

超声波流量计实验测试方法简析

王贤妮

江西三川水表股份有限公司 335000

摘要: 基于对超声波流量计功耗、信号发射接收、性能的测试,详细介绍了利用滑动平均滤波算法和改进的一阶滞后滤波算法对时差数据进行滤波的数据对比,并详细说明了流量补偿的方法,并对流量修正前后的示值误差数据进行了对比,得出结果表明所设计的超声波流量计流量传感器达到二级精度的要求。

关键词: 水表;超声波流量计;实验;测试方法

1 实验设备及静态测试

1.1 实验设备

本文设计的超声波流量计的口径为 80mm,采用中心频率为 1MHZ 的超声波换能器, Pt1000 的铂电阻温度传感器。再将 IAR 编写好的 C 程序代码生成二进制代码,然后用编程器通过 MSP430F417 的 JTAG/BSL 端口将代码下载到单片机中去,接下来就可以对超声波流量计进行相关测试了。图1 超声波流量计等,图2 为用到的静态测试工具等,图3 为超声波流量计测试用的校表装置。

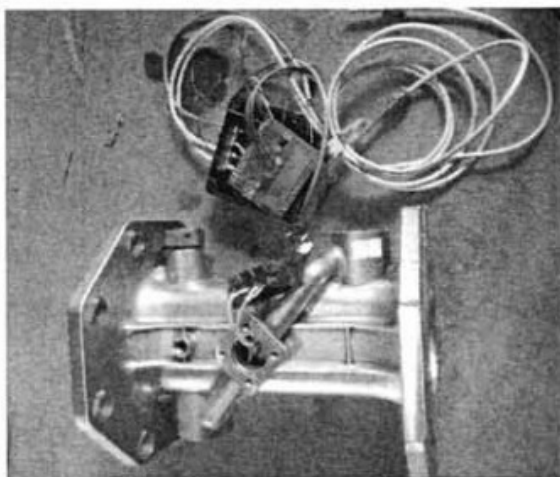


图 1 超声波流量计实物图图



2 超声波流量计静态测试工具

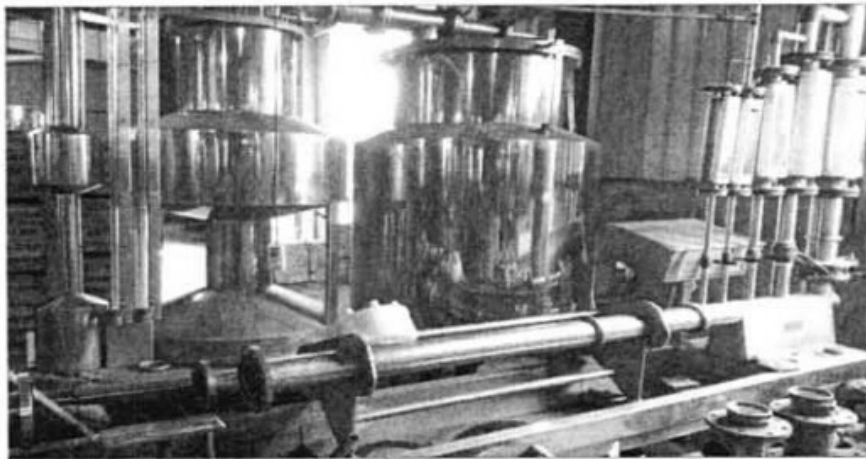


图3 超声波流量计校验装置

1.2 静态测试

静态测试包括超声波流量计功耗的测试和超声波在静水中发射和接收的波形信号检测。超声波流量计有两种工作模式，一种是用户模式，另一种是检定模式，检定模式下流量和温度的采样频率比用户模式快，是用于研发阶段测试和生产阶段检测的。功耗检测的方法如下：

