

文章编号: 0258-1825(2013)04-0462-04

# 针对气动光学效应的 RANS 计算方法研究

闫 溟, 史可天, 马汉东

(中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

**摘要:**针对气动光学效应研究的特殊需求,发展了相应的 RANS 计算方法。首先对常规湍流模型进行评估,选出对平均密度空间分布预测较好的湍流模型;同时发展了光波折射率脉动值的输运方程,用以模拟脉动密度对光学成像的畸变效应。针对一典型光学头罩作为研究对象,运用本文发展的计算方法对光学窗口流场的气动光学效应进行了计算和分析。

**关键词:**气动光学效应;湍流模式;湍流脉动

**中图分类号:**V211.3 **文献标识码:**A

## 0 引言

导弹红外制导的能力水平,不仅与制导光学系统的性能有关,而且还与光学头罩的形状及位置等有关,同时导弹的整体外形,也对光学系统接收到的目标图像的畸变程度有非常大的影响。因为导弹在稠密大气层内高速飞行时,气流对高速导弹产生的气动加热在导弹头部周围将产生高温,导弹头部激波与弹体冷却层之间形成强湍流边界层。当目标的红外光线通过湍流流场时,由于湍流气体密度不均,使流场的折射率发生变化,从而导引头光学系统将接收到畸变的目标图像,这种效应被称为气动光学效应。

在研究气动光学效应时,需要对光学头罩周围流场准确计算来提供基础数据。为了分析计算方便,通常将流场产生的气动光学效应分为两部分来考虑,即平均密度场和脉动密度场产生的光学传输效应。

对于湍流流场,目前工程上最实用的方法是 RANS 方法,通过建立雷诺应力模型,利用时间平均的 N-S 方程求解流场物理量的平均值。John E. P. 和 George W. S.<sup>[7]</sup>利用 RANS 方法计算了一种光学凸窗所产生的气动光学效应,计算选用了  $k-\epsilon$  湍流模型,John 通过光路积分得到平均密度场不均匀造成的波面畸变,并且给出了针对所讨论的凸窗情况最佳的光路入射角度。

但是单纯利用常规湍流模型计算气动光学效应

还有一些不足。因为 RANS 方法采用了雷诺平均,只能给出平均密度场的分布信息,而无法准确给出脉动场的分布信息。

本本文针对气动光学效应研究的特殊需求,发展了相应的 RANS 计算方法,该方法将常规的湍流模型与新发展的光波折射率模型方程相结合,来评估湍流流场中平均密度场和脉动密度场对光学成像的畸变。同时本文还针对一典型光学头罩作为研究对象,运用本文发展的计算方法对光学窗口流场的气动光学效应进行了计算和分析。

## 1 针对气动光学效应 RANS 计算方法

### 1.1 计算方法的总体框架

当光线在湍流边界层这样密度不均匀的流场当中传播时,流体介质的折射率  $n$  随流场密度  $\rho$  变化,二者关系近似满足 Gladstone Dale 公式:

$$n = 1 + \rho K_{GD} \quad (1)$$

其中  $K_{GD}$  是 Gladstone Dale 常数,与光波长度和流体特性有关,对于空气当中传播的可见光,  $K_{GD}$  大约为  $0.000227\text{m}^3/\text{kg}$ 。

由气动光学导致的图像畸变反映的是积分效果,当平面光波沿  $y$  方向穿过某一流场时,光程可由式(2)积分得到:

$$OPL(x, z, t) = \int_{y_1}^{y_2} n(x, y, z, t) dy \quad (2)$$

\* 收稿日期:2012-01-07; 修订日期:2012-03-04

基金项目:科技部 973 计划(2009CB724105)

作者简介:闫 溟(1980-),男,高级工程师,从事空气动力学、湍流、计算流体力学研究。

其中积分总和受到两部分参数的影响,分别为折射率平均值的分布和折射率脉动均方值 $\langle(n')^2\rangle$ 。要构造针对气动光学效应的 RANS 计算方法,可以选择合适的常规湍流模型,同时构造光波折射率脉动方程,通过二者结合得到光波通过湍流流场后的光波畸变情况。

