

高速飞行器气动光学传输效应的工程计算方法

殷兴良

(中国航天科工集团公司, 北京 100039)

[摘要] 气动光学传输效应对飞行器光学成像探测系统的性能有着十分重要的影响, 它使探测器接受的图像产生偏移、抖动和模糊。文章分析了目标光线通过流场时的光学传输特性, 建立了流场光学传输特性的工程计算模型, 描述了气动光学传输效应对成像探测系统影响的经验模型。在此基础上, 对气动光学传输效应产生的像偏移、抖动和模糊进行了数值仿真, 仿真结果表明, 气动光学传输效应对成像探测系统的影响与飞行器的飞行参数、成像探测系统参数和探测器积分时间等密切相关。

[关键词] 空气动力学; 湍流; 光学; 气动光学; 光学传输效应

[中图分类号] O43; O35 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)11-0074-06

1 引言

带有成像探测系统的高速飞行器在大气层内高空飞行时, 其周围形成激波、湍流边界层等复杂的流场结构, 当目标的红外光线通过流场时, 由于流场密度变化的非均匀性、随机性, 飞行器的成像探测系统将接收到失真的目标图像, 这种现象称为气动光学传输效应^[1]。

气动光学传输效应主要引起目标图像的像偏移、像模糊和像抖动。像偏移指目标光线穿过流场后在成像探测系统焦平面上成像位置相对于无流场时成像位置的偏差; 像模糊指目标光线穿过流场后产生的成像模糊, 是由平均流场和相对于成像帧积分时间而言密度脉动功率谱处于高频段的湍流产生的, 可用点扩散函数、光学调制传递函数(MTF)或Strehl比来衡量; 像抖动指目标光线穿过流场后成像位置在探测器平面上的运动, 是由相对于成像帧积分时间而言密度脉动功率谱处于低频段的湍流产生的, 可用成像位置的抖动范围、抖动概率分布和抖动频率等作为参数来衡量。

湍流流场计算是定量分析气动光学传输效应的关键。目前在工程中用Navier-Stokes方程描述湍流的运动规律, 该方程在物理上没有解析解, 只能通过离散的方法求解。目前的计算方法主要有三种: 直接数值模拟法(DNS)、大涡模拟方法(LES)和雷诺平均方法(RANS)。直接数值模拟法对N-S方程直接求解湍流各种尺度涡, 从理论上来说, 是求解N-S方程最精确的方法, 能得出湍流真实状态下的瞬时运动规律, 但对于计算机的运算速度和容量要求很高且应用于实际工程的计算理论还不够成熟。大涡模拟方法依据大涡模拟方程对大涡进行求解, 同时通过建立亚格子模型兼顾小涡在流场中的作用, 是湍流模拟中很有发展前景的一种方法, 但该方法同样对计算机硬件要求较高。雷诺平均方法是目前计算能力下的一种实用有效的工程计算方法, 主要是将湍流流场分为平均流场和脉动流场两部分, 利用平均化的N-S方程求解平均流场, 通过建立雷诺应力模型计算脉动流场。

对应于湍流流场的计算思路, 流场光学传输效应计算也分为平均流场光学传输效应和脉动流场光

[收稿日期] 2005-12-20; 修回日期 2006-03-27

[基金项目] 国家安全重大基础研究资助项目(51323)

[作者简介] 殷兴良(1953-), 男, 江苏无锡市人, 中国航天科工集团公司研究员, 博士生导师

学传输效应两部分。前者应用物理光学方法，后者应用统计光学方法来计算。在建立流场光学传输理论之后，可以分析高速流场光学传输效应对高速飞行器导引头信噪比、目标视线角位置以及视线角速率的影响，为高速飞行器红外成像探测制导系统设计提供理论基础。

2 光波在平均流场中的光学传输特性

2.1 平均流场对瞳函数的影响

光线沿传播路径积分，可以得到第 i 条光线光程为

$$OPD_i = \int_{M_0}^M nR_i(s) ds \quad (1)$$

设主光线的光程为 OPD_0 ，则第 i 条光线经过流场介质后产生的波像差为

$$w(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda}(OPD_i - OPD_0) \quad (2)$$

