

## 转塔气动光学效应的自适应校正分析

陈勇, 袁强, 姚向红\*, 谢伟明, 李玉栋

中国空气动力研究与发展中心设备设计与测试技术研究所, 四川 绵阳 621000

**摘要** 转塔绕流会带来严重的气动光学效应影响, 从而限制机载激光武器性能的有效发挥, 故转塔气动光学效应的抑制研究具有现实的迫切性。采用高精度数值仿真方法, 并结合风洞验证试验, 以提供高置信度的时间序列波前数据。据此, 建立校正残差在空域中随校正阶数的变化曲线与散点图, 用于自适应光学校正的定量评估。研究结果表明: 转塔流场中存在脱落涡街等复杂结构, 当马赫数较高时还会出现激波; 顶视气动光学效应最强, 前视稳态像差含量高, 顶视和后视动态像差占比大, 激波结构会增加波前的动态像差占比; 前视可以取得很好的自适应光学校正效果, 而顶视校正难度较大, 对自适应光学校正的变形镜拟合波面能力要求较高。因此, 转塔气动光学效应的抑制建议采用自适应光学校正与流动控制结合等联合抑制方法。

**关键词** 大气光学; 自适应光学校正; 气动光学效应; 光学转塔; 校正阶数; 波前重构

中图分类号 O436; O355

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2401004

## Adaptive Correction Analysis of Aero-Optical Effects of a Turret

Chen Yong, Yuan Qiang, Yao Xianghong\*, Xie Weiming, Li Yudong

Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center,  
Mianyang 621000, Sichuan, China

**Abstract** The flow around the turret causes serious aero-optical effects, consequently limiting the effective performance of airborne laser weapons. Therefore, researching the suppression of aero-optical effects of a turret has become a real urgency. In this paper, high-precision numerical simulation methods are used, and wind-tunnel verification experiments are conducted, to provide high-confidence time-series wavefront data. On this basis, the curve and scatter plot of correction residual variation with correction order in the airspace are developed for quantitative evaluation of adaptive optics correction. The results show that complex structures, such as shedding vortex streets, are observed in the flow field around the turret, and shock waves also appear when the Mach number is large. The aero-optical effect of the top view is the strongest, while the steady-state aberration of the front view accounts for a large share of the whole. Moreover, the dynamic aberrations of the top view and the rear view assume large proportions, and shock waves further increase the dynamic aberration ratios of the wavefront. The front view can achieve a satisfactory adaptive optics correction effect, while the correction of the top view is difficult as it requires a high wavefront fitting ability of the deformation mirror for adaptive optics correction. Therefore, joint suppression methods, such as combining adaptive optics correction and flow control, are recommended to suppress aero-optical effects of a turret.

**Key words** atmospheric optics; adaptive optics correction; aero-optical effect; optical turret; correction order; wavefront reconstruction

## 1 引言

机载激光 (ABL) 武器是以飞机作为移动作战平台并深受重视的新概念武器系统之一, 具有机动性强、弹仓深和受低空稠密大气层衰减小等优点, 有望改变未来的空战模式<sup>[1-4]</sup>。转塔 (半球体 + 圆柱体) 是机载

激光武器激光输出与光电信号收发的重要窗口形式, 结构简单, 能够进行周向与俯仰旋转, 具有广域视场。然而, 转塔绕流流场结构复杂, 存在马蹄涡、分离剪切层、局部超声速区、局部激波、背风区角涡和背风区脱落涡街等。流场介质的折射率系数高度非均匀且存在高频脉动, 当光在其中传输时, 光束会发生偏折、抖动、

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-05-27; 录用日期: 2022-06-21

通信作者: \*yxh\_nust@163.com

波前畸变、远场光斑弥散和峰值强度降低等强烈的气动光学效应,导致光电探测的目标图像抖动和模糊,以及到靶激光峰值强度降低,从而严重制约机载激光武器性能的有效发挥<sup>[5-12]</sup>。因此,开展转塔气动光学效应的特性与抑制等研究是非常必要的。

转塔气动光学效应可以采用流动控制或者自适应光学(AO)校正方法进行抑制。转塔气动光学效应主要由激波、分离剪切层和大尺度脱落涡街结构产生,故流动控制技术主要是抑制或延迟转塔绕流分离、减弱或消除局部超声速区、破碎大尺度涡街结构和提高流动拟周期性,但因转塔流动复杂,各种因素综合干扰,进而抑制常常难以取得预期效果<sup>[13-15]</sup>。自适应光学校正依靠变形镜复原波面,光束在穿过流场前叠加与气动光学效应共轭的波前像差,从而与气动光学效应相互抵消,改善出射光束质量。自适应光学校正在大气光学效应方面取得了巨大成功,但气动光学效应脉动频率可覆盖几赫兹到百千赫兹量级,波面结构小到毫米大到米量级,这给自适应光学校正的响应带宽和变形镜复原波面的能力带来了巨大挑战,一般的观点是自适应光学校正能力较气动光学效应校正所需带宽低1~2个数量级<sup>[16-20]</sup>。因此,目前在转塔气动光学效应抑制方面仍无突破性进展,甚至对转塔气动光学效应校正究竟需要多高带宽和多少校正阶数,或者现有自适应光学校正系统能否取得部分校正效果,仍然缺乏足够的认识。

本文针对转塔气动光学效应问题,采用高精度数值仿真方法,结合风洞静态压力测量与热线风速仪测速等验证试验,获取高置信度时间序列波前数据,开展转塔气动光学效应的自适应光学校正评估分析。流场数值仿真采用双时间步 LU-SGS 时间推进技术<sup>[21]</sup>和 IDDES 耦合 J-B 模型的复杂湍流数值仿真技术<sup>[22-24]</sup>,并重点发展了对流通量五阶精度 WENO 格式<sup>[25]</sup>和黏性通量六阶精度中心差分格式等高精度插值方法,以确保时间序列波前数据的精度与置信度。基于时间序列波前数据,建立波前畸变校正残差分布曲线与散点图,并据此开展自适应光学校正评估分析,给出波前畸变校正所需校正阶数,或者在一定校正阶数下的校正效果等。本研究有助于机载激光武器气动光学效应的自适应光学校正领域的评估分析,并为机载激光武器气动光学问题探寻可能的解决方案。

