

光学学报

可视化聚焦纹影系统实现流场中的三维扰动成像

席锋^{1,2*}, 秦华锋^{1,2}, 胡莉^{1,2}, 林睿²

¹重庆工商大学检测控制集成系统重庆市市级工程实验室, 重庆 400067;

²重庆工商大学计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067

摘要 可视化成像系统可以实现流场中扰动信息的捕获。针对光学纹影系统, 分别从理论和实验上对比研究了流场中的三维超声扰动成像。因三维超声场在光传播方向上引起的流体介质密度变化不同, 光波穿过密度变化的流场时, 其相位累积变化使图像不能真实反映声场的扰动特征。线型栅的聚焦纹影系统因其线型栅会产生多刀口滤波的作用, 故不能对流场中的三维超声扰动场实现完整成像。为了获得流场中的三维扰动特征, 提出了采用环型源栅和刀口栅的改进聚焦纹影系统。结果表明: 由改进聚焦纹影装置得到的图像扰动特征与实际流场中超声扰动特征相一致; 结合图像重构技术, 实现了流场中三维复杂扰动的重构。

关键词 成像系统; 纹影系统; 聚焦纹影系统; 三维扰动; 流场

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0911003

Three-Dimensional Perturbation Imaging in Fluid Field with Visualized Focusing Schlieren System

Xi Feng^{1,2*}, Qin Huafeng^{1,2}, Hu Li^{1,2}, Lin Rui²

¹Chongqing Engineering Laboratory for Detection, Control and Integrated System, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

²School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

Abstract The perturbation in a fluid field can be captured by a visualized imaging system. In an optical schlieren system, we theoretically and experimentally compared the images of three-dimensional perturbation in the fluid field. The variations of fluid density generated by three-dimensional ultrasonic field are different in the direction of light propagation. As a result, after the light passes through the density-changing fluid field, the images cannot truly reflect the perturbation in the acoustic field due to the phase accumulation. Focusing schlieren systems with parallel line grids also cannot image the three-dimensional ultrasonic perturbation in the fluid field because of their multiple cutoffs. For this reason, we proposed a modified focusing schlieren system with annulus source and cutoff grids to obtain the information about three-dimensional perturbation. The images obtained by the optimized system achieve the same characteristics with the ultrasonic perturbation in the actual fluid field. In combination with image reconstruction techniques, this system supports the reconstruction of complex three-dimensional perturbation in the fluid field.

Key words imaging system; schlieren system; focusing schlieren system; three-dimensional perturbation; fluid field

OCIS codes 110.0115; 110.2970; 110.7170; 230.1040

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-11-09; 录用日期: 2020-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(11804035)、重庆市博士后项目(Xm2017070)、重庆市科委基础前沿项目(cstc2017jcyjA1592)

* E-mail: xifeng7429@ctbu.edu.cn

1 引言

对于激波风洞、水中超声等流场中的扰动,可视化流场显示技术是获取实验数据的重要途径之一^[1-7]。最为常用的阴影仪、干涉仪、纹影法等装置是利用光穿过流场时的变化来获取流场的扰动信息^[8-13],但这些信息是积分结果,不能反映流场在局部区域的扰动特征,不能表征三维扰动场或者不均匀的复杂扰动场,如在充满水的密封腔体中,对于不同的外界条件,平面声波在腔中会因谐振产生不同的声场分布。光学纹影可视化系统常被用于流体中谐振声场的成像,可以获得谐振声场的分布特征^[14-19],其结果与光波在流场中的累积变化密切相关。谐振声场使流场中的介质密度发生周期性变化,但在垂直于光传播方向上的任一截面内声场分布相同。这些方法的缺陷在于:结果不能反映流场中局部区域的扰动特征,只适用于光传播方向上任一截面内扰动特征分布完全相同的情形。

