

# 光学窗口凹腔流场的光学传输效应研究

冯定华<sup>1,2</sup> 李桦<sup>2</sup> 肖飞<sup>3</sup> 丁国昊<sup>2</sup> 王文龙<sup>2</sup> 田正雨<sup>2</sup> 潘沙<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 西安卫星测控中心宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043  
<sup>2</sup> 国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073  
<sup>3</sup> 西安通信学院, 陕西 西安 710106

**摘要** 当带有光学成像探测制导系统的高速飞行器在大气层内飞行时,光学窗口与来流之间会形成复杂的凹腔绕流流场,产生气动光学效应。建立了求解超声速流场的高精度 LES/RANS 混合算法模型,研究了超声速流动条件下的 Settles 三维凹腔流动;在计算得到精确流场数据的基础上,研究了凹腔剪切层区域的光学传输效应。结果表明,凹腔流动的剪切层结构将引起光线抖动,导致严重的波面畸变,明显降低光强斯特雷尔(Strehl)比,严重影响光学传输性能,进而大大降低光学制导精度。

**关键词** 大气与海洋光学;凹腔流场;LES/RANS 混合算法;气动光学;光线追迹;光学传输效应

**中图分类号** O435; V211 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0401004

## Study on Optical Transmission Effect of Optical Window's Cavity Flow

Feng Dinghua<sup>1,2</sup> Li Hua<sup>2</sup> Xiao Fei<sup>3</sup> Ding Guohao<sup>2</sup> Wang Wenlong<sup>2</sup>  
Tian Zhengyu<sup>2</sup> Pan Sha<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an Satellite Control Center, Xi'an, Shaanxi 710043, China  
<sup>2</sup> College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China  
<sup>3</sup> Xi'an Communication Institute, Xi'an, Shaanxi 710106, China

**Abstract** When the vehicle with optical seeker in its head side window flights at high speed in aerosphere, cavity flow phenomena occurs. So, the high-precision LES/RANS hybrid algorithm model is established to solve supersonic flow. The Settles three dimensional cavity's supersonic flow is studied. And then, on the basis of accurate numerically calculated flow-field data, the optical transmission effect of the cavity shear layer region is researched. The results show that, the shear layer structure of cavity flow will cause light jitter, lead to severe wave-front distortion, reduce light intensity Strehl ratio significantly, and reduce the accuracy of the optical guidance.

**Key words** atmospheric and oceanic optics; cavity flow field; LES/RANS hybrid algorithm; aero-optics; ray tracing; optical transmission effect

**OCIS codes** 010.1290; 080.1753; 350.5500

## 1 引言

当带有光学成像探测制导系统的高速飞行器在大气层内飞行时,光学头罩与来流之间形成复杂的流场,产生真实气体效应、激波诱导边界层分离以及

无粘流与边界层的相互干扰等,从而引起气流密度、温度和组成成分变化,甚至产生气体分子电离等现象,对光学成像探测系统造成热、热辐射和图像传输干扰,引起目标图像偏移、抖动和模糊,这种效应称

收稿日期: 2011-10-08; 收到修改稿日期: 2011-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(91016010)和国防科技大学优秀研究生创新项目(B080103)资助课题。

作者简介: 冯定华(1981—),男,博士研究生,工程师,目前主要从事空间大气环境和气动光学等方面的研究。

E-mail: fdhua2000@163.com

导师简介: 李桦(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事计算流体力学和应用及高超声速空气动力学等方面的研究。

E-mail: lihuakd@tom.com

为气动光学效应<sup>[1~4]</sup>。

为了降低飞行器光学窗口热效应,飞行器在安装窗口时,通常使窗面低于飞行器表面。但这将形成复杂的非定常凹腔流场,产生如激波、湍流和旋涡分离流等,进一步加剧气动光学效应。国内外众多学者都对高速飞行器近壁流场的气动光学效应进行了研究<sup>[3,5~10]</sup>,但成果都远未达到工程应用要求<sup>[2]</sup>,迫切需要深入研究。本文将通过数值模拟方法对凹腔流场产生的光学传输效应(气动光学效应中的一种<sup>[1]</sup>)进行研究,其基本方法是采用流体力学方法计算得到流场,然后研究光线穿越该流场时受到的影响。

## 2 研究对象

在安装高速飞行器光学成像窗口时,通常使窗面低于飞行器表面,以降低传热系数。所以当高速气流流过侧窗时,形成了凹腔绕流,流场存在自由剪切层、旋涡和激波等,与 Settles<sup>[11~13]</sup>凹腔流场结构类似。因此,研究 Settles 凹腔流场引起的光学传输效应,具有实际意义和价值。Settles 对各种凹腔流动进行了大量实验研究,取得了丰富研究成果。本文选择经典 Settles 凹腔<sup>[13]</sup>作为对象,在此基础上研究凹腔复杂流动引起的气动光学效应。

Settles 凹腔外形如图 1 所示,凹腔深  $D=2.54$  cm,长  $L_x=6.19$  cm,凹腔后缘倾角为  $20^\circ$ ,后缘斜坡长度  $L_x'=21$  cm,凹腔上游流向计算域取  $D$ ,法向高度取  $4.0D$ ,展向长取  $3.0$  cm。凹腔网格的流向、法向和展向分布为,凹腔上游部分计算网格为  $57 \times 101 \times 35$ ,

凹腔内网格为  $401 \times 187 \times 35$ 。来流马赫数  $Ma=2.92$ ,总压  $P_0=0.69$  MPa,总温  $T_0=258$  K,雷诺数  $Re=6.7 \times 10^7$   $m^{-1}$ ,壁面为绝热壁。凹腔入口边界层厚度  $\delta_0=0.29$  cm,各种参数按照预先计算得到的平板边界层流动的剖面给定,该剖面参数计算结果与实验数据相吻合。网格总量为  $282.6 \times 10^4$ ,计算中分为 48 个分区,采用并行计算。

