

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902764

基于关节臂的超声测流装置几何参数精测方法研究*

吴宇¹ 胡鹤鸣² 杨卓³ 程震⁴ 崔航^{2,5}

(1. 广西壮族自治区计量检测研究院 南宁 530007; 2. 中国计量科学研究院 北京 100013; 3. 北京市南水北调南干渠管理处 北京 102600; 4. 北京市水文总站 北京 100089; 5. 中国计量大学 杭州 310018)

摘要:针对如何确保现场安装超声测流装置测量准确度的问题,提出了基于关节臂的现场安装探头几何参数精测方法。首先,对超声测流装置的流量计算模型进行分析,结果表明,其测量准确度建立在探头几何参数的准确测量基础上。在此基础上,通过探头的特殊设计及内外测比对试验,验证了使用关节臂外测探头三维坐标推算探头实际几何参数的可行性。最后,在南水北调中线工程的3个试点,使用关节臂精确测量插入式四声道超声测流装置探头三维坐标,分析得到探头几何参数的精确量值和修正权重系数。通过分析不同权重系数对超声测流装置平均流速的影响,结果表明,该方法能提高现场安装的超声测流装置测量准确度0.02%~0.58%,对现场划线定位的准确度水平做出评价,验证了方法的合理性和有效性。

关键词:几何参数;划线定位;超声测流;权重系数;精确测量

中图分类号:TK313 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**470.2010

Research on precise measurement method of geometric parameter of ultrasonic flow measurement device based on AACMM

Wu Yu¹ Hu Heming² Yang Zhuo³ Cheng Zhen⁴ Cui Hang^{2,5}

(1. Guangxi Research Institute of Metrology & Test, Nanning 530007, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China; 3. Beijing south to North Water Transfer South Main Canal Management Office, Beijing 102600, China; 4. Hydrographic Station of Beijing, Beijing 100089, China; 5. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of how to ensure the measurement accuracy of the on-site mounted ultrasonic flow measurement device, a precise measurement method of geometric parameters of the on-site mounted probe based on articulated arm coordinate measuring machine(AACMM) is proposed. Firstly, the flow-rate calculation model of ultrasonic flow measurement device is analyzed, the results show that the measurement accuracy is based on the accurate measurement of the geometric parameters of the probes. On this basis, through special design of probe and comparison of internal and external test, feasibility of using external probe 3-D coordinates value measured by AACMM to calculate probe actual geometric parameters is verified. Finally, in three test cases of middle route of south-to-north water transfer project, 3-D coordinates value of probe of plug-in four-path ultrasonic flow measurement device are accurately measured by AACMM, precise geometric parameters of the probe and corrected weight coefficients are obtained by analysis. Through analysis of the influence of different weight coefficients on the average flow velocity of ultrasonic flow measurement device, the results show that the method can improve the measurement accuracy of the on-site mounted ultrasonic flow measurement device by 0.02% ~ 0.58%, the accuracy of scribe localization is evaluated, and also the rationality and effectiveness of the method are verified.

Keywords: geometric parameters; scribe localization; ultrasonic flow measurement; weight coefficient; accurate measurement

收稿日期: 2019-11-18 Received Date: 2019-11-18

* 基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFF0206303)、广西科技基地和人才专项(桂科AD17129065)、横向课题(33300000-19-QT0601-0004)资助项目

0 引言

目前,超声流量计的测量准确度可以高达 0.5%,但这必须建立在几何参数准确测量的基础上^[1]。常用的超声流量计现场几何参数测量方法有钢卷尺法、经纬仪法、全站仪法、关节臂法等。对于准确度要求较高的超声流量计,宜采用关节臂或全站仪测量管壁点及探头点的三维坐标,并推算流量计的几何参数^[2-12]。由于关节臂式坐标测量机具有测量准确度高、测量结果可靠等优点,已被广泛接受^[13-15]。

对超声流量计探头安装,文献[16-20]研究了超声流量计探头插入深度对流量及测量误差的影响。对超声流量计探头几何参数测量,胡鹤鸣等^[1]提出了采用三坐标或全站仪测量探头三维坐标,并由三维坐标推算几何参数及其不确定度。但对现场实流管道的超声测流装置探头安装、几何参数精确测量及权重系统修正的研究,技术尚未完善。

本文研究的超声测流量装置为现场安装的插入式交叉四声道超声流量计。常用的超声测流装置探头现场管道外定位安装方法有辅助工装、划线定位直接安装等。划线定位法的安装位置由 Gauss-Jacobi 积分确定,根据管道壁厚、探头插入的方式及深度等对安装位置进行修正,能较好地控制声道角度、声道长度和声道高度,是探头定位安装的较好方法。由于现场打孔、探头安装施工、管道不圆等因素,导致探头安装后的实际几何参数与设计值往往存在一定的差异。因此,超声测流装置现场安装完成后,需对几何参数进行精确测量,将精确量值和修正权重系数输入超声测流装置,参与流量示值的计算,以确保超声测流装置的测量准确度。

1 几何参数的重要性

1.1 流量计算模型

超声测流量装置应用超声波在顺流与逆流中传播速度之差与介质流速有关的原理,测得介质流速,应用速度面积法,进而求得通过某一截面的瞬时流量。超声测流量装置的 1 对探头如图 1 所示,置于待测截面两侧,测得顺流传播时间 $t_{d,i}$,逆流传播时间 $t_{u,i}$,从而算得该声道上的平均轴向速度:

$$v_i = \frac{L_i}{2\cos\phi_i} \left(\frac{1}{t_{u,i}} - \frac{1}{t_{d,i}} \right) \quad (1)$$

