

附录：五孔探针流场测量技术简介

一、五孔探针的流场测量原理

使用五孔探针测量气流速度和压力，其使用方法有三种。第一种是全对向测量，测量时靠坐标器转动，使探针中间的孔完全对准气流方向，使探针1、3孔压力相等，且探针4、5孔压力相等；第二种是非对向测量，将探针固定在坐标架上，测量时过程种探针不转动，根据五个孔测出的压力，从校准曲线求出气流各参数；第三种是半对向测量方法，探针固定在坐标器上，但坐标架（即探针）可以绕坐标器轴转动。测量时，转动坐标架（即探针），使探针4、5孔压力相等，这样气流速度矢量就为于1、2、3孔平面内，这样，可以根据探针转过的角度得到 角。

1. 全对向测量

一般情况下，由于条件限制，在测量时，一般无法使探针的中间孔完全对准气流，所以在实际测量中很少被采用。

2. 半对向测量

在半对向测量中，气流角 可以通过探针转过的角度从坐标架角度刻度盘中读出，所以在实际测量中仅需要确定 角和气流速度大小。

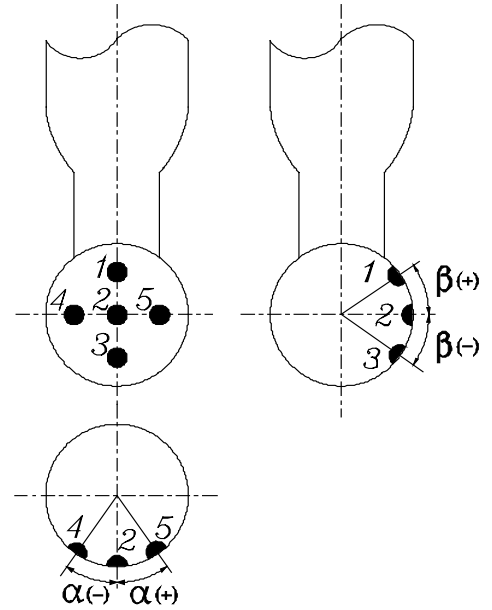


图 1 五孔探针结构示意图

$$k_{\beta} = \frac{k_3 - k_1}{k_2 - k_4} = \frac{p_3 - p_1}{p_2 - p_4} \quad (1-1) \quad k_2 = \frac{p_2 - p_s}{\frac{\rho}{2} v^2} = \frac{p_2 - p_s}{p_0 - p_s} \quad (1-2)$$

$$k_3 - k_1 = \frac{p_3 - p_1}{p_0 - p_s} \quad (1-3) \quad k_2 - k_4 = \frac{p_2 - p_4}{p_0 - p_s} \quad (1-4)$$

上述的 $k_2, (k_3 - k_1)$ 和 $(k_2 - k_4)$ 参数均为与 角有关的函数 $f(\beta)$ 。通过探针校准，可以得到 $k_2, (k_3 - k_1)$ 和 $(k_2 - k_4)$ 参数与 角的关系曲线 $f(\beta)$ 。

测量时，根据压力传感器所测量的1、2、3、4孔的压力值，按(1-1)式计算 k_{β} 值，在 $k_{\beta} = f(\beta)$ 校准曲线上，通过 k_{β} 值可以得到气流的方向角 β 。再由 $k_2 - k_4 = f(\beta)$ ， $k_2 = f(\beta)$ ， $k_3 - k_1 = f(\beta)$ 曲线，可以找到相应的 $(k_2 - k_4)$ ， k_2 和 $(k_3 - k_1)$ 值。

求气流速度按下式计算

$$v = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_s)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_4)}{\rho(k_2 - k_4)}} = \sqrt{\frac{2(p_3 - p_1)}{\rho(k_3 - k_1)}} \quad (1-5)$$

$$p_s = p_2 + k_2 \frac{p_2 - p_4}{k_2 - k_4} \quad (1-6) \quad p_0 = p_s + \frac{\rho}{2} v^2 = p_s + \frac{p_3 - p_1}{k_3 - k_1} \quad (1-7)$$

$$p_0 - p_s = \frac{p_2 - p_4}{k_2 - k_4} = \frac{p_3 - p_1}{k_3 - k_1} \quad (1-8)$$

