

超声波传感器应用综述*

Application Overviews of Ultrasonic Sensor

韦兴平 车 畅 宋春华 (西华大学机械工程与自动化学院,四川 成都 610039)

摘 要

结合超声波传感器的工作原理,对超声波技术在测距、自动焊缝跟踪、流量测量、液体浓度检测和零件无损探伤的应用现状作了综述。总结了超声波传感器目前存在的主要问题及解决方法。最后对超声波传感器的发展趋势进行了展望。

关键词: 超声波,测距,自动焊缝跟踪,流量测量,浓度检测,无损探伤

Abstract

Base on the principle of ultrasonic sensor,the application status of ultrasonic technology in the field of ranging,automatic weld seam tracking,flow measurement,liquid-concentration detection and nondestructive inspection are summarized.Then the current main problems and solutions of ultrasonic sensor are analyzed.Finally,the developmental trends in ultrasonic sensor are also presented in this paper.

Keywords: ultrasonic,ranging,automatic weld seam tracking,flow measurement,concentration detection,nondestructive inspection

超声波传感器是利用超声波的特性研制而成的传感器。超声波传感器具有成本低、安装维护方便、体积小、可实现非接触测量,同时不易受电磁、烟雾、光线、被测对象颜色等影响,能实现在黑暗、有灰尘、烟雾、电磁干扰和有毒等环境下工作。因此在工业领域得到广泛的应用。本文结合超声波传感器的工作原理,对超声波在测距、自动焊缝跟踪、零件无损探伤、流量测量、液体浓度检测的应用现状作了综述。

1 超声波传感器的工作原理

超声波定位技术是蝙蝠等一些无目视能力的生物作为防御天敌及捕获猎物的生存手段,这些生物体可发射人们听不到的超声波(20kHz以上的机械波),借助空气介质传播,根据猎物或障碍物反射回波的时间间隔及强弱,判断猎物的性质或障碍物的位置^[1]。人们根据仿生学原理,开发出了超声波测距和无损探伤等一系列实用的超声波传感器。

超声波传感器是一种可逆换能器,利用晶体的压电效应和电致伸缩效应,将机械能与电能相互转换,实现对各种参量的测量。超声波发生器可分为两大类:一类是用电气方式产生超声波;一类是用机械方式产生超声波。电气类包括压电型、磁致伸缩型和电动型等;机械类包括加尔统笛、液哨和气流旋笛等。它们所产生的超声波频率、功率和声波特性各不相同,因而用途也有所不同。目前常用的是压电式超声波发生器,它是利用压电晶体的谐振来工作的,该传感器有两个压电晶片和一个共振板,当其两极外加脉冲信号,且频率等于压电晶片的固有振荡频率时,压电晶片将会发生共振,并带动共振板振动产生超声波。反之,如果两电极间未外加电压,当共振板接收到超声波时,将迫使压电晶片振动,将机械能转换为电信号,这时它就成为超声波接收器。根据回波与发射波之间的时间差或是回波的强弱,超声波传感器即可得到被测物距离或属性。

2 超声波传感器的应用

2.1 超声波测距

超声波测距的基本原理是超声波发射传感器发出声波,声

波遇到被测物体返回至超声波接收传感器,根据声波的传输时间 t ,即可计算出被测距离:

$$d = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

式(1)中 c 为声波在介质中的传播速度(m/s)。

超声波测距原理简单、数据处理速度快、安装维护方便和成本低等优点,在液位测量、机器人避障及精确测距定位等得到广泛的应用。李敏哲等^[2]设计了基于无线传输的分布式超声波液位测量系统,能同时对多个储液罐液位进行测量,系统中采用了测温电路对温度进行补偿,提高了测量精度。刘玉芹等^[3]采用两个超声波传感器检测机器人行走过程中周围障碍物信息,实现了移动机器人避障功能,但是只能获取目标的距离信息,而不能准确得到目标的边界信息。Seong Jin Kim等^[4]在室内多个已知位置安装超声波发射器,把接收器安装在移动机器人上,并结合一个扩展的卡曼滤波器(Extended Kalman Filter,EKF),实现室内移动机器人精确定位。丁立军等^[5]为了克服超声波传感器的检测盲区,研制了基于超声波传感器与红外传感器的感测系统,采用红外传感器补偿了超声波传感器的检测盲区,提高了感测范围,在移动机器人避障及导航中得到了良好的应用。堵俊等^[6]设计了一种以单片机为主控芯片,CPLD负责超声波的产生、发送和接收以及对超声波的传播时间进行高速计数,并采用数字温度传感器进行温度补偿的超声波测距系统,减小了超声波计时误差和声速误差,实现了高精度的距离测量。

