

基于项目式实验的机械臂同步控制电路研究

马 川^{1*}, 王鹏睿¹, 蔺金元^{1,2#}, 王学忠¹, 李春树¹

¹宁夏大学电子与电气工程学院, 宁夏 银川

²宁夏大学电工电子实验中心, 宁夏 银川

收稿日期: 2024年10月30日; 录用日期: 2024年12月30日; 发布日期: 2025年1月7日

摘 要

机械臂的同步控制在工业自动化中具有重要意义, 可以提高生产效率和精度。本文通过项目式实验方式, 逐步开展电路分析实验工作。首先, 全面分析了机械臂同步控制的目标和技术需求, 制定了详细的设计方案。接着, 利用模拟电路设计了一套控制系统, 并进行了多次实验调试, 以验证其性能和可靠性。在实验过程中, 不断优化电路设计, 最终成功地通过模拟电路实现了机械臂的同步控制, 体现了快速响应和平滑控制的优势。该研究不仅将课堂上学习的电路分析知识应用于实际情境中, 还有效提升了学生的调试和故障排除能力。

关键词

项目式实验, 机械臂, 同步控制, 电路分析

Research on Synchronous Control Circuit of Robotic Arm Based on Project-Based Experiments

Chuan Ma^{1*}, Pengrui Wang¹, Jinyuan Lin^{1,2#}, Xuezhong Wang¹, Chunshu Li¹

¹College of Electronic and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

²Electrical and Electronic Experiment Center of Ningxia University, Yinchuan Ningxia

Received: Oct. 30th, 2024; accepted: Dec. 30th, 2024; published: Jan. 7th, 2025

Abstract

The synchronous control of robotic arms is of great significance in industrial automation, as it can

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 马川, 王鹏睿, 蔺金元, 王学忠, 李春树. 基于项目式实验的机械臂同步控制电路研究[J]. 人工智能与机器人研究, 2025, 14(1): 14-22. DOI: 10.12677/airr.2025.141002

improve production efficiency and accuracy. This article gradually carries out circuit analysis experiments through project-based experimental methods. Firstly, a comprehensive analysis was conducted on the objectives and technical requirements of synchronous control for robotic arms, and a detailed design plan was formulated. Subsequently, a control system was designed using analog circuits and multiple experiments were conducted to verify its performance and reliability. During the experimental process, the circuit design was continuously optimized, and ultimately the synchronous control of the robotic arm was successfully achieved through analog circuits, demonstrating the advantages of fast response and smooth control. This study not only applies the circuit analysis knowledge learned in the classroom to practical situations, but also effectively enhances students' debugging and troubleshooting abilities.

Keywords

Project-Based Experiment, Robotic Arm, Synchronous Control, Circuit Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究内容及项目背景

1.1. 研究内容

本研究的主要内容是通过模拟电路实现机械臂的同步控制，提高机械臂在多应用场景中的协作性和精确性。与常见的数字控制系统相比，模拟控制系统在响应速度上具有优势，能够实现更为平滑的控制，尤其是在需要快速调整运动状态的情况下，并且模拟电路具有更简洁的设计和更小的延迟，通过运算放大器和其他模拟元件，驱动执行单元，在应对复杂环境时表现出更加优良的稳定性。此外，模拟电路的低功耗特性使得其在特定应用环境中更具优越性。

1.2. 同步控制机械臂的项目背景

本项目实验设计并实现一套基于模拟电路的机械臂同步控制系统，帮助学生从解决实际项目问题中获得知识[1]。在机械臂的控制领域，常见的控制方式包括液压杆控制、软件控制、机械按钮控制和遥控器控制等。这种控制方式不仅降低了学习门槛，还改善了操作体验，使操作者能够更直观、准确地控制机械臂的运动。本实验旨在通过搭建模拟电路，制作等比例的遥控模型，实现机械臂的同步控制，训练电路分析的能力。这种创新的控制方法有望在工业自动化和机器人技术领域中广泛应用，提升操作效率和精度，同时减少操作者的学习成本和工作压力。

