

低功耗两线制涡轮流量计设计

邵海龙 沈昱明

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: 涡轮流量计被广泛应用于过程测量和控制仪表。但是,涡轮流量计容易受被测流体粘度的干扰,导致现场测量精度不高、量程比受限。针对涡轮流量传感器的非线性特性,本文研制了基于 MSP430 的涡轮流量计实时数字信号处理系统,将传感器测量到的数据经过线性插值法处理,然后存储在带电可擦可编程只读存储器中,实现了对涡轮传感器的非线性校正,从而涡轮流量计的测量范围明显地得到扩大。同时该仪表还具有 4~20mA 电流输出、频率输出以及 RS485 通信功能,便于和工业仪表兼容。

关键词: 涡轮流量计;非线性校正;低功耗;两线制

中图分类号: TP216+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design of turbine flowmeter of low-power and two-wire

Shao Hailong Shen Yuming

(School of Optoelectronics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Turbine flowmeter is widely used in process measurement and control instrument. However, turbine flowmeter is susceptible to interference caused by fluid viscosity, and the measurement precision in practical applications cannot be ensured and the turn-down ratio is limited. Aiming at the nonlinear characteristic of the turbine-shedding sensor, a real-time digital signal processing system was developed based on MSP430, and the system obviously implements the nonlinear correction to vortex sensor by storing the datas processed with linear interpolation of the sensor in the Erasable Programmable Read Only Memory. Meanwhile, the flowmeter also has a 4~20mA current output, frequency output and RS485 communication function which make it compatible with industrial instrumentation.

Keywords: turbine flowmeter; nonlinear corrections; low-power; two-wire

1 引言

涡轮流量计结构简单、精度高、范围宽、重复性好、压力损失小以及安装维修方便等特点,被广泛应用于气体和液体流量的测量^[1-3]。但在工业现场,由于受到管道振动和流场扰动引起的噪声干扰,使得传感器输出信号中含有不同噪声,涡轮流量信号中极易混入噪声,测量精度大大降低。因此,提高仪表精度的关键是从含有大量噪声的涡轮流量信号中提取出有效信号^[4-5]。

针对这一问题,国内外科研工作者针对涡轮流量计开展了大量的研究,并取得了很多成果^[6-11]。大致可以分为数字处理和模拟处理两类。放大、滤波、整形和计数等抑制噪声能力不强的传统模拟方法,导致小流量不能检测到或测量精度很低,量程比受限。数字信号处理方法中国外多用专业芯片实现,很难剖析内部细节,国内主要有基于

FFT 的经典谱分析、基于 Burg 算法的现代谱分析、小波分析、功率谱分析和自适应陷波等,这些方法各有优缺点,但在小流量的检测方面仍未能得到很好的解决。

本文在分析涡轮信号及其噪声特点的基础上,提出一种基于定点系数修正法的涡轮流量计,对传感器得到的数据进行处理,并用实验验证仪表测量的准确性和可重复性。

2 涡轮流量计的工作原理

采用涡轮进行测量的流量计。当被测流体流过传感器时,在流体作用下,液体流向与叶轮的叶片存在一定的偏角,叶轮受力旋转,其转速正比于管道液体的平均流速,传感器将液体流速转换为与瞬时流量成正比的频率信号。所以,可以通过测量涡轮的转速来测流量。

叶轮周期性改变感应线圈磁回路的磁阻值,检测线圈

中的磁通随之发生周期性的变化而产生与流量成正比的周期性感应电势,即电脉冲信号,经信号放大器放大后,送至显示仪表显示。

将流量和黏度确定在某一范围内,涡轮表头输出的脉冲频率 f 正比于管道中流体流过的体积流量 q_v 。即:

$$q_v = f/K \tag{1}$$

式中: K 、 f 分别为仪表系数和流量计输出信号的频率; q_v 为体积流量。只要确定了涡轮流量计的量程范围,仪表系数 K 在一定范围内为一常数,其数值由流量校验装置校验得出。仪表系数 K 值都会在每一台涡轮仪表说明书中标明。

