

脉动流场光学传输效应仿真

张士杰¹, 李俊山¹, 杨亚威^{1,2}, 陆敬辉³, 李孟¹

(1. 第二炮兵工程大学 信息工程系, 陕西 西安 710025;

2. 中国人民解放军 96215 部队, 广西 柳州 545616; 3. 第二炮兵工程大学 控制工程系, 陕西 西安 710025)

摘要: 针对瞬态脉动流场光学传输效应的实时仿真问题, 提出了基于数字混沌系统的脉动流场成像仿真方法。首先, 依据湍流的三重分解理论, 将脉动流场分解为拟序场和完全随机场; 其次, 通过数字混沌系统产生球涡来模拟拟序场, 使用光线追迹方法得到拟序场的等效相位差; 然后, 使用混沌系统产生完全随机场的等效相位差; 最后, 利用拟序场和完全随机场的等效相位差构建脉动流场的随机相位屏, 采用物理光学方法得到脉动流场的点扩展函数(快照图像); 从而获得短(长)曝光图像序列。仿真实验结果表明: 该方法得到的结果与风洞实验数据相吻合。通过修改相关参数可以方便地仿真不同条件下的湍流场的光学传输效应, 为气动光学效应的测试和校正提供了一种新的方法。

关键词: 气动光学; 湍流; 脉动流场; 拟序结构; 随机场

中图分类号: V211; O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2576-06

Simulation of aero-optic effects induced by fluctuation flow-field

Zhang Shijie¹, Li Junshan¹, Yang Yawei^{1,2}, Lu Jinghui³, Li Meng¹

(1. Department of Information Engineering, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. 96215 Unit of PLA, Liuzhou 545616, China;

3. Department of Control Engineering, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: For the real-time simulation of the aero-optical transmission effect induced by the instantaneous fluctuation flow field, a novel method based on digital chaos was proposed. Firstly, the fluctuation flow field was decomposed into coherent structure field and completely random field according to the triple decomposition theory of turbulence. Secondly, Spheres generated by digital chaos were placed randomly throughout the volume with a chosen size distribution to represent one realization of the coherent structure field, and then the optical path length was calculated for all rays to produce the phase change. After that, the phase change of the completely random field was created by digital chaos. Finally, the random phase screen of the fluctuation flow field was reconstructed with the phase change of the coherent structure field and the completely random field, and physical optics method was adopted to get the corresponding point spread function (snapshot image), and so on to produce a large number of short-term and long-term

收稿日期: 2013-12-05; 修订日期: 2014-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(61075025, 61175120)

作者简介: 张士杰(1981-), 男, 工程师, 博士生, 主要从事气动光学退化效应仿真及退化图像复原方面的研究。

Email: bei_ming_you_yu@sina.com.cn

导师简介: 李俊山(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能图像处理与目标感知识别、网络信息安全、电子对抗模拟与仿真等方面的研究。Email: lijunshan403@163.com

sequence images. The simulation experimental results show that the method is in line with the wind tunnel experiment data. The method can simulate the aero-optical transmission effect under different flow conditions by adjusting the relevant parameters, and provides a new approach to assess and correct the aero-optical effects.

Key words: aero-optics; turbulence; fluctuation flow field; coherent structure; random flow field

0 引言

目前在气动光学效应的工程研究^[1-3]中,广泛应用雷诺平均 N-S 方程配以适当的湍流模型求解高速湍流场。而 RANS 方法所采用的时间平均破坏了湍流场中脉动运动的细节信息,难以描述流场的瞬态结构对光学传输效应的影响。为解决该问题,一些学者提出了脉动流场光学传输效应仿真方法。归纳起来,可分为随机相位屏法^[4-5]和涡结构模型法^[6-7]。

借助“湍流冻结”假设,Kathman 等^[4-5]提出了用随机相位屏模拟“冻结”湍流波前畸变的方法来计算快照的畸变。但是,基于随机相位屏的仿真方法把脉动流场视为各向同性的均匀介质,这种假设条件过于苛刻,所得密度脉动值仍是一段时间内的统计平均值^[8],且无法模拟脉动流场的瞬态涡结构。