式中: L_i 是声道长度; ϕ_i 是声道角。

由于边缘效应的存在,管道内的流场分布不均,致使单声道的超声测流量装置流量测量准确度与测量重复性

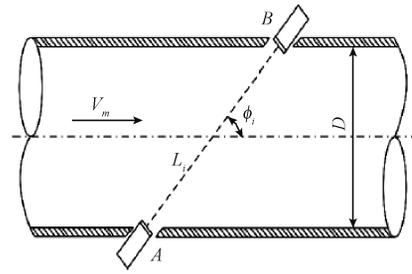


图 1 超声测流原理

Fig. 1 Principle of ultrasonic flow measurement

的结果都不甚理想。多声道超声测流量装置的出现和积分算法的成熟使上述情况得到很大改观。在待测截面平行地布置多条声道,通过各声道速度的加权求和计算截面流量:

$$q_v = R^2 \sum_{i=1}^N W_i \frac{L_i}{\cos\phi_i} f(t_{d,i}, t_{u,i}) \quad (2)$$

式中: R 为管道内半径; W_i 为权重系数。

不同声道的权重系数和声道高度可以由 Gauss-Jacobi 积分或 OWICS 积分方法确定^[21]。由式(1)、(2)可知,只要测得管道内半径 R 、每一声道的声道长度 L_i 和声道角 ϕ_i ,便可由公式算得被测截面的瞬时流量。

1.2 几何参数对流量不确定度的敏感系数

依据多声道超声测流量装置流量计算公式(式(2)),按照不确定度的合成方法,首先计算几何量相关的偏导数:

$$\frac{\partial q_v}{\partial R} = 2R \sum_{i=1}^N W_i \frac{L_i}{\cos\phi_i} f(t_{d,i}, t_{u,i}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial L_i} = R^2 W_i \frac{1}{\cos\phi_i} f(t_{d,i}, t_{u,i}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial \phi_i} = R^2 W_i \frac{L_i}{\cos\phi_i} \tan\phi_i f(t_{d,i}, t_{u,i}) \quad (5)$$

由于所有几何参数都是由同一台仪器测量,为了获取不确定度的最大可靠性,考虑各声道的声道长度强相关,各声道角也强相关,于是几何量相关的不确定度合成公式为:

$$\begin{aligned} \left(\frac{u_c(q_v)}{q_v} \right)^2 &= \left(2 \frac{u(R)}{R} \right)^2 + \\ & \frac{\left(\sum_{i=1}^N W_i \frac{1}{\cos\phi_i} f(t_{d,i}, t_{u,i}) u(L_i) \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^N W_i \frac{L_i}{\cos\phi_i} f(t_{d,i}, t_{u,i}) \right)^2} + \\ & \frac{\left(\sum_{i=1}^N W_i \frac{L_i}{\cos\phi_i} \tan\phi_i f(t_{d,i}, t_{u,i}) u(\phi_i) \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^N W_i \frac{L_i}{\cos\phi_i} f(t_{d,i}, t_{u,i}) \right)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

考虑到不同声道的声道角 ϕ_i 差异很小,时间相关项可以表达为声道速度和声道长度的关系式:

$$f(t_{di}, t_{ui}) = \frac{1}{t_{di}} - \frac{1}{t_{ui}} = \frac{c + u_{mi} \cos \phi_i}{L_i} - \frac{c - u_{mi} \cos \phi_i}{L_i} = \frac{2u_{mi} \cos \phi_i}{L_i} \quad (7)$$

式(7)简化为:

$$\left(\frac{u_c(q_v)}{q_v}\right)^2 = \left(2 \frac{u(R)}{R}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N W_i u_{mi} \frac{u(L_i)}{L_i}\right)^2 / \left(\sum_{i=1}^N W_i u_{mi}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N W_i u_{mi} \tan \phi_i u(\phi_i)\right)^2 / \left(\sum_{i=1}^N W_i u_{mi}\right)^2 \quad (8)$$

从式(8)可以看出,最终被测流量的相对不确定度,主要包含管道内半径 R 、声道长度 L_i 和声道角 ϕ_i 3 个几何参数引起的相对不确定度分量。OWICS 选取的是多声道测量方式,每声道长度和声道角对应的相对不确定度应该取各个声道的加权平均值。因此,为了确保超声测流装置的测量准确度,必须对探头的几何参数进行精测。

2 超声测流装置现场划线定位安装

超声测流装置现场划线定位安装步骤如下。

1) 确定管道横截面及顶部中心线。将不易变形的标准长方形卷纸紧紧缠绕在已进行表面清洁处理的管道外壁上,将卷纸重合部分对齐,沿着卷纸边缘确定两个横截面。使用相同方法可以获得多个横截面。将足够长的透明塑胶软管装入适量的水并确保无气泡,紧紧缠绕在管道某个横截面上并在水位持平的两端位置使用记号笔进行标记,取这 2 个点的中点即为该管道的顶部最高点。使用相同方法依次在现场管道顶部找到多个顶部最高点并做标记,将这些标记点进行连接即可得到现场管道顶部中心线。

