

内通道流场与光场能量耦合的数值模拟

孙运强^{1,2,3} 习锋杰^{1,2,3} 许晓军¹ 刘顺发² 王继红² 陈洪斌² 陆启生¹

¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073
² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209
³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 对内通道中的热晕效应问题,完整求解流场与光场的能量耦合方程是一个非常意义而又亟待解决的课题。借助流体力学模拟软件 Fluent,通过解耦求解光传输方程和流体力学方程的方法,建立了较为完整的流场与光场耦合相互作用仿真平台。编写用户自定义函数,完成初始流场参数的读取,并进行光传输计算;将计算得到的光能以能量源项的形式添加到流场能量方程中去;借助现有的流场分析软件 Fluent,对流场方程进行求解,并转入下一时间步的计算。对横截面为圆形的直管道结构,理论近似计算得到的结果与数值仿真平台计算得到的结果基本一致。

关键词 内通道;热晕效应;仿真平台;Fluent 软件

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0202013

Model for the Optical Field and Fluent Field Coupling Effects

Sun Yunqiang^{1,2,3} Xi Fengjie^{1,2,3} Xu Xiaojun¹ Liu Shunfa²
Wang Jihong² Chen Hongbin² Lu Qisheng¹

¹ College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For the thermal blooming of the beam path indoor, solving the coupling equations of optical field and Fluent field completely is a meaningful and important subject. By means of segregated solving the coupling equations, a model for simulating the coupling equations is described based on the software of the Fluent. The procedure is compiled by the user defined equations, the parameters of the fluid are inputted and the distribution of the beam intensity is calculated. The absorbed laser energy is added to the energy equation of the fluency as the energy source. The fluency equations are solved by virtue of the Fluent software. As the straight tube with the round section, the results obtained by the theoretical methods are consistent with the outcomes achieved by the established model.

Key words beam path indoor; thermal blooming; emulation model; Fluent software

OCIS codes 140.6810; 120.6810; 010.1290

1 引言

激光在内通道中传输时,内通道光场中的分子和粒子会吸收激光能量而被加热,传输通道内气体的非均匀加热引起气体密度的起伏,密度的空间起

伏又导致局部折射率变化,最终使激光在内通道中传输的相位发生畸变;而激光在进一步的传输过程中,相位畸变又会影响到远场光强分布,降低激光到达远场时的能量集中度。特别在内通道中光束的直径

收稿日期:2010-03-18;收到修改稿日期:2010-09-27

基金项目:国防预研基金(51302010207)资助课题。

作者简介:孙运强(1978—),男,博士研究生,主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail:sunyunqiang203@163.com

导师简介:陆启生(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail:luqisheng203@163.com

比较小,激光的功率密度相对较高,无强迫对流时,激光的加热效应非常明显。因此,国内外对激光系统内通道中热效应的研究都非常重视,也做了大量的理论和实验研究^[1~10]。由于内通道热效应问题的复杂性,大部分工作都是针对某一方面,采用一定的简化模型进行分析。目前,还没有建立起一个完整的流场、光场能量耦合相互作用仿真平台。

本文依托现有的流场分析软件 Fluent,对内通道中的流场、光场能量耦合相互作用进行了分析。由光传输方程计算得到内通道中的光强分布,而将光场以能量源项的形式,加载到流场能量控制方程中;通过对光场和流场的耦合求解,完成对光场、流场耦合相互作用的仿真计算。

2 理论基础

高功率激光在吸收型气体介质中传输时,流场和光场会发生耦合相互作用,相互之间产生影响。考虑到能量耦合方程组求解的复杂性,进行解耦处理,即对光传输方程和流场方程进行单独求解,而通过气体的密度和光强作为耦合变量,实现光场和流场之间的耦合相互作用。

对于光场的计算,根据标量衍射理论,在缓变振幅近似下,各向同性介质中的光传输方程可以表示为^[11]

$$i2k \frac{\partial A}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 A + k^2 \left(\frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) A, \quad (1)$$

