

侧窗头罩高速层流流场光学传输效应数值模拟

陈澄, 费锦东

(中国航天科工集团 二院二部, 北京 100854)

摘要: 高速流场光学传输效应是影响红外成像末制导技术在高速导弹上应用的关键。研究了气动光学传输效应中层流流场光学传输分量的计算方法, 应用光线追迹法和物理光学方法研究层流流场引起的像偏移和低程度的像模糊, 结合典型状态下的流场数据, 进行了高速层流流场光学传输效应的数学仿真, 得到了仿真计算结果。采用实际计算出的流场数据, 得出的计算结果与工程计算的结果相比较, 证明所建立的气动光学高速流场光学传输效应理论模型基本正确, 可以用来进行仿真计算。

关键词: 气动光学效应; 层流流场; 数值模拟; 点扩散函数

中图分类号: TJ76; V211.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)05-0548-05

Numerical simulation on the optical transmission distortions throughout the laminar flow field

CHEN Cheng, FEI Jin-dong

(The 2th Department of the Second Academy, China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract: The high speed flow optical transmission effect is a key to high speed missile using infrared image terminal guidance technology. In this paper, computing methods of the optical transmission distortions throughout the laminar flow field in aero-optical effects are described. Image shift and low blur brought by laminar flow are calculated using optical methods of ray trace and physical optics. The approaches and some simulation results are presented with computed data of high speed flow field. Comparison with the engineering results shows that the high speed flow field optical transmission theory model is correct and the numerical simulation software can be used to analyze the aero-optical effects.

Key words: Aero-optical effects; Laminar flow field; Numerical simulation; Point spread function (PSF)

0 引言

光波经过流场后, 在飞行器成像探测系统中产生的目标图像偏移、抖动和模糊的现象^[1]。

光在高速流场中的传输效应是指从目标发出的

根据飞行器飞行速度、高度、姿态和头罩外形结

收稿日期: 2004-11-28; 修订日期: 2004-01-12

作者简介: 陈澄(1979-), 男, 江苏江阴人, 硕士生, 主要研究方向为气动光学。

构等参数及制冷方式,运用高速流场计算理论就可以进行光学头罩外的流场参数计算。为分析计算方便,通常将流场产生的光学传输效应分为两部分来考虑,即层流流场光学传输效应分量和湍流流场光学传输效应分量。高速流场光学传输效应的大小用它引起的像偏移、像模糊和像抖动来衡量^[2,3]。

高速流场光学传输效应计算分为平均密度场模型和脉动密度场模型两部分,平均密度场模型应用的数学方法为光线追迹法和物理光学方法,湍流脉动统计模型应用的数学方法为统计光学方法。将这两个分量建立起来的模型称作栅格模型和子栅格模型。栅格模型被看作流场的平均密度模型,子栅格模型被看作流场的湍流脉动统计密度模型^[4]。本文重点研究层流流场光学传输效应分量的计算。

1 层流流场中光波的传输

应用光线追迹法对经过层流流场的光线进行追迹得到光线的传播路径,再沿路径进行积分得出到达光瞳面上的光程差或相位差,由波像差构建光瞳函数后,应用物理光学方法得到通过流场之后的像面光波复振幅分布,通过像面复振幅分布可以得到点扩散函数(PSF)和层流流场的光学传递特性^[5]。

1.1 光线在层流流场中传播路径的追迹

光线追迹法实质就是几何光学法。但与一般光线追迹法不同的是,流场介质是非均匀介质,其折射率是空间坐标的函数,在这样的介质中进行光线追迹,需要对传统的光线追迹方法进行改进。

