

JJF ××××—××××



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××—××××

## 激光多普勒流速仪校准规范

Calibration Specification for

Laser Doppler Velocimetry

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家市场监督管理总局 发布

# 激光多普勒流速仪校准规范

Calibration Specification for

Laser Doppler Velocimetry



归口单位：全国流量计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

中航工业北京长城计量测试技术研究所

中国气象局气象探测中心

参加起草单位：湖南省计量检测研究院

无锡市计量测试院

北廷流体测量技术有限公司

北京市燃气集团有限责任公司

本规范委托全国流量计量技术委员会负责解释

**本规范主要起草人：**

崔骊水（中国计量科学研究院）

王 毅（中航工业北京长城计量测试技术研究所）

刘 昕（中国气象局气象探测中心）

**参加起草人：**

李 宁（湖南省计量检测研究院）

陈 君（无锡市计量测试院）

付廷皇（北廷流体测量技术有限公司）

张 翰（北京市燃气集团有限责任公司）

## 目 录

引 言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文献.....	1
3 术语和计量单位.....	1
3.1 术语.....	1
3.2 计量单位.....	1
4 概述.....	2
4.1 激光多普勒流速仪的测量原理.....	2
4.2 激光多普勒流速仪的校准原理.....	3
5 计量特性.....	3
5.1 条纹间距.....	3
5.2 条纹间距相对误差.....	4
6 校准条件.....	4
6.1 环境条件.....	4
6.2 主标准器及配套设备.....	4
7 校准项目和校准方法.....	4
7.1 校准项目.....	4
7.2 校准方法.....	4
8 校准结果表达.....	7
9 复校时间间隔.....	7
附录 A.....	8
附录 B.....	11
附录 C 不确定度评定示例.....	12
C1 不确定度评定的模型与方法.....	12
C2 不确定度评定实例.....	15
附录 D 转盘校准装置.....	19
D1 转盘校准装置工作原理.....	19
D2 标准线速度的校准.....	19
D3 线速度稳定性的测试.....	19

# 引 言

本方法以 JJF1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》为主要技术依据，结合我国激光多普勒流速仪校准的现状进行编制。

激光多普勒流速仪一般通过转盘校准装置实现条纹间距的校准。转盘校准装置的转速、转动半径分别向上溯源至 SI 基本单位时间（单位 s）和长度（单位 m）。以转盘校准装置复现的标准线速度（单位 m/s）作为标准值校准激光多普勒流速仪的条纹间距，可实现流速量值（单位 m/s）向 SI 基本单位的溯源。目前，激光多普勒流速仪的光路模式多采用后向散射双光束模式，本规范内容主要针对后向散射双光束模式激光多普勒流速仪的校准制定，其他光路模式的激光多普勒流速仪可参照使用。

# 激光多普勒流速仪校准规范

## 1 范围

本校准方法适用于激光多普勒流速仪的校准。

## 2 引用文献

本方法引用了下列文件：

JJF 1001-2011 通用计量术语及定义

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本方法；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本方法。

## 3 术语和计量单位

### 3.1 术语

3.1.1 激光多普勒流速仪（Laser Doppler Velocimetry /Laser Doppler Anemometer）  
利用激光的多普勒效应测量流体运动速度的仪器，简称 LDV 或 LDA。

