

# 零差式激光多普勒测振系统全链路建模与关键参数影响分析

刘佳函 尚建华\*

东华大学, 中国·上海 201620

**摘要:** 激光多普勒测振 (Laser Doppler Vibrometry, LDV) 技术凭借非接触、高精度优势, 在结构振动测量领域具有重要应用。为定量评估实际系统中非理想因素对测量精度的影响, 本文基于相干探测原理构建零差式 LDV 系统全链路数学模型, 系统分析激光器噪声、光学混频器相位误差、平衡探测器噪声、望远镜参数及碳纤维增强复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) 反射特性对多普勒频移解调精度的影响。仿真结果表明: 光学混频器相位误差需控制在  $0.2^\circ$  以内; 平衡探测器总噪声误差小于 0.04%; 望远镜接收光功率与孔径直径平方成正比、与测量距离平方成反比; CFRP 表面漫反射引入的散斑噪声可通过提高镜面反射权重因子有效抑制。本文建立涵盖光源、光路、目标反射特性的全链路数值模型, 揭示镜面反射权重因子  $\eta$  与解调精度的量化关系, 为高精度 LDV 系统设计与复合材料无损检测提供理论支撑。

**关键词:** 激光多普勒测振 (LDV); 零差干涉; 碳纤维增强复合材料 (CFRP); 参数影响分析

## Full-Link Modeling and Analysis of Key Parameter Effects in a Zero-Difference Laser Doppler Vibrometer System

Liu Jiahuan, Shang Jianhua\*

Donghua University, China Shanghai 201620

**Abstract:** Laser Doppler Vibrometry (LDV) technology plays a significant role in the field of structural vibration measurement due to its non-contact and high-precision advantages. To quantitatively assess the impact of non-ideal factors in actual systems on measurement accuracy, this paper constructs a full-chain mathematical model of a zero-difference LDV system based on the principle of coherent detection. It systematically analyzes the effects of laser noise, optical mixer phase error, balanced detector noise, telescope parameters, and the reflective characteristics of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) on the accuracy of Doppler shift demodulation. Simulation results indicate that the phase error of the optical mixer must be controlled within  $0.2^\circ$ ; the total noise error of the balanced detector is less than 0.04%; the received optical power of the telescope is proportional to the square of the aperture diameter and inversely proportional to the square of the measurement distance; the speckle noise introduced by diffuse reflection from the CFRP surface can be effectively suppressed by increasing the mirror reflection weighting factor. This paper establishes a full-link numerical model covering the light source, optical path, and target reflection characteristics, revealing the quantitative relationship between the mirror reflection weighting factor  $\eta$  and demodulation accuracy, thereby providing theoretical support for the design of high-precision LDV systems and the non-destructive testing of composite materials.

**Keywords:** Laser doppler vibrometry (LDV); Zero-difference interferometry; Carbon fiber-reinforced composites (CFRP); Parameter influence analysis

## 1 绪论

激光多普勒测振技术以光学多普勒效应为物理基础, 通过解算被测目标表面反射激光的频率偏移, 实现振动速度的高精度非接触测量。在碳纤维增强复合材料等先进材料结构动力学研究中, 获取材料高频段振动特征是评估其力学性能的关键环节, 而传统接触式传感器在高频段存在

附加质量干扰显著、安装适配性差等缺陷, LDV 的非接触测量特性为解决上述问题提供了有效技术途径。

LDV 系统实际测量精度受多环节非理想因素耦合影响: 光学混频器非理想正交特性、探测器噪声、望远镜光学参数及 CFRP 复杂表面反射特性均会影响最终解调精度。现有研究多聚焦单一器件或特定噪声源, 缺乏全链路

视角的系统建模与综合评估<sup>[1,2]</sup>。本文基于自主搭建的零差式 LDV 系统架构, 建立完整数值仿真模型, 系统分析上述因素对多普勒频移解调精度的影响, 为系统配置与参数优化提供定量依据。

## 2 零差式 LDV 系统原理与数学模型

频率为  $f_0$  的单频激光入射至运动速度  $v$  运动的物体表面时, 反射光会产生的多普勒频移  $f_d$  与物体振动速度沿激光入射方向的分量成正比<sup>[3]</sup>:

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为激光波长,  $\theta$  为激光入射方向与振动方向的夹角。面外振动测量通常采用垂直入射方式 ( $\theta = 0$ ,  $\cos \theta = 1$ ), 公式可简化为  $f_d = 2v/\lambda$ , 通过精确测量多普勒频移, 可反演得到被测结构瞬时振动速度。

