小门南方。

第14卷第9期 出具的发公

激光测速 肉菌睾 李 启 (华南工学院化工研究所)

一种精确计算圆管流激光测速光学修正方法,对管壁及管内外介质 提罢: 均有相同折射率的理想情况作了计算,最大误差为 1.86×10-11。应用本方法还可以 预见测点位置的极限。 画出光束通过管外介质 向流体的光路的例视图和俯视图。

Optical correction of laser-Doppler-anemometry of cylindrical tube flow

Li Qien

(Institute of Chemical Engineering, South China Institute of Technology, Guangzhou)

Abstract: A calculating procedure for optical correction of LDA measurement of cylindrical tupe flow is presented. The calculated deviation error is less than 1.86×10^{-11} in the ideal case of the tube filled with liquids having the same refractive index as the tube wall. This method can also be used to predict the position limit of the measured points.



 $K'' = \sin^{-1} \left(\frac{m_{\omega}}{m} \sin K' \right)$

(8)

(2)

×10-11,证明此法具有极高的精度。在内径 为25.4mm 的圆管中进行了水的轴向流速 分布以及边界层的测量,并用本方法进行校 正,发现修正后的光学偏差远较其它误差为 小,在进行流量验算时,其误差在转子流量计 的允许误差范围内。由于流体的边界层随湍 流程度的加强而变薄, 所以光学修正尤属重 要, 否则将导致较大偏差。例如当流量为 1000升/hr的时候,未加修正的边界层厚度为 1.2mm,修正后的厚度为0.956mm,误差可 理,不作任何简化假设得到圆管流折光影响 光学修正精确的计算公式。对加方形罩和不 达25%。 加方形罩的数种情况作了计算,并对无偏的

收稿日期: 1986年7月7日。

理想情况作了计算以检验本方法的正确性。

所用圆管内径为25.4mm, 偏差最大为1.86

北島)國拿BTora 机时一系的波矢

二、公式的导出

常见的激光测速可以分为测轴向流速、 测径向流速和测切向流速三种。对二维测速 来说(本文只限于二维),偏差有水平位置偏 差、垂直位置偏差,还需进行速度校正,因为 光的波长及光束夹角随不同介质而变。

下面我们分三种不同测速情况来导出光 学修正公式

1. 测轴向流速时的光学修正

图1画出光束通过管外介质、管壁及管 内流体的光路的侧视图和俯视图。





图1 测轴向流速时的光路图

我们假设激光光束的交点原来在圆管的 中心上。我们要找出当光具坐标架向上移动 时光点在流体中的位置偏移和速度偏差。对 于位置偏移来说,这实际上就是要决定 d_e 和 光点离水乎直径的垂直距离和图中 r_a 之差。 首先,我们列出下列折射率之间的关系: $\alpha_a = \sin^{-1} \left(\frac{r_a}{R_0} \cos \lambda \right)$ (1)

$$\alpha_w = \sin^{-1} \left(\frac{n_a}{n_w} \sin \alpha_a \right) \tag{2}$$

$$\alpha'_w = \sin^{-1} \left(\frac{R_0}{R_i} \sin \alpha_w \right) \tag{3}$$

$$\alpha_f = \sin^{-1} \left(\frac{n_w}{n_f} \sin \alpha'_w \right) \tag{4}$$

式中 ra 为坐标架离中心的垂直位置; Ra, Ro 为管壁的内、外径; λ 为激光束在管外介质中 的垂直夹角之半; αa 为光束自管外介质射入 管壁的入射角; αw 为光束进入管壁的折射 角; α'w 为光束自管壁射入流体的入射角; αf 为光束射入流体的折射角; na、nw、nf 为管外 介质、管壁、管内介质的折射率。

此外,由正弦定律可得:

$$\frac{t_e}{\sin\delta} = \frac{R_i}{\sin\alpha_w} \tag{5}$$

$$\frac{t_e}{\cos\frac{\delta}{2}} = \frac{t}{\cos\left(\alpha'_w - \frac{\delta}{2}\right)} \tag{6}$$

