

多自由度篮球机器人复杂路径跟踪控制系统设计

陈 扬, 巩 博

(第四军医大学 体育教研室, 西安 710032)

摘要: 针对篮球机器人复杂路径识别精度偏低, 运行能耗较大等问题, 提出基于超声波的多自由度篮球机器人复杂复杂路径跟踪控制系统设计方法; 通过 MAX232 芯片设计控制系统的接口电路, 采用低功耗 CMOS 监控电路芯片 MAX706 构建监控电路, 超声波能够精确提供机器人所遇障碍物距离信息, 如有障碍则将接收到的信息进行转换, 以电信号的形式反馈给主控板; 软件部分利用主控板控制器的程序以及超声波测距程序的设计实现; 实验表明, 该控制系统有效提高了篮球机器人对障碍物的识别率, 减小了系统运行所用能耗。

关键词: 多自由度; 篮球机器人; 复杂路径; 跟踪控制

Design of Complex Path Tracking Control System for Multi DOF Basketball Robot

Chen Yang, Gong Bo

(Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China)

Abstract: In order to solve the problem of low complexity, low running energy consumption and so on, the design method of complex complex path tracking control system of multi degree of freedom robot based on ultrasonic is proposed. Through the interface circuit design of the control system of MAX232 chip, the construction of monitoring circuit with low power consumption CMOS monitoring circuit chip MAX706, ultrasonic wave can provide accurate robot with obstacle distance information, such as a barrier will receive the information converted to form electrical signals back to the main control board. The software uses the program of the main board controller and the design of ultrasonic ranging program. The experimental results show that the designed control system can improve the recognition rate of the obstacle and reduce the energy consumption of the system.

Keywords: multi degree of freedom; basketball robot; complex path; tracking control

0 引言

多自由度机器人方面的技术在工业及军事等方面的广泛应用^[1], 机器人学其本身也存在着独特的专业性^[2] 内容比较丰富和宽泛。机器人复杂路径控制, 作为机器人航迹控制的关键, 其运动控制器是机器人的执行机构之一, 针对机器人平稳的运转有非常重要的意义。由此对多自由度机器人的控制系统进行设计具有很高的现实意义, 可给未来的多自由度机器人的开发提供支撑^[3]。

近年来各领域的机器人应运而生, 特别是足球、篮球、乒乓球等球类项目的机器人。其中篮球机器人作为篮球竞赛中的重要成员, 对篮球领域的发展有着重要的作用^[4-5]。但当前的机器人复杂路径控制系统设计方法中存在着很多问题。这迫使着更多的人员对其进行钻研, 以下是几种研究方法。

为了提高移动机器人复杂路径跟踪精度, 王洪泉^[6]等人提出将模糊逻辑系统向控制器中未知的函数逼近, 对未知参数的自适应规律进行设计, 利用鲁棒控制器补偿逼近的误差。该方法可保障闭环系统中全部信号有界, 但存在稳定性差的问题。陈浩^[7]等人设计了机器人换挡机械手, 把拖拉机换挡操纵杆的三维球面运动变换为直角坐标中二维直线运动。该机械手能够沿着 X、Y 两个方向运动, 实现选、换挡。虽然该方法具有较强的鲁棒性, 但是耗时较长。以农业机器人精密的轨迹优化跟

踪控制为目标, 袁铸^[8]等人在优化算法中引入了 BP 神经网络以及计算力矩阵相结合的跟踪控制器。提出了解决不确定因素的自适应学习法。实验结果表明该方法具有较好的稳定性, 但自适应能力较差^[10]。

1 篮球机器人路径控制系统硬件设计

在篮球机器人复杂路径跟踪控制系统中, 将 TMS320F2812 当作主控板的控制中心, 以 MAX706 监控模块为辅助, 然后根据超声波的测距调理模块, 完成篮球机器人复杂路径跟踪控制系统硬件结构的设计, 具体的系统设计参数如表 1 所示。

