

文章编号: 0258-1825(2004)01-0084-04

激波对激光束远场强度分布影响的数值研究

贺旭照 易仕和 孔铁全

(国防科技大学航天与材料工程学院 湖南 长沙 410073)

摘要 研究了半径 0.1m、焦距 10⁶m、波长分别为 10.6μm、1.315μm 的激光束通过具有激波结构的超声速绕楔流场后的远场强度分布。得到了沿光束传播方向积分的流场的光程差分布以及激光束在穿过超声速绕楔流场并在无扰来流中传播 1km 后光束的强度分布。结果表明 强的激波结构使激光束远场强度分布发生了向光程增大方向的明显偏折 对于波长不同的激光束得到光束通过流场后的远场强度分布不同。

关键词 激波 激光束 光程差 强度分布

中图分类号: O354.3 文献标识码: A

0 引言

安装在飞机或激光制导武器上的激光器的光束, 必须穿过承载激光器的飞行器所产生的流场, 当这些飞行器作超声速飞行时, 飞行器的流场中就存在强的激波结构, 研究含有激波结构的流场对激光束远场强度分布的影响, 能了解光束穿过作超声速飞行的飞行器流场后光束的光学性能的变化, 为改进或者校正光学器件的性能提供依据。

1 流场的描述及数值解法

气体流场对激光束的退化畸变影响包括有序部分和随机部分。有序部分主要是由于流场的大尺度结构的存在, 而随机部分的产生主要是由于流场的小尺度脉动特性^[1]。流场的有序大尺度结构可以采用数值求解层流 N-S 方程得到。二维守恒型层流无量纲化 N-S 方程组为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial (F + F_v)}{\partial x} + \frac{\partial (G + G_v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

其中:

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{bmatrix}$$

$$F_v = -\frac{1}{Re} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + q_x \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e + p)v \end{bmatrix}, \quad G_v = -\frac{1}{Re} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + q_y \end{bmatrix}$$

对流场的解算采用文献 [2] 中提到的 NND-2M 差分格式, 收敛条件取为:

$$\epsilon = \max \left| \frac{\rho^{n+1} - \rho^n}{\rho^n} \right| < 10^{-4} \quad (2)$$

2 光场的描述及数值解法

光束的畸变是由于流场所导致的光束的光程的改变所引起的。在二维情况下光程 (OPL) 定义为:

$$OPL(x) = \int_{y_1}^{y_2} n(x, y) dy \quad (3)$$

光线在标准大气中的光程为 $\overline{OPL}$, 定义光程差 (OPD) 为:

$$OPD(x) = OPL(x) - \overline{OPL} \quad (4)$$

对于所考虑的激光束, 在入口处的光场分布为:

* 收稿日期: 2002-12-05; 修订日期: 2003-02-11.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10082005), 国防科技预研基金资助项目。
作者简介: 贺旭照 (1977-), 男, 博士研究生, 主要从事气动光学方面的研究。

$$\Psi(x, 0, z) = \Psi_0 \exp\left[-\frac{x^2 + z^2}{2a^2} + \frac{ik(x^2 + z^2)}{2f}\right] \quad (5)$$

Ψ_0 为激光束中心处的强度, a 为激光束的半径, f 为激光束的焦距。本文计算中 $a = 0.1 \text{ m}$, $f = 10^6 \text{ m}$, x, z 为到激光中心处的距离。气体介质折射率和气体状态参数的关系由下式给出:

$$n = 77.6 \left(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2} \left(\frac{p}{T}\right) \times 10^{-4}\right) \quad (6)$$

其中 λ 是以 μm 为单位的光在真空中的波长, p, T 分别为国际单位制下的气体的压力与温度。

在激光束穿过的非均匀流场(尺度远远不能引起光束的衍射效应)的过程中,光束的衍射是可以忽略的。对于二维的定常超声速流场,激光束在穿过流场后的分布为:

$$\Psi(x, y, z) = \Psi(x, 0, z) \exp[i2\pi OPD(x)/\lambda] \quad (7)$$

当激光在均匀介质中传播、衍射时,其控制方程为^[3]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\Psi + 2ik \frac{\partial \Psi}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

