动状态进行了理论推导,并设计了具体的封装方法,利用自建的三轴六自由度平台对封装的加速度计阵列构型进行多自由度振动测试,结果表明:在50~250 Hz条件下,角加速度相对偏差平均值不超过2.7%,说明该方法具有较好的可靠性,在现场中低频振动测量与校准领域具有应用潜力。

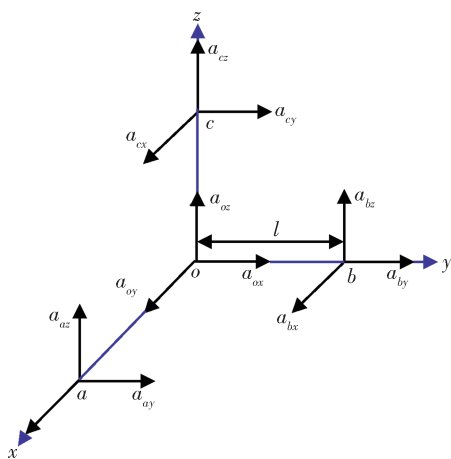


图2 文献[35]的三轴加速度传感器阵列方案

Fig.2 Triaxial accelerometer array proposed in reference[35]

随着微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)的发展, MEMS传感器凭借体积小、集成度高等优势,被广泛应用于多个领域,利用

MEMS传感器在运动坐标系中的输出信号与载体运动之间的几何对应关系,可从复杂的耦合运动中解调出线振动与角振动信息。MEMS传感器的核心工作机制:当外界力作用于芯片时,其微机械敏感结构产生微小形变,通过电容、压阻或压电等效效应将这种力学响应转换为电信号输出。KOENE I等人^[36]将两个MEMS ADXL356C加速度计在转子两侧对称安装,每个传感器测量径向和切向2个方向,借助重力分量进行零偏与增益校准。将2个对称点的加速度信号相加得到切向扭转加速度,将2个对称点的加速度信号相减得到切向横向加速度。计算横向信号的移动平均保留低频的重力与姿态信息以估计相位角,随后利用反正切求得轴瞬时旋转的相位角,最后旋转矩阵将横向振动分解为水平与垂直2个方向,从而完成高转动状态下线性振动与扭转振动信息的解耦提取。XU Y D等人^[37]在转子上安装三轴MEMS加速度计ADXL345,结合无线传输实现旋转机械的状态监测,获取高信噪比的旋转和横向动态响应,并利用正交输出构建解析信号,提取幅值和相位信息。该方法能够有效检测转子的早期故障。

在利用多轴加速度计进行多维振动测量的研究中,多数研究团队侧重于振动测量方法的提出,而对可测振幅上限未进行明确探索,其中,付强等人^[35]的研究有望推广应用于校准工作中。多轴传感器方法的精度依赖于“刚体运动学模型”的准确性与传感器信号的同步性。安装位置的标定误差、传感器轴间不对准或时序不同步,都会影响推导的矩阵模型,导致线加速度与角加速度的解算结果发生交叉耦合。在较大幅值的测量中,刚体模型可能会产生形变,影响模型的准确性。直接利用多轴传感器测量的优点在于成本较低,通过合理的阵列布局和误差修正方法,可以在较宽的频率范围内实现高精度的线加速度和角加速度测量。但该方法属于接触式测量手段,会在测量中引入附加质量。目前主流研究更倾向于发展集成化、小型化的惯性传感单元等传感器技术,可以在一定程度上解决多个多轴传感器带来的附加质量等问题。

1.2 集成化与新型传感单元

1.2.1 惯性测量单元

典型的惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)由多个MEMS传感器组成,如MEMS加速度计、MEMS陀螺仪等,加速度计充当惯性传感器,检测物体运动的线性加速度,而陀螺仪检测物体旋转的角速度^[38]。FUJARRA A L C等人^[39]针对海上结构流导致振动监测中成本高、现场应用困难的问题,结合光学追踪对比技术,验证了低成本IMU测量的可行性。该研究团队利用GY-87 10自由度IMU传感器模块,采用多位置静态校准法,用重力加速度和地磁场作为参考完成现场标定。该方法无需高精度设备,适用于现场校准,但本质上仍属于面向单传感器参数修正的校准方法。在信号处理中,利用卡尔曼滤波融合加速度计、陀螺仪和磁力计信息求取姿态角,再进一步构造四元数实现测量坐标系到全局坐标系的旋转变换,在姿态补偿基础上重构位移响应。研究结果表明:低成本IMU在经过标定与融合处理后,能够较可靠地获取频率、位移、姿态角和阻尼等参数,空气和水中试验的平均相对误差均控制在2.8%以内。实际测量验证中的平动最大位移峰值约为8 cm,横摇角/纵摇角最大峰值约为8°。但在水中六自由度试验中,观察到横摇角和纵摇角幅值存在放大现象,说明在多自由度耦合运动下,IMU对角运动分量的解算易受姿态求解误差和耦合项影响。张鹏飞等人^[40]针对传统单轴振动试验难以准确表征强非线性减振惯性组合在真实多维振动环境下传递特性的问题,发展了多输入-多输出理论,构建六自由度传递函数矩阵,利用输入自谱密度矩阵与输入-输出互谱密度矩阵求解结构传递特性。在一次振动加载中不仅获得了完整六自由度传递函数矩阵,也实现了自由度间的交联特性的分离识别。结合坐标变换,将参考点处定义的六自由度振动条件转换为实际控制点的线加速度控制量,实现了功率谱密度矩阵的闭环控制。与单轴实验相比,惯性组合减振系统的传递特性受振动自由度和振动量级影响显著,六自由度环境下角振动及线角交联特性表现出明显差异。该研究为惯性组合在真实六自由度复合振动环境下更准确地获

取传递特性、开展更接近真实工况的线角复合运动试验提供了依据。

IMU能够直接测量加速度与角速度,具有动态范围大、体积小、重量轻、易于集成与量产等优点。但其性能对环境温度较为敏感,硅材料的热膨胀效应与电学参数的温漂共同导致器件参数随温度发生变化,造成输出漂移。目前,关于惯性单元的研究多集中于测量精度的提升或新型架构的提出,对于大振幅、复合振动条件下的动态测量与校准研究相对不足。在校准溯源方面,惯性单元缺乏专用线角复合振动标准装置,目前多依赖于单轴振动台校准,溯源链尚不完备。靠分立的单轴校准或单轴试验不能完全表征其在实际工况中的动态特性,需要补充线角复合运动条件下的同步加载、同步识别和交联特性评估。

1.2.2 光纤布拉格光栅传感器

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)应变传感器也能用于线角振动的测量,KONG C Y等人^[41]提出一种基于光纤布拉格光栅传感器的实时虚拟传感方法,通过Birkhoff插值法建立位移与应变和旋转角与应变之间的代数关系,并利用追踪微分器从噪声测量中恢复应变信号及其一阶和二阶导数,从而实时估计角速度和加速度。该方法无需复杂的模态分解,可由应变信号直接重构位移、转角、角速度和加速度,同时适用于静态偏置和释放后的动态振动过程,在柔性梁结构线角复合参数同步识别方面具有较好的实时性与可实现性。该研究团队开展的实验中,位移的幅值在5 cm左右(属于较大位移),FBG传感阵列各通道同步采集,具有很好的时间同步性。黎琪慧等人^[42]针对狭小空间对微振动监测的需求,提出一种微型化三轴光纤布拉格光栅振动传感器设计方法。通过三轴线振动测量并结合双测点加速度差分与积分计算,实现了微角振动参数的间接反演,体现了由多测点线振动信息反演角振动参数的转换思路。在标准振动台上通过已知激励加速度进行幅频响应和灵敏度标定,结果表明:传感器在0~700 Hz频段内具有较好的平坦响应,且角位移测量分辨力优于0.21 μrad 。该传感器表现出轻量化的优点与较好的三轴一致性,为实现微型、轻质、

三轴集成的线振动与微角振动测量提供了一种有效的技术方案。

FBG 传感器可测量结构表面的应变, 通过特定封装结构与力学模型换算成位移、转角、角速度、加速度等参数实现解耦。FBG 传感器具有厘米级位移和度级角度的测量能力, 除此之外, 还有抗电磁干扰强, 可实现分布式测量和长时间检测的优点, 但测量目标振幅过大可能导致几何非线性问题, 引入误差。

2 激光干涉法

2.1 双光束激光干涉

双光束激光干涉的基本原理是: 激光干涉仪发出两束测量光束, 二者距离固定、平行且参数已知, 通过两束光测量物体表面两点的线速度, 根据两点速度差值与光束距离之间的关系可计算出被测物体的角速度, 从而实现旋转轴角运动参数的非接触测量^[11]。双激光干涉仪角位移测量原理如图3所示。

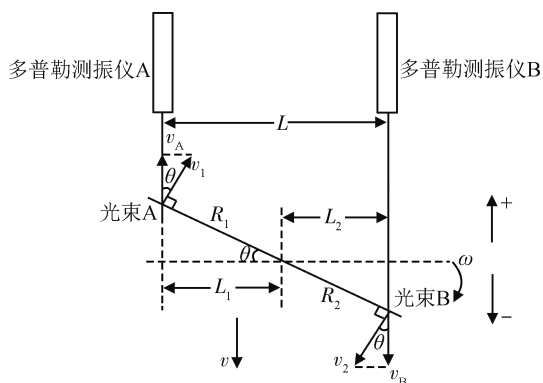


图3 双激光干涉仪角位移测量原理图

Fig.3 Schematic of angular displacement measurement principle using a dual-laser Doppler vibrometer