采用项目式实验的方法，从需求分析、设计制作、系统集成、到性能评估，全程让学生作为实验项目的负责人[2]，提高了学生的主动性、参与性，加深了学生对全过程的理解和掌握[3]。基于 OBE 理念，积极探索项目式实验教学方法及多元化的评估的实验教学模式[4]，全面实施并优化机械臂同步控制系统，确保研究成果的实用性和创新性。

2. 研究方法

2.1. 需求分析与文献调研

在进行实验之前，需要先明确同步控制机械臂的具体需求和功能要求，包括运动范围、精度要求、

响应速度等。全面调研现有的机械臂控制技术，特别是同步控制方法的研究进展。重点关注模拟电路在其中的应用，了解其优缺点与发展趋势。

2.2. 电路工作原理分析

NE555 的内部结构图如图 1 所示，它有 3 个阻值相同的电阻。6 号引脚连接一个运算放大器的同相输入端，同时该运算放大器的输出端连接到 SR 触发器的 R 端，当 6 号引脚的电位小于 $2/3 V_{CC}$ 时，R 端输入为 0，当 6 号引脚的电位大于 $2/3 V_{CC}$ 时，R 端输入为 1；2 号引脚连接另一个运算放大器的反相输入端，同时该运算放大器的输出端连接到 SR 触发器的 S 端，当 2 号引脚的电位小于 $1/3 V_{CC}$ 时，S 端输入为 1，当 2 号引脚的电位大于 $1/3 V_{CC}$ 时，S 端输入为 0。分析两个引脚组合输出结果见表 1。当设计电路中把 2 号引脚和 6 号引脚连接到一起时，称为“NE555 的无稳态电路”。

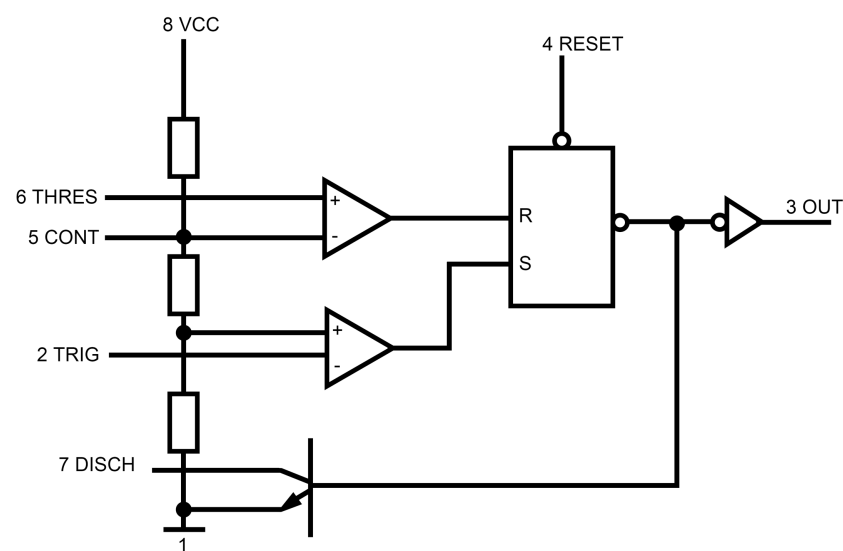


Figure 1. Simplified internal structure diagram of NE555
图 1. NE555 内部结构简化图

Table 1. Output relationship table for NE555 pin
表 1. NE555 引脚对应输出关系表

6 号引脚电位	2 号引脚电位	3 号引脚输出	7 号引脚输出
$<2/3 V_{CC}$	$<1/3 V_{CC}$	高电平	低电平
$<2/3 V_{CC}$	$>1/3 V_{CC}$	保持	保持
$>2/3 V_{CC}$	$>1/3 V_{CC}$	低电平	高电平