## 2 流场高精度数值仿真方法

流场仿真采用高精度方法获取高置信度的时间序列波前数据,其中时间推进采用双时间步 LU-SGS 方法<sup>[21]</sup>,复杂湍流数值仿真采用改进的延迟脱体涡 IDDES 耦合 J-B 模型方法<sup>[22-24]</sup>,并重点发展了高精度 WENO 格式<sup>[25]</sup>和中心差分格式来替代低阶精度 MUSCL 格式等用于对流通量和黏性通量的插值计算,以提高流场数值仿真精细化程度和数据结果精度。

### 2.1 低阶精度 MUSCL 格式

在曲线坐标系下,Navier-Stokes 方程可以写成

$$\frac{\partial(J^{-1}Q)}{\partial t} + \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} + \frac{\partial G}{\partial \eta} + \frac{\partial H}{\partial \zeta} \right) = \left( \frac{\partial F_v}{\partial \xi} + \frac{\partial G_v}{\partial \eta} + \frac{\partial H_v}{\partial \zeta} \right) + S, \quad (1)$$

式中: $F$ 、 $G$ 和 $H$ 是三个曲线坐标方向( $\xi$ 、 $\eta$ 、 $\zeta$ )的对流通量; $F_v$ 、 $G_v$ 和 $H_v$ 是三个曲线坐标方向的黏性通量; $S$ 是源项; $J^{-1}$ 是通过对坐标变换的行列式取倒数得到的,对应网格单元的体积; $Q$ 为流场守恒型变量; $t$ 为物理时间。以 $\xi$ 方向的对流通量项为例,采用矢通量分裂格式离散,在界面上的正负通量采用不同方向上的变量插值计算,即

$$\left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \right)_i = F^+(q_{i+1/2}^L) + F^-(q_{i+1/2}^R) - F^+(q_{i-1/2}^L) - F^-(q_{i-1/2}^R), \quad (2)$$

式中: $F^\pm$ 是正负矢通量,具体形式由所选择的矢通量分裂格式决定,原始变量 $q$ 则需要利用界面插值格式计算; $q_{i+1/2}^L$ 和 $q_{i+1/2}^R$ 是原始变量在界面 $i+1/2$ 的左极限值和右极限值; $q_{i-1/2}^L$ 和 $q_{i-1/2}^R$ 是原始变量在界面 $i-1/2$ 的左极限值和右极限值。基于 minmod 限制器的 MUSCL 插值格式为

$$q_{i+1/2}^L = q_i + \frac{1}{4}[(1-k)\bar{\Delta}_- + (1+k)\bar{\Delta}_+], \quad (3)$$

式中: $\bar{\Delta}$ 采用 minmod 限制器进行限制;参数 $k$ 用于调节插值格式精度,其取值范围为 $-1 \leq k \leq 1$ ,最高为三阶精度。

### 2.2 五阶精度 WENO 格式

在单元界面中心的左极限值 $q_{i+1/2}^L$ 采用五阶精度 WENO 格式插值为

$$q_{i+1/2}^L = \frac{1}{6}\omega_0(2q_i + 5q_{i+1} - q_{i+2}) + \frac{1}{6}\omega_1(-q_{i-1} + 5q_i + 2q_{i+1}) + \frac{1}{6}\omega_2(2q_{i-2} - 7q_{i-1} + 11q_i), \quad (4)$$

式中: $\omega_0$ 、 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 是非线性权值。利用对称性,右极限值 $q_{i+1/2}^R$ 可以得到类似的表达式。

### 2.3 六阶精度中心差分格式

黏性项用中心差分格式离散,用六阶精度中心差分格式计算界面上的黏性通量。以 $\xi$ 方向的黏性项为例,采用二阶中心差分格式,得到单元界面上的黏性通量

$$\left( \frac{\partial F_v}{\partial \xi} \right)_i = F_{v,i+1/2}(q_{i+1/2}, q_{x,i+1/2}, \dots) - F_{v,i-1/2}(q_{i-1/2}, q_{x,i-1/2}, \dots), \quad (5)$$

式中: $q_{i+1/2}$ 和 $q_{x,i+1/2}$ 是在界面 $i+1/2$ 上的原始变量和空间导数值; $q_{i-1/2}$ 和 $q_{x,i-1/2}$ 是在界面 $i-1/2$ 上的

原始变量和空间导数值。在计算单元界面上的黏性通量时,需要用到原始变量  $q$  及其空间导数  $q_x, q_y$  和  $q_z$  等,采用六阶精度的中心差分格式插值计算。

### 3 自适应光学校正评估方法

#### 3.1 波前像差

设光线沿  $z$  轴传输,利用几何光学追迹法沿路径积分得到在时刻  $t$  的光程差  $V_{\text{OPD}}(x, y, t)$ ,其表达式为

$$V_{\text{OPD}}(x, y, t) = \int_0^L [n(x, y, z, t) - n_0] dz, \quad (6)$$

式中: $L$ 是光线在流场中的传输距离; $n(x, y, z, t)$ 是有流动扰动的流场介质折射率分布; $n_0$ 是无流动干扰的折射率值。

在气动光学效应的自适应光学校正中,波前整体倾斜可以采用快反镜进行实时修正。如不特别说明,在以下校正分析中,只考虑对高阶像差的校正,波前不包含整体倾斜。波前整体倾斜记为  $\alpha_x(t)x + \alpha_y(t)y$ ,其中系数  $\alpha_x(t)$  和  $\alpha_y(t)$  分别代表波前沿  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的波前倾角,能够采用最小二乘法进行计算。