式中 A 为光波复振幅, z 为光传输方向, $k = 2\pi/\lambda$ 为光波在真空中的波数, λ 为光波长, n 和 n_0 分别为有、无光场和流场耦合相互作用时的介质折射率。采用分步传输的相位屏法,光传输方程的解为

$$A(x, y) = A_0(x, y) \exp(ik\Delta z \delta n), \quad (2)$$

式中 $A_0(x, y)$ 为真空中波动方程的解; $\exp(ikz\delta n)$ 为考虑光场和流场耦合相互作用时,由于折射率起伏 δn 引入的附加因子; Δz 为两参考平面之间的距离。求解真空中波动方程时,采用了菲涅耳衍射积分的卷积算法。

考虑光场和流场耦合相互作用时,气体的折射率与密度之间的关系为

$$n - 1 = \kappa\rho, \quad (3)$$

式中 n 为气体介质折射率, κ 为 Gladstone-Dale 常数, ρ 为气体密度。因此,只要获得气体的密度分布,就可以由(1),(2)式确定光束在空间的复振幅分布情况。

而对于气体的密度分布,可通过求解流体力学

的 N-S 方程组得到。在直角坐标系下, N-S 方程组的无量纲化形式可表示为^[12]

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial z} + \mathbf{S}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{U} = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho e]'$ 为守恒向量; $\mathbf{E} = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, \rho uw, \rho u(e + p/\rho)]'$, $\mathbf{F} = [\rho v, \rho v^2 + p, \rho vw, \rho v(e + p/\rho)]'$, $\mathbf{G} = [\rho w, \rho w^2 + p, \rho w(e + p/\rho)]'$ 分别为直角坐标系中 x, y, z 方向的流通向量; $\mathbf{E}_v = [0, \tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x]'$, $\mathbf{F}_v = [0, \tau_{yx}, \tau_{yy}, \tau_{yz}, u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - q_y]'$, $\mathbf{G}_v = [0, \tau_{zx}, \tau_{zy}, \tau_{zz}, u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} - q_z]'$ 为粘性项; $\mathbf{S} = [S_\rho, S_u, S_v, S_w, S_s]'$ 为源项。其中 u, v, w 为气体速度在 x, y, z 方向的分量, p 为气体压力, e 为气体内能, τ 为黏性应力张量, q_x, q_y, q_z 为热传导引起的热流量在 x, y, z 方向的分量, S_s 为能量方程中的源项。

对于光场和流场耦合相互作用时的热效应问题, N-S 方程中的能量源项可表示为两部分,即 $S_s = S_0 + aI$, 其中 S_0 包含了气体粘性和重力作用而引入的能量源, aI 为气体吸收光能而引入的源项。关于内通道的热效应问题, 现有的对 N-S 方程组的求解方法, 都是针对具体情况, 通过自编程序的方法进行求解。由于流体力学方程以及湍流模型的复杂性, 使得计算模型的可靠性以及普适性都受到一定限制。因此, 拟采用现有的较为成熟的 CFD 软件 Fluent, 对 N-S 方程组进行求解。而通过自编程序计算得到光强, 气体吸收的光能以能量源项的形式, 耦合到流场的能量方程中, 从而实现光场与流场的耦合相互作用。

3 仿真平台的建立及数值分析

Fluent 软件是由美国 Fluent 公司于 1983 年推出的 CFD 软件, 其功能全面, 适用性广, 是国内广泛使用的流体力学计算软件, 具有灵活的网格特性, 可用于分析可压缩流、不可压缩流、定常流、非定常流、层流、湍流、多相流等, 可定义多种边界条件, 而且, 还可以使用基于 C 语言的用户自定义函数功能对 Fluent 进行扩展。

