

doi:10.3788/gzxb20164506.0611002

大型彩色纹影系统像面均匀性分析

陈磊, 朱涛, 章起华, 马晓宇

(中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

摘要:采用无大口径窗口玻璃光路系统设计了 $\Phi 1200$ mm 口径彩色纹影系统, 并建模分析了该大型彩色纹影系统在重力、温度、气体冲击等复杂工作状态下的纹影像面照度均匀性. 针对 2.0 mm 切 1/4、2.0 mm 切 1/2、0.5 mm 切 3/4 这 3 种典型狭缝宽度和刀口切割量的组合, 分别分析了该系统在理想状态下和考虑系统综合误差时系统像面照度的均匀性. 结果表明: 在考虑系统综合误差时, 纹影像面均匀性较理想情况降低, 在较低灵敏度下, 整个像面照度不均匀性范围为 $-2.44\% \sim 2.45\%$; 在中等灵敏度下, 不均匀性范围为 $-3.43\% \sim 3.45\%$; 在较高灵敏度下, 不均匀性范围为 $-5.76\% \sim 5.81\%$, 说明该系统能满足实际工程应用要求.

关键词:成像系统; 纹影系统; 彩色纹影; 像面分析; 面形误差

中图分类号: TH74

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)06-0611002-9

Analysis on Imaging Uniformity of a Color Schlieren Photographer

CHEN Lei, ZHU Tao, ZHANG Qi-hua, MA Xiao-yu

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: A $\Phi 1200$ mm colorful schlieren system was designed by adopting an illumination system without any protecting windows. The theoretical optical model of the $\Phi 1200$ mm colorful schlieren system was built up and the imaging uniformity of the system was studied under the complex working conditions as the gravity, temperature variation, and ambient pressure. The three typical combinations of the slit width and the cutting quantity of the knife had been considered here, which are 2mm slit width with 1/4 cutting quantity, 2mm slit width with 1/2 cutting quantity, and 0.5mm slit width with 3/4 cutting quantity. With above three combinations, the imaging uniformity of the system was analyzed under the ideal working condition and under the condition by the consideration of integral error respectively. The results show that with the consideration of integral error, the uniformity of the schlieren image is decreased compared with that of the ideal working condition. With the consideration of integral error, when the system is under relatively low sensitivity, the range of the non-uniformity is from -2.44% to 2.45% ; under relatively normal sensitivity, the range of the non-uniformity is from -3.43% to 3.45% ; under relatively high sensitivity, the range of the non-uniformity is from -5.76% to 5.81% .

Key words: Imaging systems; Schlieren system; Color schlieren; Imaging analysis; Surface profile error

OCIS Codes: 110.0110; 110.2960; 110.4153; 120.6650

0 引言

在高超声速风洞试验中, 为反映测试区域流场密度的变化特性, 多采用阴影法、纹影法和干涉法等光学方法^[1-4]. 其中纹影法能够反映流场密度变化的一阶导

数, 其灵敏度较高, 能显示气体连续变化的密度场^[5-6], 具有操作简单和稳定性高等优点, 因此被广泛应用于高超声速风洞流场测试. 人眼对颜色变化比亮度变化更为敏感, 因此主观上人们更偏好彩色图像, 纹影法逐渐改进为彩色纹影法^[7-8].

基金项目: 国家重大工程建设-大型高超声速风洞建设项目资助

第一作者: 陈磊(1983-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为流动显示与光学测量. Email: 807524271@qq.com

收稿日期: 2015-10-30; 录用日期: 2016-03-18

<http://www.photon.ac.cn>

随着现代高超声速飞行器的发展,模型外形复杂多样,尺寸越来越大,对纹影系统的显示范围要求更高.根据某高超声速风洞中对流动显示范围的要求,需要配套的纹影系统有效口径为 $\Phi 1200\text{ mm}$,属于大型纹影系统^[9-10].在传统纹影系统中,光线要穿过安装在风洞试验段壁上的两块窗口玻璃,窗口玻璃材料内部的折射率梯度和面形上的加工缺陷都将以噪声的形式出现在纹影图像中^[11-12],因此纹影系统的灵敏度越高对窗口玻璃的质量要求越高.本文研究的纹影系统灵敏度高,能显示气流扰动引起折射率变化为 5×10^{-5} 的流场,则要求窗口玻璃折射率不均匀性应在 10^{-6} 量级以内;同时,还要求窗口玻璃能承受风洞试验时产生的载荷(玻璃的两个通光面有 100 kPa 的压差),即玻璃口径越大其厚度越大,而厚度越大的玻璃材料退火时间越长,风险越高.经分析 $\Phi 1200\text{ mm}$ 有效口径窗口玻璃的厚度不小于 150 mm ,其材料生产和加工风险都很高,难以保证纹影系统像面的均匀性,限制了大型纹影系统发展^[13-15].目前,纹影系统已研制出的最大口径为 $\Phi 800\text{ mm}$ ^[16].纹影法的基本原理是将光线受测试区的扰动转化成纹影像面上的光强分布,因此在测试区没有扰动时,像面照度的均匀性是系统的一个重要指标.在纹影系统像面均匀性分析方面,孟庆华提出了基于非球面的纹影系统设计,可有效提高系统像面的均匀性,并分析 $\Phi 500\text{ mm}$ 窗口玻璃在一个大气压压差和 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温差环境下,对像面均匀的影响^[17].但是,对于口径大于 $\Phi 500\text{ mm}$ 彩色纹影系统在复杂工作状况下像面均匀性的研究较少.

为满足大型彩色纹影系统在风洞流动显示中的切实需求,本文提出无大尺寸窗口玻璃设计模式,在光束收敛到较小口径处加装小尺寸密封观察窗.通过建立纹影成像系统的仿真模型,研究 $\Phi 1200\text{ mm}$ 口径彩色纹影系统在重力、温度变化、气体冲击等复杂工况下的对纹影像面照度均匀性的影响,对主反射镜的选材、面形误差以及支撑方式进行验证.