图3中, v 为刚体沿轴向运动速度, ω 为物体旋转角速度, v_A 和 v_B 分别为激光多普勒测振仪A和B测得的瞬时测量速度, R_1 和 R_2 分别为转轴中心到测振仪A和B光束方向的距离。激光多普勒测振仪A和B可分别测量激光束方向上的切向速度 v_1 和 v_2 , 即

$$v_A = v_1 \cdot \cos \theta + v = \omega \cdot R_1 \cdot \cos \theta + v \quad (5)$$

$$v_B = -v_2 \cdot \cos \theta + v = -\omega \cdot R_2 \cdot \cos \theta + v \quad (6)$$

且存在几何关系

$$L_1 = R_1 \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$$L_2 = R_2 \cdot \cos \theta \quad (8)$$

$$L = L_1 + L_2 \quad (9)$$

式中: L 为双激光多普勒测振仪之间的距离。

可得

$$v_A = \omega \cdot L_1 + v \quad (10)$$

$$v_B = -\omega \cdot L_2 + v \quad (11)$$

$$\omega = \frac{v_A - v_B}{L} \quad (12)$$

获得 ω 后, 通过积分可计算得出角位移。

BELL J R 等人^[43] 针对激光多普勒测振仪在测量旋转结构振动时的实际测量内容, 开展了系统性理论分析, 建立了单束激光以任意方向入射具有六自由度振动的旋转轴时, 所测速度的完整解析模型。研究表明: 测量结果由六组振动参数集构成, 单束激光无法直接分解各集合内部的独立运动分量, 难以实现六自由度运动的直接解析。该理论模型可扩展至多光束测量及更复杂的结构, 为旋转机械振动的精确光学测量提供了理论基础与方法框架。随后, BELL J R 等人^[44] 研究了多光束配置下旋转结构振动的测量问题, 针对平行光束布置提出了差速灵敏度理论, 证明该配置能有效抑制平移振动集的干扰, 为实现扭转、俯仰与偏航等旋转振动分量的测量提供了理论基础。2004年, ROTHBERG S 等人^[45] 系统阐述了激光多普勒测振技术应用于旋转轴六自由度振动测量的综合理论模型与实现方法。在前期单光束理论基础上, 进一步归纳了平行双光束配置的差速测量模型, 为旋转轴平移振动与旋转振动的激光测量及后处理提供了统一分析框架。文献[45]详细给出了单光束测量中各振动集的数学表达与部分振动集的隔离条件, 利用单光束或双光束的布置方式可以分离不同的振动集。图4为该团队为研究测量旋转、俯仰等姿态而设计的平行激光束对的布置方案。

为解决 LDV 在测量旋转机械的径向和俯仰/偏航振动时遇到的交叉敏感性问题, HALKON B J 等人^[46] 提出了一种基于频率域处理的后处理算法, 包含了恒定角速度解析算法和校正算法, 利用两路正交 LDV 输出信号以及独立的角速度测量信号, 对非同步的径向及俯仰/偏航振动分量进行恢复,

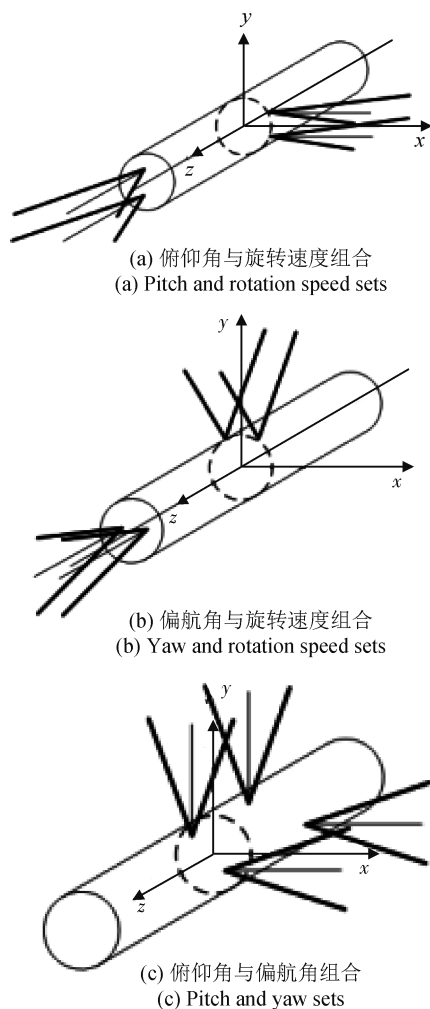


图4 测量旋转、俯仰等姿态时平行激光束对布置
Fig.4 Configuration of parallel laser beam pairs for roll and pitch measurement

并基于四冲程、四缸、2.0 L汽油发动机曲轴皮带轮等一系列物体验证了此方法的有效性。

CHEN L等人^[47]的研究聚焦于角振动测量,利用一对激光多普勒测振仪产生的两束平行光入射旋转目标表面,数据处理单元采集两台LDV对2个人射点沿光束方向的速度测量值,通过双激光束之间的关系解析目标的旋转角位移和平移位移,最后对误差进行补偿。实验结果表明:该方法可进行 $\pm 10^\circ$ 的测量,误差不超过 0.0362° ;结合多项式误差补偿技术,测量误差可降低至 0.0088° 。该研究团队所使用的实验装置旋转台经中国计量科学研究院标定,保证了角位移测量的可溯源性。

文献[13, 48-49]中的双光束激光干涉方法主要用于测量角振动(扭转振动),其优势在于:角

度信息来源于两路信号的差值,可有效抑制共同作用于两个测点的共模噪声,故对微小幅值的角振动极为敏感,非常适用于扭转、俯仰或偏航等旋转振动的检测。然而,现有研究大多聚焦于低频至中频、小幅值的动态振动,对于伴随较大线位移或大角位移的复合振动场景,尚未开展系统性的实验分析与方法验证,因此如何实现该类大位移复合振动的有效测量,仍是当前亟待深入研究的课题。应用双光束激光干涉法时,对光路对准与信号同步具有较高要求,两束激光须严格平行,否则将引入几何误差,影响测量精度。此外,虽然双光束激光干涉法已应用于角振动校准,但目前基于该方法的线角复合振动校准装置尚不完善,也尚未制定相关的校准规范。

2.2 连续扫描激光多普勒测振

连续扫描激光多普勒测振技术(Continuous Scanning Laser Doppler Vibrometry, CSLDV)是一种非接触、高精度振动测量方法,其核心思想是令激光束沿结构表面预定轨迹连续移动,从而在单次测量中获取振动信息的空间分布。CSLDV基于激光多普勒原理,当激光束被运动表面反射时,其回波频率相对入射频率产生偏移,偏移量与表面沿激光视线方向的振动速度分量成正比,通过检测该频率偏移可推算振动速度。在连续扫描模式下,精确控制扫描镜使激光光斑沿预设路径遍历待测目标,采集到的时域信号中包含了光斑空间位置信息,随后对时间序列信号进行解调与重构,即可获得结构不同位置处的振型与动态响应。

CSLDV技术可分为短扫描和长扫描两大类,具体取决于激光扫描的尺寸是小于还是大于被测表面振动的特征波长。长扫描CSLDV技术令激光束沿结构表面大范围移动,可同时测量多个位置的单自由度振动,通过后处理提取结构的振型、固有频率及阻尼比等模态参数。短扫描CSLDV技术基于多种扫描模式沿特定轨迹(如线性、圆形、锥形等)进行扫描,可用于测量扫描区域的平移和旋转刚体运动。相较于长扫描技术,短扫描技术因操作和程序较为复杂,不适用于工业场景^[50]。在短扫描中,直线扫描方式的扫描镜驱动信号为一个正弦信号;圆形和锥形扫描方式的扫描镜驱动

信号为两个同频的正弦信号。CSLDV 的短扫描方式如图 5 所示。

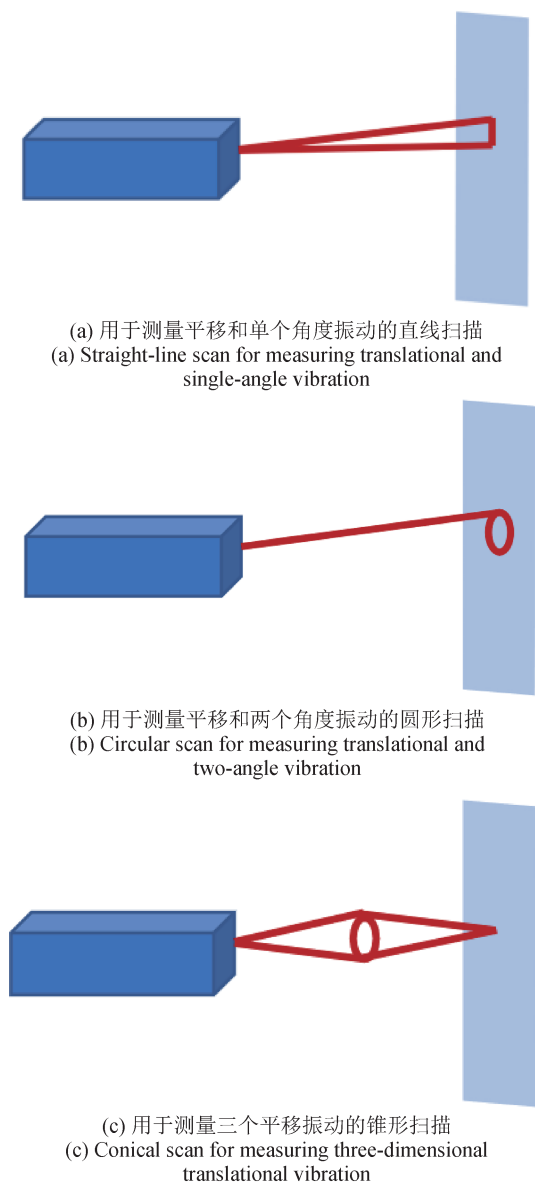


图 5 CSLDV 的短扫描方法示例

Fig.5 Example of a short-scan method for CSLDV

小半径圆扫描能够同时提取 1 个平移振动分量和 2 个主角振动分量，可进一步确定振动主方向。STANBRIDGE A B 等人^[51]提出了一种基于连续扫描的方案，使用短线或小圆即可同时测量平移和旋转振动。该研究推导并验证了平移速度和旋转速度分别与被测频谱中的中心谐波及其 2 个边带有关。在传递函数的计算中，平移振动以激励力信号为参考，而角振动则以激励力信号与扫描镜驱