3.1.2 转盘校准装置（Spinning-disc Calibration Facility）

将转盘的线速度作为标准速度校准激光多普勒流速仪的装置。装置由转盘、电机、控制系统、散射细丝（或微粒）等构成，转盘通过电机驱动在不同的转速作匀速圆周运动。

3.1.3 测量体（Measuring Volume）

激光多普勒流速仪产生并发射的两束光在空间相交并发生相干的区域。

3.1.4 条纹间距（Fringe Spacing）

激光多普勒流速仪产生的两束相干光在空间相干后形成测量体，测量体中一对明暗干涉条纹的宽度。

### 3.2 计量单位

3.2.1 流速单位： 米每秒，符号 m/s。

3.2.2 转速单位

角速度： 弧度每秒，符号 rad/s；

线速度： 米每秒，符号 m/s。

## 4 概述

### 4.1 激光多普勒流速仪的测量原理

激光多普勒流速仪主要由激光器、声光耦合器、发射及接收探头、光电检测器、信号处理器等构成，如图 1 所示。

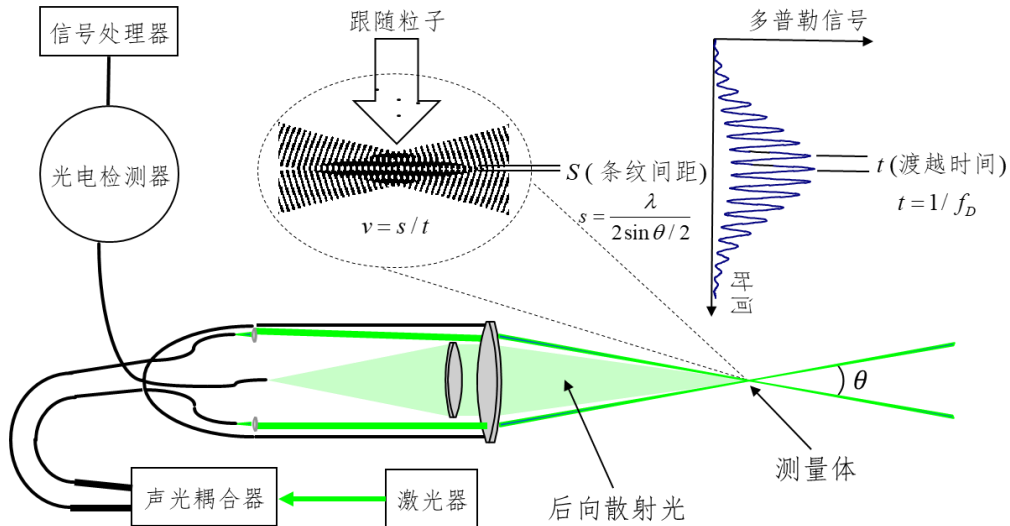


图 1 激光多普勒流速仪的测量原理示意图

激光多普勒流速仪常见的基本光路模式包括：参考光模式、单光束模式及双光束模式。目前常用的激光多普勒流速仪多采用双光束模式，其测量原理可由条纹模型解释：两束相干光经发射透镜聚焦在空间发生相干，在相干的区域形成测量体，并在测量体中产生明暗相间的干涉条纹。当跟随流体的散射粒子经过测量体中的干涉条纹时，粒子散射的光强信号由光电检测器接收，经信号处理器处理得到多普勒频率，多普勒频率与粒子运动速度成正比，由此可计算得到粒子的运动速度。由于散射粒子对流体运动有良好的跟随性，粒子的运动速度与流体速度相当，因此流速可通过式（1）、式（2）计算得到：

$$s = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \quad (1)$$

$$v_{LDV} = s \cdot f_D \quad (2)$$

式中， $s$ ：测量体的条纹间距， $\mu\text{m}$ ；

$\lambda$ ：发射光的波长， $\text{nm}$ ；

$\theta$ ：两束相干光的夹角， $\text{rad}$ ；

$v_{LDV}$ : 流体的运动速度, m/s;

$f_D$ : 多普勒频率, Hz。

## 4.2 激光多普勒流速仪的校准原理

由 4.1 激光多普勒流速仪的测量原理可知: 流速测量的准确度水平取决于条纹间距和多普勒频率的测量精度。其中, 多普勒频率测量的准确度水平一般优于  $10^{-6}$ , 其影响可以忽略。条纹间距是影响激光多普勒流速仪准确度水平的主要因素, 因此, 校准激光多普勒流速仪的主要目的是得到准确的条纹间距  $s$ 。条纹间距通过转盘校准装置校准得到, 校准原理如图 2 所示: 模拟流体中散射粒子的散射目标(微粒或细丝)安装在转盘边缘或表面, 随转盘同步作稳定匀速圆周转动, 通过转动半径  $r$  和转动角速度  $\omega$  可计算得到散射目标线速度  $v_s$ 。当散射目标穿越测量体中某位置的明暗条纹时, 被校激光多普勒流速仪测得对应的多普勒频率。以散射目标的线速度为标准速度, 标准速度与多普勒频率之比为测量体中当前位置的条纹间距  $s$ 。对测量体中多个位置的条纹间距进行多次测量取平均值作为测量体条纹间距, 计算比较测量体条纹间距与激光多普勒流速仪条纹间距名义值可得条纹间距相对误差。