1 彩色纹影系统光路

如图1,典型的纹影系统主要由3大部分组成:准直系统、成像系统和图像接收系统.准直系统由光源、聚光镜、光阑、平面反射镜、准直主反射镜组成,其作用是产生平行光.成像系统的组成内容同准直系统类似(刀口代替了光阑),它用于对穿过测试区的平行光进行汇聚和图像接收系统一起参与对测试区进行成像.

对图1中的窗口玻璃进行改进,如图2,减小了尺寸,光源和成像接收系统放置在大气环境中,两块主反射镜通过密封舱和风洞试验段相连.

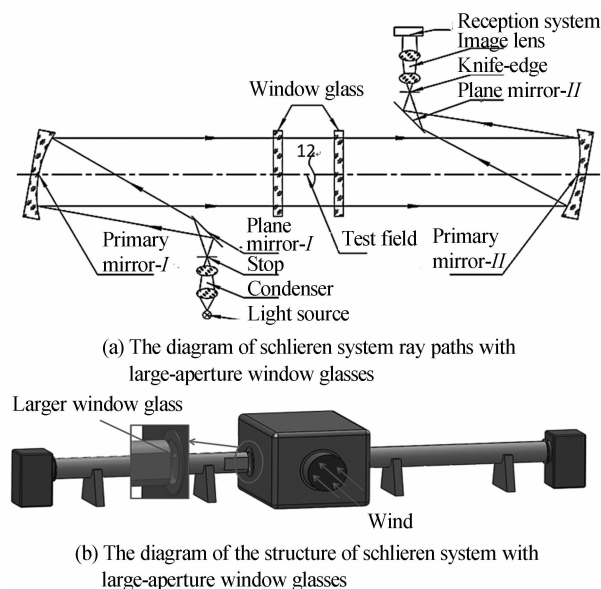


图1 含大口径窗口玻璃纹影系统

Fig. 1 The diagram of schlieren system with large-aperture window glasses

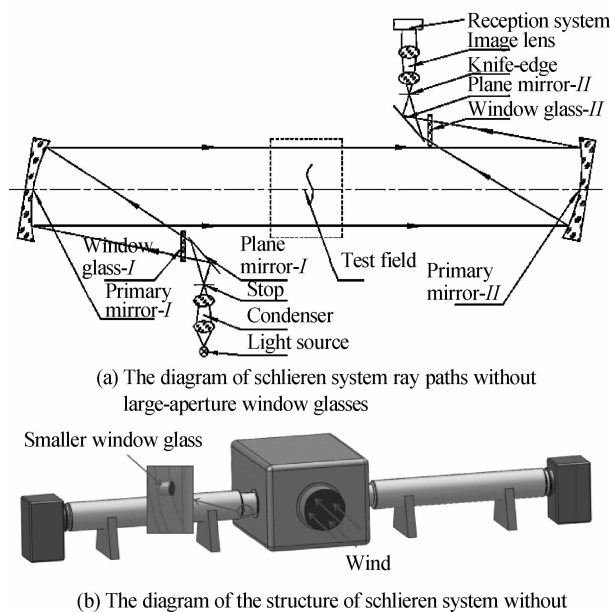


图2 无大口窗口玻璃的纹影系统光路

Fig. 2 The diagram of present schlieren system without large-aperture window glasses

纹影系统的详细光路如图3,设计指标为:通光口径 $\Phi 1200\text{ mm}$;离轴角 1.6° ;主反射镜焦距在 $12\ 000\sim 12\ 150\text{ mm}$ 之间.本彩色纹影系统的色彩是由4条窄的狭缝和红、黄、绿、蓝四种滤色片拼接成“口”字组合滤色片(图4)的颜色实现的,风洞试验中,不同色彩表示光线的不同偏折角.通过调整狭缝的宽度可适当改变系统的灵敏度.纹影系统总体位置关系:准直主反射镜与纹影主反射镜中心距离为 $33\ 000\text{ mm}$;密封观察窗I与准直主反射镜距离 $11\ 770\text{ mm}$,其中心与光轴距

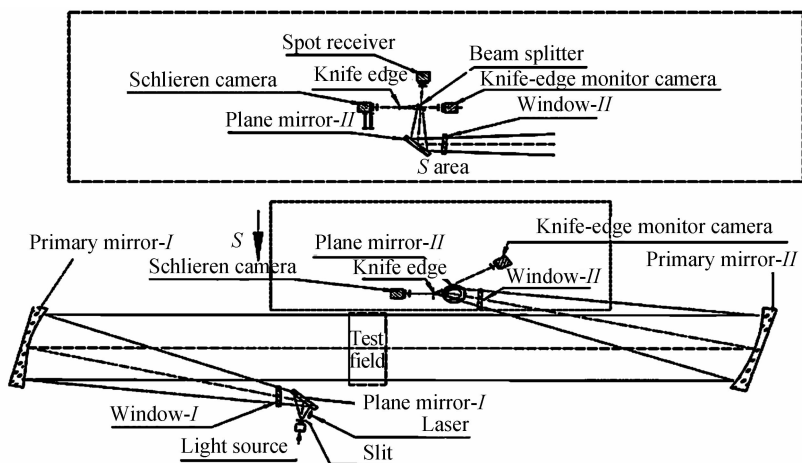


图3 $\Phi 1200$ mm 彩色纹影系统光路图
Fig. 3 The diagram of $\Phi 1200$ mm colored schlieren system

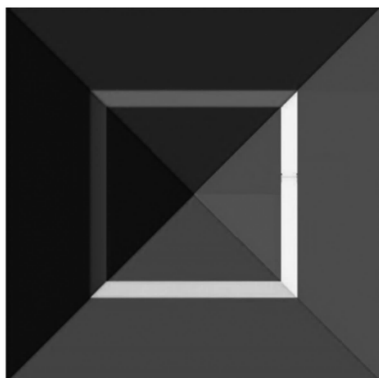


图4 组合滤色片示意图
Fig. 4 The diagram of composite filter

离 700 mm; 密封观察窗 II 与纹影主反射镜距离 11 660 mm, 其中心与光轴距离 693 mm.

