

基于 ZEMAX 软件的圆喷管成像畸变校正方法

岳茂雄^{1,2}, 解 烽², 白菡尘¹, 张 龙², 袁 强²

(1. 中国空气动力研究与发展中心 超高速空气动力研究所

超超声速冲压发动机技术重点实验室, 四川 绵阳 621000;

2. 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: 准确显示圆喷管内流场, 对于了解和控制该流场具有一定意义, 并能为相关数值计算结果提供验证。为此, 必须首先解决较厚圆喷管成像畸变带来有效视场减小的问题, 采用圆喷管外加校正柱透镜方法可以予以校正。校正柱透镜的设计采用厚透镜焦距计算和 ZEMAX 软件优化设计相结合, 并进行了静态验证, 将有效视场从不到 30% 提高到了大于 80%; 其次, 校正设计时假设圆喷管内折射率为 1, 并以平行光出射, 通过对这个假设的分析, 表明其对圆喷管内一定的高温高压流场显示结果影响较小; 然后, 分析了流场显示的可行方法, 给出了动态显示结果; 最后指出了该校正方法的可行性和对于定量干涉测量的局限性。该研究对于圆喷管内燃烧流场的研究具有参考意义。

关 键 词: 流场显示; 圆喷管; 成像畸变; 光学校正; 实验验证

中图分类号: V211.72; O443

文献标志码: A

Image distortion calibration method of round nozzle based on ZEMAX software

YUE Mao-xiong^{1,2}, XIE Feng², BAI Han-chen¹,
ZHANG Long², YUAN Qiang²

(1. Science and Technology on Scramjet Laboratory, Hypervelocity Aerodynamics Institute,
China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;

2. Facility Design and Instrumentation Institute,

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

Abstract: It is significant that the flow field has been visualized accurately for understanding and controlling it within a round nozzle, and the accurate visualization can validate the results of numerical calculation. Therefore, firstly, reduction of effective view field from image distortion because of the thickness of round nozzle was revised. Cylindrical lens were added outside round nozzle for calibrating distortion. Design of the cylindrical lens was introduced to calculate the foci of thickness lens and optimize it by ZEMAX software. Static state experiments indicate that the effective view field is increased from less than 30% to more than 80%. Secondly, it was supposed the refractive index as 1 and the spreading ray as parallel ray within round nozzle during calibrating design. Analysis indicates the effect of these supposes is small for some flow fields of high-temperature and high-pressure. Thirdly, the feasible methods for flow field visualization were analyzed, and the dynamic results were given. At last, feasibility of the calibration method and the limitation to quantitative interferometry were pointed out. The research is of reference signification to flow field of combus-

tion in round nozzle.

Key words: flow field visualization; round nozzle; image distortion; optical calibration; experiment validated

圆喷管(以下简称圆管)内的内流场是一个较为复杂的流场,对其研究通常采用数值模拟的方法对密度场^[1-3]和温度场^[4]进行仿真.就流场显示实验来说,如果是激光多普勒测速(LDV)等单点测量方法^[5],一般不考虑圆管壁带来的成像畸变;若对某个较大平面成像畸变的校正,通常采用的是较为成熟的图像处理的校正方法^[6-7],对圆管内流场的粒子图像测速(PIV)来说,也可以采用图像处理的校正方法^[8-10];本文主要对圆管内的流场显示进行校正研究,是针对整个流场空间,不能简单地只对某个平面进行校正.由于单侧圆管壁具有负的光焦度,使出射光线呈发散状,并产生成像畸变.越厚的管壁带来越大的成像畸变,使得显示的有效视场变小,为了增大有效视场,必须进行光学校正.

对于圆管成像畸变的校正研究,美国的 Robert 等人和我国的夏生杰等人采用的是近似光学补偿方法进行研究^[11-12],加拿大的 Benjaming 等人采用的是圆管外表面整体构型方法^[13],本文采用较为简便的外加校正柱透镜的近似校正方法,但是相对于此前的工作,除了采用厚透镜焦距计算方法^[14]得到校正柱透镜的焦距,同时还采用 ZEMAX 软件进行了柱透镜的曲面优化设计^[15],得到的结果是弯月校正柱透镜,相对于此前使用的平凸校正柱透镜,更能准确校正圆管带来的成像畸变.

