

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.08.008

基于嵌入式 Linux 的模拟泄漏控制系统设计^{*}

熊四昌, 毛国宾, 唐浩然

(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:针对在标定气体泄漏检测设备的检测精度时,传统标定平台存在操作过程繁琐、测量误差大和便携性差等问题,研究分析了模拟泄漏的原理,建立了模拟泄漏率与步进电机转速之间的关系,设计了一种基于嵌入式 Linux 的模拟泄漏控制系统。根据系统的功能需要设计了系统的硬件电路,并基于 Linux + Qt 的开发环境设计了系统的控制程序和人机交互界面;通过对 S3C2440 定时器 TOUT0 端口的 PWM 脉宽调制,准确控制了步进电机的转速;同时采用 S3C2440 的外部中断 EINT0 准确统计了光电编码器发出的脉冲数,实时得到了实测模拟泄漏率,并对其误差和实时稳定性进行了实验分析。实验结果表明:该系统达到了标定气体泄漏检测设备时对模拟泄漏精度和稳定性的要求,可为气体泄漏检测设备提供方便可靠的标定平台。

关键词:步进电机;嵌入式 Linux + Qt;PWM 脉宽调制;模拟泄漏

中图分类号:TH863;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)08-0823-05

Analog leakage control system based on embedded Linux

XIONG Si-chang, MAO Guo-bin, TANG Hao-ran

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

Abstract: Aiming at calibrating the detection accuracy of gas leak detection equipment, the traditional calibration platform has the problem of complicated process, large measurement error and poor portability, the principle of simulation leakage was studied and analyzed, and the relationship between simulated leakage rate and speed of stepper motor was established, a kind of leakage control system simulation based on embedded Linux was designed. The hardware circuit of the system was designed around the function of the system, and the control program and man-machine interaction interface based on the development environment of Linux + Qt was designed. Through the pulse width modulation on the TOUT0 port of S3C2440, the stepper motor speed was controlled accurately, and used the external interrupt EINT0 of S3C2440 count the number of pulse from photoelectric encoder accurately, real-time obtained the measured simulation leakage rate, and its error and stability were analyzed. The experimental results show that the system meets the requirements of simulation leakage accuracy and stability when calibrating gas leak detection equipment, and provides a convenient and reliable calibration platform for gas leak detection equipment.

Key words: stepper motor; embedded Linux + Qt; pulse width modulation; simulation leak

0 引 言

泄漏检测也叫密封性检测或试漏^[1]。随着工业与日用产品的复杂程度和对安全性要求的提高,气体泄漏检测技术在生产生活中起着重要作用^[2]。在汽

车、航空、燃气具、石油、化工和物流运输等行业,都需要对相关产品的密封元件进行气密性检测,从而衡量和保证产品的质量和安全性能^[3-5]。为了满足这些行业对气泄漏检测精度的更高要求,国内外机构相继提出了一系列的检测方法和开发了相应的检测设备。气体泄漏检测方法包括灵敏度高的超声波法、放射性同

收稿日期:2017-12-03

基金项目:浙江省科技计划资助项目(2008CZ1146)

作者简介:熊四昌(1960-),男,江西南昌人,博士,教授,研究生导师,主要从事机电检测与控制方面的研究。E-mail:xsc98@163.com

位素法、氦质谱检测法^[6]、能定量的差压法和近期提出的容积补偿法^[7]。气体泄漏检测设备如:美国 USON 的 4000 系列测漏仪、德国 JWFROEHLICH 公司的 MPS5 系列试漏仪、天津长野福田公司设计的检漏仪 FL-800。对于这些基于不同检测方法而研制的国内外气体泄漏检测设备,检测精度一直是判断它们优劣的重要依据之一。目前国外的气体泄漏检测设备较为先进,精确度可达 0.01 ml/min,测量误差在 $\pm 2.5\%$ 左右;而国内的气体泄漏检测设备精确度也可达到 0.01 ml/min,但误差较国外设备较差,在 $\pm 3\% \sim \pm 6\%$ 不等^[8]。