(1-8)可以用来相互校对动压头，检验测量是否正确。

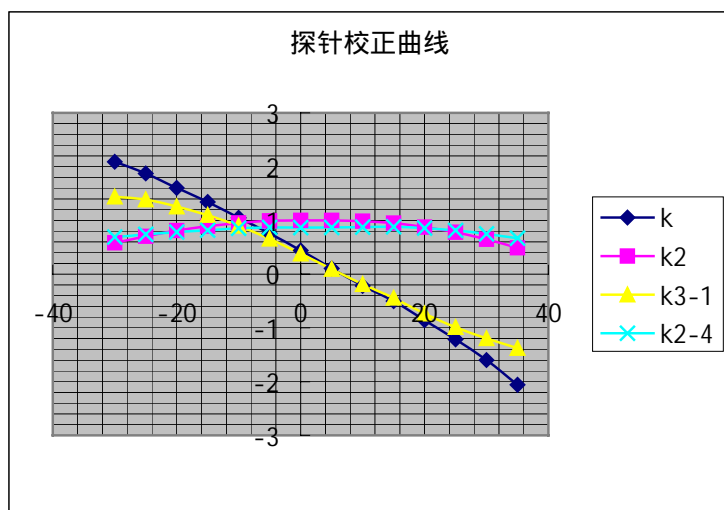


图2 半对向测量校准曲线

3. 非对向测量(方法1)

在根据五个压力孔测出的压力,计算出 K_α 和 K_β ,然后根据 K_α 和 K_β 在五孔探针特性网图 K_0 、 $K_1=f(\dots)$ 中查出 K_0 和 K_1 。

$$K_\alpha = \frac{p_3 - p_1}{(p_2 - p_1) + (p_2 - p_3)} \quad K_\beta = \frac{p_5 - p_4}{(p_2 - p_4) + (p_2 - p_5)}$$

$$K_0 = \frac{p_2 - p_0}{p_2 - (p_1 + p_3 + p_4 + p_5)/4}$$

然后根据 K_0 和 K_1 从五孔探针速度特性曲线 $K_v=f(\dots)$ 上查的动压系数,再按 K_v 值及测出的 (p_2-p_3) 计算出动压 $\rho v^2/2$ 。再根据五个压力孔测出的压力计算出系数

$$K_v = \frac{\rho v^2 / 2}{p_2 - p_5} \quad K_1 = \frac{p_1 - p_3}{p_2 - (p_1 + p_3 + p_4 + p_5)/4}$$