利用 Fluent 提供的用户自定义子程序功能, 完成光场与流场的耦合热效应问题。具体的光场与流场耦合热效应数值计算流程如图 1 所示。

首先, 用自定义的光传输子程序模块 (Model_1), 计算空间各位置上的光强; 其次, Fluent 对流场

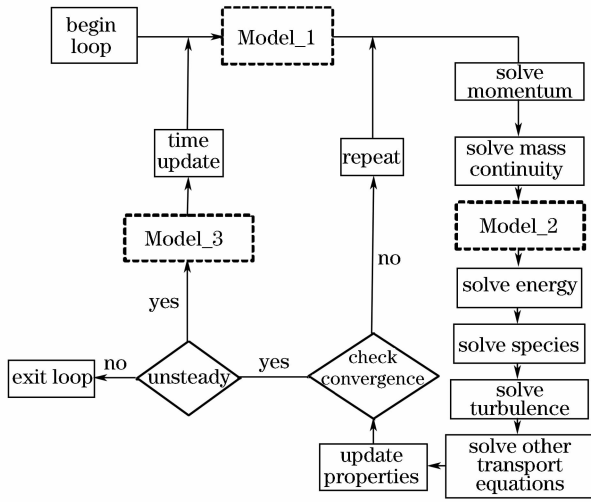


图1 光场与流场耦合热效应数值计算流程
Fig.1 Model for the optics and fluency coupling simulation

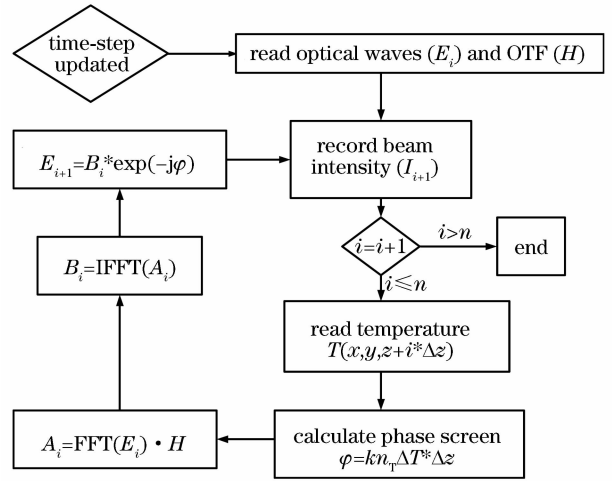


图2 光传输子程序模块

Fig.2 Procedure of the laser beam propagation

4 仿真结果及分析

针对较为简单的直圆形管道结构,结合理论分析方法,对仿真平台进行了初步的验证。传输通道的结构如图3所示。

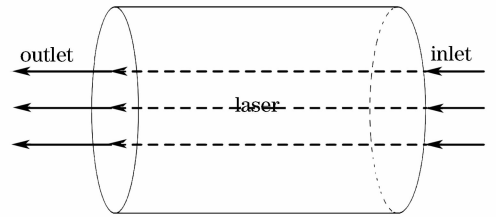


图3 光场流场耦合热效应的传输通道

Fig.3 Pipeline structure of the coupling effects

计算所采用的参数:入口气流的密度为 $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$,气体的定压热焓为 $C_p = 1006 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$,风速为 $v = 2 \text{ m/s}$,管道半径为 $d = 0.05 \text{ m}$,光束半径为 $R = 0.025 \text{ m}$,管道长度为 $L = 1 \text{ m}$,气体的吸收系数为 $\alpha = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$,入射光束采用的是平顶光束,光强分布可表示为: $I = I_0 \text{ circ}(r/R)$,气体的吸收系数 α 与初始光强的乘积取为 $\alpha I_0 = 1000 \text{ W/m}^3$,等效热扩散率取为^[9]: $\epsilon = 0.004vD$,其中 D 为管道直径,湍流采用 K -epsilon 模型, K 为湍动动能,湍动动能耗散率用 ϵ 表示。

