

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311327

基于几何光学的图像矫正法在圆管 PIV 实验中的应用研究*

陈朝帅, 余波, 张力伟, 周怀春

(中国矿业大学低碳能源与动力工程学院 徐州 221008)

摘要:粒子图像速度技术被广泛用于流体流动测量,介质折射率差异使光在圆管壁面发生偏折,导致图像失真,直接影响速度测量精度。本文建立了光学折射的物理模型,得到圆形管道中物点和图像点之间的函数关系进而得到矫正后图像的像素坐标,使用双线性插值算法得到像素灰度值重建出矫正后的粒子图像,最后根据多重网格迭代算法计算管内速度场。分别对流体进行管内静态流体与管内层流速度场测量实验,对比了光学矫正箱法、线性矫正以及基于光学模型的畸变矫正方法误差。结果表明,本文提出的基于几何光学的图像矫正方法精度优于光学矫正箱法和线性矫正方法,并通过静态与流动实验充分验证了所建立几何光学模型的准确性和有效性。

关键词:粒子图像测速;圆管流动;图像矫正;失真图像

中图分类号: TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.2010

Application of image correction method in PIV velocity measurement of round pipes

Chen Zhaoshuai, Yu Bo, Zhang Liwei, Zhou Huaichun

(School of Low Carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Particle image velocimetry (PIV) technology is widely used in fluid flow measurement. The refractive index difference of the medium causes the light to deflect on the wall of the tube, which may result in image distortion and directly affect the accuracy of velocity measurement. In this article, the physical model of optical refraction is established, and the functional relationship between the object point and the image point in the circular pipe is achieved. Then, the pixel coordinates of the corrected image are obtained. The bilinear interpolation algorithm is used to obtain the pixel gray value to reconstruct the corrected particle image. Finally, the velocity field in the tube is calculated according to the multi-grid iterative algorithm. The static fluid grid image deviation and laminar flow velocity field measurement experiments are carried out respectively. The errors of optical correction box method, linear correction method and distortion correction method based on optical model were compared. The results show that the accuracy of the proposed image correction method based on geometric optics is better than those of the optical correction box method and the linear correction method. The accuracy and effectiveness of the established geometric optics model are fully evaluated by static and flow experiments.

Keywords: particle image velocimetry; round-pipe flow; image correction; distortion image

0 引言

粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV) 是一种常用的非接触速度测量方法,广泛应用于实验流

体动力学的研究中,粒子图像的质量直接影响速度测量的准确性^[1-3]。在圆管实验流体力学的研究中,常采用透光性较好的固体介质作为圆管的材料(有机玻璃、石英玻璃)。光线在两种折射率不同的介质中传播时,在介质的交界面处发生折射,使光线的传播方向发生改变。圆管

的曲面几何形状,导致光线透过壁面沿着不同路径传播,相机采集的管内示踪粒子产生一定偏移。管内流体 PIV 实验时,图像中的示踪粒子将会产生错位,测量结果偏离真实的流动速度。理想的粒子图像没有光学失真和噪声^[4-5],矫正粒子图像的光学失真是 PIV 测速的主要挑战之一。

为了克服上述问题,通常使用如下技术进行图像矫正:

1) 光学矫正箱法:一些学者在测试段的管道外装上一个亚克力方腔,通过在方腔与圆管外壁间加注与管内介质相同的流体,解决圆形管道表面光学失真问题^[6-9]。畸变矫正的关键是光学矫正箱内介质的折射率与管道内测量流体的折射率值接近。当介质间折射率差异较小时,即使不能完全实现折射率完全匹配,也能够有效降低图像失真的影响^[10]。

2) 匹配折射率(matched index of refraction, MIR)方法:通过降低管内流体和固体介质的折射率差异,解决液体流动图像的光学失真问题^[11]。由于有机玻璃具有光学透明性、化学稳定性和易于制造,经常用作 PIV 实验研究的透明材料。室温下有机玻璃的折射率通常在 1.49 左右,而水在 20℃ 时的折射率为 1.33。将折射率较高的盐(碘化钠、碘化钾)或有机物(蔗糖)加入水中,会形成折射率较高的水溶液^[12]。后来, Amini 等^[13]研究了常用的透明固体材料的折射率匹配技术,特别是不同浓度的盐溶液以及几种有机液体的折射率与熔融石英和丙烯酸的匹配。Bai 等^[14]考虑了温度的影响,并拟合得到碘化钠溶液的浓度和折射率有关的经验公式,使 MIR 溶液的折射率涵盖了典型透明固体的折射率。Mazhar 等^[15]在研究 S 型圆管流动时,选择使用质量分数为 60% 的碘化钠溶液匹配亚克力试验段的折射率。在研究填充玻璃球附近的湍流时,用与玻璃球颗粒相同的折射率对流体进行匹配^[16]。然而 MIR 溶液通常价格昂贵,温度变化会影响 MIR 溶液的折射率^[13-14],并且溶液容易被氧化而影响图像质量^[17]。