传统的光学检测系统工作方式分为直接探测和相干探测两种。直接探测仅能获取光强信息, 无法提取频率变化信息, 因此 LDV 系统需采用相干探测结构。相干探测通过将携带振动信息的信号光与频率稳定的本振光混频, 将微弱多普勒频移转换为可探测的中频信号。根据本振光与信号光频率关系, 相干探测分为外差探测 (频率不等) 与零差探测 (频率相等)<sup>[4]</sup>。零差探测具有结构简洁、解调算法简便的优势, 因此本文采用零差式探测方案。本文设计的 LDV 系统核心为  $90^\circ$  光学混频器与平衡探测器组合, 信号光  $S$  与本振光  $LO$  经混频器混频后, 输出两路相位正交信号。零差条件下  $\Delta \omega = 0$ , 当信号光因物体振动产生多普勒频移  $f_d$  时,  $\Delta \omega = 2\pi f_d$ , 此时  $I(t)$  与  $Q(t)$  构成包含多普勒频移信息的正交载频信号。

本文采用时域微分鉴频法提取多普勒频移  $f_d$ 。对两路正交信号  $I(t)$ 、 $Q(t)$  分别求导后交叉相乘, 构造瞬时角频率

表达式, 进而求得多普勒频移  $f_d = \omega_d / 2\pi$ 。该算法无需相位展开, 对信号幅度变化具备一定鲁棒性, 但两路信号幅度不一致时会引入调幅效应, 影响测量精度<sup>[5]</sup>。

基于上述原理, 本文在 MATLAB 环境下搭建零差式 LDV 全链路仿真模型。系统结构如图 1 所示, 包含激光器、光纤分束器、光环行器、望远镜、光混频器、平衡探测器及信号解调模块。

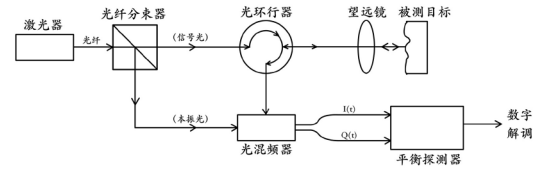


图1 零差式LDV系统结构框图

模型统一设定多普勒频移为 10kHz, 系统采样频率为 1500kHz。理想条件下仿真解调结果与设定值完全一致, 验证了模型的正确性。

## 3 系统器件参数影响分析

### 3.1 光学混频器相位误差

实际  $90^\circ$  光学混频器存在相位误差  $\delta$ , 破坏信号正交性并引入解调偏差。仿真设定相位误差  $\delta$  为  $\pm 0.2^\circ$ 、 $\pm 0.5^\circ$ 、 $\pm 0.8^\circ$ , 仿真结果如表 1 所示。

由上述仿真结果可知, 误差幅度与  $|\delta|$  近似成正比。为保障测量精度, 应选用相位误差  $\leq 0.2^\circ$  的高精度光学混频器, 并配套正交误差校准与补偿算法。

### 3.2 平衡探测器噪声

平衡探测器噪声主要为热噪声与散粒噪声, 仿真结果如表 2 所示。

由上述仿真结果可知, 热噪声为探测器主导噪声, 两类噪声共同作用下总误差控制在 0.04% 以内, 系统具备优良的噪声基底性能。

表1  $90^\circ$  光混频器相位误差  $\delta$  影响

相位误差 $\delta$	$+0.2^\circ$	$-0.2^\circ$	$+0.5^\circ$	$-0.5^\circ$	$+0.8^\circ$	$-0.8^\circ$
误差 $f-f_d$	$\pm 50\text{Hz}$	$\pm 50\text{Hz}$	$\pm 100\text{Hz}$	$\pm 100\text{Hz}$	$\pm 200\text{Hz}$	$\pm 200\text{Hz}$

表2 平衡探测器的噪声影响

平衡探测器噪声种类	热噪声	散粒噪声	热噪声+散粒噪声
误差 $f-f_d$	$(3 \pm 0.5)\text{Hz}$	$(2.9 \pm 0.01)\text{Hz}$	$(3 \pm 0.5)\text{Hz}$

表3 望远镜参数的影响

孔径直径D	D=0.02m	D=0.03m	D=0.05m
误差 $f-f_d$	$\pm 50\text{Hz}$	$\pm 20\text{Hz}$	$\pm 10\text{Hz}$
焦距f	f=0.05m	f=0.10m	f=0.20m
误差 $f-f_d$	$\pm 100\text{Hz}$	$\pm 50\text{Hz}$	$\pm 100\text{Hz}$
测量距离d	d=1m	d=2m	d=3m
误差 $f-f_d$	$\pm 50\text{Hz}$	$\pm 200\text{Hz}$	$\pm 500\text{Hz}$

表4 CFRP样板三种不同反射的影响

CFRP样板反射种类	镜面反射	漫反射	综合反射（镜面反射+漫反射）
误差 $f-d$	$\pm 1000\text{Hz}$	$\pm 2000\text{Hz}$	$\pm 2000\text{Hz}$