在已知密度场的情况下,利用气体折射率的Gladstone-Dale 定律^[6],

$$N=1+K_{GD} \rho \tag{1}$$

将密度场转化为折射率场,这里系数 K_{GD} 称为气体密度到折射率的转换系数,简称 G-D 系数。

为了方便地进行光线在层流流场中传播路径的追迹,在光学头罩侧窗法线方向建立三维坐标系,如图 1 所示。在这个坐标系下,将窗口上方的空间划分成由 $1 \times 1 \times 1$ 小栅格构成的区域。根据流场参数计算结果,可以得知每个小栅格里的折射率值 n 。对于远场点目标辐射光波,到达光学头罩绕流流场之前,可近

似为平面波,设离窗口距离为 l_0 的平波波前为 $E_0(x,y,z)$ 。由计算平面波前 $E_0(x,y,z)$ 发出的每条光线所通过小栅格的路径,可以得出层流流场介质中光波传输的光程。

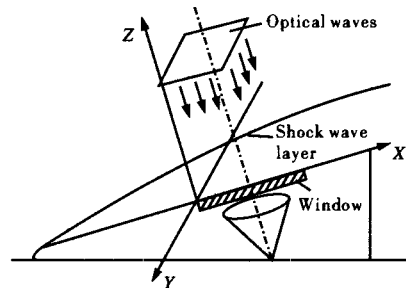


图 1 窗口上方光线追迹坐标系示意图
Fig.1 Schematic diagram of ray-tracing coordinate above the window

1.2 层流流场对瞳函数的影响

由光线追迹法得到的光程 OPD_i 为:

$$OPD_i = \sum_i n_i \Delta l \tag{2}$$

假设主光线的光程为 OPD_0 ,那么第 i 条光线经过流场介质产生的波像差为:

$$W(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} (OPD_i - OPD_0) \tag{3}$$

因此,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。层流流场引起的出射波面为:

$$A(x,y) = a(x,y)e^{iW(x,y)} \tag{4}$$

式中 $A(x,y)$ 为系统的瞳函数; $a(x,y)$ 为波面的振幅分布; $e^{iW(x,y)}$ 为波面的相位分布。

1.3 层流流场光学传输特性

光学头罩外流场的光学传输特性随飞行器飞行过程不断变化,很难满足线性光学理论所要求的基本前提,即所分析的光学系统必须具有空间不变性和时间不变性。而层流流场是高速流场中的稳态平均部分,对确定的飞行状态,层流流场结构是一定的,于是可以将其近似看作具有时间不变性。

由于层流流场密度具有空间不均匀性,其光学传输特性不具有空间不变性,于是只能在确定的人瞳大

小、入瞳位置和给定的视线方向附近应用线性光学理论来分析层流流场的特性。为分析方便,假定在头罩窗口及流场之后有一个理想的成像光学系统,如图 2 所示。

应用线性光学系统理论进行点扩散函数计算。首先求出由物点发出球面波通过光学系统以后的出射波面,即求出光学系统的波像差和瞳函数,然后根据惠更斯原理用衍射积分的方法计算出像面点扩散函数,再对点扩散函数进行傅里叶变换,得到系统的光学传递函数。

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:

$$U(x', y') = \iint A(x, y) e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} (xx' + yy')} dx dy \quad (5)$$

式中各符号的意义和坐标关系如图 2 所示。由上式可知,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平方,所以点扩散函数为:

$$PSF_M(x', y') = |U(x', y')|^2 = U(x', y') \times U^*(x', y') \quad (6)$$

对点扩散函数进行傅里叶变换可得流场的光学传递函数,即:

$$OTF(f_x, f_y) = \iint PSF(x', y') e^{-j2\pi(f_x x' + f_y y')} dx' dy' \quad (7)$$

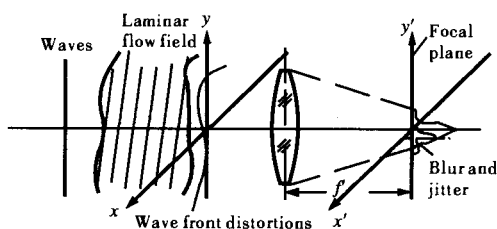


图 2 层流流场光学传输效应计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of the optical transmission effect throughout the laminar flow field