2.3. 实验电路设计

选用合适的模拟电路元件及参数，设计以 NE555 为主体的电路结构，确保能够实现机械臂的同步控制。使用 Proteus 仿真软件对设计的电路进行模拟，验证其可行性和性能。

设计与机械臂等比例的遥控器模型，并确保其结构和运动与实际机械臂相符，使用 3D 打印笔打印遥控器。

将模拟电路和遥控模型集成到一个完整的控制系统中，如图 2 所示。确保各部分协调工作。通过进

行初步的功能测试，验证系统的基本功能和性能。

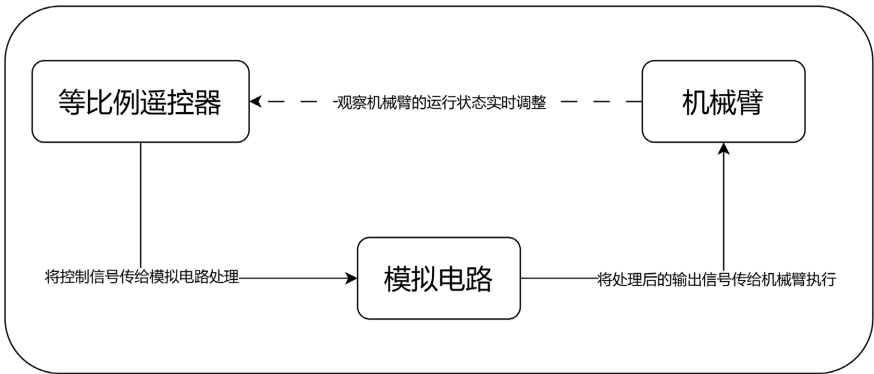


Figure 2. Circuit design process
图 2. 电路设计流程

2.4. 电路调试与优化

通过多次实验和调试，优化系统的性能，解决可能出现的问题，确保系统的稳定性和可靠性。根据实验数据，调整和改进电路设计和遥控模型，进一步提高系统的性能。

3. 项目研究结果

3.1. 电路设计及实物制作

本项目设计了一个高精度的模拟电路系统，主要的电路包括 3 个模块：

1) 输入模块

包括多个电位器，实时捕捉遥控器操作杆的位置信号，如图 3 所示。

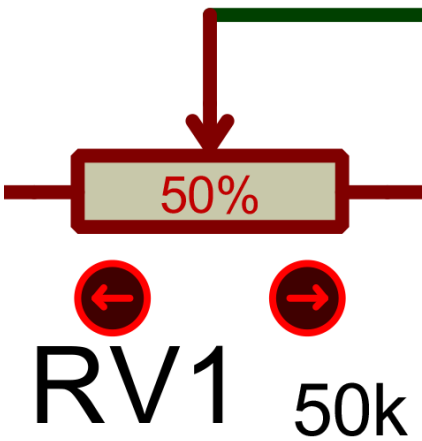


Figure 3. Potentiometer in Proteus simulation