风洞试验时试验段和主反射镜密封舱的环境温度和气压变化比较复杂, 可描述为: 试验准备阶段, 为大气环境, 温度为常温, 随后抽真空, 直到试验段的绝对压力在 0.1 kPa 左右, 同时温度也有所下降, 最低到 -10°C ; 试验开始时, 风洞流场建立瞬间, 试验段的环境气压值会发生突变, 变化值为 2kPa 量级, 温度有所升高, 最高到 50°C . 主反射镜系统要适应风洞运行过程中复杂的环境变化, 包括自身重力、环境温度变化、气压突变带来气体冲击等因素都会影响主反射镜面形^[18-21], 从而影响到纹影系统的像面均匀性. 因此, 需要对不同工况进行仿真, 分析其环境适应性.

2 彩色纹影系统成像模型建立

纹影系统的像面均匀性主要受系统“口”字形狭缝和刀口这对共轭关系的影响, 仿真环境如图 5. 在测试区不放置任何物体, 使用 Lighttools 光学软件模拟纹影相机接收到的图像. “口”字形狭缝出射的每种颜色光分别对应一个刀口, 分别仿真每种颜色的光经刀口切割后在像面上的均匀性, 再根据 4 种颜色光的叠加

结果, 获得纹影系统像面混色的均匀性. 为了使得到的纹影图像接近日光, 通过国际照明委员会色度空间配比, “口”字形狭缝出射的 4 种颜色的光照度比值为: 红: 绿: 蓝: 黄 = 1.000 : 0.988 : 0.857 : 0.776. “口”字形狭缝宽度分别为 2.0 mm、1.5 mm、1.0 mm、0.5 mm, 刀口切割光源像 1/4、1/2、3/4, 组合情况较多, 只分析 2.0 mm 切 1/4 (灵敏度较低)、2.0 mm 切 1/2 (灵敏度中等)、0.5 mm 切 3/4 (灵敏度较高) 三种典型情况.

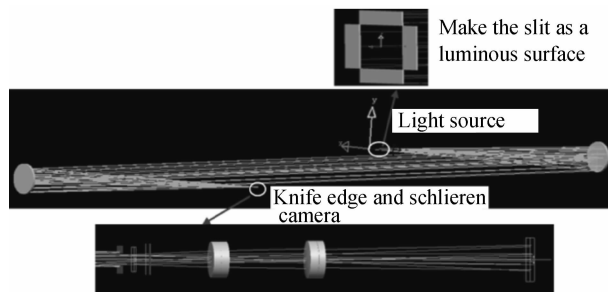
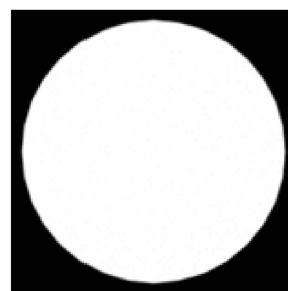


图5 均匀性仿真系统
Fig. 5 The sketch of uniformity simulation system

3 彩色纹影系统成像均匀性分析

3.1 理想情况

理想情况下, 即不考虑系统误差时, 典型狭缝宽度和切割量的纹影仿真图如图 6, 均匀性统计如表 1. 在



(a) 2.0mm with 1/4 cutting

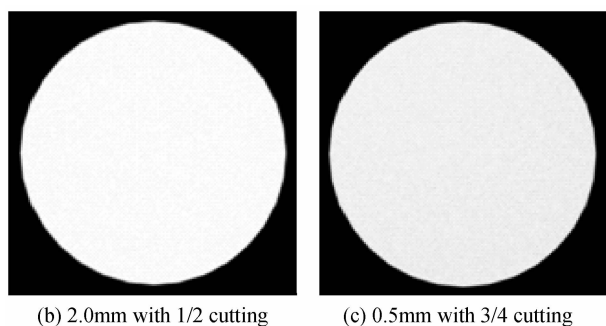


图 6 理想情况下纹影图

Fig. 6 The schlieren images under the ideal conditions

表 1 理想情况下均匀性对比表

Table 1 The chart of uniformity comparison under the ideal conditions

Width of the slit and cutting degree	color	Non-uniformity/%	
2.0 mm with 1/4 cutting	Red	-1.76	1.86
	Green	-1.74	1.77
	Blue	-1.85	1.90
	Yellow	-1.81	1.85
	Mixture	-1.93	1.91
2.0 mm with 1/2 cutting	Red	-1.87	1.92
	Green	-2.02	2.01
	Blue	-1.97	1.95
	Yellow	-1.89	1.88
	Mixture	-2.07	2.09
0.5 mm with 3/4 cutting	Red	-3.02	3.04
	Green	-3.03	3.8
	Blue	-2.95	2.98
	Yellow	-3.06	3.08
	Mixture	-3.23	3.27

纹影系统较低灵敏度下,整个像面不均匀性范围为-1.93%~1.91%;在中等灵敏度下,不均匀性范围为-2.07%~2.09%;在较高灵敏度下,不均匀性范围为-3.23%~3.27%。

超声速气流在流动过程中受到滞止减速或压强升高时,都必然产生激波^[22],所以在高超声速风洞试验中,模型周围会产生激波,如图 7 纹影照片.采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)软件在风洞典型的运行参量下计算出了模型周围激波的密度分布,再由格拉斯通-代尔公式换算出气流密度造成模型周围折射率的变化,以此为输入条件,用来模拟高超声速风洞试验中模型周围的激波.具体做法为在图 5 中的两主反射镜中间的测试区内放置薄壳椎体玻璃模型(图 8),设定玻璃材料相对周围的空气的折射率偏差,这样就仿真出纹影图像中的激波.下面为玻璃材料的折射率偏差为 5×10^{-5} 时,2000 万条光线追迹,在典型狭缝宽度和切割量下纹影的仿真图像如图 9,随着狭缝尺寸的减少和光源切割量的增加,系统灵敏增

加,仿真出的激波纹影图像越明显.