其中 k 为在均匀介质中的波矢, Ψ 为光场分布函数。

对于式(8)的求解,可以采用傅里叶变换的求解方法^[3,4]把 Ψ 展成二维傅里叶级数,令

$$\Psi(x, y, z) = \sum_{l=-N_x/2+1}^{N_x/2} \sum_{m=-N_z/2+1}^{N_z/2} \Psi_{l,m}(y) \times \exp\left\{2\pi i \left(\frac{l \cdot x}{L_x} + \frac{m \cdot z}{L_z}\right)\right\} \quad (9)$$

式中 L_x 和 L_z 分别为计算区域 x 方向和 z 方向的长度。

$\Psi_{l,m}(y)$ 可由傅里叶逆变换求出:

$$\Psi_{l,m}(y) =$$

$$\frac{\iint_{L_x, L_z} \Psi(x, y, z) \exp\{-2\pi i(l \cdot x/L_x + m \cdot z/L_z)\} dx dz}{L_x L_z} \quad (10)$$

把式(9)代入到式(8)求解得到:

$$\Psi_{l,m}^{n+1} = \Psi_{l,m}^n \exp\left\{-\frac{i}{2k} \left(2\pi\right) \left(\frac{l^2}{L_x^2} + \frac{m^2}{L_z^2}\right) \Delta y\right\} \quad (11)$$

3 物理模型、计算结果及结果分析

3.1 物理模型

如图1所示,AD为一斜劈,超声速来流绕过斜劈,激光束以AD边为起始从斜劈流场中穿过,激光束中心与斜劈中心重合。流场计算区域为xy面内的区域A-B-C-D。计算区域的尺度为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。初值条

件为:计算区域为来流条件。边值条件为:AB,BC为自由来流条件,给定 $Ma = 3.5$, $\theta = 30^\circ$, θ 为来流与斜劈夹角;CD采用二阶外推数值条件。AD边为固壁采

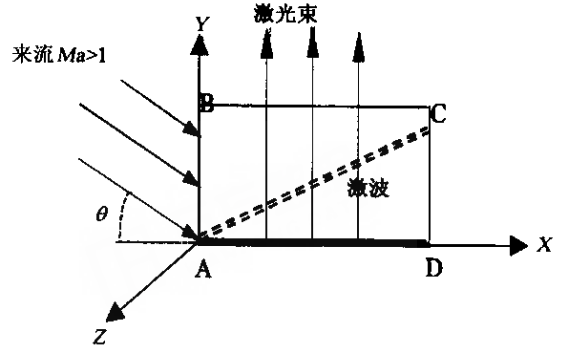


图1 激光束穿过超音速绕楔流场模型图

Fig.1 Physical model of supersonic wedge flow

用绝热壁 $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$, 压力梯度为零 $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$ 条件。光场的计算域与 y 轴平行,在 $x-z$ 面内的投影为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的正方形区域。

3.2 计算结果及分析

以激光束入口处的最大强度 I_0 为无量纲参数,把激光束的相对 I_0 的远场强度无量纲化。图2为激光束出口处的强度二维等值图。作为比较,图3为波长分别为 $10.6 \mu\text{m}$ 的激光束在无扰动大气中传播 1 km 后光束的远场强度分布情况。波长为 $1.315 \mu\text{m}$ 的激光束在无扰大气中传播 1 km 后的远场强度分布与图3类似,其强度峰值为 0.996 。

激光束穿过具有激波结构的超声速绕楔流场,由于密度场的不均匀,会引起光束相位的扰动,扰动光束经过远距离传播,会使激光束强度的分布发生明显的变化。在数值模拟的过程中,为了体现所考虑的流场对激光束强度分布的影响,我们让激光束穿过超声速绕楔流场后再在无扰来流大气中传播 1 km 。这样可以把由流场的不均匀而引起的激光束相位的微小变化,明显的表现为激光束强度分布的变化。

图4为计算得到的流场密度分布,图5为流场光程差分布,图6为波长 $10.6 \mu\text{m}$ 激光束穿过绕楔流场后的远场强度分布,图7为波长 $1.315 \mu\text{m}$ 激光束穿过绕楔流场后的远场强度分布。

从计算的结果可以发现激光束明显地向光程增大的方向偏折,这符合物理规律。光束在传播 1 km 后中心偏离出口时光束的中心 $0.2 \text{ m} \sim 0.3 \text{ m}$,计算发现随着传播距离的增长,这种偏折还会进一步增强。从

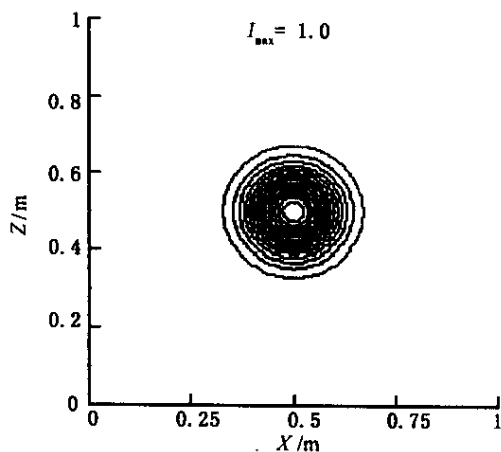


图2 激光束出口时的强度二维等值分布

Fig.2 Laser beam's 2D intensity contours

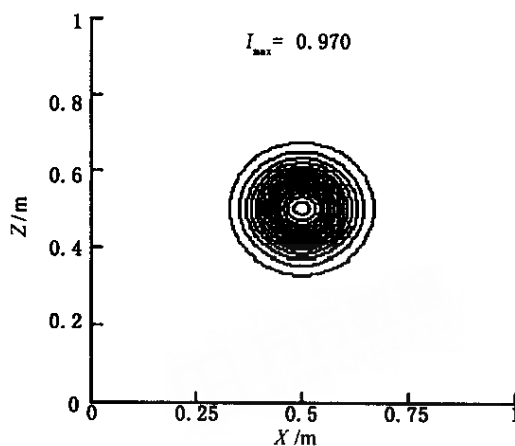


图3 激光束衍射 1km 后强度二维等值分布

Fig.3 2D intensity contours of laser beam at 1km

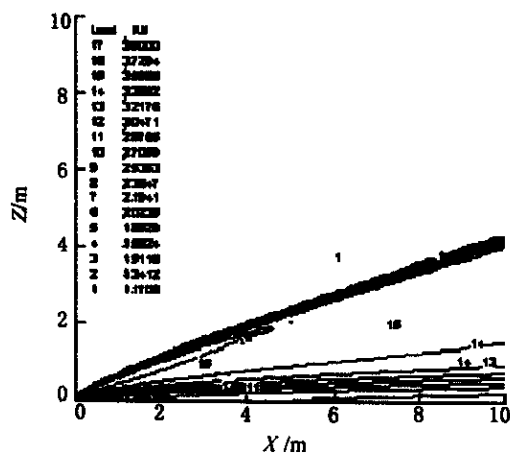
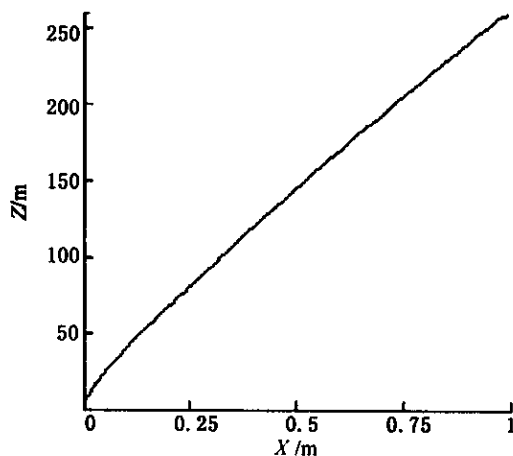
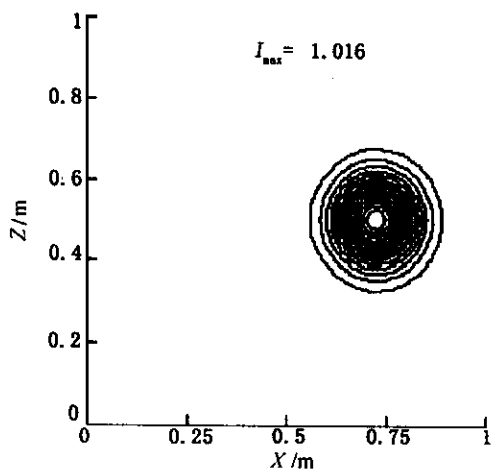
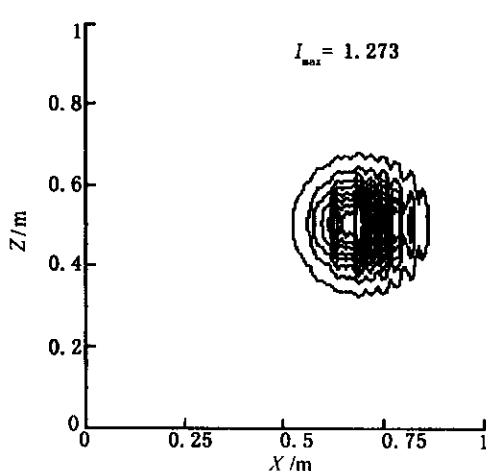
图4 超声速绕楔流动密度等值分布图 $Ma = 3.5$ Fig.4 Contour map of density at $Ma = 3.5$ 图5 沿 x 轴的光程差分布 ($\lambda = 10.6\mu\text{m}$)Fig.5 Map of OPD along x axes图6 $\lambda = 10.6\mu\text{m}$ 的激光束受绕传播
1km 后强度等值分布Fig.6 Intensity contours of disturbed
10.6μm laser beam at 1km图7 $\lambda = 1.315\mu\text{m}$ 的激光束受绕传播
1km 后强度等值分布Fig.7 Intensity contours of disturbed
1.315μm laser beam at 1km