图 3. Proteus 仿真中的电位器

采用 3D 打印笔，打印出与机械臂等比例的遥控器，并在其中嵌入电位器，当遥控器对应关节转动时带动电位器转动。如图 4 所示。

2) 信号处理模块

由 NE555 芯片和二极管、电容、电阻组成的占空比可调的矩形波发生电路，如图 5 所示。

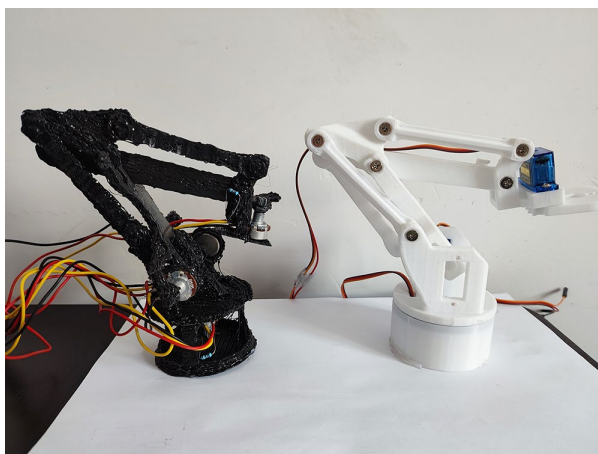


Figure 4. A physical image of a remote control (left) and a robotic arm (right) at an equal scale
图 4. 等比例的遥控器(图左)与机械臂(图右)实物图

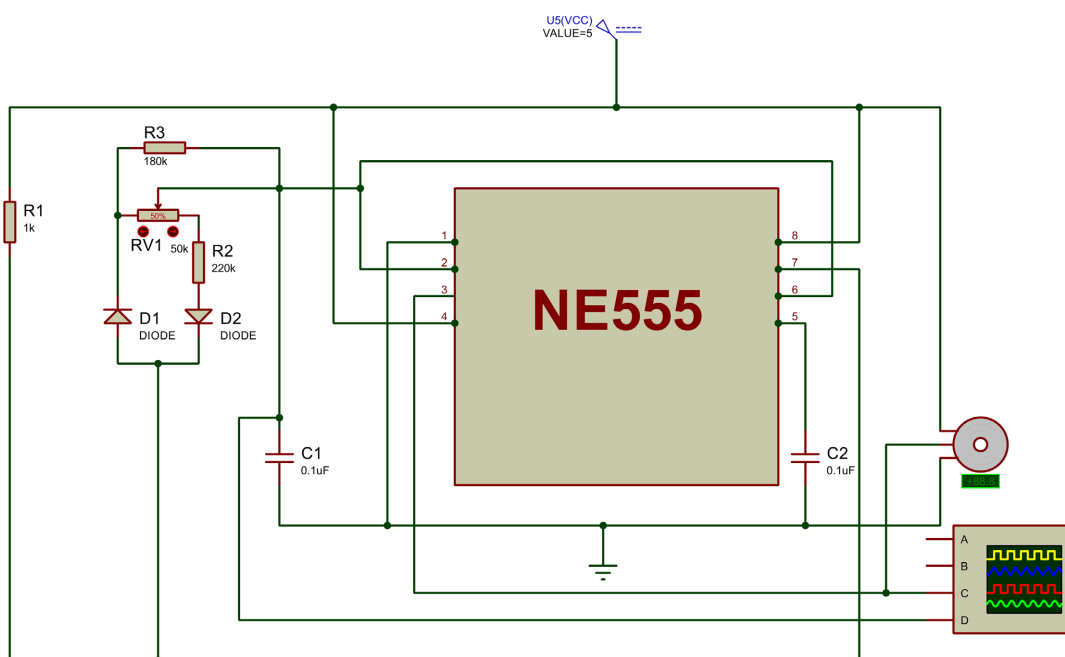


Figure 5. Signal processing module in Proteus simulation
图 5. Proteus 仿真中的信号处理模块

利用 NE555 芯片的无稳态电路，让 NE555 芯片的 2 号引脚与 6 号引脚相连，电路随着电容的充放电能够自动地不断输出高、低电平。如图 6~8 所示，通过二极管、电阻、电位器，调节电容充放电速度，从而调节输出矩形波的占空比。

