

超声波测距系统的开发与研究

刘升平¹, 王 剑², 葛 红¹

LIU Sheng-ping¹, WANG Jian², GE Hong¹

1. 华南师范大学 计算机学院, 广州 510631

2. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广州 510641

1. School of Computer Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

2. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

E-mail: newsun25@msn.com

LIU Sheng-ping, WANG Jian, GE Hong. Ultrasonic ranging system development and research. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(25): 78-81.

Abstract: A new ultrasonic ranging system applied in the mine detection robot is discussed. Varieties of hardware and software technologies are used to enhance precision of time point detection and reduce the range of blind zone. Experiments prove that the blind zone is small, the performance is stable in far and near measure range, and the accuracy accords with engineering requirements in this system. It can be used in the environment which requires small measuring blind zone and relatively high measuring accuracy.

Key words: ultrasonic ranging; measuring blind zone; measuring accuracy

摘 要: 论述一种用于移动探雷机器人越障的超声波测距系统。硬件上运用包络整形技术提高时间点检测的准确度, 软件上使用盲区处理、数理统计、稳定性检测、发射功率动态改变技术提高测量精度和减少盲区范围。实验证明系统具有测量盲区小、远近距测量较稳定、精度符合工程指标的特点。可在需要测量盲区小、测量精度较高的环境中应用。

关键词: 超声波测距; 测量盲区; 测量精度

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.25.024 **文章编号:** 1002-8331(2009)25-0078-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TB553

1 引言

随着机器人技术的不断发展, 对其研究已进入自主控制阶段。要实现机器人在未知和不确定环境下操作, 传感器起着举足轻重的作用。该超声波测距系统用于移动探雷机器人的探雷器离地高度自动控制。

对目前超声波测距系统的分析, 在超声波绕射问题上一般采用延时检测方法, 虽处理简便但导致测量盲区较大, 对测量结果也采用较简单的算术平均处理, 另一方面对于超声波声强与测距精度随距离远近变化缺点的处理, 则采用自动增益电路较复杂的硬件处理办法。由于该项目机器人的测距系统贴近地面, 对测量盲区与测量精度要求较高, 且本系统需要与机器人的主控机作控制信号上的连接, 因此开始该超声波测距系统的开发与研究。

为了减少测量盲区范围和提高测量精度, 系统分别从硬件和软件上采取综合性措施: 硬件上对回波信号进行包络整形检测时间点、并联谐振电路作信号抗干扰、测温电路修正声速随温度变化的误差; 软件上运用盲区处理、数理统计、脉冲稳定性检测、发射功率动态改变技术, 较大改善了系统的性能: 测量误差控制在 3% 以内, 测量盲区仅有 10 mm。系统不仅可用于该探雷机器人项目, 也可作进一步修正, 如更换为贴片电子元件、修

改电路设计和软件设计, 推广到其他项目或商业应用中。

2 系统总述

2.1 系统背景与指标要求

超声波测距系统放置在探雷机器人的探雷框中, 探雷框可平行地面上下运动, 前后遇到障碍时, 超声波测距系统检测到障碍物, 对探雷框发出抬高指令, 使其翻越障碍, 越障后再对探雷框发出下降指令; 探雷框可垂直方向转动, 左侧或右侧遇到障碍时同理。超声波测距系统与探雷机器人的主控机采用 RS232-TTL 和 IO 接口方式进行连接, 测距系统通过 RS232-TTL 接收主控机的指令, 或对主控机传输测量距离数据, 测距系统通过 IO 接口对主控机发出越障运动的控制信号。

测距系统的技术指标为:

高度设定: 0~1 000 mm;

控制偏差(即测距相对误差): $\leq 3\%$;

输入电压波动: $\leq 5\%$;

指令响应时间: ≤ 20 ms;

测量盲区距离: 10 mm。

2.2 基本原理与系统组成

超声测距的基本原理一般采用时间差检测法。通过不断检

作者简介: 刘升平(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为人工智能; 王剑, 男, 副教授; 葛红, 女, 副教授, 主要研究方向为人工免疫系统、人工智能。

