

多通道便携式高精度程控电阻装置设计^{*}

全修亮¹, 于丽霞¹, 杨学军², 袁治雷², 苏海鑫¹

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051; 2. 山西江阳兴安民爆器材有限公司)

摘要: 针对某航天项目需要在功率组件自动测试系统中连续输出多路大小阻值不等的电阻, 提出了一种以 STM32F103RCT6 芯片为核心的低成本、易实现的 24 通道程控电阻输出解决方案。在 I/O 口资源有限条件下, 利用 74HC595 移位缓冲器的优势控制继电器电阻网络的通断, 实现多通道电阻输出。通过 MAX232 芯片以及 Modbus 协议通信能够快速准确地输出 24 路期望阻值。测试结果表明, 开发的程控电阻装置可提供 1666.65 k Ω 以内的电阻输出, 分辨率为 10 Ω 且精度可达 0.1% 以内, 其体积小、方便携带, 而且操作简便、显示直观。

关键词: 程控电阻; 74HC595; STM32; Modbus 协议; STM32F103RCT6

中图分类号: TN79

文献标识码: A

Design of Multi-channel Miniaturized High-precision Program-controlled Resistance Device

Tong Xiuliang¹, Yu Lixia¹, Yang Xuejun², Yuan Zhilei², Su Haixin¹

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Jiangyang Xing'an Civil Explosive Equipment Co., Ltd)

Abstract: A low cost and easy to implement 24-channel program controlled resistance output solution based on STM32F103RCT6 chip is proposed in order to continuously output multichannel resistors with different resistance values in the automatic test system of power components in an aerospace project. With the advantage of 74HC595 shift buffer, the on-off of relay resistance network is controlled to realize multi-channel resistance output under the condition of limited I/O port resources. Through MAX232 chip and Modbus protocol communication, 24 expected resistance values can be quickly and accurately output. The test results show that the developed program-controlled resistance device can provide resistance output within 1666.65 k Ω , with a resolution of 10 Ω and an accuracy of less than 0.1%. It is small in size, convenient to carry, easy to operate and intuitive to display.

Keywords: programmed resistance; 74HC595; STM32; Modbus protocol; STM32F103RCT6

0 引言

舵机是飞行器控制系统中的执行机构, 通过控制系统发送控制信号给舵机, 使舵机严格按照要求工作, 从而控制飞行器的飞行方向^[1-3]。而对舵机的功率组件进行各项性能检测至关重要, 在测试过程中为了不断调整信号的占空比往往需要连续提供大小不等的多组电阻。目前测试中仍采用传统经验值, 通过人工插拔不同阻值电阻的方式切换, 不仅效率低, 而且容易造成电路板硬件结构松动。现有常见的可变电阻仍是采用通过手动改变电阻接入电路长度的方式来更换阻值, 如滑动电阻器和旋钮电位器^[4]。然而这种机械式的可变电阻输出精度低, 很难控制到期望的特定阻值。在一些测试环境中, 需要使用多组阻值可调的电阻发生器, 而使用滑动变阻器、电位计等方法

往往无法快速准确地给出期望阻值的电阻^[5]。在自动测试系统中, 程控电阻的应用越来越广泛^[6]。市场上现售的可编程电阻板卡价格十分昂贵, 考虑其电阻输出范围、精度等不同, 存在不符合实际要求的情况^[7]。而半导体芯片方式的可编程电阻通常只有有限的步长和阻值范围, 电阻的可用功率也很小, 其应用场合受限^[8-9]。现有的一些以 FPGA 为核心的可编程电阻设计通常是利用了 FPGA 丰富的 I/O 口资源直接并行输出控制继电器电阻网络的方式完成多路电阻输出调节, 不仅成本高, 而且造成了大量的 I/O 口资源浪费^[10-11]。而单片机控制的可编程标准电阻发生器^[12]仍使用按键电路进行控制, 操作不便, 效率低, 且通道少, 无法满足在自动测试系统中多路电阻同时工作应用的需求。