对于气体泄漏检测设备的标定,目前多采用的是预混合标定气体、渗透、交叉标定等方法。这些传统的方法都存在着操作过程复杂、测量误差大、对设备要求较高和便携性差等缺点,严重限制了泄漏检测设备的研制周期。

为解决上述问题,并考虑到目前气体泄漏检测设备的参数要求,本文将基于嵌入式 Linux 操作系统,设计一种工作压力范围为 0 ~ 0.8 MPa 的轻量型高精度的模拟泄漏控制系统,为标定气体泄漏检测设备提供方便并且可靠的标定平台。

1 模拟泄漏结构原理及其设计

1.1 模拟泄漏结构原理

模拟泄漏结构的主要功能是为了将步进电机的旋转运动转化为气缸活塞的直线运动,其结构原理图如图 1 所示。

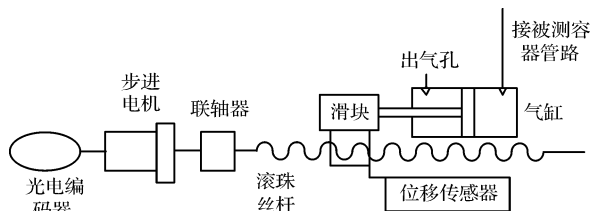


图 1 模拟泄漏结构原理图

当步进电机转动时,通过联轴器带动滚珠丝杆转动,丝杆与滑块将旋转运动转换为气缸活塞的直线运动。若气缸右端与被测容器连接,控制气缸活塞向左做直线运动,被测容器内的气体将会进入气缸的右端容腔,形成被测容器向外漏气的状态,从而实现控制系统的模拟泄漏。为了实时获取步进电机的精确转速,本研究在步进电机一端连接了增量式光电编码器进行测量,并使用位移传感器来检测气缸的位移量,对模拟泄漏量进行监控。

该系统中的模拟泄漏量计算公式为:

$$\Delta V = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 s \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: ΔV —模拟泄漏量,ml; d —气缸直径,mm; s —气缸位移,mm。

气缸位移 s 为:

$$s = n \times h \times \Delta t \quad (2)$$

式中: n —步进电机转速,r/min; h —滚珠丝杆的螺距,mm; Δt —检测时间,min。

步进电机转速 n 为:

$$n = \frac{f \times 60}{360^\circ} \cdot \chi \quad (3)$$

式中: f —脉冲频率,Hz; χ —步进电机驱动细分数; α —步距角,°。

联立(1,2)式,可求得模拟泄漏率 Q :

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi d^2 n h}{4} \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中: Q —模拟泄漏率,ml/min。

在式(4)中代入式(3),可得模拟泄漏率 Q 为:

$$Q = \frac{\pi d^2 f h \times 60}{4 \times \frac{360^\circ}{\alpha} \cdot \chi} \times 10^{-3} \quad (5)$$

