

文章编号: 1000-8055(2007)07-1161-06

机匣视窗折射对 LDV 聚焦的影响分析

赵 军, 刘宝杰, 刘火星

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了分析激光束经过机匣视窗后聚焦状态的变化情况, 发展了一套通用程序, 可用于计算不同的测量条件下, 激光束穿过不同尺寸机匣视窗时的折射情况, 并对其结果的可信性进行了验证. 利用所发展的程序, 以二维 LDV 探头为例, 分析了典型情况下蓝光、绿光焦点偏移情况, 以及蓝光与绿光焦点之间偏移量的变化情况, 并给出了确定焦点重合的计算准则. 计算结果表明: 如果不进行特殊的光学修正, LDV 测量时必须选取小的探头角度和浅的测点深度.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 折射效应; 激光多普勒测速; 压气机测量

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Analysis of beam refraction effects in laser doppler velocimetry

ZH AO Jun, LIU Bao jie, LIU Huo xing

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A general mathematical program is developed in the paper to analyze the change of focus status after laser beams refracted at curved surface and to consider the displacement of focuses caused by refraction with various dimensions of window and various optical parameters. The creditability of the program has been validated and the associated parameters have been reviewed. The analyses of displacement of focus of blue beams, displacement of focus of green beams, and displacement between focus of green beams and focus of blue beams have been conducted in the case of two-dimensional laser doppler velocimetry (LDV) system, while a calculation criterion was presented to determine the superposition of focuses. The results demonstrated that small probe angle and shallow object depth should be essential in the case of lack of special optical correction.

Key words: aerospace propulsion system; refraction effect;

laser doppler velocimetry (LDV); compressor measurements

应用 LDV 进行压气机内部流动测量时, 激光束经过机匣视窗的折射后改变了其原有的聚焦状态, 使激光光束的焦点位置发生偏移, 或者不能很好地聚焦在一起. 这些变化会对 LDV 测量产生很不利的影响, 表现在: 光束半夹角发生改变;

测速方位发生改变; 激光光束强度呈高斯分布, 偏移造成的两束光中光强不等的部分进行干涉导致条纹清晰度的下降; 更严重的是造成一对激光束的聚焦困难, 使得实验无法进行, 因此必须要考虑机匣视窗的折射对聚焦状态的影响^[1].

收稿日期: 2006-05-18; 修订日期: 2006-10-25

作者简介: 赵军(1980), 男, 安徽淮北人, 博士生, 主要从事叶轮机械内部复杂流动的研究.

目前国际上采取了如下几种方法来解决机匣视窗的折射问题: 采用薄的或平直的玻璃来减小视窗折射的影响^[2]; 采用在光路上添加一块反向放置的机匣视窗的光学修正装置来进行补偿^[3]; 采用“折射率匹配”(Refractive Index Matching)的方法来减弱折射影响^[4]; 采用“校正透镜”(Correction Lens)的方法来减弱影响^[5]。

为了将三维 LDV 系统应用于北京航空航天大学航空发动机气动热力重点实验室的低速大尺寸压气机试验台, 同样必须考察机匣视窗折射对 LDV 测量带来的影响。为此, 本文发展了一套通用程序, 通过计算不同视窗尺寸(曲率、厚度), 不同测量参数(探头角度、测点深度), 不同介质(视窗折射率)情况下的光线折射情况, 用于 LDV 实际测量中激光束经折射后焦点偏移量、光束半夹角、测速方位的预估和测量参数、视窗尺寸影响大小的判断, 用以指导实验参数的选取和方案的确定。

1 实验设备

1.1 LDV 系统

本文中的激光多普勒测速仪是美国 TSI 公司的产品, 三维系统, 由一个双色探头和一个单色探头组成。激光器是一台功率为 5 W 的水冷式氩离子激光器。本文以二维双色系统为例进行阐述, 激光器发出的激光经分束器分成两对光束, 波长分别为 514.5 nm(绿光), 488 nm(蓝光), 如图 1 所示。