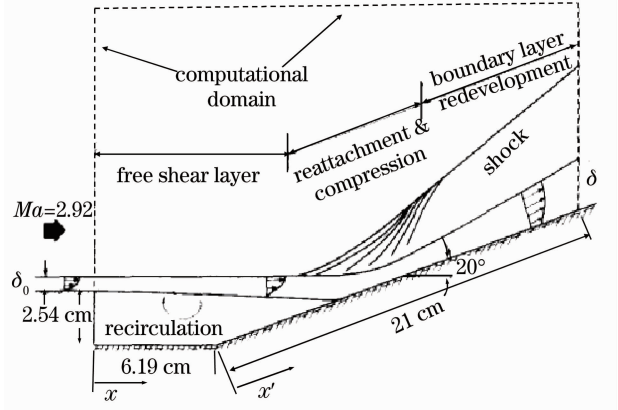


图 1 Settles 凹腔流动示意图

Fig. 1 Schematic of Settles cavity flow

## 3 研究方法

### 3.1 流场数值计算方法

针对高速复杂流动,建立了精细求解流场的 LES/RANS 混合算法模型。其中 LES 模型选取一方程亚格子模型湍动能方程<sup>[14]</sup>,如(1)式,RANS 模型选用 Menter SST 两方程湍流模型<sup>[15]</sup>,如(2)、(3)式所示:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{k})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{k}\bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_l + \mu_t^{sgs} \sigma_k^{sgs}) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \right] + P_k^{sgs} - C_d \bar{\rho} \frac{\bar{k}^{3/2}}{\Delta}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{k})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_j\bar{k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_l + \sigma_k^{SST} \mu_t^{SST}) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \right] + P_k^{SST} - \beta_k \bar{\rho} \bar{\omega} \bar{k}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{\omega})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_j\bar{\omega})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_l + \sigma_\omega^{SST} \mu_t^{SST}) \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x_j} \right] + \gamma \frac{\bar{\omega}}{k} P_k^{SST} - \beta_\omega \bar{\rho} \bar{\omega}^2 + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega 2} \bar{\rho}}{\bar{\omega}} \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial x_j}. \quad (3)$$

比较 Menter SST 湍流模型中的湍动能方程(2)式和一方程亚格子模型对应的湍动能方程(1)可知,两者形式类似,参照湍流模式 Menter SST 的构造方法,采用混合函数  $F$  来衔接两个方程的计算区域,从而得到湍动能控制方程

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{k})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_j\bar{k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_l + \mu_t \sigma_k) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \right] + P_k - \bar{\rho} \left[ F \beta_k \bar{\omega} \bar{k} + (1 - F) C_d \frac{\bar{k}^{3/2}}{\Delta} \right], \quad (4)$$

式中  $\mu_t = \bar{\rho} [F \mu_t^{SST} + (1 - F) \mu_t^{sgs}]$ ,  $\sigma_k = F \sigma_k^{SST} + (1 - F) \sigma_k^{sgs}$ ,  $P_k = F P_k^{SST} + (1 - F) P_k^{sgs}$ ,当  $F=1$  时,(4)式自动转换为(2)式;当  $F=0$  时,(4)式又转化为(1)式。

文献<sup>[16]</sup>构造的混合函数为  $F = \tan h(\eta^4)$ ,其中  $\eta = \max(\eta_1, \eta_2)$ ,  $\eta_1 = \sqrt{k}/(0.09\bar{\omega}d)$ ,  $\eta_2 = 500\nu/(\bar{\omega}d^2)$ , $d$ 是到最近壁面的距离,但此方法在计算壁面湍流时会过度估计分离区<sup>[17,18]</sup>。而  $F$  的取法具有一定的经验性,文献<sup>[18]</sup>就给出了一种改进形式  $F_{new} = \tan h(\eta_0^4)$ ,其中  $\eta_0 = \max(\alpha\eta_1, \eta_2)$ ,当参数  $\alpha = 1.505$  时,计算

效果不错,适用性也较好,本文计算时选取的混合函数也主要是基于后者的思想,针对不同来流条件时,调整参数 $\alpha$ 的值,以得到合理精确的计算结果。在求解上述方程过程中,采用5阶WENO空间格式和3阶TVD Runge-Kutta时间格式。

### 3.2 光学传输计算方法

在计算光学传输效应的方法中,光线追迹法原理简单,适用性也较广,因此得到了广泛的应用<sup>[19~25]</sup>。本文开展的气动光学研究主要是针对近壁流场,在这种情况下,由于传播距离很短,并且光的波长比流动结构小很多,因此应用几何光学是正确可行的<sup>[26]</sup>,无论对于层流流场还是湍流流场均可适用<sup>[25,27,28]</sup>。

采用基于计算流体力学三维空间离散网格,网格节点介质折射率已知,通过实时计算光传播路径上所需各点的折射率和折射率梯度,并采用Runge-

Kutta法实现光线追迹,在追迹过程中,每一步追迹的起点和终点不一定在网格点或者网格单元分界面上,并且追迹步长根据当地折射率梯度和网格尺寸自适应调节,以提高追迹的精度和效率。这部分工作已经在前期进行了研究,并得到了验证和推广,具体可见文献<sup>[29~31]</sup>。

## 4 流场流动特性计算与验证

### 4.1 流场结构

图2,图3给出了Settles凹腔流动(a)~(f)6个时刻的瞬时流动结构图,时间间隔为 $\Delta t = D/U_\infty$ 。其中,图2为三维视图情况下流向涡量 $\omega_x = 1.0$ 的演化过程图,可以清楚看到凹腔完全被自由剪切层所封闭,自由剪切层涡量向后发展与凹腔后缘斜坡面相碰撞后,变得更为紊乱和破碎。

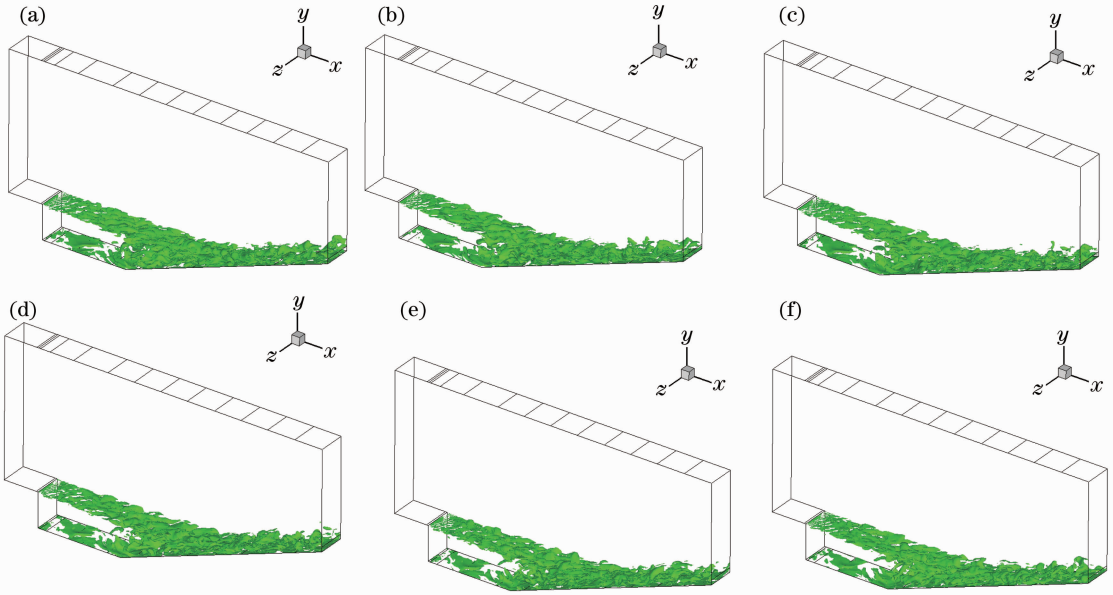


图2 Settles凹腔流向无量纲涡量 $\omega_x = 1.0$ 演化图

Fig. 2 Settles cavity flow evolution diagram of dimensionless vorticity  $\omega_x = 1.0$

图3为展向中心沿流向的切面的无量纲压力等值线图。根据图3可知,当自由剪切层撞击到凹腔后缘壁面时,不断产生压力峰值高的区域,当先前的高压区向后发展,逐渐耗散时,在再附点附近新的高压区域又产生,如此循环往复,形成一种拟序状态。

对计算结果进行统计平均后,图4给出了展向中心剖面的流向速度时均统计结果。根据图4可知,在凹腔区域主要由自由剪切层控制,在自由剪切层下面的凹腔内是一个很大的回流区。当自由剪切层运动到凹腔后缘的斜坡面时受到压缩,形成系列压缩波并向后会聚为激波,自由剪切层再附到斜坡

面上继续发展为湍流边界层。

### 4.2 自由剪切区域流动特性

文献<sup>[13]</sup>给出了该算例平均统计特性的实验结果,下面将流场计算的时均统计结果与实验结果进行比对,研究和分析Settles凹腔的流动特性,同时检验数值模拟计算流场的精确性。

图5为剪切层速度剖面图,其中 $x = -2.54$  cm的剖面为计算域的入口剖面,其余3个剖面均为凹腔内自由剪切层的平均速度剖面图。根据图5可知,计算入口的速度剖面参数与实验情况吻合较好。在 $x = 3.81$  cm和 $x = 6.35$  cm处,分别为自由剪切

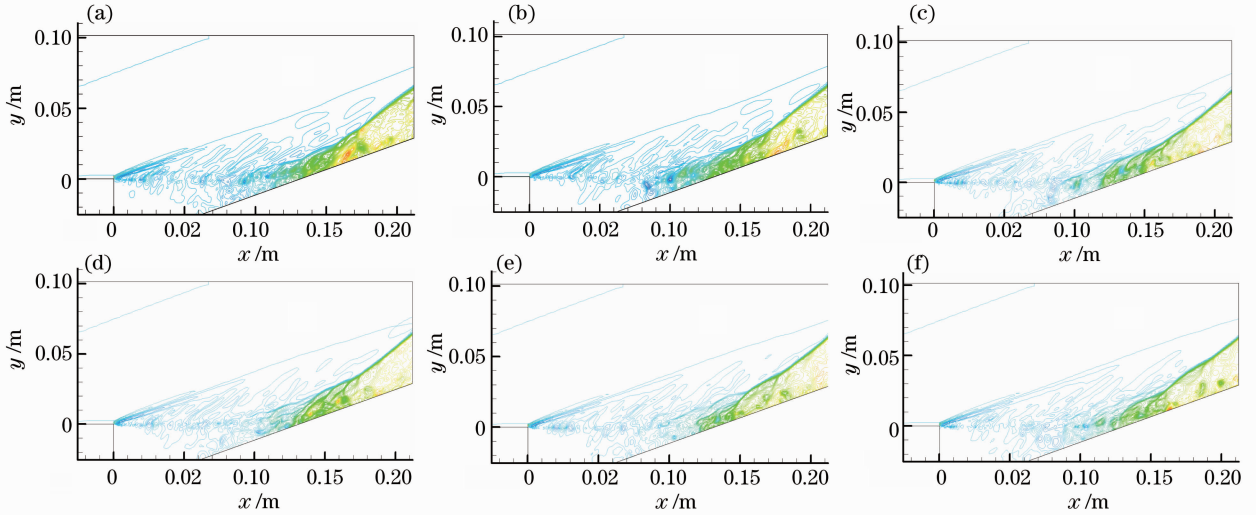
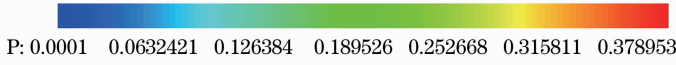


图 3 Settles 凹腔无量纲压力等值线演化过程(展向中心剖面)

Fig. 3 Settles cavity evolution of dimensionless pressure contours (the spanwise center profile)

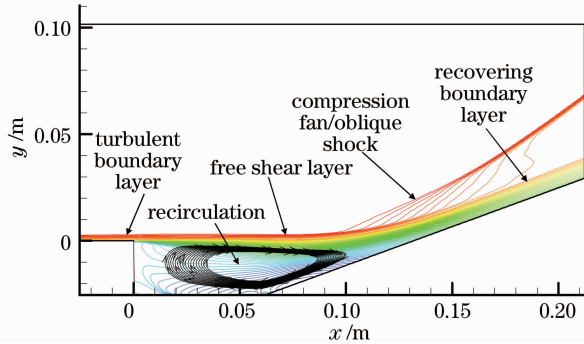


图 4 时均流向速度等值线图(展向中心剖面)

Fig. 4 Mean speed contours of flow (the spanwise center profile)

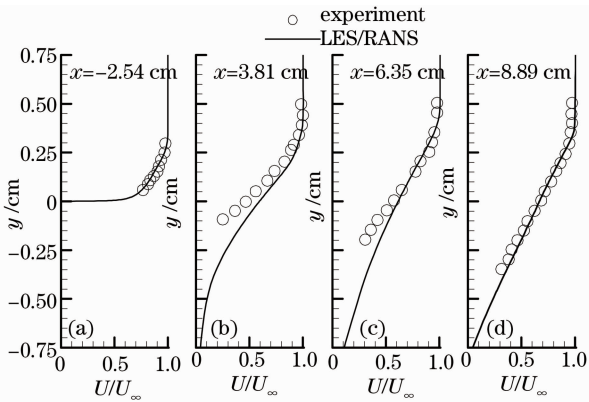


图 5 自由剪切层区域速度剖面

Fig. 5 Velocity profile of the free shear layer

层发展的初始和中间位置,在剪切层的下缘位置计算值与实验值的误差有所增大,但总的趋势仍然相符合。在  $x=8.89$  cm 处,自由剪切层已充分发展,

将与凹腔后缘斜坡发生作用,此处的计算结果和实验值符合较好。

文献[13]给出了剪切层和再附区若干剖面上的质量流脉动均方根与自由来流的比值  $\langle(\rho u)'\rangle/(\rho_\infty u_\infty)$ ,本文也计算了该比值。在计算中,  $\langle(\rho u)'\rangle = \sqrt{[(\rho u)']^2}$ ,  $[(\rho u)']^2$  可以按照下式求解<sup>[32]</sup>:

$$[(\rho u)']^2 = \overline{(\rho u)^2} - (\overline{\rho u})^2 + [(\rho u)']^2_{\text{mod}}, \quad (5)$$

式中模化量  $[(\rho u)']^2_{\text{mod}} = \frac{8}{9} [1 + (\gamma - 1) Ma_\infty]^2 \overline{\rho^2 k}$ 。

计算结果如图 6 所示,在  $x=-0.76$  cm 位置,剪切层为凹腔前方发展的壁面边界层,计算值与实验值相吻合。在后面处于自由剪切层的 3 个位置,前两处  $x=2.54$  cm 与  $x=6.35$  cm 的计算值与实验值趋势相符,但比实验值偏大,最后  $x=8.89$  cm 处,计算值和实验值基本吻合。

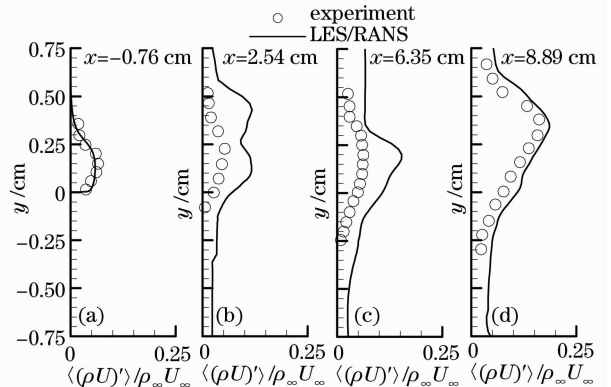


图 6 自由剪切层质量流脉动均方根

Fig. 6 RMS mass-flow fluctuation in the free shear layer

## 5 流场光学传输效应研究

通过4节对Settles凹腔的流场分析可知,本文计算的流场是准确可信的,在此基础上,对凹腔流场引起的光学传输效应开展研究。对于实际情况中的光学探测窗口,光学玻璃通常安装在凹腔底部,故本文主要针对Settles凹腔的底部区域( $0 \leq x \leq 6.19 \text{ cm}$ )剪切层流场产生的近场光学传输效应开展研究。

### 5.1 折射率分布

根据流场密度与折射率之间的Gladstone-Dale(G-D)关系式<sup>[33]</sup>

$$n - 1 = K_{\text{GD}}\rho, \quad (6)$$

式中 $n$ 为气体折射率, $\rho$ 为气体密度, $G-D$ 系数 $K_{\text{GD}} = 2.23 \times 10^{-4} \times (1 + 7.52 \times 10^{-3}/\lambda^2)$ , $\lambda$ 为波长。据此可计算与前文4.1节的6个流动瞬时状态相对应的流场折射率场分布。为了直观表示流场沿流向和纵向的折射率分布,取展向中心沿流向剖面进行研究和分析。流场介质为空气,为了定量计算流场的折射率分布,取 $K_{\text{GD}} = 2.26 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,对应波长 $\lambda = 0.75 \mu\text{m}$ ,计算6个时刻[时刻(a)~(f)]流场剖面的折射率分布,如图7所示。

