

基于无源自振抑制的小盲区超声测距方法*

程 珩^{1,2}, 李 瑾³, 靳宝全¹

(1. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室 太原, 030024)

(2. 太原理工大学机械电子工程研究所 太原, 030024) (3. 吕梁学院矿业工程系 吕梁, 033000)

摘要 防水型收发一体超声波测距换能器所需驱动功率大, 激励源去除后产生的无源自振导致了较大的测距盲区, 高达 30 cm, 限制了工程应用范围, 对此提出了一种可显著减弱无源自振的方法。首先, 建立换能器等效电路模型, 分析了无源自振产生机理, 在此基础上设计出以场效应管为核心的无源自振抑制换能器驱动电路; 然后, 由于设计的无源自振抑制电路回波信号较弱, 进而设计背景噪声阻断电路与脉冲信号叠加电路以增加回波灵敏度, 并通过检测脉冲信号叠加电路输出曲线的上拐点准确估计回波时间点。试验研究表明, 该方法显著地抑制了无源自振, 并可将测距盲区限制在 16 cm 附近。该项研究扩大了超声波测距的工程应用范围, 具有较大的应用价值。

关键词 超声波; 测距; 盲区; 无源自振

中图分类号 TB551

引 言

超声波测距技术具有适用范围广、抗电磁干扰能力强、对被测物体的表面性能和光线适应能力强、成本低等特点, 因而广泛应用于液位测量、移动机器人定位和避障、汽车防撞和曲面仿形检测等领域。

目前, 常用的超声波换能器为压电式与静电式, 静电式换能器在工业现场的应用有较大局限性^[1], 工业现场多采用压电式换能器。压电式换能器可分为收发一体型与收发分体型, 防水型与不防水型, 防水收发一体换能器式超声波测距传感器具有体积小, 安装使用便利, 环境适应性好等优势因而具有最广泛的应用潜力。但现有的防水收发一体超声波换能器驱动方法具有约 30 cm 的测距盲区, 限制了测距系统的使用范围, 因此在需近距离测距的特定场合该换能器没有得到很好的应用。

近年来, 针对超声波测距的研究主要集中在通过硬件与算法的优化提高其精度与准确度。曹茂永等^[2]提出了用自相关技术实现高噪声背景下超声回波信号识别的方法。罗本成等^[3]针对移动机器人中超声测距的不确定性特点提出了一种新型的鲁棒自适应建模方法。陈先中等^[4-5]设计了低噪声回波测距系统, 并通过曲线拟合搜索椭圆中心点的方法寻找到回波信号峰值点以提高超声测距系统的精度。

孟庆浩等^[6]提出利用混沌脉冲位置调制以消除实时超声测距系统的串扰。Queirós 等^[7]利用收发信号之间的交叉相关性确定飞行时间与正弦拟合收发信号确定相移的方法提高超声波测距精度。赵海等^[8]通过温度、距离衰减及时间差测量进行补偿的方法改进了基于 TDOA 原理的超声波测距系统。Huang 等^[9]通过发射两束具有 180°相移的调幅超声波脉冲, 检测回波脉冲中自相消干涉的方法以准确确定飞行时间, 提高测距精度。柳建楠等^[10]提出了一种基于小波变换的超声回波滤波算法。童峰等^[11]推导并用试验验证了测距回波包络曲线的近似方程, 并提出基于归一化包络曲线方程的抗起伏信号处理方法以提高测距精度。以上研究从不同的角度提出了提高超声波测距的精度与准确度的方法, 但超声波测距盲区的问题仍然影响测距系统的应用, 减小测距盲区的研究对于扩大其使用范围具有重要意义。

1 压电超声波换能器无源自振产生机理

1.1 压电超声波换能器等效电路模型

超声波压电换能器利用陶瓷压电片的压电效应与逆压电效应实现电脉冲信号和超声波信号之间的

* 国家自然科学基金资助项目(51375327); 山西省攻关资助项目(20140321018-02)
收稿日期: 2013-10-29; 修回日期: 2014-12-30