按此系数及已知的 K_0 ,从五孔探针总压曲线 $K_0=f(K_1, \dots)$ 中查处系数 K_0 ,从而算出 P_0

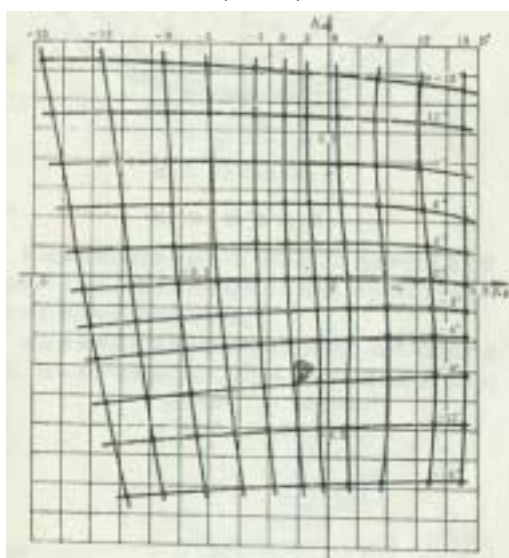


图3 五孔探针特性网图 K_0 、 $K_1=f(\dots)$

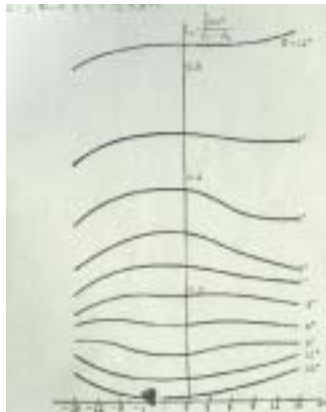


图4 五孔探针速度特性曲线 $K_v=f(\alpha, \beta)$

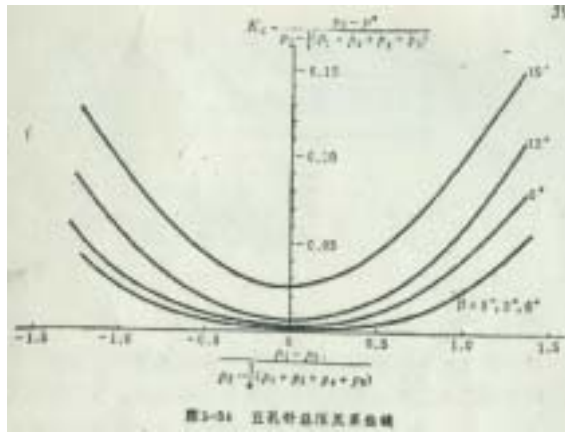


图5 五孔探针总压曲线 $K_0=f(K_1, \alpha, \beta)$

4. 非对向测量(方法2)

在根据五个压力孔测出的压力,计算出 K_α 和 K_β ,然后根据 K_α 和 K_β 再五孔探针特性网图 K_0 、 $K_v=f(\alpha, \beta)$ 中查出 K_0 和 K_v 。

$$\text{俯仰角系数 } K_\alpha = \frac{P_5 - P_4}{P_2 - P_{av}} \quad (2-1)$$

$$\text{偏航角系数 } K_\beta = \frac{P_1 - P_3}{P_2 - P_{av}} \quad (2-2)$$

$$\text{总压系数 } K_0 = \frac{P_0 - P_2}{P_2 - P_{av}} \quad (2-3)$$

$$\text{动压 } K_d = \frac{P_0 - P_s}{P_2 - P_{av}} \quad (2-4)$$

$$\text{速度系数或马赫数 } K_v = \frac{P_{av}}{P_2} \quad (2-5)$$

根据 K_0 和 K_v 从五孔探针速度特性曲线 $K_0=f(\alpha, \beta)$ 上查的总压系数,计算出总压。根据 K_v 和 K_d 从五孔探针速度特性曲线 $K_v=f(\alpha, \beta)$ 上查的动压系数,计算出动压。

5.常规五孔探针的结构



图1 球形五孔针结构外形

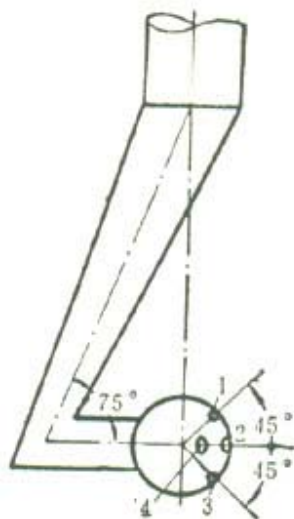
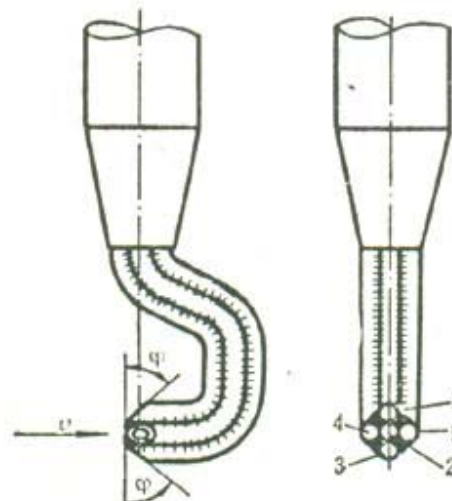


图2 棱锥五孔针结构外形



目前,经常使用的五孔针一般是球形的,小型五孔探针的球形直径一般在4 - 8mm,在球面上开有间隔位45度角度的五个测孔,如图1所示,测量时,可以采用对向测量方法,使探针中间的孔完全对准气流方向,使