由表达式(1)可以看出,仪表系数 K 代表了单位体积流体中脉冲数量,用传感器测到的信号脉冲频率 f ,除以仪表系数 K ,就可以得到体积流量 Q 。即:

$$Q = \frac{f}{K} (\text{L/s 或 m}^3/\text{s}) \tag{2}$$

3 硬件系统低功耗设计

系统的硬件框图如图 1 所示。主要由涡轮传感器、放大滤波电路、电压跟随器、单片机、人机接口电路、4~20 mA 输出、电源管理电路、频率输出和 RS485 通信组成。

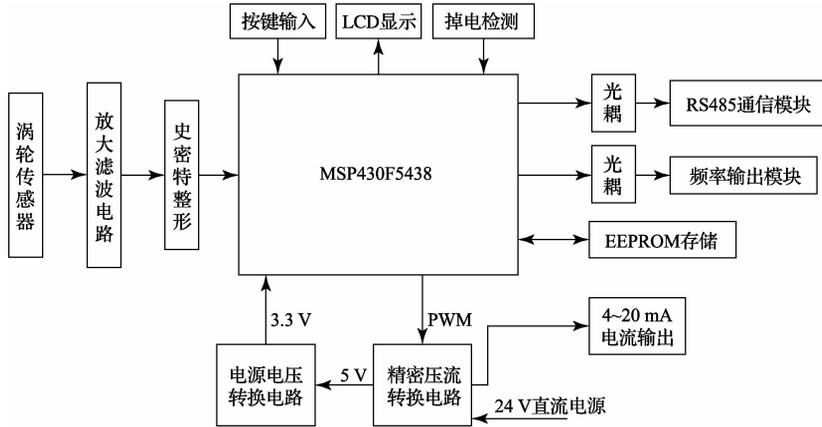


图 1 涡轮流量计硬件电路框图

对流量信号的测量充分使用了 MSP430 单片机内部的资源,即 A/D 转换器、比较器、定时/计数器等,节省了所需单片机的口线和外围器件。AD7391 芯片将数字信号转换为电压信号,再经过由 XTR115 组成的 V/I 转换电路输出 4~20mA 电流信号。电源转换模块将 24V 转换为 5V、3.3V 和 2.048V,满足运算放大器、单片机以及其他芯片的供电需求。单片机和 V/I 转换电路构成 4~20mA 变送器,变送器的耗电电流随传感器输出而变化,电流表只需要正确串联在电路中即可测量出电流值,其数值通过计算可以得到当时的瞬时流量值。

3.1 单片机芯片的选型

在众多方法中,器件选型无疑对低功耗设计的实现起到最关键的作用。系统采用了 TI 公司推出的 16 位超低功耗的 MSP430F5438 作为主控芯片,主要在于 MSP430 系列芯片的功耗优势^[12]。

由活跃模式下电流消耗相对于系统频率:

$$I_{AM} = I'_{AM} \times f_{system} \tag{3}$$

由活跃模式下电流消耗相对于供电电压:

$$I_{AM} = I'_{AM} + 175 \times (V_{CC} - 3) \tag{4}$$

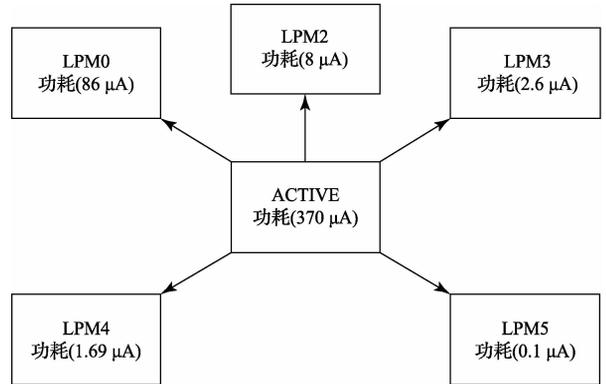


图 2 各模式转换框图

由图 2 可知,MSP430 在不同模式下的功耗相差很大,最低功耗 0.1 μA ,在活动模式下的功耗取决于系统的工作频率与供电电压,特别是系统频率。当系统主时钟频率为 1 MHz 时,工作电压为 3 V,电流消耗为 370 μA ,根据式(4)和(5)可计算出,当系统工作频率为 4 MHz,工作电压 3.3 V,电流消耗相当于 1.69 mA。因此,系统在运行时,根据涡轮信号的变换率,选择不同的工作模式,以降低系统的功耗。

3.2 4~20 mA 输出和电源供电模块

功耗问题一直是 4~20 mA 输出电路设计的难点之一。解决这一问题的主要方法是信号线与电源线复用。这样功耗问题得以保证,并且为仪表两线制工作提供足够的电流。但经过实际测试,当单片机处于高频时钟工作,并且所有外设全部工作,其电流消耗超过 4 mA。为了解决这样的问题,通过 DC/DC 对复用线进行分流,还解决了数字部分的供电问题^[13-14]。此外,流量计的硬件电路设计均采用低功耗的器件,这也是降低整体功耗的方法之一。

电流环输出部分的核心是 TI 公司的 XTR115 电流环芯片,电路如图 3 所示。引脚 3 被看作模拟地,输入端电阻 R_m 为 10 k Ω ,C 为降噪电容,晶体管的选型主要考虑 NPN 型,冲击电压,电流以及功耗,鉴于会有温度传导效应,最

好不使用贴片的封装,外接晶体三极管 Q1 只要选用 $V_{ce0} > 36$ V, $I_{cmax} > 32$ mA, $P_{outmax} > 1.2$ W 的 NPN 三极管即可,可以考虑下面的一些型号: TIP29C, 2SC1846。该电路的工作原理是当 AD7391 数模转换芯片的 6 脚输出电压信号经过 R_2 转换成 40~200 μ A 的输入电流, XTR115 内部有一个 100 增益的运放,将输入电流放大为 4~20 mA 的电流。

外部晶体管 Q1 主要作为一个电流输出源,如果使用 24 V 和 20 mA 的电流输出,此晶体管的功耗为 0.48 W, XTR115 通过采用外部的晶体管来避免产生温飘,所以在安装晶体管的时候应该避免和模拟部分的电路离的太近,包括 XTR115。在实际电路中,还需给功率管装上合适的散热器。

