

# 基于红外同步的收发分离超声测距系统的研究

张 强,徐 霞,高 颂,徐玮巍,孙晨晨,徐寅林

(南京师范大学物理科学与技术学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 传统的超声测距是基于测量超声反射回波所耗费时间的方法而进行的,该方法无法实现两个分离点目标距离的测定. 本文设计了一种利用红外同步信号控制两个分离点目标的测距系统. 文中阐述了该方法的实现原理,给出了收发分离超声测距系统的电路设计,分析了收、发两端超声波传播过程中产生的时间误差来源,并修正了超声波测距公式,以提高测量精度. 该系统电路实现简单,测距精度可达到 1.5 mm 左右,具有很好的实际应用价值.

[关键词] 超声波,红外同步,测距

[中图分类号] TH711 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2017)02-0024-06

## Research on Separation of Transceiver of Ultrasonic Distance Measuring System Based on the Infrared Synchronization

Zhang Qiang, Xu Xia, Gao Song, Xu Weiwei, Sun Chenchen, Xu Yinlin

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Traditional ultrasonic ranging is based on the method of ultrasonic echo delay. This method cannot achieve two separated points for ranging. The paper designs a distance-detecting system by using an infrared synchronization signal to control two separated targets. The paper illustrates in detail the principle of the method and this circuit design of ultrasonic ranging system is given. It also analyzes the delay error of two separated points and correct the ultrasonic ranging formula, improving the accuracy of measurement. The circuit is easy to implement and the ranging accuracy is 1.5 mm. So the system has a high practical value.

**Key words:** ultrasonic, infrared synchronization, measuring distance

超声波测距在建筑测量、工业控制等许多领域被广泛应用,这类超声测距方法是基于测距系统对超声的自发自收,即超声的接收与发射是在同一个电路上的设计方案<sup>[1-2]</sup>,该方法无法实现没有超声反射回波的点目标之间的距离测定,因而在室内定位、机器人视觉识别等领域受到了很大的限制.

本文设计了一种基于红外同步的收发分离的超声测距系统. 发送方在发送超声信号的同时同步发射红外信号,接收方在收到红外同步信号时立即启动脉冲记时,直到超声信号前沿到来结束,借助于测量超声波在空中的传播时间,实现了没有超声回波的点目标间的距离测定. 实际应用过程中,由于红外接收器件以及超声换能器在信号收发时会产生较大的响应,导致时间延时,从而造成较大的时间测量误差. 论文通过实验测量分析了该系统误差的产生规律,提出了消除该误差的方法,以提高测量精度.

## 1 超声波测距原理

超声波测距的基本原理是发射端发射超声信号通过空气传播到接收端,根据响应的的时间差  $t$  乘以声速  $v$ ,得到发射端与接收端的距离  $d$ ,即  $d=vt$ . 本文所采用的 TCT40-16T/R 型号超声探头,是一种压电陶瓷传感器,设计的系统中既作为发射又作为接收的传感器,中心频率为 40 kHz. 由于声速在空气介质中传播受温度影响较大,为了提高测量精度,还可以设置温度检测电路进行实时检测并对其修正.

收稿日期:2017-02-17.

通讯联系人:徐寅林,博士,教授,研究方向:精密仪器设计. E-mail: xuyinlin@njnu.edu.cn

2 红外同步收发分离的超声测距方法的设计

2.1 红外同步的超声测距设计原理

图 1 是测距系统结构框图,图 1(a)为发射电路,包括主控芯片 STM32<sup>[3]</sup>、红外发射电路、超声功放电路以及超声传感器,图 1(b)为接收电路,包括主控芯片 STM32、红外接收电路、超声传感器、信号调理电路以及温度检测电路. 具体工作流程如下:发射方由主控芯片 STM32 发出同步信号,该信号一方面触发红外发射电路产生 38 kHz 的红外信号,另一方面激励超声前级功放,同步发射 40 kHz 的超声信号<sup>[4]</sup>. 接收端一旦接收到红外触发信号,立即开启接收方 STM32 定时器,准备接收超声信号,一收到超声信号立即停止接收方 STM32 定时器计时,通过接收端的红外、超声波延时时间可计算出发射点与接收点之间的距离. 另外,为了修正温度对超声测距的影响,增加了温度检测电路.