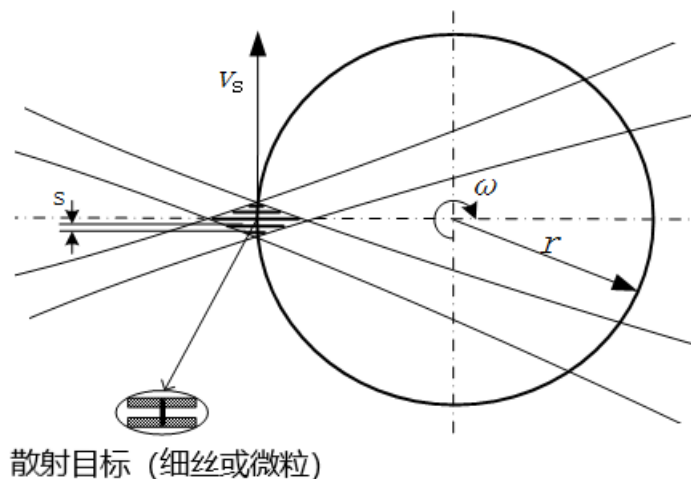


图 2 激光多普勒流速仪的校准原理示意图

## 5 计量特性

### 5.1 条纹间距

条纹间距的值由发射光束的波长与两束光夹角确定, 与被测流速无关。校准时为减小转盘校准装置引入的系统偏差, 取在多个校准速度下得到的条纹间距的平均



值作为激光多普勒流速仪的条纹间距。

## 5.2 条纹间距相对误差

激光多普勒流速仪条纹间距的名义值与校准结果之间的相对偏差。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 校准环境中温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，校准过程中温度波动不大于  $1^\circ\text{C}$ 。

6.1.2 校准环境中照明设备光强稳定，无强光直射，无杂光干扰。

6.1.3 校准时应配备光学平台，无振动影响。

### 6.2 主标准器及配套设备

主标准器及配套设备均应有有效的检定/校准证书，要求见表 1。

表 1 主标准器和配套设备表

类别	设备名称	技术要求	用途
主标准器	转盘校准装置	(1) 转速连续可调; (2) 转盘直径校准的扩展不确定度: $U_D \leq 0.005\%$ , $k=2$ ; (3) 转速稳定性优于 0.02%	校准激光多普勒流速仪
配套设备	转速计	(1) 转速计量程须覆盖转盘转速范围 (2) 转速计最大允许误差优于 $\pm 0.05\%$	(1) 转盘校准装置标准线速度的测量 (2) 装置稳定性测试
	测温仪表	(1) 温度测量的扩展不确定度 $U_T \leq 0.3^\circ\text{C}$ , $k=2$	(1) 环境条件测量 (2) 转盘直径的修正

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准项目

表 2 校准项目表

类别	激光多普勒流速仪
校准项目	条纹间距
	条纹间距相对误差

### 7.2 校准方法

### 7.2.1 校准前的准备

#### (1) 转盘校准装置的稳定性测试

按照附录 D 的要求测试转盘校准装置稳定性，装置稳定性不大于 0.02%。

#### (2) 测量体的位置和长度

校准激光多普勒流速仪前，首先确定测量体的位置和长度。将装盘校准装置的转速调节至 1 m/s，待转速稳定后，沿激光多普勒流速仪前透镜光轴方向调整测量体与散射目标的相对位置，使散射目标垂直于前透镜光轴穿越测量体，观察多普勒信号输出的出现、消失及信号幅值的变化规律确定测量体的准确位置和长度。

### 7.2.2 激光多普勒流速仪的校准

#### (1) 条纹间距的计算

条纹间距的校准是为了得到测量体的条纹间距值。转盘装置以稳定的标准线速度转动，散射目标穿越测量体某位置时产生多普勒信号，激光多普勒流速仪测得多普勒频率，测量体中当前位置的干涉条纹间距由式 (3) 计算得到。

$$s = \frac{\pi \cdot f \cdot D}{f_D} \quad (3)$$

式中， $f$ ：转盘转动频率；

$D$ ：转盘直径。

#### (2) 条纹间距的校准

当转盘校准装置在某个转速下校准激光多普勒流速仪时，使散射目标以稳定速度穿越测量体的某个位置，激光多普勒流速仪可测得多普勒频率，按式 (3) 计算得到当前位置的条纹间距。使散射目标穿越测量体中不同位置，测得不同位置的条纹间距，计算得到不同位置条纹间距的平均值即为当前校准速度下激光多普勒流速仪的条纹间距。

校准时可根据激光多普勒流速仪的实际测量范围选择校准速度范围。为尽可能的减小装置转动偏心引入的不确定度分量，在校准速度范围内至少选择 3 个速度点进行校准，取不同速度下校准结果的平均值作为激光多普勒流速仪的条纹间距。