层流流场除了产生像模糊之外还产生像偏移,用目标光线穿过流场在成像探测光学系统焦面上成像位置相对于无流场时目标在焦面上成像位置的偏差来衡量,也可以应用该线偏差相对于焦距产生的角偏差来衡量。按上面介绍的计算方法,可以得出目标光线

穿过流场在成像探测光学系统焦面上成像的 PSF 分布 $PSF_M(x', y')$, 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}) , 那么由层流流场引起的像偏移为:

像偏移线偏差 x'_{max}, y'_{max}

$$\text{像偏移角偏差 } \delta_x = \frac{x'_{max}}{f}, \delta_y = \frac{y'_{max}}{f} \quad (8)$$

像偏移的这种计算方法依赖流场数据计算结果,不能快速直观地分析各种主要参数(如马赫数、高度、攻角和光线入射角等)对像偏移的影响。

2 层流流场光学传输效应计算模拟

为了适应光学传输效应计算,研制了光学头罩高速绕流流场计算软件。该软件由参数设置、工程计算、结果显示、数据库操作四个模块组成。其中参数设置包括弹道参数、外形参数、网格点参数、计算参数;工程计算包括单机计算、并行计算;结果显示包括数据转换和二维、三维图显示等。

2.1 流场参数的生成

应用高速导弹光学头罩绕流流场并行计算软件进行高速层流流场参数计算,输入的原始参数为:

- (1) 飞行参数 飞行高度 $H=10$ km, 来流马赫数 $M_\infty=10$, 飞行器攻角 $\alpha=0^\circ$, 滚转角 $\gamma=0^\circ$;
- (2) 头罩外形参数 最大直径为 280 mm, 球头半径为 18 mm, 半锥角 $\beta=14^\circ$, 头罩高度为 505.1 mm, 侧面开有一个长 200 mm、宽 80 mm 的矩形窗口;
- (3) 成像探测系统参数 光学系统口径为 60 mm, 焦距为 120 mm, 工作波段为 9 μm ;
- (4) 目标入射光线方向 入射光线相对于弹轴的前向夹角 $\varphi=15^\circ$ 。

头罩外形如图 3 所示。生成的三维空间计算网格如图 4 所示,三维坐标间隔是以毫米为长度单位。

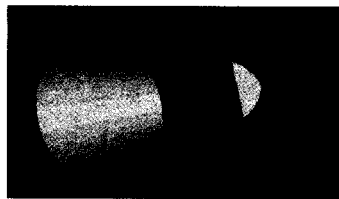


图 3 弹头外形

Fig.3 Shape of warhead

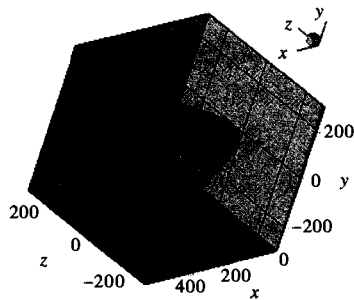


图4 生成的网格

Fig.4 Gridding of three dimension

2.2 数值模拟计算

2.2.1 层流流场引起目标图像模糊数值计算

根据层流流场光学传输效应计算的需要,对高速绕流流场计算结果进行整理并应用 G-D 公式转化为折射率场。然后,应用上一节介绍的计算模型就可以得到光波穿过流场后的波面(公式(4)的计算结果),计算结果如图5所示。图中两个方向的横坐标为波面离散间隔(离散间隔 $\Delta L=1$ mm),纵坐标表示波面相位(单位为弧度)。