相互转换,依据 KLM 等效电路理论,将压电换能器的电学特性用集中参数表示后建立其等效电路模型,如图 1 所示。

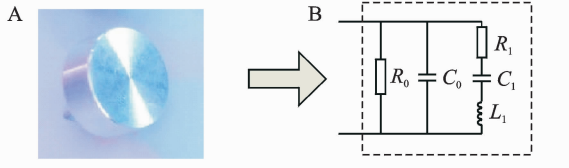


图 1 换能器及其等效电路

Fig. 1 The transducer and its equivalent circuit

图 1 中: R_0 为静态电阻,阻值很大,实际应用中可忽略^[12]; C_0 是换能器在静态时的等效电容值;串联的动态电感 L_1 、动态电容 C_1 及动态电阻 R_1 为压电换能器在振动并辐射能量时动态阻抗,它是由于元件振动时的弹性与惯性及振动元件周围介质对振动部分的反作用而产生的。

不考虑静态电阻 R_0 的情况,根据换能器的等效电路(图 1)列出换能器的导纳方程

$$\begin{cases} Y = Y_0 + Y_1 = G + jB \\ G = \frac{R_1}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2} \\ B = \omega C_0 - \frac{\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中: Y 为电路总导纳; Y_1 为动态导纳; Y_0 为静态导纳; G 为总导纳实部; B 为总导纳虚部。

推导出换能器的导纳圆公式为

$$\left(G - \frac{1}{2R_1}\right)^2 + (B - \omega C_0)^2 = \left(\frac{1}{2R_1}\right)^2 \quad (2)$$

得到换能器的导纳圆^[13],如图 2 所示。图 2 中 C 点为导纳圆圆心, S 点对应的频率为机械共振频率,换能器工作在此频率下效果最好。超声波测距系统所用换能器的机械共振频率通常为 40 kHz。

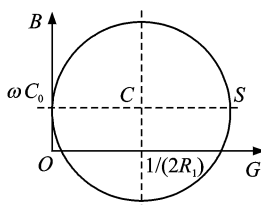


图 2 换能器导纳圆

Fig. 2 The admittance circle of transducer

1.2 无源自振产生机理

防水型单换能器超声测距电路的传统换能器驱

动电路基本结构如图 3 中 A 电路所示,换能器 T 的机械共振频率为 40 kHz,发射阶段以 40 kHz 频率的方波控制三极管 Q_1 导通与截止,利用三极管与升压变压器将发射信号放大;同时换能器静态等效电容 C_0 ,升压变压器次级绕组 L_2 和电阻 R_2 构成 RLC 并联电路,利用 RLC 电路谐振特性放大电压脉冲以驱动换能器工作。

在回波接收阶段回波通过压电式换能器引起的微弱电脉冲信号通过 RLC 并联电路的谐振作用增强信号,提高其信噪比。升压变压器次级线圈电感值 L_2 与换能器静态电容 C_0 的匹配关系为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_0}} \quad (3)$$

其中: $f=40$ kHz。

此类型驱动电路具有结构简单,驱动效率高,回波信噪比高的优点,其缺点是发射阶段结束后发射电路中的残余能量在换能器 T 与 L_2, R_2 组成的并联谐振电路中引起无源自振现象,换能器较长时间无法进入接收状态导致测距具有较大的盲区。图 3 中 A 驱动电路在接受回波时的等效电路如图 3 中 B 电路所示,超声波发射阶段结束后电路中无源自振的现象严重,工业现场应用中,该类驱动电路无源自振对回波接收的影响时间较长,测距具有一定的盲区。

