

2021 年全国大学生电子设计竞赛

基于互联网的摄像测量系统（D 题）



2021 年 11 月

## 摘 要

本作品是基于树莓派的互联网摄像测试系统，可以完成测量前校准处理、摄像节点拍摄视频并显示、终端节点显示实时视频并标记激光笔轮廓、自动测量线长 $l$ 和轨迹与 OA 边的夹角 $\theta$ 等任务。

本系统由摄像节点、终端节点、交换机三部分构成。其中，摄像节点和终端节点采用 OpenCV 的库函数对激光笔进行图像识别，获取激光笔的位置信息，通过测量单摆运动周期，得到摆线长度  $L$ ；通过测量摄像头 a,b 正对方向最大水平位移，得到轨迹与 OA 边的夹角 $\theta$ ，具有测量快速精准的特点；摄像节点客户端与终端节点服务器端间的通信部分采用 Socket 通信协议，传输时间短，性能高，适合于客户端和服务端之间的信息实时交互。

实验结果表明，该系统可以稳定的完成题目要求的所有功能。

**关键字：**套接字 Socket；树莓派；OpenCV；单摆运动

## Abstract

This work is an Internet camera testing system based on raspberry pi, which can accomplish the calibration processing before measurement, shoot and display video at the camera node, display real-time video at the terminal node and mark the contour of the laser pen, and automatically measure the line length  $l$  and the angle  $\theta$  between the track and the edge OA and many other tasks.

The system consists of camera node, terminal node and switch. Among them, the camera node and terminal node use the library function of OpenCV to recognize the image of the laser pen, obtain the position information of the laser pen, and obtain the cycloid length  $L$  by measuring the motion cycle of the single pendulum; By measuring the maximum of horizontal displacement of camera A and B in the opposite direction, the included angle  $\theta$  between the trajectory and OA edge is obtained. This has the feature of fast and accurate measurement; The communication part between the camera node client and the terminal node server adopts Socket communication protocol, which has short transmission time and great performance, and is suitable for real-time information interaction between the client and the server.

The experimental results show that the system can stably complete all the functions required in the topic.

**Keywords:** socket; Raspberry pi; OpenCV; Simple pendulum motion

## 目 录

|                            |   |
|----------------------------|---|
| 一、赛题简单分析.....              | 1 |
| 二、方案设计与比较.....             | 1 |
| 2.1 系统整体方案.....            | 1 |
| 2.2 系统主板对比与选择.....         | 1 |
| 2.3 细线长 $l$ 测量方案对比与选择..... | 2 |
| 三、系统设计及分析.....             | 3 |
| 3.1、系统理论分析与计算.....         | 3 |
| 1、细线长 $l$ 建模计算.....        | 3 |
| 2、角度 $\theta$ 的计算.....     | 4 |
| 3、交换机的自学习功能.....           | 4 |
| 4、Socket 通信原理.....         | 4 |
| 3.2 硬件电路原理图.....           | 5 |
| 1、单片机最小系统设计.....           | 5 |
| 2、一键启动及声光提示电路设计.....       | 5 |
| 图 2 一键启动及声光提示电路.....       | 5 |
| 3.3 软件流程设计.....            | 6 |
| 1、系统整体流程图设计.....           | 6 |
| 2、Socket 通信子程序流程图设计.....   | 6 |
| 3、图像处理子程序流程图设计.....        | 6 |
| 四、系统测试与分析.....             | 7 |
| 4.1 测试方案.....              | 7 |
| 4.2 测试结果.....              | 7 |
| 4.3 测试分析与结论.....           | 8 |
| 总结.....                    | 8 |
| 参考文献.....                  | 8 |

## 一、赛题简单分析

题目要求两个独立的摄像节点和终端节点通过以太网交换机实现网络互联，并且可以进行图像处理，实现对长度 $l$ 和角度 $\theta$ 的测量。其中单摆偏角小于 $10^\circ$ ，测量精度要求高。因此本实验需要解决程序进程间的通信协议问题、主处理器的选择以及测量方案的选择与优化。本摄像测量系统利用 socket 进行两个摄像节点和终端节点之间的通信，采用 Raspberry Pi 4B 作为开发主板，通过测量单摆周期来实现对系统摆线长度 $L$ 的测量，进而求出细线长度 $l$ 。测量结果精确度高，测量时间短，可满足赛题要求。