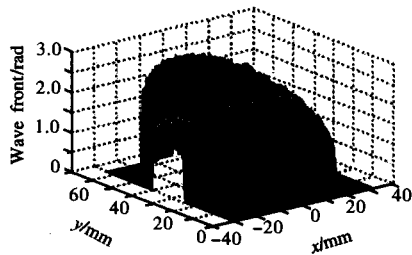


图5 层流流场波面图

Fig.5 Wave front throughout the laminar flow field

取光轴周围 64 mm×64 mm 范围内波面构造光瞳函数。对瞳函数扩充成 256×256 后,进行傅里叶变换,得到相面的振幅分布,再对振幅取平方,得到点扩散函数,计算结果如图6所示。

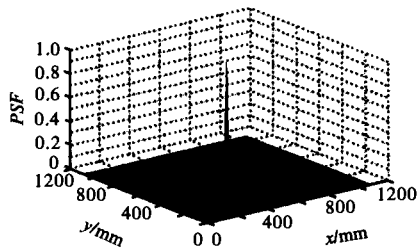


图6 层流流场点扩散函数

Fig.6 PSF of the laminar flow field

PSF 坐标的单位为毫米,离散间隔为:

$$\Delta L=1/256\lambda f=4.21875 \mu\text{m} \quad (9)$$

对点扩散函数进行傅里叶变换就可得到流场的光学传递函数(OTF)。

对光学传递函数取模,得到调制传递函数(MTF):

$$MTF=|F[PSF]| \quad (10)$$

MTF 坐标单位为空间频率单位(mm^{-1}),离散间

隔为 $\Delta K=\frac{1 \text{ mm}}{\lambda f}$,计算结果如图7所示。

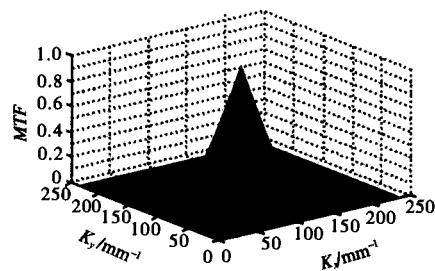


图7 层流流场调制传递函数

Fig.7 MTF of the laminar flow field

2.2.2 层流流场引起目标图像偏移数值计算

得出目标光线穿过流场在成像探测光学系统焦面上成像的 PSF 分布 $PSF_M(x', y')$,取 $PSF_M(x', y')$ 的最大值:

$$PSF_M(x', y')_{\text{max}}=9.9230 \times 10^6 \quad (11)$$

最大值 PSF_{max} 对应的坐标 $(x'_{\text{max}}, y'_{\text{max}})$ 为离散点 (131, 129) 对应的坐标。而在无流场情况下,离散点 (129, 129) 对应 PSF 最大值。两者对比如图8所示。

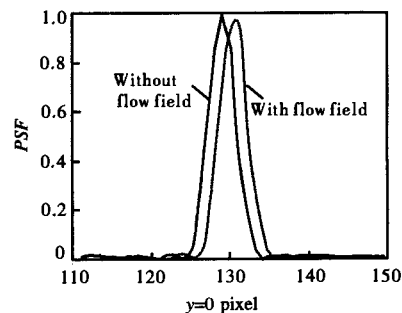


图8 有/无流场情况下 PSF 对比图

Fig.8 PSF with and without flow field

由层流流场引起的像偏移为:

像偏移线偏差

$$\begin{aligned}x_{\max}' &= \frac{1}{256} \lambda f (131-129) = 8.4375 \mu\text{m} \\ y_{\max}' &= \frac{1}{256} \lambda f (129-129) = 0 \mu\text{m}\end{aligned}\quad (12)$$

像偏移角偏差

$$\begin{aligned}\delta_x &= \frac{x_{\max}'}{f} = 70.3 \mu\text{rad} \\ \delta_y &= \frac{y_{\max}'}{f} = 0 \mu\text{rad}\end{aligned}\quad (13)$$