(1) 稳压电源电压调到 3.6V，万用表调到直流 200mA 电流档；

(2) 稳压源正极接万用表正极，万用表负极接模块正极，模块负极接稳压源负极；

(3) 接好线，模块会放电一次，放完电后，万用表显示电流接近为 0 时，调到 200 μ A 档，记录此时的稳定电流和跳变电流；

(4) 万用表调回 200mA 档，模块进入检定模式，万用表再调回到 200 μ A 档，记录下此时的稳定电流和跳变电流。

功耗的要求：用户模式下功耗不得超过 45 μ A，否则视为不合格；检定模式下功耗不得超过 250 μ A，否则视为不合格。

静水状态下超声波发射和接收信号的检测方法如下：

(1) 将超声波流量计浸入水中，水要足够多以保证整个管道充满水，再前后晃动一下，确保换能器完全浸没在水中并无气泡；

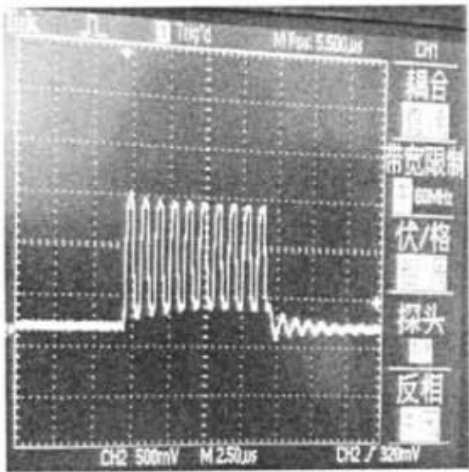
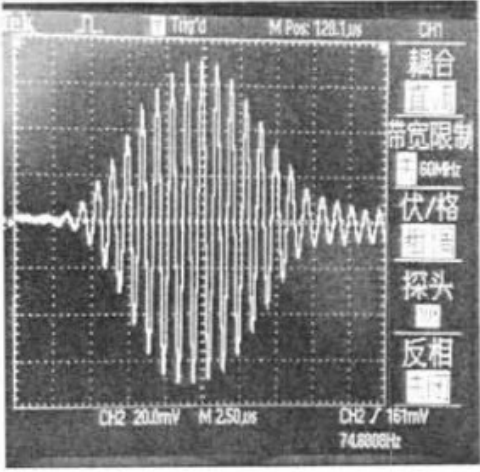
(2) 示波器的 CH1 正极接模块的上游换能器的正极，CH2 正极接模块的下游换能器的正极，负极与换能器负极相连；

(3) 找到发射和接收波后，将示波器接收波所在线路（CH1 或 CH2）电压档调到 10mV 档，时间档调到 500ns 档，记录下接收波的前三个波的幅值。

超声波信号的要求：发射的超声波信号的驱动电压要大于 1.5V，接收的超声波信号的峰峰值电压要大于 120mv，接收的第二个波幅值要大于 10mv。

测试的静态数据如表 1 所示。本设计选用一节 3.6V, 3500mAh 的锂亚电
池为超声波流量计供电。由测试数据知, 在用户模式下超声波流量计可工作
 $3500mAh / 40.9\mu A / 24h / 365\text{天} \approx 9.7\text{年}$, 超过了国家标准 CJ128—2007 中关于热
量表内置电池的使用寿命应大于 6 年的规定。由于研制的流量计和电池是整
体式不可拆卸的, 一般说的流量计的使用寿命就是指电池的使用寿命, 因而可
以得出超声波流量计的使用寿命超过 6 年。

表 1 DN80 超声波流量计静态测试数据

功耗 测试	用户模式	检定模式			
	22.3~40.9uA	42.7~97.4uA			
超声 波收 发波 信号 检测					
	(a) 发射的超声波信号		(b) 接收的超声波信号		
	发波驱动电压	回波峰峰值电压	回波第一个波	回波第二个波	回波第三个波
	1.74V	232mv	4.4mv	13.2mv	28.8mv

2 超声波流量计流量性能测试

● 测试的流量点

功耗测试和信号检测符合要求后,就可以上机进行流量测试了。本文流量测试用的校验装置如图3中所示,该转子流量计可以测量直径为80mm和100mm两种口径的超声波流量计,可测流量量程范围为0~125m³/h。量程最大测量误差为0.2%。