2) 确定管道外周长及中部中心线。在已画出的管道横截面位置,使用钢卷尺测出现场管道的外周长,每个周长测 3 遍取平均作为该横截面的周长,至少测量 3 不同横截面周长取平均作为被测管道的外周长。从现场管道顶部中心线沿着横截面线往底部方向 1/4 周长位置确定为管道中部点,使用上述方法可在管段两侧分别找到多个管道中部点,沿管道轴线方向将两侧的中部点分别连接可以得到现场管道两侧的中部中心线。

3) 确定探头安装的弧向位置和轴向位置。首先确定探头的弧向位置。四声道超声测流装置在不同的声道高度 Z_i 平行布置交叉四声道测量声道轴向流速并计算流量。通常用声道高度 $t_i = Z_i/R$ (R 为管道内半径) 来表征声道的安装位置,圆形管道还可以用声道高度角 $\alpha_i =$

$\arcsin t_i$ 来描述相对声道高度。因为探头的弧向位置是指管道外壁的弧长,所以实际弧长由 α_i 和 r (管道外半径) 确定。以管道两侧中部中心线为起点,沿横截面线向顶部和底部分别标记相应的弧向位置点。其次,确定探头的轴向位置。探头轴向距离是因声道角产生的沿管道轴线方向的横向跨度,其距离由声道高度角、声道角和管道内径确定。选取一个横截面线作为探头安装中心位置线即为轴向 0 点线,轴向距离线与弧向位置点相交得到每个探头的理论位置并使用记号笔标记。四声道超声测流装置的探头理论安装位置详细参数如表 1 所示。

表 1 探头理论安装位置

声道编号	A1	A2	A3	A4
声道高度角/(°)	54	18	-18	-54
声道角/(°)	45	45	45	45
弧长/mm	$0.3\pi r$	$0.1\pi r$	$0.1\pi r$	$0.3\pi r$
轴向	$R\cos 54^\circ$	$R\cos 18^\circ$	$R\cos 18^\circ$	$R\cos 54^\circ$
距离/mm	$/\tan 45^\circ/2$	$/\tan 45^\circ/2$	$/\tan 45^\circ/2$	$/\tan 45^\circ/2$

4) 焊接探头底座并开孔安装。使用配备高纯度氩气瓶的 350 A 大功率氩弧焊对探头底座进行焊接。为确保焊接点没有虚焊和气泡,焊完后必须进行无损探伤检查,确保没有渗水情况。探头套件使用球阀底座斜开孔相连接,连接处使用密封胶进行密封以防漏水。球阀大小与探头套接管大小一致,探头的圆柱直管段与开孔钻头大小一样,比球阀略小。探头设计及现场安装效果如图 2 所示。

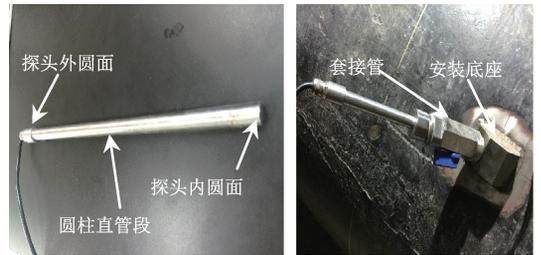


图 2 探头特殊设计及现场安装

Fig. 2 Special design and on-site installation of probe

打开球阀,推动开孔器的钻杆直至与现场管道外壁接触并开始钻孔。钻透管壁后,慢慢退出钻杆直到钻头的最前端刚远离球阀芯即关上球阀。将探头缓慢插入套接管直到触碰球阀芯,打开球阀继续插入直到探头处于全缩状态。由于探头圆柱管段的特殊设计,可以外测圆柱段长度确定探头插入深度。在探头接线端设计一个与探头圆柱管段垂直相交的外圆面,外圆面到探头内圆面的距离设计成定值。根据斜打孔角度、现场管道壁厚以及外测圆柱段的长度可确定探头插入现场管道的深度。

为了方便现场安装,可以设计专用卡规确定探头插入深度。探头现场安装及几何参数精确测量如图 3 所示。

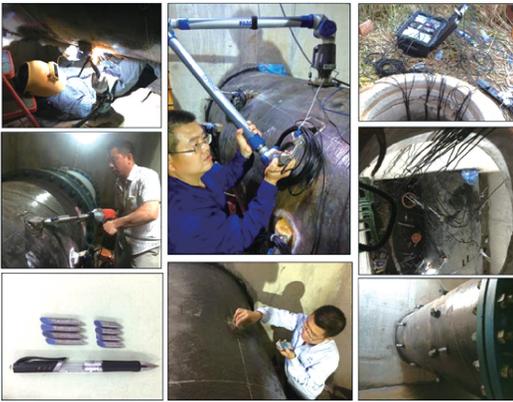


图 3 现场安装及几何参数精确测量

Fig. 3 On-site installation and precise measurement of geometric parameters of probe

3 几何参数精确测量

3.1 内半径精确

现场管道一般不会磨圆,不会有经过机械加工的管道内表面,又不能进入管道内测管道的横截面积,只能测量管道外表面的拟合圆柱体外半径和管道厚度,得到接近于实际值的管道横截面积。流量测量误差与管道横截面积测量值的误差成正比。对于 DN1200 管道,若内半径的测量误差为 +1 mm,将导致约 +0.33% 的流量误差。因此,准确测量内半径对管道流量测量非常重要。