然而,流体中的高速射流、激波风洞以及非平面声波,将引起介质密度在空间上不均匀变化。当需要捕获局部流场的扰动,或利用光的相位变化获得光干涉图样,或表征流场中的扰动特征时,前面所述的阴影仪、干涉仪、纹影仪等不再适用。为了获得复杂流场中的局部扰动特征,常用聚焦纹影可视化系统进行成像表征^[20-24]。在该系统中,聚焦透镜对扰动场的某个截面聚焦,并在像平面上通过成像显示反映该截面上的流体密度梯度变化,从而反映扰动特征。通过对不同截面上的扰动成像,可以重现三维扰动流场。高速射流、激波风洞是一种定向扰动,会引起流体介质的密度在三维空间不均匀分布,但扰动本身是一维的定向运动。因此,传统的聚集纹影系统中采用了线型源栅和刀口栅。如果考虑扰动本身是三维的情况,同时考虑扰动引起的流体介质密度在空间呈非均匀分布,现行的聚焦纹影系统显然不能获取流场中完整的扰动信息,故不能满足要求。本文针对流场中的三维扰动表征,从理论和实验上研究了光学纹影系统和聚焦纹影系统的不足,并提出了改进的聚焦纹影系统,对流场中的球面波在流体中的扰动进行了成像表征。

2 纹影成像系统

为了表征流场中的声场分布特征或者流场中的扰动,通常采用可视化纹影技术来实现光学成像。典型的纹影成像系统包括光学纹影和聚焦纹影两种。

2.1 光学纹影成像原理

光学纹影系统是基于介质的声光效应^[25],利用衍射光强分布成像来反映流场中的声场分布特征的可视化技术。周期性的平面声波在流体中会引起介质密度周期性的疏密分布,从而使得介质的折射率也发生周期性变化。此时可以将周期变化的液体看成相位光栅,当光波垂直于声波的传播方向进入流场中时,光的传播方向发生偏折。光从流场中出射后,相同传播方向的光因干涉而形成衍射图样。光波在流场中因受声波的调制而包含了声波的信息,其衍射图样上的光强分布也将反映流体中声场的分布特征。因而光学纹影系统常被用于流场中声场的表征和液体的压光系数测定^[26]。

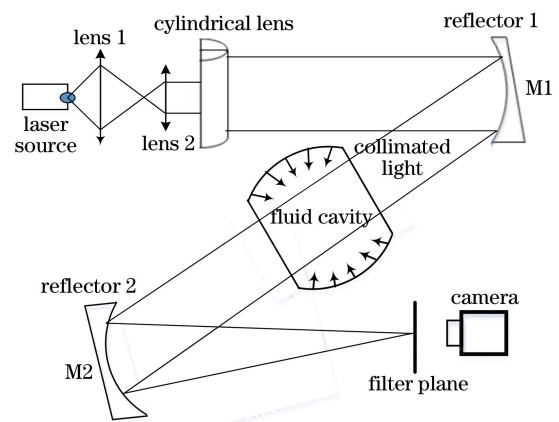


图 1 “Z”形纹影系统

Fig. 1 “Z” configuration schlieren system

纹影系统的光学图像还可以根据傅里叶光学进行理论计算,实现实验与理论结果的对比。对于三维声波在流体引起的扰动,如球面声波,其声波方程可表示为

$$P(r, t) = \frac{p(r)}{r} \exp(i\omega_s t) \exp(ik_s r + \varphi_0), \quad (1)$$

式中: $p(r)$ 表示空间的声压分布, r 为半径; t 为时间; ω_s , k_s 和 φ_0 分别表示声波的角频率、波数和初始相位。声波在流体腔内传播并被内表面反射后,叠加形成球形声驻波,该声驻波可表示为

$$P_s(r, t) = \frac{2p(r)}{r} \cos(k_s r) \cos(\omega_s t). \quad (2)$$

光波通过声场影响的流体介质后,其相位的变化受声场调制。因介质的密度分布与声压成正比,故相位变化可表示为

$$\delta \propto \text{Re}[P] = \tau p(r) \cos(k_s r) \cos(\omega_s t), \quad (3)$$

