

# 飞行器外流场对光传输的影响\*

柳建<sup>1,3</sup> 李树民<sup>2</sup> 金钢<sup>1,2</sup> 刘顺发<sup>1</sup> 张翔<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国空气动力研究与发展中心, 四川绵阳 621000)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 针对细光束在飞行器外流场中传输受流场影响的问题, 发展了光波标量衍射方程和气体运动的完全可压缩 Navier-Stokes 方程耦合的方法, 并结合长度加权插值技术, 对光束在飞行器定常外流场中传输的情形进行了数值仿真分析. 结果表明, 通过飞行器外流场的光束会发生偏转和离焦, 为保证飞行器上光学装置的正常工作, 须考虑必要的调校或补偿.

**关键词** 气动光学; 光传输; 标量波动方程; Navier-Stokes 方程

**中图分类号** TN042 **文献标识码** A

## 0 引言

激光在大气中传输会受到大气流场的多种干扰, 往往导致光学系统的作用效果和准确度降低<sup>[1,2]</sup>. 飞行器在飞行过程中, 其周围会产生一个复杂的流场, 包括分离、渗混边界层以及湍流边界层的发展等. 在高速(跨音速)和超高速(超音速)飞行时还会伴随出现强度不同的激波, 形成有强烈密度梯度变化的流场<sup>[3]</sup>, 这样的流场也势必会对飞行器上装载的光学、红外系统的成像造成极其不利的危害, 影响其使用效能. 定性、定量地研究飞行器外流场对传输光束的影响, 可为飞行器装载的光学、红外装置的光路设计、安布局及调校补偿等提供必要依据.

本文主要研究了马赫数 0.8 时定常状态下飞行器外流场对细光束传输的影响. 采用有限体积法对 Navier-Stokes(N-S)方程组进行差分离散, 并对离散方程组采取隐式推进和稳定的 LU 分解算法求解<sup>[4]</sup>, 得到飞行器外流场密度分布; 然后根据介质密度与光学折射率的关系, 通过插值将密度场分布转化为介质折射率分布, 并将其引入到光波动方程中; 最后对引入了变折射率分布的光波动方程采用相屏法和快速傅里叶变换(FFT)技术求解<sup>[5~7]</sup>, 得到飞行器外流场对传输光束产生的影响.

## 1 物理模型及控制方程求解

求解飞行器外流场对光传输影响的物理模型主要包含四个方面: a) 飞行器外流场的气体密度分布, 采用可压缩流的 N-S 方程求解; b) 光波传输采用标量波动方程求解, 其在流场中受到的影响通过气体密

度与介质折射率的关系引入; c) 流场计算网格与光束计算网格之间的传值耦合, 采用网格长度加权插值解决; d) 光束在流场中受到的影响大小通过光斑功率密度峰值点和光斑重心点的偏移进行评价.

### 1.1 N-S 方程及求解

求解流场分布的完全 N-S 方程为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + \frac{\partial G_v}{\partial z} + F \quad (1)$$

式中  $Q = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho E]^T$  是由流场的密度、动量和能量构成的列向量, 其他各项的具体表达式可参见文献<sup>[8]</sup>. 对式(1)无量纲化, 并转换到一般计算坐标系后, 得到

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial \tau} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} = \frac{\partial \hat{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}_v}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}_v}{\partial \zeta} + JF \quad (2)$$

式(2)即为计算流场时的最终控制方程. 其中  $\hat{Q} = JQ$ ,  $J$  为坐标变换的雅可比矩阵.

采用隐式方法求解方程(2), 得到一个非线性方程组, 即

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial \tau} + \omega \left( \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} \right)^{(n+1)} + (1-\omega) \left( \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} \right)^{(n)} = \left( \frac{\partial \hat{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}_v}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}_v}{\partial \zeta} + JF \right)^{(n)} \quad (3)$$

将式(3)沿时间方向展开, 舍去高阶项, 并令  $\delta \hat{Q} = \hat{Q}^{(n+1)} - \hat{Q}^{(n)}$ , 有

$$\frac{J\delta Q}{\Delta \tau} + \omega \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (A\delta Q) + \frac{\partial}{\partial \eta} (B\delta Q) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (C\delta Q) \right] = RHS \quad (4)$$

$$RHS = - \left( \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} \right)^{(n)} + \left( \frac{\partial \hat{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}_v}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}_v}{\partial \zeta} + JF \right)^{(n)}$$

\* 武器装备预研基金(51413030304kg2908)资助项目  
Tel: 028-85100191 Email: emailofliujian@126.com  
收稿日期: 2004-12-30

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别是三个坐标方向上的对流通量对  $Q$  的雅可比矩阵,  $\omega=1$  代表时间方向一阶准确度,  $\omega=1/2$  代表时间方向二阶准确度. 令

$$A^\pm = (A \pm \beta r_A)/2, B^\pm = (B \pm \beta r_B)/2, \\ C^\pm = (C \pm \beta r_C)/2$$

式中  $r_A, r_B, r_C$  分别为系数矩阵  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的谱半径, 对式(4)离散整理后得

$$D_- \delta Q_- + D \delta Q + D_+ \delta Q_+ = \frac{1}{\omega} RHS \quad (5)$$

式中

$$D = \left[ \frac{V}{\omega \Delta t} + \beta(r_A + r_B + r_C) \right] I \\ D_- \delta \hat{Q}_- = -(A_{j-1}^+ \delta \hat{Q}_{j-1} + B_{k-1}^+ \delta \hat{Q}_{k-1} + \\ C_{l-1}^+ \delta \hat{Q}_{l-1}) \\ D_+ \delta \hat{Q}_+ = (A_{j+1}^- \delta \hat{Q}_{j+1} + B_{k+1}^- \delta \hat{Q}_{k+1} + \\ C_{l+1}^- \delta \hat{Q}_{l+1})$$

对式(5)左端采用 LU 分解技术<sup>[2]</sup>, 可得

$$(LD^-U) \delta \hat{Q} = \frac{1}{\omega} RHS \quad (6)$$

式中

$$L = D + D_-, U = D + D_+$$

对式(6)可分两步求解

$$\delta \bar{Q} = \frac{1}{\omega} D^- RHS - D^- D_- \delta \bar{Q} \\ \delta Q = \delta \bar{Q} - D^- D_+ \delta Q \quad (7)$$

对 RHS, 采用 Roe 平均<sup>[9]</sup>并结合数值 Riemann 不变量<sup>[10]</sup>和通量限制器的概念<sup>[11]</sup>, 构造了具有迎风性质的半离散格式进行计算.

由上述过程即求得飞行器外流场的密度分布.

## 1.2 光传输方程及求解

光场  $E$  由式(8)描述

$$E = A(x, y, z) e^{i(\omega t - kz)} \quad (8)$$

在缓变振幅近似下  $A$  满足近轴波方程

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 A + k^2 \left( \frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) A \quad (9)$$

式中,  $z$  为沿光束传播方向上的传输距离,  $k = 2\pi/\lambda$  为在均匀介质中的波数,  $n_0$  和  $n$  分别是未扰动及有扰动后的介质折射率.

采用相屏法求解方程(9), 其解可写成真空波动方程的解叠加上由于介质折射率扰动引起的相位变化<sup>[5~7]</sup>, 即

$$A = A_{vac} \delta \varphi \quad (10)$$

$A_{vac}$  为  $n = n_0$  时的真空波方程的解. 为简单起见, 以下将  $A_{vac}$  记做  $A$ .

真空波方程采用 FFT 方法求解, 其角谱分量的传输形式为

$$A_m^{n+1} = A_m^n \exp \left[ \frac{i}{2k} \left( \frac{2\pi}{L} \right)^2 (l^2 + m^2) \Delta z \right] \quad (11)$$

式(10)中, 在  $\Delta z$  距离上因介质折射率扰动引起的相位变化为

$$\delta \varphi_n = \exp(-ik \Delta z \delta n) \quad (12)$$

气体折射率与其密度的关系为<sup>[12]</sup>

$$n - 1 = \kappa \rho \quad (13)$$

式中  $\kappa$  为 Gladstone-Dale 常量.

因此, 只要将由流场控制方程求得的流场密度分布代入式(13)即得到该流场的折射率分布, 进而由式(12)得到介质折射率扰动引起的相位变化, 最终由式(10)得到光束通过流场后的光场分布.

## 1.3 网格长度加权插值

由于各自的特殊要求, 流场和光场计算采用了两套不同的网格, 因此需要采用插值技术将流场密度分布耦合到光场计算中去. 本文引入了长度加权插值. 设光传输方向上的光束网格长度为  $L$ , 共有  $n$  个流场网格与该光场网格相交, 则有

$$\rho = \sum_{k=1}^n [(L_k/L) \times \rho_k] \quad (14)$$

式中  $L_k, \rho_k$  分别代表第  $k$  个流场网格截取的光束网格长度和密度.

## 1.4 光束偏折的评价参量

用光斑峰值点坐标和光斑重心坐标在  $x, y$  方向上的偏移量  $\Delta x_c, \Delta y_c, \Delta x_{hy}$  以及  $\Delta y_{hy}$  来刻画飞行器外流场对光传输的影响. 上述参量定义如下

$$\Delta x_c = (x_{I_{max}} - x_{I_{max0}}) / r_{beam}; \\ \Delta x_{hy} = (x_{hy0} - \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} \int_{y_{min}}^{y_{max}} I(x, y) x dx dy}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} \int_{y_{min}}^{y_{max}} I(x, y) dx dy}) / r_{beam} \quad (15)$$

式中,  $I(x, y)$  为  $(x, y)$  处的光斑功率密度,  $I_{max}$  为峰值功率密度,  $I_{max}$  为峰值功率密度点的  $x$  坐标值;  $r$  是以峰值功率密度点为原点的极半径;  $r_{beam}$  是入射光束的特征半径.

## 2 仿真计算结果及讨论

采用上述模型和方法, 对以一个三维 NACA0012 机翼的翼身组合体作为搭载光学系统平台的飞行器情形进行了仿真计算. 机翼的外流场采用 C 型计算网格, 光场采用 H 型计算网格.

初始激光束取为高斯光束

$$E = E_0 \exp(-r^2/2a^2) \quad (16)$$

光束特征半径  $a = 0.016$  m, 波长  $\lambda = 10.6$   $\mu$ m, 功率  $P = 1$  W,  $E_0 = P/(\pi a^2)$ . 飞行器来流马赫数  $Ma = 0.8$ , 攻角为  $0^\circ$ , 参考声速  $a_0 = 340$  m/s, 流场计算的边界条件包括远场边界、粘性固壁边界和对接边界,

流场对光能无吸收损耗. 光束接收面为距离入射光束出口正向 200 m、400 m 处的垂面.

图 1 为对称面上的流场网格和光束网格的几何关系. 光束网络的入口(a)和出口(b)都略突出于流场网格. 因物面处的物理量变化梯度较大, 流场网格在物面附近加密, 至远场逐渐稀疏. 为保证光场计算的准确度, 在垂直于光传输方向的横截面上, 光束网络的密度远高于流场网格. 图 2 显示了沿光束传输纵向剖面上局部的流场计算网格(疏)和光束计算网格(密)之间的关系. 图 3 为沿光束穿越流场方

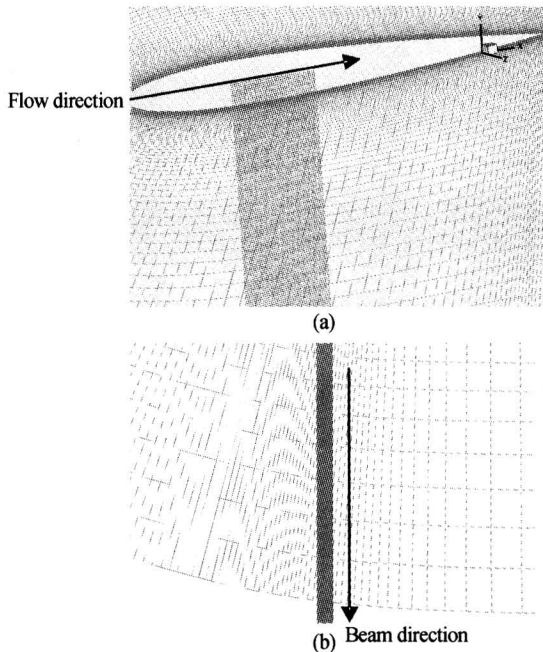


图 1 对称面上局部流场计算网格(疏)和光波计算网格(密)  
Fig. 1 The local fluid grid (sparse) and beam grid (thick) on symmetry plane

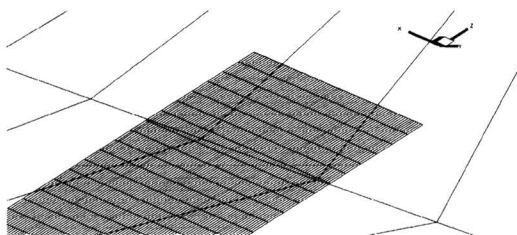


图 2 沿光束纵向剖面上局部的流场计算网格(疏)和光束计算网格(密)

Fig. 2 The local fluid grid (sparse) and beam grid (thick) on vertical plane of beam

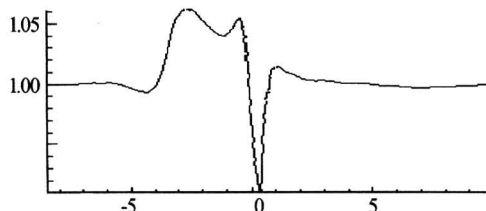


图 3 来流  $Ma=0.8$  时, 光束穿越流场纵切面密度变化曲线  
Fig. 3 The density distribution of beam section on beam direction at  $Ma=0.8$

向纵切面上的密度变化曲线图. 由图可见物面附近气体密度变化波动接近初始密度的, 密度沿光束传播路径变化很大. 后面可以看到, 正是由于流场密度的这种不均匀分布导致了光束的偏移和离焦.

图 4 为定常状态下, 光束通过飞行器外流场后在距离出口 200 m、400 m 处接收面上的光斑功率密度等值线图(a、b中偏左者为通过流场后的光斑). 可以看出, 被流场影响后的接收光斑相对理想光斑沿  $x$  方向有较大的偏转, 并且有轻微的聚焦效应.

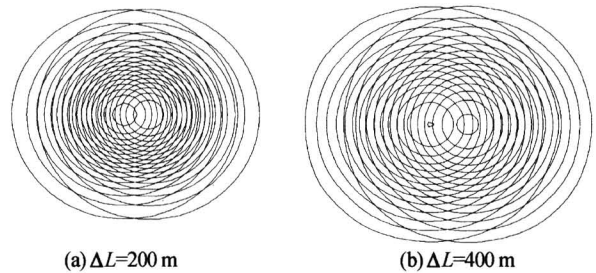


图 4 来流  $Ma=0.8$ , 不同接收面上光斑的偏移  
Fig. 4 Beam deflection at different receiving plane,  $Ma=0.8$

从表 1 可以看到, 在距光束出口 400 m 的接收面上, 无论光斑峰值功率密度点还是光斑重心点的偏移量均大于光束的特征半径, 而且随着光传输距离的增加, 此偏移量基本上呈线性增大的趋势.

表 1 来流  $Ma=0.8$  时接收光斑的偏移量

$\Delta L/m$	$\Delta x_c/m$	$\Delta y_c/m$	$\Delta x_{ky}/m$	$\Delta y_{ky}/m$
200	0.010	0.000	0.010	0.000
400	0.020	0.000	0.018	0.000

### 3 结论

针对飞行器外流场对光波传播影响问题, 本文建立了基于可压缩完全 N-S 方程和光波标量波动方程的计算方法. 利用所建立的方法对光波经马赫数 0.8 的翼身组合体流场传输的情况进行了仿真计算. 计算结果表明, 处于飞行状态下的飞行器, 由于其外流场变化相当复杂, 气流密度的波动范围很大, 当光在该流场中传输时会受到较大的影响. 在本文的计算中, 光路通道选择了飞行器流场相对稳定平缓的部位, 流场对光束传输的影响主要表现为使光束产生明显的偏折和离焦效应. 可以预计, 在湍流效应较强的情况下, 流场变化还将导致光斑形状发生畸变. 因此在设计飞行器上光学系统工作光路及安装位置时, 须考虑到外流场对光传输的影响, 并根据准确度要求进行必要的调校和补偿.

本文所建立的方法能正确地反映出飞行器外流场对光传输的影响, 并具有较好的通用性, 可用于系统研究高速(可压缩)流场的气动光学效应.

### 参考文献

- 1 牛燕雄, 张鹏, 姚建铨, 等. 强激光对星载光电探测系统

- 的干扰与破坏研究. 光子学报, 2004, **33**(7): 793~796  
Niu Y X, Zhang P, Yao J Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 793~796
- 2 易翔, 王蔚然. 激光雷达系统的数值仿真. 光子学报, 2004, **33**(1): 21~23  
Yi X, Wang W R. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 21~23
- 3 朱自强, 吴子牛, 李津, 等. 应用计算流体力学. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998  
Zhu Z Q, Wu Z N, Li J, *et al.* *Applied computational fluid mechanics*. Beijing: Beihang University Press, 1998. 191~213
- 4 Rieger H, Jameson A. Solution of steady three-dimensional compressible Euler and Navier-Stokes equations by an implicit LU scheme, AIAA-88-0619, 1989
- 5 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. 中国激光, 2002, **A29**(10): 895~899  
Jin G, Liu S F, Li S M, *et al.* *Chinese Journal of Laser*, 2002, **A29**(10): 895~899
- 6 Gebhardt F G. Twenty-five years of thermal blooming: an overview. *Proc of SPIE*, 1990, **1221**: 2~25
- 7 柳建, 刘顺发, 金钢. 封闭充气管道中气体热效应对激光传输的影响. 光电子·激光, 2004, **15**(1): 100~103  
Liu J, Liu S F, Jin G. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(1): 100~103
- 8 吴子牛. 计算流体力学原理. 北京: 科学出版社, 2001. 52-55  
Wu Z N. *The basic principles of computational fluid mechanics*. Beijing: Science Press, 2001. 52~55
- 9 Roe P L. Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes. *Journal Computational Physics*, 1981, **43**: 357~372
- 10 Boris J P, Book D L. Flux corrected transport I, SHASTA, a fluid transport algorithm that works. *Journal Computational Physics*, 1973, **11**: 38~69
- 11 Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. II. Monotonicity and conservation combined in a second order scheme. *Journal Computational Physics*, 1974, **14**: 361~370
- 12 Strohbehn W, *et al.* *Laser beam propagation in the atmosphere*. Berlin: Spring-Verlag, 1978. 224

## Influence on Laser Propagation of Aero-craft's outer Fluid Field

Liu Jian<sup>1,3</sup>, Li Shumin<sup>2</sup>, Jin Gang<sup>1,2</sup>, Liu Shunfa<sup>1</sup>, Zhang Xiang<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209

<sup>2</sup> China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000

<sup>3</sup> Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2004-12-30

**Abstract** A numerical study was carried out for the aero-optical effects of flow around an aircraft on laser beam propagation. Beam propagation is described by the paraxial scalar wave equations, solved by the phase-screen technique and the FFT method. Air density variation is governed by the complete Navier-Stokes equations which are solved by using the LU-SGS factorization technique. The numerical results show that the deflection and defocus effects would be significant due to the variation of flow field. Thus, the necessary compensation should be in consideration when use optical instruments on aero-craft.

**Keywords** Aero-optics; Beam propagation; Scalar wave equation; Navier-Stokes equations



**Liu Jian** was born in 1975, in Sichuan Province, China. He received bachelor's degree in applied physics from Xinjiang University in 1998. Now he is pursuing the Ph. D. in Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences. His research interests include laser propagation and control, numerical computation and other related areas.