

机载光学平台平均流场气动光学效应研究

董 航 张建柱 徐 明

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘要 使用选区电子衍射软件模拟机载光学平台绕流流场, 根据绕流流场定量研究了气动光学平均流场效应的性质及其随激光传输角度的变化。发现平均流场气动光学效应引起的波前畸变主要是低阶像差, 整体倾斜占比约 92%, 整体倾斜、离焦和像散三项总和占比平均值 99% 以上; 随传输方向变化, 波前像差均方根值以及波前性质有显著不同: 对于不同的传输方向, 光程差(OPD)均方根值(RMS)的变化范围从 $0.13 \sim 1.20 \mu\text{m}$, 光轴偏向角的变化范围从 $1 \sim 12 \mu\text{rad}$ 。去倾斜后的波前像差引起的光束质量因子 β 值, 对所有方向的统计平均值为 1.8; 校正了离焦和像散后, 光束质量因子 β 值的平均值为 1.16。光束质量因子 β 值随口径增加而增加, 无自适应光学校正时变化规律接近线性。

关键词 大气光学; 波前像差; 光束质量; 平均流场; 倾斜; 离焦; 像散

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0201003

Simulation on Mean Flow-Field Aero-Optic Effect of Airborne Optical Platform

Dong Hang Zhang Jianzhu Xu Ming

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract The simulation of the mean flow over airborne laser fairing as well as its aeroptic analysis with selected area electron diffraction software is presented. The simulation reveals that the aero-optic effect with respect to the mean flow field strongly depends on the beam direction; along different beam propagation directions, the root mean square of optical path difference varies between $0.13 \sim 1.20 \mu\text{m}$, and tilt angle of beam axis varies between $1 \sim 12 \mu\text{rad}$. Furthermore, the wave-front distortion caused by mean flow-field aeroptic effect is mainly low-order effect: the ratio of tilt to the aberration is about 92%, and the ratio of tilt, defocussing and astigmatism is about 99%. The average of beam quality factor β over all directions caused by no-tilt wave-front aberration is 1.8; when defocussing and astigmatism is corrected, the average of beam quality factor β is 1.16. The beam quality factor β caused by no-tilt aberration increases with the increment of beam radius as a nearly linear manner.

Key words atmospheric optics; wavefront aberration; beam quality; mean flow field; tilt; defocussing; astigmatism

OCIS codes 010.3310; 110.1080; 350.5030

1 引 言

空-地光通信链路由于其波束窄、容量大和保密性好等特点, 得到了广泛的研究^[1,2]。当飞机高速经过流场时, 飞机光学平台附近的空气密度会产生复杂的变化, 气流的折射率起伏很大, 使得远场峰值强度减少以及光束扩散和出射波前畸变, 从而导致光学系统的性能下降, 这就是气动光学效应。为了研究方便, 通常将绕流流场分为平均流场分量和湍流流场分量, 而气动光学效应也分为平均流场效应

和湍流效应。平均流场效应由飞机飞行所导致的飞机表面平均空气密度的空间不均匀分布引起, 流场特征尺寸大约是数米; 湍流效应主要由飞机表面湍流附面层内空气密度的随机涨落引起, 流场特征尺寸大约为毫米到分米量级。附面层内湍流的特征时间很短, 使得利用通常的自适应光学(AO)系统来校正存在很大困难; 但是在设计良好的情况下, 其绝对值很小, 很多情况下作为系统的系统误差不予考虑。平均流场效应主要是倾斜和离焦、像散等低阶效应,

收稿日期: 2011-08-11; 收到修改稿日期: 2011-09-08

作者简介: 董 航(1969—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事气动光学效应方面的研究。E-mail: dong_hang@iapcm.ac.cn

比较容易校正,但绝对值较大。

从 70 年代开始,关于机载光学平台气动光学效应的研究很多,包括飞行实验研究^[3,4]、风洞实验研究^[5,6]和数值模拟^[7,8]等,多数是针对湍流效应的。由于对计算能力的要求,关于平均流场效应的模拟不是很多,不多的文献中^[8]对波前性质也没有具体分析。本文在大型计算机的支持下,模拟计算了实际飞机模型表面的流场,对通过该流场的波前性质及其随传输方位的变化进行了具体研究,并分析了其口径效应。