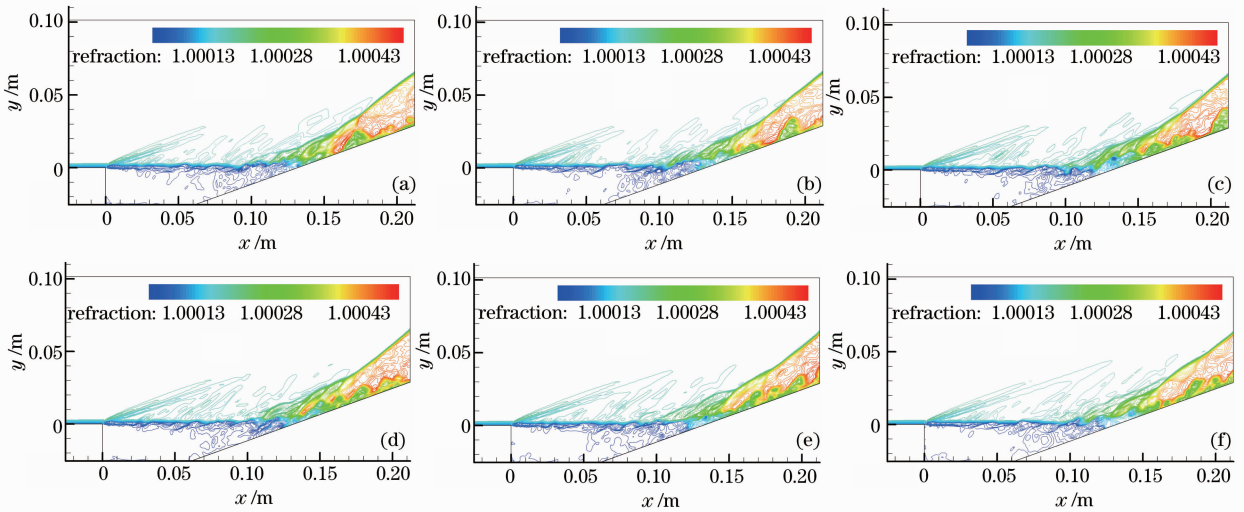


图7 展向中心瞬时折射率等值线剖面演化图

Fig. 7 Evolution diagram of instantaneous refractive index contours profile (the spanwise profile)

根据图7结果可知,沿流向的折射率变化比较明显,随着流动向后发展,流场折射率增大,在凹腔后缘斜坡的流动再附区,由于受到激波的影响,折射率显著增大。在纵向方向,由于剪切层对凹腔的封闭作用,纵向的折射率被区分为上下两个明显的区域,剪切层上面区域,折射率分布除了靠近剪切层位置处由于受到剪切层影响有波动外,大部分都是未扰动流场的折射率;剪切层下面凹腔内部各区域之间折射率变化不大,但总体明显比剪切层外的小,剪切层成为了较强的折射分界面,剪切层区域具有较大的折射率梯度。

### 5.2 光线抖动

由于流场密度分布的空间不均匀性,光束在传播过程中会产生偏折,光束经过流场后的位置相对入射位置会产生偏离主光轴的偏移量(本文定义为抖动距离),同时方位角也会发生改变,而且,由于流场为非定常流动,随着时间的发展,其位置偏移量和角度偏移量也会随时间发生改变,从而产生抖动效应。此处主要研究入射光线沿法向经过流场时,受

到流场影响而产生的抖动效应。计算中沿流向不同站点位置处布置了光线,光线从流场法向坐标 $y = 0.075 \text{ m}$ 平面处垂直向下入射进入三维流场,最后从凹腔底部下边界出射。光线的入射点位于展向中心线上,沿 $x$ 方向的位置分别是 $x = 1.54 \text{ cm}$ , $x = 3.81 \text{ cm}$ , $x = 4.62 \text{ cm}$ 和 $x = 6.16 \text{ cm}$ ,利用三维光线追迹方法<sup>[29~31]</sup>对各条光线穿越流场进行追迹。

图8为不同位置光线穿越流场的角度偏移量,在光线经过流场的初始阶段,在光径上流场的密度等变化不大,光线基本上不发生偏转;当光线接近凹腔剪切层( $y = 0$ 附近)时,流场密度发生了显著变化,折射率相应改变,导致了光线发生了明显偏转,而且光线在穿越剪切层过程中,偏转角急剧增大;穿越剪切层后,光线偏转角变化幅度明显变缓。比较图8中同一时刻不同入射位置或者同一入射位置不同时刻的光线偏转角曲线可知,光线穿越流场过程中,光线偏转角的改变随空间(不同 $x$ 位置)和时间(间隔 $\Delta t = D/U_\infty$ )不同而变化,具有明显的空间和时间特性。