采用有限体积法对流场进行求解,空间离散最小体积和最大体积分别约为 $3.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ 和 $1.66 \times 10^{-7} \text{ m}^3$.光场的轴向离散间距为 10 cm ,径向离散间距为 2 mm ,光场离散网格数为 $20 \times 64 \times 64$ 。

运用该仿真平台进行计算分析,对于瞬态的情况,在过管道中心的轴截面上,流场温度分布随时间的变化情况如图4所示。数值计算的残差曲线如图5所示。

的连续性方程和动量方程进行求解,得到流体密度和速度的近似值。在已知流体吸收系数的情况下,通过自定义的能量源模块(Model_2),进行插值运算,获取流场各网格位置上的附加能量源项;然后运用 Fluent 对流场的能量方程、湍流方程进行求解;判断流场方程的收敛情况,若收敛,通过自定义的读写模块(Model_3),记录此时流场计算得到的温度分布 $T(x, y, z)$,在等压近似情况下,再根据理想气体状态方程,得到气体的密度分布。在自定义的光传输子程序模块中,将其转化为折射率分布 $n(x, y, z)$,从而在光的每一传输步中添加一个附加相位 $\varphi(x, y, z)$,进行光传输计算,得到新的光强分布 $I(x, y, z)$,完成一个循环,然后进行下一时间步的计算。反复迭代,就可以得到不同时刻、不同位置的流场分布和光场分布。

对于光传输子程序模块,主要是采用菲涅耳衍射的卷积算法,进行分步传输计算,其计算流程如图2所示。

在一新时间步的开始,首先读取初始的光场和光学传递函数(OTF),然后进行分步光传输计算,得到该时间段内各空间位置上的光强分布情况。

对于能量源模块,在气体密度或者温度变化不大的情况下,近似认为气体的吸收系数为恒定值,根据光传输子程序模块中获得的光强分布,通过插值的方式,可以获得流场能量方程中的源项: $S_s = S_0 + \alpha I$ 。

对于读写子程序模块,主要是记录上一时间步计算得到的流场温度分布,并且通过插值的方式,转换到相应的光网格中,以备光传输子程序模块调用。

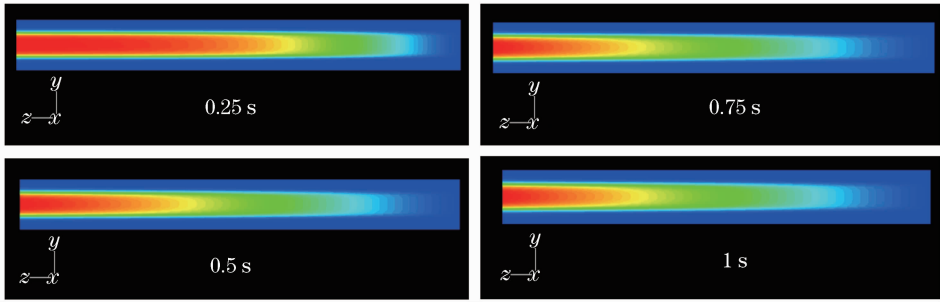


图 4 管道中心截面上的流场温度分布随时间的变化

Fig. 4 Temperature on the section of the tube center variations with the time

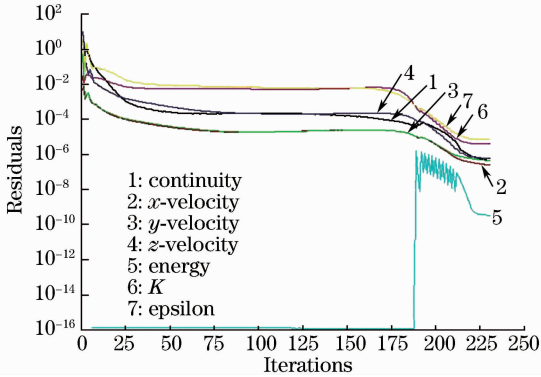


图 5 数值计算的残差曲线

Fig. 5 Residual curves of the numerical simulation

从图 4 中可以看出,管道出口处的温度要高于管道入口处的温度,这主要是由强致对流引起的热沉积效应造成的。对 1 m 的传输通道,通光 0.5 s 以后,内通道中的温度分布基本达到稳定状态。