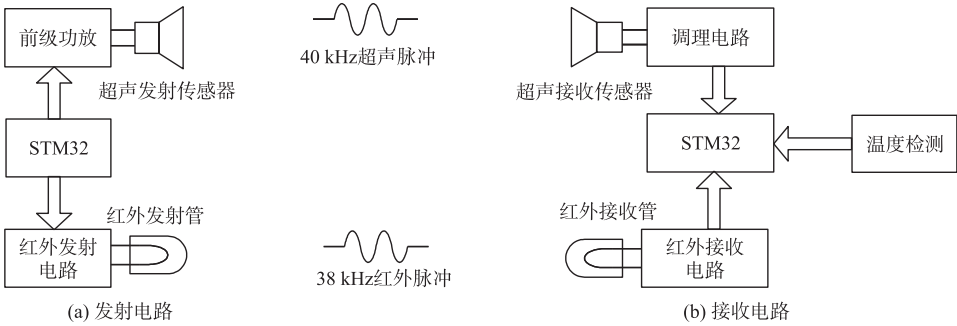


图 1 系统结构框图

Fig. 1 System structure diagram

2.2 红外同步的测距电路设计

图 2 是超声波发射和红外发射电路框图及详细原理图. 在图 2(a) 中 STM32 发射 40 kHz 的超声激励信号,并同步发射 38 kHz 的红外调制信号,然后经过各自的驱动电路输出超声信号及红外同步信号.