1.2 模拟泄漏结构设计

通过式(4)可知:模拟泄漏率只由电机的转速决定,但在进行元器件选型时,需参考式(5)中与模拟泄漏率精度相关的参数,最后根据模拟泄漏的工作原理设计了模拟泄漏结构。

模拟泄漏结构实物图如图 2 所示。

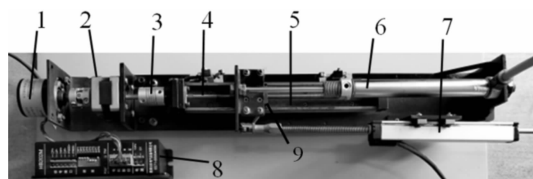


图 2 模拟泄漏结构实物图

1—光电编码器;2—步进电机;3—联轴器;4—滚珠丝杆;5—直线导轨;6—气缸;7—位移传感器;8—步进电机驱动器;9—滑块

由图 2 可看出整个装置结构紧凑、操作方便并极具便携性。

本研究设计选用型号为 35BYGH 系列的混合式步进电机,步距角为 1.8° 。

步进电机配备型号为 HB202M,细分数最高达 10 000 的步进电机驱动器。

气缸选用 SMC 公司的 MA16100 型气缸,内部泄漏不大于 10^{-5} atmcc/s。

编码器采用型号为 IHC3808 系列的增量式光电编码器,一圈脉冲数为 500。

滚珠丝杆选用螺距为 1 mm,行程为 120 mm 的日本 THK 公司 LM 系列引动器。

位移传感器选用 KTR 系列自复位式位移传器,量程为 0 ~ 100 mm,线性度 ± 0. 05%,重复精度小于 0. 01 mm^[9-10]。

2 控制系统硬件设计

2.1 总体设计

根据系统功能的需要,设计了模拟泄漏控制系统的硬件外围设备电路。它包括以 S3C2440 为中心的核心板模块、电源模块、人机交互模块、数据采集模块、执行元件模块、数据交互模块等。

模拟泄漏控制系统硬件框图如图 3 所示。

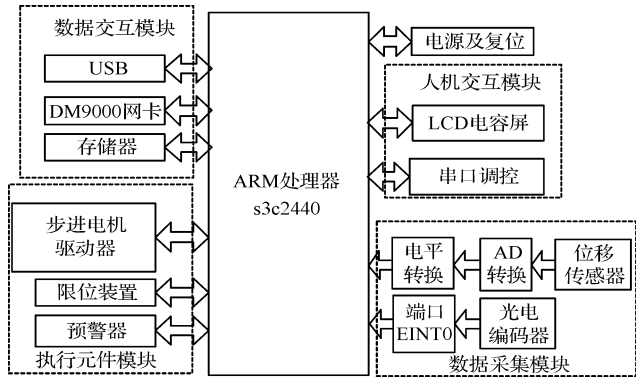


图 3 模拟泄漏控制系统硬件框图

2.2 步进电机控制电路设计

为控制步进电机的转速,首先需配置 S3C2440 内置定时器实现单位时间内脉冲数的调节,再通过步进电机驱动器对电机速度与方向进行控制。本研究采用 SN74LVC4245 进行电平 3.3 V 到 5 V 转换,同时采用 ULN2003 芯片提高 S3C2440 的 GPIO 引脚的电流输出能力。

电路设计如图 4 所示。

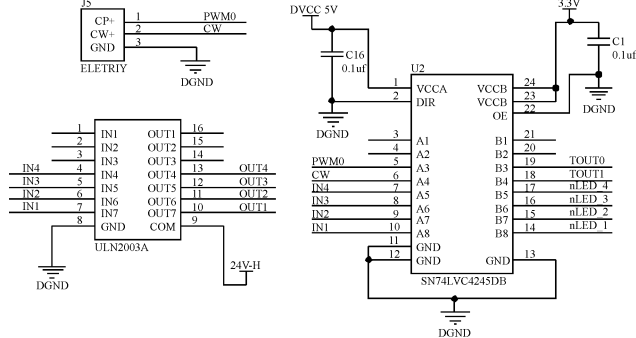


图 4 步进电机控制电路图

2.3 光电编码器的脉冲采集

型号 IHC3808 光电编码器原理是旋转一圈发出 500 个脉冲数,通常需要两步才能实现对编码器的计数。首先,对编码器的正、反转进行判断;其次,进行加、减计数^[11]。

控制器 S3C2440 通过外部中断 0 对光电编码发出的脉冲数进行计数。统计光电编码器发出的脉冲数,便可以求出步进电机的实测转速 n_x 为:

$$n_x = \frac{A}{N} \times \frac{60}{\tau} \tag{6}$$

式中: n_x —实测转速,r/min; A —单位时间内的脉冲数; τ —采集时间间隔,s; N —转一周光电编码器发出的脉冲数。

2.4 气缸活塞位移数据采集电路设计

气缸活塞位移采集主要由位移传感器与 16 位模数转换芯片 ADS8344 完成。ADS8344 将位移传感器采集的气缸位移信号进行 A/D 转换,并采用电压基准芯片 ADR445 为 ADS8344 提供 5V 的参考电压。