当电容刚开始充电时，7 号引脚输出低电平，BJT 关断。6 号引脚电位小于 $2/3 V_{CC}$ ，2 号引脚的电位小于 $1/3 V_{CC}$ ，3 号引脚输出高电平，对应输出矩形波的高电平；当电容充电大于 $1/3 V_{CC}$ 时，6 号引脚电位小于 $2/3 V_{CC}$ ，2 号引脚的电位大于 $1/3 V_{CC}$ ，3 号引脚输出保持高电平，对应输出矩形波的高电平，7 号引脚输出保持低电平，BJT 保持关断；当电容充电大于 $2/3 V_{CC}$ 时，6 号引脚电位大于 $2/3 V_{CC}$ ，2 号引脚的电位大于 $1/3 V_{CC}$ ，3 号引脚输出变为低电平，对应输出矩形波的低电平，7 号引脚输出变为高电平，BJT 导通，电容开始对地放电；当电容放电小于 $2/3 V_{CC}$ 时，6 号引脚电位小于 $2/3 V_{CC}$ ，2 号

引脚的电位大于 $1/3 V_{CC}$ ，3 号引脚输出保持低电平，对应输出矩形波的低电平，7 号引脚输出保持高电平，BJT 保持导通，电容继续对地放电；当电容放电小于 $1/3 V_{CC}$ 时，6 号引脚电位小于 $2/3 V_{CC}$ ，2 号引脚的电位小于 $1/3 V_{CC}$ ，3 号引脚输出变为高电平，对应输出矩形波的高电平，7 号引脚输出变为低电平，BJT 关断，电容停止对地放电，开始充电，进入下一轮循环。

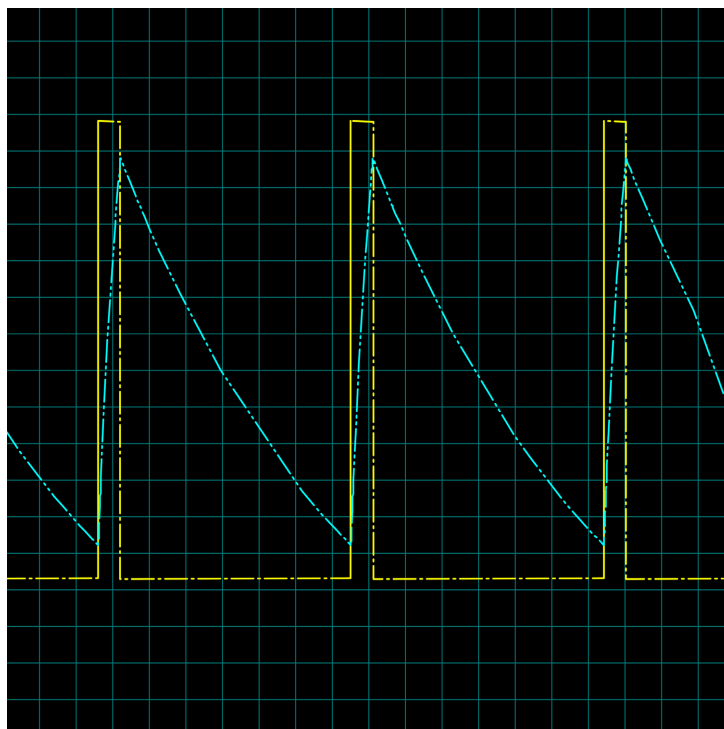


Figure 6. The capacitance charge discharge curve (blue) in Proteus simulation corresponds to the rectangular wave output (yellow)

图 6. Proteus 仿真中电容充放电曲线(蓝色)对应矩形波输出(黄色)