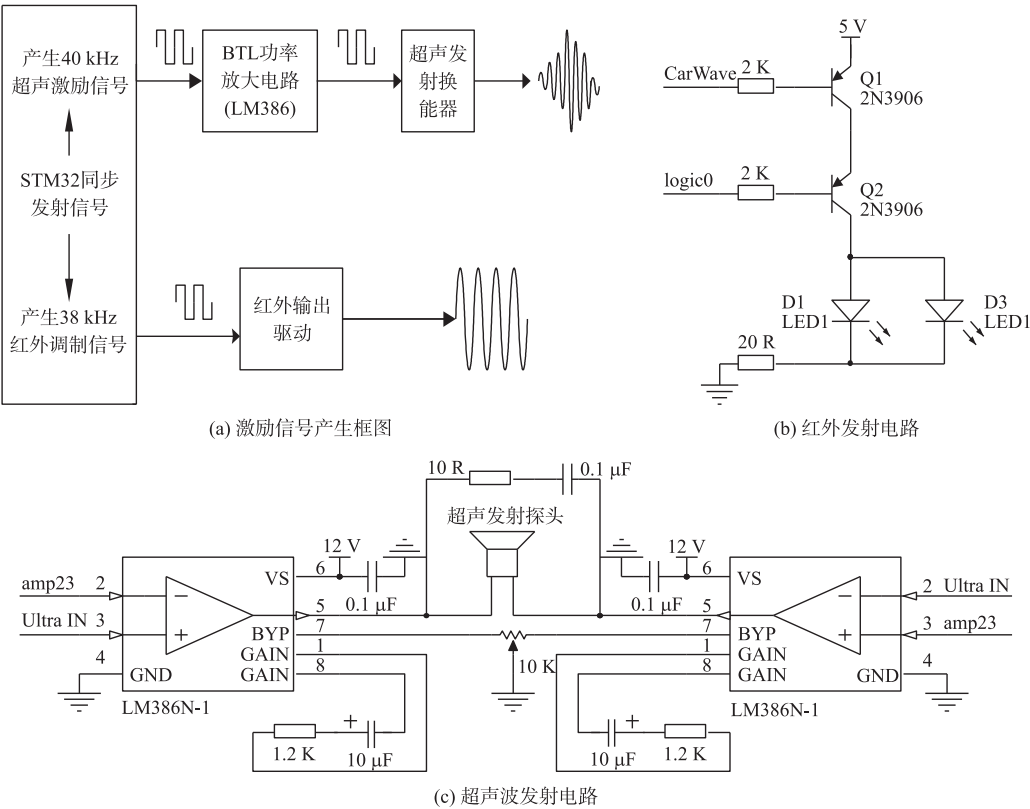


图 2 超声波发射和红外发射电路图

Fig. 2 Ultrasonic transmission circuit and the infrared emission circuit

图 2(b)是红外发射控制及红外调制波信号驱动电路,其中 LED1 为红外发射管,CarWave 为发射端超声信号所需要的 38 kHz 载波信号,该信号由 STM32 的 IO 引脚输出到 PNP 三极管 Q1 基极,logic0 为发射控制信号端,也由 STM32 的 IO 引脚输出,进行红外发射开关控制. CarWave 和 logic0 两者的组合,可以驱动 LED1 发射受控的 38 kHz 红外调制波. 图 2(c)是超声波发射电路,其中超声功放电路是由 LM386 组成的 BTL 功率放大电路. 该功率放大电路工作电压范围宽,增益可调<sup>[5]</sup>. 为了提高超声信号发射功率,把两片 LM386 芯片联合使用,这样可以增加一倍输出信号的动态范围,此时电路输出的最大功率是单个 LM386 输出功率的 4 倍左右. 此外超声换能器在 $\pm 30^\circ$ 发射角范围内可以测到有效接收信号的范围为 7 m,满足了一般室内测距的要求<sup>[6]</sup>.

红外接收和超声接收电路框图及原理图(如图 3),分别接收来自发射端的红外和超声信号,再经过 STM32(ARM)处理器测量超声传播时间,进而计算出收、发两端的距离. 图 3(b)是红外接收电路原理图,核心模块 HS0038B<sup>[7]</sup>是红外接收一体模块电路. 当该模块接收到 38 kHz 红外调制信号时,立即在 1 脚产生一个低电平. 一旦 STM32 芯片捕获到该低电平就立即启动定时器计时,直到接收到超声波信号. 图 3(c)是 DS18B20 温度检测电路,由 DOUT 引脚输出检测到的室内温度给 STM32,用于修正、减小温度对超声测距的影响,确保在收、发两端相同距离时,超声测距不随温度的改变而改变,以提高测距的精度. 图 3(d)是超声接收电路原理图,其核心是 CX20106A 厚膜芯片,该芯片内部集成了滤波放大电路、检波电路、积分电路、施密特整形电路等. 其中,滤波放大电路的功能是抑制信号以外的加性噪声,以便放大电路对有用信号的放大. 检波电路的主要功能是获取超声波信号的包络(通过实验分析可知信号的包络