#### 3.2 校正残差随校正阶数的变化

自适应光学校正系统在进行波面校正时,受变形镜的单元数和拟合波前像差能力的影响,通常只对部分低阶像差进行校正。Zernike 多项式用于  $V_{\text{OPD}}(x, y, t)$  重构,其每一项有明确的物理含义,分别代表不同类型的像差。波前数据  $V_{\text{OPD}}(x, y, t)$  的 Zernike 多项式重构为

$$V_{\text{OPD}}(x, y, t) = \sum_{k=0}^K a_k(t) z_k(x, y), \quad (7)$$

式中: $K$ 是采用的 Zernike 多项式阶数,本文取  $K=128$ ;  $a_k(t)$  是第  $k$  阶像差的加权系数; $z_k(x, y)$  是 Zernike 多项式。 $k=0, 1, 2$  分别对应常值、沿  $x$  轴方向的倾斜像差和沿  $y$  轴方向的倾斜像差。在本文波前畸变的自适应光学校正分析中,波前扣除了常值与倾斜像差,故从第  $k=3$  阶开展校正分析。

像差阶数越高,波面中含有的空间小尺度结构越多,变形镜拟合波面的难度越大。设光程差  $V_{\text{OPD}}(x, y, t)$  由  $k=0, 1, 2, \dots, k_1, \dots, K$  阶像差组成,校正前  $k_1$  阶(含  $k_1$  阶)像差后的校正残差  $V'_{\text{OPD, rms}}(t, k_1)$  的表达式为

$$V'_{\text{OPD, rms}}(t, k_1) = \sqrt{\frac{1}{I \times J} \sum_{(i,j)}^{(I,J)} [V_{\text{OPD, error}}(x_i, y_j, t, k_1) - \bar{V}_{\text{OPD, error}}(x, y, t, k_1)]^2}, \quad (8)$$

$$V_{\text{OPD, error}}(x, y, t, k_1) = V_{\text{OPD}}(x, y, t) - \sum_{k=0}^{k_1} a_k(t) z_k(x, y). \quad (9)$$

有  $N$  帧波前数据  $V_{\text{OPD}}(x, y, t_n) (n=1, 2, \dots, N)$ , 单次校正残差不具有普适性,故用统计平均残差  $V_{\text{OPD, rms}}(k_1)$  作为最终的校正残差,其表达式为

$$V_{\text{OPD, rms}}(k_1) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V'_{\text{OPD, rms}}(t_n, k_1). \quad (10)$$

## 4 讨论与分析

对转塔气动光学效应开展自适应光学校正评估分析,转塔由球冠和圆柱组成,热线风速仪监测点  $P$  和静态压力测压孔在球冠表面的分布位置如图 1 所示。在数值仿真中,用双时间步 LU-SGS 方法先进行 2 万步的流场迭代,在此基础上,继续开展 2 万步的流场与光

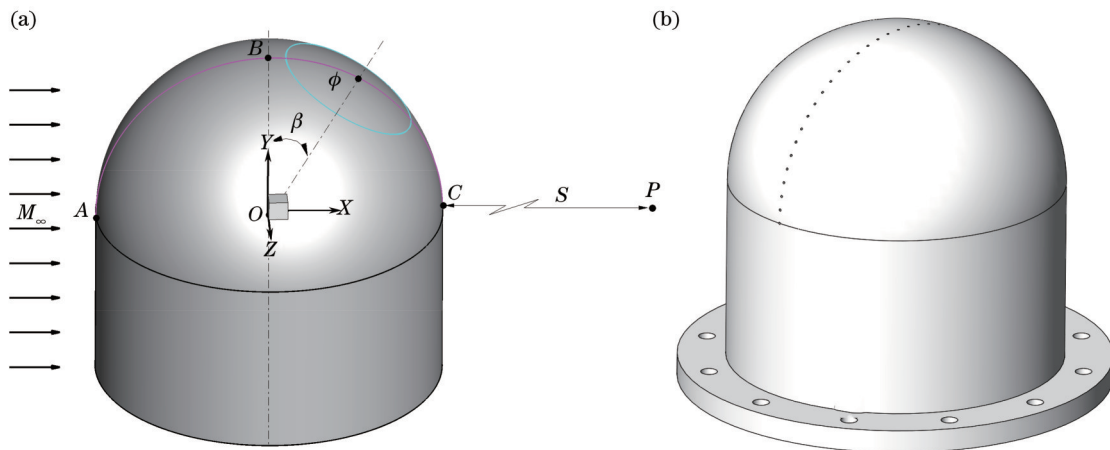


图 1 转塔模型。(a)模型示意图;(b)测压孔分布

Fig. 1 Turret model. (a) Schematic diagram of model; (b) distribution of pressure measurement holes



场的耦合迭代,每次外迭代用 10 步内迭代,故 40 万步内迭代共计可获取约 2 万帧瞬态时间序列波前数据。涉及的相关参数为:时间步长为  $\Delta t = 8.4 \mu\text{s}$ ,总积分时间为  $t_0 = 0.168 \text{ s}$ ,马赫数  $M$  的取值范围为  $0.30 \sim 0.70$ ,雷诺数  $Re$  的取值范围为  $0.71 \times 10^6 \sim 1.65 \times 10^6$ (参考长度  $D$  设定),转塔直径为  $D = 140 \text{ mm}$ ,转塔圆柱高度为  $H = 70 \text{ mm}$ ,热线风速仪监测点  $P$  距离转塔后端  $C$  点的距离  $S$  为  $210 \text{ mm}$ ,  $280 \text{ mm}$  或  $350 \text{ mm}$ ,光束孔径  $\phi$  为  $58 \text{ mm}$ ,波长为  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ,天顶角  $\beta$  为  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  或  $-45^\circ$ 。

#### 4.1 马赫数 $M=0.70$ 时流场结果验证

主要采用高精度数值仿真方法获取高帧频时间序列波前数据,并据此开展气动光学效应的自适应光学

校正分析。为确保时间序列波前数据具备高的置信度,在中国空气动力研究与发展中心大小为  $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$  的风洞上开展了  $M=0.70$  的静态压力测量与热线风速仪测速试验,用于流场数值仿真结果的对比较证,以证明仿真结果的可靠性。