表2 DN80 超声波流量计检测的流量点

公称直径	常用流量 Q_p	检测的流量点的要求	检测的流量点	流量
80mm	40m ³ /h	$Q_{\min} \leq Q \leq 1.1Q_{\min}$	0.02 Q_p	800L/h
	最小流量 Q_{\min}	$0.1Q_p \leq Q \leq 0.11Q_p$	0.1 Q_p	4000L/h
	0.8m ³ /h	$0.3Q_p \leq Q \leq 0.33Q_p$	0.3 Q_p	12000L/h
	最大流量 Q_{\max}	$0.9Q_p \leq Q \leq 1.0Q_p$	1.0 Q_p	40000L/h
	80m ³ /h	$0.9Q_{\max} \leq Q \leq 1.0Q_{\max}$	2.0 Q_p	80000L/h

根据 CJ128-2007 协议关于流量传感器流量检测点的要求^[1],本文 DN80 口径超声波流量计测试的流量点如表2中最右一列所示,为了使超声波流量计流量测量的量程更大,在流量检测时会检测比最小流量还小的流量点比如 250L/h 和 400L/h。

● 流量点流量性能表示方法及精度要求

在对以上各个流量点进行流量性能测试时,要记录下流量校验装置上的标定体积值和超声波流量计流量传感器实测的体积值,并计算各个流量点的示值误差 E_i 。

某流量点的示值误差 E_i 表示如下:

$$E_i = \frac{V_{di} - V_{ci}}{V_{ci}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

E_i ——某流量点第 i 次测量的示值误差;

V_{ci} ——某流量点第 i 次测量流量校验装置上的标定体积值;

V_{di} ——某流量点第 i 次测量流量流量传感器实测的体积值;

为了对研制的超声波流量计的稳定性和重复性进行测试,就要对所测的每个流量点进行多次测量,得到各个流量点的重复性。流量点的重复性误差是指该流量点在多次测量中的示值误差最大值减去示值误差最小值。某流量点的重复性误差 E_r 如 2 式所示。

$$E_r = E_{i\max} - E_{i\min} \quad (2)$$

式中:

E_r ——超声波流量计在某流量点的重复性误差;

$E_{i,max}$ ——某流量点 i 次测量中示值误差的最大值;

$E_{i,min}$ ——某流量点 i 次测量中示值误差的最小值;

在超声波流量计完成流量修正后,对测量的各个流量点,除了计算各个流量点的示值误差 E_i 和重复性误差 E_r 外,还要计算流量传感器的准确度 E_q ,流量传感器的准确度 E_q 的计算公式如下^[2]:

$$\text{一级表} \quad E_q = \pm(1 + 0.01 \frac{Q_p}{q})\% \quad (3)$$

$$\text{二级表} \quad E_q = \pm(2 + 0.02 \frac{Q_p}{q})\% \quad (4)$$

$$\text{三级表} \quad E_q = \pm(3 + 0.05 \frac{Q_p}{q})\% \quad (5)$$

式中:

Q_p ——超声波流量计的常用流量;

q ——使用范围内的流量;