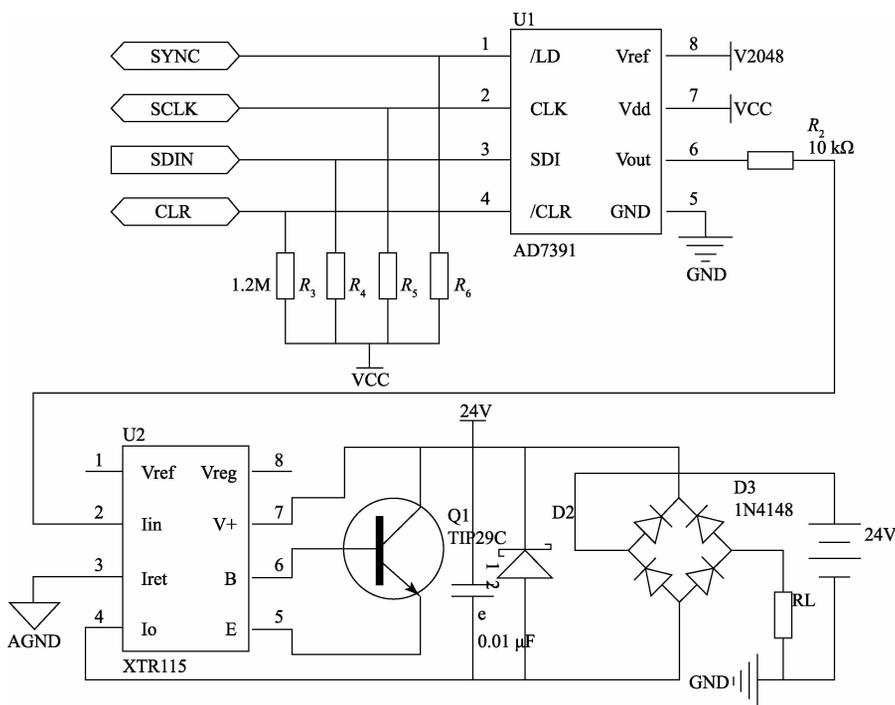


图 3 电流环输出电路

XTR115 允许各种电压保护方法,图 3 显示了一个二极管电桥电路,四个 1N4148 型开关二极管构成这样的保护电路,电路可以正常运行,甚至当电压连接线是接反的,它也能防止负电压流入 V+ 端。因为桥式电路中无论何时都会导通两只二极管,于是,在计算环路电压时,去掉两只硅二极管的正向压降(约为 1.4V)是理所应当的,由式(5)确定。

$$V_{L\text{OOP}} = 24 - I_0 R_L - 1.4 \quad (5)$$

为了防止瞬态电压过高, Motorola 公司生产的 P6KE39A 型抑制器的各项参数都符合要求,其阈值电压为 39 V,钳位时间仅为 1 ns,其性能是齐纳稳压管所不及的。只要环路电压高于 39 V 就会被钳位。通过测试数据

证明,即使电源电压高达 50 V,也损坏不了 XTR115。

鉴于整个系统自身的电流消耗不能超过 4 mA,所以通过 DC/DC 对复用线进行分流,DC/DC 的输入电压为 24 V,输出电压为 5 V,所以,当 DC/DC 效率为 80% 以上时,从电流环上取 1 mA 电流,由公式(6)计算出提供给数字电路的电流为 3.84 mA,这样不仅解决了电流环上的电流大于 4 mA 的问题,而且解决了电路中芯片的供电问题。

$$V_i \cdot I_i \cdot \eta = V_o \cdot I_o \quad (6)$$

由于流量仪表采用二线制 24 V 环路供电,单片机 3.3 V 供电,信号调理电路中运放 LM258 需要 5 V 电源供电。为了降低电路功耗,使用 TI 公司的电压转换芯片 LM3103,将 24 V 转换为 5 V,用芯片 TPS79733 将 5 V 转

换为 3.3 V,最后用芯片 REF3020 将 3.3 V 转换为 2.048 V,作为 D/A 转换芯片的参考电压。LM3103 芯片输出电压由外部电阻 R_8 、 R_9 和 R_{12} 决定。调整输出电压公式为:

$$V_{out} = 0.6 \times (R_8 + R_9 + R_{10}) / (R_9 + R_{10}) \quad (7)$$

V_{out} 为 5 V, R_8 、 R_9 分别选为 10 k Ω 和 1.3 k Ω ,根据式 (7) 计算出 R_{10} 约为 69 Ω 。24 V 转 5 V 电路如图 4 所示。