## 1.2 湍流模型的校验

对于研究气动光学效应,计算过程中对湍流模型的需求与气动力计算有所不同,需要对平均密度场的空间分布有准确把握。为此需要先对常规湍流模型进行评估。

本文通过与实验结果对比,来评估各种湍流模型的计算准确程度。为了比较密度场的空间分布,本文比较了光线通过流场后在光屏上呈的干涉条纹图像。选用的对比算例为一复杂构型超声速流场的实验结果<sup>[7]</sup>。该实验是在荷兰 Delft 科技大学航空学院的 TST27 超声速风洞中进行的,实验模型为轴对称外形,如图 1 所示,模型中部为一圆柱体,柱体前段为半球形,后部接半锥角为  $30^\circ$  的圆锥,圆锥的后部又接一段圆柱。来流速度为  $M=3$ ,以模型长度为特征尺度的雷诺数  $6 \times 10^6$ 。本文选用的试验状态为零迎角情况。

图 1 还给出了计算过程中所用的计算网格。由于在零迎角情况下流场结构是轴对称分布,因此控制方程和计算网格都采用柱坐标系下的形式<sup>[10]</sup>。针对于一个子午面,计算网格分布为  $122 \times 151$ 。

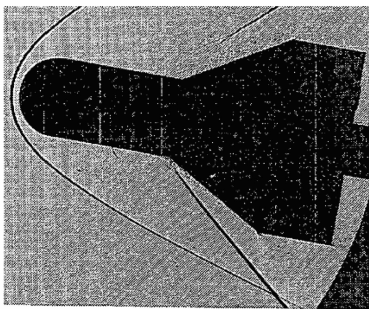


图 1 试验模型及计算网格分布

Fig.1 Test model and computational grid

图 2 给出了各种湍流模型计算结果与实验结果的比较。从图 2(b~d)可以看出,加入不同的湍流模型后,第二道激波与圆锥壁面的距离有明显变化,从而导致激波层内流场的折射率发生变化,光线穿过流场后在相屏上所成的干涉条纹呈现出不同的图案。 $k-\omega$  模型、非线性修正的  $k-\omega$  模型和 SST 模型计算的干涉条纹都可以明显看到第二道激波位置,但标准

$k-\omega$  模型计算的激波位置离壁面较远,与实验结果相差较大,SST 模型计算出的干涉条纹图像与实验最为接近。表明 SST 模型在计算气动光学效应时具有较强的优势。

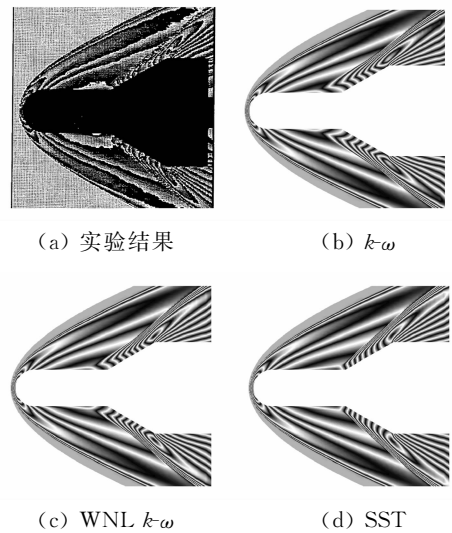


图 2 气动光学效应分析结果比较

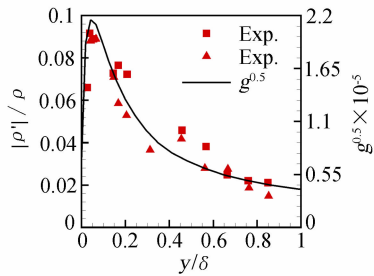
Fig.2 The analyse results of aero-optical effects

