

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.01.008

基于嵌入式的差压式容积补偿气体 泄漏检测装置的研究*

熊四昌, 李 栋, 高玉科, 黄 坚

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对常规差压式气体泄漏检测装置在各种被测容器容积未知的场合不能很好地应用的问题,提出了基于差压式容积补偿法原理的嵌入式控制系统的研究。设计中采用了具有较高处理速度的 S3C2440 作为主控制器,在结合模拟信号前端采样滤波电路、LCD 触摸屏、串口控制终端、以及比例阀、电磁阀、步进电机等驱动电路的基础上,搭建了硬件结构,在 Linux2.6.30 内核下编写了相关驱动并使用 Qt/E 实现了人机交互界面。最后,通过与另一套使用高精度研华 USB4716 数据采集卡开发的泄漏检测系统进行了对比分析。实验及研究结果表明,该嵌入式系统工作稳定,误差保持在允许范围以内,测量结果可信度比较高。

关键词:容积补偿;泄漏检测;S3C2440;嵌入式系统

中图分类号:TH863

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)01-0038-05

Differential pressure volume compensation leak detection system based on embedded system

XIONG Si-chang, LI Dong, GAO Yu-ke, HUANG Jian

(The Ministry of Education Key Lab of Mechanical Manufacture & Automation, Zhejiang
University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem that the differential pressure gas leakage detection system can't be used in some volume unknowable tests, a new device based on the principle of differential pressure volume compensation leak detection was hoped to solve the problem effectively. The S3C2440 which has a high processing speed was used in the embedded system design, and combined with some related circuits, like the analog circuit, proportional valve circuit, and stepper motor driver circuits, the hardware structure was provided. The software part was designed on the Linux 2.6.30 kernel, some drivers programs were contained, a human interface was built on Qt/E kits. Finally, some comparative analysis were made between these embedded system and another similar system worked on PC. The results indicate that the system works stably and the relative error always occurs in allowed range, so it satisfies the portable and convenient function and has practical worthiness.

Key words: volume compensate; leakage detect; S3C2440; embedded system

0 引 言

差压式气体泄漏检测作为泄漏检测的一种比较精确的方式被业界广泛地采用^[1-2]。差压法的基本原理是检测一段时间内被测容器内的压力变化,再结合被

测容器的容积大小来近似计算泄漏率^[3-5],这就使得它的应用范围非常有限。但是这种方法本质上是对泄漏率微分的近似,要受检测时间和检测压力的双重限制,所以在实际测试中要经过多次试验以选取最优搭配。因此在大多数情况下这种检测方法只适用于生产线上

收稿日期:2013-08-23

基金项目:浙江省科技计划资助项目(2008C21146);浙江省重中之重学科开放基金资助项目(未提供)

作者简介:熊四昌(1960-),男,江西南昌人,博士,教授,硕士生导师,主要从事机电检测与控制方面的研究。E-mail:lxllidong@yeah.net

大批量的检测,而不能被灵活地应用在各种被测容积未知的场合。

然而基于差压式的容积补偿法却巧妙地避开了必须知道容积的限制,使得检测更加灵活。嵌入式容积补偿气体泄漏检测充分利用了高性能微处理器在数据分析处理上的优势,使得检测更为方便快捷。

本研究主要探讨基于嵌入式的差压式容积补偿气体泄漏检测装置的研究。

1 差压式容积补偿法的基本原理

差压式容积补偿气体泄漏检测法是在差压法的基础上发展起来的,其基本原理是在被测容器一侧加上补偿气缸,气缸的运动由步进电机和直线导轨的组间间接实现^[6-7](容积补偿法结构图如图1所示)。电路上把MCU、差压传感器、位移传感器、温度传感器以及驱动电机等连接成闭环。在检测时,MCU不断地检测当前差压值,然后根据内置算法对步进电机进行相应控制,而步进电机随即又把自身的正、反转动通过直线导轨转化为对汽缸的正向或负向的容积补偿,如此反复。当系统处于动态平衡状态时,可以认为被测容器内的压力恒定。此时,泄漏率就等于补偿气体的流量,也即气缸体积的变化率。

容积补偿法泄漏率计算公式如下:

$$Q_L = \frac{\Delta V_L}{\Delta t} = \frac{\pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 l \times 10^{-3}}{\Delta t} = \frac{\pi d^2 l}{4 \Delta t} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: d —气缸直径,mm; l —气缸进给位移,mm; ΔV_L —容积补偿量,mL。