激光多普勒流速仪测量流速时，测量结果的不确定度主要来源于条纹间距校准的不确定度，由多普勒频率测量引入的不确定度分量可以忽略 ( $<10^{-6}$ )。因此，当转盘校准装置的转速范围无法覆盖激光多普勒流速仪的测量范围时，上述校准方法

所得条纹间距在流速仪能够实现的更宽的测量范围内仍然有效可用，校准结果不确定度在相应的测量范围内可作为不确定度评估的依据。

### (3) 校准步骤

- a. 确定校准速度点，校准点的个数为  $p$ ；
- b. 将标准转速调节至 1 m/s，通过观察多普勒信号出现、消失、幅值变化确定测量体的位置和长度；
- c. 调整转速至校准速度  $k$ ，待转速稳定后在测量体中某位置  $j$  进行至少 ( $n \geq 6$ ) 次测量。沿前透镜光轴方向调节散射目标与测量体的相对位置，在测量体中等间隔选取  $m$  个位置测量条纹间距，间隔距离不大于 0.2 mm，直至完成整个测量体中条纹间距的测量，计算  $m$  个位置条纹间距的平均值，即为校准速度为  $k$  时的条纹间距，如式 (4) 所示；比较名义条纹间距和当前校准速度下所得条纹间距，可得当前速度下条纹间距相对误差，如式 (5) 所示。

$$s_k = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n s_{j,i}}{mn} \quad (4)$$

其中， $s_{i,j}$ ：测量体中  $j$  位置第  $i$  次测量得到的条纹间距值；

$s_k$ ：校准速度为  $k$  时激光多普勒流速仪的条纹间距；

$m$ ：测量体中校准位置的个数；

$n$ ：在  $j$  位置测量条纹间距的次数。

$$E_{s_k} = \frac{s_{LDV} - s_k}{s_k} \times 100\% \quad (5)$$

其中， $E_{s_k}$ ：校准速度为  $k$  时的条纹间距相对误差；

$s_{LDV}$ ：激光多普勒流速仪的名义条纹间距。

- d. 计算多个校准速度的条纹间距的平均值作为激光多普勒流速仪的条纹间距，取多个校准速度下条纹间距相对误差的平均值作为相对误差，如式 (6)、式 (7) 所示。

$$\bar{s} = \frac{\sum_{k=1}^p s_k}{p} \quad (6)$$

$$E_{\bar{s}} = \frac{\sum_{k=1}^p E_{s_k}}{p} \quad (7)$$

其中， $\bar{s}$ ：激光多普勒流速仪的条纹间距；

$E_{s_k}$ ：条纹间距相对误差；

$p$ ：校准速度点的个数。

## 8 校准结果表达

校准完成后，按照本规范给出校准结果，开具相应的校准证书，校准原始记录见附录 A，校准证书格式见附录 B，校准结果的不确定度评定详见附录 C。

## 9 复校时间间隔

激光多普勒流速仪的复校时间间隔建议为 2 年，或根据客户要求及仪器使用频率确定复校时间。

## 附录 A

### 校准记录参考格式

证书编号\_\_\_\_\_校准日期\_\_\_\_\_

仪器名称\_\_\_\_\_送校单位\_\_\_\_\_

制造单位\_\_\_\_\_型号规格\_\_\_\_\_仪器编号\_\_\_\_\_

环境温度\_\_\_\_\_℃

校准依据\_\_\_\_\_

转盘校准装置信息:

转盘直径\_\_\_\_\_型号\_\_\_\_\_

证书编号\_\_\_\_\_速度范围\_\_\_\_\_

准确度等级□/最大允许误差□/扩展不确定度□: \_\_\_\_\_

证书编号\_\_\_\_\_有效期限\_\_\_\_\_

转速计信息:

转速计型号/编号\_\_\_\_\_

证书编号\_\_\_\_\_有效期限\_\_\_\_\_

准确度等级□/最大允许误差□/扩展不确定度□: \_\_\_\_\_

激光多普勒流速仪校准原始记录

名义速度 m/s	标准线速度 m/s	多普勒频率 MHz	激光多普勒流速仪 条纹间距 $\mu\text{m}$	条纹间距 相对误差%	相对标准不确定度 $u_{\text{rel}} \%$	相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}}(k=2)\%$

转盘校准装置线速度稳定性测试原始记录

测试速度点 m/s	转盘直径 mm	角速度 r/min	线速度 m/s	转动稳定性 %

## 附录 B

## 校准证书（内页）参考格式

1. 环境条件
2. 校准结果

标准线速度 m/s	激光多普勒流 速仪条纹间距 $\mu\text{m}$	名义条纹间距 $\mu\text{m}$	相对标准不 确定度%	相对扩展 不确定度 %