其中 $\tau = \kappa(\partial\mu/\partial p)_s l$, $(\partial\mu/\partial p)_s$ 是流体介质的压光系数, l 是声光作用长度。对于一个完整的球腔,其内部形成的球形驻波声场可用球贝塞尔函数表

示。为了实现通光,将球腔两端开口。而在此开口球腔内的声场并非完美的球形,实为椭球形,难以用准确的解析函数表示腔内声场的分布。为了方便,可考虑用贝塞尔函数近似表示,表达式为

$$p_s(r) = p(0, 0, z)J_0(2\pi f_s r/c_s), \quad (4)$$

其中 $p(0, 0, z)$ 表示沿光传播方向上 (z 轴) 的声压, f_s 和 c_s 分别为声波的频率和声速, $J_0(\cdot)$ 为 0 阶贝塞尔函数。准直光束穿过声波作用的流场后,出射光场可表示为

$$E(x, y, t) = E_0 \exp[i\tau p_s(r) \cos(k_s r) \cos(\omega_s t)], \quad (5)$$

用贝塞尔函数展开后可表示为

$$E(x, y, t) = E_0 \sum_m J_m[\tau p_s(r) \cos(k_s r) \exp(i\omega_s t)]. \quad (6)$$

经光学系统后在滤波平面上的光波可由傅里叶光学变换 (FT $\{\cdot\}$) 表示,表达式为

$$E_T(\eta, t) = E_0 \sum_m \exp(im\omega_s t) \text{FT}\{J_m[\tau p_s(r) \cos(k_s r)]\}, \quad (7)$$

其光强分布可由 $E_T E_T^*$ 计算得到, E_T^* 是 E_T 的共轭复数。

纹影系统对球面声波在充满脱气水、两端开口的球腔内引起的扰动图像的理论结果与实验结果如图 2 所示,图中呈现明暗相间的环形条纹,且在一个波节内出现了多条次亮条纹,这与平面声波在腔内谐振的声场不同^[14-18],可以从声光衍射的机制得以解释。

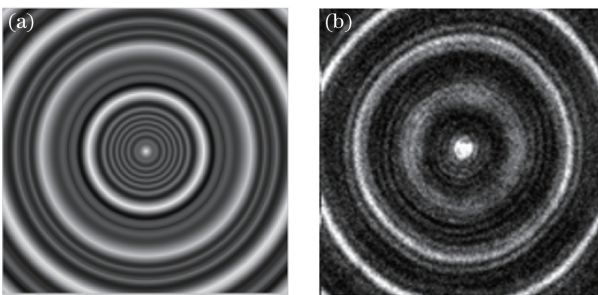


图 2 纹影系统的三维声场扰动成像。

(a) 理论计算图像; (b) 实验图像

Fig. 2 Images of three-dimensional perturbation with schlieren system. (a) Theoretical result;

(b) experimental result

光学纹影成像的实质是通过声波调制光波的相位,实现声场重现。光波在穿过扰动介质的过程中,相位发生累积变化。对于平面声波在流体中引起的

扰动,在垂直于光传播方向上的任一截面内,声场的分布都是相同的,因而得到的纹影图像可以反映整个流体中的声场分布特征。然而,对于流体中的三维声波,在沿着光传播方向上的任何截面内,球面声波的半径不同,声场的分布不同^[27-30],这导致在不同截面上光的偏折也不完全相同;另外,越靠近球腔中心声压越高,对光的偏折越明显。结果表明,纹影系统成像不能完全真实地反映流场中的三维扰动特征。