通过计算出光瞳上每条光线的光程差，就可以得到整个出瞳的波像差，因而出射波面为

$$A(x, y) = a(x, y)e^{j\frac{2\pi}{\lambda}w(x, y)} \quad (3)$$

式中 $A(x, y)$ 称为系统的瞳函数； $a(x, y)$ 为波面的振幅分布； $e^{j\frac{2\pi}{\lambda}w(x, y)}$ 为波面的相位分布。

2.2 平均流场光学传输特性^[2,3]

飞行器光学成像探测制导系统对目标的成像一般满足远场近似条件，根据惠更斯原理，瞳函数为 $A(x, y)$ 的波面在像面上形成的振幅分布为：

$$U(x', y') = \iint A(x, y)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(xx' + yy')} dx dy \quad (4)$$

式中各符号的意义和坐标关系如图 1 所示。由式 (4) 知，像面的振幅分布为瞳函数的傅里叶变换。因光强正比于振幅的二次方，所以点扩散函数为

$$PSF_M(x', y') = |U(x', y')|^2 = U(x', y') \cdot U^*(x', y') \quad (5)$$

对点扩散函数进行傅里叶变换，可得到流场的光学传递函数，即

$$OTF(K_x, K_y) = \iint PSF(x', y')e^{-j2\pi(K_x x' + K_y y')} dx' dy' \quad (6)$$

式中 K_x, K_y 为像面空间频率。

平均流场除了产生像模糊之外还产生像偏移，既可以用目标光线穿过流场在成像探测光学系统焦面上的成像位置相对于无流场时目标在焦面上的成像位置的线偏差来衡量，也可以应用该线偏差相对

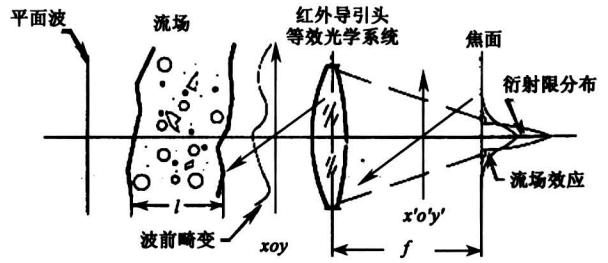


图 1 流场与光学系统成像关系

Fig.1 Fluid vs optic imaging system

于焦距产生的角偏差来衡量。将目标光线穿过流场在成像探测光学系统焦面上成像的点扩散函数分布记为 $PSF_M(x', y')$ ，若对 $PSF_M(x', y')$ 取最大值，并设最大值 PSF_{Mmax} 对应的坐标为 (x'_{max}, y'_{max}) ，则由平均流场引起的像偏移：

像偏移线偏差 x'_{max}, y'_{max} ；

像偏移角偏差

$$\delta_x = \frac{x'_{max}}{f}, \quad \delta_y = \frac{y'_{max}}{f} \quad (7)$$

3 光波在脉动流场中的光学传输特性

3.1 湍流折射率脉动功率谱^[4,5]

由光波传输理论分析可知，波动光学理论仍然适用于湍流流场的光学传输效应分析，由湍流流场脉动变化而形成的随机相位屏具有如下特性：

1) 湍流密度脉动引起的折射率脉动方差为

$$\Delta \bar{n}^2(x, y, z) = K_{GD}^2 \Delta \bar{\rho}^2(x, y, z),$$

$$n(x, y, z) = n_0 + K_{GD} \rho(x, y, z) \quad (8)$$

式中 $n(x, y, z)$ 为湍流折射率； $\rho(x, y, z)$ 为湍流密度； K_{GD} 为 Gladstone - Dale 系数，由折射率脉动构成的随机相位屏厚度与湍流流场湍流区的厚度相当。