图 2 给出了低阶精度 MUSCL 格式与五阶精度 WENO 格式的转塔绕流  $Q$  值等值面图。WENO 格式可以给出更精细化的流场结构特征,而 MUSCL 过大的数值黏性抑制了尾迹流动小尺度结构的发展。分离剪切层、激波、角涡和颈项涡等相互作用,在转塔尾迹区形成复杂的脱落涡街结构,该结构随时间随机变化,给光束传输带来不利的流场条件,必然产生气动光学效应影响。

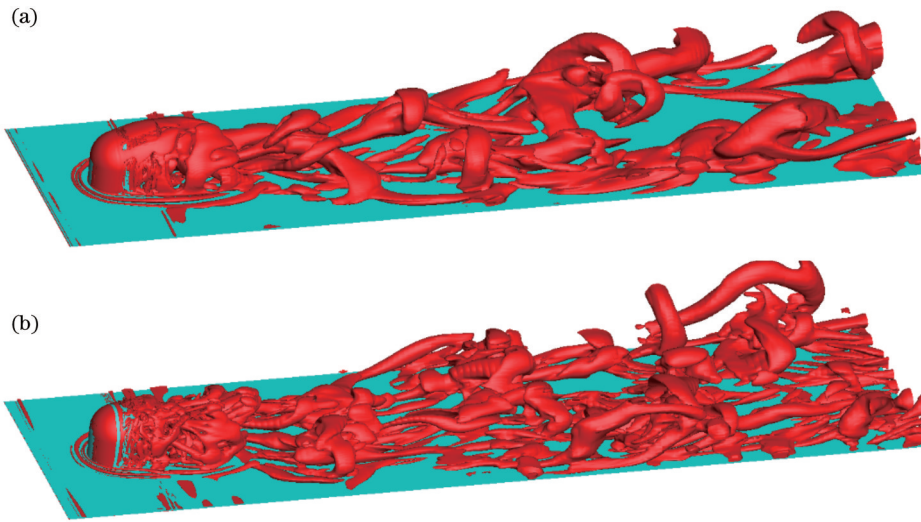


图 2  $Q$  值等值面。(a) MUSCL; (b) WENO

Fig. 2 Isosurface of  $Q$  value. (a) MUSCL; (b) WENO

图 3 给出了 MUSCL 和 WENO 格式在近壁与中截面上的马赫数分布。在模型顶部,出现局部超声速

区,此处马赫数  $M$  高达 1.20 以上,并产生强间断激波结构, WENO 格式的激波结构更为明显,强度更强。

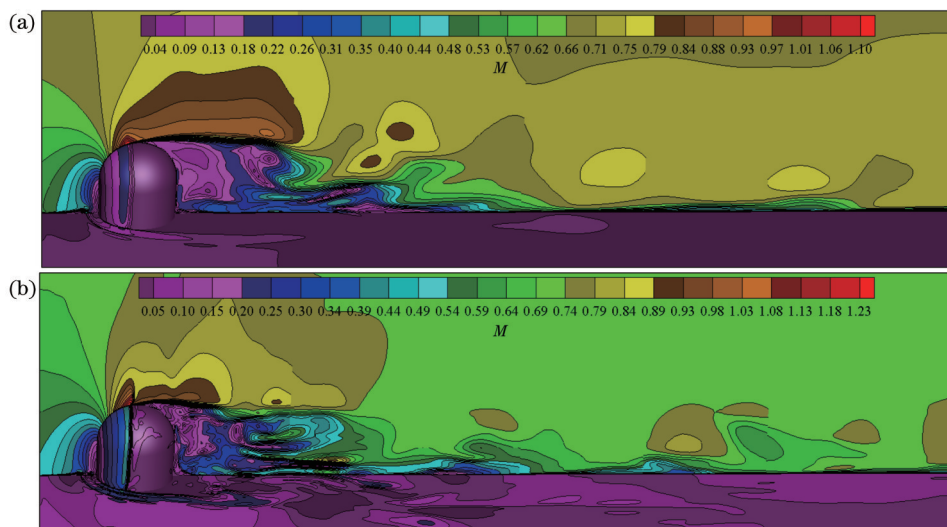


图 3 马赫数。(a) MUSCL; (b) WENO

Fig. 3 Mach number. (a) MUSCL; (b) WENO

激波前后的流场参数如密度有较大的密度梯度,激波位置还会随时间前后移动,同时存在强间断分离剪切层结构。因此,当光束沿天顶方向传输时,激波与分离剪切层必然产生巨大的气动光学效应影响。

图 4 给出了经过 A、B、C 三点的剖线的时均静态压力系数分布,其中  $\theta=0^\circ$  对应半球体最前端 A 点,  $\theta=180^\circ$  对应半球体最后端 C 点,风洞静态压力测量试验沿剖面共布置了 37 个测压孔,采用压力扫描阀获取静态压力。在转塔迎风区,WENO 格式和 MUSCL 格式的数值仿真与风洞试验的时均静态压力分布基本吻合。在转塔顶部激波与分离位置附近,数值仿真与风洞试验数据存在一些差异,风洞试验的负压区靠后,有更低的负压值。在背风的完全分离区中,数值仿真与风洞试验的结果均趋向于常值,二者的差异减小。总体上,WENO 格式较 MUSCL 格式可给出更准确的负压区位置,与风洞试验数据吻合得更好。

图 5 是转塔尾迹区监测点 P 处速度分量 V 的功率谱分布(PSD)曲线,其中数值仿真监测点与转塔后端的距离为 280 mm,热线风速仪与监测点的距离为 210 mm 或 350 mm。热线风速仪的采样帧频为

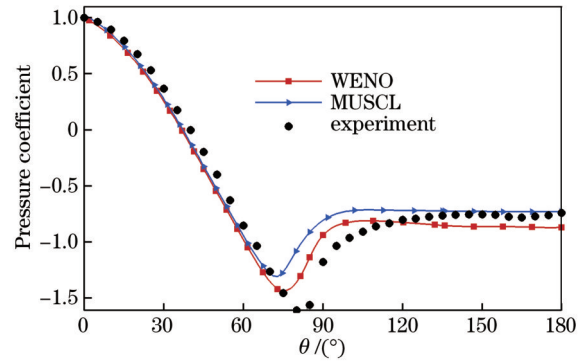


图 4 经过 A、B、C 三点的剖线上的压力系数比较  
Fig. 4 Comparison of pressure coefficients on profile line passing through points A, B and C