进行校正柱透镜(以下简称柱透镜)的计算和优化时,都是将圆管内的气体折射率假设为 1,并以平行光出射,在静态验证时,这种假设是可以确定成立的,但是对于具体的动态流场,这种假设有它的局限性,为此,针对一定的高温高压流场进行了适用性分析,最后对流场显示方法的选择进行了阐述,并用高速聚焦纹影^[16-17]进行了动态验证,得到了实验结果.

1 影响圆管成像畸变的因素

要准确显示圆管内的流场,必须要校正圆管带来的成像畸变,但首先必须搞清楚影响圆管成像畸变的因素.本文采用玻璃材质的圆管进行研究,研究的主要手段是采用 ZEMAX 软件,它是一款主要用于光学成像和照明光学等方面模型构建与优化设计的光学仿真软件.在本研究,它既用

于光线穿越光学器件的光线追踪,又用在柱透镜的曲面参数优化设计中.采用 ZEMAX 软件对影响圆管成像畸变的几个因素进行光线追踪后,总结了如下一些规律:圆管材料光学折射率越大,管壁越厚,直径越小,圆管成像畸变越大,反之亦然;直径与管壁厚度之比越大,畸变越小,直径与管壁厚度之比相同时,其光线走势相同;圆管内介质折射率不均匀变化越大,流动显示的误差也越大.

在对圆管内流场进行显示时,通常圆管材料和内径已经确定,圆管内流场引起的折射率变化是待测量,主要的待定因素就是管壁厚度,对高温高压气体,管壁往往较厚,管壁厚度增加使成像畸变增大,造成有效视场减小,为了直观说明这个问题,采用 ZEMAX 软件对不同厚度管壁进行光线追踪,分析其对有效视场的影响.管壁厚度造成有效视场减小的仿真结果如图 1 所示.

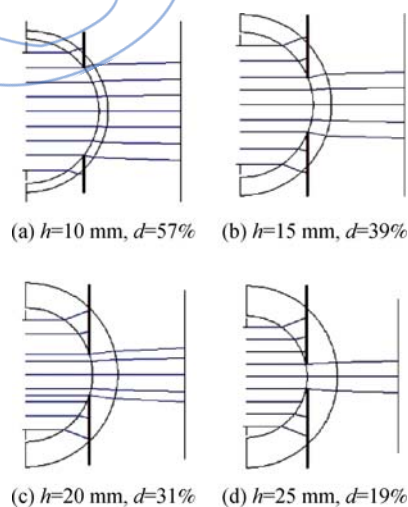


图1 管壁厚度对有效视场的影响

Fig. 1 Effect of nozzle wall thickness on effective view field

图 1 中,圆管外径为 100 mm,管壁厚度 h 依次为 10, 15, 20 mm 和 25 mm,入射平行光线为 80% 直径范围,假设出射光线偏折角小于 1.5° 为有效光线,这样得到的有效视场直径 d 依次约为 57%, 39%, 31% 和 19%. 可见随着管壁逐渐变厚,有效视场迅速减小.因此,必须对管壁产生的畸变采取相应的光学校正,才能得到更大的有效视场,从而得到更为准确的显示结果.

2 校正方法

对圆管成像畸变的校正,采用外加柱透镜办法,柱透镜设计采用厚透镜焦距计算结合 ZEMAX 软件曲面优化的方法.

2.1 单侧管壁焦距计算

研究模型为 K9 玻璃材料圆管,外径为 100 mm,管壁厚度为 10 mm,圆管长度为 110 mm. 柱透镜也采用相同材料,根据如式(1)所示薄透镜成像公式,进行单侧管壁焦距的拟合.

$$\frac{n}{l} - \frac{1}{L} = \frac{n-1}{r} \quad (1)$$

式中 n 是圆管材料折射率, l 是像距, L 是物距, r 是薄透镜的曲面半径. 单侧圆管为同心弯月柱透镜,其前后主面均在过圆心的垂直平面上^[18],如图 2 所示. 先将第 1 面作为薄透镜进行计算,将得到的像距加上圆管光学管壁厚度作为第 2 面的物距,再进行计算,求得第 2 面的像距为距离第 2 面顶点的距离,再结合其主面的位置,得到单侧管壁焦距为 -591.4 mm,柱透镜与其焦距绝对值相同,符号相反,即要采用焦距为 591.4 mm 的正柱透镜予以校正.

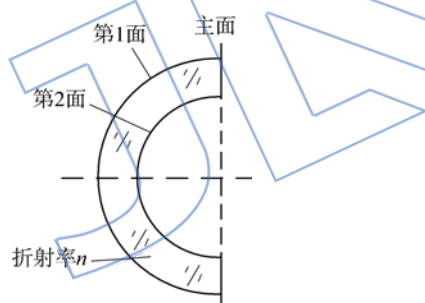


图2 单侧管壁焦距计算

Fig. 2 Foci computation of half-pipe wall

2.2 ZEMAX 软件拟合柱透镜曲面

前节得到了柱透镜焦距,按照早期的工作,通常采用的是平凸柱透镜,将其放到圆管两侧进行校正. 对此进行了 ZEMAX 软件仿真,结果如图 3 所示,可以看到平行光在通过平凸柱透镜和单侧圆管壁后,只有中心部分不到 30% 光线较为平行外,其他光线平行度并不理想,必须进行柱透镜的优化处理,即要使用 ZEMAX 软件确定柱透镜的曲面参数.

在 ZEMAX 软件中,以计算的柱透镜焦距为准,柱透镜采用相同材料的 K9 玻璃,为保证光线在圆管内部平行,截取圆管左半部分并选用像空

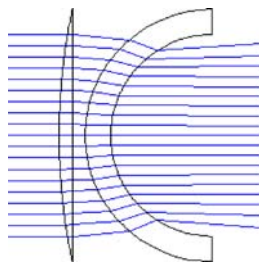


图3 平凸柱透镜校正光路

Fig. 3 Ray trace calibrated by convex cylindrical lens

间无焦点模式,然后在该半圆管左侧添加柱透镜,将柱透镜两侧的曲率半径和柱透镜与半圆管间距设置为可变量,将柱透镜边缘厚度设置为 3 mm,以便于加工. 为实现准直设计,优化函数设置为方均根(RMS)+利用波前计算差值(wavefront)+以重心点为基准(centroid). 将柱透镜与半圆管间距缩小,越小越有利于校正,为了实际操作,取间距为 5 mm,再次优化后,将像差校正不好的边缘加可变光阑限制,就可以使圆管内 80% 范围内光线呈现基本平行的情况,达到较为理想的效果. 其结果表明,以中心光线为参考,在该系统中出射光发散角度 RMS 约为 0.003°. 此时,柱透镜型曲面半径分别为 53.51 mm(外圆半径)和 58.41 mm(内圆半径). 在圆管右侧加上与左侧对称的柱透镜,即可得到完整圆管校正后的光路图,如图 4 为圆管整体校正光路.

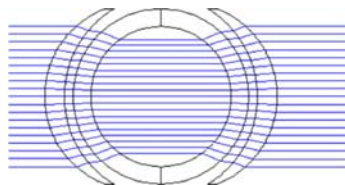


图4 圆管整体校正光路

Fig. 4 Ray trace of whole pipe calibration

需要说明的是,两侧的圆管壁都需要合适焦距的正柱透镜来修正圆管成像畸变,柱透镜的焦距和位置必须和 ZEMAX 软件拟合的实际情况相符合,如果焦距过短则修正会过量,焦距长了则柱透镜必须远离圆管表面,不利于显示视场大小,同时柱透镜起不到最佳的校正结果.

3 静态验证

根据计算和 ZEMAX 软件光线追踪结果,得到了柱透镜的焦距和曲面半径后,按仿真情况加工了两个半圆管和两个弯月柱透镜,如图 5 所示.



图5 光学加工件

Fig. 5 Optical manufacture

验证背景光源采用乳白色散射屏,背后用柔和的日光灯管照明.校正标准参考物采用黑白相间的电脑印刷栅格,黑色宽度为3 mm,白色宽度为0.5 mm,将该栅格紧贴在散射屏外表面.

将半圆管开口部分紧贴栅格,拍摄栅格的成像情况,如图6,然后将单个柱透镜放置于半圆管外侧合适位置予以校正,拍摄栅格成像情况,如图7.

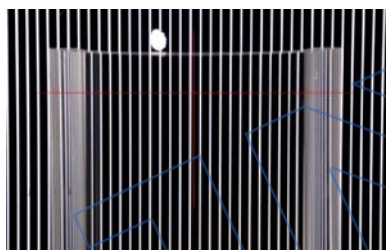


图6 半圆管对栅格成像畸变的影响

Fig. 6 Effect of half-pipe on grid image distortion



图7 半圆管由单柱透镜校正后的栅格成像

Fig. 7 Grid image in half-pipe calibrated by a acylindrical lens

将得到的栅格条纹图像进行间距判读.由于中心栅格变形基本可以忽略,采用中间栅格宽度作为参考标准,其他宽度与其进行比较,考察加柱透镜前后在径向的畸变量,得到的结果如图8所示.

从图8可以得到如下一些结论:未校正前,半圆管对栅格成像中间失真也较小,从中心往两边,条纹逐渐压缩变窄,到管壁附近时,条纹已经严重

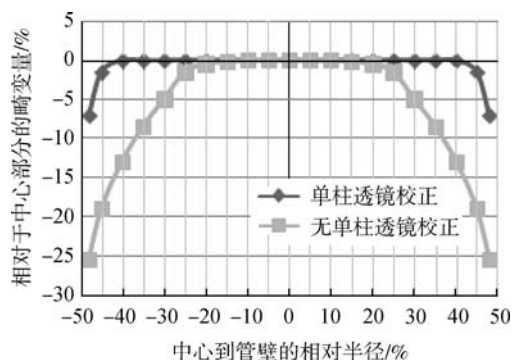


图8 半圆管由单柱透镜校正后的结果

Fig. 8 Result of half-pipe calibrated by a cylindrical lens

压缩,同时从中心往两边条纹的压缩量并不成比例;通过校正后,条纹压缩得到了明显的改观,特别是在从中心往两边大于40%的范围内,校正较好,达到了设计的预期.有效视场较未校正之前的不到30%提高到了大于80%.

4 高温高压流场的适用性分析

在进行圆管侧壁拟合焦距以及正柱透镜设计时,都是将圆管内外的折射率假定为1,并以平行光出射.静态验证时,可以满足该假设,但是进行动态验证时,必须考察圆管内的折射率的变化.为此,首先考察圆管内流场变化引起光线偏折变化的情况.

4.1 圆管内光线偏折对成像的影响

通过光线追踪发现,圆管内光线受扰非平行出射圆管后,光线将在原偏折角的基础上产生一定的客观偏离,原偏折角越大,出射圆管产生的偏离也越大.管内 1° 原偏折角的平行光出射后方均根偏离值约为 0.11° .但是圆管内平行探测光线受扰动产生的偏折角通常较小,经过后端的柱透镜后,相对原偏折角的改变更小,对成像影响可以忽略.下面通过一个具体的例子说明.如图9为焦距为5 m纹影偏折角示意图(f 为焦距),光源像在刀口位置的偏离位置通常为mm量级,取10 mm,此时的原偏折角仅为 0.114° ,通过ZEMAX

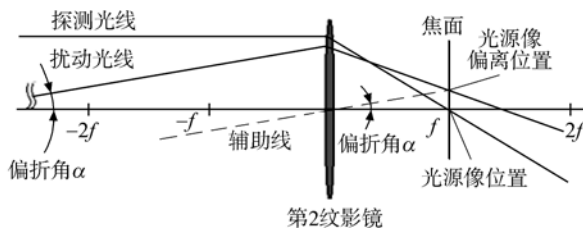


图9 纹影偏折角示意图

Fig. 9 Sketch of schlieren deflection angle

软件仿真后,其经过后侧圆管壁和柱透镜后,原偏折角的方均根偏离值约为 0.006° ,该值与原偏折角的百分比为 0.53% ,对流场成像和灵敏度影响较小。

4.2 圆管内折射率受压力和温度的影响

真空折射率被定义为 1,标准状态下气体的折射率为 1.0003 左右,折射率变化量与压力和温度的关系如式(2)所示

$$\Delta n = \frac{n_0 - 1}{p_0} \cdot \frac{\Delta p}{1 + \frac{t}{273}} \quad (2)$$

式中 n_0 和 p_0 为标准状态下气体的折射率和压力, Δn 和 Δp 分别为折射率变化量和压力变化量, t 为温度,单位为 $^\circ\text{C}$ 。在温度不变时,每增加 1 个大气压 ($1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$),折射率增加 0.0003,而温度越高,折射率变化量越小。该公式表明,只要温度较高,就可以使折射率改变量较小。假设在 10 MPa 和 1500°C 时的圆管内流场环境下,折射率变化量为 0.00462,以前面偏折角为 0.114° 计算,采用 ZEMAX 软件追踪光线发现,通过单侧管壁和柱透镜后,出射光线角度为 0.1137° ,改变量为 0.0003° ,约为原光线偏折角的 0.26% ,对光线偏折影响也较小,是可以忽略的。也就是说,在一定的压力和较高的温度环境中,管内折射率变化较小,可以近似为 1,经过柱透镜后,对原偏折角改变很小,可以忽略。

在前面的管壁焦距计算和柱透镜曲面优化设计时,都是将圆管内的折射率作为 1 来考虑的,通过第 4.2 节前面所述可以知道,管内在一定压力和较高温度范围内,折射率变化量较小,这样假设是可行的。如果通过式(2)计算发现折射率变化较大,那么管壁焦距计算和柱透镜曲面优化设计时,必须按照圆管内的实际折射率方均值进行实施。

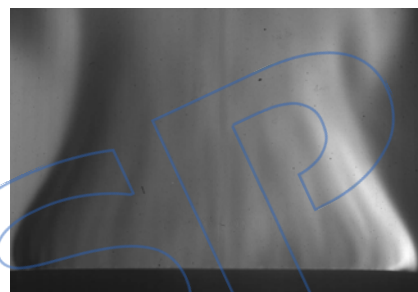
4.3 高温流场显示方法选择

高温流场往往伴随着自发光现象,考虑到对自发光的滤光需要,对燃烧场通常采用激光等单色光作为光源,定性的纹影和阴影等方法都可以。这里采用使用激光光源的聚焦纹影显示方法。由于相对于原偏折角,存在客观的微小偏离,采用干涉等方法得到的圆管内流场定量结果具有一定误差,所以此校正方法的精度还不足以进行精确的定量测量。

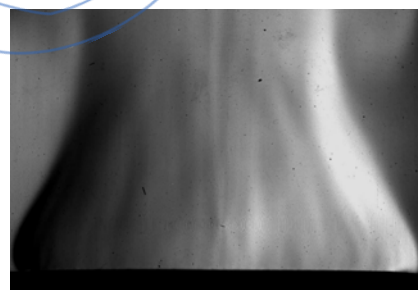
4.4 聚焦纹影验证结果

在平面火焰炉上,采用聚焦纹影显示方法,对

具有氮气保护的高温火焰流场进行显示,光源为 532nm 波长的半导体激光器,该聚焦纹影布局的锐聚焦深度为 5 mm,流场显示视场为 $\phi 150 \text{ mm}$,高速相机记录前采用对应滤光片滤掉自发光,相机曝光时间为 $1 \mu\text{s}$,得到如图 10 的结果。图 10(a)为没有加圆管和柱透镜得到的火焰流场,图 10(b)为加上圆管和柱透镜得到的火焰流场,该火焰炉直径为 60 mm,完全包裹在圆管内部,可以看到,由于该聚焦纹影布局的锐聚焦深度只有 5 mm,而且平面火焰炉流场较为均匀,图像对比度较低,但是火焰底部和中部细节非常接近,考虑到外加圆管对火焰形状的影响,两次结果基本吻合。



(a) 没有加圆管和柱透镜得到的火焰流场



(b) 加上圆管和柱透镜得到的火焰流场

图 10 聚焦纹影显示结果

Fig. 10 Result of focusing schlieren visualization

5 结 论

1) 采用玻璃材质研究圆管内流场时,管壁厚度对管内有效视场影响较大,采用拟合计算和 ZEMAX 软件相结合得到的弯月柱透镜,相对于此前的平凸柱透镜,可以更好地减小圆管管壁带来的畸变,校正后的有效视场有很大的提高。

2) 由于圆管内压力增大使得折射率增大,温度升高使得管内气体折射率变小,在一定的压力和较高的温度情况下,可以近似假定圆管内气体折射率为 1。通常情况下,圆管内流场偏折角较小,通过管壁和柱透镜出射后,光线偏离原偏折角

较小,对流场显示结果影响也较小。

3) 将置于圆管中心的格栅对校正结果进行验证,在中心大于80%范围内校正较好,达到了校正设计时的初衷。从聚焦纹影显示结果来看,显示结果基本能反映流场客观实际,没有出现明显的成像畸变情况。

4) 该校正方法虽然采用了ZEMAX软件进行辅助设计,相对于以前的工作更加精细。但是,由于校正中采用了一些近似假设,这使得圆管内流场显示用精确到波长级的定量干涉方法存在一定误差,但用本研究对圆管内流场进行定性显示是较为准确可行的。

参考文献:

- [1] 于芳芳,邓小宝,马争胜,等.轴对称矢量喷管内外流场的数值模拟[J].机械设计与制造,2008(9):146-148.
YU Fangfang, DENG Xiaobao, MA Zhengshen, et al. Numerical simulation on internal and external flow fields of axisymmetric vectoring nozzle[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(9):146-148. (in Chinese)
- [2] 雷金春,金捷.激波诱导轴对称气动矢量喷管流场数值模拟[J].航空动力学报,2008,23(9):1585-1590.
LEI Jinchun, JIN Jie. Numerical simulation of flow-field for shock induced axisymmetric fluidic vectoring nozzle[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(9):1585-1590. (in Chinese)
- [3] 黄宏艳,王强.过膨胀状态下轴对称收敛-扩喷管内外流场计算及分析[J].航空动力学报,2007,22(7):1069-1073.
HUANG Hongyan, WANG Qiang. Numerical investigation on internal and external flows for axisymmetric convergent-divergent nozzles on over-expansion state[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7):1069-1073. (in Chinese)
- [4] 夏春林,刘德彰.航空发动机圆套状尾喷管流场温度场数值模拟[J].航空动力学报,1994,9(4):428-430.
XIA Chunlin, LIU Dezhang. Numerical simulation of flow and temperature fields in double convergent nozzles[J]. Journal of Aerospace Power, 1994, 9(4):428-430. (in Chinese)
- [5] 张静,宋健斐,魏耀东,等. D300 mm×3 420 mm 圆管内旋流流场的LDV实验测量[J].实验流体力学,2009,23(1):40-44.
ZHANG Jing, SONG Jianfei, WEI Yaodong, et al. Measurement of the swirling flow field in the circular pipe with the diameter 300 mm×3 240 mm by LDV[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(1):40-44. (in Chinese)
- [6] 范勇,张佳成,陈念年,等.图像几何畸变校正方法[J].计算机工程与应用,2009,45(29):194-197.
FAN Yong, ZHANG Jiacheng, CHEN Niannian, et al. New method for image geometric distortion correction[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(29):194-197. (in Chinese)
- [7] Sakakibara J, Hishida K, Maede M. Measurements of thermally stratified pipe flow using image-processing techniques[J]. Experiments in Fluids, 1993, 16(2):82-96.
- [8] 刘亦鹏,胡学羽,陈佳洛,等.圆形截面管路内PIV流场测量的直接校正方法[J].上海交通大学学报,2013,47(4):525-531.
LIU Yipeng, HU Xueyu, CHEN Jialuo, et al. Direct image correction algorithm for PIV measurement of flow field within circular tube[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(4):525-531. (in Chinese)
- [9] LIU Yipeng, WANG Pingyang, HU Xueyu, et al. Visualization research on characteristics of the cryogenic slug flow in vertical and inclined tubes[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2012, 90(6):1588-1601.
- [10] 李如意,黄为民.柱状曲面容器内粒子图像测速中径向畸变校正方法[J].上海理工大学报,2008,30(4):315-318.
LI Ruyi, HUANG Weiming. Method of radial distortion calibration for PIV measurement in a cylinder container with arbitrary curve shaped[J]. Journal of University of Shanghai Science and Technology, 2008, 30(4):315-318. (in Chinese)
- [11] Robert C C, David S, Rhodes K. Schlieren system for visualizing the flow within a pipe of circular cross-section[R]. NASA LAR 13944-1, 1991.
- [12] 夏生杰,吴宝根.圆管内流动显示方法[J].力学学报,1982,7(4):401-403.
XIA Shengjie, WU Baogen. A method of visualization of internal flow field for studying circular pipe[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1982, 7(4):401-403. (in Chinese)
- [13] Benjaming J W, Haydee C D, Ronald J. Optical contouring of an acrylic surface for non-intrusive diagnostics in pipe flow investigations[J]. Experiments in Fluids, 2008, 45(1):95-109.
- [14] 刘钧,高明.光学设计[M].北京:国防工业出版社,2012.
- [15] ZEMAX Development Corporation. ZEMAX optical design program users guide[M]. San Diego: ZEMAX Development Corporation, 2004.
- [16] 徐翔,谢爱民,吕治国,等.聚焦纹影显示技术在激波风洞的初步应用[J].实验流体力学,2009,23(3):75-79.
XU Xiang, XIE Aiming, LÜ Zhiguo, et al. Application of focusing schlieren technology in shock wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(3):75-79. (in Chinese)
- [17] 岳茂雄,王如琴,姚向红,等.高速聚焦纹影改进及应用[J].实验流体力学,2013,27(5):88-93.
YUE Maoxiong, WANG Ruqin, YAO Xianghong, et al. Improved high-speed focusing schlieren system and its application[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(5):88-93. (in Chinese)
- [18] 王子余.几何光学和光学设计[M].杭州:浙江大学出版社,1985.