管道内半径即管道外半径减去管道壁厚。首先,测量管道外半径。由于现场管道外壁涂有保护层,需使用砂轮机在探头覆盖的管道范围内打磨足够多的壁面点。使用关节臂对这些壁面点进行三坐标测量并进行柱面拟合得到管道外半径。其次,测量管道壁厚。管道壁厚测量可以采用以下 4 种方法校验:1) 用砂轮机打磨管道外壁保护层后,使用超声测厚仪测量多点管道壁厚取平均,此方法适用于管道内壁无涂层的情况;2) 管道施工安装方提供的壁厚数据;3) 游标卡尺测量管道法兰连接处的厚度均值;4) 使用游标卡尺精确测量开孔器打孔取出的孔芯平行面距离,取所有孔芯平行面距离的平均值作为管道壁厚。优先采用第 4 种方法。

3.2 声道长度、声道高度、声道角测量

1) 实验室精测方法

在实验室条件下,使用关节臂直接对超声测流装置几何参数进行精测,可分为以下两个步骤:(1) 使用关节臂式坐标测量机对足够多的管道内壁点进行三坐标测量,可以拟合得到被测管道的内半径和管道虚拟轴线;(2) 对探头内圆面进行三坐标测量可以拟合得到探头内

圆心三坐标,进而得到声道长度和声道虚拟轴线。声道虚拟轴线与管道虚拟轴线的夹角即为声道角,声道虚拟轴线与管道虚拟轴线的距离即为声道高度。

2) 现场精测方法

对几何参数精测的要点就是管道内壁点和探头内圆心的三坐标获取。在被测管道为开放且无水状态下,才能进行管道内测几何参数。而现场管道为封闭有流管道,无法直接对管道内壁点和探头内圆心进行三坐标测量。因此,实验室精测方法并不适用于现场。在现场,是否可以通过对管道和探头其它位置的测量间接实现几何参数精确测量是一个需要探讨的问题。

管道内壁点三坐标测量是为拟合得到管道内半径和内虚拟轴线。在现场,可使用关节臂测量管道外壁点拟合得到外半径和外虚拟轴线。如果被测管道为标准圆管以及管道壁厚测量无误差,那么外虚拟轴线与内虚拟轴线将重合,外半径减去管道壁厚即为内半径。因此,通过测量管道外壁点和管道壁厚能近似实现内半径的现场测量。

探头内圆面进行三坐标测量是为了拟合得到探头内圆心三坐标。在现场,可通过对探头的特殊几何设计将探头内圆心坐标测量以外测方式实现。将探头镶嵌在标准圆柱管段内并在信号线方向设计与圆柱管段垂直连接的外圆面。在保证圆柱管段是标准圆柱且外圆面与圆柱管段完全垂直的前提下,通过测量探头圆柱管段外面壁点以及外圆面点拟合得到圆柱虚拟轴线以及与外圆面的交点,沿圆柱虚拟轴向管道内方向平移一个定值即可得到探头内圆心三坐标。现场数据拟合处理如图 4 所示。

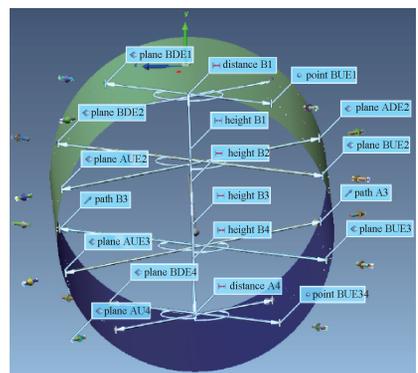


图 4 数据拟合处理

Fig. 4 Data fitting processing

在理想条件下,几何参数外测跟内测并没有区别。但由于探头圆柱段是否标准、探头外圆面是否与圆柱管段完全垂直等因素存在,需在实验室条件下验证外测方法的可行性。在实验室条件下,对 DN1000 的单人插入式四声道超声测流装置进行外测与内测几何参数对比试验。几何参数的内测和外测数据如表 2 所示。

表2 内测和外测几何参数对比

Table 2 Comparison of internal and external geometric parameters

外测外半径	壁厚	推算内半径	内测内半径	差值	相对差值
509.464 mm	9.6 mm	499.864 mm	500.339 mm	-0.475 mm	-0.09%
声道编号		A1	A2	A3	A4
声道长度	外测/mm	798.87	1 328.26	1 327.80	797.80
	内测/mm	798.57	1 327.75	1 327.33	797.07
	差值/mm	0.30	0.51	0.47	0.73
	相对差值/%	0.04	0.04	0.04	0.09
	均值/mm	798.72	1 328.01	1 327.57	797.44
声道角度/(°)	外测	45.03	44.94	44.94	45.17
	内测	44.90	44.84	44.85	45.06
	差值	0.13	0.10	0.09	0.11
	均值	44.97	44.89	44.90	45.12
	声道高度	外测/mm	405.06	154.44	155.62
内测/mm		404.96	154.83	155.79	404.89
差值/mm		0.10	-0.39	-0.17	-0.13
均值/mm		405.01	154.64	155.71	404.83
相对高度		0.809 5	0.309 1	0.311 2	0.809 1