动信号的乘积作为参考。

圆扫描、直线扫描和面积扫描可以通过时域解调或频域侧边谱分析直接提取正弦激励下结构的运行偏转形状，由模态分析获得模态形状，该方法也可扩展至角振动、矢量振动等测量场景。STANBRIDGE A B 等人^[52-53]采用上述连续扫描的方法进行模态测试与局部多自由度振动测量。之后，SALMAN M 等人^[54]将此前主要用于模态测试的短扫描 CSLDV 方法扩展应用于低频宽带随机振动测量领域。激光束以 200 Hz 的高频率进行扫描，从单个连续扫描激光测振仪的信号中解调分离平移速度与角速度，验证了低频 (10 ~ 50 Hz) 宽带激励下的振动。该研究团队将此方法进一步应用于测量人体手部因疲劳而产生的震颤，实现了对手部平移和角运动的同步、非接触式测量。YANG S F 等人^[55]利用谐波传递函数将测得的平移和旋转速度与输入激励关联，以实现更全面的模态分析。激光束沿结构表面的小圆路径连续扫描，测量信号中包含结构的平移速度分量以及因旋转产生的附加速度分量。在局部区域可近似为刚体运动时，在频域内能够识别并分离平移与旋转响应，再推导获得各测点的平移和旋转速度或模态信息。连续扫描激光多普勒信号频谱如图 6 所示，平移速度信息对应中心频率 ω_B ，旋转信息对应两侧 $\omega_A - \omega_B$ 和 $\omega_A + \omega_B$ 。

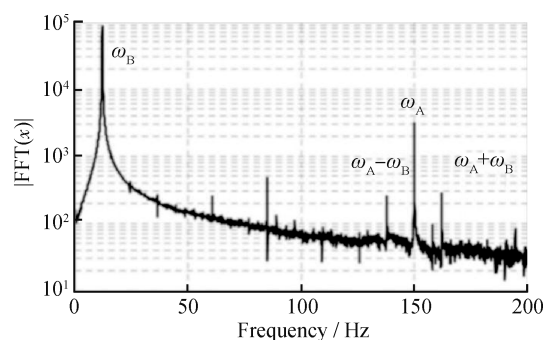


图 6 连续扫描激光多普勒信号频谱

Fig.6 Spectrum of the continuously-scanned laser Doppler signal

锥形扫描可在 1 个点上实现 3 个平移自由度的测量，不聚焦在测量点上的锥形扫描可获得 5 个自由度的信息，测量中使用共焦透镜可能会导致面内旋转自由度的丢失^[56]，因此单次圆锥扫描无法提供足够的信息来测量出第 6 个自由度，需要进行

第2次测量来克服信息不足的问题。通过2个反射镜控制特定的激光入射角度可以测量之前丢失的面内旋转。GIULIANI P等人^[57]基于STANBRIDGE A B等人提出的扫描方式构建了扫描仪,并进行了面内旋转的实验验证。

HUANG Z等人^[58]用双正弦扫描CSLDV方法,让激光点沿预设李萨如轨迹扫描被测表面,使输出信号在激励频率两侧形成边带分量,基于边带幅值与多项式系数之间的关系,重构了法向平移自由度的变形形态,两个面外旋转自由度可通过多项式函数求导获得。该方法在原理上减弱了传统有限差分法固有的噪声放大效应,相比离散点扫描耗时大幅度减少,提高了效率,适用于如机翼、舵面等板结构的测量。

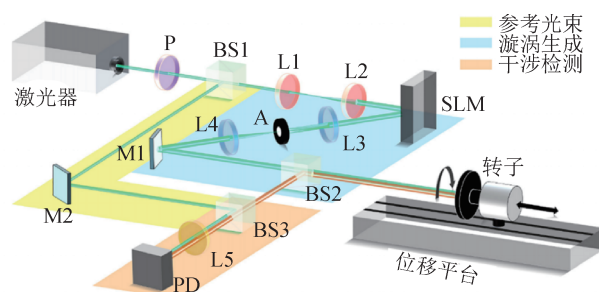
在各科研团队关于CSLDV的研究中,普遍缺乏对可测量线性振动与角振动范围的明确界定与系统阐述,同时,现有扫描方法的研究主要面向实际应用与现场测量需求,尚未有效延伸至校准溯源领域。CSLDV技术的优势在于可以利用短扫描同步解耦得出线角振动参数,可进行模态测试与全场测量,但面对复杂结构几何形状时,其扫描路径的规划和实现仍是一大挑战。基于扫描频率基波与边带信息的解调分离,CSLDV可实现平移与旋转自由度的同步测量。扫描过程中的轨迹误差、速度波动或时序抖动都会直接调制到光学多普勒信号中,导致解调出的线振动与角振动分量相互串扰。与LDV相比,散斑噪声对CSLDV的影响更大,因此,从CSLDV信号中获取精确的振动频率和变形形状等信息更具有挑战性。

2.3 其他激光干涉技术

RASOULI S等人^[59]基于零差干涉原理搭建激光光路,利用一维阵列探测器记录运动干涉条纹的连续一维轮廓,并通过离散傅里叶变换分析其时空相位分布。根据相位均值变化推导得到面外位移,根据相位沿空间方向的瞬时斜率变化推导得到角振动,实现物体面外平移振动和旋转振动的同时测量。该系统结构简单、成本较低,可测振动频率,其最大可测振幅和角振幅受阵列探测器采样频率限制和像素间距限制。该研究团队开展实验测量冲击和风吹引起的振动,振幅在亚微米级。

陈家键等人^[60]提出一种基于双频激光干涉的三自由度测量系统,用于测量光学平台三自由度的微振动。该系统通过双频激光干涉仪检测平面镜上3个点的位移,并利用几何关系计算得到平动位移、扭转角以及俯仰角。系统主要角振幅测量幅值为 ± 3 mrad,扭转角和俯仰角分辨力分别为 $5.05 \mu\text{rad}$ 和 $4.69 \mu\text{rad}$,平动分辨力达 5 nm ,与标准地震计的同步测量对比证实了该系统平动测量的准确性。该系统具有非接触、高分辨力、可溯源等优点,为光学平台的振动补偿和稳定性优化提供了可靠方法。LV Q等人^[61]利用光栅多普勒频移原理和位置灵敏探测器,通过双频激光实现了光栅矢量方向与法线方向的二维线性位移的测量,俯仰、偏摆、滚转的三维角度变化由位置灵敏探测器测得,其二维位移测量分辨力优于 4 nm ,三维角度测量分辨力优于 $1''$ 。该方法的位移测量范围仅受限于光栅的物理尺寸,具有较大的扩展潜力。该测量方法可扩展应用于低频微振动场景。

REN Y等人^[62]结合共轭光学涡旋的自干涉与平面波的外部干涉,提出双干涉方案,实验光路如图7所示。频谱上会同时出现2个对称的边带信号,其中心频率是线性多普勒频移,2个边带与中心的距离均为旋转多普勒频移,通过信号处理,可以直接且独立地解算出线速度和角速度,从而实现复合运动解耦。该方法的旋转与平动速度测量的相对误差分别低于 2.9% 和 2.8% ,为自由空间运动目标的检测提供了新途径。



注: P为偏振器; BS为分束器; L为透镜;
M为反射镜; SLM为空间光调制器;
PD为光电探测器。

图7 复杂运动速度测量的实验室实验

Fig.7 Laboratory experiments on the speed measurement of complex motion

3 机器视觉技术

3.1 单目视觉

单目视觉方法的原理：在待测振动体上固连一个具有高对比度且已知精确尺寸的视觉标记(如编码图案、棋盘格等)，使用经过标定的单个相机以固定帧率采集标记的振动运动图像序列，利用亚像素级图像处理算法从序列图像中高精度地提取并跟踪标记中的特征点、边缘等几何信息，将特征点的图像坐标通过相机标定模型和透视几何原理转换为物理世界的三维坐标或姿态信息，从而解算出振动体在各个自由度上的平移和角度随时间的变化。若振动仅发生在平面内，则可通过简单的投影关系和标定因子直接得到物理量；若涉及离面运动(如Z向平移及俯仰、偏航、滚转)，则需依赖标记的已知三维几何尺寸和透视投影模型进行三维姿态反解。测量系统结构如图8所示^[63]。

