

文章编号 1004-924X(2018)06-1299-07

基于小波包方法的超声速气膜气动 光学效应相干结构

丁浩林^{1*}, 易仕和¹, 赵鑫海¹, 朱杨柱^{2,3}, 高 穹⁴

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中国人民解放军 63926 部队, 北京 100192;

3. 中国人民解放军陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007;

4. 中国洛阳电子装备试验中心 光电对抗测试与评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘要:当高速成像制导导弹在大气中飞行时,其光学窗口承受着严重的气动加热。超声速气膜冷却方法可以有效地隔离外部加热,但是超声速气膜流动会引起光束退化,降低图像质量。为了研究超声速气膜气动光学效应,本文构建了主流马赫数为 3.4,设计喷流马赫数为 2.5,实际测得喷流马赫数为 2.45 的超声速气膜实验装置。利用基于纳米粒子的平面激光散射技术获得了高时空分辨率流场图像,并对气膜冷却流动的密度场进行重构,利用光线追迹法获取了对应密度场的光程差。通过将光程差分布和 K-H 涡对比后发现,光程差的波谷位置对应于涡卷的中心,而光程差的波峰对应于涡卷中心之间的连接部分。但是,随着涡结构的发展破碎,对应关系不再成立。根据超声速气膜 NPLS 流场图像结果,利用分形原理获取的分形维数结果,将其沿流向划分为三个区域,其对应平坦度分别为 3.4,2.9,3.6,验证了区域 2 更适合进行相干结构提取。

关键词:气动光学;超声速气膜;相干结构;小波包

中图分类号:O439;V19 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182606.1299

Investigation on coherent structure of supersonic film aero-optics based on wavelet packet

DING Hao-lin^{1*}, YI Shi-he¹, ZHAO Xin-hai¹, ZHU Yang-zhu^{2,3}, GAO Qiong⁴

(1. College of Aerospace Science, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China;

2. The 63926 Troop of People's Liberation Army of China, Beijing 100192, China;

3. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, The Army Engineering University of People's Liberation Army of China, Nanjing 210007, China;

4. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

* Corresponding author, E-mail: dinghaolin_gfkd@foxmail.com

Abstract: While a high-speed aircraft is flying in the atmosphere, its optical hood is subjected to severe

收稿日期:2017-11-13;修订日期:2018-01-10.

基金项目:国家重大仪器研制项目(No. 11527802);国防科技大学预研项目(No. EDYYJCY20140101)

aerodynamic heating. Supersonic film cooling method can effectively isolate external heating, but the flow structures formed by the supersonic film cooling can cause beam degradation and affect the imaging quality. To investigate the aero-optics of supersonic film cooling, an experimental model was adopted in this paper, with its mainstream Mach number 3.4, designed jet Mach number 2.5, and measured jet Mach number 2.45. High-resolution images of flow were acquired by the nano-based planar laser scattering (NPLS) technique, by reconstructing the density field of supersonic film cooling, and then, the optical path difference (OPD) was acquired by the ray-tracing method. Depending on the comparison between the K-H vortex and OPD distribution, the valleys of OPD correspond to the vortex ‘rollers’ and the peaks to the ‘braids’. However, the corresponding relationship becomes quite irregular for the flow field with developed vortices, and cannot be summarized in this manner. According to the NPLS result of the supersonic film flow field, based on the fractal dimension results obtained by the fractal principle, the flow field is divided into three regions along the direction of flow, and the coherent structures of the corresponding OPD are calculated respectively. The corresponding flatness is 3.4, 2.9, and 3.6, which verifies that Zone 2 is more suitable for coherent structure extraction.