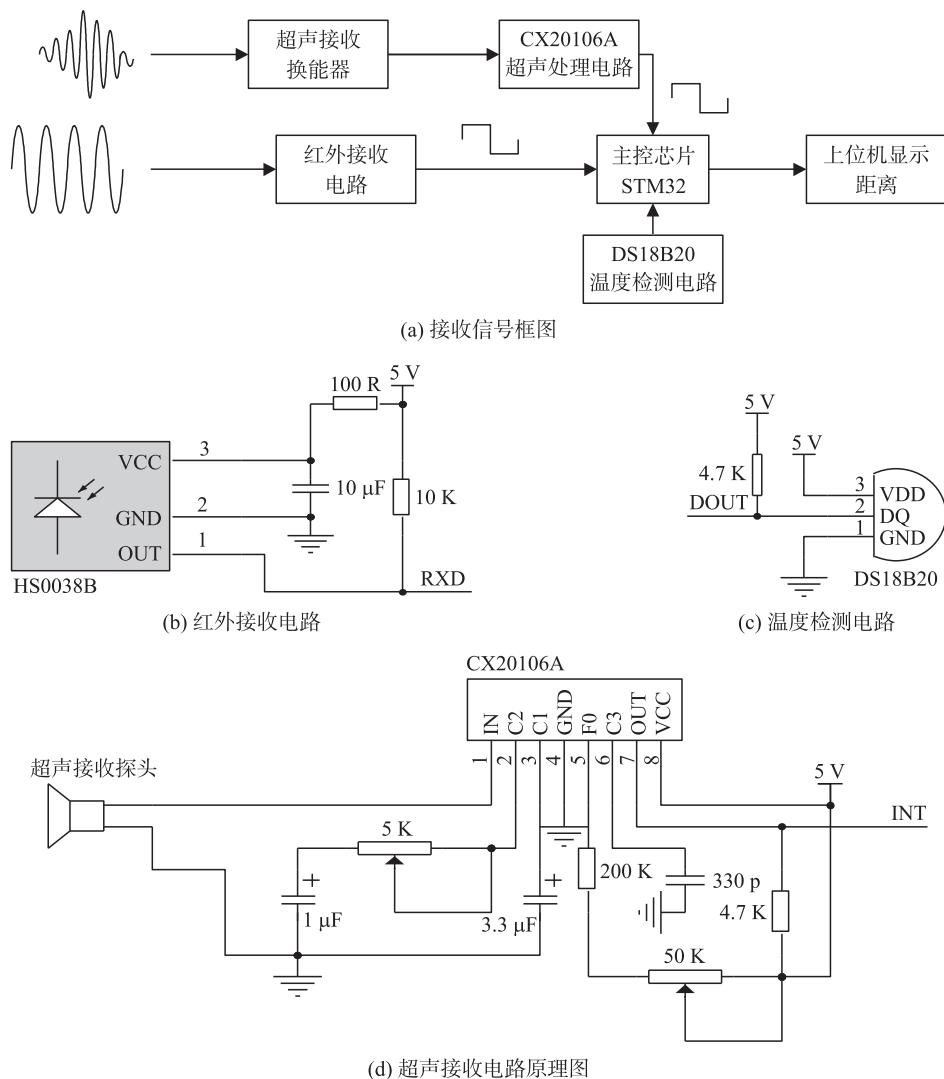


图 3 红外接收和超声接收电路框图及原理图

Fig. 3 Infrared receiving circuit and ultrasonic receiving circuit

近似一个正弦波<sup>[8]</sup>). 积分电路与施密特整形电路的作用是输出标准的脉冲信号,这样 STM32 便可获取某个时刻的低电平信号,即当 CX20106A 接收到 40 kHz 的信号时,会在模块的第 7 脚产生一个下降沿信号,此信号接到 STM32 芯片的外部中断引脚上,从而 STM32 内部定时器可以测出从接收到红外信号前沿至超声信号到来的时间间隔.

### 3 超声测距信号延时时间误差分析

#### 3.1 超声接收器件造成的额外延时

超声测距对信号传输时间误差的测定要求十分严格. 在实际应用过程中,无论是红外接收电路还是超声接收电路,从接收传感器收到红外/超声调制波到相应的接收前端处理电路输出跳变信号指示都有一定的额外延时,这个额外延时往往不可忽略. 以声速  $v=340$  m/s,发射端与接收端偏转角度为  $0^\circ$ ,收发距离  $d=10$  cm 的情况为例,图 4 上半部分是发射端发射的 40 kHz 超声脉冲激励信号,图 4 下半部分是接收端超声接收器输出的信号. 理论上收发双方信号时差应该是  $t_{\text{rel}}=0.294$  ms,但由测试图可知接收端信号往后额外延时了  $t_0$ . 其原因是超声接收传感器是一个带阻尼的谐振系统,在刚接收到超声信号时,并不能立即达到谐振状态,而是需要一个能量积累过程,共振的时刻比超声到达时刻滞后  $t_0$ ,因此理论距离应该修正为

$$d'=v(t-t_0). \quad (1)$$

式中,  $t_0$  为换能器额外延时时间.

