

新型高精度水位传感器性能测试系统^①

李陶智¹, 谢亚莲², 张占波¹

¹(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200082)

²(上海工业自动化仪表研究院, 上海 200030)

摘要: 设计了一种新型的谐振式水位传感器性能的测试系统, 系统的最终目标是测得被测传感器的特性曲线, 并以此来判断传感器的性能达标情况。系统以 AD μ C812 作为主控制器; 硬件电路主要包括水位高度压力值测量电路、谐振频率的测量电路及气室进气口开闭的控制电路。系统的核心在于采用了一种新型的频率测量方法及数值处理方法来得到传感器的特性曲线, 本系统彻底消除了传统传感器检测仪的低精度、高误差的特点, 大大提高了系统测量的可靠性和精度。

关键词: 水位传感器; 高精度; 同精度测频法; 最小二乘法; MATLAB

New-Type High Precision Water-Level Sensor Performance Test System

LI Tao-Zhi¹, XIE Ya-Lian², ZHANG Zhan-Bo¹

¹(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200082, China)

²(Shanghai Institute of Process Automation Instrumentation, Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper introduces a new-type resonant water-level sensor performance test system. The ultimate aim of this system is to obtain the characteristic curve of tested sensor, and engineer can use the curve to judge whether the performance of the tested sensor has reached the pre-established standard. This system takes the AD μ C812 as main controller, and its hardware circuit consists of pressure value of water-level measurement circuit, frequency measurement circuit, switching circuit of gas chamber. The central idea of this system is that it adopts a new-type frequency measurement method and numerical processing method to obtain the characteristic curve of tested sensor, which eliminate the shortcomings of low precision, high error characteristics of traditional sensor tested system, and greatly improved the system's accuracy and reliability.

Key words: water-level sensor; high precision; equally precision frequency measuring method; least square method; MATLAB

谐振式水位传感器^[1,2]已在工业过程控制、汽车、环境与 安全监测以及军事等领域起着重大作用。在实际应用中, 水位传感器是数据采集的重要组成部分, 其性能的优劣将直接决定采集的数据准确性和精确度。

目前市场上存在的各种类型的水位传感器性能的自动测试系统大多数都有一个共同缺点, 就是稳定性和测量精度较低。本文研制的一种新型水位传感器性能的性能测试系统就产生于这样的背景之下。本测试系统的创新有两点: 一、采用了一种新型的频率测量方法—同精度测量法, 这使得测得的传感器输出频率

误差极低; 二、对采样获取的频率利用最小二乘法进行优化处理, 使得到的传感器特性曲线(以水位高度(或压力值)为横坐标, 水位传感器输出方波频率为纵坐标)更加接近于真实曲线。该系统具有性价比较高、稳定性强、精度度高的特点, 实际运行可靠, 有着很好的市场应用前景。

1 系统设计原理

本系统采用美国 ADI 公司一款十分优秀的数据采集芯片 AD μ C812^[3,4]作为主控制器。AD μ C812 提供

① 收稿时间:2011-11-02;收到修改稿时间:2012-01-01

了一套完整的系统外围设备，不仅省去了为系统配置额外器件的开销，更重要的是这大大提高了整个系统的可靠性。

为了使得测试过程方便和高效，本系统采用气室压力变化来模拟实际水位变化，即对密闭气室充气产生的气室压力来模拟实际中向箱体注水对箱底产生的压力，气室中气量的改变等同于水箱中水位的变化。系统硬件原理框图如下图 1 所示。系统硬件电路由压力值测量电路、谐振频率的测量电路，气室进气口开闭的控制电路及串口通信部分组成，分别实现了对气室压力的测量、水位传感器输出频率的测量、气室进气口开闭的控制以及与上位机 PC 的通信。可形象地看作分别对应图 1 中由两条虚线分开而得到上、中、下三部分及右边通信部分。其中，上位机 PC 采用功能强大的 MATLAB 工具来实现与下位机的通信、对采集的数据进行处理及对测量曲线的显示。

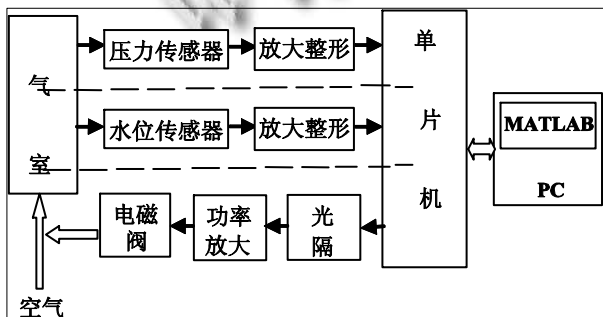


图 1 系统总体框图

2 水位传感器工作原理及系统工作流程^[5-8]

