

基于超声测距的工业机器人避障控制系统设计

李 强

(西安航空职业技术学院 质量管理中心, 西安 710089)

摘要: 工业机器人对于自身与障碍物之间的距离测量不准确, 无法根据二者距离判断行驶路径, 导致避障效果较差; 为此基于超声测距技术设计了一种新的工业机器人避障控制系统, 从硬件和软件两方面对避障效果进行优化设计; 将具有脉冲信号的超声换能器安装在单片机的操作模块中, 增加 MOS 功率器件作为超声换能器的驱动元件, 应用 EA1、EA2 和 EA3 三种型号的误差放大器, 将回波信号稳定放大到电路中, 利用运算放大器和 RC 网络电路实现滤波放大, 利用信号检测电路实现检测; 利用超声波传感器精准测量出自己与障碍物之间的距离, 通过建立模糊数据库、定位漫反射信息、提取不同方向的测距信息实现工业机器人避障控制; 实验结果表明, 设计的基于超声测距的工业机器人避障控制系统能够准确测量出与障碍物之间的距离, 避障控制准确率平均值达 97.4%, 能够实现工业机器人避障防撞操作。

关键词: 超声波传感器; 控制系统; 工业机器人; 避障控制; 传感器测距

Design of Industrial Robot Obstacle Avoidance Control System Based on Ultrasonic Ranging

LI Qiang

(Quality Inspection Center, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Because the distance between the robot and obstacle is not accurately measured, the route cannot be judged by the distance between the robot and obstacle, and leads to the poor effect of the obstacle avoidance. A new obstacle avoidance control system of industrial robot based on ultrasonic ranging technology is designed, which optimizes the obstacle avoidance effect from hardware and software. The ultrasonic transducer with pulse signal is installed in the operation module of single-chip microcomputer, a MOS power device is added as the driving element of ultrasonic transducer, and three types of error amplifiers of EA1, EA2 and EA3 are used to stably amplify the echo signal in the circuit, the operational amplifier and RC network circuit are used to realize filtering and amplification, and the signal detection circuit is used to realize the detection. The ultrasonic sensor is used to accurately measure the distance to the obstacle, and the obstacle avoidance control of the industrial robot is realized by establishing a fuzzy database, locating the diffuse reflection information, and extracting the ranging information in different directions. The experimental results show that the distance between the robot and obstacle can be accurately measured, and the average control accuracy is 97.4%, which can realize the obstacle avoidance and collision of the robot.

Keywords: ultrasonic sensor; control system; industrial robot; obstacle avoidance control; sensor ranging

0 引言

超声波测距装置是一种性能比较好的测距装置, 它不会受到外界的干扰, 测距精度高, 方向性强, 技术上已趋于成熟。超声波传感器更多地应用在工业机器人避障控制系统中, 成为了机械装备的必要辅助装置。

近年来, 国内外有大量的研究人员对超声波传感器的工业机器人避障控制系统进行研究, 将该技术应用在更广泛的领域, 同时也使得该技术具有更好的精准性和稳定性^[1-2]。

目前已有相关领域研究学者对业机器人避障控制系统做出了研究。文献 [3] 提出基于最优交互碰撞算法的机器人避障系统。在自动避障过程中, 利用最优的交互式碰撞方法, 将位置空间转化为速度空间, 以避免碰撞但是这种方式精度过低。文献 [4] 提出在硬件装置中安装大量的传

感器, 传感器覆盖设备中产生的数据可以同时上传到网络基站中, 进行故障节点的定位计算, 从而达到故障与障碍物识别的效果, 但是定位时间过长。文献 [5] 提出基于改进的快速扩展随机树的工业机器人路径避障规划算法。引入了扩展点选取和自适应步长的控制策略, 避免算法陷入局部最优解, 将该算法与 Dijkstra 算法相结合, 从而获得工业机器人避障最优路径。该方法的避障控制准确率较高, 但控制效率较差。

超声波传感器可以解决超声波传播过程中出现的起振延时间问题, 充分利用主控芯片对相关信息的控制, 检测传感器中的相位关系, 再对超声波的发射探头和接收探头进行集成处理, 经过处理的超声波携带了精准的距离参数, 不通过超声波途径从通讯电路中直接到达数据显示终端。

收稿日期: 2022-06-14; 修回日期: 2022-08-04。

作者简介: 李 强(1986-), 男, 山东潍坊人, 硕士, 讲师, 主要从事汽车工程方向的研究。

引用格式: 李 强. 基于超声测距的工业机器人避障控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(2): 109-114.