20 kHz,进行 10 kHz 的低通滤波,总采集时间为 5 s。转塔尾迹流动存在大尺度占主导作用的脱落涡街结构,对应主频在 WENO 格式、MUSCL 格式、热线风速风洞试验下依次为 480 Hz、200 Hz 和 470 Hz,WENO 格式与风洞试验更为接近,主频 480 Hz 对应的斯特劳哈尔数为  $Sr=fD/U \approx 0.29$ ,其中  $U=233$  m/s, $f$  为频率。

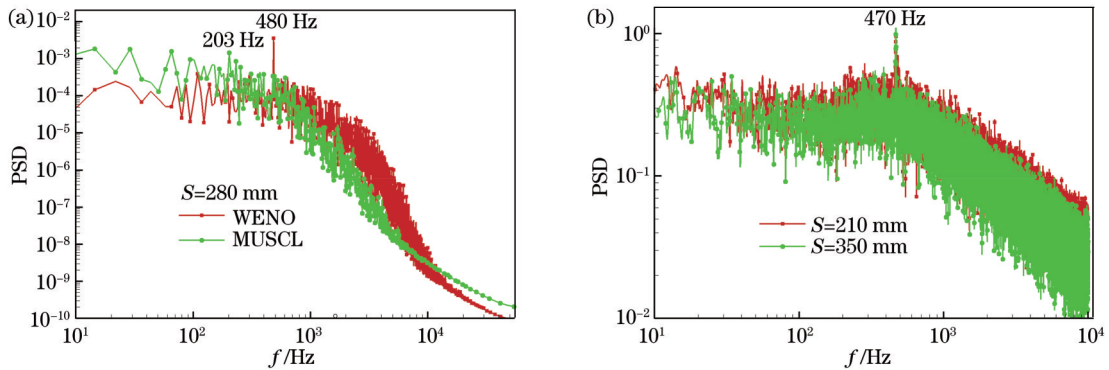


图 5 监测点 P 处速度 V 的功率谱分布。(a)数值模拟;(b)试验  
Fig. 5 Power spectrum distribution of velocity V at monitoring point P. (a) Simulation; (b) experiment

#### 4.2 波前自适应光学校正分析

波前自适应光学校正分析考察了  $\beta$  为  $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$  的前视、顶视和后视三个探测方向,马赫数  $M$  的取值范围为  $0.30 \sim 0.70$ 。4.1 节的流场分析表明,WENO 格式具有更高的结果精度,并且能够更精细化地模拟流场结构,故在不特别说明的情况下,数值仿真结果均为 WENO 格式结果,波前也不包含波前整体倾斜。

图 6 给出了  $\beta=0^\circ$  和  $M=0.70$  时有无稳态像差的 5 帧时间序列波前。图 6(a)是用取两万帧波前平均获取的稳态像差分布。图 6(b)是含有稳态像差的 5 帧时间序列波前。图 6(c)是扣除稳态像差的 5 帧时间序列波前。图 7 给出了波前校正残差  $V_{OPD, rms}$  随马赫数的变化和稳态像差所占百分比。波前分布随时间动态变化,减去稳态像差后,波前在空间分布和量级上均会发生改变。 $V_{OPD, rms}$  在马赫数为  $M \leq 0.60$  时近似与  $M$  呈

线性关系,顶视气动光学效应最强,前视和后视相当。当  $M$  在  $0.60 \sim 0.70$  范围内时,顶视和后视的  $V_{OPD, rms}$  急剧增加,这主要是炮塔顶部出现超声速区和激波后,对顶视和后视带来直接影响造成的。稳态像差所占百分比<sup>[26]</sup>随马赫数的增加而降低,稳态像差占比从大到小顺序为前视、后视、顶视,转塔局部超声速区和激波会急剧降低稳态像差比值,从而对自适应光学校正带来不利影响。

图 8 给出了  $\beta=0^\circ$  和  $M=0.70$  时的 5 帧时间序列波前,以及基于 Zernike 多项式的重构波前(不包含整体倾斜)。图 9 是 Zernike 多项式系数和能量占比分布。在进行波前重构前,利用最小二乘法扣除了波前整体倾斜,这里只对  $k \geq 3$  的高阶波前像差进行重构与校正分析,选取阶数为  $k=128$ 。重构表明,采用  $k=128$  的 Zernike 多项式能够基本重构波面复杂形状,重