2 流场模拟

采用计算流体力学(CFD)软件选区电子衍射(SAED)模拟计算光学平台绕流流场。SAED 是基于有限体积方法求解空气流动纳维-斯托克斯(N-S)方程组的数值模拟软件,采用欧拉贴体坐标下控制体方法描述空气流动,相应的网格策略为多块结

构拼接。对于 N-S 方程组的非线性对流通量项,采用 Roe 迎风格式离散^[9];对于方程组的粘性通量项,采用基于梯度定理的切换控制体方法离散^[10];采用 2eq-kec 的湍流涡粘性模式模拟湍流流动^[11],通过使用 mpi 实现流场的并行求解。

为了尽量减少窗口对飞机气动环境的破坏,计算模型取机身上加整流罩的方式,如图 1(a)所示。整流罩外形为球半径 1.2 m、拱底圆半径 0.65 m、拱高 0.2 m 的球冠,如图 1(b)所示。整流罩中心位于距离飞机头部前端 8.2 m 处。光束从球冠所在球的球心出射,光轴与垂直向上方向(Y 轴)的夹角为天顶角,光轴在 XZ 面上投影与飞行方向的夹角为方位角。计算条件是飞机飞行速度为 0.8 Mach,飞行高度为 12 km,大气参数依据美国标准大气 1976,取密度 $0.3119 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,压力 $1.94 \times 10^4 \text{ Pa}$,温度 216.65 K,粘性系数 $1.42 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

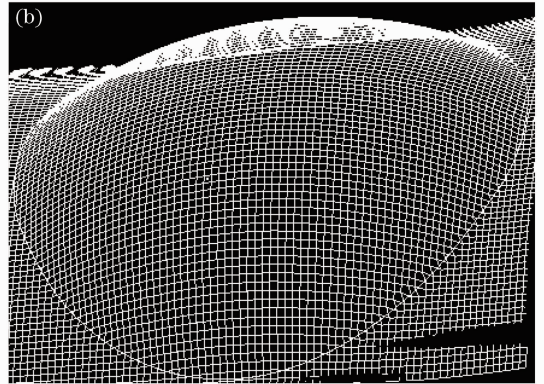
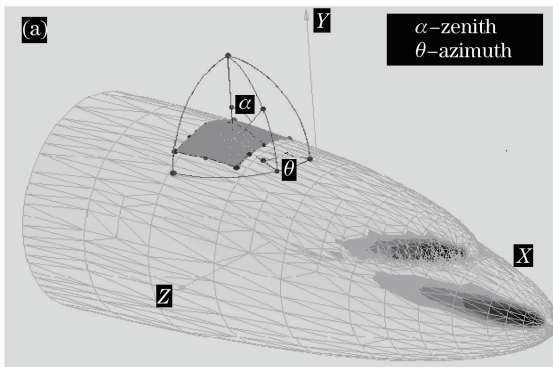