Key words: aero-optics; supersonic film; coherent structure; wavelet packet

1 引言

超声速气膜作为一种常用的主动冷却方式,在高速成像制导弹头部光学窗口、火箭发动机燃烧室、涡轮叶片等设备隔热中应用广泛^[1-3]。当超声速气膜用于光学窗口隔热时,由于超声速气膜流场包含诸如激波、剪切层、边界层等流场结构^[2,4],会对光线的传播造成影响,引起目标图像的畸变、抖动和模糊,这种现象统称为气动光学效应^[5]。

在 20 世纪 90 年代之前,气动光学模型依旧是基于湍流各向同性假设的。伴随着湍流相干结构的提出、发现和证实,各向同性假设的适用性大打折扣,改变了湍流是完全不规则随机运动的传统看法。相干结构的提取是湍流研究的重要问题,但关于相干结构的定义却还没有形成比较一致的定义。Farge 等人^[6-9]认为湍流是非高斯的相干结构和高斯背景的叠加,因而,相干结构可通过减去高斯背景的方法得到。具体提取方法类似于信号处理中基于小波的去噪。光线穿过流场后形成的光程差(Optical Path Difference, OPD)与流场中的湍流结构密切相关,针对 OPD 中相干结构成分的提取有助于分析湍流相干结构与气动光学畸变之间的关系,同时可以降低气动光学畸变信息的计算量,并且可以简化气动光学畸变的校

正。基于不同的尺度或能量准则,湍流研究中常用的相干结构辨识方法包括低通滤波方法、本征正交分解和小波分析方法等。目前,小波分析具有多尺度的优势,相关研究结果表明其提取性能优于本征正交分析方法。小波包基的时频分辨能力比小波变换更强、更灵活,所以更能够感受到信号中的细微差异^[10]。

本文主要通过纳米粒子的平面激光散射(Nano-based Planar Laser Scattering, NPLS)获取了超声速气膜高时空分辨率的流场图像,并对气膜冷却流场进行了密度场重构,利用光线追迹方法计算对应的 OPD 分布,之后利用小波包方法对 OPD 进行相干结构提取。

2 实验装置

2.1 超声速风洞

图 1 所示为本文实验所采用的 KD-03 低噪

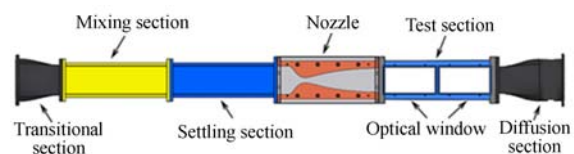


图 1 KD-03 超声速风洞结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of KD-03 supersonic wind tunnel

声超声速风洞结构示意图,风洞的运行方式为吸气式,气源采用经过干燥除尘的空气,风洞试验段的截面尺寸为 100 mm(宽)×120 mm(高),侧面

尺寸为 250 mm(长)×120 mm(高),并安装有高质量的光学玻璃,用于成像试验和测试^[11]。风洞运行参数如表 1 所示。

表 1 风洞流场的基本参数

Tab.1 Operating parameters of wind tunnel

马赫数 Ma	总压 P_0	总温 T_0	密度 ρ	速度 U_∞	单位雷诺数 Re	运行时间
3.4	1atm	300 K	0.089 kg/m ³	648 m/s	$6.11 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$	>10 s

2.2 实验模型与测试设备

图 2 为本文所使用的超声速气膜装置安装及其 NPLS 测试示意图。模型头部设计有小型半

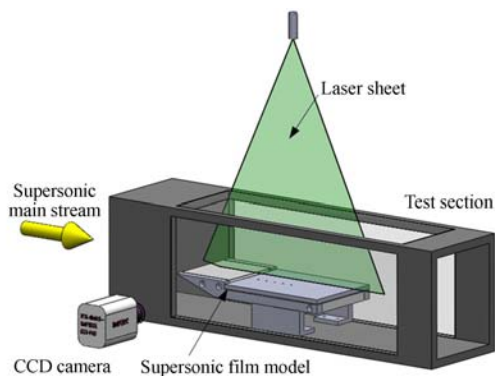


图 2 实验模型安装与 NPLS 测试示意图

Fig.2 Schematic of model setup and NPLS test

喷管,喷管型面采用基于 B-样条曲线的设计方法,设计马赫数为 2.5。

喷管出口面与台阶表面垂直以便喷流能够平行于壁面喷出。该模型的台阶上游平板长度为 70 mm,台阶下游长度为 135 mm,喷缝高度为 3 mm,喷缝宽度为 80 mm,模型的整体宽度为 100 mm,展高比为 $33.3 > 10$,流动可以近似看成二维的,喷流具体参数见表 2。

