

## 某型装备高精度液体流量监测仪设计与实现

张程, 胡金辉, 王禹

(上海航天控制技术研究所, 上海 200233)

**摘要:** 针对某型导弹发射车液体流量监测方面存在的不足进行了深入的研究, 解决传统测试方案精度低、易受干扰和温度适应性差等缺陷; 结合多项实验数据, 分析问题产生的原因; 在硬件方面, 创新地将霍尔器件应用于流量采集, 并介绍后端处理电路的设计, 为适应多场合的应用需求, 增加锂电池和 RS485 总线输出接口; 在软件方面, 优化频率测量方法, 有效降低处理器负荷; 采用实时温度采集与补偿的方法, 最大限度避免温度造成的误差; 以树形菜单的形式, 从广义的角度去实现整个架构, 避免多层循环嵌套, 为用户提供友好的操作界面; 测试结果表明, 监测仪综合性能上大幅优于传统设备, 同时具有较强的稳定性和可靠性; 目前该型流量监测仪已成功通过验收。

**关键词:** 流量监测; 霍尔效应; 温度补偿; 树形菜单

## Design and Realization of High Precision Liquid Flow Monitor for the Certain Equipment

Zhang Cheng, Hu Jinhui, Wang Yu

(Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of liquid flow monitoring of missile launcher, a deep research is carried out to solve the defect of traditional test scheme, such as low precision, easy interference and poor temperature adaptability. Analyze the reason of the problem by combining a lot of experimental data. In hardware, Holzer device is innovatively applied to collect liquid flow; besides, the design of processing circuit is introduced. In order to meet the needs of multi applications, RS485 bus and lithium battery is increased. In software, the optimization method of frequency measurement is used to effectively reduce the processor load. The errors are avoided by the method of real-time temperature compensation. Adopting a form of tree menu, it's easily to realize the whole architecture as a generalized view and effectively avoid multiple cycles. Users are provided a friendly GUI. The test results show that the comprehensive performance of the monitor is not only much better than the traditional equipment but also has a powerful stability and reliability. This type of flow monitor has been successfully passed through acceptance now.

**Keywords:** flow monitoring; Holzer effect; temperature compensation; tree menu

## 0 引言

随着国防科技的进步, 我军某导弹发射车的研制有了突破性进展, 在实战中体现出了卓越的性能, 具有射程远、灵活性强、隐蔽性强等优点, 而且能够根据北斗卫星定位, 对海拔高度、地形结构和天气因素等影响发射精度的参数作自动修正。信息化和机动性的提升都对控制系统提出了更高的要求, 不仅要实现精密控制, 还要保证稳定性、可靠性和容错性。其中, 对液体流量的测控是控制系统一个重要组成部分, 主要包括对油路和液压系统流量的实时监测。目前对于车载液体流量的采集, 主要使用信号转换器将流量计产生的频率信号转换成模拟信号的方式。这种方案存在着功能简单、易受干扰、接口单一等诸多缺点, 尤其是不能根据介质的温度对测量数据做出补偿。因此在野外作战会遇到多种极端恶劣气候的情况下, 已经不能满足现代化武器装备的需求。

本文主要介绍一种基于涡轮流量计的液体流量监测仪, 可实现高精度流量数据采集、多总线接口输出、数据回放查询和绘制曲线等, 同时笔者在多年的实践中总结出液体温度在流量

监测中的补偿方法, 根据温度对流量实时补偿。流量监测仪既可固定安装于驾驶操控台, 也能作为手持式诊断设备, 方便实用。

## 1 系统结构与原理

流量监测仪的总体结构如图 1 所示, 系统主要以 XMEGA128A1 为核心控制器, 由传感器、整形滤波、电源控制、人机交互和信号输出等模块组成。

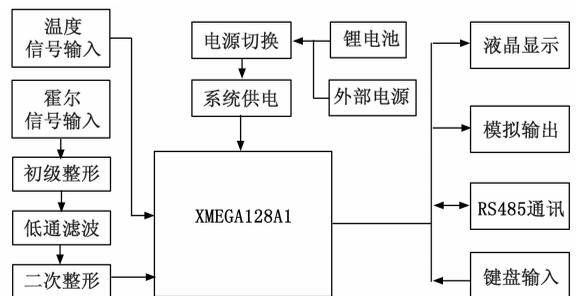


图 1 流量监测仪总体框图

涡轮流量计原理是以涡轮叶片切割磁力线产生感应电动势, 经霍尔传感器可将感应电动势转换为正弦电信号, 信号频率和幅度都与流量成正比关系, 但由于频率采集的稳定性和精