图 6、图 7 可看出,对于波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的激光束,光束远场分布较波长为 $1.315\mu\text{m}$ 的激光束规则,所受的扰动相对波长为 $1.315\mu\text{m}$ 的激光束小。这说明在同样的光程差下,小波长的光束所受到的相位扰动比大波长的光束更为突出。

从上面的分析中可以得到激光束在穿过含有激波结构的超声速流场时,光斑的中心会产生较大的偏移,这种偏移如果产生在激光制导武器的激光瞄准系统或者机载激光武器的高功率激光束上,会对光学系统的瞄准精度和激光武器的精确瞄准打击产生较大的影响,通过数值研究可以初步地估计这种偏折的程度,这就为工程实际中校正光学系统由流场干扰所引起的光束偏差提供了有价值的参考。

4 结 论

本文通过数值模拟波长 $1.315\mu\text{m}$ 、 $10.6\mu\text{m}$ 的激光束穿过含有激波结构的超声速绕楔流场,得到了光束远场强度的等值分布。通过分析计算结果,得到以下结论:

(1) 激光束穿过含有激波结构的超声速流场时,

光束中心在远场会发生明显的偏折,对于光束传播 1km 这样的情况,这种偏折可以达到 $0.2\text{m} \sim 0.3\text{m}$ 。

(2) 相同的流场结构,流场对小波长的光束远场强度分布的影响更大,使小波场光束的远场强度分布显得更无规律。

进一步的工作,可结合具体的工程实际,数值模拟激光束通过实际的流场环境时光束强度的远场分布,为工程设计提供依据。更进一步,研究流场的湍动特性进而研究流场的实时光学特性。

参 考 文 献:

- [1] ERIC J J. Recent advances in aero-optics[C]. Progress in Aerospace Sciences, 2001, 1-20.
- [2] 刘君等. 超声速主流中逆向喷流流场的数值模拟[J]. 空气动力学学报, 1994, 12(4): 383-390.
- [3] STROHBEHN J W. Laser beam propagation in the atmosphere[J]. Applied Physics, 1978, 125: 337-422.
- [4] 陈栋全等. 激光大气传输中热晕的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 1993, 5(2): 243-251.

Numerical study of the far-field intensity distribution of laser beam disturbed by shock wave

HE Xu-zhao, YI Shi-he, KONG Tie-quan

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The far-field intensity distributions of laser beam is discussed which radius are 0.1m , focus length is 10^6m and wavelength is $10.6\mu\text{m}$ or $1.315\mu\text{m}$ when it pass through the supersonic wedge flow. The optical path difference(OPD) of flow field was obtained. Also the intensity distribution of laser beam when it pass through wedge flow field and transmit 1km in inflow was obtained. Result shows that laser beam deflects to the direction which optical path length increase. The far-field intensity of laser beam is not the same for the difference of wavelength.

Key words: shock wave; laser beam; optical path difference(OPD); intensity