表 1 篮球机器人复杂路径跟踪控制系统参数

项目	数值
脉冲频率	200 次/s
位置误差可控精度	±1%
速度控制精度	±2%
定位精度	1/10000
最高加速度	80rpm/ms

1.1 控制系统整体框架设计

对篮球机器人复杂路径跟踪控制系统的硬件部分进行设计, 首先制定出控制系统的整体框架。机器人复杂路径跟踪控制系统硬件部分整体框架如图 1 所示。

图 1 的多自由度篮球机器人复杂路径跟踪控制系统整体框架, 以主控芯片 TMS320F2812 和外围电路组成, 外围电路中包含: 复位电路、接口电路以及测距调理电路等部分组成。主

收稿日期: 2017-09-01; 修回日期: 2017-10-13。

作者简介: 陈 扬(1986-), 男, 陕西商洛人, 大学, 助教, 主要从事体育教育方向的研究。

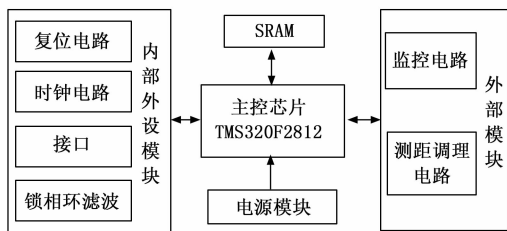


图 1 机器人复杂路径跟踪控制系统整体框架

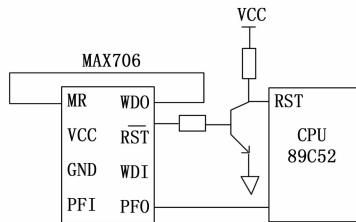


图 3 系统监控电路设计

控板的任务是：各个模块的接口管理与通信，通过主控芯片完成超声波测距的构建与多自由度机篮球机器人的定位，框架设计中的主控板可以嵌入相关的开发系统，便于后续的设计开发及升级。

1.2 路径跟踪控制系统接口电路

多自由度篮球机器人复杂路径跟踪控制系统的接口电路是利用 RS-232 串口实现的。给出机器人路径跟踪控制系统接口电路如图 2 所示。

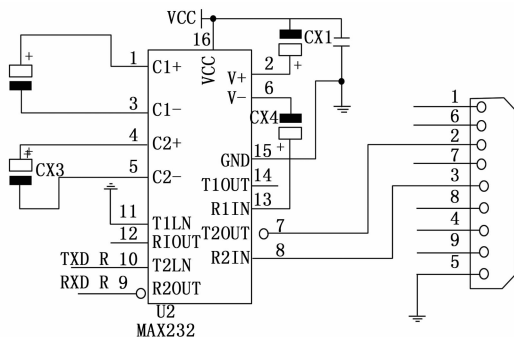


图 2 机器人路径跟踪控制系统接口电路设计

根据 RS-232 串口的标准协议，该接口电路适用于数据传输速率为 0~20000bit/s 的通信设备，RS-232 信号于正电平与负电平间发生波动，假设在发送机器人复杂路径相关数据时，其发送端驱动器能够输出 +5~+15 V 的正电平，以及 -5~-15 V 的负电平。假设没有机器人复杂路径相关数据传输，线上的电平为 TTL 电平，从机器人复杂路径数据传输开始至结束，线上电平先是 TTL 电平，然后转换至 RS-232 电平，最后返至 TTL 电平。接收器所接收的电平一般在 +3~+12 V 和 -3~-12 V 范围内，RS-232 的串行通信接口为根据电压正负表示不同逻辑方式，要使计算机经过接口与 TTL 终端进行连接，必须将电压正负转换成电平的高低。可将分立元件或芯片集成电路放在 RS-232 与 TTL 电路间。针对多自由度篮球机器人复杂路径相关数据的双向传递，根据 MAX232 芯片可完成从 TTL 至 RS-232 的双向电平转换。MAX232 芯片是美信生产的低功耗和单电源双 RS-232 收发器，适用在多种串行通信接口中。