## 1.3 光波折射率模型的校验

对于湍流流场中的脉动值,可以再增加一个模型输运方程,用来反映湍流脉动量的特性。为此首先需要选择合适的物理量,对于气动光学效应,脉动量的作用主要通过光波折射率脉动值的均方值 $\langle(n')^2\rangle$ 来反映,所以可定义一个变量  $g = \langle(n')^2\rangle$ ,以下利用输运方程对该变量的分布进行模拟,并利用实验结果对模型方程中的模型参数进行标定。模型输运方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho g)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i g)}{\partial x_i} = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu_i + \mu_t}{\sigma_g} \frac{\partial g}{\partial x_i} \right] + C_{1g} \mu_t \left( \frac{\partial n}{\partial x_i} \right) \left( \frac{\partial n}{\partial x_i} \right) + C_{2g} \rho g \omega \end{aligned} \quad (3)$$

光波折射率与密度具有对应关系,可以利用光波折射率与密度脉动的分布对比来标定模型常数。J. E. Wallace<sup>[8]</sup>的实验结果表明,密度脉动主要集中在壁面附近的强剪切流当中,脉动值沿壁面法向的分布存在一定规律,本文利用 $\langle(n')^2\rangle$ 与密度脉动值的对应关系,调整模型参数,使 $\langle(n')^2\rangle$ 的分布与密度脉动的分布形式相同,在量值上只相差  $K_{GD}^2$ 。最终模型参数分别取值为  $C_{1g} = 2.8, C_{2g} = 1.4, \sigma_g = 0.7$ ,计算结果如图 3 所示。

图3 密度脉动的分布与  $g$  的分布对比图Fig. 3 Comparison of density fluctuation and  $g$  function

## 2 计算结果及分析

下面以文献[9]中的一个光学头罩为研究对象,运用本文发展的计算方法,计算了该头罩的气动光学效应,评估了流场平均值和脉动值对气动光学效应的作用。图4给出了对称面上折射率脉动均方值的分布,可以看到在头罩前端侧缘以及凹腔口的强剪切区域存在较大的折射率脉动值,符合实验测量规律。

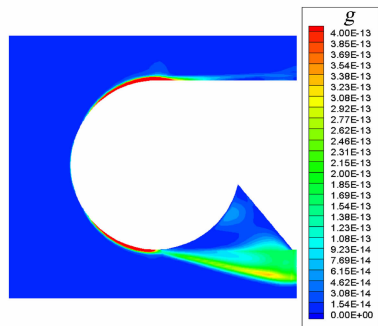
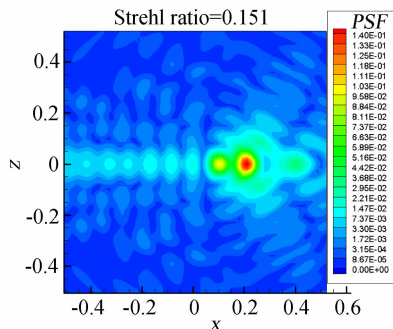


图4 折射率脉动值分布

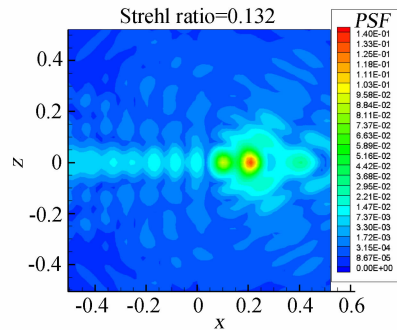
Fig. 4 Distribution of the index-of-refraction fluctuations

观察凹腔正对方向光程差的分布情况,发现由于流场分布的不均匀,密度变化剧烈,导致光线穿过流场所经历的时间有显著差别。

图5给出了远场点光源最终在光屏上所呈的像,分别给出了不考虑流场脉动影响和考虑流场脉动影响的结果,可以看出,考虑了流场脉动信息之后,成像的畸变程度更大,符合实际情况。