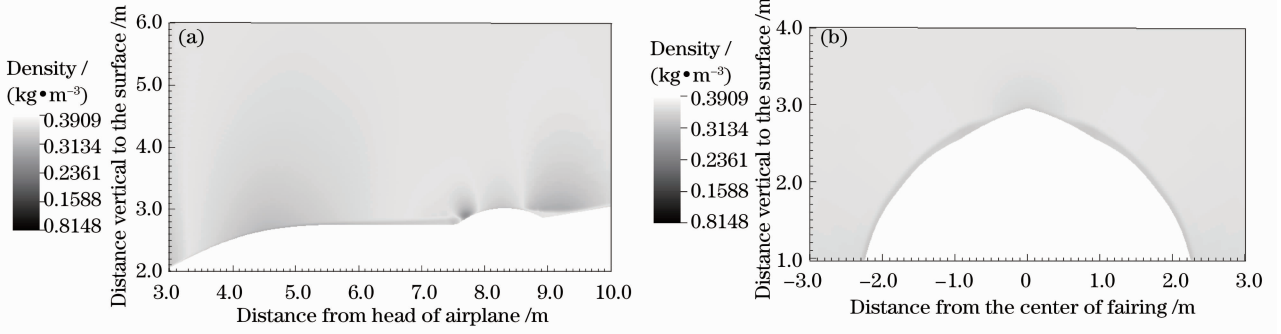
图 1 (a)计算模型及(b)整流罩表面网格

Fig. 1 (a) Airplane model and (b) grids for fairing surface

在不影响计算精度的条件下,模拟计算时只选取了飞机头部 12 m 部分进行了计算。计算的总网格数量约 12×10^6 ,在垂直于飞机表面方向上,网格数为 600。在距离飞机表面的 6 m 范围内垂直飞机表面的方向上网格数目约 400,其中在距离飞机表面 0.1 m 内,是密度变化显著的湍流附面层区域,网格进行了加密,总网格数约 100;其余部分是接近等距离分布的,每个网格的尺寸大约是 0.02 m。整流罩上为了保证求取波前均方根值的精度,对网格进行了局部加密,总网格 7000 多个。为了增加计算速度,利用 100 个进程并行计算,计算时间大约 15 h。

图 2(a)给出了飞机沿飞行方向中轴线上 xy 平

面内的空气密度分布,可以看到在整流罩前的近平面区域内,飞机表面流场有清晰的附面层结构;而在整流罩附近,由于整流罩的影响,破坏了规则的附面层结构,空气密度变化存在无规律的变化,空气密度变化区域增加,密度变化幅度增大,在飞机表面空气密度的分布是不均匀的。而在近平面区域与整流罩相交的部分,复杂的流场相互作用导致空气密度变化特别强烈。图 2(b)是通过球冠顶点的 yz 平面内的密度分布,在横坐标为 0 时对应于球冠顶点位置。可以看出机身表面的附面层结构以及整流罩附近附面层结构的破坏。平均流场空气密度的不均匀直接导致气动光学效应。

图2 飞机表面密度分布。(a)沿中轴线上的 xy 平面;(b)通过球冠顶点的 yz 平面Fig. 2 Density distribution on the surface of airplane. (a) Symmetric xy slice; (b) yz slice including peak of fairing

3 气动光学效应分析

3.1 波前像差

根据密度分布,可按照(1)式求得光斑口径内各点的光程(OPL)、光程差(OPD)及出射口径内的OPD均方根值(RMS),分别表示为

$$\begin{cases} L_{\text{OPL}} = \int (1 + k_{\text{GD}}\rho) ds, \\ L_{\text{OPD}} = L_{\text{OPL}} - \overline{L_{\text{OPL}}}, \\ L_{\text{OPD rms}} = \sqrt{\sum_N L_{\text{OPD}}^2 / N}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\overline{L_{\text{OPL}}}$ 是对光斑口径内各点OPL的平均, N 是光斑内点的数目, ρ 是空气密度, k_{GD} 是 Gladstone-dale 常数,是波长的函数,波长 $1.315 \mu\text{m}$ 时, $k_{\text{GD}} = 2.19 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

由于在远离飞机表面时空气密度不再受飞机的影响而保持常数,因此积分长度足够长时,计算OPL时积分长度的增加不再影响OPD RMS的计算结果。通过对比计算,发现在积分长度大于 3 m 时,随积分长度的增加OPD RMS的计算结果就几乎不再改变,本文计算取距离飞机表面 6 m 。沿不同的传输方向,计算了61个方向的光束的OPD RMS,其中光束口径取为 0.4 m 。图3给出了不同计算样本所对应的方位角和天顶角,图4给出了OPD RMS随传输方向的变化。可以看到随方位角和天顶角变化,OPD RMS的变化范围从 $0.13 \sim 1.2 \mu\text{m}$,反应了平均流场气动光学效应在不同方向上的显著变化。

3.2 波前性质分析

直接计算的波前方差包含了倾斜、离焦和像散等低阶项以及各种高阶项,不能反映波前的具体性质。本节将根据绕流流场计算所得的波前分布,附加到波长 $1.315 \mu\text{m}$ 、束腰宽度 a_0 为 0.2 m 的16阶