电路设计如图 5 所示。

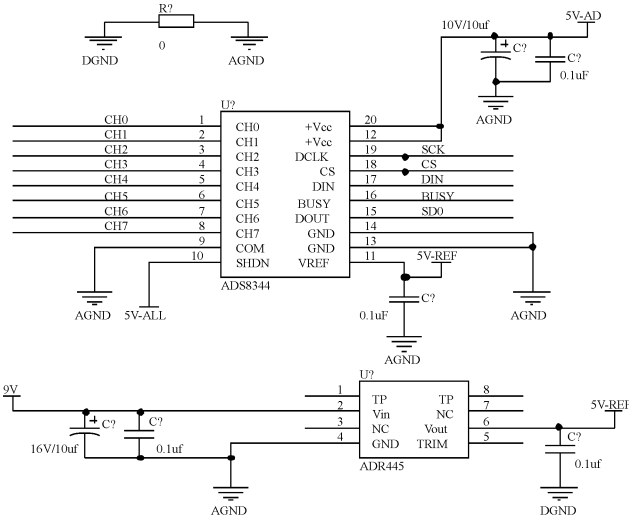


图 5 位移数据采集电路图

3 控制系统软件设计

3.1 PWM 脉冲宽度调制

系统采用的 S3C2440 的定时器 0、1、2、3 都具有脉宽调制功能^[12]。

其 PWM 时钟原理图如图 6 所示。

该设计选用定时器 0 的脉宽调制功能,通过调制 TOUT0 端口输出的脉冲信号的周期和占空比以获得所需的方波,精确控制步进电机的转速。

TOUT0 端口输入脉冲是由时钟 PCLK 先经过两次

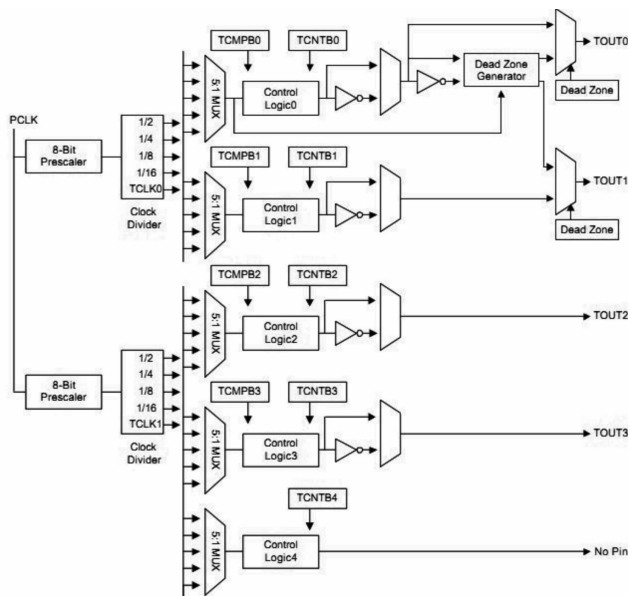


图 6 S3C2440 PWM 时钟原理图

分频,再通过设置比较缓冲寄存器 TCMPB0 而得到^[13]。TOUT0 端口输入脉冲频率越高,TOUT0 端口输出脉冲与目标脉冲的误差就越小。设计采用的 S3C2440 的时钟配置 PCLK 为 50 MHz,对寄存器的设置如下:

//设置预分频值 prescaler value = 15

TCFG0 &= ~ S3C2410_TCFG_PRESCALER0_MASK;

TCFG0 |= (16 - 1);

//设置分频值 divider value = 2

TCFG1 &= ~ S3C2410_TCFG1_MUX0_MASK;

TCFG1 |= S3C2410_TCFG1_MUX0_DIV2;

