

文章编号: 0258-7025(2010)01-0131-05

# 液体流动对激光光束质量的影响

王墨戈 许晓军 陆启生

(国防科学技术大学光电科学与工程学院定向能技术研究所, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 液体的可流动性为液体激光器热管理提供便利, 研究液体流动状态对激光光束质量的影响对液体激光器研制具有一定的现实意义。采用 Fluent 软件, 模拟了激光系统增益区液体介质横向流动状态。结果表明, 介质流速较为均匀稳定, 对于激光光束质量不会产生大的影响。实验测量了液体介质流速分别为 0.48, 1.51 和 5.39 L/min 时, 通过增益区的信标光(He-Ne 光)相位分布, 信标光的斯垂耳(Strehl)比为 0.9964, 0.9960 及 0.9936。在纵向均匀抽运条件下, 粘性流动的非均匀性使得信标光的光束质量与理想流动相比略有下降, 抽运功率密度为 46.9 W/cm<sup>2</sup>, 流速分别为 0.48 和 5.39 L/min 时信标光的 Strehl 比为 0.9484 和 0.9995。当抽运功率密度升高至 100 W/cm<sup>2</sup>, 两种流速状态下的信标光的 Strehl 比为 0.1051 和 0.9978。加快液体的流动速度可以减少因介质流速的不均匀而引起的波前畸变。

**关键词** 激光技术; 液体激光; 横向流动; 光束质量

中图分类号 TN248.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103701.0131

## Influence of Liquid Flow on Laser Beam Quality in Liquid Lasers

Wang Moge Xu Xiaojun Lu Qisheng

(Institute of Directed Energy Technology, College of Optoelectronic Science and Engineering,  
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Liquid flow has positive implication for the thermal management in liquid lasers. The flowing state of liquid can considerably influence the laser beam quality. By the aid of the commercial software Fluent, the transverse flowing states of liquid media in gain area are simulated. Based on the wave-front curving sensing technology and the Green's functions wave-front reconstruction arithmetic, the phase distribution of the probe laser (He-Ne laser) is measured when the flow rates are 0.48, 1.51 and 5.39 L/min. The Strehl ratios are 0.9964, 0.9960 and 0.9936, respectively. The results show that when the flow rate is stable, the laser beam quality is almost not affected by the liquid flowing state. Under the longitude uniform pumping circumstances, the laser beam quality in viscous flowing state is slightly reduced compared to that in uniform flowing state. When the pumping power density is 46.9 W/cm<sup>2</sup>, the Strehl ratios are 0.9484 and 0.9995, in which the flow rates are 0.48 and 5.39 L/min. The Strehl ratio decrease to 0.1051 and 0.9978, when the pumping power density increases to 100 W/cm<sup>2</sup> and the flow rate keeps the same. The wave-front aberration arising out of the heterogeneity of the flow rate can be decreased by promoting the flow rate of the liquid media.

**Key words** laser technology; liquid laser; transversely flowing; beam quality

## 1 引 言

利用液体可流动性对激光器进行热管理是液体激光器的显著特点。液体激光介质的流动状态对激光器的输出状态有着重要影响, 其主要体现在两个方面: 1) 流体自身的流动状态对激光光束质量的影

响; 2) 抽运时, 液体流动速度分布的均匀性对增益区内热量分布及相位分布的影响。因此, 研究液体流动状态对液体激光器的设计及改进具有一定的现实意义。

合理的增益区结构可以改善液体的流动状态,

收稿日期: 2009-02-25; 收到修改稿日期: 2009-03-25

作者简介: 王墨戈(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事液体激光技术方面的研究。E-mail: wmg\_nudt@sina.com

导师简介: 陆启生(1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用和非线性光学方面的研究。

E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

提高液体激光器的光束质量。根据液体流动方向与激光出射方向的关系,液体的流动结构可以分为纵向流动结构和横向流动结构。纵向流动结构中,液体的流动方向与激光出射方向平行,早期的液体激光器多采用这种结构<sup>[1,2]</sup>。这种结构的缺点在于流动方向在介质注入端和流出端发生改变,很难获得稳定均匀的流场,流动自身对光束质量的影响较大,因此难以获得高质量的激光输出。采用横向流动结构时,液体流动方向与激光出射方向垂直,其流体的注入端和流出端可以在激光腔外,避免增益区内流动方向的改变,以减小流动对光束质量的影响。美国 AVLIS 项目中,采用此种流动结构利用横向抽运的激光系统实现了 1.3 kW 的激光输出<sup>[3]</sup>。袁永轲等<sup>[4]</sup>数值模拟了上述抽运流动结构中流场特性对波前畸变的影响,但对纵向抽运结构未予讨论。