针对以上分析, 本文利用 74HC595 串行输入、并行输出的特点, 通过串口屏或上位机软件发送指令给 STM32F103RCT6, STM32F103RCT6 将数据打包处理后

^{*} 基金项目: 自然科学研究面上项目(202203021211087)。

发送串行数据给 74HC595 控制相应继电器电阻网络的断开与闭合状态,实现电阻输出的连续可调,在单片机 I/O 口资源有限的条件下,提供了一种低成本、多通道电阻输出的解决方案。程控电阻装置通过 MAX232 芯片直接与串口屏幕通信或者通过 RS232 接口与上位机软件进行通信,利用 Modbus 通信协议对电路进行实时、准确的控制,完成期望阻值的输出。

1 硬件电路设计

1.1 总体方案

程控电阻装置以 STM32F103RCT6 为主控制器,考虑到单片机引脚资源有限,而 74HC595 是一种 8 位串行输入、并行输出的位移寄存器,只需使用 3 路输入引脚便可控制 8 路输出,故采取单片机发送串行数据到 74HC595 控制达林顿管 ULN2803 驱动继电器电阻网络的方式,这样大大节约了单片机 I/O 口引脚资源,进而实现多通道电阻的输出。每个通道需要 3 个 74HC595、ULN2803 控制 20 个串联的继电器单元以及 4 个独立的控制继电器,每个继电器单元下并联一个特定阻值的精密电阻。74HC595 与 ULN2803 之间采用 TLP521-4GB 光耦进行隔离,使 STM32 单片机控制电路的 3.3 V 工作电源与继电器电阻网络的 5 V 工作电源隔离开,电路抗干扰能力强,工作更加稳定。同时单片机通过 MAX232 芯片直接与串口屏幕通信,也可通过 RS232 接口与上位机软件进行通信^[13],根据接收到的控制指令完成多通道期望阻值的电阻输出。电阻调制装置总体框图如图 1 所示。

1.2 驱动单元

程控电阻调制装置的驱动控制电路最大特点就是利用了 74HC595 自身的优势实现少 I/O 口控制多通道输

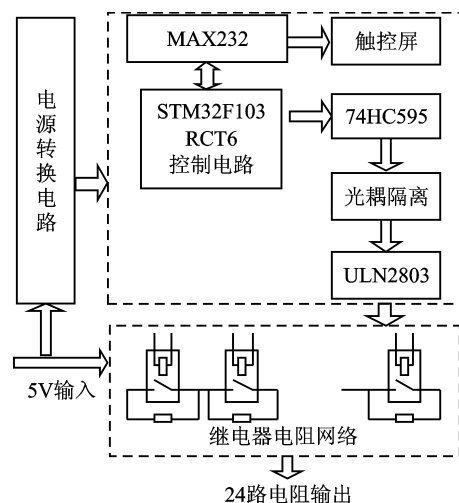


图 1 电阻调制装置总体框图

出。74HC595 是一个 8 位串行输入/串行输出或并行输出的移位寄存器^[14],并行输出为三态输出(高电平、低电平和高阻态)。每当移位寄存器时钟 SHCP 的上升沿到来,串行数据由 Data 输入端口输入到内部的 8 位移移寄存器,而内部的锁存器可以使输入数据在移位过程中输出端的数据保持不变,只有当存储寄存器时钟 STCP 的上升沿到来,移位寄存器中的数据才会寄存在 8 位并行输出寄存器中。若此时 OE 使能端为低电平,则数据并行输出;若为高电平,则输出为高阻态。同时 74HC595 含有一个串行输出端口 SQH,可用于多片 74HC595 的级联。单片机通过输出电阻指令的串行数据给 74HC595 来控制 ULN2803 驱动继电器电阻网络的闭合与断开,实现多通道输出的功能。驱动控制电路如图 2 所示。