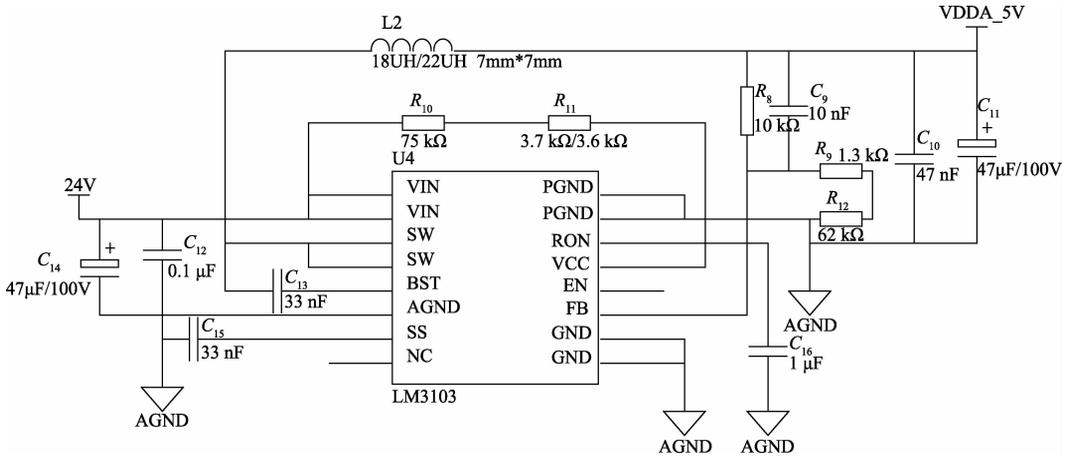


图 4 24V 转 5V 电路

3.3 RS485 通信模块

抗干扰能力是考察仪表的一项关键指标。为了减少通信信号受外界干扰,通信模块电路采用东芝公司的 P181 光耦隔离器和 75LBC184 差分收发器芯片。75LBC184 差分收发器带有内置瞬变噪声保护装置,这种设计特点明显改善了减少数据异步传输电缆上的瞬变噪声的可靠性,这种可靠性是市场上现有器件所不及的。远程计算机可以通过 RS485 通信模块及时了解涡轮流量计的流量参数。

4 系统软件设计

系统软件包含的主要功能模块有:1)初始化模块:系统上电后,首先就要对单片机的状态控制寄存器及各功能模块的工作模式进行设置,LCD 使用之前也需要对其进行复位和初始化显示。2)计算处理模块:计算出传感器信号的频率,然后,根据所设定的仪表系数,计算出瞬时流量和和累计流量,再根据计算出来的瞬时流量,向外发送相应的脉冲量和标准的 4~20mA 的电流。3)输出模块:系统输出模块即远程信号发送操作模块,分别是 4~20mA 电流输出操作和脉冲输出操作。4)人机接口模块:模块由键盘和 LCD 组成,用于显示和修改仪表测量结果。5)中断模块:TimerA 中断负责频率的测量;TimerB 中断负责脉冲计数、流量计算显示和 RS485 通信;掉电中断用来保存数

据;按键中断用来设置仪表各种参数。系统软件框图如图 5 所示。

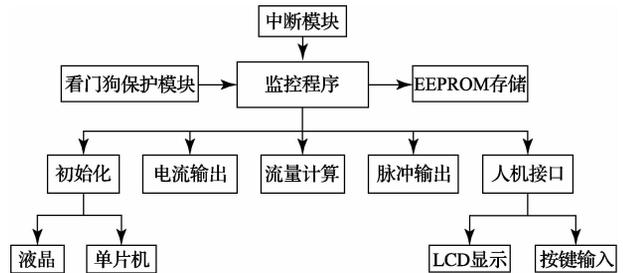


图 5 软件框图

4.1 脉冲计数

设置定时器 A(TA)来捕获涡轮信号脉冲个数,设置定时器 B(TB)来计算瞬时流量、累计流量和频率输出。捕获/比较寄存器 TACCRO 被设置为 32767,辅助时钟 ACLK 频率选用 32768 Hz,定时器 A 工作在增计数模式。TB 设置捕获/比较寄存器 TBCCRO 为 65535,选用系统时钟 4 分频后的频率为 2 MHz,定时器 B 工作在连续模式。TA 的上升沿来触发捕获脉冲信号,TB 根据相邻两次触发信号的间隔时间来捕获涡轮信号脉冲个数,再依据 TB 的工作时钟频率计算出涡轮信号的频率,流程图如图 6 所示。