3) 标准网格图像矫正方法:使用标准正交网格,对图像中的特征点进行匹配计算相机参数矩阵,对图像进行畸变矫正的方法^[18]。通过 Soloff 等^[19]的工作,实验中的粒子的位移是利用映射函数确定的。粒子的实际位置和图像上的空间位置之间的关系可以通过映射函数准确确定。随着数字图像处理技术的发展,基于图像的矫正方法已被广泛应用于图像矫正^[4,20-21]。然而当圆管的尺寸过小或不便于放置标准网格时,此方法将不再适用。此外,当圆管的规格发生改变时,往往需要重新定制标准网格,在实际使用时不具有通用性。

4) 基于光学模型的矫正方法:由于光在传播时遵循 Snell 定律,根据几何形状建立光路模型,推导出物体与图像之间的偏移关系。Lowe 等^[22]建立了圆管中光学折

射的模型,通过平面镜同时测量粒子在两个视图方向的图像,得到了粒子的管内的空间位置。姚钦舟等^[23]针对水下折射引起的图像非线性畸变问题,提出了一种非线性投影视图矫正方法。Darzi 等^[24]通过光学模型分析了不同管径和壁厚的圆柱形玻璃管中水-气界面的轮廓分布。Garafolo 等^[25]对液滴中的光路建模,矫正失真图像,并使用 micro-PIV 研究液滴表面的速度场。光学原理和图像矫正算法的结合可以解决由介质折射率引起的图像失真问题。

基于光学模型的矫正方法与上述其他方法相比大大降低了实验的复杂程度,适用于不同规格的圆管。Fu 等^[26]建立光学模型矫正圆管中气泡的轮廓,结果表明,图像的失真与两个因素有关:1) 管内和管外介质的折射率;2) 圆管的几何形状,关于两因素对图像失真的具体影响分析不足。Cherdantsev 等^[27]发现:圆管失真图像在管中心的大部分区域是线性的,而在其他区域是非线性的。由于畸变的程度是不同的,须对不同的管径分别进行计算。李华军等^[28]采用线性矫正方法对微小管道两相流图像畸变进行矫正,指出液相折射率与管壁折射率接近时,图像放大倍率不再是定值。像素是构成图像的最小单位,并且图像畸变较为复杂,需要对不同位置的像素分别矫正,作者^[27-28]并未给出实现方法。此外,关于光学矫正箱、线性矫正和几何光学原理矫正畸变图像在管内 PIV 测速的比较未见报道。

本文基于圆管几何光学模型,得到管中心物点与像点的畸变函数关系,提出了根据畸变曲线对畸变图像矫正的方法。该方法与光学矫正箱和线性矫正图像处理方法相比,有效降低了圆管曲面引起的图像畸变。通过圆管静态实验以及动态圆管层流流动 PIV 速度测量实验验证了本文所提图像矫正方法的有效性。

1 图像矫正方法

1.1 光学模型图像矫正方法

图 1 为圆管几何光学模型, O 点是圆的中心, A'' 是光线第一次折射后反向延长线与中心平面的交点。假设介质 1、2 和 3 的折射率为常数。中心平面上的物点都会向任意方向散射光线,这些散射光线通过相机镜头汇聚成像平面中同一点。为了便于分析物点与像点的几何关系,在建模分析中假定入射光线与镜头轴线平行。

介质 1 为管道内流体介质,介质 2 为聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)制成的透明圆管,介质 3 为外界空气。中心平面的光线在圆管的内、外表面两次折射,根据 Snell 定律:

$$\begin{aligned} n_1 \sin i_1 &= n_2 \sin i_2 \\ n_2 \sin i_3 &= n_3 \sin i_4 \end{aligned} \quad (1)$$

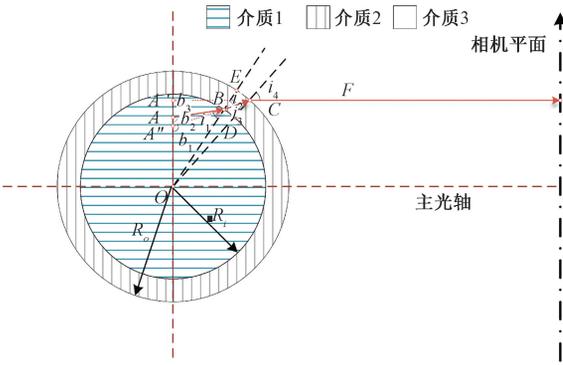


图1 圆管几何光学模型(A是中心平面上的物点, A'是 CCD 相机平面的图像点)