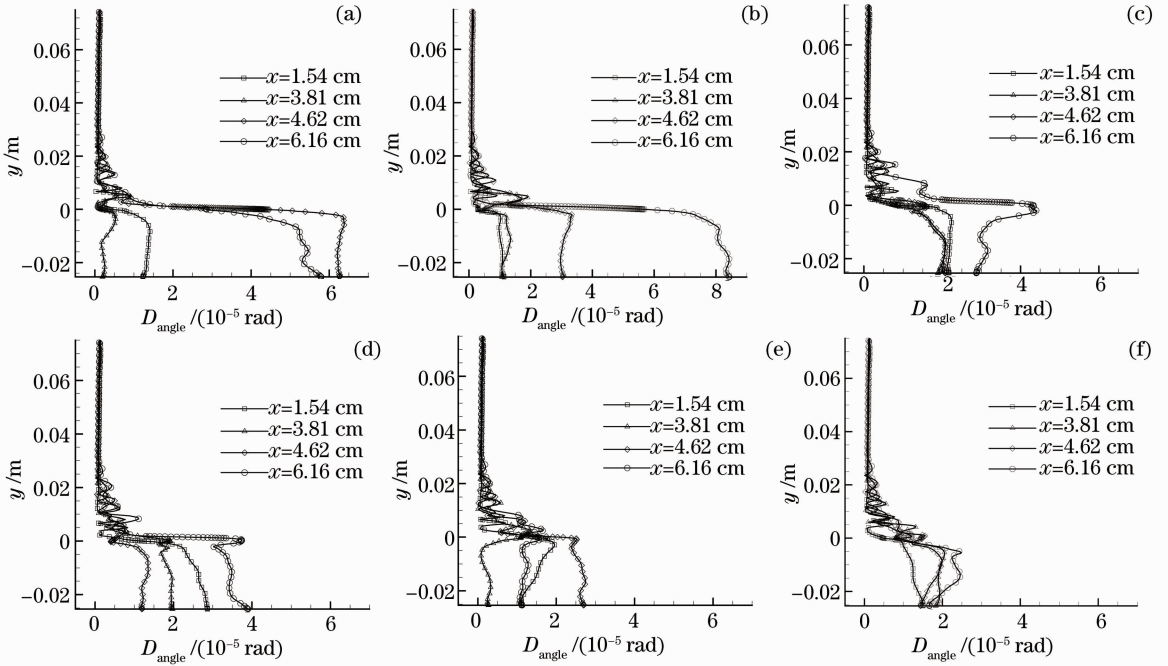


图 8 不同位置处光线穿越流场的角偏移

Fig. 8 Angle deviation of light across the flow field in different locations

图 9 与图 8 相对应,为不同位置光线穿越流场抖动距离。在光线经过流场的初始阶段,由于光线基本不发生偏转,光线抖动距离基本为零;当光线穿越剪切层时,光线传输偏离原方向,光线沿着偏离的方向向前传输,偏离主光轴的距离越来越大,即抖动距离越来越大,且抖动距离增加呈线性特征,可以看

到在剪切层附近,光线发生了明显偏转,说明了剪切层对光线传输的影响是巨大的。

### 5.3 光程差与波面畸变

由于流场密度的不均匀性,导致流场介质的折射率不均匀,平面光波经过流场后,波面相位在不同位置会产生超前或者滞后,使得平面光波产生畸变,

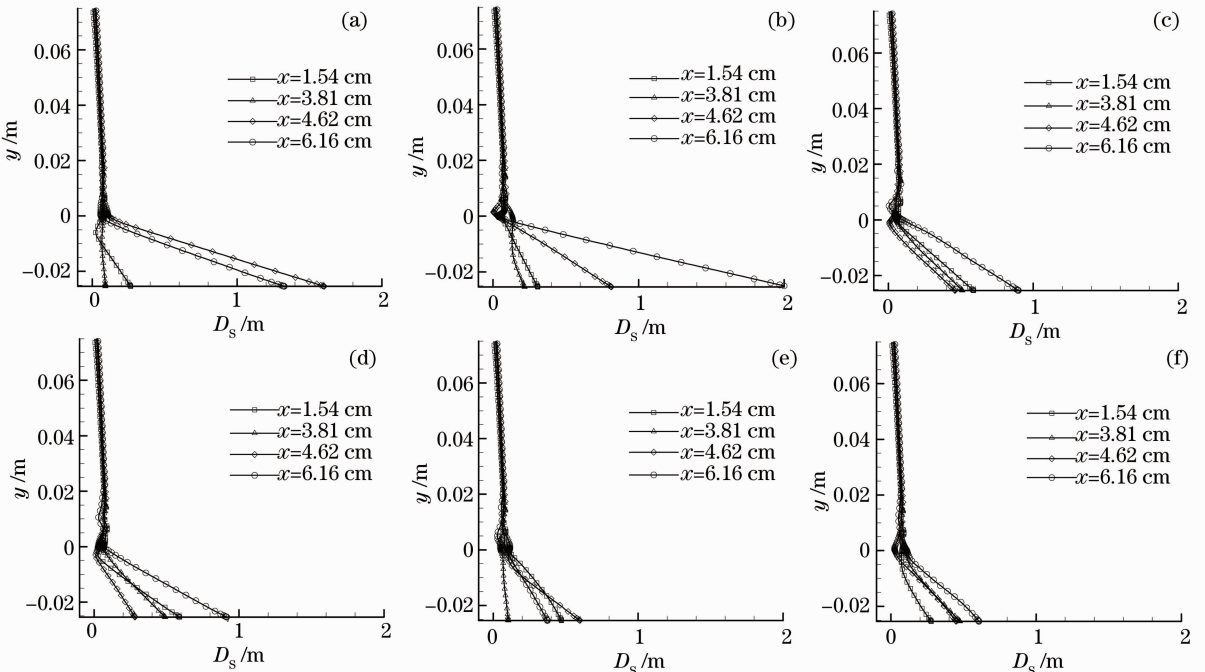


图 9 不同位置处光线穿越流场抖动距离

Fig. 9 Jitter distance of light across the flow field in different locations

畸变波前经过光学成像系统会造成图像的偏移和模糊。此处,本文考察了平面光波从计算域上表面法向穿过 Settles 凹腔流场( $0 < x < 6.19$  cm 区域),到达凹腔底部壁面后的光程差(OPD)分布。

由图 10 结果可知,平面光波穿越 Settles 凹腔

流场后,出射光的光程差  $D_{op}$  分布紊乱,波面畸变严重,呈三维特性分布,这是由于 Settles 凹腔内的湍流流场存在很多三维小尺度结构,这些小尺度结构空间分布的不均匀性最终导致了波面光程差紊乱,严重影响了光学传输性能。