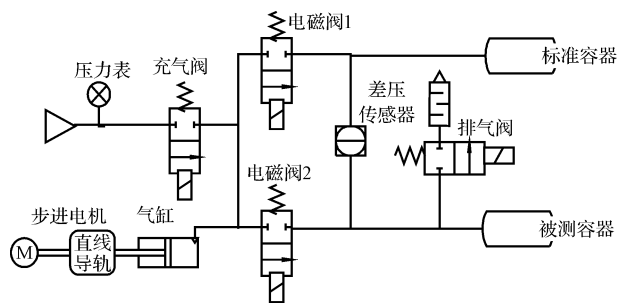


图1 容积补偿法结构图

容积补偿法不仅继承了比较差压法的高精度,而且理论上不需要知道被测容积大小,当两个容器容积相差不大时都可以通过延长测试时间以抵消温度的影响。因此用容积补偿法检测泄漏率时,系统的测量精度主要取决于差压传感器的分辨率和系统的频响特性,在条件允许的情况下要尽可能选择窄量程、高分辨率的差压传感器,同时注意改善系统频响特性。

2 系统硬件整体设计

系统硬件框图如图2所示。

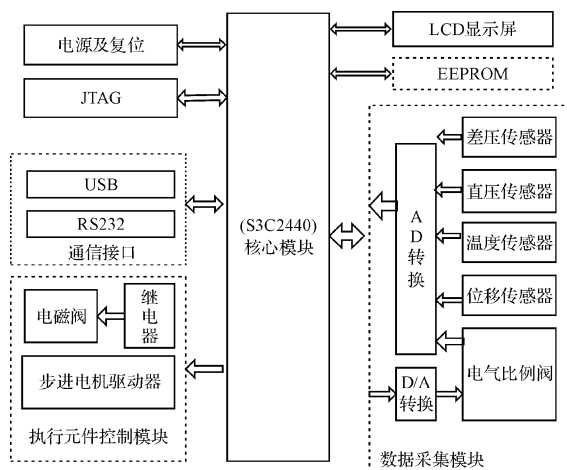


图2 系统硬件框图

2.1 ADC转换电路设计

2.1.1 4 mA ~ 20 mA 模拟信号前端处理

考虑到所用的差压变送器和温度变送器的输出信号都是4 mA ~ 20 mA 电流环信号,而AD7949是一款接收4/8差分或单极性电压信号的14位A/D转换器,这就需要首先把电流信号转化为单极性电压信号。一般情况可以考虑直接串250 Ω 电阻得到1 V ~ 5 V电压,但这样一来就不能充分利用A/D转换器的转换量程,相当于损失了20%的精度。况且通常PulSAR型A/D转换芯片即使工作正常也不能100%达到标称的分辨率,例如AD7949标称14位,但是有效分辨率(No missing codes)只有13位。所以本研究综合以上因素,把4 mA ~ 20 mA转换为0 ~ 5 V(如图3所示)。

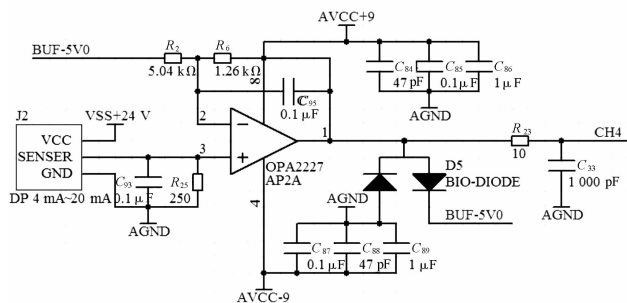


图3 差压传感器输出4 mA ~ 20 mA转0 ~ 5 V电路

2.1.2 ADC电源设计和通讯隔离

系统整体采用单一5 V电源供电,为了降低干扰,控制部分和ADC电路部分隔离供电。其中,控制执行部分使用5 V和3.3 V供电,ADC部分的使用经过隔离变压转换后的 ± 9 V。

AD7949 芯片采用 2.7 V ~ 5.5 V 电源供电,为了减少干扰,该系统的模拟部分、数字部分以及参考电压部分分别单独供电,最后用磁珠把模拟地和数字地在一起连接起来。需要注意的是,参考电压选择最大 5.0 V (BUF-5V0),而模拟部分电源采用 5.25 V,这是因为如果参考电压和供电电压用同一个电源,就会影响参考电压的稳定;其次参考电压选的越高则单位分辨 LSB 越大,这对提高精度是很有利的。