由上述试验结果可知,内半径相对偏差为0.09%,声道长度相对偏差最大值为0.09%,声道角度相对偏差最大值为0.13°,声道高度绝对偏差最大值为0.39 mm。以上试验验证,从外测几何参数推算实际几何参数的设计和方案是完全可行的。

4 关节臂几何参数精确测量数据分析

4.1 几何参数数据分析

划线定位方式只是理论定位,输入测流装置的几何参数需精测计算以保障准确性。现以南水北调中线工程的3个试点(案例1、2和3)分水口的插入式四声道超声测流装置(DN1200)实测几何参数进行数据分析。实测

几何参数分别如表3~5所示。

从上述数据可以得出,每个试点2次测量的声道长度差值的最大值为-0.2 mm,声道角度差值的最大值为0.05°,声道高度差值的最大值为1.77 mm。说明两次测量的重复性比较好,没有出现测量粗大误差。将实测数据与划线定位理论数值比较,其存在明显差异。因此,输入超声测流量装置的几何参数必须是探头安装完成后的精测数据。

4.2 权重系数的修正

超声探头安装后,声道高度通常与设计值存在一定的差异,应根据实测的声道高度修正相应的权重系数。圆形管道通常采用高斯-雅克比积分法(Gauss-Jacobi, G-J)和圆形优化积分法(OWICS)修正权重系数计算流量。

表3 几何参数-案例1

Table 3 Geometric parameters-case 1

声道编号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	
声道长度	测 1/mm	1 016.8	1 623.1	1 624.6	1 033.3	1 037.8	1 631.4	1 624.7	1 010.7
	测 2/mm	1 017.0	1 623.2	1 624.8	1 033.4	1 038.0	1 631.5	1 624.6	1 010.9
	差值/mm	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	0.1	-0.2
	相对差值/%	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	0.01	-0.02
	均值/mm	1 016.9	1 623.2	1 624.7	1 033.4	1 037.9	1 631.5	1 624.7	1 010.8
声道角度/(°)	测 1	44.82	44.78	45.25	45.03	45.39	45.11	44.84	44.06
	测 2	44.84	44.77	45.24	45.03	45.39	45.12	44.83	44.05
	差值	-0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.01	0.01
	均值	44.83	44.78	45.25	45.03	45.39	45.12	44.84	44.06
	声道高度	测 1/mm	487.72	195.22	-178.25	-482.38	479.17	177.03	-191.52
测 2/mm		487.68	195.21	-178.29	-482.36	479.03	177.04	-191.75	-491.49
差值/mm		0.04	0.01	0.04	-0.02	0.14	-0.01	0.23	-0.07
均值/mm		487.70	195.22	-178.27	-482.37	479.10	177.04	-191.64	-491.53
相对高度		0.815 5	0.326 4	-0.298 1	-0.806 6	0.801 2	0.296 0	-0.320 5	-0.821 9

表 4 几何参数-案例 2
Table 4 Geometric parameters- case 2

声道编号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	
声道长度	测 1/mm	1 021.2	1 625.0	1 628.4	1 022.6	1 027.5	1 623.2	1 623.7	1 024.5
	测 2/mm	1 021.3	1 625.1	1 628.5	1 022.6	1 027.5	1 623.2	1 623.8	1 024.5
	差值/mm	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0
	相对差值/%	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00
	均值/mm	1 021.3	1 625.1	1 628.5	1 022.6	1 027.5	1 623.2	1 623.8	1 024.5
声道角度/(°)	测 1	44.50	44.70	44.69	44.54	44.99	44.91	44.99	44.83
	测 2	44.50	44.67	44.68	44.50	45.01	44.94	45.00	44.88
	差值	0.00	0.03	0.01	0.04	-0.02	-0.03	-0.01	-0.05
	均值	44.50	44.69	44.69	44.52	45.00	44.93	45.00	44.86
声道高度	测 1/mm	487.17	188.12	-184.56	-485.05	483.30	183.83	-183.64	-484.71
	测 2/mm	486.22	187.49	-185.21	-485.44	482.76	183.11	-184.13	-485.24
	差值/mm	0.95	0.63	0.65	0.39	0.54	0.72	0.49	0.53
	均值/mm	486.70	187.81	-184.89	-485.25	483.03	183.47	-183.89	-484.98
	相对高度	0.814 0	0.314 1	-0.309 2	-0.811 6	0.807 9	0.306 9	-0.307 6	-0.811 2

表 5 几何参数-案例 3
Table 5 Geometric parameters- case 3

声道编号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	
声道长度	测 1/mm	1 028.8	1 637.8	1 636.5	1 020.0	1 026.0	1 640.2	1 639.3	1 023.4
	测 2/mm	1 028.9	1 638.0	1 636.6	1 019.9	1 026.1	1 640.3	1 639.3	1 023.4
	差值/mm	-0.1	-0.2	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0
	相对差值/%	-0.01	-0.02	-0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00
	均值/mm	1 028.9	1 637.9	1 636.6	1 020.0	1 026.1	1 640.3	1 639.3	1 023.4
声道角度/(°)	测 1	44.84	45.29	45.22	44.73	45.21	45.30	45.41	44.80
	测 2	44.86	45.32	45.24	44.76	45.19	45.27	45.40	44.78
	差值	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03	0.02	0.03	0.01	0.02
	均值	44.85	45.31	45.23	44.75	45.20	45.29	45.41	44.79
声道高度	测 1/mm	485.64	191.66	-179.87	-473.82	485.45	191.62	-178.00	-471.67
	测 2/mm	483.92	189.89	-181.58	-475.48	483.78	189.98	-179.64	-473.41
	差值/mm	1.72	1.77	1.71	1.66	1.67	1.64	1.64	1.74
	均值/mm	484.78	190.78	-180.73	-474.65	484.62	190.80	-178.82	-472.54
	相对高度	0.802 2	0.315 7	-0.299 1	-0.785 4	0.801 9	0.315 7	-0.295 9	-0.782 0

对于典型的交叉四声道配置,其权重系数修正公式为:

$$\omega_i = \left(-g_2(\kappa) \sum_{k=1, k \neq i}^4 t_k - g_1(\kappa) \prod_{k=1, k \neq i}^4 t_k \right) / \left((1 - t_i^2)^\kappa \prod_{k=1, k \neq i}^4 (t_i - t_k) \right) \quad (9)$$

式中: t_i 表示实际相对声道高度。采用 G-J 修正权重系

数时, $\kappa = 0.5, g_1(\kappa) = 1.570 796, g_2(\kappa) = 0.392 669$ 。采用 OWICS 修正权重系数时, $\kappa = 0.6, g_1(\kappa) = 1.513 365, g_2(\kappa) = 0.360 325$ 。未修正的标准权重系数和修正后的权重系数如表 6~8 所示。

表 6 权重系数-案例 1
Table 6 Weight coefficient-case 1

声道编号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
预期相对声道高度	0.809 0	0.309 0	-0.309 0	-0.809 0	0.809 0	0.309 0	-0.309 0	-0.809 0
实际相对声道高度	0.815 5	0.326 4	-0.298 1	-0.806 6	0.801 2	0.296 0	-0.320 5	-0.821 9
差值	0.006 5	0.017 4	0.010 9	0.002 4	-0.007 8	-0.013 0	-0.011 5	-0.012 9
W_i (默认)	0.217 1	0.568 3	0.568 3	0.217 1	0.217 1	0.568 3	0.568 3	0.217 1
W_i (G-J)	0.206 4	0.561 9	0.581 4	0.221 2	0.228 2	0.567 2	0.571 3	0.204 0
W_i (OWICS)	0.204 1	0.562 7	0.582 6	0.218 6	0.225 3	0.569 3	0.570 9	0.202 8

表 7 权重系数-案例 2
Table 7 Weight coefficient-case 2

声道编号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
预期相对声道高度	0.809 0	0.309 0	-0.309 0	-0.809 0	0.809 0	0.309 0	-0.309 0	-0.809 0
实际相对声道高度	0.814 0	0.314 1	-0.309 2	-0.811 6	0.807 9	0.306 9	-0.307 6	-0.811 2
差值	0.005 0	0.005 1	-0.000 2	-0.002 6	-0.001 1	-0.002 1	0.001 4	-0.002 2
W_i (默认)	0.217 1	0.568 3	0.568 3	0.217 1	0.217 1	0.568 3	0.568 3	0.217 1
W_i (G-J)	0.211 4	0.571 4	0.573 3	0.214 7	0.219 4	0.565 2	0.569 8	0.216 3
W_i (OWICS)	0.209 3	0.572 2	0.574 3	0.212 4	0.217 0	0.566 4	0.570 4	0.214 3

表 8 权重系数-案例 3
Table 8 Weight coefficient-case 3

声道编号	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
预期相对声道高度	0.809 0	0.309 0	-0.309 0	-0.809 0	0.809 0	0.309 0	-0.309 0	-0.809 0
实际相对声道高度	0.802 2	0.315 7	-0.299 1	-0.785 4	0.801 9	0.315 7	-0.295 9	-0.782 0
差值	-0.006 8	0.006 7	0.009 9	0.023 6	-0.007 1	0.006 7	0.013 1	0.027 0
W_i (默认)	0.217 0	0.568 3	0.568 3	0.217 0	0.217 0	0.568 3	0.568 3	0.217 0
W_i (G-J)	0.217 9	0.562 1	0.552 4	0.238 2	0.218 2	0.560 9	0.548 9	0.242 6
W_i (OWICS)	0.204 1	0.562 7	0.582 6	0.218 6	0.225 3	0.569 3	0.570 9	0.202 8

OWICS 修正权重系数考虑了边壁附近的零流速,系统偏差略小,对于充分发展的流动具有一定优势。分别使用未修正的标准权重系数以及上述 G-J 和 OWICS 修

正权重系数对实际测点数据求平均以分析几何参数精测对实际平均流速的影响。其平均流速差异如表 9~11 所示。

表 9 平均流速差异-案例 1

Table 9 Difference in average flow velocity-case 1

平均流速	$1-W_i$ (默认)/($m \cdot s^{-1}$)	$2-W_i$ (G-J)/($m \cdot s^{-1}$)	$3-W_i$ (OWICS)/($m \cdot s^{-1}$)	1-3 相对偏差/%	2-3 相对偏差/%
测点 1	0.167 365	0.167 483	0.167 264	0.06	0.13
测点 2	0.206 149	0.206 274	0.206 002	0.07	0.13
测点 3	0.242 546	0.242 645	0.242 304	0.10	0.14
测点 4	0.284 212	0.284 192	0.283 774	0.15	0.15
测点 5	0.321 405	0.321 356	0.320 873	0.17	0.15