综上所述,本文基于超声测距技术设计了一种新的工业机器人避障控制系统。利用 3 种不同的误差放大器 EA1、EA2、EA3,将回波信号稳频放大到电路中,利用运算放大器对其进行滤波、放大,提升硬件对障碍物的检测性能。在此基础上,基于超声检测技术构建模糊数据库,检测出机器人与障碍物之间的距离,并对所有的障碍物信息进行定位,提取不同方向的测距信息,实现全面的避障控制,完成工业机器人避障控制系统设计。

1 基于超声测距的工业机器人避障控制系统硬件设计

工业机器人避障控制系统硬件设计包括单片机数据采集模块设计、超声波传感器设计、回波接收电路设计、带通滤波器设计、信号检测电路设计及继电器设计共 6 方面,系统硬件整体结构如图 1 所示。

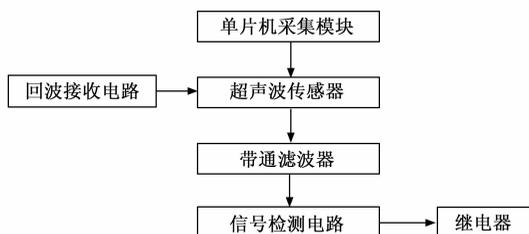


图 1 系统硬件整体结构图

1.1 单片机数据采集模块设计

通过单片机采集各种数据,利用 DTU 模块完成信息转换,得到的数据传输给上位机,利用上位机完成信息转换,在串口上通过透明传输方式完成信息传输。使用 DTU 完成通讯连接,在连接过程中不能申请固定的 IP,内部的单片机完成信息传输,延长供电时间。由于服务器不能涉及固定的 IP,因此需要利用串口完成信息的收发。系统采用自动读取和查询读取两种模式,通过单片机完成防撞操作。

自动读取模式在单片机内部加入了定时器,固定定时时间,通过单片机完成信息读取,利用 P3.7 高低电平实现信息控制,同时对 DTU 完成供电操作。在 RS-485 接口中完成信息读取,这样可以很好地保证芯片的工作时间,为系统提供更好的电量,完成信息读取。

查询读取模式适合于带电状态,通过确定高电平完成信息传感,实现命令上传,实现信息数据接收,利用定时器完成接收操作,设置 1.5 字符,当输出的信息超过 1.5 字符后会出现停顿,如果超出停顿时间就会出现新的数据帧,完成信息的采集和上报工作。

1.2 超声波传感器设计

超声波传感器在工业机器人避障控制系统中不仅要起到超声波发射的作用,还要控制内部的超声波发射电路对外进行电压驱动,避免外部超声波电路脉冲逆变。本文在设计超声波传感器的过程中,首先对单片机的信号发送模块进行结构分析,将具有脉冲信号的超声换能器安装在单

片机的操作模块中,同时还增加 MOS 功率器件作为超声换能器的驱动元件^[6-7]。本文选用的超声波传感器型号为 4-20HR-MaxSonar-WR,具有毫米级波长,波长大于 5 mm,频率为 100 kHz,检测范围可达 5 m。

常规情况下的超声波传感器中具有一个电荷响应装置,但是传统的电荷响应装置在进行电荷控制的过程中需要有一定的等待时间,而在本文的超声波传感器结构设计中,将电压控制代替电荷控制,应用较大的电压来带动电荷,使超声波传感器中的脉冲驱动电压频率等于超声波换能器的极限频率。超声波传感器中的驱动模块装配结构如图 2 所示。