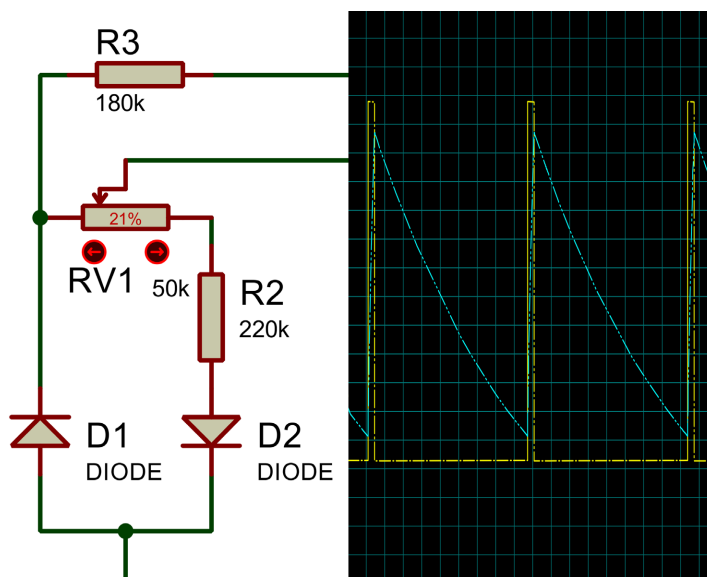


Figure 7. Corresponding waveform when potentiometer resistance is 21%

图 7. 电位器阻值为 21% 时对应波形

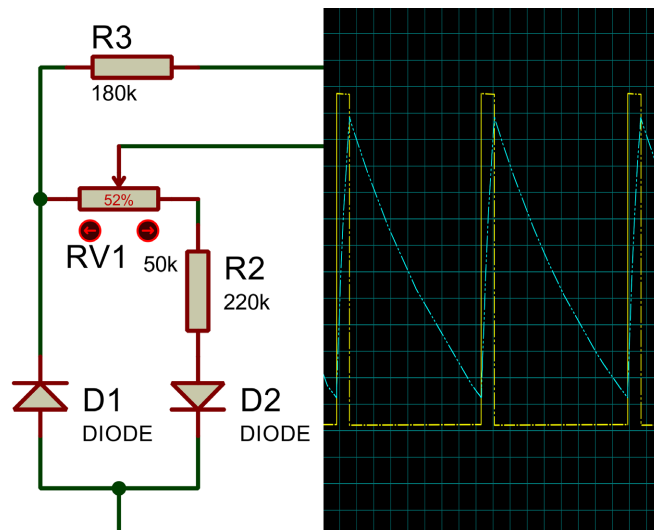


Figure 8. Corresponding waveform when potentiometer resistance is 52%
图 8. 电位器阻值为 52%时对应波形

用洞洞板根据电路图焊接电路, 并采用排针留出输入输出接口, 以便接入遥控器和机械臂。如图 9 所示。

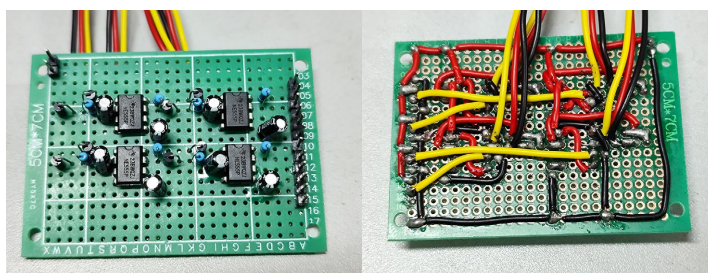


Figure 9. Physical picture of circuit soldering
图 9. 电路焊接实物图

3) 输出模块

将矩形波信号传输给 SG90 舵机, 由 SG90 舵机进行动作结果的输出, 如图 10 所示。简易的机械臂, 由四个 SG90 舵机和一些简单的结构件组成。SG90 舵机有三根接线, 分别是正极线、接地线、信号线, 其中信号线接收周期为 20 ms 的矩形波信号, 当高电平脉宽为 0.5 ms 时, 舵机转角为 0° ; 当高电平脉宽为 1.0 ms 时, 舵机转角为 45° 。以此类推, 高电平脉宽从 0.5 ms 到 2.0 ms 变化时, 舵机转角从 0° 到 180° 变化。