图 5 的残差曲线中,前 190 步采用的是稳态计算,主要是得到稳定的速度分布。190 步以后,是加入激光能量进行瞬态计算时的残差情况。

对于光场和流场耦合热效应问题,流场对光场的影响主要体现在热效应引起的光程差上,在管道出口处,热效应引起的光程差可表示为

$$O_{OPD} = n_T \int_0^z T dz \approx \int_0^z T dz. \quad (5)$$

因此,为了更直观地反映管道内温升随时间的变化情况,又记录了出口处管道轴上累加温升随时间的变化,即 $T_z = \int_0^1 T(0,0,z) dz$,结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,在通光 0.5 s 后,内通道中热效应基本达到平衡态。

为了验证仿真结果的正确性,首先,运用理论分析的方法,对稳态情况下直圆形管道的光流热耦合方程进行解析求解。在等压近似情况下,不考虑重力作用,能量耦合方程温度形式的解析解为^[8]

$$T = \frac{n_T \alpha P}{\rho_0 C_p \epsilon} \frac{2d^2}{\pi R^2} \sum_s \frac{J_0(s\rho) Q_0(s)}{s^2 J_1^2(s)} \times$$

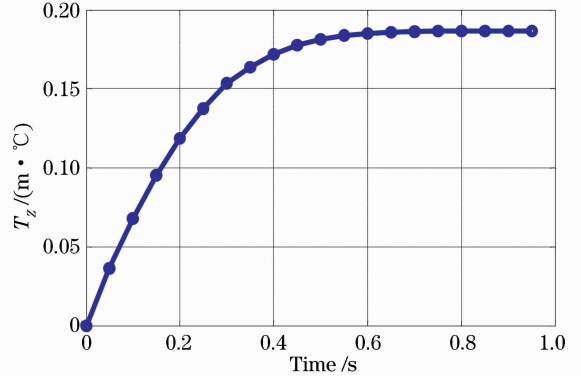


图 6 管道轴上累加温升随时间的变化

Fig. 6 Accumulative temperature along the pipe varies with the time

$$\left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha s^2}{v d^2}\right) \right], \quad (6)$$

式中 $\rho = 2\sqrt{x^2 + y^2}/d$, $J_0(s\rho)$ 为零阶贝塞尔函数, $J_1(s)$ 为一阶贝塞尔函数, \bar{v} 为平均风速, s 由边界条件 $J_0(s) = 0$ 确定, $Q_0(s)$ 为高斯光束的 Hankel 变换形式。

然后,运用仿真平台计算稳态情况下的光流热耦合方程;最后,运用仿真平台计算瞬态情况下的光流热耦合方程,记录 0.5 s 时管道横截面上的温度分

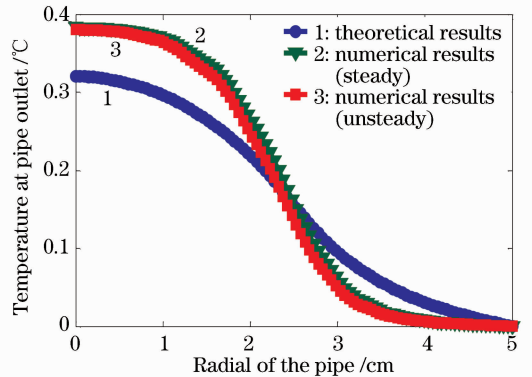


图 7 理论与数值计算结果的比较

Fig. 7 Comparison between the theoretical results and the simulation results

布。将三者计算得到的管道横截面上的径向温度分布进行比较,结果如图7所示。

从图7中可以看出,理论与仿真计算得到的结果基本一致。因为在通光0.5 s后,内通道中热效应基本达到平衡态,所以,仿真平台计算得到的稳态结果和0.5 s的瞬态结果是一致的。理论结果与数值结果之间的差别,主要原因在于理论分析时做了一定的近似处理,而且没有考虑重力场对流场的影响,湍流则采用了等效热扩散率来近似处理。

