

# 基于模拟计算单元电路(ACU)的传感器非线性校正系统设计\*

刘辉军,袁 雷,李文军,吕 进  
(中国计量学院计量 技术工程学院,杭州 310018)

**摘要:**分析了三种传感器信号的非线性校正原理,结合利用 ACU 和运算放大器对称重传感器进行非线性校正的实例,详细介绍了利用模拟计算单元电路(ACU)产生非线性校正曲线的方法,并证明此方法理论上可以产生适合一般工程中出现的非线性函数。

**关键词:**传感器;非线性校正;模拟计算单元(ACU)

**中图分类号:**TP212 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1390(2006)11-0047-03

## Design of Non-linearity Correction of Sensor Based on Analog Computation Unit

LIU Hui-jun, YUAN Lei, LI Wen-jun, LV Jin

(College of Metrology Technology and Engineering, China Institute of Metrology, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** This paper analyzes three kinds of sensors signals non-linearity correction principle. The analog computation unit (ACU) and the operational amplifier were used in the application of the weighting system. The method of non-linearity correction based on ACU was introduced in detail. Theoretically, the method can be widely applied in design.

**Key words:** sensor; non-linearity correction; analog computation unit (ACU)

### 0 引言

在测量系统中,一般都存在非线性环节,尤其是在传感器测量系统中,由于传感器的特性曲线往往是非线性的,因此在不采取非线性校正措施的情况下,测量系统的输入与输出就不可能呈线性关系,这不仅给显示仪表的刻度标定造成困难,而且由于测量系统在整个测量范围内的灵敏度系数不一致,也给测量结果的处理带来不便。因此,在测量系统的设计过程中传感器信号的非线性校正显得极其重要,其校正方法通常有软件校正和电路补偿两种,对于不采用计算机的测量仪器,主要通过电路补偿的方法进行非线性校正。本文主要讨论了使用非线性补偿电路进行校正的方法。

### 1 校正原理

目前采用的非线性校正方法主要有以下三种。

#### 1.1 开环式非线性校正

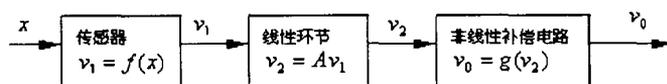


图 1 开环式非线性校正的原理框图

开环式非线性校正的原理框图如图 1,它的输入/输出关系为

$$v_1 = f(x) \quad (1)$$

$$v_2 = Av_1 \quad (2)$$

$$v_0 = g(v_2) \quad (3)$$

当  $g(v_2)$  与  $f(x)$  互为反函数时,有  $v_0 = Sx$ ,其中  $S$  为系统灵敏度。此方法的关键是当精度求很高时,要根据传感器的响应曲线构造一个复杂的线性化曲线  $g(v_2)$ <sup>[1]</sup>。

#### 1.2 闭环式非线性校正

闭环式非线性校正的原理框图如图 2,当放大器满足  $k \rightarrow \infty$  时,系统有如下输入/输出关系:

$$v_f = v_1 = f(x) \quad (4)$$

\* 国家质量监督检验检疫总局科技资助项目(计划编号:2002QK23)

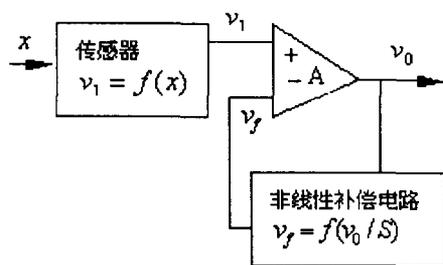


图 2 闭环式非线性校正的原理框图

$$v_y = f(v_0/S) \quad (5)$$

则有  $v_0/S = x$ , 即  $v_0 = Sx$ 。

此方法直接利用传感器的响应曲线  $f(x)$ , 不需要构造传感器的线性化曲线, 有利于提高系统精度。

### 1.3 增益控制校正

增益控制校正的原理框图如图 3, 放大器  $A_2$  的增益受程序控制, 是非线性的。当被测量为  $x_i$  时, 传感器的输出是  $v_{1i}$ ,  $A_1$  的增益

$$A_{v1}(v_{1i}) = \frac{Sx_i}{v_{1i}} \quad (6)$$

则有  $v_0 = v_{1i} \times A_{v1}(v_{1i})$ , 即  $v_0 = Sx$ 。

对放大器  $A_2$  的输出信号  $v_{2i}$  进行 A/D 转换, 把转换结果变成增益的存储器地址, 该地址中存放着对应的  $A_1$  的增益  $A_{v1}(v_{1i})$ , 当对所有被测量的增益均满足式(6)时, 系统就实现了线性化。此方法电路相对比较复杂, 且当测量精度要求较高时, 需要增益存储器的容量很大。