探针1、3孔压力相等，且探针4、5孔压力相等；也可以采用是不对向测量方法，将探针固定在坐标架上，测量时过程种探针不转动，根据五个孔测出的压力，从校准曲线求出气流各参数；或者采用半对向测量方法，探针固定在坐标器上，但坐标架（即探针）可以绕坐标器轴转动。测量时，转动坐标架（即探针），使探针4、5孔压力相等，这样气流速度矢量就为于1、2、3孔平面内，这样，可以根据探针转过的角度得到角。由于使用条件的限制，一般采用半对向测量方法或不对向测量方法。

二、五孔探针的非对向测量校准及校准数据处理

1. 校准及校准数据处理

校准方法：校准时，选择定一个校准速度，先给定一个探针角度，调整多个探针角（根据测量可能出现得角度范围，选定校准角度范围，角一般范围 $-40^\circ \sim +40^\circ$ ），得到给定速度下，每一个角度，就有一组不同角度的校准数据。

测量数据：大气参数（大气压、大气温度、大气湿度），总压、静压、压力P1-5、角度，角度；

校准系数：对给定校准速度v，得到一组校准曲线k、 $k_d=f(\quad, \quad)$ ， k_0 、 $k_d=f(\quad, \quad)$ ，密度。

一般应该根据试验时所需要的被测量流速范围 $v_{min} \sim v_{max}$ ，选取几个校准速度来校准探针，获得其不同速度下得校准数据。

采集数据变量名：

Pa,Ta,Fa, Po,Ps, P1,P2,P3,P4,P5, Alfa,Bta

校准速度个数Vnum, Alfa 角度个数Anum, Bata 角度个数Bnum

校准文件名的命名方法：

V1A10B20.CAB.txt

V1 代表速度，数字从零开始V0,V1,V2,V3表示四个不同的速度。

A10 代表Alfa角度，例如：A-10,A-5,A0,A5,A10表示五个不同的角度。

B20 代表Bata角度，例如：B-20,B-10,B0,B10,B20表示五个不同的角度。

对于一个校准速度：

1. a=-10 有一组不同Bata的校准数据；
2. a=-5 有一组不同Bata的校准数据。
3. a=0 有一组不同Bata的校准数据。
4. a=5 有一组不同Bata的校准数据。
5. a=10 有一组不同Bata的校准数据。

校准采集数据格式：

试验点数: 14

采集通道数: 11

试验日期:2003.4.23 13:29

压力单位:帕(Pa), 温度单位:

通道号	通道2	通道3	通道4	通道5	通道6	通道7	通道8	通道10	通道12	通道13	通道14	
参数名	P5	P4	P2	P3	P1	P0	Alfa0	Dlta	Pa	Ta	Fa	Alfa
传感器	500Pa	500Pa	2 KPa	2 KPa	2 KPa	2 KPa	5 KPa	人工输入	100KPa	-30~ 70	0~100 %	
No.1	-2.7498	-27.389	213.87	356.26	-159.43	363.31	1.3483	-30.000	97105.2	19.993	0.51701	1 1
No.2	-2.7345	-3.7520	254.63	343.54	-155.91	362.58	1.2973	-25.000	97111.3	19.992	0.51739	1 1

校准结果数据格式：

13	(校准试验点数)									
97116.2	20.01	0.5164	(大气参数Pa,Ta,Fa)							
362.60	25.13	1.14871	(平均总压P0、速度V、大气密度)							
序号	k	k	k0	kd	P0	Pa	Ta	Fa		
No.1	0	-30	2.12538	0.58867	1.41942	0.66784	363.31	97105.2	19.99	0.5170

2. 测量数据分析处理

1) 输入或读入测量数据p1、p2、p3、p4、p5及大气参数、探针初始转角 θ_0 和位置参数r。

2) 计算 $k_\alpha = \frac{p_4 - p_5}{p_2 - p_{av}}$, $k_\beta = \frac{p_3 - p_1}{p_2 - p_{av}}$, 通过查找 k_α 、 $k_\beta = f(\theta)$ 曲线插值得求气流方向角 θ ，

