

文章编号:1001-5078(2024)12-1857-07

· 激光应用技术 ·

基于激光测速仪的计价器检定系统的研究

梁焜¹, 周健²

(1. 国防科学技术大学 气象海洋学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科学技术大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 提出将激光多普勒测速仪应用于出租车计价器检定上, 通过多普勒效应, 采用双斜射非对称结构激光测速仪, 利用双谱峰信号处理技术, 便携式外挂工装和交互良好的操作系统完成系统设计。理论分析与实验表明: 基于 LDV 的出租车计价器检定系统具有较好的工作效果。气压式外挂工装使设备具有便携性, 能够满足更多的应用场景; 独创性的双斜射非对称光路结构设计, 避免了道路颠簸对于测量精度的影响, 提高了系统的可靠性和测量精度; 采用双谱峰信号处理技术, 提高了信号处理速度, 实现对于速度信号的实时处理; 同时配有自主设计的操作页面, 操作简单便捷, 容错率强, 人机交互良好, 极大地简化了计价器检定的流程。因此, 基于 LDV 的出租车计价器检定系统能够满足市场的实际需求, 可以解决当前计价器检定所面临的难题, 具有较高的实际价值。

关键词: 计量学; 计价器检定; 便携式; 激光多普勒; 高精度

中图分类号: TN249; TP274 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.008

Research on the calibration system of meter based on laser tachometer

LIANG Kun¹, ZHOU Jian²

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Frontier Interdisciplinary College, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In this paper, Laser Doppler Velocimetry (LDV) is applied to taxi meter checking through the Doppler effect, and the system design is completed by using a double oblique radiation asymmetric structure laser velocimeter, bispectral peaks signal processing technology, portable external tooling and a well-interacted operating system. Theoretical analyses and experiments demonstrate that the LDV-based taxi meter calibration system performs effectively. The pneumatic attachment of the apparatus enhances portability, allowing for broader application scenarios. The innovative dual oblique, asymmetric optical path design minimizes the impact of road irregularities on measurement accuracy, thus enhancing the system's reliability and precision. The dual spectral peak signal processing technology improves the speed of signal processing, enabling real-time processing of velocity signals. The system also features a custom-designed user interface, which is simple, user-friendly, and has a high error tolerance, greatly simplifying the meter calibration process. Consequently, the LDV-based taxi meter calibration system can meet the real-world demands of the market and solve prevalent challenges in meter calibration, providing substantial practical value.

Keywords: metrology; meter verification; portable; laser Doppler; high precision

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (No. 2021JJ30782) 资助。

作者简介: 梁焜 (2003 -), 男, 本科, 主要研究方向为海洋光学。E-mail: gfliangkun@outlook.com

通讯作者: 周健 (1983 -), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新型惯性传感技术。E-mail: wttzhoujian@163.com

收稿日期: 2024-04-16

1 引言

出租车计价器是列入国家强制检定计量器具目录的计量器具,量之毫厘,计之为民,计价器计量数据的准确、可靠,关系到出租车运营者和乘客的切身利益。出租车计价器通过内置的传感器将检测到的轮胎转动圈数转化为电脉冲,将脉冲数与轮胎物理特性相关的 K 参数做比即可得到出租车行驶里程。但是随着时间的推移,轮胎和变速系统齿轮的磨损、更换等都会影响计价器准确度。根据国家计量检定相关规定,装车后的计价器检定周期为 1 年^[1],即所有的出租车计价器每年都要在检定到期之前经法定计量检定机构进行周期强制计量检定,以确保计价器处于合格状态。

当前,国内进行出租车检定的主要方法为滚轮法^[1]。需要将出租车开上标准滚轮装置后,使计价器进入运营状态,启动标准滚轮装置,当计价器接近选定的检定点时,停止滚轮装置,通过被检计价器显示的转数值与标准滚轮装置所显示的转数相比较,检定当前计价器的计程误差。然而,当前的滚轮式计价器检定方法存在两个问题^[2-4]: (1) 检定存在空间限制,检定工作需要在规定时限内将一定区域的全部出租车检定完毕,在待检车辆较多,单次检定耗时较长,空间受限的情况下,造成人力与时间成本的浪费。(2) 接触式的测量方式会给 K 值的校准带来误差。滚轮式的检定方式需要将滚轮与轮胎接触后,利用摩擦力让滚轮带动轮胎再进行测量。这种接触式的测量方式会因轮胎与滚轮之间的打滑引起误差,且轮胎压在地面上时的接触变形情况和在检定装置滚轮上的变形不同,会造成检定不确定度的上升。

因此,研究一款新型出租车计价器检定装置具有重要的现实意义。针对当前对于检定装置高精度,高可靠性,高灵活性的实际需求,文章设计了基于激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimeter, LDV)的出租车计价器检定系统,用于替代现有方法。

2 系统的整体设计

本系统主要包括信息感知、蓝牙通讯、检定操作三个部分(如图 1),信息感知部分以自主研发的双光束 LDV 为核心,通过双谱峰信号处理技术

提取双频多普勒信号获取车辆的速度与里程信息。利用树莓派作为蓝牙通讯的中介与信息处理终端,将采集到 LDV 信息通过蓝牙无线传输至触控界面上进行检定操作,实现了对出租车计价器的便捷检定,整体构造简单,稳定性高,具有良好的人机交互功能,如图 2 所示。

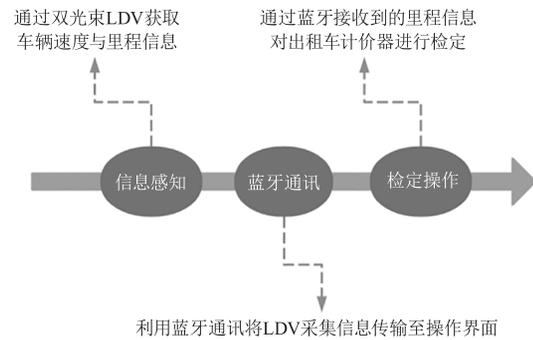


图 1 系统整体结构框图

Fig. 1 Overall structure block diagram of the system



图 2 整体结构框图

Fig. 2 Verification flow block diagram

2.1 激光多普勒测速仪的基本原理

激光多普勒测速仪(LDV)基于激光多普勒效应,可以稳定、准确地输出载体的实际运动速度,在输出端对时间进行积分,即可得到载体的实际运行里程。

给定一个固定频率的激光光源,当光源和光电探测器发生相对运动时,静止的光电探测器接收到的光波频率相对于光源发出的光波频率将会发生频移,此即激光多普勒效应。将波长为 λ 的光源与光电探测器集成为一体,附着在运动的载体上,当载体以速度 v 运动,原频率为 f 的激光从以速度 v 运动的光源 S 处沿着 \vec{e}_i 方向射向静止的地面 P ,经地面散射后,部分光从静止的地面 P 沿着 \vec{e}_s 方向进入同样以速度 v 运动的光电探测器 D 中,经过两次多普勒频移后,光电探测器接收到的频率 f' 较激光的原频率发生了频移,频移量的表达式为^[5-8]:

$$f_D = f' - f = \frac{v(\vec{e}_i - \vec{e}_s)}{\lambda} \quad (1)$$

由频移量的表达式可以得知,载体的运动速度与多普勒频移量成线性关系,即:

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

由上式可得,LDV 可以通过多普勒频移量直接输出速度信号,与加速度计输出的加速度信号相比,减少了由于积分导致的误差随时间累积的风险,具有非接触测量、动态响应范围宽、空间分辨率高等优点。

在光路结构部分^[9-13],采用双斜射非对称设计。激光器出射的激光经准直镜准直后,由分束镜分成强度相等的两束光,一束经衰减片和全反射镜沿原方向返回,再经过分束镜、滤光片和小孔光阑入射到光电探测器上,为参考光;另一束被小夹角分光棱镜分成夹角为 α 的两束光入射到运动表面上,这两束光的各自沿原方向返回的散射光,合为信号光,如图 3 所示。

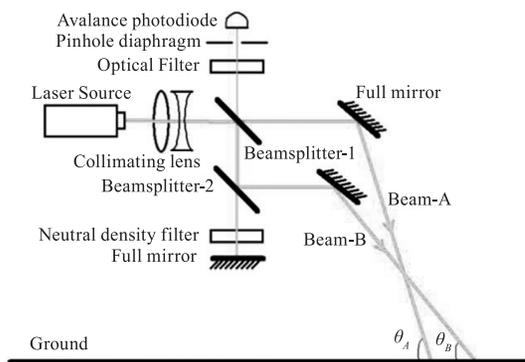


图3 光路结构设计图

Fig. 3 Optical path structure design drawing

光路中分光棱镜将信号光分为两束,当两束激光(记为 A 光和 B 光)以不同的角度射向静止的地面,各自被光电探测器所探测得到的散射光的多普勒频率 f_{DA} 与 f_{DB} 分别为^[13-15]:

$$f_{DA} = \frac{2V \cos \theta_A}{\lambda} \quad (3)$$

$$f_{DB} = \frac{2V \cos \theta_B}{\lambda} \quad (4)$$

且两个多普勒频率满足下式:

$$\frac{f_{DA}}{f_{DB}} = \frac{\cos \theta_A}{\cos \theta_B} \quad (5)$$

设 θ_A 与 θ_B 的差值为 α ,则上式可重写为:

$$\frac{f_{DA}}{f_{DB}} = \frac{\cos \theta_B \cos \alpha - \sin \theta_B \sin \alpha}{\cos \theta_B}$$

$$= \cos \alpha - \tan \theta_B \sin \alpha \quad (6)$$

可以得到 $\tan \theta_B$ 与两多普勒频率的关系为:

$$\tan \theta_B = \frac{1}{\tan \alpha} - \frac{1}{\sin \alpha} \frac{f_{DA}}{f_{DB}} \quad (7)$$

将上式代入原理部分得到的载体运动速度与多普勒频移量的关系式,可以将原本的关系式表达为:

$$v = \frac{\lambda f_{DB}}{2 \cos \theta_B} = \frac{\lambda f_{DB}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\tan \alpha} - \frac{1}{\sin \alpha} \frac{f_{DA}}{f_{DB}} \right)^2} \quad (8)$$

此时 LDV 测得的速度仅与接收到的双光束多普勒频移量 f_{DA} 与 f_{DB} 、双光束夹角 α 有关,与车速和 B 光的夹角 θ_B 无关,表明该结构可以有效消除载体运动过程中的颠簸导致发射倾角的变化对速度测量精度的影响。

由光路部分得到的 LDV 测量速度的表达式可知, v 由三个参量, f_{DA} f_{DB} 、 α 构成,其中 α 为 A 光与 B 光的出射夹角,与分光棱镜有关,为已知量。此时 LDV 仅需获取双光束多普勒频移量 f_{DA} f_{DB} ,即可得到运动速度 v 。本文采用双谱峰信号处理技术获取双频多普勒信号^[15-19],信号处理流程框图如图 4 所示。

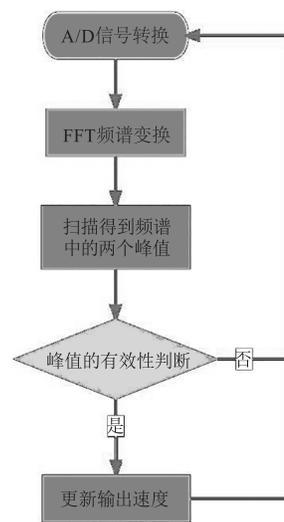


图4 信号处理框图

Fig. 4 Signal processing block diagram

将光电探测器采集到的信号进行 A/D 转换后,将得到的数字信号进行 FFT 变换,从时域表示转为频域表示。对 FFT 变换后得到的频谱进行峰值扫描,频谱中出现的两个最大值所对应的横坐标即为

双光束多普勒频率。为避免噪声、扰动等影响,进一步分析所得峰值,判断其有效性,如峰值可用,则可根据双光速 LDV 测量速度的表达式更新速度,输出到接收端。

2.2 软件设计部分

本文利用 USB 接口,实现了 LDV 与触控式树莓派,蓝牙模块的无线信息通讯,结合 Pyqt 设计完成检定器操作界面,具有的良好的人机交互性。本文检定标准均参照出租汽车计价器检定规程 JJG-517 2016。如图 5 所示,根据标准,系统中选定三个检定点进行检定,分别为 1 km 起程点,1.1 km 续程点与 1.2 km 续程点。打开 UI 界面,输入车牌号后,点击“开始检测”按钮后并进入检测界面;点击“检定开始”按钮系统开始运行;LDV 里程测量值从 0 开始增加;当点击检定点 1 处的“采样”后,以 100 个数据每秒对 LDV 速度输出值进行采样,积分运算得到里程值;到达里程点后记录对应 LDV 测得的里程值 J_1 ,并对于计程误差 w_1 进行计算,其中计程误差 w 的计算公式为:

$$w = \frac{D - J}{J} \quad (9)$$

其中, D 表示计价器里程示值; J 表示 LDV 测量得到的里程值。重复上述步骤于续程点 1 和续程点 2,得到三次测量误差 w_1, w_2, w_3 ; 根据 JJG-517 2016 标准,当 w_1, w_2, w_3 都处于 $-4\% \sim +1\%$ 的区间内时,系统输出“检测合格”,反之输出“检测不合格”。

当系统输出“检定不合格”时,可通过调整计价器 K 值进行校准, K 表示计价器为在 1 km 行程时接收到的信号脉冲数,表达式为:

$$K = \frac{N}{S} \quad (10)$$

其中, S 为出租车的行驶距离; N 在 S 行驶距离中采集到的信号脉冲数目, K 值的单位为 r/km 。本系统将给出校正因子 K_r 作为 K 值校准的参考值,校正因子 K_r 的表达式为:

$$K_r = \frac{1}{3} \left(\frac{D_1}{J_1} + \frac{D_2}{J_2} + \frac{D_3}{J_3} \right) \quad (11)$$

其中, D_1, D_2, D_3 为里程计示值, J_1, J_2, J_3 为 LDV 测量得到的里程值。

利用 K_r 对计价器校正的公式为:

$$K_e = K_r \cdot K_i \quad (12)$$

其中, K_i 为计价器原本的 K 值; K_e 为利用校正因子 K_r 校准后的 K 值。

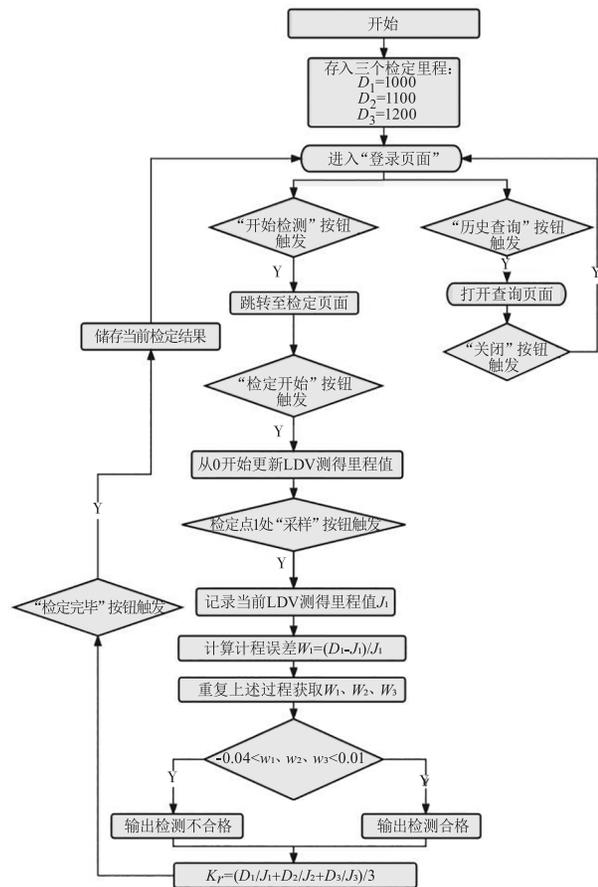


图5 检定操作流程图

Fig. 5 Verification operation flow chart

3 实验分析

3.1 LDV 精度测试

参照 JJF 1193 - 2008 非接触式汽车速度计校准规范,于湖南省计量院对系统的核心组件激光多普勒测速仪进行精度测试。测试使用计量院转速校准装置作为计量基准装置,测量范围为 $0.1 \sim 100000$ r/min,不确定度/准确度等级规定为:

$$U_{rel} = \begin{cases} 5 \times 10^{-6} \leq \frac{40000}{\min} r, k = 3 \\ 1 \times 10^{-5} > \frac{40000}{\min} r, k = 3 \end{cases} \quad (13)$$

测试中 LDV 出射激光点照在转速标准装置上,如图 6 所示,对比转速标准所转动的里程值与 LDV 测得的里程值得到 LDV 的精度。

进行 7 组速度测试,速度测试范围为 10.000 km/h ~ 200.000 km/h,测试结果如下表 1 所示。该 LDV 在

高速与低速情况下的误差均较小,速度测量相对误差绝对值最大值为0.050%,最小值为0.016%。



图6 利用标准滚轮装置测试精度

Fig. 6 Test accuracy with standard roller devices

表1 LDV 精度测试

Tab.1 LDV accuracy test

标准值/(km·h ⁻¹)	测量值/(km·h ⁻¹)	相对误差/%
10.000	10.00498	0.050
20.000	20.00983	0.049
40.000	40.01964	0.049
80.000	80.02850	0.036
120.000	120.05798	0.048
180.000	180.03742	0.021
200.000	199.96854	-0.016

经测试,本系统所使用激光多普勒测速仪在10.000 km/h~200.000 km/h 速度范围内相对误差小于±0.050%,能够满足出租车计价器校准需求,具有高精度与高可靠性。

3.2 检定系统实装测试

本检定系统面向出租车计价器检定的实际需求,为充分验证本系统在实际应用中的可靠性与便捷性,参照租汽车计价器检定规程JJG-517 2016,进行了本系统的实装检定测试。

将本系统搭载在出租车上,如图7所示,通过气压式外挂工装将测速仪垂直安装在出租车侧面。选定一处车流量较少,地面宽阔平坦的路段进行测试。使用本系统按操作流程对同一辆出租车进行三次检定,以三次检定结果的重复性、三次检定的耗时为标准判断本系统的稳定性与便捷性。

首先需要将LDV设备通电进行预热,1~2 min后当LDV上绿灯常亮表明LDV已预热完毕,即可开始检定。

对同一辆出租车进行三次检定的结果如表2,3所示。



图7 LDV 装载于出租车上

Fig. 7 LDV is loaded on a taxi

表2 LDV 检定系统耗时性测试

Tab.2 Time consuming test of LDV verification system

参数	测试一	测试二	测试三
耗时/s	130	121	124
安装耗时/s	49	42	45

上述测试数据表明对同一辆出租车进行三次检定得到的校正因子基本一致,三次检定校正因子均值为0.99863,标准差为0.000068,波动较小,重复性较好,表明本系统可靠性高,稳定性好,精度高。但三次检定耗时均在2 min左右,最长耗时达到两分十秒,且测速仪安装的耗时占比较大,表明该检定系统需要对测速仪安装方式进行改进,降低安装难度和安装要求,以提高检定效率。

4 结论

理论分析和实验表明,基于LDV的出租车计价器检定设备能够满足目前市场的迫切需求,气压式外挂工装使设备具有便携性;独创性的双斜射非对称光路结构设计,避免了道路颠簸对于测量精度的影响,提高了系统的可靠性和测量精度;采用双谱峰信号处理技术,提高了相应速度,实现对于速度信号的实时处理;同时配有自主设计的操作页面,操作简单便捷,容错率强,人机交互良好。综上所述,一方面基于LDV的出租车计价器检定设备具有高精度、高可靠、非接触、高灵活性等优势,在保证乘客利益的同时,可以解除当前出租车检定工作的种种限制,为出租车司机与工作人员带来便利。另一方面需要提高其在安装时的可操作性,减少检定耗时,提高工作效率。

表3 LDV 检定系统重复性测试
Tab.3 Repeatability test of LDV verification system

项目	检定点/m	LDV 测得里程值/m	计程误差/%	检测结果	校正因子 K_i	
测试一	测定点一	1000	1002.01	-0.20	合格	0.99856
	测定点二	1100	1103.94	-0.36		
	测定点三	1200	1198.48	0.13		
测试二	测定点一	1000	1002.86	-0.29	合格	0.99872
	测定点二	1100	1101.72	-0.16		
	测定点三	1200	1199.33	0.06		
测试三	测定点一	1000	1003.78	-0.38	合格	0.99860
	测定点二	1100	1100.66	-0.06		
	测定点三	1200	1199.77	0.02		

参考文献:

- [1] Cui Jie. Discussion on the verification of taxi meter and the problems in the process [J]. China Equipment Engineering, 2016, (8): 51. (in Chinese)
崔杰. 浅谈出租车计价器的检定与其过程中的问题 [J]. 中国设备工程, 2016, (8): 51.
- [2] Shi Zunqin. Development of taxi meter verification device [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2020. (in Chinese)
史遵琴. 出租车计价器检定装置的研制 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2020.
- [3] Chi Junjun, Wang Long. Discussion on the verification of Taxi meter [J]. China Science and Technology Journal Database Industry A, 2023, (4): 171 - 174. (in Chinese)
迟俊军, 王龙. 浅谈出租车计价器的检定工作 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2023, (4): 171 - 174.
- [4] Chen Lanjian, Xi Chongbin, Zhou Jian, et al. Research progress of laser Doppler velocity measurement for navigation and positioning [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(6): 174 - 186. (in Chinese)
陈兰剑, 席崇宾, 周健, 等. 用于导航定位的激光多普勒测速技术研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 174 - 186.
- [5] Chen Lanjian, Xi Chong bin, Zhou Jian, et al. Research and flight verification of airborne laser Doppler velocimeter for UAV [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(17): 54 - 63. (in Chinese)
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): 54 - 63.
- [6] Zhou Jian, Xi Chong bin, Nie Xiaoming, et al. A noise self-correcting laser doppler velocity measurement system and method; CN115932313A [P]. 2023 - 04 - 07. (in Chinese)
周健, 席崇宾, 聂晓明, 等. 一种噪声自校正激光多普勒测速系统及方法; CN115932313A [P]. 2023 - 04 - 07.
- [7] Tao Shanqing, Zhen Sheng lai, Fang Jian, et al. Laser Doppler velocimetry system with dual polarization structure [J]. Chinese Optics (Chinese & English), 2023, 16(4): 753 - 764. (in Chinese)
陶善静, 甄胜来, 方健, 等. 双路偏振结构的激光多普勒测速系统 [J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(4): 753 - 764.
- [8] Cui Lishui, Zhang Yuwen, Li Chunhui. A laser doppler velocimeter velocity measurement method based on Mixed base FFT; CN114578093A [P]. 2022 - 06 - 03. (in Chinese)
崔骊水, 张育闻, 李春辉. 一种基于混合基 FFT 的激光多普勒测速仪测速方法; CN114578093A [P]. 2022 - 06 - 03
- [9] Gao Chunfeng, Wei Guo, Wang Qi, et al. One-dimensional laser doppler velocimeter/single axis rotating inertial navigation combination vehicle elevation measurement method (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(12): 9 - 17. (in Chinese)
高春峰, 魏国, 王琦, 等. 一维激光多普勒测速仪/单轴旋转惯导组合车载高程测量方法 (特邀) [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(12): 9 - 17.
- [10] Chen Hongjiang, Nie Xiaoming, Wang Mengcheng. Vehicle integrated navigation system based on two-dimensional laser Doppler velocimeter [J]. Infrared and Laser Engi-

- neering, 2018, 47(12):218-224. (in Chinese)
- 陈红江, 聂晓明, 王梦成. 基于二维激光多普勒测速仪的车载组合导航系统[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12):218-224.
- [11] Li Wentao, Tang Hao, Zhou Jian. Research on laser speedometer for highway speeding detection [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9):149-158. (in Chinese)
- 厉文涛, 汤灏, 周健. 公路超速检测激光测速仪研究[J]. 光子学报, 2020, 49(9):149-158.
- [12] Zhou Jian, Long Xingwu. Research on reference beam laser doppler velocimeter [J]. Laser Journal, 2009, (4):54-55. (in Chinese)
- 周健, 龙兴武. 参考光束型激光多普勒测速仪的研究[J]. 激光杂志, 2009, (4):54-55.
- [13] Men Shaojie, Yu Qiuyuan, Liu Zhaojun, et al. An axial multi-point laser doppler velocity measurement system, method and application; CN117538891A [P]. 2024-02-09. (in Chinese)
- 少杰, 玉秋媛, 刘兆军, 等. 一种轴向多点激光多普勒测速系统、方法及应用; CN117538891A [P]. 2024-02-09.
- [14] Yin Xinhao, Zhou Yan, Zhu Ning, et al. Measurement of low pressure flow field velocity based on two-dimensional laser Doppler tachometer [J]. Brand and Standardization, 2024, (2):188-190. (in Chinese)
- 尹鑫昊, 周艳, 朱宁, 等. 基于二维激光多普勒测速仪测量低压流场速度[J]. 品牌与标准化, 2024, (2):188-190.
- [15] Cao Kang, Jiang Chenghao, Zhu Jingguo, et al. Study on frequency shift characteristics of laser Doppler [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11):150-157. (in Chinese)
- 曹康, 姜成昊, 朱精果, 等. 激光多普勒移频特性研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11):150-157.