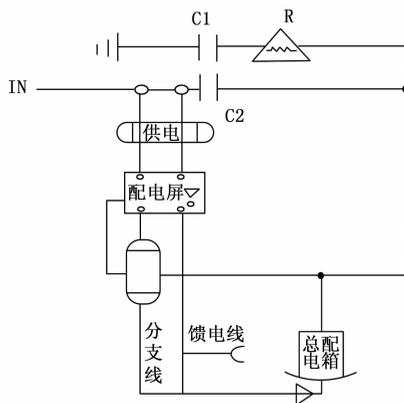


图 2 超声波传感器驱动模块装配结构图

如图 2 所示,本文设计的驱动模块中还安装有两个 MOS 管,帮助两个管路中的脉冲信号可以在传感器中交替导通。电路中的线圈具有增加传感器激励的作用,使传感器的超声波信号发送更远,随着超声波传感器中检测数字信号的增多,传感器对外表达信息的能力也随之增强^[8]。

1.3 回波接收电路设计

回波接收电路设计主要体现在可变增益放大器中,本文对电路的设计遵循电阻网络设计原理,对不同强度下的同一种超声波信号能够完成不同增益效果的选取接收,进一步实现精准测距。超声波传感器中的回波信号大多都属于电压信号,电压信号经过滤波器后便会成为交流信号,为了合理储存这种交流信号,本文应用 EA1、EA2 和 EA3 三种型号的误差放大器,分别为 Type I、Type II、Type III 误差放大器,Type I 误差放大器可增加系统的动态响应、Type II、Type III 误差放大器可抵消零点,将回波信号稳定放大到电路中。可变增益电路结构如图 3 所示。

观察图 3 可知,回流超声波在 EA1 中受到负反馈结构的作用,按照电阻的实际比例传输到另外一个输入端口中,其中 R1、R2 分别为负反馈的对比电阻。为了增加回流超声波的稳定性,本文在 EA3 中输出端中加设了一个电容 C。作为补偿,使得回波接收电路成为跨导线性环结构^[9-11]。

1.4 带通滤波器设计

本文设计的带通滤波器属于无源滤波器,只需要电感、电容以及电阻即可实现滤波作用。带通滤波器由多个普通滤波器联合组成,不使用电源负载就可以完成信号所在的

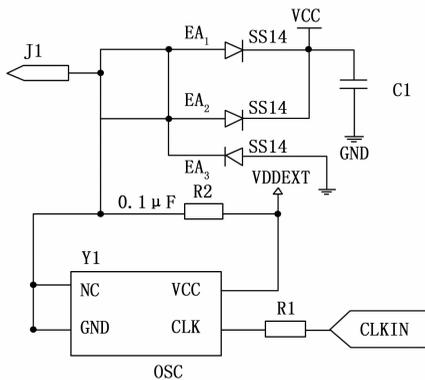


图 3 可变增益电路结构图

频率空间内过滤，但是无源滤波器滤波特性相对于有源滤波器较弱，为此本文在部分滤波器中增加安装了运算放大器和 RC 网络电路，在超声波信号没有进入到滤波器中进行了初步的特征放大，这种设计结构还可以将无功信号放大，使得无功信号也可以传输到高频环境中，代替超声波的传输，从而避免了超声波波长较短的缺陷。本文采用 LC 带通滤波器，覆盖频率在 100~2 500 MHz 之间，3 dB 标准带宽为 5~20%。带通滤波器结构如图 4 所示。

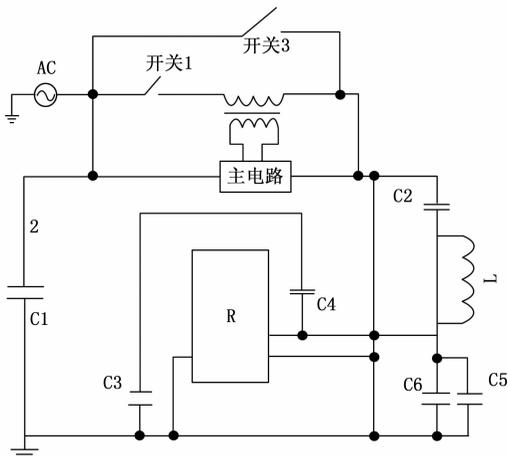


图 4 带通滤波器结构示意图

观察图 4 可知，所有电阻和电容在带通滤波器中均可以改变超声波传感器的测距范围，保证电路中滤波频率与误差放大器频率相同，在此基础上实现带通滤波器对超声波信号的效果增益^[12-14]。