式中 t_e 为光在管壁中的行程; t 为管壁厚度; δ 为由圆心向管壁入射点和出射点所连两条 半径之间的夹角,由公式(6)、(5)可推出

$$\delta = \alpha'_w + \sin^{-1} \left(\frac{t \sin \alpha_w}{R_i} - \sin \alpha'_w \right) \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(6)或(5)即可求出 t_e。 此外,从俯视图可以得出下列诸关系:

$$K' = \sin^{-1}\left(\frac{n_o}{n_w}\sin K\right) \tag{8}$$

$$K'' = \sin^{-1}\left(\frac{n_w}{n_f}\sin K'\right) \tag{9}$$

$$w = R_i \operatorname{tg} K'' + t \cdot \operatorname{tg} K' \qquad (10)$$

$$L_{f} = \frac{1}{\operatorname{tg} K''} \left\{ w - R_{0} [1 - \cos(\alpha_{0} + \lambda)] \operatorname{tg} K - t_{e} \cdot \cos(\alpha_{0} + \lambda - \alpha_{w}) \operatorname{tg} K' \right\}$$
(11)

$$t_f = \frac{D_f}{\cos(\beta - \alpha_f)} \tag{12}$$

其中

偏差。 爾在國管

 $\beta = \alpha_{o} + \lambda + \delta \qquad (13)$

K 为激光束在管外介质中的水平夹角之半; K'为光束进入管壁中的折射角; K"为光束 自管壁进入流体中的折射角; w 为两光束进 入管壁的水平距离之半; L_f 为在管内流体中 的光程在水平面上的投影长度; t_f 为光束在 管内流体中的光程; β 为自圆心连接光自内 壁出射点的半径与水平线之间的夹角。

在求出所有这些量后,就可以用下面的 式子求出水平位置偏差 d_o,垂直位置偏差 h 和速度校正因子 v_c:

$$d_{e} = R_{0} \cdot \cos(\alpha_{a} + \lambda) - t_{e} \cdot \cos(\alpha_{a} + \lambda - \alpha_{w})$$

$$-L_{f} \qquad (14)$$

$$h = R_{0} [1 - \cos(\alpha_{a} + \lambda)] \operatorname{tg} \lambda$$

$$-t_{e} \cdot \operatorname{tg} (\alpha_{a} + \lambda + \alpha_{w})$$

$$-t_{f} \cdot \operatorname{tg} (\beta - \alpha_{f}) \qquad (15)$$

$$v_{o} = \frac{\sin K}{\sin K''} \cdot \frac{n_{o}}{n_{f}} = 1 \qquad (16)$$

2. 测径向流束时的光学修正

图 2 画出光束通过管外介质,管壁及管 内流体时的光路图。



图 2 测径向流速时的光路图

由图可见,

$$\frac{r_{o}}{\sin \alpha_{o_{h}}} = \frac{R_{0}}{\sin (90^{\circ} + \bar{K})} = \frac{R_{0}}{\cos K} \quad (17)$$

$$\frac{r_{o}}{\sin \alpha_{o_{h}}} = \frac{R_{0}}{\sin (90^{\circ} - \bar{K})} = \frac{R_{0}}{\cos K} \quad (18)$$

…。参名"是加克书知道"

 $sin \alpha_n$ sin (90°-K) cos K 、 于是我们得出:

$$\alpha_{\sigma_1} = \alpha_{\sigma_2} = \alpha_{\sigma}$$
(19)
由公式(1)~(4)可以看到:
 $\alpha_{w_1} = \alpha_{w_2} = \alpha_{w}$
 $\alpha'_{w_1} = \alpha'_{w_2} = \alpha'_{w}$
 $\alpha_{f_1} = \alpha_{f_2} = \alpha_{f}$

于是公式(1)~(7)也适用于测径向流速的情况,但角β₁和β₂是不同的,它们分别等于;

$$\beta_1 = \alpha_a + K + \delta \tag{20}$$

$$\beta_2 = \alpha_a - K + \delta \tag{21}$$

这里下标1代表上面的光束,下标2代表下面的光束,其它符号同测轴向流速的情况。

111

$$S_{1} = t_{e} \cdot \cos(\alpha_{e} + K - \alpha_{w}) - R_{0} \cdot \cos(\alpha_{e} + K)$$
(22)

$$S_2 = t_e \cdot \cos\left(\alpha_w + K - \alpha_a\right) - R_0 \cdot \cos\left(\alpha_a - K\right)$$
(23)