1.3 机器人复杂路径跟踪控制系统监控电路

多自由度篮球机器人复杂路径跟踪控制系统监控电路，也可以称为“看门狗”电路。所设计的系统采用 MAX706 电路芯片进行监控电路设计，监控电路设计如图 3 所示。

MAX706 是一种低功耗 CMOS 监控电路芯片，内部电路根据上电复位和可重触发的“看门狗”定时器以及电压比较器等构成。其中，MAX706 仅在 1.6 s 内就可以检测到 WCI 引

脚，有高低电平的跳变信号，那么“看门狗”的定时器清零，并重新计时，假如超出 1.6 s，WCI 引脚还是没有高低电平的跳变信号，则“看门狗”的定时器将会溢出，WDO 引脚也会输出电平，从而触发 MR 手动复位引脚并使 MAX706 复位，进而使“看门狗”的定时器清零，重新计时，WDO 引脚开始输出高电平 MAX706 中 RET 复位引脚的输出宽度，大概为 200 毫米的低电平脉冲，该脉冲可使篮球机器人复杂路径跟踪控制系统稳定复位，并重新开始运行。

1.4 机器人复杂路径跟踪控制系统复位电路

为篮球机器人复杂路径跟踪控制系统安设复位电路，可使篮球机器人对复杂路径进行准确记忆，能够快速移动到先前的位置，完成准确、快速复位。选用 TMS320F2812 芯片进行复位电路设计，TMS320F2812 的复位不能屏蔽外部中断，根据 TMS320F2812 数据手册，芯片复位引脚中有效电平必须要持续 6 个时钟周期，在篮球机器人的设计中，考虑到机器人并不是于强电磁干扰环境下工作，因此复位电路利用 RC 电路、按键组成。

1.5 机器人复杂路径跟踪控制系统电源电路

电源电路是篮球机器人复杂路径跟踪控制系统不可缺少的组成部分，对电源电路的合理设计，是提高篮球机器人复杂路径跟踪控制系统质量的关键。它的主要作用是，为跟踪控制系统中所有模块提供电源，改进系统中所有电源均为直流电源。驱动电机电源是 +24 VDC、超声波测距电压是 +5 VDC。其余和 TMS320F2812 有关的器件电压均是 +3.3 VDC。且在多自由度篮球机器人复杂路径跟踪控制系统中，功率最大的驱动电机，其工作电压为 +24 VDC，最大工作电流为 0.825 ADC。3.3 VDC 电源利用稳压芯片 TPS76822 来构建。

1.6 路径跟踪控制系统超声波测距调理电路

超声波测距调理电路是所设计的篮球机器人复杂路径跟踪控制系统创新所在。超声波测距功能可提供篮球机器人所障碍物距离信息。发射超声波路障碍物，返至超声波换能器，将其接收的信号转化成电信号，超声波于空气中经过，会有比较大的损耗。所传回的超声波信号十分微弱，于是在机器人复杂路径跟踪控制系统超声波测距调理电路中，JP3 是接收换能器的输出端，其中换能器输出的引脚与 0.047 μF 电容滤波并接。5 VDC 电源接入 0.1 μF 的电容滤波，连接好电路之后无需调制，仅需注意超声波换能器的模拟地，就可以减少超声波往返中的损耗和噪声。

2 篮球机器人复杂路径跟踪控制系统软件设计

机器人复杂路径控制系统的软件设计中，仅有控制器需进行软件策划。控制器 TMS320F2812 的主要任务：超声波的测距设计管理。结合篮球机器人复杂路径控制系统的硬件部分，对系统软件进行设计。由硬件中路径跟踪控制器实现的跟踪控

