

超音速湍流脉动流场气动光学效应分析*

杨文霞^{1,2}, 蔡超¹, 丁明跃¹, 周成平¹

(1 华中科技大学 a. 图像识别与人工智能研究所; b. 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室 武汉 430074)

(2 武汉理工大学 理学院 数学系 武汉 430070)

摘 要:对高超音速飞行器在大气中飞行时所产生的湍流脉动气动光学效应进行了理论分析与计算. 根据 CFD 计算流场时所使用的湍流模型及其控制方程, 推导出流场的折射率脉动方差控制方程. 用统计方法, 求出该脉动流场的系综平均光学传递函数及相位均方差, 从不同角度描述了湍流脉动的气动光学效应. 计算结果表明, 气动光学传输函数的幅度响应函数具有低通特征, 使所获得的图像发生像模糊, 而相位响应函数则导致红外成像相位非线性偏移. 此外, 在相同飞行高度下, 马赫数越高, 图像模糊越严重. 电弧风洞实验结果验证了本文理论分析的正确性.

关键词: 气动光学; 折射率脉动; 湍流; 调制传递函数

中图分类号: 0439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2117-5

0 引言

高超音速/超高音速飞行器在大气中飞行时, 其周围将形成一个剧烈的高速湍流流场. 由于使用 DNS 方法直接求解 N-S 方程对计算机性能要求太高, 工程上通常使用雷诺平均法, 即通过建立雷诺应力模型, 引入不同的湍流模型, 来实现流场的 CFD 求解, 得到的流场参量是各瞬态参量的 Favre 平均值^[1]. 在研究超音速/高超音速飞行器的气动光学效应时, 将该湍流流场分解成一个时间平均流场加上脉动流场, 分别计算它们对红外成像的影响^[2-3]. 对于平均流场的气动光学效应, 国内外学者提出了很多计算方法^[4-6]; 而对于湍流脉动对成像的影响, 国内的研究尚少. 文献[7]对国外高超音速导弹气动光学效应研究方法 & 传递函数的计算进行了介绍, 但没有具体实现.

文献[8]在 CFD 基础上得到了飞行器周围的激波流场的各参量分布, 并用传递函数表示平流流场的气动光学效应. 本文提出了一种计算超音速/高超音速飞行器湍流脉动流场的气动光学效应的分析方法, 来获得脉动流场的系综平均光学传递函数及相位均方差, 并利用风洞实验数据对研究进行了有效性验证.

1 折射率脉动的求解

气动光学效应的产生, 其本质是光在非均匀随机变折射率流场中传播产生的波前畸变^[9]. 由于瞬时混合大气的折射率和密度之间满足 G-D 线性关

系, 设高速湍流流场的大气折射率其平均值为 \bar{n} , 脉动为 n' , 则有

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

式中 K_{GD} 为 G-D 系数. 又因 $n = 1 + \frac{\mu_1 + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x}$, 故折射率脉动和密度脉动之间的关系为

$$n' = K_{GD} \rho' \quad (2)$$

由于脉动的随机性, 无法得到每一时刻的准确值. 但是脉动具有统计上的稳定特征, 可以用折射率脉动方差来描述.

考虑三维流场, $k-\epsilon$ 模式的输运方程为:

k 方程:

$$\rho u \frac{\partial}{\partial x} + \rho v \frac{\partial}{\partial y} + \rho w \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_1 + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_1 + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_1 + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + C_{1k} \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] - C_{2k} \rho \epsilon \quad (3)$$

ϵ 方程:

$$\rho u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_1 + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_1 + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_1 + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\mu_t} \left[\left(\frac{\partial \mu^2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中, C_{1k} , C_{2k} , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ 为经验常量.

k 方程和 ϵ 方程具有完全相同的形式. 在工程计算中, 常假设对于折射率脉动的均方差 $\langle (n')^2 \rangle$, 可以由湍流动能耗 k 和湍流动能耗散率 ϵ 来计算得到, 且具有和 $k-\epsilon$ 输运方程完全相同的形式^[10]. 于是有:

$$\rho u \frac{\partial \langle (n')^2 \rangle}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \langle (n')^2 \rangle}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \langle (n')^2 \rangle}{\partial z} =$$