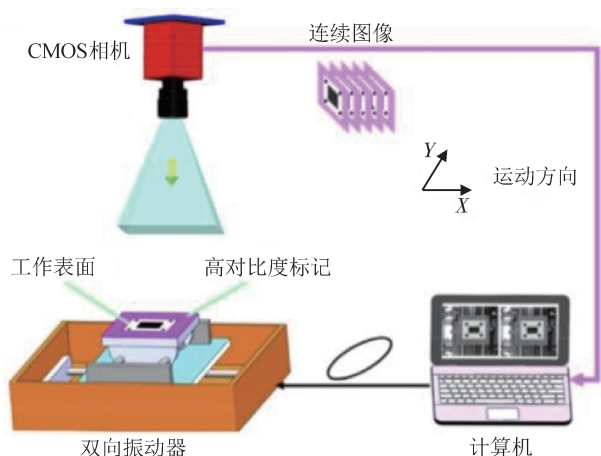


图8 测量系统结构示意图

Fig.8 Sketch of the measurement system

单目视觉领域有关线角振动测量的研究大致可分为两类：① 特定场景或物体测量方法研究；② 有关校准或溯源的研究。在针对特定场景或物体研究的测量方法研究中，为解决土木工程结构三维位移和旋转测量的实际应用问题，CHANG C C等人^[64]提出一种利用单个摄像机的视频测量方法，对结构平面靶标的3D平移与旋转进行同步测量。该研究团队利用平面标定板在现场获取相机的内参，从而建立三维相机坐标与二维图像坐标之间的映射关系。通过处理记录的靶标图像序列，结

合矩阵解算出三个方向的平移和旋转。实验结果表明：该方法覆盖线性位移测量振幅约为 ± 20 mm，旋转角度测量幅度约为 $\pm 4^\circ$ 。但是，当测量旋转导致目标沿图像法向平移时，该方法的误差较大。该研究团队基于计算机视觉领域中改进的Harris角点检测和直接线性变换等成熟算法，构建了一个适用于土木工程领域的、更简单、更经济的单相机三维运动测量方法。

针对旋转机械的状态监测与故障诊断问题，2019年，ZHONG J F等人^[65]提出了一种基于视觉的非投影复合条纹图案的视觉方法，将复合条纹图案贴附于转轴表面，通过对条纹信号进行频域分析，提取两种条纹的周期密度分量，并利用其比值解算旋转角度，再结合互相关方法精确估计轴向位移，从而实现瞬时转速与轴向振动的同步非接触测量。该研究团队开展仿真验证了1 mm振幅轴向振动条件下该方法的有效性；在实验中该方法则识别出约20 ~ 380 μm 的轴向振动幅值，并在58 ~ 1 300 r/min的条件下实现了转速与轴向振动的测量，为旋转机械的线角振动一体化监测提供了有效的非接触解决方案。复合条纹图案系统如图9所示。

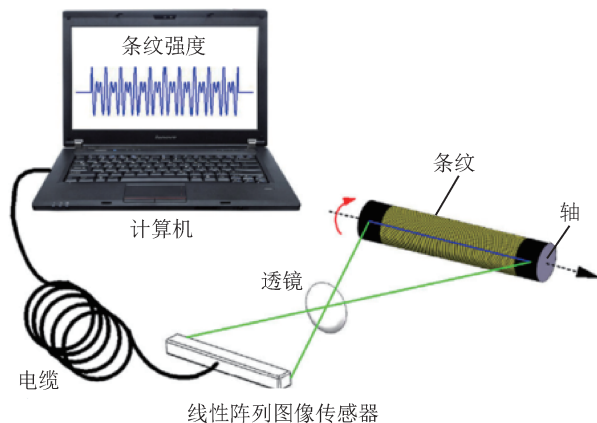


图9 复合条纹图案系统

Fig.9 Schematic diagram of the composite stripe pattern system

绳索、缆索等柔性结构振动形态复杂，常包含平移与旋转运动的耦合。ZHANG Y C等人^[66]提出一种针对钢丝绳的视觉测量方法，通过一种基于投影最小化的方法自动定位钢丝绳的轴心位置和半径，据此计算出横向位移，并根据钢丝绳的

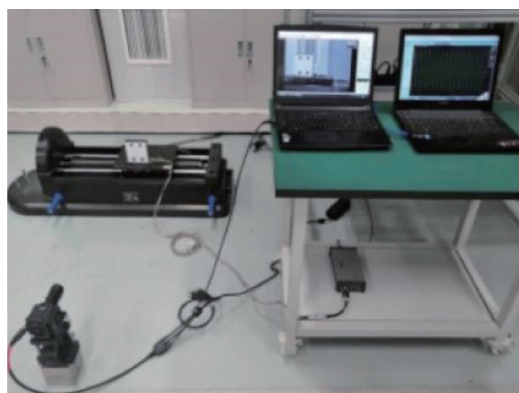
几何特性构建纵向-旋转变换函数,将复杂的空间运动转化为可求解的参数,利用改进的Lucas-Kanade算法进行迭代优化求解,从图像序列中跟踪计算出纵向位移和旋转角度。在50 frame/s的相机帧率下测量矿山绳缆的低频振动,已验证的横向位移与纵向位移振幅约为10 mm,最大旋转角度约为 12° 。该方法在模拟平台和现场环境中均具有良好的精度和可靠性,适用于起重系统的故障诊断与振动控制。

随着深度学习在计算机视觉领域的发展,有研究人员尝试将其引入多自由度振动的测量中。WANG Y Z等人^[67]基于单目计算机视觉,利用UNet3+全卷积网络提取特定设计的非对称人工目标,并结合旋转矩阵与平移矩阵计算,实现六自由度位移解算。试验中设置相机帧率30 frame/s,输入结构运动频率范围为0.1~0.2 Hz,实验输入幅值最大位移振幅为6 cm,角度位移振幅为 8° ,在平移和旋转位移测量中的平均均方根误差分别为0.106 mm和 0.115° ,该方法在非平面方向的位移测量方面表现出较高精度,但受室外各种环境因素影响(如雨天导致图像模糊、夏季热对流引起空气折射和时变畸变等)很大。

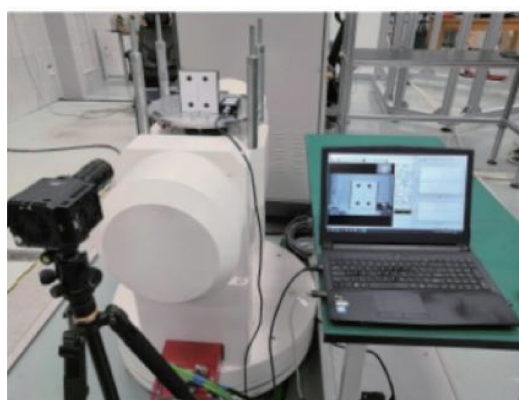
近年来,在振动计量与校准领域,不少团队致力于研究基于视觉的多自由度振动校准方法。例如,ZHANG Y等人^[68]提出了一种基于空间到平面解耦的六自由度运动测量方法,通过激光与投影屏系统将空间运动映射到平面,形成一个直角三角锥模型。结合图像处理与坐标变换,实现了3个方向位移和3个方向旋转的高精度同步测量。实验中使用最大帧率为540 frame/s的相机,在正弦条件下验证系统约 ± 10 mm的位移幅值、约 $\pm 2.5^{\circ}$ 的角位移幅值。该方法在0.1~1 Hz条件下具有较高的测量精度和可靠性,位移测量误差不超过0.21 mm,旋转角度误差不超过 0.045° 。该方法避免了复杂的立体匹配和大量数据计算,所使用的系统结构简单、成本低、灵活性高,为六自由度运动测量与溯源提供了新的思路。YANG M等人^[69]通过单个CMOS相机捕捉固定于激振器工作台上的高对比度标记的运动序列图像,利用改进的线段检测算法(Line Segment Detector, LSD)从标记图像

中提取亚像素级的特征线段。通过计算当前特征线与参考特征线之间的平均垂直距离获得线振动参数,通过计算二者夹角获得角振动参数。摄像机以0.5~500 frame/s的图像采样帧率捕获标记的运动序列图像,在线性0.05~10 Hz和角度 $0.01 \sim 5$ Hz的振动条件下,将该方法的测量结果与激光干涉仪、地球重力法和圆光栅法的测量结果进行对比,结果显示单目视觉法能够克服激光干涉法在低频区域的局限性。YANG M等人^[63]结合了Zernike矩的亚像素边缘提取技术和简单的解耦模型,提出一种基于单目视觉的平面运动轨迹测量方法。使用CMOS相机采集高对比度标记的运动序列图像,进行亚像素边缘提取后,用最小二乘法拟合出每帧图像中的长边和短边,通过计算这些边与第1帧参考边的空间距离和角度差推导得到位移与旋转角。设置10~500 frame/s的图像采集帧率,在0.05~20 Hz频率条件下,验证最大位移幅值约为82.222 mm,在0.001~10 Hz频率条件下验证最大角度约为 5.03° 。该方法的位移测量扩展不确定度为0.266%,角度测量扩展不确定度为 0.098° ,分辨力分别为 $0.1 \mu\text{m}$ 和 0.0001° ,且该方法的测量结果与激光干涉仪和圆光栅法的测量结果一致性较好。基于机器视觉的低频线角振动校准与多分量振动校准装置如图10所示。