NPLS 为本课题组自主开发的具有国际先进水平的流场精细化测试技术,具有时间分辨率和空间分辨率高的特点,基于此技术开发了流场密度场测量技术和基于 NPLS 的气动光学波前测试技术,相关技术的详细介绍请参考文献[11-14]。

表 2 喷流基本参数

Tab.2 Basic parameters of jet

设计马赫数 Ma_c	实测马赫数 Ma_c'	总压 P_{t0}	总温 T_{t0}	速度 U_c	单位雷诺数 Re_c
2.5	2.45	300 K	0.089 kg/m ³	573 m/s	$9.86 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$

3 小波包及相干结构提取

小波包(Wavelet Packet, WP)通过频率轴的均匀划分而推广了正交小波变换,其基本思想是将向量空间做递归分解。特别地,我们可以通过评价函数选择最优基。本文使用函数 $\Phi(x) = x^{1/2}$ 。只是,在进行小波包最优基选取时,不同的最优基会产生不同的计算结果,具体的执行步骤如下:

(1)根据函数 $\Phi(x) = x^{1/2}$ 选择最优基,并计算小波包系数。记初始方差为:

$$\sigma^2 = (1/N) \sum_i (L(x_i))^2, \quad (1)$$

阈值 $\epsilon = \sqrt{2\sigma^2 \ln N}$ 。

(2)对 WP 系数做如下处理:

$$\hat{L}_{ji}^\epsilon = \begin{cases} \hat{L}_{ji}, & \text{if } |\hat{L}_{ji}| \leq \epsilon \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (2)$$

并计算小于阈值的系数的个数 N^ϵ 。

(3)使用式(2)中的 WP 系数做逆变换得到 L^ϵ ,更新方差为:

$$\sigma^2 = (1/N) \sum_i (L^\epsilon(x_i))^2. \quad (3)$$

返回步骤(2)重复上述迭代,直至 N^ϵ 不再变化。

(4)得到大尺度结构 $L^c = L - L^\epsilon$ 。

相干结构提取结果的可行度主要通过以下两个准则进行说明:

a. 非相干结构的统计特性,期望概率分布函数为正态分布;

b. 非相干结构和相干结构的相关系数,期望值近似为 0。

准则 a 通过将样本的累积分布与正态分布进行比较,若样本服从正态分布,那么其可视化正态概率图输出的图像点呈线性分布,否则输出图像存在明显弯曲。准则 b 通过二维相关系数进行检验。光程差的相干结构 L_c 与非相干结构 L_ϵ 的相关系数为:

$$R_{\epsilon c} = \frac{\sum(L_c - \bar{L}_c)(L_\epsilon - \bar{L}_\epsilon)}{\sqrt{(\sum(L_c - \bar{L}_c)^2)(\sum(L_\epsilon - \bar{L}_\epsilon)^2)}} \quad (4)$$

4 实验结果与分析

图 3 为通过 NPLS 技术获得的时间间隔为 $5 \mu s$ 的超声速气膜流场图像,图像尺寸为 $170 \text{ pixel} \times 1500 \text{ pixel}$,图像空间分辨率为 $7.4 \times 10^{-5} \text{ m/pixel}$,时间分辨率为 6 ns ,符合流场冻结假设条件。 P 和 V 分别对应于流场中涡和涡之间的间歇位置, P' 和 V' 分别对应于 $5 \mu s$ 后的 P 和 V 。在 $5 \mu s$ 的时间范围内,涡的形状并未发生明显改变。将 OPD 分布和 K-H 涡对比后发现,OPD 的波谷位置对应于涡卷的中心,而 OPD 的波峰对应于涡卷中心之间的连接部分。但是,随着涡结构的发展破碎,对应关系不再成立。