2) 折射率脉动具有空间相关性，相关模型为 von Kármán 模型、指数模型和高斯模型。

3) 折射率脉动具有时间相关性，它是“冻结”状态下随机相位屏的横向移动，移动速度与湍流流动的平均速度相关。

根据这些特性，可以分析湍流脉动引起的沿成像探测系统视线方向 (LOS) 的折射率脉动协方差函数。对于湍流引起的随机折射率场，引入折射率脉动协方差函数为

$$\Gamma_n = \langle \Delta n(P_i, z_j) \Delta n(P_k, z_l) \rangle,$$

$$P_i = (x_i, y_i), \quad i, j, k, l = 1, 2 \quad (9)$$

若光束通过湍流的整个区域长度为 L , 则光程差脉动协方差为

$$\Phi(x, y) = \int_0^L \int_0^L \Gamma_n(x, y, z) dz_1 dz_2 \quad (10)$$

定义折射率脉动相关函数 $\text{cov}_n(x, y, z)$ 为^[6]

$$\text{cov}_n(x, y, z) = \frac{\langle n(x, x', y + y', z + z') n(x, y, z) \rangle}{\langle n(x, y, z)^2 \rangle} \quad (11)$$

通过一系列运算可得

$$\Phi(x, y) = \int_0^L \int_{-z}^{L-z} K_{\text{GD}}^2 \Delta \rho^2(x, y, z) \cdot \text{cov}_\rho(x, y, z') dz' dz \quad (12)$$

平面波穿过湍流介质引起的相位脉动协方差函数

$$C_\phi(x, y) = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \Phi(x, y) \quad (13)$$

进行傅里叶变换可得出相位脉动功率谱

$$F_\phi(K_x, K_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C_\phi(x, y) \cdot \exp[-j2\pi(K_x x + K_y y)] dx dy \quad (14)$$

相位脉动功率谱可分为低频部分和高频部分, 即

$$F_\phi(K_x, K_y) = F_{\phi_l}(K_x, K_y) + F_{\phi_h}(K_x, K_y) \quad (15)$$

其中, $F_{\phi_l}(K_x, K_y)$ 为低频部分, 产生图像抖动; $F_{\phi_h}(K_x, K_y)$ 为高频部分, 产生图像模糊。

进一步可以计算出流场相位脉动相关尺度为

$$l_\phi = \frac{1}{\sigma_\phi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C_\phi(x, y) dx dy \quad (16)$$

$$\sigma_\phi^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \Phi(0, 0) \quad (17)$$

工程上一般应用内时间尺度、瞬态空间截止频率 k_{FZ} 和外时间尺度等参数来描述湍流随机相位屏的特性。对于采用凝视焦平面阵列红外成像技术的探测系统, 其帧积分时间一般不小于内时间尺度。通常分两种情况讨论湍流光学传输特性: 当探测系统成像的帧积分时间 τ 大于外时间尺度时, 导引头成像相对于湍流流场为长曝光成像; 当探测系统成像的帧积分时间 τ 大于内时间尺度小于外时间尺度时, 导引头成像相对于湍流流场为短曝光成像。

3.2 脉动流场的光学传输效应

3.2.1 脉动流场的长曝光成像 设目标光线通过湍流后到达光瞳处波前构成的瞳函数为 $A(x, y)$, 在不考虑衍射时, 脉动流场的光学传递函数为

$$H(K_x, K_y) =$$

$$\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(x, y) A^*(x - \lambda f K_x, y - \lambda f K_y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |A(x, y)|^2 dx dy} \quad (18)$$

式中 x, y 为光瞳实际坐标; f 为光学系统焦距。

由于 $A(x, y)$ 为随机变量, 于是脉动流场的系综平均为

$$\langle H(K_x, K_y) \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \langle A(x, y) A^*(x - \lambda f K_x, y - \lambda f K_y) \rangle dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \langle |A(x, y)|^2 \rangle dx dy} \quad (19)$$

从而有

$$\langle H(K_x, K_y) \rangle = \frac{\Gamma_A(\lambda f K_x, \lambda f K_y)}{\Gamma_A(0, 0)} \quad (20)$$

$$\Gamma_A(x_0, y_0) =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \langle A(x, y) A^*(x - x_0, y - y_0) \rangle dx dy。$$

脉动流场可以看成是一个随机相位屏, 因而有

$$A(x, y) = \exp[j\varphi(x, y)] \quad (21)$$

其中 $\varphi(x, y)$ 为由脉动流场变化引起的相位脉动, 显然此时有 $\Gamma_A(0, 0) = 1$, 从而可写为

$$\langle H(K_x, K_y) \rangle = \Gamma_A(\lambda f K_x, \lambda f K_y) =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \langle \exp[j\varphi(x, y) - j\varphi(x - \lambda f K_x, y - \lambda f K_y)] \rangle dx dy。$$