本文应用实验室内染料池的结构参数,数值模拟了横向流动结构中乙醇的流动状态。结果表明,液体流动平稳有序处于层流状态,对激光波前不会产生大的影响。并实验测量了不同流速下,增益区内信标光波前的相位分布。同时数值模拟了纵向均匀抽运流速分别为 0.48 和 5.39 L/min 时,信标光的波前相位分布,以研究抽运时液体流动速度分布的均匀性对增益区内激光相位分布的影响。

## 2 理论模型

为达到液体激光器较好光束质量的输出,增益区内激光增益介质的流动应满足均匀、稳定、高速的要求。液体流动速度的快慢决定了激光器的热管理能力,而流动的均匀性和稳定性则是保证输出光束质量的基础。在流动结构的设计中,应该避免增益区内使得液体流动状态突变的结构。纵向流动结构的缺点就在于很难保证增益区内液体激光介质流动的均匀稳定性。注入端和流出端流动方向的突然改变,使得该处的流体湍流度急剧增加,大大降低了介质的光学均匀性,从而造成了激光光束质量的下降。横向流动结构剖面图如图 1 所示,分为收缩段、增益区和扩散段 3 部分。收缩段的作用是使流体流速增加,减小流体的湍流度,保证增益区流体的均匀性,是流动结构设计重点。通常收缩段的型面曲线采用维托辛斯基公式、双三次方曲线或五次方曲线公式设计。为与实验结果对比,采用实验室染料池结构进行代替。收缩段型面线型为直线,其入口和出口尺寸为 5.4 和 1.5 mm,长度为 11.7 mm。扩散段与收缩段结构对称。垂直于激光出射方向的增益区截

面为 8 mm × 11.3 mm 的矩形,增益区狭缝的宽度为 1.5 mm。需要说明的是液体循环结构的设计是一个比较复杂的系统工作。本文忽略了收缩段之前和扩散段后的流体状态分析。在实际工作中,收缩段来流的均匀性是能否保证增益区内液体流动均匀的前提,假定收缩段来流速度分布均匀,以便于后续的讨论。

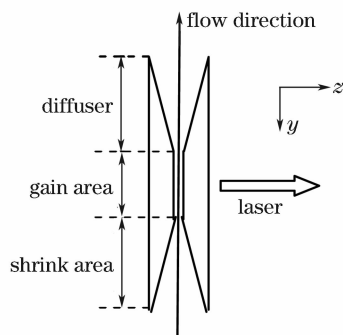


图 1 横向流动结构剖面图

Fig. 1 Section plane of transverse flowing structure

## 3 数值模拟及实验结果

### 3.1 液体流动状态对激光光束质量的影响

根据上述结构参数,采用乙醇溶液作为流体介质,在温度为 300 K,收缩段入口速度为 0.04 m/s 的条件下,应用 Fluent 软件的  $K-\epsilon$  模型,数值模拟了流体的流动状态,结果如图 2 所示。

图 2 为垂直于激光出射方向各平面的速度分量分布图,  $V_y, V_x$  分别表示  $y$  方向和  $x$  方向速度分量。由于  $z$  方向的速度分量与  $x$  方向大小基本一致,数值非常小,因此在图中未显示。从图 2 可以看出,与流动  $y$  方向的速度分量相比,其他方向上的速度分量都非常小,且在增益区内沿着  $y$  方向速度变化平缓,液体流动较为均匀。增益区入口附近的速度变化略大于其他部分。当增大收缩段入口速度时,模拟结果保持一致。

由上述数值模拟结果可知,由于横向流动结构中增益区内没有明显改变液体流动状态的几何结构,增益区内速度变化平缓,避免了速度变化过快而引起的气穴现象,对激光的光束质量不会产生大的影响。为验证上述推论,对单位时间(1 min)内通过增益区流量分别为 0.48, 1.51 和 5.39 L 的 Rh6G 乙醇溶液的信标光波前相位分布进行测量。实验装置如图 3 所示。