#### 3.2 红外接收器件造成的额外延时

虽然红外信号在空中传播的时间可以忽略不计,但接收端红外信号的检测处理电路造成的额外延时时间必须考虑. 图 5 上半部分是发射端红外激励信号,频率为 38 kHz,图 5 下半部分是接收端 HS0038 输出信号. 接收端红外检测电路在经过发送端的 8 个脉冲时才产生低电平信号,这个额外延时记为  $t_1$ .

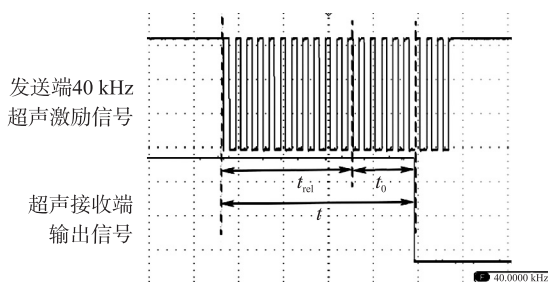


图 4 发射端与接收端距离为 10 cm 的情况

Fig. 4 The distance between transmitter and receiver is 10 cm

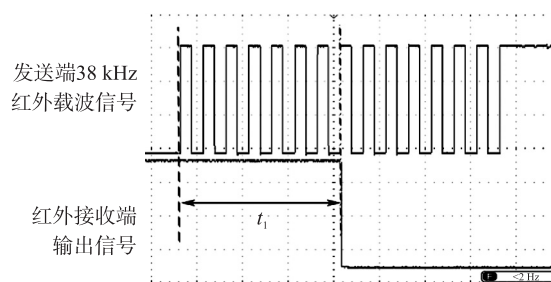


图 5 红外接收响应时刻

Fig. 5 The response time of infrared

#### 3.3 STM32 计时电路造成的时间测量量化误差

除了上述时延,还与 STM32 芯片内部定时器计数的频率有关,计数频率越高,计数器的分辨率也就越高,这有利于降低量化误差. 以计数频率 100 kHz(周期 0.01 ms)进行计数,则 100 kHz 产生的测距量化误差将是  $\pm 340$  m/s  $\times (0.01 \times 10^{-3})$  s =  $\pm 3.4$  mm,量化误差  $d_c$  为

$$d_c = v \cdot \frac{1}{f_r}. \quad (2)$$

式中,  $f_r$  为计数器计数频率. 接收端根据红外同步接收信号,超声接收信号测量得到的延时为  $t_2$  (如图 6 所示). 另外,超声接收电路会延时,实际超声在空气介质传播的延时应该为

$$t_{\text{rel}} = t - t_0 = t_2 + t_1 - t_0. \quad (3)$$

接收端采样频率有限会造成量化误差,超声在空气介质传播的延时时间进一步修正为

$$t_{\text{rel}} = t_2 + t_1 - t_0 \pm \frac{1}{f_r}. \quad (4)$$

将距离公式修正为

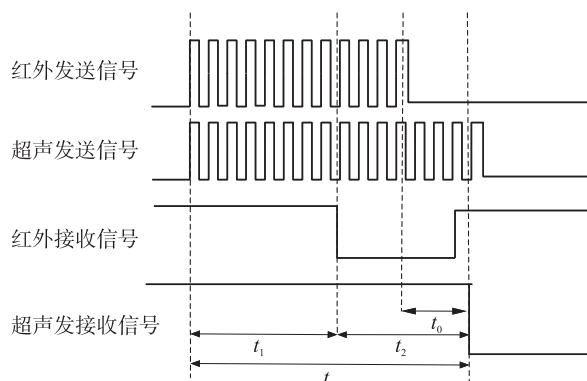


图 6 超声与红外延时示意图

Fig. 6 Ultrasonic and infrared delay

$$d_{\text{rel}}=v\cdot t_{\text{rel}}=v\cdot\left(t_2+t_1-t_0\pm\frac{1}{f_T}\right).$$

(5)

3.4 环境温度对超声测距的影响

若考虑温度对声速的影响,则声速  $v$  修正为  $v'$ ,即

$$v'=331.4\times\sqrt{1+\frac{T}{273}}.$$

(6)

式中,  $T$  为环境的摄氏温度.