(a) 只考虑平均场效应



(b) 同时考虑脉动场效应

图5 远场点光源最终在光屏上所呈的像

Fig. 5 Far-field picture

## 3 结论

本文针对气动光学效应研究的特殊需求,发展了相应的RANS计算方法,该方法将常规的湍流模型与新发展的光波折射率模型方程相结合,来评估湍流流场中平均密度场和脉动密度场对光学成像的畸变,其中利用常规湍流模型来计算平均密度场的气动光学效应,利用光波折射率模型方程来计算脉动场的作用。本文针对一种典型光学头罩作为研究对象,运用本文发展的计算方法,计算了该头罩的气动光学效应。计算结果表明,考虑流场的脉动因素后,成像的畸变程度比不考虑脉动因素更加严重,符合实际规律。

## 参考文献:

- [1] 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [2] 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, 2008, 8(11): 74-79.
- [3] ALI MANI, MENG WANG & PARVIZ MOIN. Computational study of aero-optical distortion by turbulent wake [R]. AIAA 2005-4655.
- [4] YAN TAN, RAMESH AGARWAL, WILLIAM BOW-ER, et al. Flow control of shear layers over 2-D cavities using pulsed jet and aero-optical analysis [R]. AIAA 2004-0428.
- [5] YAN TAN, RAMESH AGARWAL, WILLIAM BOW-ER, et al. Aero-optical analysis of shear layers over 2-D cavities with steady and pulsed blowing and comparisons with experimen-tal data—I [R]. AIAA-2004-2122.
- [6] YAN TAN, RAMESH AGARWAL, WILLIAM BOW-ER, et al. Aero-optical analysis of shear layers over 2-D

- cavities with steady and pulsed blowing and comparisons with experimental data—II[R]. AIAA-2004-2122.
- [7] BAKKER P G, BANNINK W J. Flow visualization study of high supersonic flow past a blunt cylinder-cone flare body[R]. Report LR-765, 1994.
- [8] JOHN E P, GEORGE W S. Aero-optic performance of an aircraft forward-facing optical turret [R]. AIAA-2005-4779.
- [9] WALLACE J E. Hypersonic turbulent boundary layer measurements using an electron beam[R]. CORNELL University Technical Report, No. AN-2112-Y-1, 1968.
- [10] 闫溟, 罗纪生. 超声速流中圆锥头部钝度对边界层稳定性的影响[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(4): 430-434.
- [11] CHRISTOPHER M W, ALEXANDER J S. Comparison of aero-optic distortion in hypersonic and transonic, turbulent boundary layers with gas injection [R]. AIAA-2006-3067.
- [12] CHRISTOPHER M W, ZAIDI S H, RICHARD B M, et al. Measurement of aero-optic distortion in transonic and hypersonic, turbulent boundary layers with gas injection[R]. AIAA-2005-4775.
- [13] MIKE I J, ERICH E B. CFD-based computer simulation of optical turbulence through aircraft flowfields and wakes[R]. AIAA-2001-2798.
- [14] MENTER F R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications [J]. *AIAA J.*, 1994, 32: 1299-1310.
- [15] MENTER F R, RUMSEY L C. Assessment of two-equation turbulence models for transonic flows [R]. AIAA -1994-2343.
- [16] MOORE J G, MOORE J. Realizability in two-equation turbulence models[R]. AIAA-1999-3780.

## A study on RANS computation for aero-optical effects

YAN Ming, SHI Ke-tian, MA Han-dong

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

**Abstract:** A RANS method for aero-optical effects has been developed. An evaluation of compressible flow RANS model has been conducted and a model had been chosen to predict main flow density distribution better. A convect equation had been used to model the refractive index fluctuation. The aero-optical effects over a aero-optical turret is evaluated and analyzed using the method developed in this paper.

**Key words:** aero-optical effects; turbulent model; turbulent fluctuation