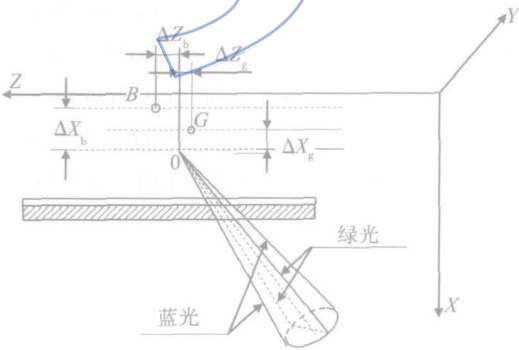


图 1 计算坐标系及示意图

电转换后变成多普勒信号, 然后经过电子混频, 最后把输出信号送给 IFA750 信号处理器。

1.2 机匣视窗

机匣视窗外表面半径 505 mm, 厚度 5 mm, 材质为浮法玻璃, 折射率 1.50。

2 计算程序

2.1 思路介绍

根据折射定律, 入射角和折射角满足斯涅耳公式 $\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1}$, 其中 θ_1 为入射角, θ_2 为折射角, n_1, n_2 分别为入射介质和出射介质的折射率; 入射光线、折射光线、法线在同一个平面上; 再设定折射光矢量为单位矢量- 这样就可以得到一个包含 3 个方程的三元二次方程组。求解得到两个折射光矢量, 根据折射光线与入射光线分居于法线两侧的判据, 舍去其中一个, 另外的一个即为所求。详细思路见文献[6]。

2.2 程序验证

首先进行光束经过平面玻璃的简单折射情况下偏移量的程序计算, 并和斯涅耳公式直接计算结果进行对比, 以验证程序的可信性。

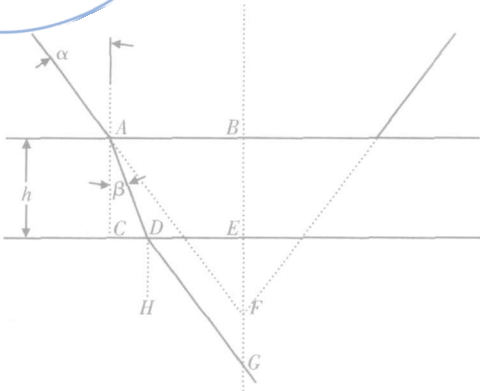


图 2 光束经平面玻璃折射

Fig.2 Beam refract in plane glasses

公式推导图 2 所示光束半夹角为 α 的情况下光束焦点的偏移情况: 入射角为 α , 折射角为 β , $\overline{BF} = \overline{AB} \cdot \cot \alpha$, 则 $\overline{EF} = \overline{BF} - \overline{BE} = \overline{AB} \cdot \cot \alpha - h$, $\overline{CD} = h \cdot \tan \beta$, $\overline{DE} = \overline{AB} - \overline{CD}$ 。

再根据 $\angle DGF = \alpha$ 则有 $\overline{EG} = \overline{DE} \cdot \cot \alpha$ 则 $\overline{FG} = h \cdot (1 - \tan \beta \cdot \cot \alpha)$, 其中: $\beta = \arcsin^{-1}[\sin(\alpha)/nw]$, nw 为玻璃的折射率。图 3 所示为随玻璃厚度的改变偏移量的程序计算和公式计算结果对比(如果不特别指明, 本文中出现的单位都默

发射系统中透镜焦距 455 mm, 光束半夹角 7.89°, 激光束直径约 1 mm, 测控体在平行光轴方向长度为 2.11 mm, 在垂直于光轴方向上的长度为 0.295 mm, 测控体体积以强度为边界计算为 0.1928 mm³。

接收系统, 采用后向接收方式, 经过分色和光

认为 mm) .