另外,还计算了入射光线相对于弹轴的前向夹角 $\varphi=5^\circ$, $\varphi=30^\circ$ 时的情况。

(1) 当 $\varphi=5^\circ$ 时, PSF_{\max} 对应的坐标 (x_{\max}', y_{\max}') 为离散点 (132, 129) 对应的坐标。

像偏移线偏差为:

$$x_{\max}' = \frac{1}{256} \lambda f (132-129) = 12.6563 \mu\text{m}\quad (14)$$

像偏移角偏差为:

$$\delta_x = \frac{x_{\max}'}{f} = 105.5 \mu\text{rad}\quad (15)$$

(2) 当 $\varphi=30^\circ$ 时, PSF_{\max} 对应的坐标 (x_{\max}', y_{\max}') 为离散点 (130, 129) 对应的坐标。

像偏移线偏差为:

$$x_{\max}' = \frac{1}{256} \lambda f (130-129) = 4.2188 \mu\text{m}\quad (16)$$

像偏移角偏差为:

$$\delta_x = \frac{x_{\max}'}{f} = 35.2 \mu\text{rad}\quad (17)$$

很明显,入射光线相对于弹轴的前向夹角越小,即入射光线偏离激波法线方向越大,产生的像偏移就越大。

3 结论

高速流场光学传输效应的大小用它引起的像偏

移、像模糊和像抖动来衡量。层流流场是高速流场中的稳态平均部分,不仅产生像偏移也产生像模糊^[7]。层流流场产生的像偏移是主要的,由于像偏移与入射光线方向密切相关,入射光线偏离激波法线方向越大,产生的像偏移就越大。将计算结果与工程上计算像偏移的方法相比较^[8],计算结果基本相符。层流流场产生的像模糊的量比较小,通过有/无流场的调制传递函数的比较,也证明了这一点。层流流场光学传输效应数值模拟结果,对揭示气动光学效应,研究气动光学校正方法具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Rodney Clark, Michele Banish. Fundamentals of Aero-Optics Phenomena (Invited) [A]. 18th AIAA Aerospace Ground Testing Conference. AIAA 94-2545 [C]. 1994. 2-7.
- [2] Cole T, Peters B, Haight J. Application of Selected Nonintrusive Optical Techniques to the Characterization of High Speed Aero-Optic Phenomena [A]. SPIE [C]. 1996, 2005. 96-98.
- [3] FEI Jin-dong. Study on aero-optical effect technology for high speed missile infrared image guide [J]. Infrared and Laser Engineering (费锦东. 高速红外成像末制导对气动光学效应技术研究的需求. 红外与激光工程), 1998, 27(1): 42-43.
- [4] YIN Xin-liang. Aero-optical Principle [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House (殷兴良. 气动光学原理. 北京: 中国宇航出版社), 2003. 169-172.
- [5] YANG Xiao-ying, LIU Chun-sheng, GU Yong-qi. Design of the hypersonic vehicle infrared cooling dome [J]. Infrared and Laser Engineering (杨晓颖, 刘纯胜, 顾永其. 层流流场光学传输效应研究. 红外与激光工程), 2003, 33(6): 576-579.
- [6] Sutton G W, Pond J E, Snow R, et al. Hypersonic Interceptor Performance Evaluation Center: Aero-Optics Performance Predictions [A]. 2nd Annual AIAA SDIO Interceptor Technology Conference. AIAA 93-2675 [C]. 1993. 3-6.
- [7] Childs Robert E. Prediction and Control of Turbulent Aero-Optical Using Large Eddy Simulation [A]. 2nd Annual AIAA SDIO Interceptor Technology Conference [C]. AIAA 93-2670 [C]. 1993. 1-2.
- [8] Michael C Dudzik; YANG Ying-huai. Electro-optical Systems Design, Analysis, and Testing [M]. Tianjin: Editorial Board of Infrared and Laser Engineering (Michael C Dudzik; 杨应槐. 光电系统设计, 分析和测试. 天津: 红外与激光工程编辑部), 2001. 339-358.