综上所述,最终超声波距离公式修正为

$$d_{\text{rel}}=v'\cdot t_{\text{rel}}=v'\cdot\left(t_2+t_1-t_0\pm\frac{1}{f_T}\right).$$

(7)

式中,  $t_2$  是接收端测得的超声与红外同步接收信号的延时,  $t_0$ 、 $t_1$  分别是超声接收器件和红外接收器件产生的额外延时.

4 实验测试及讨论

通过上述对超声波在空气中传播产生时间误差来源的详细分析,找到了影响测距误差的因素. 对基于红外同步的超声测距系统电路测量结果如表 1 所示. 测量时室内温度为 22 ℃, 超声计数频率  $f_T$  为 100 kHz, 选用激光仪(精度为 1.5 mm)作为测距参考. 分别选取 11 组数据, 根据收发两者实际距离计算出超声传播的无误差理论传播时间  $t_{\text{rel}}$  和实际测量时间  $t_2$ , 从表中可以发现理论时间与实际时间的差值基本恒定. 在相同距离下比较两种测距的误差(如图 7 所示). 可见, 在 2 m 范围内, 接收电路器件造成的额外延时基本与收发双方距离无关. 实验分析计算可知这个恒定的时间差平均值为 0.36 ms, 离散方差为  $7.3\times 10^5$ . 将额外的延时平均值作为固定的系统误差, 重新对测量的延时时间进行修正, 超声测距修正后结果(如图 8 所示), 可见超声测距在修正超声传播延时时间后两者具有很好的一致性, 通过对比计算可知超声测距的精度在  $(1.5\pm 0.03)$  mm 范围内.

表 1 不同距离下的超声传播时间实测表

Table 1 Under the different distance of ultrasonic propagation time

距离 (cm)	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
理论时间 $t_{\text{rel}}$ (ms)	0.29	0.58	1.16	1.74	2.32	2.90	3.48	4.06	4.64	5.22	5.80
实际时间 $t_2$ (ms)	0.65	0.94	1.51	2.09	2.68	3.26	3.84	4.42	4.99	5.60	6.18
误差时间 (ms)	0.36	0.36	0.35	0.35	0.36	0.36	0.36	0.36	0.35	0.38	0.38

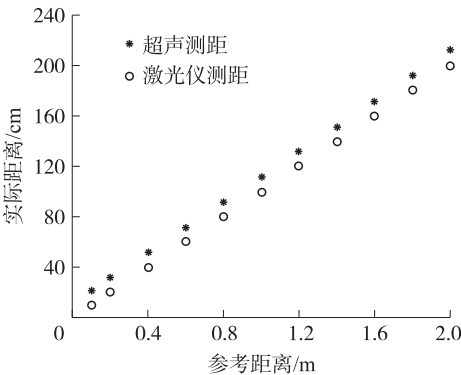


图 7 超声测距与激光仪测距比较(未修正时延)

Fig. 7 Comparison of ultrasonic ranging and laser ranging(unamended the delay)

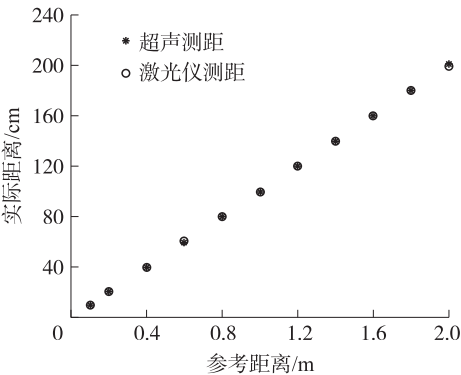


图 8 超声测距与激光仪测距比较(修正时延)

Fig. 8 Comparison of ultrasonic ranging and laser ranging(amend the delay)

5 结语

本文分析了红外同步测距系统的原理及结构,完成了相应的系统电路和软件设计. 理论分析了红外同步方式的超声发射端与接收端信号传输、处理的物理特性,并通过实验验证. 另外,分析了超声波在空气中传播产生时间误差的来源,修正了超声测距的理论公式,使测距精度达到 1.5 mm.