收稿日期: 2018-01-18; 修回日期: 2018-03-13。

作者简介: 张程(1985-), 男, 上海人, 大学, 主要从事卫星地测设备自动化采集控制以及嵌入式系统应用方向的研究。

度都高于电压采集，故流量监测仪采用频率采集的方法。霍尔传感器因其本身性能限制，在小流量时输出的信号幅度较小，电路处理转换为 0~3.3V 的方波才能被 CPU 识别，CPU 的计数器模块 (TC) 识别出信号频率，因受材料特性和温度等因素影响，采集的频率值还需要作线性修正和温度补偿，最后通过 LCD 显示。

XMEGA128A1 是 ATMEL 公司推出的高性能低成本的解决方案，单核 CPU 集成了多项外设，包括定时计数器 (TC)、Uart、浮点数处理单元 (FPU)、ADC 和 DAC 等，同时还具有 DMA 传输和事件触发系统等功能。本系统基于 XMEGA128A1 强大的性能，实现了实时频率采集、流量计算、温度补偿、数据传输和人机交互界面快速响应等多项功能。

流量监测仪内置锂电池，可作为手持式设备对在线瞬时流量作实时测量，内部所有模块均采用低功耗设计，待机时间可长达一个月。

## 2 硬件设计

### 2.1 系统供电

流量监测仪为充分适应野外作战对于电源方案的不同需求，采用外部和内置锂电池供电两种模式，额定电源工作范围 9~36 V，在外部供电的情况下，同时对内置锂电池充电。内部电源管理芯片均使用高效率、低功耗 DCDC 转换芯片，其效率高达 95% 以上，有效避免了能量损耗，增加待机时间。

### 2.2 传感器

#### 2.2.1 流量采集

涡轮流量计内部的磁钢会在流量计周围产生磁场，液体流量输入带动涡轮旋转，当铁磁性涡轮叶片经过磁钢时，磁路的磁阻发生变化。同时，叶片周期性地切割磁钢产生的磁力线，改变线圈的磁通量，从而产生感应信号。过去通常采用在铁钉上绕线圈的方式，通过电磁感应的原理来输出电信号。此方法非常容易受到外部干扰，尤其是导弹发射车上装备有大功率发动机、发电机等强干扰源，有效信号会被淹没于一片白噪声之中。经过多次尝试，本系统中创新利用霍尔效应解决了这一难题。

霍尔器件以霍尔效应为工作基础的磁传感器，可以检测磁场及其变化。具有结构牢固、体积小、重量轻、寿命长和安装方便等特点。本系统采用连续型比例式线性霍尔效应传感器 A1302 来实现流量的感应输出，可精确提供与所适用磁场成比例的电压输出，具有等于电源电压 50% 的静态输出电压，在这个过程中不会有精度损失。

#### 2.2.2 温度采集

本系统中采用 PT100 热敏电阻作温度测量，它的测量范围可从 -200~+500℃，阻值与温度的变化成正比，当 PT100 温度为 0℃ 时它的阻值为 100Ω，在 100℃ 时它的阻值约为 138.5Ω。在整个温度范围内，阻值随着温度上升而呈线性增长。利用这一特性，通过 PT100 与固定电阻分压的方式将温度转换为电压信号，再经由放大电路调理后输入到 XMEGA 的 AD 转换通道。

### 2.3 信号滤波整形

霍尔器件输出信号幅度为 50 mV 峰峰值，在外部强干扰的情况下，将有效信号分离转换为 CPU 可识别的数字信号，具有一定的难度。若后端调理电路过于灵敏，则会干扰转换