### 3.3 望远镜参数影响

望远镜参数直接决定回波光功率，进而影响系统信噪比与测量精度。本文分别分析孔径直径  $D$ 、焦距  $f$ 、测量距离  $d$  三个核心参数，理论上接收光功率  $P_r$  与孔径直径  $D$  的平方成正比，与测量距离  $d$  的平方成反比。

仿真设定孔径直径  $D$  为 0.02m、0.03m、0.05m；焦距  $f$  为 0.05m、0.10m、0.20m；测量距离  $d$  为 1m、2m、3m，结果如表 3 所示。

由上述仿真结果可知，孔径越大，接收光功率越高，解调误差显著降低，与理论平方正比关系一致；焦距存在最优区间，过短易受表面粗糙度干扰，过长导致能量密度下降、像差增大，均会提升解调误差；误差随距离增大呈平方率增长，是影响 LDV 测量精度的关键外部因素，与理论平方反比关系一致。

### 4 CFRP 反射特性影响分析

CFRP 为典型各向异性吸收介质，表面由树脂平滑区与纤维纹理区组成，反射特性表现为镜面反射与漫反射的叠加。镜面反射保持良好相干性，漫反射形成动态散斑场，引入显著的幅度与相位噪声。为量化表面状态对反射模式的影响，引入镜面反射权重因子  $\eta$ ：

$$\eta = \frac{P_s}{P_t} = \frac{P_s}{P_s + P_d} = \frac{R_s}{R_t} \quad (2)$$

式中， $P_s$  为镜面反射功率； $P_d$  为漫反射功率； $P_t$  为总反射功率； $R_s$  为镜面反射率； $R_t$  为总反射率。 $\eta$  直观反映了表面的光学平滑度。仿真对比镜面反射、漫反射、综合反射三种情况，结果如表 4 所示。

由上述仿真结果可知，漫反射分量在总反射中占主导，且漫反射分量显著劣化解调精度，镜面反射成分被淹没，进一步说明提高镜面反射权重因子的必要性。

进一步仿真对比分析不同  $\eta$  下的解调误差可知，随着  $\eta$  的增大解调误差明显减小，因此提高镜面反射权重因子  $\eta$  是提升 CFRP 表面 LDV 测量精度的有效途径。在实物实验准备阶段，可通过抛光、涂覆增强反射层等表面处理工艺提高  $\eta$  值，从而增强信号相干性、抑制散斑噪声影响。

### 5 结语

本文构建零差式 LDV 系统全链路数学模型，基于 MATLAB 仿真系统分析光学混频器相位误差、平衡探测器

噪声、望远镜参数及 CFRP 反射特性对多普勒频移解调精度的影响，主要结论如下：

(1) 光学混频器相位误差与解调误差正相关，须控制相位误差  $\leq 0.2^\circ$  并配套补偿算法；

(2) 平衡探测器噪声以热噪声为主，总误差  $\leq 0.04\%$ ，系统噪声基底优良；

(3) 望远镜接收功率与孔径直径平方成正比、与测量距离平方成反比，焦距存在最优值区间；

(4) CFRP 反射特性表现为镜面反射与漫反射叠加，漫反射引入显著散斑噪声。提高镜面反射权重因子  $\eta$  可有效改善测量精度。

本文创新构建全链路数值模型，首次建立  $\eta$  与解调精度的量化关系，为 LDV 系统设计、参数优化及 CFRP 无损检测提供理论与工程依据。未来将开展实验验证，完善复杂环境适应性模型，并研究自适应噪声抑制与正交误差补偿算法。

### 参考文献：

[1] Rezaei F. Laser doppler vibrometer and accelerometer for vibrational analysis of the automotive components during simulink simulation for validation[A]. arXiv, 2023.

[2] Wang C, Zhu L, Fu H, et al. Dynamic modeling and ADAMS multiphysics-coupling simulation of complex surface rotating ultrasonic testing device[J]. Measurement Science and Technology, 2025, 36(11): 115017.

[3] Sohn H, Dutta D, Yang J Y, et al. Automated detection of delamination and disbond from wavefield images obtained using a scanning laser vibrometer[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(4): 45017.

[4] Goyal D, Pabla B S. The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: a review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2016, 23(4): 585-594.

[5] Shang J, Liu Y, Sun J, et al. Five-channel fiber-based laser doppler vibrometer for underwater acoustic field measurement[J]. Applied Optics, 2020, 59(3): 676-683.

作者简介：刘佳函（2000.10.10），女，汉族，甘肃省兰州市，硕士研究生在读，研究方向：纺织电气系统。

\* 通讯作者：尚建华。