2.2 超声波自动焊缝跟踪

由于超声波传感器具有不受弧光和强电磁干扰、对检测物体表面起伏变化敏感、性价比高、可穿透烟尘等优点,近年来在焊缝跟踪中得到了一定的应用。田松亚等^[7]设计一种基于超声波传感器的波纹板折线焊缝跟踪系统,用超声波传感器跟踪波纹板的一个波纹周期,对输出信号进行快速傅立叶变换和巴特沃兹滤波后,求出波纹板槽面与斜边交接处的折弯位置,实现了波纹板折线焊缝自动跟踪。王英鸽等^[8]采用最小二乘法拟合对

* 四川省教育厅重点项目(10ZA102);西华大学制造与自动化省高校重点实验室开放课题(szjj2014-031);西华大学青年基金(Q0920209)资助

超声波传感器进行标定,在直角焊缝自动焊接跟踪中得到较好的效果。张晨曙等^[9-10]对超声波在焊缝跟踪进行了综述,提出了在焊接环境中提高超声波检测精度的措施,如信息融合技术和信息处理技术。

2.3 超声波流量测量

超声波流量检测的基本原理,是基于超声波在流体中传播的速度等于流体的流速与超声波速度的矢量和。其具体实现方法有传播速度差法(包括差频法、时差法和相位差)、波束偏移法、多普勒法、相关法、空间滤波法以及噪声法等^[11]。姚滨滨等^[12]研制了基于超声波时差法的流量计,采用高精度的 TDC-GP2 时间数字转换器,流量测量精度达到 5%。桂永芳等^[13]设计了一种基于互相关理论的超声波气体流量测量系统,采用 DSP 为控制器,通过采集上、下游流动信号做互相关运算,计算出互相关函数峰值对应的渡越时间,间接测量出流量,在流速大于 0.16m/s 时测量误差小于 3%。

2.4 超声波液体浓度检测

超声波液体浓度检测原理是基于超声波在液体中传播速度与液体浓度和温度之间存在着函数关系。根据声学原理,液体中超声波传播的速度是液体弹性模量和密度的函数,超声波的速度随液体弹性模量或密度而变,同时也是溶液质量浓度和温度的函数。因此只要在不同温度下测得超声波的传导速度,即可求出液体的质量浓度。黄佳等^[14-15]设计了一种基于超声波传感器的酵母浓度检测系统,研究了啤酒生产中酵母细胞浓度与超声波传播时间以及温度之间的对应关系,并对测量中产生影响的各个因素分别加以讨论并提出解决方案,实现了啤酒生产中酵母浓度的在线测量。

2.5 超声波零件无损探伤

超声波探伤既可以检测材料表面的缺陷,又可以检测内部几米深的缺陷,比 X 射线探伤灵敏度高、周期短,对人体无害等优点。其缺点是要求工件表面平滑,有经验的检测人员才能判别出缺陷的类型,对缺陷没有直观性。因此超声波探伤适合于厚度较大的零件检测。李凯峻^[16]提出了一种对高压无缝钢管超声波无损检测方法,可以对直管进行自动连续和点动探伤检测,并存储了各种钢管探伤工艺和标准,实现了无缝钢管的自动超声波无损探伤。杨理琰等^[17]设计了一种超声兰姆波无损探伤检测系统,对金属薄板无损探伤获得了较高的灵敏度。彭光俊等^[18]对无损探伤中的快速计算技术进行了研究,为无损探伤技术的可靠性、可靠性评价方法及影响因素提供了参考。