3. 复校时间间隔建议：2 年



## 附录 C 不确定度评定示例

### C1 不确定度评定的模型与方法

#### C1.1 激光多普勒流速仪条纹间距 $\bar{s}$ 的不确定度

由正文中校准方法可知： $\bar{s}$  为  $p$  个校准速度下激光多普勒流速仪条纹间距的平均值，如式 (C1) 所示（同正文中式 (6)）；

$s_j$  为测量体中某位置  $n$  次测量得到的条纹间距值的平均值，如式 (C2) 所示；

$s_k$  为计算转盘校准测量体中  $m$  个位置的条纹间距的平均值得到，如式 (C3) 所示。

$$\bar{s} = \frac{\sum_{k=1}^p s_k}{p} \quad (\text{C1})$$

$$s_k = \frac{\sum_{j=1}^m s_j}{m} \quad (\text{C2})$$

$$s_j = \frac{\sum_{i=1}^n s_{j,i}}{n} \quad (\text{C3})$$

其中， $\bar{s}$ ：激光多普勒流速仪的条纹间距

$s_k$ ：校准速度为  $k$  时激光多普勒流速仪的条纹间距；

$s_j$ ：测量体中某位置  $n$  次测量得到的条纹间距值的平均值；

$s_{j,i}$ ：测量体中  $j$  位置第  $i$  次测量得到的条纹间距值；

$m$ ：测量体中校准位置的个数；

$n$ ：在  $j$  位置测量条纹间距的次数；

$p$ ：校准速度点的个数。

由于激光多普勒流速仪不同速度下的条纹间距  $s_k$ ，测量体中不同位置的条纹间距  $s_j$  条纹间距均由转盘校准装置校准得到，因此不同速度下的  $s_k$ ，不同位

置的  $s_j$  存在相关性，因此  $\bar{s}$  的标准不确定度按式 (C4) 计算：

$$u(\bar{s}) = \frac{\sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m u(s_j)}{m \cdot p} \quad (\text{C4})$$

由式 (C4) 可知：校准结果的不确定度主要来源于测量体中某位置条纹间距  $s_j$  的不确定度。

### C1.2 $s_j$ 的不确定度

$s_j$  为测量体中某位置条纹间距，通过转盘校准装置校准  $n$  次得到，如式 (C5)。

$$s_j = \frac{\sum_{i=1}^n s_{j,i}}{n} \quad (\text{C5})$$

其中， $s_{j,i}$  测量体中  $j$  位置第  $i$  次测量得到的条纹间距值，为转盘校准一次所得条纹间距的结果，由正文中式 (3) 可知， $s_{j,i}$  可表达为：

$$s_{j,i} = \frac{\pi \cdot f_{j,i} \cdot D}{f_{D(j,i)}} \quad (\text{C6})$$

其中， $f_{j,i}$ ：转盘第  $i$  次校准测量体中  $j$  位置条纹间距时的转动频率；

$D$ ：转盘直径；

$f_{D(j,i)}$ ：转盘第  $i$  次校准测量体中  $j$  位置条纹间距时的多普勒频率。

将式 (C6) 带入式 (C5)，考虑转盘直径  $D$  为恒定值，转动频率的稳定性小于 0.02%，忽略重复性引入的不确定度，可得：

$$s_j = \pi \cdot f_{j,i} \cdot D \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{f_{D(j,i)}}}{n} \quad (\text{C7})$$

由式 (C7) 可得：

$$u_r^2(s_j) = u_A^2(f_{D(j,i)}) + u_B^2(f_{D(j,i)}) + u_B^2(f_{j,i}) + u_B^2(D) \quad (\text{C8})$$

式 (C8) 中  $u_B(f_{D(j,i)})$  为多普勒频率校准的不确定度，一般小于  $10^{-6}$ ，可以忽略，则式 (C8) 可写为：

$$u_r^2(s_j) = u_A^2(f_{D(j,i)}) + u_B^2(f_{j,i}) + u_B^2(D) \quad (C9)$$

由式 (C9) 可知,  $s_j$  不确定度的主要来源包括:

- (1) 多普勒频率  $f_{D(j,i)}$  多次测量的重复性 (A 类不确定度);
- (2) 转盘转动频率的不确定度 (B 类不确定度);
- (3) 转盘直径的不确定度 (B 类不确定度);

其中,  $u_A(f_{D(j,i)})$  经多次测量后由贝塞尔公式计算平均值的标准偏差得到;