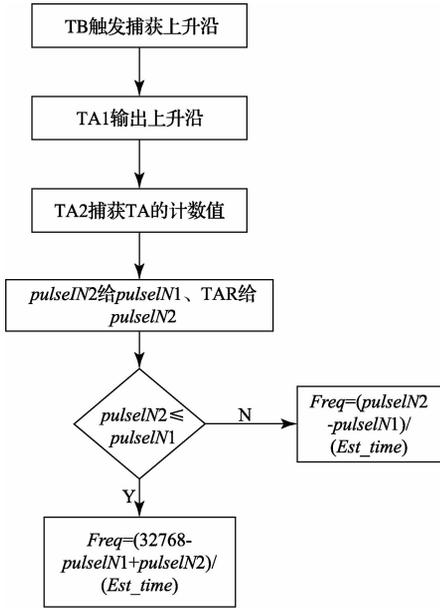


图6 脉冲捕获流程图

当 $\text{pulseIN2} \leq \text{pulseIN1}$ 时,频率计算公式为:

$$\text{freq} = \frac{32768 - \text{pulseIN1} + \text{pulseIN2}}{\text{Est_time}} \quad (8)$$

当 $\text{pulseIN2} > \text{pulseIN1}$ 时,频率计算公式为:

$$\text{freq} = \frac{\text{pulseIN2} - \text{pulseIN1}}{\text{Est_time}} \quad (9)$$

式中: pulseIN1 、 pulseIN2 为计数脉冲浮点型变量, Est_time 为计算瞬时流量时间, freq 为捕获的涡轮脉冲数。

4.2 非线性补偿设计

采用计算和查表相结合的插值法来处理涡轮传感器的非线性问题。插值法就是在传感器输出频率 F 与仪表系数 K 的特性曲线中,把输出频率 F 分成 N 个均匀的区域,这样每个区间的端点 F_i 都对应一个输出 K_i ,测定完这些数据点 (F_i, K_i) ,其中, $i = 1, 2, \dots, n$ 。按偏差平方和最小原则求出近似曲线 $k = \varphi(f)$,并且采取二项方程为拟合曲线方法,然后把近似曲线方程式预先存入到微控制器中,显然当曲线上任一点 F_x 检索到在 (F_i, F_{i+1}) 之间或端点处,就可以根据函数表达式计算出与之对应的仪表系数 K_x , K_x 的计算表达式为:

$$K_x = K_i + k(F_x - F_i) = K_i + \frac{K_{i+1} - K_i}{F_{i+1} - F_i}(F_x - F_i) \quad (10)$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, n$; F_x 为当前频率值,其值介于 F_i 和 F_{i+1} 之间。

实际使用线性插值时,线性化的误差与检测点的数量和位置相关。通过增加测量点数和选择最佳位置来得到最好的效果。

5 实验及结果分析

5.1 模拟电流输出实验

本系统对仪表设定仪表系数,量程流量,将信号发生器输出信号的幅值调节到表1中的响应值,合上开关将信号频率依次调节到量程频率的100%、75%、25%、0%,记录下各测试点的数字电流表的示值,由式(11)计算出电流相对误差。

$$\Delta i = \frac{I_{\text{示}i} - I_{\text{理}i}}{I_{\text{理}i}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: Δi 为第 i 试验点的电流输出误差; $I_{\text{理}i}$ 为第 i 试验点的输出电流理论值; $I_{\text{示}i}$ 为第 i 试验点的输出电流实际值。

表1 输出电流相对误差

信号幅值 /mV	K 系数 /P · L ⁻¹	电流测量值/mA			
		量程频率 100%	量程频率 75%	量程频率 25%	量程频率 0%
10	4000	20.000	15.992	7.993	3.996
20	500	19.998	15.992	7.995	3.996
30	80	19.998	15.990	7.995	3.995
电流/mA		20	16	8	4
最大误差(%)		-0.01	-0.062	-0.087	-0.125