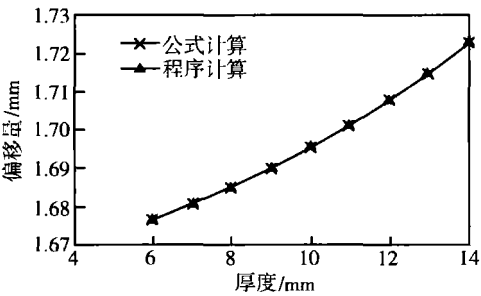


图 3 光束偏移量的对比
Fig.3 Contrast of displacement

接下来进行光束经过弧形玻璃的简单折射情况下偏移量的计算.

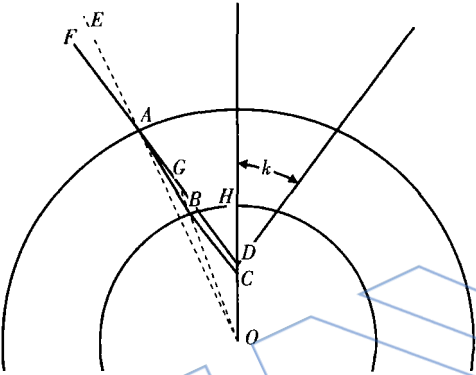


图 4 光束经弧形玻璃折射
Fig.4 Beam refract in curved glasses

公式推导图 4 情况下光束焦点的偏移情况. 设弧形玻璃外半径 R_o , 厚度 t , 折射率 n_w . 入射光束半夹角 k . 测点深度 $h = \overline{DH}$ (从玻璃内表面算起).

第 1 次折射的入射角为 α_1

$$\frac{R_o}{\sin(k)} = \frac{R_o - t - h}{\sin(\alpha_1)}$$

第 1 次折射的出射角为 α_2

$$\alpha_2 = \arcsin[\sin(\alpha_1)/n_w]$$

设第 2 次折射的入射角为 α_3

$$\frac{R_o}{\arcsin(\alpha_3)} = \frac{R_o - t}{\sin(\alpha_2)}$$

第 2 次折射的出射角为 α_4

$$\alpha_4 = \arcsin[\sin(\alpha_3) \cdot n_w]$$

在 $\triangle OCB$ 中, 根据正弦定理

$$\frac{\overline{CO}}{\sin(\alpha_4)} = \frac{R_o - t}{\sin \angle BCH}$$

而 $\angle BCH = k - (\alpha_1 - \alpha_2) + (\alpha_4 - \alpha_3)$

至此, 可以得到 $\overline{CO}$ 的值, 偏移量 $\overline{CD} = \overline{DO} - \overline{CO} = (R_o - h - t) - \overline{CO}$. 图 5 所示为随测点深度增加偏移量的程序计算和公式计算结果对比.

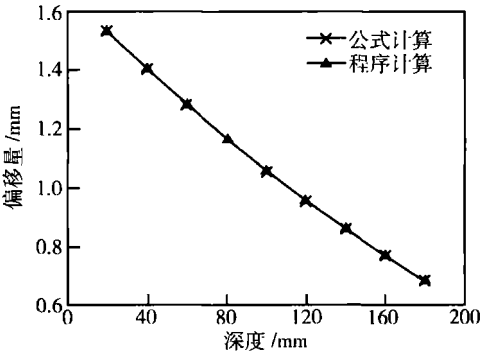


图 5 光束偏移量的对比
Fig.5 Contrast of displacement

从图 3 和图 5 的对比结果可以看出, 程序计算和公式计算结果完全吻合, 由此验证了程序计算结果的可靠性.

3 结果分析

为简化分析, 在后面的篇幅中如果不特别指明, 则探头的光轴和压气机轴线在同一水平面上.

3.1 视窗参数对偏移量影响的分析

图 6 所示是探头角度为 0° , 测点深度为 100 mm 时偏移量随视窗厚度的变化, 其中 displace_g 代表绿光的偏移量, displace_b 代表蓝光的偏移量. 随视窗厚度的增加蓝光和绿光的偏移量都呈近似线性增长, 但蓝光偏移量较绿光更大.

