

超声波测距误差分析

—— 能“瞄准”的超声波测距传感器误差释疑

一、 背景

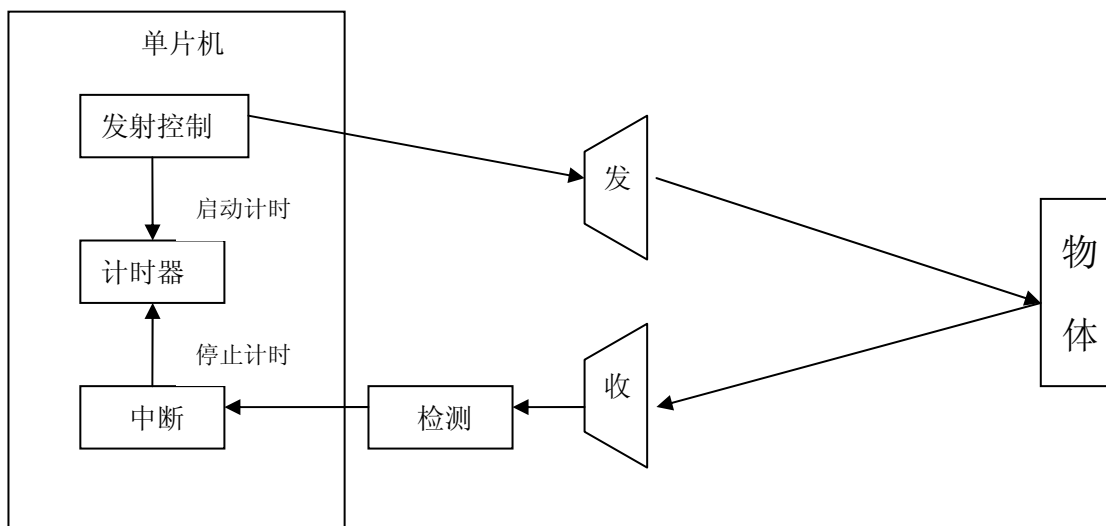
出于一个偶然原因，我设计了一个超声波测距传感器，并详细将其细节公开，起初目的是为了学习单片机的同学多一个素材，为搞机器人的同学提供一个可以自己掌控的测距传感器，所以提供了配套的 DIY 套件。但推出后很多同学问我测量的精度是多少？

我本来认为这个是 DIY 套件，无所谓精度，但细细想来，也有道理，不管怎样，这也是一个测量单元。只要牵涉到测量，就应该有精度的概念，就要分析其误差来源和大小，使制作者心中有数，可以规划其可以使用的场合。

所以，在此将所做的超声波测距传感器误差分析一下，供大家参考。

二、 超声波测距原理

在分析误差之前，首先简要介绍一下超声波测距的原理：



以上为超声波测距的原理框图，所谓“测距”实质是计时，即通过测量声波从发射到收到反射波的时间，再根据声波的速度计算出距离。

这是一个十分简单的原理，但很有效，只是受声波物理特性的限制，无法实现长距离测

量，同时指向性略差。

三、 测量误差的概念

在分析误差之前，需要先澄清测量误差的概念。

有很多同学问我：这个传感器精度多少？让我很难回答。

实际上，测量误差包含两个最基本的概念：

- A. 准确度 —— 测量值与真实值的偏差
- B. 精确度（稳定度）—— 多次测量结果的重复性。

此外还有：

- a) 线性度 —— 测量结果与被测量之间的关系是否为线性关系；
- b) 回差 —— 被测量从小到大的测量结果和从大到小的测量结果之间的偏差。

因为线性度问题在当今单片机十分普及的前提下，已不再影响测量，因为再复杂的关系曲线都可以借助于单片机换算为线性的，即使找不到数学表达式，用分段线性化方式，“以折代曲”也可以解决。

而回差是针对某些测量原理而存在的，对于超声波测距原理似乎不存在。

所以这两个指标此处不再讨论，重点讨论准确度和精确度。

所谓准确度，是针对某一类测量器具，在不加修正的情况下，它的测量结果和真实值之间的偏差。如你有一把尺，用来测量某个长度为 1m 的东西，结果为 1.002m，误差就是 0.002m，这把尺的准确度就是 0.002。

一批产品，由于制作的原因，不可能都准，所以需要给一个允许的误差范围，这就是产品的准确度，也就是“精度等级”。

但对于一个特定的测量器具，可以通过修正的方式来弥补误差，但是前提是测量的结果必须重复，即多次测量同一对象，其结果不变！

这就引出了“精确度”的概念，即数据的重复性，或者稳定性。如果一个测量器具，其

测量结果不断变化，对于同一个对象，这次是 1.000m，下次是 1.005m，再下次是 0.999m……，这样你将无法修正，因为无法确定测量结果的偏差到底多大。

从上述分析看，测量的稳定性，或者说精确度比准确度更重要，特别是针对一个特定的测量器具，而不是一批产品，因为特定的可以通过修正值消除误差。

对于你自己将要做的超声波测距传感器，应该属于一个特定的测量器具，完全有条件获取修正值，所以需要关注的是测量的精确度，也就是稳定性。

四、 超声波测距误差分析

根据超声波测距的原理，测量误差的来源有：

- 1、启动发射和启动计时之间的偏差；
- 2、收到回波到被检测出的滞后；
- 3、收到中断到中断响应停止计时之间的滞后；
- 4、计时器本身的误差。
- 5、温度对声波速度以及上述因素的影响

大致为上述五个来源，逐一分析如下：

第一项偏差源于单片机一次只能处理一件事，所以启动发射和启动计时实际上是先后完成的，存在时差，但只要指令速度足够快，其偏差可以忽略，即使需要弥补，也有可能。

第二项误差源于检测电路的灵敏度和判断偏差，从收到实际回波到电路确认并输出相应信号肯定存在滞后，这和回波信号强弱、检测电路原理以及判断电路的敏感性相关，也是超声波测距的核心。

因为如果灵敏度过高，则会将一些干扰信号误作为回波，导致测量出错，如果过低，又大大限制了检测距离，因为回波衰减是距离的平方关系。

这部分误差是导致数据不稳定的主要来源，因为判断滞后会随着回波的强弱而变化。

第三项误差源于单片机的中断机制，收到中断信号后，单片机不可能立刻响应，至少要

完成当前的指令，有时还要等待其它中断服务结束，所以这个滞后时间也不确定，从而导致测量结果的变化。

但这个因素可以通过提高单片机速度，使用高优先级中断弱化之。

第四项误差源于计时器本身，由于目前多数使用晶体振荡器，其稳定性和准确度为 20-50 PPM 级别，对于音速而言，其带来的误差在 mm 级（10us 对应 340m/s 的音速）。为减小此项误差，应该提高计时的最小单位，从而降低量化误差，同时选用质量好的晶振。

第五项误差是源于环境的影响，由于温度不同，音速会变化，计时的频率会变化，检测电路的灵敏度也会变化，所以比较复杂，通常可以借助测温修正音速变化，但后两个变化似乎只能忽略，好在其影响量有限。

五、 能“瞄准”的超声波传感器之误差

我所设计的传感器针对上述误差来源做了如下处理：

- 1、 采用速度较快的 STC12LE5410AD 单片机，其指令速度是经典 51 的 8 倍左右，所用时钟为 22.1184MHz，对应的指令周期为最快为 0.045us（单周期指令），平均约为 0.1us。
- 2、 回波检测采用 TL852 电路，其最大特征在于变增益，它支持通过控制将增益逐渐变大，这样可以利用单片机根据时间去控制，距离越近，回波时间越短，其信号强度也越大，所以需要的灵明度可以略低。随着距离加大，时间变长，回波信号减弱，就需要提高增益，以检出信号。这样处理就回避了固定增益带来的干扰问题。同时，发射电路采用了变压器升压，大大增加了发射强度，使得回波信号相应增强，也为可靠检出信号提供了保证。
- 3、 中断响应滞后问题也由于所选择的单片机速度快而化解。
- 4、 计时精度部分，除选择较好的晶体外，此单片机可以以 $F_{osc}/2$ 的速率计时，大大提高了计时器的分辨率，降低了量化误差。目前方案的计时最小单位为 0.09us