Fig.1 The geometrical-optical model of a circular tube (A is the object point in the central plane, A' is the image point in the plane of the CCD camera)

式中: n_1, n_2, n_3 是介质 1、介质 2 和介质 3 的折射率, i_1, i_2, i_3, i_4 分别是第一和第二折射时的入射角和折射角。在三角形 $A''OB$ 和 $A''OC$ 中,根据正弦定理:

$$\frac{A''O}{\sin i_2} = \frac{OB}{\sin b_1}, \frac{A''O}{\sin i_2} = \frac{OC}{\sin b_2} \quad (2)$$

从式(2)中,可以推导出:

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_3} = \frac{OC}{OB} = \frac{R_o}{R_i} \quad (3)$$

其中, R_o 是圆管的外直径, R_i 是圆管的内直径。

$A'O$ 的长度定义为 L , AO 的长度定义为 l ,在三角形 AOB 中,根据正弦定理。

$$L = R_o \sin i_4 \quad (4)$$

$$\frac{l}{\sin i_1} = \frac{R_i}{\sin b_2} \quad (5)$$

$$b_2 = \frac{\pi}{2} + i_2 + i_4 - i_1 - i_3 \quad (6)$$

定义:物点的相对长度为 $r = \frac{l}{R_i}$, 图像点的相对长度

为 $R = \frac{L}{R_i}$, 相对外径为 $R_r = \frac{R_o}{R_i}$ 。

$$r = \frac{\sin i_1}{\sin b_2} \quad (7)$$

$$R = R_r \sin i_4 \quad (8)$$

$$i_1 = \sin^{-1}(R_r n_{31} \sin i_4) \quad (9)$$

$$i_2 = \sin^{-1}(R_r n_{32} \sin i_4) \quad (10)$$

$$i_3 = \sin^{-1}(n_{32} \sin i_4) \quad (11)$$

式中: $n_{31} = \frac{n_3}{n_1}, n_{32} = \frac{n_3}{n_2}$ 。

根据式(6)~(11),将得到以下方程:

$$r = \frac{n_{31} R}{\cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{R}{R_r}\right) + \sin^{-1}(n_{32} R) - \sin^{-1}(n_{31} R) - \sin^{-1}\left(\frac{n_{32}}{R_r} R\right)\right)} \quad (12)$$

式(12)得到 r 和 R 之间的函数关系,根据极限的定义进行计算 $\lim_{r \rightarrow 0} \frac{dR}{dr} = \frac{n_1}{n_3}$ 。因此,畸变曲线的初始段斜率与管道的材料无关,只与管内介质折射率相关。

1.2 线性图像矫正方法

李华军等^[28]在研究圆管的气泡轮廓时提出线性矫正方法,将变形的图像按照一定比例对径向方向线性缩放以矫正失真图像。根据 1.1 节的分析可知,线性段斜率为管内外流体介质的折射率之比,像点与物点的对应关系如式(13)所示。

$$r = n_{31} R \quad (13)$$

图像矫正采用双线性插值算法^[29],对畸变图像进行线性矫正时沿径向缩放 n_{31} 倍。

1.3 光学矫正箱法

光学矫正箱法是在圆管外加装透明方腔,并在腔内注入与管内相同的流体介质。光学矫正箱光路如图 2 所示,上部方腔内的介质为空气,下部为水。 s_1 和 s_2 为在管中心平面距离圆心相同距离 l 处的物点, S_1 和 S_2 为相机平面中的像点。光学矫正箱中的流体介质作为圆管与流体间的缓冲介质,使光路得到矫正。