一级表的流量传感器误差限最大不应大于 3.5%,二级表和三级表的流量传感器误差限最大不应大于 5%。

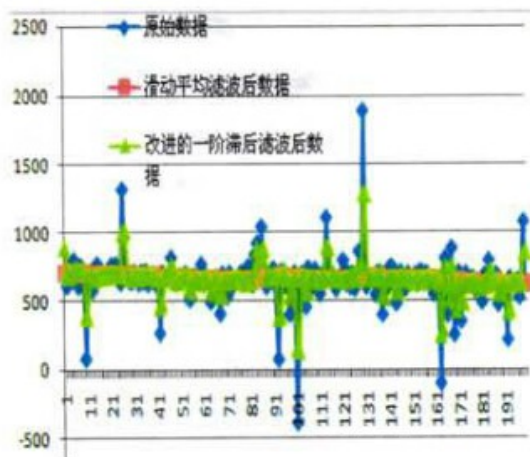
本文研制的 DN80 大口径超声波流量计要达到的目标精度如表 3 所示。

表3 DN80 的超声波流量计达到的目标精度

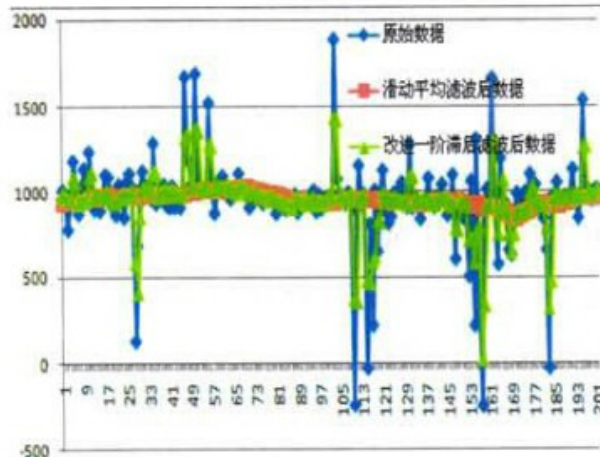
口径	目标流量传感器准确度	目标重复性精度
DN80	二级表	在小流量 1500L/h 以下的流量点的重复性误差在 2%以内; 大于 1500L/h 以上的流量点的重复性误差在 1%以内

● 时间差数据的提取及滤波处理

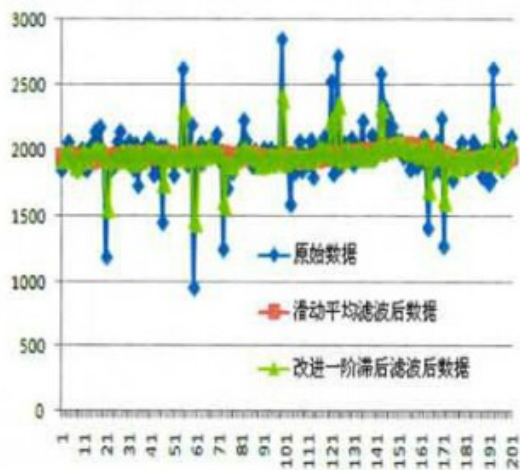
本文利用 TDC_UTA6902 测量超声波在上下游换能器之间传播的时间，再通过时差法原理换算成流量。通过软件程序控制 TDC_UTA6902 完成一次流量测量，就得到一个时差数据，测量流程如本文 1 所述，再将这个时差数据通过串口通信结合串口终端输出到电脑上并保存，其中包括没有经过任何滤波处理的原始数据和经过滑动平均滤波和改进的一阶滞后滤波算法后的数据。经过大量测试发现：本文研制的 DN80 超声波流量计在大流量时稳定性和重复性都很好，只有小流量时数据波动大，干扰多，所以主要测量小流量的时差数据。