[参考文献] (References)

- [1] 毛俊,马骏,苗津铨. 超低功耗高精度超声测距报警系统研究[J]. 自动化技术与应用,2016,35(3):68-72.  
MAO J,MA J,MIAO J Q. Study of ultra low power consumption and high precision ultrasonic distance measurement and alarm[J]. Techniques of automation and applications,2016,35(3):68-72.(in Chinese)
- [2] 刘赞,王波,刘智超. 一种基于超声测距技术的超声液位仪设计[J]. 传感器与微系统,2014,33(9):91-93.  
LIU Y,WANG B,LIU Z C. Design of an ultrasonic liquid level meter based on ultrasonic ranging technology[J]. Transducer and microsystem technologies,2014,33(9):91-93.(in Chinese)
- [3] 刘军,张洋,严汉宇. 原子教你玩 STM32(寄存器版)[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2013:13-18.  
LIU J,ZHANG Y,YAN H Y. Atom teach you to play STM32(register version)[M]. Beijing:Beihang University Press,2013:13-18.(in Chinese)
- [4] 万明习. 生物医学超声学[M]. 北京:科学出版社,2010:134-136.  
WAN M X. Biomedical ultrasonics[M]. Beijing: Science Press,2010:134-136.(in Chinese)
- [5] 丁镇生. 电子电路设计与应用手册[M]. 北京:电子工业出版社,2013:137-139.  
DING Z S. Electronic circuit design and application manual[M]. Beijing:Electronic Industry Press,2013:137-139.(in Chinese)
- [6] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础[M]. 南京:南京大学出版社,2012:223-226.  
DU G H,ZHU Z M,GONG X F. Basic acoustics[M]. Nanjing:Nanjing University Press,2012:223-226.(in Chinese)
- [7] 宋雪松,李冬明,崔长胜. 手把手教你学 51 单片机[M]. 北京:清华大学出版社,2014:303-304.  
SONG X S,LI D M,CUI C S. Taught you how to learn 51 single chip microcomputer[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2014:303-304.(in Chinese)
- [8] 赵浪涛,赵永花,柴清. 高精度超声波测距方法的研究[J]. 电气自动化,2015,37(3):112-114.  
ZHAO L T,ZHAO Y H,CHAI Q. A research on high-precision ultrasonic distance measurement[J]. Electrical automation,2015,37(3):112-114.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]

(上接第 23 页)

- [4] 罗广孝,崔翔,张卫东,等. TVS 静电抑制器等效电路参数估算及应用[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):204-211.  
LUO G X,CUI X,ZHANG W D. Equivalent circuit parameter estimation and application of TVS electrostatic discharge suppressor[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(16):204-211.(in Chinese)
- [5] CHUANG C,KER M. On-chip transient voltage suppressor integrated with silicon-based transceiver IC for system-level ESD protection[J]. IEEE transactions on industrial electronics,2014,61(10):5 615-5 621.
- [6] BICLEANU D P,NICUTA A M. Approach on electrostatic discharge protection structures based on transient voltage suppressor diodes[J]. International symposium on advanced topics in electrical engineering,2013,239(239):1-4.
- [7] WANG Z,WU Z,ZHANG X,et al. Investigation of the effect of the ESD to the transient voltage suppressor[J]. International conference on electronics and optoelectronics,2011,8 908(2):V3-133-V3-135.
- [8] 刘素玲,段平光,李霞,等. 静电放电模拟器电路建模分析[J]. 电波科学学报,2009,24(6):1 172-1 178.  
LIU S L,DUAN P G,LI X,et al. Analysis of electrostatic discharge simulator circuit modeling[J]. Chinese journal of radio science,2009,24(6):1 172-1 178.(in Chinese)
- [9] SEKINE T,ASAI H,LEE J S. Unified circuit modeling technique for the simulation of electrostatic discharge(ESD) injected by an ESD generator[J]. Journal of cellular physiology,2012,227(6):2 461-2 469.

[责任编辑:陈 庆]