制功能是整个控制系统软件部分的最核心操作。主控板的控制器软件设计包含超声波测距, 这里将对此进行介绍。

在主控板控制器的流程中, 篮球机器人的复位向量地址为程序入口和程序初始化。其中初始化内容包含: 扩展方式、DARAM、倍频等基本配置, 这些配置均是多自由度篮球机器人复杂路径跟踪控制系统中的控制器使用的, 最为基本的配置流程。初始化之后, 会开启相关的中断程序, 然后进入超声波测距, 并一直循环。如果产生中断, 那么立即中断服务程序。

程序初始化中包含 10 ms 定时器 0 和定时器 1 以及串口, 据此超声波的测距流程: 发射超声波后, 如有超声波的反射信号返回, 则由外中断 0 计算接收的距离。如在定时器 1, 超声波信号发射时, 打开了定时器, 定时的时间为最大超声波测量距离传输时需要的时间。在定时器 1 中断时, 没有外中断 0 发生, 则断定并没有超声波反射回来, 那么进入定时器 1 中断时, 将超声波返回中断以及超声波传输时间定时器关闭, 继续下一次的超声波测距并循环。

假设将各种定时器、计时器一起打开, 并假设定时时间是 14.7 ms, 其对应的障碍物距离为 5 m, 如在定时器中断时, 还未收到超声波, 那么说明 5 m 内无障碍物, 退出测距, 并进入下个测距模块。也就是说超声波最大的测距为 5 m, 发射超声波后的延时大概是 1.2 ms, 这是因为超声波发射之后, 可能会经过一定的耦合, 至超声波接收换能器中。如不经过延时而立即打开接收中断, 超声波发射时基本就已经存在接收到的超声波, 发射超声波延时的经验值大概是 1.2 ms, 相当于超声波在常温下, 空气中传播了 40 cm, 也就是说超声波测的盲区大概为 20 cm, 但这并不影响篮球机器人正常的多自由度。

3 实验结果与分析

3.1 实验参数

实验对象如图 4 所示, 实验楼道环境俯视图模型如图 5 所示。其中的参数: 机器人的驱动轮直径为 21 cm, 轮宽为 8.5 cm, 轮距为 46.5 cm, 机器人的长度为 110 cm, 宽度为 67.9 cm, 线速的最大值为 ± 100 cm/s, 角速度最大值为 $\pm 268^\circ$ /s, 最大负重为 60 kg。设计选取超声波发射的周期为 10, 40 kHz 方波。超声波测距的参数为: 工作电压 +5 VDC, 数据传输方式是串口 RS-232, 量程为 40 cm, 分辨率为 1 cm, 响应的时间为 30 ms。



图 4 实验对象

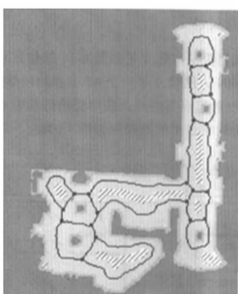


图 5 实验楼道环境俯视图模型图

3.2 实验环境

实验平台搭建在 WINCC 6.0 上, 实验在室内且周长为 50 m * 50 m 的空间内, 将图 4 的实验对象置于该室内, 将所设计

的复杂路径跟踪控制系统安装在该篮球机器人内部, 观察改进系统的整体效果。

1) 超声波测距结果, 很大程度上决定了控制系统呈现的效果优良, 将实验迭代 6 次, 观察改进系统超声波测距结果, 实验结果如图 6 所示;

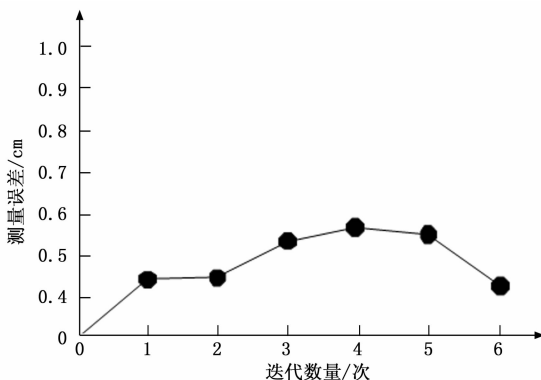


图 6 改进系统超声波测距结果

2) 将不同控制系统, 应用在多自由度篮球机器人中, 设置障碍物为 10 个, 实验迭代 5 次, 观察不同系统对障碍物的识别率 (%), 结果如图 7 所示;