对流项

* 航空科学基金(20060112101)资助

Tel: 027-62289693

Email: wenxiayang@163.com

收稿日期: 2008-6-11

修回日期: 2008-07-21

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_t + \mu_t \partial \langle (n')^2 \rangle}{\sigma_g} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_t + \mu_t \partial \langle (n')^2 \rangle}{\sigma_g} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_t + \mu_t \partial \langle (n')^2 \rangle}{\sigma_g} \right] + C_{1g} \mu_t \left[\left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial z} \right)^2 \right] - C_{2g} \frac{\rho \langle (n')^2 \rangle \epsilon}{k} \quad (5)$$

式(5)直接求解比较困难,但可以做一些假设和简化.不考虑化学反应和大气电离等效应,在平衡流场的假设下,式(5)中对流项和扩散项相等^[11],于是乘项和耗散项相等.故有

$$C_{1g} \mu_t \left[\left(\frac{\partial n}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial z} \right)^2 \right] = C_{2g} \frac{\rho \langle (n')^2 \rangle \epsilon}{k} \quad (6)$$

在本文所满足的高雷诺数条件下,湍流粘性为

$$\mu_t = \frac{C_{\mu} \rho k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

代入式(6),有

$$\langle (n')^2 \rangle = \frac{C_{1g} C_{\mu}}{C_{2g}} \cdot \frac{k^3}{\epsilon^2} \cdot \left[\left(\frac{\partial n}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (8)$$

经验常量 C_{1g} , C_{2g} , C_{μ} 取值分别为 2.80, 1.40 和 0.09. $l_c = \sqrt{k^3/\epsilon^2} = k^{3/2}/\epsilon$ 为湍流脉动的相关长度.

2 折射率脉动流场光学传递函数的计算

折射率脉动流场是随机非均匀介质.本文探测器的积分时间远远大于流场起伏的特征时间.在研究其对红外成像的影响时,红外图像可看成是远场光强,可通过对电场的系综平均给出

$$I_R(\theta_x, \theta_y) = \langle uu^* \rangle = \frac{1}{\lambda^2 R^2} \left[\int \int \int u_0(x, y) u(x', y') \times \exp \{ ik [n'(x, y, z) dz - n'(x', y', z') dz'] \} \times \exp [ik \theta_x (x' - x)] \exp [ik \theta_y (y' - y)] dx' dy' dx dy \right] \quad (9)$$

其中,随机介质的影响表现为被积函数中乘项的第二项.由于其随机性,将它的系综平均定义为随机脉动流场的光学传递函数,即

$$\tau_M = \langle \exp \{ ik [\int n'(x, y, z) dz - \int n'(x', y', z') dz'] \} \rangle \quad (10)$$

式(10)直接计算比较困难,可以做进一步假设. Sutton^[12]证明,大多数折射率脉动流场满足高斯分布.对上式做进一步简化后^[12],有

$$\tau_M = \left\{ \frac{1}{2} k^2 \langle [\int n'(x, y, z) dz - \int n'(x', y', z') dz']^2 \rangle \right\} \quad (11)$$

设传输距离为 L ,则在式(11)中,指数中的平方项为 $\int_0^L \int_0^L \langle n'(x, y, z) n'(x, y, z') \rangle dz dz'$,令 $z' = z + \xi$,则式(11)变成

$$\int_0^{L+z} \int_0^L \langle n'(x, y, z) n'(x, y, z+z') \rangle dz dz' \quad (12)$$

交叉积乘项为

$$\int_{0-z}^{Rz+R} \langle n'(x, y, z) n'(x+x', y+y', z+z') \rangle dz dz' \quad (13)$$

令

$$C(x, y, z) = \langle n'(x+x', y+y', z+z'), n'(x', y', z') \rangle \quad (14)$$

式(14)即折射率脉动相关函数.则式(11)化为

$$\tau_M(x, y) = \exp \{ -k^2 [\varphi(0, 0) - \varphi(x, y)] \} \quad (15)$$

式中, k 为波数,

$$\varphi(x, y) = \int_0^{Rz} \int_{-z}^{Rz-z} \langle n'(x', y', z')^2 \rangle C(x, y, z) dz dz' \quad (16)$$

衡量湍流脉动气动光学效应的另一个参量是相位均方差,其计算公式为

$$\sigma_{rms} = \sqrt{2k^2 \int_0^L \langle n' \rangle^2 l_c dz} \quad (17)$$

$T_M(x)$ 和相位方差 σ_{rms}^2 从不同角度描述了湍流流场的气动光学效应.

