

10 km/s 激光多普勒测速仪示值误差校准方法研究^{*}

鲁伟俊 邓文 丁宇洁 樊寅斌 彭希锋

(中国工程物理研究院计量测试中心 绵阳 621000)

摘要: 对于高速激光多普勒速度测量系统测速误差无法有效校准的问题,本文基于回波模拟法建立示值误差校准方案,通过光频调制与光波长调节模拟测速系统测速过程中携带目标信息的光回波,间接模拟参考速度,进而实现激光多普勒测速系统示值误差的校准。基于自研校准装置搭建校准实验,以测速上限高达 10 km/s 的激光多普勒测速仪为被校对象,开展示值误差校准实验。通过分析实验结果可知,基于光频调制与波长调节的回波模拟校准方案,可以实现宽速域内测速仪测速误差的校准,由测量准确度分析可知光频调制法的校准不确定度为 $U=0.26\%(k=2)$,波长调节法的校准不确定度为 $U=1.5\%(k=2)$ 。该指标满足激光多普勒测速仪示值误差的校准需求,为激光多普勒测速仪示值误差的校准提供方法参考。

关键词: 高速激光多普勒测速仪;回波模拟;示值误差校准;光频调制;波长调节

中图分类号: TH89;TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Research on the calibration method of 10 km/s laser Doppler velocimeter indicating value error

Lu Weijun Deng Wen Ding Yujie Fan Yinbin Peng Xifeng

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

Abstract: For the problem that the speed measurement error of high-speed laser Doppler velocity measurement system cannot be effectively calibrated, this paper establishes a calibration scheme for the indicated value error based on the echo simulation method, in which the optical frequency modulation and optical wavelength modulation simulate the optical echo that carries the target information in the speed measurement process of the system, and then indirectly simulate the reference speed, so as to realize the calibration of the indicated value error of laser Doppler velocimetry system. Based on the self-developed calibration device, a calibration experiment is built, and a laser Doppler velocimeter with an upper speed limit of up to 10 km/s is used as the calibration object to carry out the calibration experiment of the display value error. By analyzing the experimental results, it can be seen that the echo simulation calibration scheme based on optical frequency modulation and wavelength adjustment can realize the calibration of speed measurement error of the speedometer in a wide speed domain, and the measurement accuracy analysis shows that the calibration uncertainty of the optical frequency modulation method is $U=0.26\%(k=2)$, and the calibration uncertainty of the wavelength adjustment method is $U=1.5\%(k=2)$. This index meets the calibration demand of laser Doppler velocimeter indicating value error, and provides a method reference for the calibration of laser Doppler velocimeter indicating value error.

Keywords: high-speed laser Doppler velocimetry; echo simulation; indication error calibration; optical frequency modulation; wavelength adjustment

0 引言

激光多普勒测速仪的工作原理是基于激光多普勒效应,通过测量出射光与回光的频率变化,从而计算出被测对

象的移动速度。该类设备具有无接触测量、抗干扰能力强、动态响应快、测点小、测量范围大、操作简单等优点,近年来已被广泛应用于诸多领域^[1]。

目前针对测速设备速度测量示值误差的校准方案,常

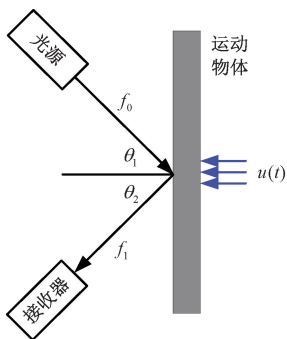
规手段是通过冲击、旋转或自由落体产生校准所需的标准速度量值,然后实现测速仪示值误差的校准^[2],新兴技术则采用回波模拟法构造参考速度实现示值误差的校准。吴晶等^[3]通过转速法提供标准线速度,可实现 50 m/s 范围内的非接触测速仪示值误差的测量。文献^[4]提出基于回波模拟法的雷达测速仪检定方法,通过回波模拟可实现 50 m/s 范围内的雷达测速仪的检定。南京理工大学团队^[5]以火炸药作为激励源,可以将专用弹体加速到公里级每秒,并以此完成了破片测速系统的校准,但由于火炸药的不可控性,该套速度定值系统的速度重复性较差,输出速度偏差较大。文献^[6]提出通过回波模拟法模拟测速仪回波信号,实现 2.7 km/s 速度范围内激光多普勒测速仪的检测。综上所述,基于冲击、旋转或自由落体法的常规校准方法可实现的速度校准上限有限,最高仅能达到公里级每秒,基于回波模拟法的测速仪校准方法目前最高实现 2.7 km/s 的测速仪校准。而现有激光多普勒测速仪速度测量上限已突破 10 km/s,属于超高速范畴。对于此类设备的校准,目前还未有成熟的校准方法可以直接使用。因此,为实现 10 km/s 激光多普勒测速仪示值误差的校准,本文拟通过光频调制与光波长调节间接模拟测速仪测速过程产生的回波信号,实现测速仪示值误差的校准。