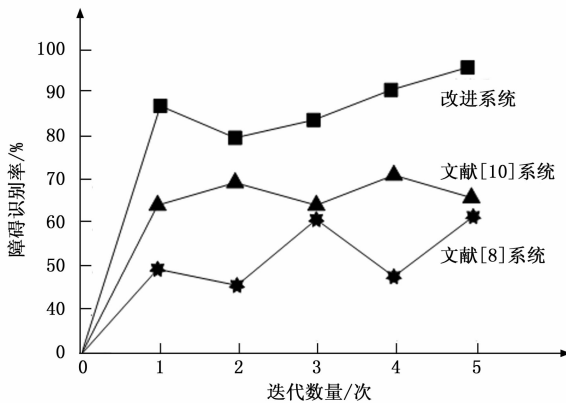


图 7 不同系统障碍物识别率对比

3) 观察不同控制系统运行所用能耗对比, 设能耗单位为 μ , 结果如图 8 所示;

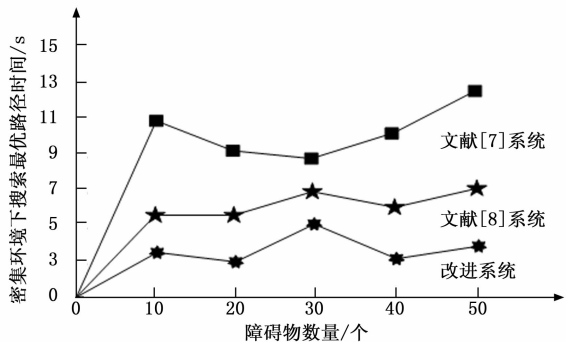


图 8 不同系统密集环境下最优路径搜索能力对比

4) 在实验环境中加入较为密集的障碍物, 观察不同系统在密集环境下跟踪最优复杂路径的能力, 实验结果如图 9 所示。

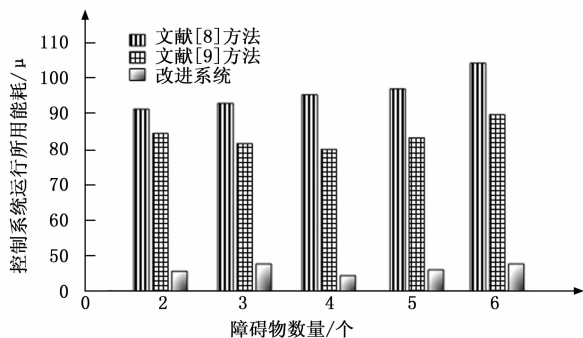


图 9 不同控制系统运行所用能耗对比结果

3.3 实验结果

超声波测距结果，很大程度上决定了控制系统呈现的效果优良。为了验证所设计的篮球机器人复杂路径跟空控制系统超声波测距精度，采用改进系统进行超声波测距，将实验迭代 6 次，观察改进系统超声波测距结果，得到超声波测距误差结果如图 6 所示。

观察图 6 可知，采用改进系统进行超声波测距，观察其超声波测距误差曲线，超声波测距误差值起初随着迭代数量的增加而增大，当迭代数量到 4 次时，出现最大超声波测距误差为 0.5 cm，而后误差值随迭代数量的增加而减小。相比传统系统，改进系统的超声波测距误差远远小于传统系统的超声波测距误差，且误差值有减小趋势，充分说明改进系统的超声波测距精度更高，对机器人复杂路径跟踪控制效果更好。

分别将所设计的篮球机器人复杂路径跟踪控制系统与文献 [8] 系统、文献 [10] 系统应用在多自由度篮球机器人中，测试三种不同系统对障碍物的识别率 (%)，验证所设计的控制系统对障碍物的识别效果，三种不同系统障碍物识别率对比结果如图 7 所示。

由图 7 可知，依照超声波测距为机器人提供了所遇障碍物距离信息，经发射超声波路遇障碍物之后，会反射回来，从而识别障碍物的原理，采用文献 [8] 系统测试机器人对障碍物的识别效果，其障碍识别率在迭代数量持续增加的情况下，没有较大变化，障碍识别率的平均值为 55%，障碍识别率曲线以平均值为基准上下波动。采用文献 [10] 系统测试机器人对障碍物的识别效果，其障碍识别率随迭代数量的变化不大，平均保持在 70%，相较于文献 [8] 系统，对障碍物的识别效果有所提高，但提高不明显。采用改进系统对机器人障碍物识别效果进行测试，改进系统的障碍识别率随着迭代数量的增加稳步上升，当迭代数量为 5 次时，障碍识别率近乎达到了 100%。对比改进系统与传统系统的障碍识别率可得，应用改进系统的机器人对障碍物识别能力远远超过应用传统系统的机器人识别能力，充分说明改进系统的障碍物识别精度更高，应用改进系统的机器人具有更高的移动灵活度，对障碍物的识别效果更好。

分别对装有改进设计的篮球机器人复杂路径跟踪控制系统、文献 [7] 系统、文献 [8] 系统的机器人，进行密集环境下最优路径搜索能力测试。在实验环境中加入较为密集的障碍物，测试三种不同系统在密集环境下跟踪最优复杂路径的能力，测得多障碍物环境中机器人运动轨迹如图 10 所示。

由图 10 可知，Start 端为机器人运行起始点，Goal 端为机

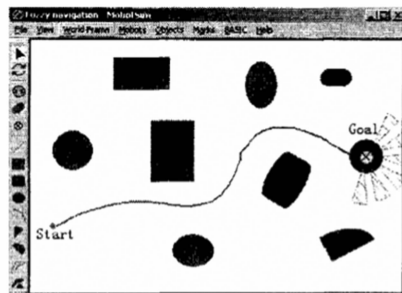


图 10 多障碍物环境中机器人运动轨迹

器人运行终结点，周围黑色图形为实验所设置的障碍物。安设三种不同系统的机器人均以此运行轨迹运行，所得三种不同系统最优路径搜索能力对比结果如图 8 所示。

由图 8 可知，当环境中的障碍物增多时，即密集环境下，采用文献 [7] 系统进行最优路径搜索，其最优路径搜索时间的起始值为 11 s，在实验过程中，搜索时间虽有下降值，但总体随着障碍物数量的增加，呈上升趋势，说明障碍物越多，最优路径的搜索耗时越长。相同环境下，采用文献 [8] 系统进行最优路径搜索，最优路径搜索时间起始值为 6 s，随障碍物的增多，搜索时间小幅度上升，曲线波动较为平稳，相比文献 [7] 系统，其最优路径搜索能力有所提升。而采用改进系统进行最优路径搜索，其最优路径搜索时间的起始值为 4 s，远远小于文献 [7] 系统、文献 [8] 系统的搜索时间，说明改进系统最优路径搜索速度更快。再由改进系统最优路径搜索时间曲线可知，其搜索时间平均保持在 4 s，不会随着障碍物数量的增加而增加。对比三种系统的测试结果，充分说明采用改进系统的机器人，在密集环境下，最优路径搜索能力更强，改进系统的性能更优，极具有有效性和实用性。

分别将传统系统和所设计的篮球机器人复杂路径跟踪控制系统安装到实验对象上，通过对复杂路径进行跟踪控制，测试两种系统的运行能耗情况，设能耗单位为 μ，两种系统运行能耗对比结果如图 8 所示。