根据上述分析,在计算得到高超音速飞行器高速湍流场参量,包括流场湍流动能耗 $k(x, y)$ 及湍流动能耗散率 $\epsilon(x, y)$ 后,由式(8)计算得到流场的折射率脉动方差 $\langle (n')^2 \rangle$,并根据式(14), (15)和(16)得到点扩散函数 $\tau_M(x, y)$,经过傅里叶变换得到幅频响应函数和相频响应函数.而相位均方差则根据式(17)得到.

3 仿真结果与实验验证

3.1 脉动流场气动光学效应数值计算

仿真条件为飞行马赫数 5 Hz、飞行高度 10 km, 红外波长 8 μm , 0 攻角的飞行条件下,弹头边界和当地平均密度流场如图 1.

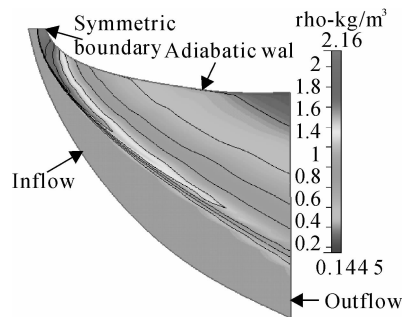


图 1 密度流场(单位: kg/m^3)

Fig. 1 Density flow-field (kg/m^3)

图 2 是折射率脉动方差的计算结果.由于脉动方差的差别很大,为显示方便,对方差值求以 10 为底的对数后显示.由图 2 可以看出,流场的折射率脉动方差显著依赖于平流流场,即越靠近飞行器表面温度越高,折射率脉动越明显.图 3 为折射率相关函数,图 4 是相位均方差.图 5(a)是 5 马赫时点扩散函数的幅频响应.

为测试在相同飞行条件下,飞行马赫数对气动图像模糊所产生的影响,同时计算了在飞行速度为 3 马赫时所对应的点扩散函数幅频响应,如图 5(b).

幅频响应表明,折射率脉动引起的气动光学效应相当于一个低通滤波器,从而导致严重的图像模糊.而在相同的飞行高度下,飞行速度越高,该低通滤波器的截止频率越低,从而引起的图像模糊越严重.图 5(c)为 5 马赫时所对应的相位响应函数,表明点扩散函数具有非线性随机位移特性,使得目标的红外成像发生非线性位置偏移和畸变.这与文献 [13-14]结论一致.