收稿日期: 2008-04-15 **修回日期:** 2009-06-29

测超声波发射后遇到障碍物所反射的回波的时间,在已知超声波声速和空气温度的前提下,可计算出距离。即 $D=VT/2$, 其中 D 为机器人与视测物之间的距离, V 为声波在介质中的传播速度 m/s , T 为超声发射到返回的时间间隔,速度会根据当前空气温度进行修正: $V=331.5+0.607 \times \text{temperature}$ 。

测距系统由 AVR 单片机、超声波发射电路、接收电路、放大电路、包络整形电路、测温电路组成。与外界连接有:IO 接口、RS232-TTL 接口、5 V 和 12 V 电源接口。信号控制以单片机 AVR ATMEGA16L 为核心。单片机 AVR 首先发出一系列固定占空比的 40 kHz 方波,输送给超声波发射电路。待换能器接收回波后,经过放大电路进行信号放大,包络电路对经放大的回波包络,整形电路对包络线的峰值进行检测并输出负脉冲,单片机接收后进行一系列的软件处理,以 TTL 电平信号方式输出探雷框控制信号和测量数据。主控机亦可用此方式对单片机发出参数修正指令,微调测距系统的性能参数。

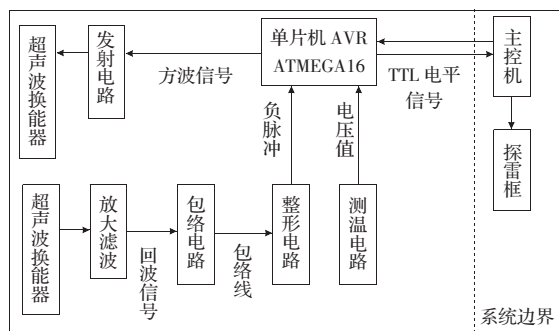


图1 超声波测距系统框图

3 硬件电路设计

3.1 超声波发射电路

发射电路充分利用单片机的软件处理功能,优点有:(1)电路设计简洁,省去了复杂的调制及分频电路。将单片机产生的脉冲方波信号经过三极管放大连接到超声波探头一端,根据逆压电效应,产生振动频率为 40 kHz 的超声波;(2)发射功率能按照距离动态改变。由于通过软件设计,单片机产生的方波脉冲占空比可动态改变,范围为 50%~75%,改变幅度可根据当前测量距离自动调整,增强接收回波在测量距离变化时的稳定性。

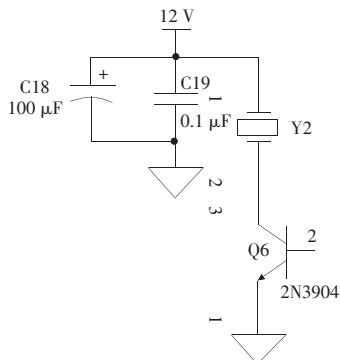


图2 超声波发射电路

3.2 放大与抗干扰处理

由于超声回波信号微弱并含有噪声,需对信号进行放大,电路采用 CA3080 跨导运算放大器。当中还应用到 LC 并联谐振抗干扰,它能够在电路输出负载变化时提供近似恒定的