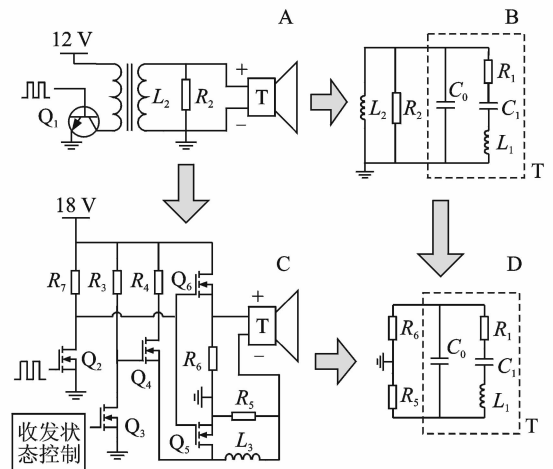


图 3 换能器驱动电路的改进及其等效电路

Fig. 3 The improvement of transducer drive circuit and the equivalent circuits

2 无源自振抑制型超声波收发电路设计

2.1 弱无源自振电路结构设计

场效应管具有控制输入端电流极小,噪声小,用

作电子开关时隔离性能好的优点,为减小发射阶段结束后的无源自振,利用场效应管为核心构成换能器驱动电路,如图 3 中 C 电路所示。 $Q_2 \sim Q_6$ 为 N 沟道增强型场效应管, Q_3 为收发状态控制端。超声波发射状态时, Q_3 截止,以 40 kHz 的频率方波控制 Q_2 导通与截止,换能器正负极之间产生频率为 40 kHz,振幅超过 60 V 的类正弦波以驱动换能器工作。实测换能器正负极之间驱动波形如图 4 中 0~0.25 ms 区间内的波形所示。

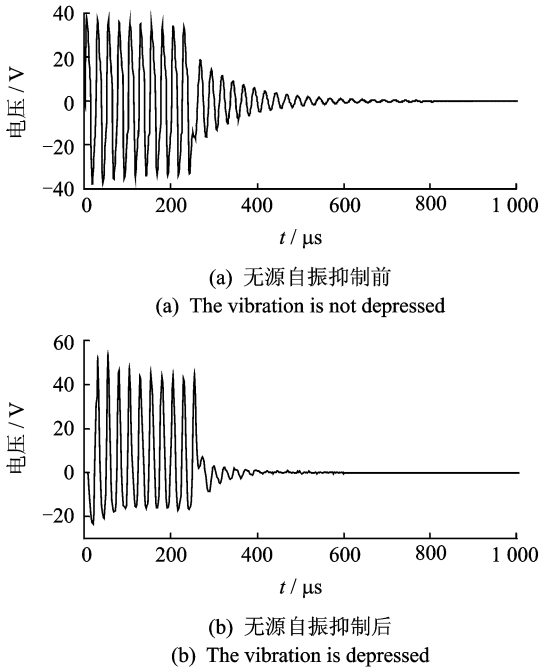


图 4 换能器驱动脉冲及无源自振波形对比图
Fig. 4 Comparison of the transducer driving pulse and the natural vibration

控制换能器发出 10 个 40 kHz 的超声波脉冲之后,换能器进入回波接收阶段,控制 Q_2 与 Q_3 导通, Q_4, Q_6, Q_5 截止,换能器正负极分别通过电阻 R_6, R_5 接地,发射电路中的残余能量进行释放。图 3 中 C 电路在回波接收时的等效电路如图 3 中 D 电路所示,残余能量释放期间无 RLC 并联电路谐振现象,无源自振现象被极大地抑制。图 4(a)中,250 μ s 后的波形为图 3 中 A 电路在发射结束后换能器的无源自振波形;图 4(b)中,250 μ s 后的波形为图 3 中 C 电路在发射结束后换能器的无源自振波形,对比图 4(a)(b)两波形图可知,换能器驱动电路在由图(3)A 电路改进为 C 电路后,超声波发射阶段结束后换能器的无源自振现象得到很大抑制,可减小测距盲区。

2.2 弱无源自振电路回波信号的处理

图 3 中 A 驱动电路在回波接收阶段,回波脉冲

经 RLC 并联谐振电路的降噪与滤波作用后具有信噪比高,背景噪声小的优点,通过运算放大电路放大滤波后可以直接通过微处理器模拟量功能采集并识别。图 3 中 C 驱动电路相比之下具有回波信号弱,背景噪声大的缺点,为弥补此不足,对回波脉冲信号进行放大与带通滤波之后,利用背景噪声阻断电路隔绝回波背景噪声,利用脉冲信号累积电路增加超声波回波灵敏度。回波信号处理电路图如图 5 所示。

主放大电路如图 5 中 A 部分所示,放大倍数为

$$A = \frac{R_8 R_9}{R_7 R_{10}} \quad (4)$$

二阶带通滤波电路如图 5 中 B 部分所示,其中中心频点与带宽的表达式为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{R_{15} C_4 C_5} \left(\frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{14}} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\Delta f = \frac{1/C_4 + 1/C_5}{2R_{15}} \quad (6)$$

其中; R_{14} 对中心频点的影响最大; C_4 和 C_5 对带宽有影响。

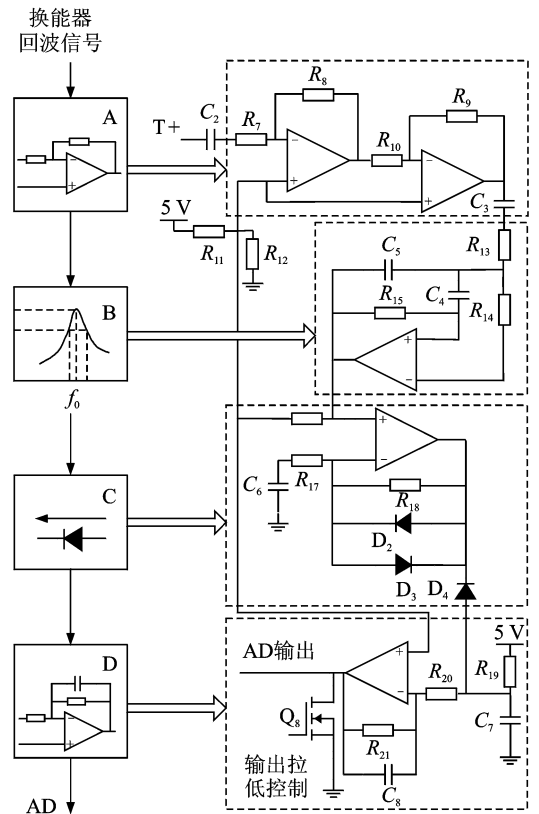


图 5 回波信号处理电路
Fig. 5 The echo signal processing circuit

回波信号经过放大滤波后进入背景噪声阻断电路,如图 5 中 C 部分所示。在对信号再次放大的同时通过二极管 D_2, D_3 对信号的幅值进行限制,以减小被测物体距离对回波信号强弱的影响。

背景噪声阻断电路以 D_4 为核心,换能器与前端电路的背景噪声由于振幅小无法使 D_4 正向导通,而被滤除;而振幅较大的回波信号引起 D_4 的阴阳极电压差较大, D_4 间断性正向导通,在 C_7 稳压作用下通过 R_{20} 的电流减小,通过 C_8 的累积作用使运放输出电压稳定增长,如图 6 中 C 波形所示。

微处理器通过模拟量采集功能判断是否有超声波回波信号。

在超声波发射阶段脉冲信号累积电路会输出高电平,发射完成后脉冲信号累积电路输出电平才会缓降至正常值,此过程会造成较大测量盲区,如图 6 中 A 曲线所示。利用微处理器在超声波发射阶段和无源自振阶段控制场效应管 Q_8 导通,脉冲信号累积电路的输出通过 Q_8 接地而保持低电平,无源自振阶段完全结束后控制 Q_8 截止以采集回波信号,信号输出波形如图 6 中 B 曲线所示。

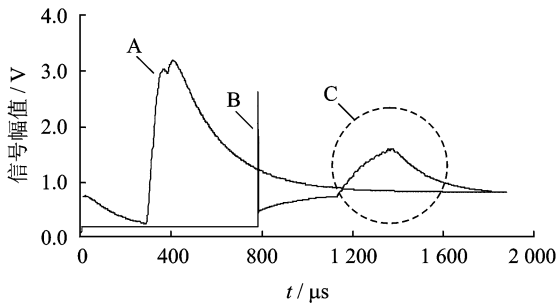


图 6 脉冲信号叠加电路输出对比图

Fig. 6 The comparison of outputs of pulse signal superposition circuit

2.3 回波信号采集与数据处理

超声波测距原理为飞行时间法,检测记录超声波发射和接收到回波之间超声波在介质中行进的时间,将行进时间乘以时距转换系数就是换能器与被测物之间的距离。

测距的流程图如图 7 所示。计数器在微处理器通过驱动电路驱动换能器发射超声波时开始计数,发射结束 0.5 ms 后 Q_8 截止,以 40 kHz 的速率实时采集脉冲信号累积电路的输出电压模拟量值。建立数组实时保存模拟量采集到的最新的 15 组电压信号值及每组信号对应的计数值,设每组电压值与对应计数值依照采集从最新到最早的顺序分别为 $U_i (i=1, 2, \dots, 15)$ 、与 $T_i (i=1, 2, \dots, 15)$,将采集到的每组最新信号电压值 U_1 与预设电压值 U_0 进行比较以判断是否有回波信号。当 $U_1 > U_0$ 时,计算 $\Delta_i = U_{i+1} - U_i$, $G_i = \Delta_{i+1} - \Delta_i$,利用冒泡法求得 G_i 中最大值 G_{\max} , G_{\max} 对应的 U_{\max} 即为脉冲信号累积电路输出电压曲线的上升拐点, U_{\max} 对应的 T_{\max} 即为

接受到回波时的计数值,将计数值与预设转换系数相乘即为换能器与被测物之间的距离值。

若计数器 T_i 计时到 20 ms 时还未检测到有效回波信号则判定 3 m 范围内无障碍物,本次测距停止。采集到 5 组被测物距离值后,将 5 组距离值用冒泡法排序后舍去较大的两组与较小的两组距离值,取剩下的一组距离值为本次测距的最终结果。

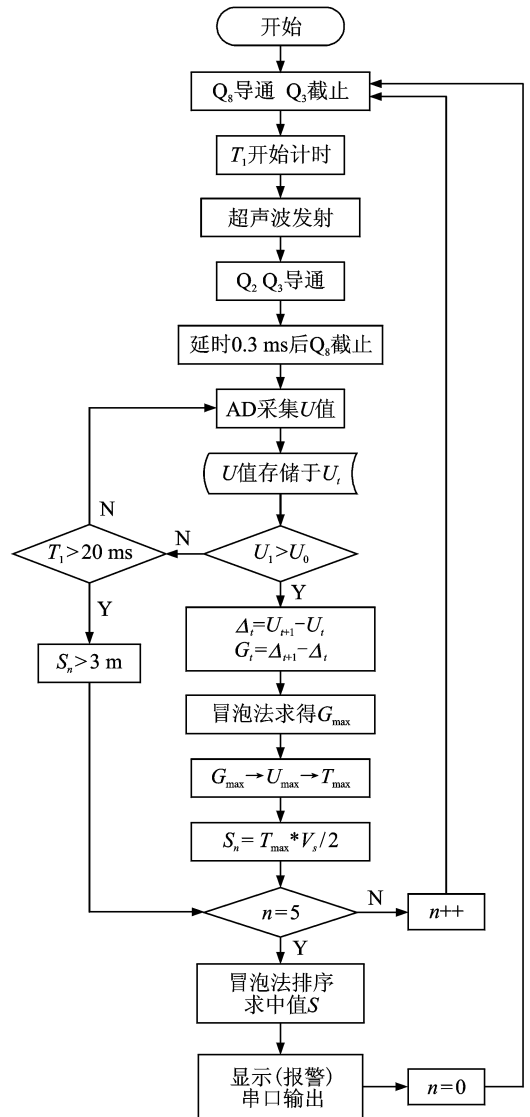


图 7 超声测距流程图

Fig. 7 The flow diagram of ultrasonic ranging

2.4 测距电路结构设计

无源自振抑制防水单换能器超声波测距系统电路结构如图 8 所示,由电源模块、主控模块、超声波收发电路模块、显示和报警模块四部分组成。共地的 18 V 和 5 V 稳压直流电源分别给超声波发射电路和系统的其余部分供电。微处理器作为测距系统的控制核心,功能为计时、驱动发射电路、检测回波