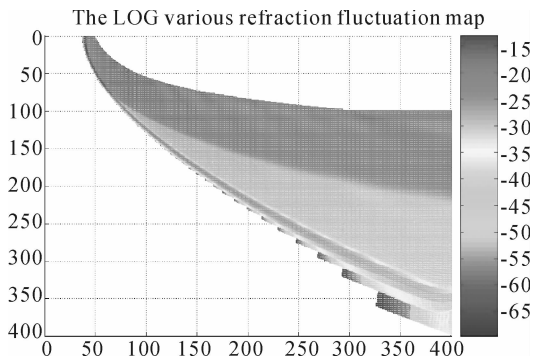


图 2 流场折射率脉动方差
Fig.2 Variance of refraction fluctuation

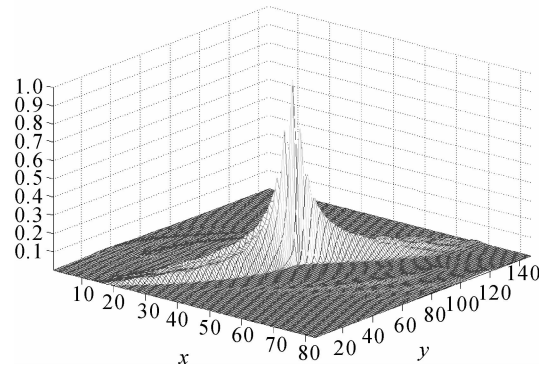


图 3 流场折射率脉动协方差
Fig.3 Covariance of refraction fluctuation

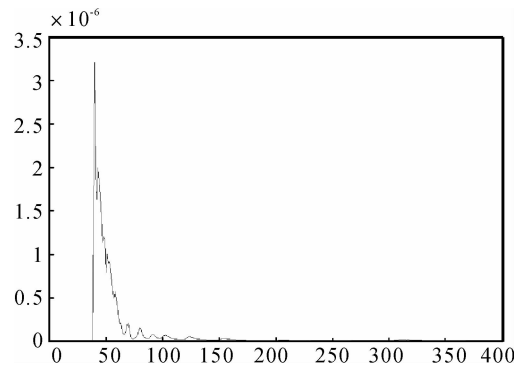
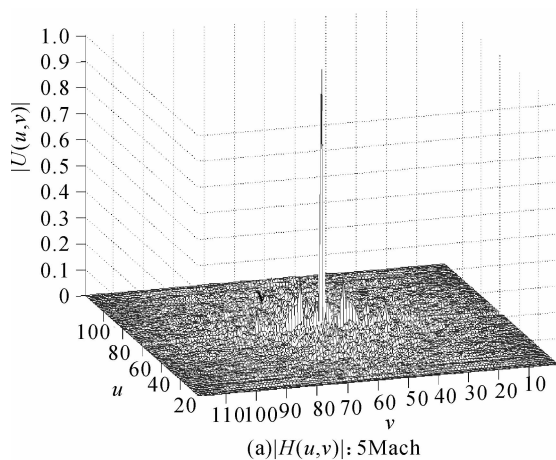
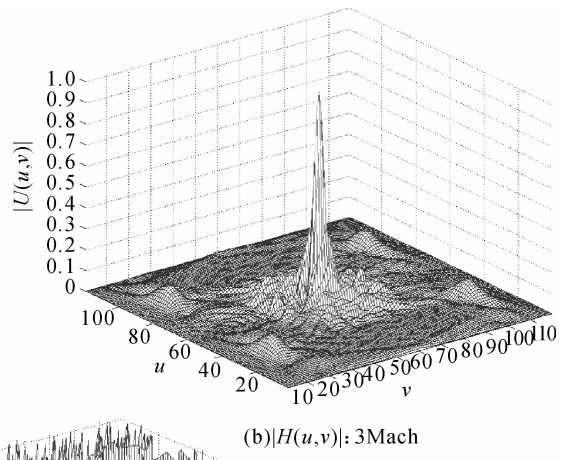


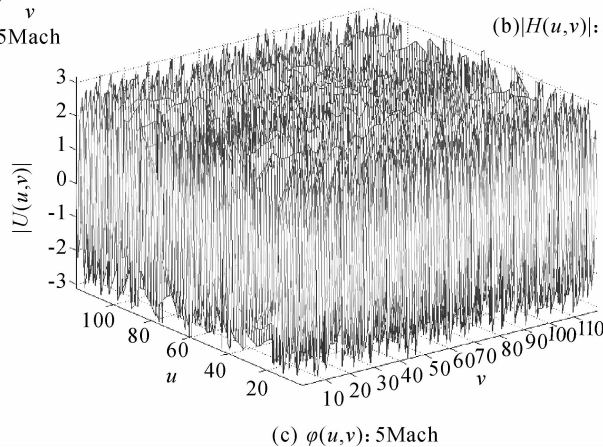
图 4 流场相位均方差
Fig.4 Phase RMS error



(a) $|H(u,v)|$: 5Mach



(b) $|H(u,v)|$: 3Mach



(c) $\varphi(u,v)$: 5Mach

图 5 MTF 的幅频和相频响应函数
Fig.5 The amplitude and phase response of MTF

3.2 气动光学效应光学传递函数有效性的验证

3.2.1 实验设计

风洞实验模拟飞行速度为5马赫、0攻角时的近地飞行(H=10 km)弹道导弹非制冷蓝宝石红外侧窗对常温目标红外辐射的影响. 本试验的原理图如图6.