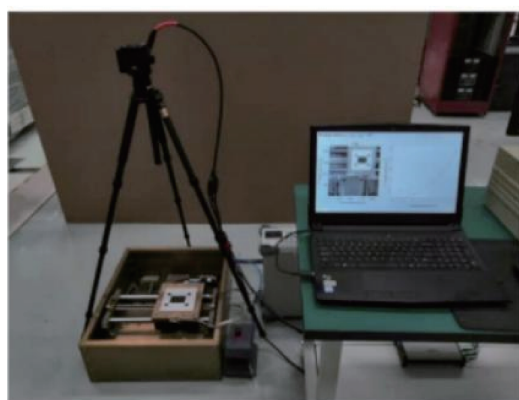
WU Q S等人^[70]设计的视觉标记含双同心环与X型角点,该研究团队采用改进的Harris角点定位算法进行亚像素级X型角点定位,结合专用的平面与空间运动解耦模型有效分离并量化振动中的线性和旋转分量,通过正弦近似方法优化位移拟合。设置相机图像采集帧率为5~100 frame/s,开展测量实验,结果表明:该方法能够同时完成平面和空间运动的解耦测量,成功测量了平面运动最大约60 mm线位移和 15° 角位移,以及空间运动最大约60 mm线位移和 30° 角位移。该方法的测量结果与传感器方法和圆光栅方法的测量结果展现出较高的一致性。未来,该方法可被应用于校准多轴线性和角振动传感器以及由它们组成的惯性测量单元。陈光贵等人^[71]提出了一种基于旋转运动激励的线角振动传感器动态校准方法,该方法通过数据融合控制算法,使旋转装置在匀速转动时提



(a) 线振动传感器校准系统
(a) Linear vibration sensor calibration system



(b) 角振动传感器校准系统
(b) Angular vibration sensor calibration system



(c) 多分量振动传感器校准系统
(c) Multi-component vibration sensor calibration system

图 10 基于机器视觉的低频线角振动校准与
多分量振动校准装置

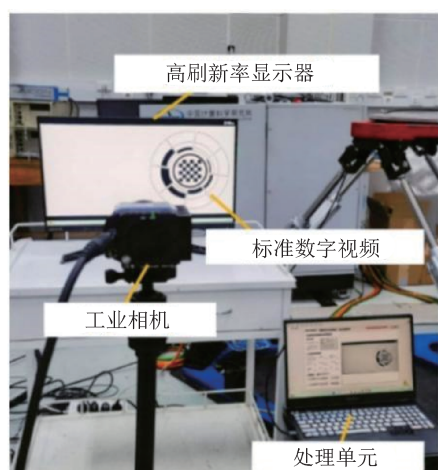
Fig.10 Low-frequency linear and angular vibration calibration
and multi-component vibration calibration setups
based on machine vision

供峰值恒为 $1g$ 的线加速度激励, 在非匀速转动时产生角加速度激励, 从而在同一平台上实现了线、角振动传感器的统一校准。校准时, 采用视觉编码器解码测量转角信息, 并结合旋转运动模型计

算线加速度与角加速度激励, 并利用正弦逼近法解算传感器灵敏度。实验表明: 在 $0.01 \sim 5 \text{ Hz}$ 条件下, 角振动传感器灵敏度的最大相对标准差为 0.206% , 在 $\text{DC} \sim 10 \text{ Hz}$ 条件下, 线振动最大相对标准差为 0.021% , 验证了该方法在提升校准效率与一致性方面的优势, 为建立统一的线角振动计量体系提供了新思路。但该方法目前尚不能进行复合振动的校准, 只能单独对线、角传感器分别进行校准。

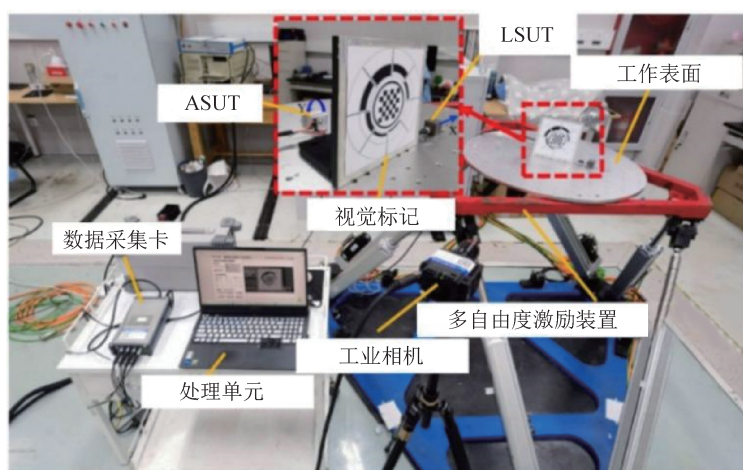
MO S F 等人^[72]提出一种面向单目视觉线性与角度振动测量的数字化计量溯源方法, 该研究团队建立了标准数字振动视频数据库和通用不确定度评估模型, 设计了棋盘格与环形编码的特殊视觉标记, 其中, 角点用于标定相机和二维平面线振动位移测量, 棋盘格以外的编码环图案和提取的特征线斜率用于确定标记的旋转角度, 舍入误差修正模型用于提高测量精确度。使用 OS10-V3-4K 高速相机, 将其采集帧率设置为视频帧率的 3 倍, 实现了 $0.01 \sim 10 \text{ Hz}$ 频率条件下, 线性位移幅度为 $60 \sim 200$ 像素、角位移的幅度为 $15^\circ \sim 90^\circ$ 的测量。实验结果表明: 该方法的线性和角度最大相对偏差分别低于 0.070% 和 0.069% , 扩展测量不确定度小于 0.093% 。该研究建立了平坦的溯源链, 支持振动传感器的现场校准, 显著推动了振动计量体系的数字化与标准化进程。基于机器视觉的线性和角度振动标准视频溯源与校准系统如图 11 所示。

数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 方法利用物体表面人工制备的随机散斑图案, 通过分析数字图像的变化实现测量^[73]。通过分析物体表面散斑图案在变形前后的图像变化, 利用相关算法匹配计算位移与应变。DIC 具有全场、非接触式测量的特点, 多用于测量振动物体的位移、角度与全场模态分析, 搭配高速相机可实现振动频率的测量^[74]。为了满足大位移与旋转的测量需求, 有研究人员基于二维数字图像相关 (Two-dimensional Digital Image Correlation, 2D-DIC) 的方法实现了运动参数的高精度提取。XIE P 等人^[75]基于环形投影的双尺度数字图像相关方法, 在整像素尺度上初始估计, 在亚像素尺度上优化结果,



(a) 基于机器视觉的线性和角度振动测量的标准数字视频溯源系统

(a) Standard digital video-based traceability system for MV-based linear and angular vibration measurement



(b) 基于机器视觉的线性和角度振动校准系统

(b) MV-based linear and angular vibration calibration system

注: 被测线性传感器 (Linear Sensor Under Test, LSUT); 被测角度传感器 (Angular Sensor Under Test, ASUT)

图11 基于机器视觉的线性和角度振动标准数字视频溯源与校准系统

Fig.11 Standard digital video-based traceability and calibration system for MV-based linear and angular vibration measurement

获得大平移和旋转的运动参数, 水平最大位移为312像素(约10.358 cm), 垂直最大位移为649像素(约21.547 cm), 绝对误差不超过0.05像素; 测量旋转角度达 180° , 绝对误差不超过 0.05° 。立体数字图像相关(Stereoscopic Digital Image Correlation, stereo-DIC)一般采用2台或多台相机, 基于双目视觉原理实现三维形状、位移及姿态的全场测量。为解决传统双相机系统成本高、同步难的缺点, YU L P等人^[76]提出了一种仅使用单台高速CMOS相机的stereo-DIC方法。该方法利用由分光棱镜、带通滤波片和平面镜组成的伪立体视觉光学装置, 将记录的彩色图像直接分离成红色和蓝色通道子图像, 进一步恢复全场3D形状和变形。在风扇转速测试中, 高速相机帧率设置为20 000 frame/s, 得到全场垂直位移及特征点位移, 并由位移周期推算出风扇转速, 叶片边缘点位移幅度可达50 mm以上, 证明该系统能够实现测量厘米级的高速动态测量。除此之外, 该研究团队还通过铝板振动实验与气球爆炸实验证明了此方法的振动测量能力与瞬态3D形状与形变测量能力。

单目视觉系统的构成较为简单, 仅需要1台相机, 成本较低且不需严格同步, 但测量维度受限, 通常只能测量二维平面内的平移, 可以借助光学

元件构建的特殊光路构造“伪双目”系统实现三维测量, 也可以利用已知的结构模型、运动模型或空间模型反算三维信息。单目的视觉方法在振幅与频率方面的测量能力受硬件物理特性的制约, 相机的视场与分辨力决定了可测的最大空间位移范围, 目标移出视场将导致测量中断。相机帧率则影响可捕捉的最高振动频率, 对于高频振动, 有限的帧率会导致时间混叠; 为了捕捉快速运动提高曝光速度, 又可能引发图像亮度不足或运动模糊, 影响信噪比。目前, 单目视觉振动测量方法多集中于低频振动的研究, 若要进行更高频率的振动测量, 需要配备高速相机。近年来在机器视觉领域, 高速相机帧率分布广泛, 针对常规工业检测的主流相机帧率为100~1 000 frame/s; 适用于高速输送带或运动分析的相机帧率为1 000~10 000 frame/s; 在微秒级运动捕获、工业瞬态测试领域, 相机帧率可达100 000 frame/s甚至更高, 主要服务于极端高速场景。