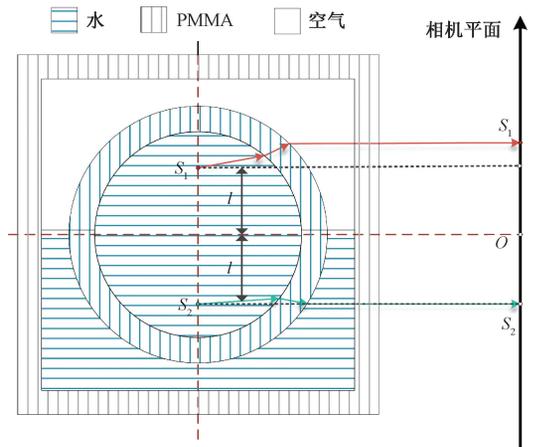


图2 光学矫正箱光路

Fig.2 Diagram of optical path of optical correction box

2 实验方法

2.1 圆管静态矫正实验

如图 3 所示,实验选取 4 种不同内径的 PMMA 圆管,

内径分别为 10、20、30、40 mm,并标记为#10、#20、#30、#40。圆管中心平面放置一个宽度与圆管内径相同的标准网格,网格的规格为 1 mm×1 mm。光学矫正箱的外部尺寸为 65 mm×65 mm×100 mm,厚度为 4 mm。静态实验圆管中的介质为空气、水、甘油,使用 CCD 相机采集图像,实验介质的光学属性如表 1 所示。

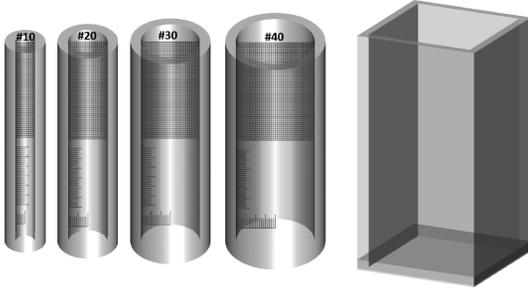


图 3 圆管和光学矫正箱

Fig. 3 Circular tubes and optical correction box

表 1 实验介质的光学属性

Table 1 Optical properties of experimental media

介质	密度/(g·cm ⁻³)	折射率
PMMA	1.18	1.49
空气	0.001 205	1.00
水	9.982	1.33
甘油	1.261	1.47

2.2 圆管流动 PIV 测速实验

图 4 是实验装置示意图,由激光照明系统、图像采集系统、图像处理系统和圆管流量实验装置组成。流量计(型号:FD-Q50 Keyence)用于监测管道中的水流量,激光照明系统(型号:Mini TR-PIV 2M3 北延测量)由激光适配器、激光器和片光源透镜组成。实验使用直径为 20 μm、密度为 1.04 g/cm³的 PSP 示踪粒子。水泵启动后,调整激光器的位置使激光垂直穿过测试部分,光学矫

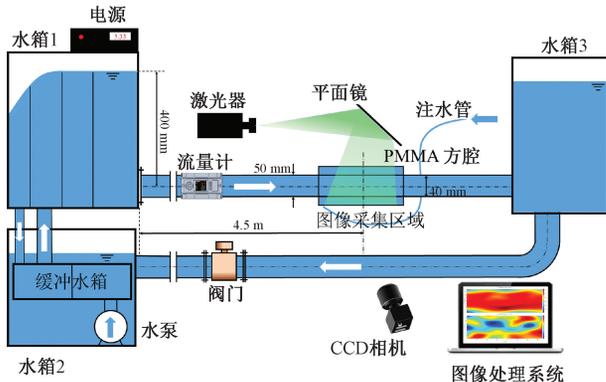


图 4 圆管实验台示意图

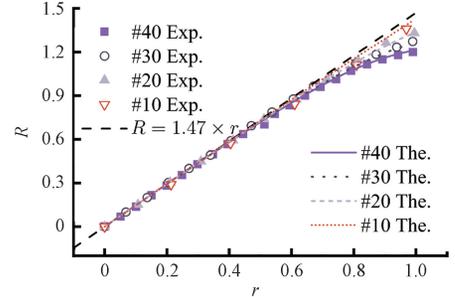
Fig. 4 Diagram of experimental setup for round tubes

正箱位于圆管外侧,并通过底部的细管注满水。圆管的内径和外径分别为 40 和 50 mm。从测试区中心到入口的长度为 4.5 m,材质为 PMMA。位于管道末端的电磁阀控制管内水流量。CCD 相机(300 FPS,1 024 pixel×2 048 pixel)在图像采集区域拍摄多帧粒子图像。

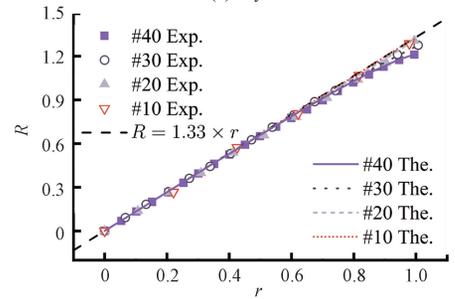
3 结果和讨论

3.1 圆管几何光学模型验证

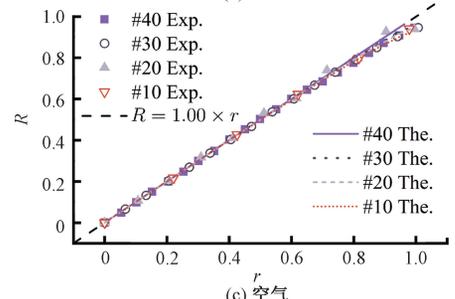
图 5 为管内空气、水和甘油在 4 种规格圆管中网格节点的实验结果。靠近圆管壁面部分的非线性区域与管内的流体介质和相对外径 R_r 有关,畸变曲线的线性部分的斜率为管内介质的折射率。实验结果与理论预测吻合,证明了畸变曲线能够准确反映物点与图像点之间的对应关系。