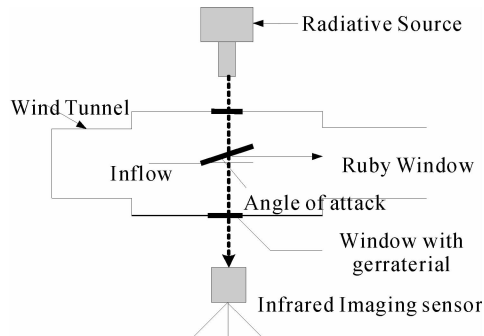


图6 气动光学风洞试验原理

Fig. 6 Setup of the wind-tunnel experiment

图7(a)是吹风前的目标透过常温下蓝宝石镜片的目标图像,图7(b)为吹风稳定阶段,由于气动光学效应得到的模糊图像. 点目标外面的轮廓线为图像分割后的物体目标,详见3.2.3节.



(a)Image before wind distorted image (b)Image after wind (c)Theoretically blurred images

图7 吹风前后图像及理论计算的模糊图像

Fig. 7 Experimental measured and theoretical aero-optically blurred images.

3.2.2 气动光学效应对应的图像退化模型

若平流场及湍流脉动流场的气动光学效应频域传递函数分别表示为 $H_1(u, v)$ 和 $H_2(u, v)$, 其空域表示分别为 $h_1(i, j)$ 和 $h_2(i, j)$, 则由气动光学效应所引起的图像退化模型可表示为

$$g(i, j) = f(i, j) * h_1(i, j) * h_2(i, j) + n(i, j) \quad (18)$$

频域中表示为

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v) + N(u, v) \quad (19)$$

式中 $f(i, j)$ 为原始图像, $g(i, j)$ 为湍流退化图像, $n(i, j)$ 为随机噪音. 综合的气动光学传递函数为

$$H(u, v) = H_1(u, v)H_2(u, v) \quad (20)$$

若已知 $h_1(i, j)$ 和 $h_2(i, j)$, 则可以由吹风前的原始图像 $f(i, j)$ 计算得到模糊退化后图像.

3.2.3 气动光学效应点扩散函数的实验验证

为验证点扩散函数的正确性, 将本文及文献^[8]计算出来的点扩散函数和吹风前的图像作卷积, 得到模糊图像如图7(c). 由于图像的目标和背景比较简单, 对理论图像和实际图像进行基于 OTSU 方法

的图像分割, 阈值灰度为20, 提取目标及其轮廓线, 计算得到的目标周长和直径数据及各目标的最大灰度值如表1所示.

从表1可以看出, 在当前飞行参量下, 实际吹风后的图像面积约扩散为原始图像的4倍, 而理论计算得到的模糊图像和实际采集到的气动模糊图像的周长和直径均很接近. 计算图7(b)和7(c)的相关系数为0.93, 反映了两图的相似程度. 此外, 实验气动模糊图像中心处比理论计算的模糊图像要亮. 这是因为吹风后, 由于气动热使目标温度更高, 从而使红外成像更亮. 以上对实际风洞实验图片的实验结果对比, 验证了由理论计算得到的气动光学点扩散函数的有效性.

表1 吹风前和吹风后模糊图像及理论模糊图像参量统计

参量	周长/pixel	直径/pixel	最大灰度值/gray
7(a)	55	17	223
7(b)	106	32	255
7(c)	118	31	218

4 结论

对飞行器弹头的高速湍流流场的脉动气动光学效应进行了分析与计算, 得到了特定飞行参量下脉动流场的光学传递函数. 结合风洞实验数据, 验证了该研究方法的有效性. 在得到湍流流场的平流流场光学传递函数及湍流流场的光学传递函数后, 对高速飞行器气动光学红外图像进行校正, 可以方便的研究传递函数的图像复原问题.