$u_B(f_{j,i})$  为校准转速计所得结果的不确定度, 可由校准报告得到;  $u_B(D)$  可由三坐标机测量转盘直径得到, 此外, 还需考虑实际校准过程中由于转动轴系间隙导致转盘直径的动态变化, 角度瞄准偏差, 校准过程中环境温度变化等非理想因素引入的不确定度, 则

$$u_B^2(D) = u_B^2(D_C) + u_B^2(D_G) + u_B^2(D_{\text{angle}}) + u_B^2(D_T) \quad (C10)$$

式中,  $u_B(D_C)$ : 三坐标机测量转盘直径的不确定度;

$u_B(D_G)$ : 转动轴系间隙引入的不确定度;

$u_B(D_{\text{angle}})$ : 瞄准时角度偏差引入的不确定度;

$u_B(D_T)$ : 环境温度变化引入的不确定度。

表 C-1  $s_j$  不确定度分项一览表

序号	不确定度来源		符号	不确定度类型
1	多普勒频率测量的重复性		$u_A(f_{D(j,i)})$	A 类
2	转盘转动频率测量的不确定度		$u_B(f_{j,i})$	B 类
3	转盘直径测量的不确定度	三坐标机测量转盘直径的不确定度	$u_B(D)$	B 类
		转动轴系间隙引入的不确定度		
		角度瞄准偏差引入的不确定度		
		环境温度变化引入的不确定度		

## C2 不确定度评定实例

由式 (C9)，激光多普勒流速仪条纹间距  $s_j$  的相对标准不确定度为：

$$u_r(s_j) = \sqrt{u_r^2(f_{D(i)}) + u_r^2(f_{j,i}) + u_r^2(D)} \quad (\text{C11})$$

式中： $u_r(f_{D(i)})$  为多普勒频率测量的相对标准不确定度（A 类不确定度）； $u_r(f_{j,i})$  为转盘转动频率的相对标准不确定度（B 类不确定度）； $u_r(D)$  为转盘直径的相对标准不确定度（B 类不确定度）；

因此，转盘测量得到的条纹间距  $s_j$  的不确定度由多普勒频率、转盘转动频率和转盘直径的不确定度决定，以下是对各个不确定度分量的详细分析。

### C2.1 多普勒频率测量的相对标准不确定度 $u_r(f_{D(i)})$

为评估 LDV 的多普勒频率所引起的不确定度，在不同转速条件下，实际测量某一位置处的 LDV 多普勒频率，所有转速下的测量结果如表 C2.1 所示。由此表可以得到，当标准转盘转速设定在 20 m/s 时，重复 5 次测量得到的多普勒频率相对标准差最大，为 0.0069 kHz，则 LDV 的多普勒频率  $f_D$  的 A 类标准不确定度为  $0.0069 / (19.61 \times \sqrt{5}) = 0.0253\%$ 。而 B 类标准不确定度由 LDV 自身引入的不确定度得到，如多普勒信号的信噪比，脉冲频谱分析，模数转换器的时钟精度和曲线拟合方法等，估计为 0.001%，可以忽略不计。取不同速度点下校准结果重复性的平均值，则多普勒频率测量的相对标准不确定度  $u_r(f_{D(i)})$  为 0.013%。

表 C2.1 不同转速下 LDV 输出频率测量值

转盘速度 (m/s)	频率 1(kHz)	频率 2(kHz)	频率 3(kHz)	频率 4(kHz)	频率 5(kHz)	平均值 (kHz)	标准差 (kHz)	相对标准 不确定度 (%)
0.2	19.60	19.60	19.60	19.62	19.61	19.61	0.0069	0.0253
0.5	47.78	47.77	47.78	47.78	47.77	47.77	0.0043	0.0065
1	95.91	95.86	95.87	95.88	95.86	95.88	0.0185	0.0140
5	474.91	474.89	474.72	474.63	474.63	474.76	0.1228	0.0187
10	945.22	945.32	945.42	945.26	945.33	945.31	0.0664	0.0051
15	1414.67	1414.99	1414.77	1414.67	1414.89	1414.80	0.1254	0.0064
20	1882.94	1881.72	1882.06	1882.04	1882.55	1882.26	0.4323	0.0166
25	2822.20	2821.62	2822.16	2821.36	2822.08	2821.88	0.3338	0.0086