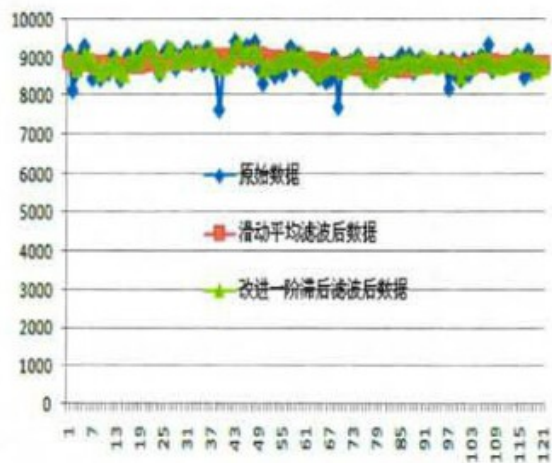
(a) 250L/h 的时差数据



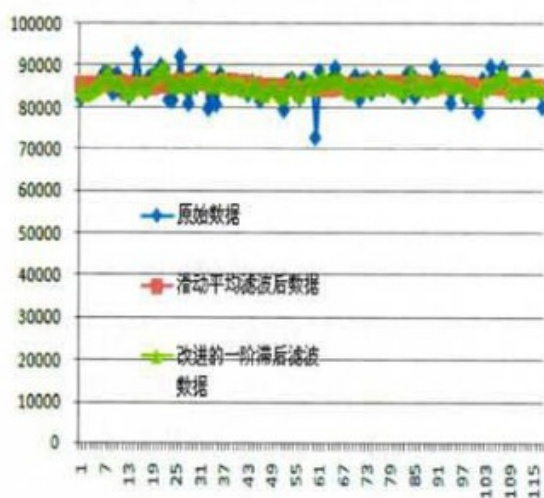
(b) 400L/h 的时差数据



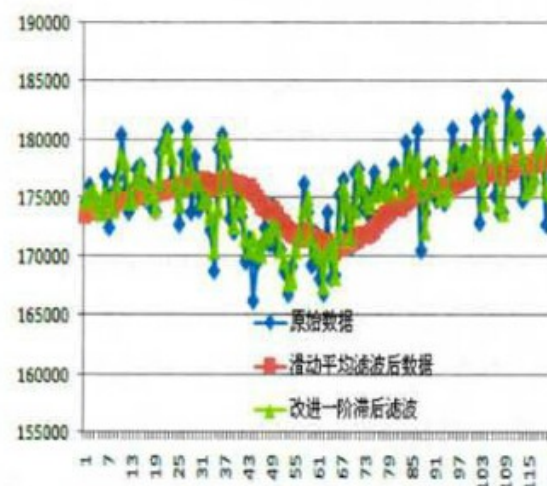
(c) 800L/h 的时差数据



(d) 4000L/h 的时差数据



(e) 40000L/h 的时差数据



(f) 80000L/h 的时差数据

图 4 各流量点的时差数据

将本文所述的滑动平均滤波算法和改进的一阶滞后滤波算法加入到程序中去，对采集的原始时差数据进行滤波处理，滤波处理的数据也是经过串口输出到电脑上并保存的，滤波处理后的数据如图4中所示，纵坐标是时差数据，横坐标是测得的时差数据的个数。超声波在上下游之间传播的时间是由 UTA6902 测量获得，并保存在 TDC 的结果寄存器中，UTA6902 的结果寄存器是 32 位的，由 16 位整数位和 16 位小数位组成。图 4 中的时差数据是由 UTA6902 测得的超声波正程与回程传播时间相减而得来的，时差数据换算成时间的方法如下，例如 250L/h 时得到的一个时差数据 256 表示的时间为： $256/65536/4\mu\text{s}=2.49\text{ns}$ 。

从滤波处理的结果数据可以看出改进的一阶滞后滤波对小流量的时差数据具有很好的滤波结果，而对大流量的时差数据容易造成误判，因为大流量变化

的幅度大，滑动平均滤波算法对大流量的时差数据有很好的滤波效果，而对小流量时差数据滤波效果不明显。

从4图的时差数据滤波数据图不能明显的体现这两种滤波算法的好坏，并且超声波流量计的重复性误差也体现不出，下面用各个流量点的体积值来说明两种滤波算法的优良。数据如表4和5所示。

表4 滑动平均滤波后的流量数据

标定流量/(L·h ⁻¹)	标定体积/L	实测体积/L	示值误差 E _i /%	重复性误差 E _r /%
400	20.04	21.45	7.04	2.01
	20.02	21.09	5.34	
	20.14	21.62	7.35	
800	20.12	21.04	4.57	1.55
	20.16	20.88	3.57	
	20.5	21.12	3.02	
4000	104.2	106.29	2.01	0.85
	102	103.18	1.16	
	103	104.9	1.81	
40000	975.1	976.35	0.13	0.53
	973.5	974.66	0.12	
	1012	1018.62	0.65	