信号、数据处理、距离换算、控制液晶显示、声音报警以及发送距离值的串行数据。

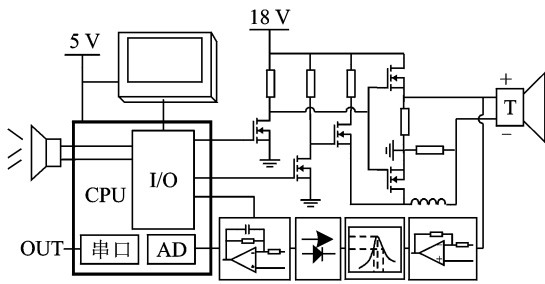


图 8 测距系统电路结构示意图

Fig. 8 The circuit structure diagram of ranging system

3 试验分析

采用以上测距系统对障碍物进行实际测量,被测障碍物为直径 20 cm,高度 1 m 的空心塑料圆柱,换能器正对障碍物,不断调整障碍物与换能器间的距离并读出测量结果,测量结果如表 1 所示。可以看出,测距系统的盲区减少到 16 cm,基本达到设计需求。实测数据总体偏大,存在系统误差,如图 9 所示。分析原因是实测条件温度下声速与程序预设声速有偏差,温度与超声波在空气介质中传播速度关系为

$$V = 331.4\sqrt{1 + T/273} \quad (8)$$

其中: V 为超声波在空气中传播速度(m/s); T 为空气介质的温度($^{\circ}\text{C}$)。

表 1 测量值与校正结果

Tab. 1 The measured value and the correction result

数据类型	数据值/cm				
实际值	16	20	30	40	60
测量值	16.2	20.2	30.5	40.7	61.1
校正后	15.9	19.9	30.0	40.0	60.1
实际值	80	100	120	150	180
测量值	82.2	102.3	122.5	152.8	182.7
校正后	80.8	100.6	120.5	150.2	179.6
实际值	210	240	270	300	
测量值	213.5	243.3	273.7	304.2	
校正后	209.9	239.2	269.1	299.1	

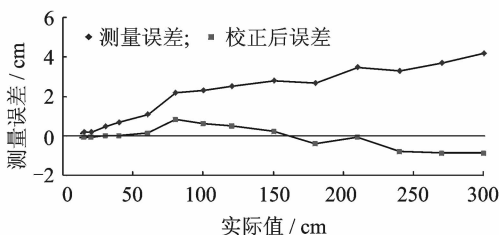


图 9 测量误差示意图

Fig. 9 The diagram of measuring error

依据式(8)对测量结果进行人工校正后结果如表 1 所示,校正后结果与实际值的最大线性误差为 1 cm 之内。在温度变化范围较大与对测距精度要求比较高的现场,需要在测距系统中增加温度校正模块。

4 结 论

1) 传统的防水单换能器型超声波测距传感器具有约 30 cm 的测距盲区,其原因是换能器与其驱动电路在激励源去除后产生的无源自振现象。本研究以场效应管为核心的收发一体型换能器驱动电路具有发射阶段结束后电路中无源自振小的优势,采用此种驱动电路的超声波测距系统的测距盲区可减少到 16 cm,扩大了检测范围。

2) 利用包含背景噪声阻断电路,脉冲信号叠加电路的超声波回波信号处理电路可有效弥补以场效应管为核心的换能器驱动电路回波信号弱,信噪比低的缺陷。

3) 针对脉冲信号叠加电路输出的回波信号,检测计算输出信号曲线上拐点,经温度校正后测距最大误差在 1 cm 之内,符合工程要求。

参 考 文 献

[1] 刘镇清,魏墨盒. 静电超声波换能器及其应用[J]. 仪器仪表学报,1995,16(4):442-445.
Liu Zhenqing, Wei Moan. Electrostatic ultrasonic transducer and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1995,16(4):442-445. (in Chinese)

[2] 曹茂永,王霞,郁道银. 高噪声背景下超声信号数字处理技术研究[J]. 仪器仪表学报,2002,23(2):200-202.
Cao Maoyong, Wang Xia, Yu Daoyin. Research on digital processing technology of ultrasonic signal in high-noise background[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002,23(2):200-202. (in Chinese)