经过系列运算和分析, 可以得出脉动流场光学传递函数为

$$\text{OTF}_{\text{LTurb}} = \langle H(K_x, K_y) \rangle = \exp\left\{-\frac{1}{2} D_\phi(\lambda f K_x, \lambda f K_y)\right\} \quad (22)$$

式中 D_ϕ 为相位脉动的方差, 在脉动流场为广义平稳的前提下, 可得

$$D_\phi(\lambda f K_x, \lambda f K_y) = 2\sigma_\phi^2 \left[1 - \frac{\Gamma_\phi(\lambda f K_x, \lambda f K_y)}{\Gamma_\phi(0, 0)} \right] \quad (23)$$

变换整理得

$$\langle H(K_x, K_y) \rangle = \exp[C_\phi(\lambda f K_x, \lambda f K_y) - C_\phi(0, 0)] \quad (24)$$

故长曝光时间条件下脉动流场的点扩散函数为

$$\text{PSF}_{\text{LTurb}}(x, y) = F^{-1}[\langle H(K_x, K_y) \rangle] \quad (25)$$

3.2.2 脉动流场的短曝光成像 光学成像探测系统帧积分时间一般为微秒、毫秒量级, 当功率谱分量的频率 $\geq k_{\text{FZ}}$ 时, 在探测器积分时间内引起成像

模糊；当功率频率分量对应的频率 $< k_{FZ}$ 时，在探测器积分时间内引起成像抖动，因而瞬态高通滤波器可设计成

$$\Pi(K_x, K_y) = \begin{cases} 1, & \sqrt{K_x^2 + K_y^2} \geq k_{FZ} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

应用 $\Pi(K_x, K_y)$ 对相位脉动功率谱 $F_\Phi(K_x, K_y)$ 进行滤波，可得

$$F_{\Phi B}(K_x, K_y) = F_\Phi(K_x, K_y)\Pi(K_x, K_y),$$

$$F_{\Phi J}(K_x, K_y) = F_\Phi(K_x, K_y)[1 - \Pi(K_x, K_y)] \quad (27)$$

1) 脉动流场短曝光时模糊分量计算。 $F_{\Phi B}(K_x, K_y)$ 是脉动流场在探测器短曝光时模糊分量的主要贡献者，其对应的相位脉动相关函数为

$$C_{\Phi B}(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F_{\Phi B}(K_x, K_y) e^{j2\pi(K_x x + K_y y)} dK_x dK_y \quad (28)$$

从而得模糊分量数学期望对应的光学传递函数为 $\langle H_{SB}(K_x, K_y) \rangle = \exp[C_{\Phi B}(\lambda f K_x, \lambda f K_y) - C_{\Phi B}(0, 0)]$

模糊分量数学期望对应的点扩散函数为 $PSF_{SB}(x, y) = F^{-1}[\langle H_{SB}(K_x, K_y) \rangle]$

2) 脉动流场短曝光时抖动分量计算。抖动特性由 $F_{\Phi J}(K_x, K_y)$ 决定，对 $F_{\Phi J}(K_x, K_y)$ 进行傅里叶变换，可得引起图像抖动的脉动流场随机相位脉动的相关函数：

$$C_{\Phi J}(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F_{\Phi J}(K_x, K_y) e^{j2\pi(K_x x + K_y y)} dK_x dK_y \quad (31)$$

从而引起图像抖动的频谱特性为： $J(K_x, K_y) = \exp[C_{\Phi J}(\lambda f K_x, \lambda f K_y) - C_{\Phi J}(0, 0)]$

于是抖动的分布规律（其中 x_1, y_1 为像平面坐标）为

$$P_J(x_1, y_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J(K_x, K_y) e^{j2\pi(K_x x_1 + K_y y_1)} dK_x dK_y \quad (33)$$