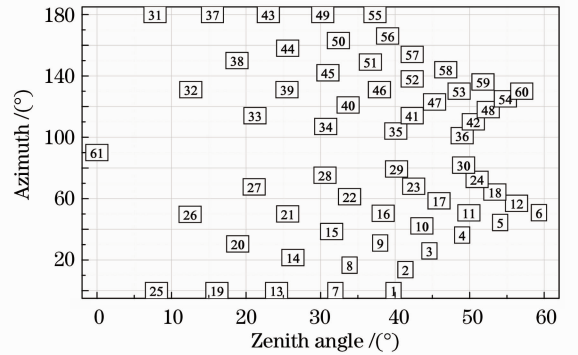


图3 样本序列号与传输角度的对应关系

Fig. 3 Relation of sample sequential number and beam direction

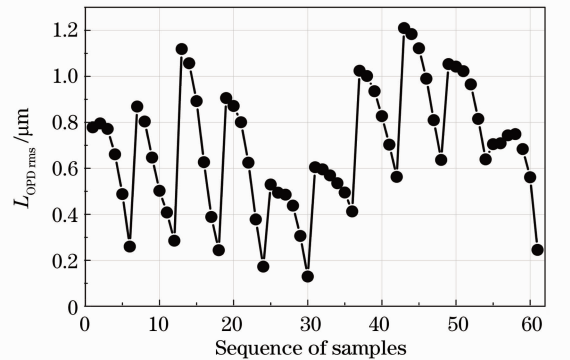


图4 平均流场气动光学效应引起的OPD RMS

Fig. 4 OPD RMS of samples

理想超高斯光束上^[12],并传输到远场,根据对远场光斑的探测,计算了去倾斜后的光束质量。超高斯光束的场 E 分布的表达式为

$$E(r, 0) = \exp[-(r/a_0)^N], \quad (2)$$

式中 r 为指距离光斑中心的距离, a_0 为束腰半宽度, $N > 1$ 为超高斯光束的阶数。

为了分析波前性质,将计算得到的半径为 a_0 的波面上的波前 $\phi(x, y)$ 分解为泽尼克多项式^[13],分

析各阶项占的比例。

$$\phi(x,y) = \sum_k a_k Z_k(x,y), \quad (x^2 + y^2 \leq a_0^2)$$

$$r = \sqrt{(a_i^2 + a_j^2) / \sum_k a_k^2}, \quad (3)$$

其中倾斜项是 $k=1, 2$ 项, 离焦是 $k=3$ 项, 像散是 $k=4, 5$ 项。将波前分别分解到 35 阶和 60 阶时, 前 5 项基本不发生变化, 说明平均流场气动光学效应主要是低阶的。

在考虑倾斜的影响时, 综合考虑光束的 X 方向倾斜和 Y 方向倾斜, 定义光轴偏离角作为参考指标为

$$t = \sqrt{X_{\text{tilt}}^2 + Y_{\text{tilt}}^2}. \quad (4)$$

图 5 是光轴偏向角随计算样本的变化, 单位是微弧度, 可以看到随不同传输方向光轴偏向角的变化非常明显。对 61 个计算样本进行统计, 光轴偏向角的统计平均值为 $6.3 \mu\text{rad}$, 均方根是 $2.7 \mu\text{rad}$ 。

图 6 给出了去倾斜后光束质量随计算样本的变化, 光束质量因子 β 定义为占总能量 63% 的光斑半径与理想光束半径之比。去倾斜后的光束质量统计平均值为 $\beta=1.80$, 校正离焦和像散后光束质量统计平均值为 $\beta=1.16$, 表明离焦和像散对光束质量的贡献很明显。

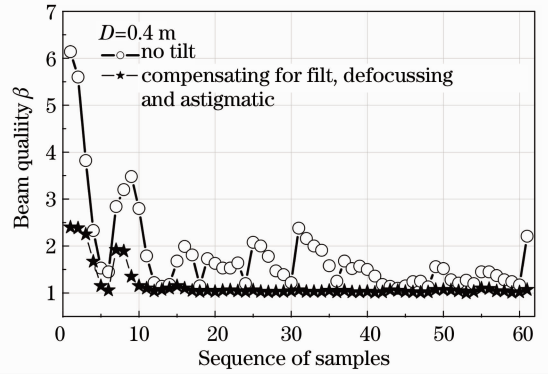


图 6 光束质量随样本变化

Fig. 6 Beam quality versus samples

图 7 分析了像差中倾斜、离焦和像散所占的比重, 统计结果显示倾斜项所占比重的平均值为 92%, 倾斜、离焦和像散三项总和所占比重的平均值为 99%, 说明像差中主要是倾斜、离焦和像散三项。同时, 不同传输方向时各项占比也有明显区别, 说明在不同方向上波前性质也有所不同。对于 3 个有代表性的方向, A 点对应光束向侧前方, B 点对应光束向侧后方, C 点对应光束垂直向上。