主控制器通过 SPI 接口控制 AD7949 读/写,采用 ADuM3471 进行通讯隔离。ADuM3471 在 A/D 转换电路一侧为 5 V 供电,在主控制器一侧为 3.3 V 供电。为了抵消信号线路上的电感,可在每条讯号线上接 1 000 pF 的电容。另外,最好在数据输出端 DO 接上拉电阻以保证通讯可靠。

2.2 LCD 和控制驱动电路

群创 7 寸屏是一款分辨率为 800 × 480 且性价比很高的显示器,工作频率为 3.84 MHz,采用 FPC 标准 40 接口跟主控制器连接。由于 GPIO 输出电压 3.3 V 不能直接驱动电磁阀和步进电机,必须使用电平转换电路把 3.3 V 转换为 5 V,再用 ULN2003 复合晶体管阵列提高输出电流以驱动电磁阀、比例阀和步进电机。

通讯电路采用两个 RS232,一个作为主控制台,一个作为和其他 PC 通讯接口。USB 电路作为烧写和数据下载接口,RST 电路使用一片 MAX811,能在需要复位时产生一个 High-Low 动作迫使系统复位。

3 系统软件设计

系统软件基于 Linux2.6.30 内核开发^[8-10],部分驱动设计如下。

3.1 SPI 总线的 AD7949 驱动

AD7949 是一款可编程的模数转换芯片,可以通过内置的 14 bit 配置寄存器 CFG 对转换模式进行配置。这里配置 $\text{CFG}[13:0] = 0x3e4e$,表示选择的模式为:

- (1) 输入单极性以 GND 为参考的信号,按序采样;
- (2) 采用内部附加电阻形成 1/4 带通滤波;
- (3) 采用外部参考电压,不使用内部缓冲,不开启温度检测;
- (4) 不读回配置寄存器 CFG 的内容。

因为差压信号和位移信号都是低频信号,本研究采用内部 1/4 带通滤波,但是这样一来采样速度也下降了 3/4,所以实际上最大采样速度为 62.5 kSPS。另

外要注意的是,在刚上电时 CFG 的值是不确定的,需要通过两次空转换来更新 CFG 寄存器的值。

AD7949 的驱动属于字符型驱动,程序主体有:

(1) AD7949 驱动模块的加载及卸载:

```
/* 定义设备结构体
struct AD7949_dev_t {
    struct cdev cdev;
    ...
} AD7949_dev;
/* 设备初始化,加载设备驱动
static int _init AD7949_init( void )
{
    cdev_init( AD7949_dev.cdev, &AD7949_fops ); /* 对 cdev
进行初始化 */
    AD7949_dev.cdev.owner = THIS_MODULE;
    /* 获取设备号 */
    if ( AD7949_major ) {
        register_chrdev_region( AD7949_dev_no, 1, DEV_AD7949 );
    } /* AD7949 设备注册 */
    else {
        alloc_chrdev_region( AD7949_dev_no, 0, 1, DEV_AD7949 );
    }
    ret = cdev_add( &AD7949_dev.cdev, AD7949_dev_no, 1 );
    ...
}
/* 卸载设备驱动模块函数 */
static void _exit AD7949_exit( void )
{
    unregister_chrdev_region( AD7949_dev_no, 1 ); /* 释放
AD7949 占用的内存空间、设备号 */
    cdev_del( AD7949_dev.cdev ); /* 对设备进行注销 */
    ...
}
```

其中,static int _initAD7949_init(void)是初始化函数,主要完成两个工作,首先配置 SPI 相关寄存器,选择 SPI 的工作方式并申请动态设备号。接着初始化 AD 的工作方式,即往 CFG 寄存器中写入控制字节。

(2) 内核与驱动的接口 file_operations 的实现^[11-12]。

file_operations 结构体中的函数是驱动与内核的接口,用户层就是通过这些函数来实现 Linux 系统调用。结构体 file_operation 中的指针是一个函数跳转表,指针所指向函数的初始化是设计驱动的重点所在,这些指针所指向的函数定义了对硬件设备的操作。应用层通过主设备号 (major) 和次设备号 (minor) 由系统调用找到相应的驱动程序,然后找到 file_operations 结构体