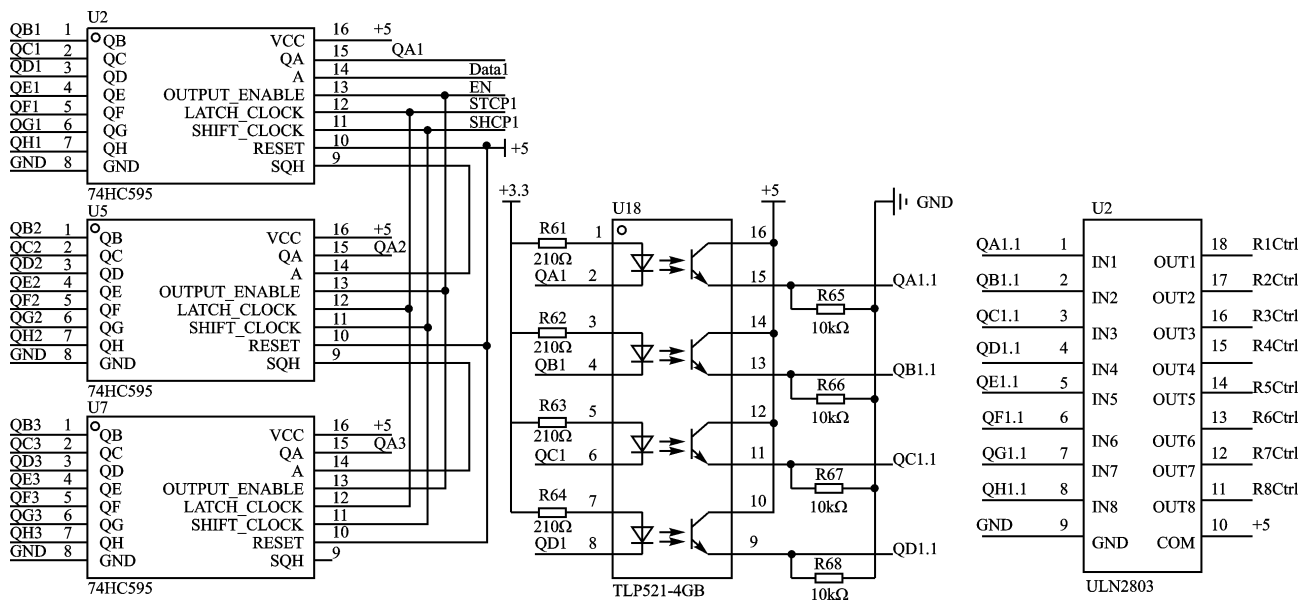


图 2 驱动控制电路

由于每个通道共需要控制 24 个继电器开关,故需要通过将一块 74HC595 的串行数据输出引脚“SQH”与另一块 74HC595 的 Data 串行输入端口进行级联。74HC595 与 ULN2803 之间采用 TLP521 光耦进行隔离,使输入端与输出端完全实现电气隔离^[15],同时使单片机控制电路的 3.3 V 供电网络与继电器的 5 V 供电网络隔离开,电路抗干扰能力强,工作更加稳定。

1.3 继电器电阻网络

程控电阻装置的每个输出通道均包含一个继电器电阻网络,它是由 20 个不同阻值的精密电阻串联后在每个电阻两端并联一个继电器而构成,考虑到继电器数量增多,其内阻会影响电阻的输出精度,故本文通过 4 个独立继电器开关 K1~K4 控制电阻网络接入电路的长度,从而降低电阻输出的误差,具体结构如图 3 所示。本文采用易于计算的 8421BCD 编码原理控制继电器电阻网络的工作状态,通过控制 k1~k20 的高低电平来控制电阻是否接入电阻网络,从而实现任意期望阻值电阻的输出。