[3] 罗本成,原魁,楚坤水,等. 一种超声测距的鲁棒自适应建模方法[J]. 机器人,2002,24(6):554-558.
Luo Bencheng, Yuan Kui, Chu Kunshui, et al. A robust adaptive modeling method for ultrasonic range finder[J]. Robot, 2002,24(6):554-558. (in Chinese)

[4] 陈先中,王伟,张争,等. 低噪声回波测距系统的电路设计与系统分析[J]. 北京科技大学学报,2005,27(4):488-492.
Chen Xianzhong, Wang Wei, Zhang Zhen, et al. Design and analysis of the lower electronic noise circuit

- with an ultrasonic pulse echo ranging system[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(4):488-492. (in Chinese)
- [5] 陈先中, 侯庆文, 叶琳, 等. 超声测距系统的高精度中心椭圆算法[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(11):1154-1157.
Chen Xianzhong, Hou Qingwen, Ye Lin, et al. High-accurate central ellipse algorithm for an ultrasonic ranging system[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(11):1154-1157. (in Chinese)
- [6] 孟庆浩, 兰少莹, 姚振静, 等. 基于混沌脉冲位置调制的实时超声测距系统串扰抑制[J]. 电子学报, 2008, 36(11):2268-2273.
Meng Qinghao, Lan Shaoying, Yao Zhenjing, et al. Rejecting crosstalk of real-time ultrasonic ranging system based on chaotic pulse position modulation[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(11):2268-2273. (in Chinese)
- [7] Queirós R, Corrêa Alegria F, Silva Girão P, et al. Cross-correlation and sine-fitting techniques for high-resolution ultrasonic rang [J]. Instrumentation and Measurement, 2010, 59(12):3227-3236.
- [8] 赵海, 张宽, 朱剑, 等. 基于 TDOA 的超声波测距误差分析与改进[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(6):802-805.
Zhao Hai, Zhang Kuan, Zhu Jian, et al. Error analysis and improvement of ultrasonic distance measuring based on TDOA[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2011, 32(6):802-805. (in Chinese)
- [9] Huang Jide, Lee C, Yeh C, et al. High-precision ultrasonic ranging system platform based on peak-detected self-interference technique[J]. Instrumentation and Measurement, 2011, 60(12):3775-3780.
- [10] 柳建楠, 刘文峰, 王伯雄. 应用于超声测距的小波变换滤波算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52(7):951-955.
Liu Jiannan, Liu Wenfeng, Wang Boxiong. Wavelet denoising algorithm for ultrasonic ranging[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012, 52(7):951-955. (in Chinese)
- [11] 童峰, 许水源, 许天增. 一种高精度超声波测距处理方法[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1998, 37(4):507-512.
Tong Feng, Xu Shuiyuan, Xu Tianzeng. A processing method with high precision for ultrasonic distance measurement[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 1998, 37(4):507-512. (in Chinese)
- [12] 孙波, 季远, 李光军, 等. 功率超声换能器导纳特性检测及电端匹配研究[J]. 振动、测试与诊断, 2002, 22(4):287-290.
Sun Bo, Ji Yuan, Li Guangjun, et al. A study of on-Line measurement of admittance characteristics and electric matching of power ultrasonic transducer [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2002, 22(4):287-290. (in Chinese)
- [13] 魏守水, 孙合明, 赵淳生. 超声马达定子的等效电路参数测量与仿真[J]. 振动、测试与诊断, 2000, 20(2):110-114.
Wei Shoushui, Sun Heming, Zhao Chunsheng. Measurement and simulation of parameters of equivalent electric model of ultrasonic motor stator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2000, 20(2):110-114. (in Chinese)



第一作者简介:程珩,女,1956年11月生,教授。主要研究方向为机电系统动态测试与故障诊断。曾发表《基于粒子群优化决策树的齿轮箱故障诊断》(《振动、测试与诊断》2013年第33卷第1期)等论文。

E-mail:chenghang@tyut.edu.cn