表 10 平均流速差异-案例 2

Table 10 Difference in average flow velocity-case 2

平均流速	$1-W_i$ (默认)/($m \cdot s^{-1}$)	$2-W_i$ (G-J)/($m \cdot s^{-1}$)	$3-W_i$ (OWICS)/($m \cdot s^{-1}$)	1-3 相对偏差/%	2-3 相对偏差/%
测点 1	0.077 538	0.077 584	0.077 521	0.02	0.08
测点 2	0.169 084	0.169 172	0.169 009	0.04	0.10
测点 3	0.244 837	0.244 958	0.244 707	0.05	0.10
测点 4	0.343 976	0.344 138	0.343 768	0.06	0.11
测点 5	0.474 976	0.475 195	0.474 672	0.06	0.11
测点 6	0.615 287	0.615 580	0.614 891	0.06	0.11
测点 7	0.770 575	0.770 943	0.770 085	0.06	0.11

表 11 平均流速差异-案例 3

Table 10 Difference in average flow velocity-case 3

平均流速	$1-W_i$ (默认)/($m \cdot s^{-1}$)	$2-W_i$ (G-J)/($m \cdot s^{-1}$)	$3-W_i$ (OWICS)/($m \cdot s^{-1}$)	1-3 相对偏差/%	2-3 相对偏差/%
测点 1	1.272 420	1.269 355	1.266 995	0.43	0.19
测点 2	0.902 681	0.900 433	0.898 775	0.43	0.18
测点 3	0.610 819	0.609 219	0.608 110	0.45	0.18
测点 4	0.426 289	0.425 123	0.424 367	0.45	0.18
测点 5	0.114 054	0.113 551	0.113 394	0.58	0.14
测点 6	1.272 420	1.269 355	1.266 995	0.43	0.19
测点 7	0.902 681	0.900 433	0.898 775	0.43	0.18

从上述试点数据可知,经 OWICS 修正后得到的平均流速与划线定位默认权重得到的平均流速最大相对偏差

为 0.58%,最小相对偏差为 0.02%。OWICS 修正得到的平均流速与 G-J 修正得到的平均流速最大相对偏差为

0.19%, 最小相对偏差为 0.08%。权重系数对超声测流装置测量准确度的影响已不可忽略。因此, 为确保超声测流装置的测量准确度, 探头安装后, 必须精测几何参数并分析修正权重系数。以平均流速点为横坐标, 分别以 3 个试点 OWICS 修正平均流速为参考值分析得到的相对误差为纵坐标得到的分析如图 5 所示。

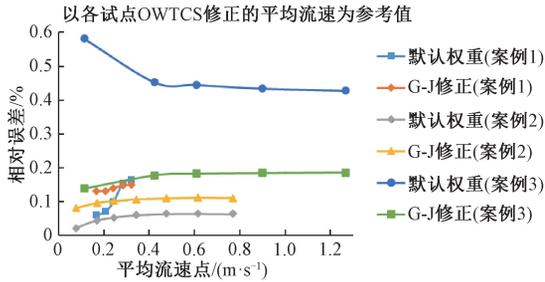


图 5 平均流速差异

Fig. 5 Difference in average flow velocity

5 结 论

现场试验表明, 通过对超声测流装置探头的特殊设计, 采用关节臂通过外测探头三坐标数据实现了几何参数的精确测量, 得到了探头几何参数的精确量值以及修正权重系数, 确保了超声测流装置的测量准确度, 是现场几何参数精确测量的较好方法。

参考文献

- [1] 胡鹤鸣, 王池, 孟涛, 等. 超声流量计几何参数测算方法及其不确定度分析[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(7): 1583-1587.
HU H M, WANG CH, MENG T, et al. Study on geometric parameter calculation method and uncertainty estimation of ultrasonic flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(7): 1583-1587.
- [2] 李冬, 耿介, 杜广生, 等. 稳态背景流场下超声波流量计内瞬态声场分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1802-1808.
LI D, GENG J, DU G SH, et al. Transient analysis of acoustic characteristic in ultrasonic flowmeter under stationary background flow[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1802-1808.
- [3] 田雷, 徐科军, 沈子文, 等. 基于气体超声波流量计的间歇激励和信号处理[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1774-1781.
TIAN L, XU K J, SHEN Z W, et al. Intermittent excitation and signal processing based on ultrasonic gas flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1774-1781.
- [4] 田雷, 徐科军, 沈子文, 等. 基于回波峰值拟合的气体超声流量计信号处理[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1107-1114.
TIAN L, XU K J, SHEN Z W, et al. Signal processing for ultrasonic gas flowmeter based on peak fitting of echo[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7): 1107-1114.
- [5] 刘敦利, 蔡勤. 管道对超声波流量计计量准确度的影响分析[J]. 中国测试, 2014, 40(4): 42-44.
LIU D L, CAI Q. Analyses of pipe affection on measurement accuracy of ultrasonic flowmeter[J]. China Measurement & Test, 2014, 40(4): 42-44.
- [6] 胡鹤鸣, 王池, 孟涛. 多声路超声流量计积分方法及其准确度分析[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(6): 1218-1223.
HU H M, WANG CH, MENG T. Integration method of multi-chord ultrasonic flowmeter and its accuracy analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(6): 1218-1223.
- [7] 杨理践, 张晓丹, 高松巍, 等. 超声波在管道防腐层剥离内检测中的传播特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(1): 9-18.
YANG L J, ZHANG X D, GAO S W, et al. Research on the propagation characteristics of ultrasonic wave in the detection of pipeline coating[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(1): 9-18.
- [8] 王芳芳, 曾云, 张振凯, 等. 大管径超声波测流误差的影响因素及修正分析[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 146-153.
WANG F F, ZENG Y, ZHANG ZH K, et al. Influencing factors and correction analysis of large diameter ultrasonic flow measurement error[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 146-153.
- [9] 雷艳, 刘礼华. 基于正交多项式的超声波测流多声道坐标求解方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(3): 298-301.
LEI Y, LIU L H. Methods for solving multipath distribution coordinates for ultrasonic flow measurement based on orthogonal polynomials[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(3): 298-301.
- [10] 李冬, 孙建亭, 杜广生, 等. 结构参数对超声波流量计水流特性影响的研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 945-951.
LI D, SUN J T, DU G SH, et al. Study on the flow characteristics of ultrasonic flowmeter with different structure parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 945-951.
- [11] 夏金东, 黄海宁, 张春华. 超声波流量计换能器系统理