定时器 0 的时钟输入频率 $\text{Frequency} = \text{PCLK} / (\text{prescalervalue} + 1) / (\text{divider value}) = 50 \text{ MHz} / (15 + 1) / 2 = 1\,562\,500 \text{ Hz}$,它的输出频率是要根据步进电机的转速来设定的。若步进电机的转速为 $n(\text{r/min})$,则所需脉冲信号的频率 $\text{freq} = 10\,000n/60$,10 000 为步进电机驱动器的细分数。

//设置脉冲信号频率为 freq,占空比为 50%

$\text{tcnt} = \text{Frequency} / \text{freq};$

$_\text{raw_writel}(\text{tcnt}, \text{S3C2410_TCNTB}(0));$

$_\text{raw_writel}(\text{tcnt}/2, \text{S3C2410_TCMPB}(0));$

3.2 控制程序设计

模拟泄漏控制程序设计主要是在 Linux 及底层驱动的基础上进行交互界面、数据采集处理程序、驱动程序、执行元件控制和数据存储 5 个模块的设计。

系统软件的结构框图如图 7 所示。

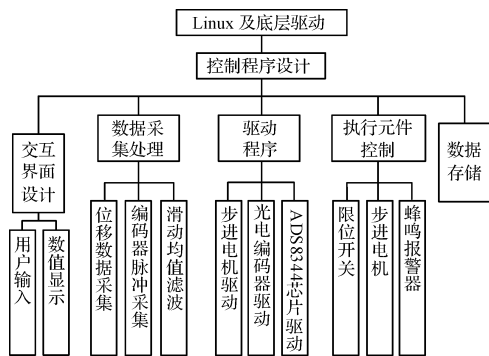


图 7 系统软件的结构框图

控制程序的功能主要是通过人机交互界面设置和显示模拟泄漏参数,控制执行元件,实时采集光电编码器和位移传感器的信号,并对其滤波之后计算相应实测模拟泄漏率,最后对相关数据进行存储。

完整的模拟泄漏控制程序流程图如图 8 所示。

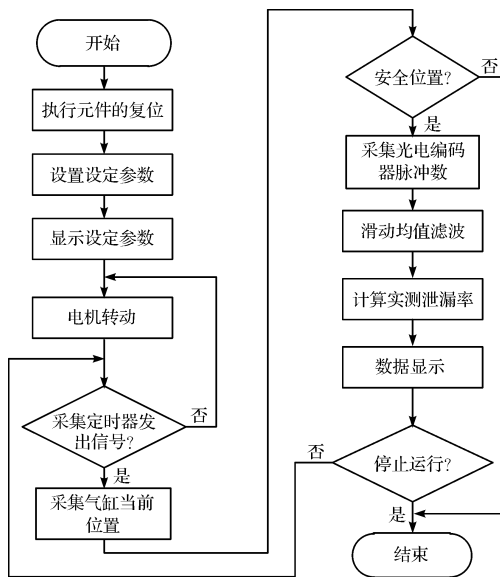


图 8 程序流程图

3.3 Qt 人机交互界面设计

为了更好地对参数进行设置和显示,方便操作,增加系统的人机交互性,笔者采用 QtCreator 设计了系统的交互界面。

系统交互界面图如图 9 所示。



图 9 系统交互界面图

界面主要是由参数设定、控制和实测显示 3 部分组成。参数设定是对步进电机转速及相对应的模拟泄漏率的设定,针对设定电机速度,设计了一个虚拟数字

键盘;控制部分针对步进电机的旋转方向、开始和停转进行控制;实测显示部分是针对步进电机可能出现的丢步现象而引入的光电编码器的实测数据进行显示,其数据为步进电机实测转动速度以及模拟泄漏系统的实测模拟泄漏率。