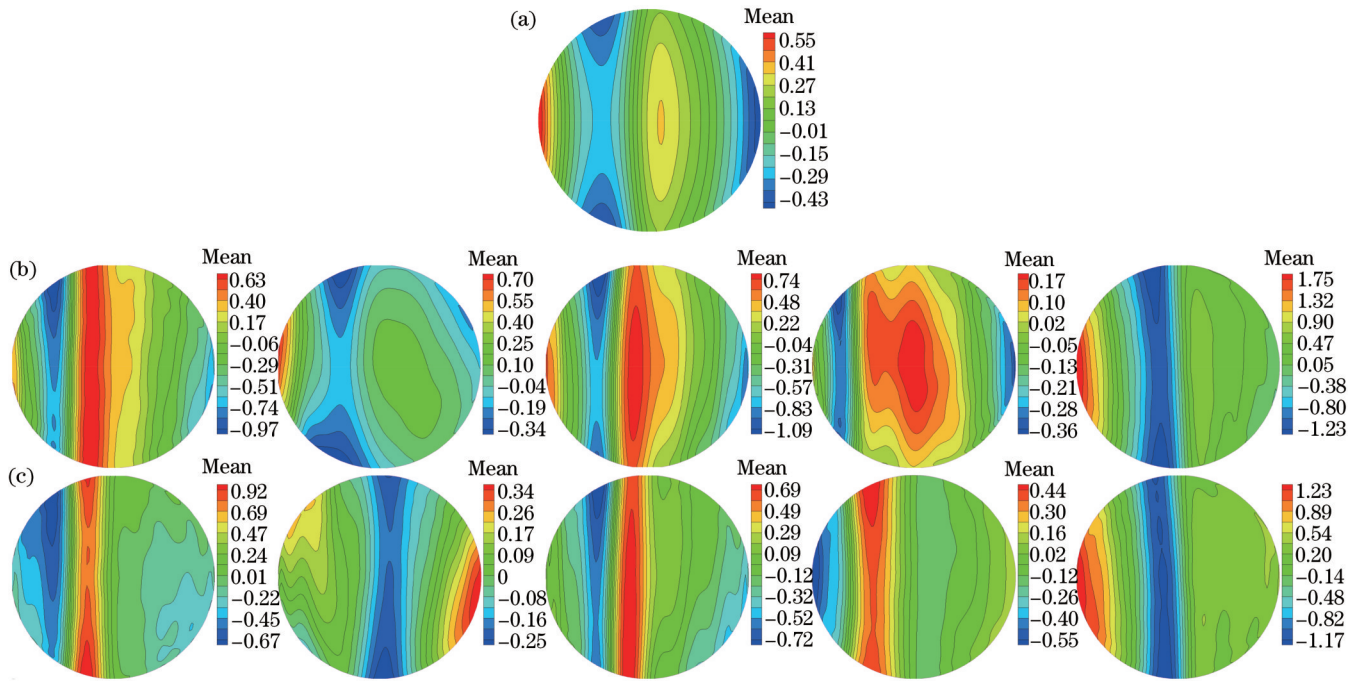


图 6 5 帧时间序列波前。(a) 稳态像差; (b) 含有稳态像差的 5 帧时间序列波前; (c) 扣除稳态像差的 5 帧时间序列波前  
 Fig. 6 5-frame time series wavefront. (a) Steady-state aberration; (b) 5-frame time series wavefront with steady-state aberration; (c) 5-frame time series wavefront without steady-state aberration

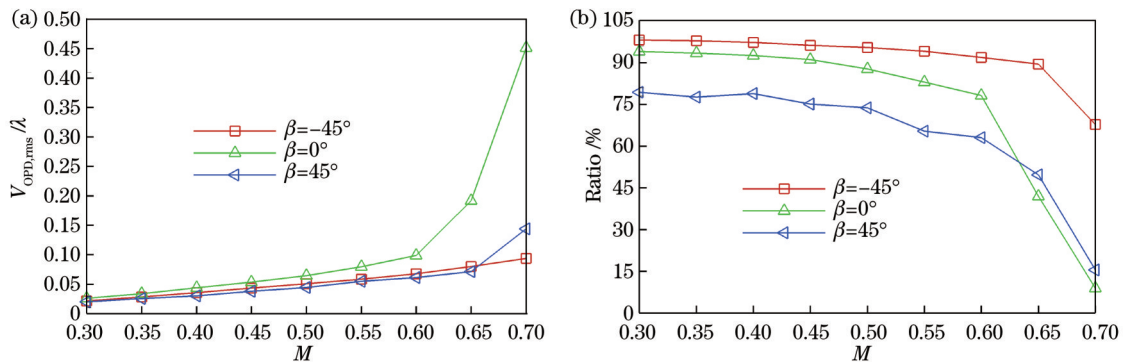


图 7 波前差随马赫数的变化。(a)  $V_{OPD,rms}$ ; (b) 稳态像差百分比  
 Fig. 7 Wavefront difference varying with Mach number. (a)  $V_{OPD,rms}$ ; (b) steady-state aberration percentage

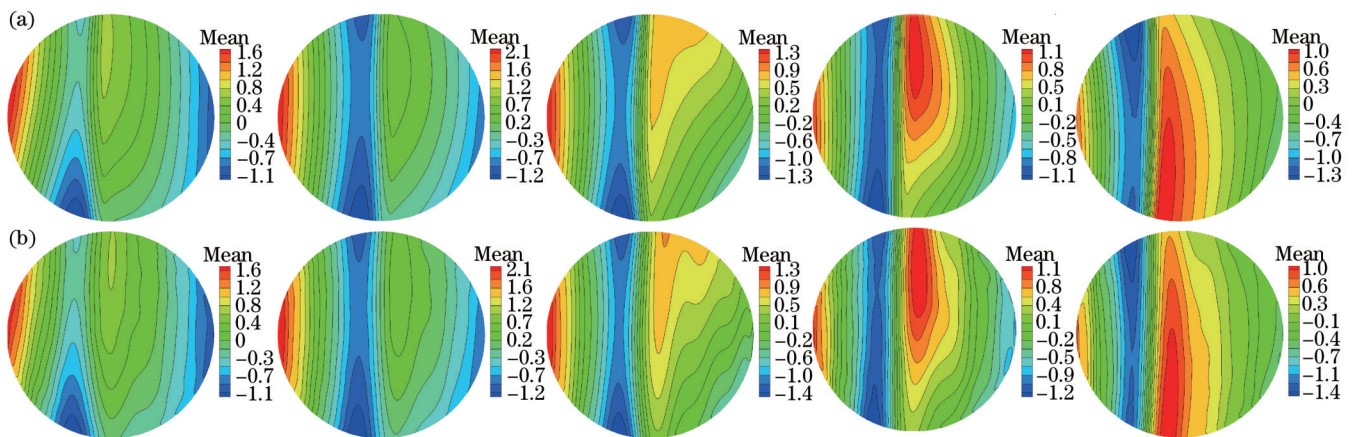


图 8 5 帧时间序列波前。(a) 原始波前; (b) 重构波前  
 Fig. 8 5-frame time series wavefront. (a) Original wavefront; (b) reconstructed wavefront