针对高速飞行器成像探测工程应用中要解决的气动光学问题，可以根据抖动的分布规律，确定由脉动流场引起图像抖动的范围和落入每个子区间的概率。设成像探测光学系统空间角分辨率为 α ，焦距为 f ，取焦平面上的采样间隔为 $\Delta x, \Delta y$ ，且

$$\Delta x = \Delta y = \frac{1}{10} \alpha f \quad (34)$$

取 $P_J(x_1, y_1)$ 的最大值为 P_{Jmax} ，设 x_1, y_1 的取值范围 σ 满足

$$\frac{P_J(x_1, y_1)}{P_{Jmax}} \geq 0.16 \quad (35)$$

则由 x_1, y_1 构成的取值范围 σ 称为脉动流场引起的像抖动的范围。用 $\Delta x, \Delta y$ 间隔细分 σ ，细分的各子区间的坐标定义如图 2 所示，从而得到落入第 i, j 子区间的概率为

$$P'_J(i, j) = \frac{P_J(i\Delta x, j\Delta y)}{\iint_{\sigma} P_J(x_1, y_1) dx_1 dy_1} \quad (36)$$

因而可将光学成像探测系统一帧时间对目标成像看作其在帧积分时间 τ 内等效“冻结”状态下所得到的 PSF 以 $P'_J(i, j)$ 概率在 σ 区间内落入 N 次的叠加，且

$$N = \frac{\tau}{\tau_{in}} \quad (37)$$

落入点的坐标值 i, j 的实现为 i_k, j_k ，且其取值在 σ 区间内遵从高斯分布规律。按 $P(i), P(j)$ 随机分布得到两个序列 $i_k, j_k (k = 1, 2, \dots)$ 。随着 k 的增加，落入 i, j 子区间的次数不大于 $P'_J(i, j)$ 时，落入有效，记作 $\delta_n(i\Delta x, j\Delta y) (n = 1, 2, \dots, N)$ ，则脉动流场抖动分量为

$$PSF_J(x_1, y_1) = \sum_{n=1}^N \delta_n(i\Delta x, j\Delta y) \quad (38)$$

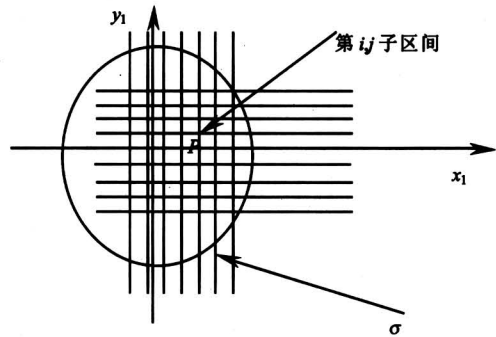


图 2 细分各子区间的坐标定义

Fig.2 Coordination define for dividing into sub-zone

3.2.3 脉动流场的光学传输特性 脉动流场光学传输特性由其带来的模糊分量和抖动分量共同构成，从而在一次积分时间内脉动流场对点目标能量积分产生的分布为

$$PSF_{Sturb} = PSF_{SB} \cdot PSF_J = PSF_{SB} \cdot \sum_{n=1}^N \delta_n(i\Delta x, j\Delta y) \quad (39)$$

对 PSF_{Sturb} 进行变换归一化后，即可得到一次曝光的脉动流场光学传输特性为

$$\text{OTF} = F^{-1}\{\text{PSF}_{\text{STurb}}\} \quad (40)$$

根据上述分析, 高速流场光学传输效应是平均流场和脉动流场产生的光学传输效应的总和。考虑到孔径衍射的存在, 成像探测系统长曝光情况下的点扩散函数为

$$\text{PSF}_{\text{SUM}}(x_1, y_1) = \text{PSF}_{\text{D}}(x_1, y_1) \cdot \text{PSF}_{\text{M}}(x_1, y_1) \cdot \text{PSF}_{\text{LTurb}}(x_1, y_1) \quad (41)$$

短曝光情况下为

$$\text{PSF}_{\text{SUM}}(x_1, y_1) = \text{PSD}_{\text{D}}(x_1, y_1) \cdot \text{PSF}_{\text{M}}(x_1, y_1) \cdot \text{PSF}_{\text{STurb}}(x_1, y_1) \quad (42)$$

式中 $\text{PSF}_{\text{D}}(x_1, y_1)$ 为衍射形成的点扩散函数; $\text{PSF}_{\text{M}}(x_1, y_1)$ 为平均流场产生的点扩散函数。