3 超声波传感器的缺点及解决方法

1)测量盲区。超声波的测量盲区由两个因素造成:第一是超声波传感器发射信号过后,换能器存在余振,如果发射信号后立即打开接收电路,余振信号会引起误判断。一般在启动发射信号后,要延迟一段时间再打开接收电路,这段时间无法检测超声波的传播距离,因此会存在测量的盲区。超声波的余振信号强弱跟换能器的性能、发射信号的强弱有关。通过提高换能器的性能和减小发射信号的功率可降低余振,减少盲区。第二是一体化探头的超声波传感器需要控制器通过切换电路控制发射和接收,切换的时间间隔也会产生盲区。可以采用更高主频的控制器和更快的切换电路来减少此类盲区。

除了提高控制器和传感器的本身性能外,丁立军等^[5]利用红外传感器无盲区、测量精度高、方向性强,但受环境影响较大、探测距离较近的特点,将超声波传感器与红外线传感器组合使用,实现优势互补,来克服超声波传感器测量盲区的问题。

2)超声波传播速度受环境变化影响。超声波在介质中传播

的速度受到环境变化的影响(如温度、压力、湿度等),其中温度的影响最为明显,一般温度每升高 1℃,声速增加约为 0.6m/s,式(2)、式(3)分别是在空气和海水中时,超声波传播的速度与环境参数之间的函数关系^[19]。

$$c_A = 331.4 \times \sqrt{1 + T/273} \quad (2)$$

$$c_W = 1450 + 4.21T - 0.0037T^2 + 1.14(S - 35) + 0.175P \quad (3)$$

式中,T 为环境温度(单位为摄氏度℃),S 为水盐度(按千分比计算),P 为海水静压力(单位为 Pa)。

为了提高超声波的测量精度,必须对声速进行校正。声速校正的主要方法有:温度补偿法和设置校正具法。温度补偿法采用温度传感器检测环境温度,再计算出对应的声速。设置校正具法是在测距过程中采用双通道测量:一个通道通过对已知距离的预设参照物的测量,确定当前环境下的声波速度;另一通道则以测得的声速为准,按正常方式测距,避免了环境变化对声速的影响^[20]。莫德举等^[21]采用设置校正具法对声速进行补偿,对液体液位进行测量,实现了比温度补偿法更高精度的测量。

3)障碍物体积不能太小。根据超声波传播理论,当障碍物的尺寸小于超声波长的 1/2 时,超声波将发生绕射;当障碍物尺寸大于波长的 1/2 时,才能反射。如采用的超声波传感器发射频率为 40kHz,相应半波长为 0.025mm,因此在理论上最小可以测得边长为 0.025mm 的障碍物。可提高超声波的发射频率来实现更小体积障碍物的测距。

4)测量距离有限。超声波回波信号幅值随传播距离增大呈指数规律衰减,使得接收器收到的回波信号随着测量距离增大而大幅减小,造成测量距离有限。而增大发射器发射功率会使换能器余振增大,加大了测量盲区。在电路中串上自动增益调节环节(AGV),使电路放大倍数随着测量距离的增大而按相应规律增加,可减少对测量盲区的影响。但受到超声波发射功率和损耗的限制,目前国内超声波传感器的最大测量距离一般不超过 15m。

4 超声波传感器的发展趋势

超声波传感器作为典型的非接触检测技术,同时具有体积小、成本低,不受电磁、光线、烟雾等干扰的优点,具有广阔的发展前景。综合分析了超声波传感器在测距等方面的应用现状、存在的问题及解决方法,对超声波传感器的发展趋势做以下几点展望:

1)集成化、高精度,未来的超声波传感器将内置温度补偿电路,当外界环境温度变化时,由温度补偿电路自动进行校对,提高测量的精度。

2)提高抗干扰性,新型的超声波传感器感应头应具有更强的自我保护能力,可以抵御物质损害,适应比较脏乱的环境。使得超声波传感器能适应恶劣环境测量。

3)智能化、数字化,新型超声波传感器应易于调整,适应不同的测量距离,输出的信号有多种类型,使得应用更加灵活。

4)多种传感器融合技术,随着工业现场对传感器的检测精度和可靠性要求越来越高,多种传感器(如激光测距、红外线等)与超声波传感器冗余结合使用,充分发挥各自的优势,提高传感器的总体性能,也将成为超声波传感器的一个发展趋势。

参考文献

- [1]赵小强,赵连玉.超声波测距系统中的温度补偿[J].组合机床与自动化加工技术,2008(12):62-64
- [2]李敏哲,赵继印,李建坡.基于超声波传感器的无线液位测量系统[J].仪表技术与传感器,2005(11):35-36
- [3]刘玉芹,刘敬文.超声波测距仪在移动机器人避障中的应用[J].仪器

(下转第 139 页)

后,控制电机进行逆时针转动。

3.2.2 ADC 中断子程序

每隔 1ms,ADC 中断子程序运行一次,采集 4 路信号,同为总电流数字信号,将采集到的 4 路信号进行相加,并采集了两组实验数据:实际输入电压 0.560、1.478;对应 4 路总电流数字信号之和为:48352、131104;对这两组数据以 $y=ax+b$ 的方式进行线性拟合,求出 a 的近似值为 90144, b 的近似值为 -2129。由于采样电阻为 $5m\Omega$,进行了 22 倍放大,设定电流上限为 20A,则对应实际电压为 2.2V,将 2.2 作为 x 代入,求得 y 近似为 196188。当电流超过 20A 时,软件进行保护,行为控制寄存器 ACTRA 赋值为 0x0CCC,三路全桥的 6 个功率管端输入全为低,baohu=1,不再运算 SVPWM 子程序,功率模块得到保护。

3.2.3 功率保护中断子程序

当接收到 EV-A 外部功率保护中断信号后,行为控制寄存器 ACTRA 赋值为 0x0CCC,三路全桥的 6 个功率管端输入全为低,baohu=1,不再运算 SVPWM 子程序,功率模块得到保护。

3.2.4 事件管理器通用定时器 1 下溢中断子程序

这个子程序的主要任务:对从旋转变压器/数字转换器输出,输入 DSP 芯片 GPIOB0-GPIOB15 端口的电机转子位置和电机转速信号进行采集,根据输入的正反转信号命令和转子位置信号,运行 SVPWM 子程序,计算写入比较寄存器 CMPR1、CMPR2、CMPR3 的数值,每 0.2ms 运行一次。

3.2.5 事件管理器通用定时器 2 下溢中断子程序

这段子程序的主要功能是:依据采集的转子角度信号、输入的正反转命令信号和发送的脉冲总个数信号,对电机进行位置控制,使电机完成指定的旋转角度,这个指定值由外部实时发送的脉冲个数决定,一个脉冲代表 10° 机械角度,对电机的位置控制偏差值要求在 1° 以内。

3.3 SVPWM 子程序

SVPWM 子程序为电机转动控制的核心算法程序,这个子程序依据第三章中的 SVPWM 模块而编写,根据旋转变压器采集的转子机械角度,乘以电机极对数后,得到转子电子角度,理论上加上 90° 或者减去 90° (在实际中不是 90° ,有偏差),就得

到使电机运行效率最高的定子三相绕组的空间电压矢量合成方向,再依据需要转动的角度值,控制有效电压值,将此有效电压值分解到定子两相静止坐标系,就得到 u_{β} 、 u_{α} 的大小,结合空间电压矢量合成方向计算所在扇区 N ,然后再算出 X 、 Y 、 Z 和 t_a 、 t_b 、 t_c ,结合所在扇区 N ,确定写入全比较寄存器 CMPR1、CMPR2、CMPR3 的数值大小。