2.2 聚焦纹影成像

对于流场中的三维扰动成像表征,应对扰动场中的不同截面分别成像,进而获得整个流场中的扰动特征。聚焦纹影正是可以实现这一目的的可视化成像技术,已被广泛应用于气流喷射、风洞测试,以及水下超声成像^[1-6, 13-19]。通常,这些扰动基本上都是沿某一特定方向的扰动,会引起流体介质的密度在空间上不均匀分布。利用聚焦纹影成像即可获得流体中扰动的形态特征。聚焦纹影系统如图 3 所示,其中扩展光源为 20×20 的 LED 阵列,腔体直径为 230 mm,开口两端间距为 180 mm。成像透镜由透镜组构成,焦距为 750 mm。所有的光学元件固定于光学平台上,腔体两侧的通光口采用光学玻璃封装。系统工作过程为:扩展光源经菲涅耳透镜聚焦后照射明暗相间的源栅,所产生的光束进入扰动场后透射,经成像透镜组出射的成像光被刀口栅滤波,最终在合适位置处的像平面上获取扰动场的图像。调整像平面 (IP) 的位置,可以得到流场中特定物平面 (OP) 上的扰动图像。传统的聚焦纹影系统里的源栅和刀口栅是一组平行、明暗相间的条带。源栅与刀口栅满足物像关系, $1/l + 1/l' = 1/f$, 其中 f 为成像透镜的焦距。当 $l = l' = 2f$ 时,源栅将在刀口栅平面成等大的像。刀口栅是源栅的完美镜像,源栅被成像到刀口栅平面,在竖直方向上调整刀口栅,使其错开而形成多个透光的狭缝,从而起到多刀口滤波的作用,以提高图像的对比度。

目前聚焦纹影系统多是对流体中的定向射流进行测量和表征。采用平行线型源栅和刀口栅时,定向射流的喷射方向基本上与源栅条纹的方向一致,可以实现射流扰动特征的捕获。当流场中存在三维扰动,如球面声波时,其结果如图 4 所示。结果表明:平行线型源栅和刀口栅不能实现三维扰动特征的完美重现;对于三维球面超声,在平行于线型栅的方向上可以实现扰动成像,但扰动的像发生了畸变,并非呈圆弧状;在垂直于栅的左右两侧,其声波引起

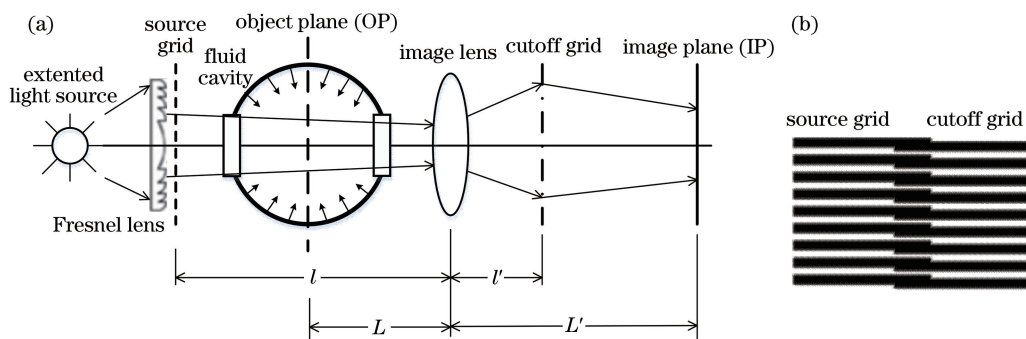


图 3 聚焦纹影成像系统。(a) 系统简图; (b) 栅结构

Fig. 3 Focusing schlieren visualization system. (a) Schematic; (b) source grid and cutoff grid

的扰动几乎完全被滤除。这一现象可解释为: 可以将球面声波的扰动看成由法向分量和切向分量组成; 而线型栅的聚焦纹影系统只能对法向扰动成像, 其切向扰动已被滤除。这与聚焦纹影对高速射流成像的结果差异非常大, 因为高速射流主要表现为流体的一维定向扰动, 其切向扰动非常弱, 其切向扰动即使被滤除也不影响成像扰动, 该特征有时对于提高图像对比度是有利的^[5,7,10,21-22]。

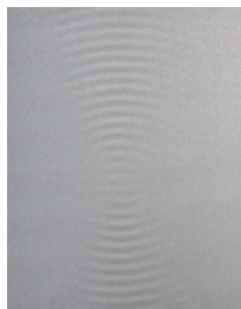


图 4 线型栅时的三维扰动图像

Fig. 4 Image of three-dimensional perturbation with parallel line grid

3 改进聚焦纹影系统

从上述讨论中发现, 现有的光学纹影和聚焦纹影可视化系统成像, 都不能真实反映流场中的三维扰动。为了实现这一目的, 本研究对传统的聚焦纹影系统进行改进。针对线型栅滤除切向扰动分量的问题, 设计了环型源栅和刀口栅, 代替线型栅。图 5 为环型源栅和刀口栅, 其中源栅的暗环和亮环宽度相同 ($a=b=2\text{ mm}$), 而刀口栅的亮环比暗环宽度要小 ($a' < b', a'=1\text{ mm}, b'=3\text{ mm}$), 但源栅和刀口栅始终满足 $a+b=a'+b'$ 。如果刀口栅的暗环亮环宽度与源栅相同, 则像平面上将出现完全暗场。当源栅经成像透镜所成的像, 与刀口栅叠加后, 将形成多个环形刀口来调制像平面上的光强分布。

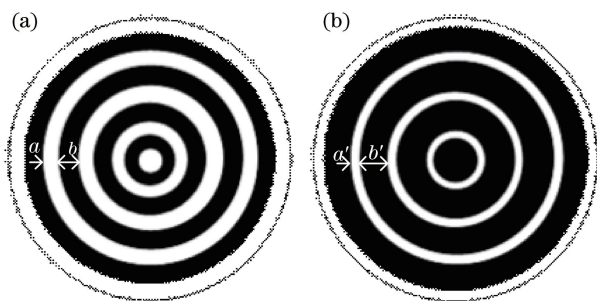


图 5 环型栅。(a) 源栅; (b) 刀口栅

Fig. 5 Annulus grid. (a) Source grid; (b) cutoff grid

利用环型栅改进聚焦纹影系统, 可以有效解决流场中的三维扰动可视化成像问题。球面超声波在腔中形成的声场近似于球形, 而在垂直于光轴方向的截面上, 声波引起的介质扰动为一组同心圆环, 如图 6 所示。其中图 6(a) 为超声在腔中的扰动成像, 相应的物平面位于腔的中心位置, 右上角插入图为固定在像平面上的标尺的像。其结果真实地反映了物平面上超声引起的介质扰动特征, 图中相邻环间距约为 3.8 mm , 声波频率为 647.35 kHz , 水中声速为 1485 m/s , 相应的声波波长约为 2.3 mm ; 球面声波向内传播聚焦后继续传播, 最后被腔内表面反射并与原波叠加, 从而形成球面超声驻波; 驻波波长是声波波长的一半, 即 1.15 mm ; 聚焦透镜焦距为 750 mm , 物平面(球面聚焦超声的焦平面)距成像透镜 1 m , 像平面距透镜 2.8 m , 由此计算可得像平面上的相邻环间距即测量的驻波波长约为 1.35 mm 。测量结果与理论值相接近, 这表明改进的聚焦纹影可视化成像系统能真实反映流场中的三维扰动特征。图 6(b) 分别为超声激励功率为 $10, 20, 30, 40\text{ W}$ 时的超声扰动图像, 随着激励功率的增加, 流场中超声引起的扰动增强。由图 2 可以看出纹影图像的声波节内有次级衍射条纹, 其原因是球形声场在垂直于光传播的方向上, 不同截面的声驻波环半径不同, 故形成了次级衍射条纹。而声驻波节内没有出现

次级亮环,这也进一步证明聚焦纹影系统是对某一特定截面上的扰动成像。由于球面驻波声场的对称性,在垂直于 z 轴的不同截面上得到的声场形态基本相

同。但对于流场中非对称的三维扰动,在不同截面上的扰动图像均不同,需对其分别进行成像,最后利用图像重构技术对整个流场中的三维扰动实现复原。

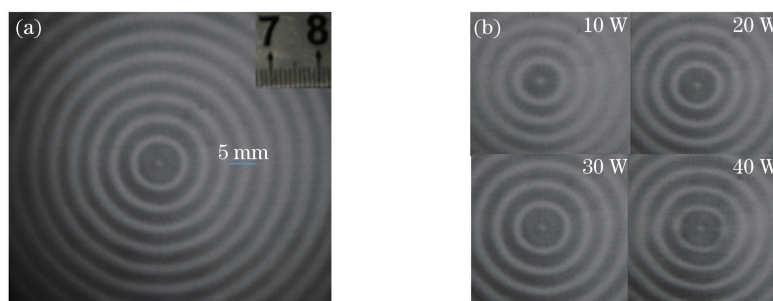


图 6 改进聚焦纹影的三维扰动成像。(a)腔中心平面上的扰动声场成像;(b)超声不同激励功率时的扰动成像

Fig. 6 Three-dimensional perturbation imaging by modified focusing schlieren system. (a) Image of ultrasonic perturbation on the plane at the center of cavity; (b) images of ultrasonic perturbation with different excited powers

4 结 论

讨论了两种纹影可视化技术对流场中扰动成像的表征,通过理论分析和实验测试,结果表明,现有的光学纹影系统和聚焦纹影系统都不适用于流场中的三维扰动成像。光学纹影平面上的光强分布依赖于光在流场中的相位累积,三维扰动会使流场不同截面上的介质密度分布不同。而采用平行线型源栅的传统聚焦纹影可视化成像系统不能获得流场中完整的扰动特征。通过对三维扰动场的特征分析,设计了环型栅的改进型聚焦纹影系统。该系统能完美地对流场中某一确定截面上球面驻波声场的扰动成像。进而,针对流场中的非对称三维扰动场,分别按不同截面进行扰动成像,并采用图像重构技术,以获得流场中完整的三维扰动分布特征。

参 考 文 献

- [1] Barnes R B, Burton C J. Visual methods for studying ultrasonic phenomena [J]. *Journal of Applied Physics*, 1949, 20(3): 286-294.
- [2] Xu Z, Chen H, Yan X, et al. Three-dimensional reconstruction of nonplanar ultrasound fields using Radon transform and the schlieren imaging method [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, 142(1): EL82.
- [3] Jones H, Menon S. Liquid jet penetration and breakup in a free supersonic gas jet[J]. *Experiments in Fluids*, 2019, 60(11): 161.
- [4] Seo S W, Martinez J, Galang E, et al. Optical ultrasound imaging using a line-scanned transducer [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(4): 770-773.
- [5] Xie A M, Huang J, Xu X, et al. Focusing schlieren technique applied to measure the flow density in shock tunnel [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2013, 27(2): 82-86.
谢爱民, 黄洁, 徐翔, 等. 激波风洞流场密度测量的聚焦纹影技术[J]. *实验流体力学*, 2013, 27(2): 82-86.
- [6] Qi S, Du Y, Zhang P L, et al. Experimental study of gasoline vapor deflagration in a duct with an open end [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 193: 16-24.
- [7] Li M, Zhu Z W, Yang Y G, et al. Flow visualization using double-pass schlieren technique in hypersonic flow [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0211001.
李明, 祝智伟, 杨彦广, 等. 双光程纹影在高超声速流场显示中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0211001.
- [8] Zhao X H, Yi S H, Ding H L, et al. Influence of pressure of jet on hypersonic flow field modulation transfer function [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(10): 1001003.
赵鑫海, 易仕和, 丁浩林, 等. 喷流压比对高超声速流场调制传递函数的影响[J]. *光子学报*, 2019, 48(10): 1001003.
- [9] Xia J P, Sun H X, Cheng Q, et al. Theoretical and experimental verification of acoustic focusing in metal cylinder structure [J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(5): 057301.
- [10] Zhang Z H, Huang Z, Chen R T, et al. Design of flame temperature measurement instrument based on projective background-oriented schlieren technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 052803.
张正贺, 黄贞, 陈汝婷, 等. 基于投影式背景纹影技术的火焰温度场测量仪设计[J]. *激光与光电子学进*

- 展, 2019, 56(5): 052803.
- [11] Pulkkinen A, Leskinen J J, Tiihonen A, et al. Ultrasound field characterization using synthetic schlieren tomography [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(6): 4600-4609.
- [12] Koponen E, Leskinen J, Tarvainen T, et al. Acoustic pressure field estimation methods for synthetic schlieren tomography [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145(4): 2470.
- [13] Bucaro J A, Flax L, Carome E F, et al. Quantitative schlieren visualization of unipolar acoustic transients [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1978, 63(1): 49-54.
- [14] Humphrey V F, Knapp S M, Beckett C, et al. Visualization of the resonances of a fluid-filled cylindrical shell using a low frequency schlieren system [M] // Leroy O, Breazeale M A. Physical Acoustics. Boston, MA: Springer US, 1991: 371-376.
- [15] Chinnery P A, Humphrey V F, Beckett C, et al. The schlieren image of two-dimensional ultrasonic fields and cavity resonances [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101(1): 250-256.
- [16] Chinnery P A, Humphrey V F. Experimental visualization of acoustic resonances within a stadium-shaped cavity [J]. Physical Review E, 1996, 53(1): 272-276.
- [17] Chinnery P A, Humphrey V F. On the overlapping acoustic resonances of a fluid-filled cavity: schlieren visualization of an insonified circular-cylindrical shell [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(3): 1383-1387.
- [18] Chinnery P A, Humphrey V F. Fluid column resonances of water-filled cylindrical shells of elliptical cross section [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 103(3): 1296-1305.
- [19] Jiang X P, Cheng Q, Xu Z, et al. Quantitative measurement of acoustic pressure in the focal zone of acoustic lens-line focusing using the schlieren method [J]. Applied Optics, 2016, 55(10): 2478-2483.
- [20] Wang X, Wang C J, Fan X J, et al. Effects of hydrogen concentration and film thickness on the vented explosion in a small obstructed rectangular container [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(40): 22752-22759.
- [21] González A M, Hernández D M, Viramontes J G, et al. Temperature measurement of fluid flows by using a focusing schlieren method [J]. Sensors, 2018, 19(1): 12.
- [22] Garg S, Settles G S. Measurements of a supersonic turbulent boundary layer by focusing schlieren deflectometry [J]. Experiments in Fluids, 1998, 25(3): 254-264.
- [23] Bühler M N, Förster F J, Dröske N C, et al. Design of a focusing schlieren setup for use in a supersonic combustion chamber [M] // Dor G B, Sadot O, Igra O, et al. 30th International Symposium on Shock Waves 2. Cham: Springer International Publishing, 2017: 1467-1471.
- [24] Ozawa R W, Cox T J, Reyes J, et al. Structured light-field focusing 3D density measurements of a supersonic cone [C] // 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, January 8-12, 2018, Kissimmee, Florida. Reston, Virginia: AIAA, 2018.
- [25] Raman C V, Nath N S N. The diffraction of light by high frequency sound waves: part III [J]. Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A, 1936, 3(1): 75-84.
- [26] Raman V, Venkataraman K S. Determination of the adiabatic piezo-optic coefficient of liquids [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 1939, 171(945): 137-147.
- [27] Li F Q, Song D, Zeng D P, et al. Frequency dependence of the acoustic field generated from a spherical cavity transducer with open ends [J]. AIP Advances, 2015, 5(12): 127218.
- [28] Shan F, Tu J, Cheng J C, et al. Acoustic field of an ultrasonic cavity resonator with two open ends: experimental measurements and lattice Boltzmann method modeling [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(12): 124502.
- [29] Li F Q, Wang H, Zeng D P, et al. Sub-wavelength ultrasonic therapy using a spherical cavity transducer with open ends [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(20): 204102.
- [30] Lu Y Y, Liu Q Q, Zhao C L, et al. Reconstruction algorithm for focused ultrasonic fields based on schlieren method [J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(5): 742-747.
- 陆彦邑, 刘俏俏, 赵纯亮, 等. 基于纹影法的聚焦超声声场重建算法研究 [J]. 应用光学, 2015, 36(5): 742-747.