(对应 22.1184MHz 晶振)，而经典 51 只能以 $F_{osc}/12$ 的速率计时。

- 5、至于温度影响，本设计只是预留了一个 18B20 的位置，留给学习者自己去完成吧，程序中未设计相应的处理。

为了更直观的了解本设计误差的实际情况，借助 PC 程序做了如下测试：

对墙测量(约 1m)：

超声波测距传感器测试程序

选择串口：COM5 自身地址：1 传感器地址：5 命令返回：成功

读写内存
数据地址HEX：20 sign char
读回数据：-124 读数据
写入数据：0 写数据

设置工作模式
工作模式：自动测量
返回数据
测量周期(10ms)：100 设置模式

读自动测量的数据
最近几次数据：0 读测量数据

返回的测量数据
自动返回的数据：左侧：1017 右侧：1017 毫米 第 162 次
返回数据的模式：
左侧：0 0 0 0 0 0 0 0
右侧：0 0 0 0 0 0 0 0

测量误差评价
左侧 右侧
样本标准差：1.71616 1.39225
样本平均值 (mm)：1016 1017
样本数：146 开始 停止
测量值 - 平均值 (mm)：左侧 右侧
出现次数
百分比

	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
出现次数	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	138	0	0	0	0	0	0	0	0
百分比	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.47	94.52	0	0	0	0	0	0	0	0

退出

超声波测距传感器测试程序

选择串口：COM5 自身地址：1 传感器地址：5 命令返回：成功

读写内存
数据地址HEX：20 sign char
读回数据：-124 读数据
写入数据：0 写数据

设置工作模式
工作模式：自动测量
返回数据
测量周期(10ms)：100 设置模式

读自动测量的数据
最近几次数据：0 读测量数据

返回的测量数据
自动返回的数据：左侧：1017 右侧：1017 毫米 第 164 次
返回数据的模式：
左侧：0 0 0 0 0 0 0 0
右侧：0 0 0 0 0 0 0 0

测量误差评价
左侧 右侧
样本标准差：1.71825 1.39514
样本平均值 (mm)：1016 1017
样本数：168 开始 停止
测量值 - 平均值 (mm)：左侧 右侧
出现次数
百分比

	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
出现次数	0	0	0	0	0	0	0	0	3	159	6	0	0	0	0	0	0	0	0
百分比	0	0	0	0	0	0	0	0	1.78	94.64	3.57	0	0	0	0	0	0	0	0

退出

对屋顶测量 (约 1.8m):

超声波测距传感器测试程序

选择串口: COM5 自身地址: 1 传感器地址: 5 命令返回: 成功

读写内存

数据地址HEX: 20 sign char

读回数据: -124 读数据

写入数据: 0 写数据

设置工作模式

工作模式: 自动测量

返回数据

测量周期 (10ms): 100 设置模式

读自动测量的数据

最近几次数据: 0 读测量数据

返回的测量数据

自动返回的数据: 左侧: 1802 右侧: 1803 毫米 第 128 次

返回数据的模式:

左侧: 0 0 0 0 0 0 0 0

右侧: 0 0 0 0 0 0 0 0

测量误差评价

左侧 右侧

样本标准差: 1.43684 1.71333

样本平均值 (mm): 左侧 1802 右侧 1802

样本数: 124 开始 停止

测量值 - 平均值 (mm): 左侧 右侧

	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
出现次数	0	0	0	0	0	0	0	0	0	116	8	0	0	0	0	0	0	0	0
百分比	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93.54	6.45	0	0	0	0	0	0	0	0