观察图 8 可知，应用文献 [8] 控制系统共的机器人在对复杂路径进行跟踪控制时，其运行所用的能耗平均值约为 96 μ，当障碍物数量为 6 个时，出现最大运行能耗，为 105 μ，从图中可以看出，该系统的运行能耗随着障碍物数量的增加快速增长。应用文献 [9] 控制系统的机器人在对复杂路径进行跟踪控制时，其运行所用的能耗平均值约为 85 μ，当障碍物数量为 6 个时，出现最大运行能耗值为 90 μ。应用改进系统的机器人对复杂路径进行跟踪控制后，其运行所用能耗平均保持在 45 μ，当障碍物数量为 2 个时，运行能耗最大，为 49 μ。对比改进系统与文献 [8] 系统、文献 [9] 系统的运行能耗平均值，相差 45 μ，改进系统的运行能耗仅仅是文献 [9] 系统运行能耗的一半，是文献 [8] 系统云性能耗的四分之一。实验结果可充分说明，改进系统的运行能耗更低，应用改进系统的篮球机器人具有长久的使用时长，运行效果更佳，同时验证了改进系统的实用性。

综上所述，通过超声波测距误差分析、障碍物识别率分析、运行能耗分析及密集环境下最优路径搜索能力分析，实验结果充分表明，所设计的篮球机器人复杂路径跟踪控制系统具

(下转第 102 页)

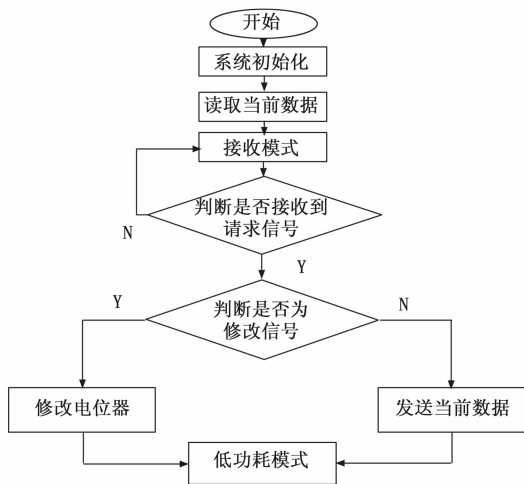


图 6 电焊机端程序设计流程图

4) 通过对遥控器与电焊机的开机测试二者的开启顺序无特殊要求。

5) 在多台电焊机同时工作的强电磁环境下, 对整个系统进行测试, 所有控制功能均正常工作。

3.3 分析

根据实验结果可得出:

1) 本系统整套装置成本低、电路改造简单方便, 控制效果达到使用要求, 在不同的工作环境下均可稳定的工作。

2) 睡眠模式下遥控器端及电焊机控制端的控制电流仅在 $2 \mu\text{s}$ 左右, 这极大的降低了手持遥控器端的功耗, 延长了电池的使用寿命。

3) 本系统是一对一的单点通信控制, 优点在于一对一控制简单、迅速, 缺点是无法一对多控制多台电焊机。后期改进可分配地址使不同地址对应不同电焊机, 按地址控制。

4) 本系统设计有危险保护措施, 当工作环境不适宜电焊机工作或会使使得电焊机出现短路、断路时, 控制系统会应急性

(上接第 98 页)

有超声波测距精度高、障碍物识别率高、运行能耗低、最优路径搜索能力强等良好性能, 验证了该系统的可行性、有效性及实用性。

4 结束语

当前的机器人学所涉及的现代技术、计算机系统和传感器技术等多学科, 其中机器人复杂路径跟踪控制系统, 是使机器人正常运转的关键。经过上述的实验可知, 本文所提方法具有可行性, 但也有一些方面需要进一步提高。

考虑到机器人运动控制系统易用性, 应将相关独立硬件更好地连接到同一系列电路上, 尽量减少系统的连接线, 应对移动机器人复杂路径跟踪控制策略进行深度研究, 这样可以更好地服务大众。

参考文献:

[1] 杨兴, 张亚, 杨巍, 等. 室内移动机器人路径规划研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (15): 234-238.