(a) 甘油
(a) Glycerol



(b) 水
(b) Water



(c) 空气
(c) Air

图 5 空气($n_1:1.00$)、水($n_1:1.33$)和甘油($n_1:1.47$)的实验结果

Fig. 5 Experimental measurement of air ($n_1:1.00$), water ($n_1:1.33$) and glycerol ($n_1:1.47$)

3.2 光学矫正箱法误差分析

光学矫正箱内介质与管内介质相同,此时图像失真主要与圆管的几何结构相关。如图6所示,在壁面附近, R 在0.97和0.99之间,表明管内壁面附近存在少量图像失真,与真实位置的相对误差为1%~2.5%。随着 R_r 增加,壁面附近的误差逐渐增大。当 $r < 0.7$ 时, R 的梯度近似为1如图6(b)所示。当 $r > 0.7$ 时, R 的梯度逐渐减少,并且随着 R_r 的减少,梯度下降更快。光学矫正箱法在靠近壁面的区域存在少量偏差,而在其他区域,可以准确地反映物体的真实位置。因此,在光学矫正箱内加注与管内介质相同的流体,可以有效降低图像失真的影响。由于流体介质折射率与管壁材料的折射率不同,壁面附近仍存在图像畸变。

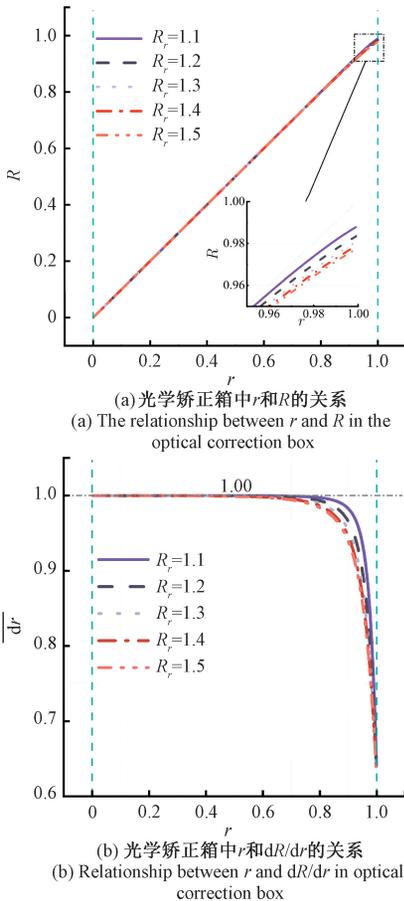


图6 光学矫正箱法误差分析

Fig. 6 Error analysis of optical correction box method

3.3 失真图像矫正

实验对比畸变曲线矫正法、线性矫正法、光学矫正箱的误差。#30圆管内的介质为水时,3种矫正方法输出的矫正图像如图7所示。图7(a)截取了圆管内变形区域的原始图像,矫正图像的中心区域为正方形网格。对比

矫正图像径向宽度可以发现,光学模型矫正算法与光学矫正箱的结果较为接近,略宽于线性矫正的图像。

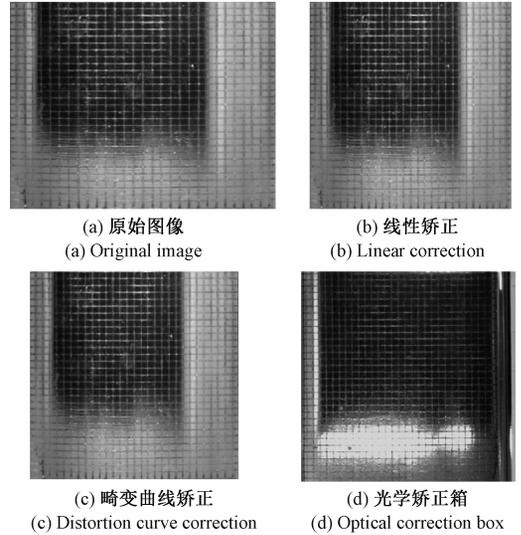


图7 矫正前后图像对比

Fig. 7 Image comparison before and after correction

定义矫正后的图像的相对误差为 Err :