和相应设备操作的函数指针。驱动的实现也就是完成这些指针指向函数对设备读写控制等的操作。该设计采用 SPI 接口对 AD7949 进行访问,相应的 file_operations 结构体如下:

```
int AD7949_open( );
int AD7949_release( );
ssize_t AD7949_read( );
ssize_t AD7949_write( );
struct file_operations AD7949_fops =
{
    open:AD7949_open,
    release:AD7949_release,
    read:AD7949_read,
    write:AD7949_write;
}
```

其中,AD7949_read 是把转换后结果从内核空间读入到用户空间;AD7949_write 则是把数据从用户空间传递到内核空间,主要实现对 CFG 的写操作。AD7949_open 完成对 AD7949 初始化操作,AD7949_release 注销释放节点。

3.2 I²C 总线的 AT24C04 和 DA5602 驱动

在 Linux 内核中,因为一条总线上可能要同时挂载多个设备,而对每个设备编写一个特定的驱动的方法显然不合理^[13]。纵观 Linux 内核可知,普遍体现着一种分层的思想,I²C 驱动也不例外,即在主控驱动跟设备驱动中间加上一层通用的接口,这样特定的设备驱动只需访问中间层通用的接口就可以了。这种分层的写法在嵌入式 S3C2440 中移植的 Linux 内核中的具体实现,就是在 i2c-s3c2410.c 和设备驱动 i2c-dev.c 中间隔了一层 i2c-core.c 驱动程序调用接口。Linux 内核提供的 i2c-dev.c 有两种读写时序,如表 1、表 2 所示。

表 1 单开始信号时序

开始	地址	数据	停止	空闲
----	----	----	----	----

表 2 多开始信号时序

开始	地址	数据	重复 开始	地址	数据	停止	空闲
----	----	----	----------	----	----	----	----

其中,read(),write()函数只适合于单开始时序,而不适合于多开始时序。另外 read(),write()只适用于 i2c 算法的情况,而不适合于 smbus 算法的情况,但是 ioctl()两者都可以适用,综上分析对设备的读/写即可用 ioctl()来实现。

本研究采用一片 4 K 外扩 EEPROM 芯片 AT24C04 来存储数据。DA5602 为数模转换芯片驱动比例阀用的,这两款芯片都是采用 I²C 协议读写,因此它们的驱

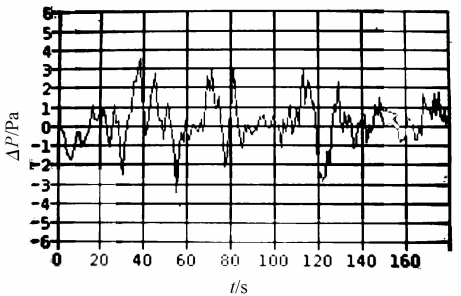
动程序的核心部分是类似的。对 AT24C04 和 DA5602 的驱动可以直接在应用层实现,关键是用 ioctl()对以下两个数据结构进行操作:

```
struct i2c_msg{
    unsigned short addr;
    unsigned short flags;
    unsigned short len;
    unsigned char * buf;
}
struct i2c_rdwr_ioctl_data{
    struct i2c_msg * msgs;
    int nmsgs;
}
```

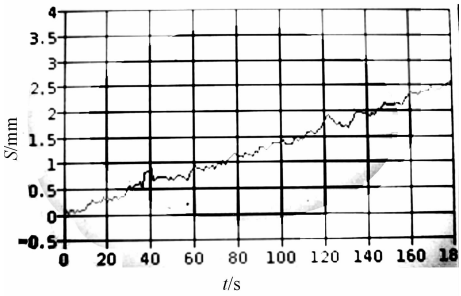
另外需要注意的是,由于几种设备共用 I²C 总线,为了实现各部分的可靠工作,必须给 SCLK 和 SDO 加上拉电阻。

4 实验结果分析对比

本研究选择一套在 PC 机上使用 VS2010 开发的控制系统作为对照组实验,该系统使用研华 USB4716 数据采集卡采集数据,并且经过标定。在实验中,两套系统使用同一套气路装置,包括两个固定容积为 800 mL 的被测容器和标准容器和电磁阀等。测试中嵌入式系统设定阈值为 ±5 Pa,环境温度为 26 ℃,分别在 0.3 MPa 和 0.4 MPa 气压下进行测试,相应的差压及位移变化曲线分别如图 4、图 5 所示。