1.5 信号检测电路设计

信号检测电路的主要功能是执行单片机中的工业机器人避障控制信号，对一些未知的控制信号进行检测与识别。本文所设计的信号检测电路将电阻与电路电源直接连接，电阻在电路分支线路中起到分压的作用，根据电阻的阻值大小以及数量确定电压的多个等级，本文设计的电压有 0.75 V、1.6 V、2.5 V 和 3.3 V 共 4 个等级^[15]。信号检测电路结构如图 5 所示。

本文在设计信号检测电路时，运行过程中的调节设备

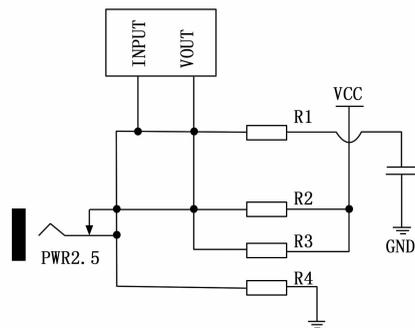


图 5 信号检测电路结构图

选用了比较器和触发器两个设备，其中 0.75 V 和 1.6 V 电压的运行等级使用比较器调节，2.5 V 和 3.3 V 电压的运行等级使用触发器调节^[16-18]。比较器与触发器与电路线路之间的连接点也作为数据的传输端口，端口的进入端使用一个电容作为电流的过渡结构，确保检测电路可以接收更广泛范围的电流信号。

1.6 继电器设计

继电器采用 SIEMENS，在编程过程中，软件没有安装指令库，因此难以支持 Modbus 协议，因此本文在继电器内部安装指令库，控制通讯协议的子程序和中断程序。在完成安装后，对系统的协议指令进行调度，从主站设备和从站设备两个角度出发完成通讯。在变性程序的过程中，利用 MBUS-INT 完成信息初始化，通过智能仪表发出各种不同的命令。完成参数设置和信息监控，在网络内部发送主站，接收智能仪表的询问命令。继电器电路结构如图 6 所示。

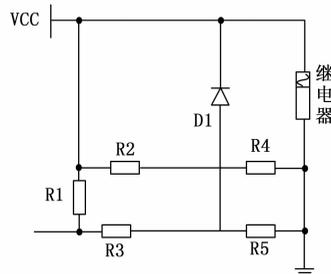


图 6 继电器电路结构图

本文选用的继电器具有超级电容，即使失去外部的接地电源也能够将 RAM 存储区的数据存入到存储器中，完成曲线计算，使系统始终能够保持带掉状态，得到的数据能够永久的保存在 RAM 中，提高系统的通用性，在复杂状态下也能完成移植。即使系统能够完成内置集成，系统的实时性也能得以增强。

综上，利用单片机数据采集模块采集工业机器人障碍物信息，利用超声波传感器及回波接收电路设计控制工业机器人智能测算障碍物距离，通过带通滤波器设计实现避障信息的高效传输，通过信号检测电路设计及继电器设计提升系统的数据处理及存储能力。

2 基于超声测距的工业机器人避障控制系统软件设计

在上述硬件设计的基础上，实现对超声波传感器应用

过程的智能控制。在软件设计部分,利用超声测距技术测算工业机器人障碍物距离,对避障信息智能处理,实现基于超声测距的工业机器人避障控制系统软件设计。

2.1 基于超声测距的工业机器人障碍物距离测算

超声波传感器在整个工业机器人避障控制系统中以成组的方式存在,可以在不同的方向共同对外发出超声波信号,再接收到反馈信号并实时处理,测算出精准的距离参数。利用超声波传感器采集工业机器人障碍物坐标点,假设其中一个超声波传感器的对外感应距离为 $2L$,那么可以初步确定障碍物与超声波信号接收点之间距离如公式(1)所示:

$$L_1 = 2\sqrt{K^2 + \left(\frac{MK}{2}\right)} \quad (1)$$

其中: L_1 表示障碍物与超声波信号接收点之间距离; M 、 K 表示超声波传感器与超声波信号接收点之间的距离和设置距离的倍数。

设置超声波传感器的间隔距离的关系如公式(2)所示:

$$L_2 = \sqrt{K^2 + (MK)} \quad (2)$$

超声波的传播路径为 S ,则有如下关系:

$$L_1 \leq S \leq L_2 \quad (3)$$

即:

$$2\sqrt{L^2 + \left(\frac{ML}{2}\right)} \leq S \leq \sqrt{L^2 + (ML)} \quad (4)$$

当 $L_1 < L_2$ 时,超声波接收装置检测到障碍物的信号,工业机器人避障控制系统发出预警信号。

2.2 基于超声测距的避障信息处理

工业机器人避障控制系统一般安装在实时动作的机械设备上,需要超声波传感器能够对避障信息进行及时处理。本文设计的超声波传感器从不同的方向同时获取外部的障碍信息,超声波传感器在进行避障信息处理的过程中需要对这些信息进行初步的综合处理,判断自身设备所在的环境状态,在已知自身环境状态的情况下实施避障策略。对于避障信息的详细处理步骤如图7所示。

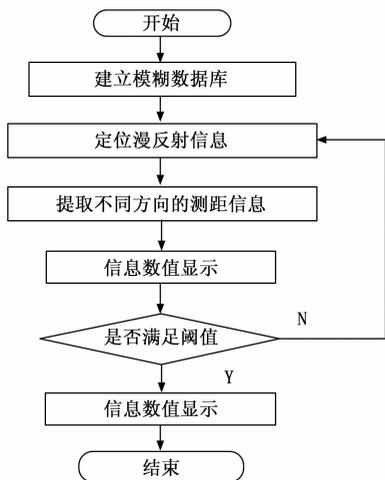


图7 基于超声测距的避障信息处理流程

1) 超声波传感器中的数据储存元件大量采集环境信息数据,同时也将工业机器人避障控制系统的动作姿态记录下来,超声波传感器中的数据储存元件大量采集环境信息数据,这些数据包含不确定因素,因此建立一个模糊数据库,将这些模糊数据储存在模糊数据库中;

2) 超声波传感器在较为狭窄的环境中会发出漫反射超声波,该环境下产生的连续漫反射超声波能够提供更加精准的测距数据,所以超声波传感器需要对漫反射信息及时定位并将信息上传到模糊数据库中;

3) 数据进入模糊数据库中,运行程序会将相应的数据按照方向类别进行划分选取,例如左侧障碍物测距数据库、右侧障碍物测距数据库、前方障碍物测距数据库等;

4) 避障信息处理的最后一步就是对不同方向的测距信息进行提取,针对不同方向的障碍物距离规划出避障路径^[19-21]。

在碰撞过程,系统需要发送软件通讯模式组件有效的服务器,利用DTU完成信息通讯,软件配置了mServer完成信息通信,通过不同的串口进行信息交互。在参数设置输入系统完成信息测量,如果测量的数据能够超过设定值,就会发出警报,提醒出现碰撞操作^[22]。

3 实验结果及讨论

为了验证本文设计的基于超声测距的工业机器人避障控制系统的有效性,通过实验平台对系统的防碰撞性能进行检测。设置工业机器人在正常状况下运行,设置碰撞阻碍,分析机器人在安装本文设计的工业机器人避障控制系统后,运行状况。

在对本文的工业机器人避障控制系统的有效性进行检测之前,要判断检测模板的正确性,设定校验模块,并设置屏蔽墙面,通过读取传感器反馈数值,分析校正值与偏差值的范围,实现超声提示,如果存在异常,需要发出警报。