为了描述瞬态涡结构对光学传输效应的影响,Trolinger 等^[6]提出了基于湍流球涡模型的仿真方法,通过在流场中随机布置不同尺度和密度的球涡来模拟瞬态涡结构引起的不均匀密度分布。但史可天等^[7]认为该方法仅通过随机均匀分布来确定流场区域内的球涡位置、尺度以及与周围流体的密度差,与真实流场会产生很大差异,据此提出了改进的方法,即根据球涡所在位置处的流场密度脉动均方根值和脉动相关尺度来确定球涡与周围流体的密度差和球涡的直径。但该方法没有考虑湍流尺度对球涡的影响和不同区域(如边界层,混合层等)中涡分布的差异。

目前的脉动流场成像仿真或将流场视为各向同性随机场,或将湍流场视为不同尺度的球涡结构,都忽略了湍流的发展过程。当雷诺数较小时,流场保持层流状态,随着雷诺数的增加,湍流的脉动变得剧烈,大尺度涡引起的脉动越来越明显,而当雷诺数增大到一定程度后,大尺度涡破裂成小尺度涡,涡的分布趋于均匀,湍流运动几乎是完全随机和无规则的。因此,脉动流场成像仿真需要考虑湍流的发展程度

才能准确模拟真实流场情况。

随着对湍流和气动光学机理研究的深入,湍流运动被普遍认为是多尺度有结构的随机过程。基于湍流理论,文中将脉动流场的光学传输效应分解为拟序场成像和完全随机场成像;通过数字混沌系统产生一系列连续的随机相位屏,利用物理光学方法得到连续多幅短(长)曝光图像,来仿真瞬态脉动流场的光学传输效应。

1 基于数字混沌系统的脉动流场成像仿真

湍流是有结构^[9]的多尺度不规则复杂运动,没有普适的湍流模式^[10];“凡是能够充分反映湍流结构和多尺度特性的模式,应当认为是好的模式”^[11]。为了描述和研究湍流中的拟序结构,张兆顺等^[12]提出了湍流的三重分解学说,即把湍流场分解为平均场、拟序场和完全随机场。根据该学说,文中将气动光学效应的计算也相应划分为平均场、拟序场和完全随机场三部分,分别采用不同的方法仿真计算。三重分解模型和 Sutton 等^[13]的二重分解模型的对应关系如图 1 所示。因此,文中所重点讨论的脉动流场光学传输效应仿真分解为拟序场成像仿真和完全随机场成像仿真两个部分。

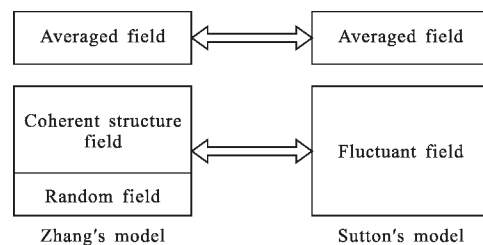


图 1 两种湍流模型比较

Fig.1 Comparison of two turbulence models

1.1 拟序场成像仿真

湍流的拟序结构表现形态为不同尺度的涡,拟序结构成像仿真实质为不同尺度球涡的仿真,该仿真以流场的 CFD 结果为基础。

大涡意味着大的密度梯度, 对应着大的密度变化球涡; 另外, 密度梯度较高区域的球涡应和周围流场具有较大的密度差, 该差值可能是正值也可能为负值。为简化计算, 认为球涡内的密度是均匀的, 定义为:

$$\Delta\rho'_j = (-1)^n k_1 \cdot \Delta\rho \cdot D_j \quad (1)$$

即球涡与周围流场的密度差 $\Delta\rho'_j$ 与球涡的直径 D_j 及涡核处密度脉动的均方根 $\Delta\rho$ 成正比。式中: k_1 为比例系数; $(-1)^n$ 表示密度差值随机地为正或为负, n 为一个随机的正整数。