C2.2 转盘转动频率的相对标准不确定度  $u_r(f_{ji})$ 

标准转盘所提供的角速度可表示为：

$$\omega=2\pi f \quad (C12)$$

其中  $f$  为转盘旋转的频率，即每秒钟转盘旋转的圈数。转盘旋转频率通过 EMT 电子计数式转速表测得，不确定度是由测量转盘旋转频率的电子计数式转速表的不确定度得到的，由校准证书可得其标准不确定度为 0.025%。

C2.3 转盘直径的相对标准不确定度  $u_r(D)$ 

由式 (C9)，转盘直径  $D$  的相对标准不确定度为：

$$u_r(D) = \sqrt{u_r^2(D_C) + u_r^2(D_G) + u_r^2(D_{\text{angle}}) + u_r^2(D_T)} \quad (C13)$$

式中： $u_r(D_C)$  为三坐标机测量转盘直径的相对标准不确定度； $u_r(D_G)$  为转动轴系间隙引入的相对标准不确定度； $u_r(D_{\text{angle}})$  为瞄准时角度偏差引入的相对标准不确定度； $u_r(D_T)$  为环境温度变化引入的相对标准不确定度；

(1) 转盘直径测量的相对标准不确定度  $u_r(D_C)$ 

转盘直径测量的相对标准不确定度由转盘直径多次测量重复性引入的不确定度与三坐标机的不确定度合成得到。依据转盘直径校准报告，其测量标准不确定度为 0.0025 mm，直径测量平均值为 200.1795 mm。则转盘直径测量的相对标准不确定度  $u_r(D_C)$  为 0.0013%。

(2) 转动轴系间隙引入的相对标准不确定度  $u_r(D_G)$ 

轴承与转盘之间存在的间隙会使得转盘旋转过程中出现偏心现象，进而改变转盘的动态旋转直径。估计由于间隙导致转盘动动态直径的变化量为 0.1mm，相对变化量  $0.1\text{mm}/200\text{mm}=0.05\%$ ，考虑为矩形分布，择则转动轴系间隙引入的相对标准不确定度  $u_r(D_G)$  为  $0.05\%/\sqrt{3}=0.03\%$ 。

(3) 瞄准时角度偏差引入的相对标准不确定度  $u_r(D_{\text{angle}})$

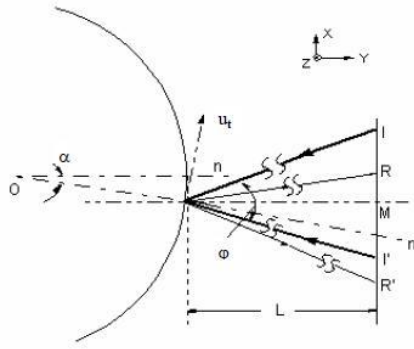


图 C2.1 入射光和散射光的不对称光斑

从图 C2.1 可以看出，当 LDV 的激光轴对准转盘的中心时，散射斑点与激光束的位置关系有  $\overline{MR} = \overline{MR'}$ ， $\tan \frac{\varphi}{2} = \frac{\overline{IM}}{L}$ ，因此在装配过程中需要尽可能使  $\overline{IR} = \overline{IR'}$ 。而当激光轴与转盘中心存在偏差时，散射斑点存在  $\overline{MR} \neq \overline{MR'}$ 。令不对称偏差为  $ASYM = (\overline{IR} - \overline{IR'})/2$ ，当  $\alpha$  很小时， $ASYM$  将近似等于：

$$ASYM = L \cdot \tan \alpha \approx L \cdot \alpha \quad (C14)$$

如果保守估计不对称偏差为  $1mm$ ，焦距  $L$  取  $500mm$ ，则：

$$\alpha = \frac{ASYM}{L} = \frac{1}{500} = 0.002rad \quad (C15)$$

假设在  $\pm 0.001rad$  的范围内偏差夹角  $\alpha$  为均匀分布，则：

$$E(D_{angle}) = \frac{0.001^2}{6} = 1.67 \times 10^{-7} rad \quad (C16)$$

$$u_r(D_{angle}) = \frac{\sqrt{D(D_{angle})}}{D_{angle}} = \frac{1}{0.001} \cdot \sqrt{\frac{0.001^4}{45}} = 0.0149\% \quad (C17)$$

因此，瞄准时角度偏差引入的相对标准不确定度  $u_r(D_{angle})$  为  $0.015\%$ 。

#### (4) 环境温度变化引入的相对标准不确定度 $u_r(D_T)$

环境温度变化会使得转盘直径出现热胀冷缩现象，进而改变转盘的动态旋转直径。但该项引入的不确定度较小，估计环境温度变化引入的相对标准不确定度  $u_r(D_T)$  约为  $0.01\%$ 。