2.1 水位传感器工作原理

谐振式水位传感器的工作原理是外部水位高度的变化通过空气压力转换成传感器内部膜片上压力的变化，从而导致传感器输出电感 L 的变化。水位传感器结构图如下图 2 所示。

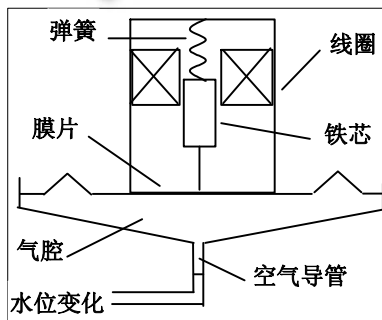


图 2 水位传感器结构图

图 3 为水位传感器等效电路图，电感 L 与电容 C1、C2 组成谐振电路，并与数字反向器 TC4069UB 连接，输出标准方波，随着水位的变化，方波频率也将作相应的改变。

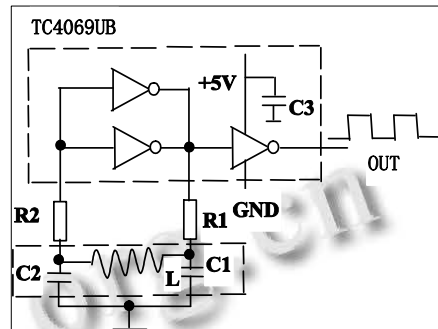


图 3 水位传感器等效电路图

2.2 系统工作流程

本测试系统共设定 10 个测量点，事先在单片机中存入 10 个标准压力值，单片机会在每个标准压力值点对传感器的输出频率进行测量并记录结果。

本系统工作流程：测试开始，控制器打开气室开关并开始进气，系统同时开始气室压力测量，直到测得压力值与事先设定的第 1 个压力值相等，则停止进气；系统开始频率测量，并将测得频率值保存到内存单元，第 1 点测量完毕；重新打开进气开关，按类似方法开始第 2 点测量，直到设定 10 点全部测量完毕；10 点测试完毕，将所得 10 点频率值通过串口依次送入上位机中，上位机利用 MATLAB 工具对这些数据进行处理，最终的得出传感器特性曲线，并与标准特性曲线点比较，判断该传感器性能是否达标。

3 水位传感器频率测量及误差分析

频率测量是整个系统的核心工作，频率的测量精度的高低将直接关系到最终特性曲线测量的准确度。频率测量通常的方法主要有低频测周高频测频法、相检测频法。低频测周高频测频法存在中界频率测量误差很大的问题，相检测频法的缺点是相位重合点不易捕捉，这可能导致测量耗时较长。

本系统采用同精度测频法。同精度测频法的思想是实际闸门时间不是固定的值，而是被测信号周期的整数倍，这使得闸门信号与被测信号同步，即只有当检测到被测信号下降沿到来时，闸门信号才开启。因此这种方法消除了对被测信号计数所产生 ±1 个数字

误差, 并且达到了在整个测量频段的“同精度”测量, 测量精度大大提高。以下是同精度测量法原理图。

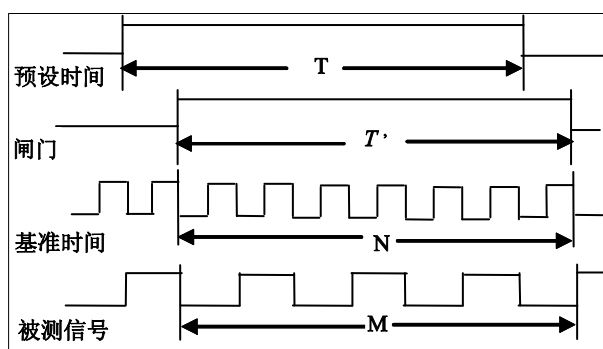


图 4 同精度测频法原理图

此方法用软件实现信号同步, 需要用到 1 个定时器及 2 个计数器。测量前需将被测信号一分为二, 一个引到外部中断 0 的输入口, 另一个引到计数器 1 的输入口。定时器 0 预先设置一个闸门时间 T , 计数器 1 用于对被测信号进行计数, 计数器 2 用于对基准时钟信号进行计数。