参考文献

- [1] YIN Xing-liang. Principle of Aero-Optics[M]. Beijing: China Astronautics Press, 2003.
殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [2] Pond J E, Sutton G W. Aero-Optic Performance of an Aircraft Forward-Facing Optical Turret [J]. *Journal of Aircraft*. 2006, **43**(3): 600-607.
- [3] YIN Xing-liang. 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.
- [4] JUMPER E J, Fitzgerald E J. Recent Advances in aero-Optics [J]. *Progress in Aerospace Sciences*. 2001, **37**: 299-339.
- [5] YIN Ke-xin, JIANG Hui-lin, Tong Shou-feng. Computational simulation on aero-optic effects of compressible turbulent Shear-layer Cavity Flow [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 780-784.
- [6] LIU Jian, LI Shu-min, JIN Gang, et al. Influence on Laser Propagation of Aero-craft's outer Fluid Field [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 599-602.
柳建, 李树民, 金刚, 等. 飞行器外流场对光传输的影响[J]. 光子学报. 2006, **35**(4): 599-602.

- [7] HAN Zhi-ping, YIN Xing-liang. Overview of study methods for aero-optic effect of hypersonic missiles[J]. *Modern Defence Technology*, 2003, **31**(3):13-18.
韩志平,殷兴良.高超音速导弹气动光学效应研究方法综述[J].现代防御技术. 2003, **31**(3):13-18.
- [8] YANG Wen-xia, CAI Chao, DING Min-yue, *et al.* Numerical Analysis of Aero-Optic Effects Induced by the Turbulence Field surrounding hypersonic aircrafts [C]. *SPIE*, 2007, **6786**:67865D-1-67865D-8.
- [9] NIU Yan-xiong, ZHANG Peng, YAO Jian-quan, *et al.* Investigation of laser disturbance and damage to satellite-borne photoelectric detecting system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):793-796.
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[J].光子学报. 2004, **33**(7):793-796.
- [10] SMITH R R, TRUMAN C Rn, Prediction of Optical Phase Degradation Using A Turbulent Transport Equation For The Variance of Index-of-refraction Fluctuations[J]. *AIAA-90-0250*:1-13.
- [11] GIERLOFF J J, ROBERTSON S J, BOUSKA D H. Computer Analysis of Aero-Optic Effects[C]. *AIAA SDIO Annual Interceptor Technology Conference*. **1992**:19-21.
- [12] SUTTON G W. Aero-optical Foundations and Applications. *AIAA Journal*, 1985, **23**(10):1525-1537.
- [13] LAWSON S M, CLARK R. L, BANISH M R, *et al.* Wave-Optic Model to Determine Image Quality Through Supersonic Boundary and Mixing Layers[C]. *SPIE*, **1991**:268-278.
- [14] KYRAZIS D T. Optical Degradation by turbulent free shear layers[C]. *SPIE*, **2005**:170-181.

Aero-Optic Effects Induced by the Fluctuation Flowfield Surrounding Hypersonic Aircrafts

YANG Wen-xia^{1,2}, CAI Chao¹, DING Ming-yue¹, ZHOU Cheng-ping¹

(1 *a. Institute of Pattern Recognition and Artificial Intelligence; b. "Image Processing and Intelligence Control"*

Key Laboratory of Education Ministry of China, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2 *Department of Mathematics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430074, China*)

Abstract: Computational analysis was carried out regarding the aero-optical effect induced by the turbulence field surrounding the hyper-speed aircraft. The transport equation of the variance of the index of refraction fluctuations was derived based on the scalar transport governing equations of the turbulence model. The refraction fluctuation variances and the fluctuation's correlation and phase covariance function along the line-of sight were obtained. Using statistical methods, the turbulent modulation transfer function(MTF) and the refraction correlation function induced in the transmission direction for the refraction fluctuation was computed, which characterized the aero-optical effect in different aspects. Experimental results show that the amplitude response of the transmission function of the aero-optical effect can be characterized as a low-pass filter, which results blurring in the obtained image; while its irregular phase response results nonlinear shifts of the target in the image. And, the higher the Mach number, the more severe the distortion in the image. The correctness of the theoretical MTF was evaluated by wind tunnel experiment.

Key words: Aero-optics; Fluctuations of index of refraction; Turbulence; Modulation transfer function



YANG Wen-xia is a Doctor, and her research interests include aero-optics, image restoration and system simulation.