则光束在流体中的光程(实际上是在垂直平 面内的投影)4,和4,之间有如下关系:

$$t_{f_{1}} = \frac{1}{\cos(\alpha_{f} - \beta_{2})} \left[t_{f_{1}} \cdot \cos(\beta_{1} - \alpha_{f}) + S_{1} - S_{2} \right]$$

$$(24)$$

命 w1 为切于管壁的水平外径的直线上 光束入射线和坐标架高度 r。之间的垂直距 离,则有

w₁=
$$R_0 \cdot tg K$$

再令
 $Q_1 = R_0 \cos(\alpha_a + K) tg K - t_e \cdot \sin(\alpha_a + K - \alpha_w)$
 $= w_1 \cos(\alpha_a + K) - t_e \cdot \sin(\alpha_a + K - \alpha_w)$
(25)

$$Q_2 = -w_1 \cos(\alpha_a - K) + t_e \cdot \sin(\alpha_w + K - \alpha_a)$$
(26)

$$T_{1} = \sin \left(\beta_{1} - \alpha_{f}\right) + \cos \left(\beta_{1} - \alpha_{f}\right) \operatorname{tg} \left(\alpha_{f} - \beta_{2}\right)$$
(27)

$$t_{f_1} = [Q_1 - Q_2 - (S_1 - S_2) \operatorname{tg} (\alpha_f - \beta_2)]/T_1$$
(28)

于是位置的水平偏差、垂直偏差和速度校正 因子如下:

$$d_e = -t_{f_1} \cdot \cos(\beta_1 - \alpha_f) - S_1 \qquad (29)$$

$$h = w_1 \cdot \cos(\alpha_a + K) - t_e \cdot \sin(\alpha_a + K - \alpha_w)$$

$$-t_{f_1} \cdot \sin\left(\beta_1 - \alpha_f\right) \tag{30}$$

$$v_o = \frac{\sin \kappa}{\sin\left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2}\right)} \cdot \frac{u_o}{n_f} \tag{31}$$

计算顺序是先由下式求 α。,

$$\alpha_a = \sin^{-1} \left(\frac{r_a}{R_0} \cos K \right)$$
然后用公式(2)~(7)、(20)~(28)、(25)算出

. 555 .



图 3 测切向流速时的光路图

th、th 等,即可算得 de、h 和 voo

3. 测切向流速时的光学修正

图 3 画出光束通过管外介质、管壁及管 内流体的光路图。由图可见,

$$\alpha_a = \sin^{-1} \left(\frac{r_a}{R_0} \sin K \right) \tag{32}$$

在公式(33)后面,可用在测轴向流速时的相同公式(2)~(7)进行计算,然后再按下面的公式顺序计算。

$$\beta = \alpha_a + K + \delta \tag{33}$$

$$w_2 = (R_0 + r_a) \operatorname{tg} K$$
 (34)

$$t_{f} = \frac{1}{\sin(\beta - \alpha_{f})} \{ w_{2} - [R_{0}(1 - \cos(\alpha_{a} + K))) \times tg K + t_{e} \cdot \sin(\alpha_{a} + K - \alpha_{w})] \}$$
(35)
$$r_{e} = t_{e} \cdot \cos(\alpha_{e} + K - \alpha_{e}) + t_{e} \cdot \cos(\beta - \alpha_{e}) \}$$

$$-R_{\rm e}\cos(\alpha+K) \tag{36}$$

就可以计算位置偏差和速度校正因子(注意, 在测切向流速的情况下,没有垂直位置偏 差):

$$d_e = r_a - r_f \tag{37}$$

$$v_{c} = \frac{\sin K}{\sin(\beta - \alpha_{f})} \cdot \frac{n_{o}}{n_{f}}$$
(38)

(02)