(a) 0.3 MPa 下的差压变化曲线



(b) 0.3 MPa 下气缸位移变化曲线

图 4 0.3 MPa 下气缸差压及位移变化曲线

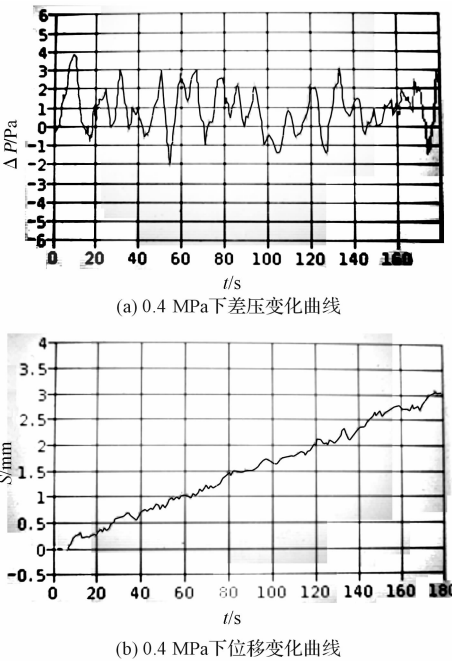


图 5 0.4 MPa 下差压、位移变化曲线

从图 4 (b)、5 (b) 中可以看出,在检测时间为 180 s,检测压力为 0.3 MPa 和 0.4 MPa 的条件下气缸活塞杆位移分别为 2.65 mm 和 3.14 mm。被测容器的泄漏率可由公式(1)计算出来,计算结果如表 3 所示。

表 3 容积补偿泄漏检测结果参数

检测压 力/MPa	气缸位 移/mm	嵌入式泄漏率 /(mL·min ⁻¹)	PC 机上泄漏率 /(mL·min ⁻¹)	相对误差 /(%)
0.3	2.65	0.278	0.286	2.80
0.4	3.14	0.329	0.340	3.24

5 结束语

(1)由以上分析可知,在 0.3 MPa 和 0.4 MPa 的实验条件下,差压在 ±4 Pa 范围内波动,气缸位移曲线与预期结论一致呈直线趋势,实验结果表明系统运行稳定。

(2)在相同的检测压力下,基于嵌入式的容积补

偿测试与 PC 机测试的泄漏率存在微小差异,但是误差都在 3.5% 以内,因此该系统的检测结果可靠性比较高。

(3)另外,本研究中的差压分辨率还是不够,如果采用更高分辨率的 A/D 转换器,并在滤波电路和系统响应上做出改进,测量精度应该会有所提高。

参考文献 (References):

[1] 纪春华,彭光正,葛楠. 流量式泄漏检测仪的设计与实验研究[J]. 液压与气动,2009(9):73-76.

[2] 彭光正. 气密性检测技术现状及发展趋势[J]. 机床与液压,2008,36(11):172-174.

[3] 周凯. 汽车油箱检漏系统的研制[D]. 天津:天津工业大学机械工程学院,2007.

[4] 黎启柏,卢广权. 气体泄漏检测方法及其工程应用[J]. 机床与液压,2005,33(11):130-132.

[5] MARTIN L. Method for Leak Testing and Leak Testing Apparatus[P]. US: 7260981,2007-08-28.

[6] 洪孝鹏. 基于压力补偿的恒压式检漏仪及检测效率的研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2009.

[7] 熊四昌,黄林,金振峰. 基于容积补偿的差压式高精度气体检漏装置的研究[J]. 机床与液压,2008,36(11):109-111.

[8] 刘迪,王冬梅. 基于 S3C44B0X 芯片的单回路 PID 控制器参数整定[J]. 电子设计工程,2011,19(12):85-87.

[9] 陈曦,吕湘晔. 基于嵌入式 Linux 新型模块化工业控制器设计[J]. 仪表技术与传感器,2010(11):27-29.

[10] 汪维钧. 一种新型的气密测试装置[J]. 机械设计与制造,2008(5):196-198.

[11] 管秋梅,胡仁杰. 基于嵌入式 Linux 的网络设备驱动设计与实现[J]. 电子工程师,2007,3(3):77-80.

[12] 胡哲光. 基于 S3C2440 与 OV9650 的光嵌入式监控系统设计[J]. 轻工机械,2012,30(2):50-53.

[13] 孙天泽,袁文菊. 嵌入式设计及 Linux 驱动开发指南—基于 ARM9 处理器[M]. 3 版. 北京:电子工业出版社,2009.

[编辑:张翔]

本文引用格式: