

## 基于液体透镜的激光多普勒信号品质因子增强技术

席崇宾, 黄荣, 周健\*, 聂晓明

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 为了提升多普勒信号的有效性, 增加激光多普勒测速仪的工作距离和可测量范围, 提出了一种基于液体透镜的品质因子增强技术。对多普勒信号的品质因子分布进行了理论分析, 然后以高斯光学为理论基础, 对基于液体透镜的激光多普勒测速仪出射高斯光束的腰斑位置和大小进行了仿真分析。最后搭建了基于液体透镜的激光多普勒测速系统, 对不同驱动电流下的品质因子进行了测量。理论分析和实验结果表明: 通过改变液体透镜的驱动电流, 多普勒信号的品质因子显著增加, 大幅提升激光多普勒测速仪的工作距离和可测量范围。

**关键词** 测量; 激光多普勒测速仪; 品质因子; 液体透镜; 驱动电流; 工作距离; 可测量范围

**中图分类号** TN29

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.0704003

## 1 引言

Yeh 等<sup>[1]</sup>在 1964 年首次证实可以通过测量多普勒频移得到液体流速。作为一种新型速度传感器, 激光多普勒测速仪(LDV)通过测量参考光和信号光的干涉信号得到载体的运动速度, 具有非接触测量、测量过程对目标无干扰、测速精度高等优点。近年来, 激光多普勒测速仪逐渐被用于测量固体表面的运动速度<sup>[2]</sup>、位移<sup>[3]</sup>、振动<sup>[4]</sup>等。但在车载激光多普勒测速仪<sup>[5]</sup>的使用过程中, 由于路面凹凸起伏或者安装高度的限制使运动表面超出激光多普勒测速仪的可测量范围时, 散射光强度减弱, 多普勒信号强度降低, 探测器输出信号的信噪比很低, 其最大频谱对应的频率不是真实的多普勒频率, 从而导致速度测量误差很大, 此时的多普勒信号为无效信号。为了对多普勒信号的有效性进行判定, 提出了品质因子  $Q$ <sup>[6]</sup>, 在测量过程中, 首先设定品质因子阈值  $Q_0$ , 如果多普勒信号的品质因子  $Q$  大于  $Q_0$ , 则认为多普勒信号是有效的, 否则认为多普勒信号是无效的。作为判定多普勒信号有效性的关键参数, 品质因子的大小直接决定了激光多普勒测速仪的工作距离和可测量范围。为了满足测量范围的需求, 现有的方法为采用两个固定焦距的透镜构成光束变换系

统。这种方法一方面会使两个透镜之间的距离较大, 使激光多普勒测速仪的整体体积过大, 另外一方面这种方法的测量范围仍然有限, 并且无法根据实际情况改变。要想使可测量范围可变, 需要增加位移机构改变透镜之间的距离或者改变透镜组合, 但增加位移机构会增加系统的复杂性, 降低系统可靠性, 而在实际应用过程中又不可能随时更换透镜组合。

本文提出了一种基于液体透镜的品质因子增强技术, 该技术改变出射高斯光束的腰斑位置, 使不同测量距离的品质因子满足阈值条件。首先对品质因子的分布进行了理论分析, 同时对利用液体透镜改变高斯光束腰斑位置的可行性进行了理论分析与仿真, 最后搭建了基于液体透镜的激光多普勒测速系统, 通过控制驱动电流的大小对不同测量距离下品质因子的分布进行了测量。实验结果表明, 基于液体透镜的激光多普勒测速仪对于多普勒信号的品质因子增强效果显著, 大大提升了测速仪的工作距离和可测量范围。

## 2 基本原理(实验仿真)

### 2.1 品质因子的分布

品质因子的定义为多普勒信号频谱中峰值谱与

收稿日期: 2020-09-02; 修回日期: 2020-10-06; 录用日期: 2020-10-26

基金项目: 国防科技大学前沿交叉学科学院重大基础自主研究项目

\*E-mail: wttzhujian@163.com

其他所有点的频谱均方根的比值,表达式为

$$Q = \frac{P_m}{\sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{m-1} P_j^2 + \sum_{j=m+1}^{N/2-1} P_j^2}{N/2-1}}}, \quad (1)$$

式中:  $P_m$  为多普勒信号的频谱峰值;  $j$  为 0 到  $m-1$  的整数;  $N$  为信号频谱中不同的频率数量。激光多普勒信号强度与光学结构参数的关系<sup>[7]</sup>为

$$I = \sqrt{E [i^2(t)]} = \frac{akq}{2} \times \frac{D}{2\omega} \sqrt{\frac{\pi k_2}{2k_1}}, \quad (2)$$

式中:  $q$  为测量表面上的平均光强;  $a$  为与参考光强相关的常数;  $E [i^2(t)]$  为光电探测器输出电流的均方根值;  $k, k_1, k_2$  均为常数;  $2\omega$  为散射表面上的光斑直径(假设光斑为圆形);  $D$  为光敏面的直径。

由(2)式可得,多普勒信号的强度随着光斑直径的减小而增强。根据傅里叶变换的线性性质,多普勒信号的频谱峰值  $P_m$  也会增大,而  $P_j (j \neq m)$  主要为与多普勒信号强度无关的噪声频谱,因此  $P_m$  的增幅大于  $P_j$ , 此时的品质因子将会增大。因此品质因子与光斑直径成反比,可以得

$$Q = \frac{k_3}{2\omega}, \quad (3)$$

式中:  $k_3$  为常数。由高斯光束的性质可知,散射表面的光斑半径与出射高斯光束的腰斑半径之间的关系为

$$\omega = \omega_3 \sqrt{1 + \left(\frac{z - L_0}{\pi\omega_3/\lambda}\right)^2}, \quad (4)$$

式中:  $\omega_3$  为高斯光束腰斑半径,如图 1 所示,  $z$  为测量点的位置,  $L_0$  为腰斑位置。结合(3)、(4)式,品质因子的表达式可以表示为

$$Q = \frac{k_3}{2\omega_3 \sqrt{1 + \left(\frac{z - L_0}{\pi\omega_3/\lambda}\right)^2}}. \quad (5)$$

品质因子的分布如图 1 中曲线所示。随着测量点接近腰斑位置,品质因子呈现上升趋势,而当测量点远离腰斑时,由于光斑变大,散射光变弱,品质因子开始下降。根据高斯光束的对称性,多普勒信号的品质因子在腰斑附近一定范围以内时大于品质因子阈值。所以当运动表面超出激光多普勒测速仪的可测量范围而使品质因子小于阈值时,可以通过改变高斯光束腰斑位置的方法增大多普勒信号的品质因子,使运动表面重新位于可测量范围以内。

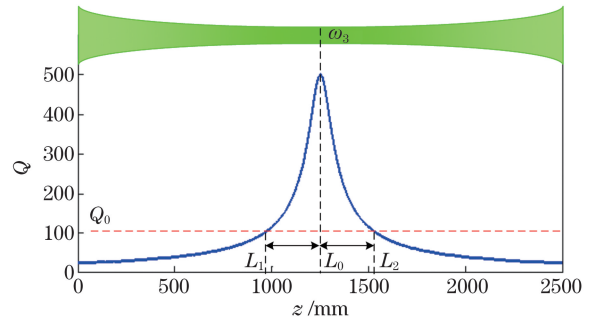


图 1 品质因子分布图

Fig. 1 Diagram of quality factor distribution

## 2.2 基于液体透镜的激光多普勒测速系统

为了增大多普勒信号的品质因子,使其在更大范围内满足阈值条件,设计了如图 2 所示的激光多普勒测速仪,以功率为 50 mW 的单纵模固体激光器作为系统光源,激光器发出的光束通过扩束、准直后经过分束器。其中被分束器反射的光束经衰减器入射到反射镜上,经过镜面反射后,再经过衰减器和分束器,这束光称为参考光。另外一束透过分束器的光通过光阑后进入由液体透镜(ETL)和固定透镜(F)组成的光束变换系统,然后以角度  $\theta$  射向运动表面。运动表面将产生沿各个方向的散射光,其中沿出射光相反方向的散射光原路返回到分束器,称为信号光。参考光和信号光经过偏振器、滤光片和针孔膜片后到达雪崩光电二极管的光敏表面。固体表面的速度在出射光方向的速度分量使信号光产生多普勒频移,通过检测信号光和参考光在光敏面产生的拍频信号,可以得到多普勒频率。根据多普勒效应,固体表面的运动速度和多普勒频率的关系<sup>[8]</sup>为

$$V_D = \frac{\lambda}{2\cos\theta} \times f_D, \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为激光器的波长;  $f_D$  为多普勒频率;  $\theta$  为出射光与运动表面的夹角,称为出射倾角。激光多普勒测速仪的测量景深  $\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2$ , 只有在  $L_0 - \Delta L_1 \sim L_0 + \Delta L_2$  内的多普勒信号为有效信号,这一范围即为激光多普勒测速仪的可测量范围,  $L_0$  为系统的工作距离。

激光器的出射光束经过透镜组后仍为高斯光束,因此图 2 所示的系统可以简化为图 3 所示的两个部分:前部系统和光束变换系统。其中  $\omega_0$  为入射到光束变换系统的高斯光束的腰斑半径,  $\omega_2$  为出射高斯光束的腰斑半径,  $l_1$  为入射高斯光束腰斑到液体透镜的距离,  $d$  为液体透镜和固定焦距透镜之间的距离,  $l_2$  为固定焦距透镜到出射高斯光束腰斑

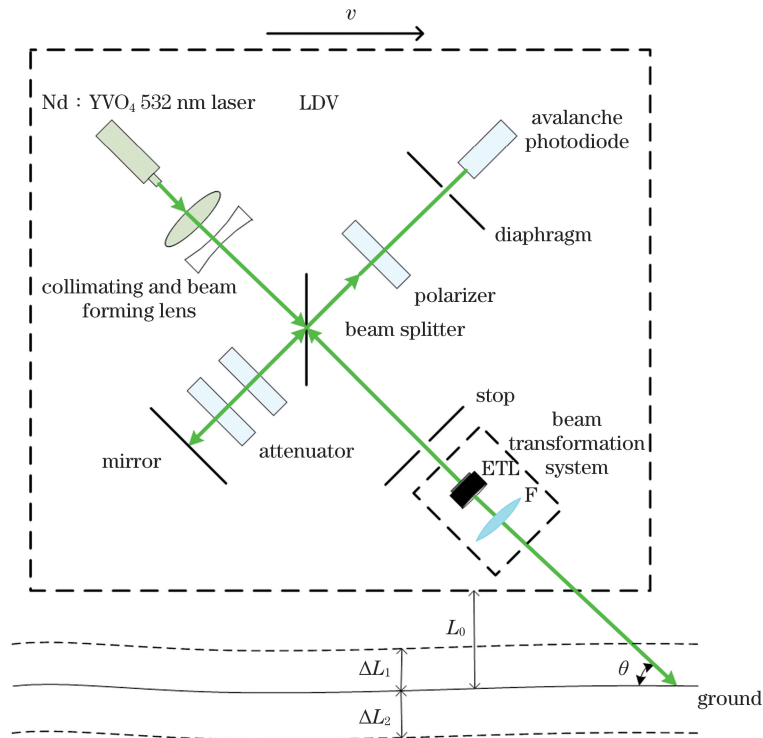


图 2 基于液体透镜的激光多普勒测速仪结构示意图

Fig. 2 Schematic of LDV based on liquid lens

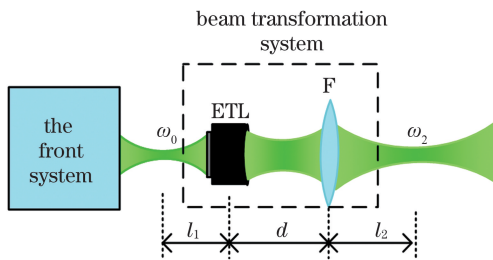


图 3 基于液体透镜的激光多普勒测速仪简化结构示意图

Fig. 3 Simplified structure diagram of LDV based on liquid lens

的距离。

如图 4(a)所示,液体透镜核心是一个由弹性聚合物薄膜密封的充满光学液体的容器,通过改变驱动电流的大小,可以控制作用在聚合物薄膜上的压力,使液体流入或流出容器,从而改变液体透镜的曲率半径<sup>[9]</sup>。当液体透镜的焦距变化范围无法满足要求时,可以通过加装补偿透镜来改变液体透镜的变化范围,如图 4(b)所示。加装补偿透镜后,液体透镜的光焦度可以表示为

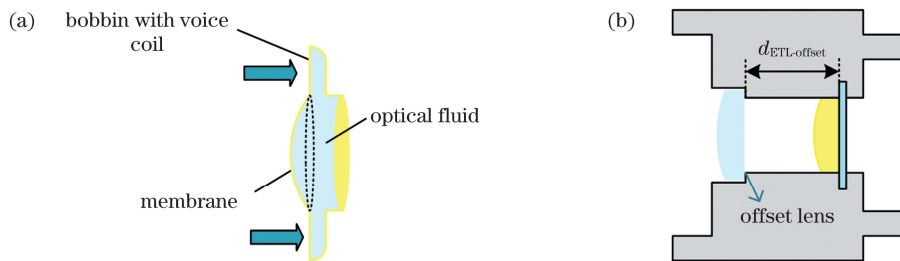


图 4 液体透镜结构示意图。(a)液体透镜原理图;(b)补偿透镜结构图

Fig. 4 Schematic of liquid lens' structure. (a) Schematic of liquid lens; (b) structure diagram of compensation lens

$$1/F_{ETL\text{-}offset} = 1/F_{ETL} + 1/F_{offset} + d_{ETL\text{-}offset} \times 1/F_{ETL} \times 1/F_{offset}, \quad (7)$$

式中: $1/F_{ETL} = 0.022i_{ETL} + 4.9276$ ,  $i_{ETL}$  为液体透镜的驱动电流; $F_{ETL}$  为未加装补偿透镜时液体透镜的

焦距; $F_{ETL\text{-}offset}$  为加装补偿透镜后液体透镜的焦距; $F_{offset}$  为补偿透镜的焦距; $d_{ETL\text{-}offset}$  为补偿透镜和液

体透镜之间的距离。由(7)式可知,理论上加装补偿透镜后,液体透镜的焦距达到任意值。液体透镜的主要参数如表 1 所示。

表 1 液体透镜的主要参数(不加补偿透镜)  
Table 1 Main parameters of liquid lenses (without offset lens)

Parameter	Value
Transmission wavelength /nm	400-700
Refractive index	1.30
Tuning range/diopter	5-10
Tuning range of focal length /mm	100-200
Nominal control current /mA	0-250
Absolute maximum control current /mA	0-400
Response time /ms	<2.5

### 2.3 高斯光束传输原理

入射高斯光束腰斑位置到固定焦距透镜 F(焦

距为  $F_2$ )后表面(图 3 所示)的传输矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/F_{ETL-offset} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

当高斯光束通过图 3 所示的光路后,入射高斯光束腰斑位置处的  $q$  参数  $q_0$  与固定焦距透镜 F 后表面处的  $q$  参数  $q_F$  之间的关系为

$$q_F = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D}, \quad (9)$$

$$q_F = q_2 - l_2 = i \frac{\pi \omega_2^2}{\lambda} - l_2, \quad (10)$$

式中: $q_0 = i\pi\omega_0^2/\lambda$ ,  $q_2$  为出射高斯光束腰斑位置的  $q$  参数。令(9)、(10)式的实部和虚部分别相等,得到的出射高斯光束的腰斑位置  $l_2$  和大小  $\omega_2$  分别为

$$\omega_2 = \sqrt{A_1 \text{img} \left\{ (B_1 - \frac{C_1}{F_{ETL-offset}} i) d + 5896i / \left[ 1 + (\frac{d}{F_2} - 1) \frac{B_1 C_1}{F_{ETL-offset}} i - \frac{d}{F_2} - D_1 \right] \right\}}, \quad (11)$$

$$l_2 = -\text{real} \left[ (d - \frac{M d}{F_{ETL-offset}} i + M i) / (1 + \frac{M(\frac{d}{F_2} - 1)}{F_{ETL-offset}} i - \frac{d}{F_2} - N i) \right], \quad (12)$$

式中: $A_1, B_1, C_1, D_1, M, N$  均为与入射高斯光束有关的常数。当参数  $\omega_0, l_1, d, F_2$  确定以后,可以通过控制驱动电流来改变液体透镜的焦距  $F_{ETL-offset}$ , 从而改变出射高斯光束腰斑的位置和大小,使散射光信号增强,最终增大多普勒信号的品质因子。

由以上分析可知,在实际应用过程中,如果运动表面起伏过大或安装环境的限制导致运动表面超出激光多普勒测速仪的测量范围时,可以通过图 5 所示的流程控制驱动电流的大小,改变出射高斯光束的腰斑位置。以多普勒信号的品质因子作为反馈信号,通过判定某一时刻的多普勒信号的品质因子来控制驱动电流。当品质因子小于阈值时,首先增大驱动电流改变出射高斯光束的腰斑位置,若此时品质因子增大,则继续增大驱动电流至多普勒信号的品质因子大于阈值。若此时品质因子减小,则减小驱动电流至多普勒信号的品质因子大于阈值。图 5 中,  $Q_1$  为初始多普勒信号的品质因子,  $Q_2$  和  $Q_3$  分别为增大和减小驱动电流后多普勒信号的品质因子。由表 1 可知,液体透镜的响应时间低于 2.5 ms,响应频率高于 400 Hz,而激光多普勒测速仪的输出频率为 100 Hz,所以液体透镜可以对激光

多普勒测速仪的工作距离进行实时调整。

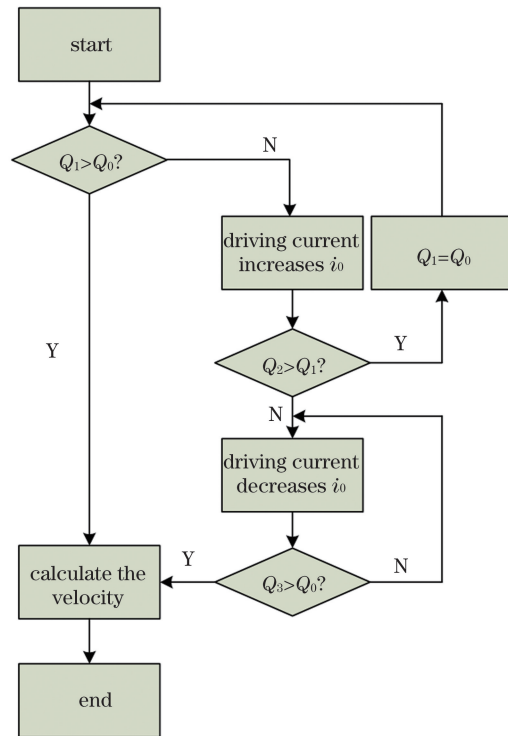


图 5 驱动电流控制流程图

Fig. 5 Flow chart of controlling driving current

### 3 仿真与实验

#### 3.1 仿真分析

光路系统中的可选变量包括  $l_1$ 、 $d$ 、 $l_2$ 、 $\omega_2$  以及液体透镜的焦距。为了分析不同透镜间距及不同补偿透镜对激光多普勒测速仪出射高斯光束的影响,对透镜间距与出射高斯光束腰斑位置和大小、补偿透镜焦距与出射高斯光束腰斑位置和大小之间的关系进行仿真。假设液体透镜位于入射高斯光束的腰斑位置,即  $l_1 = 0$ 。当补偿透镜的焦距选

定以后,液体透镜的焦距变化范围确定,不同透镜间距及不同驱动电流情况下出射高斯光束的腰斑位置及大小如图 6 所示,其中图 6(a)、图 6(b)分别为腰斑位置和大小随驱动电流的变化,图 6(c)、图 6(d)分别为腰斑位置和大小随液体透镜焦距的变化。可以看出,当驱动电流相同时,减小透镜间距会使出射高斯光束的腰斑位置增大,这意味着测速仪的工作距离增大,但此时腰斑半径也会增大,这将导致多普勒信号强度降低,品质因子减小。

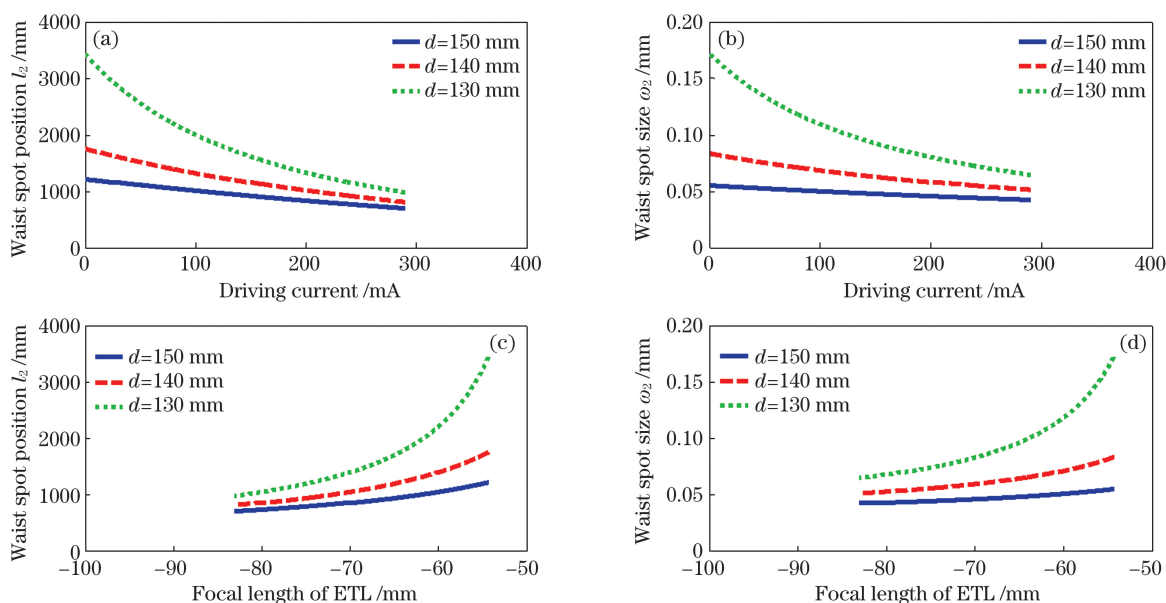


图 6 不同透镜间距时,驱动电流和液体透镜焦距与高斯光束腰斑位置和大小关系。(a)驱动电流与腰斑位置的关系;(b)驱动电流与腰斑大小的关系;(c)液体透镜焦距与腰斑位置的关系;(d)液体透镜焦距与腰斑大小的关系

Fig. 6 Relationship between driving current and focal length of ETL and position along with size of Gaussian beam waist spot under different lens spacing. (a) Relationship between position of waist spot and driving current; (b) relationship between size of waist spot and driving current; (c) relationship between position of waist spot and focal length of ETL; (d) relationship between size of waist spot and focal length of ETL

液体透镜的焦距变化范围主要取决于补偿透镜的焦距选择,选取了三种不同焦距的补偿透镜进行仿真。不同驱动电流情况下,出射高斯光束腰斑的位置及大小分布如图 7 所示,其中图 7(a)、图 7(b)分别为腰斑位置和大小随驱动电流的变化,图 7(c)、图 7(d)分别为腰斑位置和大小随液体透镜焦距的变化。

从图 7 可以看出:当补偿透镜焦距不变时,随着驱动电流增加,出射高斯光束的腰斑位置减小,即测速仪的工作距离减小;随着补偿透镜的焦距减小,腰斑位置的变化范围逐渐增大,但同时腰斑半径也逐渐增大,这将导致多普勒信号强度降低。因此在选择透镜间距  $d$  和补偿透镜的焦距  $F_{\text{offset}}$  时,既要考

虑系统的工作距离,保证在整个测量范围内多普勒信号的有效性,又要避免系统体积过大。

#### 3.2 实验结果与讨论

为了验证液体透镜可以增加激光多普勒信号的品质因子,以图 8 所示具有固定转速的转盘作为速度源,对多普勒信号的品质因子进行测量。其中  $L$  为测量点到透镜  $F$  的垂直距离, $\omega_{\text{turntable}}$  为测量点的角速度, $v_{\text{turntable}}$  为测量点的线速度。

实验过程中,对单点的品质因子随驱动电流的变化进行了测量,结果如图 9(b)所示,图 9(a)为仿真所得单点的品质因子随驱动电流的变化。由图 9 可以看出,实验测量结果与仿真分析基本一致,但仍存在一定误差,图 9(a)中品质因子在驱动电流为

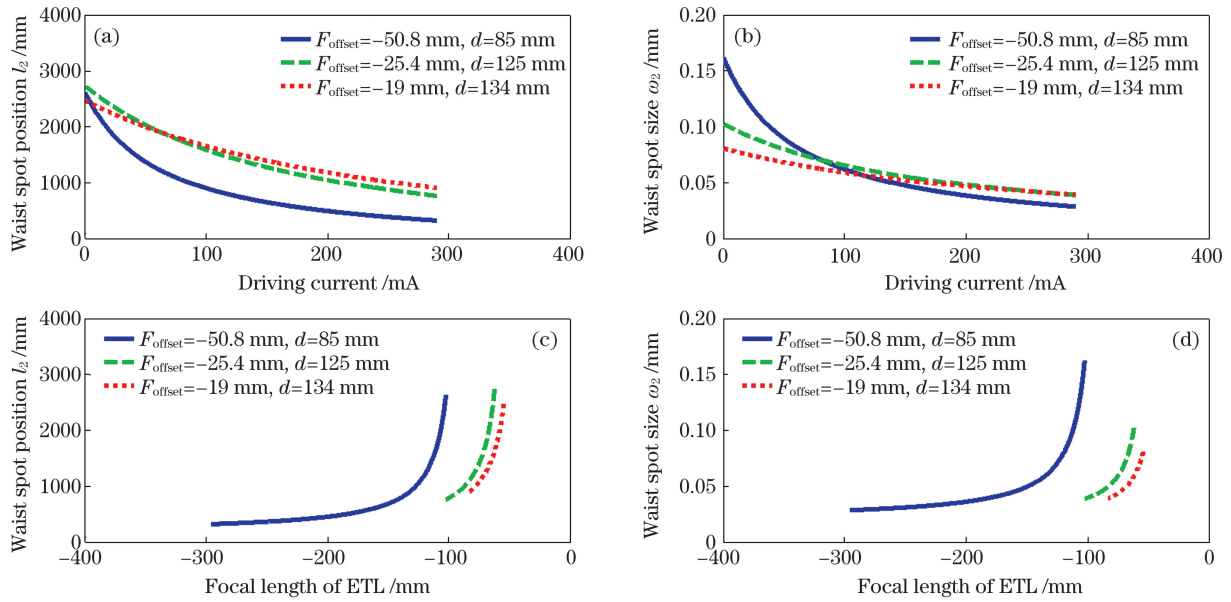


图 7 不同补偿透镜焦距时,驱动电流和液体透镜焦距与高斯光束腰斑位置和大小关系。(a)驱动电流与腰斑位置的关系;(b)驱动电流与腰斑大小的关系;(c)液体透镜焦距与腰斑位置的关系;(d)液体透镜焦距与腰斑大小的关系

Fig. 7 Relationship between position along with size of Gaussian beam waist spot and driving current and focal length of ETL under different offset lens focal length. (a) Relationship between position of waist spot and driving current; (b) relationship between size of waist spot and driving current; (c) relationship between position of waist spot and focal length of ETL; (d) relationship between size of waist spot and focal length of ETL

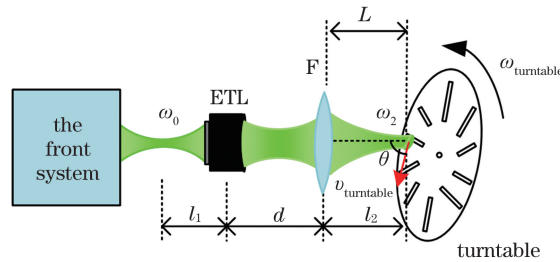


图 8 实验原理示意图

Fig. 8 Schematic of experimental principle

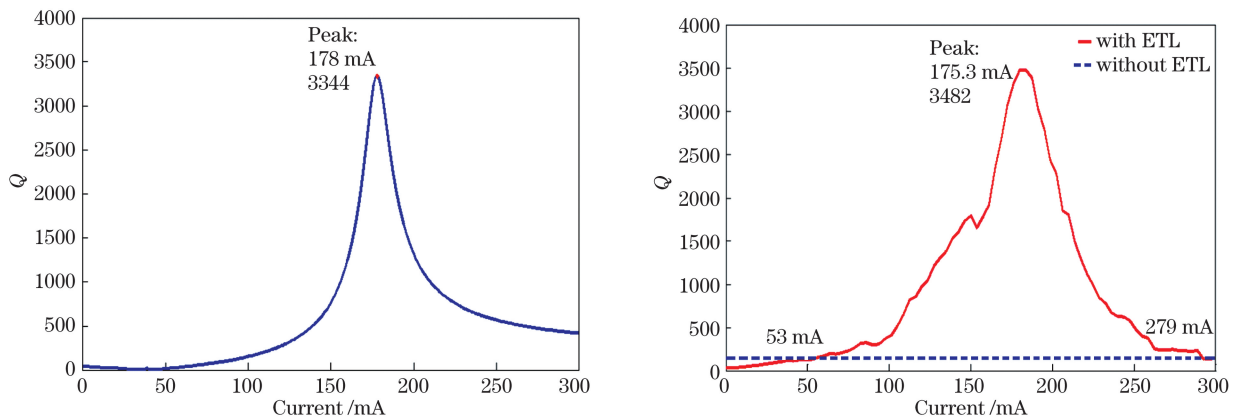


图 9 单点的品质因子随驱动电流的变化。(a) 仿真结果;(b) 实验结果

Fig. 9 Variation of quality factor with driving current for a single point. (a) Result of simulation; (b) experimental result

178 mA 时达到最大值,而实验测量中品质因子的最大值出现在驱动电流为 175.3 mA 时。原因可能为:1)理论分析中忽略了液体透镜的厚度,而实际液体透镜的厚度不能忽略;2)实验测量中存在误差。从图 9(b)可以看出,没有加入液体透镜时,多普勒信号的品质因子  $Q=152$ ,加入液体透镜后,多普勒信号的品质因子随着电流的增大先上升,然后下降。由于液体透镜的透过率小于 100%,信号光经过液体透镜时会造成一部分能量损失,因此在光路中加入液体透镜后,当电流小于 53 mA 或大于 279 mA 时,多普勒信号的品质因子低于不加液体透镜时的品质因子。而电流为 53~279 mA 时,加入液体透

镜后的品质因子明显优于不加液体透镜的情况。当液体透镜的驱动电流为 175.3 mA 时,品质因子达到最大值 3482,是不加液体透镜时品质因子的 22.9 倍。这一结果表明,液体透镜对多普勒信号的品质因子具有显著的增强作用。

多普勒信号只在腰斑附近一定范围内有效,即激光多普勒测速仪存在一个最大可测量距离和一个最小可测量距离,这个范围即为测速仪的可测量范围。实验中移动转盘,通过测量不同距离下多普勒信号的品质因子,确定测速仪的可测量范围。图 10 为采用不同补偿透镜时,测速仪的可测量范围随驱动电流的变化情况,相关测量参数如表 2 所示。

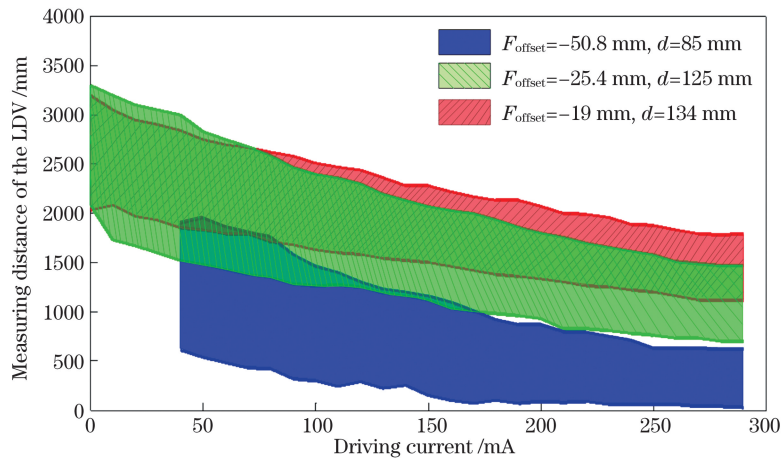


图 10 不同驱动电流下,激光多普勒测速仪的可测量范围

Fig. 10 Measuring range of LDV under different driving current

表 2 采用不同补偿透镜时的测量参数

Table 2 Measurement parameters of different compensation lenses

$F_{\text{offset}} / \text{mm}$	$d / \text{mm}$	$L_{\text{min}} / \text{mm}$	$L_{\text{max}} / \text{mm}$	$\Delta L / \text{mm}$
-50.8	85	300	1900	$60 < \Delta L < 130$
-25.4	125	700	3300	$70 < \Delta L < 120$
-19	134	1120	3200	$60 < \Delta L < 110$

表 2 中  $\Delta L$  为测量景深,  $L_{\text{max}}$  和  $L_{\text{min}}$  分别为整个驱动电流范围内测速仪的最大可测量距离和最小可测量距离,  $L_{\text{min}} \sim L_{\text{max}}$  为测速仪的可测量范围。

结合图 10 和表 2 中的数据可以得到,当  $F_{\text{offset}} = -50.8$  mm 时,高斯光束的腰斑位置变化范围最大同时透镜间距最小,但由图 6 可以看出,当驱动电流小于 30 mA 时,腰斑半径过大,导致散射光信号减弱。因此当测量距离大于 1900 mm 时,多普勒信号的品质因子小于阈值,此时的多普勒信号为无效信号,无法满足测量要求。当  $F_{\text{offset}} = -19$  mm 时,在整个范围内都可以得到有效的多普勒信号,但此时腰斑位置的变化范围最小并且透镜间距最大,

这意味着系统的工作距离可变范围最小而且体积最大,这将限制系统的适用范围。结合上述分析,当选择的补偿透镜  $F_{\text{offset}} = -25.4$  mm 时,既可以最大限度地改变测速仪的工作距离,增大系统的可测量范围,又可以减小系统的体积。而且由表 2 可以看出,此时系统的测量景深随着驱动电流的增大而增大,这将提高系统对粗糙路面的适应程度。

## 4 结 论

为了提升多普勒信号的有效性,扩大激光多普勒测速仪的工作距离和可测量范围,提出了一种基于液体透镜的品质因子增强技术。理论分析和实验

结果表明:基于液体透镜的激光多普勒测速仪可以在不增加位移机构的情况下仅通过控制驱动电流的大小来改变测速仪出射高斯光束的腰斑位置和大小,使多普勒信号的品质因子显著增强,从而大大增加激光多普勒测速仪的可测量范围,同时减小测速仪的体积,这对于激光多普勒测速仪的工程应用具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] Yeh Y, Cummins H Z. Localized fluid flow measurement with an He-Ne laser spectrometer [J]. Applied Physics Letters, 1964, 4(10): 176-178.
- [2] Qiu S, Ren Y, Liu T, et al. Detecting the speed of a rotational cylinder based on Doppler effect of optical vortex [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (20): 2026001.  
邱松, 任元, 刘通, 等. 基于涡旋光多普勒效应的旋转柱体转速探测研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2026001.
- [3] Du Z H, He S Z, Jiang C Z, et al. A profile measuring system of rotation body using laser Doppler effect [J]. Journal of Optoelectronics laser, 2003, 14 (9): 977-980.  
杜振辉, 贺顺忠, 蒋诚志, 等. 激光多普勒效应回转体表面轮廓测量系统 [J]. 光电子·激光, 2003, 14 (9): 977-980.
- [4] Durst F M, Whitelaw J H. Principles and practice of laser-Doppler anemometry [J]. Journal of Applied Mechanics, 1976, 44(3): 518.
- [5] Li W T, Nie X M, Zhou J. Method for establishing new integrated navigation system based on two-dimensional laser Doppler velocimeter [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0310001.  
厉文涛, 聂晓明, 周健. 基于二维激光多普勒测速仪建立新组合导航系统的方法 [J]. 中国激光, 2020, 47 (3): 0310001.
- [6] Zhou J. Preliminary study on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained navigation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 104-105.  
周健. 用于车载自主导航激光多普勒测速仪的初步研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2011: 104-105.
- [7] Huang H, Zhou J. Scattered light in laser Doppler velocimeter [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31 (1): 151-155.  
黄华, 周健. 激光多普勒测速仪中散射光特性的研究 [J]. 应用光学, 2010, 31(1): 151-155.
- [8] Zhou J, Long X W. Laser Doppler velocimeter using a single longitudinal mode solid-state laser source [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(7): 1167-1171.
- [9] Blum M, Büeler M, Grätzel C, et al. Compact optical design solutions using focus tunable lenses [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8167: 81670W.

## Quality Factor Enhancement Technology of Laser Doppler Signal Based on Liquid Lens

Xi Chongbin, Huang Rong, Zhou Jian\*, Nie Xiaoming

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

### Abstract

**Objective** A laser Doppler velocimeter (LDV) obtains the moving velocities of carriers by gauging the interference signal when the signal light is mixed with a reference. As a novel speed sensor, LDV possesses several advantages: non-contact measurement, no interference with the target, and high speed-measurement accuracy. However, when measuring the velocity of a solid surface, an LDV can scale the speed only within a limited range. When the moving surface is beyond the measurable range of the LDV, the intensity of the scattered light decreases, and the quality factor of the Doppler signal reduces. A Doppler signal is validated by the quality factor  $Q$ , which directly determines the working distance and measurable range of the LDV. When the quality factor is below the threshold, the carrier velocity cannot be determined from the Doppler signal. To meet the requirements of the measurable range, the quality factor is traditionally enhanced by two lenses with fixed focal length, which change the position of the waist spot of the outgoing Gaussian beam. However, this method increases the distance between the lenses and excessively expands the LDV volume. Meanwhile, the measurement scope remains limited and non-adaptable to actual situations. To change the measurable range of the LDV, one must either change the distance between the lenses or reform the lens combination. Mechanically transforming the lens distance will increase the volume and the system



complexity, largely restricting the operating range of the speedometer. In addition, the lens combination cannot be changed at any time in practical engineering applications. No other reasonable method can expand the measuring range. Herein we present a beam transformation system based on a liquid lens. The waist-spot position of the Gaussian beam is controlled by changing the driving current, enhancing the quality factor above the threshold over a considerable range. Our design greatly improves the working distance and measurable range of the LDV. We hope that our basic strategy and findings will benefit the speed measurement and navigation ability of the carrier.

**Methods** This paper combines a theoretical analysis and simulation with experimental verification. In the theoretical analysis, we first evaluated the feasibility of transforming the LDV's Gaussian beam through a liquid lens. Based on Gaussian optics, the positions and size of the waist spot were simulated under different driving currents of an electrically tunable lens (ETL). We then constructed an LDV with the ETL and changed the position of its waist spot by changing the driving current without increasing the displacement mechanism. Throughout the experiment, we determined the relationship between the quality factor of a single point and the driving current, and the working distance and measuring range of the LDV for different offset lenses.

**Results and Discussions** The presented method improved the working distance and measurable range of the LDV. Owing to the sharp response time of the liquid lens (in order of milliseconds) (Table 1), the driving current can be controlled by a feedback signal, achieving real-time adjustment of the liquid lens (Fig. 5). In the new LDV structure, the maximum quality factor of a single measuring point reaches 3482, 22.9 times that of a traditional speedometer (Fig. 9). When the  $F_{\text{offset}} = -25.4$  mm offset lens was selected, the working distance of the LDV was changed to the maximum extent, with a measuring range of 0.7–3.3 m. The system volume was reduced at the same time (Fig. 10, Table 2).

**Conclusions** This paper proposes a novel LDV scheme based on a liquid lens. Within this design, the waist spot position of the Gaussian beam can move and the working distance of the LDV can be changed simply by controlling the driving current, without increasing the displacement mechanism. Therefore, the quality factor of the Doppler signal is greatly improved. The quality factor of a single measuring point is maximized at 3482, 22.9 times that of a traditional speedometer. The new structure improves the measuring range of the LDV to 0.7–3.3 m, 4.3 times that of the traditional structure (1.2–1.8 m), while reducing the volume of the speed measurement system. These improvements will greatly expand the engineering applications of LDVs.

**Key words** measurement; laser Doppler velocimeter; quality factor; liquid lens; driving current; working distance; measurable range

**OCIS codes** 120.7250; 120.1880