三、计算实例与分析

我们编制了一个 BASIO 程序进行一些 实例计算和分析。我们计算了数种加方形罩 和不加方形罩的情况。我们假设方形罩、圆 管及罩内所注液体具有相同折射率以及管外 介质、管壁和被测液体均具有相同折射率的 特殊情况来检查偏差情况及检验本文所提计 算方法的正确性和精度。计算结果表明,在 前一情况下,水平偏差并不比不加方形罩的 情况改善多少。由此可见,在大多数场合,光 学修正计算是非常必要的。对于光束通过完 全相同折射率的介质的后一情况,各种偏差 理应等于零。在计算中,我们得到的偏差 均为10⁻⁹数量级,最大偏差也只有1.86 ×10⁻⁸,这证明了本文所提出的计算方法的 正确性及其所具有的十分高的计算精度。

各种情况下的计算结果见表1至表5。 在表1中; $n_a=1$, $n_w=1.45$, $n_f=1.33$ 。这相 当于光束通过空气进入有机玻璃的圆管然后 射入水中测水的流速。最大的偏差发生在 $r_a=12.7$ mm 的场合,约为2至3 mm,而切 向水平位置偏差为4.57 mm。

表2是光束通过空气进入有机玻璃的圆 管然后射入空气测空气流速的情况。最大偏 差发生在测径向流速时 r_a=12.7 mm 位置 上,此时水平偏差为3.49 mm。其余各种偏 差均在1 mm 以下。比较表1 和表2 可以得 出,通过管壁前和管壁后介质的折射率愈接 近,偏差愈小,这是因为前者的折光偏差和后 者的折光偏差方向相反。

表3是加方形玻罩并在罩内注水以测管 内水的流速的情形。由于水的折射率接近有 机玻璃的折射率,且管壁两侧都是水,所以可 以预期其偏差要比表1及表2所列的为小。 由表3可见,最大偏差为测径向流速时 r_a = 12.7 mm的情形。此时的水平偏差为1.68 mm,其余偏差均小于0.25 mm。由表3还 可看出,在离壁0.2444 mm 以内已不能测轴 向流速。但可采用光点沿水平直径移动的测 量方法解决。

最有意思的是表 4, 这相当于加方形 罩并使所注液体与方形罩及圆管具有相同折 射率的情况。按通常理解,这样可大大减少

. 556 .

偏差	轴	向	径		向	切向	
ra(mm)	<i>d_e</i> (mm)	h (mm)	d_e (mm)	<i>h</i> (mm)	vc	d_e (mm)	vc
3	0.0908	-0.7393	-0.9344	-0.7463	0.7519	0.8332	0.7223
6	0.3729	-1.4458	-0.3863	-1.5053	0.7519	1.8306	0.6949
9	0.8811	-2.0692	-0.9235	-2.2964	0.7519	2.9749	0.6695
12	1.7069	-2.4978	-1.8179	-3.1625	0.7519	4.2519	0.6457
12.7	1.9680	-2.5416	-2.1040	-3.3858	0.7519	4.5676	0.6404

表1 $n_a=1$, $n_w=1.45$, $n_f=1.38$, $\lambda=0$, $K=10.75^\circ$

偏差	mitani	mitaib e	ail 径 ivo	d for impr	切向		
r _a (mm)	d_{θ} (mm)	h (mm)	d_e (mm)	h (mm)	vc	d_e (mm)	vc
3	-0.01051	0.000334	0.0521	-0.000453	1	-0.0507	1.0169
6	-0.04366	0.004068	0.2427	-0.00491	(Cherredu	-0.2074	1.0346
9	-0.1050	0.03041	0.7398	-0.03046	1	-0.3752	1.0469
12	-0.2055	0.39273	2.5530	-0.27472	0.9999	-0.8787	1.0732
12.7	-0.2271	0.88837	3.4862	-0.49599	0.9999	-0.9588	1.0767
	and the second second second			1 - 1 - 200 - 200	time to a white street in the		

angle 3 $n_a = 1.33$, $n_w = 1.45$, $n_f = 1.33$, $\lambda = 0$, $K = 10.75^{\circ}$

偏差	神》。 朝 前 前 前 前 前 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一		^{加上} 於3.52 <u>m</u>			前切 向		
r _a (mm)	<i>d_e</i> (mm)	h (mm)	d_{e} (mm)	h (mm)	vc k	<i>d_e</i> (mm)	the vc	
3	-0.00599	0.000057	0.01409	-0.000033		-0.01336	1.0045	
6	-0.02689	0.000648	0.06856	-0.000392	5回。光期分	-0.05402	1.0090	
9	-0.07077	0.004948	0.23160	-0.002981	KN。 使局部	-0.12343	1.0137	
12	-0.18233	0.08663	1.0759	-0.04833	0.99999	-0.22386	1.0187	
12.7	-0.22000	0.24440	1.6745	-0.11267	0.99999	-0.24383	1.0195	