一束经扩束的氩氦信标光正入射通过染料池,进入波前曲率传感器,由 CCD 采集信标光的焦前及

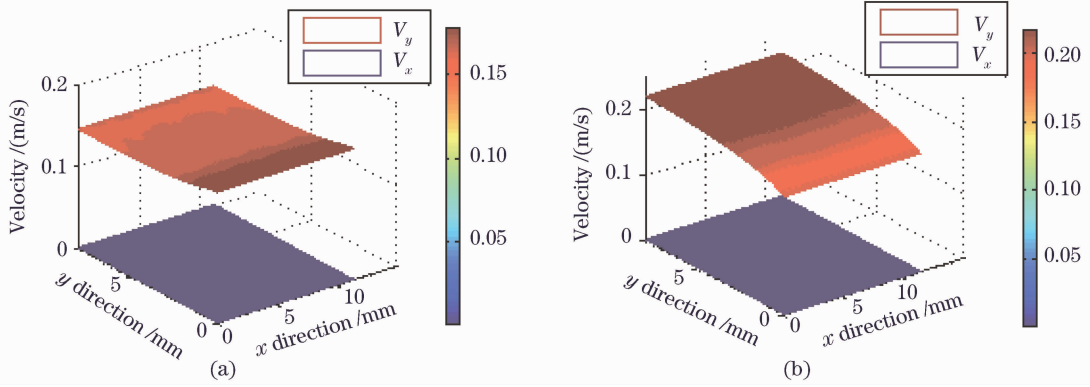


图 2 垂直于  $z$  方向各平面流体速度分布图。(a)  $z=0.003$  m; (b)  $z=0.0075$  m (中心处)

Fig. 2 Distribution of velocity in the plane perpendicular to  $z$  direction. (a)  $z=0.003$  m; (b)  $z=0.0075$  m (in the middle)

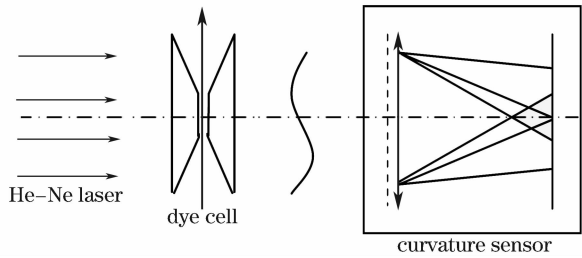


图 3 实验布局图

Fig. 3 Experimental arrangement

焦后光斑,采用矩形域的格林函数算法恢复进入波前曲率传感器信标光的波前相位分布<sup>[5]</sup>。以染料池内静止时信标光的相位分布作为基准相位分布,用流动时恢复的相位分布减去基准相位分布,即可得到不同流速时,因流动而引起的相位分布变化情况。结果如图 4 所示。

实验结果表明,在图 4(a)~(c)3 种不同流速的情况下,因流动引起的相位变化非常小,其 PV 值均小于  $\lambda/10$ ,光束的斯垂耳 (Strehl) 比分别为 0.9964,

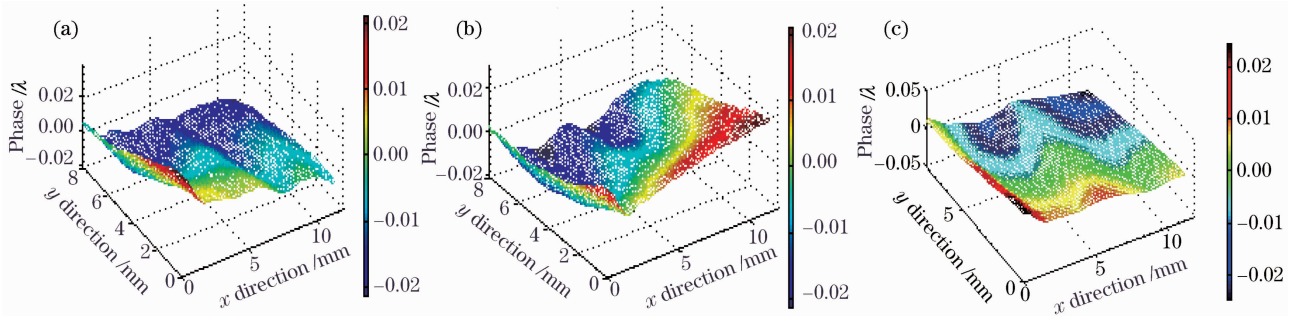


图 4 各种流量下信标光的波前相位分布

Fig. 4 Phase distribution of the probe laser in different fluxes. (a) 0.48 L/min; (b) 1.51 L/min; (c) 5.39 L/min