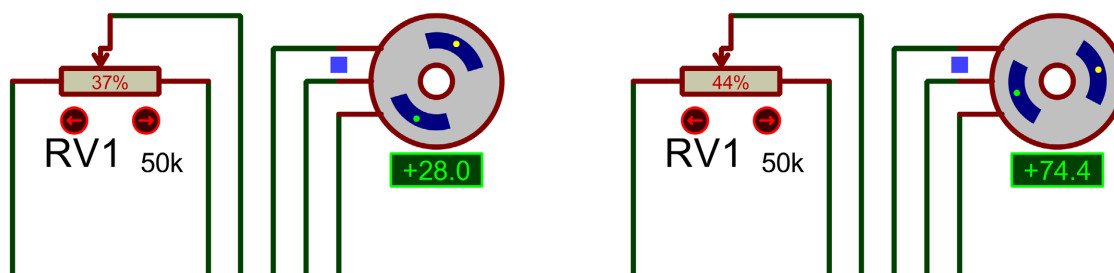


Figure 10. Adjusting the potentiometer to control the steering angle in Proteus simulation
图 10. Proteus 仿真中调节电位器控制舵机角度

3.2. 系统集成与调试

将输入模块、信号处理模块、输出模块用导线连接成一个完整的系统，接入电源进行测试，完成抓取、抬升、旋转、释放的功能，如图 11 所示。

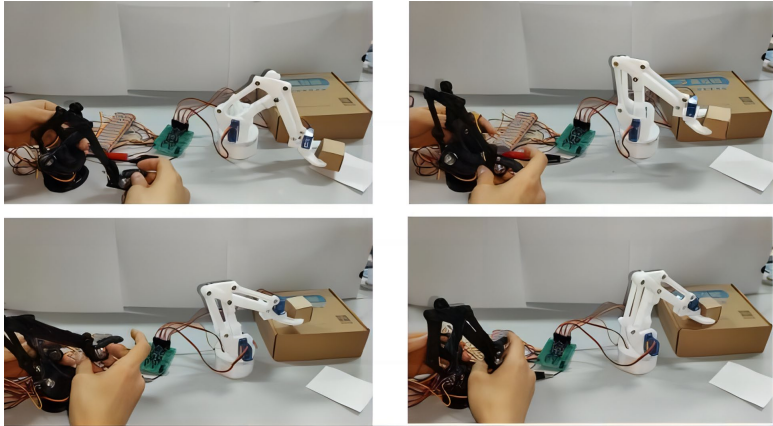


Figure 11. System integration debugging
图 11. 系统集成调试

在实验过程中，通过对模拟电路的不断优化，提升了控制的同步性和控制精度。通过调整电容充放电电阻(R2, R3)的阻值，成功解决了遥控器操作与机械臂动作之间的同步问题。最终，R2 的阻值调整为 220 k Ω ，R3 的阻值调整为 180 k Ω ，使得系统的同步控制效果达到最优。通过调试发现，操作者能够熟练掌握机械臂的操作，遥控器与机械臂的响应具有较好的同步性，机械臂能够轻松地完成抓取、抬升、旋转、释放等动作。

遥控器的操作与机械臂的动作之间存在一些差距，分析电路后发现有仿真与实物参数之间存在的差距、电子元件本身由于制造工艺产生误差所导致。尝试改变中电容充放电部分的 R2、R3 两个电阻的阻值减小误差，如图 12 所示。