测量开始后, 初始化各定时器并开外部中断 0。当被测信号的下沿到来时, 产生中断, 软件开启闸门, 同步打开计数器 1 和计数器 2 开始计数, 同时关外部中断 0。当定时器 0 定时到时 (即预置闸门时间 T 到), 开外部中断 0, 且此时外部中断计数器 1 和计数器 2 均不停止计数, 直到被测信号的下沿到来时 (在此也可看出实际闸门时间应略大于预设闸门 T)。当被测信号下沿到来时, 外部中断 0 产生中断, 同步关闭计数器 1 和计数器 2。综上所述, 被测信号的频率可表示为: $f_x = \frac{M}{N} f_0$, f_x 为被测信号频率, M 为计数器 1 计数值, N 为计数器 2 计数值, f_0 为标准晶振信号频率 (晶振频率为 11.0592MHZ)。图 5 为频率测量软件流程图。

3.2 误差分析

根据误差传递公式被测信号频率相对误差为: $\frac{\Delta f_x}{f_x} = \frac{\Delta M}{M} - \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta f_0}{f_0}$ 。其中 $\frac{\Delta f_0}{f_0}$ 为晶振的频率准确度; $\frac{\Delta M}{M}$ 为计数器 1 的计数相对误差; $\frac{\Delta N}{N}$ 为计数器 2 的计数相对误差。

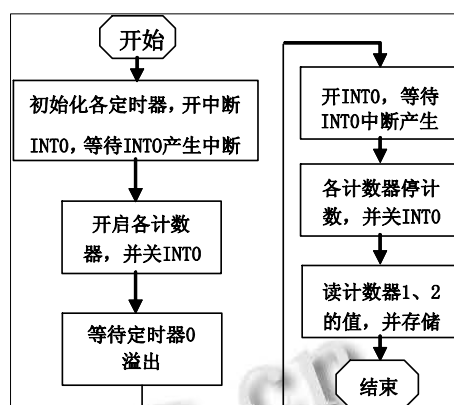


图 5 频率测量软件流程图

由于被测信号是作为同步的触发信号, 系统对被测信号的计数没有误差, 故 $\frac{\Delta M}{M} = 0$ 。但由于晶振信号与闸门信号不同步, 故有 $\Delta N = \pm 1$ 。 $\frac{\Delta f_0}{f_0}$ 的值一般远小于 $\frac{\Delta N}{N}$, 故可以忽略。所以同精度测频法可能产生的相对误差为: $\frac{\Delta f_x}{f_x} = \pm \frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{N}$ 。而且 N 越大, 此方法的相对误差就越小。

另外, 本电路是通过外部中断服务程序来实现闸门开启与关闭的, 所以存在一定的中断响应时间, 这样就增大了误差, 中断响应需要 3 到 8 个机器周期, 因此会产生 ± 5 的中断响应误差。

通过以上误差分析, 从而可知此方法的最大误差为 $k' = (\Delta N + (\pm 5)) / C' \times 100\%$, 其中 C' 为与实际闸门时间 T' 对应的基准时钟信号的周期数。由于实际闸门时间 T' 应略大于预设闸门 T , 故与预置闸门时间 T 对应的基准时钟信号的周期数 C 则应略小于 C' , 故可得最大误差又可近似表示为 $k = (\Delta N + (\pm 5)) / C \times 100\%$, 可知实际误差 k' 小于近似误差 k 。定时器为 16 位的, 最大计数可达 65536, 但考虑到实时性的问题, 选择定时器 0 时间不能太长, 即定时器 0 的初值不能太小。本系统取定时器初值为 30000, 则可得最大误差 $k = (\pm 1 + (\pm 5)) / (65536 - 30000) \times 100\% = 0.0169\%$ 。由于水位传感器输出频率范围约在 20KHZ~30KHZ, 故可计算出, 系统频率测量误差小于 ± 5 HZ, 达到了真正的高精度频率测量。

4 采样频率值的优化处理及特性曲线的获取

本系统采用 Matlab 工具作为上位机显示界面, 利用其强大的数据处理功能和图形显示功能, 使得上位机软件设计在一定程度上得到简化。上位机串口与 AD μ C812 通过 MAX232 电平转换芯片相连, 系统工作时, Matlab 通过调用 serial 类及相关函数来创建串口设备对象, 并通过中断的方式的实时接收下位机发送的 10 个数据。上位机将接收到的 10 个数据用最小二乘法进行拟合, 形成被测传感器的特性曲线, 并与标准特性曲线公差带进行比较, 判断出传感器性能是否达标。通过理论推导, 可得到传感器输出特性曲线可近似用多次多项式来拟合。设所求曲线为 $y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$ 。最小二乘法的原理就是使下式中 M 为最小值时得到 a_n, a_{n-1}, \dots, a_0 的值。