超声波传感器测距信号预警阈值如表1所示。

表1 超声波传感器测距预警阈值

传感测距/m	距离倍数/m	回波预警阈值/%
1.0	0.5	2.5
2.0	1.0	3.1
3.0	1.5	4.6
4.0	2.0	5.0

为保证验证效果,本文分别设计了在左侧遇到障碍物、在右侧遇到障碍物、存在拐角、遇到不可通行区域和遇到小型障碍物几种情况,选用本文的防碰撞系统控制系统,系统的运行情况如图8所示。

根据图8可知,本文提出的防碰撞系统控制操控下的机器人在左侧遇到障碍物之前向着右前方移动,当检测到要遇到障碍物之后,机器人通过向右侧旋转巧妙地躲开障碍物,沿着障碍墙壁直行,具有很好的避障能力。机器人在运行一段时间后,遇见障碍物,工业机器人能够感知到外界存在障碍,并改变原本的运行方式,沿着墙壁直行,防止出现碰撞。

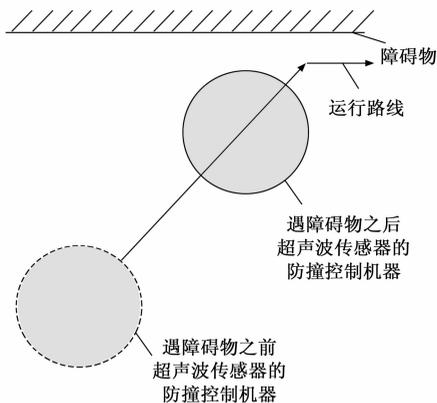


图 8 左侧遇到障碍物运行状况

根据图 9 可知，根据上图可知，在遇障碍物之前，防碰撞系统控制操控下的机器人在运行过程中向前方移动，由于障碍墙壁在机器人的正右侧，所以机器人能够正常运行。

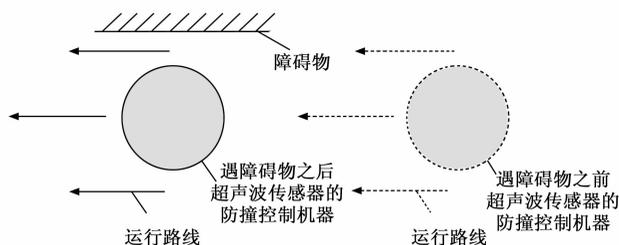


图 9 右侧遇到障碍物运行状况

根据图 10 可知，在遇到拐角之前，机器人沿着墙壁直行，在检测到拐角之后，机器人绕过拐角运行，能够正常行驶。

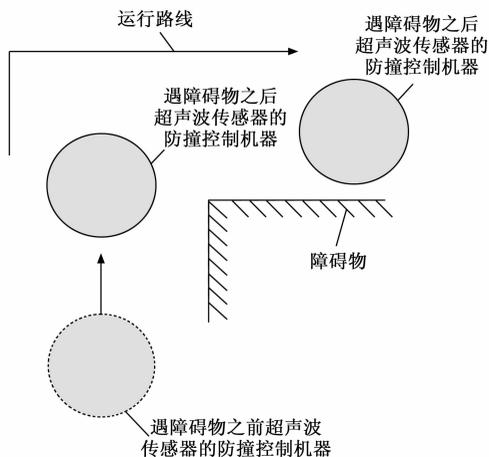


图 10 遇到拐角运行状况

观察图 11 可知，在遇到不可通行区域之前，机器人向着前方旋转，当检测到存在不可通行区域后，机器人改变运行方向，走出不可通行区域。

根据图 12 可知，本文提出的防碰撞系统控制操控下的机器人在遇到小型障碍物之后会改变运行状态，绕过障碍物向别的方位运行。

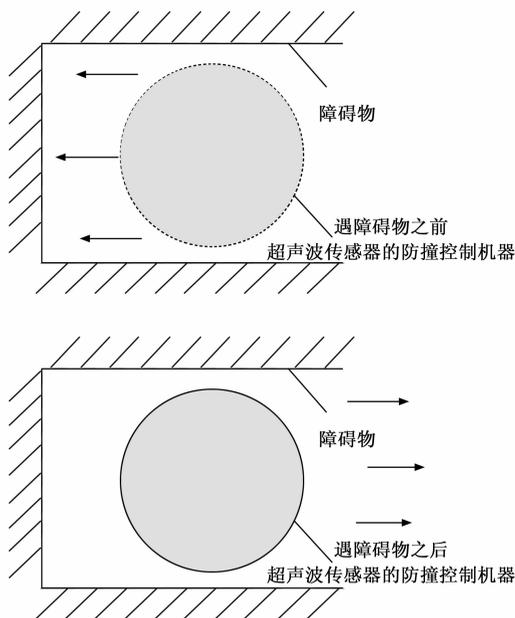


图 11 遇到不可通行区域运行状况

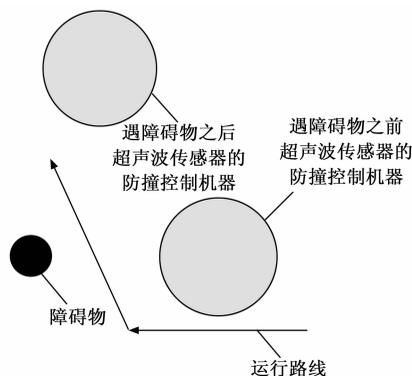


图 12 遇到小型障碍物运行状况

通过上述测试可以发现，基于超声测距的工业机器人避障控制系统具备很强的防碰撞能力，在发现正常运行的路线存在障碍物之后，系统就会立刻在监控界面上确定故障的原因，通过设定参数完成数值设置，防止系统出现碰撞。

以文献 [3] 提出的方法作为实验对比方法，测试两种系统在避障控制方面的准确性，得到对比结果如表 2 所示。

表 2 避障控制准确性对比结果

实验次数	本文系统/%	文献[3]系统/%
1	98	88
2	97	86
3	98	82
4	97	83
5	97	81