4 实验与结果分析

该系统是面向进行定量分析的微泄漏领域设计

表 1 模拟泄漏实验数据表

设定转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	设定泄漏率 $Q/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	位移传感器实测泄漏率 $\overline{Q_s}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	光电编码器实测泄漏率 $Q_x/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	Q_x 相对 Q 误差/(%)	Q_x 相对 Q_s 误差/(%)
1.0	0.201	0.198	0.199	0.995	0.505
1.13	0.227	0.228	0.228	0.441	<0.220
3.69	0.742	0.743	0.742	<0.067	0.135
3.69	0.742	0.744	0.742	<0.067	0.269
8.88	1.785	1.786	1.777	0.448	0.504
13.21	2.656	2.619	2.635	0.791	0.611
18.10	3.639	3.656	3.640	0.027	0.438
20.0	4.021	4.011	4.023	0.050	0.299
25.47	5.121	5.097	5.101	0.391	0.078
34.78	6.993	6.935	6.951	0.601	0.231
42.56	8.557	8.446	8.501	0.654	0.651
47.98	9.647	9.491	9.564	0.860	0.769
47.98	9.647	9.491	9.565	0.850	0.780
54.97	11.052	10.791	10.931	1.095	1.297
64.13	12.894	12.654	12.743	1.171	0.703

分析表 1 数据可知:设定泄漏率 Q 与实测的泄漏率 Q_x 、 $\overline{Q_s}$ 存在较大误差量,研究分析发现这主要是由于步进电机存在丢步和 PWM 脉宽调制输出的脉冲信号频率有误差所引起,故设定泄漏率 Q 不宜作为系统的实际模拟泄漏率。通过对比实验数据发现, Q_x 相对于 Q 、 $\overline{Q_s}$ 两者的误差在设定泄漏率为 0.201 ml/min ~ 9.647 ml/min 时在 0.8% 以内,且在设定泄漏率为 0.201 ml/min ~ 3.69 ml/min 时实测泄漏率 Q_x 与 $\overline{Q_s}$ 、 Q 非常接近,最大误差量只有 0.003 ml/min。实验过程中对同一设定泄漏率进行重复检测时, Q_x 差值不超过 0.001 ml/min。同时为分析 Q_x 的实时稳定性,对其在不同模拟泄漏率下进行连续 120 s 的实时检测。

其中, Q_x 为 4.023 ml/min 实验结果如图 10 所示。
由图中数据可知:实测模拟泄漏率 Q_x 的最大波动误差只有 0.149%。

基于上述分析可知:光电编码器实测泄漏率 Q_x

的,故在模拟泄漏率为 0.201 ml/min ~ 12.063 ml/min 区间进行实验。在实际应用过程中,气缸接被测容器的一端是承受着检测压力的,实验时将气缸一端接上 0.8 MPa 气源。本研究设定系统数据采样时间间隔为 1 s,实时对光电编码器和位移传感器进行数据采样以计算实测泄漏率。

实验结果如表 1 所示。

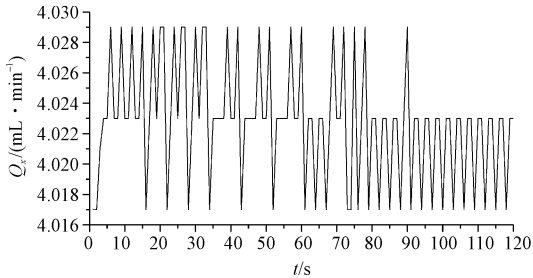


图 10 Q_x 为 4.023ml/min 实时检测图

误差小、精度高并具有良好的稳定性,达到了系统对精度和稳定性的要求,可以作为系统的实际模拟泄漏。

5 结束语

根据模拟泄漏原理,基于嵌入式 Linux 系统,本文设计了一种能精确稳定控制模拟泄漏的控制系统,内容主要包括对模拟泄漏结构设计,控制步进电机转速
(下转第 867 页)

本文引用格式:

熊四昌,毛国宾,唐浩然. 基于嵌入式 Linux 的模拟泄漏控制系统设计[J]. 机电工程,2018,35(8):◆-◆,◆.
XIONG Si-chang, MAO Guo-bin, TANG Hao-ran. Analog leakage control system based on embedded Linux[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(8):◆-◆,◆.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>