球涡直径的仿真, 文中结合参考文献[6]和参考文献[7]的方法, 即球涡的直径不仅与本地密度脉动的相关尺度有关, 也与所处区域的流场特征尺度 δ 有关, 定义为:

$$D_j = \min(k_2 \Delta\rho, \delta) \quad (2)$$

公式(2)的定义保证了大的密度脉动对应大的球涡, 同时又不会超过该区域流场的特征尺度。各种球涡直径的概率分布采用参考文献[7]的定义。即

$$P(\Lambda_n) = K \exp(-\Lambda_n/\Lambda_0) \quad (3)$$

式中: K 为归一化系数, 确保 $\sum P(\Lambda_n) = 1$; Λ_0 为与所在区域流场有关的参考球涡直径, 对不同区域的取值亦不同。如:

$$\Lambda_0 = \begin{cases} 0.20\delta, & \text{边界层} \\ 0.40\delta, & \text{剪切层} \end{cases}$$

此外, 在非均匀流动中大尺度涡结构的分布主要集中在流场中较小的区域内。因此, 不同区域球涡的最小直径应有不同的限定, 一般到相应流场区域特征尺度的 1/10~1/100。

视球涡为弱相位物体并忽略光线的衍射和散射, 计算穿过球涡每条光线的光程长可以最终得到等效相位屏。球涡引起的相位改变取决于球涡的直径以及与周围流场的密度差, 光线穿过第 j 个球涡产生的相位差为:

$$\phi_j(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta n_j \sqrt{(D_j/2)^2 - [(x-x_{0,i})^2 + (y-y_{0,j})^2]} = 2kG \cdot \Delta\rho'_j \sqrt{r_j^2 - [(x-x_{0,i})^2 + (y-y_{0,j})^2]} \quad (4)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$ 为波数; G 为 Gladstone-Dale 常数; $(x_{0,i}, y_{0,j})$ 是第 j 个球涡的涡核坐标。

计算所有球涡引起的相位差并求和, 得到拟序场的相位屏:

$$\phi(x, y) = \sum \phi_j(x, y) \quad (5)$$

1.2 完全随机场仿真

根据流场的完全随机成分具有各向均匀、同性的特点, 仍然采用随机相位屏仿真该部分引起的相位变化。由于相位的变化来源于通过流场的光线光程差的脉动, 文中利用数字混沌系统产生一系列连续的随机相位屏。

使用数字混沌产生随机变量 Tc , 假设光线仅正入射到该流场, 斜向入射光线无法进入入瞳, 则光线通过流场产生的光程长(OPL)为:

$$OPL(x, y) = L \cdot n_{\max} \cdot Tc(x, y) \quad (6)$$

式中: L 为脉动流场的特征长度, 与 δ 有关; n_{\max} 为脉动流场中折射率脉动的最大值; $Tc(x, y) \in (-1, 1)$ 为随机变量数组, 坐标 (x, y) 为相位屏位置。

光线通过随机流场的光程差 OPD, 定义为 $OPD(x, y) = OPL(x, y) - \overline{OPL(x, y)}$, $\overline{OPL(x, y)}$ 为光程长的平均值。第 i 条光线通过流场产生的波像差为:

$$w_i(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot OPD_i(x, y) = k \cdot OPD_i(x, y) \quad (7)$$

对应的相位差为:

$$\phi_{r,j}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot w_i(x, y) = k \cdot w_i(x, y) \quad (8)$$

从而可以得到完全随机场的相位屏:

$$\phi(x, y) = \sum \phi_i(x, y) \quad (9)$$

1.3 脉动流场成像仿真

结合拟序场和完全随机场的相位屏, 可以得到脉动流场的相位屏 $\phi(x, y)$:

$$\phi(x, y) = (1-\alpha) \cdot \phi_c(x, y) + \alpha \cdot \phi_r(x, y) \quad (10)$$