表5 改进的一阶滞后滤波后的流量数据

标定流量/(L·h ⁻¹)	标定体积/L	实测体积/L	示值误差 E _i /%	重复性误差 E _r /%
400	20.04	24.82	23.85	1.35
	20.06	24.57	22.48	
	20.04	24.55	22.5	
800	19.98	23.93	19.77	0.18
	20	23.97	19.85	
	20	23.99	19.95	
4000	151	171.1	13.29	0.42
	150.9	171.6	13.71	
	154.4	175.4	13.58	
40000	1020	1088	6.62	0.39
	1007	1073	6.55	
	1028	1092	6.23	

经过大量的测试发现：滑动平均滤波算法对1500L/h以上的流量有比较好的滤波效果，重复性误差都能达到目标要求，改进的一阶滞后滤波算法对1500L/h以下的流量有很好的滤波效果。

● 流量修正

流量修正前要对 DN80 超声波流量计使用范围内的流量点进行测试, 本文共测了 21 个流量点, 再按照公式 1 计算出各个流量点示值误差, 描绘出流量误差曲线如图 5 所示。

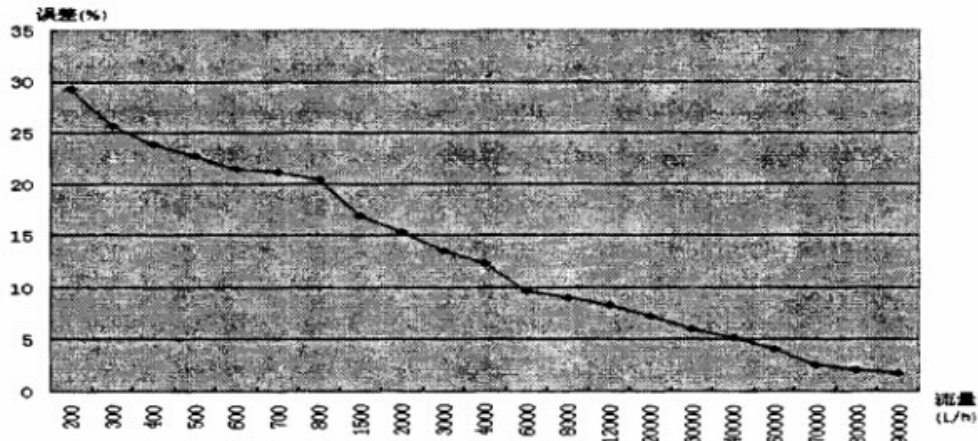


图 5 各流量点的示值误差曲线

将示值误差曲线分成 4 段共取 256 个点, 再将各个点的示值误差填入表格, 截取一部分流量误差修正的表格如表 6 所示。表格中的修正系数 K 是放大倍数后的。

表 6 DN80 部分流量修正表格及查表数组

序号	修正系数 K	序号	修正系数 K	二维数组
0	3658	8	3222	[(9000,255,255) (45000,1500,225) (6000,600,160) (1500,75,100) (0,15,0)]
1	3604	9	3168	
2	3549	10	3114	
3	3495	11	3059	
4	3440	12	3005	
5	3386	13	2950	
6	3331	14	2896	
7	3277	15	2841	

TDC 测完流量, 经过滤波程序得到时差数据, 根据此时差数据计算出流量, 此流量是线速度计算出的流量, 要经过流量修正, 表 5 中所示的二维数组是用来查找要修正的流量点在流量修正表格中的位置的, 查表得到一个修正系数 K,

再利用公式计算出真正的流量。数组的每一行的第一个元素表示取点的截止流量，第二个元素表示在这一段取点的步长，第三个元素表示总共取的流量点的个数。

例如 190L/h 在表格中对应的位置为 $n = \frac{190}{15} = 12$ ，即修正系数 K 为修正表格中的第 12 个数 3059，再经过相关处理得到真正的修正流量的系数。

● 流量修正后的重复性和准确度

超声波流量计完成流量修正后，再对以上的流量点进行测试。选取多点测量方式，按每个流量点测三组数据作为检测用数据，选取 5 个流量点的测试数据作为实验用测量数据，其各数据值如表 7 所示。