为有效信号；而过于迟滞，又会误将有效信号滤除。频率采集精准与否将直接影响流量监测仪的性能指标。

考虑上述的情况，采用了两次整形的方法，其原理如图 2 所示。

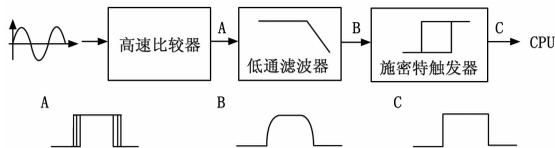


图 2 信号调理电路框图

首先高速比较器 ADCMP600 将正弦信号转换为方波，比较时间低至 3.5 ns，单电源 5 V 供电，低功耗 30 mW，轨到轨输出，适合作为调理电路的输入级，由于霍尔信号被干扰后呈现出非单调性，在比较电压附近会反复翻转，故在 A 点输出方波的上升沿与下降沿上产生较多毛刺，毛刺的频率在 100 kHz 以上。将 A 点信号经过低通滤波，滤波器截止频率点设置为 10 kHz，从 B 点的输出信号可见，高频毛刺被滤除，但也导致方波信号的边沿被破坏。利用施密特触发器迟滞比较的特性，设置高低两个门限电平作为比较电压，可避免过零比较器在比较电压附近反复翻转的问题，最后将 C 点的方波输入到 CPU 的定时计数模块 (TC)。

### 2.4 输出接口

#### 2.4.1 模拟输出

为适应模拟传输的接口需求，采用 4~20 mA 和 0~10 V 两种模式输出，可通过菜单自由切换。XMEGA128A1 内部集成 2 路 1 M 速率 12 位 DA 转换器，CPU 采集到频率值后，通过补偿算法得出相应的流量值，再根据流量与电流电压的对应关系输出相应的值。模拟信号输出电路如图 3 所示。

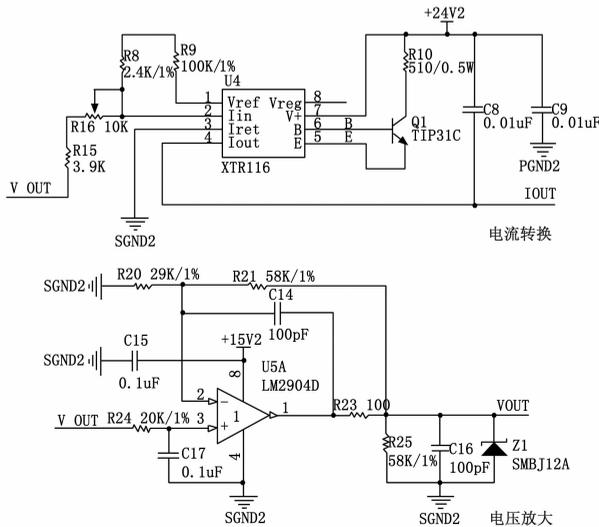


图 3 模拟信号输出电路图

DA 转换器的输出范围是 0~3.3 V，经运算放大器同相放大 3 倍可输出 0~10 V 的线性模拟信号。图 3 中电压的放大倍数由  $R_{21}$  和  $R_{20}$  决定， $R_{24}$  取  $R_{21}$  和  $R_{20}$  的并联值，起到阻抗匹配的作用。由于电压信号在长距离传输时会产生畸变和震荡等情况，增加  $C_{14}$  和  $R_{21}$  的阻容，可提高对容性负载的驱动能力，增加信号传输的可靠性。TVS 管 SMBJ12A 可抑制瞬态高压，

避免击穿运算放大器。

XTR116 是一款精密电流输出转换器, 可在标准电流环内输出 4~20 mA 模拟信号, 具有量程误差 0.05% 和非线性误差 0.003% 的卓越性能, 宽电源 7.5~36 V 供电, 精密的片内基准可对外提供偏置或激励, 电流反馈端可检测外部电路电流, 以控制输出电流的精度, 比较相似功能的芯片, 其各项指标都十分满足设计需求。图 3 中 XTR116 的 1 脚输出基准电平 4.096 V, 经过电阻  $R_8$  和  $R_9$  对输入信号提供偏置, 以实现 4 mA 电流的输出,  $R_{15}$  和  $R_{16}$  的阻值决定了输入电压与输出电流之间的比例关系。

### 2.4.2 RS485 总线输出

RS485 是一种被广泛应用的现场总线, 串行半双工模式, 支持多点数据通讯。一般采用终端匹配的总线型结构。即采用一条总线将各个节点串接起来。因其平衡发送和差分接收, 具有抑制共模干扰的能力, 能检测低至 200 mV 的电压, 传输信号能在千米以外得到恢复。485 总线接口保护电路如图 4 所示。