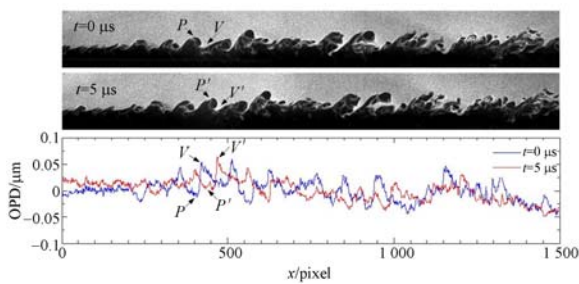


图 3 不同时刻的 NPLS 流场图像及其对应的 OPD 分布

Fig. 3 NPLS images and corresponding OPD distributions at different times

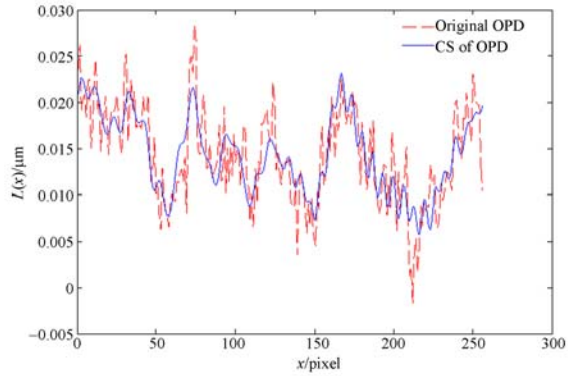
这里主要基于 $t=5 \mu s$ 时获得的 OPD 结果数据进行相干结果分析,在进行相干结构分析之前,利用分形方法获取了超声速气膜 NPLS 流场图像的分形维数,并依据分形维数结果将其划分

为以下 3 个区域:

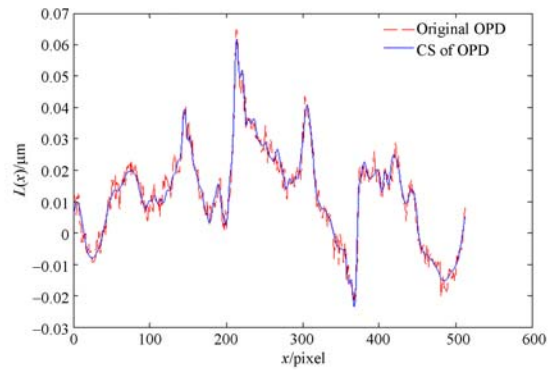
Zone 1: $1 \sim 256$; Zone 2: $257 \sim 768$; Zone 3: $769 \sim 1280$ 。

计算获取的相干结构如图 4 所示。

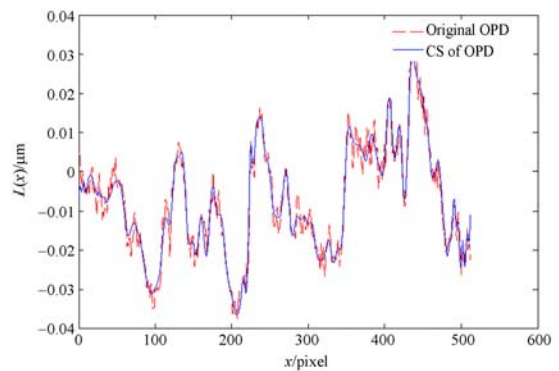
上述结果是采用以信号能量为依据的浮动阈



(a) Zone 1



(b) Zone 2



(c) Zone 3

图 4 小波包方法提取的不同区域 OPD 相干结构

Fig. 4 Coherent structures of OPD at different zones obtained by wavelet packet method

值,利用公式 $\epsilon = \sqrt{2\sigma^2 \ln N}$ 计算阈值,主要适用于低频率序列的小波包分解系数。区域 1 内 OPD 振幅较小,高频背景噪声的影响变得显著,导致在小波包系数提取时损失了部分高频信息。这一点一方面可以从图 4(a)中看出,原始数据与相干结构之间的偏差相对增加。另一方面损失的高频率序列对应的小波包系数也导致信息的压缩比升高,不过有些情况下这种损失反而有利于气动光学效应的校正。

将算法获取的非相干结构(背景)信息的统计信息统一到表 3 中。平坦度指标是常用的正态分布验证指标,越接近 3 表明其正态性越好,从中可见 Zone2 的正态性最好,而 Zone1 和 Zone3 都出现较大幅度的偏移。这一点也可以从图 5 中得到验证。根据分形结果,Zone1 对应区域可以近似看作层流,它造成的气动光学效应本身就是比较微弱的,相干结构假设对此并不适用。由于 Zone1 对应的气动光学效应非常微弱,实际上也不需要进行相干结构的提取研究。