$$Err = \frac{|R_{exp} - R_{std}|}{R_{std}} \quad (14)$$

式中: R_{std} 是标尺的图像相对长度, R_{exp} 是不同方法矫正后图像相对长度 R 。

在不同规格的圆管中,管内介质为水,表2所示为3种矫正方法的相对误差。光学矫正箱法矫正后的图像在壁面附近仍存在1.5%~2.5%的相对误差。基于光学模型矫正方法,通过物点和图像点之间的对应关系对图像进行矫正。理论上不存在系统误差,因此与标尺的相对误差最小。从表2中可以看出,畸变曲线矫正后的图像在壁面处的相对误差在1%以内。在#10和#20两种圆管实验中,线性矫正法在壁面处相对误差在1.5%以内。在#30和#40两种圆管实验中,线性矫正法的相对误差随着 R_r 的降低而增加。

3.4 圆管层流PIV速度场矫正结果对比

PIV实验中管内流动的雷诺数为1729.52,小于临界雷诺数2300为层流状态。理论上水在管内层流的速度分布为抛物线分布。对3种矫正方法处理后的图像进行速度场重建,结果如图8所示,其中 R_{aw} 为未矫正的速度分布。当管道中的流体为层流时,流动呈现出分层流动的特征。流动处于充分发展段,忽略管内流体轴向方向的速度梯度,流动方向与轴向平行,速度分布近似抛物线型。

统计管内水流的径向平均流速,3种矫正方法及原始图像的速度分布如图9所示,其中曲线为标准二次函

表 2 不同矫正方法的相对误差

Table 2 Relative error for different methods %

方法	壁面处不同矫正方法的相对误差			
	#10	#20	#30	#40
Box	2.29	1.86	1.63	1.81
DC	0.01	0.46	0.01	0.80
LIN	0.37	1.28	3.73	7.32

方法	不同矫正方法的最大相对误差			
	#10	#20	#30	#40
Box	2.29	3.11	2.90	1.89
DC	1.87	1.40	2.26	1.36
LIN	1.50	1.43	3.88	7.32

方法	不同矫正方法的平均相对误差			
	#10	#20	#30	#40
Box	0.72	1.05	0.59	0.99
DC	0.54	0.77	0.78	0.86
LIN	0.63	1.02	1.41	2.51

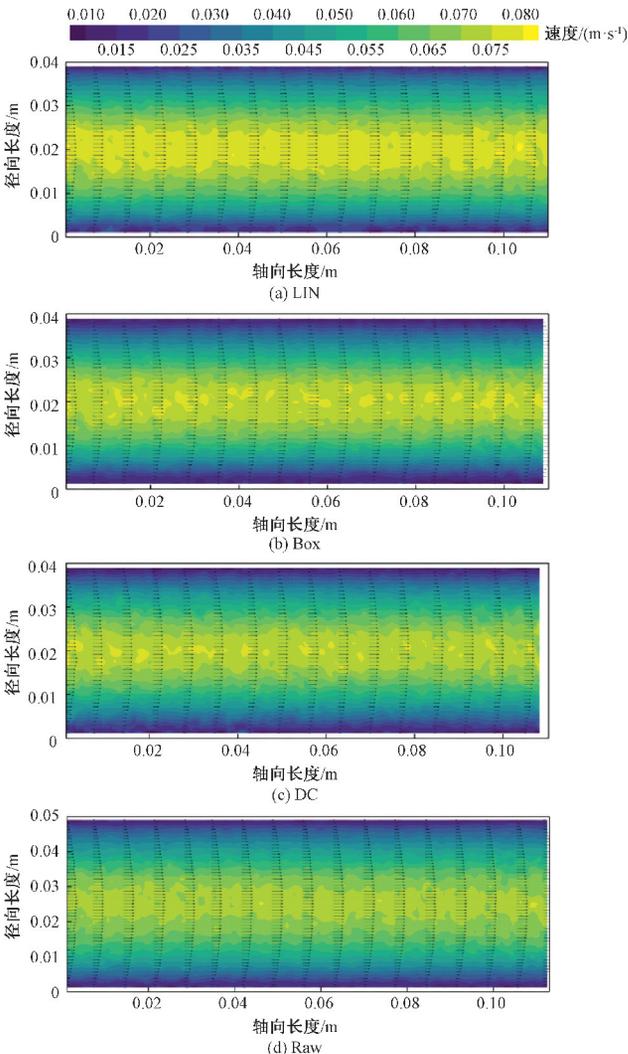


图 8 3 种矫正方法的管内速度分布云图

Fig. 8 The velocity distribution cloud diagram of the three correction methods in the tube

数,散点为查询窗口平均轴向速度值。由于轴向不存在图像畸变,因此轴向最大平均流速差别不大。从速度分布上看,由于畸变图像存在径向变形,原始图像得到的速度分布明显偏离真实速度。畸变曲线矫正法和光学矫正箱法的速度分布与标准二次分布接近,当 $|r|$ 在 0.5~1.0 范围内时,线性矫正法的速度略高于畸变曲线矫正法和光学矫正箱的速度值;当 $|r|$ 在 0.5 以内时,3 种畸变矫正方法的速度分布接近。

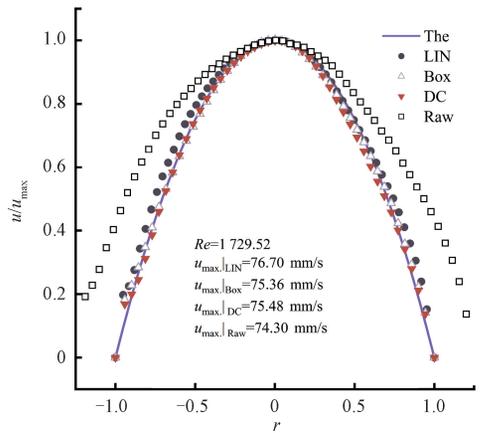


图 9 轴向平均速度分布

Fig. 9 Axial mean velocity distribution

4 结 论

本研究基于圆管光学模型得到物点与图像点之间的函数关系,并通过静态实验与管内流动实验验证了圆管光学模型的准确性。通过对函数初始段求极限,证明了畸变曲线线性段斜率为管内介质折射率,与圆管介质折射率、圆管规格无关。基于圆管光学模型对光学矫正箱进行了误差分析,由于流体介质折射率与管壁材料的折射率仍存在少量差异,使壁面附近仍存在 1%~3% 的图像失真。线性矫正法的相对误差随着圆管的相对外径 R_r 的增加而减少。本文提出的圆管内畸变图像重建算法,降低了圆管 PIV 测速实验的复杂性,对近壁面区域速度场高精度测量具有重要意义。

参考文献

[1] WINKLER C M, KUHN A I, HENTSCHEL G, et al. A review on novel channel materials for particle image velocimetry measurements-usability of hydrogels in cardiovascular applications [J]. Gels, Basel: Mdpi, 2022, 8(8): 502.

[2] YU C, LUO H, BI X, et al. An effective convolutional neural network for liquid phase extraction in two-phase