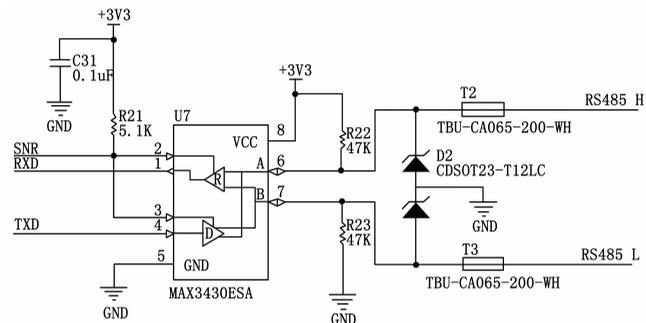


图 4 485 总线接口保护电路

野外作战的环境恶劣, 意外情况多, 通讯接口易遭到静电、浪涌和雷击的破坏。为避免此类情况的发生, 在 RS485 的差分信号线上增加了一组 Bourns 公司提供的保护器件 TBU, 即使在上千伏高压被接入的情况下, TBU 也会迅速呈现高阻状态, 保护 485 电平转换芯片不受外部高压冲击, 直到外部高压消失后, 其自动恢复到低阻状态。尤其需要注意, 在 PCB 板布局时, TBU 应非常靠近 485 接口芯片摆放, 才能起到最佳的保护效果。

### 2.5 液晶显示

液晶显示采用 2 行 8 列带中文字库屏 OCMJ2X8C, 可以显示字母、数字符号、中文字型及图形, 具有绘图及文字画面混合显示功能, 提供并行控制接口。内置 2M 中文字型 ROM 包含上万个中文字型。绘图显示画面使用一个 64x256 点的绘图区域, 文字与绘图可混和显示。此外还具有丰富的功能指令集: 画面清除、光标归位、显示移位、待命模式等。液晶显示操作简便, 将控制信号与数据信号连接到 CPU 的输出管脚, 根据操作时序写入命令和数据, 即可显示相应的字符。液晶显示接口电路如图 5 所示。

图 5 中 BKLED 是背光控制信号, 在一定时间内无按键操作的情况下, 关闭背光显示, 以节省耗电量。

## 3 软件设计

### 3.1 频率采集

由于流量一般不会发生瞬时的突变, 而是呈现一定的缓变特性。根据涡轮流量计测量范围的不同, 其频率范围在 5~

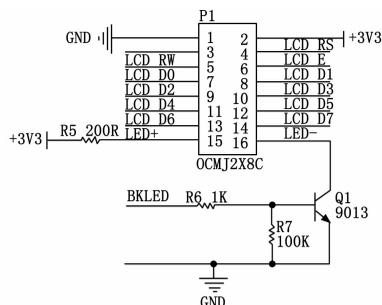


图 5 液晶显示接口电路

1 000 Hz 左右, 频率采集的定时长度默认为 1 秒, 用户也可根据实际需求将定时长度设置到最小 100 毫秒。本系统中主要采用平均周期法测量频率, 以达到最高的精度。如图 6 所示。

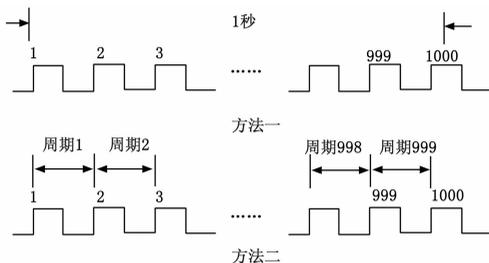


图 6 频率采集方案对比

图 6 中在整个长度为 1 秒定时周期内, 输入信号有 1 000 个上升沿, 按照方法一计算脉冲上升沿个数, 其频率应为 1 000 Hz, 然而实际有效脉冲数为 999 个。按照方法二计算脉冲平均周期法, 将所有有效信号的平均周期相加, 除以有效脉冲个数, 其频率应为 999.2 Hz, 相比方法一提高了 0.8 Hz 的精度。