4 结束语

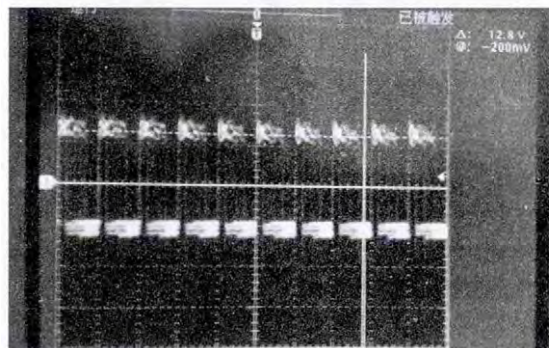


图6 线电压波形

设定电压值 $U_{ref}=8$,依据 SVPWM 算法生成 6 路 PWM 波,通过逆变电路供给永磁直流无刷电机,电机进行空转时采集到的线电压如图 6 所示,电机空转电流为 0.4A,电机平稳运转,验证了软件设计的正确性与有效性。

参考文献

- [1]南林,龚晓宏,白向林.基于 SVPWM 的永磁同步电机控制器设计[J].工业控制计算机,2012,25(10):51
- [2]贾凯,郑春晖,陈为廉.基于 TMS320F2812 的双电源供电电路设计实现[J].电子工程师,2008,34(9):27
- [3]姜燕平.旋转变压器原理及其应用[J].电气时代,2005,10:98
- [4]顾卫钢.手把手教你学 DSP—基于 TMS320X281x[M].北京:北京航空航天大学出版社,2011:193-214

[收稿日期:2014.8.19]

(上接第 136 页)

仪表学报,2006(6):1559-1560

- [4]Seong Jin Kim, Byung Kook Kim. Dynamic Ultrasonic Hybrid Localization System for Indoor Mobile Robots. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2013; 60: 4562-4573
- [5]丁立军,华亮,陈峰.基于超声波传感器与红外传感器的移动机器人感测系统研制[J].南通大学学报(自然科学版),2008(6):13-17
- [6]堵俊,吴晓,华亮.基于 CPLD 的新型高精度超声波传感器测距系统研制[J].仪表技术与传感器,2008(11):8-11
- [7]田松亚,等.超声波传感器在波纹板折线焊缝跟踪中的应用[J].焊接学报,2010(12):97-100
- [8]王英鸽,等.超声波传感器在直角焊缝自动焊接中的应用[J].传感器与微系统,2009(5):112-114
- [9]张晨曙,叶建雄.超声波在焊缝跟踪中的应用[J].焊接技术,2009(4):1-4
- [10]胡绳荪,张绍彬,候文考.焊缝跟踪中的非接触式超声波传感器的研究[J].传感器技术,1999(2):5-8
- [11]高国旺,等.超声波传感器流量测量的关键问题思考[J].仪器仪表与分析监测,2006(2):23-28
- [12]姚滨滨,等.基于时差法和 TDC-GP2 的超声波流量测量方法[J].

自动化与仪表,2011(8):17-20

- [13]桂永芳,傅新,鲍敏.基于互相关理论的超声气体流量测量电路系统[J].工业仪表与自动化装置,2004(2):15-17
- [14]黄佳,冯斌,须文波.在线测量啤酒生产中酵母浓度的超声波传感器的研究[J].仪器仪表装置,2002(3):10-12
- [15]杨海麟,等.在线测量啤酒生产中酵母浓度的超声波传感器的研究[J].酿酒,2002(9):99-100
- [16]李凯峻.超声波无损探伤的控制系统设计[J].机械设计与制造,2008(8):159-161
- [17]杨理践,梁振,高松巍.电磁超声兰姆波的无损探伤技术[J].仪表技术与传感器,2012(12):76-80
- [18]彭光俊,李文.现代无损探伤中的快速计算技术[J].无损探伤,2001(1):9-10
- [19]曹玉华.超声波测距系统设计及其在机器人模糊避障中的应用[D].青岛:中国海洋大学,2007
- [20]孙长柏.声学测量中的声速补偿技术[J].传感器技术学报,1996(4):77-80
- [21]莫德举,刘艳艳.超声波液位测量方法的研究[J].仪器仪表与分析监测,2007(1):21-31

[收稿日期:2014.8.16]