比较以上三种校正方法, 开环式非线性校正(方法 1)和增益控制校正(方法 3)中均直接对传感器的非线性曲线进行线性化处理, 当测量精度要求较高时, 需要大量复杂的计算, 因此这两种方法难以满足要求, 闭环非线性校正(方法 2)中, 我们并不对传感器的非线性曲线进行线性化处理, 通过高性能的 ACU 集成电路来产生传感器的非线性校正曲线, 从而避免了复杂的计算, 有效保证了测量的精度。

## 2 用 ACU 产生非线性曲线的基本方法

用二极管产生非线性曲线是最常用的方法, 但当非线性曲线比较复杂时, 电路需要的二极管数量很大, 并且需要复杂的计算。因此我们选用了一种模拟计算单元电路(ACU)来产生传感器的校正曲线。

### 2.1 ACU 的基本计算原理

目前模拟计算单元电路(ACU)有很多, 我们选用的 ACU(AD538AD)电路黑匣子引线如图 4。它有 3 个输入端、四个参数调整端和一个输出端, 输入/输出关系如下

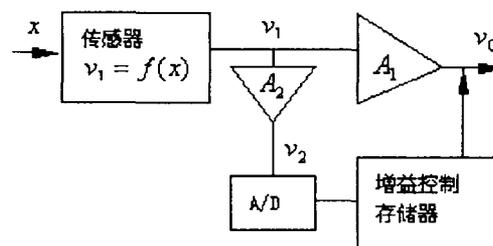


图 3 增益控制校正的原理框图

$$v_0 = v_y \left( \frac{v_z}{v_x} \right)^m \quad (7)$$

参数  $m$  可以在 0.2~5 之间调整<sup>[2,3]</sup>。

### 2.2 ACU 的基本应用

在式(7)中, 当输入端  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  和参数  $m$  取不同参数时可以得到不同的输入/输出关系, 因此可以产生各种校正函数。

### 3 应用实例

定量包装商品净含量的检定实质是按一定的检验规则进行抽样、测定净含量及评价的过程, 系统的设计包括称重单元、数据采集与处理单元, 其中如何实现定量包装商品的准确称量是系统设计的关键环节。称重单元采用应变式传感器, 其输出信号经过前置放大后送至 A/D 转换器, 然后经单片机通过 RS232 端口输入嵌入式处理器<sup>[4]</sup>。在称重单元的设计中, 难点之一就是线性电路校正的设计。

压力传感器的压力—电势表达式为

$$E = a_0 + a_1 \times p + a_2 \times p^2 + a_3 \times p^3 + \dots + a_n \times p^n \quad (8)$$

由此可见, 高幂次运算电路, 可用做线性校正, 电路运算次数越高, 线性精度也就越高, 但响应时间也随着提高, 一般只考虑到二次。

在线性校正电路中关键是平方电路的设计, 结合系统测量精度要求和电路的实现, 我们选择了闭环式非线性校正, 采用 AD538 产生非线性校正曲线, 这种集成电路使用三个输入、和, 而且有以下函数关系, 它作为平方电路不需要增加任何元件, 电路简单, 不需要构造传感器的线性化曲线, 最适合线性电路设计, 其运算精度为 0.5%, 动态范围宽, 并且有高精度基准电压, 提高了系统精度<sup>[5,6]</sup>。

实验中测得的传感器响应函数为, 与式(4)形式略有不同, 此时需要对 ACU 的输出进行调整, 在电路的设计中我们将 ACU 与运算放大器结合起来, 电路如图 4。