4 光学传输效应对飞行器成像探测的影响

4.1 像模糊对成像探测的影响

由于成像探测系统对目标的成像识别距离一般只有几千米, 大部分时间是在场景中对点源目标的检测、识别与跟踪。因此, 模糊将影响成像探测系统对目标的探测距离和点源目标的检测与识别。

由前面内容分析知, 成像探测光学系统在衍射限情况下的点扩散函数为 $\text{PSF}_{\text{D}}(x, y)$, 存在高速流场情况下的点扩散函数为 $\text{PSF}_{\text{SUM}}(x, y)$, 设成像探测系统探测器的光敏面尺寸为 $a \times b$, 则两种情况下成像探测系统对目标辐射接收利用系数分别为

$$\Lambda_1 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{PSF}_{\text{D}}(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{PSF}_{\text{D}}(x, y) dx dy} \quad (43)$$

$$\Lambda_2 = \frac{\int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} \text{PSF}_{\text{SUM}}(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{PSF}_{\text{SUM}}(x, y) dx dy} \quad (44)$$

引入高速流场模糊影响因子 Λ , 且

$$\Lambda = \frac{\Lambda_2}{\Lambda_1} \quad (45)$$

根据成像探测系统灵敏度 (NEFD) 计算公式可知, 高速流场模糊影响因子 Λ 对成像探测系统灵敏度的影响可用下式进行描述:

$$\text{NEFD}_{\Lambda} = \frac{1}{\Lambda} \text{NEFD}_{\text{D}} \quad (46)$$

式中 NEFD_{Λ} 为存在流场时成像探测系统的灵敏度;

NEFD_{D} 为衍射限情况下的成像探测系统灵敏度。

模糊也影响成像探测系统对场景和目标的成像清晰程度, 从而影响对目标的检测识别准则的制定。设点源目标的原始灰度值为 I_0 , 则通过高速流场之后的灰度分布为

$$I(x, y) = I_0 \text{PSF}(x, y) \quad (47)$$

用 $J(x, y)$ 表示成像探测系统原始场景灰度分布, 各等晕区内因高速流场存在引起的点扩散函数用 $\text{PSF}_{\text{nm}}(x, y)$ 表示, 于是经高速流场影响之后成像探测系统对场景的成像灰度分布为:

$$J_{\text{nm}}(x, y) = J(x, y) \cdot \text{PSF}_{\text{nm}}(x, y) \quad (48)$$

4.2 像偏移对成像探测的影响

高速流场产生的像偏移将影响飞行器对拦截目标的瞄准精度, 引起飞行器对瞄准点的命中误差。由于高速流场产生的像偏移为 δ , 从而在像面上产生的像移动距离为

$$\Delta l = \delta \cdot f \times 10^{-3} \quad (49)$$

在高速飞行器末制导失控距离上, 该瞄视误差引起的飞行器命中误差是无法控制的, 因此, 由瞄视误差引起的飞行器命中误差为^[7]

$$\Delta L = (V_{\text{D}} + V_{\text{M}}) t \delta \times 10^{-3} \quad (50)$$

式中 V_{D} 为飞行器飞行速度的方向投影速率; V_{M} 为目标飞行速度的方向投影速率; t 为末制导系统对目标从曝光到飞行器产生控制力的延迟时间。

像抖动对成像探测的影响, 需要应用成像探测系统的数学模型、制导律和高速飞行器末制导控制系统数学模型。

5 数值仿真结果

应用光波在湍流流场中传输的理论和流场计算, 可以进行湍流流场光学传输效应数值模拟。对于高速飞行器成像探测光学系统, 在不考虑光学系统像差 (一般均实现衍射限成像) 的情况下, 成像探测系统对目标成像的 PSF 将由流场传递特性和成像探测光学系统衍射特性决定。以一典型成像探测光学系统为例进行数值仿真。其主要参数: 光学系统口径为 60 mm, 光学系统焦距为 120 mm, 工作波长为 3~5 μm , 光线入射方向为 90° 和探测器单元尺寸为 50 μm 。通过数学仿真可得点目标穿过湍流流场在不同积分时间下总的点扩散函数 PSF, 计算结果如图 3 所示。通过仿真结果数据的分析, 可以得出流场光学传输效应带来的像模糊、像偏移和像抖动的一些基本特性:

1) 湍流流场产生图像的抖动, 是由脉动流场的低频分量产生的。对成像探测系统图像抖动呈现的程度与探测器的积分时间有关, 积分时间越长, 抖动分量引起的图像模糊越多, 反之呈现的图像抖动越多。

2) 湍流流场产生像模糊, 是由平均流场和脉动流场高频分量产生的。对成像探测系统图像模糊体现的程度还与探测器的积分时间有关, 在一定的范围内, 积分时间越长, 抖动图像模糊越严重, 反之图像越清晰。

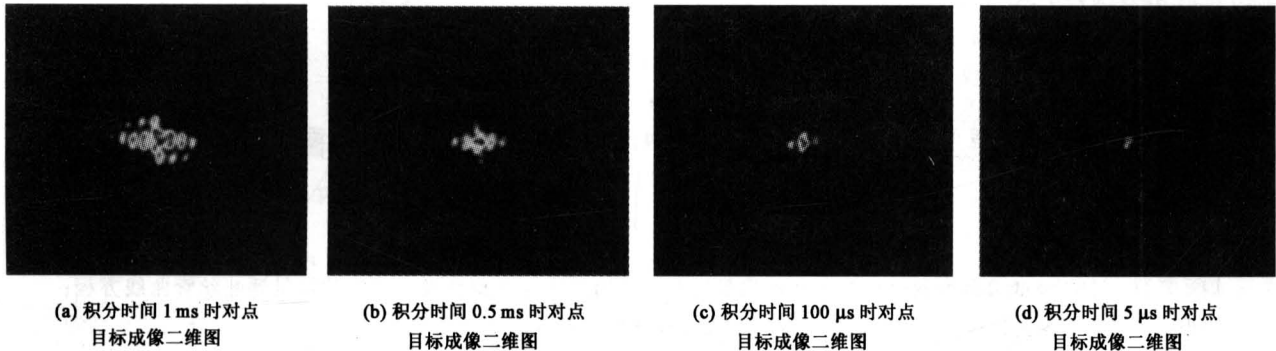


图 3 不同积分时间下的点扩散函数 PSF 二维图

Fig.3 2D PSF images with for various integration periods

6 结语

笔者建立了带有光学成像探测系统的高速飞行器气动光学传输效应的工程计算模型, 能较好地定量反映气动光学传输效应对成像探测系统性能的影响, 计算方法可应用于高速飞行器的工程设计中。

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] Goodman J W. Introduction to Fourier Optics [M]. McGraw-Hill, 1968. 115 ~ 152
- [3] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 37 ~ 81
- [4] Clark R, Banish M. Fundamentals of Aero-optics Phenomena(Invited)[R]. AIAA 94 - 2545, 1994
- [5] Barakat R. The influence of random wavefront errors on the imaging characteristics of an optical system [J]. Optica ACTA, 1971, 118(9): 683 ~ 694
- [6] Richardson M B, Clark R L Prediction of image degradation through a turbulent medium [J]. SPIE, 1987, 788: 2 ~ 9
- [7] 赵友善. 防空飞行器武器寻的制导控制系统设计 [M]. 北京: 宇航出版社, 1992. 132 ~ 148

An Engineering Method to Calculate Transmitting Effect of Aero-optics for Hypersonic Interceptor

Yin Xingliang

(China Aerospace Science & Industry Corporation , Beijing 100039 , China)

[Abstract] Transmitting effects of aero-optics is very important to optical imaging probing system of interceptor, as it may cause displacement, jitter and blurring of image to receive for the system. The optic transmitting characteristics is analyzed when target ray goes though turbulence flow. The engineering model for optical transmitting characteristics of flow is built up and empirical model for optical imaging system induced by aero-optic transmitting effects is described. The displacement, jitter and blurring are simulated. The numerical simulation results suggest that transmitting effect of aero-optics has powerful influence on the imaging probing system, which is related to flight parameters, imaging system parameters and integration periods of imaging probing system, etc.

[Key words] aerodynamics; turbulent flows; optics; aero-optics; transmitting effect