构波前在空间分布或量级上均与原始波前差异不明显。Zernike 多项式加权系数随阶数的增加而降低,波

前主要以低阶像差为主,其中前 3~5 阶的低阶像差能量占比约 99%。

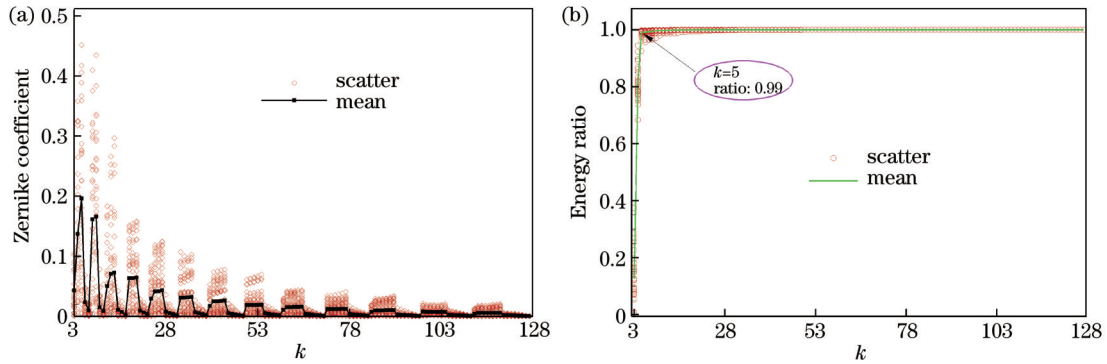


图 9 Zernike 系数和能量占比。(a) Zernike 系数;(b)能量占比  
Fig. 9 Zernike coefficient and energy ratio. (a) Zernike coefficient; (b) energy ratio

图 10 给出了顶视方向  $\beta=0^\circ$  的校正残差随校正阶数的变化,校正残差随校正阶数的增加而减小,随马赫数  $M$  的增加而增加,在  $M$  为 0.60~0.70 范围内急剧增加。图 11 给出在校正前 3~5 阶像差之后的校正残差和在校正残差  $V_{OPD,rms}=0.03\lambda$  时所需的校正阶数。无论是校正残差或所需校正阶数均满足排序:顶视、后

视、前视。对于顶视情况,校正前 3~5 阶像差之后的残差最高达  $0.35\lambda$ ,而残差低至  $0.03\lambda$  所需的校正阶数接近 90。因此,顶视波面复杂,变形镜拟合波面难度最大,尤其转塔顶部出现超声速区和激波之后会进一步增加变形镜拟合波面的难度。

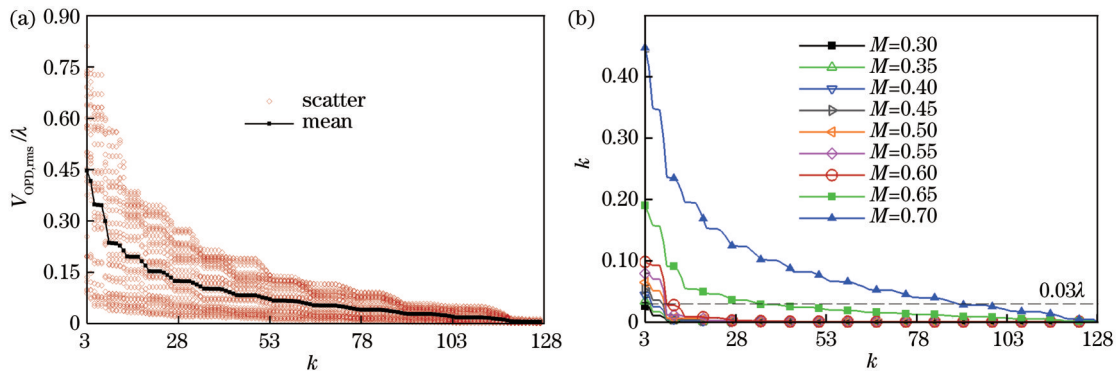


图 10 不同  $M$  下波前校正残差随 Zernike 阶数的变化。(a) 0.70;(b) 0.30~0.70  
Fig. 10 Wavefront correction residual varying with Zernike order under different  $M$ . (a) 0.70; (b) 0.30-0.70

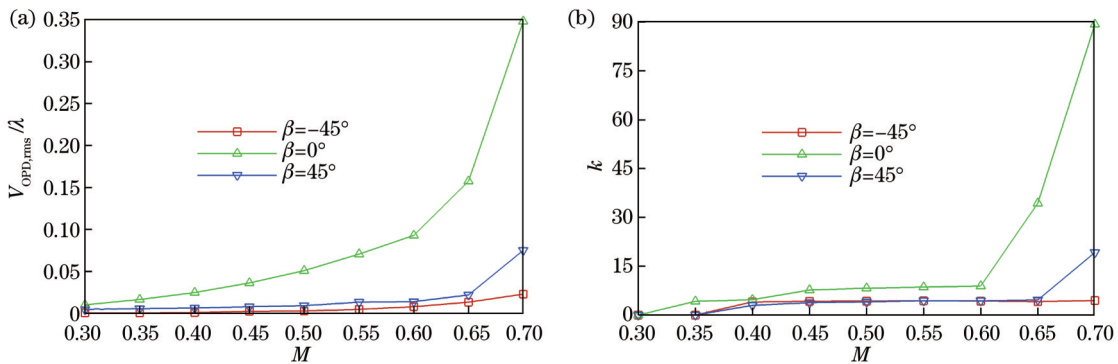


图 11 校正残差定量结果。(a)  $k=5$ ;(b)  $V_{OPD,rms}=0.03\lambda$   
Fig. 11 Quantification result of correction residual. (a)  $k=5$ ; (b)  $V_{OPD,rms}=0.03\lambda$

## 5 总 结

开展转塔气动光学效应的自适应光学校正评估分

析,给出波前自适应光学校正所需校正阶数,或者在一定校正阶数下的校正效果预估。以高精度数值仿真方法为主,重点发展了 5 阶精度 WENO 格式和 6 阶精度

中心差分格式,并结合静态压力测量和热线风速仪测速等风洞试验进行流场结果验证,以确保时间序列波前数据的置信度。研究表明:转塔流场结构复杂,在马赫数较高时还会在球冠顶部出现超声速区和激波,会进一步增加流场结构复杂性;顶视气动光学效应最强,前视稳态像差含量高,而顶视和后视动态像差占比大,激波等会进一步增加波前的动态像差占比;前视可以取得很好的自适应光学校正效果,而顶视校正难度最大,在马赫数为 $M=0.70$ 的情况下,校正残差 $V_{OPD, rms}$ 可达到 $0.03\lambda$ ,顶视所需校正阶数接近90,或者在变形镜具备3~5阶的波面拟合能力下,校正残差 $V_{OPD, rms}$ 为 $0.35\lambda$ 。因此,转塔气动光学效应对自适应光学校正要求较高,为更有效地抑制气动光学效应影响,有必要发展自适应光学校正与流动控制联合的抑制方法。