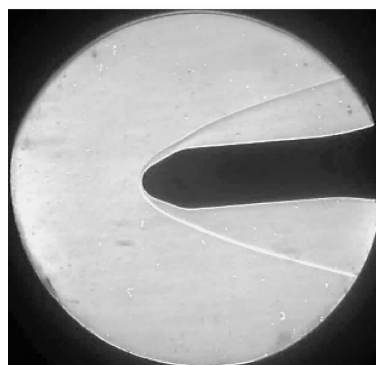


图 7 纹影照片中的激波

Fig. 7 The shock waves in schlieren images

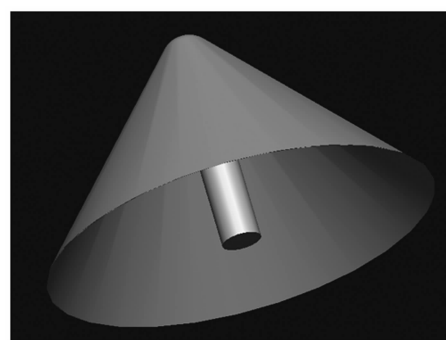
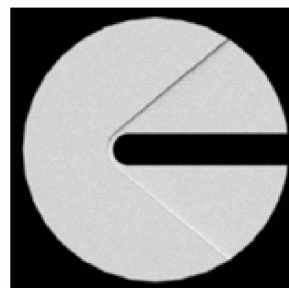
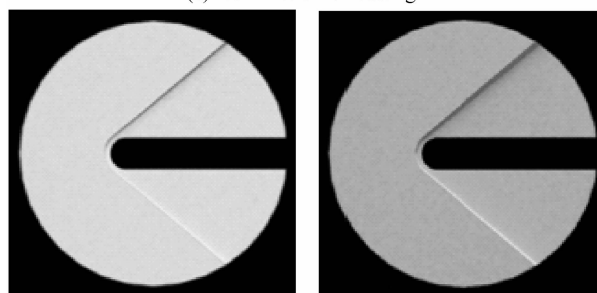


图 8 激波仿真玻璃模型

Fig. 8 The shock waves under the ideal conditions



(a) 2.0mm with 1/4 cutting



(b) 2.0mm with 1/2 cutting

(c) 0.5mm with 3/4 cutting

图 9 理想情况下激波

Fig. 9 The shock waves under the ideal conditions

3.2 考虑系统综合误差时均匀性分析

纹影系统中,光路结构确定后,像面的均匀性与系统中各个光学元件的面形误差有密切关系.考虑在主反射镜面形加工误差、不同工作状态主反射镜支撑导致的主反射镜面形误差、平面反射镜面形误差、光束进

出密封舱时密封观察窗的影响等系统综合误差的情况下,对纹影系统进行仿真,分析像面均匀性.主要光学元件面形误差情况为:

平面反射镜面形误差: $PV=0.1\lambda$, $RMS=0.025\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$,下文相同);

密封观察窗引入系统误差最大为: $PV=0.025\lambda$, $RMS=0.067\lambda$;

主反射镜引入系统误差为: $PV=0.177\lambda$, $RMS=0.029\lambda$.

由于主反射镜支撑引起的面形误差在不同工作状态时是不同的,在考虑综合误差时分重力、重力且高低温、重力且高低温及气流冲击等5种工作状态进行分析.

3.2.1 重力的影响

在考虑重力的情况下,经过有限元分析得出,主反射镜支撑卸载重力之后,主反射镜的变形为: $PV=0.061\lambda$, $RMS=0.013\lambda$.在典型狭缝宽度和切割量的纹影图如图10,均匀性统计如表2.在纹影系统较低灵敏度下,整个像面照度不均匀性范围为 $-2.17\% \sim$

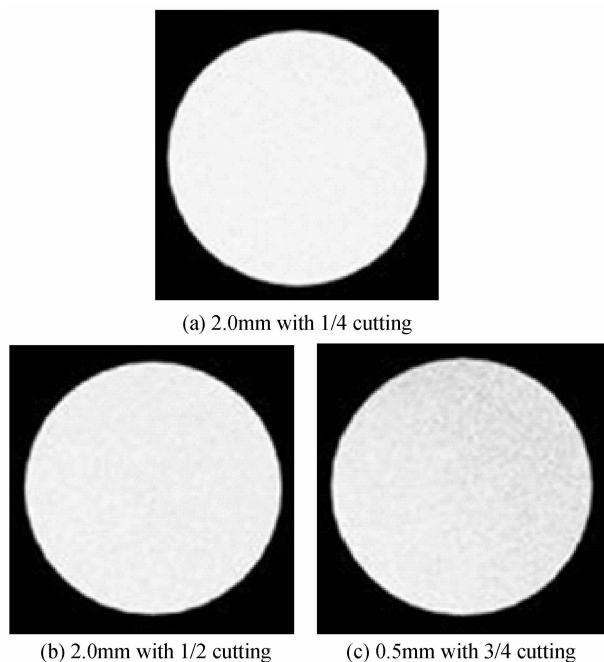
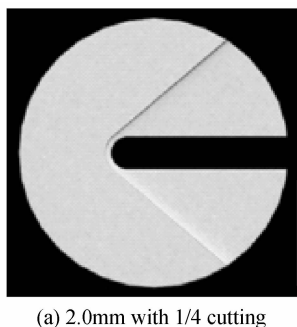
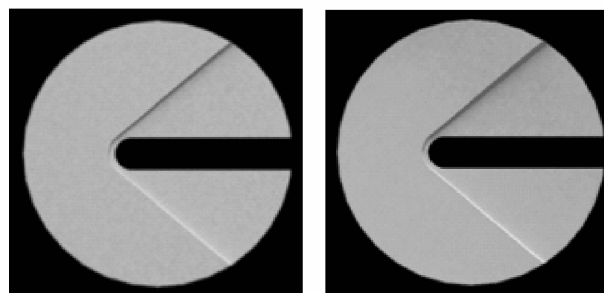


图10 考虑综合误差时(工作状态:重力)纹影
Fig.10 The schlieren images under considering the effect of gravity



(a) 2.0mm with 1/4 cutting



(b) 2.0mm with 1/2 cutting (c) 0.5mm with 3/4 cutting

图11 考虑综合误差时(工作状态:重力)激波
Fig.11 The shock waves under considering the effect of gravity

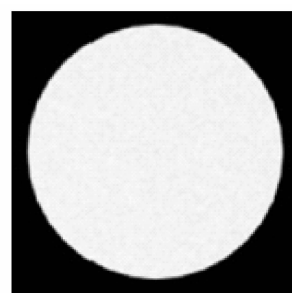
表2 考虑综合误差时(工作状态:重力)均匀性对比
Table 2 The chart of uniformity comparison under considering the effect of gravity