式中: $\alpha \in (0, 1)$ 为湍流场特征因子, 描述了湍流发展程度; $\alpha \approx 1$ 对应着完全发展湍流, 大尺度涡破裂成近似各向同性的小尺度涡, 此时脉动流场可视为完全随机场。

一般情况下, 探测器成像都能满足远场近似条件, 假设入射光线为平面波, 则光学成像设备入瞳处的波前可表示为:

$$u(x, y) = P(x, y) \exp\{j\phi(x, y)\} \quad (11)$$

式中: $P(x, y)$ 为瞳函数。

波前 $u(x, y)$ 的傅里叶变换为 $U(k_x, k_y)$, 即

$$U(k_x, k_y) = \mathcal{F}\{u(x, y)\} = \mathcal{F}\{P(x, y) \exp[j\phi(x, y)]\} \quad (12)$$

最终得到的“快照”图像为:

$$PSF(k_x, k_y) = |U(k_x, k_y)|^2 \quad (13)$$

显然, 该值也是脉动流场的点扩展函数。

1.4 基于数字混沌的脉动流场序列图像仿真

一系列随机相位屏(短曝光图像)的叠加并不能产生理想的长曝光图像,这是因为序列图像在时间上是分离的,焦平面强度分布必须是不相关的叠加才能产生正确的结果^[4]。

混沌系统的初始条件极端敏感性使得即使起始值差别很小,迭代一定次数后得到两个完全不相关的序列。这一特性易于产生大量不相关的随机数序列,从而得到不相关的连续短曝光图像和长曝光图像序列。

文中选择的数字混沌系数是三维 Baker 映射,它是一个超混沌系统,用作随机数发生器产生拟序场中球涡的位置、直径、密度差以及完全随机场中的随机变量。补偿后的三维 Baker 映射的方程式^[14]可以简化为:

$$B=B(\varphi(x), \psi(y), \phi(z)) \quad (14)$$

式中: $\varphi(x), \psi(y), \phi(z) \in (0, 1)$ 。选择一个初始条件 (x_0, y_0, z_0) , 每迭代一次就可以输出一组随机数 (x_k, y_k, z_k) 。假设仿真拟序场的区域坐标范围为 $x \in [X_1, X_2], y \in [Y_1, Y_2]$, 则随机变量到坐标的变换关系可以表示为:

$$\begin{cases} x_j = x_k \cdot (X_2 - X_1) + X_1 \\ y_j = y_k \cdot (Y_2 - Y_1) + Y_1 \end{cases} \quad (15)$$

使用同样的方法可以得到球涡的直径和密度。

运行一次 CFD 仅能得到一种场景条件下的气动光学效应结果,而且非常耗时。但结合 CFD 数据,采用计算机仿真可以实时得到多个气动光学场景和一系列的瞬态退化图像。

2 仿真实验与数据分析

为了验证文中方法的有效性,在 MATLAB R2010a 环境下作了仿真实验,实验中的流场数据来源参考文献[15]中的 CFD 结果。文中以二维流场为例讨论脉动流场的成像仿真,结果可以推广到三维情况。

实验中光学系统参数设置如下:侧窗大小为 64 mm×64 mm,光瞳口径为 60 mm,等效焦距 $f=120$ mm,光学系统像面大小设定为 256 pixel×256 pixel,入射波长 $\lambda=9 \mu\text{m}$,光线沿法线方向入射,不考虑光学头罩的影响。

图 2 是使用 CFD 方法得到飞行速度分别为 $Ma=3$ (图 2(a))和 $Ma=5$ (图 2(b))、高度为 10 km、攻角为 0 时导引头周围流场的密度分布示意图。由于 CFD 方法基于雷诺平均法(RANS),得到的流场是一个平均场。文中以该平均场为基础,通过仿真得到对应脉动流场的气动光学效应。

