

# 一种高精度超声波热量表的设计

李世光, 贾俊征, 李凯旋, 高正中, 谭冲

(山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东, 青岛 266590)

**摘要:** 针对影响超声波热量表精度的内流场因素, 根据时差法测量原理, 设计了一种高精度热量表。在基表的进水端内腔增加一个沙漏状的喉道结构, 防止产生新的涡流和压损; 采用柱状的反射装置使其附近空间更宽阔, 避免产生射流; 在测量管段前后增加渐缩段和渐扩段的“喇叭口”以及增大长径比, 改变流体流动特性, 使其迅速平稳。经过改进后的基表, 内流场性能得到改善。实验测量结果表明, 测量精度显著提高, 达到了预期的要求, 符合行业标准 2 级表的要求。

**关键词:** 热量表; 时差法; 流喉道结构; 喇叭口; 长径比

中图分类号: TH701

文献标志码: B

文章编号: 1672-3767(2016)05-0096-06

## An Design on Ultrasonic Heat Meter with High Precision

LI Shiguang, JIA Junzheng, LI Kaixuan, GAO Zhengzhong, TAN Chong

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology,  
Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** In view of internal flow as a major influence on ultrasonic heat meter's accuracy, a new type of ultrasonic heat meter with high precision is designed based on the principle of time difference measurement. A new hourglass-shaped throat structure is added to the water inlet end cavity of the base table to deter from new eddy and pressure loss. It takes a columnar reflex attachment to widen its nearby space to avoid jet flows. It can change the flow features to make its smooth through the added bell-mouthing of the converging segment and the expanded segment back and forth on the end of measuring tube and the increased length-diameter ratio. The improvement on performance of internal flow is made through improved base table. The experimental results shows that the measurement accuracy has improved dramatically to achieve the anticipated demands and conform with the requirements of the industry-standard second level table.

**Key words:** heat meter; dfference measurement; fluid throat structure; bell-mouthing; length-diameter ratio

随着我国北方采暖地区既有居住建筑供热计量及节能改造的基本完成, 供热计量监管体制机制的完善, 居民使用热量将全面按照计价收费, 从而对热量表的要求越来越严格<sup>[1]</sup>。超声波热量表由于其高精度、低功耗以及稳定性强等特点<sup>[2]</sup>, 逐渐取代了传统易磨损、精度低以及稳定性差的机械式热量表。流体在管道内流动会产生流场, 若不考虑流场因素, 会影响超声波热量表的测量精度<sup>[3]</sup>。

针对影响现有超声波热量表测量的流场问题, 设计了一种高精度的超声波热量表。根据流体力学知识

收稿日期: 2015-12-08

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2015T80729); 青岛市博士后研究人员应用研究项目资助(2015190)

作者简介: 李世光(1962—), 男, 山东青岛人, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化、控制理论与控制工程、检测技术与自动化装置。

贾俊征(1989—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化. E-mail: jiajz1203@163.com

并结合工程实践经验,对基表结构进行优化,使测量管道内流体流动平稳,改善基表内水流的特性,提高测量精度。

### 1 超声波热量表的工作原理

超声波热量表通过采集上下游超声波换能器在流体中的超声波的信号,用顺流和逆流的时间差来测量流体流速,从而间接测出流体流量<sup>[4]</sup>。通过测量进水和回水的温度来计算得出热交换系统吸收或释放的能量<sup>[5]</sup>。

热量的计算采用欧洲流行的  $k$  系数法,热交换系统吸收或释放的能量的计算公式<sup>[6]</sup>为

$$Q = \int_0^{\tau} kq_v \Delta T d\tau \tag{1}$$

式中: $Q$ 为热交换系统吸收或释放的能量,J; $\tau$ 为累积流量的时间,h; $k$ 为热焓修正系数, $J/m^3$ ; $q_v$ 为瞬时热水流量, $m^3/h$ ; $\Delta T$ 为进回水的温度差, $^{\circ}C$ 。

### 2 超声波热量表硬件结构设计

超声波热量表硬件结构主要由微处理器 MSP430 模块、TDC-GP22 芯片模块、流量测量模块以及温度测量模块等组成,热量表硬件结构如图 1 所示。

#### 2.1 热量表基表设计

由流体力学相关专业可知,粘性流体在不同流速下存在不同状态,通常把雷诺数  $Re$  作为判别层流和湍流的准则,而且实际工程上一般取临界雷诺数  $Re = 2\ 000$ 。当  $Re \leq 2\ 000$  时,流动为层流,管内速度分布为抛物线规律,管道中心轴线上的速度最大;当  $Re > 2\ 000$  时,流动是湍流,为对数分布,速度梯度较小,圆管中心线上的速度较层流时小,在管径不变的情况下更趋近于面平均速度<sup>[7]</sup>。结合工程实践经验,基表结构设计如图 2 所示。

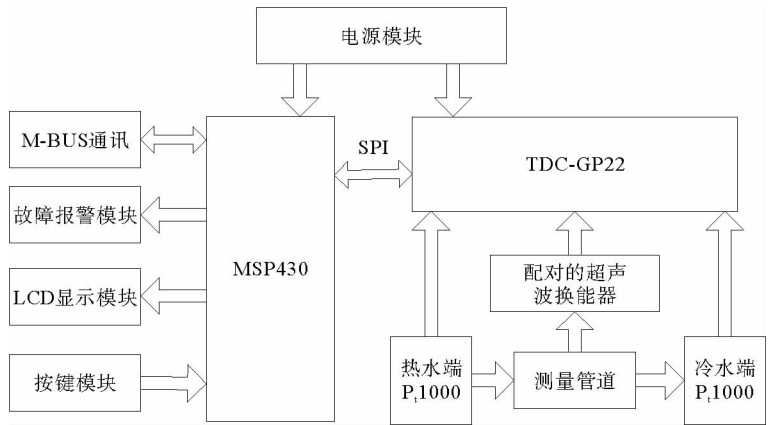
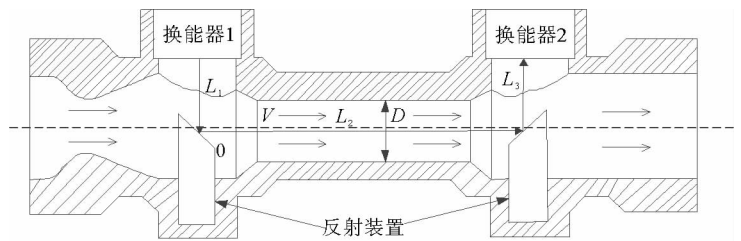


图 1 热量表硬件结构框图

Fig. 1 Hardware structure diagram of heat meter



注: $L_1, L_2, L_3$ 为超声波传播距离; $V$ 为流速; $D$ 为管道直径

图 2 基表结构示意图

Fig. 2 Diagram of base table structure

图 2 所示热量表的基表,受风洞

实验设备前端加一个喉道来获得平稳气流的启发在进水端内腔增加一圈光滑的环形突起,其内腔形状的纵截面面积呈先逐渐缩小再缓慢增大的沙漏状,进水部内腔平滑过渡到中间部内腔,即在进水端内腔上形成先沿光滑曲线收缩再缓慢扩张的喉道结构<sup>[8]</sup>。其中光滑收缩可以减少因管径横截面积减小产生的压力损失;环形突起前段的收缩段将流体的横截面缓慢减小,来流漩涡迅速衰减,加剧流体内部的能量交换,起到整流来流的作用;流体流动在收缩段时,在管道壁上不会出现分离现象,防止产生新的漩涡。环形突起的后段沿轴线方向的长度大于前段,形成的锥形部较长而平缓过渡,该锥形部的缓慢增大可防止分离漩涡的产生,进一步起到整流作用;流体流速减小,反射片装置附近的能量损失减少。在进水部内腔采用的环形突起结构,对来流起到较好的整流效果,还可以防止产生新漩涡和压力损失,提高热量表对不同来流的适应性以及测量

精度。

进出水部与中间部上的连接位置处安装有配对的超声波换能器,换能器下面是柱状结构的反射片装置,由于反射式结构是利用反射柱的发射面改变超声波信号的传播方向实现流量测量的,反射柱足够大的反射面才能保证信号的正常传播,圆形的反射面积最大且圆形的反射柱也方便加工。流体流动从柱状反射装置两侧汇入测量管道内,反射柱起到了导流的作用;反射片形状的改变使反射装置附近空间更宽阔,避免产生射流。

流体绕圆柱后在第一测量段流动混乱,需要在测量前端增加“喇叭口”(渐缩段)来进行导流。在测量段后端增加“喇叭口”(渐扩段)来进行导流,流体进入右侧的测量段。相对安置的一对反射装置均与换能器的中心轴线相对应,反射体的反射面与测量管内的水平面呈 45 度角;梯形“喇叭口”的腰与测量管道内的水平面呈 45 度角,对称的梯形“喇叭口”分别连接最小管径段,梯形“喇叭口”的高度与最小管径段的半径之间的比值为 0.9。

增大长径比可以使测量管道内流场特性改善。在测量管道长度不变的情况下,缩小管道直径即增大长径比,会影响流体流速变化以及流动特性,流体在整个测量管道内流动发展平稳。在一定程度上降低前后反射装置的扰流对测量管道内流场的影响,提高流场性能。

## 2.2 TDC-GP22 外围电路设计及电源电路

由于 TDC-GP22 芯片内部继承的功能,包括第一波自动检测功能、高精度温度检测、脉冲发生装置、模拟开关、比较器、窗口功能以及时钟标定等,仅需要外部加一个简单的单片机(无需带有任何 A/D 转换)就可以完成。TDC-GP22 芯片外围电路设计如图 3 所示。

为使整体元件的个数降到最低,在超声波回波路径当中,仅在压电陶瓷换能器上链接到一对 RC 上;在温度测量路径当中,仅有额外的一个温度稳定电阻以及放电电容;振荡器选择一个 32.768 kHz 石英晶体, FIRE\_IN 管脚可以用于 32.768 kHz 晶振的输出驱动,因此单片机不需要一个低功耗的振荡器;对于电源部分则需要应用旁通电容来给 VCC 和 VIO 去耦,分别通过一个 10 Ω 电阻进行分离。

TDC-GP22 芯片利用内部的逻辑门延迟来高精度测量时间间隔,对供电电源的性能要求较高。选用 BL8503 型低功耗稳压芯片,其良好的负载突变瞬态响应特性及温度特性,可确保芯片和电源系统的稳定性。极低的静态功耗( $I_q = 3.0 \mu A$ )延长电池寿命,使电源电路稳定可靠。电源电路如图 4 所示。

利用集成在 TDC-GP22 内部的模拟电路输入部分测量流量,该芯片的 FIRE\_UP 引脚与电阻 R3、电容 C7 连接到换能器 1 上, FIRE\_DOWN 引脚与电阻 R2、电容 C4 连接到换能器 2 上,两个换能器相互进行超声波信号的接收或发送,设计成超声波的外围电路,简化整个电路设计。

TDC-GP22 内部集成的温度测量单元有 PT1、PT2、PT3 和 PT4 等 4 个电阻测量端口,PT1 引脚和 PT2 引脚分别用来连接测量上游(热水)和下游(冷水)温度的配对温度传感器 P<sub>t</sub>1000,其测量是基于 PT3 和 PT4 上连接的电阻 R6 在电容上的放电时间,从而电容会对参考电阻和 P<sub>t</sub>1000 电阻分别放电。温度测量是自动

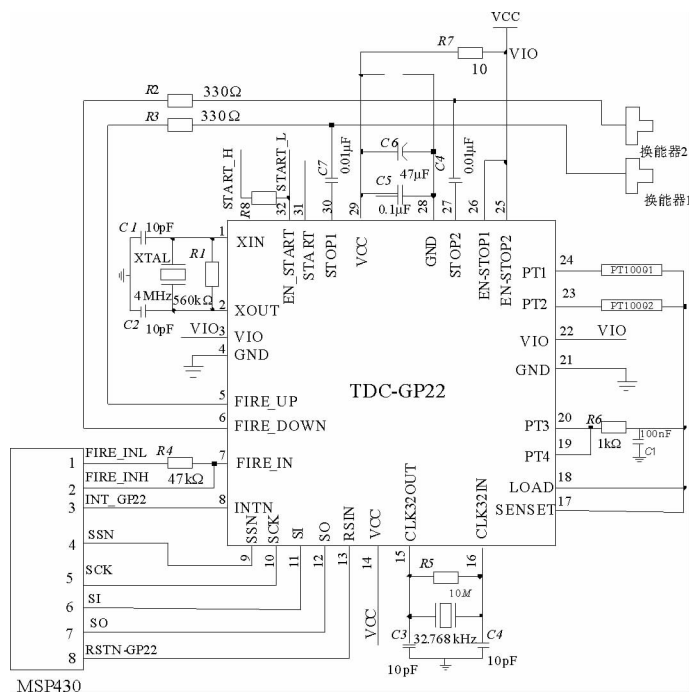


图 3 TDC-GP22 外围电路设计图

Fig. 3 TDC-GP22 peripheral circuit diagram

完成的。TDC-GP22 根据微处理器发送的 Start\_Temp\_Restart 操作码测试温度, TDC-GP22 进行 2 次或者 8 次的热身测量后按 PT1→PT2→PT3→PT4 顺序测量端口实际温度。中断标志位会在 4 次实际测量结束后置位。MSP430 微处理器依次读取寄存器 registers 0 到 registers 3 中的 4 个测量值, 根据 RC 电路电容放电时间值与电阻的比例关系, 计算出外接 P<sub>t</sub>1000 的电阻值, 再通过查询铂电阻不同阻值与温度的对应表即可得到测量端的温度值<sup>[2]</sup>。

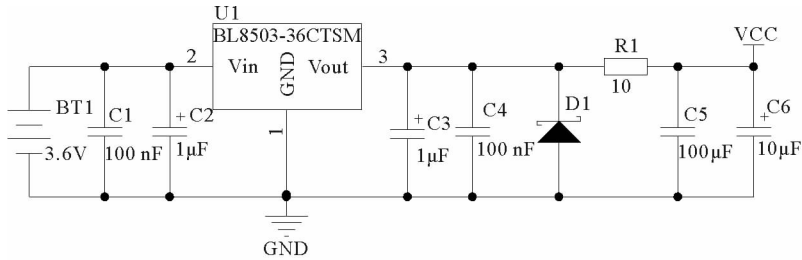


图 4 电源电路

Fig. 4 Power circuit

### 2.3 M-BUS 通讯接口硬件电路设计

该系统设计了可以实现远程抄表功能的 M-BUS 通讯接口, M-BUS 是一种低成本, 能多节点、长距离通信的总线, 在热表中进行通信。采用光电隔离后的 M-BUS 接口设计电路如图 5 所示。

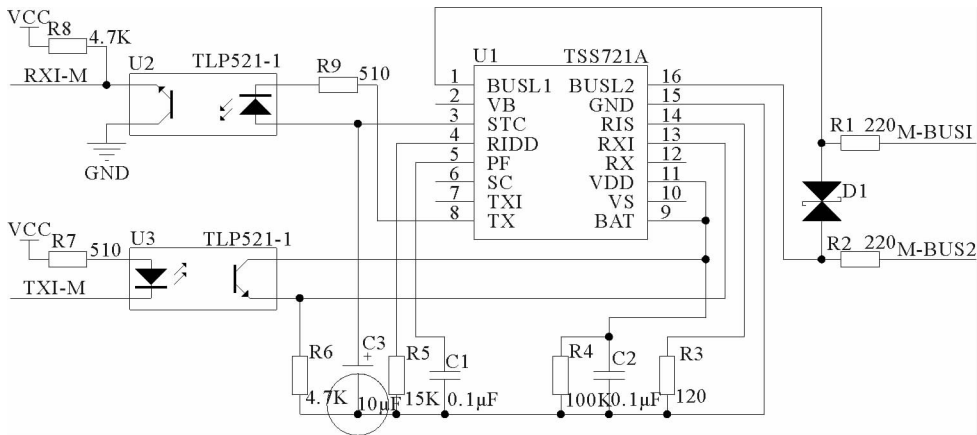


图 5 M-BUS 通讯电路图

Fig. 5 M-BUS communication circuit diagram

该 M-BUS 通讯电路选用 TSS721A 芯片, 其符合 EN1434-3 通信标准, 是 M-BUS 仪表总线的专用数据收发的芯片, 采用光耦 TLP521-1 与总线互连。稳压电源 3.3 V 集成在芯片内部, 总线可以延时关断故障。

### 3 系统软件设计

系统软件在 IAR FOR MSP430 环境下用 C 语言进行编写, 系统上电后, ①主程序首先进行 MSP430 微处理器和 TDC\_GP22 芯片以及其他外围元器件的初始化, 设置实时时钟; ②微处理器进入低功耗 LMP3 模式, SFR 中各模块允许确定各自控制器工作状态的配置; ③中断请求或允许状态控制模块的动作, 当微处理器 MSP430 被一个允许的中断唤醒, 就会执行中断程序, SR 和 PC 保存入堆栈, 中断事件发生的现场被保存; ④复位 SR 中的运行模式控制位 OscOff、SCG1 和 CPUOff 自动。系统的程序流程如图 6 所示。

为了降低系统功耗,采用数学模型简单的增量式 PID 调节算法,有着超调和快速调节控制的优点。通过反复调试,配置合适的 PID 参数,使温度测量的瞬态相应速度以及流量测量的稳定性得到较大的提高<sup>[9]</sup>。温度不会瞬变,可以每 30 秒采集一次;流量会瞬变,需要每 1 秒采集一次。

#### 4 实验测量数据与分析

通过实验测出温度及流量的数据来验证该设计的超声波热量表的高精度以及可靠性,进一步验证所设计的超声波热量表达到了预期的要求。

##### 4.1 温度测量

根据行业标准 CJ 128-2007 的出厂规定<sup>[10]</sup>,选取 5 块小口径 DN25 型热量表在恒温槽 HWC-R-L 和精密数字测温仪 SPI1602A 上进行温度测试,温度测量的实验数据表 1 所示。

由实验结果数据可知,测量中的温度传感器 Pt1000 的配对误差绝对值小于 0.037 °C。

##### 4.2 流量测量

温度保持在 55 °C 下,将选取的热量表放在热量表检定装置 RJZ15-25Z 上分别对 5 个不同的流量点进行流量测试,流量测量的实验数据如表 2 所示。

测试结果表明,所设计的热量表精度高,误差绝对值 ≤ 0.9%。

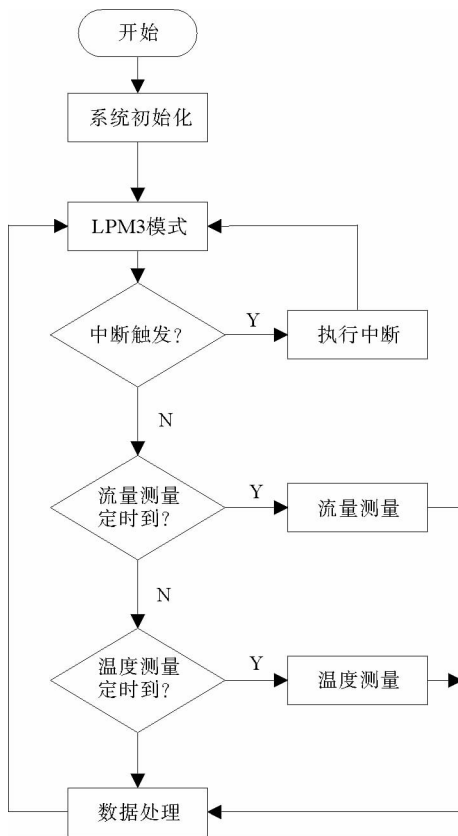


图 6 系统软件设计流程图

Fig. 6 Flow chart design of system software

表 1 温度测量结果

Tab. 1 Temperature measurements

| 表号 | 进水口温度/°C |       | 相对误差/<br>(±%) | 出水口温度/°C |       | 相对误差/<br>(±%) |
|----|----------|-------|---------------|----------|-------|---------------|
|    | 测试值      | 真实值   |               | 测试值      | 真实值   |               |
| 1  | 69.880   | 69.90 | 0.028 6       | 49.876   | 49.89 | 0.028 1       |
| 2  | 69.876   | 69.90 | 0.034 3       | 49.872   | 49.89 | 0.036 1       |
| 3  | 69.882   | 69.90 | 0.025 7       | 49.879   | 49.89 | 0.022 0       |
| 4  | 69.878   | 69.90 | 0.031 5       | 49.876   | 49.89 | 0.028 1       |
| 5  | 69.885   | 69.90 | 0.021 4       | 49.880   | 49.89 | 0.020 0       |

表 2 流量测量结果

Tab. 2 Flow measurements

| 流量点<br>/(m <sup>3</sup> /h) | 累计流量测试值<br>/m <sup>3</sup> | 累计流量实际值<br>/m <sup>3</sup> | 相对误差<br>/(±%) | 要求/<br>(±%) |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|-------------|
| 0.065                       | 0.005 034 4                | 0.005 08                   | 0.897 6       | 3.08        |
| 0.080                       | 0.005 114 7                | 0.005 16                   | 0.877 9       | 2.88        |
| 0.150                       | 0.010 849 6                | 0.010 91                   | 0.553 6       | 2.47        |
| 0.470                       | 0.040 526 9                | 0.040 36                   | 0.413 5       | 2.15        |
| 2.000                       | 0.094 620 5                | 0.094 82                   | 0.210 4       | 2.04        |

流量传感器出厂测试按照 2 级表的准确度公式

$$E_q = \pm (2 + \frac{q_p}{q}) \% \quad (2)$$

式中： $q_p$  为常用流量，查阅行业标准 CJ 128—2007 可知公称直径 DN25 对应的  $q_p$  值为  $3.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ； $q$  为使用范围内流量值。

为与不考虑流场因素的流量测量表进行精度比较，用 MATLAB 软件对本论文设计的基表与文献[2]中基表的流量测量实验数据进行误差曲线对比(如图 7)。

由图 7 可看出，本研究设计的热量表在低流量段( $0.05 \sim 0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ )的测量误差较小且误差曲线波动不大，表明流喉道结构起到了很好的整流效果。而且，本研究设计的热量表在所有流量范围内误差明显小于文献[2]中的误差，且较快速趋于平稳，超声波热量表的适应性显著提高，达到了预期的要求。

## 5 结束语

利用流体力学相关知识，结合工程实践经验，依据流体流动的发展过程和流场分布规律，优化基表结构，从而改善基表内水流特性，提高测量精度。根据行业标准对设计的超声波热量表进行温度测试、流量测试，测试结果表明所设计的超声波热量表具有高精度以及稳定性好的特点，符合行业标准 2 级表的要求，达到了预期要求。

## 参考文献：

- [1]林文卓,王树铎. 国内户用超声波热量表技术现状[J]. 暖通空调,2012,42(12):128-132.  
LIN Wenzhuo,WANG Shuduo. Technological status of domestic household ultrasonic heat meters[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2012,42(12):128-132.
- [2]高正中,谭冲,赵联成,等. 基于 TDC-GP22 高精度低功耗超声波热量表的设计[J]. 电子技术应用,2015,41(7):61-63,67.  
GAO Zhengzhong,TAN Chong,ZHAO Liancheng,et al. The design of ultrasonic heat meter with high precision and low power consumption based on TDC-GP22[J]. Application of Electronic Technique,2015,41(7):61-63,67.
- [3]肖洋. U 型反射体超声波热量表流量计量的水流动态特性数值分析[D]. 西安:长安大学,2014.
- [4]李广峰,刘昉,高勇. 时差法超声波流量计的研究[J]. 电测与仪表,2000(9):13-19.  
LI Guangfeng,LIU Fang,GAO Yong. Travel time difference method of the ultrasonic flowmeter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2000(9):13-19.
- [5]屈永. 超声波热量表的技术研究与设计[D]. 南京:南京理工大学,2014.
- [6]梁灿,袁涛,张宝芬,等. 基于 TDC-GP2 的超声波热量表[J]. 仪表技术与传感器,2010(10):15-17.  
LIANG Can,YUAN Tao,ZHANG Baofen,et al. Ultrasonic Heat Meter Based on TDC-GP2[J]. Instrument Technique and Sensor,2010(10):15-17.
- [7]BERREBI J,MARTINSSON P.-E,WILLATZEN M,et al. Ultrasonic flow metering errors due to pulsating flow[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2004,15(3):179-185.
- [8]孙望. 超声波热量表内流场特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2014.
- [9]李世光,申梦茜,王文文,等. 一种 Mecanum 轮式移动平台增量 PID 控制系统设计[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(1):86-90.  
LI Shiguang,SHEN Mengxi,WANG Wenwen,et al. Mobile platform incremental PID control system design based on mecanum wheels[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2016,35(1):86-90.
- [10]热量表国家标准. CJ128-2007,热量表中华人民共和国城镇建设行业标准[S].

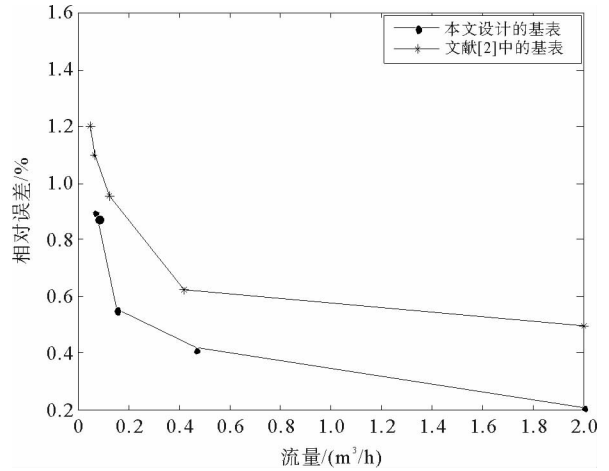


图 7 不同流量点的误差曲线图

Fig. 7 Different flow point of error curve