退出

超声波测距传感器测试程序

选择串口: COM5 自身地址: 1 传感器地址: 5 命令返回: 成功

读写内存

数据地址HEX: 20 sign char

读回数据: -124 读数据

写入数据: 0 写数据

设置工作模式

工作模式: 自动测量

返回数据

测量周期 (10ms): 100 设置模式

读自动测量的数据

最近几次数据: 0 读测量数据

返回的测量数据

自动返回的数据: 左侧: 1802 右侧: 1802 毫米 第 147 次

返回数据的模式:

左侧: 0 0 0 0 0 0 0 0

右侧: 0 0 0 0 0 0 0 0

测量误差评价

左侧 右侧

样本标准差: 1.44115 1.70561

样本平均值 (mm): 左侧 1802 右侧 1802

样本数: 143 开始 停止

测量值 - 平均值 (mm): 左侧 右侧

	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
出现次数	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	130	0	0	0	0	0	0	0	0
百分比	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.09	90.9	0	0	0	0	0	0	0	0

退出

对墙测量 (约 4.3m):

超声波测距传感器测试程序

选择串口: COM5 自身地址: 1 传感器地址: 5 命令返回: 成功

读写内存

数据地址HEX: 20 sign_char

读回数据: -124 读数据

写入数据: 0 写数据

设置工作模式

工作模式: 自动测量

返回数据

测量周期 (10ms): 100 设置模式

读自动测量的数据

最近几次数据: 0 读测量数据

返回的测量数据

自动返回的数据: 左侧: 4276 右侧: 4305 毫米 第 194 次

返回数据的模式:

左侧: 0 0 0 0 0 0 0 0

右侧: 0 0 0 0 0 0 0 0

测量误差评价

样本标准差: 左侧 1.54292 右侧 1.65268

样本平均值 (mm): 左侧 4276 右侧 4304

样本数: 134 开始 停止

测量值 - 平均值 (mm): 左侧 右侧

-9 -8 -7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

出现次数: 0 0 0 0 0 0 0 0 1 77 56 0 0 0 0 0 0 0 0

百分比: 0 0 0 0 0 0 0 0 0.74 57.46 41.79 0 0 0 0 0 0 0 0

退出

超声波测距传感器测试程序

选择串口: COM5 自身地址: 1 传感器地址: 5 命令返回: 成功

读写内存

数据地址HEX: 20 sign_char

读回数据: -124 读数据

写入数据: 0 写数据

设置工作模式

工作模式: 自动测量

返回数据

测量周期 (10ms): 100 设置模式

读自动测量的数据

最近几次数据: 0 读测量数据

返回的测量数据

自动返回的数据: 左侧: 4276 右侧: 4304 毫米 第 224 次

返回数据的模式:

左侧: 0 0 0 0 0 0 0 0

右侧: 0 0 0 0 0 0 0 0

测量误差评价

样本标准差: 左侧 1.55391 右侧 1.60221

样本平均值 (mm): 左侧 4276 右侧 4304

样本数: 164 开始 停止

测量值 - 平均值 (mm): 左侧 右侧

-9 -8 -7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

出现次数: 0 0 0 0 0 0 4 0 1 41 108 3 4 3 0 0 0 0 0

百分比: 0 0 0 0 0 0 2.43 0 0.6 25 65.85 1.82 2.43 1.82 0 0 0 0 0

退出

六、 结语

从上述结果看, 此方案的稳定性和分辨率都可以满足多数要求, 也正是基于此, 我才敢设计这个能“瞄准”的传感器, 如果数据波动很大, 那根本就无法区分两“耳”的距离差。

南京嵌入之梦工作室

2009 年 4 月 21 日星期二