Width of the slit and cutting degree	Color	Non-uniformity/%	
2.0 mm with 1/4 cutting	Red	-1.95	1.97
	Green	-1.87	1.85
	Blue	-2.04	2.07
	Yellow	-1.88	1.89
	Mixture	-2.17	2.19
2.0 mm with 1/2 cutting	Red	-2.55	1.92
	Green	-2.23	2.01
	Blue	-2.31	1.95
	Yellow	-2.22	1.88
	Mixture	-3.08	2.09
0.5 mm with 3/4 cutting	Red	-4.13	4.12
	Green	-4.72	4.71
	Blue	-4.81	4.84
	Yellow	-4.41	4.42
	Mixture	-5.12	5.14

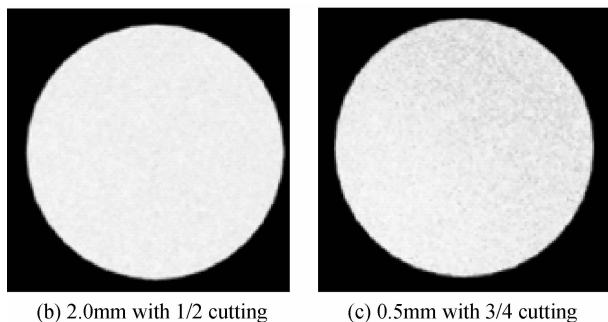
2.19%;在中等灵敏度下,不均匀性范围为 $-3.08\% \sim 3.09\%$;在较高灵敏度下,不均匀性范围为 $-5.12\% \sim 5.14\%$.加入激波仿真玻璃模型,2000万条光线追迹,在典型狭缝宽度和切割量下纹影的仿真图像如11.

3.2.2 重力和高温 50℃ 工作状态

主反射镜材料为肖特的微晶玻璃,在重力和高温 50℃ 的工况下,主反射镜支撑导致的主反射镜变形为: $PV=0.117\lambda$, $RMS=0.06\lambda$.在典型狭缝宽度和切割量的纹影图如图12,均匀性统计如表3.在纹影系统较低



(a) 2.0mm with 1/4 cutting

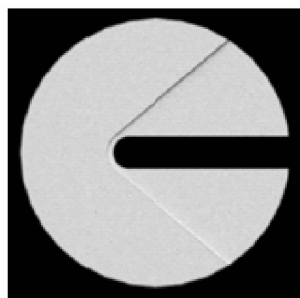


(b) 2.0mm with 1/2 cutting (c) 0.5mm with 3/4 cutting

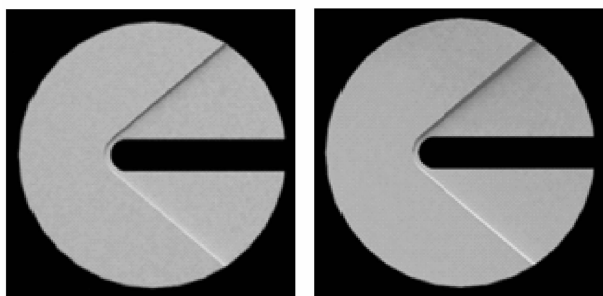
图 12 考虑综合误差时(工作状态:重力,50°C)纹影
Fig. 12 The schlieren images under considering the effect of gravity and 50°C

表 3 考虑综合误差时(工作状态:重力,50°C)均匀性对比
Table 3 The chart of uniformity comparison under considering the effect of gravity and 50°C

Width of the slit and cutting degree	Color	Non-uniformity/%	
2.0 mm with 1/4 cutting	Red	-1.95	1.97
	Green	-1.87	1.85
	Blue	-2.04	2.07
	Yellow	-1.88	1.89
	Mixture	-2.17	2.19
2.0 mm with 1/2 cutting	Red	-2.55	1.92
	Green	-2.23	2.01
	Blue	-2.31	1.95
	Yellow	-2.22	1.88
	Mixture	-3.08	2.09
0.5 mm with 3/4 cutting	Red	-4.13	4.12
	Green	-4.72	4.71
	Blue	-4.81	4.84
	Yellow	-4.41	4.42
	Mixture	-5.12	5.14



(a) 2.0mm with 1/4 cutting



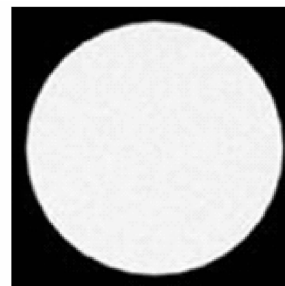
(b) 2.0mm with 1/2 cutting (c) 0.5mm with 3/4 cutting

图 13 考虑综合误差(工作状态:重力,50°C)时激波
Fig. 13 The shock waves under considering the effect of gravity and 50°C

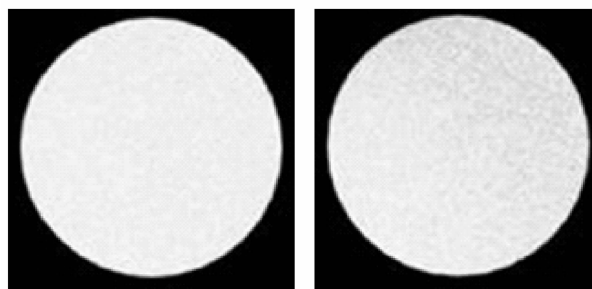
灵敏度下,整个像面照度不均匀性范围为-2.20%~2.21%;在中等灵敏度下,不均匀性范围为-3.43%~3.45%;在较高灵敏度下,不均匀性范围为-5.54%~5.57%。加入激波仿真玻璃模型,2000 万条光线追迹,在典型狭缝宽度和切割量下纹影的仿真图像如 13。

3.2.3 重力和低温-10°C 工作状况下

在重力和低温-10°C 的工作状况下,主反射镜支撑导致的主反射镜变形为:PV=0.172λ,RMS=0.041λ。在典型狭缝宽度和切割量的纹影图如图 14,均匀性统