在校准领域, 以视觉系统作为校准基准难以与激光干涉法一样直接溯源到光波长这一自然基准, 该方法针对不确定度的评估较为复杂, 不确定度来源可能包括相机标定误差、镜头畸变、散斑/特征质量、照明波动等方面, 相较激光干涉

法,视觉系统建立不确定度传递体系难度较大。

3.2 双目视觉

双目立体视觉的振动测量基于三角测量原理,即使用2台经过精确标定与同步的相机,对同一时刻左右相机拍摄的图像进行立体匹配。根据同一点在2个图像中的像素位置,利用相机间的几何关系直接解算出该点的三维空间坐标。通过分析该坐标在时间序列上的变化,即可得到精确的三维振动信息。双目三角测量原理如图12所示。

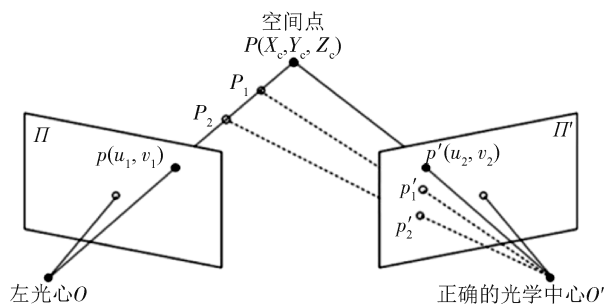


图12 双目三角测量原理

Fig.12 Principle of binocular triangulation

图12中,空间点 P 在左相机像平面上的投影点为 p ,在右相机像平面上的投影点为 p' 。连接左相机光心 O 与像点 p 得到一条射线 Op ;连接右相机光心 O' 与像点 p' 得到另一条射线 $O'p'$ 。理论上,这2条射线在空间中的交点即为空间点 P 的真实位置。已知相机内参和外参后,可以由一对匹配的二维图像坐标 $p(u_1, v_1)$ 和 $p'(u_2, v_2)$,建立关于空间点三维坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 的超定线性方程组,通过最小二乘法求解该方程组,即可计算出 P 点的三维坐标。

为检测缆索力学中的基本变量广义位移,即平移与旋转位移,WU LJ等人^[77]提出一种基于双目视觉与编码圆柱的非接触式六自由度测量方法。该方法通过编码角点的双目三维重建与圆柱拟合,获得圆柱质心及其轴线方向向量,并进一步解算三向平移以及偏航、俯仰和滚转角,其中绕轴滚转角由编码角点识别结果与圆柱模型共同确定,有效克服了传统传感器对柔性结构附加质量影响的局限,为桥梁缆索等复杂振动场分析提供了非接触测量方案。

基于stereo-DIC技术,WEI K等人^[78]提出一种

大规模透明薄膜结构的实验测量方法。设置相机采集帧率为30 Hz,在同时涉及旋转和线性振动的条件下,时域位移曲线显示结构存在明显的周期性刚体旋转,通过模态分析成功识别了结构固有频率1.31 Hz和1.60 Hz,并获得全场振型。刚性旋转运动的时域位移曲线反映了结构整体刚体旋转,而二阶模态则表现出整体扭转特征。

WEI Y C等人^[79]将3D-DIC与压缩传感技术结合,利用光学衍射元件在轴表面投影随机散斑图案,布置平面镜,并让2台相机同时捕捉实像与虚像,同步测量沿 x 轴和 y 轴的径向位移,利用DIC空间位移分析得到周期内转轴倾斜误差,并从频谱中得到转轴旋转速度。压缩传感技术用于从低帧率相机捕获的图像中重建高速振动信号,克服了传统高速采样设备成本高和空间分辨率低的问题,精确测量了 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的面外位移。在低速电机轴的振动实验中,设置相机帧率为20 frame/s,得到对应基频约为0.59 Hz,测得位移幅值约为0.4 mm,但非可测位移上限。

视频图像相关(Video Image Correlation, VIC)可用于分析结构中发生的变形和应力,VIC-3D能测量水平垂直以及面外垂直位移,并且可以利用几何关系推算角度位移。SZÁVA I等人^[80]利用VIC-3D方法测量了加法齿轮箱的扭转振动。利用双目相机正面捕获旋转件表面散斑图像,追踪特定点的线性位移,并基于几何关系将测得的线性位移计算转换为对应的扭转角位移。在实际测试中,测得不同工况下的扭转角振幅最大约 9.548° 。该系统可测量的线性位移范围可从几微米至几厘米。

在双目视觉的测量研究中,各团队侧重于特定物体的测量或多参数的创新测量方法,并未涉及校准方面的研究。双目视觉测量可同时捕捉平面内和平面外的振动,实现完整的三维位移和应变场的全场非接触测量,配合高速相机,可测量高频振动、瞬态事件,但需考虑设备成本问题。帧率方面,与单目视觉相似,双目系统可测频率受限于相机帧率,帧率越高成本越高。数据方面,双目系统产生的数据量大,导致后处理计算负荷较大。标定方面,双目相机的标定复杂度高,对同步性和标定误差敏感,相机振动可能导致系统

性偏差。在散斑图案质量不佳的情况下，DIC相关算法的鲁棒性会受到相应影响。

不同测量方法对比如表1所示。

4 总结与展望

线角复合振动是航空航天、机械工程、土木工程等领域普遍存在的复杂动态现象，对其进行精准测量是保障结构安全、优化系统设计的关键。综合国内外研究现状可知：国外在线角复合振动测量研究方面起步较早，围绕多轴传感器、激光双光束及连续扫描激光多普勒等路线形成较系统的理论模型与工程应用基础；国内研究则在多轴传感器校准、机器视觉和低频校准溯源方法领域较为集中，尤其在机器视觉低频线角振动校准方面发展较快。不同技术各有优劣，多轴传感器便于工程部署，但受附加质量影响较大，因此发展更趋向于集成化和小型化，惯性单元等新型多轴传感器测量技术发展迅速；激光干涉法精度高，并且具备绝对溯源能力，但对光路与几何参数敏感，在连续扫描中易受散斑噪声影响；机器视觉法适

用于低频振动和全场测量，但其量值传递链条较长，给不确定度评定和校准溯源带来一定困难。

根据线角多维振动测量与校准手段的研究现状，基于现有技术的瓶颈与应用需求，未来针对线角复合振动测量方法的研究将聚焦于以下核心方向：

1) 多参数同步解耦的深度优化

线角振动的耦合特性与复杂工况(如大平移与扭转复合振动)是该技术面对的主要挑战。例如，双光束激光干涉难以应对大振幅平移，扫描激光测振的散斑噪声与路径规划问题影响解耦精度，机器视觉在高频场景下易受帧率限制。未来将从两个维度突破：一是针对线角复合振动解耦进行光学设计创新，即在复合振动条件下实现线、角振动分量的快速稳定分离，并通过光路配置的优化降低平移分量对角振动解算的交叉影响。可发展多光束多普勒干涉系统，通过光路耦合设计和定制镜头，改善长行程下的信号质量，实现线速度与角速度的独立解算。二是硬件、算法与人工智能的融合，引入人工智能与数据驱动方法作为

表1 测量方法对比
Tab.1 Comparison of measurement methods

技术方法	主要测量参数	频率范围	优点	缺点	应用场景
多轴加速度计	线加速度、角速度、角加速度	DC ~ 8 kHz	成本低、应用场景广泛	接触式测量，安装与标定要求高、会引入附加质量	旋转机械的状态监测与故障诊断、船舶机电设备测量等
单传感单元	线加速度、线速度、角速度、角加速度、应变	DC ~ 700 Hz	高集成度、小型化	接触式测量，算法复杂、计算需求高，依赖加工工艺	旋转机械状态监测与故障诊断、海洋工程与离岸系统监测、航天工程振动测量等
双光束干涉	线速度、角位移、角速度	DC ~ 10 kHz	非接触式测量，高精度、高分辨力，轴向跳动不敏感	光束对准要求较高，针对大振幅研究不足	角振动校准、发动机曲轴振动监测、工业控制等
连续扫描激光	线速度、角速度、角位移、模态参数	DC ~ 1 kHz	非接触式测量，高精度，单次扫描多自由度获取	无法实现瞬态运动参数测试，散斑噪声显著，扫描路径规划复杂	工程结构的模态测试与振动分析、结构动力学测试、梁或壳类结构的损伤检测等
其他干涉技术	线位移、角位移	DC ~ 9.6 kHz	非接触式测量，高精度、运动解耦能力强	可测角度范围小，光路调试复杂	精密及超精密加工制造领域、非合作空间目标探测、刚性体的振动研究等
机器视觉	线位移、角位移、线加速度、角加速度、全场位移、角度、应变、模态参数	DC ~ 10 kHz	非接触式测量，灵活性高、低频性能好、可实现全场测量、精度高	算法复杂度高，数据计算量大，受光照影响敏感，系统校准复杂	角振动与线性振动的计量与校准、桥梁工程与矿井提升系统的缆索故障诊断、工程结构健康监测等

补充手段,例如,利用机器学习对多通道振动信号中的耦合特征进行建模,对几何误差、安装偏差及环境扰动引起的系统性误差进行自适应修正。智能算法可用于优化相位解调、特征提取与多参数反演过程,提高在低信噪比或复杂背景下的稳定性,从而精准捕捉弯扭耦合、沉浮-俯仰耦合等复杂模态。