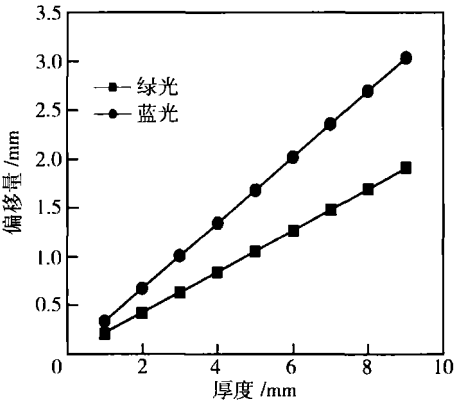


图 6 蓝绿光偏移量随视窗厚度变化
Fig.6 Displacement change with thickness

图 7 所示为固定视窗厚度为 5 mm, 选取探头角度为 0° 、测点深度为 100 mm 时, 偏移量随视窗折射率的变化. 在视窗折射率为 1.0 的时候偏移量为 0; 之后随着折射率的增加蓝、绿光的焦点偏

移量均增加,但增长率变小.

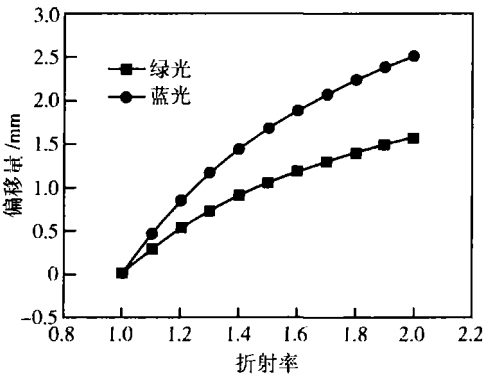


图 7 蓝绿光偏移量随视窗折射率变化

Fig. 7 Displacement change with refract index

3.2 测量参数对偏移量影响的分析

下面重点分析探头角度和测点深度对测点偏移量的影响,在考察中固定视窗参数为“实验设备”中介绍的标准值.

图 8 给出的是绿光焦点偏移量随测点深度和探头角度的变化.随测点深度的增加焦点偏移量变小,这点和图 5 的公式计算趋势是吻合的.可以想见当深度达到视窗内半径 500 mm 的时候光线经过轴线,入射角为 0° 在界面处将不发生折转偏移量为 0.从图中可以看到固定某测点深度,随 Probe 角度增大偏移量增大,且增加速度随 Probe 角度增大而增大.

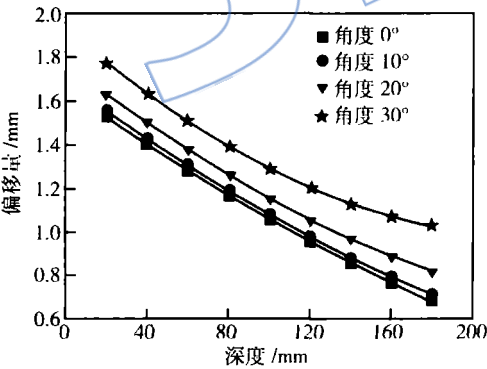


图 8 绿光偏移量

Fig. 8 Displacement of green beam

图 9 所示为探头转角 30° 时,绿光焦点偏移的总量及在 XYZ 三个方向上的分量随测点深度的变化曲线. ΔX 为负值,说明经折射后焦点更靠近机匣视窗的中心线;因为探头的中心轴线和压气机轴线在同一水平面上所以 ΔY 为 0.

图 10 所示为绿光折射后的半夹角与原始的

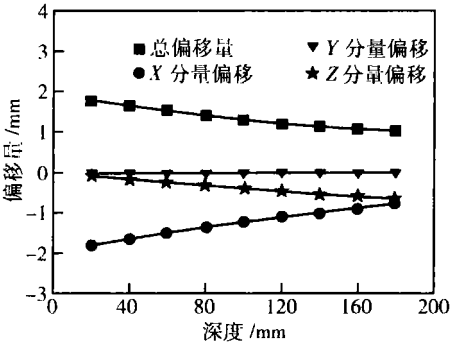


图 9 绿光偏移量

Fig. 9 Displacement of green beam

比值随测点深度和探头角度的变化.经过折射后绿光的半夹角有少量的增加,且随着深度的增加半夹角呈近似线性地减小,探头角度的减小也会带来半夹角的减小即更趋近折射前的半夹角.可以看到绿光的半夹角改变的绝对值很小,相应地对测控体大小和条纹数目的影响也会很小,在实际测量时可以忽略不计.