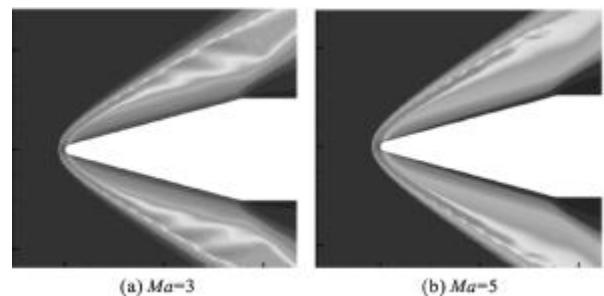


图 2 导引头周围流场密度分布

Fig.2 Density flow-field surrounding seeker

图 3 是 $Ma=3$ (图(a))和 $Ma=5$ (图(b))时仿真得到

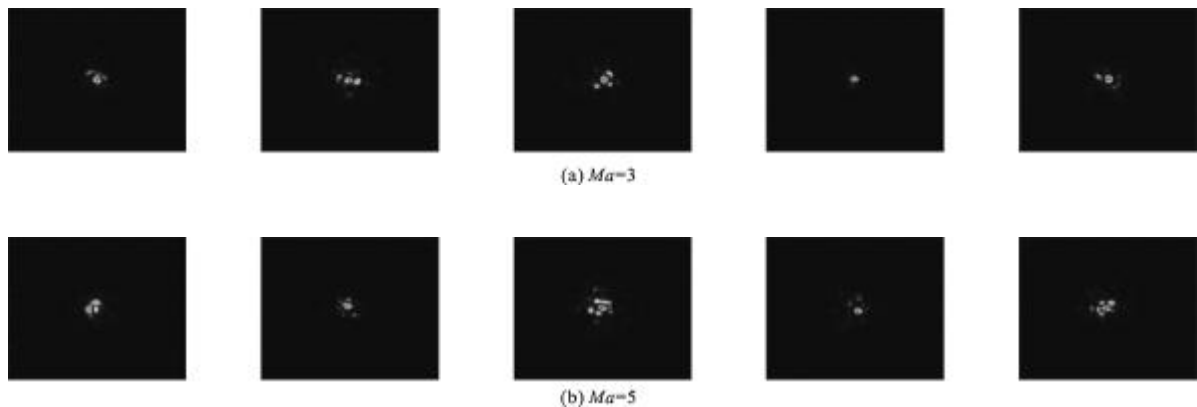


图 3 仿真的 5 帧短曝光点目标图像序列

Fig.3 Simulated short-exposure images of a point source

的连续 5 帧通过脉动流场的点目标短曝光图像,流场特征因子 $\alpha=0.5$ 。

在得到的短曝光图像序列中也观察到了点目标图像分裂现象。针对这一特点,对目标图像分裂个数进行了统计,结果如图 4 所示(图 4(a)、(c)为短曝光,图 4(b)、(d)为长曝光)。

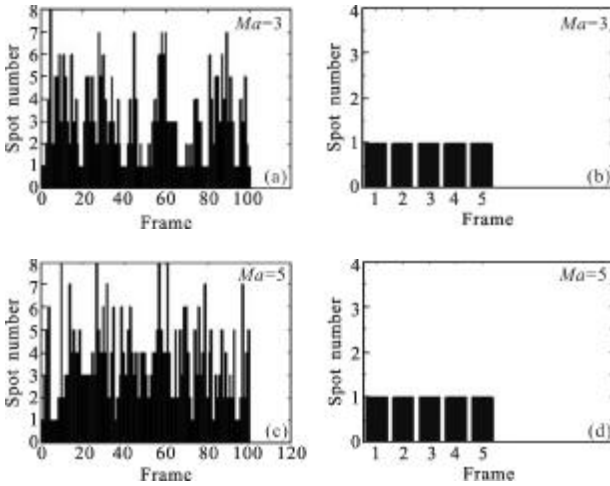


图 4 点目标长、短曝光图像分裂个数比较

Fig.4 Spot number of short-exposure and long-exposure images

从图 4 中可以看到短曝光图像具有明显的分裂现象,但对应的长曝光图像由于是多次短曝光图像的叠加,已看不出图像分裂的明显界限,而呈现出严重的模糊现象。

为了研究短曝光图像质心在不同流场条件下的抖动特性,分别对 $\alpha=0.05$, $\alpha=0.5$ 和 $\alpha=0.95$ 三种不同湍流发展阶段下的短曝光点目标图像质心在像面上的位置(坐标的 x 、 y 分量)进行了统计,结果如表 1 所示。表 1 中的均值 μ_x 、 μ_y 是相对中心点(128, 128)的偏移。