0.9960及0.9936。因此横向流动结构很好地改善了流体自身流动状态对激光光束质量的影响。

### 3.2 液体流动均匀性对纵向均匀抽运条件下激光光束质量的影响

由于受液体粘性的影响,液体的流动不可能保证流速的绝对均匀性,如图 5 所示。

液体粘性力的存在使得贴近壁面的液体流速小于中心处液体流速,产生边界层<sup>[6]</sup>。图 2 的数值模拟结果也表明了液体流动的这一特性。从而导致了相对于中心处的液体,贴近壁面的液体将在增益区内停留更长的时间,使得这部分液体因抽运而获得更大的热量沉积,对激光束的波前产生影响。

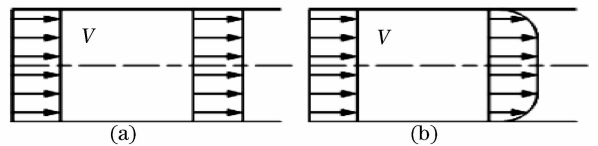


图 5 理想流动(a)和粘性流动(b)的区别

Fig. 5 Difference between the uniform flowing (a) and the viscous flowing (b)

数值模拟了纵向抽运光功率密度分别为 46.9 和 100  $W/cm^2$ , 均匀抽运条件下,通过流速为 0.48 和 5.39 L/min 的 Rh6G 乙醇溶液的氦氖信标光的波前相位分布。增益区结构参数如第 2 节所述。在增益区内的热量分布为

$$Q(x, y, z) = \eta \alpha I_p(x, y, 0) \times \{\exp(-\alpha z) + \exp[-\alpha(d-z)]\}, \quad (1)$$

式中  $z$  方向为激光出射方向,  $z$  为 0 时的  $xy$  面为抽运面,  $I_p(x, y, 0)$  为抽运面上的光强分布,  $\eta$  为生热效率,  $\alpha$  为激光介质对抽运光的吸收系数,  $d$  为  $z$  方向的尺度。液体的温度场方程为

$$\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial \tau} = -u_y(x, y, z) \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial y} + \frac{Q(x, y, z)}{\rho C}, \quad (2)$$

式中  $\rho$  为介质密度,  $C$  为液体比热,  $T(x, y, z)$  为温度分布,  $u_y(x, y, z)$  为液体的流动速度。将(1)式代入(2)式,即可求得增益区内温度场的分布。再结合温升与相位的关系

$$\varphi(x, y) = k r(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d n(x, y, z) dz = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_0 + \alpha_n n_0 \Delta T(x, y, z)] dz, \quad (3)$$

式中  $\varphi(x, y)$  为相位分布,  $\lambda$  为信标光波长,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $n_0$  为初始折射率,  $\alpha_n$  为热折射率系数,

$\Delta T(x, y, z)$  为温度场分布  $T(x, y, z)$  减去初始温度  $T_0$ 。从而可求出信标光的波前相位分布。结果如图 6, 7 所示。

结果表明,理想流动时,信标光的波前相位只含有  $y$  方向上的倾斜量成分,倾斜量的大小与抽运的光功率密度、液体流速及液体介质的属性相关。去除倾斜量后的光束 Strehl 比为 1。而在粘性流动中由于边界层内流体的流速小于流体的平均速度,使得该部分热量沉积增加,从而增大相位畸变的 PV 值。在流速为 0.48 L/min 时由理想流动的 0.4614 $\lambda$  增加至粘性流动的 0.9225 $\lambda$ 。相位畸变不止含有倾斜量成分,还含有高阶成分。