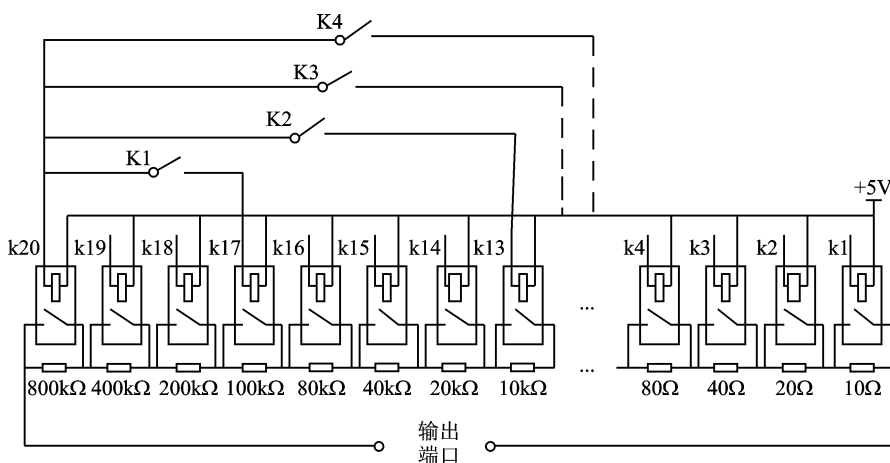


图3 继电器电阻网络

电阻网络的 20 个精密电阻分为:Ω 级、kΩ 级、十 kΩ 级和百 kΩ 级。如这 4 个级别分别对应十进制数的 4 个位,且每一级的 4 个电阻均按照 8421 编码顺序排列,K1 下并联 100~800 kΩ 4 个电阻,K2 下并联 10~800 kΩ 8 个电阻,以此类推,K3 下并联 12 个电阻,K4 下并联 16 个电阻,通过 3 片 74HC595 级联刚好可以控制 24 个继电器开关。当单片机接收到上位机软件或者串口屏的电阻控制指令时(如阻值为 65.11 kΩ),单片机先将数据转换为 8421 码,十位的值“6”转换为二进制数“0110”;个位的值“5”转换为二进制数“0101”;小数位的两个值“1”分别转换为二进制数“0001”;由于百 kΩ 级的电阻未使用,故输入阻值为 65.11 kΩ 时,需要将 K1 闭合,K2~K4 断开,同时 k15、k14、k11、k9、k5、k1 端置高电平保持继电器断开,其余各端置低电平保持继电器闭合,最终单片机需要输出

的串行数据为(0000_0110_0101_0001_0001_0111)B,从而使电阻网络形成的阻值为 65.11 kΩ。当输出阻值小于 100 Ω 时,只需将 K4 闭合,控制 k1~k4 的高低电平即可,依次类推;当 K1~K4 断开且 k1~k20 均为高电平时,继电器开关全部断开,接入电阻网络的电阻为 20 个电阻的总和,即 1666.65 kΩ。

1.4 关键问题

在设计便携式多通道程控电阻装置时需要考虑下面 3 个问题:

① 24 通道电阻的输出。由于 STM32F103RCT6 单片机的 I/O 口资源有限,通用 I/O 口数量共有 51 个,去掉串口通信占用的 PA9(RXD)端口和 PA10(TXD)端口后,只有 49 个口可用,故使用并行输出控制继电器的方式仅可实现三通道电阻的输出。因为一片 74HC595 的输入端需要 3 个 I/O 口来控制,分别是 SHCP 移位寄存器时钟、Data 串行数据输入端、STCP 存储寄存器时钟,这样通过 49 个 I/O 口最多可以实现 16 个通道的电阻输出,仍然无法满足条件。考虑 74HC595 的工作原理及存储寄存器特性,数据不会在一次输出后就立即消失,只要 74HC595 电源一直供电且没有新的数据从移位寄存器中传入,数据就会保持不变且有效,只有当新的数据传入存储寄存器时,才会进行数据更新。针对以上分析,本设计中考虑将 24 个 74HC595 的 STCP 存储寄存器时钟共用 1 个 I/O 口来控制,其他两个信号输入端使用独立 I/O 口控制。这样,只要 SHCP 端口和 Data 端口无电平变化,即便每次进行不同通道电阻的输出,STCP 的变化也不会影响其他通道的电阻输出状态,从而