5 结 论

依托现有的流体力学分析软件 Fluent, 建立了一个较为完整的光场流场耦合相互作用仿真平台。针对一个结构较为简单的直圆形管道的流场进行分析,计算结果表明,理论分析计算得到的结果与仿真平台计算得到的结果基本一致。对于较为复杂的管道结构,光场流场耦合相互作用的理论研究难度很大。因此,该仿真平台的建立,可以为复杂管道结构的光场流场耦合热效应问题提供一个较为细致、可靠的数值分析手段,节约相应实验所需的巨额资金。

参 考 文 献

- 1 Qiao Chunhong, Fan Chengyu, Huang Yinbo *et al.*. Scaling laws of high energy laser propagation through atmosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2):433~437
乔春红,范承玉,黄印博等. 高能激光大气传输的定标规律[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2):433~437
- 2 Ji Xiaoling, Zhang Tao, Chen Xiaowen *et al.*. Spectral properties of flat-topped beams propagating through atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):12~16
季小玲,张涛,陈晓文等. 平顶光束通过湍流大气传输的光谱特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):12~16
- 3 Huang Yinbo, Wang Yingjian, Rao Ruizhong *et al.*. Numerical

- calculation of the scaling parameter for adaptive optics compensation for thermal blooming effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12):1461~1464
黄印博,王英俭,饶瑞中等. 热晕效应相位补偿定标参数的数值分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12):1461~1464
- 4 Jin Gang, Liu Shunfa, Li Shumin *et al.*. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):895~899
金钢,刘顺发,李树民等. 激光热效应对光束控制系统发射光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):895~899
 - 5 Ji Xiaoling, Tao Xiangyang, Lü Baida. Influence of laser non-uniformity and thermal effects in an inner optical system on the far-field behavior [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1193~1197
季小玲,陶向阳,吕百达. 激光非均匀性和内光路热效应对远场特性的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10):1193~1197
 - 6 Liu Shunfa, Jin Gang, Liu Jian *et al.*. Effect of thermal characteristics in laser transmitting channel on far field beam quality [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6):703~706
刘顺发,金钢,柳建等. 激光通道传输热特性对远场光束质量的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(6):703~706
 - 7 Liu Jian, Wang Shiqing, Jin Gang. Effect of tube structure on beam propagation when depressing thermal effect by blowing [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(3):391~393
柳建,王世庆,金钢. 吹气抑制气体热效应时管道结构对光传输的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(3):391~393
 - 8 Gavrielides, Phillip Peterson. Time-dependent thermal blooming in axial pipe flow [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21):3359~3365
 - 9 A. J. Laderman. Thermal blooming in axial pipe flow: comment [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(14):2269~2271
 - 10 Robert E. Kelly. Thermal blooming in axial pipe flow: the effects of beam shape and thermal conditions at the pipe wall [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(18):3037~3039
 - 11 Li Junchang, Xiong Bingheng. *Communicational Optics of the Theoretic and Calculation* [M]. Beijing: Science Press, 2009
李俊昌,熊秉衡. *信息光学理论与计算*[M]. 北京: 科学出版社, 2009
 - 12 Zhu Ziqiang, Wu Ziniu, Li Jin *et al.*. *Applied Computational Fluid Mechanics* [M]. Beijing: Beihang University Press, 1998
朱自强,吴子牛,李津等. *应用计算流体力学*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998