2) 溯源体系的统一化和高精度化

目前缺乏线角振动同步校准的标准装置与计量体系,不同测量方法的结果难以比对,制约了工业规模化应用。现行国际振动计量标准(如ISO 16063)在一次振动校准方法中推荐采用激光干涉原理作为基准测量手段,各国的标准校准装置也多结合激光干涉法建立,激光干涉测量的优势在于可以直接以光波波长这一自然常数作为长度基准,测量结果可不经中间传感环节直接溯源至国际单位制,因此需要以激光干涉绝对校准技术为核心,建立统一的线角复合振动标准装置,构建覆盖宽频带、宽振幅范围的量值传递链条,解决现有校准装置能力覆盖不足的问题;同时,开发通用不确定度评估模型,实现校准过程可追溯,以满足多场景溯源需求。

3) 测量系统的集成化与场景定制化

现有技术普遍存在“通用性与专用性失衡”的问题,即通用型系统虽具备较广的适用范围,但在狭小空间、强电磁干扰或复杂结构构型条件下,系统规模大、易引入附加噪声与时序偏差;而针对特定对象设计的专用系统,虽在局部工况下获得较优性能,但往往缺乏功能扩展与参数调整能力,难以适应多工况下复合振动特性的变化。未来将侧重于集成化设计与场景化定制:对于接触式测量技术,将通过传感器微型化、抗干扰封装及嵌入式处理单元的协同设计,在测量节点内部实现必要的信号预处理、初步解耦与状态识别,缩短信号传输链路,降低环境扰动与传感器漂移对解耦结果的影响,从系统层面提升分离效率与稳定性;对于非接触式测量技术,将在保持高精度与可溯源性的前提下,进一步简化光学结构与系统配置,降低系统复杂度,以适应机翼、转子等复杂构型振动测量的需求。

综上所述,线角复合振动测量技术应围绕“精准性、溯源性、集成化”的方向开展深入研究,以破解现有的局限性,发展高精度、可溯源的线角综合振动校准技术,为航空航天、高端制造、土木工程等领域的结构安全监测与性能优化提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 胡镇星,王建,公续银,等. 工业机器人振动测量技术研究现状与展望[J/OL]. 机电工程技术, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/44.1522.TH.20250814.1024.008>. HU Z X, WANG J, GONG X Y, et al. Research status and prospects of vibration measurement technology for industrial robots[J/OL]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/44.1522.TH.20250814.1024.008>. (in Chinese)
- [2] EITNER M A, AHN Y J, CLEMENS N T, et al. Measurements of panel vibration with DIC and LDV imaged through a Mach 5 flow[M]// Computer Vision & Laser Vibrometry, Volume 6. New York: River Publishers, 2025.
- [3] 王增坤,杨志勃,乔百杰,等. 转子叶片叶端定时测振的频域分析研究综述[J]. 计测技术, 2025, 45(4): 104-118. WANG Z K, YANG Z B, QIAO B J, et al. Review on the frequency domain analysis of blade tip timing measurement for rotor blade vibration[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(4): 104-118. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] KEHOE M W. A historical overview of flight flutter testing[C]// Proceedings of AGARD Structures and Materials Panel Meeting, 1995.
- [6] ZHANG B S, ZHU L D. Experimental and computational analysis of large-amplitude flutter in the Tacoma Narrows bridge: wind tunnel testing and finite element time-domain simulation[J]. Buildings, 2025, 15(15): 2800.
- [7] 赖泽楷,关向雨,涂嘉毅,等. 基于激光多普勒测振的电力设备表面振动测量及补偿算法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(6): 1707-1717. LAI Z K, GUAN X Y, TU J Y, et al. Surface vibration measurement and compensation algorithm of power equipment based on laser Doppler vibration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(6): 1707-

1717. (in Chinese)
- [8] 种永潮, 李新良, 张大治, 等. 通用质量特性在激光测振仪研制过程中的应用研究[J]. 计测技术, 2024, 44(4): 96-108.
- CHONG Y C, LI X L, ZHANG D Z, et al. Application research of general quality characteristics in the development process of laser vibrometer[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(4): 96-108. (in Chinese)
- [9] LIU T G, FU Y, WANG S, et al. Improved laser measurement using advanced techniques: a review[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 64(12): 2256-2263.
- [10] YANG M, MO S F, CAI C G, et al. Standard sine motion video-based virtual traceability method for monocular vision low-frequency vibration measurements[J]. Optics Letters, 2023, 48(13): 3617-3620.
- [11] 彭军. 角运动测量及校准方法[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 73-80.
- PENG J. Angular motion measurement and calibration method[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 73-80. (in Chinese)
- [12] 金冉, 陈永久, 张军, 等. 基于圆光栅和加窗FFT的低频角振动测量方法[J]. 宇航计测技术, 2022, 42(6): 41-46.
- JIN R, CHEN Y J, ZHANG J, et al. Measurement method of low frequency angular vibration using circular grating and windowed FFT[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2022, 42(6): 41-46. (in Chinese)
- [13] XIANG L, YANG S X, GAN C B. Torsional vibration measurements on rotating shaft system using laser Doppler vibrometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(11): 1596-1601.
- [14] 薛景峰. 高频角振动校准方法与技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- XUE J F. Research on methods and techniques of high frequency angular vibration calibration[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [15] 刘文峰, 杨明, 蔡晨光, 等. 基于机器视觉的数字式角振动传感器动态校准方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(13): 177-182.
- LIU W F, YANG M, CAI C G, et al. Dynamic calibration method of digital angular vibration sensor based on machine vision[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(13): 177-182. (in Chinese)
- [16] CHENG H, WANG Y, WEI K, et al. Visual encoder-based angle measurement method in low-frequency angular vibration calibration[J]. Applied Optics, 2022, 61(26): 7662.
- [17] Methods for the calibration of vibration and shock transducers — part 11: primary vibration calibration by laser interferometry: ISO 16063-11[S]. International Organization for Standardization, 1999.
- [18] Methods for the calibration of vibration and shock transducers — part 15: primary angular vibration calibration by laser interferometry: ISO 16063-15: 2006[S]. International Organization for Standardization, 2006.
- [19] VON MARTENS H J. Expanded and improved traceability of vibration measurements by laser interferometry[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(12): 121601.
- [20] OTA A, NOZATO H, KOKUYAMA W, et al. Current progress of development of vibration calibration systems in NMIJ[C]// Proceedings of IMEKO TC3, TC5 and TC22 International Conference 2017.
- [21] 于梅. 0.1 Hz ~ 50 kHz 直线振动幅值和相位国家计量基准系统的研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(7): 54-58.
- YU M. Recent development of study on primary standards for measuring magnitude and phase of translational vibration in frequency domain[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(7): 54-58. (in Chinese)
- [22] VON MARTENS H J. Current state and trends of ensuring traceability for vibration and shock measurements[J]. Metrologia, 1999, 36(4): 357-373.
- [23] CHEUNG W S, PARK T I. Development of portable angular vibration exciters[C]// Proceedings of IMEKO TC3, TC5 and TC22 Conference, Force, Mass, Torque, Density, Hardness and Vibration, 2010: 247-252.
- [24] 刘爱东, 于梅, 何闻. 角振动测量方法的研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(12): 216-219.
- LIU A D, YU M, HE W. A study of an angle vibration measuring method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(12): 216-219. (in Chinese)
- [25] 唐波, 何闻, 刘爱东. 宽频带电磁式角振动校准系统研究进展[J]. 计量学报, 2021, 42(10): 1328-1334.
- TANG B, HE W, LIU A D. Research progress on broadband electromagnetic angular vibration calibration system[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(10): 1328-1334. (in Chinese)
- [26] 李昶丽, 薛梓, 黄垚, 等. 圆光栅测角系统示值误差分