运算放大器的输出电压可由式(7)得

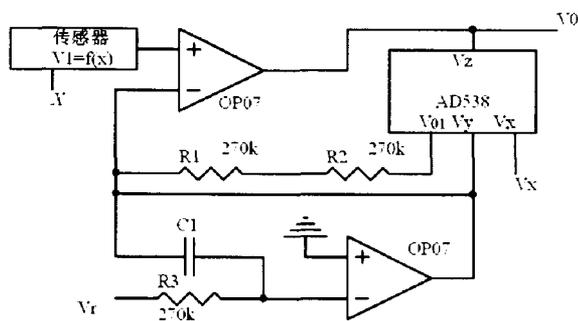


图 4 实验中使用的校正曲线产生电路

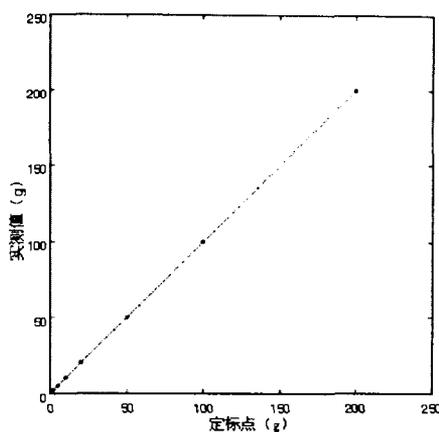


图 5 系统定标点定标值与实测值散点图

$v_{01}=v_y \left( \frac{v_0}{v_x} \right)^m$ , 通过简单的电路计算可推出得到

$$v_f = - \frac{\frac{R_3}{R_1} \left( \frac{v_0}{v_x} \right)^m}{1 + \frac{R_3}{R_2} \left( \frac{v_0}{v_x} \right)^m} V_R \quad (9)$$

调节  $m=2$  且  $R_1=R_2=R_3, V_R=-1V$  可得

$$v_f = \frac{\left( \frac{v_0}{v_x} \right)^2}{1 + \left( \frac{v_0}{v_x} \right)^2} \quad (10)$$

可见式(10)与传感器响应曲线完全一致,即  $v_0=Sx (S=10v_x)$ 。闭环的非线性校正系统和高性能的 ACU 集成电路的使用,极大地提高了系统精度,系统经浙江省称重技术研究所对定标点进行标准测试,结果如图 5,均方根误差为 0.068,达到了定量包装商品净含量计量检验规则(JJF1070-2000)的精度要求。

#### 4 结论

由于压力传感器产生的压力—电势曲线本身存在非线性,使得不施加线性校正电路实现高精度压力测量非常困难,这里介绍了用 ACU 产生非线性曲线校正,从而给出了一种通过硬件方式进行非线性校正

的新方法,并取得了较理想的效果。

从理论上分析,对于一般可以化为形如式(11)的多项式的非线性函数  $f(x)$ :

$$f(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\dots+a_ix^i+\dots+a_nx^n \quad (11)$$

式(11)中任一项均可以用若干个 ACU 实现,个 ACU 单元的输出通过线性叠加就可以得到上式的非线性函数。

#### 参 考 文 献

- [1] 张国雄,沈生培.仪器测量电路[M].北京:机械工业出版社,1991.
- [2] AD 公司.ACUC 使用手册 [EB/OL].http://www.analog.com, 1999-12/2002-10-04.
- [3] 黄重庆,刘靖.一种实用波导衰减系数测量系统的设计[J].现代电子技术,2005,(12):114-116.
- [4] 吕进,毛谦敏,刘辉军等.移动式现场定量包装商品净含量检定系统的研制[J].计量学报,2006,27(4):1-4.
- [5] 刘剑平,蔡红英,吕秀珍.称重传感器弹性元件结构参数对非线性误差的影响[J].机械工程师,2005,(9):94-95.
- [6] 孙慧卿,郭志友.传感器的误差补偿技术[J].传感技术学报,2004,(1):90-92.

作者简介:

刘辉军(1979-),男,硕士,中国计量学院计量技术工程学院讲师,从事智能测试技术研究。

收稿日期:2006-09-16

(丘源 编发)

(上接第 53 页)

#### 参 考 文 献

- [1] 王学伟. HE488 PC GPIB 总线控制器操作指南[Z]. 1996.
- [2] 周宇,顾亚平,陈光祚. PCI—GPIB 控制器的软件设计与实现[J]. 测控技术,2006,(1):40-42.
- [3] 马永锋,商庆华,李东滨,马怀俭. GPIB 与 RS232/485 和并行口转换的设计[J]. 哈尔滨理工大学学报,2000,(6):93-95.
- [4] 王学伟,单勇军. 个人计算机 IEEE488 操作语句设计及在 Quick BASIC 语言中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报,1997,(3):55-58.
- [5] 王学伟,赵乃武. IEEE488 卡 GPIB 操作语句设计及在 C 语言中应

用[J].电测与仪表,1996,(11):23-26.

[6] 张小琴,林建辉. LabVIEW 环境下的 GPIB 总线虚拟仪器开发[J]. 中国测试技术,2004,(1):53-58.

[7] 杨晶菁,顾亚平,陈光祚. VISA 事件机制的设计与实现[J]. 中国测试技术,2006,(2):114-116.

作者简介:

王学伟(1958-),男,教授,博士生导师,研究方向为自动化测试技术,现代信号处理,电气测量技术。

张未未(1979-),男,硕士研究生,研究方向为自动化测试技术,计算机应用技术。

收稿日期:2006-09-15

(杨长江 编发)