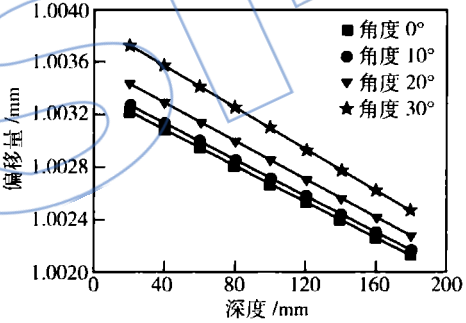


图 10 绿光折射后的半夹角与原始的比值

Fig. 10 Ratio of semi angle of green beam

图 11 是蓝光的偏移量随深度和探头角度的变化.可以看到蓝光的偏移量随深度是不变的,这是因为一对蓝光束处于视窗的轴线水平面上,弧

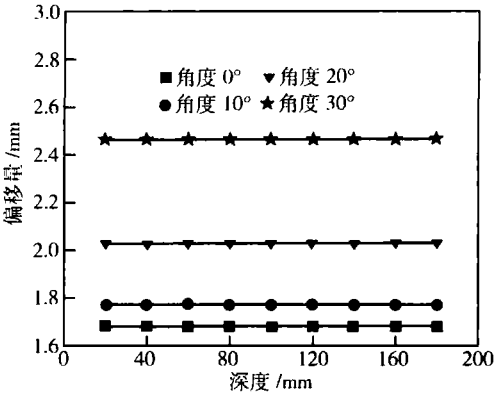


图 11 蓝光的偏移量

Fig. 11 Displacement of blue beam

形视窗发挥的作用类似于平面视窗; 同样, 随探头角度增大偏移量增大。

图 12 所示为探头偏转 30° 时, 蓝光焦点偏移的总量及在 XYZ 三个方向上的分量随测点深度的变化曲线。 ΔX 为负值, 说明经折射后蓝光焦点更靠近机匣视窗的中心线, 经与图 9 绿光的 ΔX 比较可以看到折射后蓝光焦点较绿光更接近机匣的中心线; ΔZ 为正值与图 9 中绿光 ΔZ 为负值相反, 在图 1 中已形象地示意出来。

因为蓝光类似于经过平面玻璃, 经 2 次折射后光线矢量不变, 半夹角亦不改变, 不再给出图示。

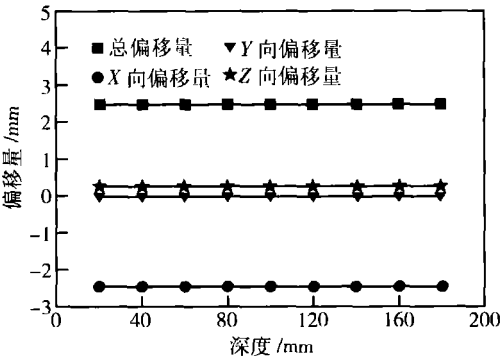


图 12 蓝光偏移量
Fig. 12 Displacement of blue beam

3.3 折射对测速方位的影响的分析

前面讨论的是探头光轴和压气机轴线在同一水平面上的情况, 所以折射后焦点没有 Y 方向的变动, 但是当探头光轴的 Y 坐标值不为 0 时, 即使光束是水平入射的, 焦点也会在 Y 方向有一些移动。图 13 所示为探头 30°, 光轴 Y 方向坐标为 +100 mm 时, 蓝绿光的焦点在 Y 向的偏移量随测点深度的变化。可以看到 Y 向的偏移量数值较大, 不可以忽略。