## 二、方案设计与比较

### 2.1 系统整体方案

本系统由摄像节点、终端节点、交换机三部分构成。其中，摄像节点和终端节点采用树莓派对激光笔进行图像识别，获取激光笔的位置信息，实现对细线长度 $l$ 和角度 $\theta$ 的测量。摄像节点客户端与终端节点服务器端间的通信部分采用 Socket 通信协议，实现信息实时交互。系统整体方案框图如图 1 所示。

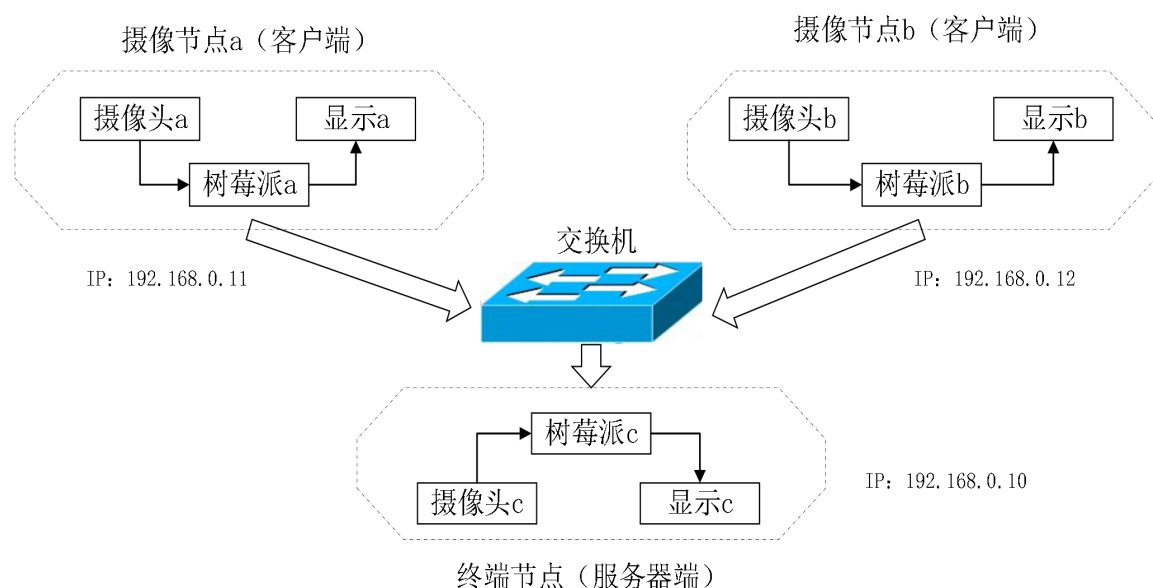


图 1 系统整体方案框图

### 2.2 系统主板对比与选择

#### 方案一：采用 NVIDIA Jetson Nano Developer Kit

树莓派 4B 采用的 GPU 为 Broadcom VideoCore VI, 而 Jetson Nano 采用 GPU 型号为 128 CUDA core Maxwell, Jetson Nano 的 GPU 性能要远高于树莓派 4B。但是 Jetson Nano 套件的官方售价为 99 美元，价格较为昂贵。

## 方案二：采用树莓派

Raspberry Pi 4 有一个较新的 ARM Cortex-A72 CPU，而 NVIDIA Jetson Nano 采用了略旧的 ARM Cortex-A57，性能差距不大，但树莓派 4B 的官方售价为 55 美元，价格较低。

两方案优缺点如表 1 所示。由表格可知两者比较因素都很接近,而且两款主板运行的操作系统都是 Linux,提供的功能也几乎相同。综合比较，基于本实验图像处理对 GPU 没有要求过高，且从价格方面考虑，选择方案二。

表 1 两方案优缺点对比表

|              | Raspberry Pi4                               | NVIDIA Jetson Nano                          |
|--------------|---|---|
| CPU          | Quad-core ARM Cortex-A72<br>64-bit @1.5 Ghz | Quad-Core ARM Cortex-A57 64-bit<br>@1.42Ghz |
| GPU          | Broadcom videoCore VI (32-bit)              | NVIDIA Maxwell w/ 128 CUDA<br>cores@ 921Mhz |
| Memory       | 4 GB LPDDR4**                               | 4GB LPDDR4                                  |
| Display      | 2x micro-HDMI(up to 4Kp60)                  | HDMI 2.0 and eDP 1.4                        |
| USB          | 2x USB3.0,2x USB 2.0                        | 4x USB 3.0,USB 2.0 Micro-B                  |
| Video Encode | H.264(1080p30)                              | H.264/H.265(4Kp30)                          |
| Video Decode | H.265(4Kp60),H.264(1080p60)                 | H.264/H.265 (4Kp60,2x4Kp30)                 |
| Storage      | Micro-SD                                    | Micro-SD                                    |
| Price        | \$55 USD                                    | \$99 USD                                    |

## 2.3 细线长 $l$ 测量方案对比与选择

### 方案一：通过激光笔的摄影投影及空间几何关系直接求细线长度 $l$

摄像头对激光笔的运动捕获规律可进行 3D 建模为如图 3-1 所示。

由图 2 可知，在激光笔自由摆动过程中，根据激光笔分别在摄像头 A、B 的取景范围内的坐标，可知：投影笔长  $X_a$ 、 $X_b$ ，笔长  $X$ ，以及笔投影最大之差  $X_\Delta$ ，根据几何规律，由勾股定理可依次求出  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  以及夹角  $\varphi$ ：

$$X_1 = \sqrt{X^2 - X_b^2} \quad X_2 = \sqrt{X^2 - X_a^2} \quad X_3 = \sqrt{X_1^2 + X_2^2} \quad \varphi = \arcsin \frac{X_3}{X}$$

$$\text{再根据等腰三角形的边角关系可求出 } l = X_\Delta \cdot \frac{\cos \varphi}{1 - \cos \varphi}$$

空间建模复杂，计算公式复杂，需要测量多个量，测量误差大。

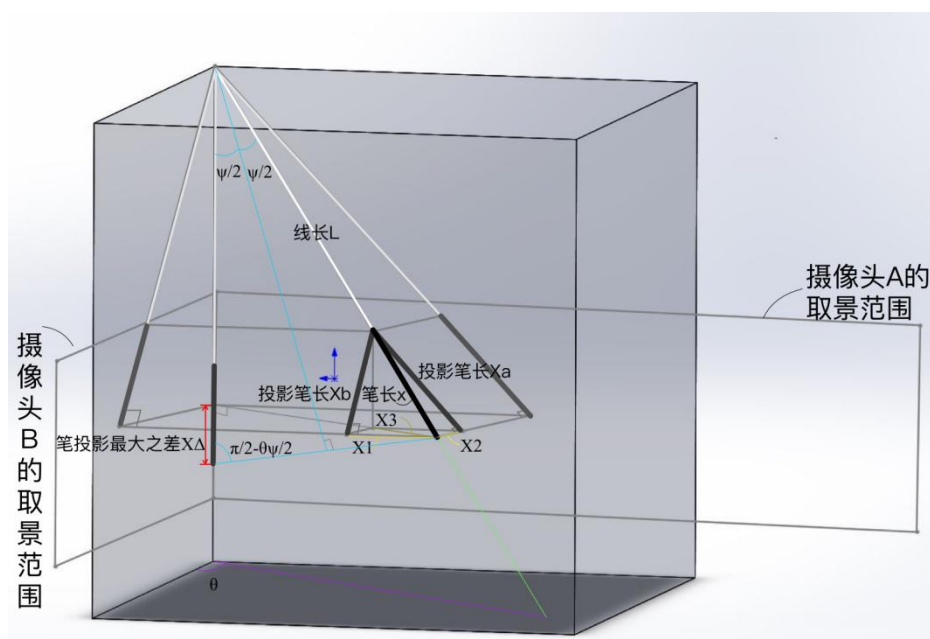


图2 系统 3D 建模示意图

## 方案二：通过单摆运动周期公式求摆线长度 $L$ , 进而求出细线长 $l$

空间建模简单，计算公式简单，测量精度高，只通过测量单摆运动周期即可求得摆线长度  $L$ ，具体理论分析与计算见 3.1。

综合比较，基于计算复杂度及测量精确度的考虑，选择方案二。

## 三、系统设计及分析

### 3.1、系统理论分析与计算

#### 1、细线长 $l$ 建模计算

摆的柔性透明细线采用质量不计、不可伸缩的单股透明的钓鱼线，激光笔周期摆动可看做单摆运动，在非常小的摆动幅度条件下，单摆做简谐运动的周期跟摆长的平方根成正比，跟重力加速度的平方根成反比，跟振幅、摆球的质量无关。

即单摆的周期为：  $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ ，题目要求摆线长度范围为  $50\text{cm} \leq L \leq 150\text{cm}$ ，拉

动激光笔偏离静止点的距离小于  $10\text{cm}$ ，摆线偏角小于  $10^\circ$ ，满足公式条件。

通过测量单摆周期，即可求得摆线长度为：  $L = \frac{T^2 g}{4\pi^2}$ 。

在本实验中，通过测量  $y$  轴最低点  $X_0$  以此作为基准点，通过树莓派测量  $20\text{s}$

内通过基准点的次数  $N$ ，通过公式可测得摆的周期  $T = \frac{2 \times 20}{N} = \frac{40}{N}$ ，进而求得摆

线的长度  $L$ ，由于摆线长度为系统质点距离支点的长度，因此需要用摆线长度减去激光笔的等效重心点与笔、线交点的长度才能得到细线长度  $l$ 。

## 2、角度 $\theta$ 的计算

由图 3 可知，通过摄像头分别测出各自  $X$  方向最大位移之差  $X_a$ 、 $X_b$ ，根据

勾股定理可得  $\theta = \arctan \frac{X_a}{X_b}$ 。

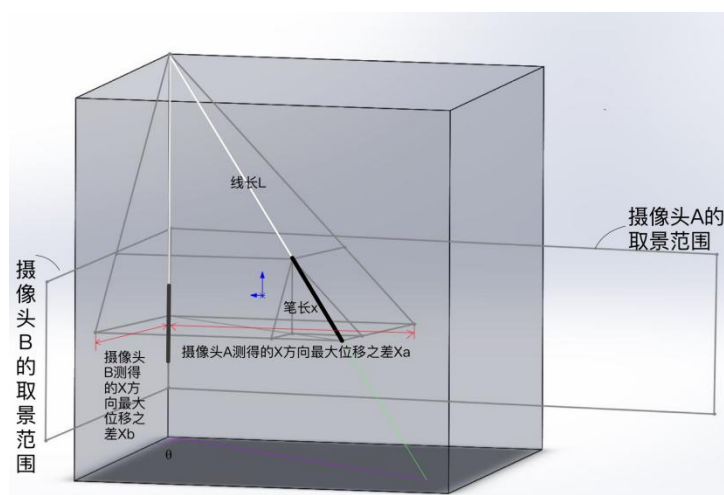


图 3 对单摆运动 3D 建模分析示意图

## 3、交换机的自学习功能

首先配置所有树莓派的静态 IP 地址，使他们位于 IP 地址范围为 192.168.0.1~192.168.0.255 的同一局域网内。我们的摄像节点及终端节点静态 IP 地址设置为：

摄像节点 a 的静态 IP 设为：192.168.0.11/24

摄像节点 b 的静态 IP 设为：192.168.0.12/24

终端节点的静态 IP 设为：192.168.0.10/24

交换机的学习功能，是指交换机对 MAC 地址表的更新具有自主学习新的 MAC 地址，并建立相对应的 MAC 地址表的功能。即最开终端节点访问摄像节点时，交换机不知道摄像节点连的哪个端口，会从接收端口以外的所有端口广播出去，同时把终端节点对应的端口保存在 MAC 地址表中，以便以后有电脑访问终端节点时直接转发数据。当摄像节点回应后就把摄像节点对应的端口也保存，对有保存条目的树莓派以后就不用广播而是直接转发。

## 4、Socket 通信原理

Socket 即套接字，是一个对 TCP/IP 协议进行封装的编程调用接口（API），

### 3.2 硬件电路原理图

## 1、单片机最小系统设计

图 4 MCU 主控电路

## 2、一键启动及声光提示电路设计

图 5 一键启动及声光提示电路



### 3.3 软件流程设计

#### 1、系统整体流程图设计

一键启动通过建立 xxx.desktop 文件,建立 python 脚本,摄像节点通过 Socket 通信将视频发给终端节点,终端节点通过图像处理与特征提取,进而确定激光笔重心坐标位置,测量单摆周期  $L$  及角度  $\theta$ ,当测量完成启动蜂鸣器及点亮 LED 进行声光显示,当测量时间超过 30s 时声光显示停止。