从表1可看出,本系统所设计的仪表输出电流相对误差不超过0.2%,符合工业设计要求。

5.2 仪表系数修正实验

在检定装置上,对口径为20mm涡轮流量传感器分别使用平均系数法和线性插值法进行标定,并与标准值进行比较,结果见表2。量程范围为(0.7m³/h~7.0m³/h)涡轮流量传感器的平均仪表系数由(12)式计算得到。

表2 平均系数法和线性插值法的比较

测试点	标准仪表系数 /P · m ⁻¹	线性插值法		平均系数法	
		仪表系数	偏差%	仪表系数	偏差%
0.7	518.71	518.89	0.034	513.09	1.08
1.5	514.02	514.28	0.051	513.09	0.181
3.0	510.94	510.99	0.010	513.09	0.421
4.0	509.63	509.35	0.055	513.09	0.679
5.5	508.83	508.50	0.065	513.09	0.84
7	507.47	507.72	0.049	513.09	1.11

$$\bar{K} = \frac{(K_i)_{\text{max}} + (K_i)_{\text{min}}}{2} \quad (12)$$

由表2可看出,平均系数法的最大非线性误差为1.11%,而插值修正法的最大误差仅有0.065%,偏差缩小了约17倍。显而易见,在同一测量精准度水平下,采用插值修正法将会明显扩大涡轮传感器的量程范围。

6 结 论

本文针对涡轮流量计实际应用中存在的问题,基于线性插值方法能有效提高涡轮传感器的测量精度和扩展测量的量程比。电路中芯片均采用低功耗器件,最大程度地降低了系统功耗;同时仪表配有RS485通信、LCD和按键输入,远程计算机随时可以查看仪表任意时刻的瞬时流量和累积流量等重要的参数,便于操作员能够即时了解和统计流量计的信息。

参考文献

- [1] 杨有涛,王子刚. 涡轮流量计[M]. 北京:中国质检出版社, 2011.
- [2] 王松,张天宏,王建峰,等. 基于涡轮流量计的动态流量测量方法研究[J]. 测控技术, 2012, 31(11): 24-27.
- [3] 张桂夫,王鲁海,朱雨建,等. 基于PIV测量的涡轮流量计响应分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2381-2387.
- [4] 张天宏,黄向华,徐建国,等. 涡轮流量计信号处理方法:中国, 201110021455. 8[P]. 2011-01-19.
- [5] 王维. 涡轮流量计修正技术研究及应用[J]. 工业计量, 2010, 20(5): 29-31.
- [6] AGRAWAL V, PRABHU S V. Review on vortexflowmeter designer perspective[J]. Sensors and Actuators, 2011, 170(1): 8-23.

- [7] 钱苏敏,张琳絮,张云,等. 基于小波阈值改进的去噪算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(5): 49-51.
- [8] 江文斌,秦会斌,邵李焕. 基于经典谱估计改进方法的涡街流量计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1): 229-234.
- [9] 沈廷鳌,涂亚庆,张海涛,等. 基于自适应陷波器的科氏流量计信号频率跟踪新方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(12): 1119-1125.
- [10] 邵永红,沈天飞,李诚. 小波滤波法在涡街流量计中的应用[J]. 电子测量技术, 2011, 34(11): 101-103.
- [11] 罗清林,徐科军,刘三山. 基于快速傅里叶变换的低功耗两线制涡街流量计[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(7): 692-697.
- [12] 任保宏,徐科军. MSP430单片机原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2014.
- [13] 曾宪俊,徐科军,周杨,等. 低功耗、两线制涡街流量计数字信号处理系统[J]. 仪表技术与传感器, 2009, (1): 76-79.
- [14] 徐科军. 流量传感器信号建模、处理及实现[M]. 北京:科学出版社, 2011.

作者简介

邵海龙, 硕士研究生, 主要研究方向为自动检测技术和数字信号处理。

E-mail: 1321818679@qq.com