实现了 24 通道电阻的输出。

② 74HC595 刚上电不定态问题。应用 74HC595 控制继电器电阻网络时,由于 74HC595 具有三态输出,刚上电存储寄存器中会存在不固定值,会造成系统刚上电部分继电器自动闭合,从而影响到接入程控电阻装置的电路正常工作。针对该问题,考虑 74HC595 的 $\overline{\text{OE}}$ 端为低电平时锁存器的数据会输出而高电平时禁止输出(高阻态),故有如下两个解决方案:

a. 刚上电时通过单片机 I/O 口控制 74HC595 的 $\overline{\text{OE}}$ 为高电平,延时一段时间将锁存器中的数据清除后再拉低;

b. 设计 RC 复位电路,控制 $\overline{\text{OE}}$ 刚上电为高电平,在 $\overline{\text{OE}}$ 无效时间内将锁存器中的数据清除后自动拉低。

由于 24 个通道电阻输出以及串口通信已将单片机的

51 个通用 I/O 口全部占用,故本文采取方案 b 来解决该问题。

③ 小型化。需要具备小体积、低重量、方便携带等特点。由于单片机控制 24 个通道电阻的输出,若将全部电路集成到同一块电路板上,电阻装置的体积必定会增大,因此本文考虑使用多块电路板级联的方式实现在有限体积下多路电阻的输出,板卡级联实物图如图 4 所示。

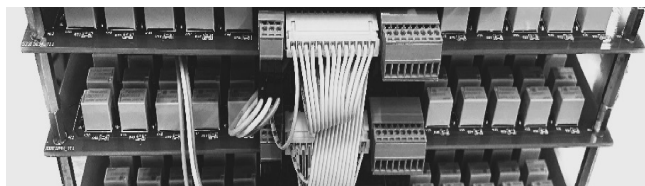


图 4 板卡级联实物图

若每层板卡设置 6 个通道电阻的输出,则需要级联 4 层板卡,每层板卡可以为相同的板卡,只需在每层电路板信号级联处设置包含 24 个通道控制信号的端口以及电源端口,将每层板卡使用到的控制信号端口与对应单片机控制引脚位置对应连接。

2 软件设计

2.1 通信协议

上位机或串口屏与单片机之间的通信采用 Modbus 协议进行数据传输。Modbus 协议是一种主/从应答的串行通信协议,其格式为“设备地址+功能码+数据段+错误检验码”,且均按十六进制格式传输^[16]。本设计中只使用了其中的 03 功能码(读寄存器)、16 功能码(写多个寄存器)。如通道 1 输出 65.11 k Ω 电阻发送的数据帧内容为“01 10 00 01 00 02 04 00 00 65 11 D9 3F”,其中“01”为从站地址(必须和主站地址 0x01 一致),“10”为功能码,“00 01”为电阻通道 1 地址,“00 02”为写寄存器的数量,“04”为写字节数,“00 00 65 11”为电阻值数据,“D9 3F”为校验码。通过 Modbus 协议进行数据传输,其简单易用,性能稳定。

2.2 程序设计

程控电阻装置的软件部分主要负责向单片机发送电阻阻值数据帧,控制各通道电阻的输出,实时刷新查看当前各通道电阻输出情况。程序设计流程如图 5 所示。

3 试验结果分析

在测试过程中,通过串口屏幕或者上位机软件输入 24 个通道的电阻值,上位机与程控电阻装置之间需要通过 RS232 线连接。由于电阻要求精度较高,因此需使用 6 位半高精度数字万用表对输出电阻进行精度测量,表 1