由于气动光学成像偏移主要由平均流场产生,因此脉动流场对像偏移的影响较小,故表 1 中的质心抖动的平均值非常接近像面中心。方差的大小一定程度反映了像抖动的范围和严重程度。从表 1 中可以看到,当 α 较小时,脉动流场中拟序结构占主要,对应的雷诺数相对较小,抖动也相对较弱;随着流场的发展, α 增大,抖动变得更加厉害;但当流场发展到一定程度后,由于大涡减少,小尺度结构的出现削弱了大尺度结构的作用,使得质心的抖动情况有所减弱。这与许东等的风洞实验^[16]结果非常吻合。

表 1 短曝光图像的质心抖动指标

Tab.1 Centroid dithering measure of short-exposure image

Flow condition	Dithering features/pixel					
	Speed	α	μ_x	σ_x	μ_y	σ_y
Ma=3	0.05		1.033 7	0.300 7	1.002 6	0.351 4
	0.5		0.045 5	9.667 2	0.065 9	9.732 0
	0.95		0.745 9	9.460 5	0.251 0	9.558 4
Ma=5	0.05		-0.274 8	5.457 5	-0.004 8	4.981 7
	0.5		0.019 9	9.850 6	0.244 4	10.040 6
	0.95		0.085 0	9.581 1	0.081 2	9.774 7

图 5 为短曝光(图 5(a)、(c))(任取一帧)和长曝光(图 5(b)、(d))图像点扩展函数。积分时间越长,湍流对传输的影响趋于各向同性,点扩展函数趋于平缓,引起的图像模糊程度越严重。这与风洞实验结果是一致的。

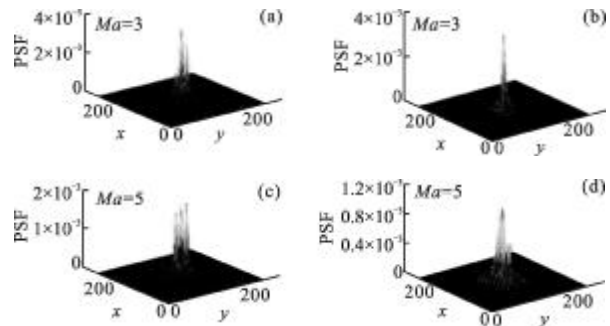


图 5 短曝光和长曝光点扩展函数比较

Fig.5 Comparison of short-exposure and long-exposure PSF

为研究飞行条件对点扩展函数的影响,文中以长曝光点扩展函数为例,分别统计了 $Ma=3$ 时和 $Ma=5$ 时的长曝光点扩展函数在 1/2 最大值处截面面积的平均值和方差。结果如表 2 所示。

表 2 长曝光点扩展函数 1/2 最大值处截面面积
Tab.2 Area of section at 1/2 maxima of long-exposure PSF

Speed	Area/pixel×pixel	
	Mean value	Stand error
Ma=3	50.25	3.767 9
Ma=5	75.15	4.852 1

从表 2 中可以看到,相同高度下,随着飞行速度的增加,长曝光点扩展函数 1/2 最大值处截面面积增加,即模糊核的尺寸增加,此时光学系统得到的目标图像更加模糊。这也符合气动光学效应的一般结论。