- 析与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 59-65.
- LI G L, XUE Z, HUANG Y, et al. Indication error analysis and compensation of circular grating angle measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 59-65. (in Chinese)
- [27] KLAUS L, HANNIG S, BOTHE H. Vibration testing to assess the transport behaviour of reference standards and mobile scientific devices[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1065: 222015.
- [28] UMEDA A, ONOE M, SAKATA K, et al. Calibration of three-axis accelerometers using a three-dimensional vibration generator and three laser interferometers[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 114(1): 93-101.
- [29] LIU Z H, CAI C G, YANG M, et al. Development of a triaxial primary vibration calibration system [J]. Acta IMEKO, 2019, 8(1): 33-39.
- [30] 杨明, 蔡晨光, 刘志华, 等. 基于外差激光干涉法的三轴向振动绝对校准方法研究[J]. 计量学报, 2018, 39(2): 201-206.
- YANG M, CAI C G, LIU Z H, et al. Research on the method of the triaxial primary vibration calibration using the heterodyne interferometry [J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(2): 201-206. (in Chinese)
- [31] KANG M R, KAHRAMAN A. Measurement of vibratory motions of gears supported by compliant shafts [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 29: 391-403.
- [32] 焦健超, 汪伟, 唐力伟, 等. 三轴加速度传感器阵列振动测试新方案[J]. 中国测试, 2012, 38(3): 109-112.
- JIAO J C, WANG W, TANG L W, et al. New scheme for vibration test by applying 3-axis acceleration [J]. China Measurement & Test, 2012, 38(3): 109-112. (in Chinese)
- [33] 陈海龙, 汪伟. 传感器阵列六自由度振动测试数值积分误差消除方法研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(16): 115-119.
- CHEN H L, WANG W. Integral error separation in six degrees of freedom vibration test by sensor array [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(16): 115-119. (in Chinese)
- [34] 叶嘉, 黄宋均, 陈荣. 六自由度振动测量装置的设计及试验验证[J]. 机电设备, 2018, 35(2): 12-15.
- YE J, HUANG S J, CHEN R. Design and experimental verification of six degree of freedom vibration measuring device [J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2018, 35(2): 12-15. (in Chinese)
- [35] 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.
- FU Q, DAI X B, WEI Y. Research on measurement method of six degrees of freedom vibration table based on accelerometer array [J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(1): 28-33. (in Chinese)
- [36] KOENE I, HAIKONEN S, TIAINEN T, et al. On-shaft wireless vibration measurement unit and signal processing method for torsional and lateral vibration [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(6): 5857-5868.
- [37] XU Y D, TANG X L, FENG G J, et al. Orthogonal on-rotor sensing vibrations for condition monitoring of rotating machines [J]. Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics, 2022, 1(1): 29-36.
- [38] SHKEL A M, WANG Y S. Inertial sensors and inertial measurement units [M]// Pedestrian Inertial Navigation with Self-Contained Aiding, 2021: 17-36.
- [39] FUJARRA A L C, LEAL A P, CARNIER R M, et al. Validation of a low-cost IMU for flow-induced vibration tracking in offshore systems [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(7): 356.
- [40] 张鹏飞, 刘伟, 付玮, 等. 基于六自由度振动的惯组传递特性试验技术研究[J]. 强度与环境, 2025, 52(4): 42-48.
- ZHANG P F, LIU W, FU W, et al. Research on experimental analysis technology of inertial unit transmission characteristics based on six degree of freedom vibration [J]. Structure & Environment Engineering, 2025, 52(4): 42-48. (in Chinese)
- [41] KONG C Y, ZHAO D J, ZHANG J C, et al. Real-time virtual sensing for dynamic vibration of flexible structure via fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(22): 21706-21718.
- [42] 黎琪慧, 陈亚新, 辛璟焘, 等. 微型化三轴FBG振动传感器的角振动测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(5): 43-50.
- LI Q H, CHEN Y X, XIN J T, et al. Research on the angular vibration measurement of miniaturized triaxial FBG vibration sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(5): 43-50. (in Chinese)
- [43] BELL J R, ROTHBERG S J. Laser vibrometers and con-

- tacting transducers, target rotation and six degree-of-freedom vibration: what do we really measure?[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 237(2): 245–261.
- [44] BELL J R, ROTHBERG S J. Rotational vibration measurements using laser doppler vibrometry: comprehensive theory and practical application[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 238(4): 673–690.
- [45] ROTHBERG S, BELL J. On the application of laser vibrometry to translational and rotational vibration measurements on rotating shafts [J]. *Measurement*, 2004, 35(2): 201–210.
- [46] HALKON B J, ROTHBERG S J. Rotor vibration measurements using laser doppler vibrometry: essential post-processing for resolution of radial and pitch/ yaw vibrations [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2006, 128(1): 8–20.
- [47] CHEN L, ZHANG D W, ZHOU Y L, et al. Design of a high-precision and non-contact dynamic angular displacement measurement with dual - laser Doppler vibrometers [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 9094.
- [48] 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.
- [49] CHATTERTON S, DASSI L, GHELLER E, et al. Torsional vibration analysis using rotational laser vibrometers [J]. *Sensors*, 2024, 24(6): 1788.
- [50] DI MAIO D, CASTELLINI P, MARTARELLI M, et al. Continuous scanning laser vibrometry: a raison d'être and applications to vibration measurements [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 156: 107573.
- [51] STANBRIDGE A B, EWINS D J. Measurement of translational and angular vibration using a scanning laser doppler vibrometer [C]// *Proceedings of First International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*, 1994, 2358: 37–47.
- [52] STANBRIDGE A B, EWINS D J. Modal testing using a scanning laser doppler vibrometer [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1999, 13(2): 255–270.
- [53] STANBRIDGE A B, MARTARELLI M, EWINS D J. Measuring area vibration mode shapes with a continuous-scan LDV[J]. *Measurement*, 2004, 35(2): 181–189.
- [54] SALMAN M, SABRA K G. Broadband measurement of translational and angular vibrations using a single continuously scanning laser doppler vibrometer[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 132(3): 1384–1391.
- [55] YANG S F, ALLEN M S. Harmonic transfer function to measure translational and rotational velocities with continuous-scan laser Doppler vibrometry [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2014, 136(2): 021025.
- [56] STANBRIDGE A B, EWINS D J. Measurement of total vibration at a point using a conical-scanning LDV [C]// *Proceedings of Second International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*, 1996, 2868: 126–136.
- [57] GIULIANI P, DI MAIO D, SCHWINGSHACKL C W, et al. Six degrees of freedom measurement with continuous scanning laser Doppler vibrometer [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 38(2): 367–383.
- [58] HUANG Z, ZANG C P. Fast modal rotation measurement using a dual sinusoidal-scan continuously scanning laser Doppler vibrometer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(8): 085201.
- [59] RASOULI S, DAEMI M H. Rotation-sensitive and direction-resolved homodyne laser-doppler vibrometry method for simultaneous measurement of rotational and translational vibrations of a rigid object using a 1D array detector [J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8658.
- [60] 陈家键, 胡慧珠, 缪立军, 等. 双频激光干涉三自由度微振动测量系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(7): 1435–1443.
- CHEN J J, HU H Z, MIAO L J, et al. Three-degree-of-freedom micro - vibration measurement system based on dual-frequency laser interference [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1435–1443. (in Chinese)
- [61] LV Q, WANG W, LIU Z W, et al. Grating-based precision measurement system for five - dimensional measurement[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 189–202.
- [62] REN Y, QIU S, LIU T, et al. Compound motion detection based on OAM interferometry [J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(6): 1127–1135.
- [63] YANG M, WANG Y, LIU Z H, et al. A monocular vision-based decoupling measurement method for plane motion orbits[J]. *Measurement*, 2022, 187: 110312.
- [64] CHANG C C, XIAO X H. Three - dimensional structural translation and rotation measurement using monocular videogrammetry[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2010, 136(7): 840–848.
- [65] ZHONG J F, ZHONG S C, ZHANG Q K, et al. Vision-

- based system for simultaneous monitoring of shaft rotational speed and axial vibration using non-projection composite fringe pattern[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 120: 765–776.
- [66] ZHANG Y C, CAO G H, WANG G H. Vision-based measurement for the transverse - longitudinal - rotational displacement of hoisting rope by modified Lucas-Kanade algorithm[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1–11.
- [67] WANG Y Z, LIU Z Q. A generic computer vision-based monocular six-degree-of-freedom displacement measurement method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2025, 604: 118990.
- [68] ZHANG Y, CAI C G, LIU Z H, et al. Space-to-plane decoupling method for six-degree-of-freedom motion measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(12): 125005.
- [69] YANG M, LIU Z H, WANG Y, et al. Monocular vision-based multiparameter dynamic calibration method used for the low - frequency linear and angular vibration sensors [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(5): 5365–5374.
- [70] WU Q S, YANG M, LIU Z H, et al. Monocular vision-based decoupling measurement method for multi-degree-of-freedom motion [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(21): 35092–35100.
- [71] 陈光贵, 董昱, 胡波, 等. 基于旋转运动激励的线角振动传感器动态校准方法[J]. *计量学报*, 2025, 46(8): 1150–1155.
- CHEN G G, DONG Y, HU B, et al. Dynamic calibration method for linear and angular vibration sensors based on rotational motion excitation[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2025, 46(8): 1150–1155. (in Chinese)
- [72] MO S F, CAI C G, YANG M, et al. A novel digital metrological traceability method for the monocular vision-based linear and angular measurement in vibration calibration [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(11): 19937–19946.
- [73] FU Y, SHANG Y, HU W X, et al. Non-contact optical dynamic measurements at different ranges: a review [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2021, 37(4): 537–553.
- [74] LIN Y K, HUANG P B, NI Z H, et al. Full-field vibration measurements by using high-speed two-dimensional digital image correlation[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(7): 4257.
- [75] XIE P, LU Z R, LIN G, et al. A ring-projection-based two-scale approach for accurate digital image correlation of large translations and rotations [J]. *Experimental Mechanics*, 2024, 64(6): 875–893.
- [76] YU L P, PAN B. High-speed stereo-digital image correlation using a single color high-speed camera [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(31): 9257–9269.
- [77] WU L J, SU Y Y, CHEN Z C, et al. Six-degree-of-freedom generalized displacements measurement based on binocular vision [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, 27(2): e2458.
- [78] WEI K, WEI G, SHAO X X, et al. An experimental method for stereo-DIC measurement of large-scale thin-film structures [J]. *Experimental Mechanics*, 2024, 64(7): 1175–1181.
- [79] WEI Y C, HUANG Y S, WU H P, et al. Vibration monitoring of rotating shafts using DIC and compressed sensing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 182: 112189.
- [80] SZÁVA I, PÁL-GÁLFIB, AMBRUS C, et al. Video image correlation-based method used for the study of the torsional vibrations of an adder gearbox [J]. *Energies*, 2021, 14(19): 6129.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 李昱宪(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为激光干涉线角综合振动测量。



通信作者: 张大治(1977—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为激光非接触动态测量与校准、振动与冲击计量校准, 担任全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会委员等职务, 完成科研项目30余项, 获奖多项。