3) 由气流方向角 θ 、 θ ，根据 k_0 、 $k_d = f(\theta)$ 插值得到相应的 k_0 、 k_d ，计算 p_s 、 p_0 、 V

$$p_{av} = (p_1 + p_3 + p_4 + p_5) / 4 \quad p_0 = p_2 + k_0 * (p_2 - p_{av})$$

$$p_s = p_0 - k_d * (p_2 - p_{av}) \quad v = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_s)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2k_d * (p_2 - p_{av})}{\rho}}$$

$\theta = \theta_0 +$

如果 $\theta = 5$ 度，最好是探针转 5 度后，测量 $\theta = 0$ 。

三、基于五孔探针的三维速度实时测量系统

1、设计思路

利用五孔探针的不对向测量方法，再配上实时数据采集处理，就可以开发三维速度实时测量系统，它可以适用于被速度变化不是非常剧烈地场合使用。目前我们已有的系统是利用五孔探针地半对向测量方法，测量时需要调整探针，而且探针转动角度的测量目前也是人工，所以在三维速度实时测量时使用会受到限制。在三维速度实时测量系统中，测量方法改用非对向测量方法，在测量中不需要随时转动探针，另外配上角度传感器，测量探针转动地角度，就可以实时测量三维速度了。

2、传感器选择

根据被测量的压力范围选择适合的传感器量程。

3、数据实时采集

利用数据采集系统来采集五孔探针的压力信号，并将它实时地传送到五孔探针测试系统中，可实时地显示流场的速度和压力。

4、角度传感器和位移传感器

测量系统如果配上绝对型的轴编码器来测量探针转动角度 θ_0 和位移传感器来测量坐标位置，可以实现角度和位置的自动测量。

5、实时测量软件处理系统

利用压力传感器测量得到的压力 $P_1 \sim P_5$ ，通过非对向测量方法，可以获得基于探针坐标系下地三维速度 V' ， θ' ， θ' ，并可以实时地显示基于探针系的气流速度和气流角度；再通过轴编码器测量探针转动的角度 θ_0 ，就可以获得世界坐标系下的气流速度和角度。

探针坐标系下速度 (V , α' , β') 转换到世界坐标系下速度 (V , α , β) 为

$$v = v'$$

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha'$$

$$\beta = \beta'$$

6、探针校准软件处理系统

利用校准时压力传感器测量得到的压力 P1~5 和探针角度 α' , β' , 通过不对向测量方法, 将数据处理成速度特性曲线 K 、 $K_v = f(\alpha, \beta)$ 和总压特性 $K_0 = f(\alpha, \beta)$ 、速度特性 $K_v = f(\alpha, \beta)$, 校准时, 在需要测量地速度范围内, 指定的几个不同速度上进行校准, 可以获得不同速度下地一组校准曲线, 保存在测量系统探针校准数据库中, 供测量时使用。

7、实时测量系统使用

利用压力传感器测量得到的压力 P1~5, 通过不对向测量方法, 可以获得基于探针坐标下的速度。为了提高测量精度, 在使用时, 可以根据实际测得的 α' , 转动探针来调整探针角度 α_0 , 使探针尽可能地对准气流速度方向, 使 α' 在一个较小的范围内, 如 $\pm 5^\circ$ 。在测量过程中, 开始时需要转动探针来对准被测量气流, 在测量过程中, 如果气流角 α' 不超出范围, 测量过程中是不需要转动探针的。

此系统可以应用于气流速度大小、方向变化不很剧烈地场合, 用于实时测量和记录气流速度的大小、方向和压力。

四、五孔探针测量方法的改进

1. 对被测气流角度的处理

对于五孔探针来说, 空间气流速度方向可以由探针坐标系上的偏航角 α 、俯仰角 β 确定。为了适应气流方向角变化幅度较大的情况, 将 α 拆分成两个部分进行测量:

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1$$

其中: α_0 为半对向测量部分, α_1 为非对向测量部分。半对向部分 α_0 采用半对向测量的思想, 即转动探针对准事先规定的与气流方向角最接近的子区域, 非对向部分 α_1 则在该子区域内采用非对向测量方法, 利用探针测量直接获得 α_1 。为保证足够的测量精度, 每个子区域的角度范围应较小, 例如取为 10° , 这意味着通常是限制 α_1 在 $\pm 5^\circ$ 。表 1 给出一个例子, 供参考。

表 1 偏航角 α 拆分示例

偏航角 α ($^\circ$)	半对向部分 α_0 ($^\circ$)	非对向部分 α_1 ($^\circ$)
1	0	1
12	10	2
23	25	-2
34	35	-1
45	45	0
56	55	1
67	65	2
78	75	3

由于利用了半对向测量方法, 所以对 α_0 的范围几乎没有限制。为了减少 α_0 的调整次数, 可以考虑取 5° 或 10° 为间隔, 此间隔也相当于非对向测量时的角度调整步长或子区域的大小。在实际测量时, 只要 α_1 不

超过规定范围，就不需要转动探针。

2. 五孔探针的校准

一般应先根据试验时被测量气流的速度范围确定最小速度 v_{\min} 和最大速度 v_{\max} ，在最小和最大速度范围内选取几个速度来校准探针，获得探针在不同速度下的校准数据。

对于一个给定的校准速度 v ，首先针对一个探针 α 角，调整多个探针 β 角 (β 角一般范围 $-45^\circ \sim +45^\circ$)，得到这个 α 角所对应的一组 β 角的校准数据。由于 α 角一般范围是 $-45^\circ \sim +45^\circ$ ，所以还需要针对不同的 α 角重复上述的探针校准工作，最终得到给定速度下，不同探针角度 α 所对应的不同组 β 角度的校准数据。即针对确定的校准速度 v ，应得到一组校准曲线 $K_\alpha = f(\alpha, \beta)$ 、 $K_\beta = f(\alpha, \beta)$ 、 $K_0 = f(\alpha, \beta)$ 、 $K_d = f(\alpha, \beta)$ 。

按照传统的非对向测量方法，通常 α 角范围为 $-45^\circ \sim +45^\circ$ ，校准时角度间隔为 5° ，则 α 角需要校准 -45° 、 -40° 、 \dots 、 40° 、 45° 共 19 组。如果采用本文改进的测量方法，限制 α_1 在 $\pm 5^\circ$ 内，为使探针测量准确，探针 α 角校准范围取为 $-10^\circ \sim +10^\circ$ ，角度间隔为 5 度，则 α 仅需要校准 -10° 、 -5° 、 0° 、 5° 、 10° 共 5 组，说明本文改进方法还可以大大减少探针校准工作量。

3. 五孔探针的测量数据处理

数据处理时，根据五孔探针的测量压力可以计算出 K_α 、 K_β ，通过查找 $K_\alpha, K_\beta = f(\alpha, \beta)$ 曲线插值得得气流方向角 α 和 β ，通过 α 、 β 在五孔探针速度特性曲线 $K_0 = f(\alpha, \beta)$ 插值总压系数 K_0 ，计算出总压。通过 α 、 β 在五孔探针速度特性曲线 $K_d = f(\alpha, \beta)$ 插值总压系数 K_d ，计算出动压。

$$\text{偏航角系数 } K_\alpha = \frac{p_4 - p_5}{p_2 - p_{avg}}, \quad \text{俯仰角系数 } K_\beta = \frac{p_3 - p_1}{p_2 - p_{avg}}$$

$$\text{总压系数 } K_0 = \frac{p_0 - p_2}{p_2 - p_{avg}}, \quad \text{动压系数 } K_d = \frac{p_0 - p_s}{p_2 - p_{avg}}$$