利用 XMEGA128A1 强大的外设性能, 可轻松实现有效脉冲数和平均周期的采集。当输入信号脉冲上升沿到来时启动计数器, 以 5 MHz 的采样频率进行计数, 在下一个上升沿到来时结束第一轮计数并启动下一轮计数, 这些操作都是在外设内部自动完成, 无须 CPU 干涉。如图 7 所示。

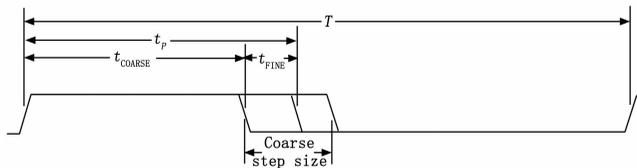


图 7 平均周期采集示意图

### 3.2 系统菜单

菜单是整个软件设计的核心, 对于简单的菜单结构, 大多采用全局变量记录当前菜单的层数和列数, 判断用户键值以修改层、列全局变量, 用循环语句判断当前层和列的变量值以执行相应的操作, 这样的架构使得代码量庞大, 循环嵌套层数多, 程序结构复杂, 稍不注意就会发生执行错误, 导致程序异常跑飞等严重后果。

为了避免这些弊端, 本系统采用基于节点的菜单二叉树法。将整个菜单以树形结构法定义, 每个菜单界面是菜单树上的一个节点, 其父节点为当前菜单的上一级菜单, 子节点为当前菜单的第一个子菜单, 左右节点为当前菜单的平行菜单, 也

就是其上一级菜单的其余子菜单。

### 3.2.1 菜单结构体

每一页菜单都有与其相对应的显示内容和操作函数，菜单结构体的定义紧密围绕对象同时具有属性、事件和方法三要素，这是组成菜单整体架构的因子之一。

```

structMenuItem
{
shortMenuCount;
unsignedint * DisplayPointer;
void (* Subs)();
structMenuItem * KidMenus;
structMenuItem * ParentMenus;
} Null;

```

从结构体中的每一个参数来看，其含义如下：

MenuCount：平行菜单数量。因为每一层菜单的平型菜单数量都不同，当菜单翻页时，需要通过此参数来判断是否已经到第一页或最后一页。表示菜单对象的属性。

\* DisplayPointer：菜单显示指针。指向当前页显示内容数组，此参数会被传递到显示函数中。表示菜单对象的方法。

(\* Subs)()：操作函数的指针。指向当前页所对应的操作函数，函数中可定义该页菜单的功能，比如读取键盘值、画曲线、改变采样率等等。表示菜单对象的事件。

\* KidMenus 和 \* ParentMenus：子菜单和父菜单定义。确定每一个菜单对象在整个架构中所对应的具体位置。表示菜单对象的属性。

### 3.2.2 菜单控制

本系统中控制菜单执行操作的主要依靠 4 个按键，分别是“上”、“下”、“确定”和“取消”，通过这 4 个按键，可实现参数设置、模式切换和数据存储等操作，其流程如图 8 所示。

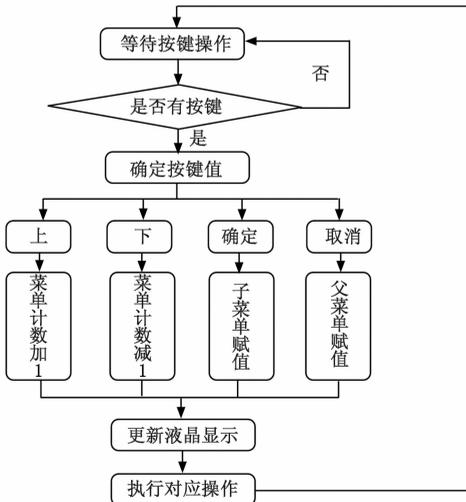


图 8 菜单执行流程图

CPU 循环扫描外部键盘的按键，当检测到有按键被按下时，按照返回值确定按键的具体内容。

- 1) 按下“上”按键，将菜单计数加 1，显示当前菜单的上一页内容。
- 2) 按下“下”按键，将菜单计数减 1，显示当前菜单的下一页内容。
- 3) 按下“确定”按键，将当前菜单的子菜单值赋给当前