- 论分析及应用[J].声学技术, 2018, 37(2): 129-135.
- XIA J D, HUANG H N, ZHANG CH H. Theoretical analysis and application of the transducer system of ultrasonic flowmeter [J]. Technical Acoustics, 2018, 37(2): 129-135.
- [12] 刘增华, 李佳奇, 张易农, 等. 小口径多声道超声流量计的非实流式校准技术[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(11): 1369-1375.
- LIU Z H, LI J Q, ZHANG Y N, et al. Non-real flow calibration technology for multi-path ultrasonic flowmeter with a small diameter[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(11): 1369-1375.
- [13] 冯旭刚, 朱嘉齐, 章家岩. 关节臂式坐标测量机的数学建模及参数标定[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 190-197.
- FENG X G, ZHU J Q, ZHANG J Y. Mathematical model and parameter calibration of articulated arm coordinate measuring machine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 190-197.
- [14] 林苍现, 林哲民, 陈刚, 等. 多关节测量臂的小生境混沌优化校准[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 2048-2056.
- LIN C X, LIN ZH M, CHEN G, et al. Calibration method of PCMA by using niching chaos optimization algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 2048-2056.
- [15] 张志刚, 李星, 李松, 等. 关节臂式三维测量对复杂铸件验收的应用[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(6): 818-822.
- ZHANG ZH G, LI X, LI S, et al. AACMM equipment measure about large and complex casting scribing of aerospace industry [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(6): 818-822.
- [16] 张亮, 孟涛, 王池, 等. 斜插式超声流量计探头插入深度影响实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(10): 2307-2314.
- ZHANG L, MENG T, WANG CH, et al. Probe installation effects on the accuracy of feed thru ultrasonic flowmeters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(10): 2307-2314.
- [17] 郑丹丹, 赵丹, 张朋勇. 超声流量测量中换能器对流场扰动机理研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(4): 18-24.
- ZHENG D D, ZHAO D, ZHANG P Y. Study on mechanism of flow disturbance caused by acoustic transducers in flow measurement [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 18-24.
- [18] 胡岳, 张涛, 郑丹丹, 等. 超声流量计探头安装入侵长度对测量影响的估算[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(9): 776-783.
- HU Y, ZHANG T, ZHENG D D, et al. Estimation on influence of probe protrusion length of ultrasonic flowmeter on measurement [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013, 46(9): 776-783.
- [19] 张朋勇, 郑丹丹, 徐天室, 等. 超声流量计探头对流场及其测量性能影响研究[J]. 实验流体力学, 2011, 25(3): 60-65.
- ZHANG P Y, ZHENG D D, XU T SH, et al. Study on the influence of ultrasonic probes on flow field and measurement performance of ultrasonic flowmeter [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2011, 25(3): 60-65.
- [20] 郑丹丹, 张朋勇, 徐天室. 超声流量计探头安装位置对测量影响数值仿真研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 13-18.
- ZHENG D D, ZHANG P Y, XU T SH. Effect of installation position of ultrasonic flowmeter probe on flow measurement [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 13-18.
- [21] 胡鹤鸣, 孟涛, 王池. 扰流流场对超声流量计积分误差的影响分析[J]. 计量学报, 2011, 32(3): 198-202.
- HU H M, MENG T, WANG CH. Theoretical analysis of integration error of ultrasonic flowmeter in the disturbed flow condition [J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, 32(3): 198-202.

作者简介



吴宇, 2008年于桂林电子科技大学获得硕士学位, 现为广西壮族自治区计量检测研究院高级工程师, 主要研究方向为流量计量。

E-mail: 35280797@qq.com

Wu Yu received his M. Sc. degree from Guilin University of Electronic Technology in 2008. Now he is a senior engineer in Guangxi Research Institute of Metrology & Test. His main research interest includes flow-rate measurement.



胡鹤鸣(通信作者), 2008年于清华大学获博士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 主要研究方向为流量计量。

E-mail: huhm@nim.ac.cn

Hu Heming (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 2008. Now he is an associate researcher in National Institute of Metrology. His main research interest includes flow-rate measurement.