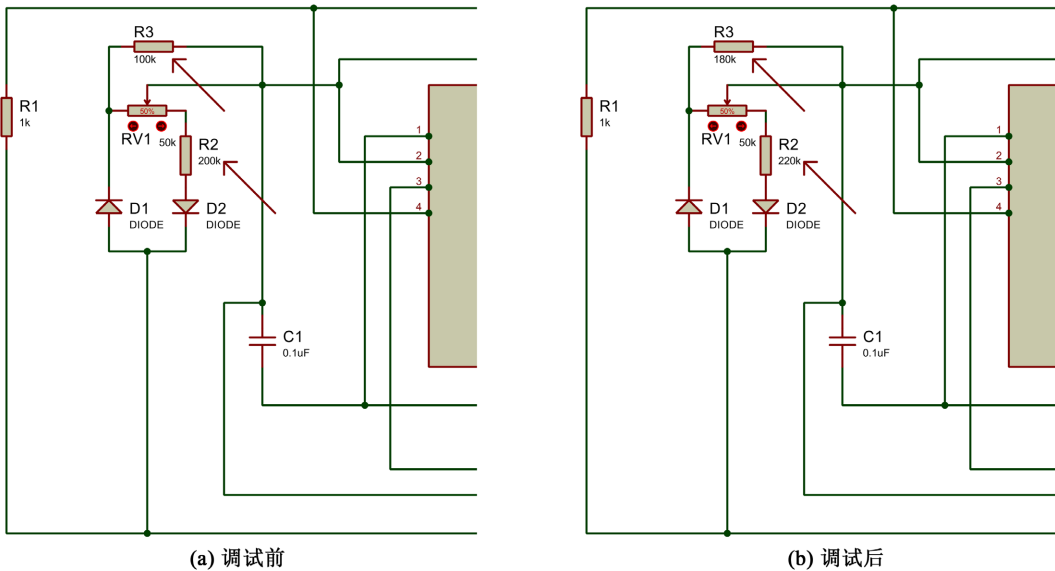


Figure 12. Comparison of new and old parameters of R2 and R3 during circuit debugging
图 12. 电路调试时 R2、R3 的新旧参数对比图

通过在焊接完成的电路中不断地调整,发现当 R2 阻值调整到 220 k Ω 、R3 阻值调整到 180 k Ω 时,遥控器的操作与机械臂的动作具有良好的同步。

4. 结论

本研究成功地设计并实现了一套基于模拟电路的机械臂同步控制系统,通过分析和研究,发现采用模拟电路进行机械臂的同步控制具有显著的优越性。与数字电路相比,模拟电路在响应速度和时效性方面表现突出,能够显著降低控制信号的处理延迟,提高系统整体反应速度。通过使用运算放大器和各种模拟器件,模拟电路能够有效地处理传感器信号,实现对关节运动的即时调节。总之,本研究基于 OBE 理念,通过项目式实验的方法,让学生在完成项目的过程中积极主动地发现问题、探究问题,对项目的设计、实施等进行全面地研讨[5],不仅将课堂上学习的电路分析知识应用于实际情境中,还有效提升了学生调试和故障排除能力。在提高学生创新能力、实践能力、操作能力方面具有良好的效果,促进了知识和技能融合与使用[6],为电路分析知识转化为实际项目提供了参考。

基金项目

2024 教育部实验教学和教学实验室建设研究项目(项目编号 SYJX2024-216);宁夏大学第六批校级“课程思政”示范课程建设项目(项目编号 KCSZ2024018)。

参考文献

- [1] 夏委委,黄斌,傅茂森. 高校材料类专业项目式实验教学模式探索与实践[J]. 科教导刊, 2024(1): 11-13.
- [2] 倪晨,李渔迎,方恺,于婷婷,顾牡. 学科竞赛视角下项目式实验教学的研究——以第三届“卓越杯”大学生物理实验竞赛为例[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(8): 256-262.
- [3] 朱金秀,陈小刚,朱昌平,周妍. 项目式实验教学的探索与实践[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(11): 93-95.
- [4] 葛利,蒋琼,伍娟,廖碧莲,杨克迪. 结合地方特色资源基于 OBE 理念的项目式实验教学探索[J]. 高教学刊, 2024, 10(11): 92-95.
- [5] 何林锦,翟云波,李彩亭,等. 项目式实验教学模式及其可行性评价方法[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(2): 94-96.
- [6] 杨柳,顾勇飞. 塑性成形专业项目式实验教学方法的探索与实践[J]. 西部素质教育, 2015(9): 54-54.