(a) 2.0mm with 1/4 cutting



(b) 2.0mm with 1/2 cutting (c) 0.5mm with 3/4 cutting

图 14 考虑综合误差时(工作状态:重力,-10°C)纹影
Fig. 14 The schlieren images under considering the effect of gravity and -10°C

表 4 考虑综合误差(工作状态:重力,-10°C)均匀性对比
Table 4 The chart of uniformity comparison under considering the effect of gravity and -10°C

Width of the slit and cutting degree	Color	Non-uniformity/%	
2.0 mm with 1/4 cutting	Red	-1.97	1.96
	Green	-1.87	1.88
	Blue	-1.67	.65
	Yellow	-2.04	2.03
	Mixture	-2.23	2.21
2.0 mm with 1/2 cutting	Red	-2.88	2.79
	Green	-2.76	2.67
	Blue	-2.85	2.74
	Yellow	-2.95	2.87
	Mixture	-3.27	3.29
0.5 mm with 3/4 cutting	Red	-4.75	4.73
	Green	-4.91	4.94
	Blue	-5.22	5.23
	Yellow	-5.19	5.17
	Mixture	-5.58	5.59

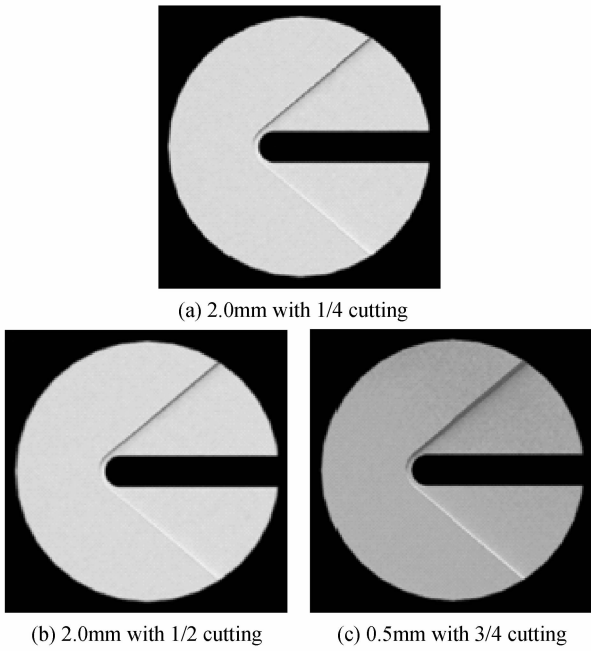
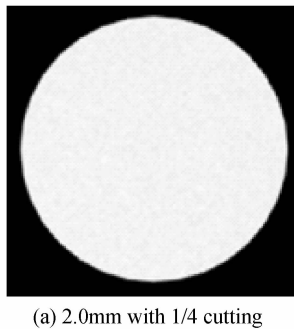


图 15 考虑综合误差时(工作状态:重力, -10°C)激波
Fig. 15 The shock waves under considering the effect of gravity and -10°C

计如表 4,在纹影系统较低灵敏度下,整个像面照度不均匀性范围为-2.23%~2.21%;在中等灵敏度下,不均匀性范围为-3.27%~3.29%;在较高灵敏度下,不均匀性范围为-5.58%~5.59%。加入激波仿真玻璃模型,2000 万条光线追迹,在典型狭缝宽度和切割量下纹影的仿真图像如 15。

3.2.4 在重力、高温 50°C 和 2kPa 气流冲击工作状况下

在重力,高温 50°C 和 2kPa 气流冲击的工况下,主反射镜支撑导致的主反射镜变形为: $PV = 0.135\lambda$, $RMS = 0.032\lambda$ 。在典型狭缝宽度和切割量的模拟结果如图 16,均匀性统计如表 5。在纹影系统较低灵敏度下,整个像面照度不均匀性范围为-2.44%~2.45%;在中等灵敏度下,不均匀性范围为[-3.42%~3.45%];在较高灵敏度下,不均匀性范围为-5.76%~5.81%。加入激波仿真玻璃模型,2000 万条光线追迹,在典型狭缝宽度和切割量下纹影的仿真图像如 17。



(a) 2.0mm with 1/4 cutting

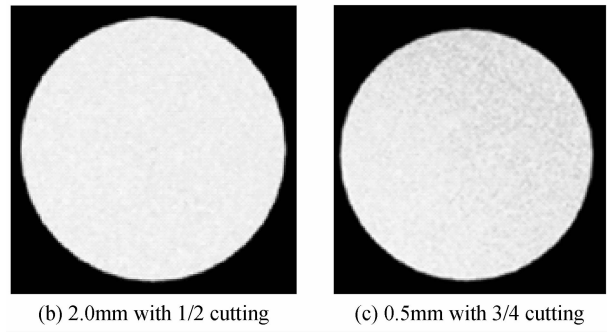


图 16 考虑重力、高温 50°C 和 2 kPa 冲击下激波图纹影
Fig. 16 The schlieren images under considering the effect of gravity, 50°C and 2 kPa

表 5 考虑重力、高温 5°C 和 2 kPa 冲击下激波图像面均匀性对比

Table 5 The chart of uniformity comparison under considering the effect of gravity, 5°C and 2 kPa

Width of the slit and cutting degree	Color	Non-uniformity/%	
2.0 mm with 1/4 cutting	Red	-2.21	2.34
	Green	-2.02	2.06
	Blue	-2.16	2.20
	Yellow	-2.34	2.22
	Mixture	-2.44	2.45
	Red	-3.01	3.09
2.0 mm with 1/2 cutting	Green	-3.15	2.99
	Blue	-3.17	3.14
	Yellow	-3.34	3.37
0.5 mm with 3/4 cutting	Mixture	-3.42	3.45
	Red	-5.41	5.49
	Green	-5.52	5.53
	Blue	-5.32	5.25
	Yellow	-5.41	5.46
	Mixture	-5.76	5.81