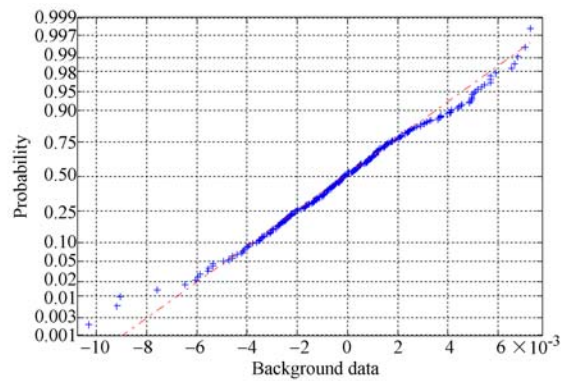
表 3 三个区域 OPD 背景统计信息

Tab. 3 Statistics of OPD background at 3 zones

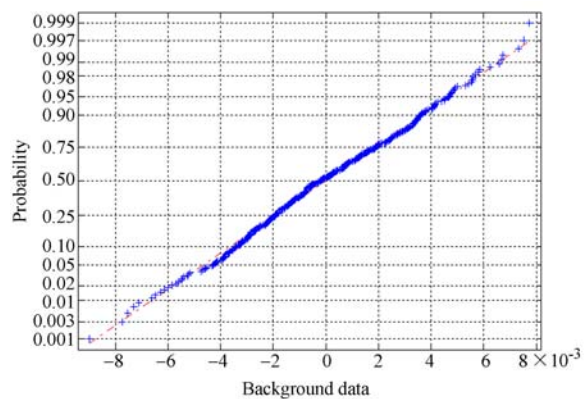
Zone	Compression ratio	Flatness	Skewness	$R_{\epsilon}/10^{-3}$
1	256/11	3.4	-0.14	1.64
2	512/42	2.9	0.034	4.45
3	512/43	3.6	-0.086	-2.07

Zone2 主要对应的是转捩中的大尺度结构区域,即相干结构区域,这部分湍流的相干性最强,相干结构相对于其它结构对于气动光学效应具有明显的影响。传统观点认为,在进行气动光学优化设计时应该避开这部分,但是其较好的相干特性实际上有利于提取气动光学效应相干结构,提取结果较好地满足了下一步的研究需求。

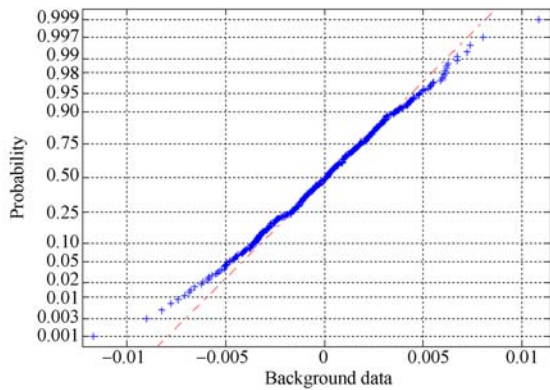
Zone3 在湍流充分发展区域,湍流的涡结构更趋向于各向同性假设。湍流的充分发展导致涡结构在空间分布上更加均匀,其中相干结构对涡结构的演化影响变的不是那么明显,从 OPD 上看就是大涡结构对光线传输的影响对相对削减,及湍流中不同尺度的涡结构的气动光学效应占据了较大比重,而不仅仅是相干结构的影响。这部分可以通过改变光线追迹计算网格密度进行研究,



(a) Zone 1



(b) Zone 2



(c) Zone 3

图 5 小波包方法提取的不同区域 OPD 非相干结构正态概率图

Fig. 5 Normal probability map of incoherent structure of OPD extracted from different zones by wavelet packet method

通过改变网格疏密对 NPLS 图像中不同尺度的涡结构进行捕捉。

5 结 论

气动光学效应相干结构提取为简化 OPD 结构,研究气动光学效应校正方法提供了一条比较好的途径。本文研究结果表明:在层流区域内相干结构假设不成立,也没有使用的必要,气动光学效应比较微弱,此时背景噪声的影响变得明显;转