频率,其频率为 40 kHz,有效地抑制了 40 kHz 以外的各种频率干扰。

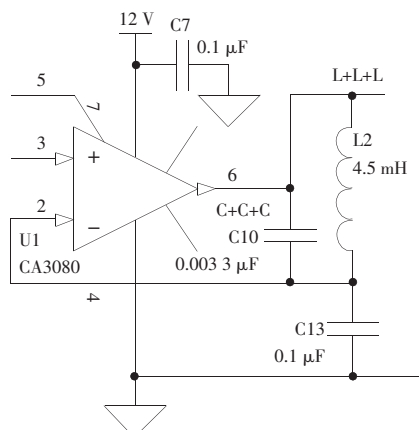


图3 回波放大电路

3.3 时间点检测电路

运用对回波形成包络线、检测波峰值并整形输出脉冲的技术,提高了测量精度并有效减少测量盲区。

超声波换能器发出的超声波是具有一定宽度的等幅余弦波,但由于经过反射在空气传播接收后,波形发生畸变。在畸变的回波信号中确定哪一点作为时间检测点成为检测电路设计的关键。同时亦要考虑超声波绕射造成的波形叠加问题,这直接影响测量盲区的大小。时间点检测的判断依据为找出与实际测量距离存在稳定线性关系的点,因此并不需要测量出回波到达的绝对时间点,只需测出相对时间,最后计算的的结果与实际距离作一定的修正补偿。通过示波器对回波信号分析,若对回波信号作包络,包络线峰值的时间点 T 与实测距离 L 存在稳定线性关系: $L=k \times T$ 。通过实验证明在盲区处理上,绕射波与回波的包络线叠加问题并不影响回波包络线峰值时间点的测量。电路设计为:对回波信号经放大电路处理后进入波形包络电路,并通过整形电路中的 LM311N 比较器在包络线的边沿下降时刻输出一列负脉冲,作为单片机的中断口输入,中断触发计时器停止。此电路设计使包络线的峰值位置成为超声波传播计时的终止时间点。

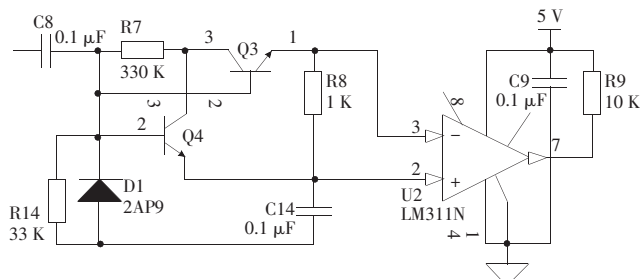


图4 包络与整形电路

图5 分别显示经放大的回波信号、对回波信号进行包络,和在包络线边沿下降时刻输出一列负脉冲,A 点所指地方为包络线波峰,亦是负脉冲开始发送时刻,检测的时间点定义为一列负脉冲中的第一个负脉冲的电平下降沿时刻。

3.4 温度测量电路

超声波传播速度与空气温度相关,为了提高测量精确度,设置了温度测量电路作声速修正。单片机模数转换接口与温度测量电路连接。温度传感器采用 AD590,其输出电流信号,经电

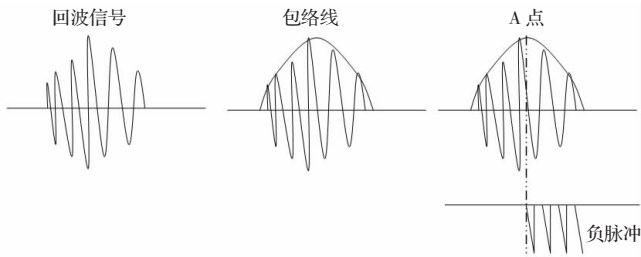


图5 时间点检测

流电压变换电路变成电压信号,最后输入到单片机的模数转换接口,通过寄存器ADC读取并计算出电压值: $voltage = ADC \times VREF / 1024$, $VREF$ 为单片机参考电压值。最后计算出温度值: $temperature = voltage / R \times 1000000.0 - 273.2 + ct$, R 为电流电压变换电路中的电阻值, ct 为温度补偿。

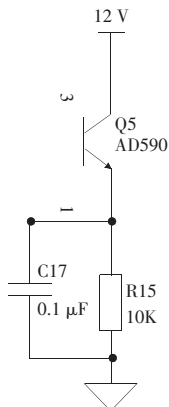


图6 温度测量电路

4 软件系统设计

4.1 软件基本流程

系统以单片机 ATMEGA16L 为核心,实现对各部分的控制和响应。软件基本架构分为两大部分:测距控制和机器人辅助功能。测距过程控制和距离计算为核心;辅助功能的目的是满足探雷机器人的功能需求。

测距软件基本流程:开启数模转换测量环境温度,开启PWM模式定时器发送脉冲方波,开启计数器计时,待回波进入接收电路,经放大、整形等硬件处理后输出一列负脉冲,触发单片机外部中断,停止计时并记录时间和脉冲宽度,调整超声波发射功率,重复以上流程直到满足测量次数为止;盲区处理,对测量数据作平均和方差、分离出偏差较大数据,检测脉冲稳定性以确保数据的有效性,对有效数据作数学处理并作温度补偿修正计算最后结果。

机器人辅助功能流程:系统初始化,根据IO接口和指令控制决定是否进入自动控制模式,当进入自动控制模式后,需调用测距流程,并根据其计算的距离结果决定机器人探雷框的运动方向,通过IO口输出运动控制信号,在测量后的空闲时间内或在没进入自动控制模式的时间内响应机器人主控机发出的指令。

4.2 软件关键技术

4.2.1 盲区处理

盲区处理是超声波测距的重要技术环节,盲区范围大小是衡量测距系统性能的重要指标。机器人的探雷框需贴近地面行走,对近距离测量要求高,因此盲区处理更为关键。盲区的形成

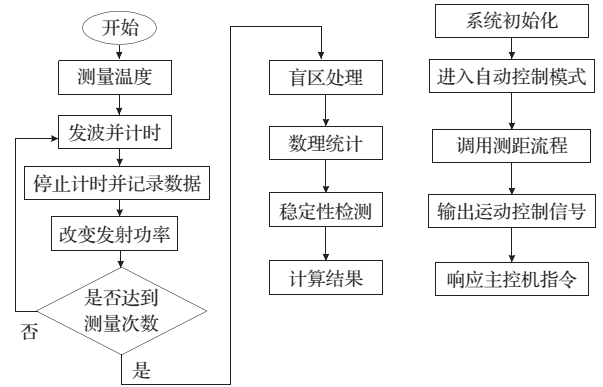


图7 软件基本流程图

是为解决超声波自身绕射问题而延伸出的另一问题。由于超声波换能器之间距离不大,有部分波未经反射物就直接进入到接收换能器。目前普遍的处理办法是对绕射虚假信号作屏蔽,优点是处理容易,缺点是盲区范围较大,不能对近距离作有效测量。采用“软硬结合”的综合性方法,有效减少盲区范围。

软件处理:在信号处理中存在两种信号,回波信号和绕射信号。处理目的是对绕射信号与反射信号进行区分,而不是把绕射信号过滤,这样可以有效减少盲区范围。从示波器观察两种波的包络线,在远距离测量中,因为反射比绕射需要更长时间,所以两种信号的时间点相隔较大,即 $T_{回} > T_{绕}$;随着测量距离减少,两种信号经过相交、覆盖、再相交的过程,第一次相交, $T_{回} > T_{绕}$,经过重叠后的第二次相交, $T_{绕} > T_{回}$;两种波的时间点会交替变化,不能以此作区分。在1000mm范围内,接收到的反射能量总比绕射能量大,反射波的幅值比绕射波的高,即 $V_{回} > V_{绕}$,通过软件分别计算反射波与绕射波的幅值,然后取两种波中幅值最大的作为反射波,这样便能区分出反射信号。

硬件处理:除了对信号进行包络外,需要对超声波的发射与接收换能器进行多次实验。因为盲区的情况跟超声波换能器的工艺有很大关系。通过对多个换能器作配对实验,发现有部分换能器在远距离测量中,不存在绕射信号,在近距离测量中,出现绕射信号,但反射信号的时间点小于绕射信号的时间点,即 $T_{回}$ 总是小于 $T_{绕}$,这样只需判断时间点最小的信号。因此在盲区的处理上,需要不断进行实验,按照波形实际情况处理。

图8显示两波接近、一次相交、覆盖、二次相交的基本情况,幅值较大的为反射波的包络线。

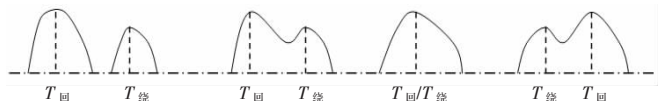


图8 回波信号与绕射信号包络线

4.2.2 数理统计

首先在短时间内调用测距子程序连续测量多个距离值 $D_1, D_2 \dots D_n$ 。由于刚开始测量信号未稳定,需要对前 $j-1$ 个数据舍弃,按实验所得数值 $j=6$ 。计算数学期望 $E(N) = (D_j + D_{j+1} + \dots + D_n) / n$; 计算 $D(N) = E\{[N - E(N)]^2\} = 1/n \sum (D_k - E(N))^2$ 。以 $D(N)$ 作为方差的衡量标准 CI , 计算 $Sub_j = D_j - E(N)$ 、 $Sub_{j+1} = D_{j+1} - E(N)$ 、到 $Sub_n = D_n - E(N)$ 。当 $Sub_k^2 \leq CI$ 时对数据保留,若 $Sub_k^2 > CI$ 把数据清零销毁。以上处理的目的是防止在超声波距离测量中出现偶然性测量偏差,即某次测量数据偏离正常值过大。通常 n 值取值越大结果越精确,但为了兼顾指令的响应时间,需要在

实验中取得最合适数据,经实验所得 $n=26$ 。

4.2.3 稳定性检测

虽然运用数理统计技术对结果进行修正,但为了进一步提高准确度和稳定性,需要对反射波经过整形电路输出的负脉冲进行稳定性检测。上面已讲到,反射波经过放大和包络后,在波峰时刻处对应输出一列负脉冲,作为单片机外中断的输入,而计算超声波传输的结束时间点为一列负脉冲中的第一个负脉冲的下降沿。每个负脉冲下降沿间隔 $50 \mu\text{s}$ 。但由于外部环境的干扰,负脉冲下降沿处有时会出现不稳定情况,不稳定情况具有非规律性和偶然性。通常误差 $E \geq 50 \mu\text{s} \times C$, C 为当前温度下的超声波在空气传播速度。

为了进一步提高精度,需要检测出不稳定的负脉冲下降沿,将其排除来提高最后结果的准确性。由于当某个负脉冲出现不稳定现象时,其宽度小于 $25 \mu\text{s}$,正常情况下单个负脉冲宽度为 $25 \mu\text{s}$ 。所以检测的关键是测量脉冲的宽度。由于其宽度的时间差已达到微秒级,检测如此短的时间差只是利用单片机的中断和计数器机制是相当困难。经过不断实验之后,得出可以同时运用计数器和捕获单元 ICP 的处理方法,计数器负责计算检测脉冲下降沿时间,而捕获单元 ICP 则检测上升沿时间,ICP 当捕获到电平变化后会立即反映到 ICP 寄存器上,不需经过中断处理函数,对于紧迫时间的检测是相当高效,适用检测脉冲宽度情况。检测宽度为 $T=TCNT1-ICR1$,即可判断此负脉冲是否稳定。当 $TCNT_k-ICR_k < Tw, k=j, j+1 \dots n$ (Tw 为脉冲宽度参考值,需通过实验得出),即把信号 k 设为无效。

对于不稳定的负脉冲需要屏蔽,并以下一个稳定的脉冲作计算时间,当然这种不稳定性只是由于偶然性干扰而出现。所以,对测量结果在数理统计修正的基础上,再对负脉冲的稳定性进行检测,进一步提高测量的精度和稳定性。

4.2.4 动态改变超声波发射功率

由于超声波在空气传播中受到散射、吸收等影响,声强按到声源的距离平方衰减。对于测量远距离物体,需要功率较大的超声波。但对于测量极近距离,容易造成信号饱和失真现象使测量失效,因此需要将发射功率调整。这就要求随着测量距离的改变能动态地改变超声波功率。