1 激光多普勒测速仪测量原理

激光的多普勒效应是激光多普勒测速的理论基础,和声学多普勒效应一样。激光的多普勒效应是激光照射到运动目标,反射光携带了因目标运动而产生的多普勒频移信号,解调出多普勒频移信息就可以获得目标的运动速度^[7-9]。如图 1 所示, f_0 为光源的出射光频率, $u(t)$ 为被测物体的移动速度,故而基于激光多普勒效应反射光的光波频率 f_1 为:

$$f_1 = f_0 + \frac{u(t)}{\lambda_0} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (1)$$

当 $\theta_1 \approx \theta_2 \approx 0$ 时,



θ_1 : 运动方向与入射光的夹角 θ_2 : 运动方向与反射光的夹角
 f_0 : 激光的出射光频率 f_1 : 反射光频率 $u(t)$: 运动物体速度

图 1 激光多普勒效应的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser Doppler effect

$$u(t) = 0.5 f_D \lambda_0 = 0.5 (f_1 - f_0) \lambda_0 \quad (2)$$

式中: f_D 表示激光多普勒频移量,由于光频与光波长可相互转化,将 $f=c/\lambda$ 代入式(2)可得式(3):

$$u(t) = \frac{\lambda_0 c}{2\lambda_1} - \frac{c}{2} \quad (3)$$

其中, c 代表真空光速($c=3\times 10^8$ m/s)。

激光多普勒测速仪工作原理示意图如图 2 所示,激光多普勒测速仪通过光学拍频技术获得多普勒频移量 f_D ,依据式(2)即可计算出被测物体的运动速度,实现对运动物体的速度测量。

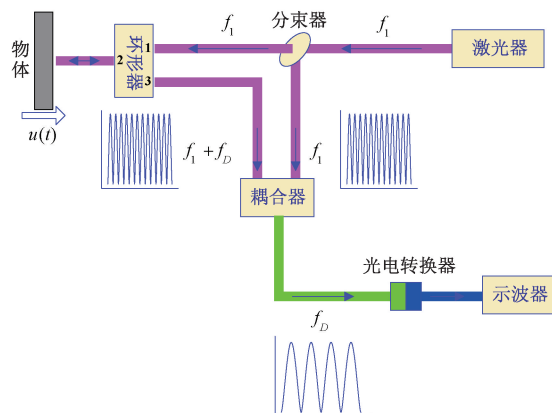


图 2 激光多普勒测速仪工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of working principle of laser Doppler velocimeter

激光多普勒测速仪速度测量主要是对回波信号中的多普勒频移信号进行检测,但当被测速度越高,对应的多普勒频率也越高(如 10 km/s 对应多普勒频率约为 12.9 GHz,对应的光波长变化约为 0.1 nm),这对于测速仪后端的数据采集系统造成一定压力。为此,激光多普勒测速仪具有光学混频工作模式,如图 3 所示,用以降低被检频率,以此降低数据采集压力。

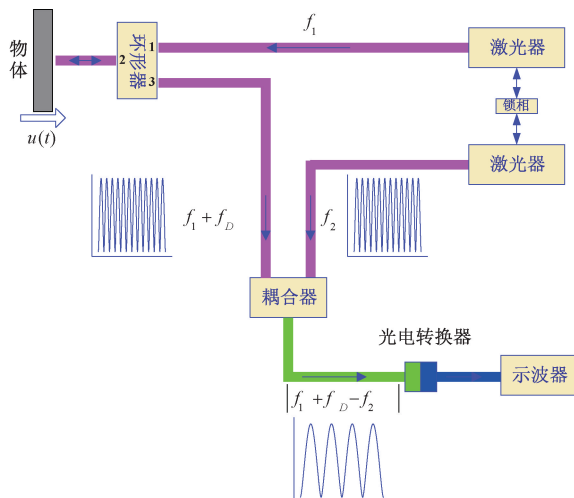


图 3 激光多普勒测速仪工作原理示意图(混频模式)

Fig. 3 Schematic diagram of working principle of laser Doppler velocimeter(mixing mode)

2 基于回波模拟法的示值误差校准方案

2.1 校准方案设计

由于常规方法所能提供的速度量值有限,无法匹配激光多普勒测速仪的校准需求。因此本方案以回波模拟法模拟速度标准源,通过光频调制与光波长调节模拟测速仪测速过程产生的回波信号,间接实现参考速度的构造,校准系统的校准路线如图 4 所示。测速仪发射的出射光,通过光频调制与波长调节进行回波模拟,模拟回光通过光路设计,被测速仪接收,激光多普勒测速仪提供速度测量示值。同时通过波长测量与频移量测量设备,获得准确的出射光波长 λ_0 、模拟回波波长 λ_1 和系统频移量 f_D ,通过速度计算表达式(2)、(3)即可获得速度参考值,测速仪示值与速度参考值的差值即为测速仪的示值误差。

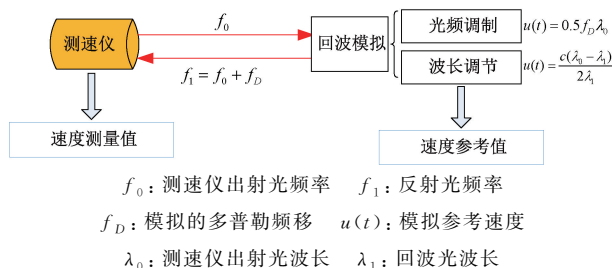


图 4 激光多普勒测速仪示值误差校准方案组成框图

Fig. 4 Composition block diagram of indication error calibration scheme of laser Doppler velocimeter

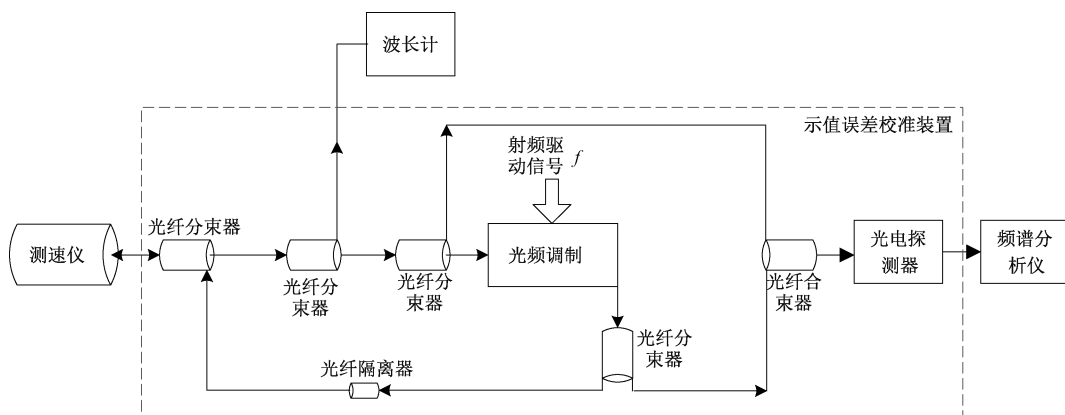


图 5 光频调制法示值误差校准方案

Fig. 5 Calibration scheme of indication error of optical frequency modulation method

基于 IQ 电光调制器的移频方案^[11-13]组成如图 6 所示。移频方案以 IQ 电光调制器(MXIQR-LN-30)为载体,驱动信号 f 通过信号发生器提供;90°电桥将驱动信号分为两路正交信号,分别连接在 IQ 调制器的两个射频输入端;V1、V2、V3 通过偏压控制模块提供,三路偏压共同作用,可实现 IQ 调制器工作点的调整,系统移频量即为驱动信号频率。