因此，基于以上各不确定度分量的分析，根据式 (C19) 可以得到转盘直径的合成相对标准不确定度  $u_r(D)$  为  $0.042\%$ 。

C2.4 合成不确定度  $u_r(s_j)$ 

综上，转盘校准激光多普勒流速仪条纹间距  $s_j$  的不确定度来源如表 C2.3 所示。

表 C2.3 转盘校准激光多普勒流速仪条纹间距  $s_j$  的不确定度分析一览表

序号	符号	来源	$c_r(x_i)$	$u_r(x_i)$	$u_r(x_i) \cdot c_r(x_i)$
			[/]	[%]	[%]
1	$u_r(f_{D(i,j)})$	多普勒频率测量	1	0.013	0.013
2	$u_r(f_{i,i})$	转盘转动频率	1	0.025	0.025
3	$u_r(D_C)$	转盘直径测量	1	0.0013	0.0013
4	$u_r(D_G)$	转动轴系间隙引入	1	0.03	0.03
5	$u_r(D_{\text{angle}})$	瞄准时角度偏差	1	0.015	0.015
6	$u_r(D_T)$	环境温度变化引入	1	0.01	0.01
合成标准不确定度 $u_r(s_j)=0.042\%$					
扩展不确定度 $U_r(s_j)=0.084\%$ ( $k=2$ )					

## 附录 D 转盘校准装置

### D1 转盘校准装置工作原理

转盘校准装置由转盘、散射目标、电机、驱动器及控制器等构成。转盘在电机驱动下在一定的转速范围内作稳定的匀速圆周运动，附着固定在转盘上的散射目标（细丝或微粒）随转盘同步运动。通过校准转盘直径  $D$  和转动角速度  $\omega$  可得散射目标线速度  $v_s$ 。以  $v_s$  为标准线速度依据正文所述校准方法可实现激光多普勒流速仪的校准。

### D2 标准线速度的校准

#### D2.1 标准线速度的计算

由转盘的直径和转动角速度可计算得到转盘的线速度，如式（D-1）所示。

$$v_s = r \cdot \omega = \pi \cdot f \cdot D \quad (\text{D-1})$$

式中， $v_s$ ：标准线速度，m/s；

$r$ ：转盘转动半径，m；

$\omega$ ：转盘转动角速度，rad/s；

$D$ ：转盘的直径，m；

$f$ ：转盘的转动频率，Hz。

#### D2.2 转盘直径的校准

转盘直径一般由三坐标机测量得到，转盘直径值由有效的检定或校准证书提供，直径测量结果的扩展不确定度： $U_D \leq 0.005\%$ ， $k=2$

#### D2.3 转速的校准

转盘的转动角速度由转速计测量得到，转速计的测量范围应覆盖转盘的转速范围，转速计应具有有效的检定或校准证书，转速计的最大允许误差的绝对值应不大于 0.05%。

### D3 线速度稳定性的测试

转动线速度作为校准激光多普勒流速仪的标准值，其稳定性直接影响校准结果的准确度水平和可靠程度。线速度稳定性应优于 0.02%，线速度稳定性的



测试方法如下：将转盘转速调节至测试速度，稳定后用转速计连续测量转盘转速 10 次以上，计算多次测量结果的相对标准偏差，作为转盘校准装置在当前校准速度下的稳定性，如式 (D-2) 所示。

$$E_{v_s} = \frac{1}{v_s} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_{s,i} - v_s)^2}{n-1}} \quad (\text{D-2})$$

式中， $E_{v_s}$ ：当前线速度的稳定性，/；

$v_s$ ：线速度的平均值，m/s；

$v_{s,i}$ ：单次转动线速度，m/s；

$n$ ：转动次数，/。

转盘校准装置的线速度稳定性至少在转盘最小线速度  $v_{\min}$ 、最大线速度  $v_{\max}$  及  $0.5v_{\max}$  三个速度下进行测试，取测试结果中的最大值作为转盘校准装置的线速度稳定性，如式 (D-3) 所示。

$$E_v = \max(E_{v_{\min}}, E_{v_{0.5\max}}, E_{v_{\max}}) \quad (\text{D-3})$$

式中， $E_v$ ：转盘装置的线速度稳定性，/；

$E_{v_{\min}}$ 、 $E_{v_{0.5\max}}$ 、 $E_{v_{\max}}$  分别为最小线速度  $v_{\min}$ 、最大线速度  $v_{\max}$  及  $0.5v_{\max}$  线速度时的稳定性，/。