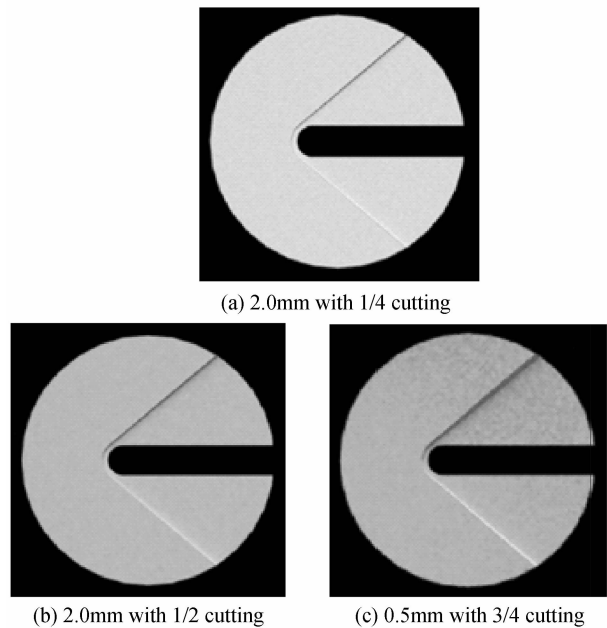
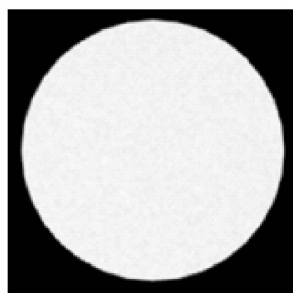


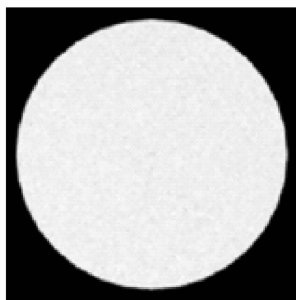
图 17 考虑重力、高温 50°C 和 2kPa 冲击下激波
Fig. 17 The shock waves under considering the effect of gravity, 50°C and 2kPa

3.2.5 在重力、低温-10℃和 2kPa 气流冲击工况下

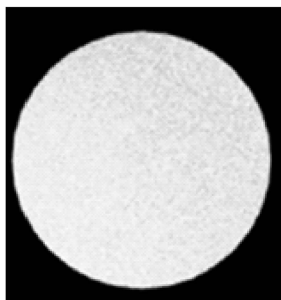
在重力、低温-10℃和 2kPa 气流冲击工况下,主反射镜支撑导致的主反射镜变形为: $PV=0.125\lambda$, $RMS=0.029\lambda$. 在典型狭缝宽度和切割量的模拟结果如图 18,均匀性对比如表 6,在纹影系统较低灵敏度下,整个像面照度不均匀性范围为-2.44%~2.45%;在中等灵敏度下,不均匀性范围为-3.36%~3.39%;在较高灵敏度下,不均匀性范围为-5.66%~5.68%. 加入激波仿真玻璃模型,2000 万条光线追迹,在典型狭缝宽度和切割量下纹影的仿真图像如 19.



(a) 2.0mm with 1/4 cutting



(b) 2.0mm with 1/2 cutting



(c) 0.5mm with 3/4 cutting

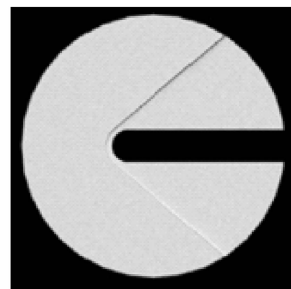
图 18 考虑重力、低温-10℃和 2kPa 冲击下纹影

Fig. 18 The schlieren images under considering the effect of gravity, -10℃ and 2kPa

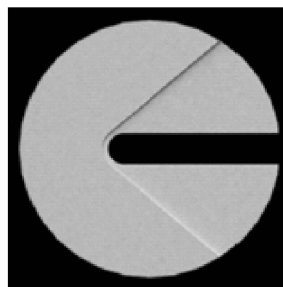
表 6 考虑重力、低温-10℃和 2 kPa 冲击下像面均匀性对比

Table 6 The chart of uniformity comparison under considering the effect of gravity, -10℃ and 2kPa

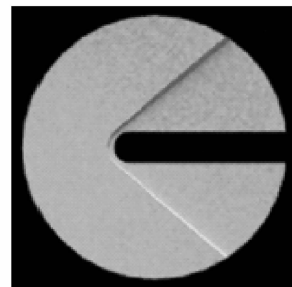
Width of the slit and cutting degree	Color	Non-uniformity/%	
2.0 mm with 1/4 cutting	Red	-2.01	1.96
	Green	-1.94	2.02
	Blue	-1.84	1.94
	Yellow	-2.04	2.03
	Mixture	-2.21	2.20
2.0 mm with 1/2 cutting	Red	-2.91	2.94
	Green	-3.23	3.16
	Blue	-3.17	3.12
	Yellow	-3.25	3.27
	Mixture	-3.36	3.39
0.5 mm with 3/4 cutting	Red	-4.99	5.04
	Green	-5.05	4.97
	Blue	-5.42	5.45
	Yellow	-5.31	5.23
	Mixture	-5.66	5.68



(a) 2.0mm with 1/4 cutting



(b) 2.0mm with 1/2 cutting



(c) 0.5mm with 3/4 cutting

图 19 考虑综合误差(工作状况:重力,-10℃,2 kPa)时激波

Fig. 19 The shock waves under considering the effect of gravity, -10℃ and 2kPa

从表 2~6 的像面均匀性仿真结果来看,主反射镜系统随着环境工作状况的增多,模型误差增大,像面的均匀性降低,在极限复杂情况下,像面的不均匀性范围为-5.76%~5.81%,比理想状态下的不均匀性增加了 2.3%。从图 11、图 13、图 15、图 17 和图 19 可知,在典型狭缝宽度和切割量下,纹影仿真图像随着狭缝尺寸的减少和光源切割量的增加,系统灵敏增加,仿真出的激波纹影图像越来越明显,但图像颜色偏差增大,均匀性变差。