菜单，显示当前菜单的下一层内容。

4) 按下“取消”按键，将当前菜单的父菜单值赋给当前菜单，显示当前菜单的上一层内容。

每一层菜单结构体中除了显示内容外，还具有对应的执行函数。每一项操作函数在菜单初始化的时候被赋值给结构体的函数指针，当菜单被更新后，主程序检测到更新标志位随即执行相应的操作函数。这样的编程思路将具体的事物抽象化，程序不再拘泥于每一个菜单项的内容与操作，而是总结整个菜单体系的共通点，从广义的角度去实现整个架构，最大程度避免了多层循环嵌套，在提升程序运行效率方面尤其显著。

### 3.2.3 菜单架构图

流量监测仪的待机画面为当前实时流量值和累计流量值，用户可手动或自动清零累计流量，无论使用哪种方式，都可在记录查询中回放先前的数据，同时也能将数据以曲线方式显示。在参数选择选项中，用户根据实际需求来设置测量周期、标定系数和存储接口等。菜单架构如图 9 所示。

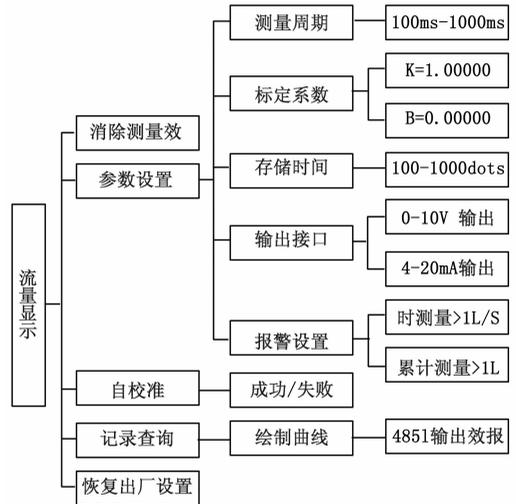


图 9 菜单架构示意图

### 3.3 温度补偿

我国幅员辽阔，南北差异较大，从温度上看，冬季极限可达零下 40℃ 低温，到了夏季又会达到 38℃ 以上高温，而野外作战会遭遇到更加极端的天气状况，因此对于设备的环境适应性要求非常高。温度会导致涡轮流量计的金属材料热胀冷缩，使叶轮与壳体内腔的贴合度发生变化，这一微小的变化就会引起标定系数 K 和 B 值的改变。表 1 反应了在 CL-15 型涡轮流量计不同油温下的频率响应。

表 1 涡轮流量计在不同油温下的频率响应

油缸 体积 /L	60℃ 油 充满时 间/s	40℃ 油 充满时 间/s	15℃ 油 充满时 间/s	60℃ 涡 轮频率 响应	40℃ 涡 轮频率 响应	15℃ 涡 轮频率 响应
50	24.33	23.97	23.38	278.13	293.62	320.68
50	32.31	31.75	31.22	209.08	221.29	240.2
50	59.37	58.10	56.63	113.10	120.20	131.1
50	113.07	108.17	103.79	58.65	63.80	70.75
50	398.08	398.56	392.64	15.56	16.13	17.72

分析表 1 数据可以看出, 60℃油温流量与频率的表达式为:  $F = 136.12Q - 1.53$ ; 40℃油温流量与频率的表达式为:  $F = 141.58Q - 1.64$ ; 15℃油温流量与频率的表达式为:  $F = 150.82Q - 1.73$ 。其中  $F$  为频率 (HZ),  $Q$  为流量 (L/S)。随着温度的升高, 金属材料热胀冷缩导致几何尺寸改变, 流量系数  $K$  呈逐渐减小趋势。

流量测试仪根据温度的不同对流量系数  $K$  和  $B$  作线性修正, 虽然温度补偿线性修正还无法完全消除温度造成的误差, 但测试精度较之前已得到大幅提高。如果希望得到更高的精度, 可采用多次函数拟合的方法, 然而数据计算量会以几何倍数增加, 鉴于流量监测仪采用的 CPU 是单片机, 故不考虑此方案。

#### 4 系统测试

为保证流量测试仪的精度, 我们采用称量法进行测试。液体介质油温 20℃, 容器容量为 60 L, 实际使用 50 L。根据温度密度表可知, 20℃时煤油的密度为 0.789 kg/L, 因此 50 L 煤油的重量约为 39.45 kg。测试设备在容器重量 (去皮) 达到 39.1 kg 时, 自动停止油泵运行。此时记录流量监测仪显示的累计流量数值, 与理论值作对比。对比结果如表 2 所示。