2.3 基于波长调节法的回波模拟校准方案

波长调节校准方案主要实现 3~10 km/s 速度校准。

光频调制采用移频模块对测速仪出射光进行移频,移频光与出射光隶属同源,两者拍频稳定性好,但移频模块对测速仪出射光存在一定损耗,且该损耗随移频频率增大而增大,无法在全速度范围内使用。波长调节通过构造回波波长模拟回波信号,间接构造参考速度,方案组成简单,但由于引入另外的独立激光器,拍频信号稳定性相较于光频调制稍差,测量不确定度会增大,适合在高速范畴使用。因此本校准方案分为两部分,校准速度在 3 km/s 以下的校准方案采用光频调制法。3 km/s 以上速度的校准采用波长调节方案。光频调制方案设计基于光学移频原理模拟测速过程产生的回波信号,间接构造校准所需的参考速度,通过外差检测光路与波长计对系统移频频率与测速仪出射光波长进行检测,通过式(2)进行参考速度计算;波长调节法设计通过可调波长激光器产生不同波长的光波,以此模拟测速过程中的回波信号,参考速度通过外置波长计检测测速仪出射光波长与回波信号波长,通过式(3)进行参考速度计算。

2.2 基于光频调制法的回波模拟校准方案

光频调制法校准方案主要实现 0.05~3 km/s 速度校准,校准方案组成框图如图 5 所示。光频调制使用 IQ 电光调制器实现光频搬移,测速仪工作波长 λ_0 通过波长计检测,频移量 f_D 通过光学外差干涉光路进行检测^[10],通过式(2)进行参考速度计算,测速仪示值误差即为测速仪速度示值与间接构造的参考速度值之差。

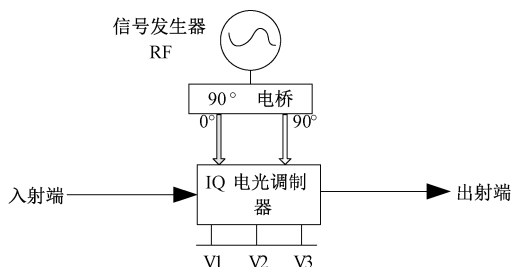


图 6 基于 IQ 电光调制器的光频调制方案

Fig. 6 Frequency shift scheme based on IQ electro-optic modulator

当激光多普勒测速仪出射光波长为 1 550 nm 时,3~10 km/s 速度范围对应回波波长范围为 1 550.03~1 550.1 nm。校准方案通过波长可调单频激光器提供模拟回波信号^[14-15],通过外置波长计对测速仪出射光波长与回波波长进行检测,由式(3)计算出构造的参考速度,测速仪示值误差即为测速仪速度示值与间接构造的参考速度值之差。校准装置原理样机组框图如图 7 所示。

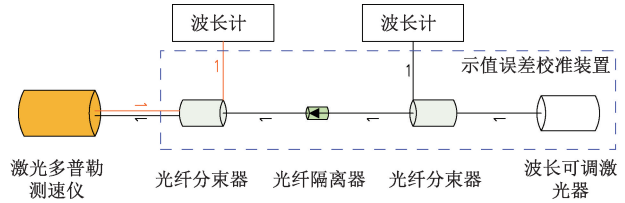


图 7 波长调节法示值误差校准方案

Fig. 7 Calibration scheme of indication error by wavelength adjustment method

对本文所述校准方案进行设备集成,由于波长计与频谱分析仪可独立单独使用,故不进行集成,最终形成的原理样机如图 8 所示。

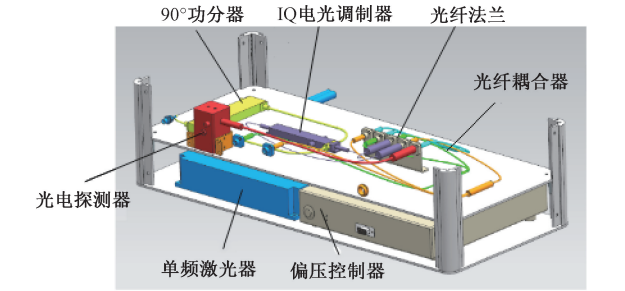


图 8 示值误差校准装置

Fig. 8 Design block diagram of calibration prototype

3 实验与结果

为验证本方案的可行性,依照本文所述方案与校准装置搭建测速仪示值误差校准实验。被测对象为测速范围 10 km/s 的激光多普勒测速仪,示值误差校准现场实物场景如图 9 所示。