3 结 论

文中根据湍流场的三重分解学说,将脉动流场的光学传输效应分解为拟序场成像和完全随机场成像。仿真实验中使用数字混沌系统作为随机数发生器,得到了通过脉动流场的点目标短曝光和长曝光图像序列。所得结果与风洞实验结论吻合,验证了文中仿真算法的有效性。文中方法可以构建模拟气动光学效应的随机相位屏,进而可以得到一系列瞬态气动光学效应退化图像,这就为评估气动光学效应和研究气动光学效应退化图像的复原校正算法提供了一种新的思路和方法。

参考文献:

- [1] Yin Xingliang. Principle of Aero-optics [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2003. (in Chinese)
殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [2] Fei Jindong. Study on aero-optical effect technology for high speed missile infrared image guide [J]. Infrared and laser Engineering, 1998, 27(1): 42-44. (in Chinese)
费锦东. 高速导弹红外成像末制导对气动光学效应技术研究的需求[J]. 红外与激光工程, 1998, 27(1): 42-44.
- [3] Stanislav G, Jumper E, Hayden T E. Aero-optical effects of supersonic boundary layers[J]. AIAA Journal, 2012, 50(3): 682-690.
- [4] Kathman A D, Brooks L C, Kalin D A, et al. A time-integrated image model for aero-optic analysis[R]. 1992, AIAA-92-2793.
- [5] Clark R, Johnson E, Hammer J, et al. An investigation of phase reconstruction methods for use with aero-optic measurements[R]. AIAA-95-1982, 1995.
- [6] Trolinger J D, Rose W C. Technique for simulating and evaluating aero-optical effects in optical systems[R]. AIAA-2005-4654, 2005.
- [7] Shi Ketian, Ma Handong. Prediction of aero-optical effects in turbulence based on the sphere vortex model [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1401-1404. (in Chinese)
史可天, 马汉东. 基于球涡模型的湍流气动光学效应预测方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1401-1404.
- [8] Fang Jiancheng, Yang Zhaohua, Wu Lin. Aero optical propagation effects based on vortex structures [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S): 372-379. (in Chinese)
房建成, 杨照华, 吴琳. 基于涡结构的气动光学传输效应研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 372-379.
- [9] Wang D P, Xia Z X, Zhao Y X, et al. Vortical structures of supersonic flow over a delta-wing on a flat plate [J]. Appl Phys Lett, 2013, 102(6): 1911-1913.
- [10] Jiang L J, Gavin T, Gao G. A new turbulence model for separated flows [J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2011, 25(8): 427-438.
- [11] Zhang Zhaoshun, Cui Guixiang, Xu Chunxiao. Approaching to turbulence [J]. Mechanics in Engineering, 2002, 24(1): 1-8,17. (in Chinese)
张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 走进湍流[J]. 力学与实践, 2002, 24(1): 1-8, 17.
- [12] Zhang Zhaoshun, Xin Dingding. Present and progress of turbulence research [J]. Mechanics in Engineering, 1988(6): 1-11. (in Chinese)
张兆顺, 忻鼎定. 湍流研究的现状和进展[J]. 力学与实践, 1988(6): 1-11.
- [13] Sutton G W, Pond J E, Snow R, et al. Hypersonic interceptor aero-optics performance predictions[J]. Journal of Space and Rockets, 1994, 31(4): 592-599.
- [14] Zhang Shijie. Research on digital chaos and application in information security [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2006. (in Chinese)
张士杰. 数字混沌研究及其在信息安全领域中的应用[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006.
- [15] Zhang Shijie, Li Junshan, Sun Lihui, et al. Aero-optical imaging deviation under the small-incidence-angle condition [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1-7. (in Chinese)
张士杰, 李俊山, 孙立辉, 等. 小入射角条件下气动光学成像偏移[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1-7.
- [16] Xu Dong, Duan Yue, Chen Kejie. Analysis of the statistical properties of transmission effects in turbulence based on the wind tunnel test images[J]. Aero Weaponry, 2011(6): 54-58. (in Chinese)
许东, 段玥, 陈科杰. 基于风洞测试试验图像的湍流场光传输效应统计特性分析[J]. 航空兵器, 2011(6): 54-58.