图 8 给出了在不同方向上 0.4 m 口径上的相位分布, 可以看到相位性质的显著区别。

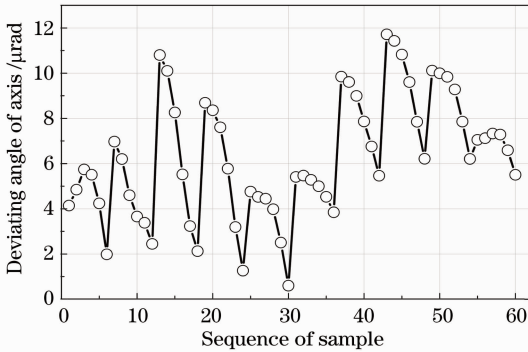


图 5 光轴偏向角随样本的变化

Fig. 5 Deviating angle versus samples

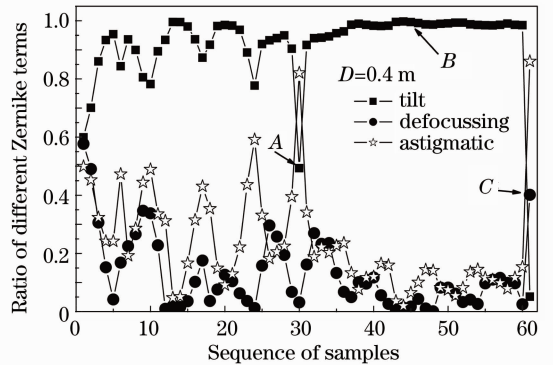


图 7 倾斜、离焦和像散占比随样本变化

Fig. 7 Tilting, defocussing and astigmatic ratio versus samples

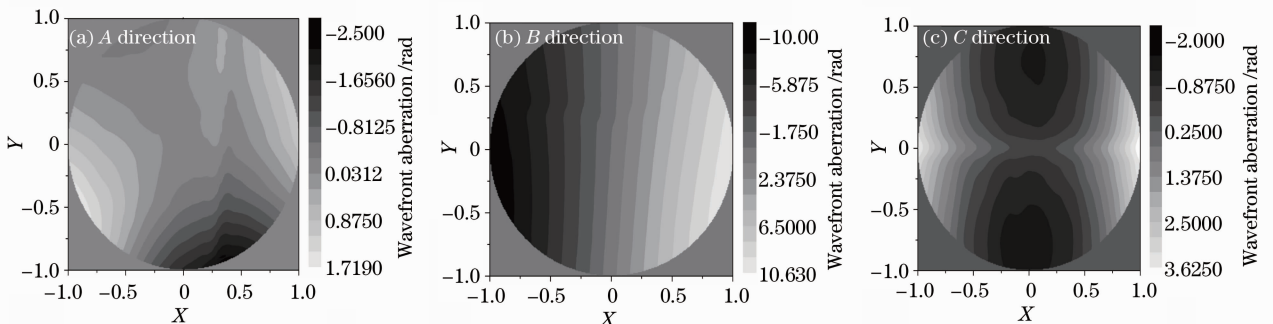


图 8 平均流场气动光学效应导致的波前像差

Fig. 8 Wavefront aberrations induced by mean flow aero-optical effect

3.3 口径效应

对于天顶角为 0 的场景,模拟计算了传输光束口径从 0.2 m 增加到 1.2 m 的情况,分析了光束质量变化以及波前像差的性质。图 9 是去倾斜光束质量随口径的变化规律,比较了无 AO 校正以及 AO 校正了离焦和像散后光束质量随口径的变化。可以看到,光束质量因子 β 值随口径增加而增加,无 AO 校正时变化规律接近线性。图 10 比较了像差中不同成分占比随口径的变化,结果表明在这个方向上,主要是离焦和像散项,倾斜项所占比重较小。

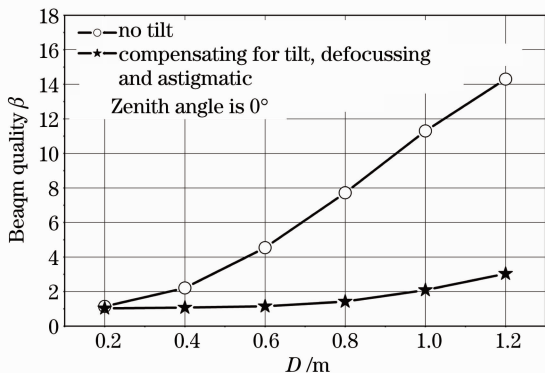


图 9 光束质量随光束口径变化

Fig. 9 Relation of beam quality and radius

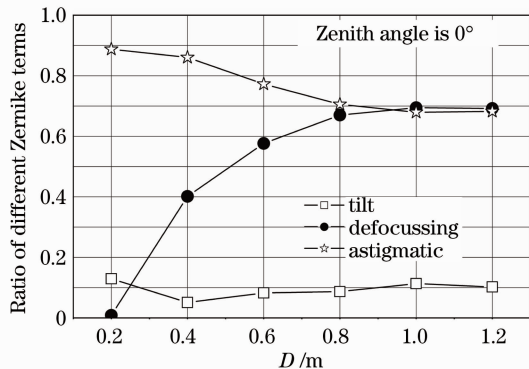


图 10 像差中成份占比随口径变化

Fig. 10 Components of aberrations versus different radius

4 结 论

通过数值模拟计算了机载光学平台整流罩附近的流场,定量分析了平均流场的气动光学效应及气动光学平均流场效应引起的波前相位的性质。结果表明,平均流场气动光学效应引起的波前像差均方根及波前像差的性质随光束传输方向改变有非常明显的变化。平均流场气动光学效应引起的波前像差主要是低阶项,其中倾斜项通常占比在 92% 以上,而倾斜、离焦、像散三项总和占比在 99% 以上。光束质量因子 β 值随口径增加而增加,无 AO 校正时

变化规律接近线性。由于气动效应对整流罩的几何结构有很强的依赖性,因此本文的结论只适用于与本文计算模型类似的结构,对于其他结构只有参考意义。

致谢 感谢计算中心的肖丽、艾志玮提供的海量数据、高性能可视化平台——Teravap,曹立强、夏芳提供的 JADLIB 接口,显著提升了可视化分析效率。

参 考 文 献

- Shlomi Amon. Effects of atmosphere turbulence and building sway on optical wireless communication systems [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(2): 129~131
- Yin Kexin, Jiang Huilin, Tong Shoufeng *et al.*. Influences of turbulent boundary layer on space-to-ground laser communication system [J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2008, **31**(3): 13~15
殷柯欣, 姜会林, 佟首峰等. 湍流边界层对空一地光通信系统性能的影响 [J]. *长春理工大学学报*, 2008, **31**(3): 13~15
- K. G. Gilbert. Lear jet boundary layer/shear layer laser propagation measurements [C]. *Progress in Astronaut and Aeronautics*, 1980. 249~260
- D. Kelsall. Optical measurements of degradation in aircraft boundary layers [C]. *Progress in Astronaut and Aeronautics*, 1980. 261~293
- Stanislav Gordeyev, Eric J. Jumper, T. Terry Ng *et al.*. Aero-optical characteristics of compressible subsonic turbulent boundary layers [C]. Orlando; 34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2003. AIAA-2003-3606
- Stanislav Gordeyev, Tim E. Hayden, Eric J. Jumper *et al.*. Aero-optical and hot-wire measurements of the flow around the hemispherical turret with a flat window [C]. Chicago; 41st AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2010. AIAA-2010-4492
- Victor Quan, Sergio E. Rodriguez. Simple models of optical phase distortion for shock waves and turbulent boundary and shear layers [C]. *SPIE*, 1998, **3268**: 178~179
- John E. Pond, George W. Sutton. Aero-optic performance of an aircraft Forward-facing optical turret [J]. *J. Aircraft*, 2006, **43**(3): 600~607
- H. C. Yee. A Class of High-Resolution Explicit and Implicit Shock-Capturing Methods [M]. Springfield; National Aeronautics and Space Administration, 1989. 9~11
- R. Peyret, T. D. Taylor. Computational Methods for Fluid Flow [M]. New York; Springer Verlag, 1983. 110~111
- K.-Y. Chien. Predictions of channel and boundary-layer flows with a low-reynolds-number turbulence model [J]. *AIAA Journal*, 1982, **20**(1): 33~38
- Ji Xiaoling, Lü Baida. Transformation properties of super-Gaussian beams passing through an astigmatic lens [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(1): 9~11
季小玲, 吕百达. 像散透镜对超高斯光束的变换特性 [J]. *激光技术*, 2002, **26**(1): 9~11
- R. J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 207~211

栏目编辑:李文喆