$M = \sum_{i=1}^m (y_i - (a_n x_i^n + a_{n-1} x_i^{n-1} + \dots + a_1 x_i + a_0))^2$, 其中 m 为采样值 (x_i, y_i) 的个数。

在 Matlab 环境下, polyfit() 函数已经实现了上式。命令格式为: P=polyfit(X, Y, n), 其中 n 代表为要拟合的次数, X, Y 分别为 m 采样值 x_i, y_i 的集合的行向量, 其中 X, Y 均为 1m 的行向量。求出结果即为 $[a_n, a_{n-1}, \dots, a_0]=P$, P 为 1n 的行向量。

本系统对每只传感器共采样 10 组数据, 采用四次多项式对传感器特性曲线进行拟合, 即 n=4, X 即各标准水位点的值, Y 为各标准水位点下传感器输出方波频率值, 其中 X、Y 均为 110 的行向量。

5 实际效果

以下是两只传感器特性曲线测试结果, 采样 10 次, 对应实际情况为每 5cm 水位高度采样一次。如下图 6、7 所示。传感器 1 测量数据(单位: khz): 27.012, 26.981, 26.453, 25.825, 25.327, 24.805, 23.813, 23.080, 22.443, 21.707, 19.583; 传感器 2 测量数据(单位: khz): 28.103, 27.944, 27.352, 26.828, 26.324, 25.805, 25.410, 24.082, 23.643, 22.304, 21.58。以下两条红色曲线之间区域为标准特性曲线公差带, 蓝色曲线为被测传感器拟合特性曲线(其中 H: 水位高度, F: 水位传感器输出方波频率)。

通过使用最小二乘法对采样点进行 4 次多项式拟合后, 得到被测传感器特性曲线。从以上两图我们可

以直观看出, 传感器 1 性能测试合格, 传感器 2 偏移量较大, 测试结果不达标。

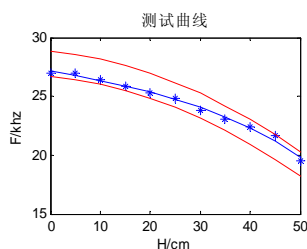


图 6 传感器 1 特性测试曲线

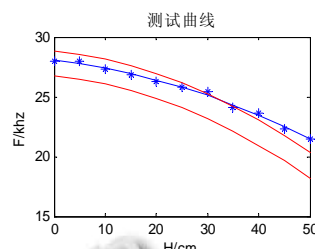


图 7 传感器 2 特性测试曲线

6 结语

本文研制了一种新型的谐振式水位传感器性能检测仪, 彻底消除了传统测试系统的低稳定性、低精度、高误差的缺点。本系统具有以下几大创新, 首先, 利用一种新型的高精度频率测量法, 使系统频率测量误差不超过 $\pm 5\text{HZ}$, 这与传统的测试系统动辄几十赫兹甚至几百赫兹的误差相比, 系统精度达到一个新的层次; 其次, 系统对被采样的数据用最小二乘法进行拟合处理, 极大优化了系统输出曲线, 使得传感器性能测试曲线更接近于真实的曲线; 最后, 采用了高集成度处理器芯片, 系统可靠性也明显提高。

参考文献

- 1 贾伯年, 俞朴, 宋爱国. 传感器技术. 20th ed. 南京: 东南大学出版社, 2008. 10-29.
- 2 扈刚, 王延峰. 谐振式水位传感器. 传感器技术, 2002, 21(5): 22-24.
- 3 何立民. MCS-51 系列单片机应用系统设计系统配置与接口技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001. 20-100.
- 4 相韶霞, 李刚. 新型数据采集系统芯片 AD μ C812 的原理及其应用. 论文之家网. 2011-05-10.
- 5 胡生清, 左进, 胡毅. 水位传感器自动测试系统及误差分析. 现代计量测试, 1999, 3: 38-40.
- 6 盛廷义. 一种新型频率测量方法及其应用[硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2000.
- 7 梁文海, 麦文, 张健, 吴均. 一种高精度频率测量的研究与实现. 四川师范大学学报, 2008, 31(3): 336-338.
- 8 付丽辉, 周西峰. 中低频信号的等精度测量. 传感器世界, 2006. 33-36.