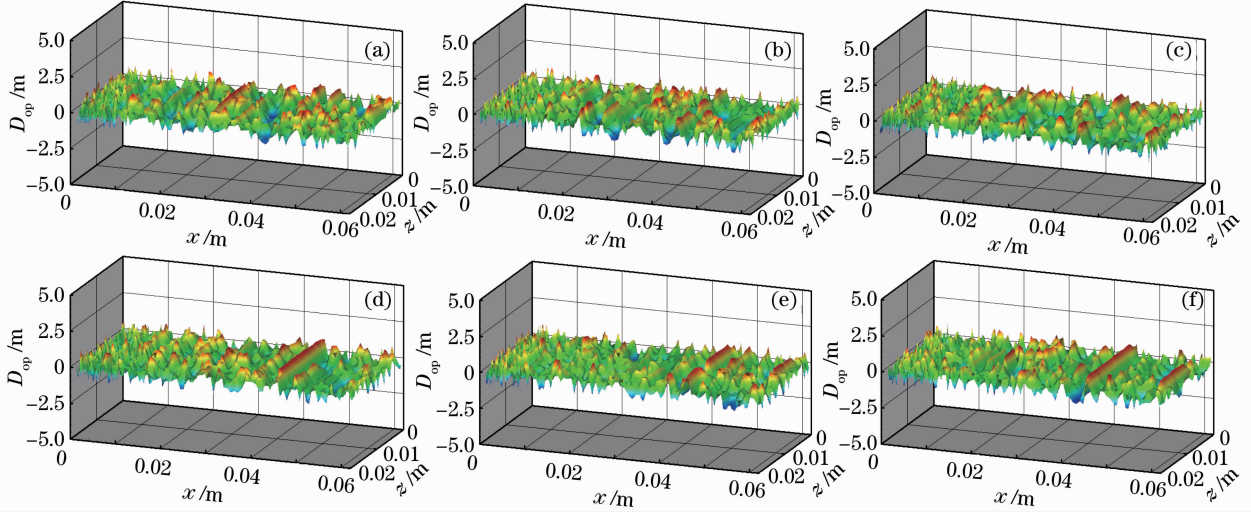


图 10 平面光波穿越 Settles 凹腔流场后光程差分布

Fig. 10 OPD distribution of plane waves throughout the Settles cavity's flow field

#### 5.4 光强斯特雷尔比

在有像差情况下的高斯像点处的光强与无像差存在时的高斯像点光强之比,称为光强斯特雷尔(Strehl)比。Settles 凹腔复杂流场的存在,将会影响光强 Strehl 比。沿流向选择不同的站点位置,并以此站点位置为光瞳中心,考察该光瞳所包含光线从流场法向的经过流场后的 Strehl 比,该光瞳口径取 20 mm,取波长  $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$ ,计算得到沿流向不同位置,光线经过流场后的 Strehl 比,如图 11 所示。由图可知,由于凹腔流场的影响,使得光线经过凹腔流场后的 Strehl 比降到了 0.2~0.3 之间,而且

Strehl 比的值随空间和时间不同,这再次说明凹腔剪切层流动对光传输的影响是显著的,明显降低了光强,将会降低图像成像质量。

## 6 结 论

综合运用 LES/RANS 混合模拟方法、并行计算技术、自适应光线追迹方法,模拟了 Settles 凹腔超声速三维流动,其流动统计平均特性与实验结果吻合;在此基础上研究了 Settles 凹腔流动引起的光学传输效应,给出了凹腔流动的剪切层结构引起光线抖动、波面畸变和光强 Strehl 比值的降低和抖动。结果表明光线抖动,凹腔流动的剪切层结构将导致严重的波面畸变,明显降低光强 Strehl 比,严重影响光学传输性能。

为了降低光学窗口剪切层对光学传输的影响,可以采取多种方法,如优化窗口形状,以改善流场剪切层结构,或者采用自适应光学方法修正剪切层引起的光学传输效应等等,这些方法都是有效途径,也是目前研究的重点和热点。

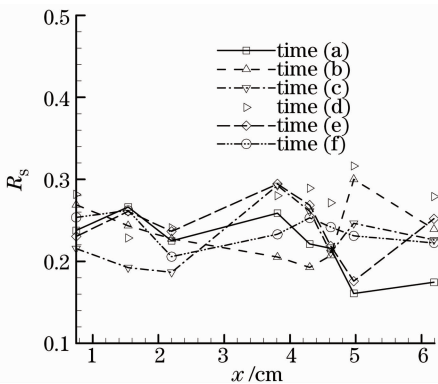


图 11 沿流向不同位置 Strehl 比

Fig. 11 Strehl ratio of different locations along the flow on the cavity bottom

## 参 考 文 献

- 1 Rodney Clark, Michele Banish, Jay Hammer. Fundamentals of Aero-Optics Phenomena (Invited) [R]. AIAA Paper 94-2545, 1994
- 2 Eric J. Jumper, Edward J. Fitzgerald. Recent advances in aero-