$$\text{其中 } p_{avg} = \frac{p_1 + p_3 + p_4 + p_5}{4}$$

4. 采用实时测量和处理技术，确保测量的 α_1 角在指定范围内

对于改进后的测量方法，需要保证非对向测量时的角度 α_1 在预先设定的范围内，这在传统的手工测量中是难以实现的。由于目前试验测量采用自行开发的计算机数据采集系统，加上五孔探针数据实时处理技术，可以直接实时得到测量结果气流的 α_1 角度，并显示在屏幕上，供试验者参考，来确定调整探针转动角度。如果气流角 α_1 超出指定的 $\pm 5^\circ$ 范围，则调整探针的 α_0 角使 α_1 角度在 $\pm 5^\circ$ 范围内。为了确保测量精度，探针的 α_1 角度在 $\pm 10^\circ$ 内校准，测量时 α_1 在 $\pm 5^\circ$ 范围内使用。在实际测量时，如果 α_1 处在 $\pm 10^\circ$ 范围之外，则在五孔探针数据处理系统内，由于 α_1 角度超出校准曲线范围，需要通过线性外插来获得此时气流的 α_1 角，这时的 α_1 角误差较大，而此时的 α_1 角仅用于指导调整探针的 α_0 角度， α_0 调整后使 α_1 角又回到预先指定的 $\pm 5^\circ$ 范围内，所以探针还是在校准的范围内使用，保证了测量的精度。试验表明，一般校准探针的 α_1 角度在 $\pm 10^\circ$ 内就可以满足测量精度的要求。

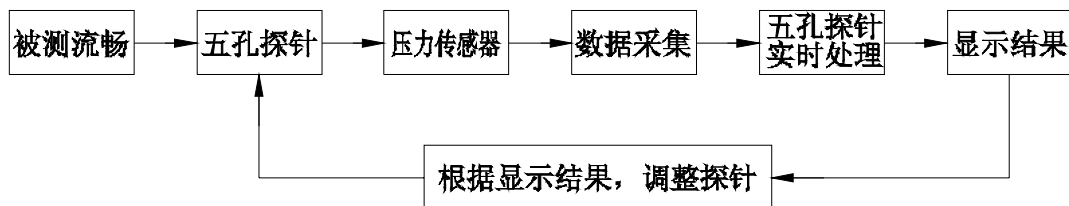


图 2-5 改进后测量方法的测量过程示意图

5. 改进后测量方法的验证测试实例

我们用改进后的测量方法对调节门后的流场做了测试，实践表明该方法可行，能提高测量速度，又能确保测量精度。

表 2-2 同一位置的不同 α_0 的测试结果

半对向部分 $\alpha_0(^{\circ})$	非对向部分 $\alpha_1(^{\circ})$	气流角 $\alpha(^{\circ})$	偏差 ($^{\circ}$)	β ($^{\circ}$)	V (m/s)	备注
20	-23.023	-3.023	-2.456	1.555	22.148	超出校准范围
15	-16.507	-1.507	-0.940	1.209	22.658	超出校准范围
10	-10.642	-0.642	-0.075	1.347	22.885	
8	-7.985	0.015	0.582	1.660	23.147	
6	-6.657	-0.657	-0.090	1.611	22.882	
4	-4.516	-0.516	0.051	1.845	22.811	推荐使用范围
2	-2.551	-0.551	0.016	1.772	22.834	推荐使用范围
0	-0.567	-0.567	0.000	1.779	22.925	以该点为基准
-2	1.598	-0.402	0.165	1.841	22.875	推荐使用范围
-4	3.678	-0.322	0.245	1.702	22.819	推荐使用范围
-6	5.864	-0.136	0.431	1.602	22.761	
-8	7.719	-0.281	0.286	1.695	22.715	
-10	9.763	-0.237	0.330	1.431	22.753	
-15	15.146	0.146	0.713	1.471	22.342	超出校准范围
-20	21.085	1.085	1.652	1.682	21.800	超出校准范围

以上是对同一个测点，采用不同 α_0 时的测量结果，测量结果表明如果超出校准范围使用，则误差会增加，在校准范围内使用，误差较小，如果在校准范围的中心区域使用，则误差更小。

应用改进的测量方法对调节门后面沿半径 R 的流场进行测试，结果表明该测量方法扩展了使用五孔探针测量气流角度 α 的适应范围，测量速度快，测量结果的重复性好。目前已将改进的测量方法全面应用于实际试验测量中，并取得较好的使用效果。