表 7 修正后的流量数据

标定流量 (L·h ⁻¹)	标定体积/L	实测体积 /L	示值误差 Ei/%	重复性误差 Er /%	流量准确度 Eq/%
250	20	20.03	0.15	1.8	一级表 ±2.6
	20	19.89	0.55		二级表 ±3.5
	20.04	19.79	-1.25		三级表 ±5
400	20.04	20.01	0.3	1.5	一级表 ±2
	20.01	20.04	0.15		二级表 ±3.5
	20.04	19.8	-1.2		三级表 ±5
800	19.86	20.18	1.61	0.73	一级表 ±1.5
	20	20.27	1.35		二级表 ±3
	20.5	20.68	0.88		三级表 ±5
4000	153.3	153.72	0.27	0.9	一级表 ±1.1
	152.6	152.23	-0.24		二级表 ±2.2
	152	153.01	0.66		三级表 ±3.5
40000	1016	1017.32	0.13	0.25	一级表 ±1.01
	1043	1042.17	-0.08		二级表 ±2.02
	1000	1001.7	0.17		三级表 ±3.05

通过式(3)~(5) 计算出一、二、三级表在各个流量点所需流量准确度 Eq,再将三次测量的示值误差 Ei 分别与一、二、三级表 Eq 对比，通过对比可知，流量点 800L/h 三次测量的 Ei 中有超过±1.5%的，但在±3%内，符合二级表的精度要求，其余 4 个流量点的误差均在一级表范围内，所以设计的超声波流量计在二级表精度范围内。图 6、图7 所示分别是这 5 个流量点修正前和修正后的示值误差。

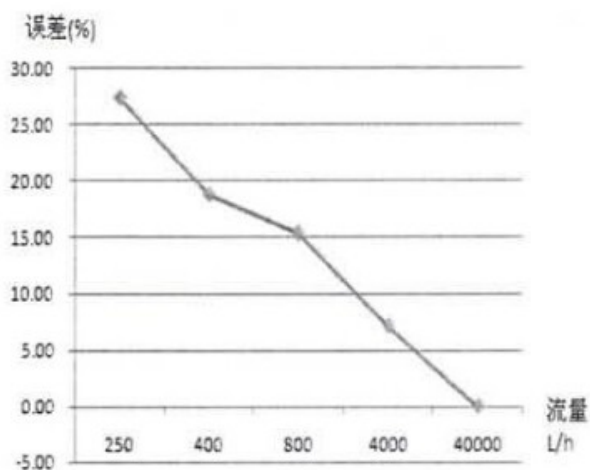


图 5 修正前的示值误差

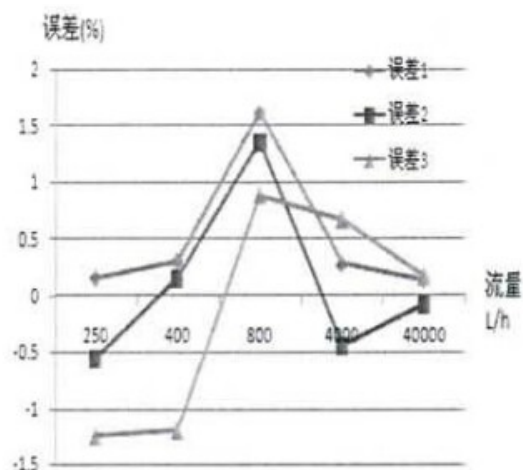


图 6 修正后的示值误差

通过对比图 5 和图 6 修正前、后的误差数据可知，加了修正算法后误差值得到真实反映，各个流量点的示值误差均在 $\pm 2\%$ 范围内，重复性误差在 2% 以内，符合设计的目标要求。

参考文献

- [1] 吕士健, 杨健, 刘巍等. 中华人民共和国城镇建设行业标准 CJ128-2007 热量表[S]. 中华人民共和国建设部, 2008
- [2] 王东伟, 邱萍. 热能表检定章程 JJG-2001[S]. 国家质量监督检验检疫总局, 2002.