分析表 1 结果可知，本文系统的避障控制准确率平均

为 97.4%，文献 [3] 系统的避障控制准确率平均为 84%。本文系统在运行过程中，系统设置了访问控制程序，计算机可以更好地操控系统，超声波传感器传输的信号像雷达一样反射给目标，在短距离使用中有明显的优势。本文设计的系统将传感器与摄像机结合到一起，工业机器人能够观察周围环境，并检测目标，因此能获得准确的避障信息。

超声波内部的响应集线器能够分析信息，频率高、波长短、绕射现象小，具有很强的折射能力。虽然在介质传播过程中，随着距离的增加，得到的能量也逐渐衰减，但是由于本文引入了传感器，因此在扩散、散射和吸收传感器能量上，本文研究的系统具有显著的优势。

压电晶片的共振频率与工作频率相同，根据工作原理可知，如果两端的交流电压频率与晶片频率能够保持一致时，系统具有很大的输出能量，能够在短时间内做出灵敏的判断，提高系统操控的工业机器人的运行准确性。由于在运行过程中，系统的工作温度较低，因此本文设计了长时间待机功能，防止在运行过程出现失效。

由于晶体本身的耦合系数很大，所以自身的灵敏度得以加强。在探测过程中，传感器听到声音就能输出信息，所有的信息会反馈给超声波传感器，利用传感器实现信息检测，扩大传感范围。由于碰撞的目标可能体积较大，凭证密度较高，因此本文设计的避障孔明之系统引入的变换器呈现角度物体，如果在短时间内，传感器都没有得到有效的信息，超声波传感器会自动加长响应时间，通过分析多次研究得到的平均值，防止信息在传播的过程中出现偏离。在超声状态下，传感器可以通过分析干扰来判断物体是否存在。同时系统还设置了温度补偿功能，这种功能可以有效对外界环境温度进行调节，即使外界环境温度出现改变，本文设计的防撞系统也能够自我调节，防止由于温度梯度出现变化，或者环境温度变化过快对超声波传感器造成的影响，提高测量精度。

综上所述，本文将以超声波传感器作为工业机器人避障控制系统的设计基础，利用超声波传感器的作用特点与工业机器人避障控制系统之间的配合度解决工业机器人避障控制系统中信号不稳定、测距参数误差较大等问题。

4 结束语

本文在超声波传感器的基础上设计了工业机器人避障控制系统，充分发挥超声波传感器方向性良好、不易受外部环境干扰等优势，设计出了超声波传感器在工业机器人避障控制系统中的核心软硬件。实验结果表明，基于超声测距的工业机器人避障控制系统能够实现更加精准、稳定的工业机器人避障控制，并通过对比实验验证了避障控制的准确性。

参考文献:

[1] 王毅, 王恺, 张艺谭, 等. 基于超声波传感器的智能跟随系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40 (8): 92-95.