针对 3 km/s 速度范围内的校准,采用图 5 所示的光频调制法的校准方案开展实验验证。测速仪不同速度测量点的校准,通过改变校准装置的移频频率实现,实验所得

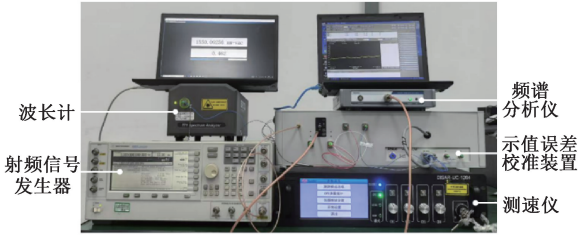


图 9 示值误差校准实验实物场景

Fig. 9 Shows the physical scene of value error calibration experiment

数据如表 1 所示。针对 3~10 km/s 速度范围内测速仪示值误差的校准,依照图 7 所示的波长调节法的校准方案开展实验验证。测速仪不同速度测量点的校准,通过改变单频激光器的输出波长实现,示值误差的校准实验数据如表 2~4 所示。表 2 数据是在测速仪工作在非混频模式下获得的实验数据,表 3 数据是测速仪工作在混频模式下获得的实验数据,表 4 为不同回光强度下的校准实验数据(测速仪工作模式为混频模式)。

表 1 激光多普勒测速仪示值误差校准结果(光频调制法)
Table 1 Calibration results of laser Doppler velocimeter signal value error (optical frequency modulation method)

入射光 波长/nm	移频频 率/GHz	参考 速度/ (m·s ⁻¹)	DISAR 设备 输出速度/ (m·s ⁻¹)	示值 误差/ %
1 550.094 68	0.499 837 829	387.40	394.87	1.93
1 550.094 97	1.000 850 665	775.71	777.39	0.22
1 550.094 26	1.497 312 831	1 160.49	1 164.67	0.36
1 550.094 54	2.002 437 944	1 551.98	1 554.13	0.14
1 550.094 97	2.501 905 55	1 939.10	1 946.20	0.37
1 550.094 59	3.001 463 166	2 326.28	2 330.81	0.19
1 550.094 59	3.500 975 777	2 713.42	2 718.81	0.20
1 550.094 66	3.997 366 281	3 098.15	3 102.16	0.13

表 2 激光多普勒测速仪示值误差校准结果(混频模式)
Table 2 Calibration results of laser Doppler velocimeter signal value error (mixing mode)

本振光 波长 λ_0 /nm	回波 波长 λ_1 /nm	参考 速度/ (m·s ⁻¹)	DISAR 设备 输出速度/ (m·s ⁻¹)	示值 误差/ %
1 550.094 49	1 550.065 85	2 771.50	2 705.43	-2.38
1 550.094 46	1 550.055 51	3 769.22	3 658.91	-2.93
1 550.094 47	1 550.035 54	5 702.77	5 581.40	-2.13
1 550.094 49	1 550.020 44	7 166.03	7 038.76	-1.78
1 550.094 49	1 550.005 35	8 626.42	8 496.13	-1.51
1 550.094 47	1 549.999 52	9 188.71	9 054.27	-1.46
1 550.094 48	1 549.989 41	10 168.13	10 038.77	-1.27

表 3 激光多普勒测速仪示值误差校准结果(非混频模式)
Table 3 Calibration results of laser Doppler velocimeter
(non-mixing mode)

本振光波 长 λ_0/nm	回波波长 λ_1/nm	参考速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	DISAR 设备 输出速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	示值误 差/%
1 550.094 43	1 550.065 60	2 789.88	2 795.06	0.19
1 550.094 61	1 550.056 10	3 726.64	3 736.44	0.26
1 550.094 64	1 550.035 97	5 677.61	5 674.43	-0.06

表 4 不同回光强度下的激光多普勒测速仪示值误差校准结果

Table 4 Calibration results of laser Doppler velocimetry indicator errors under different return light intensities

回光强 度/ μW	本振光波长 λ_0/nm	回波波长 λ_1/nm	参考速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	DISAR 设备输出 速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	示值误 差/%
14	1 550.094 41	1 550.005 42	8 611.91	8 488.38	-1.43
214	1 550.094 45	1 550.005 45	8 612.87	8 489.16	-1.44
357	1 550.094 47	1 550.005 48	8 611.91	8 488.38	-1.43
808	1 550.094 39	1 550.005 41	8 610.94	8 480.63	-1.51