- flow PIV experiment of an object entering water [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 237: 109502.
- [3] WANG H, LIU Y, WANG S. Dense velocity reconstruction from particle image velocimetry/particle tracking velocimetry using a physics-informed neural network [J]. *Physics of Fluids*, Melville: AIP Publishing, 2022, 34(1): 017116.
- [4] WANG X L, ZHENG G L, WAN Q D, et al. Particle image velocimetry flowmeter for natural gas applications[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 82: 102072.
- [5] OZKAN G M, ELSINGA G E, BREUGEM W-P, et al. Stereoscopic PIV measurements of flow over a riblet surface at high Reynolds number [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 120: 110246.
- [6] SHOKRI R, GHAEMI S, NOBES D S, et al. Investigation of particle-laden turbulent pipe flow at high-reynolds-number using particle image/tracking velocimetry (PIV/PTV) [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 89: 136-149.
- [7] HELLSTRÖM L H O, GANAPATHISUBRAMANI B, SMITS A J. The evolution of large-scale motions in turbulent pipe flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 779: 701-715.
- [8] VIRGILIO M, MAYO I, DEDEYNE J, et al. Effects of 2-D and 3-D helical inserts on the turbulent flow in pipes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 110: 109923.
- [9] DINARYANTO O, PRAYITNO Y A K, MAJID A I, et al. Experimental investigation on the initiation and flow development of gas-liquid slug two-phase flow in a horizontal pipe [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 81: 93-108.
- [10] DURRETT R P, GOULD R D, STEVENSON W H, et al. A correction lens for laser Doppler velocimeter measurements in a cylindrical tube[J]. *AIAA Journal*, 1985, 23(9): 1387-1391.
- [11] SONG M S, JEONG J H, KIM E S. Flow visualization on SFR wire-wrapped 19-pin bundle geometry using MIR-PIV-PLIF and comparisons with RANS-based CFD analysis [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, 147: 107653.
- [12] BUDWIG R. Refractive index matching methods for liquid flow investigations [J]. *Experiments in Fluids*, 1994, 17(5): 350-355.
- [13] AMINI N, HASSAN Y A. An investigation of matched index of refraction technique and its application in optical measurements of fluid flow [J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 53(6): 2011-2020.
- [14] BAI K, KATZ J. On the refractive index of sodium iodide solutions for index matching in PIV [J]. *Experiments in Fluids*, 2014, 55(4): 1704.
- [15] MAZHAR H, EWING D, COTTON J S, et al. Measurement of the flow field characteristics in single and dual S-shape 90° bends using matched refractive index PIV [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 79: 65-73.
- [16] ROUSSEAU G, ANCEY C. Scanning PIV of turbulent flows over and through rough porous beds using refractive index matching [J]. *Experiments in Fluids*, 2020, 61(8): 1-24.
- [17] UZOL O, CHOW Y C, KATZ J, et al. Unobstructed particle image velocimetry measurements within an axial turbo-pump using liquid and blades with matched refractive indices [J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 33(6): 909-919.
- [18] AKKURT M C, VIRGILIO M, ARTS T, et al. Ray tracing-based PIV of turbulent flows in roughened circular channels [J]. *Experiments in Fluids*, 2022, 63(11): 175.
- [19] SOLOFF S M, ADRIAN R J, LIU Z C. Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry [J]. *Measurement Science and Technology*, 1999, 8(12): 1441.
- [20] FUJISAWA N, TAKIZAWA T, YAMAGATA T. Comparative study of mass transfer distributions and oil-flow visualizations with image analysis on long and short 90° elbows [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 123: 110332.
- [21] NOVAKOVA L. Deformation correction algorithm for PIV data [C]. *Proceedings of the 35th Meeting of Departments of Fluid Mechanics and Thermomechanics*, 2016, 1768: 020008.
- [22] LOWE M L, KUTT P H. Refraction through cylindrical tubes [J]. *Experiments in Fluids*, 1992, 13(5): 315-320.

- [23] 姚钦舟, 庄苏锋, 屠大维, 等. 水下透视投影图像非线性畸变校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 176-183.
YAO Q ZH, ZHUANG S F, TU D W, et al. Non-linear distortion correction method for underwater perspective projection image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 176-183.
- [24] DARZI M, PARK C. Optical distortion correction of a liquid-gas interface and contact angle in cylindrical tubes[J]. Physics of Fluids, 2017, 29(5): 052004.
- [25] GARAFOLO N G, WITTMER J, PATHAK S. Curvature correction applied to droplets subjected to natural convection for particle image velocimetry [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 597: 124442.
- [26] FU X, ZHANG P, HU H, et al. 3D visualization of two-phase flow in the micro-tube by a simple but effective method [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(8): 085005.
- [27] CHERDANTSEV A V, ZDORNIKOV S A, CHERDANTSEV M V, et al. Stratified-to-annular gas-liquid flow patterns transition in a horizontal pipe [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2022, 132: 110552.
- [28] 李华军, 刘光宇, 余善恩. 微小管道两相流流动图像畸变校正研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 239-245.
LI H J, LIU G Y, YU SH EN. Flow image distortion correction for two-phase flow in micro/mini pipes [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 239-245.
- [29] 胡东华, 闫坤, 辛文凯, 等. 基于轮廓的圆形仪表自动

透视校正 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(1): 32-39.

HU D H, YAN K, XIN W K, et al, Contour-based automatic perspective correction for circular meters [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2023, 37(1): 32-39.

作者简介



陈朝帅, 2020 年获得河南科技大学学士学位, 现为中国矿业大学硕士研究生, 主要研究方向为流场光学测量和粒子图像测速。

E-mail: zschen@cumt.edu.cn

Chen Zhaoshuai received his B. Sc. degree from Henan University of Science and Technology in 2020. He is currently a master student at China University of Mining and Technology. His main research interests include flow field optical measurement and particle image velocimetry.



周怀春 (通信作者), 分别在 1985 年、1987 年、1993 年于华中科技大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为中国矿业大学教授, 主要研究方向为高温热辐射分析、锅炉燃烧监控及智能发电、燃烧及流动基础研究及流体力学。

E-mail: hczhou@cumt.edu.cn

Zhou Huaichun (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Huazhong University of Science and Technology in 1985, 1987 and 1993, respectively. He is currently a professor at China University of Mining and Technology. His main research interests include high-temperature thermal radiation analysis, boiler combustion monitoring and intelligent power generation, basic research on combustion and flow, and fluid mechanics.