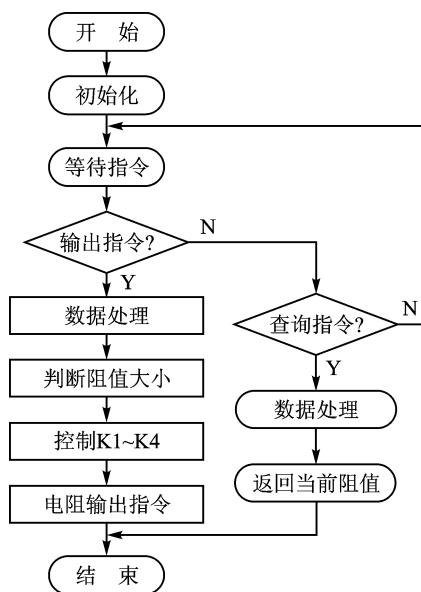


图 5 程序流程图

仅给出了其中通道 1 的测量结果,其他通道测试结果类似。结果表明,电阻输出精度与电阻本身精度有关,同时还与继电器开关固有的电阻有关,本设计测试结果均在误差要求的允许范围(0.1%)以内。图 6 为串口屏幕测试界面。

表 1 通道 1 输出阻值测试数据

序号	输入值/k Ω	测量值/k Ω	精度/%
1	3.79	3.7910	0.026
2	4.22	4.2162	0.090
3	5.11	5.1063	0.072
4	6.04	6.0364	0.060
5	143.00	142.9800	0.014
6	150.00	149.9700	0.020
7	174.00	173.9800	0.015
8	301.00	301.1600	0.053
9	365.00	365.1100	0.030
10	604.00	604.1300	0.020
11	976.00	976.0200	0.002

程控电阻-24通道											
+	65.11	-	CH1	+	1666.65	-	CH9	+	1666.65	-	CH17
+	1666.65	-	CH2	+	1666.65	-	CH10	+	1666.65	-	CH18
+	1666.65	-	CH3	+	1666.65	-	CH11	+	1666.65	-	CH19
+	1666.65	-	CH4	+	1666.65	-	CH12	+	1666.65	-	CH20
+	1666.65	-	CH5	+	1666.65	-	CH13	+	1666.65	-	CH21
+	1666.65	-	CH6	+	1666.65	-	CH14	+	1666.65	-	CH22
+	1666.65	-	CH7	+	1666.65	-	CH15	+	1666.65	-	CH23
+	1666.65	-	CH8	+	1666.65	-	CH16	+	1666.65	-	CH24
刷新数据			多路输出			参数设置			返回首页		

图 6 串口屏幕测试界面



4 结 语

本文研究的便携式多通道程控电阻装置提供了一种单片机 I/O 口资源有限的条件下 24 通道电阻输出的低成本解决方案。通过巧妙的电路设计实现了小体积、操作简单等特点,既可以使用独立电源通过串口屏幕单独控制使用,也可以接入系统使用上位机软件通过 RS232 接口控制使用。电阻全部选用精密电阻,通过串联加并联的电阻网络组合实现了输出精度在 $\pm 0.1\%$ 以内,完全满足项目 $\pm 0.5\%$ 的精度需求。利用 74HC595 串行输入、并行输出的特点,可以单通道输出或多通道同时并行输出任意期望阻值的电阻,实时性好、响应快,可以快速准确地给出 24 个通道电阻。由于单片机 I/O 口资源有限,因此方案也存在一些不足,由于控制电阻通道已将通用 I/O 口全部占用,所以若要增加其他电路功能或更多通道电阻输出(如 24 通道),则此方案会受到限制。