[2] 陈薇, 蒋旭云. 关于轮式机器人路径规划控制仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33 (5): 367-371.

断电。如: 当环境湿度、粉尘含量达到设定值时会触发电焊机断电处理。

5) 本装置加装在电焊机内部, 只做了简单的电路改造, 不影响焊机原有功能, 原有操作方式仍可正常使用。

4 结论

本装置采用控制端与焊机本体可分离的无线与有线相结合的方式, 可相互补长取短, 方便有效地解决了远距离的控制问题, 以适应各种工况的需求。该单片机系统在 I/O 接口设计中, 大量采用了输入/输出和中断方式, 可简化程序的复杂度和外围电路的设计、节约资源并提高了系统的可靠性; 遥控器的面板上的按键多采用中断模式这使得电焊机操作人员对当前电焊机的推力电流的修改具有实时性, 焊机操作人员可根据自己的工作经验设置五个常用档位减轻人员的工作复杂度, 并且通过加减键, 可任意调节电流大小, 细化规范调节。按照电磁兼容的标准对电路板进行了严格的设计, 经测试其电磁兼容性较好, 对强电强磁有较好的抗干扰性, 且自身并不会对外产生太强的干扰。

参考文献:

[1] 张红磊, 栗源, 余康, 等. 无线射频遥控型逆变焊机的分析与实现[J]. 可编程控制器与工厂自动化, 2015 (7): 26-28.

[2] 张贵锋, 肖克民. 单片机控制的红外无线式焊机遥控系统的研制[J]. 电焊机, 1999 (7): 10-14.

[3] 黄勇. 多功能焊机遥控器的设计[J]. 焊接技术, 2002, 31 (5): 43-44.

[4] 陈新举, 岳小兵, 马涛. 基于一体化焊钳与分体式焊钳的评价浅析[J]. 机械研究与应用, 2016, 29 (6): 178-179.

[5] 张忠科, 于洋, 王希靖. 基于 PLC 控制的回抽式无匙孔搅拌摩擦点焊系统[J]. 电焊机, 2017, 47 (5): 38-42.

[6] 陈树君, 林万, 余旭, 等. 变极性等离子弧焊的嵌入式控制系统设计[J]. 电焊机, 2017, 47 (5): 43-47.

[7] 陈新举, 岳小兵, 马涛. 基于一体化焊钳与分体式焊钳的评价浅析[J]. 机械研究与应用, 2016, 29 (6): 178-179.

[3] 郭胜国, 邢丹丹. 一种改进蚁群算法在机器人路径规划中的应用[J]. 科技通报, 2015, 31 (12): 91-93.

[4] 雷霆, 张国良, 羊帆, 等. 应用于力矩受限自由漂浮空间机器人的神经网络自适应控制[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4): 1168-1171.

[5] 余轲, 邓本再. 基于标准可加性模糊系统的足球机器人守门员的路径规划[J]. 电子设计工程, 2016, 24 (18): 155-158.

[6] 王洪泉, 师五喜, 常绍平, 等. 基于终端滑模机器人模糊自适应路径跟踪控制[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51 (16): 36-41.

[7] 陈浩, 卢伟, 赵贤林, 等. 基于力反馈的拖拉机驾驶机器人换挡机械手模糊 PID 自适应控制方法研究[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39 (1): 166-174.

[8] 陈顺立. 农业机器人路径优化及轨迹跟踪研究—基于遗传算法[J]. 农机化研究, 2017, 39 (8): 17-21.

[9] 袁铸, 申一歌. 农业机器人轨迹优化自动控制研究——基于 BP 神经网络与计算力矩[J]. 农机化研究, 2017, 39 (6): 33-37.

[10] 殷苏民, 郑昌俊, 徐启祥, 等. 基于 Sysmac 自动化平台的 Delta 机器人控制系统设计[J]. 机床与液压, 2017, 45 (3): 1-5.