在考虑主反射镜加工误差、不同工作状况主反射镜支撑导致的主反射镜面形变化等系统综合误差时,纹影像面均匀度较理想情况下降低. 考虑系统综合误差的情况下,纹影系统在较低灵敏度下,整个像面照度不均匀性范围为-2.44%~2.45%,在中等灵敏度下,不均匀性范围为-3.43%~3.45%,在较高灵敏度下,不均匀性范围为-5.76%~5.81%。一般认为人眼能分别出的衬度为 10%,即像面的不均匀性在±10%范围内是不会被人眼发现的. 以上分析结果表明,采用无保护窗口照明系统设计在风洞试验的复杂工作状况下能满足对其流动显示的要求。

4 结论

针对大型风洞纹影系统的大范围显示需求,设计了一种无大口径窗口玻璃的彩色纹影系统,能够避免大口径窗口玻璃的制造缺陷对纹影图像均匀性的不利影响. 针对 3 种典型的狭缝宽度和刀口切割量组合(2.0 mm 切 1/4、2.0 mm 切 1/2 和 0.5 mm 切 3/4),

通过光学建模定量分析了重力、温度、气体冲击等复杂工况对该系统纹影像面照度均匀性的影响。仿真结果表明:该纹影系统在风洞试验的典型工况环境下,像面均匀性均能够满足流动显示的观察要求。该彩色纹影系统的设计,将有助于突破我国风洞纹影测试的口径局限,更好服务于空气动力学测试研究。

参考文献

- [1] HOLDER D W, NORTH R J. A schlieren apparatus giving an image in color[J]. *Nature*, 1952, 169:466.
- [2] 杨祖清等. 流动显示技术[M]. 国防工业出版社, 2002
- [3] MENG Sheng, YANG Zang-jian, WANG Ming-xiao, *et al.* Application of quantitative schlieren method in flame temperature measurement [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, **29**(4): 65-69.
孟晟, 杨臧健, 王明晓, 等. 纹影定量在火焰温度测量中的应用[J]. *试验流体力学*, 2015, **29**(4): 65-69.
- [4] HARGATHER M J, SETTLES G S. A comparison of three quantitative schlieren techniques [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**: 8-17.
- [5] 李桂春. 风洞试验光学测量方法[M]. 国防工业出版社, 2008.
- [6] TANDA G, FOSSA M, MISALA M. Heat transfer measurements in water using a schlieren technique [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014, **71**: 451-458.
- [7] WANG Dian-kai, HONG Yan-ji, YE Ji-fei, *et al.* Color schlieren fore hypersonic shock wave structures diagnosis[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(6): 1710-1714.
王殿恺, 洪延姬, 李倩, 等. 高超声速波系结构的彩色纹影显示技术[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(6): 1710-1714.
- [8] KLEINE H. High-speed time resolved color schlieren visualization of shock wave phenomena [J]. *Shockwaves*, 2005, **14**(5): 333-341.
- [9] LIAO Zhi-chun. The mounting structure of reflection mirror in collimater[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, **24**(1): 19-23.
廖知春. 平行光管反射镜的支承结构[J]. *航天返回与遥感*, 2003, **24**(1): 19-23.
- [10] WU Xiao-xia, YANG Hong-bo, ZHANG Jin-xu, *et al.* Optimal design of support system for the large-aperture sphere mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 129-132.
吴小霞, 杨洪波, 张景旭, 等. 大口径球面镜支撑系统的优化设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 129-132.
- [11] 李桂春. 气动光学[M]. 国防工业出版社, 2005.
- [12] LIU Yang-zhou, LI Xiao-tong, CEN Zhao-feng, *et al.* Influence of inhomogeneity of optical glass used in high precision optical system on imaging quality [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **42**(4): 451-455.
- 刘洋舟, 李晓彤, 岑兆丰, 等. 高准确度光学系统中材料非均匀性对成像质量的影响[J]. *光子学报* 2012, **42**(4): 451-455.
- [13] WANG Deng, YU Gong. Investigation of kerosene jet spray in supersonic combustion [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, **2**(19): 11-13.
王东, 俞刚. 煤油射流在超声速燃烧室中的实验研究[J]. *实验流体力学*, 2005, **2**(19): 11-13.
- [14] YANG Hui, LI Feng, SUN Bai-gang. Trajectory analysis of fuel injection into supersonic cross flow based on schlieren method[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, **1**(25): 42-50.
- [15] YE Ji-fei, WEN Ming, JIANG Guan-lei, *et al.* Study on high speed schlieren measurement method for laser induced LSD wave evolvment [J]. *Physics Procedia*, 2012, **25**: 1809-1815.
- [16] SUN Wei, LI Ze-ren, WANG Wei, *et al.* Structural analysis and design for the supporting and adjusting of the primary mirror in schlieren system with large aperture[J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2010, **27**(2): 162-166.
孙威, 李泽仁, 汪伟, 等. 大口径纹影系统主反射镜装调结构分析与设计[J]. *深圳大学学报理工版*, 2010, **27**(2): 162-166.
- [17] MENG Qing-hua. A schlieren system design with non-spherical primary mirrors [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2014, **07**: 74.
孟庆华. 基于非球面的纹影系统设计[J]. *科技创新导*, 2014, **07**: 74.
- [18] CHEN Yong-cong, HU Yong-ming, LI Ying-cai, *et al.* Displacement analyzing and support position optimizing of the main mirror with backside support [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1730-1733.
陈永聪, 胡永明, 李英才, 等. 背部支撑主反射镜面形分析与支撑点优化[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9): 1730-1733.
- [19] YANG Fei, MING Ming, WANG Fu-guo, *et al.* Influences of thermal diversification o opto-mechanical system of 1.23 m telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 26-30.
杨飞, 明名, 王富国, 等. 温度变化对 1.23m 望远镜光机系统影响[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 26-30.
- [20] WANG Fu-go. Study on the influence of temperature and support style to the 1.2m SiC primary mirror surface figure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 933-936.
王富国. 温度和支撑方式对 1.2m SiC 主镜面形的影响分析 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 933-936.
- [21] LI Ling-yin, WANG Yi-fan. Active compensation technology of photoelectric theodolite primary mirror surface-shape error [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 79-83.
李零印, 王一凡. 光电经纬仪主镜面型误差主动补偿技术研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1): 79-83.
- [22] 钱翼稷. 空气动力学[M]. 北京航空航天大学出版社, 2015.