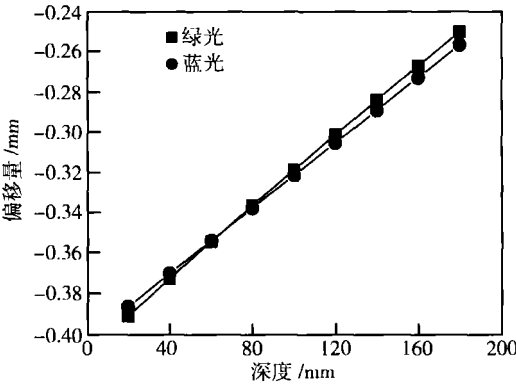


图 13 蓝绿光 Y 向的偏移量
Fig. 13 Displacement of blue and green in Y direction

LDV 测速是有方向性的, 某对光束测量得到的速度是散播微粒的速度在该对光束的平面内并且和 2 束光的角平分线垂直的方向上的分量, 该方向矢量在由探头坐标系变换到实验台坐标系上的数据后处理中是一个关键的量。在本文中探头光轴和压气机轴线在同一水平面上则折射后测速方位和折射前没有差别, 反之, 则要考虑折射后测速方位的改变。图 14 是探头偏角为 0°, 测点深度为 100 mm, 改变光轴 Y 坐标值时计算得到的折射前后测速方位的角度差。

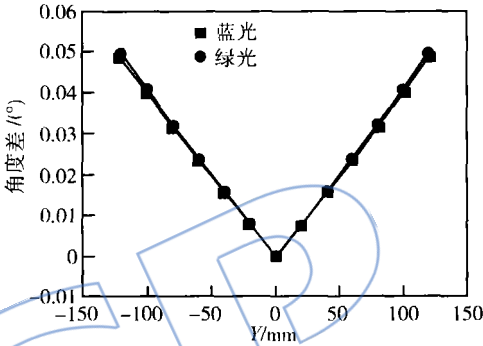


图 14 测速方位折射前后的角度差
Fig. 14 Difference of angle before and after refract

可以看到, 蓝光和绿光的测速方位都有少量的变化, 而且沿 $Y=0$ 对称变化。进一步分析发现 (详细数据没有给出), 蓝光和绿光测速方位折射前后的角度差都是铅垂方向上的。因为蓝光测量的是和实验台轴线平行的速度, 测速方位垂直方向上的变化不会影响后处理的变换矩阵; 而对于绿光在 LDV 测量数据向实验台坐标系转换时, 严格的讲, 是需要把这个角度变化考虑进来的。

3.4 蓝光与绿光之间偏移量的考察

在进行机匣视窗折射的研究中, 不仅要知道每对激光束的焦点偏移情况, 更重要的是研究两对光束焦点的相对位置关系。在这里, 我们提出一个准则, 如图 15 所示, 若两焦点的相对位置同时满足下列 2 个条件则可以认为聚焦情况是良好的: (1) 在沿平行光轴方向上偏差小于长轴长度的四分之一; (2) 在沿垂直光轴方向上偏差小于短轴长度的四分之一。

图 16 和图 17 分别绘出了在不同探头角度下测点深度的增加蓝光和绿光焦点在平行光轴方向和垂直光轴方向上的偏移量, 图中的横线代表依据上述准则得到的偏移量的临界值。