图 8, 9 分别给出了抽运光功率密度分别为 46.9 和 100 W/cm<sup>2</sup>, 流速为 0.48 和 5.39 L/min 时去除倾斜量的相位分布。通过比较可以看出,在相同流速条件下,随着抽运功率密度的提高,信标光波前畸变逐渐加剧。当流速为 0.48 L/min, 抽运功率密度由 46.9 W/cm<sup>2</sup> 升高至 100 W/cm<sup>2</sup> 时,其 Strehl 比由 0.9484 下降为 0.1051, 流速不均匀对信标光波前产

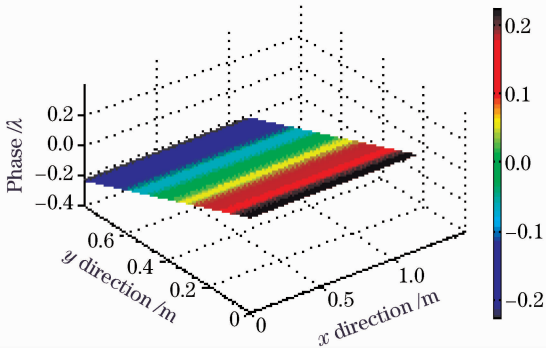


图 6 流速为 0.48 L/min 理想流动时的相位分布

Fig. 6 Phase distribution of the probe laser in uniform flowing

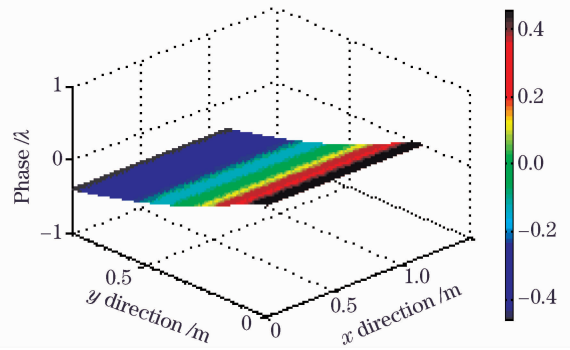


图 7 流速为 0.48 L/min 粘性流动时的相位分布

Fig. 7 Phase distribution of the probe laser in viscous flowing

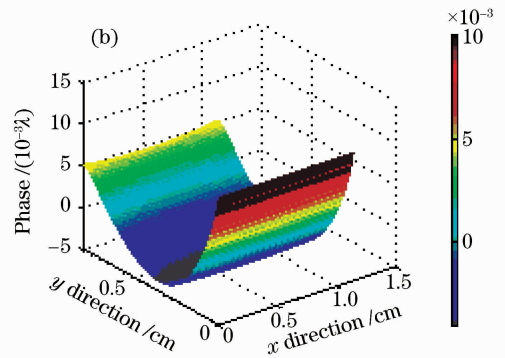
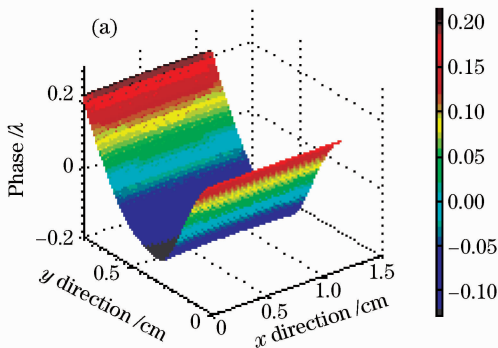


图 8 抽运光功率密度为 46.9 W/cm<sup>2</sup>, 流速分别为 0.48 L/min(a) 和 5.39 L/min(b) 粘性流动时去除倾斜量信标光的相位分布

Fig. 8 Phase distribution of the probe laser in viscous flowing (pump power density: 46.9 W/cm<sup>2</sup>) after removing the tilt signal component. (a) 0.48 L/min; (b) 5.39 L/min