 $a = 1.45, n_w = 1.45, n_f = 1.33$ $\lambda = 0, K = 10.75^{\circ}$

偏差	红出轴 [1] [1]	一 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	谷口谷口	(1) 6435a a 26	向	·····································	向地理
r _a (mm)	<i>d_e</i> (mm)	h (mm)	<i>d_e</i> (mm)	h (mm)	vc	d_{e} (mm)	vo
	-0.03087	0.27221	0.07059	0.26992	1.09023	-0.34073	1.11358
	-0.12940	0.55624	0.31320	0.53385	1.09023	-0.82877	1.13813
9	-0.32116	0.89154	0.89856	0.77079	1.09023	-1.47731	1.16415
11.6	-0.64668	2.0875	3.10982	0.65830	1.09023	-2.18226	1.18813

* 作着现工作单位差大原工。关约流光研究室。

(下转第543页)





图 7 位移矢量 4r 与图 5 的同,物为反射漫射体 6 为一组由二次曝光所获得的全息干涉图 形 照片,各对应于表中序号为 1、2、3 和 6 实验 所得的干涉图形。

照片中出现的十字丝,其交点即为预置 在记录平面 *H* 上座标(ζ, η)系统的原点(0, 0)。表中所列的实验结果表明,本法具有足够的精度(约1~2%)。因此,采用在傅里叶频谱面上比较物体位移前后的位相因子变化的方法,可以实现对物体三维位移矢量的测量。还完全避免了传统方法所遇到的困难。

图 7 为物是一反射漫射体对所得的干涉 图形照片。实验参数与表中 3 同。可见,其 干涉图形也与图 5 的照片同,表明本法同样 适用于具有足够宽连续频谱的漫射物体。

必须指出,作为被测对象,不管形状如 何,也无论是透明体或反射体,以具有连续而 较宽阔的空间频谱为宜。 在测量方法上,除 记录用的光学系统在安排上略有不同外,并 无根本的区别。

参考文献

- E. B. Aleksindrov, A. M. Bonch-Bruevich; Sov. Phys. Tech. Phys., 1967, 12, 258.
- [2] A. E. Annos; J. Sci. Instrum., 1968, 1, 731.
- [3] C. A. Sciammarella, Gillbert; Appl. Opt., 1973, 12, 1951.
- [4] U. Kopf; Opt. Laser Technol., 1973, 5, 111.
 - [5] Ming-Yi Chen et al.; SPIE Proc., 1983, 416, 7.
 - [6] J. W. Goodman; Introduction to Fourier Optics, McGraw-hill, 1968.

偏差	轴		h the Andrew 径	(1100)(ges hun Si-photo-colla	向 La 向	切	L Alix 向
r _a (mm)	d _e (nm)	h (nm)	d _e (nm)	h (nm)	trion of a large state	d_{e} (nm)	v _c
3	-0.003725	0	0	0	1	-0.002794	Risco _l
6	0	0	0.007451	0	1	0.007451	1
9	-0.003725	0	-0.003725	-0.001490	1	0.003725	1
12 Dox	-0.003725	0.005798	0.004657	0.000403	1	0.018627	1
12.5	+0.002794	ITAL ON LERE	0.007451	0.007224	可是可省	0.011176	1.1

表5 $n_a = n_w = n_f = 1.45$, $\lambda = 0$, $K = 10.75^\circ$

折光偏差。其实不然,从表4可以看出,当 r_a=11.6 mm时,偏差已达3.11 mm,而当 r_a=11.8 mm时,偏差增加到4.08 mm。如 再将 r_a增加为11.9 mm,此时光束自管内 壁射入被测 流体 与半径所成之角将大于 90°,甚至不能形成交点。

参考文献

 Boadway J.D., Karahan E.; DISA Information, 1981, No. 26.

[2] Bicen A. F.; TSI Quarterly, 1982, 8, Issue 2.

. 543 .