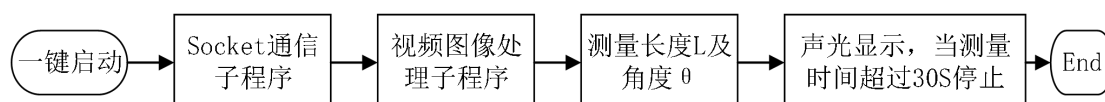


图 6 系统整体流程框图

#### 2、Socket 通信子程序流程图设计

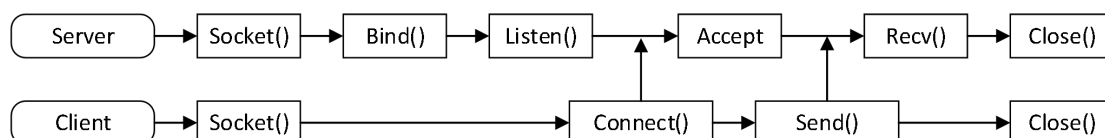


图 7 摄像测量系统的 socket 网络通信流程图

如图 5 所示,展示了客户端,服务端数据传递过程:所述传递过程包括客户端和服务端两部分,相应传递过程进行如下步骤。

表 2 摄像测量系统的 socket 网络通信步骤

| 客户端  | 服务器端                        |
|--|-----------------------------|
| 1)创建一个 socket,用函数 socket ();                   |                             |
| 2)设置 socket 属性,用函数 setsockopt ();              |                             |
| 绑定 IP 地址、端口等信息到 socket 上,用函数 bind ();          |                             |
| 4)设置要连接的对方的 IP 地址和端口等属性;                       | 4)开启监听,用函数 listen ();       |
| 5)连接服务器,用函数 connect ();                        | 5)接收客户端上来的连接,用函数 accept (); |
| 6)收发数据,用函数 send ()和 recv(),或者 read()和 write(); |                             |
| 7)关闭网络连接;                                      |                             |
|  | 8)关闭监听;                     |

#### 3、图像处理子程序流程图设计

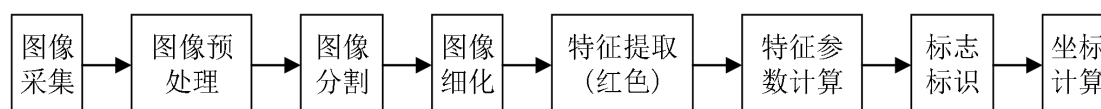


图 8 图像处理子程序流程图设计

## 四、系统测试与分析

### 4.1 测试方案

①两个独立的摄像头节点自动拍摄并显示激光笔的运动视频。

②终端节点同时自动显示两个摄像节点拍摄的实时视频，自动识别出激光笔，并在视频中用红色方框实时框柱激光笔轮廓。

③终端节点一键启动，从激光笔摆动开始计时，测量系统通过对激光笔周期摆动视频信号的处理，自动测量长度 $l$ 和 $\theta$ 。

测试条件与仪器：秒表一个，量角器，激光笔及支架，米尺

### 4.2 测试结果

表 3 测试记录表

| 测试要求 | 校准<br>处理 | 摄像节点拍摄视频<br>并显示 | 终端节点显示视<br>频并标记节点 | 自动测量<br>长度 $l$ | 自动测量<br>长度 $\theta$ |
|------|----------|-----------------|-------------------|----------------|---------------------|
| 是否实现 | 是        | 是               | 是                 | 是              | 是                   |

表 4 测试记录表

|                  | 基础要求（3）           |          |          | 发挥部分（1）          |          |          |                   |          |          |
|------------------|-------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|-------------------|----------|----------|
|                  | $\theta=45^\circ$ |          |          | $\theta=0^\circ$ |          |          | $\theta=90^\circ$ |          |          |
|                  | 测量<br>长度          | 测量<br>误差 | 测量<br>时间 | 测量<br>长度         | 测量<br>误差 | 测量<br>时间 | 测量<br>长度          | 测量<br>误差 | 测量<br>时间 |
| $l=50\text{cm}$  | 49.5              | 0.5      | 19.5     | 49.8             | 0.2      | 20.3     | 49.9              | 0.1      | 20.1     |
| $l=60\text{cm}$  | 59.2              | 0.8      | 20.1     | 59.4             | 0.6      | 20.6     | 59.8              | 0.2      | 19.8     |
| $l=70\text{cm}$  | 69.1              | 0.9      | 20.5     | 69.1             | 0.9      | 20.6     | 69.8              | 0.2      | 20.3     |
| $l=80\text{cm}$  | 79.6              | 0.4      | 19.8     | 79               | 1.0      | 20.6     | 79.6              | 0.4      | 25.3     |
| $l=90\text{cm}$  | 89.5              | 0.5      | 21.5     | 88.9             | 1.1      | 23.2     | 89.8              | 0.2      | 22.3     |
| $l=100\text{cm}$ | 99.2              | 0.8      | 22.5     | 99               | 1.0      | 23.2     | 99.8              | 0.2      | 23.2     |
| $l=110\text{cm}$ | 109.3             | 0.7      | 23.5     | 119.2            | 0.8      | 20.6     | 109.9             | 0.1      | 24.3     |
| $l=120\text{cm}$ | 119.5             | 0.5      | 23.9     | 128.8            | 1.2      | 23.5     | 119.9             | 0.1      | 25.2     |
| $l=130\text{cm}$ | 129.4             | 0.6      | 24.5     | 138.7            | 1.3      | 24.6     | 129.8             | 0.2      | 25.9     |
| $l=140\text{cm}$ | 139.5             | 0.5      | 24.5     | 148.7            | 1.3      | 24.3     | 139.9             | 0.1      | 26.2     |
| $l=150\text{cm}$ | 149.1             | 0.9      | 24.9     | 158.8            | 1.2      | 25.2     | 149.7             | 0.3      | 26.3     |

表 5 测试记录表

|                 |                  |      | $\theta=0^\circ$ | $\theta=30^\circ$ | $\theta=45^\circ$ | $\theta=60^\circ$ | $\theta=75^\circ$ | $\theta=90^\circ$ |
|-----------------|------------------|------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 发挥<br>部分<br>(2) | $l=100\text{cm}$ | 测量角度 | $0^\circ$        | $31^\circ$        | $45^\circ$        | $61^\circ$        | $75^\circ$        | $89^\circ$        |
|                 |                  | 测量误差 | $0^\circ$        | $1^\circ$         | $0^\circ$         | $1^\circ$         | $0^\circ$         | $1^\circ$         |
|                 |                  | 测量时间 | 20.2             | 20.3              | 20.5              | 22.3              | 22.5              | 22.6              |

### 4.3 测试分析与结论

根据上述测试数据及现场测试数据，可以得出以下结论：

- 1、该系统可完成测量前校准处理、摄像节点拍摄视频并显示、终端节点显示实时视频并标记激光笔轮廓。
- 2、可一键启动，自动测量线长 $l$ 和轨迹与 OA 边的夹角 $\theta$ 。
- 3、测量长度误差均在 1.3cm 以内,测量角度误差均在 1 度以内。
- 4、测量时间在 25 秒之内。

综上所述，本设计达到设计要求。

### 总结

经过四天三夜的努力，我组摄像测试装置基本完成测量前校准处理、摄像节点拍摄视频并显示、终端节点显示实时视频并标记激光笔轮廓、自动测量线长 $l$ 和轨迹与 OA 边的夹角 $\theta$ 等任务。通过这次比赛，我们对于基于树莓派的局域网实时通信系统有了进一步的理解，动手能力也得到了锻炼。其中我们 Socket 通信原理的实现上遇到阻力，但通过我们的通力合作，克服困难，成功完成实验。这让我们对团队合作精神有了深刻的理解，也使得各自的技术水平大幅度提高，这或许是才是比赛的真正目的，不忘初心，方得始终。

### 参考文献

- [1]李海,李媛琼,张恩溪.基于互联网实时监控及控制小车[J].山东工业技术,2018.
- [2]胡志超,孔锦明,魏豪特.基于树莓派的移动监控小车设计[J].科技广场,2017
- [3]王甜.基于树莓派+Python 的智能安防系统设计[J].科技视界, 2020(24): 26-28
- [4]薛哲,张功学,何凯,徐耀辉,崔聪.基于 Socket 通信的 AGV 上位机控制系统[J].现代机械,2021(05):99-102.
- [5]刘晓晖,秦子实.树莓派麦阵列数据采集分发的设计与实现[J].电脑知识与技术,2021,17(17):36-37.
- [6]马睿,王荣,魏峻超.一种基于树莓派和 Socket 通信的视频小车设计方案[J].电脑编程技巧与维护,2020(12):129-130.