参考文献

- [1] 张明月,张宏巍,刘慧.舵机调零系统设计和冗余方法研究[J].电子设计工程,2019,27(17):148-153.
- [2] 杨鑫.基于 ARM 的燃气舵舵机控制系统的设计与分析[D].南京:南京理工大学,2017.
- [3] 汪军林,解付强,刘玉浩.导弹电动舵机的研究现状及发展趋势[J].飞航导弹,2008(3):42-46.
- [4] 谭兴国,曲凯.基于 CAN 总线的高精度程控电阻器设计[J].自动化仪表,2018,39(1):99-102.
- [5] 张子明,王从庆,刘良勇,等.基于 FPGA 的程控可调电阻模块设计[J].电子设计工程,2022,30(24):79-85.
- [6] 朱利文,于雷,金传喜,等.高精度程控电阻网络生成算法设计[J].国防科技大学学报,2021,43(6):95-101.
- [7] 赵桂明.基于继电器模块的程控电阻发生器[J].计量技术,2017(4):30-31.
- [8] 陈辉,陶中幸,杨小川.半导体热敏电阻在温度控制中的应用[J].甘肃联合大学学报,2011,25(1):48-51.
- [9] 齐世举,王书湖.数字可调电位器在自动化测试中的应用研究[J].电子设计工程,2014,22(6):30-32.
- [10] 陈青,崔群,聂永生,等.基于 FPGA 的可编程电阻的设计[J].电子技术,2010,37(11):71-72,56.
- [11] 李小文,刘伟良,刘丽君.基于 FPGA 的可编程电阻装置设计[J].铁道机车车辆,2012,32(6):75-78.
- [12] 陈慧.单片机控制的可编程标准电阻发生器[J].安徽工程科技学院学报(自然科学版),2007,64(4):59-63.
- [13] Grzesiak W, Maj T, Cie liński P. Programmable laboratory resistor [Programowalny rezystor laboratoryjny][J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2011, 87(10).
- [14] 杨恒敏.74HC595 芯片对单片机 I/O 口的扩展原理与应用[J].信息与电脑(理论版),2020,32(4):120-122.
- [15] 胡丹,张茜.单片机数字计时器的系统设计与型式试验[J].单片机与嵌入式系统应用,2015,15(9):42-45.
- [16] 吴晨红.基于 Modbus 通信协议的信号采集系统[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [7] Wensing P M, Wang A, Seok S, et al. Proprioceptive Actuator Design in the MIT Cheetah: Impact Mitigation and High-Bandwidth Physical Interaction for Dynamic Legged Robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(3): 509-522.
- [8] 刘娟秀,吴益飞,郭健,等.一种轮足式爬楼梯机器人的倾翻稳定性研究性研究[J].南京理工大学学报,2015,39(6): 643-649.
- [9] 刘吉臻,李露,房方.多模态控制的研究与应用综述[J].控制工程,2015(5):91-96.
- [10] 马慧姝,刘艳霞,方建军,等.四足仿生机器人仿生足端轨迹规划研究[J].东北师大学报(自然科学版),2019,51(3): 66-71.

全修亮(硕士研究生),主要研究方向为光电信息技术与系统。通信作者:于丽霞,15725605@qq.com。

(责任编辑:薛士然 收稿日期:2023-05-17)

朱俊杰(实验师),主要研究方向为电子技术与应用。通信作者:朱俊杰,461077638@qq.com。

(责任编辑:薛士然 收稿日期:2023-05-17)

芯来科技与 IAR 达成战略合作伙伴关系

嵌入式开发软件和服务的全球领导者 IAR 与国内专业 RISC-V 处理器 IP 及解决方案公司芯来科技共同宣布达成战略合作:经 TÜV SÜD 认证的 IAR Embedded Workbench for RISC-V 功能安全版将全面支持芯来科技 NA 系列车规级处理器内核。

芯来汽车电子方案包含功能安全方案(ASIL-B&ASIL-D),满足 ISO26262 认证规范流程。从需求到计划均按 ISO26262 的要求详细记录,实时更新,保证项目的可追溯性。无论是系统性失效还是随机硬件失效,芯来科技都用系统性安全管理工具和安全分析方法来全面符合 ISO 26262。增强验证活动,从最大程度上杜绝系统性失效;增加对随机硬件失效的故障注入计划和报告,为汽车客户提供有说服力的产品诊断覆盖度。完整的安全文档在帮助客户更好使用产品的同时,也为客户 SoC/Chip 级别的安全认证提供全面支持。