由于本身特性,其本身波长存在一定漂移,这就引入一部分误差,导致测速仪在该模式下的示值误差增大。

表 4 数据为在保证回光强度满足激光多普勒测速仪最低要求的前提下,开展不同回光强度对校准结果的影响。由实验结果可知,本次实验光强变化对实验结果的影响较小。

4 校准准确度分析

4.1 光频调制法

光频调制法校准示值误差时,测速仪示值误差表达式 e 如式(4)所示,示值误差的测量准确性主要受 λ_0 与 f_D 的测量准确性影响,并且系统测量存在重复性,故本次测量准确性分析优先考虑上述因素。

$$e = u - u(t) = u - \lambda_0 f_D / 2 \tag{4}$$

式中: u 为测速仪示值速度; $u(t)$ 为参考速度; f_D 为校准系统移频量; λ_0 为测速仪出射波长; e 为示值误差。

通过对各影响参量求偏导数,进而获得相应的灵敏度系数,如式(5)所示。

$$c_1 = \left| \frac{\partial e}{\partial f_D} \right| = \frac{\lambda_0}{2}, c_2 = \left| \frac{\partial e}{\partial \lambda_0} \right| = \frac{f_D}{2} \tag{5}$$

1) 系统移频量测量产生的不确定度分量 u_1

设校准点速度为 $A \text{ m/s}$, $\lambda_0 = 1\,550 \text{ nm}$, 由式(2)可知, 对应的频移量 $f_D = 2u(t)/\lambda$ 。本方案所用频率测量设备的相对测量误差为 10^{-5} , 假设误差分布为均匀分布, 即频率测量引入的测量不确定度为 $u_{f_D} = 10^{-5} f_D / \sqrt{3}$, 进而转化为速度测量不确定度分量为:

$$u_1 = c_1 u_{f_D} / A = 6 \times 10^{-4} \% \tag{6}$$

由表 1~4 实验结果可以看出本文所述激光多普勒测速仪校准方案,通过光频调制法与波长调节法成功实现了对测速上限高达 10 km/s 的激光多普勒测速仪示值误差的校准。

由表 2 与 3 校准点重叠部分数据可以看出,激光多普勒测速仪在未混频模式下的示值误差校准结果整体上要小于混频模式下的示值误差校准结果,即测速仪的未混频工作模式的测量准确度要优于混频模式。导致此差异的主要因素是测速仪混频模式下,引入了另一激光光源,该光源波长在数据计算中使用标称值使用,而激光器

2) 波长测量产生的不确定度分量 u_2

本方案所用波长计的波长测量不确定度 $U = 2 \times 10^{-7} (k = 2)$ 。设速度为 $A \text{ m/s}$, $\lambda_0 = 1\,550 \text{ nm}$, 则波长计检测误差引入的不确定度分量 $u_\lambda = \lambda_0 U / 2$, 进而转化为速度测量不确定度分量为:

$$u_2 = c_2 u_\lambda / A = 1 \times 10^{-5} \% \tag{7}$$

3) 测量重复性产生的不确定度分量 u_3

测量重复性是对测速仪的同一速度测量点进行 10 次校准,使用贝塞尔公式计算重复性测量结果。本次重复性评定以 3 km/s 速度校准点为例,校准结果为 0.13% 、 0.01% 、 0.35% 、 0.31% 、 0.37% 、 0.23% 、 0.09% 、 0.23% 、 0.03% 、 0.16% 。由该部分产生的速度测量不确定度分量为:

$$u_3 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} = 0.13 \% \tag{8}$$

4) 扩展不确定度 U_r

根据不确定度相关理论知识可得校准结果的扩展不确定度如下所示,取 $k = 2$ 。

$$U_r = 2 \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.26 \% \tag{9}$$

4.2 波长调节法

由图 7 校准方案可知,本方案通过波长可调单频激光器模拟测速过程产生的回波信号,用以实现速度校准,参考速度 $u(t)$ 可以表示为:

$$u(t) = \frac{\lambda_0 c}{2\lambda_1} - \frac{c}{2} \tag{10}$$

式中: c 为光速; λ_0 为激光多普勒测速仪出射光波长; λ_1 为模拟回波波长; $u(t)$ 为参考速度。

通过对各影响参量求偏导数,进而获得相应的灵敏度系数,如式(11)所示。

$$\begin{cases} c_1 = \left| \frac{\partial u(t)}{\partial \lambda_0} \right| = \frac{c}{2\lambda_1} \\ c_2 = \left| \frac{\partial u(t)}{\partial \lambda_1} \right| = \frac{\lambda_0 c}{2\lambda_1^2} \end{cases} \quad (11)$$

1) 出射光波长 λ_0 测量不准确产生的不确定度分量 u_1

波长检测误差的大小与方案所选用的波长计性能直接相关。通过调研可知,目前波长计校准的相对扩展不确定度 $U=2 \times 10^{-7}$ ($k=2$)。以 1 550 nm 测速仪为例,波长计测量误差产生的不确定度分量 $u_{\lambda_0}=1\ 550U/2=1.55 \times 10^{-4}$ nm,由此产生的速度测量不确定度分量为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = 1\ 550.03\ \text{nm}, u_1 = c_1 u_{\lambda_0} = 14.515\ 8\ \text{m/s} \\ \lambda_1 = 1\ 550.05\ \text{nm}, u_1 = c_1 u_{\lambda_0} = 14.515\ 7\ \text{m/s} \\ \lambda_1 = 1\ 550.1\ \text{nm}, u_1 = c_1 u_{\lambda_0} = 14.515\ 2\ \text{m/s} \end{cases} \quad (12)$$

2) 回波 λ_1 波长测量不准确产生的不确定度分量 u_2

波长检测误差的大小与方案所选用的波长计性能直接相关。通过调研可知,目前波长计校准的相对扩展不确定度 $U=2 \times 10^{-7}$ ($k=2$)。以 1 550 nm 测速仪为例,回波光波长为 λ_1 ,则波长计测量误差产生的不确定度分量 $u_{\lambda_1}=\lambda_1 U/2$,由此产生的速度测量不确定度分量为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = 1\ 550.03\ \text{nm}, u_2 = c_2 u_{\lambda_1} = c_2 \lambda_1 U/2 = 14.515\ 6\ \text{m/s} \\ \lambda_1 = 1\ 550.05\ \text{nm}, u_2 = c_2 u_{\lambda_1} = c_2 \lambda_1 U/2 = 14.515\ 2\ \text{m/s} \\ \lambda_1 = 1\ 550.1\ \text{nm}, u_2 = c_2 u_{\lambda_1} = c_2 \lambda_1 U/2 = 14.514\ 3\ \text{m/s} \end{cases} \quad (13)$$

3) 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_3

以 5.6 km/s 校准点为例进行计算,10 次测量的示值误差数据分别为 12.27 m/s、2.58 m/s、8.39 m/s、11.29 m/s、-2.26 m/s、10.33 m/s、10.32 m/s、10.32 m/s、16.13 m/s、15.17 m/s,由测量重复性产生的速度测量不确定度分量为:

$$u_3 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} = 5.54\ \text{m/s} \quad (14)$$

4) 扩展不确定度 U_r

取 $k=2$, $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$, 则 U_r 结果如下:

当 $A = 2\ 903.17\ \text{m/s}$ ($\lambda_0 = 1\ 550\ \text{nm}$, $\lambda_1 = 1\ 550.03\ \text{nm}$) 时, $U_r = 2u_c/A = 1.46\%$; 当 $A = 4\ 838.55\ \text{m/s}$ ($\lambda_0 = 1\ 550\ \text{nm}$, $\lambda_1 = 1\ 550.05\ \text{nm}$) 时, $U_r = 2u_c/A = 0.88\%$; 当 $A = 9\ 676.80\ \text{m/s}$ ($\lambda_0 = 1\ 550\ \text{nm}$, $\lambda_1 = 1\ 550.1\ \text{nm}$) 时, $U_r = 2u_c/A = 0.44\%$ 。

由计算结果可知,3 km/s 以上测速示值误差校准的最大测量不确定度 $U_r=1.5\%$ ($k=2$)。

由测量准确度分析结果可知,光频调制法的校准不确定度相对于波长调节法要小。从原理分析可知其优势在于现有测量设备的频率测量准确度要高于波长测量准确度。所以要想提高激光多普勒测速仪的校准准确度,因尽可能在更宽速度范围内使用光频调制法对激光多普勒测

速仪进行校准。

5 结 论

本文通过分析激光多普勒测速仪工作原理,针对激光多普勒测速仪示值误差无法有效校准的问题,提出基于光学调制法和波长调节法的回波模拟校准方法,通过模拟回波信号间接构造参考速度信号,实现激光多普勒测速仪的示值误差校准。基于自研校准装置搭建校准实验平台,开展 10 km/s 激光多普勒测速仪示值误差校准实验,验证了校准方法的可行性,并进行了校准准确度分析。通过校准实验验证结果可知,本方法对于宽速域激光多普勒测速仪的校准具有一定的工程应用前景。

参考文献

- [1] 夏苑桃, 蔡洋. 激光多普勒测速仪应用于纳秒激光冲击过程的模拟和实验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(6): 994-1002.
- [2] XIA Y T, CAI Y. Numerical and experimental investigations on application of photon Doppler velocimetry in nanosecond laser-shock process [J]. Experimental Mechanics, 2020, 35(6): 994-1002.
- [3] 贺芳琪. 激光测振仪校准装置的设计与应用[D]. 杭州: 中国计量大学, 2016.
- [4] HE F Q. Design and application of laser vibrometer calibration device[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2016.
- [5] 吴晶, 鞠启明, 高奎贺. 多种测速仪的实验室模拟检测方法的研究[J]. 工业计量, 2023, 33(6): 1-3.
- [6] WU J, JU Q M, GAO K H. Research on laboratory simulation testing methods for multiple velocimeters[J]. Industrial Metrology, 2023, 33(6): 1-3.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局, JJG 528—2015 移动式机动车雷达测速仪检定规程[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015.
- [8] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Verification Regulation of Mobile Vehicle Radar Velocimeter JJG 528—2015[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2015.
- [9] 李广嘉. 破片测速系统校准方法及实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [10] LI G J. Calibration method and experimental research of fragment velocimetry system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [11] 鲁伟俊, 彭希锋, 陈爽, 等. 基于回波模拟法的激光多普勒测速仪示值误差检测方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2024(7): 30-34.
- [12] LU W J, PENG X F, CHEN SH, et al. Study on detection method of laser Doppler velocimeter indication error based on echo simulation method[J].

- Instrument Technique and Sensor, 2024(7): 30-34.
- [7] 崔耀星, 汤建勋, 聂晓明. 激光多普勒测速仪在线标定算法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(1): 105-108.
CUI Y X, TANG J X, NIE X M. Laser Doppler velocimeter online calibration algorithm [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(1): 105-108.
- [8] 陈兰剑, 席崇宾, 周健, 等. 无人机机载激光多普勒测速仪研究与飞行验证[J]. 光学学报, 2023, 43(17): 1712002.
CHEN L J, XI CH B, ZHOU J, et al. Research and flight test on airborne laser Doppler velocimeter for unmanned aerial vehicles[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(17): 1712002.
- [9] 李静, 曾令东, 袁胜智, 等. 激光多普勒测速仪在飞行器导航中的应用研究[J]. 应用激光, 2017, 37(6): 870-880.
LI J, ZENG L D, YUAN SH ZH, et al. Research on the application of laser Doppler velocimeter in aircraft navigation[J]. Applied Laser, 2017, 37(6): 870-880.
- [10] 朱吉, 傅礼鹏, 吴中超, 等. 基于差频原理的声光移频器[J]. 压电与声光, 2014, 36(4): 535-537.
ZHU J, FU L P, WU ZH CH, et al. Acousto-optic frequency shifter based on difference frequency principle[J]. Piezoelectric and Acousto-optic, 2014, 36(4): 535-537.
- [11] 王侠, 韦慕野, 邓东锋, 等. 用 IQ 调制器产生载波拟制单边带信号的研究[J]. 光电技术应用, 2021, 36(1): 14-54.
WANG X, WEI M Y, DENG D F, et al. Research on single sideband signal generated by IQ modulator[J]. Application of Optoelectronic Technology, 2021, 36(1): 14-54.
- [12] 李静楠. 基于双平行马赫-曾德尔调制器的微波光子混频方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
LI J N. Research on microwave photonic mixing method based on dual parallel mach-zehnder modulator [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
- [13] WANG Y, LI J, WANG D, et al. Ultra-wideband microwave photonic frequency downconverter based on carrier-suppressed single-sideband modulation [J]. Optics Communications, 2018, 410: 799-804.
- [14] 王旭, 李小康, 陈龙飞. 基于光开关和激光拍频的光纤色散快速测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030603.
WANG X, LI X K, CHEN L F. Fast measurement of optical fiber dispersion method based on optical switch and laser beat frequency[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030603.
- [15] 王旭, 张豪杰, 温泉, 等. 一种利用激光拍频实现应力测量的传感装置[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0801011.
WANG X, ZHANG H J, WEN Q, et al. A stress fiber sensor based on laser beat frequency[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0801011.

作者简介

鲁伟俊(通信作者), 硕士, 工程师, 主要研究方向为几何量精密测量技术研究。

E-mail: 470235451@qq.com