表 2 20℃流量测试表

油缸体积 /L	油充满时间 /s	平均流量 /(L/s)	流量监测仪累计流量 /L
50	23.43	2.134	49.88
50	27.87	1.794	49.95
50	46.59	1.073	50.07
50	104.16	0.480	50.05
50	378.78	0.132	49.90

加热后使油温升高到 40℃, 其余测试条件相同, 结果如表 3 所示。

表 3 40℃流量测试表

油缸体积 /L	油充满时间 /s	平均流量 /(L/s)	流量监测仪累计流量 /L
50	24.05	2.079	50.09
50	28.31	1.766	50.12
50	47.06	1.062	50.17
50	106.48	0.469	49.91
50	388.12	0.128	49.85

加热后使油温升高到 60℃, 其余测试条件相同, 结果如

表 4 所示。

表 4 60℃流量测试表

油缸体积 /L	油充满时间 /s	平均流量 /(L/s)	流量监测仪累计流量 /L
50	24.85	2.012	50.12
50	29.14	1.715	50.08
50	45.84	1.090	49.95
50	103.66	0.482	49.88
50	384.94	0.130	49.97

对比三组实验数据发现, 经过温度补偿后的精度显著提高。在三种温度环境下, 流量监测仪测得的累计流量最大偏差在不同流速状态下分别为:  $\pm 0.12$  L、 $\pm 0.17$  L、 $\pm 0.12$  L, 对应的满量程误差率为:  $\pm 0.24\%$ 、 $\pm 0.34\%$ 、 $\pm 0.24\%$ , 可以看出, 不同温度环境下, 累计流量的误差率已经降低到  $\pm 0.5\%$  以下, 能够满足导弹发射车流量监测需求。

#### 5 结论

本文介绍了一种为满足某型导弹发射车的智能流量监测仪, 能够适应恶劣气候条件。实验结果表明, 测试仪运行稳定, 具有精度高、抗干扰和温度适应性强等优势, 可以满足该型导弹发射车对于流量监测方面的需求。经过近一年的野外实战测试, 在各种环境下性能优良, 工作稳定可靠。人机界面设计完善, 用户操作简便, 容易上手。由于智能流量测试仪出众的性能指标, 可在船舶、工业控制、机器人等领域出现日益广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 钟兴福, 等. 用涡轮流量计测量多相流流量 [M]. 仪器仪表学报, 2002.
- [2] 杨有涛, 等. 涡轮流量计 [M]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
- [3] 徐宏华. 现场总线与工业以太网技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [4] 吴伟. AVR 单片机实用 C 语言程序设计与典型实例 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [5] 康华光, 等. 电子技术基础模拟部分 (第六版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [6] 丁玉美, 高西. 全数字信号处理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [7] 周金芝, 杨明. 基于 RS-485 总线的土壤湿度监控系统设计与实现 [J]. 湖北文理学院学报, 2016.

(上接第 109 页)

- [9] Bobrovskiy S, Barrios R, Giggenbach D, et al. Efal; Edrs Feeder Link from Antarctic Latitudes - System Architecture and Operations Concept [A]. International Conference on Space Optical Systems & Applications [C]. Pasadena, CA, 2014; 1-12.
- [10] Sudo Y, Kohata H, Tomita E, et al. Ka-band high data rate transmission tests for Drts follow-on mission [A]. The 29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference [C]. Nara, Japan, 2011.
- [11] Yamakawa S, Hanada T, Kohata H. R&D status of the next gen-

- eration optical communication terminals in Jaxa [A]. 2011 International Conference on Space Optical System and Application [C]. Santa Monica, CA, 2011.
- [12] 武颖, 郑戈, 卢满宏. 中继用户终端在运载火箭测控领域中的应用 [A]. 全国遥测遥控技术年会论文集 [C]. 苏州: 2010; 69-75.
- [13] 何雨帆, 王家松, 李远平. 基于北斗一号的近地卫星天基测控技术及应用 [J]. 武汉大学学报, 2012, 37 (4): 441-444.
- [14] 王家胜. 中国数据中继卫星系统及其应用拓展 [J]. 航天器工程, 2013, 22 (1): 1-6.