

LDA 激光探头光轴非垂直放置对测量的影响

张 莉 陈汉平

(上海交通大学, 上海, 200030)

摘要: 从光学理论角度分析了 LDA 探头非垂直布置时, 光束经过任意层中间介质后测量控制体在被测介质中的性质变化, 推导了确定被测介质中测量控制体位置、条纹间距、被测速度方向的计算公式, 研究了被测介质中测量控制体随激光探头移动而移动的变化规律。结果表明, LDA 探头非垂直布置时, 测量控制体具有与垂直布置时不同的性质。

关键词: LDA 非垂直 折射

The effect of off-axis alignment of the LDA-probe on measurement

Zhang Li, Chen Hanping

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030)

Abstract: The theoretical analysis of the performance parameters of measurement volume with off-axis alignment of the LDA-probe has been carried out. The calculated equations of the location, the fringe spacing of the measurement volume, the direction of measured flow velocity in the flow has been deduced. The proportion of the displacements between measurement volume and the LDA-probe has been determined. The results show that the measurement volume with off-axis of the LDA-probe has different performance from that with on-axis probe.

Key words: LDA off-axis refraction

引 言

激光测速仪(LDA)是一种精密的光学仪器,其测量精度很大程度上取决于测量控制体的性质,包括测量体的位置、干涉条纹的间距、测量速度的方向等,因此,在使用 LDA 测量流体流动时,人们一直很关心测量控制体的性质,以保证 LDA 的测量精度。尤其是在测量内部流动(如离心风机或离心泵内部流动)时,由于光束到达测量位置前需要穿过空气、特制的透明窗口(通常用光学玻璃)、被测介质等若干层介质,光束在其行进过程中要发生若干次折射,导致测量控制体性质的改变,如测量体位置的偏移、光束夹角、干涉条纹的间距的改变等,这就更需要定量地确定出测量控制体性质的变化。Parry 和 Doukelis 等人^[1,2]研究了光束光轴垂直穿过透明窗口后折射作用对测量体位置和光束夹角改变的影响。但是,当使用 LDA 测量三维流动时,由于受实验条件的限制,为了获得流动的第 3 个方向上的速度,测量该方向速度的两光束探头的光轴不能与窗口平面垂直,而必须与窗口平面的法线有一定夹角,这时,由于光轴的偏斜,两光束在被测介质中相交前所经过的光程不同,测量控制体性质的改变不再是单纯的测量控制体位置和光束夹角的改变,还会包括测量体干涉条纹间距和被测速度方向的改变;而且当被测介质不是空气时,激光探头的移动还会引起测量控制体在被测介质中的改变。因此,当使用 LDA 测量内部流动的三维流场时,有必要掌握激光探头非垂直布置对测量控制体性质的影响,以便提高 LDA 的测量精度。Booij 等人^[3]采用折射率补偿的方法补偿了光束的折射作用。

Zhang 等人^[4]研究了光束穿过两种不同连续介质时,光束折射对测量的影响,但研究中没有合理考虑折射后速度测量方向的改变。我们将从光学理论角度出发,定量研究激光探头非垂直布置时,光束穿过任意层不同连续介质后光束夹角的改变、干涉条纹间距的改变、被测速度方向的改变、以及测量控制体位置随激光探头位置推移而移动的关系,以期对 LDA 在三维内部流动测量应用时起到指导作用。

1 对光束夹角的影响

图 1 以光束经过两层透明窗口为例,示出了激光探头光轴不垂直于窗口平面时的光路图,图中,激光探头光轴在空气中与窗口平面法线的夹角为 φ_0 ,在空气中的光束夹角和入射角分别为 $\theta_0, \varepsilon_{1_0}, \varepsilon_{B_0}$,在被测介质中的光轴折射角、光束夹角和折射角分别为 $\varphi_A, \theta_4, \varepsilon_{A_4}, \varepsilon_{B_4}$ 。并设在中间介质中的光轴折射角、光束夹角和折射角分别为 $\varphi_k, \theta_k, \varepsilon_{A_k}, \varepsilon_{B_k} (k = 1, 2, 3)$ 。