- optics[J]. *Progress in Aerospace*, 2001, **37**(3): 299~339
- 3 Yin Xingliang. Principle of Aero-Optics[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2003  
殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京:中国宇航出版社, 2003
- 4 James Trolinger, David Weber, William Rose. An Aero-optical Test and Diagnostics Simulation Technique[R]. AIAA Paper 2002-0825. 2002
- 5 Yin Xingliang. An engineering method to calculate transmitting effect of aero-optics for hypersonic interceptor[J]. *Engineering Science*, 2006, **8**(11): 74~79  
殷兴良. 高速飞行器气动光学传输效应的工程计算方法[J]. 中国工程科学, 2006, **8**(11): 74~79
- 6 Chen Yong, Jin Gang. Optics aberrations aroused by moving vorticity pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(11): 1796~1800  
陈 勇, 金 钢. 运动涡旋脉冲引起的光学畸变[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(11): 1796~1800
- 7 Shi Ketian, Ma Handong. Study on aero-optics of compressible mixture layer[J]. *Computational Physics*, 2010, **27**(1): 66~72  
史可天, 马汉东. 可压缩混合层气动光学效应研究[J]. 计算物理, 2010, **27**(1): 66~72
- 8 C. R. Truman, M. J. Lee. Effects of organized turbulence structures on the phase distortion in a coherent optical beam propagating through a turbulent shear flow [J]. *Physics of Fluids A*, 1990, **2**(5): 851~857
- 9 E. Tromeur, E. Garnier, S. Pagaut *et al.*. Large eddy simulations of aero-optical effects in a turbulent boundary layer [J]. *J. Turbulence*, 2003, **4**(1): 5
- 10 Yang Wenxia, Cai Chao, Ding Mingyue *et al.*. Characterization of aero-optic effects and restoration of aero-optical degraded images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 347~352  
杨文霞, 蔡 超, 丁明跃等. 气动光学效应分析与气动模糊图像复原[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 347~352
- 11 G. S. Settles. An Experimental Study of Compressible Turbulent Boundary Layer Separation [D]. New Jersey: Princeton University, 1975
- 12 G. S. Settles, L. E. Vas, S. M. Bogdonoff. Details of a shock-separated turbulent boundary at a compression corner[J]. *AIAA J.*, 1976, **14**(12): 1709~1715
- 13 C. C. Horstman, G. S. Settles, D. R. Williams *et al.*. A reattaching free shear layer in compressible turbulent flow[J]. *AIAA J.*, 1982, **20**(1): 79~85
- 14 A. Yoshizawa, K. Horiuti. Statistically derived subgrid scale kinetic energy model for large-eddy simulation of turbulent flows [J]. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 1985, **54**(8): 2834~2839
- 15 F. R. Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. *AIAA J.*, 1994, **32**(8): 1598~1605
- 16 T. C. Fan, M. Tian, J. R. Edwards *et al.*. Validation of a Hybrid Reynolds-Averaged /Large Eddy Simulation Method for Simulating Cavity Flameholder Configurations[R]. AIAA Paper 2001-2929. 2001
- 17 S. H. Won, I. S. Jeung, J. Y. Choi. DES Study of Transverse Jet Injection into Supersonic Cross Flows[R]. AIAA paper 2006-1227. 2006
- 18 Sun Mingbo. Studies on Flow Patterns and Flameholding Mechanisms of Cavity Flameholders in Supersonic Flows[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008  
孙明波. 超声速来流稳焰凹腔的流动及火焰稳定机制研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008
- 19 D. M. Sulic. Ray tracing study of whistlers guided by a field-aligned depression of electron density in the magnetosphere[J]. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, **59**(5): 569~590
- 20 Qiao Yafu. Grin Optics[M]. Beijing: Science Press, 1991  
乔亚夫. 梯度折射率光学[M]. 北京:科学出版社, 1991
- 21 Huang Zhanhua, Cheng Hongfei, Cai Huaiyu *et al.*. A study on universal ray tracing algorithm in the medium of variable refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 589~592  
黄战华, 程红飞, 蔡怀宇等. 变折射率介质中光线追迹通用算法的研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(5): 589~592
- 22 D. Nikezic, F. M. F. Ng, C. W. Y. Yip *et al.*. Application of the ray tracing method in studying  $\alpha$  tracks in SSNTDs [J]. *Radiation Measurements*, 2005, **40**(2-6): 375~379
- 23 Krzysztof S. Klimaszewski, Thomas W. Sederberg. Faster ray tracing using adaptive grids[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1997, **17**(1): 42~51
- 24 Zhao Yan, Wang Tao, Xu Dong *et al.*. CFD Grids-based transmission model of the rays propagating through the hypersonic flow field [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, **29**(3): 282~286  
赵 剡, 王 涛, 许 东等. 基于计算流体力学网格的高超声速流场光传输建模研究[J]. 兵工学报, 2008, **29**(3): 282~286
- 25 Wu Lin, Fang Jiancheng, Yang Zhaohua. Study on aero-optical distortion simulation of high refraction index gradient region in hypersonic turbulent flow [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2952~2957  
吴 琳, 房建成, 杨照华. 高超声速湍流场高折射率梯度区域气动光学畸变仿真研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 2952~2957
- 26 Ali Mani, Meng Wang, Parviz Moin. Resolution requirements for aero-optical simulations[J]. *J. Computational Physics*, 2008, **227**(21): 9008~9020
- 27 Chen Cheng, Fei Jindong. Numerical simulation on the optical transmission distortions throughout the laminar flow field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(5): 548~552  
陈 澄, 费锦东. 侧窗头罩高速层流流场光学传输效应数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2005, **34**(5): 548~552
- 28 Yang Wenxia, Cai Chao, Ding Mingyue *et al.*. Numerical analysis of aero-optic effects induced by the turbulence flow field surrounding super/hypersonic[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(1): 88~92  
杨文霞, 蔡 超, 丁明跃等. 超音速/高超音速飞行器湍流流场气动光学效应分析[J]. 光电工程, 2009, **36**(1): 88~92
- 29 Feng Dinghua, Pan Sha, Tian Zhengyu *et al.*. Research on ray tracing method in 3-D discrete space with discretionary refraction index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 696~701  
冯定华, 潘 沙, 田正雨等. 任意折射率的三维离散空间光线追迹方法研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 696~701
- 30 Feng Dinghua, Pan Sha, Tian Zhengyu *et al.*. Method of ray tracing through shock wave flow field[J]. *J. National University of Defense Technology*, 2010, **32**(1): 6~10  
冯定华, 潘 沙, 田正雨等. 含激波流场的光线追迹方法[J]. 国防科技大学学报, 2010, **32**(1): 6~10
- 31 Feng Dinghua, Pan Sha, Wang Wenlong *et al.*. Simulation and analysis of ray tracing in discretionary gradient refraction index medium[J]. *Computer Simulation*, 2010, **27**(2): 135~139  
冯定华, 潘 沙, 王文龙等. 任意梯度折射率介质中光线追迹的仿真与分析[J]. 计算机仿真, 2010, **27**(2): 135~139
- 32 C. C. Horstman, W. C. Rose. Hot-wire anemometry in transonic flow[J]. *AIAA J.*, 1977, **15**: 395~401
- 33 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics[M]. Beijing: World Publishing Corporation, 2001