采用的方法是动态改变单片机输出到超声波发射电路的方波占空比,从而改变发射功率。具体步骤分两阶段测量:首先利用 n 次测量中的前 k 次作概要测量,判断距离范围,根据此范围调整方波占空比,再作精细测量得出最后距离结果。可设定占空比与测量距离存在此关系: $1-P=G \times D$, P 为占空比, G 为作实验所得的相关系数, D 为概要测量距离。亦可设定离散方式改变占空比,即 $P=PA$ (当 $D > DN$) $P=PB$ (当 $D < DN$), PA 为当 D 大于参考距离 DN 时的占空比, PB 为当 D 小于参考距离 DN 时的占空比。公式中的数值都需要经过多次实验得出。通过按照测量距离变化而动态改变发射超声波功率的技术,从而确保测量较远和较近距离同时获得良好的精度。

5 检测与实验结果

经过了模拟电路设计、单片机外围电路搭建、多次电路实验、PCB 板布线和电子元件的焊接、单片机编程、程序调试等步骤后,已基本成型。其后需要对此系统作多方面的测试,目的是检测系统的稳定性、测量精确性、系统实地环境模拟等。

稳定性检测:对系统作长时间的连续性供电工作,并反复不断地测量距离,以测试硬件中电子元件的运作情况,测量数

据在长时间工作下的数据有效性。

测量精确性检测:对系统作静态水平距离测量,测量数值如下:

表1 距离测量实验结果

实际距离/mm	测量距离/mm	绝对误差/mm	相对误差/(%)
1 000	1 027	27	2.7
900	920	20	2.2
800	813	13	1.6
700	709	9	1.3
600	606	6	1
500	502	2	0.4
400	399	-1	0.3
300	294	-6	2
200	198	-2	1
100	101	1	1

根据技术指标要求,高度设定为 $0 \sim 1\,000 \text{ mm}$ 。实验结构表明:对于最远距离的测量误差最大,相对误差接近 3%;误差最小位置在 $400 \text{ mm} \sim 500 \text{ mm}$ 范围,误差小于 1%;对于 $10 \text{ mm} < D < 100 \text{ mm}$ 的测量范围,相对误差控制在 3% 以内;对于小于 10 mm 的测量,误差陡然增大,因此定义测量盲区范围为 $0 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm}$ 。所以,系统有效测量距离为 $10 \text{ mm} < D < 1\,000 \text{ mm}$,相对误差 $e < 3\%$,盲区大小 10 mm ,符合技术指标要求。

模拟系统的实地环境检测:模拟机器人行走情况,将系统作水平运动,在运动过程测量离地面距离,中途遇到障碍物,系统离地距离 700 mm ,障碍物高度 400 mm 。用电脑通过 RS232 串口观测离地距离数值,同时用示波器观测在自动控制模式下对机器人主控机输出的运动控制信号。检测结果表明:能够准确测量出离地距离数值和障碍物高度,当遇到障碍物和跨过障碍物时,能输出正确的控制信号。

6 结束语

超声波测距系统从硬件和软件方面采用多种技术:软件盲区处理程序配合适当的硬件设计减少测量盲区范围,超声波发射功率动态改变技术减少声强衰减带来的误差,包络与整形电路时间点检测和数理统计方法提高了测量精度,负脉冲稳定性检测和并联谐振电路增强系统抗干扰能力。具有测量盲区小,远近距离测量较稳定,测量精度较高的特点。用于探雷机器人越障控制,亦能移植到需要测量盲区较小、测量精度较高的应用中。

参考文献:

- [1] 马潮.高档 8 位单片机 ATmega128 原理与开发应用指南(上)[M].北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- [2] Razavi B.Design of analog CMOS integrated circuits[M/DK].[S.1.]: McGraw-Hill, 2001.
- [3] 潘宗预,潘登.超声波测距精度的探讨[J].湖南大学学报:自然科学版,2002,29(3):18-21.
- [4] 贾莉娜.高精度的超声波测距系统在移动机器人导航方面的应用[J].计测技术,2004(9):23-26.
- [5] 张和生,宋明耀.提高超声波测距精度的设计[J].测试测量,2004(7):87-89.
- [6] 何永强,卜英勇,任凤跃,等.用于微地形探测的超声波测距系统[J].设计与计算,2005(12):114-116.
- [7] 曾祥进,王敏,黄心汉.自动增益电路在超声波测距系统中的应用研究[J].测控技术,2005,24(7):69-71.