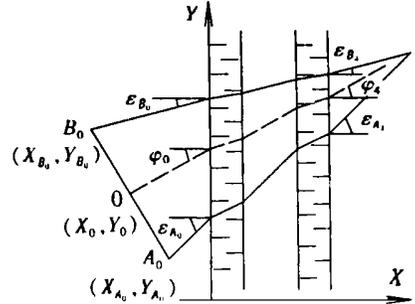


Fig. 1 Refraction and intersection of laser beams of an off-axis probe

空气的相对折射率通常认为是 1; 设中间介质的相对折射率为 $n_k (k = 1, 2, 3)$; 被测介质的相对折射率为 n_4 。则:

$$\sin \varepsilon_{1_0} = n_1 \sin \varepsilon_{A_1} = \dots = n_4 \sin \varepsilon_{A_4} \quad \sin \varepsilon_{B_0} = n_1 \sin \varepsilon_{B_1} = \dots = n_4 \sin \varepsilon_{B_4} \quad (1)$$

于是,
$$\sin \varepsilon_{A_0} = n_4 \sin \varepsilon_{A_4} \quad \sin \varepsilon_{B_0} = n_4 \sin \varepsilon_{B_4} \quad (2)$$

由于在空气和被测介质中光束夹角与折射角间存在如下关系:

$$\theta_0 = \varepsilon_{1_0} - \varepsilon_{B_0} \quad \theta_4 = \varepsilon_{A_4} - \varepsilon_{B_4} \quad (3)$$

可见,光束夹角的变化仅与被测介质有关,而与中间介质无关,即无论光束穿过多少层中间介质以及中间介质的折射率为多大都不会影响光束的最终夹角。下面以被测介质是否为空气而分别讨论。若被测介质仍为空气,由于 $\varepsilon_{1_0} = \varepsilon_{A_4}, \varepsilon_{B_0} = \varepsilon_{B_4}$, 则其在被测介质中的夹角与空气中的夹角一致,即 $\theta_4 = \theta_0$ 。若被测介质为非空气物质,有:

$$\begin{aligned} \theta_4 &= \varepsilon_{A_4} - \varepsilon_{B_4} = \arcsin(\sin \varepsilon_{A_0} / n_4) - \arcsin(\sin \varepsilon_{B_0} / n_4) \\ &= \arcsin[\sin(\varphi_0 + \theta_0 / 2) / n_4] - \arcsin[\sin(\varphi_0 - \theta_0 / 2) / n_4] \end{aligned} \quad (4)$$

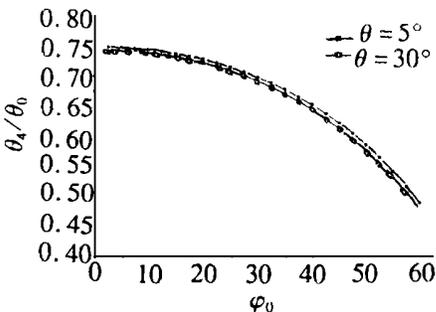


Fig. 2 Distortion of the interaction angle of an off-axis probe compared to that of an on-axis probe

此时夹角的变化不仅与光束在空气中布置有关,而且与被测介质的折射率有关。

图 2 示出了被测介质为水($n_{H_2O} = 1.34$)时,光束夹角的随光轴倾斜角和光束夹角的变化。由图 2 可以看出,光轴的倾斜程度越大,水中的光束夹角越偏离空气中的光束夹角值。当光轴倾斜角度为测量第 3 个方向上速度至少所需的 30° 时,光束夹角的相对值仅为 0.7。

2 对干涉条纹间距的影响

根据光学知识,测量控制体在被测介质中的干

涉条纹的间距 d_4 是一个与光束夹角有关的量:

$$d_4 = \frac{\lambda_4}{2\sin(\theta_4/2)} = \frac{1}{n_4} \frac{\lambda_0}{2\sin(\theta_4/2)} = \frac{\lambda_0}{2\sin(\theta_0/2)} \frac{\sin(\theta_0/2)}{\sin(\theta_4/2)} = d_0 \frac{\sin(\theta_0/2)}{\sin(\theta_4/2)} \quad (5)$$

式中, d_0 为在空气介质中的干涉条纹的间距。

由前面的讨论可知, 在光轴非垂直放置时, 若被测介质仍为空气, 光束夹角不改变; 若被测介质不是空气时, 光束夹角在非空气介质中会发生变化。因此, 在光轴非垂直放置时, 若被测介质仍为空气, 干涉条纹间距也不变; 但若被测介质不是空气时, 则干涉条纹间距也会发生变化。

以被测介质为水为例, 图 3 示出了水中干涉条纹间距随光轴倾斜角、光束夹角变化的规律。从图中可以看出, 当光轴倾斜角很小 ($\varphi_0 < 5^\circ$) 时, 干涉条纹间距几乎不变, 但随着光轴倾斜程度的加大, 干涉条纹的间距急剧加大。在测量三维速度至少需要的倾斜角度 $\varphi_0 = 30^\circ$ 时, 干涉条纹的间距已增大到 LDA 默认条纹间距的 1.08 倍左右。

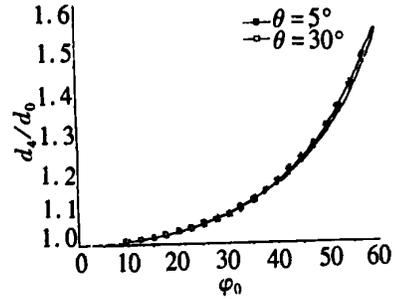


Fig. 3 Distortion of the fringe spacing of an off-axis probe compared to that of an on-axis probe

3 对速度方向的影响

LDA 所测速度的方向是垂直于光束夹角平分线的方向, 因此, 需要确定在被测介质中光束夹角平分线的位置, 以便确定测量速度的方向。激光探头非垂直布置时, 光束经过若干次折射后, 折射光束夹角的平分线不仅不与光轴的折射线重合, 而且还可能不与其平行。当原光束夹角值不大时, 折射光束夹角的平分线与光轴的折射线差别不大, 以往就近似地认为光轴的折射线与折射光束夹角的平分线重合, 根据光轴的折射线的位置角来确定测量速度的方向^[4]。实际上, 光轴的折射线与折射光束夹角的平分线并不重合, 当被测介质仍是空气时, 由于光轴的折射线、折射光束分别与原光轴、入射光束平行, 光轴的折射线与折射光束夹角的平分线尚相互平行, 此时上述假定并不影响测量速度方向确定; 但当被测介质不是空气时, 光轴的折射线与折射光束夹角的平分线甚至不再相互平行, 这时, 定量地确定折射光束夹角的平分线在非空气被测介质中的位置角也是提高 LDA 测量精度的一个重要环节。

光束夹角在被测介质中平分线的方向角 φ_4

为:
$$\varphi_4 = (\varepsilon_{A_4} + \varepsilon_{B_4}) / 2 \quad (6)$$

由(4)式可知:

$$\begin{aligned} \varphi_4 &= (\varepsilon_{A_4} + \varepsilon_{B_4}) / 2 = \\ &= \frac{\arcsin(\sin \varepsilon_{A_0} / n_4) + \arcsin(\sin \varepsilon_{B_4} / n_4)}{2} = \\ &= \frac{\{\arcsin[\sin(\varphi_0 + \theta_0/2) / n_4] + \arcsin[\sin(\varphi_0 - \theta_0/2) / n_4]\}}{2} \quad (7) \end{aligned}$$

而光轴在被测介质中的折射方向为:

$$\varphi_4 = \arcsin(\sin \varphi_0 / n_4) \quad (8)$$

比较(7)式和(8)式可知, 在非空气介质中, 光轴的折射线与折射光束夹角的平分线并不相互平行。

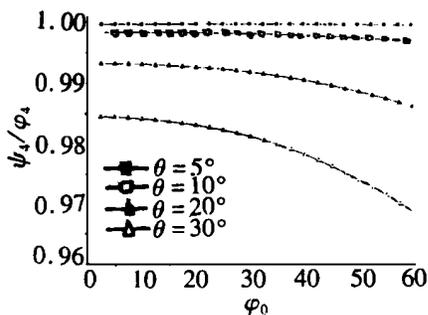


Fig. 4 Ratio of the bisector of the refraction beams to the optical axis of the off-axis probe

图4给出了被测介质为水时,光轴折射线的方向角与折射光束夹角平分线的方向角的相对值。当光束夹角很小时($\theta_0 \leq 5^\circ$),光轴折射线与折射光束夹角平分线相互平行的假设尚近似合理,但随光束夹角增大,光轴折射线与折射光束夹角平分线的方向角偏差也越大。在同一光束夹角的情况下,激光探头越是倾斜,两者的偏差就越大。故激光探头非垂直布置时需准确地确定所测速度的方向,不能近似地以光轴折射线方向作为速度的测量方向。

4 测量控制体的移动

测量内部流动时,如何准确确定流场内的测点位置是测量成功与否的关键。通常,为LDA探头(包括发射探头和接收探头)确定测点位置的方法是:首先确定一个基准点(常常采用激光直接定位法来确定),然后在已知测量控制体位置的移动量随激光探头移动的变化规律的前提下,通过移动激光探头将激光测量控制体逐一移动到待测位置。朱德忠的研究表明,激光探头垂直放置时,测量控制体相应移动量与探头移动量间呈线性关系^[5]。我们主要研究激光探头非垂直放置时,测量控制体位置的移动量随激光探头移动量的变化规律。

根据图1的光路图,并设中间介质的厚度为 l_k ($k=1, 2, 3$),可以用两种方法确定被测介质中测量控制体在 y 方向上的坐标:

$$y = y_{A_0} - x_{A_0} \tan \varepsilon_{A_0} + \sum_{k=1}^3 l_k \tan \varepsilon_{A_k} + \left(x - \sum_{k=2}^3 l_k \right) \tan \varepsilon_{A_4} \quad (9)$$

$$y = y_{B_0} - x_{B_0} \tan \varepsilon_{B_0} + \sum_{k=1}^3 l_k \tan \varepsilon_{B_k} + \left(x - \sum_{k=1}^3 l_k \right) \tan \varepsilon_{B_4} \quad (10)$$

将上两式等同起来,便可以得到激光探头非垂直放置时,光束穿过任意层中间介质后测量控制体在 x 方向坐标的计算公式:

$$x = \sum_{k=1}^3 l_k + \frac{(y_{B_0} - y_{A_0}) - (x_{B_0} \tan \varepsilon_{B_0} - x_{A_0} \tan \varepsilon_{A_0})}{\tan \varepsilon_{A_4} - \tan \varepsilon_{B_4}} = \sum_{k=1}^3 l_k + \frac{2L \tan \theta_0 / 2 - [(x_0 - L \tan \theta_0 / 2 \sin \varphi_0) \tan \varepsilon_{B_0} - (x_0 + L \tan \theta_0 / 2 \sin \varphi_0) \tan \varepsilon_{A_0}]}{\tan \varepsilon_{A_4} - \tan \varepsilon_{B_4}} \quad (11)$$

式中, L 为激光探头的焦距, (x_0, y_0) 为激光探头中心 O 的坐标。

将(11)式代入(9)式,即可得到测量控制体在 y 方向坐标的计算公式:

$$y = y_0 - L \tan \frac{\theta_0}{2} - \left[x_0 + L \tan \frac{\theta_0}{2} \sin \varphi_0 \right] \tan \varepsilon_{A_0} + \sum_{k=1}^3 l_k \tan \varepsilon_{A_k} + \left(x - \sum_{k=1}^3 l_k \right) \tan \varepsilon_{A_4} \quad (12)$$

(1) 激光探头在 y 方向上移动:

$$\text{对(12)式在 } y \text{ 方向上取微分,得 } dy/dy_0 = 1, \quad dx/dy_0 = 0 \quad (13)$$

表明当激光探头在 y 方向上移动时,测量控制体在任何被测介质中的移动量与激光探头的移动量相同。

(2) 激光探头在 x 方向上移动:

$$\text{对(12)式在 } x \text{ 方向上取微分,得 } dx_0 = (\tan \varepsilon_{B_0} - \tan \varepsilon_{A_0}) / (\tan \varepsilon_{A_4} - \tan \varepsilon_{B_4}) \quad (14)$$

$$dy/dx_0 = -\tan \varepsilon_{A_0} + dx \tan \varepsilon_{A_4} / dx_0 = -\tan \varepsilon_{A_0} + (\tan \varepsilon_{B_0} - \tan \varepsilon_{A_0}) \tan \varepsilon_{A_4} / (\tan \varepsilon_{A_4} - \tan \varepsilon_{B_4}) \quad (15)$$

当被测介质为空气时,由于 $\varepsilon_{A_4} = \varepsilon_{A_0}$, $\varepsilon_{B_4} = \varepsilon_{B_0}$,故 $dx/dx_0 = 1$, $dy/dx_0 = 0$,激光探头在 x 方向移动时,测量控制体有相同的移动量。当被测介质不是空气时,激光探头的 x 方向上的

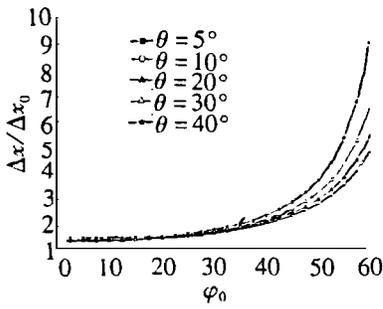


Fig. 5 The shift of the measurement volume in x direction due to that of off-axis probe in x direction

倾斜程度的加大, 测量控制体在 y 方向的移动还会增大。研究表明, 激光探头非垂直布置时, 激光探头移动所引起的测量控制体的移动具有与探头垂直布置时不同的移动规律, 在使用 LDA 测量三维速度时, 需根据不同的移动规律合理地移动垂直探头和非垂直探头, 以保证测量控制体的重合精度。

5 结 论

从理论上定量地研究了 LDA 测量内部流动激光探头非垂直布置时, 光束测量控制体性质的变化规律。当被测介质仍为空气时(如测量压气机内部流动), 测量体的光束夹角、干涉条纹间距、测量速度方向都与激光探头在原发射介质(空气)中的一致, 无需考虑所测速度大小和方向的修正, 同时测量控制体位置的移动与激光探头的位置移动一致。当被测介质不是空气时, 测量控制体的光束夹角、干涉条纹间距、测量速度方向都与激光探头在原发射介质(空气)中的不再一致, 它们的重新确定可采用本文中所推导出的与光束夹角、光轴倾斜角以及被测介质的折射率有关的公式。另外, 激光探头位置 x 方向的移动不仅会引起测量体在被测介质中 x 方向非等量的移动, 甚至还会引起测量体 y 方向的移动, 这一点在移动激光探头后重新确定测量控制体位置时不容忽视。

参 考 文 献

- 1 Parry A J, Lator M J, Tridimas Y D. Refraction corrections for laser-doppler anemometry in a pipe bend. *Dantec Information*: 4~ 6
- 2 Doukalis A, Founti M, Mathioudakis K. A general procedure for calculating and correcting the displacement using a three component laser Doppler anemometer for turbomachinery application. 7th international symposium on applications of laser technique to fluid mechanics, Lisbon, Portugal, Paper no. 17. 4. 1~ 17. 4. 7
- 3 Boonij R, Tukker J. 3-Dimensional laser doppler measurements in a curved flume. 7th international symposium on applications of laser technique to fluid mechanics, Lisbon, Portugal, Paper no. 28. 5. 1~ 28. 5. 8
- 4 Zhang Z, Eisele K. *Experiments in Fluids*, 1995; 19: 89~ 94
- 5 朱德忠. 热物理激光测试技术. 北京: 科学出版社, 1990

* * *

作者简介: 张 莉, 女, 1973 年 4 月出生。博士生。现从事应用激光测速技术(LDA、PIV)测量旋转叶轮机械内部流场的研究。

移动不仅会引起测量控制体 x 方向上的移动, 而且还会引起测量控制体 y 方向上的移动, 相对移动量大小与光束入射角和最终折射角有关, 实际上, 最终取决于被测介质的折射率、光轴与法线的夹角和光束夹角。

图 5、图 6 给出了被测介质为水时, 激光探头 x 方向上移动时引起的测量控制体在 x 、 y 方向上的相对移动量。从图中可以看出, 只要激光探头稍有偏斜, 激光探头在 x 方向上的移动不仅会引起测量控制体 x 方向的移动, 还会引起测量控制体在 y 方向的移动; 随着激光探头

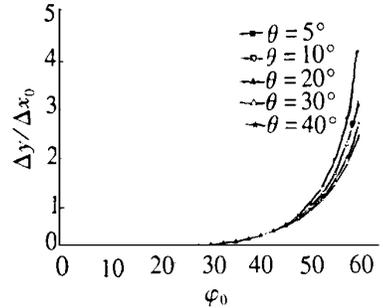


Fig. 6 The shift of the measurement volume in y direction due to that of off-axis probe in x direction