随测点深度增加蓝光和绿光之间的偏移量是增加的, 这点可以从图 8 和图 11 得到解释: 随深

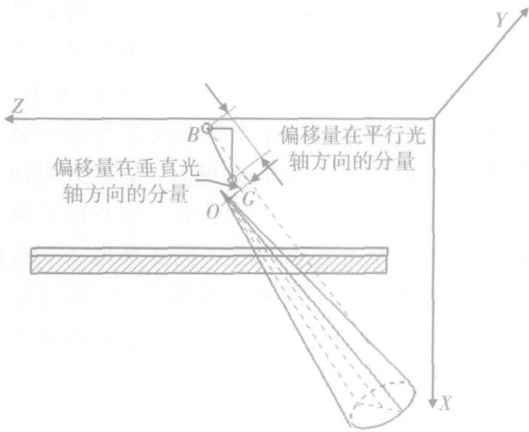


图 15 蓝绿光焦点偏移量的两个分量
Fig. 15 Sketch map of displacement

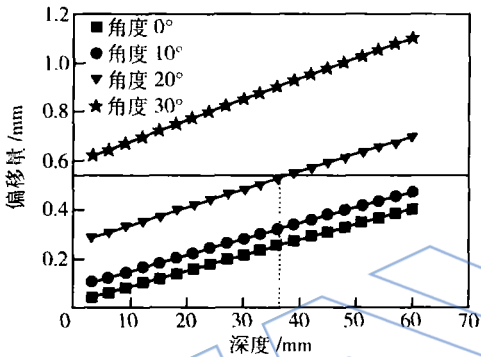


图 16 蓝绿光焦点偏移在平行光轴方向的分量
Fig. 16 Displacement parallel to beam axis

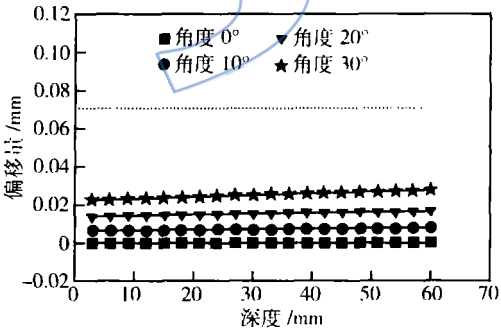


图 17 蓝绿光焦点偏移在垂直光轴方向的分量
Fig. 17 Displacement perpendicular to beam axis

和原始点之间所以蓝光和绿光之间的偏移量增加。
从图中还可以看到,当探头转角为 20° 、测点深度大于 36 mm 时,偏移量大于临界值。这说明应用 LDV 测量时,如果不采取其他的修正措施,必须要选取小的探头角度和浅的测点深度;同时可看到在考察范围内垂直于光轴方向的偏移量都没有超过临界值。这说明在实际的聚焦问题中平行光轴方向的偏离是主导因素。

4 结 论

- (1) 发展了一套通用程序,可用于计算不同测量条件下,激光束穿过不同尺寸机匣视窗时的折射情况,并对其结果的可信性进行了验证。
- (2) 考察了输入参数对结果的影响及折射后蓝光和绿光焦点位置、光束半夹角、测速方位的变化规律,可用以指导实验参数的选取和方案的确定。
- (3) 考察了蓝光与绿光之间偏移量的变化情况。发现在聚焦问题中平行光轴方向的偏离是主导因素。LDV 测量时如果不进行特殊的光学修正,必须要选取小的探头角度和浅的测点深度。

参考文献:

[1] 徐月亭, 蒋浩康. 压气机转子内流场三维 LDV 的测量技术 [R]. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议, 编号: 972061.

[2] Faure T M, Michon G J, Miton H, et al. Laser doppler anemometry measurements in an axial compressor stage [J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(3): 481-491.

[3] Ottavy X, Trebinjac I, Vouillarmet A. Analsis of the interrow flow field within a transonic axial compressor: part 1 experimental investigation [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 49-56.

[4] Budwig R. Refractive index matching methods for liquid flow investigations [J]. Experiments in Fluids, 1994, 17: 350-355.

[5] Durrett R P. A correction lens for laser doppler velocimeter measurement in a cylindrical tube [J]. AIAA J, 1985, 23(9): 1387-1391.

[6] Doukelis A, Founti M, Mathioudakis K, et al. Evaluation of beam refraction effects in a 3D laser doppler anemometry system for turbomachinery applications [J]. Measurement Science Technology, 1996, (7): 922-931.

度增加蓝光焦点保持不变,绿光焦点相对原始点的偏移量是变小的,因为绿光焦点处于蓝光焦点