捩区域中相干结构对流动状态的演化起主导作用,这种主导作用也在 OPD 中得到反映,较好地符合了相干性假设,简化了原始 OPD 结构;充分发展湍流区域,涡结构在空间上分布比较均匀,相干结构在其中的气动光学贡献并不是特别显著,导致其非相干结构并不是严格服从正态分布,但是不同涡结构尺度对 OPD 的具体贡献量还需要通过改变光线追迹计算网格密度来进一步研究。

参考文献:

- [1] FU J, YI SH, WANG XH, *et al.*. Experimental study on supersonic film cooling on the surface of a blunt body in hypersonic flow [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(10): 315-322.
- [2] 朱杨柱,易仕和,陈值,等.带喷流超声速光学头罩流场气动光学畸变试验研究[J].*物理学报*, 2013, 62(8): 084219-1-8.
ZHU Y ZH, YI SH H, CHEN ZH, *et al.*. Experimental investigation on aero-optical aberration of the supersonic flow passing through an optical dome with gas injection [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2013, 62(8): 084219-1-8. (in Chinese)
- [3] 丁浩林,易仕和,付佳,等.雷诺数对超声速气膜气动光学效应影响的实验研究[J].*红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0211002-1-8.
DING H L, YI SH H, FU J, *et al.*. Experimental investigation of influence of Reynolds number on supersonic film aero-optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0211002-1-8. (in Chinese)
- [4] 易司琪,丁浩林,龙志强.超声速气膜冷却时的光学性能优化设计[J].*应用光学*, 2017, 38(4): 20-25.
YI S Q, DING H L, LONG ZH Q. Optimal design of supersonic gaseous film cooling optical performance [J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(4): 20-25. (in Chinese)
- [5] 丁浩林,易仕和,付佳,等.超声速湍流边界层气动光学效应的实验研究[J].*红外与激光工程*, 2016, 45(10): 1018007-1-7.
DING H L, YI SH H, FU J, *et al.*. Experimental investigation of aero-optical effect due to supersonic turbulent boundary layer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1018007-1-7. (in Chinese)
- [6] FARGE M. Wavelet transforms and their applications to turbulence [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1992, 24: 395-457.
- [7] FARGE M, KAI S, KEVLAHAN N. Non-Gaussianity and coherent vortex simulation for two-dimensional turbulence using an adaptive orthogonal wavelet basis [J]. *Physics of Fluids*, 1999, 11(8): 2187-2201.
- [8] FARGE M, PELLEGRINO G, SCHNEIDER K. Coherent vortex extraction in 3D turbulent flows using orthogonal wavelets [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87(5): 054501.
- [9] FARGE M, KAI S, PELLEGRINO G, *et al.*. Coherent vortex extraction in three-dimensional homogeneous turbulence: Comparison between CVS-wavelet and POD-Fourier decompositions [J]. *Physics of Fluids*, 2003, 15(10): 2886-2896.
- [10] DAUBECHIES I. *Ten Lectures on Wavelets* [M]. Philadelphia: Society for industrial and applied mathematics, 1992: 1-2.
- [11] DING H L, YI S H, ZHU Y Z, *et al.*. Experimental investigation on aero-optics of supersonic turbulent boundary layers [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(27): 7604-7610.
- [12] YI S H, TIAN L F, ZHAO Y X, *et al.*. Aero-optical aberration measuring method based on NPLS and its application [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2010, 55(31): 3545-3549.

- [13] TIAN L F, YI S H, ZHAO Y X, *et al.*. Study of density field measurement based on NPLS technique in supersonic flow [J]. *Sci. Chin. Phys. Mech. Astron.*, 2009, 52:1357-1363.
- [14] GAO Q, YI S H, JIANG Z F, *et al.*. Hierarchical structure of the optical path length of the supersonic turbulent boundary layer [J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 16494-16503.

作者简介:

丁浩林(1990—),男,江苏新沂人,博士研究生,2014年、2017年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事基于BOS的波前测试方法、超声速流场气动光学效应以及高超声速成像制导等方面的研究工作。E-mail: dinghaolin_gfkd@foxmail.com

导师简介:

易仕和(1965—),男,湖南湘阴人,教授,博士生导师,1988年、1991年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2002年于国防科学技术大学获得博士学位,主要从事(高)超声速流场可视化、航天气动光学与成像制导技术以及风洞设计与建造等方面的研究工作。E-mail: yishihe_gfkd@foxmail.com