- [2] 李磊, 刘庆辉, 杨宽, 等. 基于超声波虚拟相控阵列的气体泄漏成像方法 [J]. 传感技术学报, 2019, 32 (5): 676-680.
- [3] 牛胜华, 韩佩. 智能巡查机器人自主避障系统设计 [J]. 电子设计工程, 2021, 29 (4): 155-158, 163.
- [4] 孙思瑞, 陶月松, 陈彬, 等. 基于 Opencv 的双目视觉智能防撞系统 [J]. 自动化技术与应用, 2020, 39 (5): 11-14.
- [5] 刘亚秋, 赵汉琛, 刘勋, 等. 一种基于改进的快速扩展随机树的工业机器人路径避障规划算法 [J]. 信息与控制, 2021, 50 (2): 235-246, 256.
- [6] 王钰, 朱琳, 苏世雄, 等. 基于 STM32 的双模式智能避障小车系统设计与实现 [J]. 自动化与仪表, 2021, 36 (3): 31-36, 54.
- [7] 丁艳华, 郑宏, 肖凤, 等. 基于 PSO-PID 的超声电源频率跟踪系统设计 [J]. 电子器件, 2021, 44 (3): 575-578.
- [8] 耿丽娟, 刘青, 袁培燕. 基于 Arduino 的智能防盗系统设计 [J]. 计算机技术与发展, 2020, 30 (5): 175-179, 184.
- [9] 马国明, 周宏扬, 刘云鹏, 等. 变压器局部放电光纤超声检测技术及新复用方法 [J]. 高电压技术, 2020, 46 (5): 1768-1780.
- [10] 边玉亮, 李淑静, 严晓龙. 基于 STC12C5A60S2 的汽车侧向盲区探测系统 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38 (10): 133-136.
- [11] 南玉龙, 张慧春, 郑加强, 等. 基于圆柱面模型的仿形喷雾植物冠层密度超声量化测试 [J]. 农业机械学报, 2019, 50 (1): 209-216.
- [12] 马平, 张勇, 苏攀杰, 等. 基于 ARM 嵌入式 AGV 的避障系统设计 [J]. 机床与液压, 2019, 47 (5): 61-64.
- [13] 宋逢泉, 胡功达, 江海燕, 等. 基于 GPRS 的水位预警监测器设计研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2020, 43 (9): 1208-1212.
- [14] 史镜名, 郑狄, 潘炜, 等. 基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器及其无损检测研究 [J]. 光学学报, 2019, 39 (12): 45-50.
- [15] 谢永超, 杨利, 严俊. 基于嵌入式系统 STM32 的超声波介质传输速度测试系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (12): 20-23.
- [16] 周奇智, 陶硕文. 基于无线通信的车辆主动防撞预警系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (7): 190-194, 199.
- [17] 李扬. 立体车库搬运器与防火卷帘防撞控制系统设计 [J]. 自动化技术与应用, 2019, 38 (7): 20-22.
- [18] 王萌. 基于组合定位的现代有轨电车雷达防撞系统设计 [J]. 铁道标准设计, 2020, 64 (5): 189-193.
- [19] 肖金峰. 航行安全技术下全驱动船舶操纵系统防撞控制方法 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42 (10): 38-40.
- [20] 张三川, 叶建明, 师艳娟. 基于毫米波雷达的汽车前防撞预警系统设计 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2020, 41 (6): 13-18.
- [21] 李雨田. 基于 Isight 的汽车前防撞系统低速碰撞优化设计 [J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49 (12): 82-86.
- [22] 张馨予. 基于机器学习的车用主动防撞预警雷达信号识别系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 225-229.