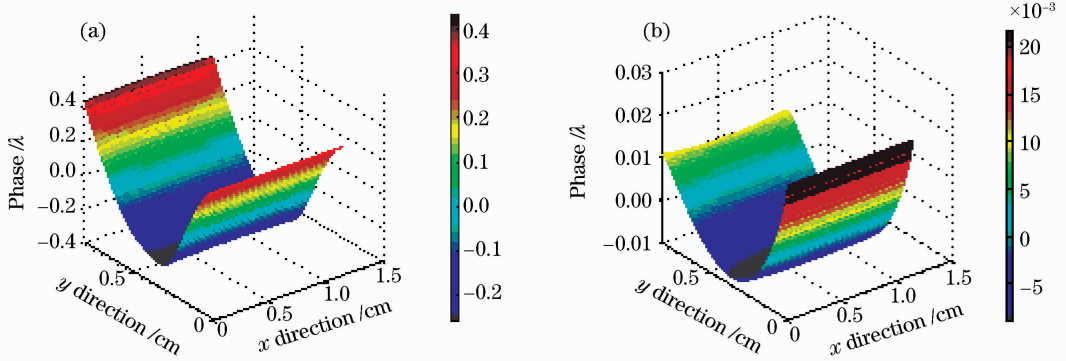


图9 抽运光功率密度为  $100 \text{ W/cm}^2$ , 流速分别为  $0.48 \text{ L/min}$ (a)和  $5.39 \text{ L/min}$ (b)粘性流动时去除倾斜量信标光的相位分布

Fig. 9 Phase distribution of the probe laser in viscous flowing (pump power density:  $100 \text{ W/cm}^2$ ) after removing the tilt signal component. (a)  $0.48 \text{ L/min}$ ; (b)  $5.39 \text{ L/min}$

生较大影响;当流速为  $5.39 \text{ L/min}$ 时,在相同抽运变化条件下,其 Strehl 比由  $0.9995$  下降为  $0.9978$ ,流速不均匀对信标光波前几乎没有影响。同时,在相同抽运光功率密度下,流速快的介质因流速分布不均匀而引起的相位畸变明显小于流速慢的介质。因此在均匀抽运条件下,加快液体的流动速度可以减少因介质流速的不均匀而引起的波前畸变。

## 4 结 论

对液体激光器中液体流动状态对激光光束质量的影响进行了理论和实验研究。相比于纵向流动结构,横向流动结构改善了液体的流动状态,液体流动均匀,对激光的光束质量不会产生大的影响。实验测量了 Rh6G 乙醇溶液在流速分别为  $0.48, 1.51$  和  $5.39 \text{ L/min}$ 时,因液体流动产生的波前相位的 Strehl 比为  $0.9964, 0.9960$  及  $0.9936$ 。实际液体由于受粘性的影响,在增益区内的流速不可能绝对均匀。边界层的热量沉积增大了通过液体的激光相位畸变程度。与理想流动相比,在均匀抽运条件下,信标光的光束质量变差。在相同流速下,随着抽运光功率密度的增加,信标光波前畸变逐渐加剧;同时,在相同抽运光功率密度下,流速快的介质因流速分布不均匀而引起的相位畸变明显小于流速慢的介质,因

此在均匀抽运条件下,加快液体的流动速度可以减少因介质流速的不均匀而引起的波前畸变。本文数值模拟结果显示,当流速为  $5.39 \text{ L/min}$ 时,抽运功率密度由  $46.9 \text{ W/cm}^2$  升高至  $100 \text{ W/cm}^2$  条件下,流速不均匀对信标光波前几乎没有影响。

## 参 考 文 献

- 1 W. Watson, S. Reich, A. Lempicki *et al.*. A circulating liquid laser system [J]. *J. Appl. Phys.*, 1968, **39**(13):6120~6121
- 2 H. Brinkschulte, J. Perchermeier, E. Schimitschek. A repetitively pulsed Q-switched inorganic liquid laser [J]. *J. Phys. D*, 1974, **7**(5):1361~1368
- 3 I. L. Bass, R. E. Bonanno, R. P. Hackel *et al.*. High-average-power dye laser at LLNL [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(33):6993~7006
- 4 Yuan Yongke, Xu Zheng, Li Mi *et al.*. Effect of flow field characteristics in liquid laser system on thermally induced distortion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9):1342~1345  
袁永轲,许正,李密等. 液体激光系统流场特性对热畸变的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9):1342~1345
- 5 Xi Fengjie, Xu Xiaojun, Wang Tiezhi *et al.*. Wavefront curvature sensor with phase defocus grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):377~378  
习锋杰,许晓军,王铁志等. 相位光栅型波前曲率传感器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):377~378
- 6 Lin Jianzhong, Ruan Xiaodong, Chen Bangguo *et al.*. Viscous Hydrodynamics [M]. Beijing: Qinghua University Press, 1998. 274~284  
林建忠,阮晓东,陈邦国等. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1998. 274~284