## 参 考 文 献

- [1] Kalisky Y, Kalisky O. Applications and performance of high power lasers and in the battlefield[J]. *Optical Materials*, 2011, 34(2): 457-460.
- [2] Jumper E J, Gordeyev S, Cavalieri D, et al. Airborne Aero-Optics Laboratory-Transonic (AAOL-T)[C]//53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, January 5-9, 2015, Kissimmee, Florida. Virginia: AIAA Press, 2015: 675.
- [3] de Lucca N G, Gordeyev S, Jumper E J, et al. Effects of acoustic waves on optical wavefronts in flight on AAOL-T[C]//48th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June 5-9, 2017, Denver, Colorado. Virginia: AIAA Press, 2017: 3832.
- [4] Kalensky M, Gordeyev S, Jumper E J. In-flight studies of aero-optical distortions around AAOL-BC[C]//AIAA Aviation 2019 Forum, June 17-21, 2019, Dallas, Texas. Virginia: AIAA Press, 2019: 3253.
- [5] Gordeyev S, Jumper E. Fluid dynamics and aero-optical environment around turrets[C]//40th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June 22-25, 2009, San Antonio, Texas. Virginia: AIAA Press, 2009: 4224.
- [6] Gordeyev S, Jumper E J. Fluid dynamics and aero-optics of turrets[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2010, 46(8): 388-400.
- [7] Morrida J, Gordeyev S, de Lucca N G, et al. Aero-optical investigation of transonic flow features and shock dynamics on hemisphere-on-cylinder turrets[C]//53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, January 5-9, 2015, Kissimmee, Florida. Virginia: AIAA Press, 2015: 676.
- [8] Arad E, Weidenfeld M. Aero-optic calculations of a spherical turret at transonic flow[C]//55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, January 9-13, 2017, Grapevine, Texas. Virginia: AIAA Press, 2017: 0537.
- [9] 关奇, 杜太焦, 陈志华, 等. 亚声速球/柱尾流对激光传输影响的数值模拟[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(9): 0906005.  
Guan Q, Du T J, Chen Z H, et al. Numerical simulation of laser propagation effects through subsonic hemispherical/cylindrical wake[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0906005.
- [10] 董航, 徐明. 转塔气动光学效应时空特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1001002.  
Dong H, Xu M. Space-time characteristics of the aero-optical effect around turrets[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1001002.
- [11] Kamel M S, Wang K, Wang M. Numerical prediction of aero-optical distortions by transonic flow over a cylindrical turret[C]//AIAA Scitech 2019 Forum, January 7-11, 2019, San Diego, California. Virginia: AIAA Press, 2019: 472.
- [12] Lu D J, Zhang K, Dong H, et al. Space-time characteristics of aero-optical effect around conformal turrets[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 1022-1032.
- [13] Gordeyev S, Jumper E, Vukasinovic B, et al. Hybrid flow control of a turret wake, part II: aero-optical effects [C]//48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 4-7, 2010, Orlando, Florida. Virginia: AIAA Press, 2010: 438.
- [14] Reynolds T, Saunders D, Presoorf T, et al. Effect of geometric modifications on the flow field of a turret[C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 9-12, 2012, Nashville, Tennessee. Virginia: AIAA Press, 2012: 869.
- [15] Ding H L, Yi S H, Zhao X H, et al. Experimental investigation on aero-optical mitigation of hypersonic optical dome using microvortex generators[J]. *AIAA Journal*, 2019, 57(6): 2653-2658.
- [16] 姜文汉. 自适应光学技术[J]. *自然杂志*, 2006, 28(1): 7-13.  
Jiang W H. Adaptive optical technology[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, 28(1): 7-13.
- [17] 姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900106.  
Jiang W H, Zhang Y D, Rao C H, et al. Progress on adaptive optics of institute of optics and electronics, Chinese academy of sciences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900106.
- [18] 谢文科, 马浩统, 高穹, 等. 气动光学自适应校正研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 090001.  
Xie W K, Ma H T, Gao Q, et al. Research advances in aero-optics adaptive correction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 090001.
- [19] Burns W R, Jumper E J, Gordeyev S. A latency-tolerant architecture for airborne adaptive optic systems[C]//53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, January 5-9, 2015, Kissimmee, Florida. Virginia: AIAA Press, 2015: 679.
- [20] Burns W R, Jumper E J, Gordeyev S. A robust modification of a predictive adaptive-optic control method for aero-optics[C]//47th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June 13-17, 2016, Washington, D. C.. Virginia: AIAA Press, 2016: 3529.



- [21] Jameson A, Yoonf S. Lower-upper implicit schemes with multiple grids for the Euler equations[J]. AIAA Journal, 1987, 25(7): 929-935.
- [22] Spalart P R, Deck S, Shur M L, et al. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2006, 20(3): 181-195.
- [23] Shur M L, Spalart P R, Strelets M K, et al. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(6): 1638-1649.
- [24] Jin G, Braza M. Two-equation turbulence model for unsteady separated flows around airfoils[J]. AIAA Journal, 1994, 32(11): 2316-2320.
- [25] Luo J, Xuan L J, Xu K. Comparison of fifth-order WENO scheme and finite volume WENO-gas-kinetic scheme for inviscid and viscous flow simulation[J]. Communications in Computational Physics, 2013, 14(3): 599-620.
- [26] 陈勇, 谢伟明, 路大举, 等. 吊窗尾迹流动非稳态气动光学效应研究[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1601001.  
Chen Y, Xie W M, Lu D J, et al. Study on unsteady aero-optical effect of turret wake[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1601001.